

정유공장 전력계통 동특성을 고려한 부하차단 적용 사례연구

이강완*, 임주일*, 김형태**
 *:대화기술단, **:LG-Caltex정유(주)

Load shedding case study of the refinery plant power system considering dynamic characteristic

Kang Wan Lee*, Joo Il Lim*, Hyung Tae Kim**
 *:Dae Hwa Engineering & Consultants, **:LG-Caltex Refinery Co.

Abstract - This paper presents the load shedding case studies and recommendations of load shedding scheme for improving the reliability to suit the requirements of LG-Caltex refinery plant power system. It is recommended for LG-Caltex to decrease the total generation for the economic dispatch. When the LG-Caltex refinery is isolated from KEPCO utility system, the proper load shedding scheme should be implemented since total generation in LG-Caltex refinery plant is less than the load demand. According to the studies carried out, the logic-based load shedding is recommended as the main protection scheme, with the combination of the under-frequency relay load shedding.

1. 서 론

한국전력 전력계통과 154kV 송전선로로 연계되어 있는 LG-Caltex 정유 여수공장 전력계통은 3대의 자가발전기가 병렬운전 되고 있다. 그러나 에너지 사용의 경제성 제고를 위하여 2대의 발전기 또는 1대의 발전기만 계통에 병입되어 제한된 출력으로 운전되는 것이 바람직한 것으로 평가되었다. 따라서 지금까지는 3대의 자가발전기가 계통에 병입되어 운전됨으로서 전기사고로 한국전력과 연계선로가 개방되어 LG-Caltex 정유 전력계통이 단독계통이 되는 순간 과부하율이 약54%가 되어 저주파수계전기 단계별 부하차단으로 전력계통을 안정화시킬 수 있었으나 2대 또는 1대의 자가발전기 만을 계통에 병입하여 운전할 경우 사고로 연계선로가 개방되면 발전대 수요의 불평형 정도를 나타내는 과부하 정도가 100% 이상이 되어 기존의 저주파수계전기에 의한 부하차단 만으로는 계통을 안정화시키기 어렵게 되었다.

표 1 LG-Caltex 발전기 운전 형태별 과부하

번호	운전조건			발전 [MW]	수요 [MW]	과부하 [%]
	No.1	No.2A	No.2B			
1	○	×	×	22.0	125	468
2	×	○	×	29.5	125	324
	×	×	○			
3	○	○	×	51.5	125	143
	○	×	○			
4	×	○	○	59.0	125	112
5	○	○	○	81.0	125	54

○ : 운전, × : 정지

현재 정상운전중인 LG-Caltex 정유 전력계통 전력수요는 약 125MW로 표 1에 나타난 것과 같이 발전기 운전 형태별로 단독운전일 경우 과부하율이 다르다. 여

기서 각 발전기 출력은 순동예비력(Spinning reserve) 고려하여 발전기 최대출력의 85%로 한 것이다. 본 논문에서는 LG-Caltex 전력계통이 제한된 자가발전기 운전으로 단독계통으로 분리되었을 때 과도한 과부하 상태에서 전력계통이 안정화 될 수 있는 최적 부하차단 방안을 제시하고, 이의 적정성을 안정도 해석프로그램으로 모의하여 실제계에 적용토록 한 사례를 제시하였다.

2. 전력계통 동특성 모의

한국전력과 154kV 송전선로로 연계되어 있는 LG-Caltex 전력계통이 전기적 사고로 연계선로가 분리되어 단독계통이 되면 발전력이 수요보다 작은 과부하 상태에 의해 계통주파수가 저하되고 적정 부하차단으로 계통이 안정화되거나 또는 붕괴 될 수 있다. 이와 같은 외란 및 부하차단 방안은 운전중인 발전기 제어계통 동특성은 물론 부하의 동적인 특성들이 충분히 반영되는 안정도해석 프로그램으로 모의 해석된다. 발전기 제어계통에는 응답속도가 빠른 전압조정 장치인 여자기(exciter)가 있고 터빈에는 기계적 입력을 외부와 균형을 유지하도록 조절하는 조속기(governor)가 설치되어 있으며 발전기 자신 뿐 아니라 발전기가 연결되어 있는 외부 전력계통의 상태변화에 따라서 이들 제어장치가 응답하게 되고, 부하는 계통 전압 및 주파수 상태에 따라 변화된다. 따라서 이들의 동특성을 정확히 모의하는 것이 매우 중요하다.

2.1 발전기 모의

발전기는 크게 돌극기와 비돌극기로 구분되며 전자는 주로 수력발전기이고 후자는 주로 화력발전기로서 LG-Caltex 자가발전기들이 여기에 해당된다. 일반적으로 안정도 계산을 위한 발전기 모의는 발전기 형태 및 모형의 정밀도 등에 따라 결정된다. LG-Caltex 정유 자가발전기는 그림 1과 같은 차과도 효과를 감안한 비돌극기 모형으로 모의하는 것이 바람직하다.

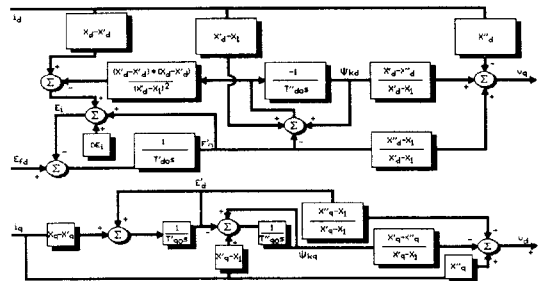


그림 1 차과도효과를 감안한 비돌극기 발전기 모형

표 2는 LG-Caltex 정유 발전기 특성을 나타낸 것이다.

표 2 LG-Caltex 정유 발전기 특성

발전기	LG No. 1	LG No. 2 A	LG No. 2 B
kV	13.8	13.8	13.8
MVA	33.7	40.835	40.835
H	4.57	3.29	3.29
KD	2.0	2.0	2.0
X'd	0.285	0.184	0.184
X'q	0.496	0.32	0.32
Xd	1.984	2.20	2.20
Xq	1.876	2.02	2.02
Xl	0.171	0.1	0.2
T'Do	5.493	13.4	13.4
T'Qo	0.404	4.1	4.1
SGU	0.2681	0.2681	0.2681
SGL	0.0870	0.087	0.087
EU	1.2	1.2	1.2
EL	1.0	1.0	1.0
X''d	0.21	0.126	0.126
T''Do	0.021	0.05	0.05
T''Qo	0.049	0.05	0.05
X''Q	0.015	0.2	0.2

2.2 여자기 모의

여자로 전압을 조정하는 것은 안정도를 향상시키는 가장 기본적인 방법이다. 발전기의 단자전압이 전압감지기에서 감지되고 비교기에서 기준 전압과 비교되어 이때 발생한 편차는 증폭기를 거쳐 여자기로 전달되며 그 편차만큼 제자 회로에 대한 여자를 조정하여 발전기 단자 전압, 역률 및 전류의 크기를 제어한다. 그림 2는 LG-Caltex 전력계통 안정도 검토에 적용된 여자기 모형을 나타낸 것이고 표 3은 이의 특성을 나타낸 것이다.

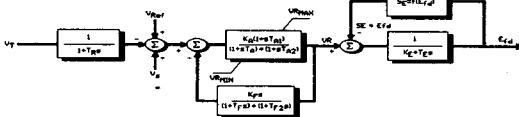


그림 2 여자기 모형

표 3 LG-Caltex 정유 발전기 여자기 특성

여자기	LG No. 1	LG No. 2 A	LG No. 2 B
TR	0.02	0.02	0.02
KA	400.0	4461.0	4461.0
TA	0.02	0.02	0.02
VRMAX	7.0	72.7	72.7
VRMIN	0.0	1.0	1.0
KF	0.005	0.015	0.015
TF	0.7	0.6	0.6
TF2	0.0	1.0	1.0
KE	1.0	1.0	1.0
TE	0.0	1.0	1.0
SEMAX	4.1	5.76	5.76
SE.75	1.13	2.47	2.47
EPDL	5.5	3.0	3.0
TA1	0.0	0.0	0.0
TA2	0.0	0.0	0.0

2.3 원동기 모의

원동기는 발전기 회전속도를 제어하고 기계적 입력을 제공해주는 장치로서 발전기 동요방정식에서 기계적 토크를 결정해주는 역할을 한다. 조속기는 주파수 즉 원동기(터빈)의 회전수 변동을 감지하여 주파수가 규정치 이하로 저하한 경우 원동기에 유입되는 증기량을 증가하도록 주파수저하에 비례하여 조리개변이 열리도록 작용하고 반대로 주파수가 규정치 이상으로 상승하면 원동기 증기 유입량을 감소하도록 이에 상응한 조리개변이 닫히게 되어 출력이 조정되므로 서 회전속도(주파수)가 일정하게 유지되도록 한다. 그림3은 LG-Caltex 전력계통 안정도 해석에 적용 할 가스터빈 발전기용 원동기 모형을 나타낸 것이고, 표 4는 여기에 적용된 가스터빈 원동기 특성을 나타낸 것이다.

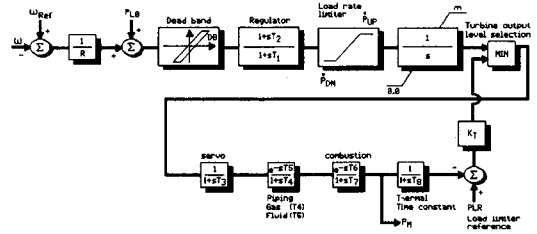


그림 3 가스터빈 원동기 모형

표 4 LG-Caltex 정유 가스터빈 원동기 특성

원동기	LG No. 1	LG No. 2 A	LG No. 2 B
MVA	25.34	34.71	34.71
R	0.05	0.04	0.04
DB	0.02	0.05	0.05
T1	0.027	0.05	0.05
T2	0.52	0.0	0.0
PUP	0.1	0.01	0.01
PDN	-0.1	-0.58	-0.58
KT	5.7	25.0	25.0
PLR	1.0	1.0	1.0
T3	0.4	0.05	0.05
T4	0.0	0.0	0.0
T5	0.15	0.01	0.01
T6	0.09	0.05	0.05
T7	0.31	0.4	0.4
T8	0.0	0.0	0.0

2.4 부하 모의

전력계통에서 전력부하는 전압의 크기에 따라 그리고 주파수 변화에 따라 변하게된다. 안정도 해석에 이용되는 부하모형은 첫째 전압 변화에 따른 유효 및 무효부하 전력의 상관관계, 둘째 주파수 변화에 따른 유효 및 무효부하전력의 상관관계를 설정해야한다. 일반적으로 각 모선의 부하를 정전력부하, 정전류부하 및 정임피던스부하로 간주하여 이들의 적정비를 구하거나 또는 부하의 종류에 따른 특성정수를 구하면 된다. 전압 변화에 따른 유효 및 무효전력의 상관관계를 수식화 하면 다음과 같다.

$$P = P_0 (V/V_0)^{PV}$$

$$Q = Q_0 (V/V_0)^{qV} \quad (1)$$

다음은 여러 종류의 부하로 구성되어 있는 경우 부하 특성정수 결정 방식이다.

$$pv = \frac{\sum (pv_j P_j)}{\sum (P_j)} \quad (2)$$

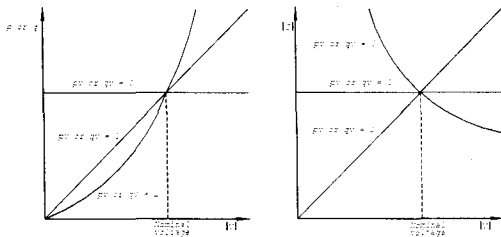
표 5는 부하 종류에 따른 전압과 부하전력 관계를 나타낸 것이다.

표 5 부하 종류별 전압과 유효 및 무효전력 관계

부하 종류	pv	qv
백열 전등	1.6	0.0
형광등	1.2	3.0
전열기	2.0	0.0
반부하 유도전동기	0.2	1.6
전부하 유도전동기	0.1	0.6
유도로	1.9	2.1
알미늄 공장	1.8	2.2

즉, pv 및 qv 가 0인 경우 정전력부하
 pv 및 qv 가 1인 경우 정전류부하
 pv 및 qv 가 2인 경우 정임피던스부하

그림 4는 부하 모형에 따른 각각의 전력 전압관계를 나타낸 것이다.



a) 전압과 전력 관계 b) 전압과 전류 관계

그림 4 부하 모형에 따른 전력 전압관계

LG-Caltex 정유공장은 대부분의 부하가 유도전동기 또는 동기전동기 등으로 구성되어있음을 감안하여 pv=0.2 및 qv=1.0으로 가정하여 안정도를 계산한다.

마찬가지로 주파수 변화에 따라 부하전력이 변하게 되는데 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$P = P_0 (1 + pf(f-f_0)/f_0)$$

$$Q = Q_0 (1 + qf(f-f_0)/f_0) \quad (3)$$

여기서 pf 및 qf 가 0인 경우 주파수와 관련이 없는 독립부하 형태이다. 즉, 이 경우 전력부하는 주파수 변화에 관계없이 일정부하가 된다. 그러나 회전기기는 주파수 저하에 따라 소비전력이 감소하게 되는 특성을 감안하여 pf=1.0 및 qf=1.0으로 가정하여 안정도를 계산한다.

3. 부하차단 모의

3대의 자가발전기가 있는 LG-Caltex 정유 전력계통이 한국전력으로부터 분리되면 표 1에 나타난 것과 같이 발전기 운전 형태별로 과부하율이 다르게 된다. 일반적으로 계통분리에 의한 과부하가 1.0 이상인 경우 급격한 주파수저하(dF/dt)로 인하여 대부분 0.5초 이내에 계통주파수가 터빈 운전한계 주파수인 57[Hz]에 도달하게되어 보통의 저주파수계전기에 의한 부하차단으로 계통을 안정되게 운전하기 어렵게된다.

표 6은 현재의 LG-Caltex 정유 생산공정을 고려한 부하차단 우선 순위, 차단전력, 저주파수계전기 정정치 등을 나타낸 것이다.

표 6 LG-Caltex 정유 부하차단 방안

순위	공정부하 [MW]	차단부하 [MW]	누적부하 [MW]	UFR [Hz]	지연 [Sec]
1단계	7	29	29	59.2	0.1
	22				
2단계	11	17	46	58.8	0.1
	6				
3단계	11	11	57	58.4	0.1
4단계	21	21	78	58.0	0.1
5단계	13	13	91	58.4	0.4
6단계	27	27	118	58.0	1.0
-	7	7	125	-	-

부하차단은 특정 신호 발생으로부터 6사이클인 100ms 후에 완료되는 것으로 가정하였으며 이들의 세부 내역은 다음과 같다.

Interposing relay operating time : 25 ms
 Tripping and control relay : 10 ms
 기타 보조계전기 및 여유시간 : 15 ms
 차단기 개방시간 : 50 ms
 합계 : 100 ms

안정도 해석 결과 저주파수계전기에만 의존하여 부하차단을 할 경우 발전기 운전 대수가 1대 또는 2대로 제한된 경우 과도한 과부하율에 의해 부하차단 후에도 전력계통이 불안정 상태로 진행되었다. 따라서 발전기 운전대수가 3대미만인 경우는 사전차단을 실시하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 표 7은 LG-Caltex 정유 전력계통의 사전 부하차단 방안은 표시한 것이다.

표 7 발전기 운전 상태별 사전 부하차단 및 과부하

번호	운전조건			발전 [MW]	수요 [MW]	사전부하차단 [MW]	과부하 [P.U.]
	No.1	No.2A	No.2B				
1	○	×	×	22.0	125	91(1 - 5단계)	0.55
	×	○	×				
2	×	×	○	29.5	125	91(1 - 5단계)	0.15
	○	○	×				
3	○	○	×	51.5	125	46(1 - 2단계)	0.53
	○	×	○				
4	×	○	○	59.0	125	46(1 - 2단계)	0.34
5	○	○	○	81.0	125	-	0.54

○ : 운전, × : 정지

그림 5에서 그림 14까지는 사전부하 차단이 적용되는 부하차단 로직을 채택한 경우 154kV 연계송전선로에 3상단락고장이 발생하여 LG-Caltex 전력계통이 단독으로 분리되는 것을 모의 한 것으로 부하차단은 부하차단 로직이 이를 감지하여 차단기에 신호를 보낸 것으로 하여 동작시간을 0.1초로 모의하였다. 즉 계통 분리로부터 0.1초 후에 사전부하차단이 끝나는 것으로 가정하여 안정도를 해석한 것으로 LG-Caltex 전력계통의 전기적 중심이 되는 66kV 모선의 주파수와 전압 상태를 나타낸 것이다.

안정도 해석 결과 발전기가 2대 이상인 경우 사고로 인하여 LG-Caltex 전력계통이 한국전력으로부터 분리되어 단독전력계통이 되어도 사전 부하차단 및 저주파수 계전기에 의한 부하 차단으로 정상 상태로 복귀하여 안정된 상태가 되었다. 반면에 발전기가 1대인 경우는 사전 부하차단에도 불구하고 정상 상태로의 복귀가 용이하지 않은 것으로 나타났다.

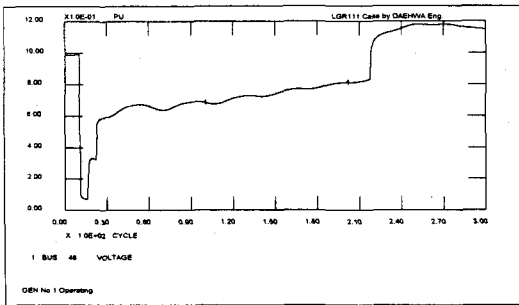


그림 5 GEN No.1 운전 부하차단 66kV 전압

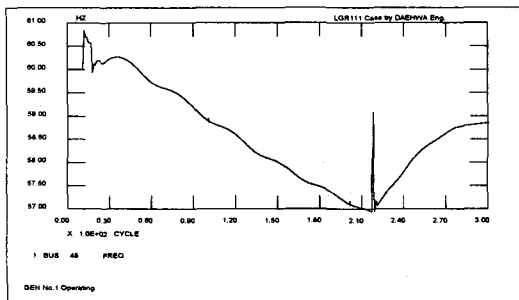


그림 6 GEN No.1 운전 부하차단 66kV 주파수

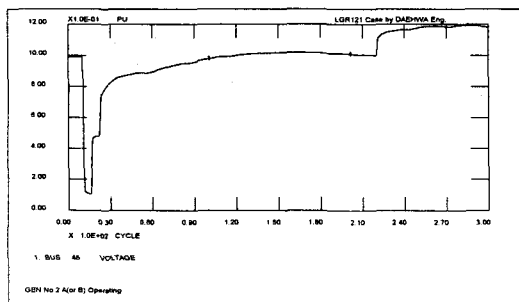


그림 7 GEN No.2A (또는 B) 운전 부하차단 66kV 전압

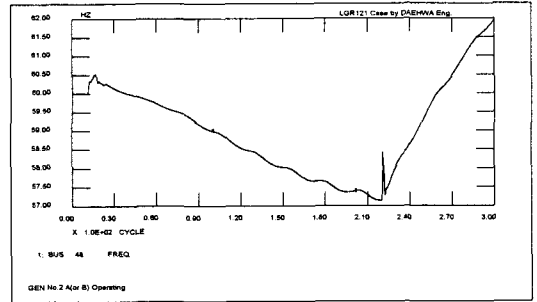


그림 8 GEN No.2A (또는 B) 운전 부하차단 66kV 주파수

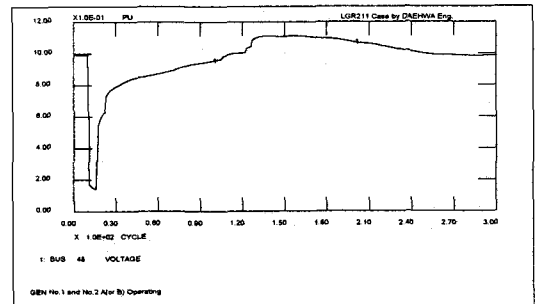


그림 9 GEN No.1 및 No.2 A (또는 B) 운전 부하차단 66kV 전압

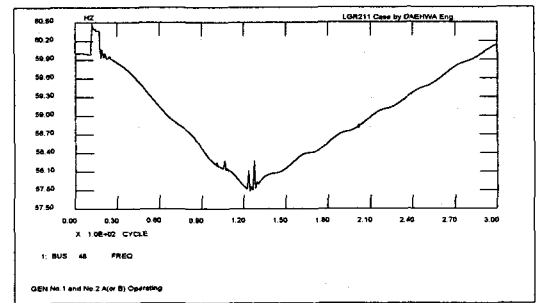


그림 10 GEN No.1 및 No.2 A (또는 B) 운전 부하차단 66kV 주파수

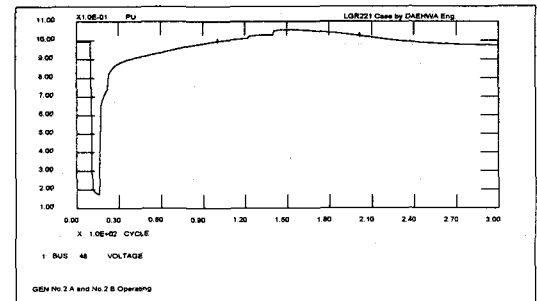


그림 11 GEN No.2A 및 B 운전 부하차단 66kV 전압

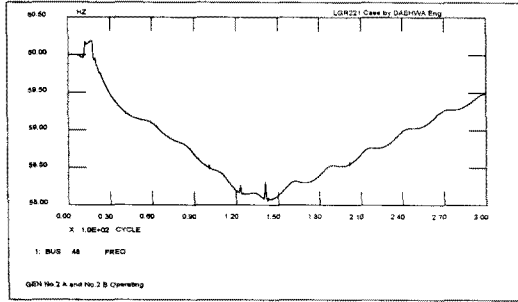


그림 12 GEN No.2A 및 B 운전 부하차단 66kV 주파수

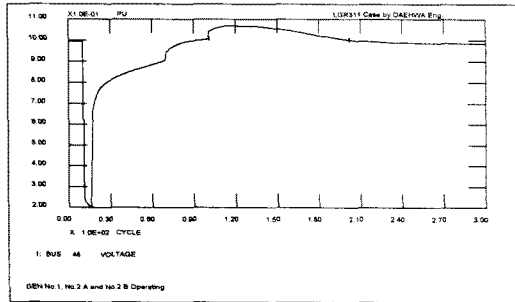


그림 13 GEN No.1, GEN No.2A 및 B 운전 부하차단 66kV 전압

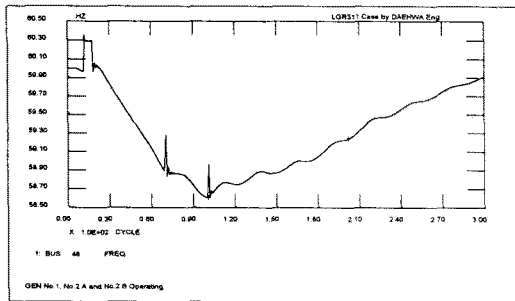


그림 14 GEN No.1, GEN No.2A 및 B 운전 부하차단 66kV 주파수

4. 결 론

안정도 해석에 의한 부하차단 모의 결과 발전기 운전 대수가 3대 미만인 경우 사전부하차단 실시가 필요한 것으로 나타났다. 즉, 연계선로용 차단기 상태를 감시하여 LG-Caltex 전력계통이 한국전력과 분리되어 단독운전인 경우 사전에 계획된 부하를 차단하도록 로직을 구성하여 운영할 필요가 있게 되었다.

LG-Caltex 정유 전력계통 154kV 모선에는 삼남 154kV송전선로가 연계되어 있다. LG-Caltex 정유 전력계통이 한국전력으로부터 분리되는 경우 즉, 154kV 연계송전선로가 사고에 의해 보호계전기 동작으로 정상 동작하여 분리되면 한국전력측 154kV차단기와 LG-Caltex 154kV차단기가 순시에 차단되고, 이와 연동하여 삼남 154kV차단기가 개방되면 비교적 바람직한 부

하차단이 순차적으로 이루어질 수 있어 적정 부하차단 다음 중요공정의 부하는 자가발전기에 의해 전력공급이 계속되는 안정 상태가 될 수 있다. 반면에 오동작 또는 부동작으로 인하여 한국전력측 154kV차단기만 개방될 경우 LG-Caltex 정유 전력계통에 삼남 전력부하가 그대로 남게되어 정상적인 계통 분리시 예상되는 과부하율보다 훨씬 큰 과부하가 걸리게되어 매우 급격한 주파수 저하가 일어나고 이로 인하여 바람직하지 않은 상태인 전력계통 붕괴로 진행될 수 있다. 물론 이와 같은 비정상적인 불합리한 동작을 보완하도록 154/66kV 주변압기에 전력계전기를 설치하여 역송을 감지 주변압기 1차 및 2차차단기가 개방되도록 하였으나 전력계전기 동작 시간 및 차단기 차단에 걸리는 시간동안 매우 급격한 주파수 저하로 전력계통이 붕괴 될 것이다. 따라서 이의 보완 대책 수립이 요구된다.

주어진 전력계통에서 발전과 수요의 불균형 즉, 발전력 부족으로 계통 주파수가 저하되면 전력계통의 정상적인 운영을 저해하게되므로 이를 억제하도록 사전 부하차단 및 저주파수계전기에 의한 부하차단을 실시하여 계통을 안정화시킨다. 그러나 과도한 과부하율인 경우에는 발전력 부족이 주파수 저하는 물론 급격한 전압강하를 유발하여 전력계통의 안정 운전을 위협하게된다. 따라서 앞으로는 저전압계전기에 의한 부하차단도 고려되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 이강환, LG-Caltex 정유 Load shedding 설계용역 최종보고서, 대화기술단, 2000
- [2] P. Kunder, Power System Stability and Control, McGraw- Hill, 1993
- [3] J. Arriaga, C.P. Arnold, B.J. Harker, Computer modelling of electrical power system, Willy, 1983
- [4] PSFA-STAB for Windows user's guide and reference manual, CYME Inc., 1999
- [5] PSFA for Windows tutorial, CYME Inc., 2000
- [6] IEEE Recommended Practice for Industrial Commercial Power System Analysis, IEEE Std 399-1990