

우리나라 계통의 주파수특성에 관한 고찰

이운희*, 송석하
한국전력거래소

A study of the frequency characteristic about our power system

Woonhi-Lee, Seokha-Song
Korea Power Exchange

Abstract - 원자력과 같은 대용량 발전기의 갑작스런 탈락이나 하루 중 아침시간이나 점심시간과 같이 급격한 부하변동이 발생하는 특수 시간대에는 계통의 발전량과 부하량간에 심한 불균형이 발생하게 된다. 이 경우 계통 주파수가 변하여 발전량과 부하량이 자동으로 조절되어 수급의 균형이 이루어지게 되므로 계통이 안정하게 유지된다. 본 논문에서는 실제동 사고사례를 통하여 우리나라 계통에서 대용량 발전기 탈락시 주파수변동에 따른 발전량 및 부하량의 조절특성과 고장당시 계통 발전기들의 운동특성을 소개한다.

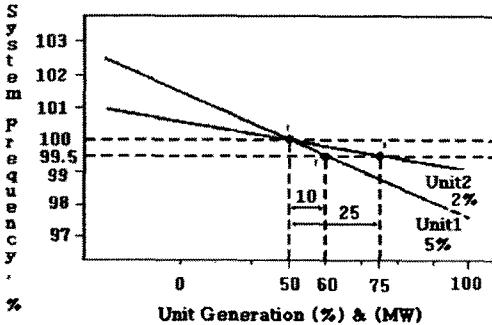
1. 서 론

대용량 발전기의 탈락으로 계통에 갑작스런 수급 불균형이 발생하게 되면 계통주파수가 저하하고 이에 따라 발전기 가버너의 속도조절에 의한 운동특성과 부하의 주파수조정특성에 의하여 수급의 불균형을 회복하게 된다. 본 논문에서는 당진화력 발전기 탈락시와 영광원자력 및 울산부합 발전기 탈락시에 대하여 고장당시 수급 불균형에 의한 주파수 저하 특성을 살펴보고, 특히 영광원자력 및 울산부합 발전기 탈락고장에 대해서는 계통 발전기들의 운동 특성을 유형별로 분석하고 우리계통의 문제점과 해결방안을 제시한다.

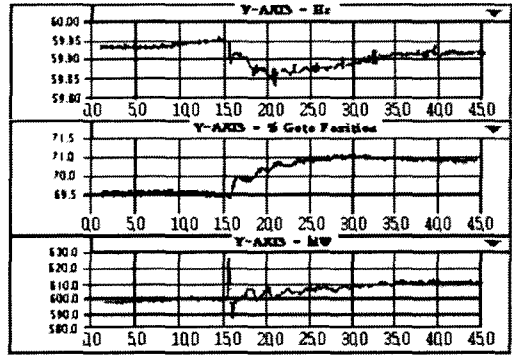
2. 본 론

2.1 주파수 변동에 따른 일반적인 발전조정특성

계통의 급격한 유효전력 변화는 계통주파수의 변화를 초래하고 이러한 주파수 변화는 발전기의 속도조절에 의한 주파수응답 특성과 주파수에 대한 부하조정특성에 의하여 결정된다. 따라서 실제동운영시에는 가버너 운동에 의한 예비력을 일정량 이상 확보하여 운전하므로써 제철부하와 같은 급격한 부하변동 또는 발전기 탈락 등과 같은 상황에 대응하고 있다. 다음은 서로 다른 속도조절율을 가진 발전기 2기에 대하여 계통주파수 변화시 각각의 발전기 출력이 어떻게 변하는지를 보여주는 일반적인 특성곡선을 표시하고 있다.



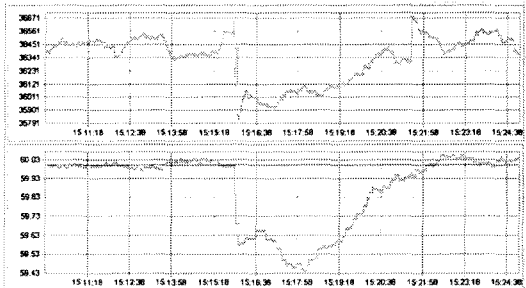
다음 그래프는 주파수 변동시 가버너동작에 의한 입력밸브 위치의 자동조절과 그에 따른 출력변동을 나타내는 일반적인 그래프이다.



Governor Response to a System Transient

2.2 당진화력 발전기 탈락사례

아래 그림은 당진화력 발전기 3기 트립으로 발전기 출력이 150만kW정도 탈락시 계통 발전기의 총출력과 주파수 변화를 보여주고 있다. 고장당시 EMS에 의하여 2초단위로 기록된 자료에 근거하여 그려진 것이다.



발전기 탈락으로 인한 급속한 주파수저하와 15시 18분 이후의 발전력 증가에 의한 빠른 주파수 회복을 볼 수 있다. 주파수 회복은 AGC에 의한 발전력 증발과 단시간내 기동이 가능한 수력, 양수 또는 가스터빈 발전기의 기동으로 이루어진다. 또한 EMS의 AGC에 의한 출력조정은 4초단위로 이루어지고 있다.

2.2.1 발전기 탈락시 주파수 및 총발전량

고장당시 계통의 총출력과 고장으로 정지된 발전기의 출력 내역은 아래 표의 내용과 같다. 표에서 알 수 있듯이 처음에 발전기 2기의 출력이 갑자기 50만kW정도 감발되었다가 이어서 발전기 3기가 트립되는 고장이었다. 이것은 위의 발전 및 주파수변동 그래프에서도 쉽게 확인할 수 있다.

주파수 [Hz]	총발전 [MW]	당진TP			부분합 [MW]
		G1	G2	G4	
59.99	36634	502	491	503	1497
59.99	36104	239	262	502	1005
59.69	35856	0	0	0	0
59.58	36024	0	0	0	0

2.2.2 발전기 및 부하의 주파수특성계수

□ 고장후 18초 동안의 주파수 특성계수

구분	경과시간	비 고		
		0초	18초	
주파수 [Hz]	59.99	59.58	$\Delta f = 0.41$	
출력증가[MW]	36,634	36,024	$1) \Delta P_G = 888$	
계통수요[MW]	-	-	$2) \Delta P_D = 610$	
발전량탈락[MW]	1,498	0	$3) \Delta P_L = 1498$	

고장발생 후 18초 동안은 주파수가 급격히 저하하였고 그 이후는 안정하기 시작하는 시점으로 볼 수 있다. 왜냐하면 18초 이후에는 일차적인 주파수회복이 있었기 때문이다. 따라서 가버너 응답에 의한 발전출력 조정은 18초까지 완료되었고 그 이후는 AGC에 의한 출력조정이 이루어지는 과정이라고 볼 수 있다. 주파수가 급격히 저하하였다가 안정하는 기간은 가버너가 응답하여 주파수를 안정시키는 기간으로써, 이 기간동안 주파수 변동에 대한 발전력조정 및 부하조정 특성을 구하면 다음과 같다.

$$\%K_G = \frac{\Delta P_G/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{888/36634}{0.41} \times 100 = 5.91$$

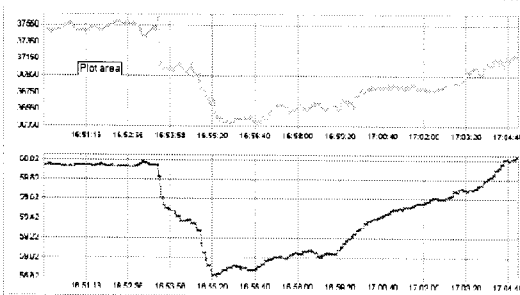
$$\%K_L = \frac{\Delta P_D/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{610/36634}{0.41} \times 100 = 4.06$$

$$\%K = \frac{\Delta P_L/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{1498/36634}{0.41} \times 100 = 9.97$$

윗 식에서 %KG와 %KL은 각각 계통전체에 대한 발전기의 주파수특성계수, 및 부하의 주파수특성계수로써 단위는 %MW/Hz이다. %K는 %KG와 %KL를 합한 값으로 계통의 주파수특성계수이다.

2.3 영광 및 울산C/C 발전기 탈락사례

아래 그래프는 영광원자력 #1호기(약100만kW) 및 울산C/C #2 Block(약50만kW) 고장정지시 총발전량 변화와 주파수 변화를 보여주는 그래프이다. 고장시간도 당진화력 고장시와 유사하며, 당시 계통출력도 유사하였음을 알 수 있다. 또한 탈락 발전양도 거의 같지만 당진화력의 경우는 거의 일시적으로 발전양이 탈락하였으나 영광의 경우는 100만kW가 먼저 탈락하고 약 2분 후에 50만kW가 추가적으로 탈락했다는 점이 다르다.



$$1) \Delta P_G = P_{GT2} - (P_{GT1} - P_L) \text{ (발전 조정량)}$$

$$2) \Delta P_D = \Delta P_L - \Delta P_G \text{ (부하 조정량)}$$

$$3) \Delta P_L = P_{L1} - P_{L2} \text{ (부하급변량 또는 발전탈락량)}$$

주파수변동 그래프에서 2번의 급격한 주파수 변화를 확인할 수 있으며, 또한 당진화력 고장시에 비하여 주파수 회복과정이 매우 느리게 진행되고 있음을 알 수 있다.

2.3.1 발전기 탈락에 따른 주파수 변동

고장당시 계통전체의 출력과 고장정지된 발전기들의 출력 및 주파수 내역은 다음 표와 같다. 영광원자력 #1호기 정지시 계통주파수 저하가 매우 큰 폭으로 발생하였음을 알 수 있다. 당진화력 고장으로 150만kW 탈락 시보다 더 많은 저파수 저하가 발생하였음을 알 수 있다.

주파수 [Hz]	총발전력 [MW]	울산C/C #2 Block			영광NP G1	부분합 [MW]
		G3	G4	ST2		
59.97	37624	152	151	163	987	1453
59.52	37033	155	154	160	0	475
59.29	36955	0	175	161	0	336
59.29	36861	0	0	158	0	158
58.84	36656	0	0	0	0	0

2.3.2 발전기 및 부하의 주파수특성계수

□ 영광정지 16초 후 주파수 특성계수

구분	경과시간	비 고		
		0초	16초	
주파수 [Hz]	59.97	59.52	$\Delta f = 0.45$	
출력증가[MW]	37,624	37,033	$\Delta P_G = 396$	
계통수요[MW]	-	-	$\Delta P_D = 591$	
발전량탈락[MW]	987	0	$\Delta P_L = 987$	

고장발생 후 16초 동안은 주파수가 급격히 저하되었다가 안정을 시도하지만 AGC의 조정능력 부족으로 주파수가 계속하여 저하하고 있음을 알 수 있다. 영광원자력 #1호기 정지후 16초 동안의 주파수 변화에 대한 발전력 조정 및 부하조정 특성을 구하면 다음과 같다.

$$\%K_G = \frac{\Delta P_G/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{396/37624}{0.45} \times 100 = 2.34$$

$$\%K_L = \frac{\Delta P_D/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{591/37624}{0.45} \times 100 = 3.49$$

$$\%K = \frac{\Delta P_L/P}{\Delta f} \times 100 = \frac{987/37624}{0.45} \times 100 = 5.83$$

2.4 계통의 주파수특성계수 비교

당진화력 발전기 고장정지시와 영광#1호기 및 울산 C/C #2Block 고장정지로 인한 계통특성을 비교하면 다음과 같다. 두 고장은 계통조건과 고장조건이 매우 유사하지만 계통주파수 저하특성 및 회복특성이 매우 다르다. 이것은 그래프에서 쉽게 확인할 수 있다. 그 원인을 살펴보면, 두 고장계통에서 주파수에 대한 부하조정 특성(각각 4.06% 및 3.49%)은 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 주파수에 대한 발전양 조정특성은 각각 5.91% 및 2.34%로써 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 가버너에 의한 발전조정량(주파수조정 운전예비력)이 크게 다르거나 또는 과도시 발전기가 부적절하게 응답한 부분이 내포되어 있었기 때문이라고 할 수 있다.

2.5 주파수저하시 발전기 응답특성분석

고장당시 가버너프리운전 및 AGC운전에 대한 정보를 요약하면 다음 도표와 같고, 이것은 EMS의 기록내용과 가버너 및 AGC의 운전범위에 대한 발전사별 제출자료를 근거로 작성된 것이다.

	C/C	T/P	N/P	H/P	합계
발전기 운전대수	79	39	15	5	138
AGC 운전대수	34	22	-	-	56
G/F 운전대수	79	39	-	5	123

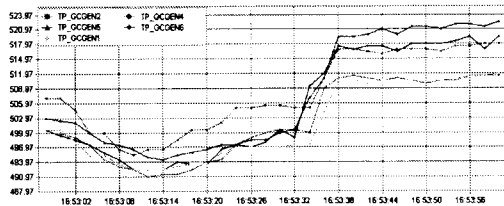
2.5.1 발전기별 출력변동 유형 분석

고장당시 계통에서 운전된 모든 발전기에 대한 출력변동 특성을 분석해 보면 다음과 같이 세가지 유형으로 분류할 수 있다. 그 첫째는 주파수 저하에 대하여 가버너가 적절히 응동하므로써 안정적인 출력증발이 이루어진 발전기, 다음으로 가버너가 응동하여 출력조정을 하였으나 유지되지 못하고 곧이어 감발하므로써 일시증발한 발전기, 마지막으로 가버너가 응동하지 못한 미응답 발전기로 대별된다. 분류 결과는 아래 표와 같다.

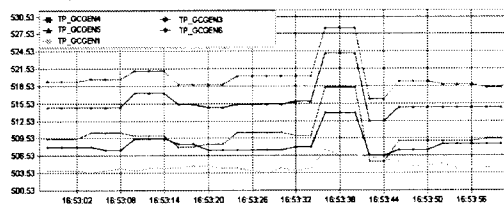
	안정증발	일시증발	미응답	합계
C/C	24	28	27	79
T/P	23	12	4	39
H/P	1	-	4	5
N/P	6	3	6	15
합계	54	44	40	138

다음은 각 발전기별 출력변동 분류에 대한 예시 그래프이다.

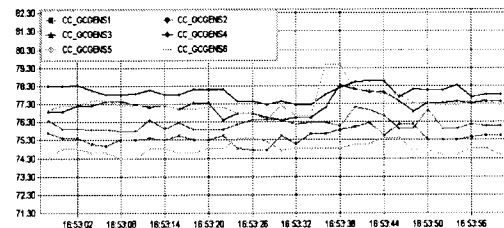
○ 안정증발 발전기 예



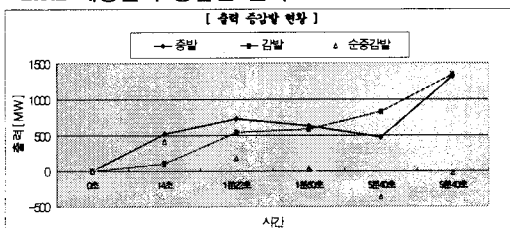
○ 일시증발 발전기 예



○ 미응답 발전기 예



2.5.2 계통출력 증감발 분석



2.5.3 고장 중 이벤트 분석

시간	이벤트	내용
0초	영광#1호기 정지	- 98만kW 탈락
14초	가버너 및 AGC 응동	- 안정증발 발전기 - 일시 증발 발전기 - 무응답 발전기 - AGC 트립
1분22초	울산#2블록 정지	- 48만kW 탈락
1분50초	최저 주파수 도달	- 발전력 추가 탈락 - 주파수의 급속한 추가 하락 - 최저 주파수 : 58.82Hz
5분40초	완만한 회복	- UFR동작 : 217MW 차단
9분40초	급속한 회복	- 수력/양수 기동 : 1,967MW
-	기타	- 주파수 회복 중 일부 발전기 감발

2.5.4 문제점 및 대책

당진화력 고장시와 영광N/P 고장시 주파수 변동에 따른 발전조정 계수를 비교하면 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 주파수조정 예비력 확보에 차이가 있거나 또는 발전기의 부적절한 응동에 의한 것임을 알 수 있다. 따라서 대책으로는 주파수조정 예비력의 적정성에 대한 연구와 발전기의 부적절한 응동에 대한 원인규명과 설비 개선방안이 함께 강구되어야 할 것이다. 또한, 시장운영 규칙에 따라 30초 이내에 500MW의 출력을 증발할 수 있도록 AGC의 분당증감발을 향상 방안도 함께 강구되어야 할 것으로 생각한다.

3. 결 론

이상으로 2가지 고장에 대하여 대용량 발전력 탈락시 우리 계통의 주파수특성이 매우 상이함을 살펴 보았다. 이것은 주로 주파수변동에 대한 발전조정력의 차이에 의해서 발생한 것으로 분석되었다. 또한 이러한 발전조정력의 차에 대하여 주파수유지를 위한 운전예비력 확보량과 발전설비 응동의 적절성에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각한다. 뿐만 아니라 주파수 조정능력 향상을 위한 AGC의 분당증감발을 개선이 필요할 것으로 생각한다. 현행 시장운영 규칙에 따르면 30초 이내에 500MW의 출력을 증발할 수 있어야 하므로 AGC의 분당증감발을 향상이 필요한 것으로 생각된다. 아울러 이러한 계통의 복잡하고 중요한 문제를 해결하기 위해서는 자사의 이익보다도 계통의 안전을 우선하여 전력사 및 거래소가 서로간의 긴밀한 협조를 하여야 할 것으로 생각한다.