

原子力 構成比 增大에 따른 系統運用



李 暉 宰

(韓國電力公社 中央給電指令所長)

最近 電力系統에서 原子力發電이 차지하는 比率이 점차 增加함에 따라 이제 原子力發電은 基底負荷뿐만 아니라 尖頭負荷도 擔當할 수 있는 負荷追從運轉이 要求되고 있다. 지난 10月30日 열린 電力技術워크·숍 第1分野에서는 負荷追從에 관해서 10편의 技術論文이 發表되었는데, 本誌에서는 그중 原子力發電과 관련된 6편의 論文을 이번號부터 3회에 걸쳐 2편씩 紹介한다(편집자註).

1. 序 論

電力은 國家經濟의 持續的 發展 및 國民生活水準의 向上을 爲하여 없어서는 안될 生産財이고 消費財이며 公共財가 되고 있다. 그동안 우리나라의 電力事業은 다섯차례에 걸친 電源開發計劃의 成功的 推進으로 量的인 面은 물론, 質的인 面에 있어서도 많은 成長을 거듭해 왔다.

특히, 1970年代 두차례에 걸친 에너지波動으로 에너지資源을 大部分 海外에 依存하고 있는 우리나라로서는 에너지의 自立, 安定, 低廉化를 爲하여 原子力과 大型 石炭火力發電所의 建設을 적극 推進하게 되었다.

이에 따라 1986년에 들어와 原子力 5, 6, 7號機의 竣工으로 10月부터 原子力 發電量의 占有率이 全體 發電量의 50%를 웃돌게 됨으로써 지금까지의 火主水從에서 原主火從의 供給體制로 바뀌게 되었다.

이러한 電源 設備의 構成 變化에 따라 電力系統의 運用에 있어서도 系統運用의 安定性에 關心을 두어야할 새로운 局面을 맞이하게 되었으며, 發電機의 燃料費를 最少化하는 지금까지의 經濟給電方式에서 부터 大單位 原子力, 有煙炭, LNG, 揚水發電機 등 多元化된 設備과 既存 設備(水力, 油專燒)를 어떻게 調和시켜서, 電力에너지의 品質向上과 供給의 安定을 期할 것인가가 새로운 課題로 擡頭하게 되었다.

더우기 앞으로의 電力需要는 電氣에너지가 가지고 있는 使用의 便益性과 安定性 그리고 크린·에너지라는 利點으로 現代 尖端技術 및 情報産業 社會의 主에너지源이 될 것이며, 電氣의 質的 向上 要求도 더욱 增大될 것으로 보고 있다.

한편, 國民生活의 水準向上에 따른 民需用에너지의 增加는 深夜와 晝間의 需要隔差가 더욱 벌어질 것으로 展望되며, 또한 原子力 등 基底負荷供給設備의 增加로 因하여 需要變動에 따

른 發電力 調整 및 周波數 制御 等 系統運用面에서도 彈力性이 크게 低下될 것으로 보고 있다.

이러한 여러가지 系統狀況의 變化에 對處하면서 電力의 質的인 向上과 經濟運用이라는 相反된 目的을 滿足시켜야 할 것이 앞으로 系統運用의 課題가 되고 있다.

2. 系統運用實績 및 展望

가. 原子力發電의 構成比 變遷

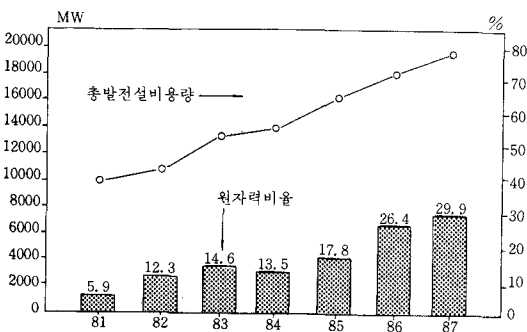
1978年 原子力 1號機가 系統에 併入·運轉되면서 當時 設備는 全系統設備容量의 5.9%에 불 過하던 것이 1986년에 이르러 原子力 6, 7號機가 竣工되어 6基가 稼動되면서 그의 設備는 全系統設備의 26.4%의 構成比로 크게 增加되었다. 뿐만 아니라 原子力の 發電量도 해를 거듭하여 增加를 보게 되었다(그림 1, 2 參照).

1985년에는 우리나라 年間總發電量의 28.9%를 占有하였고, 1986년에 들어와서는 6, 7號機의 잇달은 竣工으로 每月 發電量이 增加되던中 1986年10月 原子力の 發電量이 火力을 凌駕하여 그의 占有率이

- 原子力 : 51.9%
- 火 力 : 42.7%
- 水 力 : 5.3%

가 되어 原主火從의 轉換期를 맞이하게 되었다.

〈그림 1〉 총발전설비용량 및 원자력비율 증가추이



한편, 이와 같은 原子力發電의 增加는 電力 需要變動에 對應하는 發電調整能力의 低下를 가져오게 된다. 그 理由로서는 原子力은 經濟的인 面에서 뿐만 아니라 安全한 運轉을 爲해서도 負荷追從運轉을 自信있게 勸하는 電力會社나 제작소가 없다는 것이다. 이에 따라 原子力の 基底負荷運轉이 常例가 되었고, 이러한 出力變動이 困難한 原子力の 增加, 基底負荷用 大型 火力機의 運轉은 系統周波數調整에 柔軟性을 低下시키게 되고, 負荷變動에 速應性이 있는 水力 및 油專燒 發電機의 運轉을 制限함으로써 精度 높은 周波數調整에 어려움을 주게 된다.

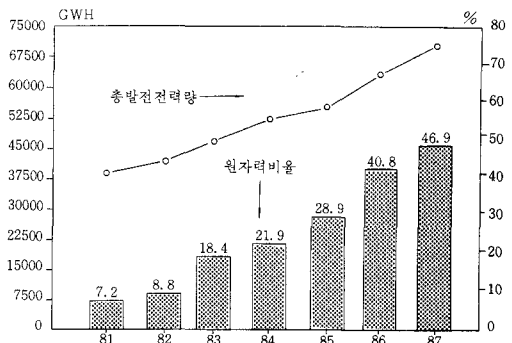
이러한 問題를 解決하기 爲하여 1986년에 試圖된 것이 大單位 石炭火力에 對한 負荷追從運轉(Governor Free)이었고, 그동안 應動特性이 鈍한 水·火力機에 對한 全面的인 特性 改善과 周波數調整運轉을 實施하여 相當한 效果를 거두었다.

그러나 앞으로 다가올 原子力機의 增大와 深夜에 차지하는 原子力の 比重이 漸次 커짐에 따라 深夜와 特殊輕負荷時에는 周波數調整에 가장 어려운 時間帶로서 나타나게 되었다.

나. 系統周波數 品質改善

系統周波數의 精密한 維持는 需用家側 要求에서 緊要할 뿐아니라 大型 發電機의 脫落時

〈그림 2〉 총발전전력량 및 원자력비율 증가추이



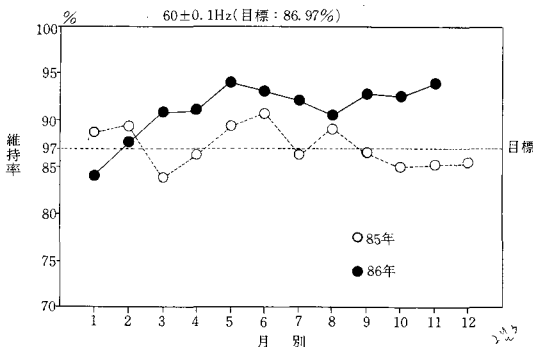
周波數 回復의 迅速을 期함으로서 大型火力 터빈의 低周波運轉으로 因한 可動翼 損傷을 防止하고, 原子力의 所內動力源의 安全된 運轉을 爲해서도 必要하며, 系統의 安定度 改善에도 有益한 것이다.

이에 따라 周波數 變動許容 目標値도 今年부터 60±0.2Hz에서 60±0.1Hz로 점차 上向調整을 設定하고 있으나, 周波數를 改善하기 위해서는 時時刻刻 變動하는 系統負荷에 맞추어 即時 應動할 수 있는 充分한 發電力의 確保가 필요하다.

過去의 周波數 制御는 主로 尖頭負荷 供給用 水力 및 油專燒火力機가 擔當하여 왔으나, 基底負荷 供給用 原子力發電 占有率이 점차 增大됨에 따라 過去 基底負荷用으로 建設된 石炭火力機도 周波數調整運轉이 불가피하게 되었다. 이러한 추세에 따라 三千浦, 保寧等 大容量 有煙炭發電機에 對한 設備改善으로 負荷追從運轉에 參與하게 됨으로써 1986年 봄부터 原子力發電比率이 높아졌음에도 系統周波數 維持率이 크게 向上되었다(그림3 참조).

특히, 앞으로의 系統運用上 周波數調整에 문제가 되는 時間은 負荷減少로 基底負荷用 原子力發電 比重이 增加되는 深夜時間帶이며, 이 期間中 周波數 調整問題를 集中檢討하여야 할 段階에 이르렀다(그림4 참조).

〈그림 3〉 周波數維持實績



3. 深夜時間帶 發電量 變動分析

電力系統에서 주파수 調整을 위한 所要 制御量 算出은 實제의 계통부하 變動특성을 파악하여야 하나, 現 계통에서는 이의 實現이 어려우므로 주파수 變動에 따른 電 統의 發電變動運轉 發電機들을 조사하여 총 Governor Free 應動量(P_G)을 산출해 낸다. 그런데 총발전변동량(ΔP)은 총 Governor Free應動量(P_G)과 A-GC 또는 指令에 의한 調整量(P_R)으로 構成되어 있기 때문에 다음과 같은 式이 成立된다.

$$\Delta P = 2 \times (G \cdot F \text{應動量}) + 2 \times (AGC \text{指令調整量}) = 2 \times P_G + 2 \times P_R \dots\dots\dots (1)$$

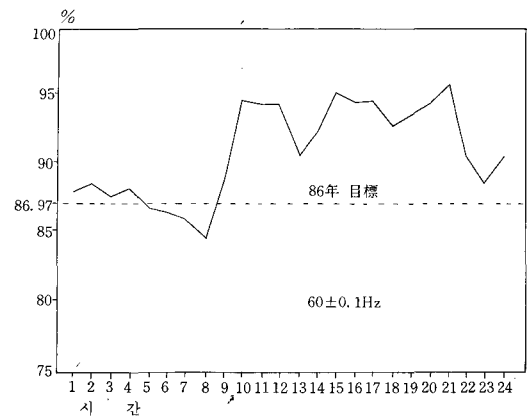
表 1 은 實系統으로 부터 實측된 심야시간대 的 主 周波數 維持율 及 발전변동량을 나타낸 것이다.

여기서 G·F應動量(P_G)은 각각의 시간대에 G·F運轉된 發電機들을 조사하여 산출해 낸 값이다. 이들의 평균값을 確率分布인 標準正規分布로 작성하면 그림 5 와 같다.

4. 所要 制御量 算定

周波數 調整을 위한 所要 制御量은 주파수 유지율 目標를 어떤 값으로 지정하느냐에 따라 바뀌게 된다. 電力系統에서 周波數 變化를 보면 매우 불규칙적인 것 같지만, 주기적으로 주파수 變動을 취하여 보면 비교적 규칙성 있게 중

〈그림 4〉 時間別 周波數 維持率



〈表 1〉 深夜時間帶 周波數 維持率

(單位: MW)

순위	일자	주파수 유지율	발전변동 (ΔP)	G·F응동량 (P_G)	AGC 및 지령 조정량 (P_R)
(1) 95% 대	8/8	98.0%	138	60.6	8.4
	7/30	96.9%	220	59.5	50.5
	7/2	95.4%	140	51.6	18.4
	평균	96.8%	166	57.2	25.8
(2) 90% 대	7/8	90.0%	188	40.4	53.6
	7/25	91.2%	213	51.5	55.0
	8/12	89.6%	162	45.5	35.5
	평균	90.3%	188	45.8	48.2
(3) 80% 대	7/26	80.6%	198	42.6	56.4
	8/4	86.2%	145	30.4	42.1
	8/15	81.2%	140	28.8	41.2
	평균	82.7%	161	33.9	46.6
총 평균		89.9%	172	45.7	40.3

* 주파수 유지목표 60±0.1Hz

첩하고 있음을 알 수 있다. 따라서 標準正規分布로부터 주파수 유지목표를 80%, 85%, 90% 및 95%로 유지하기 위한 각각의 所要 制御量 (ΔP), G·F應動量(P_G)과 AGC 및 지령에 의한 조정량(P_R)은 다음과 같다(表2 참조).

$$\Delta P = 2 \times (P_G + P_R)$$

〈表 2〉 周波數 維持率別 所要 制御量

단위: [MW]

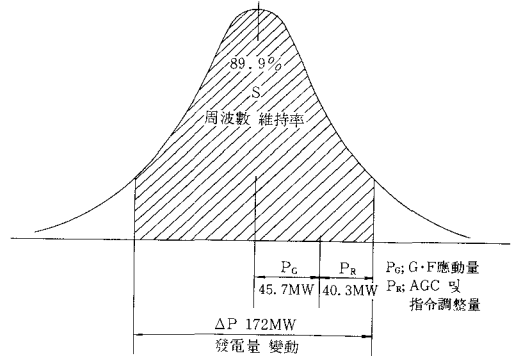
	주파수 유지율(S)	주요제어량 (ΔP)	G·F응동량 (P_G)	AGC 및 지령 조정량 (P_R)
1	95%	205	54.6	48.0
2	90%	173	45.9	40.4
3	85%	151	40.1	35.3
4	80%	134	35.6	31.3

(주) $P_G : P_R = 45.7 : 40.3$ 적용

5. 原子力 構成比(計算例)

電力生産의 경제성 향상을 추구하기 위해서는 原子力과 火力機와 함께 수력 또는 揚水의 합리적 운용이 이루어져야 한다. 우리나라와 같이 거의 대부분의 수력발전소들이 水量의 단시간 저장능력을 갖는 調整池式 發電所와 비교적 장기간의 水量 저장능력을 갖는 壩式 발전소들

〈그림 5〉 發電量 變動分布



로 구성되어 있는 水系運用은 가능한한 전력생산 단가가 높은 尖頭負荷(Peak Load)時間帶에 發電하도록 運用하고 양수발전소는 이의 효율을 감안하여 基底負荷時 양수하고 침두부하 시간대에 발전하게 함으로써 최적 경제상태가 되도록 운용하여야 한다. 또한 發電 燃料費가 저렴한 원자력발전소는 가능한한 最大出力이 되도록 운용하고, 그 이외의 화력발전기들은 等増分 燃料費法을 적용하여 최적 기동정지(Unit Commitment)계획에 따라 운용되어야 한다.

이와 병행하여 電力系統은 주어진 전력생산의 경제성 향상을 극대화하면서 高品質의 전력 에너지 공급조건인 주파수 유지율이 적정율이 유지되도록 운용되어야 한다.

韓電의 경영목표중 하나인 주파수 유지율 60±0.1Hz, 90%를 달성하기 위한 원자력 구성비율을 주어진 發電設備를 감안하여 산출하면 다음과 같다.

주파수 유지목표 60±0.1Hz범위 유지율 90% 이상일 때의 소요 제어량은 表2로부터 173 [MW]이고, 심야계통수요는 양수부하를 포함하여 6,500[MW] 수준일 때의 가능 최대발전 점유율을 계산하면 다음과 같다.

$$P_L = \sum P_{GRLO} + \sum P_{L,LM} + \sum P_N \dots \dots \dots (2)$$

여기서 P_L : 심야 최저 계통수요[MW]

$\sum P_{GRLO}$: 제어량 확보를 위한 운전발전기들의 하한출력합계[MW]

$\Sigma P_{L,LM}$: 일일 기동정지 불가능 발전기들의 최소출력합계 (무연탄, 유연탄, 기력) [MW]

ΣP_N : 원자력 상한 출력[MW]

따라서 현재의 발전설비를 이용한 소요 제어량을 최적상태로 운용하기 위하여서는 현 발전설비중 제어량이 173[MW]가 되도록 적정발전기들을 선정하고 이들의 하한 운전 출력을 구하면 表 3과 같다.

〈表 3〉 G·F 최소운전대수 및 하한 운전출력 (60±0.1Hz 90%유지 목표) [MW]

발전기	소요 제어량 (ΔP)	G·F 응답량 (P _R)	AGC 및 지령조정량(P _R)	G·F 운전하한 (P _{GRL0})	하한운전 출력 (P _{GRL0})	비고
1 서울 #5	13.5	6.75	—	120	120	
2 인천 #1	13.5	6.75	—	120	120	
3 평택 #1	36.1	8.05	10	220	230	
4 울산 #6	58.4	9.20	20	260	280	
5 삼천포 #1	17.4	8.70	—	410	410	
수 력	33.8	6.48	10.4	24	34	3대
계	173.0	45.93	40.4	1154	1194	

(주) P_G : P_R=45.7 : 40.3 적용

즉, P_{GRL0}는 1,194[MW]이다.

또한 日日 起動停止가 불가능하나 발전 단가가 유전소 발전소보다 경제적인 유연탄 및 무연탄 발전기들은 심야에는 최저출력으로 운전되어지고 주간시간대에는 거의 최대출력으로 운전되어 수요변동폭을 흡수하는 이들 발전기들의 최소출력은 表 4와 같고 이들 발전기들의 운전하한의 총합인 $\Sigma P_{L,LM}$ 은 1,280[MW]이다.

그러므로 주파수 유지목표 60±0.1Hz범위 내의 유지율 90[%]를 달성할 수 있는 최대 原子 (表 4) L·LM운전 최소출력(일일기동정지 불가능 발전소 : 유연탄, 무연탄 기력)

보령 #1, 2 : 220×2MW	호남 #1 : 150MW
부산 #1 : 30MW	영동 #2 : 100MW
영동 #1 : 60MW	영월 #1, 2 : 25×2MW
삼천포 #2 : 250MW	군산 # : 40MW
서천 #1, 2 : 80×2MW	합 계 : 1280MW

(풍수기 수력 : 최대출력 운전조건 제외)

力發電은 식(2)로 부터

$$\Sigma P_N = P_L - \Sigma P_{GRL0} - \Sigma P_{L,LM} - \alpha \dots \dots \dots (3)$$

여기서 α : 예측오차를 감안한 減發餘裕量 [MW] 즉, 예측된 P_L이 실제 系統負荷보다 높거나 또는 계통에 並列運轉되는 발전기들의 조합 조건을 감안할 수 있는 여유감발량

$$\begin{aligned} \Sigma P_N &= 6500 - 1194 - 1280 - 100 \\ &= 3926 [MW] \end{aligned}$$

이를 日負荷 曲線上에서 도해하면 그림 6과 같다.

위 계산으로 부터 심야시간대 최대 가능 원자력 구성비는

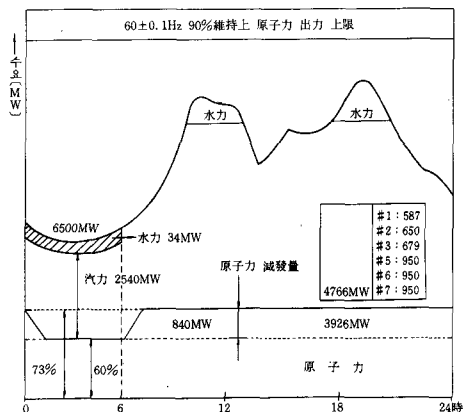
$$\begin{aligned} \text{구성비} &= \frac{\text{원자력발전} [MW]}{\text{주요} [MW]} \times 100 \\ &= \frac{3926}{6500} \approx 60 [\%] \end{aligned}$$

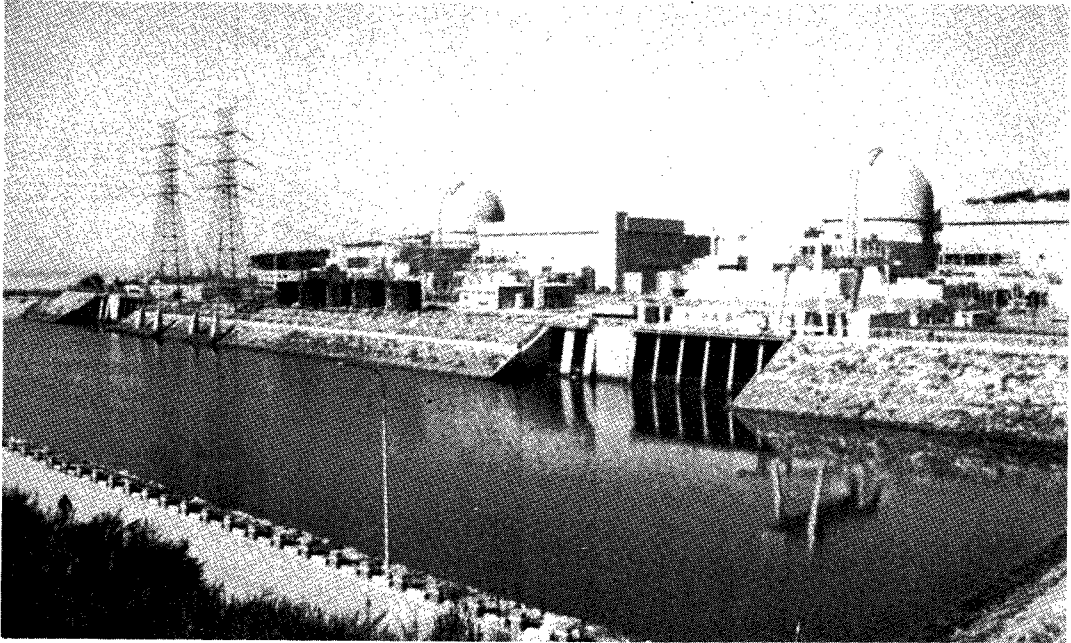
60[%]가 된다.

6. 結論 및 對策

前述한 바와 같이 대용량 원자력발전기의 기저부하운전은 저부하 시간대인 심야에 주파수 유지율의 低下要因이 되고, 이로 인하여 系統運用에 安定性和 전력공급의 신뢰성이 저하하게 되므로 出力變化가 곤란한 원자력발전 점유율이 가장 큰 심야시간대에서의 주파수 조정상

〈그림 6〉





〈영광의 原子力 7, 8號機 전경〉

원자력의 상한 운전 제약치 결정방법과 계통운용방안은 다음과 같다.

1. 日日發電計劃에 의해 심야부하가 결정되면 절대운전 발전기 대수에 따라 발전기의 최저 출력한계가 결정된다.
2. 주파수 조정을 위한 최소 Governor Free 운전 발전기는 Governor Free 하한출력 이상에서 운전되어야 한다.
3. 심야주파수 조정을 위하여 指令調整이 용이한 수력기를 최소 3대 이상 확보 운전하여 Governor Free發電機가 조정범위내로 유지될 수 있도록 보조기능을 수행한다.
4. 위 3개 항의 발전기 출력 하한치 總和와 원자력의 출력합계가 수요를 초과할 때 원자력은 減發하여야 한다.
5. 주파수 조정능력이 없는 발전기의 운전은 원자력의 減發을 가중시킨다.

原子力發電設備의 利用率 增大는 전력생산의 경제성을 높이게 된다. 따라서 이를 위해서는 다음과 같은 대책이 수립되어야 한다.

1. 심야 계통수요 저하에 따른 일일 기동 정지 확대 실시(특히, Governor Free불가능 발전기).
2. 각 발전기의 Governor Free運轉 및 Load Limit運轉 하한치 하향설정 연구(예: 60%선에서 40%선으로).
3. 절대 운전발전기(일일기동 정지가 불가능한 유·무연탄)에 대한 성능 개선으로 부하추종 능력 향상(Governor-Free가능토록 개선).
4. 原子力發電機의 부하추종 운전가능 발전기 선정 및 조정능력 설정(변동폭, 변동속도).
5. 심야 양수발전기의 최대 활용(단, DSS와의 경제성 비교).
6. Governor Free가능 발전기의 적기 보수로 응답특성 유지(Governor Free운전이 둔화될 경우 심야시간대 Governor Free운전 소요 대수 증가로 원자력 감발 요인이 됨).
7. 장기대책: 심야부하 개발을 위한 蓄熱式 料金の 획기적 인하.