

『系統周波數의 自動制御 試論』

—우리나라 電力系統을 對象으로—

李 珉 煥

1. 계통주파수의 현황

전력계통의 주파수가 안정되어 있어야 한다는것은 새삼 論할 여지가 없다.

定格 주파수를 유지하라는 要求는 전력需要家에서 요 청하는 比重이 크다고하겠으나 발전회사 자체로서도 요 청되는바 크다. 우리나라의 경우와같이 火主水從의 진 력구조를 가진 계통에서는 특히 그 영향을 많이 받는다. 화력발전소는 그 구성 요소로서 熱力이나 priming 같은 변화속도를 제한받는 요소가 많아서 돌리 변동을 작을수록 좋은것이다. 물론 계통주파수가 변동 하더라도 출력변동은 하지않게 Load Limit 장치로서 고정시킬 수 있으나 이것은 계통의 慣性을 더욱 약화시키는 결 과가 되므로 특수한 경우 외에는 사용하지 않는다. 이 기 특수한 경우인 현재의 우리나라 전력계통과 같이 발전량의 절대량이 부족한 경우이며 60 cycle 이하야 할 계통주파수가 58 cycle 정도로 떨어지는 경우도 있다. 현재 시정으로서도 절대량이 부족한 실정에 있고 또 대 소의 계통사교가 매월 數回씩이나 되어 사고의 防止 에 及及한 현실이지만 앞으로 전력개발 5개년계획의 進 展에따라 내년초부터는 供給量이 需要量을 증가하게되 어 이제는 電氣自體의 質的向上을 기도해야 할 단계에

表 1.

年 度		1963	1964	1965	1966
		MW	MW	MW	MW
시 설 용 량	水 力	143	215	215	215
	火 力	349	581	690	756
	기 他	39	39	39	39
	계	531	790	944	1,010
발 전 계 획	水火對比	27/73	26/74	23/77	21/79
	年間尖頭發電量	482	790	910	976
	年間尖頭需要量	610	683	765	842
년간평균발전량	水 力	71.4	65.0	96.9	96.9
	火 力	184.7	309.3	323.8	366.2
	기 他	256.1	374.3	420.7	463.1

韓國電力株式會社 火力建設部

이르렀다 일것이다. 전력개발 5개년계획에 의하면 시정 용량과 발전계획의 趨勢는 다음과같이 예상된다.

現系統의 負荷변동의 양상을 살펴보면 周期가 3분이 하던 것은 계통전력의 3% 정도, 즉 8MW 정도이고 周 期가 15分 이하의것은 계통전력의 10% 정도, 즉 25MW 정도의 부하변동을 가지고 있으며 周期가 15分 이상의 것에 대해서는 給電指命으로 調整하고 사시각각 변동하 는 부하에 대해서는 수동으로 발전기 가마나를 조작하여 調整하고 있다. 주파수의 변동상태를 본다면 대략 평균 偏差가 ±0.3 cycle 이대이고 계통사교로 인한 변동을 제 외하고는 최대偏差 ±0.7 cycle 정도의 것이 하루 평균 7~8 회씩 分布하고 있다.

2. 기본방침의 선택

부하변동의 樣相에 따라 調整방법은 다음의 네가지로 분류할 수 있다.

a) Base 調整

시간별 부하변동을 예상하여 계획적 급전지시로서 調整한다.

b) 임시 급전지령 調整

15分~60分정도의 周期를 가진 변동에 대해서 base 調整을 모충하여 역시 급전지령으로 調整한다.

c) AFC (Automatic Frequency Control)

2分~15分정도의 周期를 가진 변동에 대해서는 AF C 生 有効하다.

d) Speed governor 調整

변동량의 絕對値는 작지만 변화속도가 빠른 random 변화에 대한 調整을 即應의으로 동작하는 speed governor에 분담시킨다.

a) 및 b)는 역시 AFC의 분야여기는 하나 負荷配分 에 관한 것이므로 별도로 다루어야 하겠고 우선 c) 및 d)를 대상으로 해서 검토한다. speed governor 調整은 瞬間的으로 변화하는 부하변동에 따라가기 위하여 가급 적 速應性이 좋은 제어장치를 사용하여야 하는데 여러가 지 제어장치중에 turbine의 speed governor가 가장 적

당하다. 그러나 火力은 熱應力, priming(프라이밍) 또는 automatic combustion control 등과의 調整가 문제가 되어 단위 발전기 용량의 10% 정도가 조정할 수 있는 限界가 되기때문에 제어용량면으로보아 불리하다. 제석회사에서 지지하는 운전지침을 보면 speed governor 운전지침에는 load limit 을 약 10% 上部에 놓는것이 좋다고 되어있다. 즉 25MW 용량의 발전기를 speed governor로서 20MW 출력을 낼때에 load limit는 22.5MW에 設定하라는 것이다. full load로서 운전할 때는 때때로 speed governor 사용을 피해야 한다. 만약 어떤 전력계통의 발전기가 전부 speed governor 운전중을 이고있다면 가마나특성에 의한 慣性이 계통주파수의 변동을 억제하는 방향으로 작용하기 때문에 주파수의 변동을 대폭 安定된다. 그러나 설치되어 가마나특성은 주파수 회복에 따라 다르고 또 발전기마다 차이가 있어 어떤 부하변동에 대한 부담량이 발전기마다 달라지므로 그대로 운전할수는 없는것이다. speed governor는 比例動作이므로 제어동작에 定常偏差(Offset)를 동반하게되며 이것을 나시말하면 제이가 불안전하다는 것이다. 이 offset을 제거하여주기 위해서는 積分動作을 加味해준다. 된다. 적분동작이란 어떤 設定値를 넘는 外亂에 대해서 지음의 설정값으로 복구될때까지 계속해서 제어력이 增大하는 방식을 말한다. 주파수 자동제어용으로는 F.F.C.(Flat Frequency Control)가 있다. F.F.C.는 A.F.C.의 한 분야이다. 장차 계통이 성장하여 負荷配분에 경제성을 고려해야 할때에는 가장 급박한 부하배분을 자동적으로 계산하여 각 발전소의 출력을 자동적으로 조절하는 計算機式制御機構를 중앙에 설치하여 한기반에 주파수제어 및 부하배분을 담당하게 될 것이므로 우선 설치한 F.F.C.의 열결을 전환할 수 있도록 F.F.C.에는 미리 중앙 제이카로부터의 지령을 받을 수 있도록 入力裝置를 고려해 두어야 한다.

3. 調整用 전력용량의 결정

실현식에 의하면 확률상 95%의 調整을 위하여 다음과 같은 조정용전력이 필요하다고 한다.

$$P_R = K(4\sigma_f - 2fp)$$

여기서 P_R : 조정용 전력량 %MW,

K : 계통定數 %MW/°

σ_f : 주파수의 표준편차 °,

fp : 주파수의 허용편차 °.

예를들어 $\sigma_f=0.3^\circ$, $fp=0.1^\circ$ 계통전력을 400MW, 계통定數를 10%/° 라면

$$P_R=10(4 \cdot 0.3 - 2 \cdot 0.1)=10(\%)$$

즉 400MW $\times 0.1=40$ MW의 조정용전력이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 調整用발전소의 선택

외국의 大電力系統에서는 P_R 가 5%라 할지라도 계통전력이 4,000MW면 조정용전력은 200MW 인고로 단위발전소만으로 調整한다는것은 系統經濟運營上 및 단위발전기의 制約때문에 2개소 이상의 連系로서 中央集中式제어를 해야하지만 우리나라의 경우는 단위발전소의 용량이 전 계통전력의 20% 내외에 達하는 것이 있으므로 1개소만으로 제어할 수 있다. 조정용발전소가 가져야 할 조건은,

1) 충분한 전력용량 및 조정가능전력량을 가진것.

2) 출력의 調整이 容易하고 速應性이 좋고 또 조정범위 全般에 걸쳐서 効率が 높고 높을것.

3) 발전설비의 성능이 우수하고 출력변동에 따라 나쁜 영향을 받지않을 것.

4) 기본적으로 부하중심에 가깝고 출력조정으로 인한 손실이 적고 계통 運用상의 지장이 적고 인력통신시설이 완비되어 있고 修理 및 點檢에 소요되는 시간이 짧을것.

단위발전소로서 調整用발전소의 조건을 갖춘곳은 華用 水力 및 甘用 火力 정도를 꼽을 수 있을것이다. 화력발전소와 수력발전소를 조정용발전소라는 견지에서 比較해보면 表2와같은 차이가 있다. 즉 governor 특성 및 관성의 견지에서 보면 火力을 이용하는편이 낫고, 출력변화의 幅과 속도의 견지에서 보면 水力이 우수하지만 수력은 계통에 따라 이용 할수 있는 용량에 큰 차이가 있으므로 한마디로 어느쪽이 낫다고 단정하는 어려우나 甘用의 發電반응이 있다는 點에서 유리하다.

表 2.

	수 력	화 력
慣性定數 Governor 의時定數	적 다, 50초 정도	크 다, 0.5초 정도
障 害 Governor 의不感帶	Water hammer, 等 넒 다.	熱應力, Priming, 等 좁 다.
제어 속도 出力制御範圍	느 리 다. 효율이 저부하 에서 대폭 나빠 지므로 대략 25 % 이상에서 가 능하다.	빠 르 다. 무인타원조시에는 대개 40% 이상에 서 가능하다.

5. 화력발전소를 調整用으로 이용했을때의 문제점.

조정용발전소로서 화력을 이용했을때의 지장, 제한,

유의점 등을 고려하자.

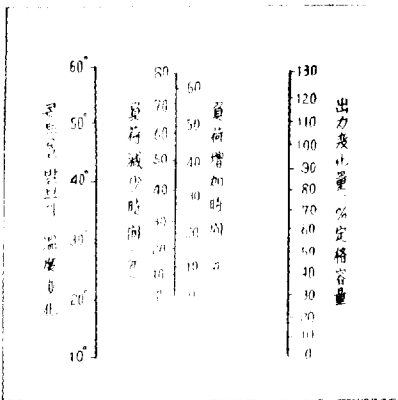
ㄱ) 출력 변화 가능한 범위

微粉炭을 燃油와 동시에 연소시키고 있는 보이라는 低負荷에서는 무연탄 연소가 불가능하며 대개 정격출력의 40% 이상에서 무연탄을 연소하게 되어있고, 40% 정격출력 이상이라 할지라도 출력이 増減함에 따라 무연탄 burner의 개수를 加減시켜주지 않으면 안되는 경향이 있어서 완전히 자동으로 부하변화에 따라갈 수 있는 범위는 75%에서 100%까지의 범위이고 기기에 수동조각까지 加味한다면 40%에서 100%까지 확대시킬 수 있다. 또 화력증기의 온도를 調節하여주는 제어장치는 일반적으로 75% 정격출력 이상에서 有効하도록 되어있다.

ㄴ) 출력 변화 속도의 限界

Priming, 熱應力, 과열기의 過熱 등의 원인으로 부하의 급격한 변동이 재약을 받게되며, 미국에서 발표한 data를 소개한다.

表 3.



日本電氣學會에서 발표한것을 보면 1分間に 변화시킬 수 있는 최대부하변동은 boiler에 있어서는 정격의 15%, turbine에 있어서는 정격의 25% 이내라고한다.

ㄷ) 자동 연소 제어장치(A.C.C.)와의 協調문제.

A.C.C.는 時定數가 상당히 크고 빠른변동에는 追從을 하지못한다. 이 時定數와 A.F.C.의 時定數가 비슷한 경우 racing 현상이 일어날 가능성이 있으므로 時定數 선택시에 염두에 두어야 한다.

ㄹ) Speed governor의 傾斜調節率 문제.

Turbine의 control valve는 4~8개로 구성되어 있으며 출력변화시에는 그것을 순차적으로 개폐시키도록 하거나 두 개의 連動軸과 그 위에 배치된 cam로서 동

작이 전달되도록 機構가 되어있다. 連動軸의 回轉角度는 直線的 變化를 하고있고 control valve의 위치와 증기량과는 비직선적 변화를 하기때문에 cam의 모양을 설계 할때에 連動軸의 회전각과 蒸氣量이 비례하도록 고려한다. 그러나 실제에있어 그 比例性이 좋지못하며 애진대 governor 調節率在 5%로 되어 있을지라도 어떤 위치에서는 2%가 되는 수도있고 또 8%가 되기도 있다고 한다. 調節率 5%에서 最適調整을 해두었다면 2%의 위치에서는 평형이 깨어지고 hunting 현상이 발생한 우려가있으므로 A.F.C.설계상 고려해야 할것이다.

ㄴ) 발전소의 발전방식.

A.F.C.를 시행할 하역발전소는 配電盤, turbine control board, boiler control board가 한 장소에 집중되어있어서 전체를 파악하기가 容易하고, 현장에서의 수동조작개조가 적을수록 安全上 유리하다. 또 경제성 입장에서 보면 발전량의 여유가 많지 않는 계통에서는 발전原價가 비싼 발전소를 조정용으로 사용하는 편이 유리하다. 이 점에서 概述한 諸 要件으로 보아서 韓國電力系統에서는 수파수자능 제어용 발전소로서 甘川火力에 主調整을 담당시키고 深夜나 日曜等 강부하지에는 華川水力이나 또는 淸平水力에서 하도부 하는것이 이상적이다. 이가지는 手先 甘川火力에 應加시킬것을 提案한다.

6. A.F.C.의 선택

제어장치를 선택하는데 다음과 같은 점을 고려하여야 한다.

- ㄱ) 계통의 강압 및 그 운용방식.
- ㄴ) 조정용량 및 조정발전소의 수.
- ㄷ) 하용偏差幅.
- ㄹ) 부하변동 상황.
- ㅁ) 통신계통 telemetering의 整備상황.

ㄱ)항에 대해서는 기본방식에서 이미 말한바와같이 F.F.C.가 적당하며 ㄴ) ㄷ)항에 대해서도 이미 말한바와같이 ㄴ)에 대해서는 固定式이 아니고 0.05~0.3 정도 로 변화시킬 수 있는것이 좋고 동시에 不感帶의 幅自體도 可變이면 이상적이다. 계통이 불안정한 경우에도 許容偏差가 클수록 安定度가 커지고 不感帶의 幅을 넓을수록 A.F.C.의 동식회수가 적어지며 A.F.C. 장치의 壽命이 연장된다. 또 장래에 계통용량이 증대하면 T.B.C. (Tie line bias control)를 시행하여 전력潮流 및 경제적 부하배분도 할수있게 중앙제어장치와 연결시킬 수 있도록 미리 준비하는 것이 좋다. ㄹ) ㅁ)에 대해서는 특별히 지적할만한것은 없다.

제어장치의 원리상의 분류에 있어서 연속식과 불연속식으로 대별할 수 있는데 두 가지 모두 일정 일단이 있으나 제어장치의 壽命으로보아 불연속식은 리레이

(Relay)을 사용하고 있다. 磁氣중복기를 사용하고 있는 연속식제 미해 불리하다. A.F.C. 장치는 현재 많은 제작회사에서 만들고 있으나 주요한 것을 추려보면 다음과 같다.

1. Leeds & Northrup 型.
2. Honey-Well 型
3. G.E. 型
4. Hitachi 型
5. Toshiba 型
6. Meidensha 型

중의 것중에 G.E.의 turbo generator 를 가진 廿川火力를 조정발전소로 가장한다면 기기의 協調 G.E. 型이 우선된다. G.E. 型의 특징은 a) 연속조정방식, b) 비례 Reset 방식의 동작, c) 設定値可變, d) 실시간 보호장치완비. 등을 들수 있는데 mechanism 은 selsyn 을 사용하고 있어서 精密도가 상당히 크다. 보호장치로서는 계동자오직에 자동에서 수동으로 전환시키는 장치와, 또 이 제어방식 자체에 load limit 장치가 있어서 조정범위를 안전한계내에 유지하도록 하며 그 이상의 변동에 대해서는 경고장치가 동작하도록 되어있다. 제어장치의 고장시에도 역시 자동에서 수동으로 전환되며 경보가 울린다.

7. 定量的檢討

于先 turbine 의 speed governor 만으로서 계동주파수를 調整하는 경우를 생각한다. 먼저 靜特性을 본다면

$$df = \frac{dp}{K_L + K_G}$$

- 여기서 df : 주파수 변동
 dp : 부하변동
 K_L : 부하특성定數
 K_G : 발전기특성定數

로서 나타낼 수 있는데 1964 년도의 수준으로 검토해보자. 調整발전량을 374 MW, 조정발전소로서 廿川火力을 잡으면 총력이 132 MW 에 조정율을 5%라 가정하면 발전기특성 K_G 는 다음 식으로 주어진다.

$$K_G = \frac{\Delta P_G}{\Delta f_G} = \frac{\text{조정전력} \times \text{계동전력} \times 100}{\text{계동주파수} \times \text{가바나조정율}}$$

$$= \frac{132 \times 374 \times 100}{60 \times 5} = 0.117$$

즉 11.7%/로 가 되고 K_L 는 實測을 해야지만 대략 5%/로 가정하여 부하변동 10% 時의 주파수변동을 계산하면

$$df = \frac{10}{5 + 11.7} = 0.6(\%)$$

즉 $60 \times 0.006 = 0.36 \approx$ 의 편차가 생기게 된다. 이 편

차는 부하가 원상으로 복구하지 않는한 항상 殘留하게 되므로 offset 가 된다.

10% 부하변동이면 37.4 MW 이며 廿川火力의 정격인 132 MW 의 28.3% 이므로 실현성있는 이야기이다. 여기서 이 offset 을 F.F.C. 를 사용하여 제거해 준다면 계동에 並列된 다른 발전소도 전부 speed governor 로서 운전될 수 있으며 그렇게되면 발전력 특성이 大幅개량되므로 주파수는 매우 安定하여진다.

다음에 動特性을 보자, 제어장치에는 time lag 가 반드시 同作하고 발전기나 계동자체에 관성에 따라 時定數가 존재하므로 이러한 time const. 를 고려하면 상당히 복잡하여진다. 단순화하여 block diagram 을 그려보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

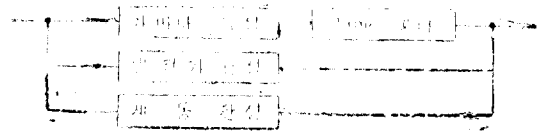


그림 1

여기서 가바나 특성만 제외하고 나머지 요소는 指數形 정식으로 표현되는데 解析의 편의상 Laplace 의 變換表를 사용하여 해석해 보기로한다. 발전기 관성과 계동관성은 feed back 요소이므로 Laplace 變換時에 $\frac{1}{1+Ts}$ 의 형식으로 해주면 線形 block 도 할 수 있으며 다음과 같이 될것이다.

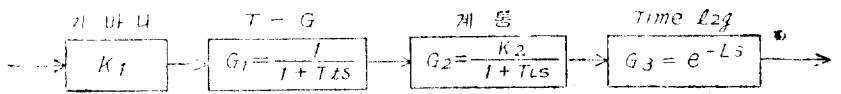


그림 2

Governor 의 比例定數 K_1 은 $\frac{1}{\text{速度調定率}}$ 이니까 調定率 0.05 이면 $K_1 = 20$, 터빈의 時定數 T_L 는 일반적으로 16 초, 계동의 비례상수 K_2 는 부하특성이니까 일반적으로 0.05, 계동의 지령수 T_L 는 水力機와 병렬운전이고 모두 speed governor 로서 운전한다고 하여 60 초, 전체의 time lag L 는 1~2 초인데 1 초로 본다면 公式에 의하여 loop 전체의 利得(Gain) G :

$$G = K_1 \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \right| \left| \frac{K_2}{\sqrt{1 + (\omega T_L)^2}} \right|$$

이고 loop 전체의 位相角 $\angle G$ 는

$$\angle G = -(\tan^{-1}(\omega T) + \tan^{-1}(\omega T_L)) - 180 \omega L / \pi$$

이다. 이 식으로 계산하면 表 4 와 같이된다.

表 4.

ω	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1.0
G(db)	+1	0	-5	-17	-40	-80
$\angle G(^{\circ})$	-13	-40	-88	-144	-181	-228

제어계통의 안정도는 gain margin 과 phase margin 이 갈수록 좋아지는데 表 4 로 보아 gain margin 은 약 40db, phase margin 은 약 140° 나 되므로 극히 안전하다. 그러나 gain 이 너무작다는것을 알 수 있으며 잔류편차가 큰것도 이때문이므로 F.F.C. 를 써서 gain 을 올리주어야 한다. $\omega < 0.05$ 의 범위, 즉 周期 125 초 이상의 변화에 대해서는 적분형 제어를 기기에 주지 않으면 offset 가 없어지지 않는다. 火力발전소에 F.F.C. 를 설치하여 조정을 담당하는데 3.5 분간 에 부하변동 10% 를 감당할 수 있는가를 검토한다는것은 중대한 의의가 있다. 즉 周期 3.5 분 이하의 변화라 한것은 3.5 분이내에 부하변동이 소멸한다는것을 말하는것이므로 발전소 기기에 그리 큰 영향을 주지 않고 복구된다는 것이기 때문이다. 이제 3.5 분간 에 계통전력 374 MW 의 10% 즉 37.4

MW 가 변동한 것으로 가정하면 1 분간에는 10.7 MW 의 변동이 되고 2 대의 발전기가 분擔한다면 毎유닛당 5.3 MW/min 가 되므로 1 臺의 용량이 66 MW 인경우 약 8% 정격출력/min. 이므로 약간 무리하기는 하지만 不可能한것은 아니라는 結論이 나오는것이다. 주파수지동제어를 실천에 옮기는데에는 조사하여야 할것이 많다. 보이라에 관한 定數들, priming 이 발생하지 않는 변화속도의 한계, 또 turbine 에 대해서도 speed governor 의 諸特性, turbine casing 内外의 허용온도차, 등 대상이 있고 계통의 부하 특성도 우리나라에서는 한번도 측정해 본 경험 이 없으니 실제로 측정을 해야만 F.F.C. 를 설계할 기초 data 를 얻을 수 있다. 이러한 것들이 앞으로 해야할 課題이며 關心있는 여러 先輩들의 協助있기를 바라는 바이다.

參 考 書 籍

- 自動周波數調整 電氣書院刊.
- 火力發電所の 自動制御 OHM 社 刊.
- (1963 年 7 月 30 日 接受)

營 業 案 內

“코-크스” 製造販賣

朝鮮骸炭工業社

社長 金 祥 洙

釜山本社및工場 釜山市東區凡一洞 252 番地
電話③ 1 0 8 4

서울事務所 서울特別市中區小公洞 7 4
電話 ② 2624 ② 5624 ③ 9309