

發電設備의 負荷追從

洪 尚 垠

韓電 技術研究院 先任研究員

1. 머릿말

전력계통의 주파수는 부하와 공급력의 평형에 의해 정해지며 이 평형 상태가 깨지면 계통주파수의 변동이 생긴다.

특히 주파수는 전력의 품질을 평가하는 3대 지표 중의 하나로 주파수의 변동은 수용가 측에 전동기의 회전수 변동을 초래하여 생산제품의 불량을 일으키고, 전력회사에서는 화력기의 터빈 진동 문제 등이 발생하게 되며 기타의 전력기기, 전기기기 역시 주파수가 일정하여야만 안정된 운전을 유지할 수 있다.

따라서 시시각각 변화하는 수요에 맞추어서 주파수를 기준치 이내로 유지하기 위해서는 계통상황에 알맞는 운용기술과 효율적인 발전설비의 제어를 필요로 한다.

현재 우리나라 전력계통의 전원 구성은 과거 火主水從에서 1980년 이후 원자력 건설의 가속화에 따라 原主火從의 형태로 변화되었으며 이같은 상황은 앞으로 상당기간 지속될 전망이다.

더우기 1986년 말부터는 기저부하용인 원자력 발전량의 점유율이 전체 발전량의 50%를 넘게 되어 과거 기저 부하용으로 건설된 화력발전기도 주파수 조정 운전(부하추종 운전)이 불가피하게 되었다.

특히 최근에는 생활수준의 향상과 정밀기기 보급

의 보편화에 따라 전력품질의 고급화 요구가 점점 하고 있어 주파수변동 허용 목표치를 1986년부터 $60 \pm 0.2 \text{ HZ}$ 에서 $60 \pm 0.1 \text{ HZ}$ 로 상향조정하여 주파수 개선을 위한 노력을 기울이고 있다.

이와같은 시점에서 한전 기술연구원에서는 「부하추종」이라는 주제를 가지고 지난 1986년말과 1987년 초 2회에 걸쳐 전력기술 Work shop을 개최한 바 있으며 각 분야에서의 전문가들이 모여 부하추종에 따른 계통운용 현황과 문제점, 그리고 그 대책에 대한 논문발표와 함께 진지한 토의를 가진바 있어 본고에서는 그 내용을 중심으로 발전설비의 부하추종 운전에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 부하변동 특성과 제어분담

2.1 부하변동 특성

전력계통에서 부하의 변동 특성을 주기별로 구분하면 다음 3종류로 나눌 수 있다.

- a) 년, 계절, 월 등 장주기로 변화하는 것
- b) 주간, 일간 등의 주기로 변화하는 것
- c) 분, 초, 단위의 단주기로 변화하는 것

여기서 a)는 계절의 변동이나 일조시간의 변동에 따른 변화이며 b)는 공장의 생산활동, 주택부하의 사용시간에 따른 변화이다. c)는 부하설비의

특성 즉 아-크로, 압연기, 전철 등 순간적인 변동을 일으키는 것으로 이들의 변동특성이 중첩하여 나타나는 변화이다.

이들을 보다 상세히 분류하면 그림 1과 같이 일반적으로 10초 정도의 주기를 갖는 미소변동분, 10초에서 2~3분 정도의 단주기 변동분(Fringe Load)

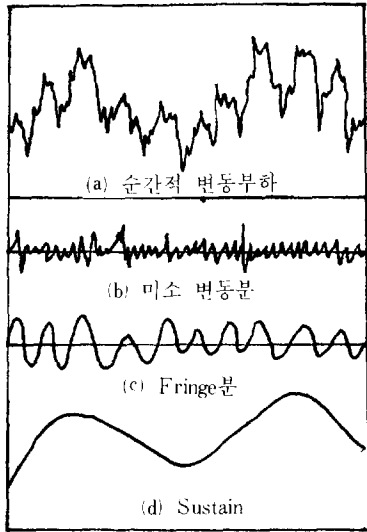


그림 1. 순간적 변동부하의 분석

d), 주기 2~3분에서 10~20분 정도 또는 그 이상의 장주기 변동분(Sustained Load)으로 나누어진다.

우리나라의 주파수 변동특성을 5분이내의 주기별로 측정한 결과는 그림 2와 같이 맥동분이 평균치 5초, 단주기분은 24초, 장주기분은 1.8분으로 나타난다. 한편 부하의 주기성과 지속성을 기준한 계통의 부하 변동특성을 실측한 결과는 그림 3과 같다.

2.2 변동부하와 제어분담

변동부하 중 맥동분은 발전기 조속기의 불감대나 자동급전장치의 제어 지연특성때문에 제어불가 영역이 되지만 부하의 자기 제어특성이나 계통발전기의 회전에너지에 의해 어느정도 흡수된다.

단주기 변동분은 Governor Free 운전에 의한 발전기 출력의 자동조정에 의해 흡수되며, 장주기 변동분중비교적 주기가 짧은 것은 LFC에 의해 흡수되고, 주기가 긴것은 ELD에 의해 흡수된다. 시간단위의 변동에 대해서는 발전기 일일기동정지(DSS: Daily Start and Stop) 등의 발전기 계획운전으로 부하추종이 가능하다. 한편 최근에는 부하예측 기술의 비약적인 발전에 따라 상당히 정확한 예측이 가능하므로 이를 이용한 ELD운용의 개선방안이 제시되고 있어 그 내용을 후술하였다.

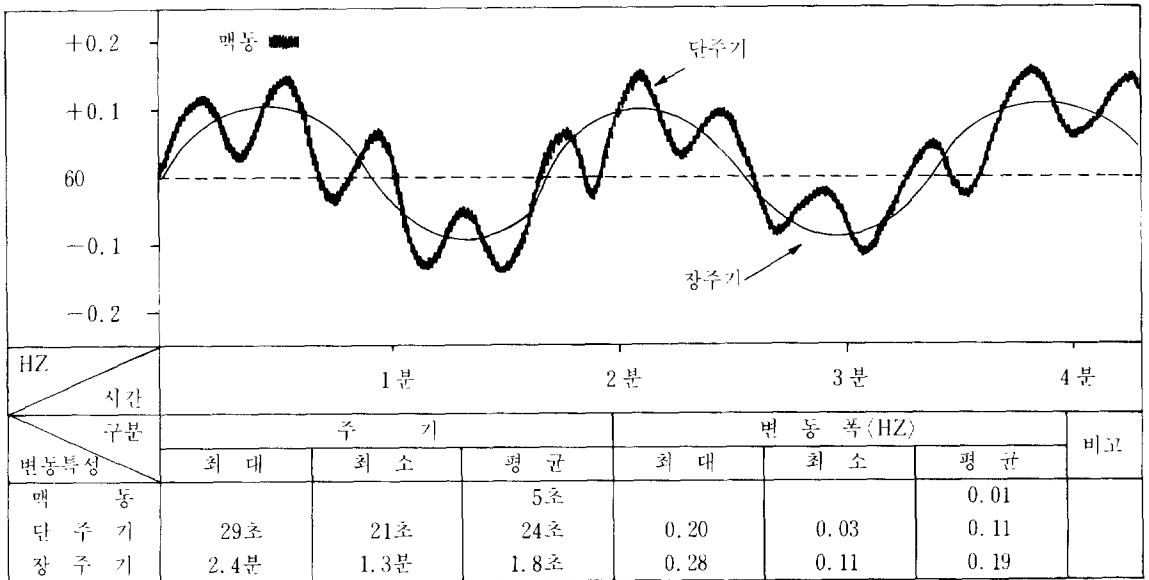


그림 2. 계통의 주파수 변동특성

특집/전력계통

이상의 부하변동 주기와 발전기 출력 조정과의 관계를 부하변동량과 관련하여 나타내면 그림 4(a)와 같으며 급전계획에서 발전기 제어까지의 제어분담 흐름도는 그림 4(b)와 같다.

그림 2에서 계통주파수 변동으로 나타난 부분은 상기한 발전기 제어량 부족 또는 지연으로 제어분담이 적절하지 않을 때 발생하는 것으로 실제의 부하변동 주기보다 짧게 나타나는 것을 알 수 있다.

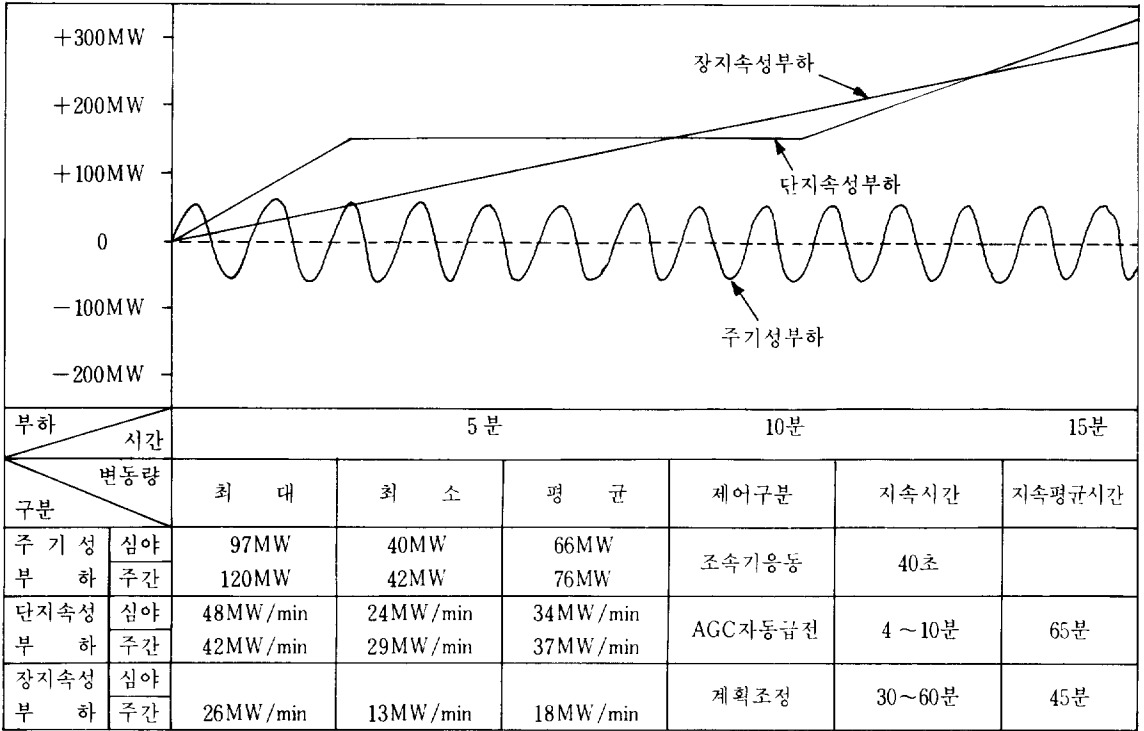


그림 3. 계통의 부하 변동 특성

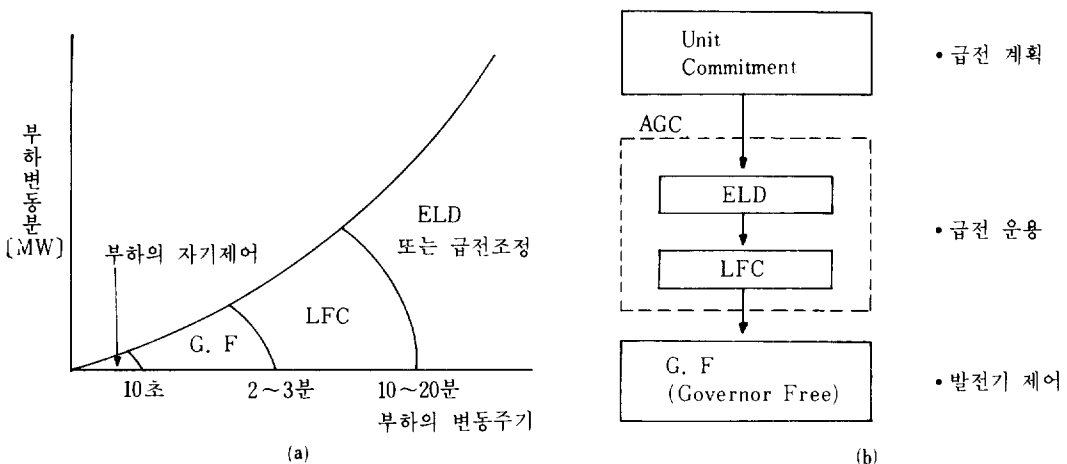


그림 4. 변동부하의 제어분담

3. 발전 설비의 부하추종 특성

3.1 수력설비

수력설비의 조속기 응답 특성은 부하추종에 가장 적합한 것으로 출력 Sustain 변동율은 100% MW / min이다. 한편 양수 발전 설비의 발전시 특성은 수력설비와 같은 특성을 가지고 있으나 양수시 양수 전동기 투입에 전정적 입력을 일시에 요구하기 때문에 양수전동기 기동 및 정지시 주파수 변동의 원인이 되고 있다.

3.2 화력설비

화력설비의 제어방식 및 특성은 참고문헌 8과 10에 상세히 설명되어 있어 이를 참고하기 바란다.

다만 화력설비의 부하추종 속도는 0.5-5% MW / min로 되어있다.

그림 5는 화력 및 수력설비에서 5% 또는 50% 부하변동이 있을 경우 일반적인 응답 특성을 나타낸 것이다.

3.3 원자력설비

원자력설비의 부하추종 운전 유형은 다음과 같이 크게 두가지로 나누어진다.

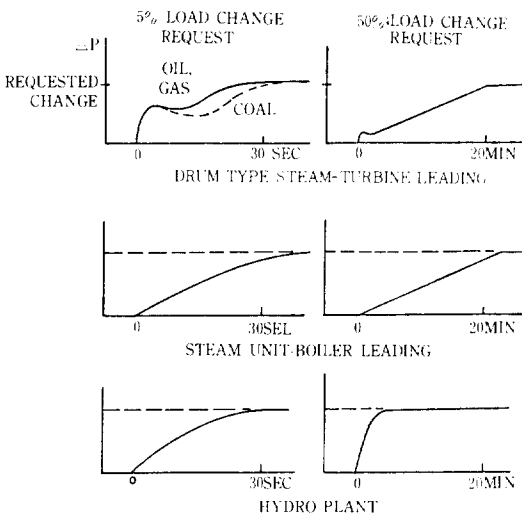


그림 5. 수·화력 설비의 부하변동시 응답특성

첫째는 수요예측에 따라 사전에 계획한대로 원자력 발전설비를 느린 속도로 증감할시기는 부하추종으로 “계획 감발 부하추종 운전 (Mode-A)”이 있다.

운전유형은 그림 6과 같이 하부를 12-3-6-3 시간 혹은 여러가지 유형으로 출력을 100% - 70% - 100%, 100% - 50% - 100% 등 증감발시간과 출력변화를 다양하게 하여 일 또는 주단위로 사전에 계획하고 계획운전에 따른 원자로 물리 및 동특성 분석을 하여 사전에 계획한 대로 제어봉을 삽입 또는 인출하고 BRS (Boron Recovery System) 및 BTRS (Boron Thermal Regeneration System)를 이용하여 보론을 농축 혹은 희석함으로써 원자력 출력을 조정하는 것이다.

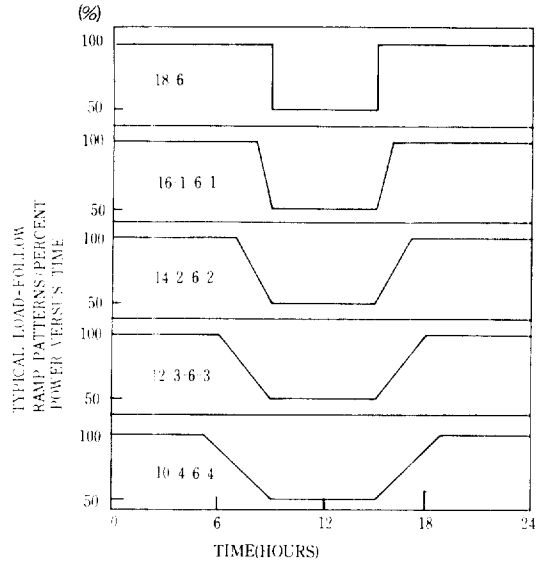


그림 6. 전형적인 부하추종 유형

둘째는 화력설비와 유사한 정도의 부하추종 운전 능력을 갖고 있어 현재 원자력 발전설비가 담당하고 있는 기저부하뿐만 아니라 중간 및 첨두부하까지 부하추종이 가능한 빠른 속도의 부하추종 운전 형태로서 프랑스에서 채택하고 있는 개선된 부하추종 운전 (Mode-G)을 말한다. 이것은 반응도가 낮은 제어봉인 Gray Rod (Steel Rod)를 사용하여 원자로 출력을 Mode-A보다 넓은 운전 영역내에서 증감시킬 수 있는 새로운 형태의 제어방식으로 프

표 1. 국내 원전의 계획감발 부하추종 운전 능력

발전소	평균출력증감속도	F _q 설계치	BRS/BTRS	부하추종능력
KNU 1	0.05 %/min	2.13	BRS	없음
KNU 2	0.3 %/min	2.34	BRS/BTRS	있음
KNU 5, 6, 7, 8	0.3 %/min	2.32	BRS/BTRS	있음
KNU 9, 10	0.3 %/min	2.35	BRS	있음

랑스의 Framatome에서 개발되어 장시간 시험 운전에서 그 유용성을 확인한 바 있다.

이상 두가지 제어방식 중 현재 국내에서 적용 가능한 방법은 첫번째 Mode-A방식으로 국내 원자력 설비의 부하추종 운전능력은 표 1과 같다.

(3)의 제약조건을 만족하면서 최소화하는 최적이론에 기초를 두고 있다.

$$\text{목적함수} : \text{Min} C = \sum_{i=1}^m C_i (P_i) \quad (1)$$

$$\text{제약조건} : \sum_{i=1}^m P_i = P_L + P_a \quad (2)$$

$$P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \quad (3)$$

4. 발전기 부하추종성을 고려한 ELD

4.1 새로운 급전 제어 방식의 도입 필요성

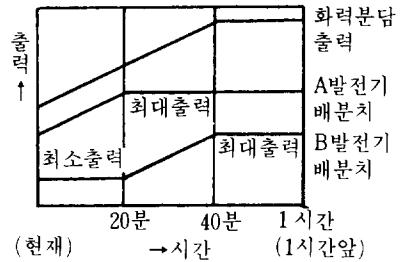
현재 화력 발전기간의 부하배분은 등증분연료비법을 따르고 있다. 이 방법은 몇분 앞의 수요를 예측하여 등증분연료비법에 따라 각 발전기에 부하를 배분하는 것으로 그 이후의 부하 동향을 무시한 정적인 부하배분법이다.

그러므로 이때에는 그림 7의 (a)와 같은 부하배분이 이루어지나 부하변동이 급격할 경우 그림 7의 (b)와 같이 빗금 부분 만큼의 수급불균형 (공급력 부족)이 발생된다. 이를 보완하기 위한 방법으로 수력발전기를 가동시켜 이 문제를 해결할 수 있으나 갈수기인 경우나 석탄화력 및 원자력발전의 비중이 높아지면 수력만으로 이를 보충하는데는 곤란한 문제가 발생한다. 따라서 1시간 이상의 부하에 대처를 이용하여 화력발전기의 부하추종 능력을 고려한 새로운 급전제어방식을 도입하게되면 그림 7의 (c)와 같이 수급평형을 유지할 수 있는 발전기의 운전출력 배분이 가능해진다.

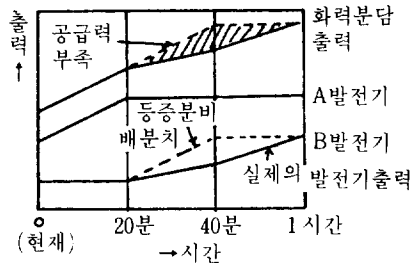
이와같은 상황은 그림 8과 같이 아침부하 상승시간과 점심시간을 전후한 부하 급변동시간대에서 발생하며 현재 주파수 유지율 역시 이 부분에서는 가장 나쁜 실적을 보이고 있다(1987. 1월 실적치)

4.2 종래의 ELD

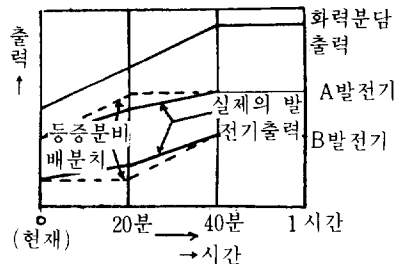
경제부하배분 계산은 식 (1)의 목적함수를 식 (2),



(a) 종래의 경제 부하배분



(b) 공급력 부족 발생 원인



(c) 부하추종력을 고려한 부하배분

그림 7. 화력기의 경제부하배분에

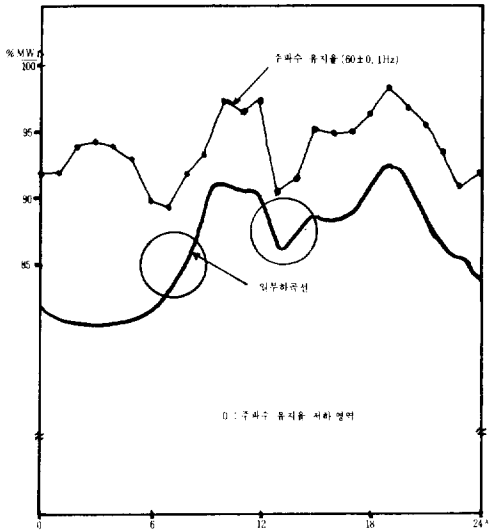


그림 8. 일반부하곡선과 시간별 주파수 유지율 실적

이상의 문제에서 최적해는 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} \cdot PF_i = \lambda \quad (4)$$

이때 송전손실을 무시할 경우 식(4)와 식(2)는 다음과 같이 간략화된다.

$$\frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} = \lambda \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i = P_d \quad (6)$$

4.3 부하추종 능력을 고려한 경제부하배분

화력발전기는 운전상하한 제한외에도 분당출력 변동속도(rate-of-response)의 제한치 ΔP_r 이 있어 부하추종 능력에 제한을 받게 된다. 따라서 이를 고려한 경제부하배분 계산에서는 N시간 앞까지 Δt 시간폭으로 부하예측을 실시하여 부하변동이 급격한 K시간대의 부하배분을 실시하게 된다. 이때의 계산식은 식(7)~(11)과 같다.

$$\text{목적함수} : \text{Min } C = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m C_i(P_i(K)) \quad (7)$$

(817)

$$\text{제약조건} : \sum_{i=1}^m P_i(K) = P_d(K) \quad (8)$$

$$P_i^L(K) \leq P_i(K) \leq P_i^H(K) \quad (9)$$

여기서

$$P_i^H(K) = \text{Min}(\bar{P}_i(K), P_i(0) + K \cdot \Delta P_r \cdot \Delta t, P_i(N) + (N-K) \cdot \Delta P_r \cdot \Delta t) \quad (10)$$

$$P_i^L(K) = \text{Max}(\underline{P}_i(K), P_i(0) - K \cdot \Delta P_r \cdot \Delta t, P_i(N) - (N-K) \cdot \Delta P_r \cdot \Delta t) \quad (11)$$

즉 그림 9와 같이 종래의 ELD에서는 운전 상하한만 고려하고 있기 때문에 부하추종성을 고려한 빗금부분 외에도 부하배분할 가능성이 있다.

그러나 부하추종성을 고려하게 되면 이를 고려한 운전가능 영역인 빗금부분으로 발전기 부하배분을 제한하게 된다.

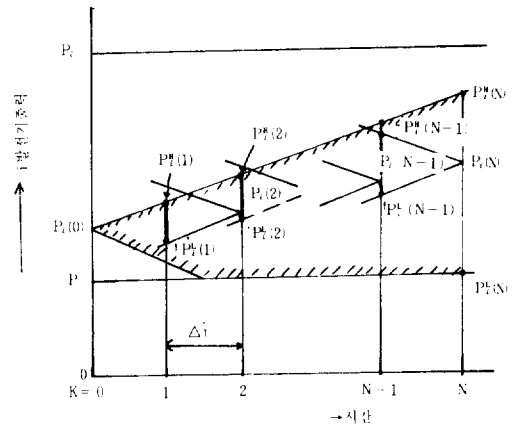


그림 9. 발전기의 운전가능 영역

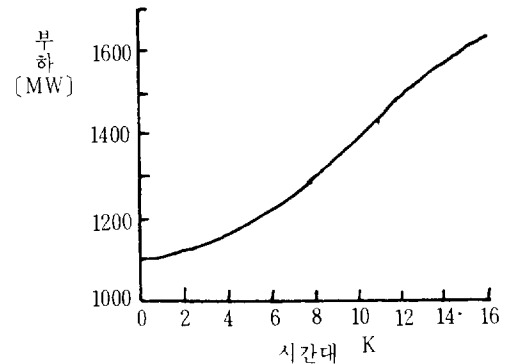
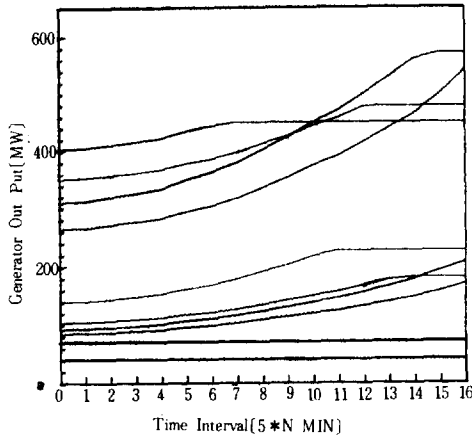
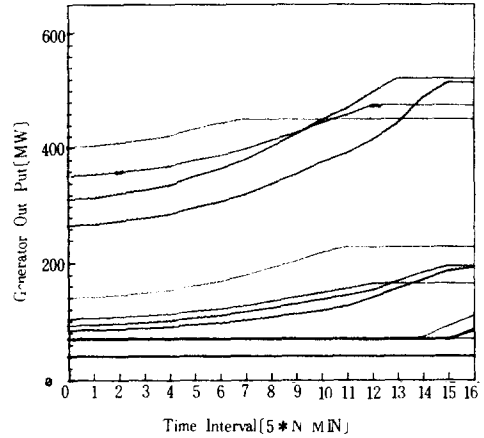


그림 10. 시간별 적용부하곡선



(a)



(b)

그림 11. 계산 결과

4. 4 계산결과

그림 10의 시간별 부하곡선을 적용할 경우 15대의 발전기에 대하여 부하추종성을 무시한 경우인 그림 11(a)와 고려하는 경우인 그림 11(b)를 비교해보면 각 발전기별 변동특성이 서로 차이가 있다. 즉 부하추종성을 고려하는 경우 부하추종성이 빠른 발전기의 출력 증가를 억제하고 느린 발전기의 출력을 증가시키는 것을 알 수 있다.

5. 부하추종의 문제점과 대책

5. 1 문제점

(1) 기저부하용인 대용량 원자력 발전기와 석탄화력 발전기의 점유율 증가는 심야 저부하 시간대에서 부하추종 설비의 부족으로 주파수 유지율의 저하 원인이 되고 있다.

(2) 양수전동기의 기동 또는 정지시 전용량이 일시에 개폐되므로 이로 인한 급격한 부하변동을 초래하여 주파수 변동이 발생한다.

(3) 부하변동이 급격한 아침 및 주간 시간대에서의 주파수 유지율이 저하한다.

(4) DSS대상 설비의 제약, Load Limit 상향운전, Governor Free가능 설비의 제약 등 설비 운용상의 미비로 인해 부하추종성이 저하한다.

5. 2 대책

(1) 원자력 발전기의 부하추종 운전실시 ; 단기적으로는 Mode-A와 같이 실현 가능한 제어방식을 적용하고 장기적으로는 Mode-G와 같은 제어 방식을 적용하여 설계 또는 건설되도록 한다.

(2) 석탄화력의 성능 개선 ; 석탄화력의 제어 방식을 대폭 개선한 최신 제어 계통설비를 연구 개발하며 가능하면 DSS도 경제적으로 실시할 수 있는 설비로 개선한다.

(3) 양수전동기 운전개선 ; 단기적으로는 양수전동기 운전시간대를 중점 관리하고 장기적으로는 양수전동기의 입력을 연속적으로 제어할 수 있는 SCR 제어장치를 개발한다.

(4) 새로운 ELD시스템의 개발 ; 최근 외국에서 개발중에 있는 동적인 ELD시스템을 개발하여 아침 및 주간 부하급변시 적용토록 한다.

(5) 발전설비 개선 ; 부하추종과 관련한 발전소 제반설비들의 성능시험과 미비점 개선 및 새로운 제어 시스템의 적용 등을 검토한다. 특히 중소용량의

휴지발전기를 DSS용 발전기로 전환하여 설비 이용율을 높인다.

6. 결 론

전력계통 운용에 있어 가장 기본이 되는 주파수 유지 문제는 최근 설비의 대응량화, 부하추종성이 낮은 원자력, 석탄화력의 점유율 증가로 상당한 어려움에 봉착하고 있고 사회적인 전력 품질 고압화 요구도 증가되는 시점에서 이에 대한 문제점과 대책을 검토하였다. 이 검토과정에서 나타난 여러가지 사항들은 현재 전력계통분야의 새로운 연구과제로 제기되고 있는 부분으로 앞으로 전력계통 뿐 아니라 부하추종과 관련되는 타 분야에서도 많은 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) G. Quazza and E. Ferrari, "Role of Power System Control in Overall System Operation", proceedings of the Symposium on Real-Time Control of Electric Power Systems, Baden, Switzerland, 1971. u
- 2) El-Abiad and Keyhabi, "Optimal Automatic Generation Control of Thermal Units of a Power System", Proceedings of the International Symposium (COPOS'75), SaO Carlos. S. P. Brazil, 18~25 Aug. 1975.
- 3) H. Mukai, J. Singh, J. H. Spare and J. Zabarszky, "A Reevaluation of the Normal Operating State Control of the Power System using Computer Control and System Theory", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, PP. 309~317, Jan. 1981.
- 4) R. P. Shulte and D. E. Badley, "Problems Associated with Generator Load Following in System Operation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, PP. 1566~1569, Jun. 1983.
- 5) R. Yokoyama, B. S. Kermanshashi, K. Aoki, T. Satoh, "Dynamic Generation Dispatching Considering Security and Environmental Operating Constraints", Ninth Power Systems Computation Conference, Aug. 1987.
- 6) 이경재, "계통운용의 현황과 전망", 전력기술 work shop(I). 한전기술연구원, 1986. 10.
- 7) 전력기술 work shop(II) "부하추종", 한전기술연구원, 1987. 3.
- 8) 허성광, "전기공학에서 본 발전제어 시스템에 관하여", 전기학회지, Vol 36, No. 7, pp. 526~537, 1987. 7.
- 9) 일본 화력 원자력 발전기술 협회, "전력계통의 운용과 전기설비 강화" 1984. 6.
- 10) 남해근, "발전설비의 모델링 및 제어", 전기학회지, Vol 36, No 1, pp. 21~27, 1987. 1.