

다양한 발전원 계통에서의 연간발전계획 전산화 시스템 개발(I)

*주진부 *전등훈 *김성학 **윤상현 **김희철*
 *한국전력공사 ** (주)프로컴시스템

Development of the annual power generation schedule package for various generation type system(I)

*Jin Boo Chu *Dong Hoon Jeon *Sung Hak Kim **Sang Hyun Yoon **Hoi Cheol Kim
 *Korea Electric Power Corporation **PROCOM Systems Corporation

Abstract

This paper is to build and develop the generation schedule program to provide a stable power supply and economic operation of power generation system. A practical algorithm is presented for solving the thermal unit commitment problem which is one of very important areas in economic operation of power system. This algorithm is based on priority ordering by th unit generation cost and it is shown that the operation cost of chosen sets of generators is the minimum. The proposed method is proven to be very practical, accurate and efficient in a KEPCO system.

1. 서론

우리 나라의 전인설비를 살펴보면 수력, LNG, 무연탄화력과 같이 에너지 사용량의 제약을 받는 발전기와 부하추중에 경직성을 갖는 원자력 발전기 등 다양한 발전기로 구성되어 있다. 발전계획은 이러한 발전기의 다양성과 운전 특성을 고려하면서 가장 안정적이고 경제적인 발전계획이 산출되어야 한다. 전력회사의 생산계획이라 할 수 있는 발전계획을 수립하기 위해서는 우선 각 발전기에 대한 연간 예방정비계획(Maintenance Schedule)을 작성하게 된다. 예방정비계획에 따라 계통에 참여할 수 있는 발전기가 확정되면 전력수요를 충족하기 위한 발전기의 기동정지 계획과 발전량 배분이 이루어지는데 이때의 의사결정기준은 일정한 공급신뢰도를 유지하면서 발전연료비의 합을 최소로 하는 데 있다. 수요 변화에 대응하여 발전기를 어떤 조합으로 발전에 참여시킬 것인가를 결정하는 기동정지계획(Unit Commitment Schedule)의 해법으로 대표적인 것은 우선순위법(Priority List Method)^[6], 동적계획법(Dynamic Programming)^[6] 및 Lagrangian relaxation에 의한 산법^[6]이 발표되었고 동적계획법의 계산시간을 줄이기 위해서 Hybrid DP법^[12]도 발표되었다. 또한 운전될 발전기별 출력을 어떻게 배분할 것인가를 결정하는 경제급전계획 (Economic Load Dispatch Schedule)의 해법으로는 등중분연료비법(Equal Lambda Method)이 널리 사용되고 있다^[6].

본 논문에서는 연료비[원/KWH]에 따라 미리 우선순위를 정해 두고 수급조건을 만족한 때까지 차례대로 병입하는 우선순위법(Priority List Method)을 기동정지계획에 적용하였다. 이 방법은 계산이 단순하지만 해가 근사적이어서 최적해를 구할 수 없다는 단점이 있다. 반면 위에 언급한 수치해석적인 기법은 발전기의 수가 많아지고 고찰 대상기간이 길어지는 경우에 계산량의 엄청난 증가로 인하여 해를 얻기 위한 상당한 계산 노력이 필요하게 된다. 따라서 실제통계용시에는 해를 구할 수 없는 경우가 발생할 가능성도 있다^[6]. 따라서 본 논문에서는 매우 단순하고 효율적인 연료비 우선순위법을 이용하여 화력기의 기동정지 문제를 해결하고 화력기, 수력기 및 양수기 등 다양한 발전원을 고려한 발전계획 알고리즘을 개발하였다. 또한 제시된 산법의 실무적 적용가능성 및 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 KEPCO계통을 대상으로 사례연구를 수행하고 그 효율성을 검토하였다.

2. 발전계획 문제의 정식화

전력계통에서 발전계획은 고찰기간 T를 통하여 주어진 운전제약조건들을 만족시키면서 화력발전비용을 최소화하는 것이다. 여기서 목적함수는 식 (1) 같이 표현할 수 있다.

$$F_T = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_{i,t})] \right\} \quad (1)$$

또한 만족해야 할 수급조건은 식 (2) 와 같다.

$$P_{d,t} = \sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{j=1}^M P_{j,t} + \sum_{k=1}^N P_{k,t} \quad (2)$$

단,

- i, j, k : 각 화력, 수력 및 양수의 인덱스
- F_T : 고찰기간 T에서 총발전비용 [원]
- F_i : i 화력기의 발전비용 [원]
- $P_{i,t}, P_{j,t}, P_{k,t}$: t 시각에 각 발전기의 출력 [MW]
- $P_{d,t}$: t 시각의 수요 [MW]

주어진 수급조건 이외에도 각 발전원별로 고유의 운전형태와 제약조건이 주어진다. 이를 위해 발전원을 화력형, 수력형 및 양수형으로 분리하였으며 각각의 특성과 제약조건은 다음과 같다.

가. 화력형 발전기

석유 및 LNG를 사용하는 화력기는 석탄화력에 비하여 출력조정 범위가 넓기 때문에 부하변동에 큰 중간 부하대를 담당하게 된다. 또한 석탄화력 및 원자력은 경제성과 출력용동특성으로 보아 기저부하를 담당하게 되며 연료비가 가장 비싼 가스터빈과 복합화력은 첨두부하시에만 운전된다. 여기에서 LNG는 도입물량과 용선계획 및 기저부하용량에 제약받게 되며 인공급을 갖하고 있는 수도권 복합 발전소는 난방부하공급 제약도 있다. 화력형 발전기의 입·출력 특성식은 식 (3) 같이 표현된다.

$$F_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (3)$$

제약조건 :

$$P_{\min i} \leq P_{i,t} \leq P_{\max i}$$

또한, 화력기의 경제배분 기본식은 식 (4) 와 같다.

$$\lambda_t = \frac{dF_{i,t}}{dP_{i,t}} \quad (4)$$

단,

- a_i, b_i, c_i : 연료비 특성계수
- $P_{\min i}, P_{\max i}$: 화력기 상한한 출력 [MW]
- λ_t : t시간 증분연료비 [원/KWH]

화력형 발전 중 석탄 및 석유화력 등의 배분시는 기동 및 정지에 따른 최

소기동정지 시간 제약을 고려해 주어야 한다. 실제적으로, 원자력 발전은 그 특성상 기동정지를 피하고 상시 운전 발전기로 지정하여 기저에서 발전하도록 하며 가스터빈은 최소기동정지 시간 제약을 무시해도 된다. 하지만 가스터빈은 기동, 정지회수에 제한을 받게 된다. 각 시각에서의 on-line된 발전기의 발전비용은 식 (5) 같이 표현이 된다.

$$F_i = \sum_{i=1}^n F_i(P_{i,t}) ; \text{ 시각별 연료비} \quad (5)$$

화력기 기동정지는 각 화력기의 연료비[원/KWh]를 기준 하여 기동우선순위를 결정하였으며, 시각별 수요가 주어지면 운전가능한 발전기 중에서 연료비순으로 수요를 상회하는 출력수준까지 차례로 기동하게 된다. 이때 각 발전기의 최소 운전/정지시간을 고려하여 제약조건으로 해당되는 발전기는 기동정지를 하지 못하게 되므로 다음 순위의 발전기가 기동정지를 하게 된다. 발전기의 운전대수가 결정되면 수요에 상응하는 시각별 증분연료비(λ_i)를 구하여 발전기별 출력배분과 연료비를 계산한다.

화력기의 기동정지계획 및 경제배분과정은 다음과 같은 절차로서 실행된다.

- 1) 전 고찰기간에 걸쳐 최대수요를 만족하도록 연료비 우선순위로 화력기(원자력포함)를 기동한다.
- 2) 전 고찰기간의 시간대별 증분연료비(람다)를 구성한다.
- 3) 수력형 발전기를 배분한다.
- 4) 총수요에서 수력배분량을 제외한 화력당당 수요를 산정한다.
- 5) 연료비 우선순위를 이용하여 화력당당 수요를 상회하도록 시간대 화력기를 기동정지를 한다.
- 6) 양수형 발전기의 운용계획을 수립한다.
- 7) 총수요에서 수력기 및 양수기 배분량을 제외한 수요에 예비력을 부가한 가상수요를 산정한다.
- 8) 가상수요를 만족하도록 화력기 기동정지를 수행한다.
- 9) on-line된 화력형 발전기를 대상으로 총수요에서 수력 및 양수를 제외한 수요로 경제배분을 수행한다.

나. 수력형 발전기

사후식 수력에 대하여는 상류의 유입량 전량을 발전하게 되므로 출력조정 이 되지 않는 것이 일반적이며, 저수지식 수력은 연간 유입량을 저수 또는 방류하면서 운영하므로 저수위의 변동이 있게 된다. 따라서 갈수기에는 저수량을 사용하면서 하류의 용수공급과 침투부하시 발전용으로 운용되고 홍수기에는 상시 발전하면서 무효방류를 억제하고 동시에 저수위로부터 제한수위까지 저수량을 확보하게 된다. 또한 수력발전기는 출력변동폭이 크기 때문에 수요급증 시간대나 양수 기동정지시 주파수 조정용으로도 활용되고 있다. 수력의 공급력 산정에 있어서 저수지식일 경우 연간 수위변동에 따라 최대출력이 변동하며 자유식인 경우는 만수위에서 운용되므로 연간 최대출력이 일정하다. 수력형 배분은 화력형과 달리 주어진 고찰기간내의 사용수량 제약 조건까지 만족시켜야 하며, 이때 수력형 발전기는 식 (6), (7)과 같은 특성식을 갖는다.

$$Q_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (6)$$

제약조건 :

$$Q_{\min j} \leq Q_{i,t} \leq Q_{\max j} ;$$

$$W_j = \sum_{t=1}^T Q_{i,t} \quad (7)$$

if $Q_{i,t} \leq Q_{\min j}$
 $Q_{i,t} = 0, \quad Q_{i,t} = Q_{\min j}$
 (최소방류량제약, 예:판당)

단,

$$Q_{i,t}, Q_{\min j}, Q_{\max j} : j \text{ 수력기 사용수량 및 상하한 } [m^3/sec]$$

$$W_j : j \text{ 수력기의 고찰기간 중 총 사용수량 } [m^3/sec]$$

본 논문에서는 사용수량 제약을 고려한 수력기의 출력배분을 수화력 협조 운용기법인 Y법을 이용하여 수력발전소별 발전출력을 배분한다. 즉, 사용수량을 입력하여 부하곡선상 가장 증분연료비가 비싼(λ_i 가 가장 큰) 부분에 수력발전을 배분하여 총발전비용을 최소화시키는 것이다. 수력형의 배분시 제약식을 고려하기 위해서는 한계치를 벗어난 발전기는 정지 또는 P_{\min} 나 P_{\max} 로 고정시키고 이를 고정발전력에 해당하는 수량 Q_{\min} 또는 Q_{\max} 를

총 사용가능 수량에서 제한 다음, 배분이 가능한 시간대에 재 배분하게 된다¹¹⁾. 즉, 수력형의 발전력 배분은 화력형 시간별 증분연료비 λ_i 와 고찰기간 중의 평균 증분수단가 γ_i 에 의해 정해지며 수화력협조식은 식 (8)과 같다.

$$\lambda_i = \frac{dF_{i,t}}{dP_{i,t}} = \gamma_i \frac{dQ_{i,t}}{dP_{i,t}} \quad (8)$$

식 (8)에서의 평균 증분수단가 γ_i 는 식 (9)에서 구할 수 있다.

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{\sum_k \lambda_k^2}{\sum_k (4a_k A)}} \quad (9)$$

$$\text{단, } A_j = W_j + \sum_{k \neq j} \left[\frac{b_j}{(4a_j)} - c_j \right]$$

수력을 배분하는 구체적인 절차를 설명하면 다음과 같다.

- 1) 선행화력기처리를 통하여 구한 증분연료비를 이용하여 각 수력기의 증분수단가를 구하고 고찰기간 동안 시각별 사용수량을 구한다.
- 2) 사용수량 한계치를 벗어난 발전기는 식 (7) 에서와 같이 정지 또는 P_{\min} 나 P_{\max} 로 고정시킨다.
- 3) 전체수량에서 고정된 사용수량을 제외한다. 그리고 나머지 배분 가능한 시간대에 걸쳐서 사용수량을 산정하며 (2)의 과정을 반복한다.
- 4) 전체수력기를 모두 배분할 때까지 (1)부터 전체루프를 반복수행한다.

다. 양수형 발전기

양수발전소는 시간대별 부하에 따라 양수운전을 하는 전동기가 되기도 하고 발전을 담당하는 발전기가 되기도 한다. 즉 원자력과 유연탄등 저렴한 연료비의 발전기들이 계통부하에서 큰 비중을 차지 않는 심야 경부하 시간대에 부하로서 운전되며 이때 저장한 에너지를 연료비가 비싼 침투부하 시간대화력의 출력을 대체하게 된다. 양수발전은 최대전력 균형표를 이용하여 수급운용, 잉여운용 및 경제운용 세 가지로 구분하여 양수발전운전여부를 사전에 결정한다. 양수 저수지용량, 수위, 발전소 효율, 발전시 최대/최소출력, 양수동력의 입력자료를 바탕으로 가장 경제적인 양수시간과 양수량을 결정 한 다음 발전시는 저수지식 수력기와 동일한 방법으로 출력을 배분하고 양수시는 최대출력으로 양수한다.

양수형 발전기의 특성식은 식 (10), (11), (12)와 같다.

$$Q_k(P_{k,t}) = a_k P_{k,t}^2 + b_k P_{k,t} + c_k \quad (10)$$

발전시 제약조건 :

$$Q_{\min k} \leq Q_{k,t} \leq Q_{\max k}$$

$$W_{k,g} \geq \sum_{t=1}^T Q_{k,t} \quad (11)$$

if $Q_{k,t} \leq Q_{\min k}$
 $Q_{k,t} = 0$

양수시 제약조건 :

$$W_{k,p} \geq \sum_{t=1}^T Q_{k,t}$$

$$Q_{k,t} = Q_{\max k} \quad (12)$$

단,

$$Q_{k,t} : k \text{ 양수기 사용수량 } [m^3/sec]$$

$$Q_{\min k}, Q_{\max k} : k \text{ 양수기 상하한 수량 } [m^3/sec]$$

$$W_{k,g} : k \text{ 양수기의 총 사용 가능수량 } [m^3/sec]$$

$$W_{k,p} : k \text{ 양수기의 저수지용량 } [m^3/sec]$$

1) 수급양수

전체 발전력이 계통수요에 미달할 경우는 계통수요를 만족할 때까지 필요한 양수발전기를 투입하며 필요한 수량은 당일 또는 주간 경부하를 이용, 양수하여 일일 수급운용에 대비토록 하고 수급양수에 의한 양수기의 발전은 수화력협조 대상에서 제외한다.

2) 경제양수

양수발전 경제성 검토를 주단위로 수행하여 양수 대수와 시기를 결정하고 발전출력 경제배분을 하는 것이다. 즉, 일일의 주간 최대부하에 대하여 양수 발전 없이도 적정 운전예비력이 확보되어 있는 경우, 요가의 화력기로 공급하는 발전량 보다 양수로 대체했을 때의 연료비용이 저렴하게 될 때 양수만

전대수를 결정하며 해당 화력은 정지하게 되고 양수형 발전기의 발전은 수화력회조로 경제배분하며 경제양수의 시간대결정은 식 (13) 이용하여 $\rho_k > 1$ 을 만족하는 시간대에 양수기를 투입한다.

$$\rho_k = \frac{\eta_k \lambda_{i, \min}}{\lambda_{i, \max}} \quad (13)$$

단,

ρ_k : 양수이득
 η_k : 양수효율

3) 잉여전력양수

화력의 최소 출력합계가 야간의 수요를 상회할 때 잉여양수를 시행하며 최소수요를 끌어올려 화력기 운용제약을 해소할 수 있도록 한다. 발전시는 수화력회조로 양수기 출력을 경제배분한다.

양수형 발전기의 발전배분은 양수량을 일간에 사용해야 할 사용수량으로 두면, 앞질의 수력형 배분산법을 양수형에도 쉽게 확장할 수 있다. 이때 발전시는 수력형으로 취급하여 배분하고 양수시는 최대용량으로 양수하게 된다. 지정된 양수시간대의 양수부하는 개통수요에 부가되며 양수된 수량은 수력형과 동일한 방법으로 출력을 배분하게 된다. 즉, 양수발전기의 경제배분은 경제양수와 잉여전력양수만을 고려한다. 본 논문에서 제시하는 기동정지 계획과 경제급전계획 흐름도는 그림 (1)과 같다.

3. 사례연구

본 논문의 발전계획은 168시간(1주일) 계산을 기준으로 하여, 각 발전기 별로 52주(8760시간)의 시간대별 발전량을 계산하는 연간발전계획의 형태를 가진다. 연간 수요자료와 예비정비계획 및 수력기의 사용수량은 해당 시스템으로부터 데이터베이스를 통하여 자동으로 입력되며 발전설비 특성 및 연료비 계수 등의 자료도 데이터베이스를 통하여 입력된다.

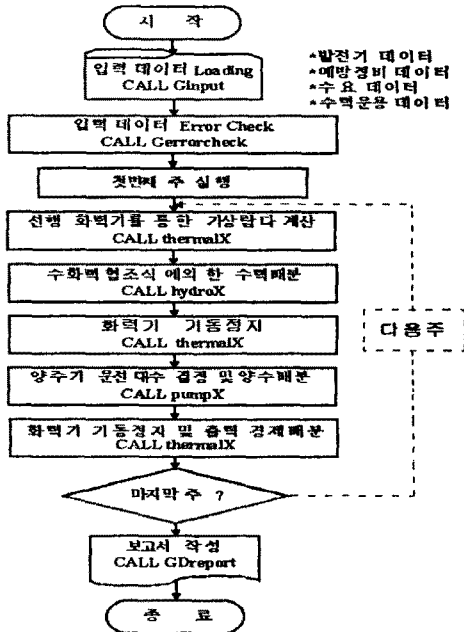


그림 1 연료비 우선 순위법에 의한 발전계획 흐름도
 Fig. 1 Flow chart of Priority based generation schedule

입력된 각종 자료는 EMS와 동일한 자료를 사용하여 처리되므로 계획과 실제 운용상의 차이를 최소화할 수 있는 발전계획의 수립이 가능해진다. 수 령된 발전계획은 일간, 주간, 월간 및 연간 베이스로 구분하여 출력된다. 또

한 양수발전과 화력 DSS운전의 경제성 검토를 위한 사례별 시뮬레이션이 수행되고 연료계약 및 사고율을 고려한 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 발전계획이 각각 산출된다.

따라서 본 논문은 발전계획의 기본구조인 1주간(168시간)에 대한 사례검토 를 하였다. 이는 연간발전계획을 위한 실행처리과정으로서 부하의 패턴은 일 주일 단위로 유사성이 존재하며, 양수발전의 경제운용은 일주일 단위로 이루어진다. 또한 수력기의 사용수량은 일주일 단위로 산정이 가능하므로 1주간 계산을 반복계산하면 연간발전계획을 작성할 수 있기 때문이다. 그리고 발전기자료는 표 (1)과 같다. 표 (1)과 같은 발전계획에 대하여 그림 (1)의 흐름 도에 의해서 1주간의 화력발전기 기동정지 계획문제에 대한 사례연구를 수 행하였다. 이 발전계획의 발전기의 총수는 95대로서 화력기 78대, 수력기 14 대, 양수기 3대이며 1월의 1주간의 최대수요는 27400.0[MW] 수준이다. 1주 간 수요패턴은 우리 나라 개통의 1월 7일부터 1주간 수요패턴을 모델로 검 토하였다. 그림 (2)는 1주간 수요곡선과 1주간 각 발전원의 배분을 그래프로 나타낸 것이다. 배분된 자료로부터 수력과 양수는 중분연료비가 비싼 즉, 고 가의 화력기가 투입된 시간에 발전을 하며 중분연료비가 싼 즉, 정부하에서 양수발전용 하고 있음을 알 수 있다. 또한 프로그램 처리시간 측면에서 PC 펜티엄급에서 1주계산시 3초정도 소요되며 이것을 연간확장시 다른 제약조 건을 추가하여도 5분 이내에 계산이 완료되므로 실 업무 수행시에는 지장이 없을 것으로 사료된다. 그림 (3)은 주간첨두수요가 발생한 화요일 배분표를 그림으로 나타낸 것이다.

발전원	설비용량	대 수	비 고	
양수	1600.00	6대		
수력	495.95	31대		
화 력	복합화력	6148.55	62대	ST 16대 GT 46대
	무연탄	1020.00	9대	
	LNG	1537.50	6대	
	OIL	4634.80	18대	
	유연탄	6800.00	14대	
원자력	9615.68	11대		

표 1 발전원별 특성
 Table.1 Structure of generation type

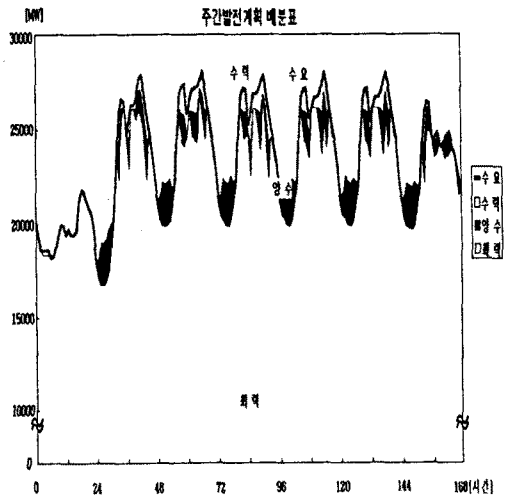


그림 2 한전계통의 주간 부하곡선과 배분표
 Fig. 2 Weekly load curve and generation schedule of KEPCO system

일간발전계획(화요일)

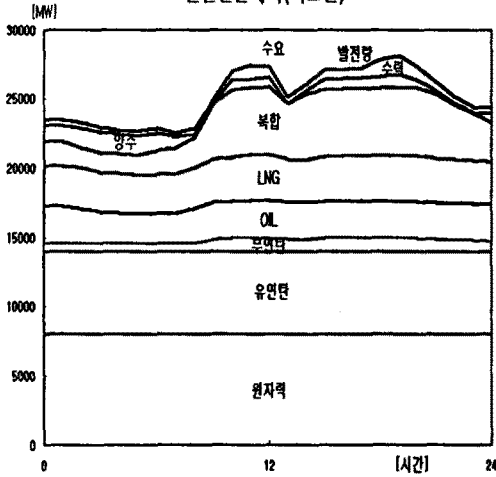


그림 3 한전계통의 일간 부하곡선과 배분표
Fig. 3 Daily load curve and generation schedule of KEPCO system

4. 결론

이상의 화력기 기동정지계획과 수화력협조에 의한 1주간의 각발전원들의 배분과정과 기동정지계획을 알아보았다.

가. 수력 및 양수발전기운용과 화력기 기동정지계획을 적절하게 협조시킴으로서 보다 정확하고 효율적인 운용계획을 수립할 수 있었다.

나. 화력기의 기동정지계획을 연료비 우선순위를 이용하여 계산시간 향상을 가져왔다.

우리 나라 실정에 맞는 각 모든 발전원을 취급하므로써 실무에 적용가능함을 입증하였다. 한편 앞으로 더 고려할 사항으로는

가. 환경제약 고려

나. 사고율 고려

다. 열병합발전소의 열공급제약 고려 등은

본 논문에서 제시하는 알고리즘을 바탕으로 하여 지속적인 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

- [1] 安在承, 金成學, 黃甲珠 "A study on the Unit Commitment for Various Generation Type System" 電氣學會論文誌 第43卷 第5號 1994.
- [2] 金俊鉉, 黃甲珠, 劉仁根 "Hybrid DP에 의한 電力系統의 發電機 並列臺數 決定에 관한 研究" 電氣學會論文誌 第33卷 第4號, 1984
- [3] P.G. Lowery, "Generating Unit Commitment by Dynamic Programming", ibid., Vol. PAS-85, pp. 422~426, 1966.
- [4] J.A Muckstadt, S.A. Loerig, "An application of Lagrangian Relaxation to scheduling in power generating systems", Operations Research, Vol.25, May/June, pp.387~403, 1977.
- [5] 李鳳容, 沈建輔, 金正勳 "화력기 운전예비력 및 운전비단가 우선순위법에 의한 화력시스템의 실제적인 기동-정지계획" 電氣學會論文誌 第37卷 第6號, 1988.
- [6] J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, New York, 1984.