

## 電力産業에서의 經營科學의 應用

한국 과학기술원 金世憲  
경영과학과(工博)

### 1. 서 론

경영과학의 諸 기법들은 여러 분야의 산업체에 있어서 생산성 향상에 많은 도움을 주고 있다. 그러나 그 응용이 한국의 산업체의 경우 널리 확산되지 못한 것도 사실이다. 크게 응용되고 있는 미국의 경우와 한국의 경우 이러한 차이를 유발하는 근본적인 이유는 바로 기업체의 규모에 있다. 같은 경영과학 기법을 이용하여 약 5%의 원가절감이 이루어 졌다고 할때 규모가 일천만불의 경우에는 50만불의 원가절감을 의미하지만 규모가 일백만불인 경우에는 5만불의 원가절감을 의미한다. 경영과학을 이용할때 드는 기본적인 비용들—즉 전문가의 인건비, 컴퓨터 사용료, 사무실 임대비 등—을 감안하게 되면 5만불의 원가절감을 위하여 경영과학 기법을 도입할 것인가에 대하여서는 이견의 여지가 많다. 그러나 50만불의 원가절감의 경우 경영과학 기법의 도입은 확실히 유리하다.

이렇게 한국의 경우 기업체의 규모가 적기 때문에 경영과학 기법의 도입이 지연되고 있으나 전력산업의 경우에는 이야기가 달라진다. 이 경우에는 한국의 경우가 미국의 경우보다 경영과학 기법의 도입으로 훨씬 큰 이득을 올릴 수 있다. 왜냐하면 미국의 경우 전력산업이 여러개의 소규모 전력회사들로 갈라져있으나 한국의 경우 전력산업은 한국전력이라는 mammoth 기업으로 통합되어 있기 때문이다.

또한 전력산업은 다른 산업에 비하여 그 운영

이 중앙집권화 되어있기 때문에 경영과학 기법의 도입으로 더 큰 성과를 얻을 수 있다. 즉 한국 전력의 給電 지령소에서 한국내의 모든 발전소의 발전을 On-line 으로 통제하고 있기 때문에 給電 지령소의 운영에 경영과학 기법을 도입함으로써 모든 발전소의 생산성향상을 도모할 수 있다.

이뿐만 아니라 한국전력은 제품(전력)의 가격이 정부에서 통제를 받는 독점 산업이기 때문에 한전 운영의 성패는 다른 기업체와 달리 판매 전략 등에 있는 것이 아니라 전력수요(부하)를 생산하기 위한 원가절감에 있다. 따라서 경영과학 기법을 통한 원가절감 또는 생산성향상은 한국전력의 운영에 직접적인 영향을 미치게 된다.

전력산업에서 응용할 수 있는 경영과학 기법들은 매우 다양하다. 재고 관리, 인사 관리 등은 다른 기업체에서와 같이 한전에서든 이용될 수 있다. 이러한 응용범위는 여타 기업체와 유사한 성격의 문제이므로 여기서는 다루지 않고 전력산업만이 갖는 경영과학기법 응용 분야를 이곳에서 소개하고자 한다.

(1) 火力發電系統의 經濟給電(Economic Dispatch of Thermal Units) : 이는 한 순간의 부하(전력수요)를 만족시키면서 최소의 연료비를 달성하기 위한 각 화력발전기(기동중인)의 운전수준을 결정하는 문제. 이것은 Convex 인 목적함수를 갖고 선형의 제약식을 갖는 최소화 문제가 된다.

(2) 火力發電系統의 起動停止 계획(Unit Commitment for Thermal Units) : 각 화력발전기

의 연료비에는 fixed cost 부분이 있으며 또한 화력발전기의 起動 및 停止에는 추가적인 비용이 든다. 이 문제는 일주일간에 있어서 각 화력발전기의 起動 및 停止 시간을 최적으로 결정하여 총 비용을 최소화하는 문제이다. 이것은 정수계획법(Integer Programming) 또는 動的 계획법(Dynamic Programming)으로 풀게 된다.

(3) 水·火力 협조(Hydrothermal Coordination) : 發電系統에는 火力뿐 아니라 水力발전기도 있다. 수력발전은 발전비용이 들지 않으나 발전량은 수량(水量)으로 제한된다. 따라서 수력발전은 발전단가가 비싼 첨두부하(尖頭부하, peak load) 때에 발전하는 것이 화력발전의 연료비를 최대로 절감할 수 있다. 따라서 이 문제는 장기적으로는(약 1달~1년) 갈수기와 홍수기를 예측하고 강우량을 예측하여 발전계획을 수립하는 문제와 단기적으로는(1일~1주일) 매 시간대별 발전계획을 수립하여 화력발전 연료비 절감을 극대화하는 방안을 모색하는 문제이다.

(4) 揚水 발전 최적 운영(pumped-storage generation scheduling) : 發電系統에는 수력 및 화력 발전기 외에도 전력을 저장하는 역할을 하는 양수발전이 있다. 양수발전은 발전단가가 싼 심야에 낮은 저수지의 물을 높은 저수지로 퍼올렸다가 발전단가가 비싼 첨두부하때에 발전함으로써 연료비를 절감한다. 이 문제는 단기적으로(1일~1주일) 매 시간대별 양수발전 운영 계획을 수립하여 연료비 절감을 극대화한다.

(5) 電源開發계획(Electric utility expansion planning) : 앞으로 장기간(20년~30년)에 걸쳐서 미래의 부하를 예측하여 이 부하를 만족시키면서 이의 공급 총비용(신규발전소 건설비+연료비)을 최소로 하는 발전소 건설계획을 수립하는 문제이다. 이 문제는 경영과학에서 잘 알려진 Capacity Expansion Planning에 속하는 문제이다. 이 문제는 정수계획법이나 동적 계획법을 이용하여 해를 구한다.

위에서 열거한 예 이외에도 다음과 같은 응용분야가 있다. 그러나 이 분야들은 전력산업에만 국한된 것이 아니고 대부분의 다른 산업에서도

나타나는 응용분야이므로 간단한 열거만 하여 보겠다.

(6) 通正燃料 재고수준 결정(Fuel Management Problem) : 한전의 경우 연료의 재고는 약 2,000억원에 달하고 있다. 따라서 이의 적정관리를 통한 재고비용(이자비용+창고비용)의 절감은 효과가 막대하다. 경영과학의 재고이론을 도입할 필요가 있다.

(7) 燃料 수송 계획(Fuel Transportation Problem) : 여러 종류의 연료에 관하여 產地 또는 도입 항구에서부터 중간 창고 또는 발전소까지의 수송계획을 수립하여 適期에 수송되게 하면서 연료비 및 수송비를 최소로 줄이는 문제이다. 이는 경영과학의 선형계획(Linear Programming)으로 해결할 수 있다.

다음절 부터는 처음의 5가지 응용분야에 관하여 좀더 상세히 설명하겠다. 여기서는 예제를 통하여 이해를 하는 방법으로 설명하고자 한다. 상세한 내용은 참고문헌을 살펴보기 바란다.

## 2. 火力發電系統의 經濟給電

먼저 경제급전부터 살펴보도록 하자.  $N$ 개의 화력발전기로  $P_R$ 의 전력수요(부하)를 공급하는 시스템을 생각해 보자. 그림 1은 이 시스템을 나타낸다. 각 발전기의 input  $F_i$ 는 그 발전기의 시간당 연료비를 나타낸다. Output  $P_i$ 는 그 발전기에 의해 생산된 전력이다. 따라서 전체비용은  $F_i$ 의 합이며 제약식은 각 발전기의 output  $P_i$ 의 합이  $P_R$ 과 같아져야 한다는 것이다. 각 발전기의 시간당 연료비  $F_i$ 는 당연히 발전량  $P_i$ 의 함수이다.

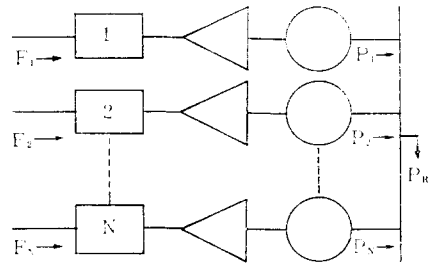


그림 1. 부하  $P_R$ 을 공급하는  $N$ 개의 화력발전기 체계

각 발전기의 발전량은 최대용량  $\bar{P}_i$ 를 넘지 못하며 또한 최소 발전수준  $P_i$ 보다는 커야 한다. 이러한 내용을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \\ & \text{subject to } \sum_{i=1}^N P_i = P_R \\ & \quad P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, \quad i=1, \dots, N \end{aligned}$$

이 문제는 선형의 제약식을 갖으며 비선형의 목적함수를 갖는 비선형 계획문제이다. 이 문제는  $F_i(P_i)$ 라는 함수의 성질에 따라 쉽게 풀릴 수도 있고 또한 매우 풀기 어려울 수도 있다. 그런데 발전기 공학에 관한 연구 결과에 의하면  $F_i(P_i)$ 는 볼록함수(Convex function)임이 알려져 있다. 따라서 위의 문제는 선형의 제약식을 갖는 볼록비선형 문제가 되어 그 최적해를 쉽게 구할 수 있다.

다음과 같은 세대의 화력발전기를 갖는 시스템을 생각해 보자.

- 제 1 번기 :  $\bar{P}_1 = 600\text{MW}$   
 $P_2 = 150\text{MW}$   
 $F_1(P_1) = 510 + 7.2P_1 + 0.00142P_1^2$
- 제 2 번기 :  $\bar{P}_2 = 400\text{MW}$   
 $\bar{P}_2 = 100\text{MW}$   
 $F_2(P_2) = 310 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2$
- 제 3 번기 :  $\bar{P}_3 = 200\text{MW}$   
 $P_3 = 50\text{MW}$   
 $F_3(P_3) = 78.0 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2$

부하가 850MW가 걸렸을 때의 각 발전기의 최적 운영수준을 Kuhn-Tucker Condition을 이용하여 구하면

$$\begin{aligned} P_1^* &= 393.2(\text{MW}) \\ P_2^* &= 334.6(\text{MW}) \\ P_3^* &= 122.2(\text{MW}) \end{aligned}$$

가 된다. 특히 여기서  $P_1^*, P_2^*, P_3^*$ 는 모두 최대 및 최소 발전 수준 내에 있다. 따라서 이때에  $\frac{dF_1(P_1^*)}{dP_1} = \frac{dF_2(P_2^*)}{dP_2} = \frac{dF_3(P_3^*)}{dP_3}$ 의 관계가 성립한다. 즉 각 발전기의 증분연료비(Marginal Cost)가 같게끔 운전하는 것이 최적의 운전이다.

이러한 경제급전은 현재 이미 한전에서라도 도입하여 최적 운영에 사용되고 있다.

### 3. 火力發電系統의 起動停止 계획

전력 부하의 패턴은 낮에는 높고 밤에는 크게 떨어지는 주기적인 현상을 보인다. 또한 주말에는 부하가 크게 떨어진다. 또한 각 발전기는 기동 및 정지에 비용이 들게 되며 각 발전기의 연료비는 일단 운전을 하면 최소한 필요한 고정비가 있다. 이에 따라 변화하는 부하 패턴을 따라 발전기의 기동 및 정지를 적절히 조절하여 줄 필요가 있다.

앞에서 본 예제를 다시 생각하여 보자. 부하가 550MW 일 때 어느 발전기를 켜서 운전하는 것이 비용이 최소가 되는가 알아보자. 표 1은 모든 가능한 Combination의 최소 비용을 계산해 본 것이다.

표 1. 부하 550 MW를 공급하는 비용

1 번기	2 번기	3 번기	최 대 발전용량	최 소 발전수준	최 적 운 영						총 비 용
					$P_1$	$P_2$	$P_3$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	
OFF	OFF	OFF	0	0				불 가 능			
OFF	OFF	ON	200	50				불 가 능			
OFF	ON	OFF	400	100				불 가 능			
OFF	ON	ON	600	150	0	400	150	0	3,760	1,382	5,142
ON	OFF	OFF	600	150	550	0	0	4,900	0	0	4,900
ON	OFF	ON	800	200	500	0	50	4,465	0	489	4,954
ON	ON	OFF	1,000	250	295	255	0	2,758	2,438	0	5,196
ON	ON	ON	1,200	300	267	233	50	2,537	2,244	489	5,270

이 표를 보면 부하 550MW를 공급하는 최소의 비용은 모두 다 켜졌을 때가 아니고 1번기 하나만 켜졌을 때 이루어진다. 이것은 소위 “Fixed Cost”의 개념으로 설명된다. 즉 하나의 발전기를 켜면 그 운전수준에 관계없이 들어가는 연료비가 있다. 이 Fixed Cost가 크기 때문에 3개를 모두 키는 것 보다는 제일 경제적인 것 하나만 켜는 것이 더 효율적이다.

이제 부하가 시간에 따라서 달라지는 경우를 생각해 보자. 그림 2는 한가지 예를 보여주고 있다. 이와같이 부하가 변하는 경우 peak 부하에서는 많은 발전기를 켜야하며 저부하일 때에는 적은 발전기로 운전하는 것이 경제적이다. 이에따라 어느 발전기를 기동 및 정지 시킬 것인지 결정하여야 한다. 여러개의 화력발전기들(약 40~50기)이 있는 한국의 경우 이 문제는 상당히 복잡한 계산을 필요로 한다.

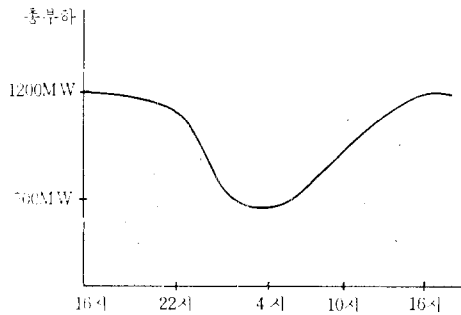


그림 2. 전형적 부하패턴

이 예제의 경우 앞에서 한 것과 같이 매시간에 대한 최적의 Combination을 구하여 보면 최적의 기동정지 계획은 그림 3과 같다.

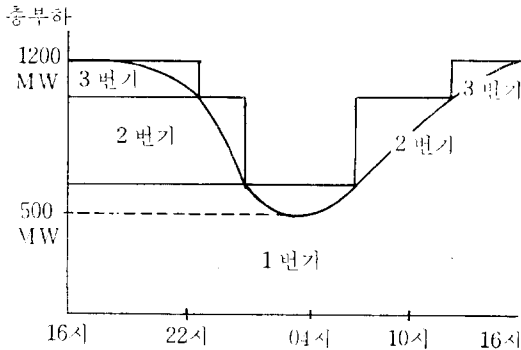


그림 3. 최적기동 정지 계획

이 예제에서는 매우 간단한 경우만을 살펴 보았으나 실제의 운용에 이용하기 위해서는 다음의 요소들을 감안하여야 한다.

(1) 예비력 제약 조건 : 예비력(spinning reserve)은 현재 켜져있는 발전기들의 최대 발전용량과 실제 발전 출력의 차이를 말한다. 즉 현재 켜져 있는 발전기로서 추가적으로 더 발전할 수 있는 여유를 말한다. 예상치 않았던 사고로 작동중인 발전기가 갑자기 꺼질 수 있기 때문에 이때 필요한 전력을 제대로 공급하기 위해서는 예비력을 유지하여야 한다. 따라서 적당한 수준의 예비력을 유지하는 범위에서 起動停止 계획을 수립하여야 한다.

(2) 발전기 특성에 따른 제약 : 화력발전기를 기동하는 경우 이에 필요한 일정한 시간이 필요하다. 따라서 일단 발전기를 켜다가 다시 키는 경우 최소한의 시간 간격이 필요하다. 즉 Minimum Down time이 필요하다. 또한 起動된 후 최대 출력으로까지 올라가는 데에는 일정한 시간이 필요하다. 즉 Ramping time을 감안하여야 한다. 또한 停止된 후 보일러의 물이 식는 속도에 관한 제약도 필요하다.

(3) 수력 및 양수 발전 : 뒤에 설명하게 될 수력발전 및 양수발전의 운전도 감안하여 기동 정지를 하여야 한다.

이러한 점들을 모두 감안하여 화력발전기의 기동 및 정지를 결정함으로써 Feasible한 최적 운전계획을 세울 수 있다.

#### 4. 水·火力 협조

여기서는 단기적인 수화력 협조에 관하여 논의하여 보자. 간단한 예로 한개의 수력발전소가 있는 시스템을 생각해 보자(그림 4).  $P_{Hj}$ 는 시간  $j$ 에서의 수력발전량,  $P_{Sj}$ 는 시간  $j$ 에서의 화력발전량,  $P_{Lj}$ 는 시간  $j$ 에서의 부하를 나타낸다. 시간  $j$ 에서 화력발전량  $P_{Sj}$ 를 생산하는 연료비를  $F_j(P_{Sj})$ 라 하자. 또한 수력발전량  $P_H$ 를 생산하는데 드는 물의 양을  $q(P_H)$ 라 하자. 그러면 이 문제는 다음의 최적화 문제가 된다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{j=1}^T F_j(P_{Sj}) \\ & \text{subject to } P_{Hj} + P_{Sj} = P_{Lj}, j=1, \dots, T \\ & \sum_{i=1}^T q(P_{Hi}) \leq q_{TOT}, \end{aligned}$$

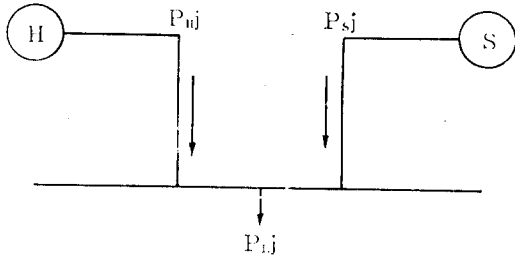


그림 4. 수화력 계통

여기서  $P_{Lj}$ 와 최대 사용가능 수량  $q_{TOT}$ 는 주어진 상수이다. 이 문제를 풀어서 각 시간대에 있어서의 수력 발전량과 화력 발전량을 최적으로 구할 수 있다.

실제 운용에 있어서는 또한 다음의 요소들을 감안하여야 한다.

- (1) 저수지에 시간대별 물의 자연유입량
- (2) 계획기간중 저수지의 수위가 너무 높아서 발전없이 방류하는 물의 양
- (3) 저수지의 조절 능력—즉 저수지의 용량이 크면 수량 조절 기능이 크며 저수지의 용량이 매우 적으면 수량조절 기능이 적다. 수량조절 기능이 큰 수력 발전소를 저수지식(reservoir)라 하고 수량조절 기능이 작은(최대 발전할 경우 1~2시간 내에 저장된 물을 모두 사용할 때) 수력 발전소를 自流式(Run-of-the-River)이라 한다. 이에 대하여 고려해야 한다.

(4) 수력발전소의 연계성(Hydraulically Coupled System) : 상류의 발전소의 발전은 하류의 발전소의 물량 유입을 의미하므로 연계되어 있는 수력 발전소들의 경우 이점을 감안하여야 한다. 한강계에 있는 수력발전소들이 하나의 예이다.

(5) 환경 및 홍수조절 능력—하천은 최소한의 물량이 흘러야 하천으로서의 역할을 하기 때문

에 이에 대하여 감안하여야 한다. 또한 홍수기에 있어서는 수·화력 협조보다 홍수 방지가 우선적으로 감안되어야 한다.

### 5. 揚水발전 최적 운영

간단한 하나의 예로 한개의 양수 발전소와 화력 시스템을 생각해 보자. (그림 5)에서  $P_{Sj}$ 는 시간  $j$ 에서의 화력발전량,  $P_{Pi}$ 는 시간  $i$ 에서 揚水(pumping)을 위하여 사용된 전력량,  $P_{Hk}$ 는 시간  $k$ 에서 양수 발전으로 발전한 양이다. 전력  $P_{Pi}$ 로 양수된 물의 양을  $r(P_{Pi})$ 라 하고 전력  $P_{Hk}$ 를 발전하기 위해 사용된 물의 양을  $q(P_{Hk})$ 라 하자.

$V_k$ 를 시간  $k$ 에서의 상단 저수지에 있는 물의 양이라 하자. 그러면  $V_{k+1}$ 와  $V_k$ 는 다음의 관계를 갖는다.

$$V_{k+1} = V_k + r(P_{Pk}) - q(P_{Hk}).$$

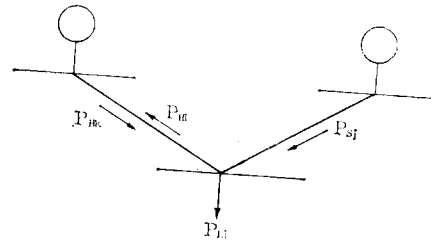


그림 5 양수 발전과 화력 시스템

상단부의 물의 양은 음수가 될 수 없으므로  $V_k \geq 0$ 이다. 따라서 이 문제는 다음과 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{j=1}^T F_j(P_{Sj}) \\ & \text{subject to } P_{Sj} + P_{Hj} - P_{Pi} = P_{Lj}, j=1, \dots, T \\ & V_{j+1} = V_j + r(P_{Pi}) - q(P_{Hj}), j=1, \dots, T-1 \\ & V_1 = V_S \\ & V_T = V_e \\ & V_j \geq 0 \text{ for } j=1, \dots, T, \end{aligned}$$

여기서 부하  $P_{Lj}$ , 초기 상단 저수지물량  $V_S$ , 말기 상단저수지 물량  $V_e$ 는 모두 상수이다. 대개의 양수 발전의 경우 효율은 약 70%이

다. 즉 100kw의 전력으로 물을 끌어 올려서 이 물로 발전하는 경우 약 70kW를 다시 얻게 된다. 따라서 전력으로 불 때는 30%의 손실을 의미한다. 그러나 비용으로 불 때는 이득을 얻을 수 있다. 심야의 경우 부하가 낮기 때문에 전력 생산비용은 저렴한 반면 낮의 침두부하가 걸렸을 때는 생산비용이 비싸다. 예를들어 심야의 경우 kw 당 발전비용이 100원이고 낮의 침두부하가 걸렸을때 생산 비용이 200원이라 하자. 그러면 100kw의 전력으로 양수하여 70kw를 얻는 경우 비용은  $100 \times 100 = 10,000$ 원이며, 이득은  $70 \times 200 = 14,000$  원이 되므로 약 4,000 원의 비용절감을 이룩할 수 있다.

## 6. 발전계통의 단기 최적 운영

이제 앞에서 논의한 經濟給電, 起動停止계획, 水火力협조 및 揚水 운전 등을 모두 감안하여 단기적인(1일 또는 1주일) 최적운행을 하여야 한다. 이를 위해서는 먼저 계획기간 중의 부하를 예측하여야 한다. 이렇게 부하를 만족시키며 예비력(spinning reserve) 수준을 유지하면서 각 발전기의 운전 특성에 따른 제약을 만족시키며 수력 발전계의 연계성을 감안하고 저수지의 저수 능력을 감안하며 양수 발전소의 상단 저수지의 저수 능력 등을 감안하여 일주일간의 총 비용을 최소로 하는 운영 Schedule을 찾아야 한다.

이 문제는 소위 Mixed Integer Programming으로 정식화 할 수 있으나 이것을 소위 정수 계획법을 이용하여 해를 구한다는 것은 거의 불가능할 정도의 크기의 문제가 된다. 따라서 이 문제는 Module 별로 구분하여 Iterative한 방법을 이용하여 해를 구하는 것이 현실적이다. 이것을 flow-chart로 나타내 보면 그림 6과 같다.

처음에 부하 예측을 한다. 수력 및 양수 발전이 없다고 가정하고 이 부하를 만족하는 기동정지 계획을 수립한다. 이 기동정지 계획下에서 최적의 수력발전 계획 및 양수 발전계획을 수립한다. 이 수력 및 양수발전 계획이 고정되었다고 가정하고 화력의 기동정지 계획을 수립한다. 이 계획이 전 iteration에서 구한 계획과 변함이

없으면 이 Algorithm은 끝난다. 변화가 있으면 다시 반복한다.

현재 한국 과학기술원 경영과학과에서는 이러한 Algorithm에 기초를 두어 발전계통의 최적 운영을 위한 Software개발을 한전의 용역을 받아 수행하고 있다. 이에 대한 자세한 내용은 저자에게 문의하여 주시기 바란다.

## 7. 電源開發 계획

이제 마지막으로 전원개발 계획에 관하여 소개하겠다. 앞에서 나온 내용들은 모두 단기적인 최적 운영에 관한 내용이다. 따라서 신규 발전소의 건설이나 노후 발전소의 폐기와 같은 문제는 다루지 않았으며 현재 운전가능한 발전기 시스템을 어떻게 최적으로 운영하는가에 관한 내용만을 다루었다.

그러나 연료비를 절감하는 다른 방법으로는 열효율이 낮은 노후 발전기를 폐기하고 효율이 좋은 신규발전기로 대체하는 방안이다. 또한 앞으로 부하가 매년 10% 이상씩 증가할 것으로 예측되므로 신규발전소의 추가 건설은 필연적으로 이루어 져야 한다.

발전소의 종류는 크게 나누어 수력, 양수 및 화력으로 구분될 수 있으나 화력은 그 연료의 종류에 따라 원자력, 석탄화력 및 석유화력 등으로 구분된다. 이들은 각각 연료비에 있어서 크게 차이가 나며 또한 건설비에 있어서도 큰 차이가 난다. 뿐만아니라 같은 원자력 발전소도 그 발전능력에 따라 대형과 소형 등으로 구분하게 된다. 이에 따라 앞으로 장기적으로(20년~40년) 불 때 향후의 부하를 만족하고 전력공급의 reliability를 유지하면서 총비용(=건설비+연료비+운영비)을 최소로 하기 위해서는 언제 어떤 종류를 몇대 건설하여야 하는가를 결정할 필요가 있다.

이러한 종류의 문제를 Capacity Expansion Planning이라 부르며 전력산업 이외에도 거의 모든 산업에서 부딪치는 문제이다. 특히 규모의 경제(Economy of Scale)가 매우 큰 철강산업, 정유산업, 화학산업 등 중화학공업에서 많이 응

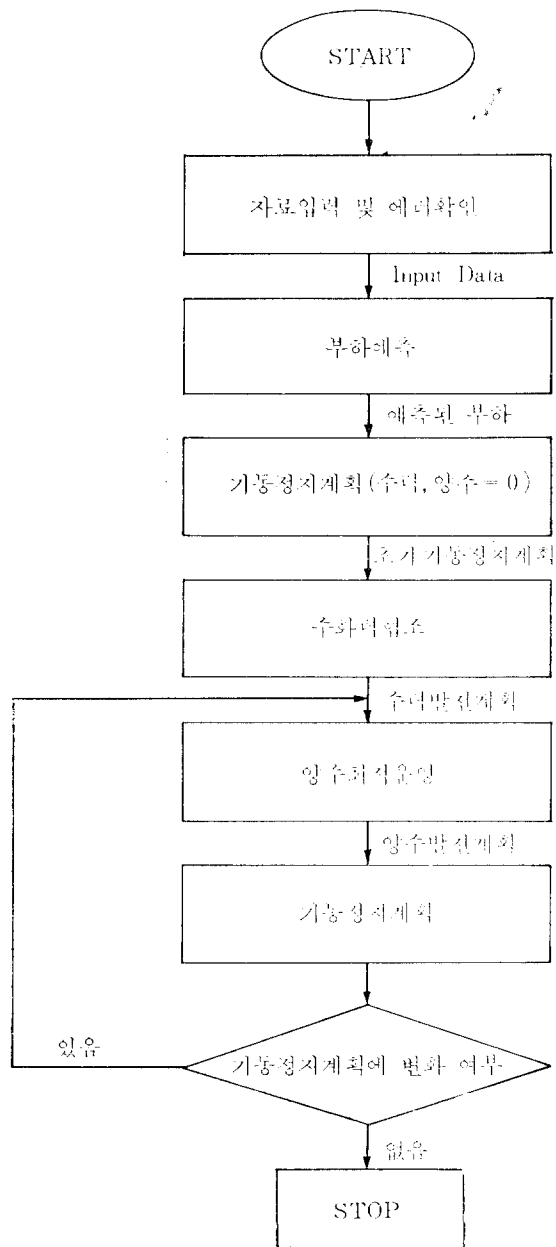


그림 6. 수력, 양수 및 화력 시스템의 최적 운영계획을 위한 Algorithm.

용되고 있다. 그러나 특히 전력산업의 경우 이러한 장기적인 planning을 통한 효과는 기타 산업보다 더욱 클 것으로 기대 된다. 그 첫째 이유는 전력수요는 매우 안정적으로 성장하고 있다는 것이다. 수출을 진제로 하는 중화학공업의 경우 해외 시장의 변동 여부에 따라 수요는 급격히 변화할 수 있기 때문에 불확실성이 매우 높은 반면 전력은 전량 내수만 하고 있기 때문에 GNP 성장율과 매우 밀접하게 안정적으로 성장하고 있다. 따라서 좀 더 용이한 planning을 할 수 있다는 점이다. 또한 둘째 이유는 전력산업이 완전한 독점이기 때문에 판매 전략의 성과에 따른 수요의 변동이 거의 없다는 점이다.

전원개발계획 문제는 정수계획법 또는 동적 계획법 및 회적제어이론등으로 그 해를 구할 수 있다. 현재 한전 및 동력자원연구소 등에서는 소위 WASP(Wien Automatic System Planning Package)를 IAEA(International Atomic Energy Agency)에서 도입하여 전원개발 계획에 응용하고 있다. 이 WASP는 동적 계획법을 이용하고 있다. 이에 대한 자세한 내용은 WASP-III User's Manual을 참고하기 바란다. 여기서는 매우 단순화시킨 예제를 통하여 이것을 소개하고자 한다.

(예제) 1985년에 전력 생산능력이 1,000MW이며 부하도 1,000MW인 한 나라를 생각해 보자(예비력 및 reliability는 이 예제에서는 무시하고 있다) 앞으로의 전력수요 증가를 예측하여 본 결과 매 5년마다 400MW가 늘어날 것으로 추정된다(표 2).

두 가지 종류의 발전소의 신규 건설에 대하여 생각하고 있다. 이의 건설비용은 1985년 dollar로 표현하고 적절한 할인율을 적용하여 1985년

표 2. 수 요 예 측

연 도	수 요 예 측(MW)
1985	1,000
1990	1,400
1995	1,800
2000	2,200

표 3. 건설비용(현재가치, 억불(1985년 dollar))

종류 \ 년도	1990	1995	2000
500MW	1.0	0.5	0.25
1,000MW	1.6	0.8	0.4

도의 현재 가치로 표현하여 보면 (표 3)과 같다.

이 표를 보면 상당한 규모의 경제가 있음을 알 수 있다.

발전 능력이 부하보다 크면 이의 연료비 및 운전비는 정상이라고 가정하자. 발전능력이 모자랄 경우 500MW 이상의 능력부족이 되면 이것은 계획 대상에서 제외시킨다. 반면 500MW 이내로 부족하게 되면 전력 공급시장에 따른 penalty 비용을 감안하여야 한다. 표 4는 각 연도에 전력공급에 지장이 있을 경우 penalty 비용을 현재가치로 표시한 것이다.

표 4. penalty 비용(현재가치, 억불(1985년 dollar))

년도 \ 부족분	1990	1995	2000
100MW	0.2	0.1	0.05
200MW	0.4	0.2	0.1
300MW	0.6	0.3	0.15
400MW	0.8	0.4	0.2

이제 동일한 양의 전력을 공급하는 연료비 및 운영비는 발전 시설의 종류 및 규모에 관계없다고

표 5. 최 적 건 설 계 획(비용 : 현재가치, 억불(1985년 dollar))

년 도	준 공 계 획	발 전 시 설	건 설 비	penalty 비용	총 비 용
1985	—	1,000MW	0	0	0
1990	500MW 1대	1,500MW	1.0	0	1.0
1995	500MW 1대	2,000MW	0.5	0	0.5
2000	—	2,000MW	0	0.1	0.1
					합 계 1.6



가정하자(실제에 있어서는 크게 관계있음). 그러면 이 문제는 건설비와 penalty 비용의 합을 최소로 하는 건설계획을 수립하는 문제가 된다. 이것을 동적 계획법을 이용하여 풀게 되면 최적의 해는 표 5와 같음을 알 수 있다.

이 예는 매우 단순화된 문제이다. 실제로 운영하는데 있어서는 다음을 감안하여야 한다.

(1) 각 발전기의 열효율곡선 및 연료비 및 운영비

(2) 수력 발전소의 수량 조절기능

(3) Reliability에 관한 제약. 이것은 LOLP (Loss-of-Load Probability)로 나타내며 Simulation을 통하여 구해진다.

(4) 예비력에 관한 제약: 이것은 LOLP와 깊은 관계가 있는 제약이다. 때로는 예비력에 관한 제약은 명시적으로 해줄 필요가 있다.

이러한 점들을 모두 감안하여 동적 계획법을 적용하게 되면 소위 "curse of dimensionality"에 부딪힌다. 즉 각 period에 있어서의 state의 갯수가 엄청나게 늘어남으로써 도저히 풀 수 없을 정도의 문제가 된다. 따라서 각 period의 state의 수를 줄이는 작업을 해 줄 필요가 있다 이를 위해서 WASP에서는 화력발전기의 Load order를 도입하고 있으며 또한 불가능해 보이거나 Optimal이 아닌 state는 미리 제거해 버리는 과정을 거치게 된다. 따라서 WASP에서는 어느정도 근사치의 최적해가 구해지기 마련이다. 또한 동적계획법을 이용하기 때문에 발전한계비용을 구하기 어렵고 따라서 전력요금제도와 연계시키기가 어렵다. 이를 보완하기 위하여

서는 회적재어이론을 이용하는 MNI(Model of National Investment)등 다른 Model을 생각해 볼 필요도 있다.

마지막으로 WASP에는 재무제약식이 들어있지 않다. 즉 건설비와 연료비 등의 현재가치를 최소로 하는 전원개발 계획을 구할 뿐 이를 위하여 내자(內資) 및 외자(外資)의 조달가능 여부에 관하여서는 제약을 둘 수 없다. 이는 자본이 풍부한 선진국의 경우 커다란 문제점을 야기시키지 않으나 만성적인 외자 부족과 자본 부족을 겪는 한국을 비롯한 개발도상국의 경우 심각한 문제를 야기시키고 있다. 즉 WASP는 때로는 뒷받침할 자금조달이 불가능한 건설계획을 제공하기 때문이다. 이는 아무리 현재가치가 최소화되었다 하더라도 수행 불가능한 계획이 되는 것이다.

현재 국내 에너지 정책에 관련된 여러 전문가들 사이에 WASP의 문제점이 많이 거론되고 있는데 이 문제점들 중 많은 부분이 이러한 재무제약에 관련된 내용들이다. 앞으로 WASP에 재무제약식을 도입하는 작업을 한다면 이는 전원개발 계획의 정책분석에 많은 실제적 도움이 될 것으로 생각된다.

#### 〈참고 문헌〉

1. 김 선웅, 화력발전 계통의 최적 운영방법, 한국 과학기술원 경영과학과 석사논문, 1983.
2. 김 세헌, 안병훈, 고 석하, 이 승규, 염 건, 기동정지 계획을 위한 Software 개발-연구보고서, 한국 과학기술원 경영과학과, 발간예정
3. Allen Wood and Bruce Wolleyberg, *Power Generation, Operation and Control*, John Wiley & Sons 1984.
4. WASP-III *User's Manual*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1980.