

## 화력발전소 주변환경제약을 고려한 발전계획 알고리즘에 관한 연구

이 범<sup>1)</sup>, 김용하<sup>2)</sup>, 차준민<sup>3)</sup>, 노규민<sup>4)</sup>, 오광해<sup>5)</sup>, 남궁재용<sup>6)</sup>, 송길영<sup>7)</sup>  
 여수수산대 전기과, 인천대 전기과, 대진대 전기과, 충청전문대 전기과, 철도연구원, 고려대 전기과

### Generation Planning Algorithm Considering Environmental Constraints Near Thermal Power Plants

B. Lee, Y.H. Kim, J.M. Cha, K.M. Roh, K.H. Oh, J.Y. Namkung, K.Y. Song  
 Yosu National Fisheries University, Incheon University, Dajin University,  
 Chungchung junior college, Railroad Research Institute, Korea University

**Abstract** - A new generation planning algorithm considering environmental constraint by using fuzzy technique is developed. This algorithm has a new formula which can consider environmental constraints and an effective solving method which has newly developed fuzzy dual procedure. By using this algorithm, economic generation planning considering environmental constraints can be scheduled. The usefulness of this method is verified by applying it to the test system.

#### 1. 서 론

발전전력의 매우 큰 비중을 차지하는 화력발전소는 화석연료를 사용하여 발전하기 때문에 불가피하게 다량의 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 등 오염물질을 배출하며, 따라서 발전소 주변의 환경에 악영향을 미치고 있다.

화력발전소 주변의 환경을 개선하기 위한 방법으로 본 연구에서는 화력발전기의 운용계획 수정만으로 오염물질 배출량을 제한치 이내로 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

오염물질 배출량특성은 첫째로 총연료비와 Trade-off관계에 있으며, [1][2] 둘째로 수급계약 등 기존 제약조건과 달리 약간의 위반시에도 그다지 심각한 문제를 일으키지는 않는다. 따라서 오염물질 배출량제약을 경제적으로 만족시킬 수 있는 운용계획을 수립하기 위하여는 퍼지기법의 도입이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 대규모계통에서도 용이하게 운용계획을 수립할 수 있는 Lagrangian Relaxation법(이하 L.R.법)[3]과 퍼지기법[4]을 사용하여 지역별 오염물질 배출량제약을 고려한 화력발전기의 발전계획을 수립할 수 있는 해법을 제안하였다. 우선 종래에 목적함수로 사용되어온 총연료비 뿐만아니라 지역별 오염물질 배출량도 새로운 승수를 사용하여 목적함수에 포함시켜 구성함으로써, 이들 물질의 배출량을 고려할 수 있는 발전계획문제를 정식화하였다. 또한 정식화된 문제로 부터 확대목적함수를 구성하고, 구성된 확대목적함수

를 원문제-쌍대문제(Primal-Dual)로 푸는 과정에서 쌍대문제의 해를 효율적이면서도 합리적으로 구할 수 있는 방법을 개발하였다. 이 방법은 보다 빠르고 확실하게 해를 구할 수 있는 최적화기법[5]을 사용하여 수급계약 및 운전예비력제약에 관련된 Lagrange승수를 구하고, 총연료비와 지역별 오염물질 배출량 사이의 Trade-off관계를 이용한 퍼지 최적화기법을 사용하는 제안한 방법에 의해 지역별 오염물질 발생량과 관계되는 승수를 구할 수 있도록 한 것이다. 이로써 보다 경제적으로 오염물질 배출량제약을 만족시킬 수 있는 합리적인 화력발전기의 운용계획을 수립할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 그 특성 및 유용성을 검증하였다.

#### 2. 오염물질 배출량을 고려한 발전계획문제의 정식화

##### 2.1 목적함수

##### (1) 총연료비

$$Fuel = \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{a_N} \{ (\alpha_i (P_t^i)^2 + \beta_i P_t^i + \gamma_i) U_t^i + S_t^i \} \quad (1)$$

여기서,

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ :  $i$  화력발전기의 연료비 계수

$T$ : 고찰기간 ( $t=1 \sim T$ )

$A$ : 계통의 지역수 ( $a=1 \sim A$ )

$a_N$ :  $a$  지역의 발전기 수 ( $i=a_1 \sim a_N$ )

$P_t^i$ :  $t$  시간대에서의 발전기  $i$ 의 출력 [MW]

$U_t^i$ :  $t$  시간대에서의 발전기  $i$ 의 상태  
 ( $U_t^i = 1$ : 운전,  $0$ : 정지)

$S_t^i$ :  $t$  시간대에서의 발전기  $i$ 의 기동 또는 정지비용 [천원]

##### (2) 지역별 오염물질 배출량

$$EP_a^t = \sum_{i=1}^{a_N} f_i \{ (\alpha_i (P_t^i)^2 + \beta_i P_t^i + \gamma_i) U_t^i + S_t^i \} \text{ [Kg]} \quad (2)$$

여기서,

$f_i$ : 발전기  $i$ 의 오염물질 배출계수 [Kg/천원]

(3) 지역별 오염물질 배출량을 고려한 목적함수

이 목적함수는 총연료비에 지역별 오염물질 배출량을 더하여 구성하였으며, 본 연구에서는  $e'_a$ 라는 승수를 도입하여 식(3)와 같은 새로운 목적함수를 구성함으로써 각각의 목적함수를 모두 동일한 단위로 처리할 수 있도록 하였다.

$$F = \text{Min} \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} \{ (\alpha_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i) U_i^t + S_i^t \} + \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A [ e'_a \sum_{i=1}^{G_i} f_i \{ (\alpha_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i) U_i^t + S_i^t \} ] \right] \quad (3)$$

또한 본 연구에서는 지역별 오염물질 배출량이 제한치를 초과하지 않을 때에는 배출량에 대한 비용을 무시하기 위하여  $e'_a$ 를 0으로 하고, 제한치를 초과하는 경우에만 값을 갖도록 하였다.

## 2.2 제약조건

### 2.2.1 결합제약조건

#### (1) 수급제약

$$\sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} U_i^t P_i^t = D^t \quad (4)$$

여기서,  $D^t$  : t 시간대에서의 부하 [MW]

#### (2) 운전예비력제약

$$\sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} U_i^t P_i^{Rt} \geq D^t + R^t \quad (5)$$

여기서,

$$P_i^{Rt} = \text{Min}(P_i^{t-1} + \Delta P_{i,up}^{\max}, P_i^{\max}) \text{ [MW]}$$

$R^t$  : t 시간대에서의 운전예비력 [MW]

$P_i^{\max}$  : 발전기 i의 최대출력 [MW]

$\Delta P_{i,up}^{\max}$  : 발전기 i의 출력 증감발을 [MW/h]

### 2.2.2 국지제약조건

#### (1) 출력 상하한치

#### (2) 최소 운전 및 정지시간

#### (3) 단위시간당 출력 증감발을

## 3. 퍼지기법을 사용한 새로운 화력발전기

### 운용계획문제의 해법

#### 3.1 확대목적함수의 구성

확대목적함수는 식(3)의 목적함수와 식(4)~(5)의 결합제약조건을 승수  $\lambda'$ ,  $\mu'$ 로 포함시켜 구성하였다.

$$\begin{aligned} L(P, U, \lambda, \mu, e_a) &= \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} \{ (\alpha_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i) U_i^t + S_i^t \} \\ &+ \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A [ e'_a \sum_{i=1}^{G_i} f_i \{ (\alpha_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i) U_i^t + S_i^t \} ] \\ &+ \sum_{t=1}^T [ \lambda'(D^t - \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} U_i^t P_i^t) \\ &+ \mu'(D^t + R^t - \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} U_i^t P_i^{Rt}) ] \end{aligned} \quad (6)$$

## 3.2 확대목적함수의 해법

### 3.2.1 원문제의 해법[5]

쌍대문제에서 결정된 Lagrange 승수를 고정시킨 다음, 식(6)을 다음과 같이  $q_i$ 로 표현되는 소문제로 각기 분할하고, 각 소문제를 1기 동적계획법을 사용하여 기동정지계획을 결정한다.

$$L(P, U, \lambda, \mu, e_a) = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^{G_i} q_i + \text{Constant term} \quad (7)$$

여기서,

$$q_i = \sum_{t=1}^T [ (1 + e'_a f_i) \{ (\alpha_i(P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i) U_i^t + S_i^t \} - \lambda' U_i^t P_i^t - \mu' U_i^t P_i^{Rt} ] \quad (8)$$

$$\text{Constant term} = \sum_{t=1}^T [ \lambda' D^t + \mu' (D^t + R^t) ]$$

### 3.2.2 쌍대문제의 해법

확대목적함수를 최대화시킬 수 있는 최적의 승수를 구하며, 이때의 승수값은 결합제약조건을 위반하지 않으면서 목적함수를 최소화 시키게 된다[3].

$$\begin{aligned} &\text{Maximize [ Minimize } L(P, U, \lambda, \mu, e_a) \text{]} \\ &\lambda, \mu, e_a \quad P, U \end{aligned} \quad (9)$$

#### 3.2.2.1 승수 $\lambda'$ , $\mu'$ 의 계산

이들 승수  $\lambda'$ ,  $\mu'$ ,  $e'_a$ 중 Lagrange 승수인  $\lambda'$ ,  $\mu'$ 를 구하기 위하여 종래에는 Subgradient법 등이 사용되어 왔으나, 최근 탐색간격 결정 등의 문제를 해결하여 보다 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있는 방법[5]이 개발되었다. 따라서 보다 효율적으로 해를 구하기 위하여 본 연구에서도 이 방법을 사용하였다.

#### 3.2.2.2 승수 $e'_a$ 의 계산

승수  $e'_a$ 는 운용계획 입안자의 의사결정에 영향을 받으며, 총연료비와 지역별 오염물질 배출량은 Trade-off관계를 갖고 있어 승수  $e'_a$ 의 값에 따라 결과가 달라지기 때문에 Lagrange 승수  $\lambda'$ ,  $\mu'$ 와 동일한 방법으로 해를 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 총연료비와 지역별 오염물질 배출량에 대하여 멤버쉽함수를 구성하고, 이들에 대한 퍼지의 사결정을 함으로써 목적함수를 가장 합리적으로 최소화할 수 있는 승수를 구할 수 있도록 하였다.

#### (1) 퍼지 멤버쉽함수의 구성

① 총연료비에 대한 멤버쉽함수[4]

$$\mu_F = \text{EXP}[-W_F \Delta C(M)] \quad (10)$$

여기서,

$$\Delta C(M) = \frac{F(M) - F_{\min}}{F_{\min}}$$

$$F_{\min} = \text{Min } F(M)$$

$W_F$  : 총연료비에 대한 가중계수

② 지역별 오염물질 배출량에 대한 멤버쉽함수

$$\mu_{EP_a} = \text{EXP}[-W_{EP_a} \Delta E'_a(M)] \quad (11)$$

$$\mu_{EP_a} = 1 \quad (\text{if } \Delta E'_a(M) < 0)$$

여기서,

$$\Delta E'_a(M) = \frac{EP'_a(M) - EP'_{a \text{ ref}}}{EP'_{a \text{ ref}}}$$

$EP'_{a \text{ ref}}$  : 오염물질발생 제한치 [Kg/h]

$W_{EP_a}$  : 오염물질 배출량에 대한 가중계수

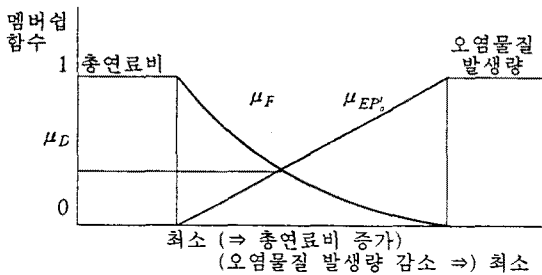
## (2) 퍼지의사결정

퍼지의사결정은 승수  $e'_a$ 를 최적으로 결정하여 총 연료비와 지역별 오염물질 배출량의 만족도 모두가 최대가 될 수 있도록 하여야 하므로, 총연료비와 지역별 시간대별 오염물질 배출량의 멤버쉽함수들의 '∩'이 최대가 되는 승수를 구하였다. 하나의  $e'_a$ 값에 대한 퍼지 멤버쉽함수와 의사결정 과정을 그림.1에 나타내었다.

$$\mu_D = \min(\mu_F, \mu_{EP_1}, \mu_{EP_2}, \mu_{EP_3}, \dots, \mu_{EP_n}) \quad (12)$$

이들 만족해들 중에서 가장 바람직한 대체안은 다음과 같을 때 얻어지며, 따라서 이때의  $e'_a$ 가 입안자의 의사결정을 반영하면서 가장 경제적으로 지역 오염물질 배출량을 만족시키는 승수가 된다.

$$\mu_D^* = \max[\min(\mu_F, \mu_{EP_1}, \mu_{EP_2}, \mu_{EP_3}, \dots, \mu_{EP_n})] \quad (13)$$



Min total fuel cost (⇒ increase fuel cost)  
(⇒ decrease pollution) Min pollution

그림. 1 퍼지 멤버쉽함수 및 의사결정과정

## 4. 사례연구

### 4.1 시험계통의 특성

시험계통의 발전기는 8기이며, 이들 발전기는 3개 지역(A,B,C지역)에 분포되어 있는 것으로 하였다. 이들 발전기의 특성, 오염물질발생량 제한치 및 가중치는 표.1에 나타내었으며, 부하 및 운전예비력은 그림.2에 나타내었다.

### 4.2 적용결과

(1) 제안한 방법에 의한 운용계획의 변화

제안한 방법의 특성을 알아보기 위하여 ① 지역

표. 1 발전기 특성 및 환경관련 자료

UNIT	TYPE	$C'_i$			$f_i$	$P_i^{\min}$ [Mw]	$P_i^{\max}$ [Mw]	가동비용 [S]	최소 가동시간 [h]	최대 가동시간 [h]
		$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$						
1	N	.001	4.5	1042	0.000	600	1200	21072	100	100
2	C	.001	8.4	305	1.379	100	500	3512	10	8
3	C	.002	8.6	315	1.379	100	500	3512	10	8
4	C	.002	8.9	178	0.443	50	200	1756	7	5
5	C	.003	9.1	184	0.443	50	200	1756	7	5
6	O	.004	26.0	248	0.109	100	400	3512	5	3
7	G	.035	31.8	161	0.054	50	200	1756	2	2
8	G	.036	32.8	165	0.054	50	200	1756	2	2

지역	발전기	오염물질발생 허용(권장)치 [Kg/h]	$W_F$	$W_{EP_a}$ (t=1·T)
A	1, 4, 5	3,000	1	12
B	2, 3	8,000	1	12
C	6, 7, 8	3,000	1	12

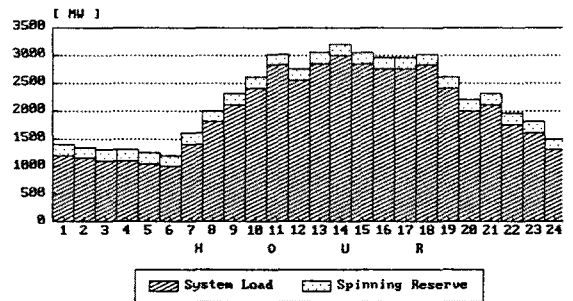


그림. 2 대상부하 및 운전예비력

별 오염물질 배출량을 고려하지 않은 종래의 방법(이하 방법 1), ② 지역별 오염물질 배출량을 고려한 목적함수를 사용함으로써 배출량을 엄격히 규제하는 방법(이하 방법 2), ③ 지역별 오염물질 배출량을 고려한 목적함수 및 퍼지기법을 사용하는 제안한 방법(이하 방법 3)으로 각각 기동정지계획 및 발전출력을 구하고, 오염물질 배출량을 ②, ③의 방법으로 고려함에 따른 기동정지계획의 변화를 그림.3에 나타내었으며, 이 중 부하가 큰 시간대 13~15에서의 각 발전기의 발전출력의 변화를 표.2에 나타내었다. 또한 오염물질발생 제한치를 크게 초과하는 B지역의 시간대 8~21에 대한 배출량을 시간대별로 그림.4에 나타내었으며, 오염물질 배출량이 가장 큰 시간대 14에서의 배출량과 총연료비를 표.3에 나타내었다.

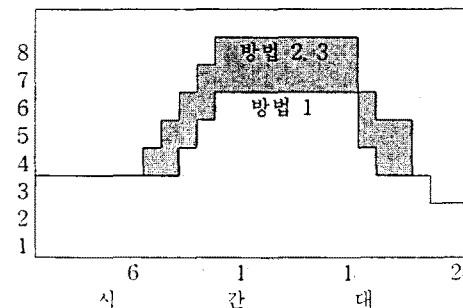


그림. 3 기동정지계획

표. 2 발전출력

발전기	방법	시간대 14 (부하 3000MW)			시간대 13, 15 (부하 2850 MW)		
		방법 1	방법 2	방법 3	방법 1	방법 2	방법 3
A 지역	1	1200	1200	1200	1200	1200	1200
	4	200	200	200	200	200	200
	5	200	200	200	200	200	200
B 지역	2	500	348	348	500	338	346
	3	500	252	252	500	243	251
C 지역	6	400	400	400	250	400	400
	7	0	200	200	0	143	135
	8	0	200	200	0	126	118
총 발전량		3000	3000	3000	2850	2850	2850

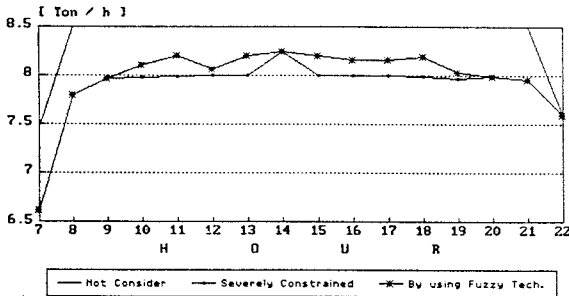


그림. 4 시간대별 오염물질 배출량 (B지역)

표. 3 총연료비 및 오염물질 발생량

방법	결과	총연료비 [S]	최대 오염물질 발생량 [Kg/h] (시간대 14)		
			A 지역	B 지역	C 지역
방법 1		429,057	1,842	13,584 (70% 초과)	1,238
방법 2		528,715	1,842	8,244 (3% 초과)	2,106
방법 3		525,570	1,842	8,244 (3% 초과)	2,106

우선, ①의 방법으로 운용계획 수립시 A,C 지역에서는 전시간대에서 오염물질 배출량이 제한치를 초과하지 않으나, B지역에서는 시간대 8~21에서 크게 초과(최대 70%)하고 있다. ②의 방법은 그림.3 및 표.2와 같이 제한치를 초과하고 있는 B지역의 발전출력을 줄이고 제한치에 여유가 있는 C지역의 발전기를 추가 기동 및 발전출력을 증가시키는 새로운 운용계획을 수립함으로써, 그림.4 및 표.3과 같이 시간대 14를 제외한 모든 시간대에서 A, B, C 지역 모두의 오염물질 배출량을 제한치 이내로 만족시키고 있다. 시간대 14에서는 배출량이 약 3% 초과하고 있는데, 이와 같은 현상은 이 시간대에서 부하가 매우 커서 수급계약과 배출량계약 모두를 만족시킬 수 없기 때문에 발생한다. 이와 같은 제약조건의 고려에 따라 총연료비는 약 23% 증가하고 있음을 알 수 있다.

반면 제안한 ③의 방법은 ②의 방법에서 얻어지는 최대 초과치를 같게 유지하면서도 보다 경제적인(총연료비가 약 0.6% 감소) 운용계획이 수립되고 있다. 그림.5에서 ②의 방법이 시간대 14에서만 오염물질 배출량 제한치를 약 3% 초과 하는 데 반하

여, ③의 방법은 시간대 10~19에 걸쳐 배출량 제한치를 최대 초과치인 약 3% 한도내에서 초과 운전토록 하여 최대 오염물질 발생량을 증가시키지 않으면서도 경제적인 운용을 가능하도록 한 것이다. 이와 같은 결과로부터 ②, ③의 방법은 ①의 방법에서 고려할 수 없었던 오염물질 배출량을 고려할 수 있으며, 특히 ③의 방법은 ②의 방법과 같은 만족도를 유지하면서도 보다 경제적인 운용계획을 구할 수 있다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 승수  $e'_0$ 를 지역별 오염물질 배출량에 도입함으로써 배출량을 총연료비와 동일한 단위로 처리할 수 있도록 하는 새로운 목적함수를 구성하였다.
- 2) 쌍대문제를 풀에 있어 퍼지기법을 통하여 지역별 오염물질 배출량을 합리적으로 만족시키면서도 보다 경제적인 화력발전기의 운용계획을 수립할 수 있는 승수  $e'_0$ 를 구할 수 있는 방법을 개발하였다.
- 3) 최근에 개발된 수급계약 및 운전예비력계약과 관련된 승수를 보다 빠르고 확실하게 구할 수 있는 최적화 기법과 함께 적용할 수 있도록하여 보다 효율적으로 쌍대문제를 풀 수 있도록 하였다.
- 4) 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 유용성을 검증하였으며, 제안한방법이 동일한 만족도를 유지하면서도 보다 경제적인 운용계획을 수립할 수 있음을 입증하였다.
- 5) 추후 오염물질 배출량이 제한치를 크게 초과하는 지역에 대하여 화력발전기의 사용연료 대체까지도 고려할 수 있는 화력발전기 운용계획 기법의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] T. Gjengedal, S. Johansen, O. Hansen, "A Qualitative Approach to Economic-Environmental Dispatch-Treatment of Multiple Pollutants", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.7, No.3, pp.367-372, 1992. 9.
- [2] B. S. Kermanshahi, Y. Wu, K. Yasuda, R. Yokoyama, "Environmental Marginal Cost Evaluation by Non-inferiority Surface", IEEE Trans. Power Systems, Vol.5, No.4, 1990. 11.
- [3] A. Merlin, P. Sandrin, "A New Method for Unit Commitment at Electricite de France", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, No.5, pp.1218-1225, 1983. 5.
- [4] C. C. Su, Y. Y. Hsu, "Fuzzy Dynamic Programming: An Application to Unit Commitment", IEEE Trans. Power System, Vol.6, No.3, 1991. 8.
- [5] 이범, 김용하, 송길영, "L.R.법에 의한 새로운 기동정지계획 알고리즘의 개발", 전기학회논문지, 제 44권 제 10호, pp.1239~1246, 1995. 10.