퍼지 多目的函數를 이용한 發電機補修維持計劃의 樹立

The Generator Maintenance Scheduling using Fuzzy Multi-criteria

崔 在 錫*, 都 大 鎬**, 李 泰 仁***

Jaeseok Choi*, Daeho Do**, Taein Lee***

ABSTRACT

A new technique using integer programming based on fuzzy multi-criteria function is proposed for generator maintenance scheduling. Minimization maintenance delay cost and maximization reserve power are considered for fuzzy multi-criteria function. To obtain an optimal solution for generator maintenance scheduling under fuzzy environment, fuzzy multi-criteria integer programming is used. In the maintenance scheduling, a characteristic feature of the presented approach is that the crisp constraints with uncertainty can be taken into account by using fuzzy set theory and so more flexible solution can be obtained.

The effectiveness of the proposed approach is demonstrated by the simulation results.

I. 서 론

발전계통의 운용계획이란 '여러가지 기술적 제약조건 아래에서 높은 신뢰성을 지닌 최경제적인 운용방법을 찾자'는 최적화 문제의 일종으로서 이의 체계화및 자동화 문제에 관한 중요성은 매우 크다고 할 수있다. 그러나 대상기간의 차이, 불확실성의 정도, 그리고 계산량의 증대등의 문제 때문에 아직까지 전체적인 최적운용을 계획하기란 힘들고 다음과 같이 시기별로 분류하여 각 경우의 최적화를 꾀하므로써 이의 목적을 이루어 나가고 있는 실정이다.(1)

(1) 장기운용계획(補修計劃, 核燃料 交替計劃, 貯水池 長期 運用計劃등)

(2) 단기운용계획(起動停止計劃, 貯水池 短期 運用計劃, 經濟給電등)

이중 보수계획은 발전계통 운용계획중 경제성및 신뢰성 모두에 영향을 미치는 중요한

* 경상대학교 전기공학과 조교수

** 포항전문대학 전기과 교수

*** 한국전력공사 삼천포화력발전소

계획문제로서 최적 보수 계획은 공급 예비율을 높여 줄수 있을 뿐만 아니라, 발전기의 건설시기도 연기할 수있기 때문에 발전기 건설비의 절감효과를 기대할 수 있으며 발전 비용및 보수유지비용의 감소를 가져다 준다.

발전기의 보수유지계획수립을 위하여 1972년 W.R. Christiaanse 및 A.H Palmer 가 최소 예비력을 최대화 시키는 앨고리즘을 발표하였으며 같은해에 L.L Garver가 발전기 사고율을 고려한 '위험의 평준화 (Risk levelizing)' 모델을 제시하였다. 이어 1975년 Zurn과 Quintana는 처음으로 상태 공간법을 이용하여 발전 비용과 신뢰도를 함께 목적함수로 삼아서 정식화 하는데 성공하고 이를 DPSA(Dynamic Programming Successive Approximation)로 처리하여 그 실용성을 입증하였다.[2]

그후 1983년 Z. Yamayee, K.Sidenblad 및 M. Yoshimura는 수십번씩이나 계산이 요구되는 발전비용 계산을 속도가 훨씬 빠른 Cumulant법으로 처리하는 앨고리즘을 제시하고 이를 신뢰도만을 목적함수로 한 결과와 서로 비교함으로써 보수계획의 목적함수는 최적값 근처에서 평탄하며 신뢰도목적함수가 계산 소요시간의 측면에서는 효과적이지만 계산시간이 그다지 장해가 되지 않는다면 발전비용을 목적함수로 삼는것이 더욱 효과적이라고 주장하는 입장을 취하는 연구를 발표하기도 했다.[3] 그러나 지금까지의 기법들은 엄격히 규제되는 제약조건들을 만족하는 범위내에서 비용인 목적함수를 최소로하는 계획안를 찾는 방식으로 해석하고 있다. 하지만 목적함수에는 의사결정자등에의해 주관적으로 정해지게되는 지망수준(Aspiration Level)이 있고 제약조건도 역시 확정적으로 정해지지않는 것이 많다. 또한 비용최소화 및 신뢰도 최대화라는 다목적함수로 처리하여야 합리적이라 할 수 있는 경우도 발생하고 있으며 부하나 강우량등의 불확실성등 불확실성을 갖는 인자들을 직접고려하여 해석하는 방법들이 대두되고있다.[4]

본 연구에서는 전역적인 최적해를 얻을 수있는 정수계획법을 확장한 퍼지정수계획법을 이용하여 발전기보수유지계획수립용 수법을 개발하였으며 이 방법의 모델계통의 사례연구를 통해 그 효용성을 검토 하였다.

II. 퍼지 整數計劃法에의한 보수유지계획수립수법

2.1 퍼지 整數計劃法

일반적인 0-1 정수계획문제는 식 (1)과 같이 정식화 된다.

$$
\begin{aligned}
&\max(\min) \quad \mathbf{F(x)} \\
&\text{Sub. to} \quad \mathbf{Ax} \le \mathbf{b} \\
&\qquad\qquad \mathbf{x} = \{0,1\}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

단, **x** : 결정변수벡터

F : 목적함수 계수행렬(qxn)

A : 제약조건 계수행렬(pxn)

b : 제약조건량 상수벡터(px1)

그러나 목적함수가 만족도 최대화에 따르는 것으로 하고 제약조건도 Fuzzy 제약으로 주어질때는 식 (1)은 식 (2)와 같은 Fuzzy 정수계획문제로 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F(x)} &\lesssim zo \quad &&(\text{Fuzzy 목표: q개}) \\ \mathbf{Ax} &\lesssim \mathbf{b} \quad &&(\text{Fuzzy 제약: p개}) \qquad (2) \\ \mathbf{x} &= \{\mathbf{0,1}\} \quad &&(\text{0,1제약: n개}) \end{aligned}$$

이 문제의 최적해 $\mathbf{x}^*$는 만족도 최대화 기준에 따르는 Fuzzy 최적의사결정법에 의하면 식 (3)의 해로 구해진다.

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} [\min \{\min_{i=1\sim q} \mu_i(\mathbf{F(x)}), \min_{i=1\sim p} \mu_i(\mathbf{Ax})\}]$$

$$= \max_{\mathbf{x} \geq 0} [\min_{i=1\sim p+q} \mu_i(\mathbf{Bx})] \qquad (3)$$

단, $\mu_i(\cdot)$: i번째 Fuzzy 부등식에대한 Membership함수

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\cdot) \\ \mathbf{A} \end{bmatrix}$$

또한, 이 문제에대하여 만족도를 나타내는 부가변수 λ를 도입하면 식 (3)은 식 (4)와 같은 수리계획문제로 등가화 된다.

$$\begin{aligned} &\max && \lambda \\ &\text{Sub. to} && \lambda \leq \mu_i(\mathbf{B(x)}) \qquad (4) \\ & && \mathbf{x} = \{\mathbf{0,1}\} \\ & && \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

이 문제는 수리계획법에의한 최적화 앨고리즘에의해 해결될 수있다. 여기서 i번째 Fuzzy부등식의 허용폭을 $d^{(i)}$로 하고 그 Membership 함수 $\mu_i(\mathbf{Bx})$를 식(5)와 같이 선형식으로 표현되는 것으로 하면 식(4)는 식 (6)처럼 정식화된다.

$$\mu_i(\mathbf{Bx}) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{B(x)})_i \leq b_i' \\ 1 - \{(\mathbf{B(x)})_i - b_i'\}/d^{(i)} & b_i' < (\mathbf{B(x)})_i \leq b_i' + d^{(i)} \\ 0 & b_i' + d^{(i)} < (\mathbf{B(x)})_i \end{cases} \qquad (5)$$

단, 식 (5)에서 b_i'는 **zo**와 벡터 **b**를 하나로 묶은 베터를 **b'**라 할때 **b'**의 i번째 요소를 표시한다.

$$\begin{aligned} &\max && \lambda \\ &\text{Sub. to} && \lambda \leq 1 - \{(\mathbf{B(x)})_i - b_i'\}/d^{(i)} \qquad (6) \\ & && \mathbf{x} = \{\mathbf{0,1}\} \\ & && \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

그러나 식 (6)의 만족도를 나타내는 도입된 부가변수 λ는 정수가 아닌 실수이다. 그러므로 식 (6)은 완전한 정수계획이 아닌 선형과 혼합된 혼합정수선형계획법이다. 따라서 이를 해석하기위해서는 통상적인 혼합정수선형계획법이나 또는 식 (6)의 부가변수 λ를 Fractional Binary Expansion 으로 변형시킨 변형꼴인 식 (7)과 같이 정식화하여 해석하

기도한다.

$$\max \quad \lambda=\Sigma(1/2)^n\lambda_n$$

$$\text{Sub. to} \quad \Sigma(1/2)^n\lambda_n \le 1-\{(\mathbf{B}(\mathbf{x}))_i-b_i'\}/d^{(i)} \qquad (7)$$

$$\mathbf{x} = \{\mathbf{0,1}\}$$

$$\lambda_n = \{0,1\}$$

식 (7)은 통상적인 정수계획법 문제로 되므로 Implicit Enumeration법이나 Cutting법 또는 Branch and Bound법과 같은 기존의 응용프로그램에의해 처리될 수있다.[5][6][7]

2.2 퍼지정수계획법으로의 정식화

발전기 보수유지계획수립문제는 식 (1)와 같이 변수 x가 0-1만을 갖는 0-1 정수계획법으로 정식화 될 수 있으며 본 연구에서 시용하는 목적함수및 제약조건들의 각각에 해당되는 함수를 정리하면 다음과 같다. 여기서 $x_{ij}=1$ 은 i발전기를 j시간대에 보수시작함을 의미한다.

(1) 목적함수

(가) 비용최소화

$$\min\ z_1 = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j\in BSi} c_{ij}x_{ij} \qquad (8)$$

단, BSi : i 발전기의 보수가능시작시간대집합

$x_{ij} = \{0,1\}$

식 (8)은 그의 Fuzzy 지망수준을 z_1^* 이라 하면 식 (9)와 같이 Fuzzy 목표함수로 정식화된다.

$$z_1 \lesssim z_1^* \qquad (9)$$

단, z_1^* : z_1 의 지망수준

(나) 최소공급예비력의 최대화

공급예비력의 최대화를 목적함수로 할 경우에는 식 (10)과 같이 정식화된다.

$$\max\ z_2 = \min\{\ TCAP-L_{Pt}-\sum_{i=1}^{NG} \sum_{j\in Bit} cap_i x_{ij}\ ;\ \ \forall t,\ t=1-T) \qquad (10)$$

단, Bit : i 발전기의 t 시간대 보수가능집합

$x_{ij} = \{0,1\}$

앞서의 비용최소화와 같이 식 (10)은 그의 Fuzzy 지망수준을 z_2^* 이라 하면 식 (11)과 같이 Fuzzy 목표함수로 정식화된다.

$$z_2 \gtrsim z_2^* \qquad (11)$$

단, z_2^* : z_2 의 지망수준

(2) 제약조건

(가) 공급신뢰도 제약조건

$$(TCAP-L_{Pt}-\sum_{i=1}^{NG}\sum_{j\in Bit} cap_i x_{ij})/L_{Pt} \ge Rmin(t) \qquad \forall t \qquad (12)$$

단, Rmin(t) : t 시간대에 있어서 공급예비율 하한치

$x_{ij} = \{0,1\}$

(나) 동시보수불가능제약조건(배타조건)

$$\sum_{i\in ECI}\sum_{j\in Bit} x_{ij} \le 1 \qquad \forall ECI,\ \forall t \qquad (13)$$

단, ECI : i 번째 배타조건을 갖는 발전기들의 집합

(다) 연속성보수제약조건(연속조건)

$$x_{ije} - x_{ijs} = 0 \qquad \forall\ i\in SCI \qquad (14)$$

단, SCI : i 번째 연속조건을 갖는 발전기의 집합

je : 보수가 완료되는 시간대

js : 보수가 시작되는 시간대

(라) 종단 경계조건(단한번 보수및 완료조건)

마지막 시간대 까지는 모든 발전기가 보수를 완료하되 단 한번만 보수를 실시함을 조건으로 할때는 식 (15)처럼 정식화 된다.

$$\sum_{j\in Bit} x_{ij} = 1 \qquad \forall i,\ \forall t \qquad (15)$$

2.3 일반적인 정수계획법으로의 등가화

max λ

Sub. $F_1(x_{ij}) + d_1\lambda \le z_1^* + d_1$

$-F_2(x_{ij}) + d_2\lambda \le -z_2^* + d_2$

$$(TCAP-L_{Pt}-\sum_{i=1}^{NG}\sum_{j\in Bit} cap_i x_{ij})/L_{Pt} \ge Rmin(t) \qquad \forall t$$

$$\sum_{i\in ECI}\sum_{j\in Bit} x_{ij} \le 1 \qquad \forall ECI, \forall t \qquad (16)$$

$$x_{ije} - x_{ijs} = 0 \qquad \forall i\in SCI$$

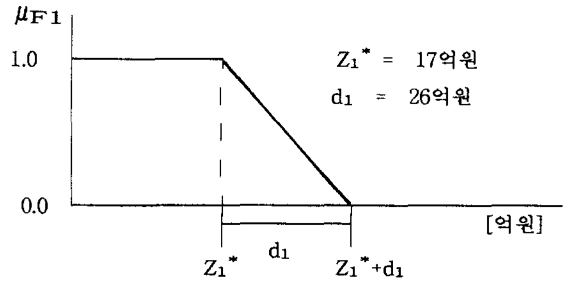
$$\sum_{j\in Bit} x_{ij} = 1 \qquad \forall i, \forall t$$

$$x_{ij} = \{0,1\}$$

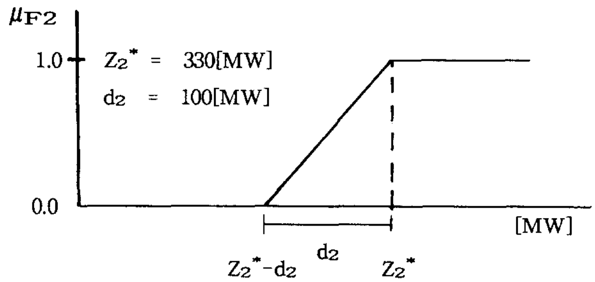
단, d_i : i번째 퍼지부등식의 멤버쉽함수의 허용폭

III. 사례연구

본 연구에서 개발한 퍼지정수계획법을 이용한 발전기보수유지계획 프로그램을 사용하여 발전기 16대 부하 12달인 모델계통에 적용하여 보았다. 또한 각 발전기의 보수가능기간 중에서 가능한 빨리 보수에 들어 가기를 희망하는 보수시작조기화를 목적함수로 할 경우 및 각 부하시간대의 공급예비력 들중 최소공급예비력을 갖는 시간대의 공급예비력을 최대화하는 시키는 최소공급예비력의 최대화를 목적함수로 삼아 비교 검토하여 보았으며 나아가 이들 2개의 목적함수를 결합한 퍼지다목적함수를 목적함수로하였을때의 경우도 검토하여보았다. 이때 보수시작시간대에서 보수가 지연될수록 비용이점차 선형적으로 증가한다고 가정하였다. 목표함수들을 그림 1처럼 선형 멤버쉽함수로 가정한 Fuzzy 목표함수로 삼고 이번에 개발한 Fuzzy 정수계획법을 사용하여 多目的函數로 처리하여 보았다.



(a) An example of membership function for cost fuzzy goal.



(b) An example of membership function for reliability fuzzy goal.

Fig. 1 A membership funtion of fuzzy goals for case study.

이때의 계산결과는 그림 2 및 표 1과 같으며 만족도 $\lambda = 0.69$였다.

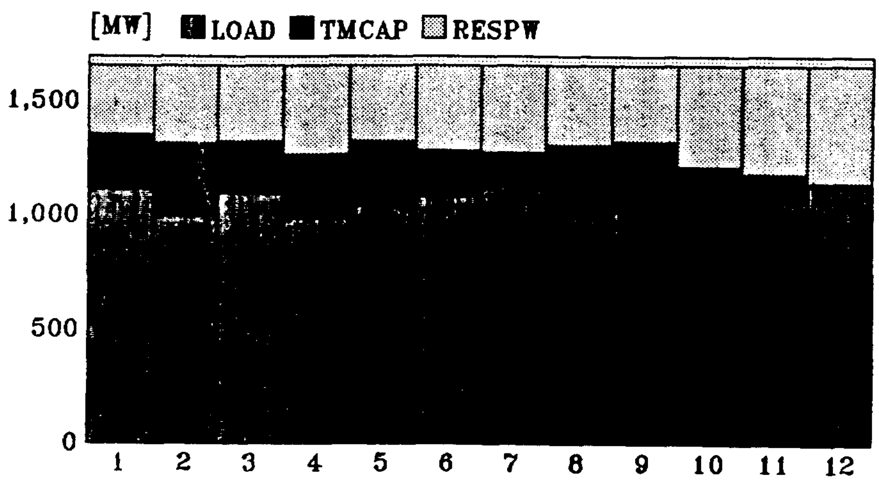


Fig. 2 Optimal maintenance quantity and reserve power in each period (by fuzzy multi-criteria).

Table 1 Optimal maintenance scheduling by fuzzy multi-criteria.

발전기 자료				부하시간대(월)											
입력번호	발전기명	용량	최적시간대	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Ams1	80	2	- -	——	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
2	Ams2	80	4	- -	- -	- -	——	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -
3	Cok1	110	1	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -				
4	Cok2	110	2	- -	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -				
5	Gav1	50	4				——	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
6	Gav2	50	6				- -	- -	——	——	- -	- -	- -	- -	
7	Col1	130	1	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -		
8	Col2	130	2	- -	——	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -		
9	Edg1	150	3			——	——	- -	- -	- -	- -				
10	Edg2	150	5			- -	- -	——	——	- -	- -				
11	Nel1	90	8								——	- -	- -	- -	- -
12	Nel2	90	9								- -	——	- -	- -	- -
13	Roc1	120	8						- -	- -	——	——	- -	- -	- -
14	Roc2	120	10						- -	- -	- -	- -	——	——	- -
15	Hyd1	100	7				- -	- -	- -	——	——	- -	- -		
16	Hyd2	100	9				- -	- -	- -	- -	- -	——	——		

(단, - - : 보수가능시간, —— : 최적보수계획시간)

Table 2 Comparision of crisp results with fuzzy multi-criteria,

	목적함수	비 용 [억원]	최소공급 예비력[MW]	만족도 λ
Crisp	비용 최소화	17	230	-
	최소공급 예비력 최대화	43	330	-
Fuzzy	다목적함수	25	300	0.69

표 2는 Crisp로한 각 목적함수에서의 계산결과와 이들 목적함수를 퍼지 다목적함수로 하여 퍼지정수계획법으로 처리한 계산결과를 비교한 것이다. 이 표에서 보는 바와 같이 퍼지정수계획법에의한 계산결과가 Crisp로 한 각각의 목적함수에서의 계산결과들의 타협점임을 알수 있다. 따라서 발전기 보수유지계획수립에 있어서 퍼지 다목적함수로 처리할 수 있는 기법을 도입하면 어느정도 유연성이 있는 계획을 수립할 수 있으리라 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 정수계획법에의한 발전기의 최적보수유지계획수립을 위한 방법을 더욱 확장하여 퍼지 목표함수로서 비용 함수뿐만 아니라 최소공급예비력 최대화함수도 포함시킨 정수계획법에서의 퍼지 多目的函數를 처리할 수 있는 퍼지 정수계획법에의한 보수유지계획수립용 방법을 개발하였다. 또한 이번 사례연구가 비록 발전기 16 대 정도의 계통에만 적용한 것에 불과 하지만 전력계통의 보수유지계획수립용으로 퍼지정수계획법을 개발하고 모델계통에 적용하여 더욱 유연성있는 보수유지계획을 수립할 수 있슴을 보였다. 본 수법의 적용시 전역적인 최적해를 찾을 수 있으나 아직까지는 현재의 컴퓨터로서는 실계통 적용시 실용적이지 못하므로 축차근사법과의 혼합된 형태의 수법의 적용이 불가피하다고 사료된다. 물론 이는 전역적인 최적해에대한 보장을 받을 수 없다.

앞으로 본 알고리듬을 축차근사법과의 혼합된 형태의 수법의 적용으로 확장할 계획이며 전력계통 자동화 운용시스템에 실제 적용 가능하리라 기대되어진다.

본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원에의해 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 연구결과의 일부임

V. 참고문헌

(1)A.J.Wood, B.F. Wollenberg;'Power Generation Operation & Control' John Wiley & Sons 1984, p.239-289.

(2) H.H.Zurn,V.H.Quintana;'Several Objective Criteria for Optimal Generator Preventive Maintenance Scheduling ' IEEE PAS-96, May/Jun, 1977, pp.984-992.

(3) Zia Yamayee, K.Sidenblad, Miki Yoshimura ;'A Computationally Efficient Optimal Maintenance Scheduling Method'IEEE PAS-102, Feb,1983,pp.330-338.

(4) H.J. Zimmermann;'**Fuzzy Set Theory and Its Applications'**, Kluwer-Nijhohh Boston,1986, pp.220-234.

(5) B.E. Gillett;'**Introduction to Operations Research: A Computer-Oriented Algorithmic Approach'**,McGraw-Hill USA ,1976, pp.68-128.

(6) 宋 吉永, 崔 在錫, 南宮 在鎔; 'Fuzzy 線形計劃法을 이용한 長期電源構成의 수립', 대한전기학회논문지, 1992. 11, Vol. 41, No,11 pp.1235-1245.

(7) James P. Ignizio, S. C. Daniels,'Fuzzy Multi-criteria Integer Programming Via Fuzzy Generalized Networks', Fuzzy Sets and System, 10, pp.261-270.