

퍼지 多目的 函數를 갖는 柔軟한 最適電源構成의 수립에 관한 研究

宋 吉 永* 南宮 在 鎔* 崔 在 錫**

* : 고려대학교 ** : 경상대학교

A Study on the Construction of Flexible Best Generation Mix with Fuzzy Multi-criterion Function

Kil-Yeong, Song* Jae-Young, Namgung* Jae-Seok, Choi**

* : KOREA UNIVERSITY ** : GYBONG-SANG NAT'L UNIVERSITY

Abstract

The new approach using fuzzy linear programming with fuzzy multi-criterion is proposed for the best generation mix of a power system. A characteristic feature of the presented approach is that not only cost but also reliability for goal function can be taken into account by using fuzzy multi-criterion and so more realistic solution can be obtained.

The effectiveness of the proposed approach is demonstrated by the best generation mix problem of KEPCO-system size model which contains nuclear, coal, LNG, oil and pump-generator hydro plant in multi-years.

1. 序 論

오늘날 전원개발은 건설자금의 방대함, 발전소의 입지확보에대한 곤란, 연료확보의 불안정, 장기부하예측의 불확실성, 환경규제의 강화등으로인해 더욱 어려워지고있는 실정이다. 그러므로 이를 담당하는 사람들은 적절한 안정성 확보 및 신뢰성을 유지하면서 수요에 알맞는 적절한 규모의 전원을 구성하는데 있어서 전없이 재정상의 제약과 불확실성을 어떻게 극복할 수 있을 것인가 하는 심각한 문제에 직면하고있다. 이에대한 연구로서 본 저자들은 앞서 허가화된 건설비와 가변비의 합을 퍼지 목표함수로 삼아서 그 불확실성을 고려할 수 있는 방법을 개발한 바있다. (6) 그러나 전원구성수립문제에서는 적절한 신뢰성의 확보도 매우 중요하다.

이에따라 본 연구에서는 앞서 개발한 퍼지 선형계획법에 의한 최적전원구성수립을위한 방법을 더욱 확장하여 퍼지 목표함수로서 허가화한 총비용함수뿐만아니라 발전계통의 신뢰도 산정함수도 포함시킨 퍼지 다목적함수를 갖는 방법을 개발하였다. 여기서 개발한 방법을 실제계에 가까운 모델계통을 대상으로한 사례연구를 통하여 유용성및 타당성을 검증했다.

2. Fuzzy 多目的 線形計劃法

일반적인 다목적 선형계획문제는 식 (1)과 같이 정식화 된다. (2)

$$\begin{aligned} \max(\min) \quad & Fx \\ \text{Sub. to} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

단, x : 결정변수벡터($nx1$)
 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 선형계획문제로 된다.

$$\begin{aligned} Fx &\leq z_0 \quad (\text{Fuzzy 목표: } q\text{개}) \\ Ax &\leq b \quad (\text{Fuzzy 제약: } p\text{개}) \\ x &\geq 0 \quad (\text{非負제약: } n\text{개}) \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \max_{x \geq 0} \{ \min_{j=1 \sim q} \mu_j(Fx), \min_{i=1 \sim p} \mu_i(Ax) \} \\ = \max_{x \geq 0} \{ \min_{i=1 \sim p+q} \mu_i(Bx) \} \end{aligned} \quad (3)$$

단, $\mu_i(\cdot)$: i 번째 Fuzzy 부등식에대한 Membership함수
 $B = \begin{bmatrix} F \\ A \end{bmatrix}$

또한, 이 문제에대하여 만족도를 나타내는 부가변수 λ 를 도입하면 식 (3)은 식 (4)과 같은 수리계획문제로 등가화 된다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \text{Sub. to} \quad & \lambda \leq \mu_i(Bx) \\ & x \geq 0 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

이 문제는 수리계획법에의한 최적화 알고리즘에의해 해결될 수있다. 여기서 i 번째 Fuzzy부등식의 허용폭을 $\delta^{(i)}$ 로 하고 그 Membership 함수 $\mu_i(Bx)$ 를 식(5)와 같이 선형식으로 표현되는 것으로 하면 식(4)는 식 (6)처럼 정식화 되어 통상

적인 선형계획문제로 되므로 Simplex 법과 같은 기존의 응용프로그램에 의해 처리될 수 있다.

$$\mu_i(Bx) = \begin{cases} 1 & (Bx)_i \leq b_i' \\ 1 - \{(Bx)_i - b_i'\} / \delta^{(i)} & b_i' < (Bx)_i \leq b_i' + \delta^{(i)} \\ 0 & b_i' + \delta^{(i)} < (Bx)_i \end{cases} \quad (5)$$

단, 식 (5)에서 b_i' 는 벡터 z_0 와 벡터 b 를 하나로 묶은 벡터를 b' 라 할때 b' 의 i 번째 요소를 표시한다.

$$\begin{aligned} \max & \quad \lambda \\ \text{Sub. to} & \quad \lambda \leq 1 - \{(Bx)_i - b_i'\} / \delta^{(i)} \\ & \quad x \geq 0 \\ & \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

3. Fuzzy 線形計画法에 의한 最適電源構成問題의 解析

3.1 問題의 設定(6)

- (1) 전원은 단위(Unit)별이 아니고 종별로 나누어서 각각 1 기로 취급하기로 한다.
- (2) 전력부하는 미리 상정된 값으로 한다.
- (3) 고정비로는 건설비를, 가변비로는 연료비만으로 하고 이들을 각각 현가화한 합을 총비용으로 삼는다.
- (4) LNG 화력에 대해서는 일정한 에너지를 소비해야 하는 것으로 한다.
- (5) 원자력은 부하추종능력이 없는 것으로 하고 양수식 수력은 수급대응발전(첨두부하시) 및 잉여대응발전(기저부하시)으로 운전되는 것으로 한다.

3.2 Fuzzy 目標

(1) 비용함수

최적전원구성문제에서의 목적함수중 가장 중요한 것은 건설비와 연료비의 현가화된 비용들의 합인 총비용을 최소화 하는 것이며 이는 식(7)과 같이 정식화된다. 이를 Fuzzy 선형계획문제인 식(2)중 Fuzzy 목표를 나타내는 식에 따라 식 (8)과 같이 쓸 수 있으며 이를 총비용에 대한 Fuzzy 목표로 삼는다.

$$\begin{aligned} \min z_1 &= \sum_{n=0}^N \sum_{i=1}^{NG} \left[\frac{1+er_1}{1+r} \right]^n d_{in} \alpha_i \Delta x_{in} + \left[\frac{1+er_1}{1+r} \right]^n f_{in} y_{in} \\ &= F(\Delta x_{in}, y_{in}) \end{aligned} \quad (7)$$

- 단, i : 전원종류첨자
 n : 연구대상연도첨자
 r : 할인율 (Discount Rate) [p.u]
 er_1 : i 전원의 건설재료의 피상물가상승률 [p.u]
 er_1 : i 전원의 연료의 피상물가상승률 [p.u]
 α_i : i 전원의 연료비율 [p.u]
 Δx_{in} : n 년도에서의 i 전원의 건설량 [MW]
 y_{in} : n 년도에서의 i 전원의 발전전력량 [MWh]
 d_{in} : n 년도에서의 i 전원의 건설단가 [원/MW]
 f_{in} : n 년도에서의 i 전원의 연료단가 [원/MWh]

$$F(\Delta x_{in}, y_{in}) \leq z_{01} \quad (8)$$

단, z_{01} : 의사결정자의 총비용에 대한 지망수준[원]

(2) 신뢰도 지수함수(1)

본 연구가 대상으로 삼은 전원구성문제가 발전기 단위별 결정문제가 아니고 종별 결정문제이므로 전력의 개념보다

전력량의 개념에 가까운 문제이다. 그러므로 발전계통의 신뢰도지수들중에서 식 (9)와 같이 정의되고있는 전력량부족확률(LOEP: Loss of Energy Probability)을 단위법으로 한 식 (10)을 사용하기로 한다.

$$LOEP = \sum_{k=1}^n y_k Q(A_k) \quad (9)$$

$$LOEP_{p.u} = \sum_{k=1}^n y_k Q(A_k) / W \quad (10)$$

- 단, $Q(A_k)$: 최대가능공급력의 저하분이 A_k 가 되는 확률
 y_k : A_k 가 되는 경우에 공급부족전력량의 총합
 n : 사고발생경우의 수
 W : 공급전력량의 총합

그런데 본 문제에서 연구대상으로 삼은 전원의 종류의 수는 원자력, 석탄화력, LNG, 석유화력, 일반식수력, 양수식수력 등 6가지이고 이중 일반식수력과 양수식수력의 사고율은 '0' 이라고 볼 수 있으므로 사고율이 '0'이 아닌 전원의 종류 수는 4가지가 된다. 그러므로 부족전력량을 발생하는 사고의 경우의 총수는 $4C_1 + 4C_2 + 4C_3 + 4C_4 = 15$ 가지이고 이들 각 경우의에 따른 공급부족전력량의 기대치는 표 1과 같다.

표 1 사고 경우에 따른 부족전력량의 기대치

	원자력	석탄	LNG	석유	공급부족전력량 기대치
	1	0	0	0	$q_1 y_1$
	0	1	0	0	$q_2 y_2$
	0	0	1	0	$q_3 y_3$
	0	0	0	1	$q_4 y_4$
	1	1	0	0	$q_1 q_2 y_1 y_2$
	1	0	1	0	$q_1 q_3 y_1 y_3$
	1	0	0	1	$q_1 q_4 y_1 y_4$
	0	1	1	0	$q_2 q_3 y_2 y_3$
	0	1	0	1	$q_2 q_4 y_2 y_4$
	0	0	1	1	$q_3 q_4 y_3 y_4$
	1	1	1	0	$q_1 q_2 q_3 y_1 y_2 y_3$
	1	1	0	1	$q_1 q_2 q_4 y_1 y_2 y_4$
	1	0	1	1	$q_1 q_3 q_4 y_1 y_3 y_4$
	0	1	1	1	$q_2 q_3 q_4 y_2 y_3 y_4$
	1	1	1	1	$q_1 q_2 q_3 q_4 y_1 y_2 y_3 y_4$

단, q_i : i 전원의 사고율

그러므로 각 전원별 사고확률의 합은 식 (11) - 식 (14)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{원자력} : Q_1 &= q_1 + q_1 q_2 + q_1 q_3 + q_1 q_4 + q_1 q_2 q_3 + q_1 q_2 q_4 + q_1 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{석탄화력} : Q_2 &= q_2 + q_1 q_2 + q_2 q_3 + q_2 q_4 + q_1 q_2 q_3 + q_1 q_2 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LNG화력} : Q_3 &= q_3 + q_1 q_3 + q_2 q_3 + q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 + q_1 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{석유화력} : Q_4 &= q_4 + q_1 q_4 + q_2 q_4 + q_3 q_4 + q_1 q_2 q_4 + q_1 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 + q_1 q_2 q_3 q_4 \quad (14) \end{aligned}$$

위의 식을 사용하여 최적전원구성문제에서의 목적함수의 하나로 발전계통 신뢰도산정함수를 나타내면 식(15)와 같이 정식화된다. 이를 Fuzzy 다목적선형계획문제인 식(2)중 Fuzzy 목표를 나타내는 식에 따라 식 (16)과 같이 쓸 수 있으며 이것을 신뢰도를 확보를 위한 Fuzzy 목표로 삼는다.

$$\min z_{02} = \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^m y_{kn} Q(X_{kn}) / W \quad (15)$$

$$= F(y_{kn}, Q(X_{kn}))$$

$$F(y_{kn}, Q(X_{kn})) \leq z_{02} \quad (16)$$

3.3 일반적인 제약과 Fuzzy 제약

多年度를 대상으로하는 최적전원구성문제에서 고려될 수 있는 일반적인 제약조건들과 Fuzzy 제약으로 삼을 수있는 제약조건들은 다음과 같다.

(1) 전원설비제약조건

$$\sum_{i=1}^{NG} (x_{i,n} + \Delta x_{in}) \geq L_{pn}(1+R_n) \quad n=0 \sim N \quad (17)$$

단, R_n : n 년도의 공급예비율

(2) 부하전력량제약조건

$$\sum_{i=1}^{NG} y_{in} = L_{pn} * L_{Fn} * 8760 + V_n \quad n=0 \sim N \quad (18)$$

단, V_n : 양수로 인한 부하전력량 [MWh]

(3) 발전전력량제약조건

$$y_{i,n} \leq (x_{in} + \Delta x_{in}) * 8760 * a_{in} \quad i=1 \sim NG, n=0 \sim N \quad (19)$$

단, a_{in} : i 전원의 n 년도에서의 한계이용율

(4) 초기년도 전원설비제약조건

$$x_{i0} = EX_i \quad i=1 \sim NG \quad (20)$$

단, EX_i : i 전원의 기준년도에서의 설비량 [MW]

(5) 기설 및 신설전원의 상호관계제약조건

$$x_{in} + \Delta x_{in} = x_{in+1} \quad i=1 \sim NG, n=0 \sim N \quad (21)$$

(6) LNG 화력의 에너지제한제약조건 (각년도)

$$y_{3n} \geq \eta_3 * LEP_n \quad n=0 \sim N \quad (22)$$

단, η_3 : LNG 화력의 열효율 [MWh/Ton]

LEP_n : n 년도에서의 LNG 화력의 소비에너지 제약조건량 [Tons]

(7) 양수발전소 저수지용량한계제약조건 (각년도)

$$V_n \leq (x_{6n} + \Delta x_{6n}) * 365 * b_n \quad n=0 \sim N \quad (23)$$

단, b_n : 양수식 수력의 일일 양수가능시간 [Hours]

(8) 양수와 양수발전간의 에너지 평형조건 (각년도)

$$y_{6n} \geq \eta_{pg} V_n \quad n=0 \sim N \quad (24)$$

단, η_{pg} : 양수식 수력의 효율

(9) 원자력 부하추종능력제한 제약조건 (각년도)

$$x_{in} + \Delta x_{in} \leq (x_{6n} + \Delta x_{6n}) + L_{Bn} \quad n=0 \sim N \quad (25)$$

(10) 전원별 총용량 상하한 제약조건 (각전원)

$$X_i^{\min} \leq x_{in} + \Delta x_{in} \leq X_i^{\max} \quad i=1 \sim NG \quad (26)$$

단, X_i^{\max}, X_i^{\min} : i 전원의 총설비량의 상, 하한치 [MW]

(11) 신설전원용량 상하한 제약조건 (각년도, 각전원)

$$\Delta X_{in}^{\min} \leq \Delta x_{in} \leq \Delta X_{in}^{\max} \quad i=1 \sim NG, n=0 \sim N \quad (27)$$

단, $\Delta X_{in}^{\max}, \Delta X_{in}^{\min}$: n 년도에서 i 전원의 신설 설비량에 대한 상, 하한치 [MW]

3.4 일반적인 선형계획문제로의 등가화

$$\begin{aligned} \max & \lambda \\ \text{Sub.} & F(\Delta x_{in}, y_{in}) + \delta^{(1)} \lambda \leq z_{01} + \delta^{(1)} \\ & F(y_{kn}, Q(X_{kn})) + \delta^{(2)} \lambda \leq z_{02} + \delta^{(2)} \\ & \sum_{i=1}^{NG} (x_{i,n} + \Delta x_{in}) \geq L_{pn}(1+R_n) \\ & \sum_{i=1}^{NG} y_{in} = (L_{pn} * L_{Fn} * 8760 + V_n) \\ & y_{i,n} \leq (x_{in} + \Delta x_{in}) * 8760 * a_{in} \\ & x_{i0} = EX_i \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} x_{in} + \Delta x_{in} &= x_{in+1} \\ y_{3n} &\geq \eta_3 * LEP_n \\ V_n &\leq (x_{6n} + \Delta x_{6n}) * 365 * b_n \\ y_{6n} &\geq \eta_{pg} V_n \\ x_{in} + \Delta x_{in} &\leq (x_{6n} + \Delta x_{6n}) + L_{Bn} \\ X_i^{\min} - \delta^{(3)} \lambda &\leq x_{in} + \Delta x_{in} - \delta^{(3)} \lambda \\ x_{in} + \Delta x_{in} + \delta^{(4)} \lambda &\leq X_i^{\max} + \delta^{(4)} \lambda \\ \Delta X_{in}^{\min} - \delta^{(5)} \lambda &\leq \Delta x_{in} - \delta^{(5)} \lambda \\ \Delta x_{in} + \delta^{(6)} \lambda &\leq \Delta X_{in}^{\max} + \delta^{(6)} \lambda \end{aligned}$$

단, $\delta^{(j)} \lambda$: i 전원에 대한 j 번째 Fuzzy 부등식의 Membership 함수의 허용폭 [MW]

4. 事例研究

본 연구에서 제안하는 방법을 우리나라 KEPCO 계통에 가까운 모델계통에 적용하여보았다.

4.1 입력자료

기본적인 입력자료는 참고문헌 6과 동일한 자료를 사용하였으며 신뢰도 지망수준 z_{02} 를 0.01로 하였다.

4.2 적용결과 및 검토

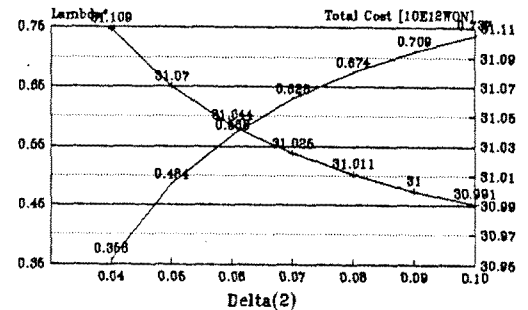


그림 1 신뢰도지수 허용폭의 변화에 따른 λ 와 총비용

5. 結論

본 연구에서는 앞서 개발한 퍼지 선형계획법에 의한 최적 전원구성수립을 위한 방법을 더욱 확장하여 퍼지 목표함수로써 현가화한 총비용함수뿐만 아니라 발전계통의 신뢰도 산정함수도 포함시킨 퍼지 多目的函数를 갖는 방법을 개발하였다. 이를 위해 신뢰도지수를 중 LOEP를 선택하고 이를 최적 전원구성문제에 맞게 정식화했다. 또한 제안한 방법을 우리나라 실제계통에 가까운 모델계통에 적용하고, 이에 대한 사례연구를 통하여 보다 현실적인 제약조건을 만족하는 해를 얻을 수 있음을 밝혔다.

앞으로 여기서 개발한 방법을 더욱 확장하여 미래의 불확실한 상황에 더욱 유연하게 대처할 수 있는 유연성의 정도를 정량적으로 분석하고 이를 이용하여 전원구성을 수립하는 방법을 개발할 계획이다.

참고 문헌

1. R. Billinton, Power System Reliability Evaluation, Gordon & Breach, Science Pub., 1970, pp.92-118.
2. H.J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer-Nijhoh Boston, 1986, pp.220-234.
3. 韓國電力公社 研究報告書, 長期電力需給計劃案, 電源計劃處 報告書, No.100, 1990.
4. 佐藤晴夫, 等, "ファジィ線形計劃法による長期電源構成計劃", 日本電氣學會論文誌 B, 112卷 2號, 平成4年, pp.147-153.
5. N. de Franco, "Special Report for Group 37(Power System Planning and Development)", CIGRE SC-37 WG.01 Special Report, Paris, Aug., 1986.
6. 宋吉永, 崔在錫, 南宮在鎔, "Fuzzy 線形計劃法を用いた長期電源構成の 수립", 1992년도 電力系統 Workshop 및 春季學術研究發表會論文誌, 1992년 5월, pp.51-55.