

입안자의 주관을 고려한 최적전원구성에 관한 연구 - 실계통에의 적용 -

송길영* 차준민② 오광해* 김용하**

* : 고려대학교 전기공학과
** : 인천대학교 전기공학과

A Study on Best Generation Mix Problem with Consideration of Planner's Subjectivity

K. Y. SONG* J. M. CHA* K. H. OH* Y. H. KIM**

* : Dept. of Electrical Engineering KOREA UNIVERSITY
** : Dept. of Electrical Engineering INCHON UNIVERSITY

Abstract

A planner have to consider many uncertain factors in best generation mix problem. To solve those problems, fuzzy theory is applied in this paper. Using fuzzy measure and Sugeno's fuzzy integral, the planner can choose the best alternative. By applying the proposed algorithm to KEPCO data, the validity of the proposed method is verified.

1. 서론

전력계통의 계획과 운용측면에서 장기전원개발계획은 정확한 수요예측과 그에 대한 안정된 전력공급을 위하여 심도깊고 계획성 있게 추진되어야 한다. 장기전원개발계획에서 각 전원별도 경제성 연료공급의 안정성, 신뢰성, 부하수충성등을 종합적으로 분석, 평가하여 전원별구성비율을 결정하는 것이 최적전원구성(Best Generation Mix)이다. 여기에 미래에 발생할 수 있는 여러가지 불확실성(uncertainty) 때문에 시나리오 분석방법등을 이용하여 여러가지 최적전원구성을 평가할 수 있다. 실제적으로 최종적인 결정은 정책입안자가 각 안들에 대한 여러가지 평가결과를 근거로 하여 주관적인 판단으로 하나의 최종안을 선택하게 된다. 이러한 주관적인 판단기준을 정량화할 수 있고, 애매하고 불확실한 사항들을 표현할 수 있는 퍼지이론을 이용하여 최적전원구성문제의 우선순위 결정문제에 대한 알고리즘을 제안한다. 이 제안한 알고리즘을 실계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 퍼지이론 2.1 퍼지측도

한 원소가 여러개의 집합중에 임의의 집합에 소속될 가능성이 애매한 상황일 때 이 소속정도를 나타내는 척도를 퍼지측도(fuzzy measure)라고 한다. 퍼지측도 \$g\$가 불확실한 상태를 계량화하여 표시하려면 다음의 세가지 조건을 만족해야 한다.^[1] 단, \$g\$는 퍼지측도, \$X\$는 전체집합, \$P(X)\$는 전체집합 \$X\$의 멱집합, \$A_1, A_2, B, \dots\$는 \$P(X)\$의 부분집합을 나타낸다.

- ① \$g(\emptyset) = 0, \quad g(X) = 1\$ (경계조건) (1)
- ② \$A \subset B\$ 이면 \$g(A) \le g(B)\$ (단조성) (2)
- ③ 부분집합의 연속(sequence) \$A_1 \in P(X), i \in X\$에 대하여 \$A_1 \subset A_2 \subset A_3 \dots\$ 또는 \$A_1 \supset A_2 \supset \dots\$ 이면

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(A_n) = g(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n)$$
 (연속성) (3)

본 연구에서는 여러 퍼지측도중 확률측도에서 덧셈조건을 완화시킨 식(4)의 \$\lambda\$-퍼지측도를 사용하였다. 이것을 \$n\$개의 부분집합에 대해 일반화시킨 것이 식(5)이다.

$$g_\lambda(A \cup B) = g_\lambda(A) + g_\lambda(B) + \lambda \cdot g_\lambda(A) \cdot g_\lambda(B) \quad (4)$$

단, \$\lambda\$는 \$-1 < \lambda < \infty\$

$$g_\lambda\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \frac{1}{\lambda} \left(\prod_{i=1}^n (1 + \lambda g_\lambda(A_i)) - 1 \right) \quad (5)$$

2.2 퍼지적분

Sugeno의 퍼지적분은 어떤 대상이 여러 평가항목의 중요도(degree of importance : DOI)에 차이가 있을때, 각 항목에 대한 평가치(evaluation value)를 퍼지측도를 이용하여 종합하는데 사용된다. 집합 \$X\$를 어떤대상에 대한 평가항목이라고 하자. \$X\$의 멱집합의 원소 \$E \in P(X)\$에 대해 정의되는 퍼지측도 \$g(E)\$는 대상의 전체적인 평가에 대해 항목 \$E\$의 평가치가 기 대하는 정도, 즉 평가항목의 부분집합 \$E\$의 중요도이다. 그리고 함수 \$h(x), x \in X\$는 평가항목 \$x\$에 대한 평가치라 하면 전체 평가항목 \$X\$에서의 평가함수 \$h\$의 중요도 함수 \$g\$에 대한 퍼지적분은 식(6)과 같이 정의되며 이것을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.^[2]

$$f_X h(x_i) \circ g = \max_{E \subset X} \min_{x \in E} [\min \{ h(x_i), g(E) \}] \quad (6)$$

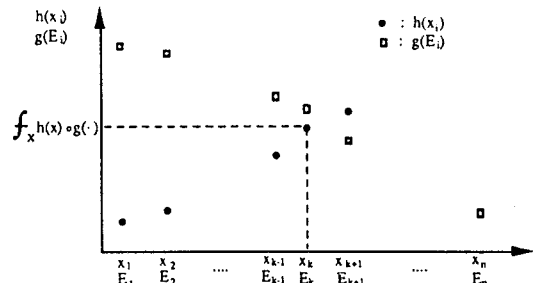


그림 1. Sugeno의 퍼지적분과정

3. 최적전원구성의 우선순위결정문제의 정식화

최적전원구성의 비율이 다른 \$n\$개의 대체안을 평가하기 위하여 우선 \$i\$번째 대체안 \$A(i)\$의 \$j\$번째 전원의 구성비율은 \$\text{COMPO}_{i,j} [\%]\$라 한다.

3.1 평가항목별 평가치의 계산 3.1.1 건설비와 연료비의 평가치

\$i\$번째의 대체안의 평균건설단가 또는 연료비율 \$\text{SUM}(i)\$라 하면 식(7)로 구한 뒤 정규화시킨다. 즉, \$i\$번째의 대체안의 \$j\$번째 평가항목에 대한 평가치 \$h_{i,j}\$는 식(8)과 같다.

$$\text{SUM}(i) = \sum_{j=1}^{SC} \text{COMPO}_{i,j} \cdot \text{PRICE}_j \quad (7)$$

단, \$\text{COMPO}_{i,j}\$: \$i\$번째 대체안의 \$j\$번째 전원의 구성비율 [%]
 \$\text{PRICE}_j\$: \$j\$번째 전원의 건설단가[천원/KW] 또는 연료비[원/KW]
 \$SC\$: 전원의 종류

$$h_{i,j} = \frac{\text{SUM}(i)}{\text{MIN}\{\text{SUM}(i)\}} \quad (8)$$

단, j=1: 건설비
j=2: 연료비

3.1.2 환경오염에 대한 평가치

각 전원이 미래의 환경계약에 대해 어떤 허용을 갖는지 직접적인 효과를 알 수 없으므로 다음과 같이 생각한다. 환경에 대한 여러계약이 "현재보다 완화된다(F₁)", "변화없다(F₂)", "현재보다 엄격해진다(F₃)", ..., "F(N)" 등의 N개의 미래상황에 대한 발생가능성 μ(F_k)를 주관적으로 정하고 이것을 식 (9)를 이용하여 그 발생가능성에 대한 확률값을 구한다. [3]

$$\text{PROB}(k) = \frac{\mu(F_k)}{\sum_{i=1}^N \mu(F_i)} \quad (9)$$

단, PROB(k): k번째 미래상황의 발생확률
μ(F_i): i번째 미래상황이 발생할 가능성에 대한 퍼지멤버십 값

위의 N가지 경우에 대한 전원별 환경계약에 관한 효용을 CONST_{J,k}라고 하고 0에서 1사이의 값으로 계획입안자의 주관적인 판단에 의하여 정한다. 이 효용치를 이용하여 각 대체안별 환경계약에 대한 평균효용치를 식(10)에 의하여 구한다. 여기에 식 (9)에서 구한 확률 P를 적용해서 i번째 대체안의 효용치를 식(11)로 구하고, 각 대체안별 평가치 h_{i,j}는 식(12)로부터 구한다.

$$\text{hENV}_{i,j} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (\text{COMPO}_{i,j} * \text{CONST}_{j,k}) \quad (10)$$

단, CONST_{J,k}: j번째 전원의 k번째 경우의 효용치
SC: 전원의 종류
N: 미래의 상황발생 경우수

$$h'(i) = \text{hENV}_{i,j} * \text{PROB}(k) \quad (11)$$

$$h_{i,j} = \frac{h'(i)}{\text{MAX}\{h'(i)\}} \quad (12)$$

단, j=3: 환경계약

3.1.3 신뢰도와 부하추중성에 대한 평가치

전원의 신뢰도를 평가하기 위하여 전원별 고장정지율 (Forced Outage Rate: f.o.r)을 적용한다. 즉 f.o.r이 작을수록 전원으로서는 효과가 좋으므로 f.o.r이 가장 작은 전원의 효용을 1.0으로 보고 나머지 전원의 신뢰도에 대한 효용치 hRELI는 식 (13)과 같고 이를 식 (7)의 PRICE 대신에 대입하여 구한 SUM(i)를 식 (14)에 대입하여 신뢰도에 대한 각 대체안의 평가치를 구한다.

$$\text{hRELI}_j = \frac{1}{\text{FOR}_j} \quad (13)$$

단, FOR_j: j번째 전원의 신뢰도

$$h_{i,j} = \frac{\text{SUM}(i)}{\text{MAX}\{\text{SUM}(i)\}} \quad (14)$$

단, j=4: 신뢰도
j=5: 부하추중성

부하추중성 LOADF(i)는 전원별로 0에서 1사이의 값으로 정한뒤, i번째 대체안의 평균효용치를 신뢰도의 경우와 마찬가지로 식 (7)로 부터 구하고 평균효용치가 가장 큰 것을 1로 보아 식(14)로 정규화시켜 부하추중성에 대한 각 대체안의 평가치를 구한다.

3.2 퍼지속도의 계산

각 평가항목에 대한 중요도를 DOI_i라 하면 식(5)를 이용하여 퍼지속도를 구할 수 있다. 우선 3.1절에서 각 대체안의 평가항목별 평가치를 구하였으므로 이것을 크기순으로 배열한다. 우선 첫번째 평가항목에 대한 λ-퍼지속도는 다음식 (15)로부터 구한다. 단, x는 퍼지속도를 정규화하기 위한

승수이다. 반복적인 방법으로 n번째 평가항목까지 고려한 λ-퍼지속도 g_λ(n)는 다음식 (16)과 같다. [4]

$$g_{\lambda}(1) = \text{DOI}_1 \cdot x \quad (15)$$

$$g_{\lambda}(n) = g_{\lambda}(n-1) + \text{DOI}_n \cdot x + \lambda \cdot g_{\lambda}(n-1) \cdot \text{DOI}_n \cdot x \quad (16)$$

모든 평가항목을 고려한 λ-퍼지속도 값은 퍼지속도의 경계 조건 즉, 식(1)을 만족시켜야 하므로 최종적인 퍼지속도 g_λ(n)=1이어야 한다. 이것은 승수 x의 함수이므로 g_λ(n)-1=0을 만족하는 x를 구해야 한다. g_λ(n)-1을 x의 함수 f(x)라 하면 f(x)=0으로 놓을 수 있고, 이것은 평가항목의 수가 n개일때 x의 n차 방정식임을 알 수 있다. 방정식의 해법을 이용하여 근을 구한 뒤 식 (15), (16)에 대입하여 퍼지속도 값을 구한다.

3.3 퍼지적분에 의한 종합평가치 계산

각 대체안별로 3.1절에서 구한 평가항목별 평가치 h_{i,j}와 3.2절에서 구한 λ-퍼지속도 값을 퍼지적분식인 식(6)에 대입하여 적분값 즉, 종합평가치 EVAL(i)를 구한다. 그중 가장 큰 값을 갖는 대체안을 최종적으로 선택한다.

$$\text{EVAL}(i) = \text{MAX}_i [\text{MIN}_j \{ h_{i,j}, g_{\lambda}(j) \}] \quad (17)$$

$$\text{BEST} = \text{MAX}_i \{ \text{EVAL}(i) \} \quad (18)$$

4. 사례연구

본 연구에서 전원은 매장량, 환경오염등을 고려하여 신규 대체설비로 석유는 고려하지 않고 원자력, 석탄, LNG, 수력의 4가지로 한정하였으며, 수력은 국내 수력자원의 한계등을 고려하여 10%로 고정시켰다. 전원구성비율은 한전 전원계획처의 "장기전력수급계획안"에서 채택된 3개안을 기준으로 하여 이안들의 전원구성비율의 상·하안을 5%씩 추가 고려한 10개안(표 1)을 선정하여 사례연구를 실시하였다.

표 1. 각 대체안별 전원구성비율 [%]

대체안	원자력	석탄	LNG	수력	전원별 변동폭
A(1)	30	30	30	10	
A(2)	35	25	30	10	원자력 35-45%
A(3)	35	30	25	10	석 탄 25-40%
A(4)	35	35	20	10	LNG 15-30%
A(5)	35	40	15	10	수 력 10%
A(6)	40	25	25	10	
A(7)	40	30	20	10	
A(8)	40	35	15	10	
A(9)	45	25	20	10	
A(10)	45	30	15	10	

4.1 건설단가와 연료비

건설단가와 연료비는 한전 전원계획처의 "장기전력수급계획안"의 자료를 이용하여 표 2와 같이 주었다. [5]

표 2. 전원별 건설단가와 연료비

	건설단가[원원/KW]	연료비[원/KW]
원자력	1,246	3.78
석 탄	696	14.82
LNG	433	27.22
수 력	450	8.20

4.2 환경계약

환경계약에 대한 미래의 상황변화를 정확히 예측할 수는 없으므로 다음과 같이 가정한다. 즉, 환경계약이 "현재보다 완화된다(F₁)", "변화없다(F₂)", "현재보다 엄격해진다(F₃)"의 3가지 경우로 나누어 다음의 퍼지정보를 고려해 보자.

"현재보다 가혹하게 적용될 전망이다."
이것을 퍼지 멤버십함수로 표현하여 식 (19)와 같이 멤버십 값을 주기로 한다. 그리고, 전원별 환경계약에 관한 효용은 표 3과 같이 주었다.

$$\mu(F_1) = 0.1, \mu(F_2) = 0.4, \mu(F_3) = 1.0 \quad (19)$$

표 3. 전원별 환경제약에 관한 효용

	염격(F ₁)	불변(F ₂)	완화(F ₃)
원자력	0.8	0.9	1.0
석탄	0.3	0.6	1.0
LNG	0.6	0.8	1.0
수력	1.0	1.0	1.0

4.3 신뢰도와 부하추중성

전원별 신뢰도는 기존의 자료로부터 구할 수 있고, 식(13)으로부터 신뢰도에 대한 효용치 hRELI를 구하여 전원별 부하추중능력에 대한 효용치와 함께 표 4에 실었다.

표 4. 전원별 신뢰도와 부하추중성에 대한 효용치

	f. o. r. [M] for(i)	신뢰도에 대한 효용치 hRELI(i)	부하추중성에 대한 효용치 LOADF(i)
원자력	9.0	0.444	0.5
석탄	9.5	0.421	0.8
LNG	10.0	0.4	1.0
수력	4.0	1.0	0.7

4.4 퍼지적분에 의한 평가

앞 절의 데이터를 각 식에 대입하여 각 대체안별로 구한 종합평가지수를 그림 2에 나타내었다. 각 평가항목의 중요도는 0에서 1사이의 값으로 표 5와 같이 정하였다. 각 대체안의 평가치와 식(5)에 의해 구한 퍼지측도를 식(17)에 의하여 퍼지적분을 실시해서 종합평가지수 EVAL(i)를 구한 결과는 표 6과 같다. 이때 EVAL(1)의 퍼지적분과정을 그림 3에 보인다.

표 5. 각 평가항목별 중요도

평가항목	중요도(DOI _i)
건설비	0.9
연료비	0.9
환경제약	0.8
신뢰도	0.7
부하추중성	0.7

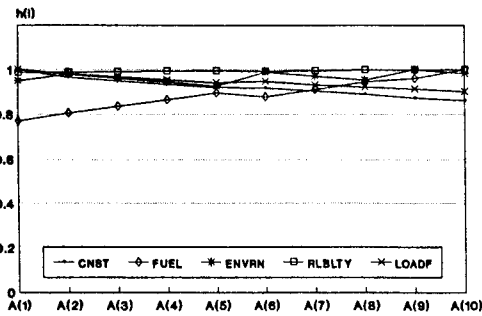


그림 2. 각 대체안의 평가항목별 평가치 계산 결과

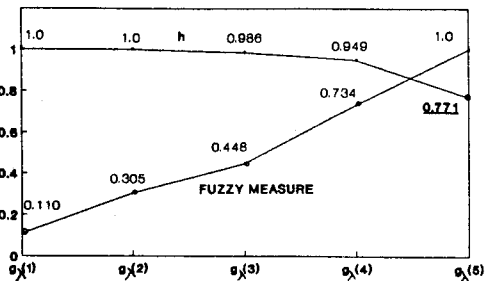


그림 3. 1번 대체안의 퍼지적분과정

최종적으로 표 6에서 EVAL(i)중 최대값을 갖는 A(7)안이 최적이었고, 이때의 전원별 구성비율은 40, 30, 20, 10[%]로써 한전의 결과와 동일한 결과를 구할 수 있음을 알 수 있다.

표 6. 대체안별 최종 종합평가지

대체안	EVAL(i)
A(1)	0.771
A(2)	0.807
A(3)	0.835
A(4)	0.864
A(5)	0.896
A(6)	0.877
A(7)	0.903*
A(8)	0.889
A(9)	0.874
A(10)	0.861

중요도를 표 7과 같이 다르게 해서 결정된 최적안을 그림 4에 보인다.

표 7. 중요도를 바꾼 경우

평가항목	중요도		
건설비	0.9	0.1	0.1
연료비	0.9	0.9	0.1
환경제약	0.8	0.1	0.9
신뢰도	0.7	0.9	0.1
부하추중성	0.7	0.1	0.1

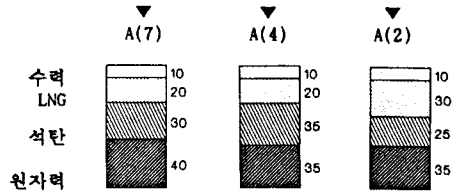


그림 4. 결정된 최적안의 전원구성비율 [%]

5. 결론

퍼지이론을 적용하여 정책입안자의 주관적 판단을 고려하기 위하여 제안된 본 알고리즘의 사례연구 결과는 다음과 같다.

- 복수개의 안에 대해서 복수개의 평가항목으로 평가한 결과를 놓고 최적안을 선택해야 하는 경우 복잡하고 반복적인 과정을 거치지 않고 효율적으로 평가할 수 있는 알고리즘을 제안하여 실제통에 적용시켜서 그 유용성을 검증하였다.
- 정확한 통계와 확률로 평가하기 어려운 환경제약등의 문제를 멤버십함수를 이용하여 확률에 적용시킴으로써 확실한 미래 상황에 대처할 수 있는 대체안을 결정할 수 있게 되었다.
- 퍼지적분시 퍼지측도를 결정하게 되는 각 평가항목별 중요도를 정책입안자의 주관적판단에 따라 적용시킬 수 있으므로 보다 유연성있는 대체안을 결정할 수 있게 되었다.

참고문헌

- [1] H. J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory - and Its Application, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985, pp. 37-45
- [2] 本多中二, 大里有生, FUZZY工學入門, 日本海文堂出版株式會社, 1989, pp.119-135
- [3] 關根泰次 外, "電力系統工學の新しい方向", 日本電氣學會雜誌, 1979.
- [4] 이관형, 오길복, 퍼지이론및 응용(1권), 흥통과학출판사, 1991, pp.9.26-9.35
- [5] 한전 전원계획처, 장기전력수급계획안, 1990, pp.87-45
- [6] A. Kaufmann, M. M. Gupta, Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, Elsevier Science Publishers Co., 1988, pp.19-67