

## LOLE(Loss Of Load Expectation) Evaluation using Fuzzy Set Theory

沈 載 鴻\* · 鄭 炫 洙\*\* · 金 鎮 吾\*\*\*  
(Jae-Hong Shim · Hyun-Soo Jung · Jin-O Kim)

**Abstract** - This paper presents a conceptual possibilistic approach using fuzzy set theory to manage the uncertainties in the given reliability input data of the practical power systems. In this paper, an algorithm is introduced to calculate the possibilistic reliability indices according to the degree of uncertainty in the given data. The probability distribution function can be transformed into an appropriate possibilistic representation using the Probability-Possibility Consistency Principle(PPCP) algorithm. In this algorithm, the transformation is performed by making a compromise between the transformation consistency and the human updating experience. Fuzzy classification theory is applied to reduce the number of load data. The fuzzy classification method determines the closeness of load data points by assigning them to various clusters and then determining the distance between the clusters. The IEEE-RTS with 32-generating units is used to demonstrate the capability of the proposed algorithm.

**Key Words** : Loss of Load Expectation, Forced Outage Rate, Probability-Possibility Consistency Principle, Fuzzy Clustering

### 1. 서 론

신뢰도 계산에 사용되는 실질적인 데이터들은 정보가 불충분하거나 또는 부정확하기 때문에 그 자체에 불확실한 성질을 포함하게 된다. 신뢰도 지수중의 하나인 공급지장기대치(LOLE : Loss Of Load Expectation)를 산출하기 위해 필요한 강제고장 정지율(FOR : Forced Outage Rate)도 결정적 수치가 아닌 통계적인 수치가 된다. 따라서 종래의 확률이론을 이용한 신뢰도 계산방법에서는 이러한 불확실한 성질을 다루기 위하여 강제고장 정지율을 평균치와 분산을 갖는 정규분포함수로 표현하였다 [1]. 발전기들의 강제고장 정지율에 관한 불확실성을 정규분포 형태를 가정하여 계산하는 경우에는 누적확률표(Capacity Outage Cumulative Probability table)와 함께 순차적인 공분산 행렬을 결정하여야 한다. 최종적인 공급지장기대치는 누적확률표와 그에 따른 공분산 행렬에 부하형태를 결합하여 결정할 수 있고, 그 결과는 평균값과 분산의 형태로 주어진다.

그러나 이러한 공분산행렬을 사용한 반복적 방법은 그 계산이 복잡할 뿐만 아니라 대규모 전력계통의 경우에는 각 모선의 발전기들에 관한 공분산을 계산하는데 많은 시간과 메모리용량을 소비하게 되는 단점이 있다. 이에 대해 연속적인 정규분포 곡선에 대한 푸리에 변환을 이용한 시도가 있었으며[3], 본 연구에서는 이러한 불확실성을 보다 효율적으로 해석하기 위하여

퍼지 신뢰도 이론을 도입하였다. 퍼지이론은 기존의 방법으로 풀기에는 매우 복잡한 문제를 적절히 다룰 수 있는 능력을 가진 도구로 이해되어지고 있다. 이러한 퍼지집합이론의 특징중 하나는 지엽적인 부분에 너무 얽매이지 않으면서도 불확실한 상태를 해석할 수 있는 언어적 순응성이다. 확률적 형태로 표현된 정보들을 퍼지연산에 이용하기 위해서는 우선 그 데이터를 그에 대응하는 퍼지형태로 변환시켜야한다. 확률적 데이터를 가능성 데이터로, 혹은 그 반대로 변환시키는데 있어, 그 과정을 보다 객관적이고 일관성 있게 수행하도록 하기 위한 연구는 Zadeh나 Dubois와 Prade를 비롯한 여러 연구자들에 의하여 행하여져 왔으며 이를 확률-가능성간의 적합도 원리 (PPCP : Probability-Possibility Consistency Principle)로 나타낸다[2]. 본 연구에서는 전문가의 경험을 바탕으로 한 계통에 관한 정보와 Zadeh의 확률과 가능성 분포간의 적합한 구조의 변환법을 합성하여 확률적인 데이터를 퍼지수로 나타내었다. IEEE-RTS 데이터[3]를 이용하여 확률적 방법에 의해 구해진 지수와 퍼지연산을 사용하여 얻은 퍼지 신뢰도 지수를 비교하여 제안된 알고리즘의 유용성을 보였으며, 또한 많은 양의 부하에 관한 데이터를 퍼지화된 집단으로 분류하여 적용함으로써 퍼지이론을 이용한 방법이 계산상의 편리함과 빠른 계산속도 그리고 적은 메모리 용량을 사용하는 이점을 가짐을 보였다.

### 2. 불확실성이 내재된 공급지장기대치의 문제점

신뢰도 지수중의 하나인 공급지장기대치를 산출하기 위해 필요한 강제고장 정지율은 실제로 수집되어 있는 데이터의 값들에 의존하여 얻어진 최적의 추정치를 단일값으로 표시한 것이

\* 準 會 員 : 漢 陽 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 卒 業

\*\* 正 會 員 : 漢 陽 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

\*\*\* 正 會 員 : 漢 陽 大 學 院 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1997年 12月 10日

最 終 完 了 : 1998年 9月 28日

다. 따라서 이러한 값들에는 상당한 불확실성이 내재되어 있으며 이들 수치를 사용하여 얻어지는 공급지장기대치에도 영향을 미치게 된다. 확률이론에서는 이러한 강제고장 정지율을 정규분포의 형태로 가정하여 공급지장기대치를 구할 수 있다.

총래의 공급지장용량의 누적확률표는 단위추가법(Unit Addition Algorithm)에 의하여 식 (1)과 같은 반복식으로 표현된다[9].

$$P(X) = (1-\gamma)P'(X) + \gamma P'(X-C) \quad (1)$$

여기서  $P'(X)$ 와  $P(X)$ 는 각각 발전기가 추가되기 전과 후의 공급지장용량이  $X$ 보다 같거나 클 누적확률이며,  $C$ 와  $\gamma$ 는 추가되는 발전기의 용량과 강제고장정지율을 각각 나타낸다. 강제고장 정지율  $\gamma$ 는

$$\gamma = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

로서 표현되며, 여기서  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 각 발전기의 고장율(Failure Rate)과 복구율(Repair Rate)을 나타낸다.

발전기들의 강제고장정지율에 관한 불확실성을 정규분포형태를 가정하여 계산하는 경우에 누적확률표와 함께 순차적인 공분산 행렬을 결정하여야 한다. 최종적인 공급지장기대치는 누적확률표와 그에 따른 공분산 행렬에 부하형태를 결합하여 결정할 수 있고, 그 결과는 평균값과 분산의 형태로 주어진다. 단위추가법으로 공분산 행렬을 계산하는 식은 식 (3)과 같다[4].

$$\begin{aligned} Cov[P(X), P(Y)] &= [(1-\gamma)^2 + V]Cov[P'(X), P'(Y)] \\ &+ [\gamma(1-\gamma) - V]\{Cov[P'(X), P'(Y-C)] \\ &+ Cov[P'(X-C), P'(Y)]\} \\ &+ [\gamma^2 + V]Cov[P'(X-C), P'(Y-C)] \\ &+ V[P'(X) \cdot P'(Y) - P'(X) \cdot P'(Y-C) \\ &- P'(X-C) \cdot P'(Y) + P'(X-C) \cdot P'(Y-C)] \quad (3) \end{aligned}$$

여기서  $X, Y$ 는 공급지장용량이고  $P(X)$ 는 공급지장용량이  $X$ 보다 클 누적확률이다. 그러나 이러한 공분산 행렬의 방법은 그 계산과정이 복잡하고, 대규모 전력계통의 경우에는 각 발전기들의 공분산을 계산하는 데 많은 시간이 소요되며 메모리의 소비가 커지는 단점이 있다.

구해진 누적확률표를 부하와 결합하여 공급지장기대치를 구하고 공분산 행렬을 사용하여 그것의 분산은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} E[LOLE] &= \sum_{i=1}^n E[P_i(C_i - X_i)] \\ Var[LOLE] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Cov[P_i(C_i - X_i), P_j(C_j - X_j)] \quad (4) \end{aligned}$$

여기서,  $n$ 은 부하로 주어진 데이터의 갯수이고,  $C_i$ 는  $i$ 번째

부하에 대한 계통의 발전용량,  $X_i$ 는  $i$ 번째로 주어지는 부하의 크기이다.  $E[P_i]$ 는  $i$ 번째 부하에 대한 공급지장확률의 기대치이며  $Cov[P_i, P_j]$ 는 각각  $i$ 와  $j$ 번째 부하에 관한 공급지장확률의 공분산이다.

### 3. 적합도(Consistency)를 이용한 가능성 분포함수

전력계통의 신뢰도 지수를 구하는데 적용되는 데이터들은 과거의 통계치를 바탕으로 얻어진 추정값 들이다. 따라서 이러한 데이터 값들로부터 구해지는 공급지장기대치의 결과값은 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 이러한 불확실성을 전문가의 경험적 지식을 합성하여 퍼지이론으로 처리하고자 하였다. Zadeh가 제시한 퍼지이론은 가능성 분포를 사용하며, 본 연구에서는 이러한 퍼지 가능성 분포를 나타내기 위하여  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$ 의 네 점의 형태로 표현되는 사다리꼴 퍼지수를 사용하였다. 이러한 사다리꼴 퍼지수의  $\alpha$ -level에서의 신뢰구간(Interval of Confidence)은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다[5].

$$\begin{aligned} A_\alpha &= [a_1^{(\alpha)}, a_4^{(\alpha)}] \\ &= [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_4 - a_3)\alpha + a_4] \quad (5) \end{aligned}$$

가능성 분포를 네점  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$ 의 사다리꼴 퍼지수의 형태로 나타낼 때,  $\alpha$ -level이 1인 부분(구간  $[a_2, a_3]$ )을 퍼지수  $A$ 의 평균구간(mean interval), 0인 부분(구간  $[a_1, a_4]$ )을  $A$ 의 퍼짐구간(spread interval)이라고 정의한다. 주어진 발전기 입력에 관한 분포형태가 표준정규분포를 따르고 이때의 확률분포함수를  $p(x)$ , 가능성 분포함수를  $\mu(x)$ ,  $S$ 를  $p(x)$ 의 표준편차로 하면 그 관계식은 식 (6), (7)과 같다[6].

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp[-(S^2 - x^2)/2] & |x| > S \\ 1 & |x| \leq S \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C &= (2/\pi)^{1/2} [\exp(S^2/2) \int_S^\infty \exp(-x^2) dx \\ &+ \int_0^S \exp(-x^2) dx] = F_\alpha(S) \quad (7) \end{aligned}$$

여기서  $C$ 는 변환의 적합도를 나타냄과 동시에 실제의 평균값이 가능성 분포함수로 정의된 평균구간 내에 존재할 가능성을 나타낸다.

QC(Quite Confident), CON(Confident), LC(Less Confident)의 세 가지 형태의 확신레벨을 사용한 분포곡선의 식은 (8)과 같이 표현되며 이를 그림 1에 나타내었다.

$$F_{CON}(S) = \begin{cases} \frac{S_{Nmax} - |S|}{S_{Nmax} - S_{Nmin}} & S_{Nmin} < |S| < S_{Nmax} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $S_{Nmax}$  는 QC, CON, LC에 대하여 각각 0.7, 1.0, 2.0의 값을 가지며, 이러한 값들은 계통에 대한 경험을 가진 전문가의 판단에 의하여 정해지는 값이다.  $S_{Nmax}$  는 가능성 분포를 가지는 사다리꼴 퍼지수의 퍼짐구간을 결정하는 동시에 식(7)의 적합도 함수와 결합되어 평균구간의 범위와 그 구간내에 실제로 평균값이 위치할 가능성을 결정한다.

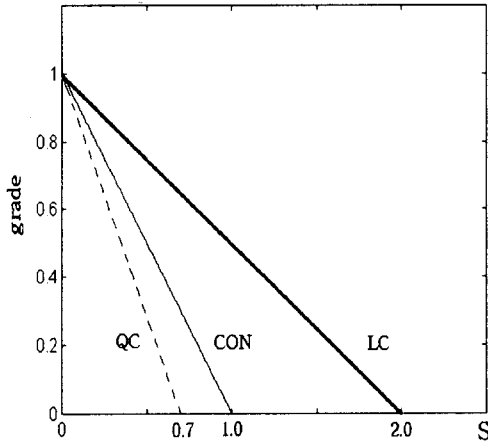


그림 1 인간의 경험을 바탕으로 한 확신레벨  
Fig. 1 Confidence levels based on human experience

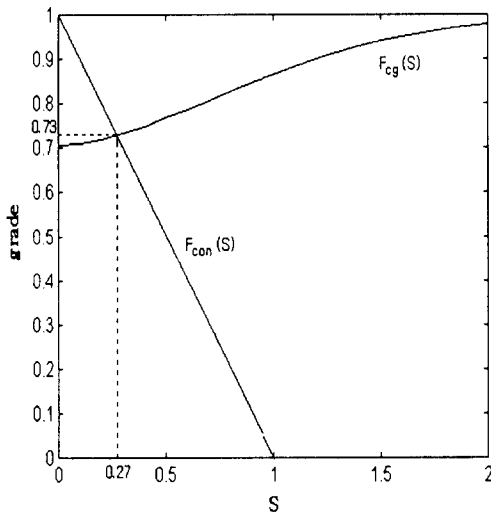


그림 2 전문가적 경험과 PPCP 변환과의 합성  
Fig. 2 Compromise between experts' experience and PPCP transformation

전문가의 경험적 판단과 Zadeh의 확률-가능성 적합도 이론(PPCP)에 의해 제시된 적합도를 나타내는 함수를 합성하여 평균구간을 구하는 과정을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 변환의 적합도를 나타내는 함수  $F_{cg}(S)$ 와  $F_{con}(S)$ 가 만나는 점이 바로 평균구간이 분포하는 구간의 상·하한값을 나타내며

그 점에서의 가능성(possibility)을 나타내는 수치, 0.73이 바로 변환의 적합도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 확신레벨이 높아질수록 평균구간은 좁아지고 그 구간 내에 실제 평균값이 위치할 가능성은 감소된다.

이상과 같은 알고리즘을 사용하여 구한 각 구간의 상·하한을 표로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 각각의 확신레벨에 따른 사다리꼴 퍼지수의 형태

Table 1 TrFNs related to the degrees of confidence

	( $a_1$ , $a_2$ , $a_3$ , $a_4$ )
QC	( $\mu - 0.7\sigma$ , $\mu - 0.2\sigma$ , $\mu + 0.2\sigma$ , $\mu + 0.7\sigma$ )
CON	( $\mu - 1.0\sigma$ , $\mu - 0.27\sigma$ , $\mu + 0.27\sigma$ , $\mu + 1.0\sigma$ )
LC	( $\mu - 2.0\sigma$ , $\mu - 0.48\sigma$ , $\mu + 0.48\sigma$ , $\mu + 2.0\sigma$ )

$\mu$  = 정규분포의 평균값,  $\sigma$  = 정규분포의 표준편차

구해진 가능성 분포의 사다리꼴 퍼지수를 가지고 단위 추가법에 의한 반복식과 Max-Min의 퍼지 연산을 통하여 공급지장기대치에 관한 분포를 구한다. 따라서 종래의 방법으로 계산된 누적확률표의 식 (1)은, 다음과 같이 일례로 확신레벨 QC에 대한 사다리꼴 퍼지수를 가지는 반복식으로 표시할 수 있다.

$$\tilde{P}(X) = (1(-) \tilde{\gamma}_{qc})(\times) \tilde{P}'(X) + \tilde{\gamma}_{qc}(\times) \tilde{P}'(X-C) \tag{9}$$

여기서  $\tilde{P}'(X)$ 와  $\tilde{P}(X)$ ,  $\tilde{\gamma}_{qc}$ 는 각각 사다리꼴 퍼지수의 형태를 가지는 누적확률과 강제고장 정지율을 나타내며, 계산과정에서 퍼지연산자 (-)와 ( $\times$ )를 사용하였다. 식 (9)의 결과 구해진 누적테이블은 구간의 범위와 함께 그 소속도(membership)를 가지게 되며 부하데이터와 결합되어 사다리꼴 퍼지수 형태의 공급지장 기대치를 얻을 수 있게 된다. 이러한 퍼지수를 사용한 계산 방법으로 구한 공급지장 기대치의 평균값은 확률적 방법을 사용하여 얻는 평균값과 거의 일치하고 있음을 다음의 사례연구에서 알 수 있다. 그러나 평균값이 존재할 수 있는 분포를 나타내는데 있어서 본 논문의 방법은 확률적 형태로 주어지는 데이터에 불확실한 면이 존재할 때 경험을 가진 전문가가 데이터의 확신정도에 따라 이를 계산과정에서 합리적인 방법으로 반영할 수 있도록 하였다.

#### 4. 퍼지이론을 이용한 부하데이터의 분류

누적확률표를 사용하여 공급지장기대치를 구하는 경우 주어진 부하를 하나 하나 결합하여 계산하게 되므로 이에 필요한 소요시간은 주어진 데이터의 양에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 계산속도를 향상시키기 위하여 부하에 관한 데이터를 일

정한 갯수의 집단으로 묶어 신뢰도 지수를 산정할 수 있고 이를 분류하는 과정에 퍼지 소속도의 개념을 적용하였다[7].

퍼지 군집화(Fuzzy Clustering)는 데이터가 분류될 때, 그 소속도의 정도를 0과 1뿐만이 아닌 그 사이의 수를 사용하여 나타낼 수 있다. 따라서 각각의 퍼지 집단(fuzzy class)에 속해있는 각각의 데이터에 0부터 1사이의 소속도를 부여할 수 있으며 이것은 한 개의 데이터가 다수의 집단에 부분적인 소속도를 가질 수 있다는 것을 의미하게 된다. 퍼지이론을 이용하여 부하 데이터를 분류할 때 기본적인 조건은 다음과 같다. 우선  $k$  번째 데이터가  $i$  번째 집단에 속하는 소속도는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\mu_{ik} = \mu_{\Delta_i}(x_k) \in [0, 1] \quad (10)$$

이 때, 단일 데이터 점  $k$ 가 모든 집단에 속하는 소속도의 합은 1이 되어야 하며, 집단  $i$ 에 원소가 하나도 없는 경우나 모든 원소를 포함하는 경우는 있을 수 없다. 따라서  $c$ 개의 집단과  $n$ 개의 데이터가 주어지는 경우 퍼지분류행렬(fuzzy partition matrix)의 군(family)을  $M_{fc}$ 라 정의하고, 이를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{fc} = \{ U \mid \mu_{ik} \in [0, 1]; \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1; 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n \} \quad (11)$$

여기서  $U$ 는 퍼지화된 집단의 분류행렬이다.

많은 갯수의 퍼지분류행렬 가운데에서  $n$ 개의 데이터와  $c$ 개의 집단으로 구성되는 특정한 퍼지집단분류행렬(fuzzy  $c$ -partition matrix)  $U$ 를 정하기 위해 목적함수  $J_m$ 을 정의하면

$$J_m(U, v) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2 \quad (12)$$

이고, 여기서  $d_{ik}$ 는  $k$  번째 데이터가  $i$  번째 집단의 중심으로 부터 떨어진 거리를 나타내고,  $J_m$ 이 최소값을 가질 때 분류의 상태가 최적화된 것으로 생각한다.

소속도의 멱지수를 나타내는 값  $m'$ 은 원래  $[1, \infty]$ 의 범위를 가진다.  $m' = 1$ 일 경우는 퍼지의 개념을 사용하지 않은 경우가 되며 이때의 소속도는 0과 1만을 가지게 된다. 반면  $m' \rightarrow \infty$ 일 경우는  $J_m \rightarrow 0$ 이 된다. 일반적으로  $m'$ 이 커지면 집단에 대한 소속도를 분산시키는 경우가 되며, 반대로  $m'$ 이 1에 가까워지면 그 소속도는 0과 1의 두가지 상태로만 분류되려는 성질을 나타내게 된다.  $m'$ 에 대한 이론적 최적값은 나타나 있지 않지만, 일반적으로 1.25에서 2사이의 값을 사용하며  $m'$ 의 값이 클수록 수렴속도는 감소한다. 본 논문에서는  $m'$ 에 대한 값으로 2를 사용하였다.

데이터들을 각 집단으로 분할하여 소속도를 부여하는 방법을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

**STEP 1.** 데이터들을 분류해 넣고자 하는 집단의 갯수  $C$ 를 결정하고 주어진  $m'$ 을 이용하여 분할행렬  $U(0)$ 를 초기화한다.

**STEP 2.**  $r$  번째 갱신되는 집단을 나타내는 대표값을  $v_i^{(r)}$ 로 나타내고 이를 식 (13)과 같이 계산한다.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2 \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2} \quad (13)$$

$\mu_{ik}$ :  $k$  번째 데이터가  $i$  번째 집단에 포함되는 소속도

$x_k$ :  $k$  번째 데이터의 값

**STEP 3.**  $r$  번째 step에서의 분할행렬  $U(r)$ 는 식 (14), (15)와 같이 결정된다.

$$\mu_{ik}^{(r+1)} = \left[ \sum_{j=1}^c \left( \frac{d_{jk}^{(r)}}{d_{ik}^{(r)}} \right)^{\frac{2}{m'-1}} \right]^{-1} \text{ for } I_k = \emptyset \quad (14)$$

또는,

$$\mu_{ik}^{(r+1)} = 0 \text{ for } i \in \tilde{I}_k \quad (15)$$

여기서,

$$I_k = \{ i \mid 2 \leq c < n; d_{ik}^{(r)} = 0 \} \quad (16)$$

$$\tilde{I}_k = \{ 1, 2, \dots, c \} - I_k \quad (17)$$

이다.

**STEP 4.** 식 (18)과 같이 새로 생성되는 분할행렬과 이전의 행렬의 원소를 비교하여 그 차이가 최대인 것이 종결조건을 만족시키면 분할이 끝난 것으로 하고 아니면  $r = r + 1$ 로 갱신하여 STEP 2로 돌아간다.

$$\| U(r+1) - U(r) \| \leq \epsilon_L \quad (18)$$

이상과 같은 방법을 사용하여 얻어진 분할된 데이터와 그에 관한 소속도를 확신레벨에 따른 퍼지수를 사용한 누적확률표와 결합하여 공급지장기대치를 구한다.

### 5. 사례연구 및 결과

본 논문에서 사용된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 33개의 발전기를 가지는 IEEE-RTS 데이터가 사용되었으며, 표 2에 이 계통에 대한 발전기 데이터를 나타내었다.

여기에서 나타내어지는 발전기에 대한 분산값은 참고논문 [1]을 통하여 제시되어진 값을 이용하였다. 공급지장기대치를 구하기 위한 부하의 경우는 i) 계통의 첨두부하가 2850[MW]의 한가지로 주어지는 경우, ii) 일주일동안의 부하형태가 2650.5,

표 2 IEEE-RTS 발전기 데이터

Table 2 Generating unit data for IEEE-RTS

발전기 용량(MW)	발전기 갯수	E [FOR]	Var [FOR]×10 <sup>-3</sup>
12	5	0.02	0.004
20	4	0.10	0.100
50	6	0.01	0.040
76	4	0.02	0.016
100	3	0.04	0.100
155	4	0.04	0.100
197	3	0.05	0.225
350	1	0.08	0.784
400	2	0.12	2.304

2850.0, 2793.0, 2736.0, 2679.0, 2194.5, 2137.5[MW]의 7 가지로 주어지는 경우, iii) IEEE-RTS에서의 8736가지의 부하로 주어지는 세 가지의 경우를 적용하였다. 퍼지이론을 이용하여 변환시킨 발전기 데이터에 관한 확률분포는 그 데이터의 확신정도에 따라 QC, CON, LC의 세 가지로 분류하였다. QC는 발전기에 관한 데이터들이 그 불확실한 정도가 가장 적음을 나타내며, CON, LC로 갈수록 점차 그 데이터들에 대한 불확실성이 증가되는 것을 의미한다. 이렇게 분류된 각각의 경우에 대하여 발전기의 누적 확률표를 구하고 이것을 부하와 결합하여 최종적인 공급지장 기대치에 관한 퍼지분포를 구할 수 있다. 부하가 8736가지로 주어지는 경우와 같이 그 데이터의 수가 많을 때는 퍼지 이론을 사용하여 이를 몇 개의 소 집단으로 분류한 뒤 공급지장 기대치를 계산하였다.

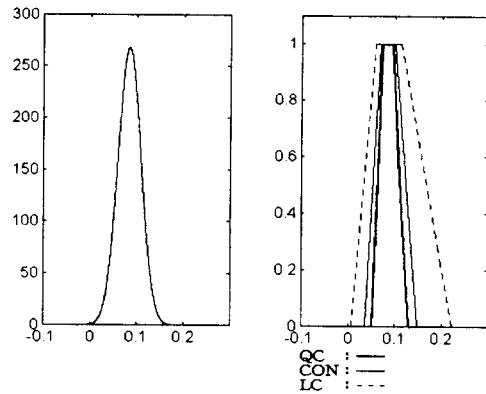
5.1 부하가 1가지인 경우(2850[MW])

확률이론에서의 공분산 행렬을 사용하여 구한 공급지장기대치에 대한 분포곡선과 확신레벨에 따라 변환된 퍼지수를 사용하여 구한 퍼지분포곡선은 그림 3과 같이 나타내어진다.

그림 3의 (a)는 공분산 행렬을 사용하여 얻어진 확률 분포 평면에서의 공급 지장 기대치의 분포를 보이고 있으며, 그림 (b)는 세 가지의 확신레벨을 사용한 퍼지 분포를 나타내고 있다. 발전기의 데이터에 대한 불확실성이 가장 많은 LC의 경우는 평균구간과 퍼짐구간이 다른 두 가지 경우에 비하여 가장 넓은 것을 볼 수 있다. 이것은 사용되는 발전기의 강제고장정지율에 관한 데이터가 신뢰할 수 없는 경우, 얻어지는 공급지장 기대치의 범위가 점점 넓어지는 것을 나타낸다. 발전기 데이터에 관한 확신레벨이 모두 QC로 그 불확실성이 매우 작다고 한다면 최종적으로 얻어진 공급지장 기대치의 분포는 그림(b)의 좁은 실선처럼 나타내어지며 그 범위는 가장 좁게 나타난다.

계통을 구성하는 발전기에 대한 데이터의 확신정도가 서로 다른 경우에는 서로 다른 확신레벨을 적용하여 공급지장기대치의 분포를 구할 수 있다[8].

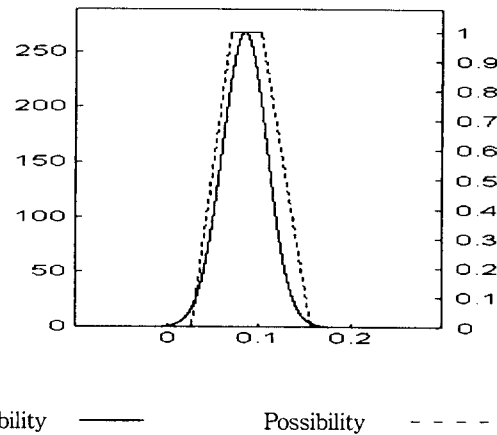
강제고장정지율에 관한 분산을  $\sigma^2$ 으로 표시할 때 주어진 분산의 크기가 커질수록 데이터에 대한 확신레벨의 정도가 점점 떨어지는 경우로 해석하면 다음과 같이 분류할 수 있다.



(a) 확률분포 (b) 가능성분포

그림 3 확률 곡선과 퍼지 곡선으로 나타낸 공급지장기대치의 분포

Fig. 3 LOLE distribution curve depicted by probabilistic and possibilistic function



Probability ——— Possibility - - - -

그림 4 확률 곡선과 퍼지 곡선으로 나타낸 공급지장기대치의 분포

Fig. 4 LOLE distribution curve depicted by probabilistic and possibilistic function

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 < 0.1 \times 10^{-3} & : \text{QC} \\
 0.1 \times 10^{-3} \leq \sigma^2 < 1.0 \times 10^{-3} & : \text{CON} \\
 1.0 \times 10^{-3} \leq \sigma^2 & : \text{LC}
 \end{aligned}$$

위의 분류에 따라 변환된 퍼지수를 사용하여 신뢰도 지수를 산출한 것을 그림 4에 나타내었다. 복합적인 발전기의 확신레벨을 사용하여 구해진 퍼지분포곡선의 평균구간은 확률분포로 구한 공급지장 기대치의 평균값을 포함하고 있으며, 퍼짐구간

은 공급지장 기대치가 존재하는 거의 모든 부분을 잘 포함하는 것을 볼 수 있다.

앞에서 얻어진 퍼지분포에서의 평균구간은 공급지장기대치의 평균값이 존재할 수 있는 범위를 그 가능성과 함께 나타내어 준다. 퍼짐구간은 신뢰도 지수가 존재할 수 있는 전체 영역을 표시해 주는 것으로 이해할 수 있다.

공분산 행렬을 통해 얻어진 확률적 계산결과는 표 3에 나타내었으며, 사다리꼴 퍼지수를 사용하여 각각의 확신레벨과 합성레벨에 따라 얻어진 평균구간과 퍼짐구간을 표 4에 나타내었다.

표 3 확률구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 3 Probabilistic intervals for LOLE

확률분포함수의 평균값	확률분포함수의 $\pm 3\sigma$ 부분		계산시간
0.084578	0.011430	0.157726	132초

표 4 퍼지구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 4 Fuzzy intervals for LOLE

	possibility	평균구간		퍼짐구간		계산시간
		하한값	상한값	하한값	상한값	
Q C	0.72	0.073526	0.096184	0.048924	0.127625	0.168초
CON	0.73	0.069874	0.100383	0.036248	0.147984	
L C	0.76	0.059249	0.113385	0.006841	0.222317	
합성레벨	0.72	0.068301	0.102018	0.028563	0.157085	

예를 들어, 확신레벨이 모두 QC로 그 불확실성이 매우 작으면, 이때의 평균구간은 그 상한과 하한이 각각 0.073526, 0.096184이며 이 구간 내에 공급지장 기대치가 존재할 가능성은 0.72가 된다. 표 3과 표 4의 결과를 보면 QC, CON, LC의 세 가지 확신레벨에 따라 구한 평균구간이 모두 확률분포에서 구한 확률분포함수의 평균값을 포함하고 있음을 나타내고 있으며, 각 구간 내에 신뢰도 지수가 속할 가능성은 구간이 넓어지면서 커짐을 볼 수 있다.

확률평면에서의 정규분포함수는 표준편차의  $\pm 3\sigma$  되는 구간이 99.7% 이상의 확률을 포함하므로 공급지장기대치를 나타내는 확률밀도함수의  $\pm 3\sigma$  부분을 퍼지 분포함수의 퍼짐구간과 비교할 수 있다.

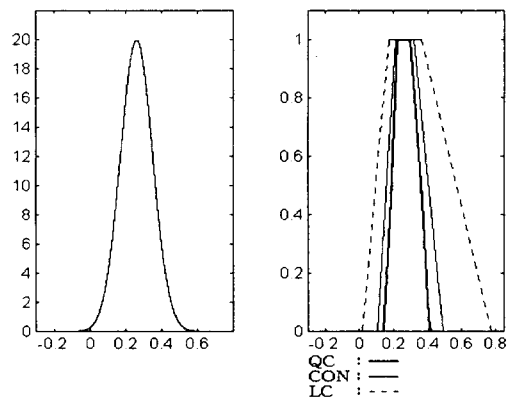
표 4의 합성레벨에 관한 계산값은 계통을 구성하는 발전기에 대한 데이터의 확신정도가 서로 다른 경우에는 서로 다른 확신레벨을 적용하여 구한 것이다. 합성된 평균구간은 그 상한값과 하한값이 각각 0.068301, 0.102018로서 구간 내에 공급지장기대치가 존재할 가능성은 0.72가 되며, 퍼짐구간은 확률분포의 대부분을 포함하는  $\pm 3\sigma$ 의 부분과 근사한 것을 확인할 수 있다.

이러한 퍼지 신뢰도의 결과는 전문가의 계통의 정보에 대한 경험과 함수 변환의 적합도를 잘 조화시켜 반영하고 있을 뿐 아니라 연산속도에 있어서도 확률이론을 사용한 것에 비해 매우 우수함을 보이고 있다.

5.2 부하가 7가지인 경우 (2650.5, 2850.0, 2793.0, 2736.0, 2679.0, 2194.5, 2137.5(MW))

공분산 행렬과 퍼지 확신레벨을 사용하여 얻어진 각각의 분포곡선을 그림 5에 나타내었다. 부하가 1가지로 주어진 그림 3의 경우와 마찬가지로 데이터에 대한 불확실성이 가장 많은 LC의 평균구간과 퍼짐구간이 다른 두 가지의 경우보다 그 범위가 넓게 나타나는 것을 볼 수 있다.

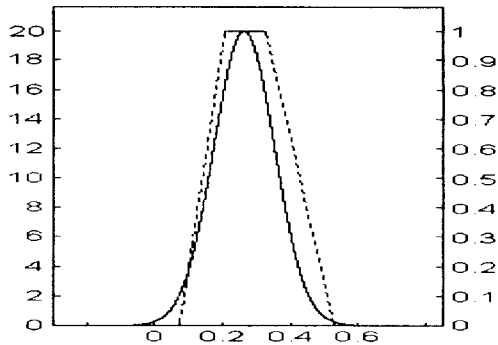
그림 (b)에서의 확신레벨에 따르는 각각의 평균구간은 확률분포에서의 평균값을 잘 포함하고 있다. QC, CON, LC의 순서로 데이터에 대한 불확실성이 늘어남에 따라 가능성분포로 구해지는 퍼지분포곡선이 존재하는 범위는 넓어지게 되고, 그 구간내에 공급지장기대치가 속할 가능성이 증가하게 된다. 계통을 구성하는 발전기에 대한 데이터의 확신정도가 서로 다른 경우, 이를 앞에 제시된 예와 같이 주어진 분산의 크기가 커질수록 데이터에 대한 확신레벨의 정도가 점점 떨어지는 경우로 해석하였다. 합성된 확신레벨에 관한 공급지장기대치의 분포와 공분산행렬을 사용하여 구한 분포곡선의 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 4의 경우와 마찬가지로 복잡한 발전기의 확신레벨을 사용하여 구해진 퍼지분포곡선의 평균구간은 확률분포로 구한 공급지장 기대치의 평균값을 포함하고 있으며, 퍼짐구간은 공급지장 기대치가 존재하는 거의 모든 부분을 잘 포함하는 것을 볼 수 있다



(a) 확률분포 (b) 가능성분포

그림 5 확률 곡선과 퍼지 곡선으로 나타낸 공급지장 기대치의 분포

Fig. 5 LOLE distribution curve depicted by probabilistic and possibilistic function



Probability ——— Possibility - - - - -

그림 6 확률 곡선과 퍼지 곡선으로 나타낸 공급지장기대치의 분포

Fig. 6 LOLE distribution curve depicted by probabilistic and possibilistic function

확률분포에 관한 계산결과와 퍼지분포의 각 구간에 관한 상·하한값을 표 5와 표 6에 나타내었다. 분포를 구하는데 필요한 연산시간은 퍼지분포가 확률분포에 비하여 매우 우수함을 보이고 있으며 데이터에 관한 전문가의 확신정도에 따라 계통의 공급지장기대치분포를 잘 나타내고 있음을 볼 수 있다.

공급지장기대치를 구하는데 있어서 부하의 데이터는 그 수가 증가할수록 계산의 소요시간을 증가시키게 된다. 따라서 많은 수의 부하를 퍼지 분류화 이론을 사용하여 작은 수의 집단으로 축소시킬 수 있고, 이에 따라 연산시간을 감소시킬 수 있다. 그림 7과 8은 8736개의 부하 데이터를 퍼지이론을 이용하여 20개의 집단으로 분류한 결과를 그림으로 표시한 것이다.

표 5 확률구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 5 Probabilistic intervals for LOLE

확률분포함수의 평균값	확률분포함수의 $\pm 3\sigma$ 부분		계산시간
0.262053	-0.005871	0.529978	160초

표 6 퍼지구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 6 Fuzzy intervals for LOLE

	possibility	평균구간		퍼지구간		계산시간
		하한값	상한값	하한값	상한값	
Q C	0.72	0.224601	0.302239	0.143234	0.414307	0.172초
CON	0.73	0.212148	0.316941	0.103005	0.489198	
L C	0.76	0.176852	0.362991	0.016391	0.776849	
합성레벨	0.72	0.205805	0.323908	0.075435	0.529208	

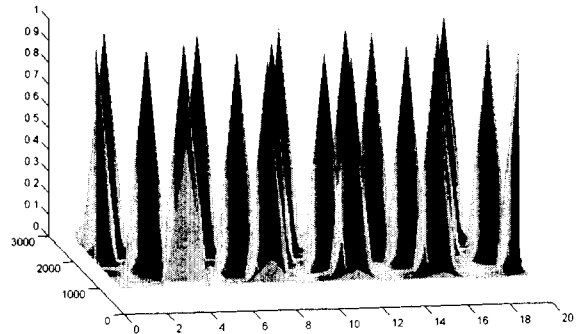


그림 7 20개의 집단으로 분류된 데이터와 그의 소속도에 관한 분포

Fig. 7 Membership distribution for the data divided into 20 clusters

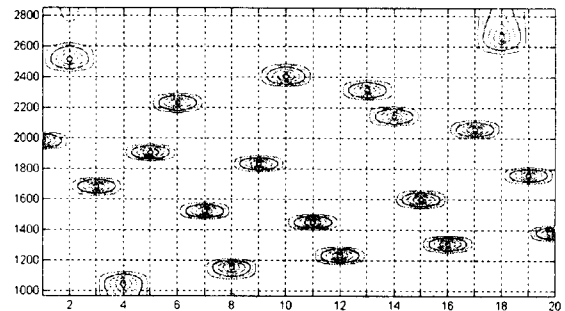


그림 8 등고선 형태로 나타낸 데이터와 소속된 집단과의 분포 형태.

Fig. 8 Distribution for the data and their clusters displayed by contour lines

퍼지 분류화는 분류되는 데이터가 한 개의 집단에만 속하게 되는 것이 아니라 이웃한 주변의 집단에도 어느 정도의 소속도를 가지게 되는 것을 의미한다. 그림 7의 x 축은 분류된 20개의 집단을 나타내고 있으며 y 축은 8736개의 데이터가 나타내고 있는 부하의 크기이다. z 축은 각각의 데이터가 각 집단에 속하고 있는 소속도를 나타내고 있다. 분류되는 부하데이터는 소속되는 집단을 나타내는 대표값에 가까울수록 1에 가까운 소속도를 가지게 된다. 원추형으로 나타내어진 소속도의 그림은 분류된 데이터가 중심값에서 가까운 곳은 거의 1의 값을 가지고 멀어질수록 그 값이 낮아지는 것을 쉽게 볼 수 있다. 이것을 등고선의 형태로 나타내면 그림 8과 같다.

### 5.3 8736개의 부하를 20개, 50개의 집단으로 분류한 경우

여기서는 주어진 부하에 관한 데이터가 한 집단에만 속해있는 것이 아니라 다른 이웃한 집단에도 소속도를 가지도록 퍼지 분포를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다.

예를 들어 부하가 1800[MW]라고 가정하면 이 부하는 분류 집단 9에 어느 정도의 소속도를 가짐과 동시에 집단 19에도 일정한 소속도를 가지는 것을 볼 수 있다. 주어진 8736개의 부하는 그 분포가 전 영역에 고르게 분포하지 않으므로 분류집단을 나타내는 타원의 크기가 서로 다르게 된다. 따라서 분류집단 4 또는 18의 경우처럼 집단에 포함되는 부하의 갯수는 많지 않으나 그 범위가 넓게 나타날 수 있다. 분류하고자 하는 퍼지집단의 갯수를 10개에서부터 50개까지 변화시켜 보았다. 이때 구해지는 공급지장 기대치를 사다리꼴 퍼지수의 형태로 표시하고, 확률이론에서의 8736개의 부하를 모두 사용하여 구해진 공급지장 기대치의 평균값에 대한 오차율을 비교하여 표 7로 나타내었다. 8736개의 많은 부하데이터를 10개만의 집단으로 분류했을 때는 확률분포에서 구한 공급지장 기대치의 평균값에 대한 오차는 17.75%를 나타낸다. 분류집단의 갯수를 증가시켜 20개로 했을 때는 그 오차가 4.24%로 낮아지며, 50개일때는 1.44%로 낮아지는 것을 표에서 볼 수 있다.

공분산 행렬을 사용하여 구한 확률분포와 확신레벨을 사용하여 얻어진 퍼지분포의 계산값을 표 8과 표 9에 나타내었다. 퍼지 분포의 평균구간은 그 상한값과 하한값 내에 확률분포에서의 평균치를 포함하고 있으며, 퍼지구간은 발전기 구성 데이터의 확신정도에 따라 전문가의 정보에 대한 경험을 반영하여 신뢰도 지수가 존재할 수 있는 구간을 나타내고 있다.

표 7 퍼지 군집화를 이용한 공급지장 기대치 산정  
Table 7 LOLE evaluation using fuzzy clustering

사다리꼴 퍼지 퍼지수 집단의 갯수	( a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> )				
	10개	(3.179456 6.146443 9.562535 15.404794)	평균	7.726813	오차율
20개	(4.393317 7.955174 11.894039 18.429763)	평균	9.792573	오차율	4.24%
30개	(3.970136 7.344825 11.129266 17.474148)	평균	9.105151	오차율	3.08%
50개	(4.029270 7.466775 11.316435 17.758827)	평균	9.258149	오차율	1.44%

(확률이론에 의한 공급지장기대치의 평균값 : 9.39416)

표 8 확률구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 8 Probabilistic intervals for LOLE

확률분포함수의 평균값	확률분포함수의 ±3σ 부분		계산시간
9.39416	-3.979215	22.767535	247초

표 9 퍼지구간으로 나타낸 공급지장 기대치

Table 9 Fuzzy intervals for LOLE

	possibility	평균구간		퍼지구간		계산 시간
		하한값	상한값	하한값	상한값	
합성레벨	0.72	7.46677	11.3164	4.02927	17.7588	0.206초

6. 결 론

본 논문에서는 주어진 확률적 데이터를 퍼지데이터로 변환하여 신뢰도 지수를 계산하는 방법을 제시하였다. 기존의 확률이론에서는 공급지장기대치의 산정시 불확실성을 고려하는 경우에 공분산 행렬을 사용하는 방법을 이용하였다. 본 논문에서는 이러한 불확실성에 퍼지이론을 도입하여 퍼지수의 Max-Min 연산을 사용하였고, 많은 양의 부하데이터에 대한 계산상의 부담을 줄이기 위하여 퍼지분할이론을 통해 부하를 몇 개의 대표값으로 집단화하여 이를 적용하였다. 논문에서 사용되는 많은 수의 부하데이터는 퍼지분할행렬을 이용하여 소집단으로 분류되었으며, 이렇게 분류된 집단의 대표값은 그의 소속도와 함께 신뢰도 지수를 구하기 위한 퍼지연산에 사용되었다. 또한 논문에 적용된 알고리즘은 불확실성이 존재하는 확률적 데이터에 전문가의 경험적 판단을 첨가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이러한 퍼지연산을 사용하여 얻은 퍼지 신뢰도지수값을 기존의 확률이론에서 얻은 신뢰도지수값과 비교하였다. 이것은 신뢰도 지수를 구하기 위한 데이터가 불확실성을 포함한 경우, 확률적 데이터의 가치를 무시하지 않으면서도 전문가의 경험적 판단을 객관적이고 논리적으로 조화시킬 수 있는 방법으로서의 가치가 있다고 하겠다. 본 논문에서 사용된 알고리즘은 경제적인 퍼지연산과정을 통하여 기존의 확률이론에서 사용된 방법보다 그 계산속도를 매우 향상시켰으며 컴퓨터내의 저장공간을 경제적으로 사용함으로써 그 유용성을 보였다. 이러한 방법은 데이터가 불확실성을 내포한 전력계통의 다른 부분의 해석에도 적용 가능할 것으로 기대되어 진다.

참 고 문 헌

[1] R. Billinton and G. Hamoud, "Considerations in Including Uncertainty in LOLE Calculations for Practical Systems," Paper No. A 79 075-3, IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, Feb. 4-9, 1979.

[2] C. P. Gupta, "A Note on the Transformation of Possibilistic Information into Probabilistic Information for Investment Decisions," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 56, pp.175-182, 1993.

[3] G. Hamoud, R. Billinton, "An Approximate and Practical Approach to Including Uncertainty Concepts in Generating Capacity Reliability Evaluation," *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 100, No. 3, pp.1259-1265, Mar. 1981.



- [4] A. D. Patton and A. Stasions, "Variance and Approximate Confidence Limits on LOLP for a Single-Area System," *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 94, No. 4, pp.1326-1336, Jul./Aug. 1975.
- [5] D. L. Mon and C. H. Cheng, "Fuzzy System Reliability Analysis by Interval of Confidence," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 56, pp.29-35, 1993.
- [6] J. M. Ling, C. E. Lin and C. L. Huang, "Investigation of Fuzzy Real Power Flow Modeling with Probabilistic-Heuristic Based Information," *Electric Power Systems Research*, Vol. 32, pp.175-186, 1995.
- [7] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [8] D. L. Mon and C. H. Cheng, "Fuzzy System Reliability Analysis for Components with Different Membership Functions," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 64, pp.145-157, 1994.
- [9] Roy Billinton and R.N.Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd Edition, Plenum Press, New York, 1996.

---

## 저 자 소 개



심 재 홍 (沈載鴻)

1969년 6월 24일생. 1995년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1998년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 포항제철 근무



정 현 수 (鄭炫洙)

1950년 8월 13일 생. 1974년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : (02) 2290-0347

김 진 오 (金鎭 吾)

전기학회논문지 제48A권 제3호 참조

Tel : (02) 2290-0347

E-mail : jokim@email.hanyang.ac.kr