

퍼지이론을 이용한 철도 전력 설비의 Risk Priority Number 산정

Evaluation for Risk Priority Number of Railway Power System Facility using Fuzzy Theory

이윤성* · 변용태* · 김진오[†] · 김형철** · 이준경***

Yun-Seong Lee · Yoong-Tae Byeon · Jin-O Kim · Hyung-Chul Kim · Jun-Kyung Lee

Abstract The RPN provides information which includes the risk level and the priority order of maintenance tasks for components. However, if there is no sufficient historical failure data, the historical failure data from other sources can be applied to the target system. And if we use historical data from other sources without any process, there will be concomitant problems according to a discord of each system characteristic, a difference between the present and the date of failure data, etc. In this paper, a new methodology is proposed to model the failure rate as a fuzzy function to resolve these problems. Taking advantage of this result, the RPN can be calculated by using the fuzzy operation. The proposed method is applied to the substation system.

Keywords : Expert System, FMECA, Fuzzy Theory, Risk Priority Number, RPN

요 지 신뢰도 기반 유지보수의 연구가 진행됨에 따라 설비의 신뢰도를 바탕으로 한 효율적인 유지보수 업무가 가능하게 되었다. Risk Priority Number(RPN)는 시스템을 구성하고 있는 설비에 대한 Severity(S), Occurrence(O), Detection(D)을 각각 평가하고 이를 하나의 통합된 수치로 표현함으로써 설비간의 유지보수 우선순위에 관한 정보를 제공한다. 하지만 철도 전력 설비와 같이 통계적인 고장 데이터가 부족하거나 신뢰성이 떨어지는 경우에는 이들의 평가가 객관적으로 이루어지기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 설비의 Occurrence를 평가하기 위해 퍼지 이론을 이용한 고장률 가공 방법을 제시하고, 객관적인 Severity와 Detection 평가를 이용하여 Risk Priority Number를 계산하는 새로운 방법을 제시하였으며, 이를 철도 변전소 모의 시스템에 적용시켜 보았다.

주 요 어 : 전문가 시스템, 퍼지이론, FMECA, Risk Priority Number, RPN

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

신뢰도 기반 유지보수(Reliability Centered Maintenance)의 연구가 진행됨에 따라 경제적으로 효율적인 유지보수 업무수립에 대한 필요성이 증대되었다[1]. 설비의 효과적인 유지보수 업무를 위해 도입할 수 있는 Risk Priority Number(RPN)는 시스템을 구성하고 있는 설비에 대한 Severity(S), Occurrence(O), Detection(D)을 1~10 사이의 수

로 평가하고 이를 하나의 통합된 수치로 표현함으로써 설비간의 유지보수 우선순위에 관한 정보를 제공한다[2]. 여기서 Severity는 고장의 심각도를 의미하고, Occurrence는 고장의 빈도수, Detection은 고장의 탐지 가능성을 의미한다.

하지만 전력 설비는 수명이 길고, 체계적으로 고장 데이터가 누적되어 있지 않은 경우가 많아 통계적으로 활용할 수 있는 고장 데이터가 부족하고, 그로인해 신뢰성이 떨어지는 경우에는 이들의 평가가 객관적으로 이루어지기 어렵다. 이 때 국제 규격서의 고장 데이터를 차입하여 대상 설비에 적용할 수 있지만, 대상 설비와의 시스템 특성의 불일치, 기술 수준이나 유지보수 업무의 차이 등으로 인해 그대로 적용하기엔 문제가 발생한다.

그리고 기존의 RPN의 계산은 각각 평가된 S, O, D 값들을 단순히 산술적으로 곱하는 것이었다. 하지만 이러한 방

* 책임저자 : 정희원, 한양대학교, 전기제어생체공학부, 교수
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0347 FAX : (02)2220-1856

† 정희원, 한양대학교 대학원, 전기공학과

** 정희원, 철도기술연구원

*** 정희원, 세종기술

법은 Table 1에서 보는 것처럼 설비 A와 설비 B의 RPN이 각각 80과 70으로 계산되고, 설비 A의 유지보수 우선순위가 설비 B보다 높다는 데서 문제가 발생한다. Table 1의 결과는 설비 B의 Detection에 의해 RPN값이 왜곡되었음을 확인할 수 있다.

Table 1. Results of traditional method for RPN

설비	S	O	D	RPN
A	5	4	4	80
B	7	10	1	70

유지보수 우선순위의 결정은 효율적이고 경제적인 유지보수 업무를 위해 합리적으로 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 설비의 Occurrence를 평가하기 위해 퍼지 이론을 이용한 고장률 가공 방법을 제시하고, 객관적인 Severity와 Detection 평가를 이용하여 Risk Priority Number(RPN)를 계산하는 새로운 방법을 제시한다.

2. Risk Priority Number

2.1 Severity & Detection 평가

본 논문에서는 RPN을 계산하기 위해 필요한 세 지수 중 Severity와 Detection에 관한 평가를 먼저 수행하고, 이 평가 결과를 이용하여 Severity & Detection 평가 퍼지 함수를 구성한다.

2.1.1 Severity 평가

철도 전력 시스템의 각 설비에 대한 Severity는 고장수목도(Fault Tree)를 이용하여 설비의 구조적 중요도를 분석하여 평가하는 방식을 이용하였다. 철도 전력 시스템의 각 구성요소를 고장수목으로 나타내고 최소절단집합(Minimal Cut set)을 구하여 각 설비가 전체 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것이다[3]. Severity는 식 (1)과 같이 계산한다.

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{M.O} \sqrt{w} \times N_{ij}}{\sum_{j=1}^{M.O} N_{ij}} \quad (1)$$

여기서, w 는 고장 발생에 대한 효과 수치, $M.O$ 는 최소절단집합의 최대 차수, N_{ij} 는 설비 i 의 j 차 절단집합에 포함된 개수를 나타낸다.

2.1.2 Detection 평가

Detection은 설비 고장의 탐지 가능성을 평가하는 것으

로, 고장이 발생하고 나서 수리가 이루어지기 까지 경과되는 평균 지연 시간으로써 구할 수 있다. 이 때 평균 지연 시간을 1~10사이의 값으로 변환하기 위해 식 (2)와 같이 표준화 하는 과정을 거친다.

$$D_i = 5 + \frac{T_i - m_d}{\sigma_d} \quad (2)$$

여기서, T_i 는 설비 i 의 평균 지연 시간, m_d 는 평가 대상 설비의 평균 지연 시간의 산술평균, σ_d 는 평가 대상 설비의 평균 지연 시간의 표준편차이다. D_i 의 최솟값은 1이고, 최댓값은 10이다.

2.1.3 Severity & Detection 평가 퍼지 함수 구성

Severity와 Detection 평가치를 결합하여 퍼지 함수로 나타낸다. 이 과정을 식 (3)에 나타내었다.

$$C_i^{SD} = \frac{S_i + D_i}{2} \quad (3)$$

$$l_i^{SD} = \min[S_i, D_i]$$

$$u_i^{SD} = \max[S_i, D_i]$$

여기서, C_i^{SD} 는 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수의 중심 값을 의미하고, l_i^{SD} 과 u_i^{SD} 는 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수의 하한값과 상한값을 각각 나타낸다.

2.2 Occurrence 평가

설비의 Occurrence는 고장률을 바탕으로 평가할 수 있고, 철도 전력 설비의 고장 데이터가 충분치 않거나 데이터의 신뢰성이 부족한 경우, 외부 국제 규격서의 고장 데이터를 차용하여 사용해야 한다. 이 때 차용한 시스템과 분석 대상 설비와의 시스템 특성 차이, 운영 조건 차이, 또는 고장 데이터의 불확실성 등의 이유로 전문가 의견 시스템을 통한 데이터의 가공 과정을 거쳐야 한다. 하지만 주관적인 전문가의 의견이 고장률에 반영될 경우에는 특정 전문가의 극단적인 평가 성향이 고장률 평가 값에 심한 왜곡을 불러일으킬 수가 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 전문가 성향을 반영하는 전문가 평가 매트릭스를 이용한 고장률 가공 방법을 제시하고, 앞서 언급한 불확실성을 나타내기 위한 고장률의 퍼지 함수 표현 방법을 제시한다.

2.2.1 전문가 평가 매트릭스

철도 전력 설비 전문가들은 시스템을 구성하고 있는 설비들에 대해 실제로 고장이 얼마나 빈번하게 발생할 지를 고장 데이터를 차용한 해당 외부 설비와의 비교 분석을 통해 분석 대상 설비의 고장률에 대한 평가 수치를 결정한다. 이 수치를 취합하여 하나로 구성한 것을 전문가 평가 매트릭스, X 라 정의하고, 매트릭스의 행(row)에는 설비의 종류가, 매트릭스의 열(column)에는 각각의 전문가를 나타낸다.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2j} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \cdots & X_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, i 는 설비 종류를, j 는 전문가를 나타낸다. 전문가들은 다른 외부 데이터로부터 획득한 고장 데이터와 비교하여, 수치 5를 기준으로 1~10 사이의 수치로써 철도 전력 설비의 고장률을 평가하게 된다. 외부 데이터와 비교하여 더 높은 고장률이 예상된다면 기준 5보다 높은 수치를, 더 낮은 고장률이 예상된다면 기준보다 낮은 수치를 책정하게 된다.

이 때, 특정 전문가가 모든 전력 설비에 대해 편차가 거의 없도록 평가를 했다면 다른 전문가들에 의해 전반적인 낮은 평가를 받은 설비가 평가 편차가 거의 없는 전문가에 의해 고장률이 평가절상 된다는 문제점을 가지고 있다. 반대로 평가의 편차를 크게 두는 평가 성향을 가지는 전문가의 의견도 같은 이유로 왜곡을 발생시킨다. 이것은 평가를 받는 설비의 입장에서도 고려해야 한다. 대부분의 낮은 고장률 평가를 받은 설비가 있을 때, 소수의 전문가들의 편차가 낮은 평가 성향으로 인해 평가 결과가 상향 조정될 우려가 있다.

이러한 논리를 바탕으로 고장률 예측을 위한 전문가 평가 매트릭스를 보정할 수 있는 새로운 매트릭스, ΔX 가 존재해야 하고, 전문가 성향을 반영한 보정치 매트릭스의 요소, Δx_{ij} 를 구하는 방법을 다음과 같이 제안한다.

$$\Delta x_{ij} = \frac{\sigma_j}{\rho_i} \times \frac{x_{ij} - m_{x_i}}{n} \quad (5)$$

여기서, Δx_{ij} 는 ΔX 의 구성 요소, σ_j 는 X 의 j 열 요소들 간의 표준 편차, ρ_i 는 X 의 i 행 요소들 간의 표준 편차, x_{ij} 는 X 의 i 행, j 열 구성 요소, m_{x_i} 는 X 의 i 행 요소들의 산술 평균, n 은 전문가 수를 의미한다. 식 (5)에서 σ_j 는 전문가

의 성향을 대변하는 표준편차이고, ρ_i 는 평가받는 설비에 대한 평가치의 표준편차이다. σ_j 가 큰 전문가, 즉 평가치의 편차가 큰 전문가의 평가는 상향조정이 된다. 반면 해당 전문가의 평가가 편차가 큰 평가 성향으로 인해 특정 설비에서 다른 전문가에 비해 상대적으로 크거나 작은 평가가 매겨졌다면, ρ_i 로 인해 평가가 다시 하향조정 된다. 다시 말해 각 평가치가 σ_j 로 인해 1차 보정된 후, 다른 전문가들의 평가치와 비교하여 이 보정치가 합당한 지를 판별하여 ρ_i 에 의해 2차 보정이 이루어지는 것이다. 특정 전문가가 다른 전문가에 비해 크게 벗어나는 평가를 했다면 ρ_i 값이 커질 것이고, 이 값에 의해 Δx 가 다시 작아질 것이기 때문이다.

표준편차 자체로는 실제적인 평가 수치의 크기를 반영하고 있지 않으므로, 하나의 설비에 대한 각각의 평가 수치와 그 설비에 대한 평가 수치의 산술 평균과의 차이를 곱함으로써 전체적인 보정치 크기를 결정하게 된다. 그리고 전문가의 수가 많아질수록 결과 값의 왜곡 정도가 감소하게 되므로, 보정치에 전문가의 수를 반영하였다.

전문가 성향을 반영한 보정치 매트릭스, ΔX 는 각 전문가의 성향에 따라 양수 또는 음수의 값으로 이루어진 매트릭스로서, 처음의 전문가 평가 매트릭스, X 에 더하여 보정된 전문가 평가 매트릭스, $X_{revised}$ 를 구할 수 있다.

$$X_{revised} = X + \Delta X \quad (6)$$

여기서, 보정된 전문가 평가 매트릭스, $X_{revised}$ 의 요소의 범위는 0~10 사이이므로, 10 이상의 수치는 10으로 나타낸다.

2.2.2 전문가 가중치 벡터

전력 설비의 고장률을 평가하는 전문가들은 각기 다른 실무 경험과 평가 대상에 대한 직무 상관성이 다르기 때문에 이들의 평가치를 차등화 하여 반영할 필요가 있다. 이 때 전문가들의 직위, 근로년수, 교육수준, 연령 등의 지표를 고려할 수 있고[4], 이를 식 (7)과 같은 벡터로 표시한다.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, n 은 전문가 수, w_n 는 전문가 별 가중치로써(해당 전문가의 점수 합/모든 전문가들의 점수 합)으로 구한다.

2.2.3 고장률 평가 지수 벡터

전문가의 평가 수치에 해당 전문가의 가중치를 부여하기 위해, 식 (7)에서 정의한 전문가 별 가중치 벡터, W 를 보정

된 전문가 평가 매트릭스, $X_{revised}$ 에 곱함으로써 최종적인 고장률 평가 지수 벡터, X_{new} 를 구할 수 있다.

$$X_{new} = X_{revised} \times W \quad (8)$$

이 수치는 전문가의 평가 성향을 고려하였을 뿐만 아니라, 평가를 시행한 전문가의 직위, 학력, 연령 등의 분류를 통해 차등화 한 점수로 계산된 전문가 별 가중치도 함께 고려되었다. 즉, 고장률 평가 지수 벡터는 설비의 최종적인 Occurrence 평가를 위한 수치를 의미한다.

2.2.4 고장률의 퍼지 함수 표현

고장 데이터의 불확실성을 나타내고, 퍼지 연산을 이용한 RPN 계산을 위해 고장률을 퍼지 함수로 표현해야 하고, 일반적인 퍼지 함수 중의 하나인 삼각 퍼지 함수를 이용하여 Fig. 1과 같은 퍼지 소속 함수를 구성하였다.

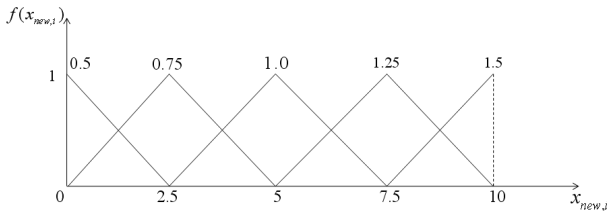


Fig. 1. Fuzzy membership function for expression of failure rate

설비 별 고장률 평가 지수 벡터, X_{new} 를 이용하여 고장률을 퍼지 함수로 표현하는 방법은 식 (9)~(11)을 따른다.

$$\lambda_c = c_1 f_{c1}(x_{new,i}) + c_2 f_{c2}(x_{new,i}) \quad (9)$$

여기서, λ_c 는 고장률 퍼지 함수의 중심값, $x_{new,i}$ 는 설비 별 고장률 평가 지수, c 는 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수 (0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5) 이다. c 는 고장률 평가치가 커질수록 불확실성도 커진다는 것을 반영하기 위해 퍼지 함수 별로 가중치를 두는 것으로, 전문가들이 설정할 수 있는 값이다.

고장률을 퍼지 함수로 표현함에 있어서, 하한값과 상한값을 결정하기 위해 하나의 고장률 평가 지수에 대해 두 개의 퍼지 소속 함수 값이 나오게 된다. 식 (9)에서의 두 항 $c_1 f_{c1}(x_{new,i})$ 와 $c_2 f_{c2}(x_{new,i})$ 는 각각 고장률 퍼지 함수의 하한값과 상한값에 대한 불확실성의 크기를 내포하고 있다. 따라서 이 값을 더함으로써 불확실성을 고려한 예측된 고장률의 크기로서 중심 값을 나타냈다. 그리고 고장률 퍼지 함수의 하한값과 상한값은 식 (10)과 식 (11)에 의해 계산한다.

$$l = \lambda_c - \frac{\rho_i \times \min\{c_1, c_2\}}{n} \quad (10)$$

$$u = \lambda_c + \frac{\rho_i \times \max\{c_1, c_2\}}{n} \quad (11)$$

여기서, l 은 고장률 퍼지 함수의 하한값, u 는 고장률 퍼지 함수의 상한값, ρ_i 는 X 의 i 행 요소들 간의 표준 편차, n 은 전문가 수에 따른 계수이다.

식 (10)과 식 (11)에서의 l 과 u 는 각각 고장률 퍼지 함수의 하한값과 상한값을 나타낸다. 이것은 고장률의 불확실성을 표현하기 위해 설정되는 값으로 고장률 퍼지 함수의 중심 값으로부터의 거리를 뜻한다. ρ_i 는 전문가 평가 매트릭스, X 의 i 행 요소들 간의 표준편차로써 하나의 설비에 대한 전문가들의 평가의 분산 정도를 나타내는 값으로 퍼지 소속 함수 관계식 가중 지수 값에 곱해짐으로써 그 정도를 반영하게 된다. 하나의 설비에 대한 전문가들의 평가의 편차가 크다면 해당 설비에 대한 고장률의 불확실성도 크다는 것을 의미하므로, 이것이 고장률 퍼지 함수의 하한값과 상한값을 결정하는 데 ρ_i 를 고려해야 하는 근거가 된다. 식 (9)~(11)로부터 λ_c , l , u 를 구하면, Fig. 2와 같이 고장률을 불확실성을 반영한 퍼지 함수로 표현할 수 있다. 외부 데이터로부터 얻은 설비의 고장률이 λ 라고 할 때, 평가 대상 설비의 고장률은 $\lambda_c \cdot \lambda$ 라는 것에 대한 소속 함수 값이 1이고, $\pm(1 - f(\lambda_A)) / (\lambda_c - \lambda_A)$ 의 기울기를 가지며 분포한다는 것을 의미한다[5].

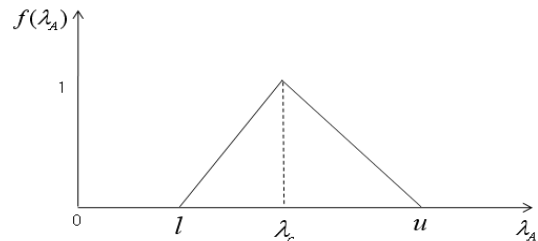


Fig. 2. Fuzzy function for failure rate

2.2.5 Occurrence 평가

본 논문에서 설비의 유지보수 우선순위 산정을 위한 RPN 계산에 필요한 Occurrence 평가를 위하여 평가 대상 설비의 고장률, $\lambda_c \cdot \lambda$ 를 표준화 하는 과정을 거친다.

$$O_i = 5 + \frac{\lambda_{c,i} \cdot \lambda_i - m_o}{\sigma_o} \quad (12)$$

여기서, $\lambda_{c,i} \cdot \lambda_i$ 는 설비 i 의 고장률, m_o 는 평가 대상 설비의 고장률의 산술평균, σ_o 는 평가 대상 설비의 고장률의 표

준편차이다. O_i 의 최솟값은 1이고, 최댓값은 10이다.

2.3 Risk Priority Number 계산

2.1.3절에서 구한 Severity & Detection 평가 퍼지 함수와 2.2.4-2.2.5절에서 구한 Occurrence 평가 퍼지 함수를 결합하기 위해 α -cut 연산을 이용하고[6], 통합된 퍼지 함수의 무게 중심의 가로축 좌표 값을 해당 설비의 RPN으로 결정하였다.

3. 사례연구

본 논문에서 제안하는 철도 전력 설비의 고장률 평가와 유지보수 우선순위의 결정을 위해 Fig. 3(a)와 같은 철도 변전소 모의 계통을 구성하였다. Fig. 3(a)의 철도 변전소 모의 계통에 대한 고장 수목도는 Fig. 3(b)와 같다.

Fig. 3의 고장 수목도를 바탕으로 최소 절단 집합을 구하고, 식 (1)을 이용하여 설비 별 Severity를 계산하였으며, 결과를 Table 2에 나타내었다.

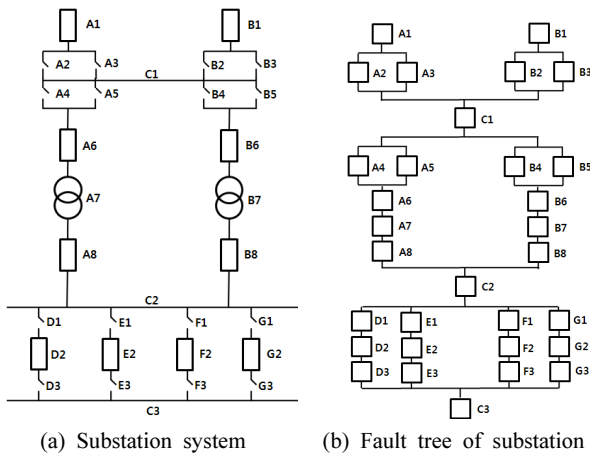


Fig. 3. Power substation system and fault tree

Table 2. Severity evaluation for facilities

설비	설비코드	Severity
가스차단기	A1, A6, A8, B1, B6, B8, D2, E2, F2, G2	4.09
스코트변압기	A7, B7	4.95
단로기	A2, A3, A4, A5, B2, B3, B4, B5, D1, D3, E1, E3, F1, F3, G1, G3	2.73
Bus	C1, C2, C3	10.0

설비의 Occurrence 평가를 위한 전문가 평가는 Table 3과 같이 가정하였으며, 본 논문에서 제안한 전문가 평가 성향을 반영한 결과 값은 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Expert's opinions

설비	전문가 평가				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
가스차단기	8	7	6	6	7
스코트변압기	9	6	7	4	5
단로기	2	2	5	3	4
Bus	1	2	5	4	4

Table 4에서 산술평균은 전문가 평가를 산술평균한 값이고, 보정값은 본 논문에서 제안한 전문가 성향을 반영한 평가치이다.

Table 4. Evaluation index for failure rate

설비	산술평균	보정값	고장률
가스차단기	6.80	7.05	1.2715×10^{-5}
스코트변압기	6.20	6.18	8.3405×10^{-6}
단로기	3.20	2.60	2.2896×10^{-6}
Bus	3.20	2.65	3.999×10^{-6}

Fig. 4는 가스차단기에 대한 고장률의 퍼지 표현이며, Table 5는 설비 별 Occurrence 평가를 정리한 것이다. 표 5의 occurrence는 절대적인 값이 아니며 설비들 간의 고장률을 바탕으로 평가된 상대적인 중요도를 의미한다.

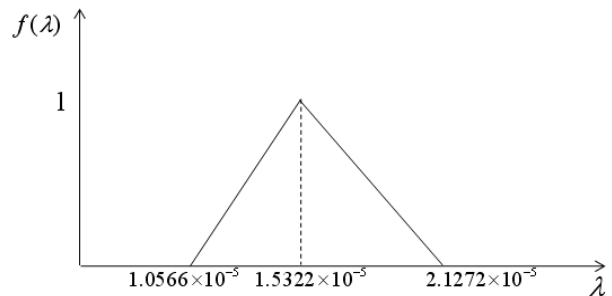


Fig. 4. Fuzzy Function for failure rate of Gas circuit breaker

Table 5. Occurrence evaluation for facilities

설비	Occurrence		
	하한값	중심값	상한값
가스차단기	4.46	6.47	8.98
스코트변압기	1.24	5.36	10.00
단로기	1.68	3.96	7.00
Bus	1.18	4.21	8.25

설비의 Detection 평가는 평균 지연 시간을 이용하여 계산하지만 본 논문에서는 Table 6과 같이 가정하였다. Table 2, 5, 6의 S, O, D 평가를 이용하여 본 논문에서 제안하는

퍼지 연산을 이용한 RPN 계산 결과를 Table 7에 정리하였다. 세 평가치를 하나로 통합하는 과정에는 α -cut 연산 방법을 이용하였다.

Table 7에서 제안된 RPN은 본 논문에서 제안한 방법에 의한 결과이고, 기존의 RPN은 산술적인 곱연산에 의한 결과이다. Fig. 3에서 보듯이 bus의 구조적 중요도가 아주 높다는 것을 알 수 있고, bus의 Severity도 10.0이라는 값을 가지게 되었는데, 기존의 RPN은 다른 설비에 비해 훨씬 높은 bus의 Severity를 반영하지 못하고 우선순위가 3위에 그치는 반면, 본 논문에서 제안한 RPN 계산 방법에 의해서는 이 값을 잘 반영한 것을 확인할 수 있다.

Table 6. Detection evaluation for facilities

설비	Detection
가스차단기	5
스코트변압기	5.5
단로기	4
Bus	3

Table 7. Results for evaluation of RPN

설비	S	O	D	기존의 RPN	우선 순위	제안된 RPN	우선 순위
가스차단기	4.09	6.47	5.00	132	2	5.19	3
스코트변압기	4.95	5.36	5.50	146	1	5.28	2
단로기	2.73	3.96	4.00	43	4	3.61	4
Bus	10.0	4.21	3.00	126	3	5.79	1

4. 결론

철도 전력 설비의 유지보수 우선순위를 결정하는 방법으로 퍼지 이론을 이용한 Risk Priority Number를 계산하는

새로운 방법을 제안하였다. 또한 고장 데이터의 가공을 통한 불확실성이 반영된 고장률의 퍼지 표현 방법을 제시하였고, 이를 RPN의 Occurrence 평가에 이용하였다. 국제 규격서의 고장 데이터를 바탕으로 전문가 의견 시스템을 통해 철도 전력 설비의 고장률을 평가한 뒤, 전문가의 평가 성향을 고려함으로써 전문가 의견 시스템에서 발생할 수 있는 결과치의 왜곡을 최소화하였다. 그리고 Severity, Occurrence, Detection 등 세 수치를 단순히 산술적으로 계산하는 기존 방법의 문제점을 해결할 수 있는 퍼지 연산을 통한 RPN 계산 방법을 제시하였고, 이를 철도 변전소 시스템에 적용시켜 합리적인 유지보수 우선순위 결과를 얻을 수 있는 방법론을 제안하였다.

참고 문헌

1. J. Moubra(1995), "Reliability-centered maintenance," Butterworth-Hinemann.
2. John B. Bowles(2003), "An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis," Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium.
3. 김동진, 김진오, 김형철(2009), "최소절단집합과 퍼지이론을 이용한 FMECA 전문가 시스템," 한국철도학회 논문집, 제 12권, 제 3호, pp.342-347.
4. Dong Yuhua and Yu Datao(2005), "Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, No. 18, pp.83-88.
5. Sadaaki Miyamoto(1990), "Fuzzy Sets in information retrieval and cluster analysis," Kluwer Academic Publishers.
6. 이광형, 오길록(1991), "퍼지 이론 및 응용," 홍릉과학출판사.

접수일(2009년 8월 10일), 수정일(2009년 9월 1일),
 게재확정일(2009년 12월 18일)