

변전설비의 구조적 중요도와 고장 분석을 통한 유지보수 우선순위 선정

(Decision of Maintenance Priority Order for Substation Facility through Structural Importance and Fault Analysis)

이성훈* · 이윤성 · 김진오**

(Sung-Hun Lee · Yun-Seong Lee · Jin-O Kim)

Abstract

Reliability Centered Maintenance(RCM) is one of most widely used methods in the modern power system to schedule a maintenance cycle and determine the priority of inspection. A precedence study for the new structure of rearranged system should be performed due to introduction of additional installation. This paper proposes a new method to evaluate the priority of maintenance and inspection of the power system facilities. In order to calculate that risk index, it is required that the reliability block diagram should be analyzed for the power system. Additionally, a fault cause analysis is also performed through the event-tree analysis.

Key Words : Expert System, FMECA, Reliability Centered Maintenance, Risk Priority Number

1. 서 론

여러 산업 분야에서 전통적으로 수행되어온 유지보수 계획은 설비의 수명이나 특성보다는 운영자의 편리성과 설비 자체의 보존에 초점이 맞추어져 있고, 이러한 계획은 정비업무의 비효율과 과도한 비용지

출로 이어진다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 신뢰도 기반 유지보수에 대한 연구가 각 분야에서 이루어지고 있으며, 이는 전력 시스템에도 적용시킬 수 있다[1]. 신뢰도 기반 유지보수는 시스템의 구조를 분석하고, 설비의 신뢰도를 평가하여 이를 유지보수 계획에 이용함으로써, 정비업무의 효율성을 도모하고 있다.

신뢰도 기반 유지보수의 효과로는 직접적인 정비비용의 감소, 고장정비의 최소화, 예방정비의 감소, 시간 지향업무대신 상태지향 및 예측업무로 대체, 적용 시스템의 안정성 및 이용률 향상 등이 있으며, 그 절차는 그림 1과 같다.

여러 RCM 기법 중에서 가장 대표적인 것이라 할 수 있는 Risk Priority Number(RPN)은 시스템을 구

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과
** 교신저자 : 한양대학교 전기공학과
* Main author : Department of Electrical Engineering, Hanyang University
** Corresponding author : Department of Electrical Engineering, Hanyang University
Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2220-1856
E-mail : lypd@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2013년 1월 3일
1차심사 : 2013년 1월 5일
심사완료 : 2013년 3월 28일

성하고 있는 설비에 대한 Severity(S), Occurrence(O), Detection(D)를 평가하고, 이를 하나의 통합된 수치로 표현함으로써 설비간의 유지보수 우선순위에 관한 정보를 제공한다[2]. Severity는 설비 구조에 기반한 고장의 심각도를 의미하고, Occurrence는 고장과 관련한 고장의 빈도수, Detection은 해당 고장의 탐지 가능성을 의미한다. 전통적인 RPN 계산 방법은 각각 산정된 S, O, D를 단순히 산술적으로 곱하는 것으로, 이러한 계산 방법은 종종 잘못된 결론을 도출하기도 한다.



그림 1. 신뢰도 기반 유지보수 절차
Fig. 1. Reliability Centered Maintenance Procedure

예를 들어 설비 A의 S, O, D가 각각 9, 8, 1로 평가되었고, 설비 B의 S, O, D가 4, 4, 5로 평가되었다면, A의 RPN은 72, B의 RPN은 80으로 계산되어 B의 유지보수 우선순위가 A보다 높게 나타나지만, 이것은 설비 A의 낮은 Detection에 의해 다소 왜곡된 결과라는 것을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 퍼지 함수를 도입하여 이러한 문제점을 해결하려 하였다.

또한 전력 설비의 경우에는 통계적인 고장 데이터가 부족하거나 신뢰성이 낮은 경우가 많고, 데이터에 대한 객관적인 분석이 이루어지지 않는 경우가 있으며

로, 본 논문에서는 객관적인 시스템 분석 방법과 퍼지 함수를 이용한 새로운 RPN 계산 방법을 제시하고, 전문가의 주관적 평가 요소를 최소화할 수 있는 방안을 연구하여 이를 변전소 시스템 유지보수 계획 수립에 적용하여 보았다.

Severity와 Detection을 퍼지 함수로 표현하는데 있어서 Rule Base를 이용하여 보다 직관적으로 평가할 수 있도록 하였으며, Occurrence 퍼지 함수를 구성할 때에는 정규 분포에서 이용하는 3σ -rule을 이용하여 전문가 평가의 모호함을 정량적으로 표현할 수 있도록 하였다.

또한 설비의 구조뿐만 아니라 Event-Tree 분석을 통해 고장의 원인 측면에서의 접근방식도 함께 보여 다각적인 유지보수 계획을 수립하고자 하였다. 기존의 RPN 평가 기법 연구에서는 설비의 구조와 고장률을 중심으로 평가가 이루어지는게 보통이었지만, 본 논문에서는 고장 이벤트 중심의 분석도 수행할 필요가 있다는 것을 인지하고, 설비가 어떤 상황 하에서 고장이 발생하였는지에 대한 연구도 진행하였다.

그림 2는 본 논문에서 기술한 방법론에 대한 설비 평가 절차의 흐름도이다.

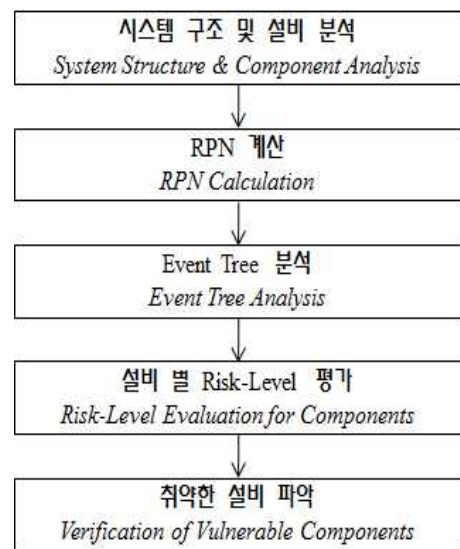


그림 2. 유지보수 우선순위 평가 절차
Fig. 2. Maintenance Priority Evaluation Procedure

2. 본 론

2.1 Risk Priority Number

Risk Priority Number는 설비의 유지보수 우선순위를 결정하기 위해 평가하는 수치로써 1~10사이의 값으로 설비의 Severity, Occurrence, Detection에 관한 평가를 한다[2]. 본 논문에서는 고장의 빈도수와 관련된 Occurrence 평가에 가중치를 두어[3-4] 개별적인 평가를 통해 퍼지 함수로 표현하고, Severity와 Detection에 관한 평가를 묶어 Occurrence 평가와 동등한 가치를 가지는 퍼지 함수로 표현한 다음, 두 퍼지 함수를 하나의 통합된 퍼지 함수로 표현하는 방법을 가진다.

2.1.1 Severity 평가

Severity는 설비가 고장이 발생하였을 경우 시스템에 미치는 영향을 나타내는 것으로, 보통의 경우 전문가가 자신의 경험에 비추어 정성적인 평가를 하게 된다. 이 경우 전문가의 주관적인 의견이 반영되어 정확하고 합리적인 결과를 얻을 수 없다는 문제점이 발생하므로, 본 논문에서는 시스템 신뢰도 블록도(Reliability Diagram)를 이용하여 설비의 구조적 중요도를 분석하고 평가하였다. 전력 시스템의 각 구성요소를 신뢰도 블록도로 나타내고, 최소절단집합(Minimal Cut Set, MCS)을 구하여 각 설비가 전체 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 해당 설비가 낮은 차수의 MCS에 많이 포함될수록 Severity의 값은 커지게 되고, 낮은 차수의 MCS에 포함되어 있다는 것은 그만큼 해당 설비가 중요한 위치에 존재한다는 뜻이다. w 는 고장의 영향 정도를 나타내는 값으로, 총 MCS로 대체될 수 있다[5].

$$S_i = \frac{\sum_{k=1}^{MO} \sqrt[k]{w} \times N_{ik}}{\sum_{k=1}^{MO} N_{ik}} \quad (1)$$

여기서 w 는 고장 발생에 대한 효과 수치, MO 는 최소절단집합의 최대 차수, N_{ik} 는 설비 i 의 k 차 절단집

합에 포함된 개수를 나타낸다.

2.1.2 Occurrence 평가

설비의 Occurrence는 고장률을 통해 평가할 수 있는 항목이므로, 먼저 고장률에 대한 결정이 이루어져야 한다. 하지만 분석 대상의 전력 설비 고장 데이터가 충분치 않거나 데이터의 신뢰성이 부족한 경우, 일종의 가공 절차를 거쳐야 하는데 여기서 결과의 왜곡 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 전문가 성향을 반영한 평가 매트릭스를 구성하고, 이를 통해 Occurrence를 평가하였다.

전력 설비 전문가들은 시스템을 구성하고 있는 설비들에 대해 실제로 고장이 얼마나 빈번하게 발생할지를 업무경험이나 설비의 노화상태, 운영 방식, 기술 수준 등을 근거로 하여 고장 데이터를 차용한 타 시스템 설비와의 비교 분석을 통해 식 (2)와 같이 평가를 수행한다[6].

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

전문가 평가 매트릭스 X 의 행(i)은 설비의 종류가, 열(j)은 각각의 전문가를 나타낸다. 전문가들은 타 설비 데이터로부터 취득한 고장 데이터를 참고하여 수치 5를 기준으로 1~10 사이로 값으로 전력 설비의 Occurrence를 평가하게 된다. 외부 데이터와 비교하여 더 높은 고장률이 예상된다면 5보다 높은 수치를, 그 반대의 경우라면 5보다 낮은 수치를 책정하게 된다.

전력 설비의 고장률을 평가하는 전문가들은 각기 다른 실무 경험과 평가 대상에 대한 직무 상관성이 다르기 때문에 이들의 평가치를 차등화 하여 반영할 필요가 있다. 따라서 전문가 별 가중치를 고려해야 하며, 관련 요소로는 직위, 근로 년 수, 교육 수준, 연령 등이 있다. 이에 대한 차등화된 점수를 나타낼 수 있고[2-3], 이를 식 (3)과 같은 벡터로 표시한 다음, 식 (2)에 곱함으로써 최종적인 Occurrence 평가 벡터를 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X_w = X \times W \quad (4)$$

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

Occurrence 평가 벡터, X_w 는 평가를 시행한 설비의 수만큼의 행이 존재하는 벡터이다. Occurrence 평가 벡터의 값들은 주관적인 평가와 외부 차용의 요소 때문에 불확실성을 내포하고 있으므로, 이를 퍼지 화하여 표현하는 것이 바람직하다[7-8]. 본 논문에서는 X_w 의 값을 삼각퍼지함수로 나타내며, 그 방법은 정규 분포에서의 3σ -rule을 이용하였다. 3σ -rule은 정규분포에서 평균 값 주위로 표준편차의 3배에 해당하는 구간 내에는 분포의 99.7%의 값이 포함되어 있음을 나타낸다[9].

그림 3은 각각 Occurrence 평가를 퍼지 함수로 표현한 예시이다.

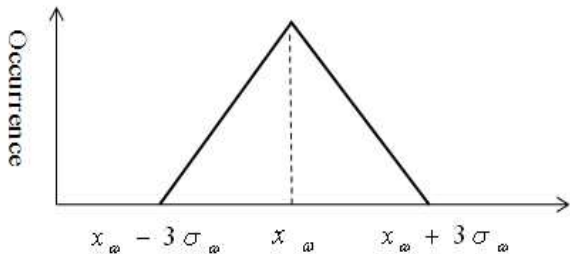


그림 3. Occurrence 퍼지 함수
Fig. 3. Occurrence Fuzzy Function

2.1.3 Detection 평가

Detection은 설비 고장의 탐지 가능성을 평가하는 것으로, 고장이 발생하고 나서 수리가 이루어지기 까지 경과되는 평균 지연 시간으로써 구할 수 있다. 이때 식 (5)와 같이 표준화 하는 과정을 거친다.

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

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.

2.1.4 RPN 퍼지 함수

퍼지 연산을 이용한 RPN 계산을 위해, 먼저 Severity와 Detection 평가치를 결합하여 퍼지 함수로 나타낸다. 본 논문에서는 Severity 평가와 Detection 평가를 결합하기 위해 표 1과 같이 전문가 시스템의 Rule Base를 구성하였다. 2.1.1과 2.1.3에서 각각 평가된 Severity와 Detection 평가치를 바탕으로 전문가들이 구성한 Rule Base를 통해 Very Low, Low, Middle, High, Very High 등의 다섯 등급으로 다시 구분할 수 있다. 이 등급은 그림 4에서의 Severity&Detection 퍼지 함수에서 해당되는 등급의 퍼지 함수를 선택하는 기준이 되며, 이 퍼지 함수가 Severity와 Detection 결합 퍼지 함수가 된다. 만약 Severity와 Detection이 각각 8과 3으로 평가되었다면, 표 1을 통해 High 등급을 받게 되고, 이것을 다시 그림 4에서 찾으면 그림 5와 같은 퍼지 함수로 표현할 수 있게 된다.

마지막으로 2.1.2에서 구한 Occurrence 평가 퍼지 함수와 그림 5에서 표현한 Severity와 Detection 평가를 결합한 퍼지 함수를 통합하는 과정은 α -cut 연산을 이용하였고[7, 9], 통합된 퍼지 함수의 무게 중심의 가로 축 좌표 값을 해당 설비의 RPN으로 최종 결정하였다.

표 1. 룰 베이스
Table 1. Rule Base

Rule Base		Severity				
		1~2	3~4	5~6	7~8	9~10
Detection	1~2	Very low	Very low	Low	Middle	Middle
	3~4	Very low	Low	Middle	High	High
	5~6	Low	Low	Middle	High	Very high
	7~8	Low	Middle	High	Very high	Very high
	9~10	Low	Middle	High	Very high	Very high

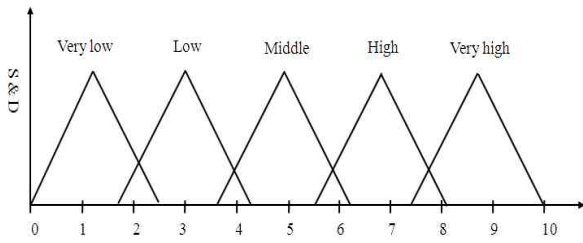


그림 4. Severity와 Detection 평가 기준 퍼지 함수
Fig. 4. Severity and Detection Evaluation Fuzzy Function

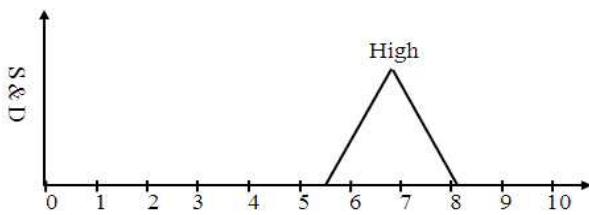


그림 5. Severity & Detection 퍼지 함수 예시
Fig. 5. Example of Severity & Detection Fuzzy Function

2.2 Event Tree 분석

설비의 구조적 분석과 고장률을 기준으로 판단하는 RPN 분석이 끝났다면, 고장 이벤트 중심의 분석도 수행할 필요가 있다. 고장 기록은 어떤 설비가 몇 번 고장이 났는가로 기록될 수도 있지만, 어떤 고장 상황이 발생하였는가로 표현될 수 있기 때문이다.

RPN이라는 값 자체가 설비의 리스크 정도를 표현하는 값이라면, 해당 설비가 고장이 날 확률을 고려하여 설비별 Risk-Level을 산정할 수 있다. 이 때 Risk-Level을 산정하는 방식은 기본적으로 식 (6)을 따른다.

$$Risk - Level = Probability \times RPN \tag{6}$$

하나의 고장 이벤트 발생은 다수의 원인을 가지고 있을 수가 있는데, 이때는 주요 원인 별로 그 확률과 심각도를 개별적으로 분석하여 합산하여야 한다. 여기서 이벤트 원인 분석의 도구로써 사용할 수 있는 것이 Event-Tree 분석이다. Event-Tree 분석은 하나의

고장 이벤트가 발생할 수 있는 모든 경우의 수를 나열하고, 개별 고장 확률을 이용하여 특정 원인에 대한 해당 고장 이벤트가 발생할 가능성을 분석하는 방법이다. 그림 6은 보호 설비에 대하여 Event-Tree를 간단하게 구성한 예이다.

고장이 발생하게 되면, 먼저 고장 탐지기가 고장을 검출하게 되고, 고장이 검출되면 계전기가 고장전류를 확인하고, 트립 신호를 보내 차단기가 작동하는 구조이다. 그림 6의 예시와 같은 Event-Tree를 이용하여 특정 이벤트의 모든 고장 원인에 대하여 개별 확률과 설비 연계 형태를 구할 수 있다. 모든 고장 원인에 대하여 분석이 끝났다면, 식 (7)을 이용하여 식 (6)을 식 (8)과 같이 확장할 수 있다.

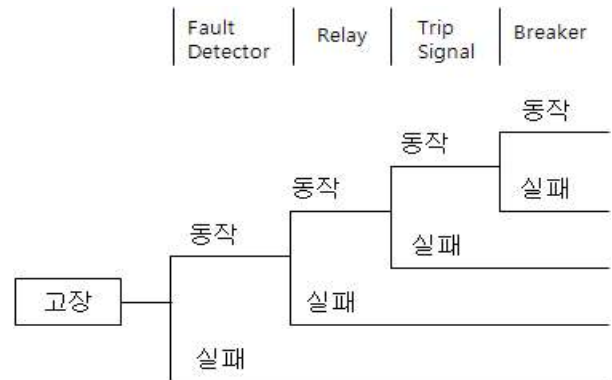


그림 6. Event-Tree의 구성
Fig. 6. Composition of Event-Tree

$$Probability_{j,n} = \tag{7}$$

$$\prod_{i=1}^n (1 - Probability_i) \times \prod_{l=1}^n Probability_l$$

$$Risk - Level_i = \sum_{n=1}^m Probability_{j,n} \times RPN_i \tag{8}$$

여기서 i 는 Event Tree에서 고장원인이 아닌 설비, l 는 Event Tree에서 고장원인인 설비, $Risk - Level_i$ 는 설비 i 의 Risk-Level, $Probability_{j,n}$ 은 이벤트 j 의 n 번째 고장 원인에 대한 확률, m 은 총 고장 원인의 수를 각각 나타낸다. 식 (8)을 통해 특정 고장 이벤트 j 에 대한 시스템으로의 과급 효과를 파악할 수 있다.

3. 사례연구

본 논문에서 제시한 방법을 그림 7에 나와 있는 전력 계통 변전소 시스템에 적용시켜 보았다. 그림 7의 변전소 시스템의 신뢰도 블록도를 구하여 MCS을 바탕으로 한 설비별 Severity를 계산하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

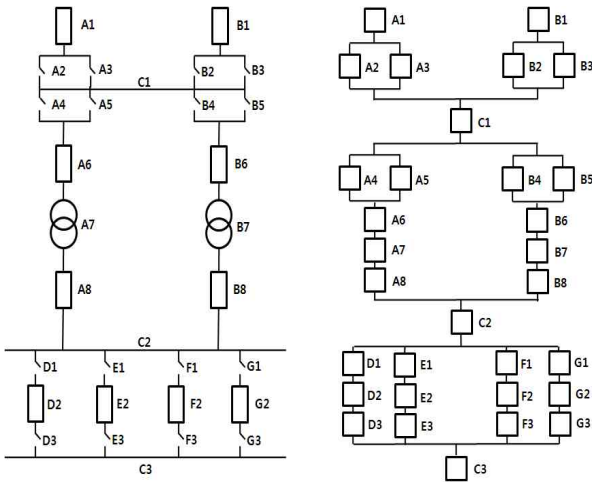


그림 7. 변전소 계통도와 신뢰도 블록도
Fig. 7. Substation Systems and Reliability Diagram

표 2. Severity 평가
Table 2. Severity Evaluation

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

그림 7의 변전소 계통도를 바탕으로 하여 변전소를 구성하고 있는 가스차단기, 스코트변압기, 단로기, Bus 등의 설비에 코드 번호를 부여하고, 표 2에 분류하였다. 그리고 설비별 최소절단집합을 구하기 위해 계통도를 신뢰도 블록도로 변환하였으며, 변환된 신뢰

도 블록도와 식 (1)을 이용하여 설비별 Severity를 구하였고, 이를 표 2에 나타내었다.

설비의 Occurrence 평가를 위한 전문가 평가는 표 3과 같이 평가되었고, 식 (2)~(4)를 이용하여 계산된 Occurrence 평가치가 표 4의 중심값에 해당한다. 표 4의 하한값과 상한값은 3σ -rule에 의해 계산된 결과이다.

표 3. 전문가 평가
Table 3. Expert Evaluation

설비	전문가 평가				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
가중치	0.2	0.3	0.1	0.25	0.15
가스 차단기	8	5	6	6	5
스코트 변압기	8	6	7	6	6
단로기	4	3	5	3	4
Bus	3	3	5	4	4

표 4. Occurrence 평가
Table 4. Occurrence Evaluation

설비	Occurrence		
	하한값	중심값	상한값
가스 차단기	2.66	5.95	9.24
스코트 변압기	4.10	6.50	8.90
단로기	1.31	3.55	5.79
Bus	1.36	3.60	5.84

설비의 Detection 평가는 평균 지연 시간을 이용하여 계산하고, RPN 계산을 위한 Severity, Occurrence, Detection 평가 결과를 표 5에 나타내었다.

또한 본 논문에서 제안하는 퍼지연산을 이용한 RPN 계산 결과도 표 5에서 확인할 수 있다. RPN을 계산하기 위한 퍼지 연산의 첫 번째 단계는 Severity와 Detection을 통합하여 나타내는 것인데, 이는 표 1의 Rule Base와 그림 4의 퍼지 함수를 이용한다.

Severity&Detection 퍼지 함수를 구하였다면, 두 번째 단계로 Occurrence 퍼지 함수와 통합하는 과정을 거쳐야 한다. Occurrence 퍼지 함수는 표 4에 계산된 중심값과 하한값, 상한값을 이용해 삼각퍼지함수로 나타낼 수 있고, Severity&Detection 퍼지 함수와 Occurrence 퍼지 함수를 통합하는 과정에는 α -cut 연산 방법을 이용하였다.

표 5. RPN 결과
Tbale 5. RPN Conclusion

설비	S	O	D	RPN
가스 차단기	4.09	5.95	5.00	5.14
스코트 변압기	4.95	6.50	4.00	5.39
단로기	2.73	3.55	4.00	3.41
Bus	10.0	3.60	4.50	6.36

다음 분석 절차로 고장 이벤트 분석을 수행하기 위해 본 논문에서는 표 6에 나와 있는 것처럼 5가지 경우의 고장을 고려하였다. 표 6에서 O, X 표시는 해당 고장이벤트에 첫 번째 행에 나열되어 있는 각각의 기기가 연관되어 있는 지에 대한 유무이다. 예를 들어, 첫 번째 고장이벤트(Event 1)는 다른 기기는 정상 작동을 하였지만 Breaker 2가 오작동을 하였기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 각각의 경우의 Event Tree를 분석한 후 식 (7)에 대입한 결과를 표 7에 나타내었고, 최종 설비별 Risk-Level을 표 8에 나타내었다.

표 6. 이벤트 별 Event-Tree
Table 6. Composition of Event-Tree for Each Event

	Fault Detector	Relay	Trip Signal	Breaker 1	Breaker 2
Proba-bility i	0.03	0.007	0.2	0.05	0.02
Event 1	O	O	O	O	X
Event 2	O	O	O	X	O
Event 3	X	-	-	-	-
Event 4	O	X	-	-	-
Event 5	O	O	X	-	-

표 7. 이벤트 별 고장 확률
Table 7. Failure Probability of Each Event

	Event1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5
Proba-bility j,n	0.0451	0.0227	0.0130	0.0088	0.1289

표 7에 나타나 있는 수치는 총 5개의 고장 이벤트의 발생 확률을 나타낸다. 이 고장이벤트들은 그림 7에 있는 모든 설비들의 고장원인으로 존재하는 것이며, 설비의 수가 많아질수록 고장도 빈번하게 발견될 것이라는 정성적인 개념을 정량적으로 계산하는 과정에서 이용되는 값이라고 할 수 있다.

표 8은 설비별 Risk-Level을 계산한 최종 결과이다. RPNi는 설비의 구조적 중요도와 고장률을 중심으로 평가한 수치이며, Risk-Leveli는 여기에 더해 고장 이벤트를 분석하여 설비와 고장이벤트의 연관성까지 고려하여 평가한 수치이다.

고장의 이벤트를 분석하여 어느 설비가 어느 고장 이벤트에 영향을 받고 있는 지를 확인하는 Event-Tree 분석을 수행하지 않았을 경우에는 Bus-스코트변압기-가스차단기-단로기의 순서로 우선순위가 정해졌지만, 가스 차단기가 더 많은 고장 이벤트와 관여하고 있다는 Event-Tree 분석 결과로 인해 Event-Tree 분석을 반영한 결과에서는 스코트 변압기보다 순위가 더 높게 나온 것을 표 8에서 확인할 수 있다.

표 8. 설비별 Risk-Level 결과
Table 8. Conclusion of Component Risk Level

설비	가스 차단기	스코트 변압기	단로기	Bus
RPNi	5.14	5.39	3.41	6.36
Risk-Leveli	1.17280	1.06420	0.81132	1.28978
우선순위	2	3	4	1

4. 결 론

본 논문에서는 전력 계통 변전소 시스템을 구성하고

있는 설비에 대한 유지보수 전략을 수립하는데 있어서, RPN을 계산하는 새로운 방법을 제안하였다. 최소 절단집합을 통한 합리적인 Severity 평가방법을 이용하고, 설비의 수리 지연 시간에 의해 계산된 Detection을 Rule Base를 이용하여 퍼지 함수로 나타내었다. 또한 전문가 가중치를 적용한 Occurrence 평가방법과 3 σ -rule를 이용한 퍼지 함수 표현 방법을 수립하였다. α -cut 연산을 통해 이 두 퍼지 함수를 하나의 퍼지 함수로 나타냄으로써, 전통적인 RPN 계산에서 발생하는 왜곡 문제를 해결하였고, Event-Tree 분석을 통해 설비의 구조적 측면에서의 분석뿐만 아니라 고장의 원인에서 접근하는 방식을 함께 접목시켰다.

따라서 설비가 구조적으로 얼마나 중요한 위치에 자리 잡고 있는 지에 대한 분석과 함께 해당 설비가 얼마나 많은 고장 이벤트와 연관되어 있는 지를 함께 분석함으로써, 시스템의 유지보수 계획을 세우는데 있어서 보다 합리적인 결론을 도출할 수 있게 되었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2011-0017064)

References

[1] J. Moubr, "Reliability-Centered Maintenance", Butterworth-Hinemann, 1995.
 [2] John B. Bowles, "An Assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003.
 [3] Dong Yuhua, Yu Datao, "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, 2005.
 [4] Kai Meng Tay, Chee Sing Teh, David Bong, "Development of a Fuzzy-logic-based Occurrence Updating model for Process FMEA", Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, 2008.
 [5] Dong-Jin Kim, Jin-O Kim, Hyung-Chul Kim "Expert System for FMECA Using Minimal Cut Set and Fuzzy Theory", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 3, The Korean Society for Railway, pp. 342-347, 2009.

[6] Yun-Seong Lee, Yoong-Tae Byeon, Jin-O Kim, Hyung-Chul Kim, Jun-Kyung Lee, "Evaluation for Risk Priority Number of Railway Power System Facility using Fuzzy Theory", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 6, The Korean Society for Railway, pp. 921-926.
 [7] R. Kruse, Gebhardt, F. Klawonn, "Fuzzy Systems", John Wiley & Sons, 1994.
 [8] Zaili Yang, Steve Bonsall, Jin Wang, "Fuzzy Rule-Based Bayesian Reasoning Approach for Prioritization of Failures in FMEA", IEEE Transaction on Reliability, Vol. 57, No. 3, 2008.
 [9] William Q. Meeker, Luis AEscobar, "Statistical Methods for Reliability Data", John Wiley & Sons, 1998.

◇ 저자소개 ◇



이성훈 (李晟薰)

1978년 2월 25일생. 2004년 2월 인천대학교 전기공학과 졸업. 2007년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 한양대학교 전기공학과 수료(박사). 현재한국수자원공사 K-water 연구원 재직중.

Tel : (042)870-7672

E-mail : shlee@kwater.or.kr



이윤성 (李允成)

1984년 6월 5일생. 2008년 한양대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석·박사통합과정.

Tel : (02)2220-0347

E-mail : lypd@hanyang.ac.kr



김진오 (金鎭吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.

Tel : (02)2290-0347

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr