Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No.2, pp. 148~153 February 2009 논문 23-2-20

Fuzzy Linear Opinion Pool을 이용한 FMECA 전문가시스템

(FMECA Expert System Using Fuzzy Linear Opinion Pool)

변용태* · 김동진 · 김진오**
(Yoong-Tae Byeon · Dong-Jin Kim · Jin-O Kim)

요 약

FMECA는 전력설비의 기능, 고장 모드, 고장 원인 및 고장의 파급 효과 등을 분석하고 각 고장 모드가 시스템의 기능 유지에 영향을 미치는 정도인 심각도(Severity)와 고장 발생의 빈도의 정도인 치명도(Criticality)를 평가하여 치명도 매트릭스(Criticality Matrix)를 구성함으로써 높은 위험성을 갖는 고장 모드를 판별하고 효과적인 시스템 구성을 위한 참고 자료를 제공한다[4-5]. 대부분의 경우, 고장 모드의 두 지수는 미리 정해진 기준에 따라 전문가들의 정성적인 평가에 의해 결정된다. 따라서 본 논문에서는 두 지수들에 대한 다양한 전문가의 의견을 종합하여 결론을 도출하기 위한 방법론으로 기존의 Linear Opinion Pool에 퍼지이론을 결합하는 방식을 제안하였다. 또한 기존의 치명도 매트릭스 방식으로 위험도를 판별하던 방식의 한계를 인식하고 운영자의 관심에 따라 두 지수를 종합적으로 평가하기 위해 퍼지 FMECA 전문가 시스템을 구성하였다[7-8]. 사례연구에서는 대표적인 전력 설비에 대한 적용 예를 나타내었다.

Abstract

Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) is one of most widely used methods in modern engineering system to investigate potential failure modes and its severity upon the system. FMECA evaluates criticality and severity of each failure mode and visualize the risk level matrix putting those indices to column and row variable respectably. Generally, those indices are determined subjectively by experts and operators. However, this process has no choice but to include uncertainty. In this paper, a method for eliciting expert opinions considering its uncertainty is proposed to evaluate the criticality and severity. In addition, a fuzzy expert system is constructed in order to determine the crisp value of risk level for each failure mode. Finally, an illustrative example system is analyzed in the case study. The results are worth considering while deciding the proper policies for each component of the system.

Key Words : Linear Opinion Pool, FMECA, Expert System, Fuzzy Theory

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 한양대학교 전기공학과 교수
Tel : 02-2220-0347 Fax : 02-2220-0347
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2008년 12월 9일
1차심사 : 2008년 12월 17일
심사완료 : 2009년 1월 8일

1. 서 론

고장모드 및 임계분석(FMECA : Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis)은 고장모드가 시스템에 미치는 영향에 따라 고장모드를 심각도 레벨로 분류할 뿐만 아니라 고장모드의 발생빈도에 대한 임계분석을 하여 높은 위험을 가진 고장모드를 확인한다. 따라서 FMECA는 우선적인 고장모드들을 선정할 수 있는 자료를 제공하며 각 고장모드에 대한 적절한 유지보수 작업을 결정 및 수행할 수 있게 함으로써 전체 시스템에 대한 효과적인 운영에 이바지한다. 여기서, 각 고장모드에 부여되는 고장빈도에 대한 지표를 치명도(Cr : Criticality), 시스템에 미치는 영향에 대한 지표를 심각도(Sv : Severity)라 한다.

고장이 일어나는 경우가 극히 드물고 과거의 고장이력 데이터가 불확실하거나 불충분한 전력계통의 설비들의 경우에 고장모드의 치명도와 심각도의 결정은 데이터의 통계적인 처리에 의한 방식보다는 설비업체가 제공하는 수치를 이용하는 방식이나 관련 분야의 전문가의 판단을 이용한 방식이 이용되었다. 이에 따라, 본 논문에서는 전력계통의 전문가들에 의해 치명도와 심각도의 결정이 이루어지는 상황을 가정하였다[1-2]. 또한, 여러 명의 의견을 수렴하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성의 효과적인 처리를 위해 Linear Opinion Pool(LOP)에 퍼지 이론을 활용하는 방식을 제안하였다.

FMECA의 결과는 전통적으로 치명도와 심각도를 하나의 행렬형태로 표현되었다. 그러나 이와 같은 표현방식은 두 가지 지표를 한눈에 보여준다는 장점에도 불구하고 실제적인 정책결정 등의 사안에 있어서 의사 결정자에게 큰 도움을 주지 못한다[3,6]. 따라서 본 논문에서는 의사 결정자의 판단논리를 모델링한 퍼지 전문가 시스템을 구축함으로써 치명도와 심각도를 단일값인 위험도(Rl : Risk level)로 표현하는 방식을 제안한다. 전문가 시스템을 이용한 FMECA 평가결과의 분석과정의 자동화를 통하여 효율적인 운영을 기대할 수 있다.

2. 본 론

2.1 Fuzzy Linear Opinion Pool

의사결정이 전문가 집단의 의견을 종합해서 이루어지는 것을 집단 의사 결정 문제라 하며 특히 전문가들의 의견을 이용하는 경우 전문가 문제라 한다. 가장 간단한 전문가 문제의 해결 방법으로는 LOP이 있으며, 본 논문에서는 불확실성의 효과적인 처리를 위해 기존 방식에 퍼지이론을 결합하여 수식 (1)의 Fuzzy Linear Opinion Pool(FLOP)을 제안하였다.

$$J_i = \sum_{j=1}^{pop} grade_j \odot J_{ij} \tag{1}$$

표 1. 전문가 데이터
Table 1. Personal data of experts

번호	직위	경력	학력	나이	총점	grade
1	Professor	more than 20	Doctor	50′s	20	1.00
2	Professor	16-20	Doctor	50′s	19	0.95
3	Professor	more than 20	Master	50′s	19	0.95
4	Professor	16-20	Doctor	40′s	18	0.90
5	Vice-professor	11-16	Doctor	50′s	17	0.85
6	Vice-professor	more than 20	Master	30′s	16	0.80
7	Instructor	more than 20	Bachelor	50′s	16	0.80
8	Instructor	16-20	Master	40′s	15	0.75
9	Instructor	11-16	Master	40′s	14	0.70
10	Primary	16-20	Master	30′s	13	0.65

$$grade_j = \frac{\sum_{k \in C} s_{jk}}{\sum_{k \in C} \max\{s_k\}} \qquad (2)$$

여기서, pop는 참여한 전문가의 수, $grade_j$는 j번째 전문가의 가중치, J_{ij}는 j번째 전문가의 i번째 고장모드에 대한 퍼지화된 견해, J_i는 i번째 고장모드의 퍼지화된 결론, s_k는 k요소에 대한 배당점수를 의미한다.

이때, 각 전문가의 가중치는 전문가의 직위, 경력, 학력, 나이 등의 요소에 따라 결정된다. 본 논문에서 사용한 10명의 전문가에 대한 데이터와 배당점수를 표 1과 2에 나타내었다. 표 2의 배당점수에 따라 전문가의 가중치는 수식 (2)와 같이 계산된다. 특히 수식 (1)의 새로운 연산자인 ⊙는 해당 퍼지 레벨을 $grade_j$값으로 잘라내는 연산을 의미하며 그림 1에 개념을 나타내었다.

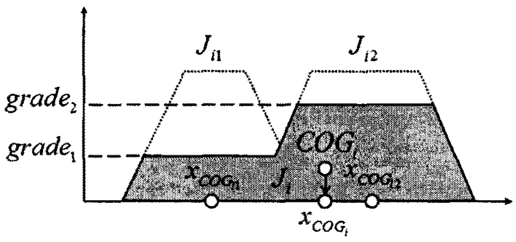

그림 1. 연산자와 무게중심법의 개념
Fig. 1. Concept of ⊙ and Center of gravity

그림 1에서 각 레벨은 $grade_1$과 $grade_2$로 제한되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방식으로 제한된 의견은 퍼지 연산에 의해 더해져 i번째 설비에 대한 모든 전문가의 견해를 도출하게 된다.

전문가의 견해를 종합한 후, 무게중심법을 이용하여 퍼지화되어 있는 결과를 비퍼지화 할 수 있다. 비퍼지화를 통하여 각 고장모드의 치명도와 심각도를 단일값으로 결정하게 된다.

무게중심법을 이용한 비퍼지화의 개념은 그림 1에서 확인할 수 있으며, 수식 (3)과 같이 계산된다. 불연속적인 계산을 위한 식은 (4)와 같다. 본 논문에서는 x축을 눈금을 10,000등분하여 수식 (4)를 사용하여 계산하였다.

$$x_{COG_i} = \frac{\int x \cdot m_i(x)dx}{\int m_i(x)dx} \qquad (3)$$

$$x_{COG_i} = \frac{\sum x \cdot m_i(x)}{\sum m_i(x)} \qquad (4)$$

여기서, m_i는 i번째 고장모드의 FLOP 결론의 다각형 형태의 영역을 의미하며 x는 0-10사이의 값을 갖는 가로축을 의미한다. 한편 COG_i는 i번째 고장모드의 무게중심을 x_{COG_i}는 i번째 고장모드의 비퍼지화 결과를 의미하는 무게중심의 x좌표가 된다.

표 2. 평가요소와 배당점수
Table 2. Weighting score and Constitutions

평가요소	구 분	배점
직위	Professor	5
	Vice-Professor	4
	Instructor	3
	Primary	2
	Worker	1
경력	more than 20	5
	16-20	4
	11-16	3
	6-11	2
	less than 5	1
학력	Doctor	5
	Master	4
	Bachelor	3
	Junior college level	2
	etc	1
나이	50's	5
	40's	4
	30's	3
	20's	2
	10's	1

고장모드의 치명도와 심각도를 위한 퍼지 변수 공간을 그림 2와 3과 같이 구분하였다. 의사 결정자의 다양한 요구에 대응할 수 있도록 대표적인 사다리꼴과 삼각형 형태 및 일반적인 멤버십형태를 복합적으

로 사용하였으며, 퍼지 전문가 시스템의 입력변수로 활용하기 위하여 Rank 값은 10으로 정규화하였다.

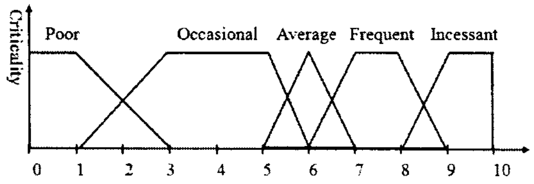

그림 2. 치명도의 멤버십함수
Fig. 2. Membership function for Criticality

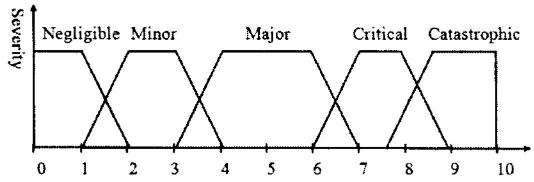

그림 3. 심각도의 멤버십 함수
Fig. 3. Membership function for Severity

2.2 Fuzzy Expert System

퍼지집합 이론에 기반으로 퍼지 논리는 인간의 추론 방식을 모델링하는 기법으로서 발전되어 왔다. 퍼지 전문가 시스템은 IF-THEN 규칙을 이용한 시스템으로서 전문가의 판단 논리 구현에 강점을 갖는다. 기본적인 퍼지 전문가 시스템의 구성을 그림 4에 나타내었다.

만약 FLOP의 퍼지화되어 있는 결과가 아닌 치명도와 심각도 데이터가 단일값 형태를 가지고 있다면 그림 4의 퍼지화기를 거쳐 퍼지화된 이후에 규칙기반을 통한 추론이 이루어질 것이다. 그러나 본 논문에서 제안한 FLOP의 방법에 따르면 이미 각 고장모드의 치명도와 심각도는 전문가들의 의견을 종합한 퍼지화된 형태로 존재하기 때문에 바로 규칙기반에 따라서 추론이 이루어진다. 여기서 치명도와 심각도의 공간을 5개씩으로 구분하였기 때문에 총 25개의 규칙기반이 요구된다. 본 논문에서 사용된 규칙기반을 표 3에 정리하였다. 여기서, 출력변수인 위험도는 그림 5와 같은 멤버십함수를 사용하였다.

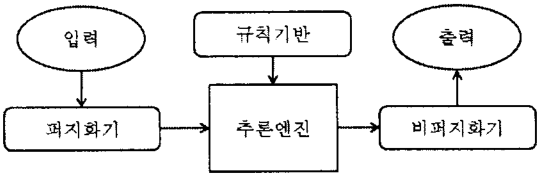

그림 4. 퍼지 전문가 시스템
Fig. 4. Fuzzy Expert System

표 3. 규칙기반
Table 3. Rule Base

	. Po	Oc	Av	Fq	In
Ng	I	II	III	III	IV
Mn	II	II	III	IV	IV
Mj	III	III	IV	IV	V
Cr	IV	IV	V	V	VI
Ct	IV	IV	V	VI	VI

* Po : Poor * Oc : Occasional * Av : Average
* Fq : Frequent * In : Incessant
* Ng : Neglibigle * Mn : Minor * Mj : Major
* Cr : Critical * Ct : Catastrophic

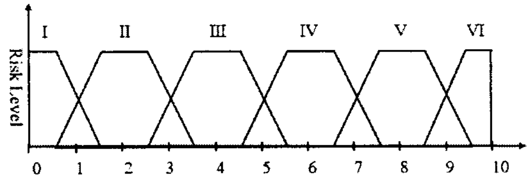

그림 5. 위험도의 멤버십 함수
Fig. 5. Membership function for Risk level

3. 사례연구

사례연구를 위해 전형적인 변전소 계통의 주요한 4가지 설비(주변압기, 단권변압기, 차단기, 단로기)에 대해서 평가를 수행하였다. 단, 설명의 간소화를 위해 모든 설비는 완전한 고장을 일으키는 한 가지 고장모드만 존재한다고 가정하였다. 각 설비의 치명도와 심각도에 대한 표 1의 10명의 전문가의 견해를 표 4에 정리하였다.

표 4. 전문가 의견
Table 4. Expert Opinion

	MT		AT		COS		DS	
no.	Cr	Sv	Cr	Sv	Cr	Sv	Cr	Sv
1	Oc	Ct	Av	Ct	Av	Mn	In	Mn
2	Av	Cr	Oc	Mj	Fq	Mn	Fq	Ng
3	Po	Cr	Po	Cr	Av	Mn	In	Ng
4	Oc	Cr	Oc	Cr	Av	Mj	Fq	Ng
5	Oc	Cr	Oc	Cr	Oc	Mn	In	Mn
6	Oc	Cr	Po	Ct	Av	Mn	Fq	Mj
7	Oc	Cr	Po	Cr	Fq	Mj	Fq	Mj
8	Po	Ct	Po	Cr	Av	Mn	Fq	Ng
9	Av	Cr	Oc	Ct	Fq	Mj	Oc	Mn
10	Fq	Cr	Oc	Cr	Fq	Mn	Av	Mj

* MT : Main Transformer(주변압기)
* AT : Auto Transformer(단권변압기)
* COS : Cut Out Switch(차단기)
* DS : Disconnecting Switch(단로기)

주변압기를 평가하는 방법에 대해 자세히 설명함으로써 전체 결과에 대한 계산과정을 대신한다. 가장 첫 단계로 전문가의 견해를 모으는 작업을 수행한다. 수식 (1)과 그림 2와 3의 멤버십 함수를 이용하여 그림 6과 7의 결과를 얻을 수 있다. 이때 각 해당 레벨의 상단을 표 1에서의 *grade*값이 제한하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다음 과정은 퍼지화되어 있는 결론의 비퍼지화 과정이다. 수식 (4)에 의해 메인 변압기의 치명도와 심각도를 4.0990과 8.2298로 결정할 수 있다. 다른 설비에 대해서도 동일한 방법으로 치명도와 심각도를 결정할 수 있으며 표 6에 전체 설비에 대한 결과가 정리되어 있다. 다음으로는 전문가 시스템에 의해 위험도를 결정하는 과정이 수행된다. 주변압기의 치명도와 심각도의 퍼지화된 결과인 그림 6과 7이 퍼지 전문가 시스템의 입력으로 들어가면, 규칙 4, 5, 9, 10, 14, 15, 19와 20에 의하여 판단이 이루어지게 된다. 일련의 추론과정을 표 5에 간략하게 정리하였다. 위험도의 *grade*는 각 규칙에 걸려있는 치명도와 심각도의 *grade*의 최소값으로 결정된다. 결과적으로 위험도는 IV-VI의 레벨을 갖게 되는데 이 결과를 위험도 레벨에 따라 최대연산자를 이용하여 종합하게 되면 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

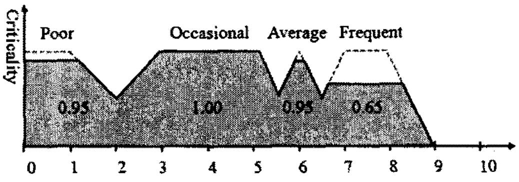

그림 6. 치명도의 퍼지상태 결론 (주변압기)
Fig. 6. Fuzzified Conclusion for Criticality (MT)

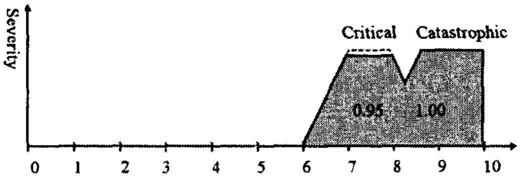

그림 7. 심각도의 퍼지상태 결론 (주변압기)
Fig. 7. Fuzzified Conclusion for Severity (MT)

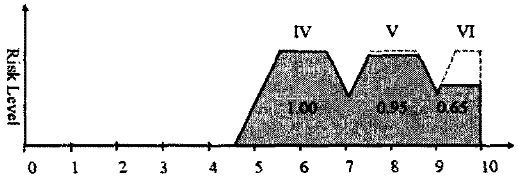

그림 8. 위험도의 퍼지상태 결론 (주변압기)
Fig. 8. Fuzzified Conclusion for Risk level (MT)

표 5. 위험도 계산과정의 논리전개
Table 5. Logical Process for Risk level

규칙	Cr		Sv		Rl	
	레벨	평점	레벨	평점	레벨	평점
4	Po	0.95	Cr	0.95	IV	0.95
5	Po	0.95	Ct	1.00	IV	0.95
9	Oc	1.00	Cr	0.95	IV	0.95
10	Oc	1.00	Ct	1.00	IV	1.00
14	Av	0.95	Cr	0.95	V	0.95
15	Av	0.95	Ct	1.00	V	0.95
19	Fq	0.65	Cr	0.95	V	0.65
20	Fq	0.65	Ct	1.00	VI	0.65

마지막으로 그림 8의 퍼지화된 상태인 위험도를 비퍼지화한다. 비퍼지화 방법은 위와 동일한 무게중심법을 이용하였으며 주변압기의 경우 7.3036의 위험도를 갖게 된다. 이상의 과정을 반복하여 나머지 3

개의 설비에 대해서도 평가할 수 있으며 전체결과를 표 6에 정리하였다.

표 6. 최종 결과
Table 6. Final Result

	MT	AT	COS	DS
Cr	4.0990	3.2805	5.2165	6.1038
Sv	8.2298	6.7027	3.9813	3.2113
Rl	7.3036	6.0195	4.0455	5.0765

표 6의 결과를 보면 변전소의 가장 핵심적인 기능이라고 할 수 있는 변압에 직접적인 영향을 미치는 주변압기와 단권변압기가 설비간의 연결을 담당하는 차단기와 단로기에 비해 상대적으로 높은 위험도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전문가 의견 도출과 전문가 시스템에 퍼지이론을 도입하는 방안을 제안하였다. 퍼지이론을 절절하게 응용함으로써 여러 전문가들의 의견 수렴에서 올수 있는 불확실함에 대한 처리방법을 제시할 뿐만 아니라, 위험도와 심각도를 종합적으로 평가하는 전문가 시스템이 의사 결정자의 관심사에 따라 유연하게 적응할 수 있도록 하고 있다. 사례연구의 결과는 본 방법론의 발전가능성과 넓은 적용분야에 대한 가능성을 보여주고 있다.

References

[1] Billinton, R., and R. N. Allen. Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd Edition. Essex, England; Longman Scientific & Technical. 1983.
[2] Marvin Rausand, and Arnljot Hoyland. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, 2nd Edition. Hoboken, New Jersey, USA; Wiley & Sons, Inc. 2004.
[3] E.E.Lewis. Introduction to Reliability Engineering, 2nd Edition. Wiley & Sons, Inc. 1995.
[4] John Moubray. Reliability-Centered Maintenance, 2Rev Edition. Butterworth-Heinemann. 1999.
[5] Andrews, J. D. and Beeson, S. "Birnbaum's Measure of Component Importance for Noncoherent Systems." IEEE Trans. on Reliability, vol. 52, No. 2, pp.213-219, June 2003.
[6] Hwang, F. K. "A hierarchy of importance indices." IEEE Trans. on Reliability, vol. 54, No. 1, pp.169-172, March 2005.
[7] Chaudhuri, G., Hu, K. and Afshar, N. "A new approach to system reliability." IEEE Trans. on Reliability, vol. 50, No. 1, pp.75-84, March 2001.
[8] F. C. Meng. "Relationships of Fussell-Vesely and Birnbaum importance to structural importance in coherent systems." Reliability Engineering & System Safety, vol. 72, No. 3, pp.241-245, June 2001.

◇ 저자소개 ◇

변융태 (卞隆泰)
1958년 6월 19일생. 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
E-mail : srbyt619@naver.com

김동진 (金東珍)
1984년 4월 21일생. 2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 동 대학원 전기공학과 석사과정.
E-mail : gentlebug@hanyang.ac.kr

김진오 (金鎭吾)
1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 1987년 ~현재 한양대 전기공학과 정교수.
Tel : (02)2220-0347
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr