

FMEA를 이용한 건설현장 전력설비의 위험성에 대한 정성적 평가

김두현 · 이종호[†]

충북대학교 안전공학과

(2004. 6. 28. 접수 / 2004. 12. 6. 채택)

Qualitative Assessment for Hazard on the Electric Power Installations of a Construction Field using FMEA

Doo-hyun Kim · Jong-ho Lee[†]

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received June 28, 2004 / Accepted December 6, 2004)

Abstract : This paper presents an qualitative assessment for hazard on the electric power installations of a construction field using FMEA. The power installations have the mission to maintain the highest level of service reliability on the works. The more capital the electric power invest, the higher service reliability they plausibly will achieve. However, because of limited resources, how effectively budgets can be allocated to achieve service reliability as high as possible. The assessment typically generates recommendations for increasing component reliability, thus improving the power installation safety. The FMEA tabulates the failure modes of components and how their failure affects the power installations being considered. In order to estimate the risks of a failures, the FMEA presents criticality estimation or risk priority number using the severity, occurrence, and detectability. The results showed that the highest components of the risk priority number among components were condenser, transformer, MCCB and LA. And In case of the criticality estimation, the potential failure modes were abnormal temperature rise, insulation oil leakage, deterioration for the transformer, overcurrent for the MCCB and operation outage for the LA.

Key Words : FMEA, electric power installation, qualitative assessment

1. 서 론

건설현장에서 사용중인 전력설비는 건설현장의 전력공급에 대한 신뢰성에 영향을 미치고 있으며, 그 중요성이 커지면서 개방형에서 큐비클 형태의 수전설비로 바뀌고 있다. 또한 안정적으로 전력공급을 위해서 많은 종류의 부품들로 상호 결합된 복잡한 구조로 구성되어 있다. 이런 복잡하고 중요한 전기설비의 안전을 유지하려면 평소에 진단(점검, 검사, 측정 등)을 철저히 실시하는 것이 효과적일 것이다.

건설현장에서는 작업이 진행됨에 따라 케이블과 설비 등이 쉽게 손상 받을 수 있으며 새로운 설비의 증설과 작업 중 혼잡한 상황은 현장을 통제하기가

어렵게 되는 등의 위험한 상황이 될 수 있다. 또한 전력설비가 외부 환경에 노출되어 있어 환경의 변화에 직면하게 되면 결함이 생기기 때문에 낙뢰, 온도, 습도 등의 변수에 크게 좌우된다. 변압기 자체가 어떤 원인으로 고장이 발생하게 되면 외부의 배전 선로를 통해 전력 회사의 변전소로 사고가 파급되기도 한다. 이러한 건설현장에서의 전력설비 고장은 현장의 작업중단, 복구까지의 노력과 시간의 손실, 고장직후 또는 복구작업 중의 재해유발 가능성 등 많은 위험성을 동반하고 있으므로 그 취급 여하에 따라서 감전, 화재, 전기설비 소손 등의 재해를 수반하게 된다. 그러므로 전력설비의 특성을 감안하여 수시설비점검은 절대적으로 필요하다. 그러나 건설현장이라는 특성상 어려운 실정이므로 우선적으로 신뢰성 높은 전력설비를 계획하여야 한다. 경제적이면서도 안전하게 전력 공급을 지속적으로 할

[†]To whom correspondence should be addressed.
yijho@korea.com

수 있게 전력설비를 관리해 나갈 필요가 있다^{1,2)}. 일반 수전설비의 경우 국내 연구는 미비한 실정이며, 특히 건설현장의 임시전력설비에 대한 정성적 평가를 하거나, 해왔던 연구가 거의 없는 실정으로서 이에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

본 연구에서는 건설현장에서 사용중인 전력설비를 구성하고 있는 기기들 중에서 서브시스템과 부품에 대한 정성적 평가를 하고자 한다. 이를 위해서 "what if"라는 질문을 염두에 두면서 고장 모드 및 영향 분석(failure modes and effects analysis; FMEA)으로 각 부품에 대한 정성적 분석 및 각 부품이 고장났을 경우 그것이 시스템에 어떠한 영향을 미치는가를 정성적 평가를 하고자 한다.

2. FMEA 분석절차

건설현장의 수전설비를 정성적으로 평가하기 위해서는 많은 정성적 평가 기법이 있지만 본 연구에서는 기본 설계 단계에서부터 생산단계에 이르기까지 제품이 의도한 대로 기능을 발휘할 것인가를 평가하고, 만족하지 못할 때는 개선활동을 통해 고장을 사전에 예방하고자 하는 신뢰성 활동의 하나인 FMEA(failure modes and effects analysis)를 사용하였다. FMEA는 부품 고장간의 인과관계를 체계적으로 규명하고, 시스템에 치명적일 수 있는 고장모드, 특히 전파될 수 있는 단일결함의 최초 징후를 제공한다는 큰 장점이 있다. 또한 정상적인 기능으로부터의 이탈뿐만 아니라, 파생되는 결과들을 규명할 수 있다는 점에서 여러 시스템의 안전성 분석기법으로 널리 사용되고 있다. 이러한 평가 기법을 통하여 현재 사용중인 수전설비의 유지·보수 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

시스템(system)은 정해진 많은 기능을 달성하기 위하여 몇 개의 서브시스템(sub-system)의 조합으로 되어 있고, 또 이것은 각각의 구성품(component) 단위로 조립되어 있으며, 이것은 다시 조립품(assembly), 부품(part)으로 조립되어 요구되는 기능을 충족시키고 있다. 따라서 분석 수준을 어디까지 하느냐에 따라 분석대상이 광범위해지기 때문에 본 전력설비에서는 시스템과 서브시스템의 수준까지 분해하여 FMEA를 실시할 것이다. 이렇게 분석 수준을 정한 다음은 부품이나 기기 등의 고장모드(failure mode)를 선정하여야 한다. 이것은 기기나 부품의 고유특성의 변화나 기기에 가해지는 스트레스 등의

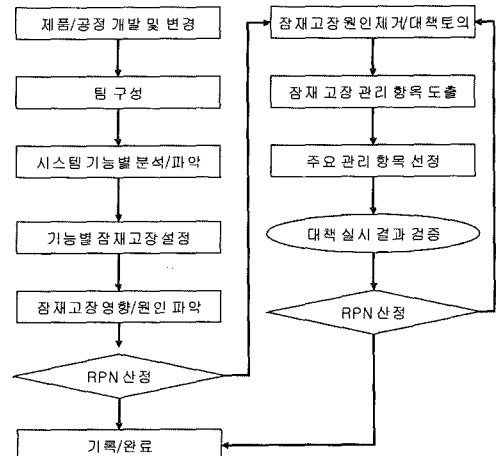


Fig. 1. FMEA Procedure

원인에 의해 발생한다. 잠재 고장(potential failure)은 반드시 일어나는 고장이 아니라 일어날 가능성이 있는 모든 고장을 과거 사고사례, 고장기록, 경험, 유사 부품의 고장이력 그리고 brain storming 등을 이용해서 찾아낸다. 이것은 고장모드가 과거에 발생했던 것이 재발하는 것이기 때문에 많은 정보가 필요하다. 고장원인(failure cause)은 고장모드의 원인을 기술하는 것으로 하나의 고장모드에 대해 한 가지 이상의 고장원인을 가질 수 있기 때문에, 각각의 고장 모드에 대해서 모든 잠재적인 독립 원인을 규명한다. 그리고 Fig. 1은 FMEA 실행순서를 나타내고 있다³⁾.

3. FMEA worksheet 작성 및 평가

FMEA는 정성적 분석 중에서 기능적인 면을 중심으로 시스템 구성품의 기능 및 성능에 대한 영향을 평가할 수 있으며, 고장모드는 기기나 부품의 고유특성이 변화하여 그 기능을 잃었을 경우 또는 물리적, 기술적으로 실패한 경우로 선정하였다. 그리고 고장 발생 원인은 각 부품의 메커니즘을 검토하여 1차적인 고장을 기입하였다. 일반적으로 많이 이용하고 있는 고장모드로서 국제전기표준규격인 "IEC 60812 ; FMEA"에 제시된 것을 이용하였다⁴⁾. 그리고 인간과오에 의한 고장원인을 본 FMEA에서는 직접적으로 검토하지 않았다.

본 연구에서 사용된 건설현장의 수전설비를 Fig. 2에서 보여주고 있으며 분석 대상의 시스템 주요 사양은 ASS(25.8kV 3P 200A), MOF(13.2kV/110V,

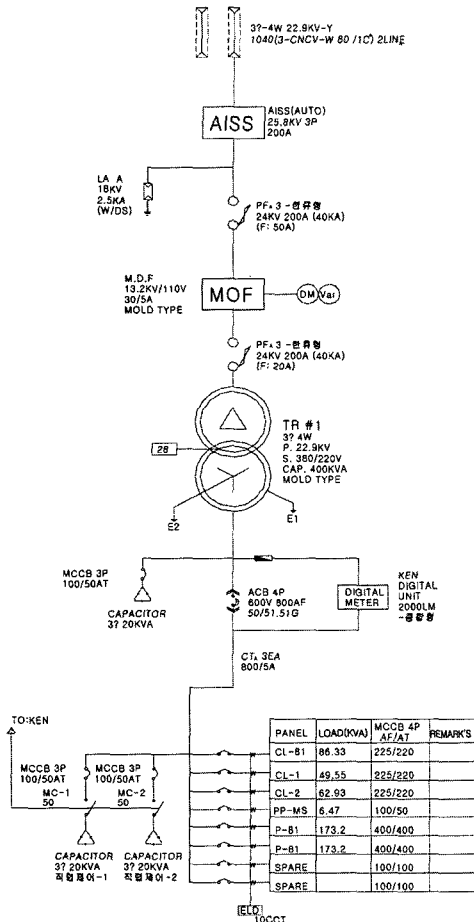


Fig. 2. Skeleton diagram

30/5A), PF(24kV 200A), Trans(P 3 Ø4W 22.9kV, S 380/220V, C 3 Ø 400kVA), MCCB(4P, 3P 다수) 등으로 구성되었다. 현장에서 사용되고 있는 주요 장치로 부하측 기기를 점검할 때 회로를 차단하는 단로기(disconnecting switch; DS), 외부 이상 전압(번개 등)으로부터 전기실의 전기 기기를 보호하는 피뢰기(lightning arrester; LA), 부하 측에서 단락 사고 및 지락 사고가 발생하였을 때 신속히 회로를 차단하는 차단기(circuit breaker; CB), 역률 개선을 위한 콘덴서(condenser), 기기 측에서 단락 사고가 발생시 기기를 보호하는 전력 퓨즈(power fuse; PF), 그리고 계기용 변압 변류기(metering out-fit; MOF)와 적산 전력량계(Wh), 계기류 등이 있다.

분석과정에서 FMEA의 한계성을 보완하기 위해 중요도 평가와 위험우선순위(risk priority number ; RPN)를 이용하였다⁵⁾. 이는 시스템의 점검 및 보수

에 대한 중요성과 우선순위를 보조하는데 도움을 줄 수 있으며, 수용가능한 위험성에 대한 명확한 경계를 설정할 수 있다. 이를 위해서 각각의 고장모드에 대한 발생빈도(occurrence)와 영향도(severity)에 의한 중요도(criticality)를 평가하고, 검출도(detectability)를 포함시켜 세 가지 값에 의하여 결정되는 위험 우선순위를 계산하였다. 이는 많은 고장모드에 대해 상대적으로 위험한 부품을 선택적으로 우선순위를 결정하고 사후조치에 관한 결정을 보조하는데 많은 기여를 할 수 있다. RPN값을 계산하기 위해서 고장모드의 발생빈도, 시스템의 영향도, 및 고장 발생시의 검출도인 세 범주로 분류하여 평가하였으며, 각 범주를 다섯 단계로 나누고 각각의 단계에 수준을 1~5까지로 부여하였다. Table 1~3은 발생빈도, 영향도 그리고 검출도에 대한 등급을 보여주고 있다.

Table 1. Classification and grades of occurrence

Class	Occurrence	Level	Criteria
I	remote	1	Failure is unlikely.
II	low	2	Relatively few failures.
III	moderate	3	Occasional failures.
IV	high	4	Repeated failures.
V	very high	5	Failure is almost inevitable.

Table 2. Classification and grades of severity

Class	Severity	Level	Criteria : severity of effect
I	none	1	No effect.
II	minor	2	Failure inducing unplanned maintenance but has no severe effect on system.
III	low	3	Inducing failure such as functional incapability on corresponding subsystem.
IV	high	4	Failure inducing consequence such as operable incapability of system.
V	hazardous	5	Failure has possibility of very severe consequence.

Table 3. Classification and grades of detectability

Class	Detectability	Level	Criteria
I	very high	1	Very high chance detect a potential cause and subsequent failure mode.
II	moderately high	2	Moderately high chance will detect.
III	low	3	Low chance will detect.
IV	remote	4	Remote chance will detect.
V	very remote	5	Very remote chance will detect.

3.1. 중요도 평가

중요도 평가는 고장이 발생하는 경우 그로 인하여 부품이나 시스템 또는 운영자가 받는 영향의 정도를 평가하며, 영향도를 주안점으로 하여 분석하는 것으로 일명 리스크 행렬(risk matrix)이라고 불려진다. 특히, 발생빈도가 높고, 영향도도 높은 등급을 갖는 고장모드에 주의를 기울이기 위하여 사용되는 수단이다. 중요도는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 의해 평가하는 것으로 다음 식으로 구할 수 있다⁵⁾.

$$\text{중요도} = \text{발생빈도} \times \text{영향도}$$

이것은 리스크의 개념과 같은 것으로 바람직하지 않은 사건의 발생 확률(발생빈도)과 그로 인해 야기될 수 있는 피해결과(강도, severity)로부터 추정된다. 여기에서는 제한된 시간과 자금으로 완벽한 재해예방을 한다는 것은 사실상 불가능하기 때문에 중요도를 3가지 등급으로 나누고자 한다. 발생확률과 피해강도 모두 낮은 경우, 발생확률은 높지만 발생시 재해강도가 낮은 형태의 사건, 즉 흔히 우리 주변에서 볼 수 있는 사소한 고장의 경우, 그리고 발생확률은 낮더라도 일단 발생하면 피해규모가 큰 사건, 더욱이 발생확률까지 크다면 문제는 심각하게 되는

경우로 나누고자 한다. 따라서 시스템의 안전성은 바로 이러한 유형의 재해를 구별해 내고 이런 재해에 안전의 노력을 극대화하는 것이다. 이러한 위험성 평가의 방향을 최초로 제시한 문건이 MIL-STD-882이다. 이것은 원래 미군의 물자조달을 위한 군용 안전규격이었는데 그 사고 방법이나 기법이 일반 산업시스템, 제품안전이나 시스템 안전의 전체 구조를 체계적으로 제공하고 있기 때문에 리스크 관리의 기본으로 널리 활용되어 왔다⁶⁾.

중요도를 평가하기 위해 사용된 평가표는 “실천 FMEA 手法”을 참고하였으며 Table 4에서 나타내고 있다⁷⁾. “High”(10이상), “Medium”(5~9), “Low”(5미만) 등급으로 관리지침을 설정하는 데 이용하였다. 또한 높은 수치를 나타내는 것은 관리나 능력을 집중함으로써 재해예방 노력의 효율을 증대시킬 수 있을 것이다.

Table 4. Criticality estimation matrix

Severity Occurrence	Severity				
	I	II	III	IV	V
A	1	2	3	4	5
B	2	4	6	8	10
C	3	6	9	12	15
D	4	8	12	16	20
E	5	10	15	20	25

Table 5. FMEA of the electric power installations

Item	Potential Failure Mode	Severity	Potential Effect(s) of Failure	Occurrence	Potential Cause/Mechanism Failure	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
변압기	이상한냄새발생	3	성능저하	2	국부가열	3	18	원인규명 대책	M
	절연유 누유 유변위치	5	과열, 파손, 정전 이상수치저시	3	가스킷 열화, 패킹불량, 부식, 균열, 계기고장, 누유	4	60	가스킷 교환, 교체, 도색,조이기	H
ASS	애자균열	4	정전, 오동작 및 성능저하	2	먼지 및 이물질에 의한 절연열화	3	24	교체, 청소	M
콘덴서	단자부 과열 변색	3	성능저하, 수명감소	2	고주파 유입, 부적당한 기기선정	2	12	체결력강화, 교체	M
COS	퓨즈 용단	4	부하측 정전	2	차단전류용량 부족 열화, 부식	4	32	적정 차단용량으로 교환	M
MCCB	투입불능	3	전압 Trip 장치의 이상	2	부족전압, 코일소손	1	6	전원 개선 반송수리	M
	오동작 트립	3	정격전류 이하에서 트립 시동전류에서 트립	4	단자부 느슨해짐에 따른 발열 차단기 내부 발열, 진동, 충격 시동돌입 전류조건사이의 차	3	36	통기, 조임, 교환, 쿠션으로 내진 정정 및 선정변경	H
LA	기능 정지	5	변압기나 기타 장비 파손	3	과대서지, 절연성능 불량, 흡습, 방전이 없음 이물질 부착에 의한 외부 플래시오버	3	45	성능정기점검, 설계기준강화 청소, 교체	H

3.2. 위험우선순위 평가

시스템의 고장영향을 평가하는 방법으로 위험우선순위를 이용하여 평가하는 것도 좋은 방법 중의 하나이다. 이 위험우선순위는 중요도를 평가하는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 고장의 검출도를 추가하여 평가하는 것으로 다음 식으로 평가한다⁹⁾.

$$\text{위험우선순위(RPN)} = \text{발생빈도} \times \text{영향도} \times \text{검출도}$$

위험우선순위의 값이 크다는 것은 해당 고장모드로 인해 시스템이나 기기가 큰 영향을 받을 수 있고, 혹은 그와 같은 고장이 자주 발생할 수 있으며, 고장이 발생하더라도 감지가 어렵다는 것을 의미한다. 그리고 우선적으로 시정조치를 시행하여 영향도나 발생도, 검출도 중의 한, 두 개 또는 전부를 감소 시킴으로써 위험우선순위 값을 감소시켜야 하는 고장모드라는 것을 의미한다. 현장의 전력설비에 대한 FMEA 분석 결과는 중요도 및 위험우선순위가 높게 평가된 기기별 고장모드를 종합하여 그 일부를 Table 5와 같이 나타내었다.

각 부품에 대한 RPN값으로 위험의 우선순위를 결정하였는데 그 결과를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

RPN값이 40 이상으로 평가된 고장모드를 Group A, 16 이상 40 미만인 경우를 Group B, 그리고 16 미만을 Group C 등급으로 분류하였다. 이 기법은 파레토 커브(Pareto's curve)의 특성으로서 분류항목의 합계에 대한 비율을 구하거나, 분류항목을 몇개 합하여 그 전체에서 점하고 있는 비율을 발견하게 되는 등 개선을 위해 노력을 투입하여야 할 방향을 정하는 데 도움을 줄 수 있다. 일반적으로 FMEA에 의한 분석은 상위 10%의 대책에 의해 대상 시스템의 신뢰성을 80% 이상 개선 가능한 것으로 많이 알려

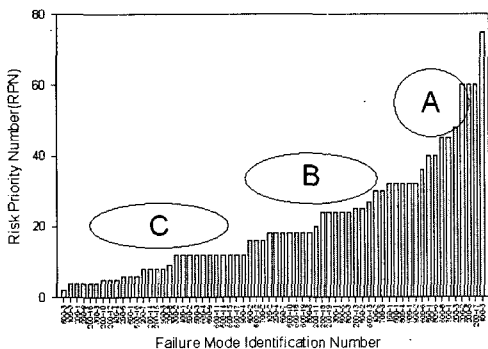


Fig. 3. Risk level classification by RPN

져 있다⁸⁾. 따라서 상위 10%에 해당하는 Group A에 대한 고장모드를 검토하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

건설현장의 전력설비에서 빈번하게 발생하는 사고의 원인 및 형태를 규명하는 데 정성적인 분석인 FMEA만으로는 한계가 있기 때문에 정량적 분석이 가능한 FTA를 실시하여 여러 분석기법들을 상호 보완적 적용을 통하여 신뢰성을 향상시켜야 할 것이다.

4. 결론

본 논문은 건설현장에서 사용중인 전력설비에 대하여 신뢰성 예측 기법인 FMEA를 통하여 잠재적 고장모드와 그 원인을 부품 수준으로부터 파악하여 그 영향을 분석하였으며, 시스템이나 기기의 가동에 치명적인 영향을 미치는 고장모드에 대하여 적절한 대책을 제시함으로써 시스템의 선택적 관리를 할 수 있어 정전시의 대처방안, 재투입 순서 및 방법, 그리고 이에 따른 파급효과를 미연에 막을 수 있을 것이다.

1) 중요도 평가의 경우 critical matrix에서 High 등급에 해당되는 고장모드는 변압기의 경우 이상온도 상승, 이상음 발생, 절연유 누유, 폭발, 절연물 열화, 철심 단자부 및 탭이상으로 인한 고장 모드가 주를 이루고 있다. 콘덴서의 경우 기름누설, 절연과피 및 내부단락, MCCB의 경우 오동작 트립, 과전류에 의한 부동작, LA의 경우 기능정지, 소손, PT의 경우 파손이 시스템에 영향을 많이 받는 것으로 해석되었다.

2) 위험우선순위(RPN)가 높은 고장모드 중에서 상위 10%에 해당되는 기기는 변압기, MCCB, 콘덴서, LA가 해당되고 있어 높은 신뢰성을 갖는 부품으로 설치해야 하며, 운전중 관리자는 세심한 주의를 기울여야 한다.

참고문헌

- 1) “건설현장의 전기안전”, 한국산업안전공단, pp. 1~26, 2001.
- 2) “전기설비관리지침”, 대한홍보사 출판부, 1989.
- 3) “제품안전을 위한 리스크 평가기법 및 소프트웨어 활용지침”, 한국표준협회, pp. 54~61, 2001.

- 4) ISO 60812, "Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)", 1985.
- 5) John B. Bowles, "The new SAE FMECA Standard", Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symp., pp. 48~53, 1998.
- 6) MIL-STD-882, "System safety program requirements", 1993.
- 7) 小野寺勝重, "實踐 FMEA 手法", 日科技連, 1998.
- 8) IEC 50 (191) : International Electro-mechanical Vocabulary (IEV), Chapter 191 : Dependability and quality of service, 1990.