

임시전력설비의 정성적 및 정량적 분석

이종호 · 김두현

충북대학교 안전공학과

1. 서론

오늘날 산업의 발달 및 삶의 질 향상과 더불어 새로운 건축물에 대한 욕구가 다양해지고 이에 따라 여러 곳에서 동시다발적으로 공사가 이루어지고 있다. 임시전력설비 운영의 가장 중요한 임무가 정전없는 양질의 전력을 현장에 안정적으로 공급하는 것이다. 이러한 임시전력설비는 공사현장의 특성상 임시적으로 가설되어 있는 구조로서 오랜 기간동안 많은 문제점을 지닌 채 지금까지 안전성이나 신뢰성에 대한 개선 없이 획일적인 구조로 설치 운용되어 오고 있다. 현재 임시전력설비는 일단 설치되면 고장이 날 때까지 방치되어 운영되고 고장이 발생한 경우에도 원인이나 재발방지, 피해정도 및 보수시의 재해가능성에 대한 분석절차도 거치지 않고 가장 중요한 자료의 보관조차도 무시되어 지고 있는 실정이다. 국내 임시전력설비에 관련된 고장률 데이터는 거의 알려져 있는 것이 없다. 자료가 있더라도 조사대상기기 수의 불충분과 많은 제작사로 인하여 데이터의 신뢰성이 낮아 고장률을 이용한 임시전력설비에 대한 신뢰도 분석 사례가 전무한 상태이다.^{1,2)}

따라서 본 연구에서는 임시전력설비에서의 빈번한 사고를 유발시킬 수 있는 원인 및 형태를 규명하고 신뢰성 분석이 대상이 되는 변압기, 차단기 등의 주요 부품의 고장률을 기초로 신뢰성 분석기법을 도입하여 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 분석하고자 한다. 또한 이에 대한 적절한 대책을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 임시전력설비의 위험성

임시전력설비는 전력 회사의 배전 선로에서 분기하여 인입된 특별 고압을 변압기에 의해 220[V], 380[V]의 전압으로 낮추어 건설현장에서 필요한 이동용 기계기구, 전기용접기 등의 전원으로 사용하는 설비이다. 보통 변압기를 중심으로 전력의 배분, 공급하는 시스템으로 구성된다. 임시전력설비의 주요 장치들은 시스템의 기능유지와 피해확산방지를 위해 자동고장구분개폐기, 피뢰기, 차단기, 전력퓨즈 등의 장비를 갖추고 있다. 그러나 건설현장의 특성인 외부에 노출된 환경적인 요인, 용량 증대, 그리고 인식부족으로 인한 사용자재의 조잡함, 공정진행에 따른 이설 및 증설, 공기단축으로 인한 정격 무시, 작업자의 전기에 대한 무지 등의 많은 악조건을 갖고 있다. 그리고 현장에서 작업 진행에 따른 케이블과 설비의 손상, 외부 배전 선로에서 낙뢰가 침입에 의한

변압기 소손, 또는 변압기 자체의 고장으로 외부의 배전 선로를 통해 전력 회사의 변전소로 사고가 파급되는 등의 많은 위험성을 내재하고 있다.^{3, 4)}

2.2 분석기법

시스템의 위험성을 평가하기 위해서는 위험요소 및 위험상황을 초래할 수 있는 원인을 도출하는 정성적 평가를 선행하고, 정량적 평가는 이미 정성적 평가에서 도출된 요소 및 원인에 대한 확률론적 평가가 이루어지는 것이 일반적이다.

임시전력설비의 신뢰성 해석을 위해 FMEA는 부품 고장간의 인과관계를 체계적으로 구명하고, 시스템에 치명적일 수 있는 고장모드, 특히 전파될 수 있는 단일결함의 최초 징후를 제공하는 고장모드 및 영향분석(Failure Modes and Effects Analysis : FMEA) 해석기법을 사용하고자 한다. 고장모드는 국제전기표준규격인 “IEC 60812 ; FMEA”를 이용한다. 그리고 각 부품별 고장모드를 검출하고, 이의 결과를 이용하여 임시전력설비에 있어 가장 중요한 고장영향을 설정한 후 Fault Tree Analysis(FTA)를 실시함으로써 임시전력설비에 대한 정량적인 전체 신뢰도를 평가하고자 한다.⁵⁻⁹⁾

3. 임시전력설비의 신뢰성 해석

본 연구의 분석대상 시스템은 300KVA 변압기 용량을 갖는 임시전력설비 시스템을 선정하였다. 변전 설비는 폐쇄형의 큐비클 형태이고 비교적 양호한 외관을 갖추고 있다. 또한 경제적인 1회선 수전 방식을 사용하고 있지만, 이는 정전 발생시 복구시간이 오래 걸려 전력 공급 신뢰도면에서는 바람직하지 않는 단점을 지니고 있다.

Fig. 1은 분석대상 시스템의 단선 결선도를 나타며 분석 대상의 시스템 사양은 다음과 같다. ASS(25.8kV, 200A), MOF(PT 13.2kV/110V, CT 20/5A), PF(25.8kV, 200AF/30AT), COS(25kV 100AF/8AT), Trans(P 3 ϕ 22.9kV, S 380/220V, C 3 ϕ 300kVA 2대), MCCB(4P 600AF/500 AT, 4P 400AF /300AT) 등으로 구성되었다. 본 연구는 임시전력설비 시스템 구성품의 기능 및 성능에 대한 영향을 평가하고, 운전 중 이 시스템의 정전상황을 분석대상으로 설정하였다.

3.1 FMEA

분석과정에서 정량적인 평가가 곤란한 FMEA의 한계를 보완하고 시스템의 점검 및 보수에 대한 중요성과 우선순위를 부여하기 위하여 최종적으로 각각의 고장모드에 대한 발생빈도(occurrence)와 영향도(severity)에 의한 중요도(criticality)를 평가하고, 검출도(detectability)를 포함한 세 가지의 값에 의하여 결정되는 위험우선순위(Risk Priority Number, RPN)를 계산하였다. 중요도 평가를 하기 위해 小野寺勝重 저서의 “實踐 FMEA 수법”¹⁰⁾을 참고하였는데 이것은 각 범주에 1부터 5까지의 가중치를 부여하여 곱한 후 Table 1과 같은 결과를 얻는다. 중요도에 대한 평가 등급을 H(>10), M(5-9),

L(<5) 등급으로 하여 관리지침을 설정하는데 이용하였다. 그리고 재해를 예방하는 데에 관리능력을 집중함으로써 재해예방 노력의 효율을 증대시킬 수 있다.

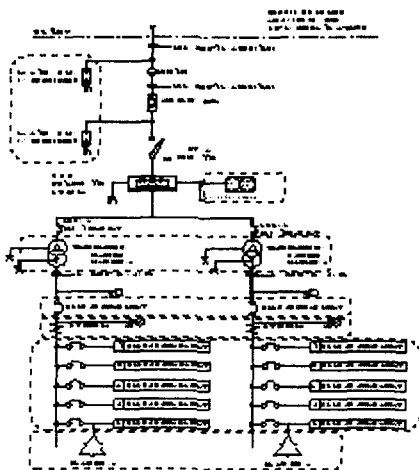


Fig. 1. Skeleton diagram of Temporary Electric Power Installations

위험의 우선순위를 결정하기 위해 RPN값이 40이상으로 평가된 고장모드를 Group A, 16이상 40미만인 경우를 Group B, 그리고 16미만을 Group C 등급으로 분류하였다. 이와 같이 RPN값으로 분류한 것을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 이 기법은 파레토 커브 (Pareto's curve)의 특성으로서 분류항목의 합계에 대한 비율(상대도수, 누적상대도수)을 구하거나, 분류항목을 몇 개 합하여 그 전체에서 점하는 비중을 발견하게 되는 등 개선을 위해 노력을 투입하여야 할 방향을 정하는 데 도움을 줄 수 있다.

Table 2는 임시전력설비의 FMEA 분석결과를 보여주고 있는 것으로 Group A에 해당하는 고장모드 목록을 보여주고 있다. 일반적으로 FMEA에 의한 분석은 상위 10%의 대책에 의해 대상 시스템의 신뢰도를 80% 이상 개선 가능한 것으로 많이 알려져 있기 때문에 상위10%에 대한 고장모드를 검토하였다.¹¹⁾

Table 1. Criticality estimation matrix

Severity Occurrence	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

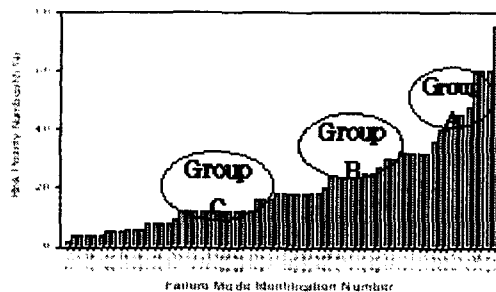


Fig. 2. Risk level classification by RPN

Table 2. FMEA of Temporary Electric Power Installations

Item	Number	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
변압기	200-2	이상온도상승	수명감소, 파손	계기고장, 전압강하 과부하, 고조파 유입, 과여자 권선내부 이상, 주위온도 과대	4	3	5	60	수리·교환 부하 지장 시간 균형, 원인규명	H
	200-5	절연유 누유 유연위치	고열, 파손, 정전 이상수치지시	개스킷 열화, 패킹불량, 부식, 균열, 계기고장, 누유	5	3	4	60	개스킷 교환, 교체, 도색조이기	H
	200-11	누유	과열	복합, 패킹 불량	5	2	2	20	교체, 패킹보강	H
	200-13	폭발	정전	급격한 과부하, 사고시 차단기 미 동작	5	5	1	25	방압 안전장치 검사	H
200-17	절연물 열화	절연물의 변색, 균열	국부가열, 경년열화	4	3	5	60	정기점검, 교체, 수리	H	
콘덴서	400-2	기중누설	폭발, 정전, 기능저하	외부 단락, 지락 및 용기 손상	5	2	3	30	외관 검사, 청소	H
	400-3	용연과교 내부단락	2차측 CT 폭발, 정전	자연 열화, 경년열화, 부식간 플래시오버	5	3	5	75	감화설계, 교체	H
MCCB	600-6	오동작트립	장력전류 이하에서 트립 시동전류에서 트립	단자류 누스해짐에 따른 발열 차단기 내부 발열, 진동, 충격 시동돌입 전류조건사이의 차	3	4	3	36	통기, 조일, 교환 내진 및 선정변경	H
	600-8	과전류 부동작	주위온도 저하	규정동작전류에서 부동작	5	3	3	45	실내온도상승	H
LA	700-1	기능 정지	변압기나 기타 장비 파손	과대서지, 절연성능 불량, 흡습 전압 저하를 위한 방전이 없을 이물질 부착에 의한 외부 플래시오버	5	3	3	45	성능경기점검, 설계기준강화 청소, 교체	H
	700-3	스승	정전	접지선 탈락, 접지선 고압유도 지선, 풍압에 의한 균열, 파손	5	2	3	30	교환, 수리	H
PT	800-6	파손	정전	자연열화	5	2	4	40	정기점검	H

3.2 FTA

FTA는 정상사상이 발생하는 원인이나 조건을 추출하여 대책 가능한 수준의 기본사상을 구하는 기법으로 시스템의 고장 원인의 최종사상이 기본사상이 된다. Fault Tree를 구성하면서 다음과 같은 가정들을 사용하였다. 첫째, 시스템의 고장밀도함수는 지수분포를 따른다. 둘째, 각각의 기본사상은 통계적으로 상호 독립적으로 발생한다. 셋째, 고장률은 부품이 포함되어 있는 어셈블리 및 시스템의 환경에 따라 즉, 온도 및 진동 등의 stress에 의해서 변화할 수 있지만, 일반적으로 작동중인 부품의 고장률보다는 낮은 고장률을 갖게 되고 그 결과 시스템 신뢰성 분석결과에 큰 영향을 미치지 않는다. 넷째, 시스템 가동 기간 중에는 수리에 의한 보수는 없다. 다섯째, 휴면에러에 의한 운전상의 오조작 가능성은 분석대상 시스템이 복잡하고 방대하여 FTA에서는 언급하지 않기로 한다. 본 연구의 목적이 임시전력설비 시스템의 부품 고장이 전력설비의 정전을 일으키냐에 초점을 맞추고 있기 때문에 연구 대상에서 제외하였다.

임시전력설비에서 사용한 기본사상의 고장률과 분류 코드를 Table 3에서 나타내고 있으며, 각 부품의 고장률은 백만 시간당 고장률 값이다. 특히 임시전력설비관련 분야에서는 아직까지 고장률 데이터가 축적되어 있지 않고 있다. 따라서 기본사상이 되는 부품의 고장률은 미국방성 소속인 "Reliability Analysis Center(RAC)"에서 1995년에 발간한 "Non electronic Parts Reliability Data(NPRD)"^[12]자료를 근간으로 임시전력설비에 사용된 부품들의 특성에 가장 적합한 고장률 값을 선택하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 "정전"이라는 정상사상을 일으키기 위해 필요한 조건을 변압기, COS, 자동고장구분개폐기(ASS), 계기용변성기(MOF), PF가 고장이 발생하는 것으로 가정하였으며 이를 바탕으로 구성한 Fault Tree가 Fig. 3에 제시되어 있다. 임시전력설비의 운전시간은 건설현장마다 공사기간이 다르기 때문에 특정기간 동안의 운전시간으로, 1년(8760

시간)이라는 시간으로 해석하였다.

Table 3. Failure rate data for Basic events

Basic Event Code	Description	Failure Rate	Basic Event Code	Description	Failure Rate
101	애자 소손	0.05	241	고압리드선 탈락 및 접속 불량	0.0394
102	접속부 불량	0.3221	242	접지선 탈락 및 접속 불량	0.03
103	퓨즈 링크 손상	2.8686	243	애자균열(피뢰기)	0.05
201	보호계전기 부동작	2.6069	301	애자균열(ASS)	0.05
202	권선 열화	0.041	302	퓨즈 링크 손상	2.8686
203	부싱단자 고장	0.05	303	spring 고장에 의한 latch 손상	0.017
211	냉각팬 고장	6.8804	304	체결부 불량	0.0242
212	베어링 마모	1.6445	401	단자부 변색 및 변형	0.05
213	유류 밸브 고장	12.4549	402	애자손상	0.05
214	송유 펌프 고장	69.6427	411	단자부 변색 및 변형	0.05
221	배유 밸브 고장	12.4549	412	리드선 체결 불량	0.0394
222	방압판 고장	0.0001	501	퓨즈 링크 손상	2.8686
231	방압판 변형	0.0001	502	Element 손상	0.00065
232	개스킷 열화로 기기불량	0.3051			

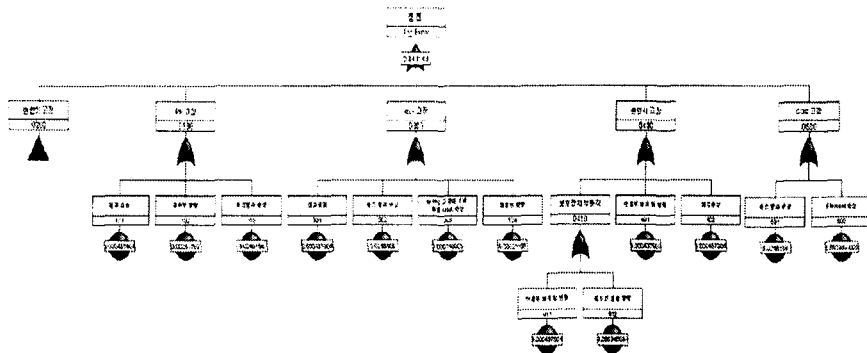


Fig. 3. Fault Tree of Temporary Electric Power Installations

임시전력설비에 대한 정상사상의 발생확률, 확률중요도 및 치명중요도 그리고 최소절단집합을 결정하기 위해 Fault Tree를 구성하고, 운전시간은 8760시간으로 하여 임시전력설비의 정전이라는 정상사상이 발생할 확률은 2.115×10^{-4} 가 된다. 이것을 평균고장시간인 MTTF(Mean Time to Failure)로 환산하기 위해서는 불신뢰도 $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 식에서 고장률 λ 를 다음 식 (1)으로 구한 후 MTTF를 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{-\ln(1-F(t))}{t}, \quad MTTF = 1/\lambda \quad (1)$$

식 (1)을 통해 구한 MTTF는 약 4730시간이며, 임시전력설비의 경우 공사기간 동안 24시간씩 매일 동작을 해야 하는 가혹한 조건이므로 이 시간에 근거한 임시전력설비의 정전 발생 주기는 약 0.54 년인 반년으로 평가되었다. 임시전력설비 정전에 가장 크게 작용하는 것은 변압기 고장으로 확률이 1.64×10^{-4} 이며, 이것은 일반적으로 전력설비에서 변압기가 중요하다

는 것을 뒷받침하고 있다. 그 다음으로 PF 고장이 발생할 확률은 3.25×10^{-6} 이고, ASS의 고장확률은 2.96×10^{-6} , 그리고 COS의 고장확률은 2.87×10^{-6} 이라는 결과를 얻었다.

4. 결 과

본 연구는 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 평가한 것으로 고장 양식 및 영향 분석(Failure Modes and Effects Analysis ; FMEA)을 통해 정성적으로 분석을 하였고, 고장영향을 설정한 후 고장수목분석(Fault Tree Analysis ; FTA)을 실시하였다. 이러한 일련의 안전성 및 신뢰성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, FMEA 분석 결과 시스템의 정전을 일으키는데 가장 큰 영향을 미치는 설비는 RPN값이 큰 변압기, 피뢰기, 콘덴서 설비이며, 특히 변압기에 의한 고장모드가 제일 많아 고신뢰성의 변압기로 교체하는 것이 사고예방을 위한 바람직한 조치가 될 것이다. 둘째, FTA 분석 결과 정전이라는 정상사상의 고장률은 2.115×10^{-4} (건수/백만 시간)이고, MTTF는 약 0.54 년이 되어 임시전력설비의 고장이 최소 6개월에 한번씩은 정상사상이 발생되는 것으로 해석되었다.

셋째, FTA 분석 결과 각 중간사상의 고장확률은 변압기가 1.64×10^{-4} , PF 고장확률은 3.25×10^{-6} , ASS 고장확률은 2.96×10^{-6} , 그리고 COS 고장확률은 2.87×10^{-6} 으로 변압기가 가장 높은 고장확률이었다.

참고문헌

- 1) 건설현장의 전기안전, 한국산업안전공단, 2001.
- 2) 신석화, 전기설비설계, 사이텍미디어, 2002.
- 3) 박동수 외2인 공저, 수변전설비의 계획과 설계, 의제, 2002.
- 4) 자가용 변전설비공사 실무교재 개발, 한국전기공사협회, 2000.
- 5) 박경수, 신뢰성개론, 영지문화사, 1996.
- 6) Puligandla Viswanadham & Pratap Signh, Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages, Chapman&Hall, 1998.
- 7) 한국표준협회, 제품안전을 위한 리스크 평가기법 및 소프트웨어 활용 지침, 2001.
- 8) 総合安全工学研究所 編, FTA 安全工学, 기전연구소, 1992.
- 9) ISO 60812, Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effect Analysis(FMEA), 1985.
- 10) 小野寺勝重, 實踐 FMEA 手法, 日科技連, 1998.
- 11) IEC 50 (191) : International Electromechanical Vocabulary (IEV), Chapter 191 : Dependability and quality of service, 1990.
- 12) Reliability Analysis Center, Nonelectronic Parts Reliability Data, 1995.