

안전분야 - 연구자료

연구원 2003-48-459

임시전력 설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델 개발 연구

A Study on Development of Evaluation Model for
Reliability and Safety of Temporary Electric Power
Installations

연구수행기관 : 충북대학교

한국산업안전공단
산업안전보건연구원

제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 2002년 귀 연구원의 안전연구사업계획에 따라 수행한 “임시전력 설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델 개발 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2003 년 10 월 일

연 구 기 관 : 충북대학교 안전공학과

연구책임자 : 김 두 현(교수, 공학박사)

연 구 원 : 이 종 호(공학석사)

강 동 규(공학박사)

김 성 철(공학석사)

연구상대역 : 산업안전보건연구원 안전공학연구실

박 대 식(차장)

요 약 문

1. 과 제 명 : 임시전력 설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델 개발 연구

2. 연구기간 : 2002 년 12 월 4 일 ~ 2003 년 10 월 3 일

3. 연구목적 및 필요성

새로운 건축물의 수요에 의해 동시다발적으로 이루어지는 건설 현장에 안정적인 전력을 공급하기 위한 임시전력설비는 기기의 이용률 증대 및 경제성 확보라는 우선순위로 인해 안전성 확보는 후순위로 밀린 상태에서 운전되고 있는 것이 일반적이며 또한 감리대상이 아닌 이유로 전기 기기의 안전을 유지, 관리하는데 있어 소홀히 취급되는 측면이 있다. 이러한 임시전력설비는 건설 현장의 대형화, 첨단화로 인한 전기설비의 용량 증대, 경비절감 및 인식 부족으로 인한 저신뢰성 기기의 사용, 공정진행에 따른 잦은 이설, 다습한 장소라는 환경과 공기단축을 위한 정격 무시, 작업자의 전기에 대한 무지 등의 많은 악조건을 수반하고 있다. 이러한 조건에서 설비를 운용하는 인간의 과오가 더해지게 되면 여러 가지 형태의 전기사고와 이에 따른 심각한 재해를 유발하게 된다. 즉, 현재 임시전력설비는 어떤 조건과 확률 속에서 관리 운영되고 있는지에 대한 정보의 필요성을 인식하지 못한 채 일단 설치되면 고장이나 사고가 발생할 때까지 방치되어 운영되고 있으며, 사고가 발생한 경우에도 원인, 피해정도 및 보수시의 재해가능성에 대한 분석절차도 거치지 않고 사고처리가 종료되며 정상운전 상태에 들어간다. 현장과 관계기관의 무지에 의해 재발방지에 가장 중요한 자료의 축적이나 보관조차도 무시되고, 주어진 기간 동안 설비가 얼마나 고장없이 안정되게 고유의 업무수행이 가능한가라는 신뢰성 측면과 이를 이용

한 사고나 재해의 발생 정도에 대한 평가라는 설비의 종합적 안전성에 대한 무관심으로 동종사고가 지속적으로 발생되고 있다. 이러한 현실에서 획일적인 구조로 설치 운용되고 있는 임시전력설비에서의 재해를 방지하기 위해서는 설비에 대한 수시 점검을 실시하고, 설비의 수명특성을 파악하여 고장이 발생하기 전에 사전 조치를 취하여야 하며, 설비 전반에 걸쳐 신뢰성 분석과 안전성 확보를 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 임시전력설비에서 발생하는 다양한 형태의 사고를 예방하기 위하여 확률론적 기법에 근거한 정량적 평가와 정성적 평가기법을 도입하여 설비의 신뢰성과 안전성을 평가하고자 한다. 기개발된 신뢰성 평가기법을 상호보완적으로 적용하여 다양한 분야에서 활용 가능한 설비의 안전성과 신뢰성을 평가할 수 있는 평가모델을 개발한다. 이를 통해 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 향상이 가능하며 임시전력설비 사고로 인한 인적·물적·손실의 감소를 기대할 수 있고 경제적인 설비 운용이 가능할 것으로 기대된다.

4. 연구방법 및 내용

임시전력설비의 결함을 개선하기 위해 우선 건설 현장에서 운영되고 있는 임시전력설비에 대한 계통도를 이용하여 기기의 신뢰성에 대한 분석이 필요하다. 임시전력설비는 변압기, 차단기, 배선 및 계전기 등 많은 부품들로 구성되기 때문에 각 부품에 대한 고장률을 바탕으로 하여 설비에 대한 신뢰성 데이터 분석을 한다. 이러한 설비의 신뢰성 분석을 통하여 설비로 인한 기계적 결함과 사고의 예방은 어느 정도 극복할 수 있지만, 사고가 발생하는 경우 재해라는 측면에서는 일시적이고 한정적인 효과만을 기대할 수 있다. 즉, 설비의 신뢰성 해석으로 인적 재해의 예방에는 한계가 있기 때문에 작업자의 조작 및 사용시 지속적인 주의 환기와 의식 향상 등의 인적 원인에 대한 대책을 강구해야 한다. 임시전력설비를 취급하는 인간의 특성상 휴면에러를 발생시켜 재해를 발생시키는 요인들에 대해서는 사례연구를 통해 사용 중의 사고를 최소화함과 동시에 확산을 방지할 수 있는 예방 대책을 확립하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 임시전력설비의 사고사례들을 중심으로 조사, 정리하여 임시전력설비의 고장 형태 및 유형을 살펴보고 빈도수가 높은 사고유형을 추출한다. 고장률에 기초하여 임시전력설비의 각 부품 및 사고에 대해 FMEA, FTA 등의 정성적, 정량적 신뢰성 평가기법들을 적용하여 설비의 신뢰성, 사고 모드 및 영향, 주요원인, 합리적 대책을 수립한다. 또한 THERP를 이용하여 휴먼에러 발생 가능성을 최소화하기 위한 휴먼에러의 특성을 분석하고, 에러로 인한 피해를 최소한으로 줄이기 위해 작업자와 설비를 하나의 시스템으로 통합 처리하여 그들의 상호관계를 사고사례를 중심으로 분석·평가하고 각 기법들의 분석 결과를 상호보완적으로 종합 평가하여 임시전력설비의 신뢰성과 안전성 대책을 마련하고자 한다.

5. 연구결과

(1) FTA와 FMEA기법을 이용한 정성적 평가와 정량적 평가를 상호보완적으로 수행하고, 사고에 기인하는 인적오류 분석을 위한 THERP 기법을 도입함으로써 신뢰성 및 안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 평가모델을 제시하였다.

(2) 제안된 평가모델을 이용한 임시전력설비의 신뢰성 평가를 통해 임시전력설비의 주요 고장원인이 변압기에 의한 것으로 나타났으며, 이로 인한 정전사고는 0.5회/년 정도의 고장률로 평가되었다.

(3) 임시전력설비에서 발생 가능한 다양한 고장모드에 대한 분석 및 원인 추정, 이에 따른 대책제시, 위험도 평가를 수행하여 제시함으로써 설비 운용의 활용도 및 효율화를 추구하였다.

(4) 휴먼에러 분석을 위해 감전사고가 빈발한 특정작업에서 작업절차상의 직무분석시 직무와 직무사이에 “확인”이라는 작업절차가 도입되는 경우에 휴먼에러로 인한 사고를 감소시킬 수 있다는 사실에 대한 정량적 평가를 도출하였다.

6. 활용계획

임시전력설비의 각 부품에 대한 합리적 고장률 데이터를 지속적인 연구를 통해 데이터베이스화가 가능하다면 본 모델을 이용하여 향후 임시전력설비에 대한 신뢰성 및 안전성 평가에 많은 활용을 할 수 있을 것이다. 또한 휴먼에러와 관련된 문제의 예방활동에 지대한 영향을 줄 수 있어 임시전력설비 운전 중의 사고 방지 및 경제적이고 합리적인 설비의 운영을 위해 다양하게 활용 가능할 것으로 평가된다.

(1) 임시전력 공급 설비의 신뢰성 및 안전성 평가를 위한 다양한 방법론 개발 및 고신뢰성 임시전력설비의 구성을 위한 평가·분석에 활용 가능하다.

(2) 임시전력설비의 정전시간 단축 및 보수의 용이성 등 작업현장의 생산성 향상을 위한 분석 자료를 수집하고 축적하기 위한 수단으로 활용 가능하다.

(3) 감전, 화재 등의 전기 재해발생으로 인한 인적 및 물적 손실 발생을 감소시키고 임시전력설비의 취약 기기 선정을 위한 기초자료 확보를 위한 해석 방법으로 활용가능하다.

(4) 효율적이며 경제적인 임시전력설비의 유지, 보수를 위한 설비의 개선 우선순위 선정은 정량적 신뢰성 분석에서의 치명도 분석 결과를 통해 활용이 가능하다.

(5) 임시전력설비 관리 인력의 합리적 재배치를 위해 일관되고 체계적인 분전업무와 재해 예측을 위한 점검순서의 일상화의 근거자료로 활용가능하다.

(6) 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델은 설비의 보수, 교체에 따른 우선순위 결정과 적정한 수준의 설비도입으로 경제적인 신뢰성 향상을 가능하게 하며, 이를 바탕으로 체계적이고 효율적인 시스템 운영을 가능하게 한다. 또한 이 모델은 임시전력설비뿐만 아니라 수변전설비 및 전력계통의 신뢰성 및 안전성 평가에도 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

7. 중심어 : 임시전력설비, 신뢰성 및 안전성 평가모델, FMEA, FTA, 휴먼에러, 인간신뢰성분석, THERP

차 례

I. 서 론	1
1. 연구배경	1
가. 연구의 목적 및 필요성	1
나. 국내 연구 동향 및 배경	3
2. 연구개요	4
가. 연구기간 및 수행일정	4
나. 신뢰성 및 안전성의 개념	5
나. 연구방법 및 범위	6
다. 분석도구	7
II. 임시전력설비 및 사고현황	9
1. 임시전력설비 개요	9
가. 설비의 개요	9
나. 임시전력설비의 주요 장치	10
다. 건설현장의 임시전력설비	11
2. 설비사고 현황	17
가. 설비사고 발생 형태 및 원인	17
나. 설비사고 발생 통계	18

III. 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가·분석22

1. 평가·분석 개요22

2. 임시전력설비의 고장모드 및 영향분석(FMEA)25

가. FMEA 분석25

나. FMEA Worksheet 작성 및 평가방법27

다. FMEA 분석 결과32

3. 임시전력설비의 고장수목분석(FTA)41

가. FTA 분석41

나. 정상사상 : 감전 FTA42

다. 정상사상 : 정전 FTA49

라. FTA 분석 결과55

4. 임시전력설비의 인간신뢰성분석60

가. Human Error 분석의 필요성60

나. Human Error 분석기법63

다. 직무 분석 및 인간신뢰성 분석68

라. 인간신뢰성 분석 구도81

IV. 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델84

1. 평가모델 흐름도84

2. 평가모델 개발85

3. 평가모델 적용 결과 및 고찰	87
--------------------------	----

V. 결 론	90
--------------	----

표 차 례

<표 1> 건설현장의 임시전력설비 기기들	16
<표 2> 국내의 보호장치 동작별 사고발생현황	20
<표 3> 국내의 사고원인별 사고발생현황	20
<표 4> 국내의 사고형태별 발생현황	21
<표 5> FMEA 절차(IEC 812)	25
<표 6> Classification and grades of occurrence	28
<표 7> Classification and grades of severity	28
<표 8> Classification and grades of detectability	29
<표 9> Criticality estimation matrix	30
<표 10> 임시전력설비의 FMEA 결과	35
<표 11> 설비의 Basic events에 대한 고장률 Data	51
<표 12> 최소절단집합 Lists	56
<표 13> Birnbaum 중요도 지수	58
<표 14> Criticality 중요도 지수	60
<표 15> 종속성 모형의 조건부확률	66

그 립 차 례

[그림 1] 사상과 게이트에 대한 단축아이콘	8
[그림 2] 임시전력설비에 대한 FT도	8
[그림 3] H 건설현장의 임시전력설비 단면도	12
[그림 4] H 건설현장의 임시전력설비 및 기기	13
[그림 5] H 건설현장의 내·외부 설비 등	13
[그림 6] B 건설현장의 임시전력설비 단면도	14
[그림 7] B 건설현장의 외부 형상	15
[그림 8] 임시전력설비의 단선 결선도	24
[그림 9] FMEA 실행순서	27
[그림 10] RPN에 의한 위험성 등급 분류	32
[그림 11] 감전사고의 정성적 FTA	44
[그림 12] 임시전력설비의 정전에 대한 Fault Tree	52
[그림 13] 최소절단집합의 불신뢰도	57
[그림 14] 인간신뢰성 분석절차	65
[그림 15] THERP 분석원리	67
[그림 16] 전력용 퓨즈 교체 작업	70
[그림 17] 전력용 퓨즈 교체 작업시 인간신뢰성 계산 (확인작업이 없는 경우)	72
[그림 18] 전력용 퓨즈 교체 작업시 인간신뢰성 계산 (확인작업이 있는 경우)	73
[그림 19] 전력용 퓨즈교체 작업시 감전사고 ETA	75
[그림 20] ASS 교체 작업시 인간신뢰성 계산(확인작업이 없는 경우)	78
[그림 21] ASS 교체 작업시 인간신뢰성 계산(확인작업이 있는 경우)	79
[그림 22] ASS 교체 작업시 감전사고 ETA	80
[그림 23] 인간신뢰성 분석 기본 구도	82

[그림 24] 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 분석 절차 흐름도	85
[그림 25] 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가 모델	87

I. 서 론

1. 연구배경

가. 연구의 목적 및 필요성

오늘날 산업의 발달 및 삶의 질 향상과 더불어 새로운 건축물에 대한 욕구가 다양해지고 이에 따라 여러 곳에서 동시다발적으로 공사가 이루어지고 있다. 건설현장의 임시전력설비는 직접적으로 건설 현장의 전력공급 신뢰성에 중요한 영향을 미치는 설비로 전력공급을 위해 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. 또한 환경의 변화에 직면하면 결함이 생기기 때문에 수시설비점검은 절대적으로 필요하지만 임시전력설비의 특성상 어려운 실정이다. 그리고 현장에서의 작업이 진행됨에 따라 케이블과 설비는 손상 받을 수 있으며 새로운 설비의 증설과 작업 중 혼잡한 상황이 되어 통제를 어렵게 하는 등의 위험한 상황이 될 수 있다. 또한 외부 배전 선로에서 낙뢰를 받으면 변압기는 순식간에 소손될 수 있는 가능성이 존재하고, 변압기 자체가 어떤 원인으로 고장이 발생하게 되면 외부의 배전 선로를 통해 전력 회사의 변전소로 사고가 파급되기도 한다. 아울러 현장에서의 단락이나 과부하로 인하여 임시전력설비의 고장을 유발시킬 수 있으며 이로 인한 현장의 작업중단, 복구까지의 노력과 시간의 손실, 고장직후 또는 복구작업 중의 재해유발 가능성 등 많은 위험성을 동반하고 있으므로 그 취급 여하에 따라서는 감전, 화재, 전기설비 소손 등의 재해를 수반하게 된다. 그러므로 임시전력설비의 특성을 감안하여 우선적으로 신뢰성 높은 전력설비를 계획하여야 하고, 부하 설비에 적합한 용량의 변압기

를 설치하여 원활한 전력수급을 유지하면서 외관 점검이나 설비의 열화 및 부하특성 등에 대한 고려 및 관리를 통해 경제적이면서도 안전하게 전력 공급을 지속적으로 할 수 있게 임시전력설비를 관리해 나갈 필요가 있다.

사고 발생을 최대한 방지하며, 발생하더라도 그 피해를 최소화하도록 설계되어 있는 것이 현실이지만 작업자의 실수나 기기의 작동 실패를 완전히 방지할 수는 없으며, 안전장치의 작동불능 또는 기기의 고장으로 정전이나 감전 등의 전기사고가 발생할 수도 있다. 따라서 잠재적 전기사고를 사전에 예방하고 만일의 사고에 대한 대책 마련을 위해, 우선 발생할 수 있는 가능한 사고가 어떤 것들이 있으며 그러한 사고의 발생 가능성 및 그로 인한 피해를 평가하는 것이 필요하다.

분석 대상이 되는 건설작업현장은 안전한 전기 사용이 어려운 환경에 대부분 위치하고 있으며, 작업의 상당수는 습한 옥외에서 이루어지고 있다. 이러한 습한 작업 환경 조건은 감전 등 다양한 사고의 위험성을 증가시킨다. 건설 현장에서 전력을 공급하는 임시전력설비는 이러한 건설현장의 특성을 잘 나타내고 있으며, 산업의 발전에 따라 임시 전력설비의 용량도 증가하는 반면, 전력설비의 안전을 유지, 관리하는데 있어 소홀히 하는 면이 있으며, 이러한 관리소홀과 옥외환경에 노출된 시설이라는 이중의 특성으로 인해 고장의 가능성으로 인한 위험성이 항상 존재하는 설비임에 분명하다. 초기에 최상의 설비였던 시설이라도 시간의 흐름에 따라 예측할 수 없는 환경의 변화에 직면하면서 결함이 생기므로 전력설비를 장기간 고신뢰성으로 유지하기 위해서는 전력설비에 사용 중인 부품에 대한 고장률 및 사고사례를 보유해야 하지만, 국내의 경우에는 이러한 자료의 축적이 거의 이루어지고 있지 않은 실정이므로 임시전력설비뿐만 아니라 다른 전력설비의 정상상태와 이상상태를 비교·분석하여 설비기기의 이상 유무를 진단하는 예방보전(Preventive Maintenance)과 기기의 노후정도 및 잔여수명 등을 진단하는 예지보전(Predictive Maintenance)의 종합적인 대책을 수립하는 데 어려움이 있다. 이러한 현실

을 감안할 때 임시전력설비의 중요성이 지나치게 간과되고 있음을 부인할 수 없으며 이러한 분야에 대한 많은 연구가 이루어져야 하며 지속적인 노력이 기울어져야 한다.

본 연구에서는 임시전력설비의 부품 및 사고에 대해 FMEA, FTA 등의 정성적, 정량적 신뢰성 평가기법들을 적용하여 설비의 신뢰성, 사고모드 및 영향, 주요원인, 합리적 대책을 수립하고 THERP를 이용하여 휴먼에러의 특성을 분석하고, 작업자와 설비를 하나의 시스템으로 통합 처리하여 임시전력설비와 작업자의 신뢰성과 안전성을 평가한다. 아울러 설비 운용상 유발 가능한 휴먼에러의 문제점을 비교, 검토 및 분석하고 필요한 대책을 제시할 수 있는 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델을 개발하고자 한다.

나. 국내 연구 동향 및 배경

현재 국내 임시전력설비에 관련된 고장률 데이터는 거의 알려져 있는 것이 없으며, 임시전력설비에 대한 신뢰성 및 안전성 평가에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다. 그래서 임시전력설비의 신뢰성 데이터를 이용한 시스템(임시전력설비)의 관리, 운영 등이 어떻게 진행되고 있는지를 알 수가 없는 실정이며 자료가 있더라도 조사대상 기기수의 불충분과 데이터의 신뢰성이 낮아 고장률을 이용한 임시전력설비에 대한 신뢰성 분석 사례가 전무한 상태이다. 임시전력설비를 공사기간 동안 사용하면서 높은 신뢰성을 유지하기 위해서 사용 중인 여러 가지 예방보전기술이 필요하다. 이러한 보전기술은 설비의 유지관리에 있어 비용절감과 최소인력으로 설비관리의 업무수행을 가능하게 하기 때문에 선진국의 경우, 이에 관련된 연구개발이 다방면으로 수행되고 있다는 점을 감안할 때, 국내의 연구개발에 대한 투자가 체계적이고 지속적으로 지원되어야 할 것이다.

임시전력설비의 고신뢰성화를 이루기 위해서는 합리적이고 표준적인 임시 전력설비의 모델이 필요하나, 지금까지의 미비한 연구 자료나 축적 데이터로서는 기준의 선정이 불가능하며 설비 유지·보수의 중복 투자, 비효율화, 비경제성 등이 초래될 수밖에 없다. 이런 문제점을 해소하기 위해서는 설비의 고장률에 대한 신뢰할 만한 데이터에 기초한 확률론적 신뢰성 해석 연구와 개발이 시급히 요구된다.

2. 연구개요

가. 연구기간 및 수행일정

(1) 연구기간 : 2002년 12월 4일 ~ 2003년 10월 3일

(2) 연구수행 일정

구 분	월 별 추 진 일 정						
연 구 내 용	12, 1	2, 3	4, 5	6, 7	8, 9	10, 11	
임시전력설비에 대한 자료 수집 및 정리	→						
사고사례 조사	→	→					
건설현장의 임시전력 설비 조사	→	→					
사고사례 분석		→	→				
신뢰도 평가 (정성적, 정량적 분석)			→	→	→		
인간신뢰성 분석			→	→	→		
신뢰성 평가 모델 개발				→	→	→	
검토 및 결론 도출				→	→	→	
결과보고서					→	→	

나. 신뢰성 및 안전성의 개념

신뢰성이라는 것은 개념적으로는 시스템이나 장치가 사용 조건에 따라 소정의 시간에 걸쳐 만족하게 작동하는 시간적 안정성을 의미한다. 즉, 시스템의 운용, 보수, 서비스를 포함하여 이것을 확률로 정의하고 이것을 정량적으로 표현하는 것이다. 신뢰도란 어떤 부품 또는 시스템이 일정한 환경하에서 일정시간 고장없이 그 능력을 발휘하는 확률이라고 정의할 수 있다. 이 정의에서 중요한 것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- ① 신뢰성 대상의 명확화
- ② 규정의 사용 환경 및 조건
- ③ 규정의 시간
- ④ 기능 또는 고장의 정의

고장을 모두 없게 하는 것은 기업의 목표이지만 신뢰성을 확률로서 표현하는 이상 이것을 제로(zero)로 하는 것은 대단히 어렵지만, 어떤 제품을 어떤 기간 동안 고장을 일으키지 않도록 하는 것은 가능하다. 신뢰성의 정의에서 볼 수 있듯이 임시전력설비의 신뢰성 분석은 종합안전성 평가의 한 부분으로 수행하면서 대상설비 고유의 특성이 유지된 상태에서 행해져야 한다.

안전성을 방법론적으로 살펴보면 임시전력설비의 안전성을 확인하기 위한 방법으로는 전통적으로 결정론적인 안전성분석(Deterministic Safety Analysis ; DSA) 방법을 사용할 수도 있는데, 이 방법은 발생 가능한 중요 사고를 선정하고 이러한 사고가 발생하더라도 임시전력설비 및 작업장이 안전하다는 것을 확인하는 방법이다. 이때 설치된 보호장치가 정상적으로 기능을 발휘한다는 가정을 하게 되는데, 이러한 가정은 다중방호개념에 입각한 안전장치 확보로 만족된다는 판단 하에 그 타당성을 인정하여 왔다. 그러나, 이러한 가정을 넘는 심각한 사고가 발생하면 어떻게 될 것이며, 그러한 사고가 일어

날 가능성은 얼마나 되는지에 대한 의문을 제기할 수 있다. 이러한 의문에 해답을 구하기 위하여 시도되고 있는 방법이 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment ; PSA)이다. PSA 기법은 1975년 완료된 WASH-1400에서 처음 사용되었으며, 이러한 방법은 원자력 설비의 안전성 평가에 널리 이용되어 그 타당성이 입증되어 왔다.

PSA 업무란 대상 임시전력설비에서 발생할 수 있는 모든 주요 사고 시나리오들을 파악하고, 확률 이론에 근거하여 그 발생 빈도를 추정하며, 각 사고 시나리오에 대하여 예상되는 인적, 물적 피해를 정량적으로 평가하는 것이다. PSA 수행 결과 어떤 사고 시나리오가 상대적으로 중요하며 어떤 부품이나 기기가 공장 전체의 안전성측면에서 중요한지를 파악할 수 있으며, 이러한 중요도에 근거하여 사고 대책은 물론 설계, 설치 및 운용 측면에서의 개선안을 도출할 수 있다. PSA의 주요 업무는 설비신뢰성분석(Reliability Analysis)으로 사고 요인별로 설비고장에 이를 수 있는 사고 시나리오들을 파악하고 주요 사고 발생빈도를 추정한다. 일반적으로 FMEA(Failure Mode Effect Analysis ; 고장모드 및 영향분석), ETA (Event Tree Analysis ; 사상수목분석) 및 FTA(Fault Tree Analysis ; 고장수목분석) 기법을 이용하여, 임시전력설비에서 발생할 수 있는 주요 사고 시나리오들과 그 발생빈도를 추정하며 이를 통해 설비의 신뢰성과 안전성을 평가하여야 한다.

다. 연구방법 및 범위

임시전력설비는 전력 회사의 배전 선로에서 분기하여 인입된 특별 고압을 변압기에 의해 220[V], 380[V]의 전압으로 낮추어 건설현장에서 필요한 이동용 기계기구, 전기 용접기 등의 전원으로 사용하는 설비인데 본 연구에서는 임시전력설비에서 빈번한 사고를 유발시킬 수 있는 원인 및 형태를 과거의

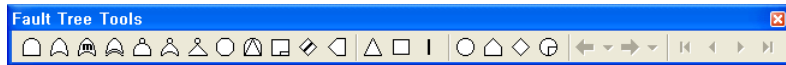
사고 사례, 문헌, 그리고 건설현장 방문을 통해 규명하고 이에 대한 적절한 대책을 수립하기 위하여 임시전력설비의 각 부품에 대한 일련의 정성적·정량적 평가를 실시하고자 한다. 우선 정성적 분석방법인 FMEA 평가를 실시한 후 위험우선순위지수를 도입하여 FMEA의 단점을 보완하고 시스템의 점검 및 보수에 대한 중요성 및 우선순위를 정한다. 그리고 임시전력설비의 고장에 대한 정상사상을 설정하고 그 원인을 파악하면서 FT도를 작성하고 변압기, 차단기, 전력용 퓨즈 등의 부품에 대한 고장률 데이터를 기초로 정량적, 정성적 분석기법인 FTA를 수행한다. 시스템에 대한 중요도 분석도 실시하여 시스템을 구성하는 부품이 전체 시스템에 어떠한 영향을 미치는지를 분석한다. 또한 임시전력설비의 안전성과 신뢰성은 단지 고신뢰성 부품만으로 이루어지는 것이 아니므로 작업이나 점검중 휴먼에러에 의한 사고발생 가능성을 확인하기 위해 인간신뢰성 분석기법 중 가장 많이 사용되는 THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) 기법을 기초로 하여 DeBDA(Detailed Block Diagram Analysis)와 ETA를 실시한다. 이러한 여러 분석기법을 통하여 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 향상시키고, 평가 결과를 바탕으로 보다 신뢰성이 높고 사고의 가능성을 낮출 수 있는 임시전력설비 신뢰성 및 안전성 평가 모델을 개발한다.

라. 분석도구

Relax에 의한 Fault Tree Analysis의 기본적인 접근 방법은 고장목(Fault Tree)을 만들고, 이에 의거하여 시스템의 고장확률 또는 불가용도(Unavailability)를 구함으로써 가장 문제가 되는 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰성을 개선하는 고장해석 및 신뢰성평가 방법이다. Relax FT 구성은 프로그램에서 다양하게 제공되어 있는 사건(Event)과 논리기호(Gate)를 이용하여 만들 수 있으며, 여러 개의 사건을 하나의 프로젝트에서 관리할 수 있어서 보다 편리

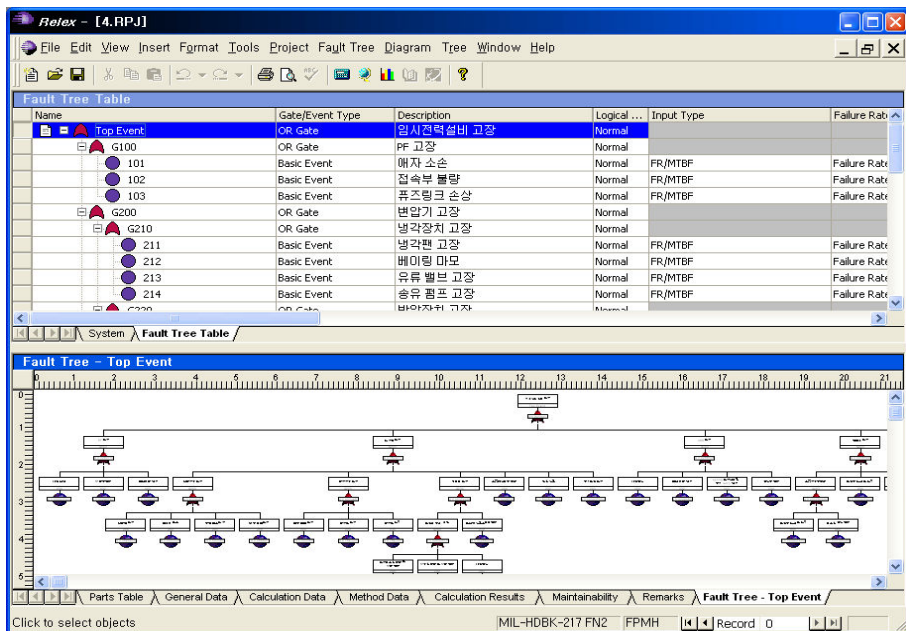
한 분석을 도와준다.

Relax에서 임시전력설비의 정전이라는 정상사상에 대해 Fault Tree Analysis를 하는 과정은 우선 FTA 프로젝트를 만든다. 그리고 [그림 1]을 참조하여 메뉴 바의 Event와 Gate를 이용하여 고장목을 설계한다.



[그림 1] 사상과 게이트에 대한 단축아이콘

임시전력설비에 대한 FTA를 구성한 것을 [그림 2]에서 보여주고 있다. FT도를 구성하였으면 NPRD에서 확보한 고장률 자료를 이용하여 기본사상의 고장률을 입력하고, 설비의 운전시간을 입력한다. 정량적인 해석을 하기 위해 고장목의 설계에 따른 정상사상과 중간사상에 대해 불신뢰도, 최소절단집합, 중요도 지수 등을 계산한다.



[그림 2] 임시전력설비에 대한 FT도

II. 임시전력설비 및 사고현황

1. 임시전력설비 개요

가. 설비의 개요

임시전력설비는 공사장이나 작업장 구내에서 한국전력공사로부터 전력을 수전하며, 변전하는 설비를 시설하여 구내에만 배전하고 구외로 전송하지 않는 설비를 말한다. 보통 변압기를 중심으로 전력의 배분, 공급하는 시스템으로 구성되는데 전기접속 관계와 전체적인 설비 내용에 대해 계통을 세워 간결하게 표시하는 단선 결선도(skeleton diagram)로 나타낼 수 있다. 이것은 임시전력설비를 계획하고 설계함에 있어서는 필수적이며, 시스템 구성 내용에 따라 신뢰성, 안전성, 경제성 또는 운용상의 난이도에 직접적인 영향을 주기 때문에 매우 중요하다.

임시전력설비는 계통이 간단하며 경제적인 1회선 수전방식을 사용하고 있으며, 설치장소는 최소한의 공간을 차지하도록 요구되고 있기 때문에 보통 주상 변압기를 설치하여 사용하고 있으며, 분전반도 옥외에 노출되어 있는 등 임시전력설비는 대부분이 옥외에 설치되어 운용되고 있다. 사전에 사고를 예방하기 위해서는 현장의 임시전력설비의 각 부분을 철저히 점검하는 것을 생활화하는 것이 매우 중요하며 또한 임시전력설비의 설치기준에 입각하여 시설하는 것이 바람직하다.

일반적으로 임시전력설비의 설치기준을 보면 다음과 같다.

- 임시 수전설비는 구획된 장소에 설치한다.
- 관계자 이외의 근로자가 출입할 수 없도록 위험표지를 부착하고

시건장치를 한다.

- 철재 울타리와 철문을 충분한 높이로 설치한다.
- 철문, 철재 울타리 등 금속 부분에는 반드시 접지한다.
- H변대의 변압기 받침대 주위에 안전 난간대와 방호울을 설치해 추락을 방지한다.
- O.S 조작용 로프는 바람에 흔들리지 않도록 견고하게 묶는다.
(충전부와 충분한 이격거리가 있도록 한다.)
- 가공선로용 전주의 밑에서 위로 2m까지의 지지선은 보호커버를 씌우고 야광 페인트(노랑색과 검정색)를 칠해둔다.
- 옥외에는 비, 바람, 눈 등으로부터 보호되는 옥외형을 설치한다.
- 주 차단기는 저압 ACB로 하고, 지락사고 보호요소(GT)가 있는 정지형 트립장치가 내장된 것을 사용한다.
- 충분한 차단용량을 갖춘 배선용차단기를 설치한다.

나. 임시전력설비의 주요 장치

임시전력설비는 대부분 외부환경에 노출되어 있어 낙뢰의 침입이나, 전기실 내·외부에서의 단락·지락·과부하, 감전, 그리고 전기화재 사고 등이 발생하였을 때나 변압기의 수리 점검이 요구될 때 등등의 다양한 환경을 고려하여 항상 안전하고 신뢰성 있게 전원 공급 및 전원차단이 가능하여야 한다. 따라서 임시전력설비의 구성에 필요한 각각의 기기들에 대한 기능과 필요성에 대해 충분한 사전지식을 습득할 필요가 있다. 임시전력설비 부품의 대부분은 상용 수변전설비에 기초하여 사용하기 때문에 임시전력설비에 사용되는 주요 장치에는 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(Static Condenser), 기기 측에서 단락 사고가 발생하였을 때 기기를 보호하는 전력 퓨즈(Power Fuse ; PF), 그리고 계기용 변압 변류기(Metering Out-Fit ; MOF)와 적산 전력량계(Wh), 계기류 등이 있다.

다. 건설현장의 임시전력설비

(1) H 건설현장

[그림 3]은 일반적인 건설현장의 임시전력설비에 비해 비교적 양호하게 시설되어 있다고 판단되는 H 건설현장에서 사용중인 임시전력설비의 단면도를 나타내고 있다. [그림 4]는 이 시스템이 큐비클(Cubicle) 형태로서 임시전력설비 기기들이 폐쇄되어 있는 구조이며 외부인이나 근접작업자의 충전부접촉을 막을 수 있게 철조망으로 둘러싸여 있으며, 잠금장치와 표지판 등 비교적 보호장치가 잘되어 있는 상황을 나타낸다.

[그림 4] 내의 소형 원내는 임시전력설비의 주요 기기 및 배선 등을 나타내며, 타 공사현장과 비교하여 볼 때 정리가 잘 되어 있으며 설비의 상태가 양호하며, 차단기를 각 현장의 곳곳에 설치하여 재해를 예방하기 위한 노력을 기울이고 있는 것을 볼 수 있다. [그림 5]는 건설현장 내·외부에서 전력을 사용하는 설비, 배선, 접지설비 등을 보여주고 있다. 건설현장 내부로 가는 케이블의 정리가 다소 미흡한 상태이지만, 현장의 임시분전반의 상태가 잘 관리되고 있으며, 전기작업 중 많은 감전 사고를 발생시키는 용접기의 경우 접지가 아주 잘 되어있는 것을 알 수 있다.



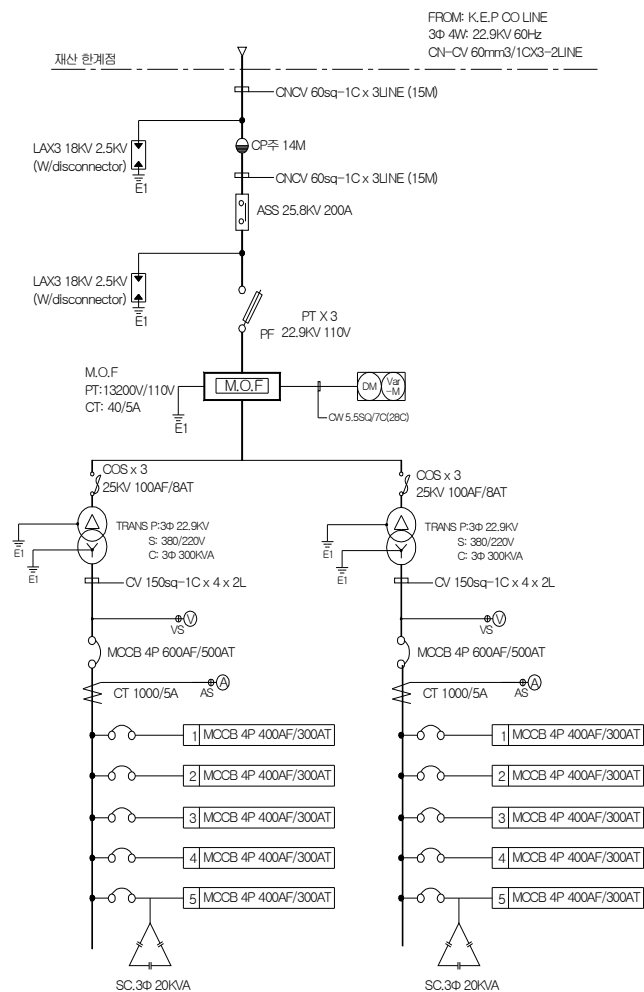
[그림 4] H 건설현장의 임시전력설비 및 기기



[그림 5] H 건설현장의 내·외부 설비 등

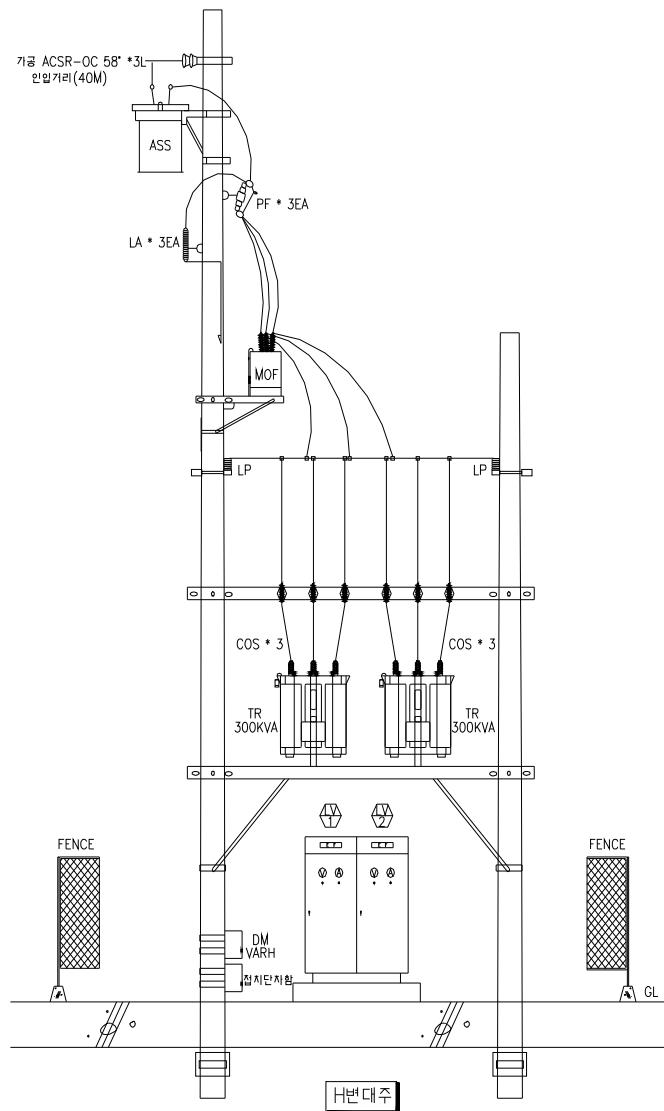
(2) B 건설현장

[그림 6]은 B 건설현장에서 사용중인 임시전력설비의 단면도를 나타내고 있는데 변압기 두 대를 사용하고 있다. 이것은 설비 구성이 복잡해지고 경제적인 면에서도 시설비가 과대해지지만, 변압기 고장이 발생할 경우 다른 변압기에 의한 건설현장의 전기공급을 할 수 있는 장점을 갖고 있다.



[그림 6] B 건설현장의 임시전력설비 단면도

[그림 7]은 현장 설비의 외부 형상을 보여주고 있으며, 옥외형으로 되어 있다.



[그림 7] B 건설현장의 외부 형상

(3) 건설현장의 사용기기

임시전력설비의 현장별 사용기기의 비교를 <표 1>에서 보여주고 있는데 ASS, LA, PF, MOF, TR, PT, CT, MCCB, Capacitor는 기본적이고, 필수적인 기기들로 사용하고 있으며, 설비의 용량에 따라 각 기기들이 조금씩 다르게 사용되고 있다. 따라서 필수적인 기기들에 대한 보전 활동을 신중히 행함으로써 임시전력설비의 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

<표 1> 건설현장의 임시전력설비 기기들

건설현장 기기	H사 (200×1kVA)	B사 (300×2kVA)	C사 (400×2kVA)
ASS	○	○	
LA	○	○	○
PF	○	○	○
MOF	○	○	○
TR	○	○	○
PT	○	○	○
CT	○	○	○
MCCB 2P	○	○	
MCCB 3P	○	○	○
MCCB 4P	○	○	○
Capacitor	○	○	
COS	○	○	
CW 5.5SQ/7C		○	
CV	○	○	
ACB 4P			○
ATS 4P			○
AISS			○

2. 설비사고 현황

가. 설비사고 발생 형태 및 원인

전기사고의 종류는 감전, 전기화재, 설비 기기의 소손, 정전, 전압변동 등으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 전기에너지에 의한 사고 중에서 가장 중요하게 다루어져야 하는 것은 감전사고와 전기화재사고임은 말할 필요도 없다. 기술 발전과 함께 모든 일이 전기에너지원에 의존하고 있는 현재, 단순한 정전사고도 큰 재해로 이어지는 경우가 있어 간과할 수는 없다. 이러한 전기사고를 유발하는 표면적 원인을 살펴보면, 누전, 지락, 과전류, 접촉불량, 소손, 용단 등에 의한 것으로 판명된다. 이들 표면적 원인을 유발하는 근원적 원인을 살펴보면, 자연열화, 과부화, 설비 기기의 제작·시공 불완전, 보수 불완전, 빗물이나 눈의 침입, 우뢰, 조수의 침입, 작업자의 과실 등이며, 전기로부터 안전성을 확보하기 위해서는 반드시 고려하고 대책을 세워야 할 중요한 원인들이다.

따라서 임시전력설비의 경우 정기적으로 보수관리를 함으로써 사고의 원인, 요인을 조기에 발견하여 신속하게 대처할 필요가 있다. 그러나 불가항력적인 것이나 작업자의 과실 등 설비의 보수관리만으로는 위험을 미연에 방지하는데 어려운 점이 있으므로 전기회로에는 요소마다 과전류차단장치(braker), 지락차단장치 등의 보호장치가 설치되어 있어서 만일의 경우에는 사고 범위를 축소시키는 구조의 시스템으로 되어있다. 그럼에도 불구하고 임시전력설비의 특성상 상용 수변전설비나 기타 전기설비보다 더 사고에 취약한 것이 현실이다. 임시전력설비에서의 전기에너지로 인한 사고를 예방하고 재해를 축소시키기 위해서는 임시전력설비의 사고사례 조사 및 통계분석을 통하여 사고와 원인간의 상관성을 규명하고 이에 따른 대책을 수립하는 것

이 바람직하다. 임시전력설비의 신뢰성 해석을 위한 기초 데이터의 확보를 위해서도 수년간의 임시전력설비의 사고사례가 필요하나, 국내의 경우 아쉽게도 거의 통계적 자료가 축적되어 있지 않은 실정이므로 각 공사현장을 일일이 방문하여 작업자에게서 구두로 전해들은 사고사례를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행한다.

나. 설비사고 발생 통계

임시전력설비에서 발생하는 사고는 일반 수변전설비나 기타 전기설비에서 발생하는 사고와 매우 유사하기 때문에 부족한 정보는 일반 전기설비사고 통계에서 확보하고자 한다. 이에 국내외 전기설비 사고 통계에 관하여 기술하여 보면 다음과 같다.

JISHA(Japan Industrial Safety and Health Association)에서는 1998년 고압전기설비에 대해 1,636건, 저압전기설비는 18,818건으로 사고가 일어났는데 그 개요를 고압과 저압측면으로 구분하여 살펴보면 다음과 같다.

고압전기설비의 원인으로서는 과부하에 의한 변압기의 소손이나 보호장치의 동작 등이 211건(12.9%), 자연열화에 의한 케이블이나 변압기 등의 지락, 합선 등이 145건(8.9%), 천둥에 의한 실외부하개폐기의 절연파괴 등이 96건(5.9%), 작은 짐승이 큐비클내에 침입해서 실내부하개폐기 등과의 접촉에 의한 지락, 합선 등이 90건(5.5%), 비나 눈 등이 큐비클에 스며들어 지락, 합선 등에 의한 사고 88건(5.4%), 도로의 굴삭공사 등에 의해 작업자가 고압 케이블 등을 실수로 손상시킨 사고 56건(3.4%)이 대부분이었다. 또 지락보호장치가 원인불명으로 작동해서 전부 정전 됐던 것이 342건 발생했고, 이것은 전체의 20.9%에 해당하는 수치이다. 대부분의 경우 원인 불명인 것이 현실이다.

저압전기설비와 관련된 사고를 원인별로 보면, 자연열화 4,542건(24.1%), 작업자의 과실 1,244건(6.6%), 보수불완전 1,241건(6.6%), 과부하 1,090건(5.8%), 시공불완전 1,037건(5.5%), 비나 눈의 침입에 의한 것 960건(5.1%)이 대부분이다.

또한 누전차단기가 작동해서 정전됐지만 조사할 때는 이상원인이 소멸해 버려서, 원인을 알 수 없는 것이 1,667건(8.8%)이다. 저압 설비 기기와 관련된 사고의 현황에 대해 살펴보면, 절연저하에 의한 것이 압도적으로 많고, 다음으로 과전류, 손상에 의한 누전, 접촉불량, 소손, 용단 등의 순으로 발생했다.

2001년 이전 국내의 전기설비 관련 통계를 <표 2>~<표 4>에서 나타내고 있다. <표 2>에서 살펴보면 보호장치 고장발생현황 중 MCCB가 가장 많이 발생하고 있으며 <표 3>에서는 자연열화, 과부하에 의한 사고원인이 40% 이상을 차지하고 있어 세심한 주의를 필요로 하고 있다. 사고 형태는 주로 단순 보호장치동작, 지락, 기기소손 등이 이라는 것을 <표 4>를 보면 알 수 있다. 이러한 사고의 추이는 임시전력설비에서도 예외가 아니다. 따라서 이러한 사고유형을 예방하기 위한 일련의 노력이 경주되어야 한다. 임시전력 설비의 신뢰성 해석을 통하여 동종 및 유사유형의 사고를 유발하는 원인을 분석하고 적절한 대책을 수립함으로써 사고를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

<표 2> 국내의 보호장치 동작별 사고발생현황

구 분	건수	백분율%
MCCB	2624	34.45
부동작	1795	23.57
저압차단기	1254	16.47
COS	509	6.68
계통정전	343	4.50
PF	282	3.70
수배전용개폐기	252	3.31
책임분계점	249	3.27
휴즈	220	2.89
특고차단기	88	1.16
합 계	7616	100

<표 3> 국내의 사고원인별 사고발생현황

구 분	건수	백분율%	구 분	건수	백분율%
자연열화	2386	29.44	진동	67	0.83
수분, 습기	1149	14.18	화재	61	0.75
과부하	1044	12.88	무자격자조작	59	0.73
보수불량	694	8.56	분진	59	0.73
시공불완전	367	4.53	뇌	58	0.72
제작결함	313	3.86	빙설	50	0.62
작업자과실	289	3.57	염해	31	0.38
기타접촉	237	2.92	공공의 과실	20	0.25
부식	227	2.80	고주파영향	18	0.22
불명	207	2.55	수목접촉	14	0.17
풍우	140	1.73	연료불량	6	0.07
조수접촉	135	1.67	지반붕괴	6	0.07
타사고 파급	119	1.47	기타	243	3.00
수해	106	1.31	합 계	8105	100

<표 4> 국내의 사고형태별 발생현황

구 분	건수	백분율 %
단순보호장치동작	1612	19.89
지락	1518	18.73
기기소손	1246	15.37
부동작	1064	13.13
결상	882	10.88
단락	545	6.72
탄화	505	6.23
용단	403	4.97
파손	305	3.76
붕괴	26	0.32
합 계	8106	100

III. 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가·분석

1. 평가·분석 개요

시스템의 위험성을 평가하기 위해서는 위험요소 및 위험상황을 초래할 수 있는 원인을 도출하는 정성적 평가가 선행되어 이루어지고, 정량적 평가를 통하여 확률론적 평가가 이루어지는 것이 일반적이다. 이러한 위험성 평가에 있어 정성적 분석기법으로는 예비위험성 분석(Preliminary Hazard Analysis ; PHA), 결함위험성 분석(Fault Hazard Analysis ; OHA), 운용위험성 분석(Operating Hazard Analysis ; OHA), 고장모드 및 영향분석(Failure Modes and Effects Analysis ; FMEA), What-If, HAZOP(Hazard and Operability Study) 등이 있다. 그리고 정량적 분석기법에는 신뢰성 블럭다이어그램 분석(Reliability Block Diagram Analysis ; RBDA), 치명도 분석(Criticality Analysis ; CA), 사상수목분석(Event Tree Analysis ; ETA), 고장수목분석(Fault Tree Analysis ; FTA) 등 많은 기법들이 개발되어 왔다.

이러한 다양한 방법 중에서 본 연구에서는 임시전력설비의 변압기를 기점으로 한 임의의 시스템과 부품에 대해 “what if” 라는 질문을 염두에 두고 각 부품이 고장났을 경우 그것이 시스템에 어떠한 영향을 미치는 가를 고장양식 및 영향 분석(Failure Modes and Effects Analysis ; FMEA)을 통해 정성적으로 분석을 한다. 즉, 각 부품별 고장모드를 검출하고, 이의 결과를 이용하여 임시전력설비에 있어 가장 중요한 고장영향을 설정한 후 Fault Tree Analysis (FTA)를 실시함으로써 임시전력설비에 대한 정량적인 전체 신뢰성을 평가하고자 한다. FTA 기법을 이용하여 정상사상이 발생하는 최소 기본사상의 집합인 최소절단집합(Minimal Cut Set), 확률중요도, 그리고

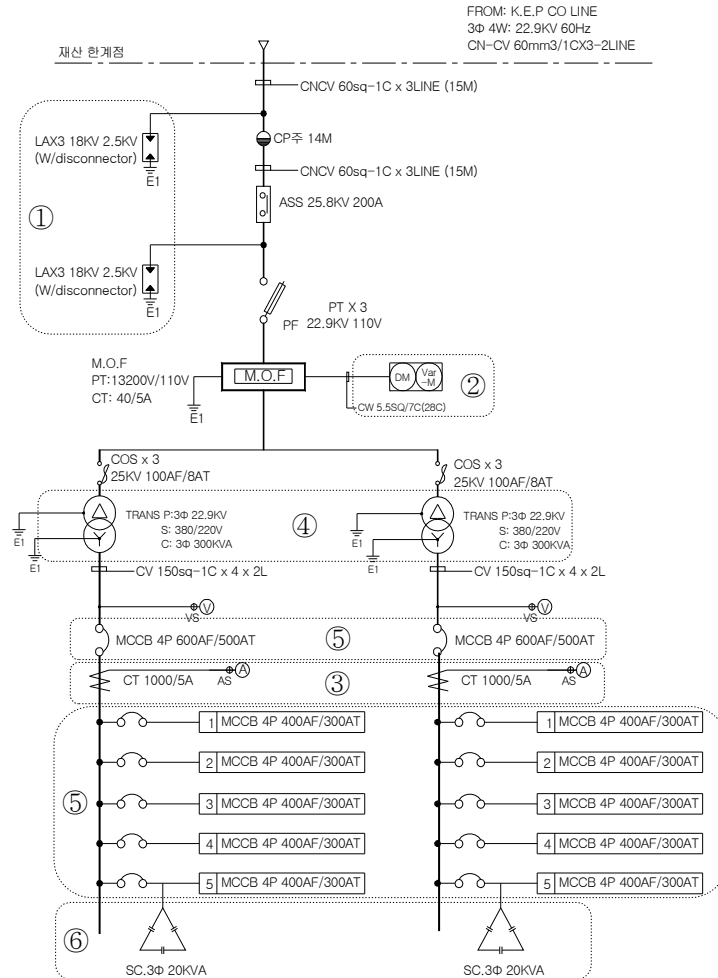
치명중요도를 구하고자 한다. 아울러 설비측면에서의 신뢰성과 안전성을 높이는 일련의 노력과 더불어 작업자의 인간신뢰성 해석이 수반이 되어야 임시전력설비에서 발생하는 사고를 근본적으로 감소시킬 수 있으므로 FMEA, FTA를 통한 해석결과에 인간신뢰성 해석을 동시에 수행하고자 한다. FMEA, FTA 기법 및 인간신뢰성분석(Human Reliability Analysis)기법을 통하여 얻어진 결과는 임시전력설비 시스템의 가장 중요한 부품이 어느 것인지를 알 수 있으며, 작업중 발생할 수 있는 휴먼에러가 어떤 것인지를 알 수 있어 이를 통해 안전성을 향상시킬 수 있는 방안이나 대책을 제시 할 수 있다.

본 연구의 분석대상 시스템으로 국내 B사 건설현장에서 사용중인 300KVA 변압기 용량을 갖는 임시전력설비 시스템을 선정하였다. 변전 설비는 폐쇄형의 큐비클 형태이고 비교적 양호한 외관을 갖추고 있다. 또한 간단하고 경제적인 1회선 수전 방식을 사용하고 있지만, 이는 전력 회사의 배전선로 및 다른 수용가의 사고 파급으로 인한 정전 발생시 복구하는데 걸리는 시간이 오래 걸려 전력 공급 신뢰성면에서는 바람직하지 않는 단점을 지니고 있다. [그림 8]은 대상 시스템의 단선 결선도를 나타내며 분석 대상의 시스템 주요 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/500AT, 4P 400AF/300AT 다수

본 연구에서는 임시전력설비 시스템 구성품의 기능 및 성능에 대한 영향

을 평가하고, 운전 중 발생할 수 있는 감전상황과 시스템의 정전상황을 분석 대상으로 설정하였다.



[그림 8] 임시전력설비의 단선 결선도

2. 임시전력설비의 고장모드 및 영향분석(FMEA)

가. FMEA 분석

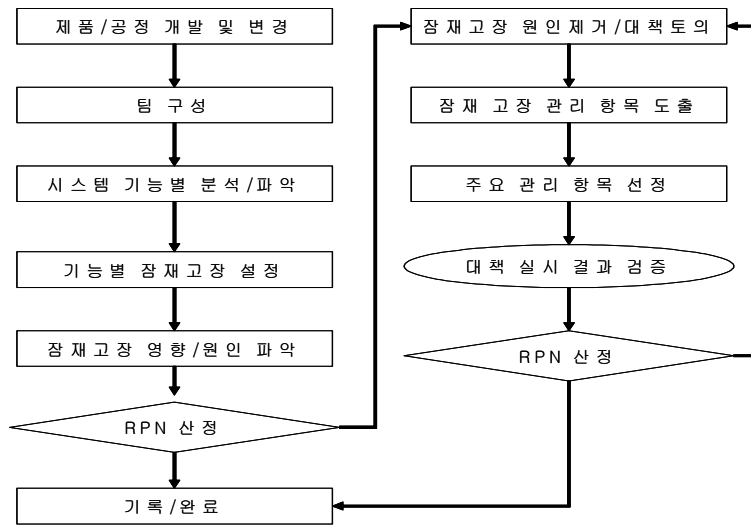
정성적 평가방법 중에서도 FMEA는 부품 고장간의 인과관계를 체계적으로 규명하고, 시스템에 치명적일 수 있는 고장모드, 특히 전파될 수 있는 단일결함의 최초 징후를 제공한다는 큰 장점이 있으며 이전에 알려져 있지 않은 가능한 결과들을 탐색할 수 있다. 또한 정상적인 기능으로부터의 이탈뿐만 아니라, 파생되는 결과들을 규명할 수 있다는 점에서 여러 시스템의 안전성 분석기법으로 널리 사용되고 있다. <표 5>는 FMEA의 분석 절차를 나타내는 일반적인 과정이다.

<표 5> FMEA 절차(IEC 812)

1. 시스템과 그 기능적 최소 운용요구조건 정의
2. 기능적, 신뢰성 블록 다이어그램, 기타 다이어그램적 또는 수학적 모형과 묘사의 개발
3. 분석수행상의 기본원칙과 그에 상응하는 문서양식의 설정
4. 고장모드, 그들의 원인과 영향, 상대적인 중요성, 그리고 그 연쇄들의 규명
5. 고장검출과 격리규명 및 방법의 규명
6. 특히 바람직하지 않은 사건에 대한 설계 및 운용규정의 규명
7. 사건치명도(event criticality)의 결정
8. 고장확률의 평가
9. 필요한 경우, 고려되어야 하는 특정조합의 다중 고장에 대한 탐색
10. 권장사항

하나의 재료, 부품, 장비 등이 고장났을 경우 그것이 전체 제품이나, 사용자, 혹은 제품기능에 어떠한 영향을 미치는가를 점차 넓혀가면서 상위수준으로 분석하여 가는 것이다. 즉, 하나의 부품이 고장났을 경우 그 고장을 모드(mode)별로 분류하고, 전체 제품이나 작업자, 혹은 임무완수에 어떠한 영향을 미치는가를 도표화하여 분석하는 기법이다. 그러므로 이 기법은 전형적인 귀납적 분석방법이며 상향성(bottom-up)이고, 정성적인 위험성 분석기법의 대표라고 할 수 있다.

우선 FMEA 분석을 하기 위해서는 분석의 수준을 결정해야 한다. 시스템(system)은 정해진 많은 기능을 달성하기 위하여 몇 개의 서브시스템(sub-system)의 조합으로 되어 있고, 또 이 sub-system은 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 임시전력설비에서는 시스템과 서브시스템의 수준까지 분해하여 FMEA를 실시할 것이다. 이렇게 분석 수준을 정한 다음은 부품이나 기기 등의 고장모드(failure mode)를 선정하여야 한다. 이것은 품목의 이름과 기능을 열거하고, 잠재 고장 모드의 리스트를 만드는 것이다. 잠재고장(potential failure)은 반드시 일어나는 고장이 아니라 일어날 가능성이 있는 모든 고장을 과거 사고사례, 고장기록, 경험 그리고 brain storming 등을 이용해서 찾아낸다. 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 규명하였다. [그림 9]는 FMEA 실행순서를 나타내고 있다.



[그림 9] FMEA 실행순서

나. FMEA Worksheet 작성 및 평가방법

FMEA는 정성적 분석 중에서 기능적인 면을 중심으로 시스템 구성품의 기능 및 성능에 대한 영향을 평가할 수 있으며, 고장모드는 기기나 부품의 고유특성의 변화나 기기에 가해지는 스트레스 등의 원인에 의해 발생한다. 그리고 고장 발생 원인은 각각의 메커니즘이 있으며 이 메커니즘을 검토함으로써 고장의 발생을 방지할 수 있다. 일반적으로 많이 이용하고 있는 고장 모드로서 국제전기표준규격인 “IEC 60812 ; FMEA”에 제시된 것을 이용하였다.

본 연구에서는 분석과정에서 정량적인 평가가 곤란한 FMEA의 한계성을 보완하고 시스템의 점검 및 보수에 대한 중요성과 우선순위를 부여하기 위하여 중요도 평가와 위험우선순위(Risk Priority Number ; RPN)를 이용하였다. 이를 위해서 각각의 고장모드에 대한 발생빈도(occurrence)와 영향도(severity)에 의한 중요도(criticality)를 평가하고, 이것에 검출도(detectability)

를 포함시켜 세 가지 값에 의하여 결정되는 위험우선순위를 계산하였다. 이는 많은 고장모드에 대해 상대적으로 위험한 부품을 선택적으로 우선순위를 결정하는데 많은 기여를 할 수 있다.

RPN값을 계산하기 위해서 고장모드의 발생빈도, 시스템의 영향도, 및 고장 발생시의 검출도 등 모두 세 범주로 분류하여 평가하였으며, 각 범주를 다섯 단계로 나누고 각각의 단계에 수준을 1~5 까지로 부여하였다. <표 6>, <표 7>, <표 8>은 발생빈도, 영향도 그리고 검출도에 대한 등급을 보여주고 있다.

<표 6> Classification and grades of occurrence

Class	Occurrence	Level	Criteria
I	almost never	1	Failure unlikely.
II	remote	2	Rare number of failures likely.
III	medium	3	moderate number of failures likely.
IV	moderately high	4	Frequent high number of failures likely.
V	very high	5	Very high number of failures likely.

<표 7> Classification and grades of severity

Class	Severity	Level	Criteria : severity of effect
I	negligible	1	No effect.
II	minor	2	Failure inducing unplanned maintenance but has no severe effect on system.
III	major	3	Inducing failure such as functional incapability on corresponding subsystem.
IV	serious	4	Failure inducing consequence such as operable incapability of system.
V	hazardous	5	Failure has possibility of very severe consequence.

<표 8> Classification and grades of detectability

Class	Detectability	Level	Criteria
I	very high	1	has very high effectiveness.
II	moderately high	2	has moderately high effectiveness.
III	low	3	has low effectiveness.
IV	remote	4	is unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.
V	very remote	5	is very unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.

(1) 중요도 평가

중요도 평가는 일명 리스크 행렬(Risk Matrix)이라고 불리는 것으로, 고장이 발생하는 경우 그로 인하여 부품이나 시스템 또는 운영자가 받는 영향의 정도를 평가하며, 영향도를 주안점으로 하여 분석하는 것이다. 특히, 발생빈도가 높으며, 높은 영향도 등급을 갖는 고장모드에 주의를 기울이기 위하여 사용되는 수단이다. 중요도는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 의해 평가하는 것으로 다음 식으로 구할 수 있다. 이것은 리스크의 개념과 같다. 즉, 바람직하지 않은 사건의 발생 확률(발생빈도)과 그로 인해 야기될 수 있는 피해결과(강도, severity)로부터 추정된다.

$$\text{중요도(Criticality)} = \text{발생빈도(Occurrence)} \times \text{영향도(Severity)}$$

여기에서 발생확률이 낮고, 피해강도도 낮은 사건에 대해서는 그다지 주의를 기울일 필요가 없다. 왜냐하면 제한된 시간과 제한된 자금으로 완벽한 재해예방을 한다는 것은 사실상 불가능하기 때문이다. 발생확률은 높지만 발생 시 재해강도가 낮은 형태의 사건에는, 흔히 우리 주변에서 볼 수 있는 시스

템의 사소한 고장에 해당된다. 반면 발생확률은 낮더라도 일단 발생하면 피해규모가 큰 사건, 더욱이 발생확률까지 크다면 문제는 심각하지 않을 수 없다. 시스템의 안전성은 바로 이러한 유형의 재해를 구별해 내고 이런 재해에 안전의 노력을 극대화하자는 것이다.

이러한 위험성 평가의 방향을 최초로 제시한 문건이 미국의 군용규격 MIL-STD-882(1969)이다. 이것은 원래 미군의 물자조달을 위한 군용 안전규격이었었는데 그 사고 방법이나 기법이 일반 산업시스템에도 적용시킬 수 있을 뿐만 아니라 제품안전이나 시스템 안전의 전체구조를 체계적으로 제공하고 있기 때문에 리스크 관리의 기본으로 널리 활용되어 왔다.

중요도를 평가하기 위해 사용된 평가표는 小野寺勝重 저서의 “실천 FMEA 수법”을 참고하여, 중요도 행렬표인 <표 9>를 사용하여 중요도에 대한 평가등급을 부여하였다.

<표 9> 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

영향도 범주는 각각 1, 2, 3, 4, 5의 가중치를 부여하였으며, 발생빈도 범주에도 각각 1부터 5까지의 가중치를 부여하여 곱하면, <표 9>와 같은 결과를 얻는다. 이렇게 얻은 표는 바람직하지 않은 사건으로 말미암은 리스크의 상대적 경중을 나타낸다. 이 중 지수가 10 이상은 그 영향 및 발생빈도를 고려

하여 철저한 관리가 필요한 높은 “High(H)” 등급으로, 5~9는 중간정도의 중요도 평가 등급인 “Medium(M)” 등급으로, 그리고 5 미만은 낮은 등급인 “Low(L)” 등급으로 하여 관리지침을 설정하는 데 이용하였다. 또한, 높은 수치를 나타내는 것은 관리 및 능력을 집중함으로서 재해예방 노력의 효율을 증대시킬 수 있다.

(2) 위험우선순위 평가

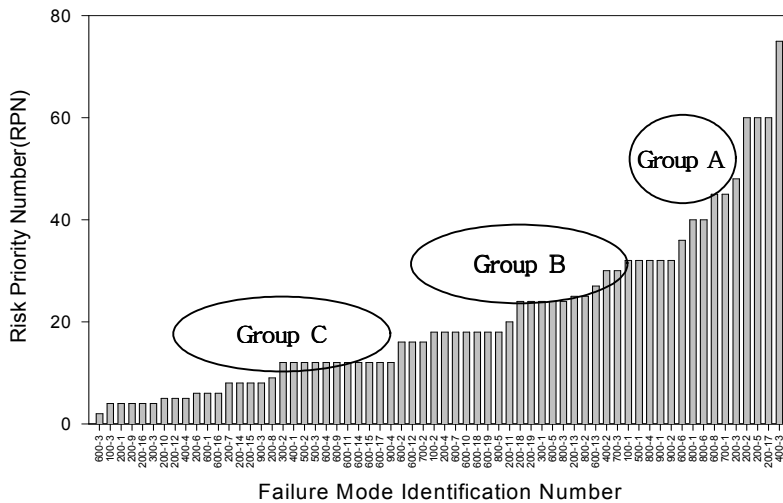
시스템의 고장영향을 평가하는 방법으로 위험우선순위를 이용하여 평가하는 것도 좋은 방법 중의 하나이다. 이 위험우선순위는 중요도를 평가하는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 추가하여 고장의 검출도를 평가하는 것으로 다음 식으로 평가한다.

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

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 감소시킴으로써 그 값을 감소시켜야 하는 고장모드라는 것을 의미한다.

본 연구에서는 각 부품에 대한 RPN값으로 위험의 우선순위를 결정하였다. RPN값이 40 이상으로 평가된 고장모드를 Group A, 16 이상 40 미만인 경우를 Group B, 그리고 16 미만을 Group C 등급으로 분류하였다. 이와 같이 RPN값으로 분류한 것을 [그림 10]에서 보여주고 있다. 이 기법은 파레토 커브(Pareto's curve)의 특성으로서 분류항목의 합계에 대한 비율(상대도수, 누적상대도수)을 구하거나, 분류항목을 몇개 합하여 그 전체에서 점하고 있는 비중을 발견하게 되는 등 개선을 위해 노력을 투입하여야 할 방향을 정

하는 데 도움을 줄 수 있다. 일반적으로 FMEA에 의한 분석은 상위 10%의 대책에 의해 대상 시스템의 신뢰성을 80% 이상 개선 가능한 것으로 많이 알려져 있기 때문에 상위 10%에 대한 고장모드를 검토하는 것으로 하였다.



[그림 10] RPN에 의한 위험성 등급 분류

다. FMEA 분석 결과

임시전력설비에 대한 FMEA 분석 결과는 중요도 및 위험우선순위가 높게 평가된 기기별 고장모드를 종합하여 <표 10>과 같이 나타내었으며 기기별 분석내용은 다음과 같다.

▪ MCCB

주위온도 저하에 따른 MCCB의 “과전류 부동작”이 임시전력시스템의 MCCB를 고장시킬 수 있는 것으로 평가되었으며, MCCB의 “Reset, Trip 및 Off 불능”은 중요도 지수가 Medium이지만 이에 따른 조작이상으로 인

체 사고를 유발시킬 수 있는 가능성이 커서 철저한 관리를 필요로 하며, 또한 임시전력설비의 전체 시스템에 직접적인 영향을 주지는 않지만 과전류에 의한 시스템을 보호해주는 역할을 하기 때문에 점검시 주의해야 한다.

- 콘텐츠

역률개선용 콘텐츠의 경우 열화에 의한 “절연파괴 및 내부단락”의 고장모드가 시스템에 큰 영향을 줄 것으로 해석되었다.

- 변압기

임시전력설비 고장의 60% 이상을 차지하고 있는 변압기의 경우 내부이상, 고조파 등에 의한 “이상온도상승” 고장모드와 가스킷 열화, 패킹불량, 부식, 균열 등에 의한 “절연유 누유” 고장모드, 열에 의한 “절연물 열화” 고장모드 그리고 과전압, 부분방전, 공진 등에 의한 “이상음 발생”의 고장모드가 변압기의 주요 고장모드가 되어 철저한 관리 및 정기점검에 주의를 기울여야 한다.

- 전력퓨즈

과전류에 의한 열화나 부식으로 발생하는 전력퓨즈의 “용단” 고장모드가 시스템에 큰 영향을 미치는 것으로 해석되었다.

- 계기용변압기

제조불량, 열화 등에 의한 계기용변압기의 “소손 및 폭발” 고장모드가 시스템에 영향을 미치는 것으로 해석되었다.

- 자동고장구분개폐기

먼지 및 이물질에 의한 절연열화로 발생하는 ASS의 “애자소손” 고장모드가 시스템에 영향을 주고 있으며 먼지 등에 의한 절연열화가 일어나지 않도록 일상점검을 철저히 하여야 한다.

- 피뢰기

과대서지, 이물질 등에 의한 피뢰기의 “기능정지 및 소손” 고장모드가 시스템에 영향을 주는 것으로 해석되었다.

- 변류기

열화에 의한 변류기의 “오동작 및 OCR 동작” 고장모드가 시스템에 영향

을 주며 열화가 발생하지 않도록 관리가 되어야 한다.

위의 고장모드들은 임시전력설비의 부품을 고장시키거나 정전을 유발시킬 수 있는 주요 고장 모드들이다. 이러한 FMEA를 통해 시스템의 선택적 관리를 할 수 있으며, 그 중요도를 파악하여 정전시 대처 방안, 재투입 순서 및 방법, 그리고 이에 따른 파급효과를 막을 수 있을 것이다.

<표 10> 임시전력설비의 FMEA 결과

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
전력 퓨즈	100-1	고전압회로, 기기 단락보호	용단	과전류 차단 불가, 정전	과전류에 의한 열화나 부식	4	2	4	32	교환, 정기 점검	M
	100-2		플래시오버	열화, 절연 성능 저하	좁은 간격, 조임부분 이완 및 접합부분 불량	3	2	3	18	간격 확보, 교환, 정기 점검	M
	100-3		애자 소손	정전	염분 등의 이물 부착, 접촉부 이상	4	1	1	4	청소, 정기 점검	L
변압기	200-1	전압 변환	이상수치지시	오조작, 성능저하	계기고장, 과부하	2	2	1	4	수리·교환	L
	200-2		이상온도상승	수명감소, 파손	계기고장, 전압강하 과부하, 고조파 유입, 과여자 권선내부 이상, 주위온도 과대	4	3	5	60	수리·교환 부하 저감 상간 균형 원인규명 대책, 통풍	H
	200-3		이상음발생	높은 철심을 진동, 공진음 방전음	과전압 설치 불안정, 공진 부분방전발생, 접지 불안정 볼트너트 이완	4	4	3	48	탭 교환 안정적인 설치, 공진조건 제거 원인규명 대책	H
	200-4		이상한냄새발생	성능저하	국부가열	3	2	3	18	원인규명 대책	M
	200-5		절연유 누유 유면위치	과열, 파손, 정전 이상수치지시	가스킷 열화, 패킹불량, 부식, 균열, 계기고장, 누유	5	3	4	60	가스킷 교환, 교체, 도색조이기	H
	200-6		단자부 이상	과열에 의한 변색	과부하 또는 이상 전류 조임부 헐거움 접촉면 불량	1	3	2	6	부하저감, 조이기 연마·제도금·청소	L
	200-7		애관 소손, 부품파손 및 탈락	정전	외부단락, 지락, 내부이상	4	2	1	8	청소 및 수리교환 정기점검	M

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
변압기	200-8	전압 변환	방전, 방전흔적	애자 소손, 열화가속	이상전압의 침입 또는 발생	3	3	1	9	원인규명 대책	M
	200-9		녹 발생		도막열화	1	2	2	4	소정의 도료로 보수	L
	200-10		오동작	정 전	작은동물 흔적	5	1	1	5	울타리 설치	M
	200-11		누유	과열	녹슴, 패킹 불량	5	2	2	20	교체, 패킹보강	H
	200-12		소손	정 전	코일손상으로 지락 낙뢰로 부싱쪽 플래시오버 2차측 절연열화로 단락	5	1	1	5	기중개폐기 설치 피뢰기 설치 정기점검	M
	200-13		폭발	정전	급격한 과부하, 사고시 차단기 미 동작	5	5	1	25	방압 안전장치 검사	H
	200-14		전원투입불능	과전류 계전기 동작, 정전	과부하, 배전선 단락, 변압기 내부 고장	2	2	2	8	부하, 배전선 조사, 수리	L
	200-15		차단기 트립	접지계 전기 동작, 정전	변압기 내부 및 배전선 지락	2	2	2	8	수리, 배전선 조사	L
	200-16		온도상승	수명감소, 파손, 정전	과부하, 변압기 내부 고장, 냉각팬 고장, 온도계고장, 에어필터 오염 및 막힘	2	2	1	4	수리, 냉각팬 조사, 교정, 교체, 에어필터 교환	L
	200-17		절연물 열화	절연물의 변색, 균열	국부가열, 경년열화	4	3	5	60	정기점검, 교체, 수리	H
	200-18		절연저항이상	수명감소, 열화가속	흡습, 오손	3	2	4	24	정기점검, 교체, 수리	M
	200-19		외관 철심 단자부 및 탭 이상	가열에 의한 변색 먼지, 오손, 부품파손	과부하, 이상전류, 체결부 이완, 접촉면 불량,	3	4	2	24	조임, 부하 저감, 연마, 청소, 수리, 교체	H
ASS	300-1		애자균열	정전, 오동작 및 성능저하	먼지 및 이물질에 의한 절연열화	4	2	3	24	교체, 청소	M
	300-2		퓨즈링크 및 체결부 불량	성능저하	변색, 흡습	2	2	3	12	체결력강화, 수리	L
	300-3	부하전류차단	투입불능	자주 개방됨, 정전	부식, 고장전류	4	1	1	4	교체, 수리	L

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
콘덴서	400-1	역률개선	단자부 과열 변색	성능저하, 수명감소	고주파 유입, 부적당한 기기선정	3	2	2	12	체결력강화, 교체	M
	400-2		기름누설	폭발, 정전, 기능저하	외부 단락, 지락 및 용기 손상	5	2	3	30	외관 검사, 청소	H
	400-3		절연파괴 내부단락	2차측 CT 폭발, 정전	자연 열화, 경년열화, 부싱간 플래시 오버	5	3	5	75	강화설계, 교체	H
	400-4		침수	단락, 지락	침수	5	1	1	5	높이 조절	M
COS	500-1	변압기 보호 및 개폐	퓨즈 용단	부하측 정전	차단전류용량 부족 열화, 부식	4	2	4	32	적정 차단용량으로 교환	M
	500-2		플래시오버	정전	대지거리, 상간거리 또는 바리어와의 간격	3	2	2	12	간격유지	M
	500-3		오동작	정전 및 성능 저하	접속 불량, 염분 등의 이물질 부착	2	3	2	12	조임, 청소	M
MCCB	600-1	고장전류차단	투입불능	전압 Trip 장치의 이상	부족전압, 코일소손	3	2	1	6	전원 개선 반송수리	M
	600-2		투입불능	부족전압 Trip장치 고장	적용주파수 또는 전압착오, 전압강하 과다	4	2	2	16	전원 개선	M
	600-3		투입불능	무전압 상태에서 Trip 동작 안함	차단기 Trip 기구 고장	2	1	1	2	오동작방지조치,수리	L
	600-4		이상발열	단자부 이상상승 본체케이스의 온도상승	접속단자의 느슨함 전류밀도상승	2	3	2	12	조임, 수리 및 교환	M
	600-5		조작불능	투입불능 리셋불능	트립상태에서 리셋불가 부식변형, 기구부의 이상	4	2	3	24	리셋조작실시 냉각후 리셋, 교환	M
	600-6		오동작트립	정격전류 이하에서 트립 시동전류에서 트립	단자부 느슨해짐에 따른 발열 차단기 내부 발열, 진동, 충격 시동돌입 전류조건사이의 차	3	4	3	36	통기, 조임, 교환, 쿠션으로 내진 고정 및 선경변경	H

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
MCCB	600-7	고장전류 차단	부속장치 이상	전압트립 장치 이상 보조스위치 이상	코일 소손 스위치 소손 및 조정불량	3	2	3	18	정정, 수리 교환 및 조정, 수리	M
	600-8		과전류에서 부동작	주위온도 저하	규정동작전류에서 부동작	5	3	3	45	실내온도 상승시킴	H
	600-9		온도상승	단자온도 상승 단자부 절연물의 소손	단자 스크루, 도체접속 스크루의 풀림	2	2	3	12	체결력강화, 진동방지	L
	600-10		Mold측 온도 상승	성능저하	접촉부의 접촉저항이 증가 내부단자의 풀림 단락단선에 따른 전류밀도 증가	2	3	3	18	접촉상태점검, 신품교환	M
	600-11		본체 발열	성능저하	부스바 풀림 부스바 도전부와 본체단자와의 접촉불량	3	2	2	12	조임 부스바 재조립	M
	600-12		투입불능	부분정전	개폐기구부에 이물이 있다. 개폐스프링 소손 및 피로	2	4	2	16	이물제거 반송수리, 폐기	M
	600-13		Reset 불능 Trip 불능 Off 불능	성능저하, 부분정전	Trip내구에 따른 마모 Reset기구불량, 조정불량 부족전압 Coil무여자 바이메탈이 부식 또는 변형 많은 조작횟수로 수명 단축 과전류 Trip장치가 냉각이 안됨 차단전류 과대에 따른 접점용착	3	3	3	27	신품교환 및 폐기 반송수리 전원인가 반송수리 폐기 냉각후 Reset 큰차단용량으로 교체	M
	600-14		도통 불량	통전이 안됨	접점간에 절연물이 흡인 도전부 용단 ·접점 마모가 큼	2	2	3	12	이물제거 및 수리 큰차단용량으로 교체, 폐기	L
	600-15		부동작	규정의 동작전류 이상에서 부동작	정격전류 선정이 크게 됨 한류차단 또는 상위 차단기의 협조가 안됨	3	2	2	12	적은 정격으로 변경 협조의 재검토 및 선정의 변경	M

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
MCCB	600-16	고장전류차단	전원측의 단락	전원측 단락	먼지 등이 쌓여 있음 도전물의 전원측 낙하	2	1	3	6	청소 원인물 제거	L
	600-17		차단기의 잘못된 TRIP	통상부하에서 동작	조정온도가높다 온도상승이크다 배선용 차단기 내부발열	2	3	2	12	정격선정 변경, 통풍 조임, 신품교환	M
	600-18		차단기의 잘못된 TRIP	기동 도중에 오동작	기동전류에 따른 긴 발열· 기동시간 정격전류 이상의 부하전류	3	3	2	18	정격이 큰 것으로 교환 정격선정 변경	M
	600-19		차단기의 잘못된 TRIP	기동시 순시동작	전류과대, 순시재기동, 돌입전류 전동기의 충간단락 투입과 동시에 이상전류흐름, 조작회로의 오접속	2	3	3	18	순시 Trip전류의 설정 또는 정격 변경 전동기 수리 회로점검	M
LA	700-1	이상전압억제	기능 정지	변압기나 기타 장비 파손	과대서지, 절연성능 불량, 흡습, 방전이 없음 이물질 부착에 의한 외부 플래시오버	5	3	3	45	성능정기점검, 설계기준강화 청소, 교체	H
	700-2		기능 불량	기능 저하	가스켓 경년 열화, 압축부족 체결부 및 단자부 이완	4	2	2	16	수리, 교체, 조임	M
	700-3		소손	정전	접지선 탈락 및 고압유도 지진, 풍압에 의한 균열, 파손	5	2	3	30	교환, 수리	H
PT	800-1	배전반 전원 저전압 변경	소손	정전, 지락, 모선 단락, 화재	경년 열화, 자연 열화 번개, 제조불량, 제작 결함 지붕크랙으로 누수, 쇼트	4	2	5	40	교체, 철거, 수리 내성강화 설계	M
	800-2		폭발	정전	절연열화	5	1	5	25	교체,	M
	800-3		이상음	정전, 열화가속	PT 1차 단락, 자연열화	3	2	4	24	교체, 천장 2중구조	M
	800-4		표시등 미점등	정전	PT 2차 단락, 계기고장	2	2	4	32	교체, 퓨즈 설치	L
	800-5		ZCT 손상	정전	쇼트	3	2	3	18	교체	M

Item	Item Number	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Potential Cause / Mechanism Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Action Taken	Critically Matrix
PT	800-6	배전반 전원저전압 변경	파손	정전	자연열화	5	2	4	40	정기점검	H
CT	900-1	전류를 변성	OCR 동작	정전	절연열화	4	2	4	32	교체, 정밀검사	M
	900-2		오동작	정전	절연열화	4	2	4	32	보수자 교육, 교체, 정기점검	M
	900-3		소손 및 파손	정전	CT 2차 단선으로 이상전압 발생, 낙뢰	4	1	2	8	교체, 원인규명	L
	900-4		플래시 오버	성능저하, 정전	단자부 플래시오버, 지락	3	2	2	12	간격유지	M
모선, 접속도체			과열	정전, 오동작, 열화가속	과부하, 조임이완 주위온도 과대	4	2	3	24	청소, 조임 부하선택, 통풍	M
			진동음	정전, 단락, 지락	조임이완	4	2	2	16	조임, 정기점검	M

3. 임시전력설비의 고장수목분석(FTA)

가. FTA 분석

FTA는 시스템의 고장을 발생시키는 정상사상(top event)과 그의 원인과는 인과관계를 논리기호인 부울대수(Boolean Algebra)를 사용하여 나뭇가지 모양의 그림으로 나타낸 고장수목(fault tree)을 만들고, 이에 의하여 시스템의 고장확률을 구함으로써 문제가 되는 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰성을 개선하는 개량적 고장해석 및 신뢰성 평가방법이다. 이 기법은 부품 고장간의 인과관계를 체계적으로 규명하고, 시스템에 치명적일 수 있는 고장모드, 특히 전파될 수 있는 단일결함의 최초 징후를 제공한다는 큰 장점을 지니고 있으며, 이전에 알려져 있지 않은 가능한 결과들을 탐색할 수 있다. 또한, 정상적인 기능으로부터의 이탈 뿐만 아니라, 파생되는 결과들을 규명할 수 있다는 점에서 여러 시스템의 안전성 분석기법으로 널리 사용되고 있다. 즉, 이 기법은 정상사상을 초래하는 원인이나 원인들 조합의 규명, 정상사상의 발생확률을 평가하거나 어떤 기본사상의 발생이 정상사상의 발생에 어느 정도의 영향을 미치는가를 결정하며, 정상사상에 대한 제품의 고장률과 평균수리시간을 구할 수 있다. 이상과 같이 여러 분야의 신뢰성 평가를 하는데 필수적인 분석기법으로서 임시전력설비에 적용한 사례가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 지속적인 전원 공급을 하면서 높은 성능을 유지하는 임시전력설비의 목적을 성취하기 위해서 임시전력설비의 바람직하지 않은 정상사상으로 설비의 정전과 더불어 중요한 인명재해인 감전이라는 사상으로 정하였다. 임시전력설비의 운전시간은 건설현장마다 공사

기간이 다르기 때문에 특정기간 동안의 운전시간인 1년(8760시간)이라는 시간으로 해석하였다. 또한 IEC 50(191)에 규정된 분석절차로 FTA 분석기법을 이용한 정량적인 분석을 하였다.

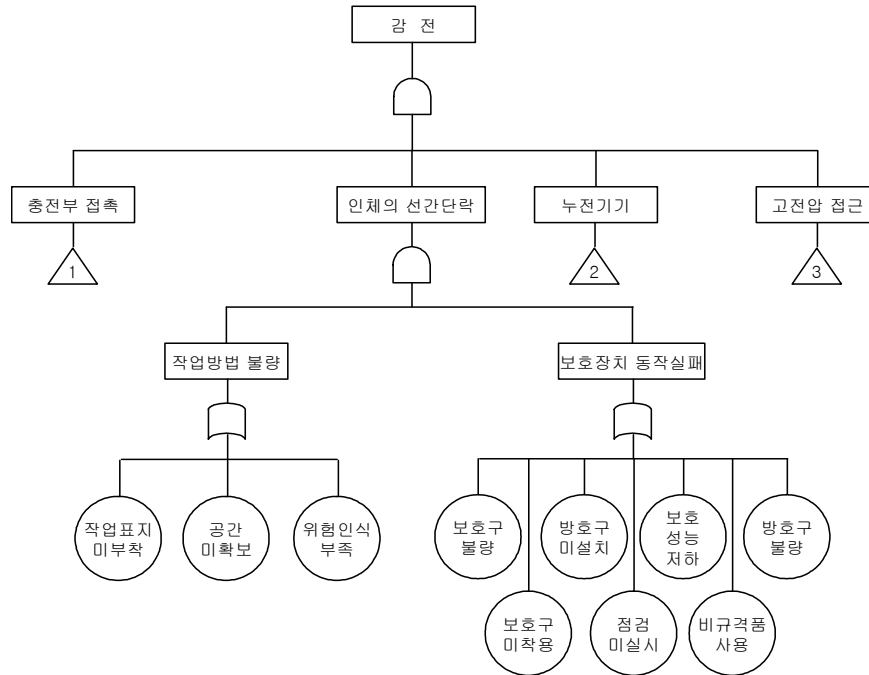
나. 정상사상 : 감전 FTA

일반적으로 저압의 경우보다는 고·특고압에서 감전재해의 위험이 높은 것으로 인식되고 있으나, 최근 2001년 감전재해의 전압별 감전사고 발생현황을 보면 고압보다는 저압에서의 재해 빈도가 높았으며, 사망재해도 많은 것으로 나타나고 있다. 그 이유는 저압의 경우 가정이나 작업장에서의 접근 용이성과 많은 빈도를 갖는 전압이고, 고압의 경우는 위험설비로 구분되어 사고를 예방하기 위한 각종 보호시설과 안전장치가 갖추어져 있으며 또한 전문가나 관계자 이외는 취급을 금하고 있기 때문인 것으로 분석된다. 감전사고가 발생할 당시 사고자의 행위를 살펴보면 전기공사나 전기설비 보수작업을 하는 도중에 발생한 사고가 33.3%로 가장 많았다. 그리고 전기설비의 운전이나 점검 중에 발생한 사고도 5.2%나 되었다.

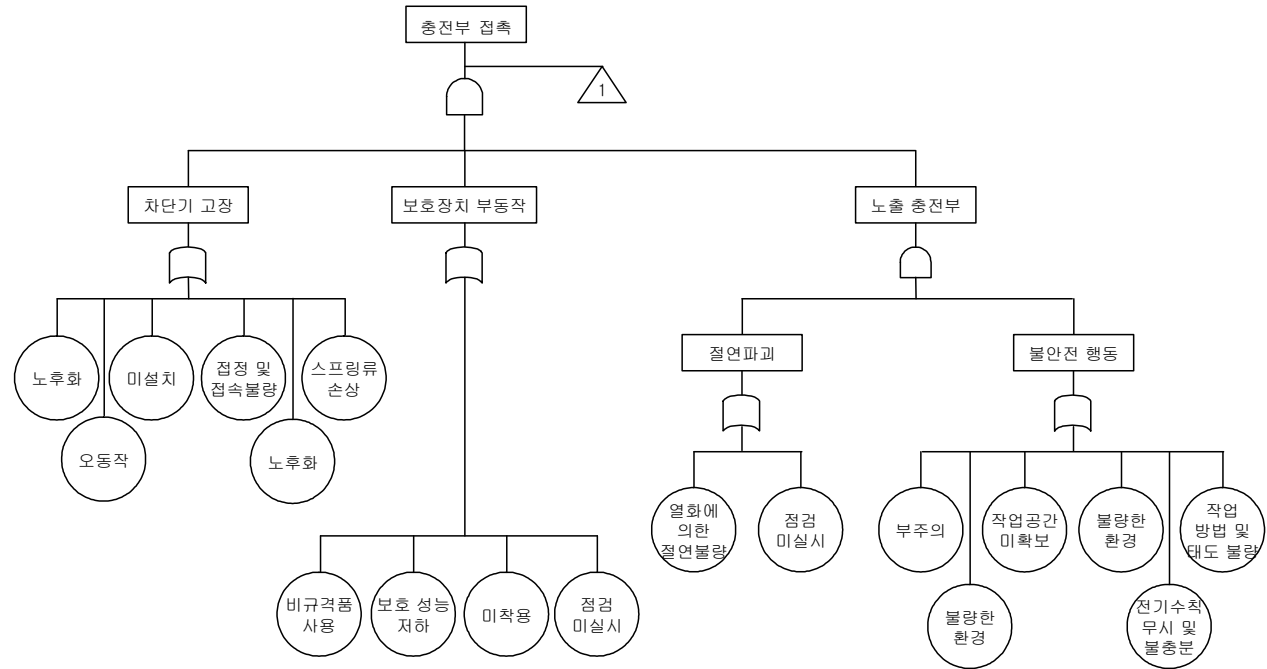
따라서 임시전력설비의 감전에 대한 정성적인 FTA를 하여 작업자가 감전재해를 일으키는 원인을 파악함으로써 그 대책을 제시할 수 있다. [그림 11]은 감전이라는 정상사상에 대한 정성적인 FTA를 보여주고 있다.

임시전력설비의 정성적 FT분석을 통해 살펴본 바, 감전의 형태가 주로 충전부접촉, 인체선간단락, 누전 그리고 고압부 접근에 의한 재해로 발생하고 있으며, 정상사상에 영향을 주는 중간사상 및 기본사상을 사례에서 나타난 자료로 검토하여 원인을 제시하면 다음과 같다. 충전부

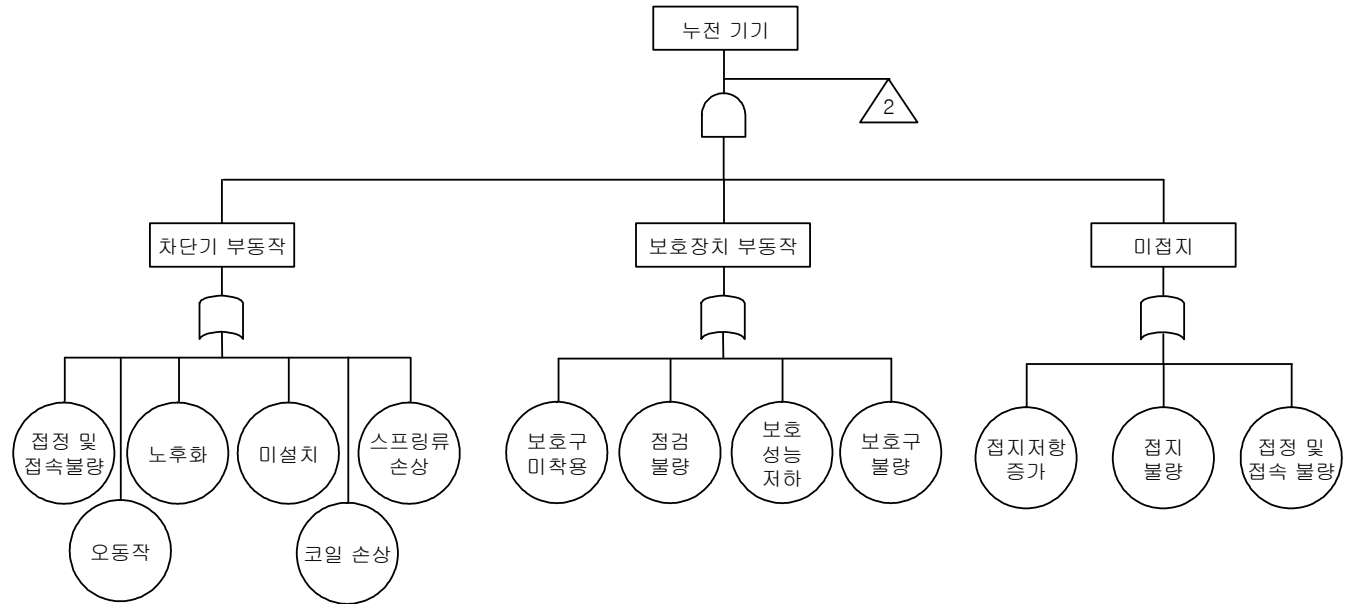
접촉에 의한 전격재해의 경우 차단기 미설치, 전선의 절연열화로 인한 절연과괴, 불안전행동 등에 의한 재해가 발생하고 있으며, 인체 선간단락의 경우 작업불량, 방호구 및 보호구 미착용 그리고 보호장치 동작실패 등으로 인해 감전사고가 발생하고 있다. 또한 누전의 경우 접지불량, 차단기 미설치 등에 의해 전격재해가 발생하고 있으며 고압부 접근의 경우에는 전기위험성의 인식부족, 방호구 미설치 등이 감전사고의 원인으로 밝혀지고 있다.



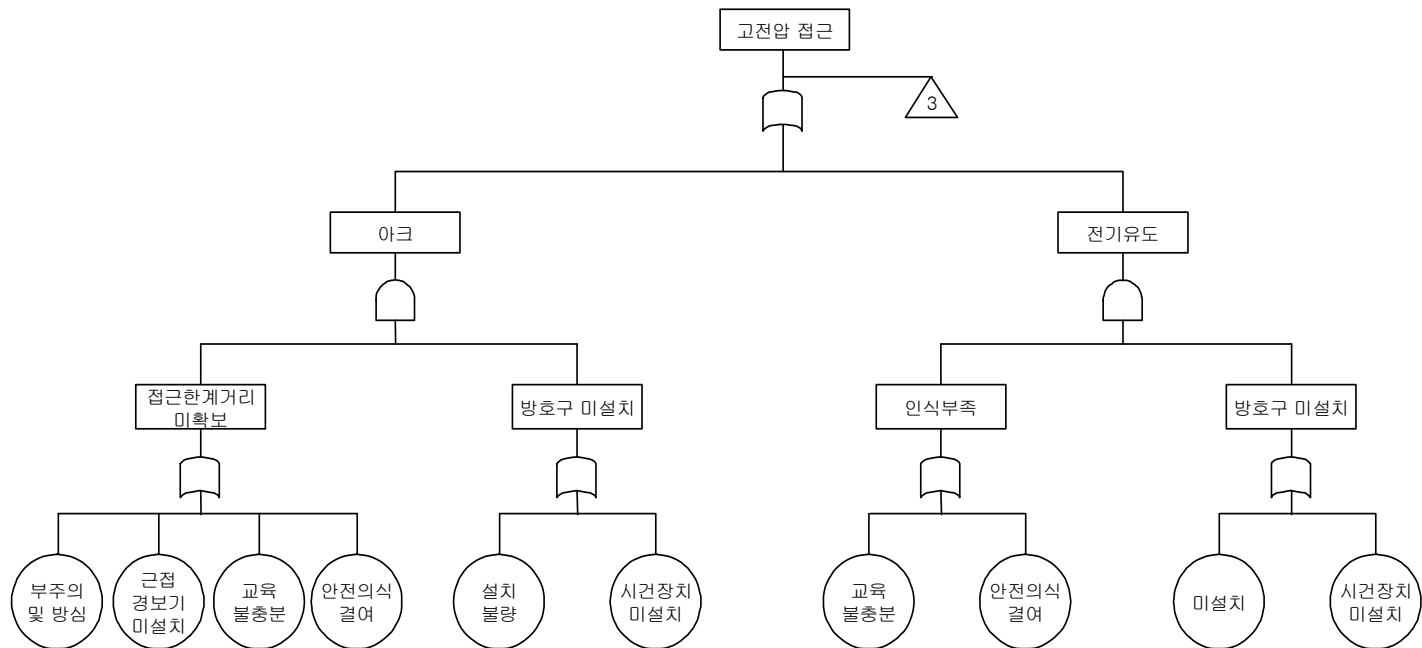
[그림 11] 감전사고의 정성적 FTA



[그림 11] 감전사고의 정성적 FTA(계속)



[그림 11] 감전사고의 정성적 FTA(계속)



[그림 12] 감전사고의 정성적 FTA(계속)

건설현장에서의 감전재해를 방지하기 위해서는 건설현장 특성 및 전기설비의 특징을 잘 이해하고 대응해야 한다. 우선 작업중이나 통행시에 접촉 또는 접촉우려가 있는 배선에 대해서는 절연성능을 유지하고 있는 가에 대한 정기적 점검이 필요하며, 임시적으로 이동용 전선을 사용하고, 과부하로 인한 절연물의 열화가 가속되지 않도록 전선이나 케이블의 허용전류 이하의 전류가 흐르도록 설비증설이나 신설에 신중을 기하여야 한다. 중량물을 취급하는 통로상에서 사용할 경우는 중량물의 이동으로 인해 손상을 입지 않도록 시설하여야 한다. 배전반 및 분전반은 불연성 재료를 사용하고, 잠금장치를 설치하여 관계자 이외의 작업자가 조작하거나 수리하는 것을 방지하여야 한다. 즉, 관리책임자를 임명하고 무절제하게 전력을 인출하여 사용하는 것을 금지하여야 한다. 그리고 개폐기는 커버가 달린 것을 사용하고 반드시 정격퓨즈를 사용하여야 하며 분전함의 외함 또는 내부철판은 전압에 따라 제3종 접지, 또는 특별3종접지를 행하여야 한다.

220V를 사용하는 이동식 전기기기는 인체감전 방지용 누전차단기를 사용하여야 한다. 신규설비의 설치나 수리를 위하여 전기공사가 필요한 경우에 공사중뿐만 아니라 공사후까지 절차에 따라 작업에 임해야 하며 개폐기를 투입하기 전에 모든 작업자가 충전부에 접근치 못하도록 조치하고 선로 뒷처리의 완벽여부를 확인한 후에 통전하여야 한다. 그리고 설비·기기의 고장, 장애 등에 의해 발생하는 위험에 대한 대응책, 전기의 기초지식 습득을 통한 위험성 인지 및 전기를 취급함에 있어 작업자의 안전대책 등 작업자와 전기계통을 통합하여 근로자-전기계라는 하나의 시스템적 접근을 통한 대책을 세우는 것이 필요하다. 이러한 노력을 기울이는 것이 전기설비로 인한 재해를 최소화할 수 있을 것이며, 감전 방지를 위한 일반적인 대책을 제시하면 다음과 같다.

- (1) 감전의 원인이 되는 충전부분의 절연·격리
- (2) 기기 및 설비에 대한 근원적인 안전화
- (3) 전기설비의 이상현상의 검출 및 조치
- (4) 전기설비의 보수·점검 철저
- (5) 전기 작업용 안전장비의 정비
- (6) 작업표준의 확립 및 준수
- (7) 안전교육의 실시
- (8) 비상시의 대책확립

다. 정상사상 : 정전 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.

본 연구에서 이용된 FTA가 전형적인 확률이론을 이용한 FTA이기 때문에 기본적으로 부품과 부품사이에는 상호 연관성을 가지고 있음에도 불구하고 독립이라는 가정에서 출발하게 되었다.

셋째, 고장률은 부품이 포함되어 있는 어셈블리 및 시스템의 환경(온도 및 진동 등의 stress)요인을 제외하였다. 왜냐하면 외부환경에 따라 고장률이 변할 수 있지만 시스템 신뢰성 분석결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다.

넷째, 시스템 가동 기간 중에는 수리에 의한 보수는 없다.

다섯째, 휴먼에러에 의한 운전상의 오조작 가능성은 분석대상 시스템이 복잡하고 방대하여 FTA에서는 언급하지 않기로 한다.

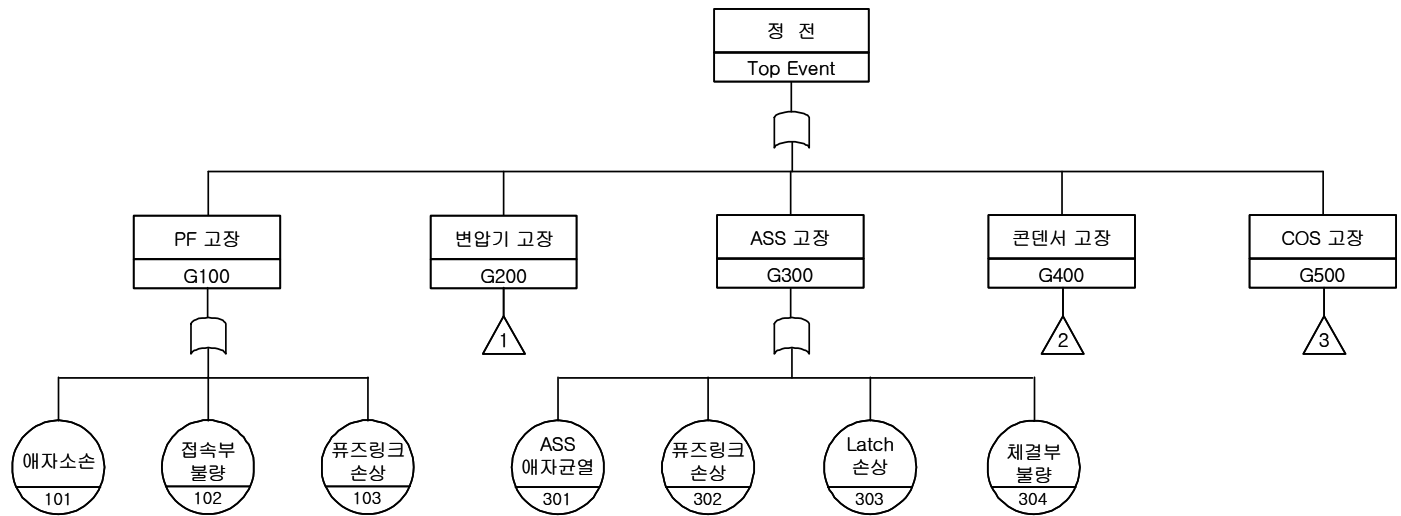
본 연구의 목적이 임시전력설비 시스템의 부품 고장이 전력설비의 정전을 일으키는가에 초점을 맞추고 있기 때문에 연구 대상에서 제외하였다.

본 연구에서와 같이 현장에서 사용되고 있는 시스템을 대상으로 FTA를 하는 경우에 문제가 되는 것 중의 하나는 고장률에 대한 데이터가 절대적으로 부족하다는 것이다. 그래서 과거 연구자의 자료를 그대로 도입하거나 대상 시스템의 특성에 맞게 적절하게 수정하여 분석을 수행하는 경우가 많다. 특히 임시전력설비관련 분야에서는 아직까지 고장률 데이터가 축적되어 있지 않고 있다. 따라서 기본사상이 되는 부품의 고장률은 미국방성 소속인 Reliability Analysis Center(RAC)에서 1995년에 발간한 “Nonelectronic Parts Reliability Data(NPRD)”를 근간으로 임시전력설비에 사용된 부품들의 특성에 가장 적합한 고장률 값을 선택하여 연구를 수행하였다. 다만 하나의 부품에는 여러 가지의 고장모드가 있지만 NPRD에는 고장모드를 고려한 고장률이 아니기 때문에 RAC에서 1997년에 발간한 “Failure mode/ mechanism distributions”에 제시한 기계부품의 고장모드 분포를 참작하여 최종적으로 고장률을 결정하였다. 그리고 고장률 계산시점의 사용기간은 1년으로 하여 계산하였다. <표 11>은 임시전력설비에서 사용한 기본사상의 고장률과 분류 코드를 나타내고 있다. 각 부품의 고장률은 백만 시간당 고장률 값이다.

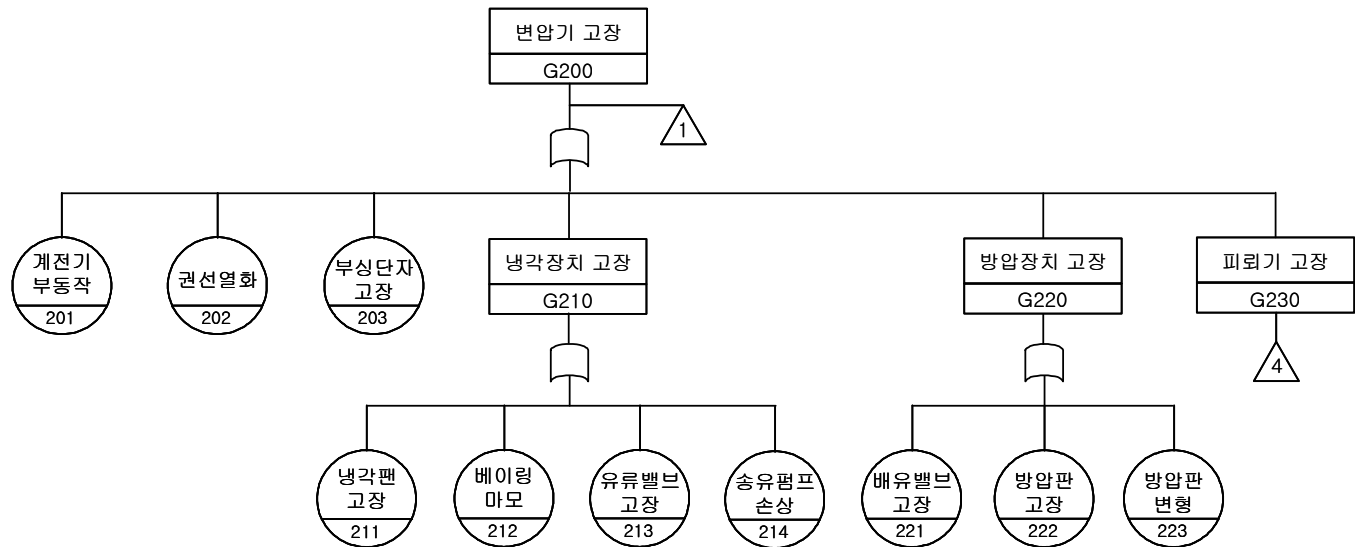
본 연구에서는 “정전”이라는 정상사상을 일으키기 위해 필요한 조건을 변압기, COS, 자동고장구분개폐기(ASS), 콘덴서, PF가 고장이 발생하는 것으로 가정하였으며 이를 바탕으로 구성한 Fault Tree가 [그림 12]에 제시되어 있다.

<표 11> 설비의 Basic events에 대한 고장률 Data

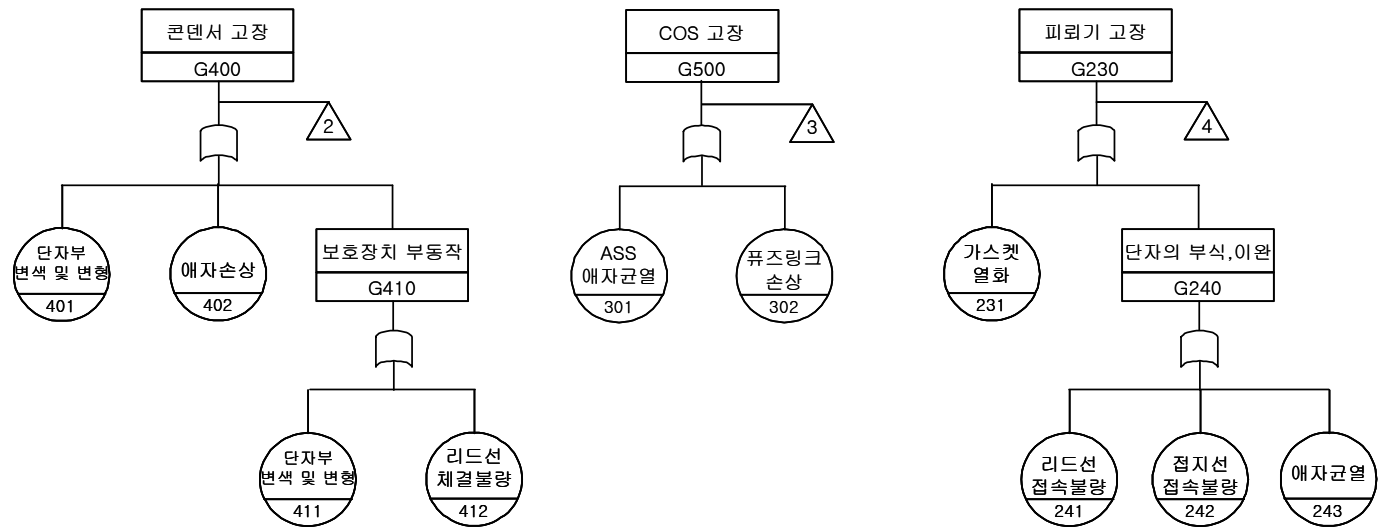
Basic Event Code	Description	<u>Failure Rate</u> 10 ⁻⁶ /hr
101	퓨즈 애자 소손	0.05
102	접속부 불량	0.3221
103	퓨즈 링크 손상	2.8686
201	보호계전기 부동작	2.6069
202	권선 열화	0.041
203	부싱단자 고장	0.05
211	냉각팬 고장	6.8804
212	베어링 마모	1.6445
213	유류 밸브 고장	12.4549
214	송유 펌프 고장	69.6427
221	배유 밸브 고장	12.4549
222	방압판 고장	0.0001
223	방압판 변형	0.0001
231	가스켓 열화로 기기불량	0.3051
241	고압리드선 탈락 및 접속 불량	0.0394
242	접지선 탈락 및 접속 불량	0.03
243	피뢰기의 애자균열	0.05
301	ASS의 애자균열	0.05
302	ASS의 퓨즈 링크 손상	2.8686
303	spring 고장에 의한 latch 손상	0.017
304	체결부 불량	0.0242
401	콘덴서 단자부 변색 및 변형	0.05
402	콘덴서 애자손상	0.05
411	보호장치 단자부 변색 및 변형	0.05
412	리드선 체결 불량	0.0394
501	COS의 퓨즈 링크 손상	2.8686
502	Element 손상	0.00065



[그림 12] 임시전력설비의 정전에 대한 Fault Tree



[그림 12] 임시전력설비의 정전에 대한 Fault Tree(계속)



[그림 12] 임시전력설비의 정전에 대한 Fault Tree(계속)

라. FTA 분석 결과

임시전력설비에 대한 정상사상의 발생확률, 최소절단집합, 그리고 확률중요도 및 치명중요도를 결정하기 위해 Fault Tree를 구성하고, 전세계 신뢰성분석 소프트웨어 시장의 80%를 점유하고 있는 전문분석프로그램으로 신뢰성엔지니어들에게 호평 받고 있는 Relex Ver. 7.0 Software를 이용하여 계산하였다. 본 software는 다양한 신뢰성분석기법을 적용하여 시스템의 수명(MTBF)과 신뢰도, 가용도, 고장유형분석, 정비예측, 비용분석 등이 가능하며 그 밖의 신뢰성과 관련된 수학적/통계 분석패키지를 탑재하고 있는 전문소프트웨어이다.

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)로 구한 후 MTTF를 구하였다.

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

식 (1)을 통해 구한 MTTF는 약 4730시간이며, 임시전력설비의 경우 공사기간 동안 24시간씩 매일 동작을 해야 하는 가혹한 조건이므로 이 시간에 근거한 임시전력설비의 정전 발생주기는 약 0.54 년인 반년으로 평가되었다. 임시전력설비 정전에 가장 크게 작용하는 것은 변압기 고장으로 확률이 1.64×10^{-4} 이며, 이것은 일반적으로 임시전력설비에서 변압기가 중요하다는 것을 뒷받침하고 있다. 그 다음으로 PF 고장이 발생할 확률은 3.25×10^{-6} 이고, ASS의 고장확률은 2.96×10^{-6} , 그리고 COS

의 고장확률은 2.87×10^{-6} 이라는 결과를 얻었다.

(1) 최소절단집합

정상사상이 발생할 기본사상의 최소집합인 최소절단집합(Minimal Cut Set ; MCS)은 <표 12>에서 보여주고 있다. 이것은 임시전력설비의 정전이라는 정상사상을 일으키는데 상위 15%에 해당하는 최소절단집합이 대부분의 영향을 주고 있는 것으로 해석되었다. [그림 13]은 <표 12>에 해당하는 최소절단집합의 불신뢰도를 표현한 것으로 “X” 지점 이후로 급격히 증가하고 있다. 따라서 정상사상에 큰 영향을 주고 있는 최소절단집합을 “X” 지점을 기준으로 살펴보면 변압기의 냉각팬 고장, 유류밸브 고장, 송유 및 배유 밸브 고장이고, 또한 이 사상들은 시스템의 성능과 신뢰성을 높게 유지하기 위한 사상들이다.

<표 12> 최소절단집합 Lists

Basic Event	Unreliability	Basic Event	Unreliability
222(방압판 고장)	0.00000088	401(단자부 변색, 변형)	0.00043790
223(방압판 변형)	0.00000088	402(애자손상)	0.00043790
502(element 손상)	0.00000569	231(가스켓 열화)	0.00266911
202(권선열화)	0.00003592	102(접속부 불량)	0.00281762
303(latch 손상)	0.00014891	212(베어링 마모)	0.01430255
304(체결부 불량)	0.00021197	201(보호계전기 부동작)	0.02257767
242(접속 불량)	0.00026277	103(퓨즈링크손상)	0.02481583
241(고압리드선 탈락)	0.00034508	302(ASS 퓨즈링크손상)	0.02481583
412(체결불량)	0.00034508	501(COS 퓨즈링크손상)	0.02481583
101(퓨즈 애자손상)	0.00043790	211(냉각팬고장)	0.05849188
243(애자균열)	0.00043790	213(유류밸브고장)	0.10336367
203(부싱단자 고장)	0.00043790	221(배유밸브고장)	0.10336367
301(ASS 애자균열)	0.00043790	214(송유펌프고장)	0.45668719
411(단자부 변색)	0.00043790		

계 할 수 있다면 정상사상의 발생 확률을 효율적으로 저감할 수 있다. Birnbaum 중요도 지수인 $I_g(j)$ 에 대한 계산은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 I_g(j) &= g(q_1, q_2, \dots, q_{j-1}, 1, q_{j+1}, \dots, q_n) \\
 &\quad - g(q_1, q_2, \dots, q_{j-1}, 0, q_{j+1}, \dots, q_n) \\
 &= g(1_j, Q) - g(0_j, Q)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $q_j(j=1, 2, \dots, n)$ 은 기본사상 j 의 발생확률, $g(\cdot)$ 는 정상사상의 발생확률을 나타내는 함수이다. 위와 같은 식을 이용하여 구성된 FT에 대한 Birnbaum 중요도를 계산한 결과는 <표 13>에서 보여주고 있다.

<표 13> Birnbaum 중요도 지수

Basic Event	Birnbaum	Basic Event	Birnbaum
214(송유펌프고장)	0.053306	401(단자부 변색, 변형)	0.363227
213(유류밸브고장)	0.284619	402(애자손상)	0.363227
221(배유밸브고장)	0.284619	243(애자균열)	0.363477
211(냉각팬고장)	0.318631	411(단자부 변색)	0.363477
302(ASS 퓨즈링크손상)	0.331100	304(체결부 불량)	0.363532
103(퓨즈링크손상)	0.331100	241(고압리드선 탈락)	0.363550
501(COS 퓨즈링크손상)	0.331100	412(체결불량)	0.363550
201(보호계전기 부동작)	0.333983	242(접속 불량)	0.363614
212(베어링 마모)	0.352689	303(latch 손상)	0.363618
102(접속부 불량)	0.360021	202(권선열화)	0.363770
231(가스켓 열화)	0.361738	502(element 손상)	0.363811
301(ASS 애자균열)	0.363227	222(방압판 고장)	0.363818
101(퓨즈 애자소손)	0.363237	223(방압판 변형)	0.363818
203(부싱단자 고장)	0.363227		

이 결과를 보면 변압기내의 “방압판 변형”인 경우와 “방압판 고장”인 기본사상이 Birnbaum 중요도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그 다음으로 COS의 element 손상, 변압기의 권선열화, ASS의 투입 latch손상 순으로 중요도 지수가 크게 나타나고 있다.

따라서 방압판 변형이나 고장이라는 기본사상이 단일고장으로 발생하면 “정전”이라는 정상사상발생에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 뜻한다.

치명 중요도 척도는 기본적으로 기본사상 발생확률의 변화율 $\Delta q_j/q_j$ 에 대한 정상사상 발생확률의 변화율 $\Delta g(Q)/g(Q)$ 의 비로 정의되며, Birnbaum 중요도 척도에 어떤 기본사상 j가 발생할 확률을 곱하고 이것을 정상사상이 발생할 확률로 나눈 것이다. 치명 중요도 지수 값이 크다는 것은 해당 기본사상의 신뢰성을 증가시키면 정상사상의 발생확률을 현저히 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 치명 중요도는 신뢰성 개선 측면에서 유용하다고 할 수 있다. 이러한 치명 중요도 지수인 $I_c(j)$ 는 수학적 함수들의 특성에 따라 다음과 같은 식 (3)에 의해 계산된다.

$$I_c(j) = \frac{q_j}{g(Q)} I_g(j) \quad (3)$$

<표 14>는 치명 중요도 지수를 계산한 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면 변압기의 “송유펌프 고장”, “유류밸브 고장”, “배유밸브 고장”, 그리고 “냉각팬 고장”이라는 기본사상이 치명중요도 지수가 크게 나와서 이에 관련된 부품을 신뢰성이 높은 부품으로 교체함으로써 정상사상의 발생확률을 감소시킬 수 있을 것이다.

<표 14> Criticality 중요도 지수

Basic Event	Criticality	Basic Event	Criticality
214(송유펌프고장)	0.038266	401(단자부 변색, 변형)	0.000250
213(유류밸브고장)	0.046244	402(애자손상)	0.000250
221(배유밸브고장)	0.046244	243(애자균열)	0.000250
211(냉각팬고장)	0.029296	411(단자부 변색)	0.000250
302(ASS 퓨즈링크손상)	0.012915	304(체결부 불량)	0.000121
103(퓨즈링크손상)	0.012915	241(고압리드선 탈락)	0.000197
501(COS 퓨즈링크손상)	0.012915	412(체결불량)	0.000197
201(보호계전기 부동작)	0.011853	242(접속 불량)	0.000150
212(베어링 마모)	0.007929	303(latch 손상)	0.000085
102(접속부 불량)	0.001595	202(권선열화)	0.000021
231(가스켓 열화)	0.001518	502(element 손상)	0.000003
301(ASS 애자균열)	0.000250	222(방압판 고장)	0.000001
101(퓨즈 애자소손)	0.000250	223(방압판 변형)	0.000001
203(부싱단자 고장)	0.000250		

4. 임시전력설비의 인간신뢰성분석

가. Human Error 분석의 필요성

모든 사고에는 어떤 형태로든 인간(인적요인)과 기계(물적요인)가 관련되어 발생한다(Man-Machine System). 이런 점에서 인간과 기계, 어느 쪽의 요인도 성공적으로 기능을 하지 않고서는 전체 시스템이 성공적으로 기능하리라고 예상하는 것은 무리다. 그런데 생산기술이 고도로 발달된 현대에 이르러, 특정기계의 고장률은 10^{-9} 을 육박할 정도의 높은 신뢰성을 갖고 있는 데 반해, 인간의 고장률은 여전히 10^{-3} 정도로 개선에 대한 필요성을 인식하지 못한 채 매우 낮은 신뢰도를 유지하고

있다. 즉 기술이 고도로 발달된 현시점에서 기계는 높은 신뢰성을 갖는데 반해, 인간의 에러에 대한 대처 방안은 매우 취약한 편이다. 이러한 근본적인 이유로 인해 최근에 발생하는 인간-기계 시스템의 고장은 대부분 휴먼에러(Human Error)에 의한 것이다. 이와 같은 비율은 생산자동화가 이루어진 시스템에서도 예외가 아니어서, 항공기의 경우 휴먼에러로 인한 사고발생 비율은 60~70%, 전자장치의 경우에는 50~70%, 그리고 휴먼에러가 치명적인 결과를 초래할 수도 있는 미사일 시스템에서조차 20~53%에 이른다고 한다.

국내 2000년 전기재해통계 중 사고원인별 설비사고 발생현황을 보면 사용자의 실수 또는 조작 미숙으로 발생한 사고가 6772건 중 332건을 차지할 정도의 높은 점유율을 나타낸다. 이러한 현실에 비추어볼 때 사고방지를 위한 원인 및 대책수립 연구에 휴먼에러에 대한 비중을 간과할 수 없다. 휴먼에러 데이터의 개발과 축적이 임시전력설비의 안전성 및 신뢰성해석에서 얼마나 중요한 것인가를 알 수 있으며, 현장의 임시설비에서 작업하는 작업자에서 흔히 발생할 수 있는 인적오류의 예를 들면 다음과 같다.

- 정비, 수리, 조사를 하는 동안 전압 인가
- 결함이 있거나 불안정한 도구의 사용
- 전압 인가된 부품에 근접한 도구나 장비의 사용
- 부적절하게 퓨즈 제거
- 수리를 할 때 전원이 꺼져 있다는 것을 확인하지 않는 것 등

위의 사항들은 전기적인 지식의 유·무를 떠나 모든 작업자들이 유발할 수 있는, 그리고 유발하는 형태들이다. 이와 같은 인간의 불안전 행동에 의해 많은 위험한 상황들을 만들어 사고를 유발하게 되는데 이

원인들을 제거하기 위해서는 휴먼에러에 대한 분석을 하여 근원적인 대책을 제시하고, 해결방안을 모색하여야 한다.

고신뢰성의 부품으로 구성되어 높은 신뢰성을 유지하는 임시전력설비라 하더라도 운용 중 발생하는 사고의 많은 부분은 우연히 발생하는데 특히 건설작업현장 내의 전기작업은 작업자의 경솔한 행위로 야기되는 사소한 실수로 인해 전격재해라는 인명피해를 초래할 수 있어 세심한 주의를 필요로 한다. 이러한 감전원인을 좀더 세부적으로 고찰하면, 주로 작업자의 불안전한 행동, 즉 휴먼에러에 의해 발생한다고 볼 수 있다. 작업자의 기술미숙, 심신상태, 부주의와 오인, 전기적 지식의 부족 및 위험성 지각능력부족으로 인한 절차상 결함 등 휴먼 에러에 의한 사고의 위험성이 상존하며 실제 다양한 형태로 사고가 발생되고 있다. 휴먼에러의 특성상 책임의 추궁과 한계파악 등 관리의 한계가 있으므로 작업자의 휴먼에러를 체계적으로 관리하기가 힘든 실정이다. 이에 대한 대책은 단시간 내에 이루어지는 것이 아니기 때문에 우선 지속적인 현장의 작업자관리 및 교육으로 해결해야 할 것이다. 이러한 측면에서 임시전력설비 사용시 휴먼에러에 의한 사고 예방 및 확산방지를 위해 사전설비점검, 예방보수, 교육훈련 등 여러 방법을 사용하여 지속적인 관리가 필요하다. 또한 임시전력설비에서의 휴먼에러에 의한 사고는 열악한 건설현장 환경의 특수성 때문이라고 취부하기에는 그 피해 정도가 심각하다.

임시전력설비의 신뢰성을 개선하여 설비의 결함이나 손실을 최소화할 수 있지만, 설비운용 면에서도 사소한 사고에서부터 중대 재해까지 많은 사건들이 발생할 수 있으며, 이를 방지하기 위해서는 경험부족, 정보 전달 미비, 인지 확인 미스, 판단 미스, 오조작 등의 휴먼에러를 파악하여 시스템에 미치는 영향을 파악하고, 인적·물적 손실을 방지하기 위해 과거의 사고 사례를 해석하여야 한다. 또한 사고사례 해석을

통해 휴먼에러를 미연에 방지하기 위해서는 관리자와 작업자의 종합적인 대책과 더불어 그 특징과 경향을 분석하여 합리적인 대책이 수립되어야 한다.

나. Human Error 분석기법

“인간은 얼마나 신뢰할 수 있는가” 라는 질문에 답하기 위하여 휴먼에러가 시스템에 미치는 영향을 정량적으로, 특히 확률적으로 평가하기 위하여 신뢰성공학의 기법을 이용한 평가기법을 도입해야 한다. 이를 인간신뢰성분석(Human Reliability Analysis)이라 하며, 휴먼에러가 부품이나 시스템에 미치는 영향을 평가하기 위해 많은 분야에서 사용되고 있다.

휴먼에러는 인간이 명시되어 있는 정확도, 순서 혹은 시간 한계 내에서 지정된 행위를 하지 못하거나 혹은 금지된 행위를 하는 것으로 그 결과 재해발생, 장비나 재산의 파손 또는 예정된 작업의 중단을 초래할 수 있다. 휴먼에러는 인간의 신뢰성 문제로서 취급되고 있으나, 인간의 신뢰성은 인간-기계체계 전체의 신뢰성에 관계가 있기 때문에 이를 어떠한 방법으로 대처할 것인가에 중요한 의의를 가지고 있다.

Three Mile Island의 원자력 발전소 사고를 계기로 휴먼에러의 종속성 모형(Dependence Model)을 제시한 Swain과 Guttman이 휴먼에러 형태를 Omission Error(해야 할 것을 하지 않는다), Commission Error(해야 할 것을 불충분하게 한다), Sequential Error(해야 할 것과 다른 것을 한다), Extraneous act(필요 없는 것을 한다), 그리고 Time Error(시기에 맞지 않게 한다)로 분류하였다.

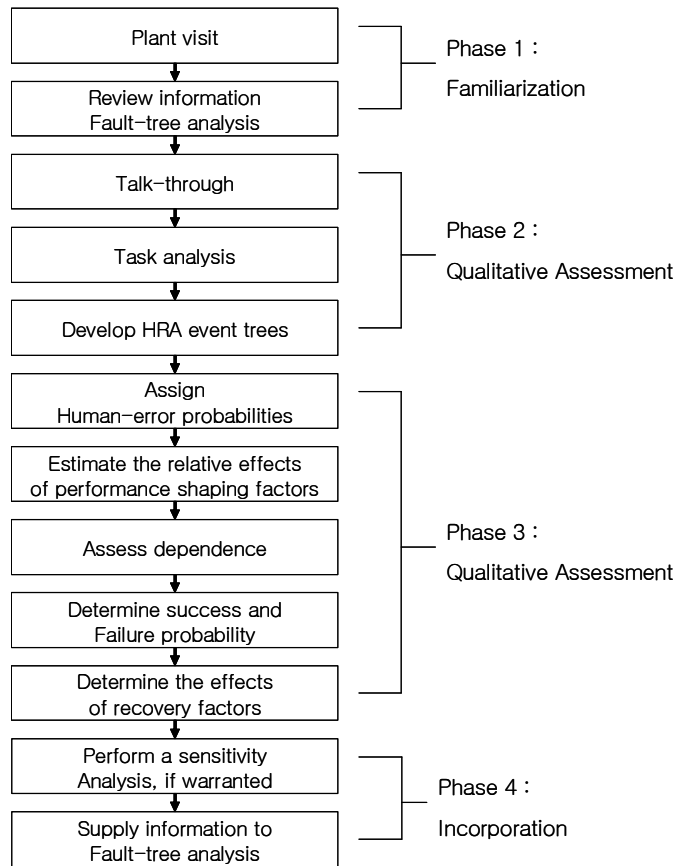
휴먼에러는 옛날부터 지금까지 원자력, 일반산업의 어떠한 분야를 막

론하고 설비의 운전, 조작 등 이른바 작업상의 휴먼에러에 관심이 쏠려 있다. 이에 휴먼에러에 기인하는 원인을 보면 개인 특성, 교육·훈련·교시의 문제, 직장 성격상의 문제, 작업특성·환경조건 등이 있다.

인간신뢰성분석 혹은 인간신뢰성평가(Human Reliability Assessment)라고 불리는 방법에는 여러 가지 기법이 있지만, 어느 것이나 대체로 [그림 14]와 같은 순서를 따르는 것이 일반적이다.

처음에는 작업자의 직무분석(Task Analysis)으로부터 접근하여 분석하고자 하는 작업을 직무나 작업요소들의 연속으로 이해하고, 전체적인 작업수행의 성공, 실패에 영향을 미치는 작업요소의 특성을 파악하는 휴먼에러 규명(human error identification)을 거친 후, 마지막으로 이를 종합화하여 작업을 성공적으로 수행할 수 있는 확률을 계산하는 인간신뢰성 정량화(human reliability quantification)라는 부분으로 [그림 14]와 같이 구성된다고 할 수 있다.

인간이 어떤 하나의 작업을 수행해 나갈 때 실제로 직무들간에는 서로 관련된 작업이 많다. 이러한 작업은 선행작업의 성공 혹은 실패여부에 따라 크게 달라질 수 있다. 휴먼에러의 종속성 모형(Dependence Model)은 단위작업간의 의존도를 평가하여 선행작업과의 의존정도에 따라 후행작업의 성공확률을 다르게 추정해가는 방법이다. 일련의 작업수행에 있어서 성공확률과 실패확률을 수학적으로 모형화하여 작업전체의 성공적 수행확률을 계산한다. 또한 작업요소간 의존관계를 5단계로 구분하여 인간이 수행하는 작업요소간의 종속도를 근거로 작업수행의 성공확률과 실패확률을 수학적으로 추정하는 기법을 창안하였다.



[그림 14] 인간신뢰성 분석절차

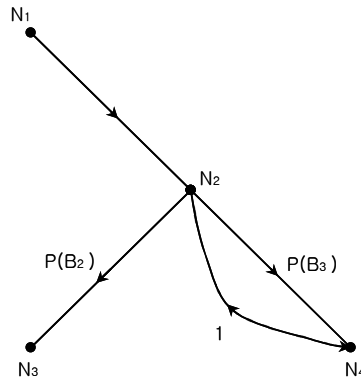
이 모형에 따르면 두 작업의 파오사이에 의존관계가 전혀 없다면 무의존(Zero Dependence : ZD), 선행하는 작업에서 성공하면 후행작업도 성공, 실패하면 실패하고 하는 긴밀한 유착형이라면 완전의존(Complete Dependence : CD)이라고 하고, 이것들의 중간을 저의존 (Low Dependence : LD), 중의존(Moderate Dependence : MD), 고의존(High Dependence : HD)의 다섯 가지의 단계로 구분된다. <표 15>는 두 단위작업간의 의존도를 고려하여 후행작업의 성공확률 혹은 실패확률을 계산하는 방법을 나타낸다. <표 15> 중의 BHSP는 Basic Human Success Probability, BHFP는 Basic Human Failure Probability를 나

타낸다. 이들은 종래의 ETA의 장점을 더욱 개발하고 FTA의 유용성을 극대화하여 휴먼에러율 예측기법(Technique for Human Error Rate Prediction ; THERP)라는 기법을 개발하였고, 이것은 휴먼에러에 대한 정량적 분석 및 평가기법의 주류를 이루게 되었다.

<표 15> 종속성 모형의 조건부확률

Pr(success success)	Dependence	Pr(failure failure)
BHSP	ZD	BHFP
$\frac{1 + 19 \times BHSP}{20}$	LD	$\frac{1 + 19 \times BHFP}{20}$
$\frac{1 + 6 \times BHSP}{7}$	MD	$\frac{1 + 6 \times BHFP}{7}$
$\frac{1 + BHSP}{2}$	HD	$\frac{1 + BHFP}{2}$
1	CD	1

가장 기본적이면서 널리 활용되는 기법은 THERP인데, 이 기법은 시스템 내에서의 휴먼에러율을 정량적으로 평가하기 위하여 1963년에 개발되었다. 이 분석에 이용되는 것은 ETA에서 이용되는 나무모양의 그림인데, 다른 점이 있다면 각각의 절점(node)에서 분지되는 왼쪽 가지가 성공적 작업수행을 나타내며, 오른쪽 가지가 실패를 나타낸다는 점이다. 또 다른 특징적인 것은 오른쪽 가지로 진입된 작업진행이라 할지라도 작업진행 중의 자기점검이나 반성에 의해 다시 원점으로 회귀할 수 있다는 현실성이 반영되고 있다는 점이다. THERP는 복잡하고 연쇄적인 직무를 분석하는데 효과적이다. 일련의 의사결정 분지들의 모형화를 [그림 15]에서 보여주고 있다.



[그림 15] THERP 분석원리

[그림 15]에서 N_1 절점에서 N_2 절점까지 이미 행위가 이루어졌다고 하고, N_2 에서부터의 작업수행만을 고려하면, 절점 N_2 에서 다음 작업요소를 성공할 확률은 1회 수행에 한정된다면 $P(B_2)$ 가 된다. 그러나, 현실적으로는 그 다음 작업을 계속 수행하면서, ‘아차, 내가 밸브를 너무 열었구나!’라든지, ‘전원을 넣지 않았구나!’ 하고 자기점검이나 반성을 통해 자신의 과오를 확인할 수 있다. 그래서 다음 순간에는 다시 절점 N_2 로 돌아가 작업을 재시도함으로써 작업을 원활히 지속시켜 나갈 수 있는 것이다.

이것을 정량화해 본다면, 1차 시행에 성공할 확률은 $P(B_2)$, 1차 시행에 실패했지만 2차 시행에 성공할 확률은 $P(B_3)P(B_2)$, 2차 시행에도 실패하고 3차 시행에 성공할 확률은 $P(B_3)P(B_3)P(B_2), \dots$ 이렇게 계속해 나가면 최종적인 성공확률 $P(N_3)$ 은 식 (4)로 계산된다. 물론 이 경우에도 작업요소간의 실패 혹은 고장은 상호독립이라고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 P(N_3) &= P(B_2) + P(B_3)P(B_2) + P^2(B_3)P(B_2) + P^3(B_3)P(B_2) + \dots \\
 &= P(B_2)[1 + P(B_3) + P^2(B_3) + P^3(B_3) + P^4(B_3) + \dots] \\
 &= P(B_2)/[1 - P(B_3)]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

다. 직무 분석 및 인간신뢰성 분석

임시전력설비에서 발생하는 사고사례들을 수집하여 사고 유형을 파악하고, 휴먼에러의 원인을 분석하였다. 설비의 감전사고 및 아차사고는 정기점검 중 절연저항을 측정할 때가 제일 많이 발생하였으며, 다음으로 기기의 개·보수, 개폐 조작시, 퓨즈 교체 순으로 조사되는 등 여러 가지 형태의 사고가 발생하였는바 다음과 같이 사고사례를 요약하고자 한다.

- 고압진상콘텐서의 절연저항 측정시 개방된 것으로 착각하고 전력용 퓨즈에 접촉하여 감전
- 퓨즈가 용단되어 교체시 전체 전원이 개방된 것으로 착각하여 감전
- 큐비클 내부 도색 작업중 팔이 충전부에 접촉하여 감전
- ASS 교체 작업 및 점검 중 특고압 충전부 접촉으로 인한 감전

감전사고는 건설현장에서 발생하는 재해 중 가장 치명적인 재해로서, 임시전력설비의 점검 및 수리 작업에서 빈번하게 발생함을 알 수 있다. 이러한 감전사고가 많이 유발되는 직무를 선정하여 휴먼에러의 분석을 통한 인간신뢰성을 평가한다. 앞에서 언급한 사고 사례의 내용은 단순하게 기술되어 있지만 실제 작업 내용을 직무별로 분류하면 단순하지 않은 여러 단계로 구성되어 하나의 작업을 수행하게 된다. 즉 여러 단계의 직무들로 구성됨을 의미한다. 임시전력설비의 보수 점검시 감독자나 안전관리자의 입회 하에 정전작업 절차를 따르면서 일련의 작업을 하는 것이 바람직하며 이 경우 작업자의 안전성을 확보할 수 있으

나, 현재의 건설현장은 짧은 공사기간과 그리고 작업중인 현장의 다양한 업무의 신속한 수행을 위해서는 안전에 대한 순위를 낮게 설정하는 경향이다. 때에 따라서는 정전작업시 휴먼에러로 인한 충전부가 충전된 상태나 활선상태의 작업을 하게 되는데 이때 점검 및 기기 보수작업은 높은 위험성을 지니고 있다. 임시전력설비의 전력용 퓨즈 교체작업시 발생확률이 높은 감전사고와 ASS 교체작업시 발생할 수 있는 감전사고로 인간실패성을 분석하였다.

(1) 전력용 퓨즈 교체 작업

임시전력설비의 전력용 퓨즈 교체작업에서 인간의 불안전행동을 초래하는 작업요소를 분석하기 위해서는 교체작업에 대한 직무분석을 먼저 수행하여야 한다. 퓨즈 교체작업의 일반적인 세부 절차를 아래와 같이 제시하고, 각 직무에 대한 성공과 실패확률 데이터를 적용하여 휴먼에러를 고려한 경우에 교체작업이 성공적으로 수행될 확률을 구한다. 그리고 교체작업 중 발생할 수 있는 치명적인 재해형태인 감전이라는 사상에 대한 휴먼에러확률을 구하기 위해 ETA(Event Tree Analysis) 기법을 도입하였다. [그림 16]에서는 건설현장의 퓨즈 교체작업의 절차 중 직무 4의 ASS 개방을 위한 작업모습을 보여주고 있다.

- 직무 1. 작업내용 파악 및 현재 상황 확인
- 직무 2. 보호구 착용
- 직무 3. 임시전력설비의 펜스 및 분전반 잠금장치 해제
- 직무 4. Hook 봉으로 ASS(Automatic Section Switch) 개방
- 직무 5. 콘덴서 방전
- 직무 6. 변압기 각 상(R, S, T)을 접지
- 직무 7. Hook 봉으로 퓨즈를 분리

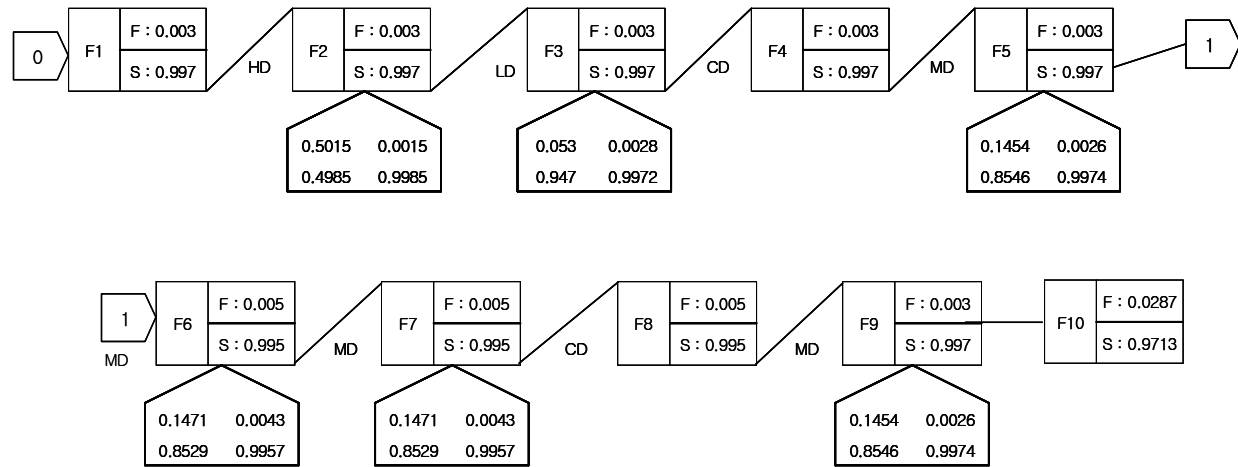
- 직무 8. Hook 봉으로 퓨즈 교체
- 직무 9. Hook 봉으로 ASS 투입



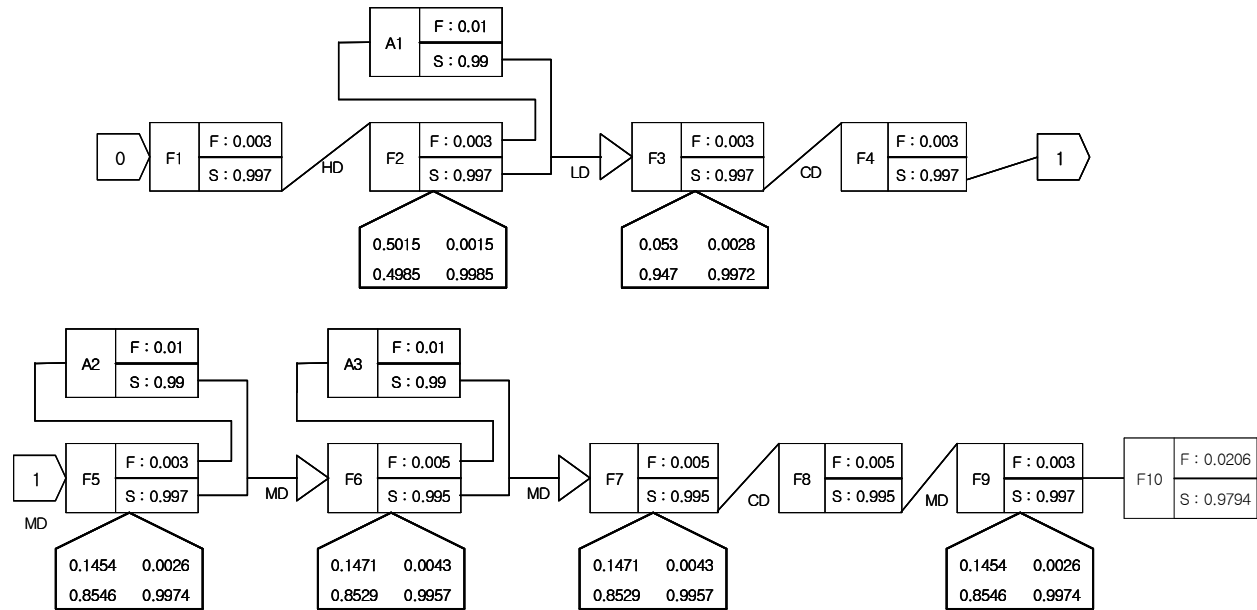
[그림 16] 전력용 퓨즈 교체 작업

각 직무에 대한 입력자료는 휴먼에러율에 대한 데이터가 전무한 상태여서 Swain과 Guttman의 "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on an Nuclear Power Plant Applications" 보고서에 인용된 인간신뢰성 자료표를 이용하여 가장 유사한 직무에 대한 확률값을 이용하였다. 자료표에서 각각 세분화된 직무의 실패확률(불신뢰도)은 대수 정규분포를 따른다고 가정하고 있다. 이러한 자료는 원자력발전소의 휴먼에러를 규명하면서 축적된 것으로 임시전력설비의 경우와는 차이가 있다는 사실을 배제할 수 없다. 그러나 많은 문헌이나 논문 등에서 관련분야의 휴먼에러확률의 데이터 적용이 어려운 경우에 이 자료를 기준으로 사용하여 좋은 결과를 얻고 있다. 다만 각 분야에

적합한 휴먼에러 확률의 데이터화가 이루어진다면 좀더 인간신뢰성분석에 있어 신뢰성을 높일 수 있으며, 또한 연구 성과와 현실문제 적용성간의 격차를 줄일 수 있을 것이라 생각된다. 임시전력설비의 전력용 퓨즈 교체작업에서 각 직무순서에 따른 종속성은 건설현장에서 전기업무를 담당하고 있는 안전관리자와의 면담을 통하여 작업요소간의 상호연관관계를 파악하였다. 이러한 과정을 거쳐서 작성된 전력용 퓨즈 교체 작업시의 DeBDA(Detailed Block Diagram Analysis)을 이용하여 구성된 종속성 모형을 [그림 17]~[그림 18]에서 보여주고 있다. [그림 17]은 직무 중간에 확인이나 점검이 없는 경우를 나타내는 모형이다. [그림 18]은 직무들 사이에 보호구 착용을 확인하는 직무 A1, 콘덴서 방전을 확인하는 직무 A2, 그리고 변압기 접지를 확인하는 직무 A3를 삽입한 경우의 종속성 모형을 보여주고 있다.



[그림 17] 전력용 퓨즈 교체 작업시 인간신뢰성 계산(확인작업이 없는 경우)



[그림 18] 전력용 퓨즈 교체 작업시 인간실패성 계산(확인작업이 있는 경우)

각 직무에서의 작업을 성공적으로 수행할 때 전체작업의 성공 확률은 <표 15>의 식을 이용하여 각 직무간의 종속성을 고려하여 계산하고 이를 토대로 식 (5)에 의하여 계산한다. i 는 각 직무순번이고, $R_i(t)$ 는 i 번째 직무의 성공확률을 나타낸다. 작업의 성공적 수행확률은 각 직무의 개별적 성공확률을 축차적으로 곱하여 얻을 수 있는데 여기에 각 직무에서의 종속성이 영향을 미치게 된다.

$$R(t) = \prod_{i=0}^n R_i(t) \quad (5)$$

기본 휴먼에러 확률값을 근거로 하여 전력용 퓨즈 교체작업의 성공 및 실패확률을 계산한 결과, 확인작업이 없는 경우의 성공확률은 0.9713, 실패확률은 0.0287이고, 확인작업이 있는 경우의 성공확률은 0.9794, 실패확률은 0.0206이다. 직무 중간의 확인 작업으로 인해 성공확률이 0.0081이 더 높게 나왔다. 이는 확인작업의 유무가 직무 작업시 큰 도움을 줄 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 작업자의 교육이나 훈련, 상호연락 체제의 명확화가 이루어져야 한다는 것을 보여준다.

전력용 퓨즈 교체작업에 대한 직무분석 중 임시전력설비에서 발생할 수 있는 치명적인 재해형태인 감전사고라는 사상에 대한 휴먼에러확률을 구한다. 직무 중 2, 4, 5, 6에 해당하는 직무들이 감전사고를 일으킬 수 있는 중요한 직무들이기 때문에 ETA를 이용한 분석에서 이 직무들을 이용하였다. 마찬가지로 직무에 대한 각 사상의 발생은 종속성 모형에 가정을 두었다. 이것은 각 사상이 독립이라는 가정을 했을 경우 지나치게 단순화된 작업분석이 되어 현실적인 문제와 다른 결론을 내릴 수 있다는 단점을 해소하기 위한 개념이다. 전력용 퓨즈 교체 작업 중

$$\Pr\{\text{case 4}\} = R_4(t) = F_2F_4 = 3.082 \times 10^{-2}$$

감전사고가 발생하는 일련의 직무들은 THERP의 기본 이론에 따라 감전의 휴먼에러확률을 이용하였으며, 각 직무의 실패 여부가 다음 직무의 실패에 영향을 미치기 때문에 종속성 모델을 이용하였다.

위의 분석에서 임시전력설비의 퓨즈 교체작업시 감전의 위험을 일으킬 수 있는 휴먼에러확률이 가장 높은 경우로는 직무 2의 실패와 직무 4의 실패라 평가할 수 있다. 직무 4에 대한 확인만이라도 제대로 되었다면 감전사고를 발생시키는 휴먼에러확률을 감소시킬 수 있다. 즉, 퓨즈 교체작업에서 작업효율을 저해하는 보호구를 제거하는 작업자나, ASS 개방시 완전개방을 확인하지 않는 작업자에 대한 안전의식 함양과 교육을 지속적으로 실시하고, 작업현장의 감독을 철저히 하는 것이 사고의 빈도 및 확률을 낮출 수 있다고 평가된다.

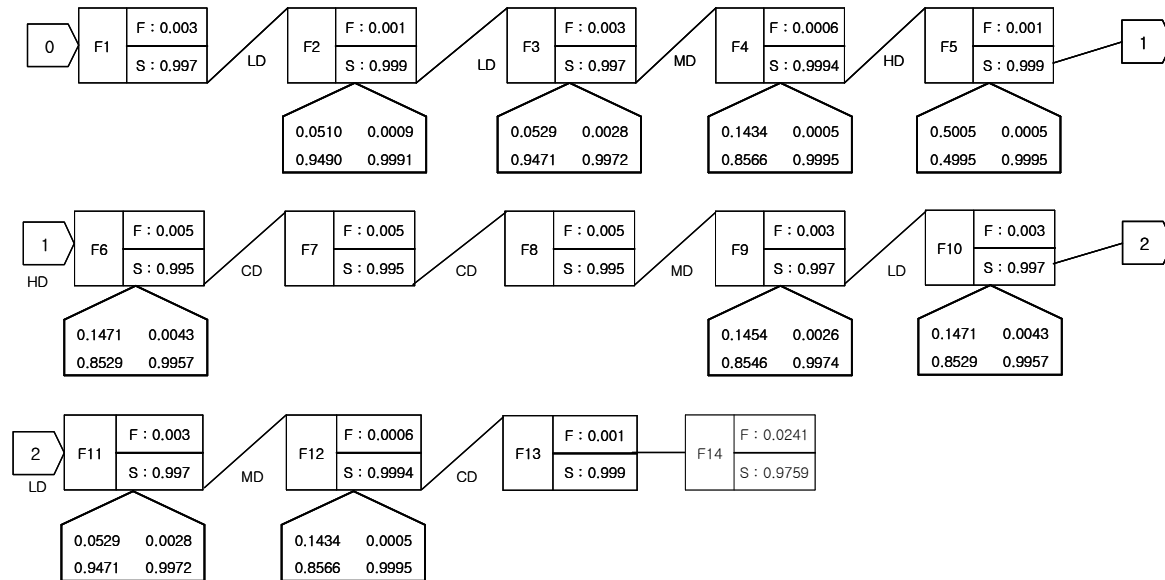
(2) ASS 교체 작업

임시전력설비의 ASS 교체작업에 있어 인간의 불안전행동을 초래하는 작업요소를 분석하기 위해 교체작업에 대한 세부 절차를 다음과 같이 보여주고 있다. 각 직무에 대한 휴먼에러확률은 Swain 보고서에서 유사한 직무를 선택하여 적용하였다. 직무간의 상호 연관관계는 종속성 모형으로 파악하였다. 각 직무에 대한 성공과 실패 확률 데이터를 적용하여 교체작업이 성공적으로 수행될 확률을 구하였다. 작업 중 발생할 수 있는 감전사상에 대한 휴먼에러확률을 구하기 위해 ETA(Event Tree Analysis)기법을 도입하였다.

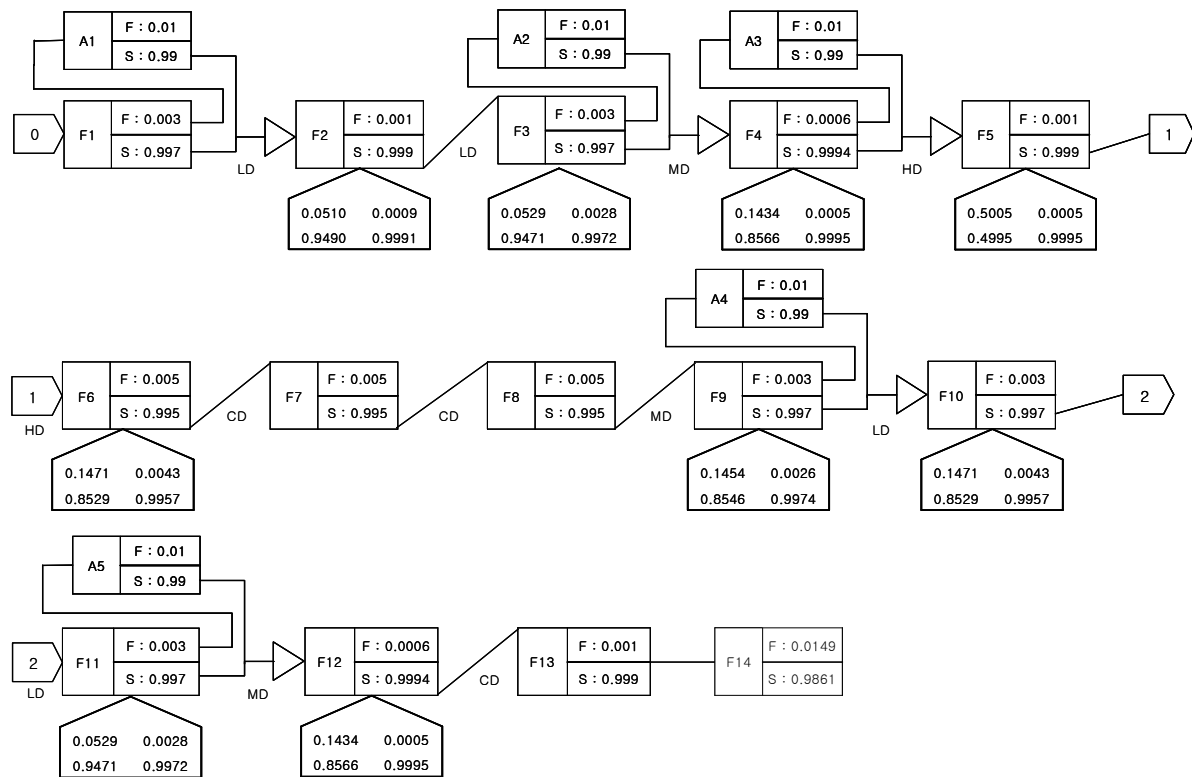
- 직무 1. 책임분기점 COS 개방
- 직무 2. ASS 축전지 전압, 전류 확인

- 직무 3. 제어함의 개폐조작 자동으로 선택
- 직무 4. 제어함 개방 스위치 누름
- 직무 5. ASS 개방 램프 확인
- 직무 6. ASS 부하측, 전원측 터미널 분리
- 직무 7. ASS 교체
- 직무 8. ASS 부하측, 전원측 터미널 연결
- 직무 9. 책임분기점 COS 투입
- 직무 10. ASS 축전지 충전전압 및 전류 확인
- 직무 11. 개폐조작 자동으로 선택
- 직무 12. 제어함 투입 스위치 누름
- 직무 13. 제어함에서 ASS 활선상태 확인

이러한 과정을 거쳐서 작성된 전력용 퓨즈 교체 작업시의 DeBDA를 이용하여 구성된 종속성 모형을 [그림 20]과 [그림 21]에서 보여주고 있다. [그림 20]은 직무 사이에 확인이나 점검이 없는 경우를 나타내는 모형으로 ASS 교체 작업에 대한 성공확률은 0.9759이고, 실패확률은 0.0241이었다. [그림 21]은 직무 사이에 책임분기점 COS 개방 확인, 개폐조작 자동 선택 확인 등 인간행동에 대한 확인작업을 넣은 모형이다. 이때 교체 작업에 대한 성공확률은 0.9861이고, 실패확률은 0.0149의 값을 갖는다. 이는 확인작업이 퓨즈 교체 작업에서도 나와 있듯이 ASS 교체 작업에 대해서도 아주 중요한 인간행동으로 받아들일 수 있는데 즉, 작업 중 작업자간의 의사소통, 작업절차의 준수 등이 휴먼에러에 의한 직무실패를 줄일 수 있을 것이다.

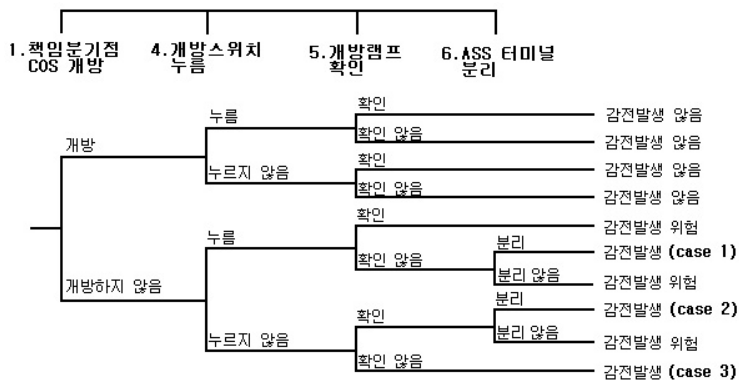


[그림 20] ASS 교체 작업시 인간신뢰성 계산(확인작업이 없는 경우)



[그림 21] ASS 교체 작업시 인간신뢰성 계산(확인작업이 있는 경우)

ASS 교체작업에 대한 직무분석 중 발생할 수 있는 감전 사상에 대한 휴먼에러 확률을 구하기 위해 감전사고를 일으킬 수 있는 직무를 선정하였다. 그것은 직무 중 1, 4, 5, 6에 해당하는 직무들로 ETA에서 이를 이용하여 분석하였다. 마찬가지로 직무에 대한 각 사상의 발생은 종속성 모형에 가정을 두었다. ASS 교체작업 중 감전이라는 사상이 발생할 상황에 대해 [그림 22]와 같은 ETA를 실시하였다.



[그림 22] ASS 교체 작업시 감전사고 ETA

[그림 22]의 사상수목에서 감전 발생의 첫 번째 경우는 ① 직무 1: 책임분기점 COS개방을 하지 않고, ② 직무 4: 개방스위치를 누르고, ③ 직무 5: 개방램프를 확인하지 않고, ④ 직무 6: ASS 터미널을 분리하는 일련의 작업으로 구성된다. 이 경우 휴먼에러를 포함한 일련의 사상들이 연속적으로 발생하여 감전이라는 사고로 이어지는 휴먼에러 확률은 다음과 같다.

$$\text{Pr}\{\text{case 1}\} = R_1(t) = F_1S_4F_5S_6 = 1.497 \times 10^{-6}$$

여기서, F는 사상의 실패이고, S는 사상의 성공이며, 첨자는 절차상의 직무번호를 나타낸다. 같은 방법으로 각 경우에 대한 감전발생 휴면예러확률을 구한다.

$$\text{Pr}\{\text{case 2}\} = R_2(t) = F_1F_4S_5S_6 = 1.497 \times 10^{-6}$$

$$\text{Pr}\{\text{case 3}\} = R_3(t) = F_1F_4F_5 = 7.5 \times 10^{-10}$$

감전사고가 발생하는 일련의 직무들은 각 직무의 실패 여부가 다음 직무의 실패에 영향을 미치기 때문에 종속성 모델을 이용하였으며, THERP의 기본 이론에 따라 감전사고의 휴면예러확률을 계산하였다.

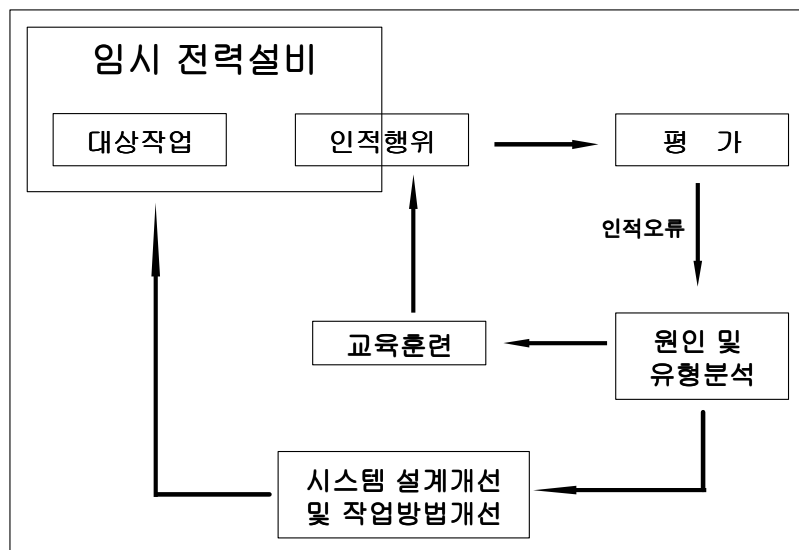
위의 분석에서 임시전력설비의 ASS 교체작업시 감전의 위험을 일으킬 수 있는 휴면예러확률이 가장 높은 경우 직무 1의 성공이나 실패 여부에 달려있다고 할 수 있다. ASS 개방시 전기안전공사 관계자와 현장 작업자간의 의사전달이 중요하며, 작업 시작전 교육을 실시하고, 작업현장의 감독을 철저히 하는 것이 사고의 빈도 및 확률을 낮출 수 있다고 평가된다.

따라서 인간신뢰성 분석을 통하여 임시전력설비의 다른 일반적인 작업에서 휴면예러에 기인된 사고를 예방하기 위해서는 안전을 확보하기 위한 작업자의 기본적 자세가 중요하며 이를 기본으로 다양한 작업에 대한 철저한 분석을 통한 대책수립이 필요하다.

라. 인간신뢰성 분석 구도

본 연구에서 임시전력설비에서 행해지는 특정작업에서의 인간오류를 해석하기 위하여 가장 널리 사용되는 THERP 기법을 적용하였다. 이

기법은 인간을 작업이라는 시스템을 구성하고 있는 하나의 요소로 간주하고 인간의 내적인 특성을 고려해서 하드웨어의 신뢰성 분석과 유사한 방법으로 인적오류에 대한 정량적 분석을 수행하는 방법이다. 즉, 주어진 환경내에서 주어진 시간동안에 주어진 작업을 오류를 범하지 않고 수행할 확률을 분석하는 것을 의미한다. 이 방법은 물리적이고 반복적인 일상 작업을 대상으로 할 때 그 유용성이 인정되나 인간의 정보처리 과정에서의 인적오류 발생 메커니즘을 고려하지 못하고 오류간에 형성되는 상호 인과관계를 반영하지 못하며 오류에 대한 적절한 대처방안의 도출이 어렵다는 점은 있다. 그러나 규정된 안전성을 충족시키기 위한 평가나 작업직무간의 안전성을 상호 비교하는 등에는 활용할 수 있다. 작업을 수행하는 과정의 인적오류를 분석하고 이를 토대로 동일 작업에서의 인적오류의 발생을 억제하기 위한 기본 구도는 [그림 23]과 같다.



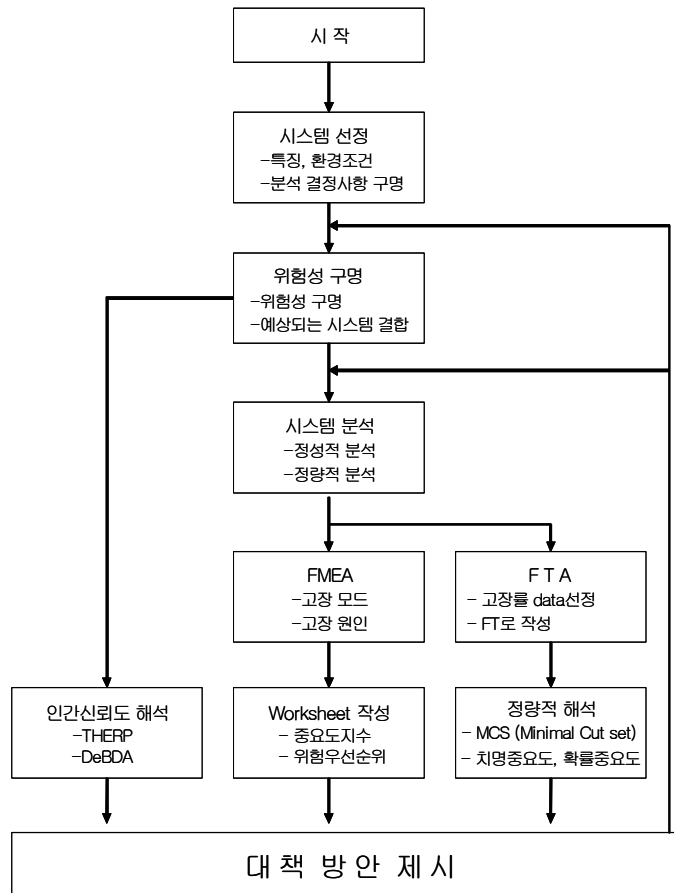
[그림 23] 인간신뢰성 분석 기본 구도

[그림 23]에서 살펴보면 인간신뢰성 해석을 통한 인적오류의 확률적 분석을 위한 과정을 본 연구에서 수행을 하였다. 반면에 임시전력설비에 서 행해지는 작업은 특성상 고도의 인지적 과정이 필요한 것으로는 볼 수 없는 작업이기에 인지적 요소에 대한 분석이나 분류를 하지 않았으며 아울러 인적 오류의 심리적 원인이나 유형의 분석은 여러 가지 제약으로 인해 수행할 수 없었다. 또한 인적오류의 분석 결과 이에 대한 대응책으로 교육·훈련의 필요성은 역설할 수 있었으나, 작업도구나 작업과 관련된 설비의 설계개선에 대한 대응책의 제시는 적절하게 할 수 없었다.

IV. 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델

1. 평가모델 흐름도

임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 평가하기 위하여 우선 시스템의 조건이나 분석대상을 결정한 후 이 시스템의 위험성을 규명하였다. 시스템분석은 FMEA를 통해 정성적으로 분석하고, 가장 중요한 고장사례를 설정한 후 FTA를 적용하여 정량적으로 해석하였다. 그리고 작업자의 인적오류를 해석하기 위하여 THERP 기법을 적용한 DeBDA를 이용하였으며 이러한 과정을 통하여 임시전력설비의 신뢰성과 안전성을 평가하여 사고를 일으키는 주요인자와 발생확률에 관한 측정값을 평가할 수 있었다. 본 연구에서 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 평가하기 위해 적용한 기법들간의 자료의 수순 및 분석과정을 보여주기 위한 절차를 나타내는 흐름도는 [그림 24]에 제시되어 있다.



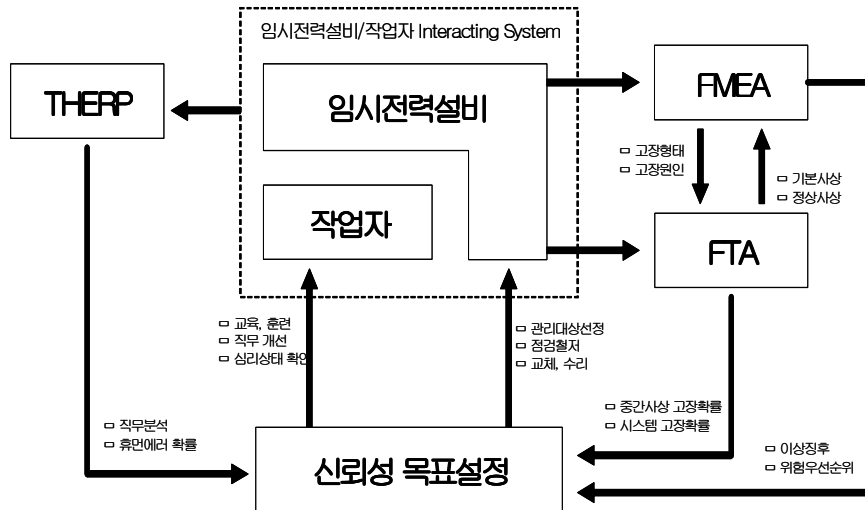
[그림 24] 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 분석 절차 흐름도

2. 평가모델 개발

임시전력설비에서 빈번하게 발생하는 사고의 원인 및 형태를 규명하고 대책을 수립하기 위하여 각 부품에 대한 정성적인 분석인 FMEA, 고장에 대한 정상사상과 기본사상으로 FT도를 작성하고 정량적 분석이 가능한 FTA, 휴먼에러에 의한 사고발생 가능성을 확인하기 위해

인간신뢰성 분석기법중 가장 많이 사용되는 THERP 기법을 기초로 하여 DeBDA와 ETA 등을 실시한다. 이러한 여러 분석기법들을 상호보완적 적용을 통하여 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 향상시키고, 평가 결과를 활용하여 보다 신뢰성이 높고 사고 및 재해의 가능성을 낮출 수 있는 임시전력설비 신뢰성 및 안전성 평가 모델의 개발이 가능하다. [그림 24]에서의 자료의 흐름 및 분석기법 사이의 관계를 바탕으로 본 연구에서 제시하는 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가 모델은 정성적 평가와 정량적 평가를 동시에 수행하고 사고에 기인하는 인적오류 분석을 위한 인간신뢰성 분석기법을 도입하여 평가하였다. 이 과정에서 Relx Ver. 7.0 Software를 사용하고 분석기법의 장점을 취하고 단점을 보완함으로써 분석과정에서 발생할 수 있는 오류를 방지할 수 있으며 분석 절차 및 내용을 일관성 있게 유지할 수 있다. 이에 따라 분석하고자 하는 임시전력설비에 대하여 분석자 개인간의 편차를 줄일 수 있으며 신뢰성 분석에서 흔히 발생하는 임의성을 최소화하여 보다 높은 객관성과 신뢰성을 유지할 수 있다.

임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가 모델을 제시하면 [그림 25]와 같다. 임시전력설비에 대한 정성적 분석인 FMEA를 통한 이상징후와 위험우선순위를 선정하면서, 정량적 분석인 FTA를 통해 부품 및 시스템의 고장률을 계산한다. 이것을 미리 설정된 신뢰성 목표와 비교하여 설비에 대한 관리대상선정, 점검, 그리고 교체 및 수리 등의 조치를 취함으로써 임시전력설비의 신뢰성을 향상시킨다. 설비측면과 휴먼에러측면의 신뢰성을 상호보완적 적용을 위해 인간신뢰성분석인 THERP 분석으로 직무분석과 휴먼에러확률을 계산하고 작업자에 대한 직무개선, 교육 및 훈련 등을 실시함으로써 임시전력설비 및 작업자에 대한 신뢰성을 개선할 수 있는 모델을 제시하고 있다.



[그림 25] 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가 모델

3. 평가모델 적용 결과 및 고찰

임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 평가하기 위해 개발한 평가 모델을 적용하여 도출한 결과를 살펴보면 임시전력설비의 운용 및 유지에 매우 중요한 정보를 제공함을 알 수 있다. 이를 통해 개발된 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델의 타당성을 추정할 수 있다. 분석과정에서 다양한 형태의 자료 및 정보의 확보가 가능하며 그 중에서 주요한 결과를 제시하면 다음과 같다.

첫째, FMEA 분석 결과 시스템의 정전을 일으키는데 가장 큰 영향을 미치는 설비는 RPN값이 큰 콘덴서, 변압기, 피뢰기 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} (건/백만시간)이고, MTTF는 약 0.54 년이 되어 임시전력설비의 고장이 최소 6개월에 한번씩은 정상사상이 발생하는 것으로 해석되었다. 또한 설비가 한번 설치되면 공사가 끝날 때까지 외부 환경이라는 악조건에 노출되어 운전을 하기 때문에 FTA 분석시 임시전력설비의 운전시간을 길게 하면 할수록 MTTF는 점점 짧아질 것이다.

셋째, 감전재해에 대한 정성적인 FTA 결과 충전부접촉에 의한 전격재해의 경우 차단기 미설치, 전선의 절연열화로 인한 절연파괴, 불안전행동에 의해 발생되며, 인체선간단락의 경우 작업불량, 방호구 및 보호구 미착용 그리고 보호장치 동작실패, 누전의 경우 접지불량 및 차단기 미설치, 고압부 접근의 경우에는 전기위험성의 인식부족, 방호구 미설치 등이 감전사고의 원인으로 나타났다.

넷째, 치명 중요도 평가 결과 정전이라는 정상사상의 발생확률을 감소시키기 위한 즉, 임시전력설비의 신뢰성을 개선하기 위한 기본사상들은 변압기의 “송유펌프 고장”, “유류밸브 고장”, “배유밸브 고장”, 그리고 “냉각팬 고장”이라는 사상들이며, 설계 초기부터 위의 부품을 고신뢰성 부품으로 사용한다면 임시전력설비 시스템의 신뢰성은 증가할 것이다.

다섯째, Birnbaum 중요도 평가 결과 단일 고장으로 정상사상을 발생시키는 데 큰 영향을 미치는 기본사상들은 변압기내의 “방압판 변형”인 경우와 “방압판 고장”으로 해석되었다.

여섯째, 전력용 퓨즈 교체 작업시 인간신뢰성분석을 통해 “보호구 미착

용”과 “ASS 개방 미확인”이라는 휴먼에러에 의해 감전사고를 일으킬 수 있는 휴먼에러확률이 3.082×10^{-2} 로 평가되어 이 직무에 대한 철저한 통제가 필요하다. ASS 교체작업시 직무사이에 확인직무가 없는 경우 성공확률은 0.9759이고, 확인직무가 있는 경우 성공확률은 0.9861로 작업자간의 원활한 의사소통의 중요성이 강조되고 있다.

개발된 평가모델에서는 FTA에 의해 FMEA에서 다루지 못한 정량적인 분석을 병행하여 임시전력설비에 대한 신뢰성 및 안전성에 대하여 좀 더 효과적으로 분석할 수 있었다. 정성적인 FMEA와 정량적인 FTA에 의한 해석 결과가 서로 일치하게 나타나는 부분이 있는 반면에 서로 다른 결과를 나타내는 경우도 있었으며, 이는 두 방법의 상호보완적 적용에 대한 필요성을 제시하는 것으로 해석할 수 있다. 설비측면의 신뢰성 향상과 더불어 작업자의 신뢰성을 확보하기 위해 THERP기법을 이용하여 인적과오에 대한 정량적 분석을 실시하였다. 그러나 대상 임시전력설비에 대한 고장통계 및 고장률 데이터의 미비로 해석결과의 현장적용 신뢰성과 정확성에 대해서는 추후 연구를 통해 일부 수정이 필요할 것으로 판단된다. 또한 현재 임시전력설비의 열악한 환경에서 높은 신뢰성을 유지하기 위해서는 Stand-by 구조 시스템 모델에 대한 경제성을 신중하게 검토해야하며, Markov Model 분석기법을 이용하여 신뢰성 평가 등을 통하여 높은 신뢰성과 안전성을 확보할 수 있는 임시전력설비의 개발을 위해 지속적인 노력을 기울여야 하겠다.

V. 결 론

본 연구는 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성을 평가하기 위한 것으로 고장 양식 및 영향 분석(Failure Modes and Effects Analysis ; FMEA)을 통해 정성적으로 분석을 하였고, 가장 중요한 고장모드를 설정한 후 고장수목분석(Fault Tree Analysis ; FTA)을 실시하였다. 임시전력설비 작업자의 인적오류를 해석하기 위한 인간신뢰성 해석기법인 THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)기법을 적용하였다. 이 방법들의 상호보완적 적용을 통해 개발한 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가 모델을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임시전력설비의 신뢰성과 안전성을 평가하기 위해 FTA와 FMEA기법을 이용한 정성적 평가와 정량적 평가를 상호보완적으로 수행하고, 사고에 기인하는 인적오류 분석을 위한 THERP 기법을 도입함으로써 신뢰성 및 안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 평가모델을 제시하였다.

(2) 제안된 평가모델을 이용한 임시전력설비의 신뢰성 평가를 통해 임시전력설비의 주요 고장원인이 변압기에 의한 것으로 나타났으며, 이로 인한 정전사고는 0.5회/년 정도의 고장률로 추정되었다.

(3) 임시전력설비에서 발생 가능한 다양한 고장모드에 대한 분석 및 원인 추정, 이에 따른 대책제시, 위험도 평가를 수행하여 제시함으로써 설비 운용의 활용도 및 효율화를 추구하였다.

(4) 휴먼에러 분석을 위해 감전사고가 빈발한 특정작업에서 작업절차상

의 직무분석시 직무와 직무사이에 “확인”이라는 작업절차가 도입되는 경우에 휴먼에러로 인한 사고를 감소시킬 수 있다는 사실에 대한 정량적 평가가 가능하였다.

(5) 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델은 임시전력설비뿐만 아니라 수변전설비 및 기타 전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가에도 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

(6) 임시전력설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델의 전 과정을 컴퓨터 프로그래밍화를 통한 온라인화를 이룩함으로서 그 활용능력을 극대화하여 전력계통을 포함한 산업전반에 활용 가능한 시스템으로의 개발이 요구된다.

< 참 고 문 헌 >

- [1] 박경수, 신뢰성개론, 영지문화사, 1996
- [2] 신석화, 전기설비설계, 사이텍미디어, 2002
- [3] 전기설비관리지침, 대한홍보사 출판부, 1989
- [4] 大浜庄司 著, 박한중 譯, 전기설비보수와 제어, 성안당, 1998
- [5] 김희진, 신재화 共著, 차단기, 단로기의 보수유지입문, 성안당, 1997
- [6] 일본 Ohm社 전기와 공사 편집부 編, 박한중 譯, 전기설비 실무 텍스트, 성안당, 1998
- [7] 大浜庄司 著, 박한중 譯, 전기관리기술자실무입문, 성안당, 1997
- [8] 건설현장의 전기안전, 한국산업안전공단, 2001
- [9] 전기설비의 계측실무와 트러블 대책입안, 중부전기보안협회, 김영록 譯, 성안당, 1997
- [10] Nihon Denki Gakkai, 전기설비의 진단기술, 대한전기협회, 1994
- [11] 박동화, 정용기, 이순형 共著, 수변전설비의 계획과 설계, 의제, 1994
- [12] Puligandla Viswanadham & Pratap Signh, Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages, Chapman&Hall, 1998
- [13] William Denson, William Crowell, Paul Jaworski, David Mahar, Failure Mode/Mechanism Distributions, RAC, 1997
- [14] William Denson, William Crowell, Paul Jaworski, Greg Chandler, Amy Clark, Noelectronic Parts Reliability Data, RAC, 1995
- [15] Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, A.D.Swain, H.E.Guttman, 1983
- [16] J.I.Ansell & M.J.Phillips, Practical Methods for Reliability Data Analysis, Oxford, 1994

- [17] J.Flamm and T.Luisi, Reliability Data Collection and Analysis, Kluwer Academic Pub., 1992
- [18] Don O. Koval, H Landis Floyd.II, "Human Element Factors Affecting Reliability and Safety", IEEE Transactions on IA, Vol.34, No.2 March/April, 1998
- [19] Giuseppe Parise, Erling Hesla, "Clearing Procedures in Electrical Installations : The Electrical Status Space as Model for Training and Planning", IEEE Transactions on IA, Vol.38, No.3 May/June, 2002
- [20] W Fordham Cooper, D A Dolbey Jones, "Electrical Safety Engineering " Butterworth Heinemann, 1993
- [21] 塩見 弘, 島岡 淳, 石山敬幸, FMEA, FTAの活用, 日科技連, 1987
- [22] 鈴木順二郎, 牧野鐵治, 石坂茂樹, FMEA, FTA 實施法, 日科技連, 1995
- [23] 小野寺勝重, 実践 FMEA 手法, 日科技連, 1998
- [24] 제품안전을 위한 리스크 평가기법 및 소프트웨어 활용지침, 한국표준협회, 2001
- [25] 이한길 監譯, FTA 안전공학, 기전연구사, 1992
- [26] Stamatis, D.H., Failure Mode and Effect Analysis-FMEA from Theory to Execution, *ASQ Quality Press*, 1995

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의
개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견
해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원 원장

임시전력 설비의 신뢰성 및 안전성 평가모델 개발 연구

(안전분야-연구자료 연구원 2003-48-459)

발 행 일 : 2003년 10월

발 행 인 : 한국산업안전공단 이사장 김용달

연구책임자 : 충북대학교 교수 김두현

발 행 처 : 한국산업안전공단 산업안전보건연구원

주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-4

전 화 : (032) 5100-842

F A X : (032) 5100-867

뒷면