

# 전기철도 고압배전시스템의 공급신뢰도 향상 방안 연구

## Improvement Method of Supplying Reliability on the Electric Railway Power Distribution System

김영선\*                      창상훈\*\*                      김왕곤\*\*\*  
Kim, Young-Sun   Chang, Sang-Hoon   Kim, Wang-Gon

---

### Abstract

High quality power supplying of power distribution system in electric railway system is the important function. Power feeding system is complicated witch is compose with distribution line, circuit break, protection facilities and so on. Among this components, role of substation is most important for elevation of reliability in electric power system. Therefore, the enhanced reliability considering the preventive inspection, repair work, replacement is necessary. In this study, a proposed the enhanced reliability method through a calculation of fault probability in power feeding system.

---

### 1. 서론

전기철도 고압배전설비의 가장 중요한 임무는 정전 없는 양질의 전력을 안정적으로 공급하는 것이라 할 수 있다. 전력 공급에는 복잡한 설비로 구성된 여러 단계의 고장을 거치게 되는데 이 중 중간 단계에 해당하는 변전소의 역할은 공급신뢰도에 중요한 역할을 담당하고 있다. 따라서 변전설비 운영의 신뢰도를 향상시키기 위해 설비에 대한 예방점검, 보수, 교체 등의 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 우리가 사용하고 있는 설비들은 완벽하지 않기 때문에 무고장 운영을 실현하기에는 어려운 것이 사실이다. 모든 설비는 성능 보장을 위한 수명이 정해져 있으므로 시간의 경과에 따라 노후되며, 그 결과로서 자연히 설비의 동작 신뢰도가 저하되어 간다고 할 수 있다.

전력계통의 신뢰도 평가는 기본적으로 사고에 의한 공급능력의 “부족량”의 계산에 의해 이루어진다. 이것을 정식화면에서 공급신뢰도의 평가는 “공급지장량을 최소화”하는 문제가 되며, 이후 평가방법의 패러다임에 따라 확정론적(deterministic) 또는 확률론적(probabilistic) 지수(index)의 산정문제로 귀착된다.

본 논문에서는 전기철도 고압배전설비의 수명특성에 따른 고장확률에 의해 고장이 발생하는 것으로 가정하여 이 고장확률을 근거로 시스템에 대한 신뢰도를 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법을 이용하여 구하였으며 시스템의 현재 신뢰도와 신뢰도 저하의 주요인을 분석, 이를 향상시키기 위한 방안을 제시하였다.

### 2. 신뢰도 해석기법

#### 2.1 신뢰도와 수명관계

고장데이터나 수명데이터에 관한 기본적인 통계적 성질을 어느 정도 파악하고 있다면 이것을 기초

---

\* 서울산업대학교, 철도전문대학원 철도전기,신호공학과 석사과정

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 공학박사, 정회원

\*\*\* 서울산업대학교 전기공학과 교수, 공학박사.

로 하여 부품이나 시스템의 장기적인 성능을 사전 평가할 수 있다. 장치의 수명은 신제품인 장치가 갖고 있는 ‘정상적으로 동작할 수 있는 시간 또는 고장 날 때 까지의 시간에 대한 기대치로서 결정된다. 즉, 동일한 종류의 장치에서도 고장이 발생할 때까지의 시간은 하나하나가 달라지는 것이 보통이다. 따라서 설비의 수명을 생각할 때에는 다수의 같이 장치에 대한 통계적인 성질 즉, 기대치로서의 의미를 갖게 된다.

대상으로 하는 설비나 장치가 지정되는 조건하에서 지정된 기간 및 지정된 기능을 갖는 확률을 신뢰도라고 하고 지정된 기능을 갖지 못하게 되는 것이 고장이다. 대상으로 하는 장치가 고장날 때까지 사용시간의 합계를  $X$ 라 한다면  $X$ 는 확률변수이며, 이  $X$ 가 주어진 시간보다 크게 되는 확률  $P(X > t)$ 가 신뢰도함수 또는 신뢰도  $R(t)$ 이다. 결국

$$P(X > t) = R(t) \quad (t > 0) \quad (2.1)$$

이 된다. 반대로  $X$ 가 주어진 시간  $t$ 보다 작아지는 확률  $P(X < t)$ 가 누적고장분포함수 또는 불신뢰도  $F(t)$ 로

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.2)$$

가 된다. 이  $F(t)$ 에는 통상적으로 와이블 분포를 가정하는 누적분포 함수를 이용하는 경우가 많다.

시간에 관한 와이블 분포에서는 시간의 위치 파라미터  $t_1$ 을 영(zero)으로 생각하는 경우가 많으며 이 때에는

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_s}\right)^m\right] \quad (2.3)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{t_s}\right)^m\right] \quad (2.4)$$

등으로 된다. 또 고장밀도 함수  $f(t)$ 는

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.5)$$

이 된다. 이것을 통상적으로 파괴확률 밀도분포라고 부르며 만약 와이블 분포인 경우

$$f(t) = m \cdot \frac{t^{m-1}}{t_s^m} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{t_s}\right)^m\right] \quad (2.6)$$

이 된다. 그리고 고장율  $\lambda(t)$ 는

$$\lambda(t) = \frac{[dR(t)/dt]}{R(t)} \quad (2.7)$$

이 되어 고장 없이 작동해온 장치가  $t + dt$  동안에 고장이 발생하는 조건부 확률에 상당하는 것이다.

## 2.2 해저드(hazard) 해석

수명평가지험은 가장 중요한 시험의 하나이지만 통상적으로 많은 시간과 비용이 소모되는데 충분한 시험이 실시된다고 할 수 없다. 경우에 따라서는 공시시료중 일부 시료의 파괴데이터가 얻어진 단계에서 시험을 중지하는 경우도 있다. 이와 같은 불완전한 데이터나 중도에 중단하는 데이터 등을 효과적으로 수명추정에 이용하기 위한 해저드 해석법이 있다.

중도에 중단하는 경우의 해저드는 사실 고장률  $\lambda(t)$ 의 별도의 명칭이다. 식(2.7)에서 알 수 있듯이  $\lambda(t)$ 에서  $t$ 의 값을 계산할 경우에는 모든 시료의 수명데이터가 아니고  $t$ 까지 파괴된 시료의 수명데이터가 있으면 충분하다. 이것은 도중에 중단되는 경우 해저드 해석을 가능하게 하는 것이다.  $R(t)$ 와  $\lambda(t)$ 의 관계는

$$R(t) = \exp\left[\int_0^t \lambda(x) dx\right] \quad (2.8)$$

가 되어  $\lambda(t)$ 에서  $R(t)$ 를 계산할 수 있다. 이 지수부분을 누적 해저드  $H(t)$ 라고 부르며 통계량을 나타낸다.

$$H(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (2.9)$$

가 되며, 이  $H(t)$ 와  $F(t)$ 는 다음 식과 같이 밀접한 관계가 있다.

$$F(t) = 1 - \exp[-H(t)] \quad (2.10)$$

### 2.3 FMEA 기법

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법은 고장모드 영향분석을 말하며 설계단계에서 잠재적인 고장모드를 발견하기 위한 신뢰성 평가기법으로 널리 적용되고 있지만 이를 적용하기 위한 유연성이 풍부하여 제품의 life cycle중 임의의 단계에서 응용이 가능하며 제품의 개량, 제품의 기능저하 등을 미연에 방지하기 위한 방법으로 적용되고 있다. 또 이 기법은 미국의 유명한 우주계획인 아폴로 계획의 실시단계에서 신뢰성과 안전성의 평가에 주도적으로 사용된 바 있다.

FMEA 기법을 이용하여 각 기기 재료별, 부속재료별로 생각될 수 있는 열화모드(고장이 나타나는 양상)를 알아내어 열화의 원인(열화를 진전시키는 요인), 구성품에 미치는 영향(성능저하)을 검토하고 각각에 대하여 그 '발생빈도', '가혹도', '위험검출도'를 평가하여 '위험우선도'가 가장 높은 열화모드를 선정한다. '위험우선도'라는 것은 고장이 발생할 위험이 높아 주의가 요구되는 것을 말하며 우선도를 명확하게 하기 위하여 발생빈도, 가혹도, 위험검출도의 점수를 부여하여 평가한다.

복잡한 시스템의 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 시스템 운영중 각 구성품의 기능에 관련된 지식이 필요하다. 설계에서는 통상 시스템 구성도를 작성하는데 이는 특정의 고유기술면에서 구성품의 물리적인 관계를 보여주는 것이다. 따라서 신뢰성을 검토하기 위해서 신뢰성 block도가 이용된다.

신뢰성 block도는 구성품-서브 시스템-시스템 간의 기능 전달을 표시하기 위하여 각 구성품간의 기능적 결합, 각 서브 시스템간의 기능적 결합에 의하여 최종적으로 시스템의 목적 달성에 미치는 영향을 상세하게 검토하는데 이용되며, 고장원인을 block도를 이용하여 추정할 수 있다.

발생빈도, 가혹도, 위험검출도 각각의 기준은 표2.1~2.3과 같다. 표에 나타난 점수는 발생빈도를 예를 들면 각 구성 재료의 열화모드별 사고발생 확률 등으로 결정되어야 하나 데이터의 수집이 어렵기 때문에 정성적, 감성적으로 점수를 부여한 것으로 수치 자체는 각 표 안에서의 대소 관계를 나타낸 것이다.

표2.1 발생빈도의 기준

점수	기 준
5	자주 발생하는 고장모드
4	보통 이상 수준으로 발생하는 고장모드
3	보통 수준으로 발생하는 고장모드
2	적지만 발생할 수 있는 고장모드
1	거의 발생하지 않는 고장모드

표2.2 가혹도의 기준

점수	기 준
5	자주 발생하는 고장모드
4	보통 이상 수준으로 발생하는 고장모드
3	보통 수준으로 발생하는 고장모드
2	적지만 발생할 수 있는 고장모드
1	거의 발생하지 않는 고장모드

표2.3 위험도의 검출기준

점수	기 준
5	자주 발생하는 고장모드
4	보통 이상 수준으로 발생하는 고장모드
3	보통 수준으로 발생하는 고장모드
2	적지만 발생할 수 있는 고장모드
1	거의 발생하지 않는 고장모드



### 3. 고압배전설비의 열화모드 및 신뢰성 해석

#### 3.1 주요 고압배전설비의 열화모드

표3.1은 주요 고압배전설비의 열화모드를 나타낸 것이다.

구 성 품	열화모드	열화의 추정원인	저하되는 성능
지지물	녹, 부식	수분, 산소, 열, 염분	강도저하
애자	균열	냉열변화	절연내력저하
절연전선	응력부식	자외선, 수분	절연내력저하, 단선
주상변압기	탄화, 분해가스, 슬러지	열, 전계, 수분, 산소	절연내력저하, 산가저하
개폐기	탄화, 트래킹, 기밀불량	전계, 아크, 열, 수분	절연내력저하, 강도저하

#### 3.2 신뢰성 해석

고압배전설비의 신뢰성 해석에 대하여 FMEA기법을 이용하여 주요 설비에 대하여 실시하였다.

##### 3.2.1 지지물

지지물의 신뢰성 block도를 그림3.1에, 지지물의 FMEA 해석결과를 표3.2에 나타내었다.

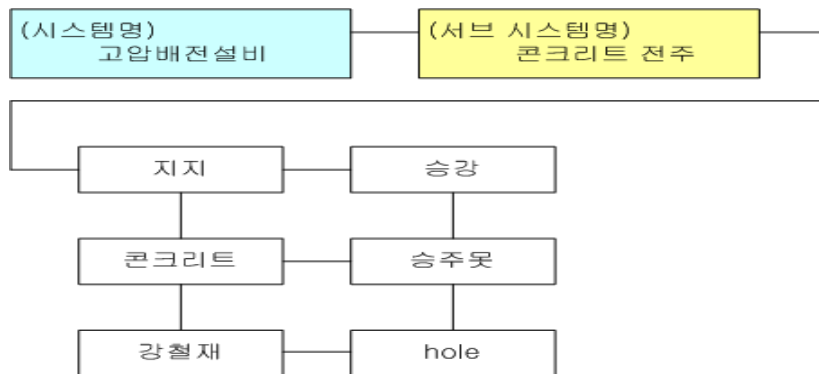


그림3.1 지지물의 신뢰성 block도

표3.2 지지물의 FMEA 해석결과

구성재료		열화모드	열화추정원인	영향	발생빈도 (1)	가혹도 (2)	위험검출도 (3)	위험우선도 (1)×(2)×(3)	
1차	2차								
콘 크 리 트 전 주	지 지	콘 크 리 트	박리 균열	알카리 반응 불평형 장력	강도저하	2	4	2	16
		강 철 재	녹 발생	수분 염분 산소	강도저하	1	4	5	20

##### 3.2.2 애자

애자의 신뢰성 block도를 그림3.2에, 지지물의 FMEA 해석결과를 표3.3에 나타내었다.

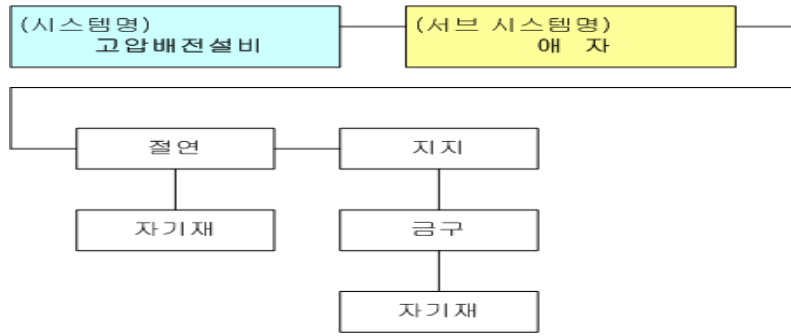


그림3.2 애자의 신뢰성 block도

표3.3 애자의 FMEA 해석결과

구성재료		열화모드	열화추정원인	영향	발생빈도 (1)	가혹도 (2)	위험검출도 (3)	위험우선도 (1)×(2)×(3)
1차	2차							
절연부	자기	균열	냉열	절연내력저하	2	4	2	16
			시멘트 경년팽창	절연내력저하	1	4	2	8
			시멘트 내부 수분 동결	절연내력저하	1	4	2	8
		관통	흡습, 수분	절연내력저하	1	4	3	12
	이상전압의 반복충격		절연내력저하	1	4	3	12	
	금구	부식	수분, 염분, 열, 가스	기계강도저하	1	2	2	4
지지부	금구	부식	수분, 염분, 열, 가스	기계강도저하	1	2	2	4

#### 4. 결론

본 논문에서는 전기철도 고압배전설비의 수명특성에 따른 고장확률에 의해 고장이 발생하는 것으로 가정하여 이 고장확률을 근거로 시스템에 대한 신뢰도를 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법을 이용하여 구하였으며 시스템의 현재 신뢰도와 신뢰도 저하의 주요인을 분석하여 제시하였다. 신뢰성 해석을 통하여 위험우선도가 높은 설비를 대상으로 집중적인 유지보수 및 점검이 이루어진다면 고장의 발생을 미연에 방지할 수 있으며, 계획적인 유지보수가 가능하게 된다.

보다 정확한 신뢰성 해석을 위해서는 각 열화모드별 사고 데이터의 관리가 필수적인 요인이라 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 창상훈 외, “산업선 전기설비 노후도에 따른 최적의 개량방안 연구”, 철도기술연구원 1997. 12.
- 2) 신뢰도지수를 고려한 배전계통의 최적 전력전송경로 결정, 전기학회논문지, 제48-A, 1999. 3.
- 3) Roy Billinton, "Power System Reliability Evaluation", pp5~38, 1977
- 4) Roy Billinton, Wenyan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", pp9~29, 1994
- 5) Roy Billinton, Ronald N Allan, "Reliability Evaluation of Power System", pp6~68, 1984