

철도전철전력설비 고장을 분석

김형철* 이병승* 박찬배* 김진오**
한국철도기술연구원* 한양대학교**

The Investigation of failure rates in traction power equipments

Hyungchul Kim* Byongsong Lee* Chanbae Park* Jin-O Kim**
Korea Railroad Research Institute* Hanyang University**

Abstract - 철도전력설비에서 고장을 예측은 신뢰성기반 유지보수 및 신뢰성 및 안전성 분석에 가장 기본적인 요소 중의 하나이다. 본 논문에서는 전철전력설비 관련 국제 규격서를 검토하여 소개하였으며, 실제 철도전력시스템에서 발생하는 사고데이터를 분석하여 그에 따른 고장율과 고장데이터가 적을 경우 추정하여 철도 급전시스템에 적용할 수 있는 데이터베이스를 구축하고자 한다. 이러한 모델과 계산법의 목적은 시스템의 신뢰도 수준 결정, 시스템의 디자인 평가, 시스템 운영, 점검, 유지보수 프로그램 방침 평가 및 위험도 평가에 기여할 수 있다

1. 서 론

시스템을 설계할 때 기술 자료가 필요하듯이 신뢰성 관리에도 기술 자료가 필요하다. 시스템은 부품으로 구성되며 이것을 조립기술로 완성한다. 고장은 부품 자체의 결함 또는 부품과 부품사이의 인터페이스 부분에서 발생한다. 결함이나 결점을 가진 부품을 제거하고, 결함이 없도록 조립을 한다면 고장은 줄어들 것이나, 그것을 보증한다는 것은 매우 어렵다. 그래서 과거의 경험 자료와 현재 평가한 자료를 조합하여 새로운 시스템설계를 하게 되는데 이러한 자료를 이용해서 시스템의 고장발생을 예측하는 기술이 필요하게 된다. 이것을 신뢰도 예측 기술이라 하며, 현재는 MIL-HDBK-217F 등을 이용, 장비의 사용 환경 조건을 입력시켜 고장률을 산출하는 예측방법이 군사 분야에 많이 활용되고 있다.

개발 중에 부적절한 설계에 의한 잠재적인 결함을 방지해 나가기 위해서는 시간과 비용상의 제약조건을 해결하고 시험평가를 실시함으로써 시스템에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 이를 위해서 과거의 경험, 공개된 유사 기술정보 및 자료 등을 모아서 설계자가 이용하기 쉽도록 표준화된 기술문서 (Technical papers)로 편집하는 것이 필요하며, 이렇게 함으로써 경제적이고 신뢰성이 높은 시스템의 설계 작업을 지원할 수 있다. 또한 이러한 문서들은 운용자에게 안내서가 될 수 있다.

특히 대량생산 시스템에서는 기초적인 기술을 표준화함으로써 보다 새로운 시스템의 개발을 촉진하게 된다. 만약 어느 시스템에 대한 기능 및 성능변경이요구될 때, 필요 부분에 한정해서 기술과 경비를 집중할 수 있는 장점이 있다.

설비의 신뢰도 예측은 항상 각 부품의 고장률 예측을 토대로 전체 합산을 하면 구할 수 있기에 부품에 대한 지식과 메커니즘은 필수라고 할 수 있다. 이 메커니즘의 연구는 과거부터 지속적으로 진행되고 있으며, 현재는 주로 능동, 집적회로뿐만 아니라 전력 설비에 대해서도 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 이러한 규격서들은 대부분 가속 수명 테스트를 통하여 수명 예측을 한 것이며 전기, 전자제품의 고장률 추이를 시간에 따라 나타낼 경우 육조 곡선(bath tub curve)을 부분적으로 따르지만 대부분 마모단계(wear-out)는 무시하고, 초기

고장(infant mortality)과 우발고장(지속형, steady state)으로 나눌 수 있다. 예를 들어 MIL-HDBK-217F의 경우 고장률 계산 모델은 모두 우발고장(steady state)을 가정하고 있지만, Telcordia에서 제정한 SR-332는 초기 1년간의 감소형 단계까지 예측할 수 있는 기능도 갖추고 있다.

고장률 예측시 한 가지 유념하여야 할 것은 이러한 규격서를 활용한 값들은 순전히 부품 고유(intrinsic)의 고장 유형에 기초를 둔 것이라는 점이다. 따라서 규격서를 완전히 믿고 제품의 실제 MTBF와 동일시하는 것은 위험한 발상일 수 있다. 실제 부품을 제조할 때의 환경 조건과 사용시에 규격서에 제시하지 않은 환경이 우발적으로 발생할 경우는 예상하지 못한 고장 메커니즘이 발생할 수 있기에 이러한 고려가 필요하다. 이를 보완하기 위해서는 예측하고자 하는 부품에 여러 가지 신뢰도 테스트 결과를 규격서의 데이터와 복합해서 사용하는 것이 가장 실용적일 수 있다.

2. 전철전력설비 관련 국제규격서

2.1 EPRI Technical Report

2003년에 출판된 Technical Report인 Reliability Centered Maintenance Technical Reference for Power Delivery는 1990년대 후반에 수행된 RCM 연구의 연장선에 있으며 전력회사들의 10년간의 RCM 노하우를 통합하여 유지보수 프로그램을 관리하는 기법에 대해 중심을 두고 정리하였다. 이 프로젝트는 이제까지의 변전소의 전력설비 관리를 위한 다양한 자료를 활용하였으며 실제 전력 회사로부터 피드백을 받아 정확한 자료를 제공하고자 노력했다. 송전과 배전을 위한 장비를 포함하였으며 이러한 장비의 유지 보수 용어와 기술들을 추가하였다.

2.2 IEEE Standards

IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)는 전기전자공학 전문가들의 국제조직으로 뉴욕에 위치하고 있으며, 2004년 현재 150개국 35만명의 회원으로 구성된 전기전자공학에 관한 최대 기술 조직으로 주요 표준 및 연구 정책을 발전시키고 있다.

2.2.1 IEEE-500

IEEE-500 규격서는 전기, 전자, 센서, 기계류의 장비에 적용할 수 있도록 작성되었으며 IEEE 352-1975(IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear-Power Generating Station Protection Systems)에서 보이는 바와 같이 원자력 발전소의 신뢰도 계산을 목적으로 하고 있다. 부록에는 신뢰도 분석가와 시스템 디자이너가 활용할 수 있도록 신뢰도 데이터와 모델을 포함하고 있다.

2.2.2 IEEE-color book

IEEE 컬러 북 규격서 시리즈는 많은 산업체들로부터 검증받은 도구이며, 산업용 혹은 상업용 전력 계통을 다루는 엔지니어를 위해 개발되었다. 용도와 대상 설비의

종류에 따라 총 13개의 책으로 구성되어 있으며 최신 설비들에 대한 접근을 가능하게 하고 있다. 컬러 북 규격서 시리즈는 다음과 같이 구성되어 있다.

표 1. IEEE-Color book 의 예

IEEE Red Book (IEEE STD 141-1993)	Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Power Plants
IEEE Green Book (IEEE STD 142-2007)	Recommended Practice for Industrial and commercial Power Systems
IEEE Gray Book (IEEE STD 241-1990)	Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings
IEEE Buff Book (IEEE STD 242-2001)	Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems
IEEE Brown Book (IEEE STD 399-1997)	Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis
IEEE Orange Book (IEEE STD 226-1995)	Recommended Practice for Emergency and Stand by Power Systems for Industrial and Commercial Applications
IEEE Gold Book (IEEE STD 493-2007)	Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial & Commercial Power Systems
IEEE Violet Book (IEEE STD 551-2006)	Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems
IEEE White Book (IEEE STD 602-2007)	Recommended Practice for Electric Systems in Health Care Facilities
IEEE Bronze Book (IEEE STD 739-1995)	Recommended Practice for Energy management in Commercial and Industrial Facilities
IEEE Yellow Book (IEEE STD 902-1998)	Guide for Maintenance, Operation and Safety of Industrial and Commercial Power Systems
IEEE Blue Book (IEEE STD 1015-2006)	Recommended Practice for Applying Low-Voltage Circuit Breakers Used in Industrial and Commercial Power Systems
IEEE Emerald Book (IEEE STD 1100-2005)	Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment

표 2. IEEE-Goldbook 의 고장율 예

Equipment	Equipment subclass	Failure rate (failures per unit-year)	Actual hours of downtime per failure	
			Industry average	Median plant average
Transformers	Liquid filled—All 300-10 000 kVA	0.0062	356.1*	—
	10 000+ kVA	0.0059	297.4*	—
	0.0153	1178.5*	—	
Rectifier transformers	Liquid filled 300-10000 kVA	0.0153	1664.0*	—
Motors > 700 hp ^b	Induction 0-1000V	0.0824	42.5	15.0
	1001-5000 V Synchronous 001-5000 V	0.0714	75.1	12.0
Circuit breakers ^c	Fixed (including molded case) 0-600 V—All sizes	0.0052	5.8	4.0
	0-600 A	0.0042	4.7	4.0
	Above 600 A	0.0035	2.2	1.0
	Above 600 V ^d	0.0096	9.6	8.0
	Metalclad drawout type—All 0-600 V—All sizes	0.0176	10.6	3.8
	0-600 A	0.0030	129.0	7.6
	Above 600 A	0.0027	147.0*	4.0
	Above 600 V ^d	0.0023	3.2	1.0
	Above 600 A	0.0030	232.0	3.0
	Above 600 V ^d	0.0036	109.0*	168.0
Motor starters	Contact type: 0-600V	0.0139	65.1	24.5
	Contact type: 601-15 000V	0.0133	284.0	16.0
Generators	Continuous service Steam turbine driven	0.1691	32.7	—
	Emergency and standby units Reciprocating engine driven	0.0023	—	—
	Rate per hour in use (0.00536) Failures per start attempt (0.0135)	—	478.0	—
Disconnect switches	Enclosed	0.006100	1.6	2.8
Switchgear bus— indoor and outdoor ^e	Insulated: 601-15 000 V	0.001129	261.0	26.0
	Bare: 0-600 V Above 600 V ^d	0.000802 0.001917	350.0 17.3	27.0 36.0
Bus duct— indoor and outdoor (Unit = 1 circuit ft) Open wire (Unit = 1000 circuit ft)	All voltages ^f	0.000125	128.0	9.5
	0-15 000 V	0.01890	42.5	4.0
	Above 15 000 V	0.00750	17.5	12.0

2.3 RAC Databook

RAC는 미국의 DoD(Department of Defense Information Analysis Center)정보분석 센터로서 정부산하기관과 산업분야에 신뢰성 정비성 업무 및 품질 분야에 각 중 데이터를 서비스해주는 역할을 담당하고 있다. 전기전자 부품 및 시스템, 기계부품 및 시스템 등의 신뢰성관련 데이터를 수집 분석하고 이를 재 가공하여 효율성 있는 데이터로 제공해주는 역할을 담당하고 있다.

이중에서 EPRD97(Electronic Parts Reliability Data)와 NPRD95(Non-electronic Parts Reliability Data)는 미국방성의 관리하에 RIAC(Reliability Information Analysis Center)에 의해 개발되었다. 이 데이터베이스들

은 상호 보완적이며 중복되는 자료를 가지고 있지 않으며 많은 수의 복잡한 메커니즘과 기기들에 대한 신뢰도 예측을 가능하게 한다. EPRD97은 커패시터, 다이오드, 집적 회로, 광학기기, 저항, 사이리스터, 변압기, 트랜지스터 등의 전자부품에 대한 고장률을 포함하고 있으며 NPRD95는 전기, 전기기계, 기계류의 고장률을 포함하고 있다. 두 자료는 관련분야의 1970년대에서 1990년대까지의 장기간에 걸친 모니터링 데이터를 기로 작성되었다. 기초 데이터의 수집은 새로운 설비 종류에 상대적으로 집중하여 이루어졌으며 다양한 소스와 동작환경, 산업분야에 걸쳐 이루어졌다. 두 데이터베이스의 목적은 상업 적용도의 설비와 최첨단 장비의 개발시에 고장률을 고려할 수 있게 하여 보다 높은 신뢰도의 제품을 생산하도록 하며, 미국방성의 MIL-HDBK-217F를 보완하는데 있다.

3. 고장율 산출

3.1 부품고장율 예측

신뢰도 예측은 제품의 품질을 평가하거나 향상시키기 위해 구상 및 디자인 단계 뿐만 아니라 운영과 유지보수 단계에 있어서까지 활용되고 있다. 보다 정교한 신뢰도 예측을 위해서 최근에는 시스템의 구조를 고려하는 신뢰도 블록 다이어그램(Reliability Block Diagram) 기법, 고장수목분석(Fault Tree Analysis)등의 방법론이 개발되고 있다. 초기 디자인 단계에서는 고장률 예측이 가장 널리 사용된다. 신뢰도 예측은 제품의 useful life 기간의 고장률 값을 예측하는 프로세스를 의미한다. 그러나 실제로는 제품의 디자인은 완벽할 수 없으며 어떤 파트의 고장은 전체 시스템의 고장을 야기하지 않기 때문에 실제상황을 완벽하게 고려한 신뢰도 예측은 불가능하다.

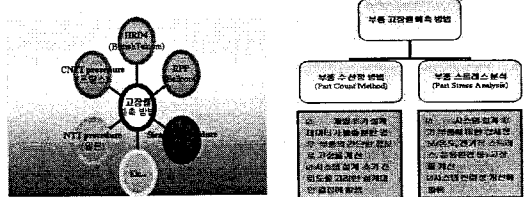


그림 1. 고장율 예측 방법

또한 기존의 고장 데이터는 15년이상 수집되어야 할 필요가 있는데 그런 데이터는 대개 존재하지 않는다. 따라서 예측된 데이터에도 불확실성이 내재되어 있다는 것을 무시할 수는 없다. 한편, 일부 예측 기법 대뉴일에는 기존의 고장 데이터 대신 제조업체에서 제공하는 고장률을 사용하도록 허용하고 있다. 이러한 경우 제조업체에서 테스트한 환경에 중속적인 예측결과가 나오게 되는 것에 주의해야 한다. 전력설비의 신뢰도는 하위 부품들의 신뢰도를 알고 있다면 이들로부터 예측가능하다. 신뢰도 예측방법 중 하나인 Part Count 기법의 경우 새로운 제품의 디자인의 초기부터 가능한 장점이 있다. 또한 제품의 디자인이 완료된 후에 제품에 영향을 줄 수 있는 스트레스에 대한 조사와 측정이 끝나면, Part Stress 기법으로의 예측이 가능해진다. 이외에도 다수의 제품을 특수한 조건하에서 테스트함으로써 신뢰도 예측을 하는 방식도 있다. 이 경우 일상적인 조건보다 가혹한 조건을 주게 되는데 이러한 방식을 가속수명평가기법 (Accelerated life test)이라고 한다. 이러한 방법을 통하여 다양한 조건하의 사용자에게 맞는 신뢰도를 예측할 수 있다. 실제적으로는 제품을 출시하기 전에 제품 샘플을 사용자에게 공급하여 예측된 신뢰도 값과 실제 샘플에 의해 수집된 데이터가 얼마나 잘 맞는지에 대한 확인 작업을 수행하기도 한다. 일부 신뢰도 예측기법은 실제 샘플을 가지고 조사한 결과까지 고려하기도 한다.

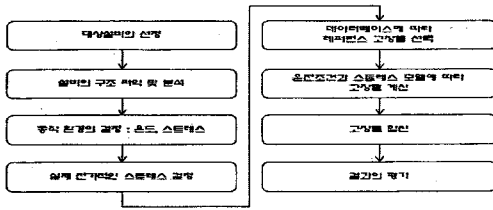


그림 2 고장률 예측 순서

3.2 사고이력에 의한 고장률 추정

고장률(failure rate), 순간고장률(instantaneous failure rate) 또는 고장률함수(hazard rate)이라고 불리는 $\lambda(t)$ 가 있다. $\lambda(t)$ 는 시간 t 에서 온전한 것이 시간 t 와 $t+dt$ 에서 고장날 확률로 정의된다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt} \quad (1)$$

$\lambda(t)$ 는 시간 t 의 시점에서 현재 작동하는 것들 중 몇 개가 순간적으로 고장날 것인가 또는 시간당 얼마씩 고장이 발생되느냐를 나타내는 비율이다. $\lambda(t)$ 는 고장률함수(failure rate function)라고도 불린다.

각 설비의 과거 고장 데이터를 통계적 방법을 통하여 산출한 결과 국제 규격서에 나와 있는 데이터와는 상당히 많은 차이를 발견할 수 있다. 그러므로 와이블분포의 형태모수와 척도모수를 추정하여 계산할 수 있다.

와이블(Weibull) 분포는 하나의 중요한 특성을 가지고 있다. 그것은 분포가 특징적인 모양을 가지고 있지 않다는 것이다. 사실 신뢰도 함수의 모수 값에 의존하지만 그것은 어떤 특징적인 모양의 모수가 아니라 실험값에 의한 분포로 모양이 나타내어진다. 이런 이유로 와이블 분포는 설비나 기기의 사용기간에 따라 특정한 관계의 변화를 분포의 모수를 변화시켜 가면서 여러 종류의 고장현상을 적절하게 묘사할 수 있으므로 실험값의 통계적 분석에서 중요한 역할을 한다. 와이블 확률지와 같은 특별한 종류의 확률지는 실험값들을 가지고 데이터를 사상 시키는데 편리하게 이용 가능하다. 이 확률지는 데이터들을 가지고 와이블 분포의 모수를 추정하는데 쉽게 사용될 수 있다.

와이블 분포의 적절한 함수를 고려하므로써 다양하게 이용되어 질 수 있다. 와이블 분포의 고장 밀도 함수는 식 (2)과 같다.

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} \exp \left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

여기서, $t \geq 0$, $\beta > 0$, $\alpha > 0$ 이다.

4. 사례 연구

여기에서는 실험에 의해 수집된 데이터를 바탕으로 와이블분포에 따른 파라미터 값을 구하였다. 사용된 데이터는 한국철도공사 서울지역의 고장발생 데이터이며 자세한 사항은 표 3과 4에 나타내었다. 또 그림 3은 와이블분포 데이터 값을 나타낸 그래프이다. 그리고 오른쪽 하단에 각 파라미터 값이 계산되어 있음을 알 수 있다.

표 3. 서울 지역 고장데이터

06월 06일 04:05	중앙선 망우역구내 23호주 전철	벌크화차 상부에서 일반인파 전차선로 접촉
06월 16일 06:07 7:42	중앙선 원주-유교간 전철107호	터널내 조수류 침입으로 인한 전차선로 트립
06월 18일 17:38	중앙선 구학역구내 전철	에자형색선개소 조류접촉으로

	7-1호주	인한 전차선로 트립
07월 06일 07:32	중앙선 망우역구내 14-1호주	에자형색선개소 조류접촉으로 인한 전차선로 트립
07월 08일 07:36	중앙선 망우역구내 8-1호주	에자형색선개소 조류접촉으로 인한 전차선로 트립
07월 12일 09:50	중앙선 간현역구내 7호주	에자형색선개소 조류접촉으로 인한 전차선로 트립
07월 12일 10:16	중앙선 망우역구내 20-1호주	건축공사 작업자의 줄자와 전차선로 접촉으로 트립
07월 28일 07:49	중앙선 망우역구내 20-1호주	건축공사 작업자의 릴코드가 전차선로 접촉 트립

표 4. 철도전력설비의 고장률 예

변압기	출력단	MTBF(h)	고장률	비고
568	25,920	13	1752685.7	0.000005706 0.0023
547	25,920	29	787680	0.0000012696 0.0079
168	25,920	13	518400	0.0000019290 0.0036
170	25,920	19	367200	0.0000027233 0.0073
1081	25,920	4	9339840	0.000001071 0.002

*본 표는 연구목적으로 실제 값과 차이가 있음

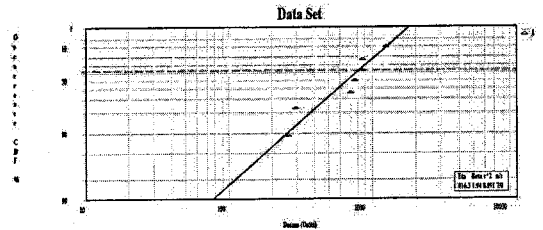


그림 3. 와이블 함수에 의한 고장률 추정

5. 결론

전철전력설비 신뢰성연구 및 유지보수측면에서 해당설비의 고장률 계산은 가장 중요하고 기본적인 사항이다. 본 논문에서는 먼저 국제규격서를 통해 고장율을 취득하였고, 각 설비의 과거 고장 데이터를 고장율을 계산하였으며, 이러한 방법을 보완하기 위하여 통계적 방법을 통하여 와이블분포의 형태모수와 척도모수를 추정하였으며, 모수들을 이용하여 고장률을 계산하여 각 설비의 고장률로 사용하였다. 각 설비의 형태모수, 척도모수 및 고장률에 대한 데이터를 추정하였다.

본 연구는 국토해양부 도시철도 표준화 2단계 연구 개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] 한국철도공사 전기기술단, "전기 업무 자료", 2006,
- [2] 한국 철도 기술 연구원, "철도 설계 편람(전철전력 편) 제정 용역설계 연구과제 보고서" 2004, 12
- [3] 한국철도시설공단, "철도 설계 편람(전철전력편:송변전)" 2004, 12
- [4] MIL-STD 1629A, Reliability-Centered Maintenance, US Department of Defense, Washington DC 20301
- [5] Marvin Rausand, "Reliability centered maintenance", Reliability Engineering and System Safety, pp.12 1-132, 1998