

철도 급전시스템 신뢰도 평가 연구

A Study of Traction Power System Reliability

김형철*
Hyungchul Kim

차준민**
Jun-Min Cha

김진오***
Jin-O Kim

한문섭*
Moonscob Han

ABSTRACT

This paper proposes a new reliability evaluation for traction power system. The electric railway consists of traction power systems, various vehicles, operating equipment, track, overhead line and electric equipment. It is a fundamental function of traction power systems that supply customers with reasonable price, acceptable reliability and high quality power. In a general way, the power system reliability deals with the ability to satisfy load demands in supply capability or rating of every factor. On the other hand, the reliability of traction power systems has been focused on train time delay caused by power outage. In this paper, we make a selection optimum reliability indices for the reliability evaluation of electric traction power systems. The reliability study not only applies a plan for traction supply system after detecting the vulnerable point of existing traction supply systems but also makes a role in stable operating railway.

Keywords : Traction Power System, Reliability,

1. 서론

전기철도[1]는 다양한 차량과 운전선비, 궤도, 전차선로, 전기선비를 포함한 급전시스템으로 구성되어 있다. 차량의 운행에 필요한 동력을 전달하기 위해 전철변전소에서는 전력회사로부터 수전하여 전차선을 통하여 전력을 차량에 공급하고 있다. 철도 급전시스템의 기본적 기능은 가능한 한 경제적이고 수용할 만한 신뢰성과 양질의 전기에너지를 수용자에게 공급하는 것이다. 이러한 기능은 일련의 운전 조건을 만족하면서 이루어져야 한다. 이들 조건은 공급의 질과 직접적으로 관련된 전압위반과 주파수 변동 등과 같은 것이 있고, 설비 정적, 계통 안정도 한계, 고장 등급 등과 같은 수용자에게는 직접적 관계는 없지만 운영 측면에선 중요한 제한 조건이 있다.

-
- * 한국철도기술연구원 전기연구본부, 선임연구원
 - ** 대전대학교 전기정보시스템 공학과 교수
 - *** 한양대학교 전기전자공학부 교수

일반적으로 전력계통에서의 신뢰도[2]는 시스템을 구성하고 있는 각 요소의 정격이나 공급 능력 내에서 부하의 요구를 만족하는가 하는 능력을 의미하는 반면, 철도 급전 시스템의 신뢰도는 전력공급이 이루어지지 않음으로서 열차의 지연시간이 관심의 대상이다.

본 논문에서는 전기철도 급전시스템의 신뢰도 평가를 위하여 기존 급전시스템에 대한 구성 기기의 데이터를 조사하여 신뢰도지수를 선정한다. 여기서 제시된 신뢰도 평가는 기존 급전 시스템의 취약요소를 검출하여 추후 급전시스템의 설계 시 활용할 수 있을 뿐만 아니라 신뢰도 개선방안 제시가 가능하여 안정된 전기철도 운영에 일익을 담당할 수 있다.

2. 전기철도 급전시스템 신뢰도의 필요성 및 중요성

전력계통에서 신뢰성에 대하여 미국 신뢰도 위원회 (NERC : North American Electric Reliability Council)[3]는 적정성연구와 안전도연구로 신뢰성을 두 가지 기본 측면으로 크게 나눈다. 적정성연구는 수용가의 부하 요구나 계통운영 제한 요소를 만족시키는 충분한 계통 설비와 관계있다. 이것은 충분한 발전설비와 실질적인 수용가까지 전력을 송전, 배분하는데 필요한 설비를 포함한다. 따라서 적정성 연구는 계통 장애를 포함하지 않는 정적인 상태조건과 관련된다. 안전도연구는 계통 내에 발생하는 갑작스런 외란에 대응하는 능력과 관계있다. 따라서 안전도연구는 모든 장애에 대응하는 정도와 관련된다. 이 안전도 연구는 지역적 또는 전체적인 장애와 발전 및 송전설비의 손실과 관계된 조건을 포함하고 있다. 전력계통에 있는 아주 체계적인 표준과 지침서 등은 철도급전 시스템의 설계, 운용 및 유지보수에 잘 적용할 수 있다. 그러나 이러한 신뢰성연구는 철도급전시스템의 모든 것을 적용하기에는 부족함이 많다. 급전시스템의 신뢰도의 중요성은 전력공급중단으로 인한 열차지연, 대중교통 서비스 사고로 인한 지역 경제에 미치는 부작용 수반, 전력공급중단으로 인명을 위협하는 상황 등을 들 수 있다.

철도 급전 시스템의 신뢰도[4-5]는 사고위험, 열차 지연을 야기하지 않고 정상적인 유지보수와 더불어 갑작스런 외란에도 전력이 끊임없이 적절히 제공할 수 있는 능력으로 정의 할 수 있다. CIGRE(International Committee on Large Power System)에 의하면 전력계통의 신뢰도는 전력공급지장을 (한 해 동안의 고장 시간)으로 정의되어 진다. 반면에 철도 급전 시스템의 신뢰도는 전력공급이 이루어지지 않음으로서 열차의 지연시간이 더 적절한 측정수단이다. 즉 열차만큼 열차가 지연되었는가와 비교값으로 나타낼 수 있다.

신뢰도 연구의 첫 스텝은 고장원인을 파악하기위한 전력기기의 사고조사이다. 전력기기 신뢰도 데이터는 신뢰도 연구에 절대적으로 필요하다. 전철전력시스템 사고이력을 데이터베이스로 구성하여 체계적인 원인분석 및 관리는 필수조건이다[6]. 신뢰도 연구는 시스템 신뢰도의 여러 분야를 포함해야 한다. 예를 들면 계획, 운영, 신뢰도에 관한 정의, 상정사고, 고장 분류, 신뢰도 위반 등이다. 철도 급전 시스템은 변환기, 급전선과 같은 하나의 전력 요소의 탈락의 경우 적절한 전압 및 온도한계 안에서 계획, 설계, 건설되어 진다. 물론 시스템이 정상적인 상태일 때나 수리중일 경우에도 고려되어야 한다. 시스템 서비스는 유지 보수 시에 발생한다. 일반적으로 서비스가 원활하지 않는다면 시스템은 신뢰성이 없다고 할 수 있다. 그러므로 시스템 서비스는 아주 중요한 특성을 가지고 있다. 신뢰도와 서비스는 일반적으로 변전소에서의 요소들의 여유분에 의해서 향상되어 진다. 예를 들면 두 개의 고압 피더 혹은 두 개의 변압기, 배전 버스의 두 개의 섹션 등이 있다. 이러한 일반적인 배치가 대부분의 전형적 상정사고에 신뢰성이 높다. 대부분의 상정사고가 설계시에 예상되어지지만 실제 운영상황에서 일어나는 상정사고나 고장 기록의 분석 및 보존은 아주 중요하다. 특히 새로운 설계시에는 더욱 그렇다.

3. 전기철도 급전시스템 신뢰도

급전시스템 신뢰도란 전기철도가 안정되게 전력을 공급받을 수 있는지 여부를 나타내며, 신뢰성 있는 급전시스템이라 함은 정전없이 전력을 공급받고, 언제든지 이용할 수 있어야 함을 의미한다. 예를 들면 99.9%의 가동률(Availability)은 매우 큰 값으로 보이지만, 실제로는 일년에 8시간 45분 동안(1년의 0.1%)은 전력을 공급하지 못하여 연차운행을 지연시키는 것을 의미한다.

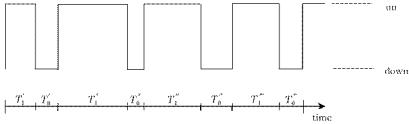
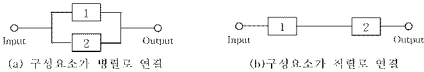


그림 1 급전시스템 구성요소의 두 개의 상태(Up, Down) 모델링의 예

그림 1은 급전시스템 구성요소의 상태에 관한 예를 보이고 있다. 이때 구성요소는 단지 정상상태와 실패상태 두 가지로만 나타내었다. 여기서 곱셈은 정상(Up)상태 평균값의 역으로 나타낼 수 있으며, 회복율은 실패상태 평균값의 역으로 표현된다. 그림 2는 급전시스템 구성요소가 병렬로 연결된 때와 직렬로 연결된 때의 간단한 구조를 비교하고 있다.



(a) 구성요소가 병렬로 연결

(b) 구성요소가 직렬로 연결

그림 2 두 개의 구성요소를 가진 시스템

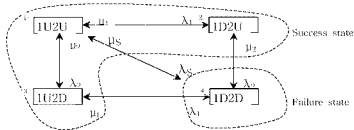


그림 3 병렬연결을 가진 상태변이도

그림 3는 구성요소가 병렬로 연결된 때의 상태변이도를 나타내고 있다. 구성요소가 정상상태일 때를 U(Up)으로, 실패상태일 때를 D(down)상태로 나타내고 있다. 이때 가능한 상태의 수는 모두 4가지로 두 개의 구성요소가 모두 다운(Down)상태일 때를 제외하고는 시스템은 정상적이라고 가정한다. 즉 상태 1, 2, 3은 정상상태이고 상태 4(D2D)은 실패상태라고

한 수 있다. 예를 들면 두 개의 전력선이 두 개가 병렬로 연결되어 있을 경우는 하나가 고장이 났을 경우에도 시스템이 정상적으로 운행이 가능하여 신뢰성을 높일 수 있다. 이때 시스템 전체의 고장율과 회복율은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\lambda_S = \frac{P_2\lambda_2 + P_3\lambda_1}{P_2 + P_3 + P_1} = \frac{\lambda_1\lambda_2(r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1r_1 + \lambda_1} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\mu_S = \frac{P_4(\mu_1 + \mu_2)}{P_4} = \mu_1 + \mu_2 = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1r_2} \quad \text{-----} \quad (2)$$

그림 4는 구성요소 1과 2가 직렬로 연결된 배의 상태변이도를 나타내고 있다. 구성요소가 정상상태일 때를 U(Up)으로, 실패상태일 때를 D(down)상태로 나타내고 있다. 병렬 연결일 때와 마찬가지로 가능한 상태의 수는 모두 4가지인데, 두 개의 구성요소가 모두 정상(Up)상태일 때를 제외하고, 시스템은 실패한다고 가정한다. 즉 상태 1은 정상상태이고 상태 2, 3, 4은 실패상태라고 할 수 있다.

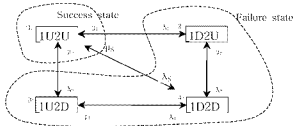


그림 4 직렬연결을 가진 상태변이도

$$\lambda_S = \frac{P_1(\lambda_1 + \lambda_2)}{P_1} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\mu_S = \frac{P_2\mu_1 + P_3\mu_2}{P_2 + P_3 + P_1} = \frac{\lambda_1\mu_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1\mu_2}{\lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1} \quad \text{-----} \quad (4)$$

이상과 같이 급전시스템에서 구성요소는 병렬과 직렬형태로 나타내어진다. 그러나 급전시스템에서의 직렬은 이 두 가지 형태의 혼합 형태도 나타낼 수 있으며, 이러한 혼합형태는 위의 상태변이도로서 간단히 속약이 가능하다. 즉 전체 시스템에서 부분적인 병렬연결은 상태변이도를 통하여 병렬 요소 부분의 고장율과 회복율을 구할 수 있어 전체 시스템은 직렬 연결로 표현될 수 있다. 그러므로 급전시스템의 구성요소를 직렬연결을 가진 구성요소로 나타내었을 때, 급전시스템 신뢰도지수는 다음과 같이 표현되어진다.

$$f = \sum_i \lambda_i (= \lambda_S) \quad (\text{운행지장횟수/년}) \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$\Delta T = \sum_i \lambda_i K_i \quad (= U) \quad (\text{운행지장시간/년}) \quad \text{-----} \quad (6)$$

- 단, f : 연간 정전으로 인한 운행지장횟수
 ΔT : 연간 정전으로 인한 운행 지장 지속시간
 λ_i : 구성요소 i 에 대한 연간 사고횟수의 기대치
 K_i : 구성요소 i 에 대한 평균 복구시간(절체시간)
 $(K_i = \frac{1}{\mu_i})$

4. 사례연구

그림 5는 사례연구를 위한 모델계통을 나타내고 있고 표1과 표2는 모델계통 구성 데이터와 신뢰도 데이터를 각각 나타내고 있다. 표 3은 신뢰도 결과를 나타내고 있다.

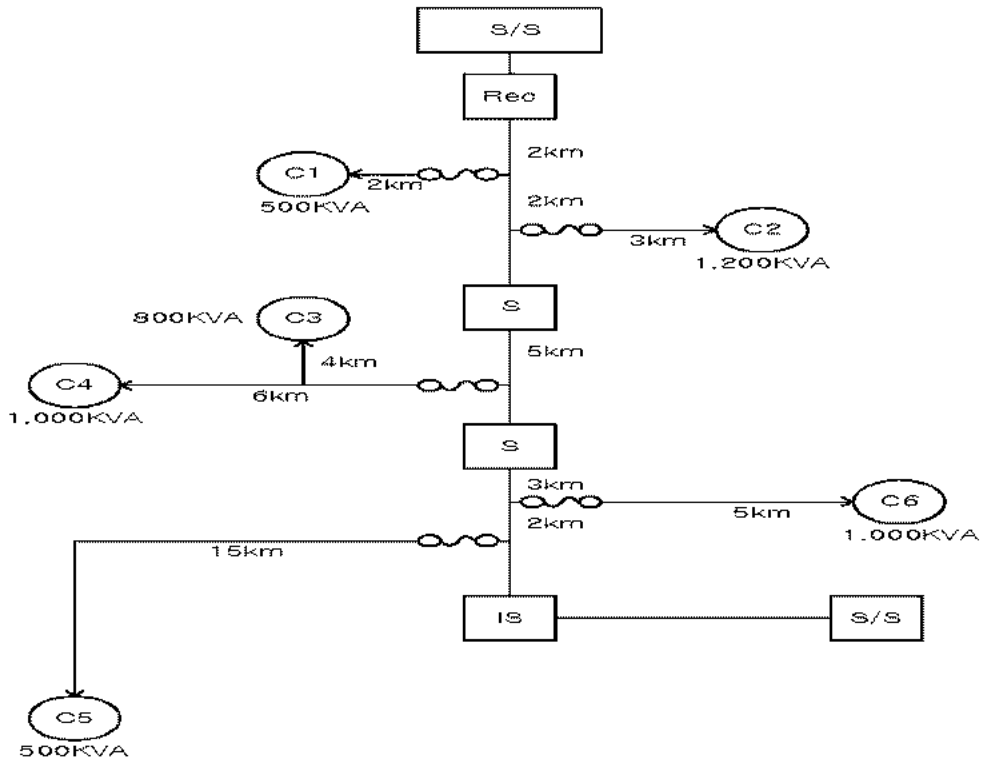


그림 5 모델계통

표 1. 모델계통 구성 데이터

내역 구역	피크부하 크기(kW)	길이 (km)	개폐기 수	주상 변압기수
C1	500	4	2	10
C2	1200	7	2	24
C3	800	13	3	16
C4	1000	15	3	20
C5	500	29	4	10
C6	1000	17	4	20

표 2. 모델계통 신뢰도데이터

	사고율 (횟수/년간)	복구시간 (년/사고당)
가공선로(per km)	0.06	0.02
차단기	0.017	0.06
구분개폐기	0.014	0.015
주상변압기	0.01	0.03

표 3. 각 구간별 신뢰도의 결과

구간 지수	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
f (운행지장횟수/년)	0.371	0.691	0.985	1.145	1.899	1.279
ΔT (운행지장지속시간 /년)	0.00903	0.01683	0.01464	0.02544	0.03945	0.02805

6. 결론

철도시스템은 최근 수많은 대중교통개발 사업으로 인하여 빠른 성장을 하고 있다. 대중교통에 관한 성패는 신뢰성에 달려있다. 그러므로 철도급전시스템은 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 예를 들면 철도전력기기의 고장율 및 신뢰도 지수 산정은 급전시스템의 최적 설계 및 운영 시 필요한 요소이다. 본 논문에서는 간단한 급전시스템에 관한 신뢰도 지수를 산정하고 신뢰도평가를 하였다. 현재 우리나라의 경우 고속전철의 도입과 함께 전기철도에 대한 많은 시설투자가 이루어지고 있으며 앞으로 더욱더 활발히 진행될 것이다. 이러한 철도 분야의 확대는 전체 시스템을 구성하는 각 구성요소들의 발전과 더불어 진행될 것이며 그 중 특히 안전성 및 신뢰성 확보는 반드시 선행되어야 한다. 따라서 앞으로 이 분야에 대한 정책은 물론이고 학계, 및 기업체들의 연구 및 개발활동이 활발히 이루어 질 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] IEE railway Professional Network, "Railway Electrification Infrastructure Systems" Scarman House Conference center University of Warwick, UK
- [2] R. Billinton, "Power System reliability Evaluation" Gordon and Breach, Science publishers, 1970.
- [3] North American Electric reliability council, " NERC Planning Standard", Princeton, NJ. 1997
- [4] S. Sagareli, "Traction Power Systems Reliability Concepts", Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 6-8, 2004, Baltimore, maryland, USA, pp 35-39.
- [5] R. Eacker, M. Bardsley, "Electrical Reliability Analysis for Transit Applications", Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 23-25, 2002, Washington, DC, USA, pp 81-86.
- [6] P. Proctor, "Infrastructure Risk Modelling Overhead line Traction Delivery System", Director EE&CS Railway Track H.Q. Oct. 1997