

Reliability Analysis of Catenary of Electric Railway by using FTA

具本熙* · 車溶敏[†] · 金炯徹**
 (BonHui Ku · Jun-Min Cha · Hyungchul Kim)

Abstract - As catenary supply electric power directly to the railway system, it is very important to prevent an accident of a catenary for appropriate train operations. This paper analyzed the outage data for British catenary safety analysis report and Korean data to compare the reliability of the railway systems. The analyzed data were applied to Fault Tree Analysis(FTA) algorithm to calculate the reliability indices of a railway system. Failure rate of an electric railway system through FTA were calculated for each element and the entire railway system. The reliability indices can be used to determine the equipment to be replaced for the entire system reliability improvement.

Key Words : Reliability, Catenary of Electric Railway, Failure Rate, Fault Tree Analysis(FTA)

1. 서 론

철도전력시스템은 전기적 및 기계적으로 결합된 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템으로 안전성의 확보가 필수적이다. 전기철도에서 전차선은 차량에 직접 전력을 공급하는 설비로서 철도차량에 전기를 공급하는 전차선, 전차선을 조가하는 조가선, 변전소로부터 전력을 공급하는 급전선 등으로 구성되어 있다. 전차선로는 차량의 운행과 직접 관련이 있는 중요한 설비로서 전차선의 사고를 예방하고 안전성을 유지하는 것이 중요하다. 본 논문은 전기철도 전차선의 신뢰도를 산정하고자 KORAIL 철도연구개발센터의 “전기시설물 점검주기 및 개량주기에 관한 연구(2006)” 보고서를 이용하여 전차선의 장애사례를 분석하였다. 전차선로의 장애 내용으로 전차선에 전력이 공급되지 않는 경우와 전차선로 설비가 제대로 동작하지 않는 경우로 나누어, 실제 전차선의 장애사례를 분석하고 Fault Tree Analysis(FTA) 알고리즘에 적용하여 개통의 신뢰도를 산정하는데 사용하였다. FTA는 시스템의 고장을 해석하는 방법으로 사용되며, 시스템의 고장을 발생시키는 사건원인을 통하여 Fault Tree(FT)를 작성하고 시스템의 고장확률을 구하여 시스템의 신뢰성을 개선할 수 있다. 본 연구에서는 Relex 7.7 프로그램을 사용하여 FTA를 수행하였다.

2. 전차선로의 구성

전차선로는 전기차량에 전력을 직접 공급하는 역할을 담당하고 있는 설비이다. 일반적으로 전기차량의 팬터그래프와 직접 접촉하여 전력을 공급하기 위한 가선설비와 이에 부속하는 설비를 말한다. 전차선로는 전기차량에 전력을 원활히 공급하도록 하는 것을 목적으로 일반적인 송·배전 선로와 달리 전기방식이나 급전, 가선 방식이 다르기 때문에 신뢰도를 고려하여야 한다.

가공 전차선에 의한 전기 운전 방식은 선로 상에 일정한 높이로 전차선(trolley wire)을 가선하고 전기차 또는 전기기관차의 운행 중에 집전장치인 팬터그래프가 항상 이 전선에 기계적으로 접촉 집전하여 전기차의 전동기에 전력을 공급하는 방식이 일반적이다. 가공 전차선로의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[1].

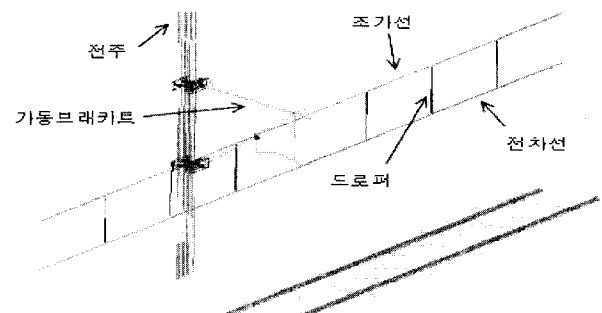


그림 1 가공 전차선로의 구성
 Fig. 1 Components of overhead catenary line

전기철도 운전에 필요한 전력은 전기 철도 변전소에서 전기철도 운전에 적합한 전력으로 변환하고 전차선을 통하여 전기차에 공급된다. 전기차 운전을 위하여 궤도와 병행하여

[†] 교신저자, 正會員 : 大眞大學校 電氣工學科 教授 · 工博
 E mail : chamin@daejin.ac.kr
 * 學生會員 : 大眞大學校 電氣工學科 碩士課程
 ** 正會員 : 韓國鐵道技術研究員 先任研究員
 接受日字 : 2008年 8月 20日
 最終完了 : 2008年 9月 3日

시설되는 설비에는 전기차의 집전장치와 직접 접촉하여 전력을 공급하는 전차선과 전차선을 레도면 상의 일정한 높이에 수평으로 조가하는 조가선, 변전소로부터 전력을 공급하는 급전선, 전기차량에 공급된 전력을 변전소로 반환하기 위한 귀선 등의 가선 설비와 이에 부속된 부속설비, 전차선 장치, 빔(beam), 전주 등으로 구성되어 있다[2]. 전차선은 전기차에 전력을 공급해 주는 부분으로 고압전류가 항상 흐르고 있기 때문에 높은 신뢰도를 필요로 한다.

3. Fault Tree Analysis를 이용한 신뢰도 산정

3.1 FTA의 개요

FTA는 신뢰도와 안전성 분석을 위해 행하는 기법으로, 일반적으로 복잡하고 동적인 시스템에 적용된다. FTA의 주된 목적은 분석적 또는 통계적 방법을 이용하여 최상위 Event의 확률을 평가하는 것이다. FTA는 실패의 가능성에 관련한 유용한 정보와 그러한 실패의 발생의 의미를 제공하는 기능을 갖는다. 시스템의 안전성을 증대시키기 위한 노력은 그 분석의 결과를 사용하는 것으로 초점이 맞춰진다.

FTA(Fault Tree Analysis)는 시스템의 전체와 일부분의 고장이 어떠한 논리로 결부되어 있는지를 FT(Fault Tree)로 나타내어 시스템의 고장을 해석하는 방법이다. 시스템의 고장이나 결함을 발생시키는 사상(event)을 사건 원인에 따라 논리게이트를 이용하여 FT를 작성하고 시스템의 고장확률을 구하여 고장이 발생한 부분을 찾아 시스템의 문제점이나 시스템의 신뢰성을 개선할 수 있다. FT의 작성은 시스템 고장의 최상위사건 즉, 주요 시스템 고장(Top event)을 규정하고 사건을 일으키는 하위 고장의 원인을 찾아 각 요소별 연결의 인과관계에 따른 논리게이트로 결합하여 더 이상 분해가 불가능한 기본사상(Basic event)이 될 때 까지 반복한다. FTA 수행절차는 다음 그림 2와 같다.

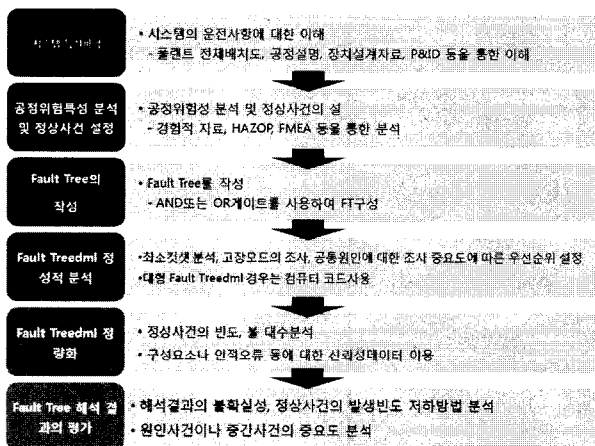


그림 2 FTA 수행 과정
Fig. 2 Procedure of FTA

FTA의 해석과정은 다음의 3단계로 나타낼 수 있다.

Step 1. 고장목(Fault Tree)을 구축한다. 시스템의 정의와 범위, 바람직하지 못한 사건의 정의를 명백하게 한다.

Step 2. 사건들 사이의 분명한 연산관계, 즉 고장을 발생시키는 관계들을 연결하기 위해 논리게이트에 적용한다.

Step 3. 최상위사건(Top event)의 확률을 결정하기 위해 실제의 데이터를 적용하여 각 사건의 발생확률을 구한다.

Step 4. 시스템에 영향을 끼치는 모든 가능한 고장형태에 대한 신뢰도를 고려한다.

FTA는 시스템의 고장 원인의 연역적인 추론과 분석이 가능한 방법으로 사실과 현상이 복잡한 경우 인과관계를 알기 쉽다는 장점이 있다.

3.2 고장률 산정 알고리즘

시스템의 신뢰도는 전체 시간 중 얼마나 시스템의 고장이 일어나지 않고 동작하는가를 나타낸다. 시스템의 고장은 연속적인 시간함수로 표시되며, 시스템은 t=0에서 신뢰도가 1이지만 시간이 경과하면 TBF(time between failures)가 1이상으로 될 확률은 최종적으로 0이다. 고장률에 관련되어 중요한 파라미터는 시간이다. 우리는 시간개념으로 m(m=시행의 대수에 있어서 예상되는 시스템 고장률의 수치)을 어떻게 표현할 것인지의 방법을 찾고자 한다.

우선, t 시간동안 고장이 발생할 횟수가 $t/\theta = \lambda t$ 이고, 만약 $\lambda = 1/\theta$ 라고 가정하면,

$$p(\text{시스템 고장률이 발생하지 않을 경우}) = e^{-m} = e^{t/\theta} = e^{\lambda t} \quad (1)$$

시간함수로 나타나는 신뢰도를 신뢰도 함수 R(t)라 한다. 신뢰도 함수 R(t)는 t시간동안 동작이 연속적으로 성공할 확률을 정의하며 식 (2)와 같다.

$$R(t) = e^{-t/\theta} = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

시간당 어느 정도 비율에서 고장인지를 알려면 이것을 시간으로 미분한 고장확률밀도 f(t)를 구한다.

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - e^{\lambda t})$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3)$$

시간 t 이전에 시스템 고장이 발생할 확률은 누적분포함수 F(t)로부터 주어진다. 시스템이 t 시간 이전에 고장이 나거나 나지 않을 때 다음 식 (4)로 표현된다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = 1 - F(t)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

고장률 $\lambda(t)$ 는 다음 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda(t) = \frac{dN_f(t)}{N_s(t)dt} = F(t)/R(t) = -dR(t)/R(t)dt \quad (5)$$

3.3 FTA에서의 Gate 확률 산정

FTA에서 시스템의 고장확률 계산은 n개의 기본사상이 AND결합으로 Top event의 고장을 일으킨다고 할 때, 사상이 발생할 확률 F는 식 (6)과 같다.

$$F = F1 \cdot F2 \cdots Fn = \prod_{i=1}^n Fi \quad (6)$$

OR결합으로 고장이 발생할 확률 F는 식 (7)과 같다.

$$F = 1 - [1 - F1][1 - F2] \cdots [1 - Fn] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Fi) \quad (7)$$

4. 사례연구

4.1 모델계통

본 연구에 사용된 모델 계통은 영국의 전차선 안전성분석

보고서(RAILTRACK EE&CS Report Infrastructure Risk Modelling Overhead Line Traction Delivery System)의 FT가 우리나라의 전차선로의 모델과 유사한 점에 착안하여 같은 구조의 FT를 사용하였다[6].

전차선로의 고장을 Top event로 하여 전차선로에 전력공급이 되지 않는 사고와 전차선로의 조정실패의 경우로 나누고, 전력공급이 되지 않는 사고의 경우 급전에 문제가 있는 경우와 전차선 구간의 고장으로 나누어 하위에 각 요소별 고장에 관한 기본사건을 제시하였다. 전차선로의 조정실패의 경우에는 전차선로를 이루는 각 설비의 조정이 실패한 경우의 사고율을 데이터로 하여 전체 전차선로 설비의 고장률을 산정하였다. 각 이벤트는 인과관계에 따라 결합되어 있기 때문에 시스템의 구성과 고장 발생의 원인을 알 수 있다[7].

4.2 입력 데이터

사례연구에 사용된 입력데이터는 KORAIL 철도연구개발센터의 “전기시설물 점검주기 및 개량주기에 관한 연구(2006)” 보고서의 각 설비별 수량, 사용시간, 장애건수, 장애시간 등의 고장사례 분석 데이터와 영국의 전차선 안전성 분석 보고서의 데이터를 사용하였다.

각 설비별 고장 데이터를 통하여 한국과 영국의 전차선로 고장률 $\lambda(t)$ 를 각각 산정하고 FT에 적용하여 전차선로 시스템 전체의 고장률을 산정하였다. 단, 부족한 데이터에 해당

표 1 각 요소별 고장률

Table 1 Failure rate of each components

No.	Event	λ	No.	Event	λ
1	loss of supply to overhead line section	(gate)	17	lose of load	(gate)
2	overhead line out of alignment	2.14161e-005	18	Feeder board	(gate)
3	failure of catenary	2.79418e-007	19	AC Filter	(gate)
4	failure of dropper-contact wire	1.4245e-008	20	Receiving end & scott Transformer	(gate)
5	overhead line obstructed	2.0475e-007	21	Auto Transformer(AT)	0.003999
6	failure of balance weights-contact wire loses alignment	0.103	22	M phase	4.70106e-006
7	overhead line-incorrect installation	2.0475e-007	23	T phase	4.70106e-006
8	contact wire misaligned	1.25755e-009	24	AC Filter(AC)	0.033914
9	loss of feeds from both ends	(gate)	25	Receiving end(CB,PT,DS)	9.06191e-007
10	fault on overhead line section	(gate)	26	overhead line fault	(gate)
11	loss of one feeding system	(gate)	27	circuit breaker spurious trip	9.66
12	lose of feeds to 25kv busbar	(gate)	28	neutral section loss of insulation	2.87
13	25kV busbar failure	2.79418e-007	29	failure of contactwire	1.25755e-009
14	25kV circuit breaker failure	0.00102222	30	short circuit-failure of insulation	3.25
15	25kV feeder failure	0.0155	31	Earth on contact wire	0.0258
16	one transformer only on maintenance	(gate)			

하는 고장률은 영국모델의 값을 사용하였다. 위의 표 1에 Event의 내용과 각각에 해당하는 고장률을 나타내었다.

4.3 FTA를 적용한 고장률 산정

분석한 고장률 데이터는 Fault Tree Analysis 알고리즘에 적용하여 전차선로 급전계통의 신뢰도를 산정하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Relx 7.7을 이용하였다. 다음 그림들은 FTA를 수행한 것이다. 그림 3은 Top event를 포함한 최상위의 FT로, 전차선로의 고장률은 0.000103014로 계산되었다. 그림 4~7은 고장원인별로 연결된 FT로, Basic Event별 사고율을 입력하여 FTA를 수행한 것이다. 그림 안의 번호 1~31은 표 1의 각 요소별 고장률을 나타내며 이 값은 표 1의 고장률 값을 사용하였다.

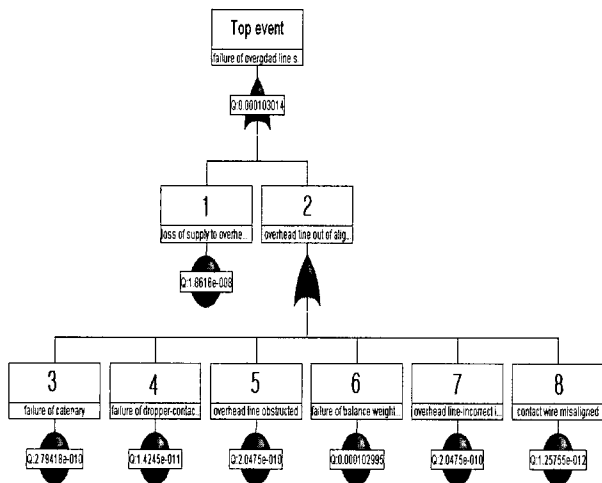


그림 3 전차선로 시스템의 FTA적용(Top event)
Fig. 3 FTA application of catenary system(Top event)

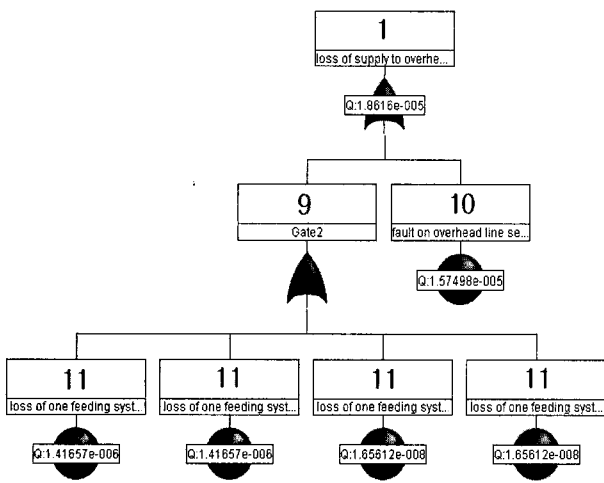


그림 4 전차선로 전력공급 실패시 FTA
Fig. 4 FTA of loss of supply to catenary

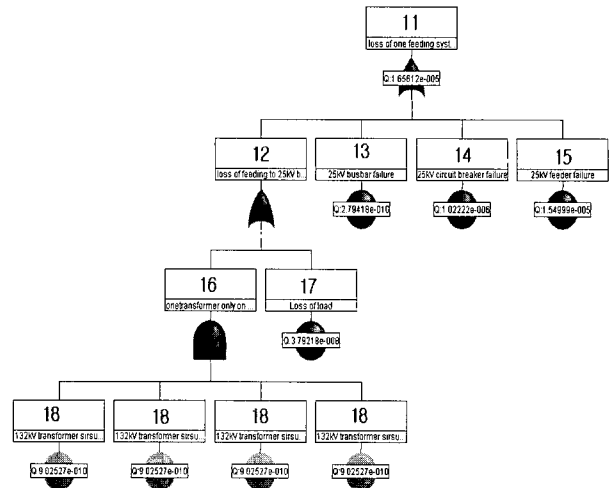


그림 5 급전시스템 이상시의 FTA
Fig. 5 FTA of loss of feeding system

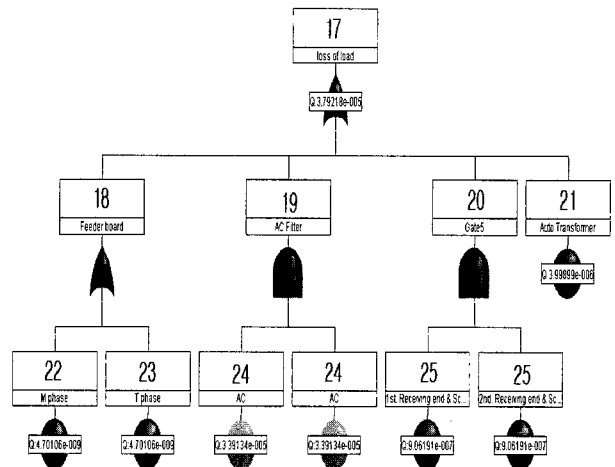


그림 6 변전소 시스템 FTA
Fig. 6 FTA of S/S system

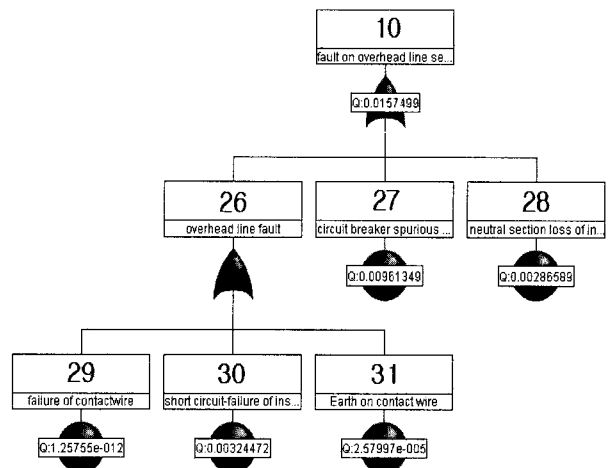


그림 7 가공선 구간의 이상시의 FTA
Fig. 7 FTA of fault on overhead line section

4.4 비교분석

전차선로에 관한 FTA를 실행하여 고장률을 산정한 결과 우리나라 전차선로의 고장률은 0.000103014로 산정되었고 영국의 고장률은 0.01405로 나타나 우리나라의 고장률이 영국의 고장률 보다 우수한 것으로 나타났다. 그 이유는 사용한 데이터의 정확도 부족과 고장데이터의 정의 및 수집기간 등의 차이로부터 온 것으로 판단된다.

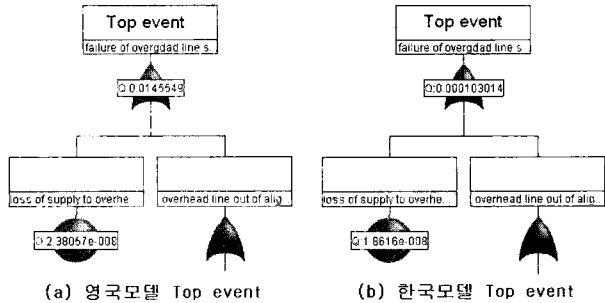


그림 8 Top event 구성과 고장률 (a) 영국모델의 FT, (b) 한국모델의 FT

Fig. 8 Components of Top event and failure rate (a) FT of British and (b) FT of Korean system

표 2 우리나라와 영국 고장률의 비교

Table 2 Comparison of failure rate between Korean and British failure rates

	Failure of overhead line section
한국	0.000103014
영국	0.01405

5. 결 론

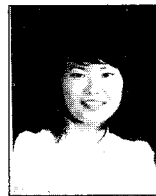
본 연구에서는 KORAIL 철도연구개발센터의 “전기시설물 점검주기 및 개량주기에 관한 연구(2006)”보고서를 바탕으로 영국의 전차선 안전성 분석 보고서에 적용하여 전차선로의 신뢰도를 산정하였다. 사례연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. FTA를 이용하여 요소별 고장률 데이터를 사용하여 전체 시스템의 신뢰도를 산정하였다. 이를 통하여 각 구성요소별 고장률이 전체 시스템의 신뢰도 평가에 어떠한 영향을 미치는지 추정할 수 있다.
2. 고장률 분석을 통하여 한국과 영국의 신뢰도 차이를 비교분석하였고, 추후 부품 교체시 최적 부품으로 교환하거나 신뢰도가 높은 부품을 사용하여 전체 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 추후 본 연구 결과를 전기철도 급전시스템 전체 신뢰도 향상을 위해 적용할 수 있는 보완대책 또는 최적 투자계획안 선정 등에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 강인권, “최신 전차선로”, 성안당, 2006
- [2] 김양수, 유해출, “전기철도공학”, 동일출판사, 1999
- [3] KORAIL철도연구개발센터, “전기시설물 점검주기 및 개량주기에 관한 연구”, 2006
- [4] 김원경, “시스템 신뢰도공학”, 교우사, 1999
- [5] 김원경, “신뢰도공학의 이론과 실제”, 교우사, 2005
- [6] RAILTRACK EE&CS Report, “Infrastructure Risk Modelling Overhead Line Traction Delivery System”, Oct 1997
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Fault Tree Handbook”, Jan 1981
- [8] 구본희, 차준민, 김형철, “장애사태 분석을 통한 전기철도의 신뢰도 산정”, 대한전기학회 전력계통연구회 춘계 학술대회논문집 pp.165-167, 2008
- [9] 구본희, 차준민, 김영현, 김형철, “베이즈 이론을 이용한 교류전철변전소의 신뢰도 분석”, 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집 pp.122, 2008

저 자 소 개



구 본 희 (具 本 熙)

1984년 5월 4일생. 2008년 대전대 전기정보시스템공학과 졸업. 2008년~현재 동대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 031-539-1910
E-mail : kbony@hotmail.com



차 준 민 (車 濬 敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 대전대 전기정보시스템공학과 교수.
Tel : 031-539-1915
Fax : 031-539-1910
E-mail : chamin@daejin.ac.kr



김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월 30일생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~1999년 엘지근무. 2003년 Texas A&M 전기공학과 졸업(공박). 2004년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.
Tel : 031-460-5450
E-mail : hckim@krri.rc.kr