

고속철도차량의 이선빈도가 귀선전류에 미치는 영향

(The Influence on Traction Return Current by Pantograph Detachment Frequency of High-speed Train)

이성근* · 조영만 · 고광철**

(Sung-Gyen Lee · Young-Maan Cho · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

Currently it is major problem of electric railway with increasing drive speed such as the arc generated by the pantograph detachment and the distortion current in the motor-block high speed switching. When physical contact between the pantograph and the catenary line is separated, the pantograph detachment arcing occurs and it makes up the conductive noise to the return feeder. We made the EMTP modeling of the railway traction system and the pantograph arc by circuit elements and switches. The influence of pantograph detachment frequency is investigated by changing some frequencies. The over-current occurs in each detachment and it oscillates some time at beginning and stabilizes gradually. The magnitude of over-current is decided by instantaneous value of existing traction return current. If the detachment occurs at a point of peak value or distortion current, the over-current will be more harmful to the power systems connected with the return feeder and will become to arise with increasing detachment frequency.

Key Words : Pantograph Detachment Frequency, Traction Return Current, EMTP Modeling, High-Speed Train

1. 서 론

철도차량의 주행속도가 증가함에 따라 등고를 유지 하던 전차선의 접촉력이 변하여, 물리적으로 팬터그래프와 떨어지는 이선현상이 발생하며 이는 전기철도가 고속화됨에 따라 수반되는 주요 문제점 중 하나이다. 이러한 이선현상은 전차선에서 팬터그래프로 전력을 공급하는 도중에 발생하므로 접촉면에서 아크방전을 일으킨다. 이 때 발생하는 아크는 팬터그래프와 전차선을 마모시켜 파손, 수명단축 등의 물리적 문제뿐만

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
 ** 교신저자 : 한양대학교 전기·생체공학부 교수
 * Main author : Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
 ** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
 Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886
 E-mail : kwang@hanyang.ac.kr
 접수일자 : 2014년 4월 2일
 1차심사 : 2014년 4월 10일, 2차심사 : 2014년 5월 25일
 심사완료 : 2014년 7월 11일

아니라 철도차량 및 내부 회로에서 전기적인 문제를 발생시킨다[1-2]. 또한 철도차량의 주 전력변환장치에서 발생하는 고속 스위칭 동작과 함께 전자과장해(EMI)의 주요 발생원이 된다[3]. 전자과장해는 방사성 잡음과 전도성 잡음으로 구분되며[4], 특히 전도성 잡음의 경우 레일의 임피던스 본드와 연결된 귀선선로를 통해 변전소에 유입됨으로써 기기에 효율을 감소시키고 과열 및 포화 등 의도하지 않은 악영향들을 미치게 된다. 따라서 전력계통의 신뢰성 확보와 안정적인 동작을 위해 고속철도에서 발생하는 전도성 잡음에 대한 연구의 필요성이 요구되며, 이를 위해 주 전력변환장치에서 발생하는 전도성 잡음뿐만 아니라 아크에 의해서 발생하는 전도성 잡음 또한 고려되어야 한다. 하지만 기존의 아크모델링의 경우 주로 차단기 등의 중전기기의 해석에서 다루어 졌으며, 실험을 통해 얻어진 초기 아크컨덕턴스, 아크전압, 아크전류 등의 측정데이터를 기반으로 아크컨덕턴스의 미분방정식에서 해를 구하는 방식으로 모델링이 진행되어 왔다. 이러한 방법은 물리적인 이해를 돕고 현상분석에는 용이하나, 전체적인 시스템을 해석할 경우에 직관적인 해석이 어려우며 상황에 따라 변화하는 실측데이터가 요구되는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 회로 모델링을 통하여, 이션현상이 일어났을 때 이션전류가 귀선선로에 미치는 영향을 연구하였다. 시뮬레이션은 EMTP (Electromagnetic transient program)를 이용하여 전차선로와 주 전력변환장치 등 집전시스템의 각 부분을 회로소자와 스위치, TACS(Transient analysis of control system) 소자로 모델링하였다.

2. 고속열차 집전시스템 모델링

그림 1은 시뮬레이션을 위해 모델링 된 고속열차 집전시스템을 나타낸다.

전차선로의 단권변압기(Auto transformer, AT)의 간격은 장소에 따라 상이하나, 평균적으로 8~10km의 간격으로 설치되어 있으므로 10km간격의 구간을 주행하는 상황을 가정하였다. 철도차량의 모델링은 300km/h의 속도로 주행하는 KTX 산천을 대상으로 실시하였고, 개략도는 그림 2와 같이 나타낸다.

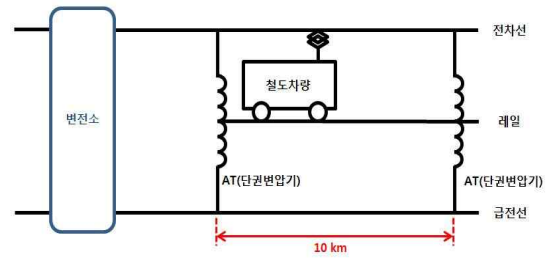


그림 1. 고속열차 집전시스템 시뮬레이션 범위
Fig. 1. The simulation range of electric railway feeding system

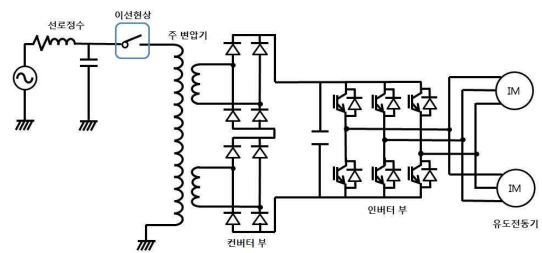


그림 2. 전체 집전시스템 모델링 개략도
Fig. 2. The schematics of whole electric feeding system model

3. 전차선로 및 주 전력변환장치의 회로모델

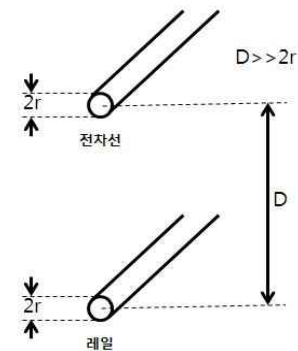


그림 3. 전차선과 레일
Fig. 3. The catenary wire and rail

전차선로의 모델링은 선로의 구조에 따른 선로정수를 이용하여 전송선 이론(Transmission line theory)으로 구성하였다. 고속철도의 전차선은 높이 5.08m, 직경 13.6mm, 단면적 150mm²의 홈불이선이며, 1km당 0.17593Ω의 저항을 가진다[5]. 선로정수의 인덕턴스와 커패시턴스의 값은 그림 3과 같은 구조로 높이가

고속철도차량의 이선빈도가 귀선전류에 미치는 영향

D(=5.08m)에 반경이 r(=6.8mm)인 전차선과 레일을 가정할 경우, 식 (1)과 같이 구할 수 있다[6].

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r \ln(2D/2r)}{\pi} \text{ [H/m]},$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(2D/2r)} \text{ [F/m]} \quad (1)$$

R, L, C 값을 이용하여 1km당 단위 선로정수를 구할 수 있으며, 차량의 위치에 따른 선로정수 값을 이용하여 그림 4와 같이 모델링하였다.

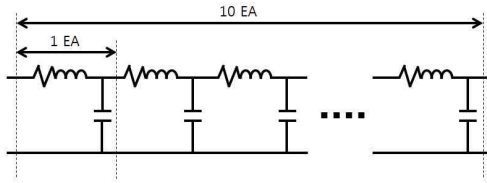


그림 4. 전차선로의 회로모델
Fig. 4. The circuit model of catenary

실제 KTX 산천의 주 전력변환장치는 주 변압기에서 전차선으로부터 받은 AC 25kV를 AC 1.4kV로 강압하여 2개의 컨버터부에서 정류하여 DC로 만든다. 그 다음 정류된 DC 2.8kV를 인버터부에서 다시 AC로 변환하여 유도전동기를 구동한다[7]. 주 전력변환장치는 EMTP를 이용하여 그림 5와 같이 구성하였다.

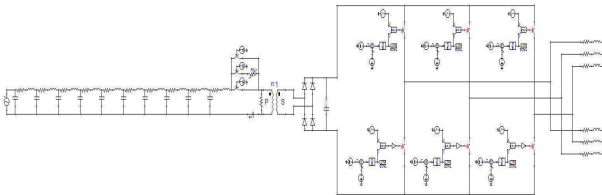


그림 5. EMTP 회로도
Fig. 5. The circuit diagram of EMTP model

주 변압기와 컨버터 부의 모델링은, 주행 시 컨버터 부는 정류회로의 역할을 하기 때문에 다이오드를 이용하여 구성하였고 변압기와 하나의 컨버터로 모델링하였다. 다음으로 인버터 부는 EMTP의 라이브러리 내에서 IGBT소자가 없기 때문에 같은 동작을 하도록

TACS 소자를 이용하여 그림 6과 같이 구성하였다.

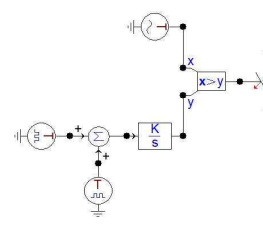
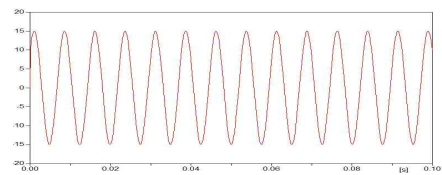
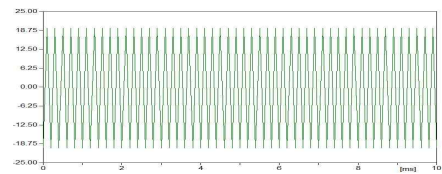


그림 6. TACS 소자로 구성된 IGBT 모델
Fig. 6. The IGBT model composed of TACS elements

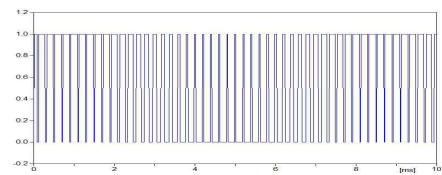
그림 7의 (a)는 레퍼런스 출력, (b)는 반송파 출력, (c)는 스위치에 입력되는 신호를 나타낸다.



(a) 레퍼런스 신호



(b) 반송파 신호



(c) IGBT 제어 신호

그림 7. IGBT 모듈 입력신호
Fig. 7. The input signal to IGBT module

레퍼런스 출력은 300km/h의 속도로 주행 시 대상열차의 차륜직경, 기어비, 전동기의 슬립과 극수 등의 특성에 따라 132.7407Hz의 주파수를 가지며[8], TACS 교류전원으로 구성하였다. 또한 반송파의 경우 TACS 펄스전원 2개로 양주기와 음주기의 진폭, 주기, 펄스폭을 조정하여 합친 후 적분기에 입력하여 삼각파로

변환하였다. 레퍼런스 출력과 반송파 출력을 비교하여 스위치의 ON/OFF 신호를 입력함으로써 EMTP에서 IGBT의 기능을 하도록 모델링하였다.

4. 이선아크모델

기존의 아크의 모델링은 주로 차단기 분야에서 아크 컨덕턴스를 구하는 미분방정식의 해를 구하는 방법으로 이루어져왔다. 이러한 방법들은 아크가 발생하는 각각의 상황에 따라 Mayr's arc model, Cassie's arc model 등을 적용하거나 혼용하여 아크 컨덕턴스를 구한다[9]. 하지만 이러한 방법은 해당 상황에 따라 변화하는 실제 측정값을 초기값으로 요구하며, 계산과 해석에 어려움을 가지는 단점이 있다. 따라서 거리와 전류에 의해서만 정해지는 아크저항의 일반식을 사용하면 아크의 회로모델링과 전반적인 특성연구가 용이해진다. 극간의 거리가 5~500mm의 범위에서 아크에 의해 확산되는 전력은 식 (2)와 같고[10], $P = I^2 R$ 의 관계에서 식 (3)과 같이 아크저항을 구할 수 있다.

$$P = (20 + 0.534z_g) I_t^{1.12} \quad (2)$$

$$R = \frac{20 + 0.534z_g}{I_t^{0.88}} \quad (3)$$

철도차량의 고속주행 시 발생하는 이선은 0.1mm나 0.5mm의 미소한 간격에서도 발생하지만, 드물게 5mm의 큰 이격에서도 발생할 수 있다. 따라서 발생 가능한 이선의 정도를 고려하여 일반적으로 최대길이인 5mm를 최대 거리로 모델링하였다.

그림 8은 이선현상의 개념도를 나타내며 d는 펜터 그래프와 전차선 사이의 이격거리이다.

이선 발생 전 전차선과 펜터그래프의 거리는 0mm 이고, 이선 발생 후에 최대 5mm까지 떨어졌다가 재접촉되는 상황을 고려하였다. 또한 300km/h의 속도로 주행하는 고속철도차량이 1km 주행 시 소요되는 시간은 12초이므로, 철도의 건설기준에 관한 규정에 따라 이선율을 1% 미만을 고려한 0.12초 동안에 이선되었다가 재접촉한다고 가정하였다.

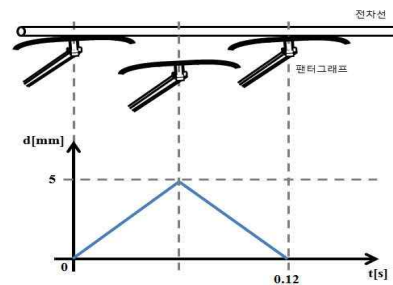


그림 8. 이선현상의 개념도
Fig. 8. The schematic of pantograph detachment

이선 발생은 그림 9와 같은 개념으로 진행되었고 TACS 스위치 소자와 가변저항으로 모델링 된 이선현상에서 각 스위치의 ON/OFF 동작을 나타낸다.

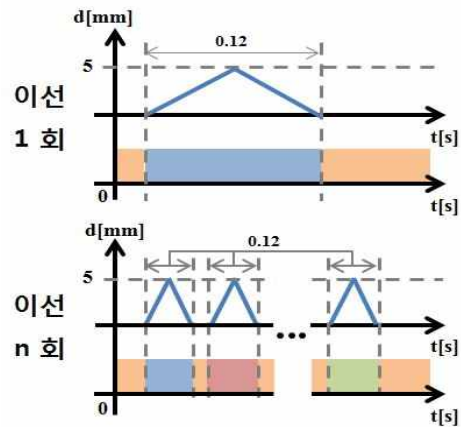


그림 9. 이선빈도에 따른 이선상황의 예
Fig. 9. The example of pantograph detachment by frequency

5. 이선빈도에 따른 시뮬레이션

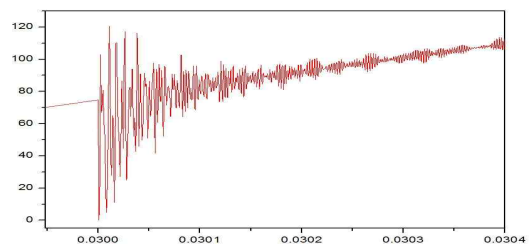
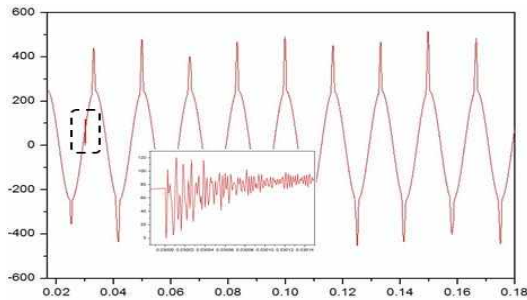


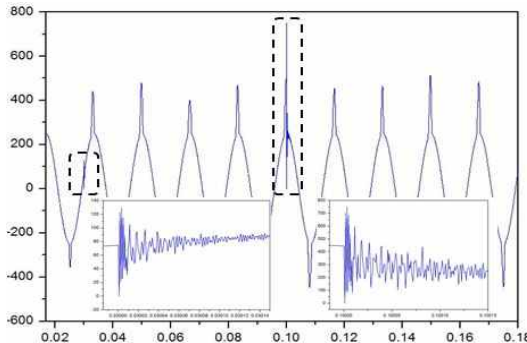
그림 10. 이선아크 파형
Fig. 10. The waveform of pantograph detachment arc

시뮬레이션은 동일한 이선시간 동안 발생하는 이선의 빈도를 1회에서 3회까지 변화하면서 귀선전류에 미치는 영향을 비교하였다. 그림 10은 이선아크의 파형을 나타낸다.

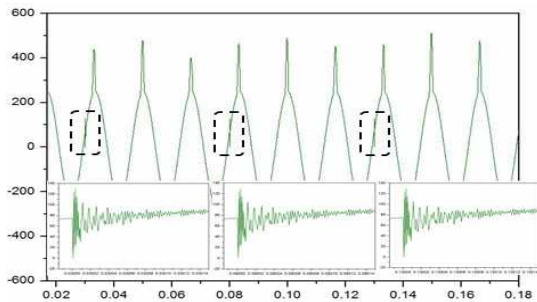
이선을 1%을 고려하여 전차선과 팬터그래프가 떨어져있는 시간을 0.12초로 하였고, 2회 이상의 경우에서 이선과 이선 사이의 접촉 구간(0.01초)은 이선시간에서 제외하였다.



(a) 이선 1회 발생



(b) 이선 2회 발생



(c) 이선 3회 발생

그림 11. 이선 빈도에 따른 귀선전류 파형
Fig. 11. The waveform of traction return current by pantograph detachment frequency

전차선과 팬터그래프의 접촉이 떨어지는 스위치 작용과 아크저항의 변화로 인해 초기에 전류가 튀는 과도현상을 거치고 점차적으로 안정된다. 그림 11은 이선아크가 발생하는 빈도에 따른 귀선전류를 나타낸다.

주 전력변환장치에 의한 왜형이 발생하고 있는 기존의 귀선전류에서 이선이 발생 할 경우 전류가 튀는 현상이 나타나는데, 이는 기존 파형의 순시값에 따라 그 크기가 달라진다. 특히 기존파형의 순시값이 피크일 때나 주 전력변환장치에 의해 변형된 파형에서 이선이 발생 할 경우에는, 기존 전류의 피크값에 비해 훨씬 큰 이상전류를 발생시킨다.

그림 11의 (a)는 이선이 1회 발생 했을 때의 파형이며 기존파형의 순시값이 높지 않은 상태에서 발생하여 이상전류의 크기가 그리 크지 않지만, (b)의 경우 두 번째 발생하는 이선이 기존파형의 피크 순시값과 변형된 지점에서 발생 하여 높은 이상전류를 발생시킨다. (c)는 0.12초내 3회 이선 시 각 이선마다 0.04초의 주기를 가지며 이선과 이선사이에 순간적으로 0.01초 동안 일어나는 접촉까지 0.5초의 주기를 가지는데, 이는 60Hz 기존전류의 3주기와 동일한 주기를 가진다. 따라서 3회 이선의 크기가 같은 것을 볼 수 있다.

6. 결론 및 고찰

본 연구는 EMTP를 이용하여 전차선로 및 주 전력 변환장치 등의 집전시스템과 이선아크현상을 회로모델링하고 이선빈도에 따라 귀선전류에 미치는 영향을 연구하였다. 이선현상의 빈도는 동일 시간 내에서 같은 주기로 1~3회 발생하는 경우를 가정하였으며 그 결과를 아래와 같이 정리하였다.

발생된 이선아크는 초기에 스위치 작용과 함께 아크저항의 변동으로 인하여 전류가 튀고 진동하는 과도현상을 거쳐서 점차적으로 안정되는 이상전류를 발생시킨다. 이상전류는 기존 귀선전류의 순시값에 따라서 그 크기가 변하며, 순시값이 피크이거나 주 전력변환장치의 스위칭 동작에 의해 변형되는 값을 가질 때 이선이 발생 시 기존전류의 피크값 이상의 이상전류를 발생하게 된다. 따라서 동일한 시간에 이선이 발생 하더라도, 이선의 빈도가 빈번할 경우 이러한 지점에

서 발생하기가 쉬워 적절한 보호설비가 되지 않거나 유지보수가 미흡할 경우 오작동 및 수명저하 등의 악영향을 미친다.

집전시스템과 이선현상의 회로모델링을 통한 시뮬레이션 연구는 기존 기법들에 비해 전체적인 시스템을 직관적으로 분석이 가능하다. 하지만 실제 철도차량에서 발생하는 현상과 비교해보기 위한 실제 측정이 가능한 상황이 아니라면, 이루어지기 어려운 한계점을 가지고 있다. 따라서 관련 기관과의 협조 및 심화연구가 진행된다면, 점차 실제모델과 더욱 유사하게 모델링된 집전시스템 모델링과 확보된 실제측정값을 기반으로 이선아크를 모델링함으로써 정확도를 높이는 연구가 가능하다. 이와 관련하여 국외에서 이루어진 실측자료와 시뮬레이션 결과를 비교한 연구[11]를 참고하여 본 연구 모델링의 개연성을 확인하였다.

이선빈도의 경우 본 연구에서 다룬 주기적인 형태 이외에도 다양한 토폴로지를 고려해 각 상황에 맞게 적용해 볼 수 있으므로, 철도차량의 고속주행 시 발생할 수 있는 사고들의 예측과 보호기기의 선정 및 사고 발생 후 조사 등에 도움이 될 수 있다.

References

[1] Bong-Yi Lee, Jae-Chul Kim, Sung-Ho Han and Su-Gil Lee, "A Study on an arc according to loss of contact between pantograph and catenary" Proceedings of KIEE Annual Conference pp.367-470, 2005.

[2] Jae-Moon Kim and Yang-Su Kim, "Transient Characteristic Study on Contact Loss of High Speed Electric Railway Using a Power Line Disturbance Simulator", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers P, Vol. 58, No. 4 pp. 427-431, Dec. 2009.

[3] Sung-Gyen Lee, Young-Maan Cho and Kwang-Cheol Ko, "Analysis on Conductive Noise of High-Speed Train including Pantograph Detachment", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 27, No.12, pp.87-92, Dec, 2013.

[4] Kunihiro Kawasaki, "Methode to Calculate Fluctuations in the Strength of Radio Noise Emitted from Electric Railway Systems", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 50, No. 3, Aug. 2009.

[5] Yangsu Kim, Hae-Chul You, Electric Railway, pp.453-459, Donillbook, 2008.

[6] Paul W. Smith, Transient Electronics : Pulsed circuit technology, pp.41-46, John Wiley & Sons Ltd, 2002.

[7] Sung-Joon Cho,, Man-Kyu Jeong, Kwang-Ju Lee, Geon - Tae Park and Du-Sik Kim, "A Study on Propulsion Control System for Korean Train Express(KTX-Sancheon)", Power Electronics Annual Conference, No. 7 pp. 295-296, 2010.

[8] Young-Maan Cho, "Analysis on the Conductive Noise generated by Pantograph Detachment of High-Speed Train", Hanyang Univ., Master Thesis., 2014.

[9] T. E. Browne, "Practical Modeling of the Circuit Breaker Arc as a Short line Fault Interrupter", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-97, No. 3 pp.838-847, May 1978.

[10] A. D. Stokes and W. T. Oppenlander, "Electric arcs in open air", J.Phys, D: Appl. Phys. Vol. 24, No.1, 1991.

[11] Liu Y. J., Chang G. W. and Huang H. M., "Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No.3, pp.2025-2027, Jul 2010.

◆ 저자소개 ◆



이성근 (李誠根)

1957년 5월 17일생. 1986년 서울시립대 전자공학과 졸업. 2010년 한양대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대 일반대학원 전기공학과 박사과정. 1987~1994년 서울시 공무원. 1994~2012년 서울시 도시철도공사 팀장. 2012년~현재

㈜디투엔지니어링 전무.



조영만 (趙英滿)

1985년 12월 28일생. 2012년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 2014년 한양대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



고광철 (高光哲)

1959년 1월 31일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동경공업대학 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 1990~1995년 가천대 전기공학과 조교수. 1995~2005년 한양대 전기공학과 조교수/부교수. 2005년~현재 한양대 전기·생체공학부 교수.