전기철도시스템에서 궤도회로 측면의 귀선전류 고조파 분석

Analysis of Harmonic Frequency for Return Current on the Track Circuit in Electrical Railway System

백 중 현*
(Jong-Hyen Beak)

Abstract - Electric power used in electrical vehicles flows into the substation through the feedback circuit, track circuit. Due to these power conversion equipments in electrical railroads, return current contains harmonics, and it should not affect other communication lines. In this paper, based on the return currents, we measured harmonics and analyzed an influence in railway equipments due to the harmonics. For analysis, we utilize the measured values of return currents measured in track circuits, and predictive values of those compared to the earth methods between the existing electrified sections. Applying the regulations used for Gyeongbu HSL(High Speed Line), the results of measured harmonics have found to be acceptable.

Key Words : Track circuit, Return current, Harmonics, Electrical railroad

1. 서 론

지난 2007년 기준으로 우리나라의 교통혼잡비용에 24조원이라는 막대한 비용을 지불하였으며 이는 전체 국내총생산(GDP)의 3%에 달하는 막대한 금액이다. 최근 전 세계적으로 지구의 온난화 문제, 환경문제 등에 직면하면서 지속가능한 교통수단으로 철도는 재조명 되고 있다. 하지만 철도의 경우 대량수송에 적합한 교통수단으로 가장 효율적인 교통수단임과 동시에 사고발생시 막대한 인명 및 재산 피해로 직결 될 수 있다. 따라서 안전사고에 대한 예방이 무엇보다 중요하다. 전기철도 차량에 의해 발생하는 전류는 신호, 전력, 전차선, 궤도시스템과 연관되며, 선로변 직원의 안전과 전철화에 따른 철도관련 전기시스템의 보호를 위해 취급되어야 할 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 열차운행의 안전을 책임지는 열차제어시스템이 귀선전류의 고조파 영향에 의해 오동작을 일으키는 경우, 열차운행의 중단 등과 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 더군다나 최근의 열차제어시스템은 ICT(Information and Communication Technology)를 적용한 무선통신에 의한 가상폐색 및 이동폐색시스템을 실현하는 열차제어시스템으로 전환되어가는 추세이기 때문에 귀선전류의 불평형 및 과전류상태에 의한 시스템 유도장해, 시스템 고장 등이 보다 심각하게 분석될 필요가 있다[1-7]. 전기철도차량에서 사용한 부하전류는 귀환회로인 궤도의 양쪽 레일 임피던스가 거의 동일하기 때문에 약 1/2씩 나누어져

임피던스 본드를 통해 변전소로 유입된다. 전기철도차량에서 사용하는 전력변환장치 때문에 부하전류에는 고조파가 함유되고 이 고조파 전류는 외부통신선에 영향을 주지 않아야 한다. 전기철도차량의 전력변환시스템은 견인전동기를 제어하여 차량의 추진 및 전기제동을 수행하는 주 전력변환장치와 차량 내 전기기기 전원 공급 및 객차 서비스를 위한 조명설비, 냉난방설비에 필요한 전원을 공급하는 보조전원장치로 구성된다. 전력변환시스템은 전력전자기술, 고속 대용량 반도체소자 및 마이크로프로세서의 기술발달에 힘입어 높은 성능과 승차감, 효율, 안전성, 에너지 소비측면에서 뛰어난 제어능력을 갖추게 되었다. 하지만 고속 스위칭소자를 사용함에 따라 발생하는 고조파로 인해 전기차량은 물론 변전소, 신호시스템, 데이터 전송 및 감시시스템에 영향을 주게 된다[6-10]. 특히 전력변환장치의 정수배 근방 주파수에서 발생한 노이즈 전류를 귀선전류 고조파라 한다. 본 논문에서는 개정된 철도안전법에 따라 시험을 수행하여야 하는 궤도회로 고조파 확인을 위해 신설된 전기철도 구간에서 철도차량 운행에 따라 측정, 분석한 귀선전류의 고조파를 기반으로 전기철도 구간에 있어서의 차량운행속도에 따른 귀선전류 고조파 관계를 분석하였다.

2. 전기철도 전력변환 시스템

2.1 주전력변환장치

일반적인 전기철도 주전력변환장치는 크게 단상 교류전원을 받아 직류전원으로 변환하는 장치인 컨버터부와 직류전원을 다시 3상 교류전원으로 변환하여 견인전동기를 구동하는 인버터부로 구성한다. 컨버터부는 4상한 PWM 컨버터 2

* 정 회 원 : 한국철도기술연구원 지능형도시철도제어연구실
선임연구원

E-mail : jhbaek@krri.re.kr

접수일자 : 2012년 1월 17일

최종완료 : 2012년 4월 16일

대를 병렬 운전하는데 Boost Type PWM 컨버터 방식을 사용하여 직류 링크전압을 2,800Vdc로 제어한다. 컨버터 1대의 용량은 약 1,238kVA이며 입력단 전압은 1,400Vac이다. 이와 같은 형태의 컨버터를 사용함으로써 입력 역율을 1.0에 접근하도록 제어가 가능하고 회생 제동시에 에너지를 입력 측으로 환원할 수 있을 뿐만 아니라 입력전류를 정현파 형태로 할 수 있고 병렬운전에 의해 입력측 고조파 성분을 대폭 줄였다. 견인전동기를 구동하는 인버터부는 전압형 3상 PWM 인버터를 사용한다. 전압과 주파수를 동시에 제어하는 가변전압, 가변주파수 제어 방식을 적용하였다. 출력전압과 주파수를 동시에 제어하게 되면 교류전동기의 가감속 제어는 가능하나, 제동시 교류전동기에서 인버터로 흐르는 회생전력으로 인하여 콘덴서 전압이 크게 상승하거나 시스템에 과부하가 걸리게 되므로 이를 방지하기 위하여 전력을 제어하는 회생 제어기법을 적용한다.

2.2. 보조전원장치

보조전원장치는 교류입력전압을 직류전원으로 변환할 수 있는 IGBT를 사용한 PWM컨버터로 구성되어 있다. 직류 출력단 필터 커패시터의 초기 충전을 위한 충전부는 충전용 접촉기와 충전저항으로 이루어졌으며 4개의 파워 모듈로 이루어진 2군 2병렬 운전회로방식으로 구성되어 있어 보조전원장치에서 1개의 파워모듈이 불의의 사고로 인한 고장이 발생하게 되면 고장이 발생한 파워모듈의 컨버터군은 부하와 분리하고 정상운전중인 나머지 파워 모듈을 사용하여 운전한다. 또한, 교류의 입력전류파형을 정현파로 유지하도록 함으로써 저차고조파를 줄일 수 있고, 교류 입력측의 역율을 1.0에 근사하게 제어할 수 있으며 계통의 효율을 증대시킬 수 있다. 또한 직류 출력 전압의 맥동성분을 줄여 일정하게 제어할 수 있으며, 쌍방향의 전력흐름이 가능하여 4상 운전이 가능하다. 동일 용량의 위상제어방식 싸이리스터 컨버터에 비해 시스템의 중량 및 부피가 감소된다. 보조전원장치에서 생성한 직류전압은 열차의 주변압기 냉각을 위한 냉각팬 구동용 인버터의 전원으로 사용하며 승객서비스를 위한 냉난방장치와 공기압축기 등을 구동하기 위한 전원으로 사용한다.

3. 귀선전류 고조파 측정방법 및 제한치

전기차량 운행에 따른 궤도회로장치에 대한 고조파 간섭 및 영향 여부를 확인하기 위해 그림 1(a)와 같이 차량의 팬터그래프에 인접한 차량 내부 고전압 측에서 측정하고자 하였으나 그림 1의 (b)와 같이 절연체로 쌓여 있어 측정이 불가능하였기 때문에 그림 1의 (c)와 같이 차량 접지로 연결되는 곳에 로고스키 코일을 설치하여 귀선전류 고조파를 측정하였다. 로고스키 코일에서 측정된 전류 신호를 계측용 Labview 8.6 프로그램이 설치된 노트북 컴퓨터에 연결하고 A/D 변환하여 FFT 분석을 수행하였다.

그림 1 고조파 전류 측정위치: (a) 고조파 전류 측정위치 (b) 원래 측정하고자 했던 차량 고전압 측 (c) 전류 센서를 설치한 차량 접지 측 (d) 고조파 전류 측정사진

Fig. 1 Harmonic current measured point; (a) Harmonic current measured point, (b) Original measuring point of high voltage cable, (c) Current sensor installed transformer earth cable, (d) Measuring picture of harmonic current

시험 기준은 경부 고속철도 1단계시 사용되었던 것을 적용하였고, 이는 전기차량 운행에 따른 궤도회로장치에 대한 고조파 간섭 및 영향여부 확인에서 궤도회로 기준 주파수 (2040Hz, 2400Hz, 2760Hz, 3120Hz)별로 중심주파수(F0)와 측면 주파수(F0±25Hz)에서 측정된 고조파가 표 1의 궤도회로 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 지속적으로 초과하지 않아야 한다는 것이다[11]. 이러한 기준의 의미는 중심주파수(F0)와 측면 주파수(F0±25Hz)에서 측정된 고조파가 궤도회로 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 지속적으로 초과할 경우 열차검지 및 제한속도 정보전송에 장애를 발생시킬 우려가 있다는 것을 나타낸다.

표 1 궤도회로 주파수별 고조파 제한치

Table 1 Harmonic limits of track circuit frequency

궤도회로 주파수	2040Hz	2400Hz	2760Hz	3120Hz
중심주파수의 고조파 제한치(F0)	228mA	192mA	156mA	121mA
측면주파수의 고조파 제한치 (F0±25Hz)	80mA	60mA	52mA	45mA

4. 귀선전류 고조파 측정결과 및 분석

전기차량 운행에 따른 궤도회로장치에 대한 고조파 간섭 및 영향 여부 확인을 위하여 KTX 차량 내부 고전압 접지 측에 전류센서를 설치하여 2010년 8월 12일에 측정하였으며, 궤도회로 기준 주파수(2040Hz, 2400Hz, 2760Hz, 3120Hz)별로 중심주파수(F0)와 측면 주파수(F0±25Hz)에서 측정된 고조파의 실효치가 표 1의 궤도회로 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 지속적으로 초과하지 않았다. 총 8회의 측정결과 모두 유사한 데이터를 나타내기 때문에 이 중 170±5km/h 1왕복, 270±5km/h 1왕복 4개의 측정결과를 제시한다.

4.1. 상·하행 열차속도 170Km/h 주행열차에 대한 측정결과

상행방향, 170Km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 궤도회로 고조파 측정결과는 표 2에 제시하였다. 궤도회로 기준 주파수별 고조파 제한치를 1초 이상 초과하지 않음을 알 수 있다. 각 기준 주파수별 귀선전류 고조파에 따른 영향을 분석하기 위해 시간에 따른 귀선전류 변동 값을 그림 2와 같이 Labview 8.6의 Sound & Vibration Tool-kit을 사용, 분석하여 그래프로 제시하였다. 그림 2의 (b)에서 중심주파수(F0)와 측면 주파수(F0±25Hz)에서 측정된 고조파가 제한치를 초과하는 부분들에 대해 A, B, C 세 영역으로 구분하여 (c)부터 (e)와 같이 자세하게 분석하였다. 표 2의 결과와 같이 부분적으로 고조파 제한치를 1초 이상 초과하는 부분은 있으나 중심주파수(F0)와 측면 주파수(F0±25Hz)에서 측정된 고조파가 제한치를 동시에 1초 이상 초과하는 부분은 없었다. 다만 그림 2에서 측면 주파수의 경우 정확하게 F0±25Hz를 0.1초 단위로 분석은 불가능하기 때문에 F0±20Hz와 F0±30Hz에 대해 분석하였다.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

그림 2 열차속도 170km/h에서의 상행방향 측정결과; (a) 귀선전류 측정 데이터 (b) 귀선전류 고조파 측정 데이터, (c) A구간 분석 데이터 (d) B구간 분석데이터 (e) C구간 분석데이터

Fig. 2 Measuring result of up-direction on train velocity 170km/h; (a) Measuring data of return current (b) Measuring data of harmonic current (c) Analysis data of A section (d) Analysis data of B section (e) Analysis data of C section

표 2 상행 170km/h

Table 2 Up-direction 170km/h

평가항목	판정기준	시험결과	비고
1. 2040Hz	$\leq 228\text{mA}$	1. 2040Hz : 최대값 223mA	적합
2. 2040Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 80\text{mA}$	2. 2040Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 373mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
3. 2400Hz	$\leq 192\text{mA}$	3. 2400Hz : 최대값 242mA	적합
4. 2400Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 60\text{mA}$	4. 2400Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 355mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
5. 2760Hz	$\leq 156\text{mA}$	5. 2760Hz : 최대값 191mA	적합
6. 2760Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 52\text{mA}$	6. 2760Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 268mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
7. 3120Hz	$\leq 121\text{mA}$	7. 3120Hz : 최대값 200mA	적합
8. 3120Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 45\text{mA}$	8. 3120Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 234mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	

하행방향, 170Km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 궤도 회로 고조파 측정결과는 표 3에 제시하였으며, 각 기준 주파수별 귀선전류 고조파에 따른 영향을 분석하기 위해 시간에 따른 귀선전류 변동 값을 그림 3과 같이 그래프로 제시하였다. 그림 2 및 표 2의 결과와 마찬가지로 궤도회로 기준 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 초과하지 않음을 알 수 있다.

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 3 열차속도 170km/h에서의 하행방향 측정결과; (a) 귀선전류 측정 데이터 (b) 귀선전류 고조파 측정 데이터 (c) A구간 분석 데이터 (d) B구간 분석데이터

Fig. 3 Measuring result of down-direction on train velocity 170km/h; (a) Measuring data of return current (b) Measuring data of harmonic current (c) Analysis data of A section (d) Analysis data of B section

표 3 하행 170km/h

Table 3 Down-direction 170km/h

평가항목	판정기준	시험결과	비고
1. 2040Hz	$\leq 228\text{mA}$	1. 2040Hz : 최대값 228mA	적합
2. 2040Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 80\text{mA}$	2. 2040Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 361mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
3. 2400Hz	$\leq 192\text{mA}$	3. 2400Hz : 최대값 298mA	적합
4. 2400Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 60\text{mA}$	4. 2400Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 339mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
5. 2760Hz	$\leq 156\text{mA}$	5. 2760Hz : 최대값 283mA	적합
6. 2760Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 52\text{mA}$	6. 2760Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 294mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	

평가항목	판정기준	시 험 결 과	비고
7. 3120Hz	$\leq 121\text{mA}$	7. 3120Hz : 최대값 181mA	적 합
8. 3120Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 45\text{mA}$	8. 3120Hz $\pm 25\text{Hz}$: 최대값 215mA (F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	

4.2. 상 · 하행 열차속도 270Km/h 주행열차에 대한 측정 결과

상행방향, 270Km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 궤도회로 고조파 측정결과는 표 4에 제시하였다. 궤도회로 기준 주파수별 고조파 제한치를 1초 이상 초과하지 않음을 알 수 있다. 각 기준 주파수별 귀선전류 고조파에 따른 영향을 분석하기 위해 시간에 따른 귀선전류 변동 값을 그림 4와 같이 그래프로 제시하였다. 그림 2 및 표 2의 결과와 마찬가지로 궤도회로 기준 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 초과하지 않음을 알 수 있다.

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 4 열차속도 270km/h에서의 상행방향 측정결과; (a) 귀선전류 측정 데이터, (b) 귀선전류 고조파 측정 데이터, (c) A구간 분석 데이터, (d) B구간 분석데이터

Fig. 4 Measuring result of up-direction on train velocity 270km/h; (a) Measuring data of return current, (b) Measuring data of harmonic current, (c) Analysis data of A section, (d) Analysis data of B section

표 4 상행 270km/h

Table 4 Up-direction 270km/h

평가항목	판정기준	시 험 결 과	비고
1. 2040Hz	$\leq 228\text{mA}$	F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음	적 합
2. 2040Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 80\text{mA}$	(F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
3. 2400Hz	$\leq 192\text{mA}$	F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음	적 합
4. 2400Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 60\text{mA}$	(F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
5. 2760Hz	$\leq 156\text{mA}$	F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음	적 합
6. 2760Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 52\text{mA}$	(F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	
7. 3120Hz	$\leq 121\text{mA}$	F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음	적 합
8. 3120Hz $\pm 25\text{Hz}$	$\leq 45\text{mA}$	(F0와 F0 $\pm 25\text{Hz}$ 에서 동시에 1초 이상 초과하지 않음)	

하행방향, 270Km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 궤도회로 고조파 측정결과는 표 5에 제시하였으며, 각 기준 주파수별 귀선전류 고조파에 따른 영향을 분석하기 위해 시간에 따른 귀선전류 변동 값을 그림 6과 같이 그래프로 제시하였다. 그림 2 및 표 2의 결과와 마찬가지로 궤도회로 기준 주파수별 고조파 제한치를 동시에 1초 이상 초과하지 않음을 알 수 있다.

(a)

(b)

(c)

(d)

그림 5 열차속도 270km/h에서의 하행방향 측정결과; (a) 귀선전류 측정 데이터, (b) 귀선전류 고조파 측정 데이터, (c) A구간 분석 데이터, (d) B구간 분석데이터

Fig. 5 Measuring result of down-direction on train velocity 270km/h; (a) Measuring data of return current, (b) Measuring data of harmonic current, (c) Analysis data of A section, (d) Analysis data of B section

표 5 하행 270km/h

Table 5 Down-direction 270km/h

평가항목	판정기준	시험결과	비고
1. 2040Hz	$\leq 228\text{mA}$	F0와 F0±25Hz에서 동시에	적합
2. 2040Hz ± 25Hz	$\leq 80\text{mA}$	1초 이상 초과하지 않음	
3. 2400Hz	$\leq 192\text{mA}$	F0와 F0±25Hz에서 동시에	적합
4. 2400Hz ± 25Hz	$\leq 60\text{mA}$	1초 이상 초과하지 않음	
5. 2760Hz	$\leq 156\text{mA}$	F0와 F0±25Hz에서 동시에	적합
6. 2760Hz ± 25Hz	$\leq 52\text{mA}$	1초 이상 초과하지 않음	
7. 3120Hz	$\leq 121\text{mA}$	F0와 F0±25Hz에서 동시에	적합
8. 3120Hz ± 25Hz	$\leq 45\text{mA}$	1초 이상 초과하지 않음	

5. 결 론

본 논문은 전기차량 운행에 따른 궤도회로장치에 대한 고조파 간섭 및 영향 여부 확인을 위해 실제 전기철도시스템에서의 고조파전류를 측정하여 평가한 결과를 제시하였다. 전기차량 운행에 따른 궤도회로장치에 대한 고조파 간섭 및 영향 여부 확인을 위해 경부고속철도 1단계(서울-동대구)시 시행된 기준을 적용한 결과 차량에서 발생하는 고조파가 기준에 적합함을 알 수 있었다.

철도안전법에 의한 신설되거나 성능에 영향을 줄 수 있는 개량 노선의 경우 종합 시설물검증시험을 수행하여 시설물의 적합성을 확인하여야 하며, 이러한 시험의 한 분야로서 전기철도 구간에서 철도 차량 운행에 따라 발생하는 귀선전류 고조파에 의해 궤도회로 사용주파수에 영향을 줄 수 있는 지 확인하기 위한 궤도회로 고조파 확인 시험이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 시험을 위해 철도 차량의 고전압 접지 측에서 귀선전류 고조파를 측정하였으며, 분석결과 각각의 사용주파수별로 중심주파수 및 측면주파수에서 개별적으로 제한치를 넘는 경우는 있었으나 모두를 동시에 1초 이상 제한치를 초과하고 있지는 않았기 때문에 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 논문은 귀선전류에 의한 궤도회로의 유도장에, 시스템 고장을 예방하기 위해 실제 현장에서의 측정 및 분석 방법과 시스템 안전성 평가를 위한 시험기준을 제시하였음에 의의를 가지며, 향후 관련분야에 크게 기여할 것으로 기대한다. 특히 최근에 개정된 철도안전법에 의하면 신설되는 철도 노선의 운영을 위해서는 궤도회로에 대한 귀선전류 고조

과가 적합함을 확인하여야 하기 때문에 본 논문에서 제시한 시험방법 및 결과는 개정된 철도안전법에 따른 최초의 시험 결과로서 향후 신설되는 철도 노선의 운행 확인을 위한 귀선전류 고조파 시험 및 분석에 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 백종현, 김용규, 오세찬, 조현정, 이강미, “전기철도 구간에서의 철도차량 운행에 따른 귀선전류 분석”, 한국산학기술학회논문지 제12권 제9호, pp.4112-4118, 2011.
- [2] 김용규, 유창근, “2×25kV 급전방식에서의 공동접지망 적용에 따른 귀선전류의 영향”, 대한전기학회논문지 제51B권 제9호, pp.509-514, 2002.
- [3] 이길노, 김용규, 백종현, 유창근, “전기철도시스템의 접지유형에 따른 귀선전류 비교”, 2005 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp.53-55.
- [4] 김용규, 양도철, 유창근, “경부선 전철화 구간에서의 귀선전류 및 임피던스 예측”, 2001 대한전자공학이하계학술대회 논문집, pp.123-126.
- [5] 김용규, 백종현, 유창근, “기존선 전철화에 따른 궤도회로 특성 연구”, 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집.
- [6] Y.K, KIM and al, “Estimation and Measurement of the traction return current on the electrified Gyeongbu line”, 2001 Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1458-1461.
- [7] 이길노, 김용규, 김중기, 김학렬, “궤도회로에서의 공동접지와 단독접지 인터페이스”, 2005년 한국철도학회 추계학술대회 논문집.
- [8] 김용규, 백종현, 박재영, “궤도회로의 유지보수 효율화를 위한 동조 유니트 특성 분석”, 한국산학기술학회논문지 제10권 제12호, pp.3594-3599, 2009.
- [9] 철도청(1999), “경부선 동대구~부산간 전철화에 따른 신호 설비 실시 설계 보고서”.
- [10] 철도청(1999), “경부선 동대구~부산간 전철화에 따른 전력 설비 실시 설계 보고서”.
- [11] Eukorail(2003), “경부고속철도 1단계 Core System Integration Test Procedure Phase A and B : EMI(WBS No. : K690-0-C2300-EE-00+T-075)”

저 자 소 개

백 종 현 (白 宗 鉉)

1995년 2월 : 전북대학교 제어계측공학과 학사, 1997년 2월 : 광주과학기술원 메카트로닉스공학과 석사, 2009년 8월 : 전북대학교 메카트로닉스공학과 박사, 1997년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 지능형도시철도제어연구실 선임연구원
<관심분야> 현대제어, 지능형시스템, 시스템엔지니어링