

인천 국제공항청사 경전철 도입에 따른 고조파 영향 분석

(Harmonic Evaluation of An Imported IAT(Intra Airport Transit) System
in Incheon International Airport)

송학선 · 김진오*

(Hak-Seon Song · Jin-O Kim)

요 약

최근 전기철도에 고속화 기술이 적용되고 열차 구동장치 및 제어계통에 전력용 반도체 소자가 사용되고 있으며, 전기철도 구동시스템의 주요 구성장치인 인버터와 컨버터의 동작을 제어하는 전력전자 소자의 이용은 고조파를 발생의 원인이 된다. 이러한 고조파는 통신장애 및 전류, 전압의 전력품질 저하 등 여러 가지 문제를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 인천 국제공항에 설치되고 있는 경전철 전력설계의 전력시스템 평가 및 개발을 통해 상위 계통에 미치는 영향 및 전력시스템에서 발생할 수 있는 장애 요인을 사전에 예측 계산하여 이에 대한 대책을 마련하여 전력품질 향상에 목적이 있다. 인천 국제공항청사 내의 전력시스템의 전력품질 문제 접근에 있어 경전철이 운행될 경우 발생할 수 있는 여러 문제 중 특히 전압강하 및 전압불평형에 영향을 미치는 고조파 발생에 대해 분석하였다. 고조파 분석은 IEEE 519-1992(IEEE 141-1993과 동일) 기준에 의거하여 행하였다. 또한 인천 공항청사의 운행되는 경전철은 동적 전력시스템 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC 모델링하고 이의 시뮬레이션 결과를 이용하여 고조파 분석을 하였다.

Abstract

This paper presents harmonic evaluation of an IAT(Intra Airport Transit) system in Incheon International Airport. It will be used for electric vehicles with 80[kW] per car produced by Mitsubishi Heavy Industries Ltd, and which is constructed with SIV(Static Inverter), VVVF controller and two induction motor. The vehicles operated in the IAT system can be treated as rapidly changing DC load, and at a feeding substation, 3-phase electric power is transferred to DC 750[V] by rectifier. Since vehicles are changing continuously, the voltages for the load fluctuate in the IAT system, and moreover, the voltage fluctuation generates high-order harmonics. It results the difficulty in maintaining power quality in KEPCO systems' side.

The power quality of the IAT system in Incheon International Airport is evaluated using PSCAD/EMTDC simulator in the paper. The THD(Total Harmonic Distortion) of voltages and TDD(Total Demand Distortion) of currents, indices are calculated for the IAT system using the results of PSCAD/EMTDC dynamic simulation.

Key Words : Railway, Harmonic, THD, TDD

* 주저자 : 한양대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2297-1569, E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2005년 9월 8일, 1차심사 : 2005년 9월 12일, 심사완료 : 2005년 10월 4일

1. 서 론

최근 전기철도에 고속화 기술이 적용되고 열차 구동장치 및 제어계통에 전력용 반도체 소자가 사용되고 있으며, 전철화가 확장되고 수송량도 증가하는 추세에 있어 이로 인해 전압강하와 시스템 안정도 등 전력품질 저하가 우려되고 있다. 또한 전기철도 구동 시스템의 주요 구성장치는 컨버터와 인버터로 구성된다. 이러한 컨버터와 인버터의 동작은 전력전자 소자의 스위칭을 이용하는 펄스폭 변조방식(PWM: Pulse Width Modulation)으로 제어되기 때문에 고조파를 발생시키게 되며, 이러한 고조파는 통신장애 및 전류, 전압의 전력품질 저하 등 여러 가지 문제를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 인천 국제공항에 설치되고 있는 경전철 전력설계의 전력시스템 평가 및 개발을 통해 상위 계통에 미치는 영향 및 전력시스템에서 발생할 수 있는 장애 요인을 사전에 예측 계산하여 이에 대한 대책을 마련하여 전력품질 향상에 목적이 있다.

인천 국제공항청사 내의 전력시스템의 전력품질 문제 접근에 있어 경전철이 운행될 경우 발생할 수 있는 여러 문제 중 특히 전압강하 및 전압불평형에 영향을 미치는 고조파 발생에 대해 분석하였다. 고조파 분석은 IEEE 519-1992(IEEE 141-1993과 동일) 기준에 의거하여 행하였다. 또한 인천 공항청사

의 운행되는 경전철은 동적 전력시스템 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC 모델링하고 이의 시뮬레이션 결과를 이용하여 고조파 분석을 하였다.

2. 본 론

2.1 인천 국제공항청사 전력시스템의 IAT 시스템 모델링

그림 1은 인천 국제공항청사의 경전철 IAT 시스템 구축 사업에 대한 대략적인 구조를 보여준다. 경전철 구축 사업이 완료되면 터미널 I, 공항홀 A, B, C, D까지 확장될 것이다. 하지만 본 논문에서는 터미널 I(Terminal I)까지 완료된 시점을 가정하여 다음 4장에서 사례연구 하였다.

그림 2는 그림 1의 터미널 I의 전력시스템을 나타낸다. 한전(KEPCO)에서 22.9[kV]를 수전 받아 Star결선 변압기와 정류기(Rectifier)를 통해 DC 750[V]를 경전철에 공급하는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 경전철의 제동시 발생하는 전력을 이용하기 위해 회생제동을 위한 인버터(Inverter)도 설계시 고려되었다. 따라서 이동부하인 경전철뿐만 아니라 회생제동을 이용하기 위한 인버터로 인해 전력품질은 매우 저하될 것이다. 이에 대한 시뮬레이션 결과 및 증명은 다음 4장에서 하도록 한다.

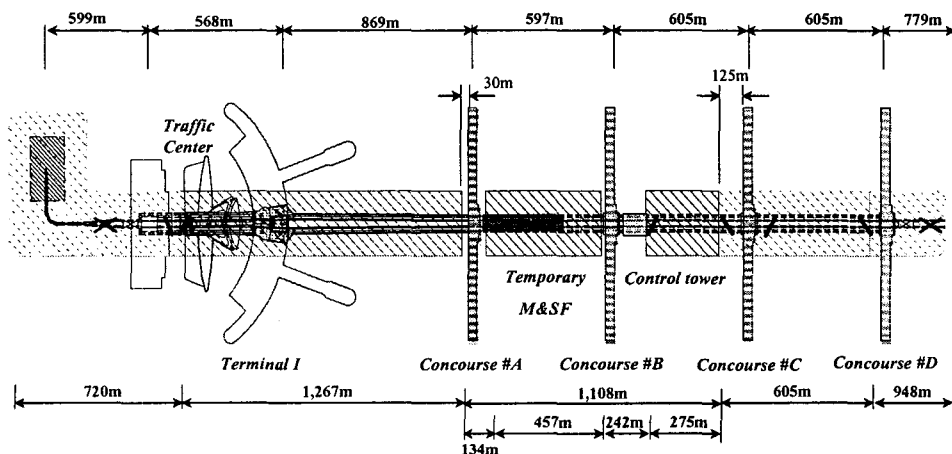


그림 1. 인천 국제공항청사의 경전철 IAT 시스템 개략도
Fig. 1. A Drawing of the IAT system in Incheon international airport

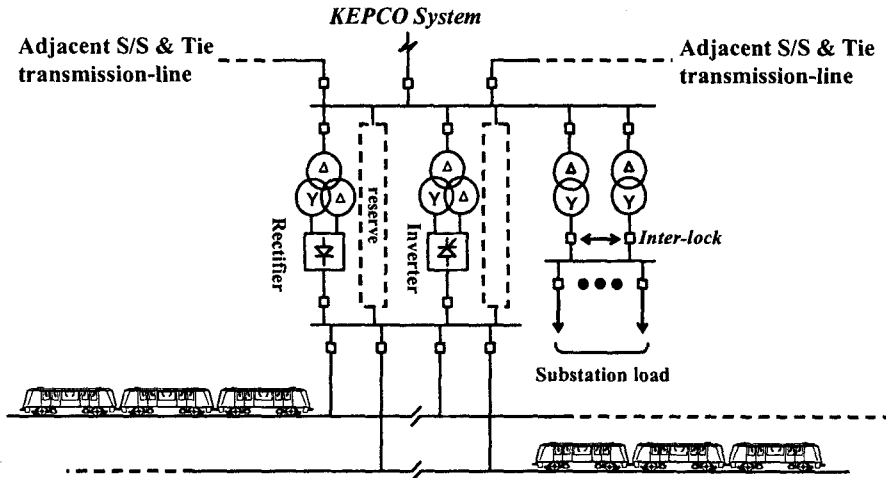


그림 2. 인천 국제공항철사의 경전철 IAT 급전시스템 단선도
 Fig. 2. The single-diagram of IAT system in Incheon international airport

2.2 PSCAD/EMTDC를 이용한 계통 모델링

그림 1의 시스템 개략도와 그림 2의 급전시스템 단선도를 바탕으로 하여 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 수행하기 위해 계통을 설계하였다.

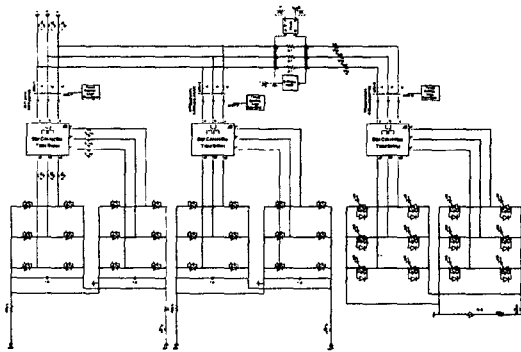


그림 3. 정류기 및 인버터 모델링
 Fig. 3. Rectifier and inverter modeling using PSCAD/EMTDC

그림 3은 154[kV]를 22.9[kV]로 감압하여 AC/DC 변환부에 급전하는 정류기 및 인버터에 대한 하위 설계로서 AC/DC 정류기 2대와 회생제동시 발생하는 전력을 상위 시스템으로 변환하여 보내주는 인버

터 1대로 구성되어진 설계화면을 보여준다. 그림 4는 80[kW]/량 경전철 차량에 대한 PSCAD/EMTDC 구현 모델을 보여준다[2,3].

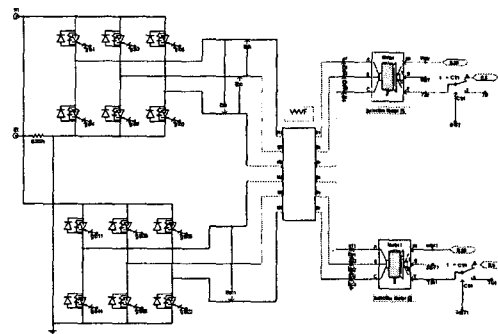


그림 4. 철도차량 모델링
 Fig. 4. Electrical trainload modeling using PSCAD/EMTDC

2.3 고조파에 대한 기준 및 규정

국내 고조파에 대한 기준은 한전(KEPCO) 기준이 있으나 전기철도처럼 이동하는 부하가 존재하는 배전시스템에 대한 기준은 아직 명확히 규정되어 있지 않다. 또한 인천 국제공항철사는 항공기 이착륙에 따른 민감한 설비들을 사용하는 시스템이므로 고조

파에 대하여 한전 기준보다는 엄격한 IEEE-519 기준을 적용하는 것을 원칙으로 설계되었다.

표 1. 한국전력공사 고조파 허용기준
Table 1. The harmonics standard of KEPCO

시스템	지중선로가 있는 S/S에서 공급하는 수용가	
	THD[%]	등가방해전류[A]
전압		
66[kV] 이하	3	-
154[kV] 이상	1.5	3.8
시스템	가공선로만 있는 S/S에서 공급하는 수용가	
	THD[%]	등가방해전류[A]
전압		
66[kV] 이하	3	-
154[kV] 이상	1.5	-

표 1은 한전의 고조파 전류 및 전압에 대한 관리 기준이며, IEEE-519에 의한 고조파 기준은 전류와 전압에 대해 각각 표 2와 3과 같이 엄격히 규정된다. 전압의 총 고조파 왜형률 THD는 식 (1)로 정의된다. 여기서 V_{1s} 은 기본파의 rms(실효치)이며 V_{hrms} 는 각 고조파의 실효치이다.

$$THD = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_{hrms}^2} \right) / V_{1s} \quad (1)$$

$$TDD = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \right) / I_L \quad (2)$$

표 2의 TDD는 %로 표현된 최대 부하전류에서 고조파 전류 왜곡으로 정의되며, I_{sc} 는 최대 단락전류, I_L 은 기본 주파수 요소의 최대 부하전류를 의미한다. 수학적으로 TDD는 식 (2)와 같이 표현된다. 또한 표 2는 홀수 고조파에 대한 규정만을 정의하고 있으며 짝수 고조파의 규제치는 홀수 고조파의 25[%] 이내로 정의하고 있다.

그림 1과 2의 인천 국제 공항청사의 IAT 급전시스템의 단선도를 이용하여 그림 3과 4와 같이 계통을 PSCAD/EMTDC로 모델링 한 후 시뮬레이션 결과를 이용하여 IEEE-519 고조파 기준을 위배하는지에 대해 평가하였다.

표 2. 일반적인 배전시스템에 대한 전류 왜곡 제한 규정

Table 2. Current distortion limits for general sub-transmission systems

$SCR = I_{sc} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)		
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$
<20	4.0	2.0	1.5
20-50	7.0	3.5	2.5
50-100	10.0	4.5	4.0
100-1000	12.0	5.5	5.0
>1000	15.0	7.0	6.0
$SCR = I_{sc} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)		
	$23 \leq h < 35$	$35 < h$	TDD[%]
<20	0.6	0.3	5.0
20-50	1.0	0.5	8.0
50-100	1.5	0.7	12.0
100-1000	2.0	1.0	15.0
>1000	2.5	1.4	20.0

표 3. 고조파 전압 왜형률

Table 3. Total harmonic distortion(THD) in IEEE-519

Voltage Level	개별 전압 왜형률[%]
69[kV] 이하	3.0
69.001 - 161[kV] 미만	1.5
161[kV] 이상	1.0
Voltage Level	총 전압 왜형률[%]
69[kV] 이하	5.0
69.001 - 161[kV] 미만	2.5
161[kV] 이상	1.5

2.4 시뮬레이션 결과

위에서 언급한 바와 같이 시뮬레이션은 전체 급전시스템 중 Terminal I에 대하여만 행하였다. 고조파 분석을 하기 위한 가장 중요한 모델인 전기철도 차량은 1량 당 80[kW] 3상 유도전동기 2대가 앞 뒤 구동원으로 동작된다. 본 논문에서 운행되는 경전철은 4량으로 가정하여 모의하였고, PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 위해 이용된 경전철 차량에 대한 제원은 아래와 같다.

- 차량모델 : Crystal Mover(Mitsubishi Heavy Industry제작)
- 최대 가속도 : 3.5[km/h/s]
- 최대 운행속도 : 70[km/h]
- 최대 감속도 : 3.5[km/h/s]
- 차량 형식 : 내부 안전 알루미늄 휠을 지닌 no-tube 고무 타이어 방식
- 차량 운전방식 : ATC(Automatic Train Control) 에 의한 무인운전
- 차량 추진방식 : AC 유도 전동기(80[kW]) 2기/차
- 차량 제동방식 : 전기 회생제동 및 공압 디스크 제동의 조합 방식

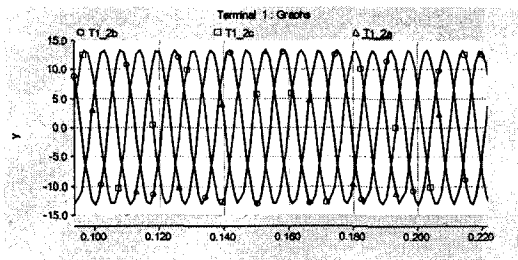
본 논문의 인천 국제공항철사 IAT 시스템 시뮬레이션 시간은 동적 상태를 보기 위해 2[sec]으로 하였고, 총 시뮬레이션 시간 중 1[sec]에서 회생제동을 위한 제동 상태로 전이된다고 가정하였다. 또한 회생제동 상태에서 다시 경전철 운영 모드로의 전환 시간은 총 시뮬레이션 시간 중 1.3[sec] 후라고 가정

하였다. 즉 0.3[sec] 간에 시뮬레이션 상의 회생제동 상태가 된다. 자세한 PSCAD/EMTDC 설계 및 시뮬레이션 과정은 지면 상 제약으로 길게 기술하지 않도록 하겠다.

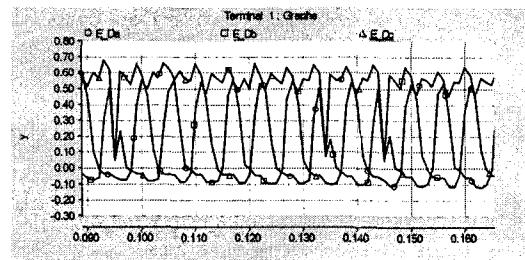
그림 5는 시뮬레이션 결과 그래프로 인천 국제공항철사의 154/22.9[kV] 2차측의 전압을 측정한 파형을 보여준다. 그림 5(a)는 경전철이 정상 운전시의 전압 파형이며, 그림 5(b)는 경전철이 제동상태로 접어들어 잉여전력이 22.9[kV] 2차측으로 유입되는 것을 볼 수 있는 시뮬레이션 시간 1[min] 이후의 전압 파형을 보여준다. 그림 5 (b)에서 볼 수 있듯이 전압 불평형 및 전압 왜곡이 두드러지게 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 6 (a)는 병렬로 연결된 12 펄스의 정류기에서 3상 교류를 스위칭 동작에 의해 정류하는 파형을 보여주며, (b)는 정류기의 DC(직류) 출력을 보여준다. 그림 6(b)는 경전철 4량(최대 부하)이 운행될 경우이며 무부하일 경우 DC 출력은 790[V]이다.

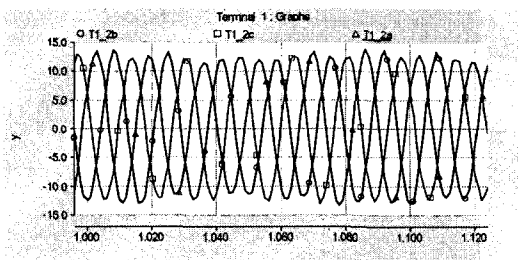
PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 결과를 이용하여



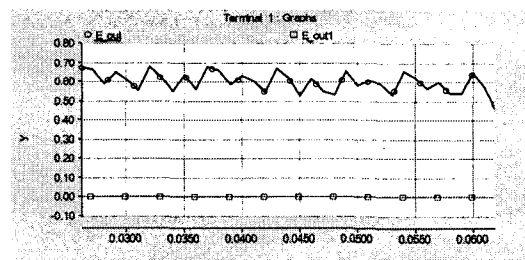
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 5. 동적 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 이용해 측정한 154/22.9[kV] 2차측 전압 파형
Fig. 5. The secondary voltage profile of 154/22.9 kV transformer using PSCAD/EMTDC

그림 6. 정류기의 3상 정류 파형 및 DC(직류) 출력
Fig. 6. Rectifier output and DC output

3 장의 IEEE-519 기준에 의한 고조파 분석한 결과는 표 4, 5, 6과 같다.

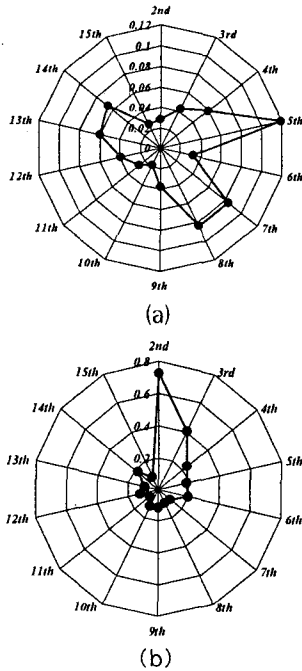


그림 7. 인천 국제공항청사 IAT 시스템 154/22.9(kV) 2차측 전압의 기본파를 제외한 각 고조파 크기
Fig. 7. The secondary voltage harmonics' magnitude of 154/22.9 kV transformer in IAT feeding system

그림 7의 (a)는 경전철이 정상속도로 운행하고 있을 경우에 대한 15 고조파까지의 전압 크기를 보여주며, (b)는 경전철이 회생제동 상태로 전이되고 있을 경우에 대한 15 고조파까지의 전압 크기를 보여준다. 표 5와 6에서 사용된 $SCR = I_{sc}/I_L$ 은 참고문헌[1]을 참고하여 계산하였다. 표 4부터 6의 결과를 살펴보면 경전철이 정상 운전하고 있는 경우의 고조파 발생에 대한 인천 국제공항청사 IAT 시스템이 받는 영향은 IEEE-519 기준치 내의 정상적인 수준이다. 하지만 경전철이 제동을 할 경우, 비정상적으로 높게 발생하는 DC 출력전압에 의해서 인버터는 DC 회로로 절체하게 되고 따라서 인버터 전류는 정류기 출력회로를 인버터로 바이패스(bypass)하여 결과적으로 정류기의 출력값이 감소되는 경우에는

홀수 고조파 전류뿐만 아니라 비선형적인 짝수 고조파 전류까지 발생하게 되어 IEEE-519 기준치를 위반하는 것으로 평가되었다.

표 4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 이용한 고조파 전압 왜형률
Table 4. THD evaluation using PSCAD/EMTDC simulation results

Mode	정상 운행시	제동에 의한 회생제동시
THD[%]	5.0	5.0
계산된 IAT 시스템의 THD[%]	1.67	7.29
Assessment	Normal	Abnormality

표 5. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 이용한 홀수 고조파 전류 왜형률
($SCR = I_{sc}/I_L : 100 \sim 1000$)
Table 5. The TDD evaluation of odd order harmonic using PSCAD/EMTDC simulation results

Mode	정상 운행시	제동에 의한 회생제동시
기준 TDD[%]	15	15
계산된 IAT 시스템의 TDD[%]	5.49	14.79
Assessment	Normal	Normal

표 6. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 이용한 짝수 고조파 전류 왜형률
($SCR = I_{sc}/I_L : 100 \sim 1000$)
Table 6. The TDD evaluation of even order harmonic using PSCAD/EMTDC simulation results

Mode	정상 운행시	제동에 의한 회생제동시
기준 TDD[%]	3.75	3.75
계산된 IAT 시스템의 TDD[%]	15.02	17.04
Assessment	Abnormality	Abnormality

위의 결과와 같이 IEEE-519 기준치를 위반하는 고조파에 대한 대책으로 경제성을 고려하지 않는다면 스위칭 소자를 이용한 능동필터가 가장 효과적일 것이다. 하지만 고조파 제거성과 경제성을 동시에 만족시키려면 비교적 저가의 수동소자를 이용한 수동필터의 사용도 하나의 고조파 저감대책이 될 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 인천 국제공항청사 IAT 시스템 운영 중 발생하는 고조파가 한전측 22.9[kV] 주 공급 전원에 미치는 영향을 평가하기 위해 연구되었다. 경전철의 구동원인 교류 3상 유도전동기에 최상의 전력품질의 정현파 3상을 공급하기 위해 한전에서 수전받은 AC를 DC로 변환하고 차량 자체에서 SIV(Static Inverter)를 통해 AC로 변환한 후, VVVF를 통해 최종 유도전동기를 구동한다. 따라서 전력전자 소자가 사용되는 정류기, 인버터와 회전기 기인 유도전동기로 인해 비선형적인 고조파가 발생됨을 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 이용하여 평가하였다. 인천 국제공항청사는 항공기 이착륙에 따른 민감한 설비들을 사용하는 시스템이므로 이러한 고조파 발생에 따른 대책이 필요함을 본 논문에서 결과로 제시하는 바이다.

본 연구는 (주)동산엔지니어링에 의한 연구지원으로 연구된 결과의 일부입니다.

References

- [1] IAC/Lea+Elliott Inc., Incheon International Airport IAT(Intra-Airport Transit) System Project Request for Proposal, Vol. 2, May 2003.
- [2] EMTDC User's Guide V. 4.02, Manitoba HMDC Research Centre Inc., 2003.
- [3] Seung-Hyuk Lee, Jin-O Kim and Hyun-Soo Jung, Analysis of Catenary Voltage of AT-Fed AC HSR System, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 6, pp. 1856-1862, November 2004.
- [4] 오광해, 이한민, 전기철도에서의 고조파 발생과 계통응답특성(II) - 고조파 측정분석을 중심으로-, 철도학회 논문집 제 7권 1호 pp 65-69, 2004.

◇ 저자소개 ◇

송학선 (宋學宣)

1979년 2월 20일생. 2004년 2월 군산대학교 전기전자공학부 졸업. 2004년 3월 한양대학교 대학원 전기공학과 입학. 2004년~현재 동대학원 전기공학과 석사과정.

김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전자전기공학부 교수.