

다단자망 알고리즘을 이용한 급전시스템의 무효전력 보상 모델링 및 시뮬레이션

Modeling and Simulation Reactive Power Compensator using Multi-port Network Algorithm in Electrified Railway

김 주 락*
(Joorak Kim)

Abstract - The power supply system in Korean electrified railway has adopted AT feeding. If a fault occurs in some substation for any reason, the vicinity substation must feed electric power on the outage substation through catenary. So, the feeding distance grows twice of the normal state at extended feeding condition. If substation's feeding distance is longer than normal condition, the catenary impedance and train to supply electric power from the substation. Therefore, the severe voltage drop can occur and power supply shall be not allowed. This paper presents the model of compensator against voltage drop using multi-port network algorithm. Whole traction power supply system can be analyzed with this model. Computer simulation including this model is performed based on real train schedule and increased schedule in case studies.

Key Words : Reactive power compensation, Voltage drop, Traction power supply system

1. 서 론

경부고속철도가 2004년 4월 개통한 후 서울~부산 구간은 반나절 생활권이 되었다. 도심 접근성과 비움측면을 고려하면 항공 교통보다 우위에 있어 지속적인 수송수요 증가를 보이고 있다. 이후, 경부고속선 2단계 구간 및 도심구간이 개통되어 완전한 고속선이 구성되고 있고, 2015년 호남고속선의 개통으로 국내 고속선 구간의 건설이 확대 되었다. 이와 같이 고속선 구간은 서울을 중심으로 부산, 광주 방향으로 확대 되어 고속철도 운영 초창기의 열차 편성보다 훨씬 그 수가 많아 졌으며, 전기적인 측면에서는 전력을 공급해야할 부하가 매우 크게 증가하였다.

한편, 교류 급전시스템은 집중전원이 단방향 급전을 약 25km~50km를 공급하기 때문에 열차와 전차선로에 의한 전압강하가 시스템의 전력공급 안정성에 미치는 영향이 매우 크다. 더불어, 하나의 전원으로 긴 구간에 전력을 공급하기 때문에 전원의 고장시 전력공급 대책이 필요하고, 이러한 이유로 연장급전을 고려한 전원을 시설하고 있다. 이와 같이 급전시스템의 전원 용량은 정상급전은 물론 연장급전까지 고려하지만 앞서 언급한 부하의 증가는 전압강하에 영향을 끼칠 것이다[3,4].

본 논문에서는 급전시스템의 현재 연장급전 조건에서 전압강하의 현황을 검토하고, 더불어 향후 부하 증가에 대비하여 전압강하를 예측하고, 전압 보상이 필요한 경우 보상설비의 용량과

적정 위치를 예측할 수 있는 수학적 모델링과 시뮬레이션 방법을 제안하고자 한다. 전압의 보상은 급전시스템의 무효전력을 보상하여 전압강하를 감소시키는 커패시터 뱅크를 대상으로 하였으며, 실제 급전시스템의 연장급전 상황을 가정하여 수립한 모델링의 적정성과 보상량 산정 방안을 사례 연구를 통하여 검토하였다.

2. 급전시스템의 전압강하와 부하 특성

급전시스템의 역할은 열차에 전력공급을 하여 운행에 지장이 없도록 하는 것이다. 이에 따라 정상급전뿐 아니라 변전소 고장을 대비한 연장급전을 고려하고 있다. 또한 약 3[MVA]부터 15[MVA]까지 다양한 용량의 차량이 운행되고 있으며, 제어 방식도 여러 가지로 다양한 부하 특성이 시스템에서 나타난다.

현재 국내에 운행중인 전기철도 차량은 모두 VVVF 인버터 방식으로 역행시 부하 역률 1을 목표로 제어하고 있다. 단, KTX-I 차량의 경우 사이리스터 위상제어 방식으로 전동기를 제어하여 VVVF 인버터 방식보다는 무효전력의 발생량이 크다. 본 논문에서 대상으로 한 경부고속선의 경우 KTX-I의 운행이 가장 빈번한 구간으로서 차량의 무효전력과 함께 급전시스템을 구성하는 주변압기, 단권변압기 및 전차선로 등의 리액턴스에 의한 전압강하가 큰 편이다. 그림 1은 실제 급전시스템에서 측정된 전압과 무효전력으로서 무효전력의 크기에 따라 전압의 크기가 변동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 무효전력을 보상하여 집전전압을 한계 값 이상으로 높일 수 있다.

* Corresponding Author : Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea.
E-mail: jrkim@krri.re.kr

Received : September 17, 2015; Accepted : April 14, 2016

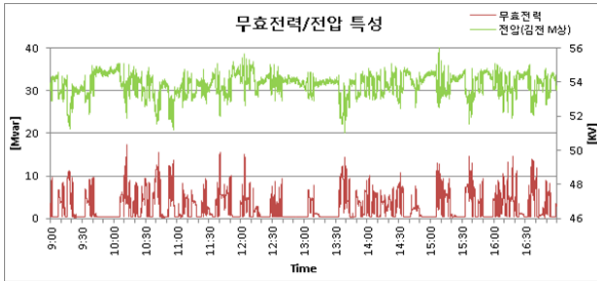


그림 1 전철변전소의 무효전력 및 전압 특성
Fig. 1 voltage and reactive power in railway substation

3. 무효전력 보상설비 모델링

최근 급증하는 철도의 수요에 따라 발생하는 급전시스템의 전압강하 문제는 무효전력 보상으로 해결할 수 있다. 실제 급전시스템에 무효전력보상설비를 설계 혹은 적용시 최적 위치 및 용량을 선정해야 한다. 그러나 급전시스템이 설계사 또는 운영사가 용이하게 이용할 수 있는 시뮬레이션 S/W가 전무한 실정이다.

본 논문에서는 2000년 이후 현재까지 대부분의 급전시스템 용량 산정에 이용되고 있는 'PowerRail'에서 무효전력 보상설비의 위치 및 용량을 산정할 수 있는 그림 2와 같은 무효전력 설비의 모델을 제안한다. 그림에서 보듯이 무효전력보상설비는 급전선 (AF)과 전차선(TF) 사이에 병렬로 설치된 커패시터로서, 수학적 모델은 식 (1)과 같다.

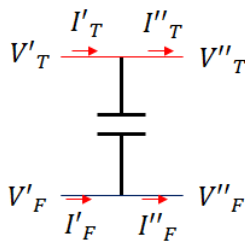


그림 2 무효전력 설비의 다단자망 모델
Fig. 2 Reactive power compensator model

$$\begin{bmatrix} V'_T \\ V'_F \\ I'_T \\ I'_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Y_c & Y_c & 1 & 0 \\ -Y_c & -Y_c & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V''_T \\ V''_F \\ I''_T \\ I''_F \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서, V'_T : 무효전력설비의 입력단의 전차선 전압 [V]
- V'_F : 무효전력설비의 출력단의 전차선 전압 [V]
- V''_T : 무효전력설비의 입력단의 급전선 전압 [V]
- V''_F : 무효전력설비의 출력단의 급전선 전압 [V]
- I'_T : 무효전력설비의 입력단의 전차선 전류 [A]
- I'_F : 무효전력설비의 출력단의 전차선 전류 [A]
- I''_T : 무효전력설비의 입력단의 급전선 전류 [A]
- I''_F : 무효전력설비의 출력단의 급전선 전류 [A]
- Y_c : 무효전력설비의 어드미턴스 [S]

특히, 이 모델은 다단자망 알고리즘을 이용한 것으로 그림 3에 보인 것과 같이 변전소, 구분소 등 설치할 위치에 따라 그 효과를 회로 계산으로 검증하기에 가장 편리한 알고리즘이 다단자망 해석법이다[1-3]. 그림 3에서 보듯이 변전소 또는 구분소에 보상설비 설치 위치에 따라 식 (2)의 M_C 행렬도 위치가 변경되어, 시스템을 표현하는 전체 행렬도 변경된다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 모델은 급전시스템의 설계 단계에서 다양한 무효전력 보상의 대안을 비교 검토할 수 있는 장점이 있다.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot M_C \cdot M_{LINE} \cdot M_{MIDAT} \cdots M_{LINE} \cdot M_{TRAIN} \cdot M_{LINE} \cdot M_C \cdot M_{SP} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (2)$$

4. 사례연구

4.1 모의 계산 조건

급전시스템의 무효전력 보상설비의 효과를 검토하기 위한 모의 계산은 국내 철도 중 부하의 크기가 가장 큰 경부고속선의

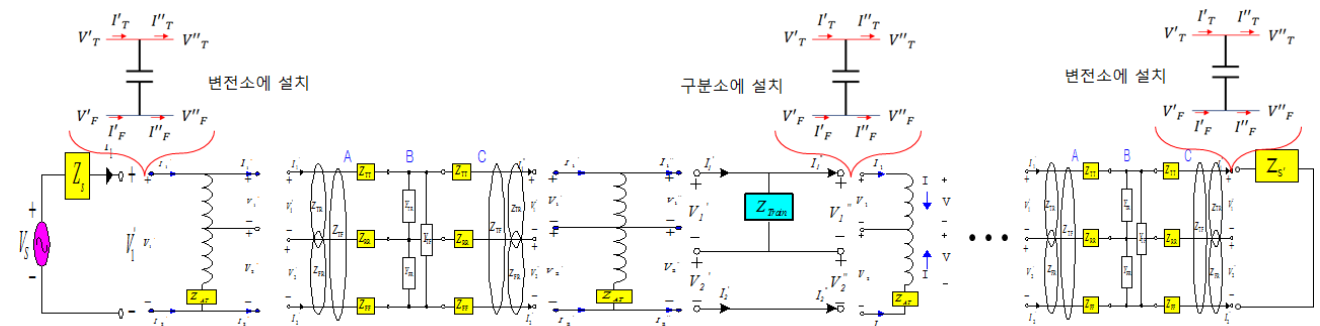


그림 3 무효전력 보상설비를 포함한 다단자망 해석 모델
Fig. 3 Multi-port algorithm with reactive power compensator in railway

한 급전구간을 대상으로 하였다. 그림 4는 한 변전소의 고장으로 연장급전을 시행하는 모의 계산 대상 계통도를 보인 것이다. 모의 계산 조건을 연장급전으로 한 것은 최대 전압강하 조건을 상정하기 위함이다.

그림 4와 같은 연장급전 계통에서 고속열차의 실제 영업 스케줄[11]을 적용하여 무효전력 보상설비의 효과를 검토하였다. 단, 무효전력 보상설비의 효과를 검토하기 위한 큰 전압강하를 모의하기 위해 그림 5와 같은 실제 운행 스케줄에 1대의 고속열차를 추가하여 그림 6의 스케줄로 가정하였다. 그림 6과 같이 기존 스케줄에 추가 열차를 배치한 이유는 향후 승객 증가 및 수도권고속철도의 개통을 예상한 것이다.

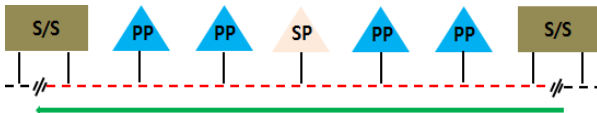


그림 4 시뮬레이션 대상 급전시스템
Fig. 4 Traction power supply system configuration for simulation

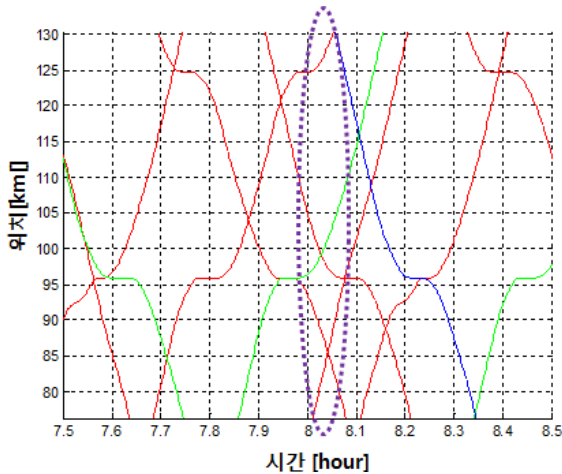


그림 5 경부고속선 실제 열차 운행스케줄
Fig. 5 Train schedule in Kyungbu high speed line

4.2 모의 계산 결과

4.2.1 급전계통 해석 결과

그림 5(a) 및 (b)와 같은 열차 스케줄을 기반으로 전압강하를 예측한 결과는 표 1 및 2와 같다. 각 표의 결과에서 알 수 있듯이 기존 스케줄의 계산 결과는 최저 차량 전압이 18.4[kV]로서 비지속성 최저 전압보다는 높아 열차 운행은 가능한 수준이다. 그러나 예측 스케줄을 기반으로 한 표 2의 계산 결과는 비지속성 최저 전압보다 훨씬 낮아 급전이 불가능하다. 따라서 전압강하에 대한 적절한 보상이 필요하다.

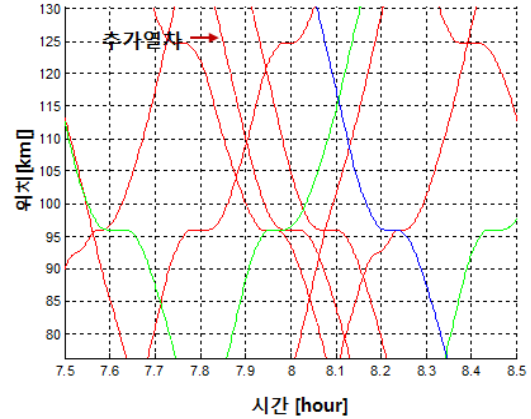


그림 6 경부고속선의 예측 운행 스케줄
Fig. 6 Predicted train schedule in Kyungbu line

그림 6의 예측 운행스케줄은 해당 연장급전구간에 총 6대의 열차가 진입하였다. 이들 열차들의 위치는 그림 7에 보인 것과 같다. 그림 7에 열차들이 위치할 때 최대 전압강하가 나타났으며, 각 열차들의 부하와 집전전압은 표 3에 보인다. 표 3에서 보듯이 모든 열차들은 비지속성 최저 전압보다 현저히 낮은 집전전압으로 계통 운영이 불가 한 것으로 나타났다. 따라서 전압강하를 보상할 대책이 필요하다.

표 1 현재 운행 스케줄을 기준으로 한 전압강하 계산 결과
Table 1 simulation result on present schedule

전압	공급전압 [kV]		차량전압 [kV]	
	최대	최소	최대	최소
T상	55.38	45.63	28.79	18.43
부하 [MVA]	1시간	15분	1분	순시
T상	20.45	31.80	57.90	66.61

표 2 예측 운행 스케줄을 기준으로 한 전압강하 계산 결과
Table 2 simulation result on predicted schedule

전압	공급전압 [kV]		차량전압 [kV]	
	최대	최소	최대	최소
T상	55.24	37.56	28.10	9.32
부하 [MVA]	1시간	15분	1분	순시
T상	22.16	33.82	78.14	89.94

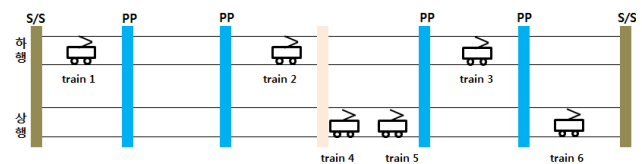


그림 7 연장급전 계통내 열차 위치 및 번호
Fig. 7 Train position and number in the target system

표 3 열차별 부하 및 집전전압 계산 결과

Table 3 Calculation result of all train voltage and power

구 분	부하[MVA]	집전전압[kV]
train 1	13.924+j7.134	17.80
train 2	13.800+j7.070	11.62
train 3	13.255+j2.692	9.64
train 4	-1.155-j0.337	10.67
train 5	11.767+j6.669	10.16
train 6	14.353+j5.567	9.32

4.2.2 전압강하 보상 대책 효과 검토 결과

급전시스템의 연장급전은 상시 발생하는 조건은 아니지만 발생할 경우에 반드시 대비는 해 야 하는 계통 구성이다. 따라서 연장급전 조건에서도 열차의 운행에 문제가 없어야 한다. 따라서 일상적인 계통 구성 조건이 아닌 연장급전 조건에서는 주변압기 2대 병렬 운영을 기본으로 하고, 주변압기 병렬 운영으로도 급전이 불가능 한 경우에 대해서 전압강하 보상설비를 검토하는 방식으로 검토해야 한다.

전압강하 보상 대책으로는 계통의 무효전력을 보상하는 방법이 가장 효과가 좋을 것으로 예측되기 때문에 커패시터 뱅크를 전압강하 보상대책으로 선정하였으며, 그 용량 및 위치별 대안은 다음과 같다.

- ① case i : 주변압기 병렬 운전
- ② case ii : case i + 변전소 커패시터 뱅크, 5Mvar
- ③ case iii : case i + 구분소 커패시터 뱅크, 5Mvar
- ④ case iv : case i + 구분소 커패시터 뱅크, 10Mvar

그림 7과 같은 연장급전계통 및 열차 위치 및 소비전력을 기준으로 각 열차들의 집전전압을 위해 제시한 전압강하 보상 대책 들을 각각 적용하여 계산하였고, 그 결과는 표 4와 같다.

표 4 전압강하 보상 대안들의 전압 보상 효과 예측 결과

Table 4 Simulation result(train voltage) of each case

구분	집전 전압 [kV]					
	Train 1	Train 2	Train 3	Train 4	Train 5	Train 6
case i	23.16	18.87	17.48	18.22	17.85	17.24
case ii	23.10	19.43	18.22	18.85	18.51	18.02
case iii	23.41	19.72	18.53	19.15	18.83	18.35
case iv	23.93	20.56	19.35	20.01	19.68	19.14

4개의 case 중 case i 은 급전시스템에 별도 설비 도입 없이 쉽게 구현 가능하며, 앞서 설명하였듯이 전압강하에 대비하는 기초적인 대응 방안으로 본 논문에서도 전압강하 대책으로 case i 은 기본으로 설정하며, 그에 더한 각 case를 서로 비교하고자 한다. 그림 8은 전압강하 보상을 위한 case i 과 ii 및 iii을 비교한 것이다. 즉, 5[Mvar] 동일한 용량의 커패시터 뱅크를 전철

변전소와 구분소에 각각 적용한 경우 전압 보상 수준을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 case ii의 경우 Train 6의 보상 크기가 0.78[kV]로 전압 보상 효과는 그리 크지 않았다. 반면 case iii의 경우 Train 6의 보상 크기가 1.11[kV]로 커패시터 뱅크의 위치에 따라 전압 보상 효과가 달라지는 것을 보여준다.

이와 같은 결과를 볼 때, 연장급전 계통에서 무효전력 보상은 공급 변전소보다 구분소에 설치하는 것이 효과가 큰 것으로 나타났다. 여기서, Train 6은 집전전압 급전구간 가장 끝에 위치하여 집전전압이 해당 계통에서 가장 낮기 때문에, 대상 급전시스템의 전력공급 가능 여부를 판단하는 기준이 되며, case ii 및 iii의 경우 연속 최저 전압 19[kV]보다 낮기 때문에 전압강하 보상 수준을 높여야 할 것이다.

그림 9는 구분소에 커패시터 뱅크의 용량을 10[Mvar]로 높여 모의 계산한 결과를 기존 case i , ii와 비교한 것을 보여 준다. 즉, case iv의 전압강하 보상 크기는 Train 6을 기준으로 1.9 [kV]로서, 19.14[kV]의 집전전압으로 계산되었다. 이 전압 크기는 해당 급전시스템의 전력공급이 정상적으로 이루어 질 수 있다는 것을 말한다.

본 논문에서 대상으로 한 그림 4와 같은 급전시스템에서 그림 5 및 6과 같은 열차 스케줄로 전압강하 문제가 발생하였을 때, 선택할 수 있는 방안 중 구분소에 전압강하 문제를 해소할 수 있는 용량의 커패시터 뱅크를 설치하는 것이 가장 효과적일 것이다.

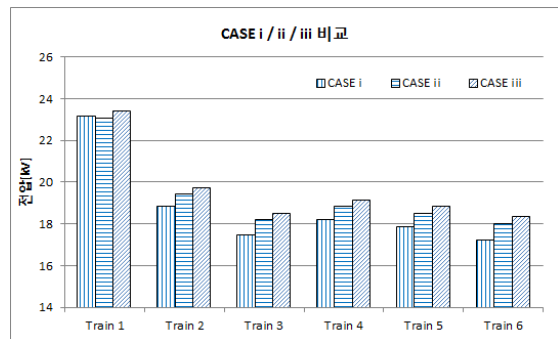


그림 8 Case i , ii 및 iii의 계산 결과 비교

Fig. 8 Comparison Case i with ii and iii

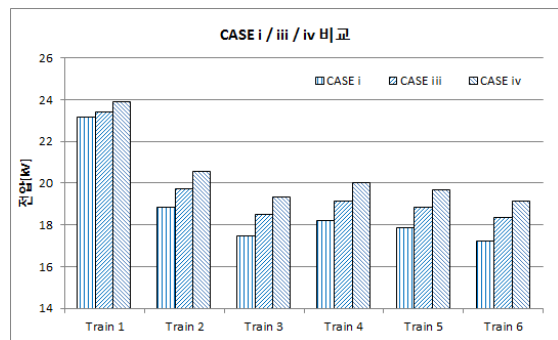


그림 9 Case i , iii 및 iv의 계산 결과

Fig. 9 Comparison Case i with iii and iv

3. 결 론

본 논문에서는 다단망 모델에 의한 철도 급전시스템의 무효전력 보상설비 수학적 모델을 수립하고, 이를 이용하여 실제 국내 고속철도 열차 스케줄을 기준에서 향후 수요 증가에 의한 열차 증편을 고려하여 무효전력 보상설비의 용량과 설치 위치를 검토하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- 본 논문에서는 기존에 수립한 다단자망 모델에 의한 급전시스템의 해석 방법에 기반하여, 최근 급속히 증가하는 고속철도 이용량에 대비한 전압강하 대책을 수립하였다. 무효전력 보상에 의한 대책으로서 기존 다단자망 해석 모델에 적용할 수 있는 수학적 모델을 수립하였다.
- 수립한 모델을 이용하여 실제 영업운전 중인 고속철도의 스케줄을 바탕으로 하여 전압강하 발생을 모의하였고, 무효전력 보상 용량과 위치에 따른 보상 효과를 사례 연구를 통하여 검토하였다.
- 특히, 연장급전이라는 급전시스템 운영 방법을 채택하고 있는 전기철도에서는 차량의 집전전압이 급전시스템의 운영 여부를 결정하는 중요 요소로서, 본 논문에서 제안한 무효전력 보상 대책 모델링을 이용하여 최적 용량과 위치 설계가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] S. Chang, K. Oh, J. Kim, and J. H. Kim, "Harmonic Analysis for Traction Power Supply System Using Four-Port Network Model", Trans. KIEE. Vol. 51., No. 6, pp. 255~316, 2002

[2] K. Oh, H. Lee, S Chang, J. H. Kim, "8-Port Network Model for Harmonic Analysis on the Test Track in Seoul-Pusan High-Speed Railway", Trans. KIEE. Vol 51., No. 3, pp. 99~106, 2002

[3] S. H. Chang, Multi-Port Modeling, Steady State Analysis and Power Quality Assessment in the Electric Railway Power System, Thesis for Doc., Hongik University, 2001.

[4] Joorak Kim, "A Study on Verification of PowerRail based on Voltage Drop under Extended Feeding Condition", Trans. KIEE. Vol 62., No. 2, pp.331~337, 2014

[5] J. kim, et. al., "Development of Integrated Simulator for AC Traction Power Supply System", Trans. KIEE. Vol 59., No.

1, pp.76~81, 2010

[6] IEC60850, 'Railway applications - Supply voltages of traction systems', 2007.

[7] W. Qingzhu, C. Jianye, H. Zhenhua, Z. Wang, "Real-Time Tracking of Substation's Feeder Current Based on Traction Calculation", Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 777-782, 2007.

[8] T. K. Ho, B. H. Mao, Z. Z. Yuang, H. D. Liu, "Computer simulation and modeling in railway applications," Computer Physics Communications, vol. 143, pp. 1-10, 2002.

[9] D. Yu, K. L. Lo, X. D. Wang, C. G. Yin, D. L. Huang, "Analysis of dynamic MRTS traction power supply system based on dependent train movement simulation", Proceedings of the 2004 ASME/IEEE joint Rail Conf., 2004.

[10] A. Stephan, "OpenPowerNet-Simulation of Railway Power Supply System", IT 08 Rail, 2008.

[11] <http://www.letskorail.com/>

저 자 소 개



김 주 락 (Joorak Kim)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 1999년 동대학원 전기제어공학과 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
 Tel : 031-460-5411
 Fax : 031-460-5028
 E-mail : jrkim@krii.re.kr