

철도 변전소 공유를 통한 직류 도시철도 시스템 회생에너지 이용률 향상 방안 연구

논 문
60-12-34

A Study of Improving Regenerative Energy Utilization in Urban DC Railway Systems Through Sharing Substations

정 승 민* · 이 한 상** · 변 길 성** · 권 세 혁*** · 장 길 수† · 정 호 성§ · 김 형 철§
(Seungmin Jung · Hansang Lee · Gilsung Byun · Gilsoo Jang · Sae-Hyuk Kwon ·
Hosung Jung · Hyungchul Kim)

Abstract - This paper deals with the power integration of large urban railway systems to improve regenerative energy utilization. Current regenerative energy utilization is low because there is no special plan for using this energy. If the railway system is integrated with other railway systems, the efficiency is expected to be improved. Through the case studies, to find the realistic effect of integrated operation, real system for the Seoul Metro lines, especially line 5 and 7, had been applied.

Key Words : Regenerative energy, Regenerative braking, Integrated railway system, KERS

1. 서 론

유가 급등에 따른 에너지 절약의 필요성이 산업 전반에 걸쳐 증대되고 있으며 환경 문제를 유발하는 화석에너지 발전을 억제하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 전력 산업 분야에서는 스마트그리드를 비롯한 고효율 친환경 그리드 구축 계획을 수립하여 활발한 연구를 진행 하고 있으며 이러한 추세에 따라 보다 친환경적이고 효율적인 도시철도 시스템의 구현을 위한 연구가 필요하다. 도시철도 시스템은 부하 용량 측면에서 가장 큰 수용가 중 하나로, 차량의 잦은 기동과 제동이 반복 과정에서 발생하는 회생에너지로 인해 효율 개선에 의한 효과가 가장 클 것으로 예상되는 전력 시스템 중의 하나이다. 도시철도시스템은 전력시스템의 다른 부하와 달리, 부하의 시공간적 변화가 있으며, 기동을 위하여 많은 순시전력을 필요로 하지만 철도차량의 기계적 관성으로 인하여 고속 운전 시에는 오히려 전력을 거의 소모하지 않고, 특히 제동 시에 발생하는 회생전력이 상당히 크다는 특성을 가지고 있다. 기존 국내의 도시철도차량의 경우, 제동 시 발생하는 회생에너지가 한계계통으로 다시 유입될 수 없는 다이오드 정류기를 채용하고 있어, 인근 기동 차량에서 회생에너지를 소비할 수 없는 경우 저항회로를 통하여 강제적으로 회생에너지를 소비하고 있는 실정이다[1]. 이에 대하여, 회생에너지 이용률 향상을 위하여 에너지 저장

장치 또는 회생 인버터 등의 다양한 연구가 진행되고 있다 [2]. 에너지 저장장치를 통해 효율 향상을 구현하려는 연구의 경우, 저장장치의 종류, 설치 장소, 제어 방안 등에 관한 연구가 진행되고 있다[3]. 배터리를 적용한 연구의 경우 배터리의 비용대비 수명을 고려하였을 때 충분한 경제성 확보가 어렵고, 초기 투자비용이 높은 단점이 있다. 설치 장소에 관련하여, 차량에 설치 또는 철도 변전소에 설치를 고려하는 연구가 진행되고 있지만 차량에의 탑재를 고려하는 경우 공간 확보 및 높은 순시용량을 필요로 하는 단점이 있고, 변전소에 설치하는 경우 충·방전 과정에서 가산 손실이 높은 점이 있다[4]. 회생인버터의 경우 인버터의 고조파로 인해 교류계통으로 고품질의 전력을 제공급할 수 없기 때문에, 전력 회사에서 오히려 선호하지 않는 이유로 개발이 되었으나 설치 및 운전이 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 초기 투자 비용이 낮고 유지보수의 필요성이 적은 연계운전을 통한 회생에너지 이용률 향상 방안을 제안한다. 도시철도시스템간의 연계 운전을 통해 연계점을 기준으로 회생에너지를 소비할 수 있는 차량을 확보함으로써 회생에너지 이용률을 높이는 연구를 수행하였다.

2. 직류도시철도 전력조류 해석 알고리즘

전력조류계산을 위한 회로망 해석은 루프방정식의 해를 구함으로써 가능하다. 그림 1에 철도 전력시스템 회로망을 나타내었다. 그림 1에 대한 노드방정식은 식 (1)과 같다. 차량 양단에 걸리는 전압과 등가임피던스의 관계는 식 (2)와 같다.

I_1 과 I_2 가 결정되어 있으므로, 반복계산법을 이용하여 각 노드의 전압의 해를 구할 수 있다. 그러나 반복계산 과정에서 $gveh$ 을 갱신하기 위하여 사용되는 식 (2)는 차량전압의 공급에 관계된 식이기 때문에, 수렴속도가 늦고 반복계산이 많아지게 하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 철도차

* 준 회원 : 고려대 공대 전기전자전파공학과
** 정 회원 : 고려대 공대 전기전자전파공학과
*** 시니어회원 : 고려대 전기전자전파공학과 교수
§ 정 회원 : 한국철도기술연구원
† 교신저자, 시니어회원 : 고려대 전기전자전파공학과 교수
E-mail : gjang@korea.ac.kr
접수일자 : 2011년 9월 9일
최종완료 : 2011년 10월 7일

량을 전류원으로 증가화 하여 컨덕턴스 행렬과 전압 및 전류 행렬의 형태를 수정할 필요가 있다. 식 (3)의 관계식을 이용하여 식 (1)과 (2)는 식 (4)와 (5)로 개선된다. 노드방정식의 이러한 개선은, 반복계산 과정에서 I_{veh} 를 갱신할 때, 소비전력과 전압의 관계가 1차적인 관계이므로, 계산 초기과정에서 전압의 오차에 대하여 덜 민감하도록 한다. 이것은 반복계산의 수렴속도 증가와 반복계산 횟수 저감으로 인하여 계산 량이 감소하는 효과로 나타난다. 또한 가선에 위치한 노드와 레일에 위치한 노드에 대한 행렬 구분이 가능하기 때문에 매 계산 시 전압행렬의 값을 구하는 계산 부담도 저감된다[5].

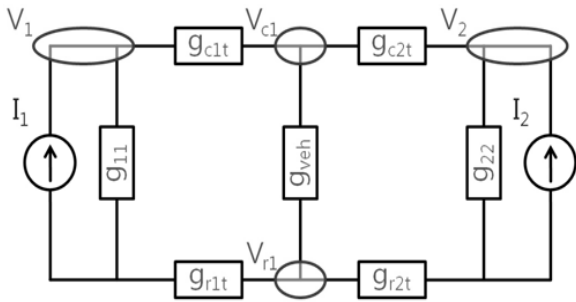


그림 1 변전소와 차량을 증가화 하여 나타낸 회로도
Fig. 1 Equivalent circuit of railway system

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1t} & 0 & -g_{c1t} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2t} & -g_{c2t} & 0 \\ -g_{c1t} & -g_{c2t} & g_{c1t} + g_{c2t} + g_{veh} & -g_{veh} \\ 0 & 0 & -g_{veh} & g_{veh} + g_{r1t} + g_{r2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{cl} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, g_{veh} : 철도 차량 부하 증가 어드미턴스
 g_{ii} : 노드 증가 회로를 구성하였을 때, 변전소의 어드미턴스
 g_{cit} : 차량과 변전소 사이의 가선 어드미턴스
 g_{rit} : 차량과 변전소 사이의 레일 어드미턴스
 V_i : 변전소 전압
 V_{ci} : 차량의 가선 전압
 V_{ri} : 차량의 레일 전압
 I_i : 노드 증가 회로를 구성하였을 때, 변전소의 증가전류

$$g_{veh} = \frac{P_{veh1}}{(V_{cl} - V_{r1})^2} \quad (2)$$

여기서, P_{veh1} : 철도 차량 유효전력

$$g_{veh} (V_{cl} - V_{r1}) = I_{veh} \quad (2)$$

여기서, I_{veh} : 철도 차량 증가 전류

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1t} & 0 & -g_{c1t} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2t} & -g_{c2t} & 0 \\ -g_{c1t} & -g_{c2t} & g_{c1t} + g_{c2t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{r1t} + g_{r2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{cl} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I_{veh1} = \frac{P_{veh1}}{(V_{cl} - V_{r1})} \quad (5)$$

그림 2는 개발된 도시철도시스템 조류계산 알고리즘의 순서도이다[6]. 그림 2의 알고리즘은 특정한 시간을 두고 상태가 반복되는 철도시스템의 특성에 기반을 두어 시격(headway)동안 1초마다 계산을 수행하도록 설계되어 있다. 매 초에 대한 계산을 수행하기 전에 TPS(Train Performance Simulator)에서 계산된 차량의 위치와 소비전력데이터를 입력으로 하여 고정된 변전소의 위치에 대한 철도차량의 위치를 결정한다. 차량의 위치는 차량-변전소 간, 차량-차량 간 거리에 기반을 둔 임피던스를 계산하여 컨덕턴스 행렬에 반영함으로써, 매 초 차량의 이동을 조류계산에 반영하도록 설계하였다. 또한 차량의 운전모드와 현재 운전하고 있는 궤도의 구배, 경도에 따른 차량의 소비전력이 달라지는데, TPS로부터 계산된 매 초의 소비전력데이터를 반영함으로써 차량전압과 부하전류의 관계를 갱신하도록 알고리즘을 구성하였다.

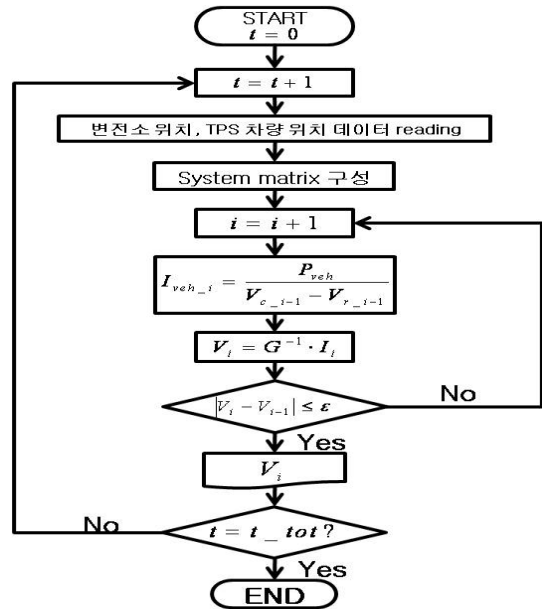


그림 2 철도 시스템 전력조류해석 알고리즘
Fig. 2 Power flow Flowchart of railway system

3. 개별운전

3.1 대상 노선 정보

호선 간 계통 연계를 모의하기에 앞서 효율성 향상을 판단하기 위해 직류 1,500 V를 이용하는 호선 2개를 선정하여 전력 수급 현황을 모의하였다. 서울 지하철 5호선, 7호선은 지리적으로 가까운 위치에서 운행되고 있으며 현재 전기적으로 연계가 되어있지 않다. 각 호선의 전력 조류를 모의하고 두 호선의 계통연계를 진행하여 효율 향상 평가를 도모하였다.

표 1 서울 지하철 5호선 역 및 변전소 위치 데이터

Table 1 Location data of Station and Transformer(Line 5).

Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.
510	2,900	521	14,706	532	25,764	543	36,444
511	3,611	522	16,057	533	26,975	544	38,350
512	4,839	523	16,497	534	28,339	545	39,046
513	6,178	524	17,508	535	29,200	546	40,400
514	7,201	525	18,216	536	30,030	547	42,235
515	8,392	526	19,764	537	30,913	548	43,519
516	9,479	527	20,484	538	31,816	549	44,318
517	10,584	528	22,184	539	32,826	550	45,119
518	11,676	529	23,084	540	33,585	551	45,976
519	12,979	530	24,202	541	34,325	552	46,903
520	13,805	531	25,084	542	35,235	553	47,993

표 2 서울 지하철 7호선 역 및 변전소 위치 데이터

Table 2 Location data of Station and Transformer(Line 7)

Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.	Sta No.	Loca.
709	1,585	720	13,675	732	26,403	743	38,986
710	2,641	721	14,535	733	27,003	744	40,443
711	3,900	723	15,656	734	28,119	745	41,620
712	5,479	724	16,536	735	30,343	746	42,160
713	6,900	725	17,377	736	31,423	747	43,780
714	7,740	726	19,218	737	32,177	748	45,240
715	8,725	727	20,007	738	34,368	749	46,740
716	10,055	728	21,193	739	35,260	750	48,680
717	10,905	729	22,700	740	36,281		
718	11,305	730	23,150	741	37,352		
719	12,705	731	25,063	742	38,376		

3.2 에너지 효율 분석

본 논문에서 사용하는 직류철도 전력조류계산 알고리즘은 TPS로부터 매 초 계산된 차량의 위치데이터와 소비전력데이터를 입력으로 받는다. 철도계통에 대한 전력조류계산은 차량의 이동을 고려하여 매 계산마다 컨덕턴스 행렬을 갱신하고, 차량의 운전모드에 따른 소비전력도 변화시켜주어야 한다[7].

표 3 서울 지하철 5호선의 운전조건 및 모의 조건

Table 3 Operation conditions of Simulation(Line 5)

모의 조건		서울 지하철 5호선, 7호선	
운전 데이터	정격전압	1,500	[V]
	정차시간	30	[sec]
	총 운행시간	4,162	[sec]
	시격	180	[sec]
변전소 데이터	무부하전압	1,650	[V]
	임피던스	0.02956	[Ω]
선로 데이터	급전선 임피던스	0.0203	[Ω/km]
	레일 임피던스	0.000464	[Ω/km]

3.2.1 5호선 분석 결과

서울지하철 5호선에 대한 조류계산은 정차시간 30초, 열

차시격180 초의 운행조건과 상, 하행선에 각 25대의 철도차량운행을 가정하였다. 총 부하량은 19133.6 kWh, 전력 총 공급량은 29992.67 kWh로 63.79%의 에너지 이용률을 보였다.

3.2.2 7호선 분석 결과

서울지하철 7호선에 대한 조류계산은 정차시간 30초, 열차시격 180초의 운행조건과 상, 하행선에 각 24대의 철도차량운행을 가정하였다. 총 부하량은 18679.1 kWh, 전력 총 공급량은 25164.08 kWh로 74.23%의 에너지 이용률을 보였다.

표 4 서울 지하철 5, 7호선 개별운전 시 부하 수급 현황

Table 4 Load supply status of Seoul Metro railway(Line 5,7)

Case	총 부하량 (kWh)	총 공급량 (kWh)	에너지 이용률(%)
5호선	19133.6	29992.67	63.79
7호선	18679.1	25164.08	74.23
합계	37812.7	55156.75	68.55

4. 연계운전

3.1 대상 노선 정보

전력손실과 연계선 길이의 문제로 인해 연계거리가 가까울수록 비용에서 장점이 있다. 또한 해당 노선의 연계하고자 하는 지점에 변전소가 설치되어 있다면 계통연계가 수월하다. 위의 조건을 반영하여 적합 노선을 선정된 결과, 서울지하철 5호선과 7호선의 환승역인 군자역을 연계점으로 상정하였다. 그림 3은 2개의 호선을 연계할 때 사용하는 전력조류계산 알고리즘 순서도이다. 호선 간 연계가 변전설비를 통해 이루어진다고 할 때 변전설비가 없는 호선에서는 변전설비를 설치한다고 가정하여 더미버스를 추가하여 해당역의 데이터를 입력함으로 연계를 모의하였다. 구성된 노드방정식은 각각의 노선에 대한 행렬과 연계 지점의 어드미턴스 값을 상호 어드미턴스 값을 추가함으로써 구성되어 전력조류계산을 실행한다.

추가적으로, 계통 통합 시 해당 변전소의 전압 안정도를 고려하기 위해 전압 변동을 확인해야 한다. 그림 4는 계통연계를 모의하기 전 5호선 군자역 변전소의 전압변동을 나타낸 것이다. 7호선과 같은 경우 군자역에 변전 설비가 존재하지 않으며, 이를 고려하기 위해 기존의 모션 정보에 군자역에 변전 설비가 설치되었음을 고려한 더미 버스를 추가하였다. 그림 5는 추가된 더미 버스의 전압변동을 나타낸 것이다.

3.2 에너지 효율 분석

기존의 운행조건과 동일하게 서울지하철 5호선과 7호선에 대한 조류계산을 수행하였다. 총 부하량은 37812.7 kWh, 전력 총 공급량은 54286.28 kWh로 69.65%의 에너지 이용률을 보였다. 이는 5호선 7호선을 통합하여 운행한 수치로서 세부적으로 각 호선의 부하와 공급을 표로 나타내면 다음과 같다.

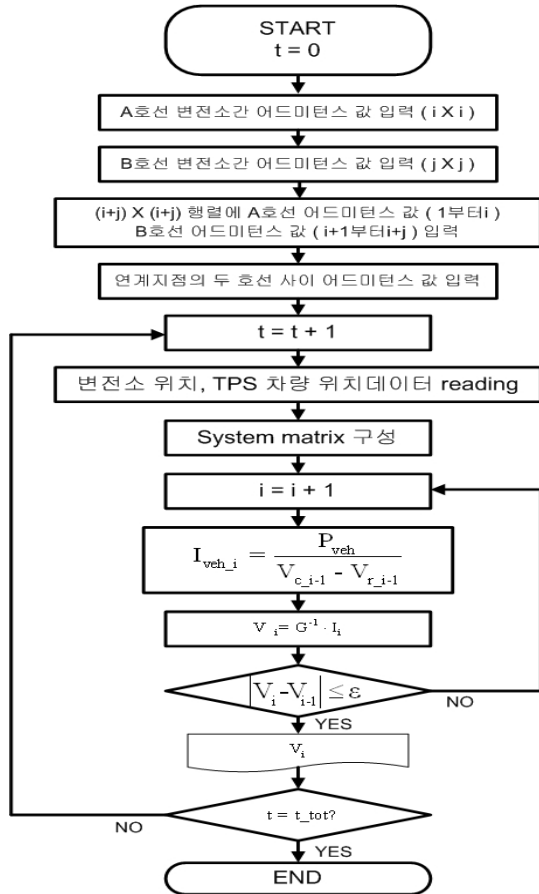


그림 3 호선 연계를 고려한 전력조류계산 알고리즘
Fig. 3 Power flow Flowchart of integrated railway system

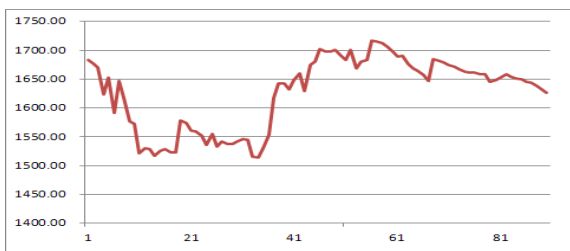


그림 4 5호선 군자역 변전소 전압 변동 그래프
Fig. 4 Voltage fluctuation graph(Gunja Sta. Line 5)

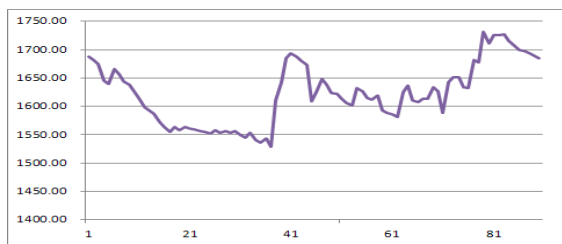


그림 5 5호선 군자역 변전소 전압 변동 그래프
Fig. 5 Voltage fluctuation graph(Gunja Sta. Line 7)

표 5 서울 지하철 5, 7호선 연계운전 시 부하 수급 예상
Table 5 Expectation of power supply in integrated railway system (Line 5,7)

Case	총 부하량 (kWh)	총 공급량 (kWh)	에너지 이용률(%)
5호선	19133.6	29569.03	64.71
7호선	18679.1	24717.25	75.57
합계	37812.7	54286.28	69.65

군자역 통합 변전소 운영 결과 870.46 kWh의 전력공급이 저장되는 것을 확인할 수 있었고 에너지 이용률 상으로 약 1.2%의 저장효과를 확인할 수 있었다. 그림 6은 연계 운전 시 군자역 변전소의 전압변동을 모의한 것이다. 전압 변동의 최대값과 최저값의 차이가 연계 운전 전에 비하여 감소한 것을 볼 수 있으며 전압 안정도에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

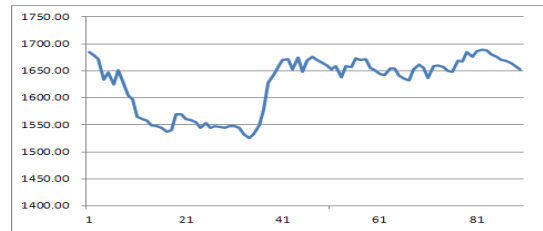


그림 6 통합 운전상의 군자역 변전소 전압 변동 그래프
Fig. 6 Voltage fluctuation graph(Gunja Sta. integrated condition at Line 5, Line 7)

5. 결 론

본 논문에서는 회생에너지 이용률을 개선하고, 운영비용 절감을 위한 방안으로, 노선 간 연계운전을 제안하였다. 개별 운전 대비 연계 운전에서의 효율 개선 효과를 해석하기 위하여 compaq visual fortran을 통해 도시철도 시스템 모델링 및 해석 알고리즘을 구성하여 모의하였다. 개별 운전 시, 두 노선의 에너지 공급량은 55156.75 kWh이었는데, 연계운전을 가정하였을 때에 에너지 공급량이 54286.28 kWh로 개선되었음을 사례연구를 통하여 알 수 있었다. 에너지 공급량 측면에서 개선이 미비한 이유는 철도시스템이 거리에 비례하여 손실이 증가하므로 일정 지역을 벗어나면 회생에너지가 전달되는데 한계가 있어서이다. 특정 지역에 대하여 분석했을 경우, 에너지 이용률 뿐 아니라 전압 안정에도 긍정적인 영향을 보여준다. 여러 노선에 대하여, 연계점을 확대하면 더 높은 효율 개선 효과와 전압 안정도 효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEO, No.20114010203010) 및 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 20110018632)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Francesco, G. Giancarlo, S. Edoardo, "Modal Analysis of a Railway Braking Resistor", Proceedings of the 27th International Modal Analysis Conference, 2009.2
- [2] 김주락, 장동욱, 한문섭, 창상훈, "도시철도 잉여 회생에너지 재활용을 위한 회생용 인버터의 현장 적용 시험 및 고찰", CICS 정보 및 제어 학술대회 논문집, 2009.10
- [3] 이한상, 이한민, 이장무, 장길수, 김길동, "전기철도 회생에너지 활용 극대화를 위한 에너지 저장장치 최적 동작 전압 결정 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회 전기설비전문위원회 춘계학술대회 논문집, 2010.4
- [4] M. Steiner, M. Klohr, S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles", European Conference on Power Electronics and Applications, 2007
- [5] Sang-Gi Chung, Jae-Seung Hong "Computer Algorithm for the Loadflow of the DC Traction Power Supply System", Korean Society for Railway Conference, pp.78-85, 2000
- [6] 에너지저장장치의 도시철도시스템 적용에 의한 전력조류분석연구, 한국건설교통기술평가원, 2009
- [7] 이한상, 송지영, 이한민, 이장무, 장길수, 김길동, "도시철도시스템 전력조류계산 알고리즘을 이용한 회생에너지 최적 활용 방안 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009

저 자 소 개



정 승 민 (鄭 丞 珉)

1986년 10월 12일생. 2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2010~현재 고려대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.
 Tel : 02-3290-4766
 Fax : 02-3290-3692
 E-mail : muejuck@korea.ac.kr



이 한 상 (李 漢 相)

1980년 1월 17일생. 2003년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기전자전파공학부 졸업(공학박). 2010년~현재 동 대학원 박사 후 과정
 Tel : 02-3290-4766
 Fax : 02-3290-3692
 E-mail : hansan80@korea.ac.kr



변 길 성 (邊 吉 成)

1981년 9월 19일생. 2006년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 석박사통합과정.
 Tel : 02-3290-4766
 Fax : 02-3290-3692
 E-mail : bgsean@korea.ac.kr



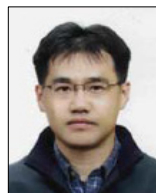
권 세 혁 (權 世 赫)

1949년 5월 4일생. 1974년 서울대 공업교육과 졸업. 1976년 동 대학원 공업교육과 졸업(교석). 1980년 美 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박). 현재 고려대 전기전자전파공학과 교수.
 Tel : 02-3290-3220
 Fax : 02-3290-3692
 E-mail : shkwon@korea.ac.kr



장 길 수 (張 洁 洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 美 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박). 현재 고려대 전기전자전파공학과 교수.
 Tel : 02-3290-3246
 Fax : 02-3290-3692
 E-mail : gjang@korea.ac.kr



정 호 성 (鄭 澣 聖)

1971년 10월 4일생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 광역도시철도연구본부 선임연구원.
 Tel : 031-460-5116
 Fax : 031-460-5459
 E-mail : hsjung@krri.re.kr



김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월 30일생. 1993년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2003년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 실장
 Tel : 031-460-5450
 Fax : 031-460-5459
 E-mail : hckim@krri.re.kr