

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

정승민*, 이한상*, 변길성*, 장길수*, 권세혁*, 김형철**
고려대*, 한국철도기술연구원**

A Study of improving regenerative energy utilization in Urban DC railway systems through sharing substations

Seungmin Jung*, Hansang Lee*, Gilsung Byun*, Gilsoo Jang*, Sae-Hyuk Kwon*, Hyungchul Kim**
Korean University*, Korea Railroad Research Institute**

Abstract - This paper deals with power integration of large urban railway systems for improvement of regenerative energy utilization. The main idea of this paper is that the integration of railway power systems will increase efficiency through sharing regenerative energy. To verify the effects of this system, case studies for Seoul Metro Line has been performed. Where railway data of Seoul Subway Line 5 and Line 7 are used. In this work, the integrated railway system is modelled using Compaq Visual Fortran.

1. 서 론

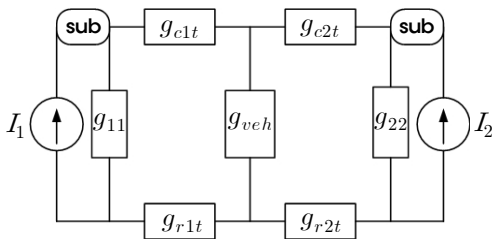
유가 급등에 따른 에너지 절약의 필요성이 산업 전반에 걸쳐 증대되고 있으며 환경 문제를 유발하는 화석에너지 발전을 억제하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 전력 산업 분야에서는 스마트그리드를 비롯한 고효율 친환경 그리드 구축 계획을 수립하여 활발한 연구를 진행하고 있으며 이러한 추세에 따라 보다 친환경적이고 효율적인 도시철도 시스템의 구현을 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

기존 국내의 도시철도차량의 경우, 계동 시 발생하는 회생에너지로 인하여 가선의 전압을 크게 상승시키거나, 저항회로를 통하여 강제적으로 소비하고 있는 실정이다. 회생에너지의 이러한 소비는 에너지의 경제적 소비에 반한다고 볼 수 있으며, 도시철도시스템간의 연계 배전망을 구성할 경우 경제성을 상당히 높일 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문은 도시철도 시스템 안에서 적절한 위치를 지정, 연계를 통해 각 지하철 호선 시스템간의 전력교류가 일어나게 하여 손실을 줄이고 효율을 높이는 시뮬레이션을 모의하여 차후 도시철도시스템의 배전망 구성 시 보다 효율적인 시스템을 모의할 수 있도록 지표를 제시하고자 한다.

2. 개별운전

2.1 노드방정식

다음은 2개의 철도변전소와 1대의 차량으로 구성된 간단한 철도계통에 대하여 그림으로 나타낸 것이다. 그림의 노턴 등가 회로에 대한 노드 방정식을 구성하면 다음과 같다.



<그림 1> 노턴 등가 회로

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1t} & 0 & -g_{c1t} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2t} & -g_{c2t} & 0 \\ -g_{c1t} & -g_{c2t} & g_{c1t} + g_{c2t} + g_{veh} & -g_{veh} \\ 0 & 0 & -g_{veh} & g_{veh} + g_{r1t} + g_{r2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{c1} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)의 노드방정식은 1차 연립방정식처럼 보이지만 컨덕턴스 행렬 (3,3)의 g_{veh} 값은 경우에 따라 발산할 가능성이 있어 수렴성이 낮고 작은

오차가 크게 확대되는 단점이 있다[1]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 차량 부하를 I_{veh} 의 크기를 가지는 전류원으로 등가하여 식을 재구성하면 다음과 같다.[2]

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1t} & 0 & -g_{c1t} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2t} & -g_{c2t} & 0 \\ -g_{c1t} & -g_{c2t} & g_{c1t} + g_{c2t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{r1t} + g_{r2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{c1} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ -I_{veh1} \\ I_{veh1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1 대상 노선 정보

호선 간 계통 연계를 모의하기에 앞서 효율성 향상을 판단하기 위해 직류 1500 V를 이용하는 호선 2 개를 선정하여 전력 수급 현황을 모의하였다. 서울 지하철 5호선, 7호선은 지리적으로 가까운 위치에서 운행되고 있으며 현재 전기적으로 연계가 되어있지 않다. 이에 해당 호선의 전력 수급을 모의하고 두 호선의 계통연계를 진행하여 효율 향상 평가를 도모하고자 한다.

<표 1> 서울 지하철 5호선 역 및 변전소 위치 데이터

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

검은 셀: 변전소가 위치한 역

<표 2> 서울 지하철 7호선 역 및 변전소 위치 데이터

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		

검은 셀: 변전소가 위치한 역

2.2 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 컨딕턴스 행렬을 갱신하고, 차량의 운전모드에 따른 소비전력도 변화시켜주어야 한다.[2]

〈표 3〉 서울 지하철 5호선의 운전조건 및 모의 조건

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	부부하전압	1,650 [V]
	임피던스	0.02956 [Ω]
선로 데이터	급전선 임피던스	0.0203 [Ω/km]
	레일 임피던스	0.000464 [Ω/km]

2.2.1 5호선 분석 결과

서울지하철 5호선에 대한 조류계산은 정차시간 30초, 열차시격 180초의 운행조건과 상, 하행선에 각 25대의 철도차량 운영을 가정하였다. 총 부하량은 19133.6 kWh, 전력 총 공급량은 29992.67 kWh로 63.79 %의 효율을 보였다.

2.2.2 7호선 분석 결과

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

〈표 4〉 서울 지하철 5호선, 7호선 개별 운전 시 부하 수급 현황

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

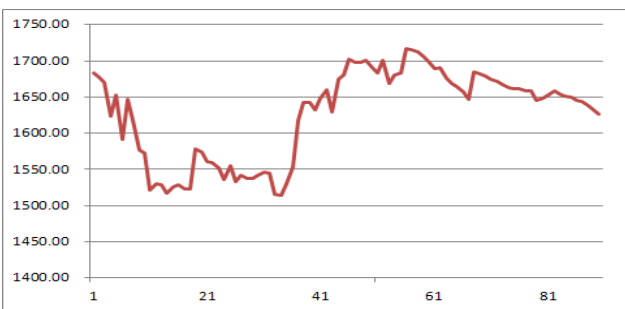
3. 연계운전

3.1 대상 노선 정보

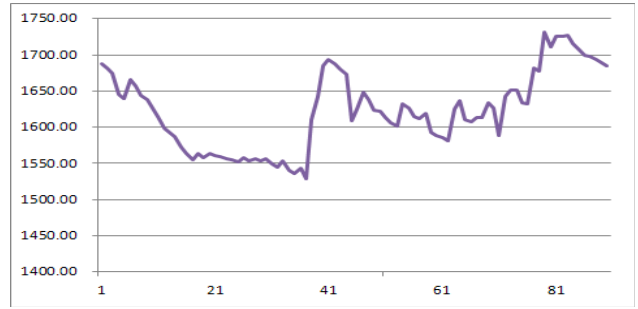
호선 간 전력연계는 가까운 거리 안에서 변전 설비를 통해 이루어져야 한다. 호선 간에 가장 가까운 거리라 하면 지리적으로 같은 위치인 환승역이 적합하다고 할 수 있다. 또한 계통 연계가 변전소를 통해서 이루어진다고 할 때, 환승역에 변전설비가 있다면 전력 연계가 수월하다고 할 수 있다. 서울 지하철은 평균적으로 4정거장 간격으로 전력변환설비가 갖추어져 있다. 위와 같은 조건을 바탕으로 호선 간 연계를 가정했을 때 군자역이 적합한 것을 알 수 있다.

추가적으로, 계통 통합 시 해당 변전소의 전압 안정도를 고려하기 위해 전압 변동을 확인해야 할 필요가 있다. 그림 2은 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 dummy bus를 추가하였다. 그림 3은 추가된 dummy bus의 전압변동을 나타낸 것이다.



〈그림 2〉 5호선 군자역 변전소 전압 변동 그래프



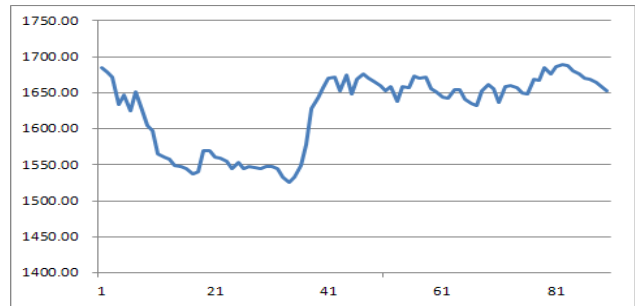
〈그림 3〉 7호선 군자역 변전소 전압 변동 그래프

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 효율을 보였다. 이는 5호선 7호선을 통합하여 운행한 수치로서 세부적으로 각 호선의 부하와 공급을 표로 나타내면 다음과 같다.

〈표 5〉 서울 지하철 5호선, 7호선 통합 운전 시 부하 수급 현황

Case	총 부하량(kWh)	총 공급량(kWh)	효율(%)
5호선	19133.6	29569.03	64.71
7호선	18679.1	24717.25	75.57
통합 운전	37812.7	54286.28	69.65



〈그림 4〉 통합 운전상의 군자역 변전소 전압변동 그래프

군자역 통합 변전소 운영 결과 870.46 kWh의 전력공급이 저감되는 것을 확인할 수 있었고 효율 상으로 약 1.2 %의 저감효과를 확인할 수 있었다.

그림 4는 연계 운전시 군자역 변전소의 전압변동을 모의한 것이다. 전압 변동의 최대 최저값의 차이가 연계 운전 전에 비하여 감소한 것을 볼 수 있으며 전압 안정도에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 회생에너지 이용율을 높이기 위해, 노선 간 연계를 제안하였다. 개별 운전 대비 연계 운전에서의 효율 개선 효과를 Compaq Visual Fortran을 통해 모의하였다. 개별 운전 시, 두 노선의 에너지 효율은 68.55 %였는데, 연계운전을 가정하였을 때에 69.65 %로 개선되었음을 사례연구를 통하여 알 수 있다. 효율 개선은 회생에너지 이용율이 높아졌기 때문에 발생한 것이라고 볼 수 있다. 대규모 지하철 시스템에서 노선 간 연계 운전을 통해 효율 개선을 할 수 있으며, 운영기관별 관리 노선에서의 연계운전을 진행한다면 보다 높은 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 회생 전력의 에너지 저장방안을 고려했을 시 연계운전 자체로 효율 개선이 되기 때문에, 보다 작은 에너지 저장장치 용량이 요구될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 이한상, "도시철도시스템 전력조류계산 알고리즘을 이용한 회생에너지 최적 활용 방안 연구", 대한전기학회 학회학술대회 논문집, 2009
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, 1994