

## 도시철도시스템 전력조류계산 알고리즘을 이용한 회생에너지 최적 활용 방안 연구

**이한상\***, 송지영\*, 이한민\*\*, 이장무\*\*, 장길수\*, 김길동\*\*  
고려대\*, 한국철도기술연구원\*\*

### Optimal Utilization Strategies of Regenerative Energy using DC Loadflow Algorithm for Electric Railway Systems

Hansang Lee\*, Jiyoung Song\*, Hanmin Lee\*\*, Changmu Lee\*\*, Gilsoo Jang\*, Gildong Kim\*\*  
Korea University\*, Korea Railroad Research Institute\*\*

**Abstract** - 본 논문은 철도부하의 이동을 고려한 전력조류계산 알고리즘에 기반하여, 에너지 저장장치를 설치하였을 때 철도계통의 영향 해석에 관한 논문이다. 철도부하는 위치적 변화 뿐만 아니라 기동-타행-제동의 운전모드의 변화에 따라 전력소비 패턴이 달라지는데, 제동 시에 발생하는 회생에너지를 에너지 저장장치를 이용하여 활용함으로써 에너지 절감 효과 및 가선전압 안정화를 구현할 수 있다. 본 논문에서는 서울지하철 2호선의 실제통에 대한 사례연구를 수행하여, 실제통에 에너지 저장장치를 적용함으로써 그 필요성을 증명하였다.

#### 1. 서 론

전력계통 전반에 걸쳐 에너지 소비 절감과 시스템 효율 향상을 목적으로 에너지 저장장치에 대한 다양한 연구와 적용 방안이 개발되고 있다. 대표적인 예로 하이브리드 자동차를 들 수 있다. 휘발유를 소비하여 얻어진 기계적 토르를 전기적 에너지로 변환하여 저장한 후, 저속 주행 시 사용하는 원리로 설계되었다. Hybrid 자동차와 유사한 원리로, 도시철도 시스템에 에너지 저장장치 활용 연구가 진행되고 있다. 빈번한 기동과 제동을 반복하는 도시철도 시스템은, 기동 시에 큰 전력이 필요하다는 것과 제동 시에 회생전력이 발생한다는 독특한 전기적 특징을 가지고 있다. 이런 소비전력의 큰 변동은, 전기철도 가선전압의 큰 변동을 야기 시킴으로써, 다른 기기에 전기적 스트레스를 줄 우려가 있다.

이 논문에서는 한국의 DC 1,500[V] 도시철도 시스템의 에너지 절감 및 가선전압 안정화를 위한 에너지 저장장치 용량 산정을 위한 직류 전력조류계산 알고리즘을 제시하고, Train performance simulator(TPS)를 이용하여, 서울 지하철 2호선에 대한 조류계산을 수행하여, 에너지 저장장치의 필요성을 검증하였다.

#### 2. 전력조류계산

일반적인 회로망 해석은 망방정식이나 노드방정식을 세우고 해를 구함으로써 가능하다. 일반적으로 노드방정식이 구성하기 쉽고 정확하기 때문에 컴퓨터를 이용한 회로망 해석에 흔히 사용된다. 본 논문에서는 변전소와 차량 간의 전차선로 임피던스 뿐만 아니라, 레일의 임피던스까지 고려하여 레일 전위를 계산하고 전차선로와 레일 간 차량 전압을 계산하는 알고리즘을 개발하였다.

##### 2.1 노드방정식

2개의 철도변전소와 1대의 차량으로 구성된 간단한 철도계통에 대하여, 노턴 등가 회로를 구성하면 그림 1과 같다. 그림 1의 선로파라미터는 컨덕턴스 성분이다. 그림 1의 노턴등가회로에 대한 노드방정식을 구성하면 식 (1)과 같다.

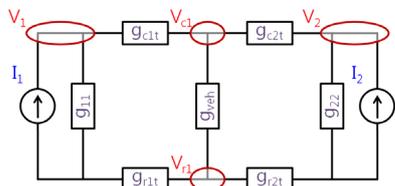


그림 1. 노턴 등가 회로

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1r} & 0 & -g_{c1r} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2r} & -g_{c2r} & 0 \\ -g_{c1r} & -g_{c2r} & g_{c1r} + g_{c2r} + g_{veh} & -g_{veh} \\ 0 & 0 & -g_{veh} & g_{veh} + g_{r1r} + g_{r2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{c1} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{식 1}$$

$$g_{veh} = \frac{P_{veh1}}{(V_{c1} - V_{r1})^2} \quad \text{식 2}$$

식 1의 노드방정식은 1차 연립방정식처럼 보이지만 철도부하는 정전력부하이면서 차량의 컨덕턴스 값은 식 2의 관계식에 의해  $P_{veh}$ 와의 관계가 정의됨에 따라 차량전압의 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 식 2의 관계에 따라 식 1의 행렬을 푸는 경우, 수렴성이 낮고 작은 오차가

크게 확대되는 단점이 있다[1]. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 차량부하를  $I_{veh}$ 의 크기를 가지는 전류원으로 증가하여, 전압( $V_{c1} - V_{r1}$ )과 전류( $I_{veh}$ ), 그리고 컨덕턴스( $g_i$ )의 관계식을 구하면 식 3과 같고, 식 1을 재구성하면 식 4와 같다. 식 3을 전압과 소비전력에 관계된 식으로만 표현하면 식 5와 같이 되고, 이 방정식은 조류계산 시에 전압값을 이용하여 전류값을 계산할 때에 사용된다.

$$I_{veh1} = g_{veh} \cdot (V_{c1} - V_{r1}) \quad \text{식 3}$$

$$\begin{bmatrix} g_{11} + g_{c1r} & 0 & -g_{c1r} & 0 \\ 0 & g_{22} + g_{c2r} & -g_{c2r} & 0 \\ -g_{c1r} & -g_{c2r} & g_{c1r} + g_{c2r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{r1r} + g_{r2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{c1} \\ V_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ -I_{veh1} \\ I_{veh1} \end{bmatrix} \quad \text{식 4}$$

$$I_{veh1} = \frac{P_{veh1}}{(V_{c1} - V_{r1})} \quad \text{식 5}$$

#### 2.2 TPS : Train Performance Simulator

전기철도 시스템은 병렬급전을 기본으로 하여, 다수의 열차군과 각 차량의 역간 운전모드의 전기적 고려뿐만 아니라, 선로의 킷브 및 구배 등에 따른 기계적 요소도 고려해야 하는 방대한 시스템이다. 한국철도기술연구원에서 개발된 TPS는 차량의 기계적 운전, 표준운전곡선, 및 설비의 토목건축적인 구조를 고려하여 한 기의 차량이 레도를 운행 할 때의 퍼포먼스를 결정하는 알고리즘이다[2].

철도차량의 퍼포먼스는 그림 2에서 보이는 운전특성곡선에 기반하여 TPS에서 계산한다. TPS 모의 결과 중, 위치데이터와 소비전력데이터를 사용하여 알고리즘에 사용한다. 위치데이터는 매 계산마다 달라지는 컨덕턴스 행렬을 구성하는 데에 사용되며, 소비전력 데이터는 역행, 타행, 제동의 운전모드에 따른 부하전류의 방향을 결정하는 데에 사용된다.

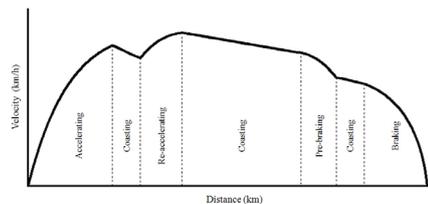


그림 2. 표준운전곡선

#### 2.3 전력조류계산 알고리즘

본 논문에서 제시하는 도시철도 직류전력조류계산 알고리즘은 TPS로부터 매 초 계산된 차량의 위치데이터와 소비전력데이터를 입력으로 받는다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 본 논문에서 제시한 전기철도 시스템에 대한 전력조류계산 알고리즘은 't\_tot'의 총 모의시간을 입력으로 받아서 매 초 수행된다. 그러나 철도시스템은 운송이 주목적이기 때문에, 차량의 공간적 이동이 필수적이다. 따라서 철도계통에 대한 전력조류계산은 차량의 이동을 고려하여 매 계산마다 컨덕턴스 행렬을 갱신하고, 차량의 운전모드에 따른 소비전력도 변화시켜주어야 한다.

#### 2.4 Matrix transformation

회생전력의 활용을 위하여 설치되는 에너지저장장치는 가선전압으로부터 제어신호를 받는다. 가선의 전압에 대하여 상한제어전압과 하한제어전압의 제어범위를 결정하고 해당 범위를 벗어나지 않도록 에너지 저장장치의 충방전을 제어한다. 식 4에서 보는 바와 같이, 방정식은 주어진 전류 벡터에 대하여 전압벡터의 각 성분을 구하는 것인데, 가선전압이 제어범위를 벗어나게 되는 경우, 상한제어전압 또는 하한제어전압에 전압을 고정시키고 변전소 전류를 구해야 한다. 따라서 식 6과 같이 해당 변전소에 대한 전류를 우변의 변수 벡터로, 전압을 좌변의 상수 벡터로 하여 방정식을 풀어야 한다. 이 과정에서 matrix transformation technique이 알고리즘에 추가된다.

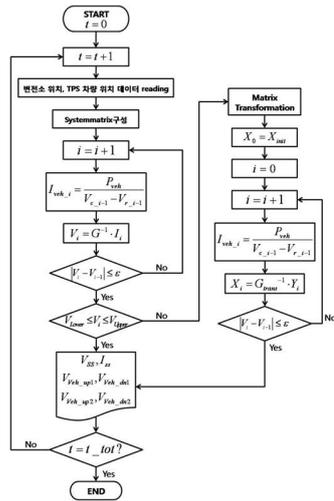


그림 3. 전력조류계산 알고리즘

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & -a_{1n} & a_{1n} \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & -a_{2n} & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & -a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{in} & -a_{in} & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{j1} & -a_{j2} & a_{j3} & \dots & a_{jn} & -a_{jn} & a_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & -a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & -a_{nn} & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

식 6

### 3. 사례연구

2호선은 순환선으로 되어 있으며, 총 43개 역, 13개의 변전소로 구성 되어 있다. 200번의 시청역을 절대거리 '0'의 기준으로 하여, 각 역의 위치와 변전소의 위치를 표 1에 나타내었다.

표 1. 서울지하철 2호선의 역 및 변전소 위치 데이터

Sta No.	Loca.(m)						
200	0	211	9,623	222	21,641	233	37,394
201	405	212	11,200	223	23,583	234	38,621
202	1,160	213	12,124	224	25,226	235	39,486
203	1,810	214	13,921	225	26,785	236	40,642
204	2,820	215	14,962	226	28,454	237	42,665
205	3,700	216	16,178	227	29,503	238	43,745
206	4,635	217	17,358	228	30,485	239	45,055
207	5,475	218	18,336	229	31,634	240	45,887
208	6,464	219	19,662	230	33,403	241	46,805
209	7,550	220	20,866	231	34,507	242	47,607
210	8,375	221	21,641	232	35,630	243	48,688

검은 셀: 변전소가 위치한 역

#### 3.1 모의조건

서울지하철 2호선에 대한 조류계산은 정차시간 30초, 열차시격 180초의 운행조건과 상, 하행선에 각 26대의 철도차량 운영을 가정하였다.

##### 3.1.1 열차다이아

열차다이아는 시간에 따른 차량의 위치를 나타낸다. 그림 3의 파란선은 상행선 차량의 다이아, 붉은선은 하행선 차량의 다이아를 나타낸다. 각 다이아는 180초 이동하여 다음 차량의 시간에 따른 위치를 결정한다.

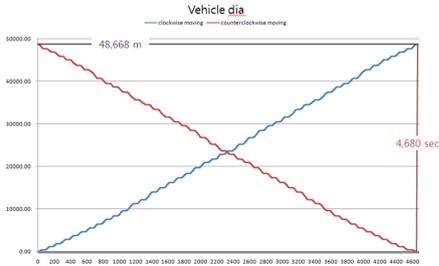


그림 4. 열차 다이아

##### 3.1.2 소비전력데이터

철도차량이 을지로입구와 을지로3가역의 구간진행에 대하여 TPS에서 계산된 소비전력데이터는 그림 5와 같다. 운전모드에 따른 소비전력의 변화를 볼 수 있으며, 특히 제동 시에 상당히 큰 회생전력이 발생함을 알 수 있다. 총 43개 역간에 대하여 비슷한 패턴으로 나타난다.

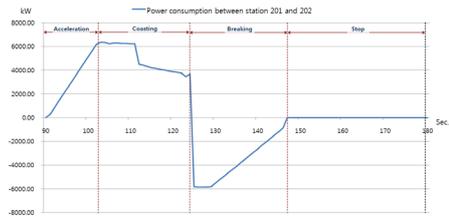


그림 5. 을지로입구-을지로3가 구간 소비전력 추이

### 3.2 변전소 전압

모의는 에너지저장장치가 없는 경우(Case 1), 전류제한이 없는 저장장치를 설치한 경우(Case 2), 1,200A의 전류제한을 가진 저장장치를 설치한 경우(Case 3)에 대하여 수행하였다. 그림 6은 전압변화가 가장 큰 변전소 13에 대한 모의 결과를 나타낸 그래프이다. 정격전압의 +10%와 -5%의 제어범위에 대한 제어가 이루어졌으며 변동폭이 상당히 줄었음을 알 수 있다. 표 2는 case 1과 3을 비교하여 변전소 전압의 최대 및 최소전압을 나타낸다.

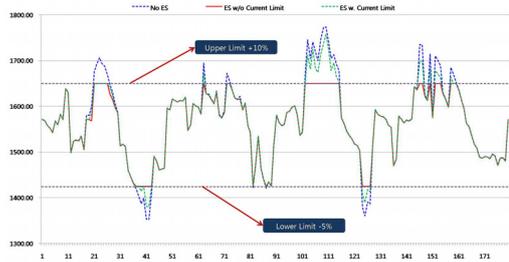


그림 6. 변전소 13에 대한 각 case 모의 결과

표 2. 변전소 전압 모의결과

Substation No.	Max. Vol. [kV]		Min. Vol. [kV]	
	Case 1	Case 3	Case 1	Case 3
Sub. 1	1714.73	1692.30	1373.24	1401.98
Sub. 2	1709.50	1689.48	1456.71	1456.71
Sub. 3	1688.91	1670.68	1462.54	1466.01
Sub. 4	1701.89	1682.05	1495.27	1495.27
Sub. 5	1664.14	1650.00	1447.18	1447.18
Sub. 6	1692.32	1676.92	1447.35	1447.35
Sub. 7	1725.39	1705.18	1436.78	1436.78
Sub. 8	1728.49	1710.45	1472.61	1472.58
Sub. 9	1720.74	1696.96	1460.27	1460.26
Sub. 10	1746.48	1728.69	1421.76	1425.00
Sub. 11	1752.75	1735.51	1453.84	1458.30
Sub. 12	1740.66	1712.09	1452.13	1463.12
Sub. 13	1773.87	1756.92	1352.08	1380.05

### 3.3 소비전력

표 3에 각 case에 대한 변전소에서 계통에 공급하는 전력량(kWh)을 나타내었다. Case 1에 비하여 2와 3는 각각 8.11%, 4.93%의 에너지 사용량이 저감되었음을 알 수 있다. 회생에너지의 활용율을 높이기 위해서 변전소별 가선전압의 제어 범위를 조정함으로써 극대화시킬 수 있다.

표 2. 매 시간 사용 전력량 및 에너지 저감률

Case No.	전력량(kWh)	저감량(kWh)	저감율(%)
Case 1	43965.07	-	-
Case 2	40401.17	3563.90	8.11
Case 3	41797.79	2167.28	4.93

### 4. 결론

철도 차량의 잦은 제동과 기동으로 인하여, 철도시스템 가선전압의 변동이 크다는 것을 조류계산 결과를 통하여 알 수 있었다. 에너지 저장장치를 활용하여, 차량의 제동 시에 발생하는 회생전력을 저장하고, 기동 시에 이를 활용할 경우, 에너지 절감 뿐만 아니라, 가선전압의 안정화도 꾀할 수 있다.

에너지 저장장치를 포함한 전기철도 시스템에 대한 조류계산 알고리즘을 이용하여, 저장장치 용량 선정, 경제성 분석, 저장장치간 지능형 협조제어 등의 연구를 진행함으로써 전기철도 시스템의 에너지 효율을 극대화할 수 있을 것으로 기대한다.

### [참고 문헌]

- [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] Hansang Lee, "A Study on Modeling for 1,500V DC Power-Supplying Railroad System Using EMTDC," Master dissertation, School of Electric Engineering, Korea University, Seoul, 2005