

회생에너지와 운전특성을 고려한 직류지하철 시스템 모델링

박찬흥, 장수진, 이병국, 원충연
성균관대학교

Modeling of DC Subway System Considering Regeneration Energy and Operation Characteristic

Chan-Heung Park, Su-Jin Jang, Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

철도차량이 운행될 때 회생제동 구간에서는 회생에너지가 발생한다. 1500[V] DC급전시스템에서 회생된 에너지는 가선 전압을 상승시킨다. 상승된 가선전압은 급전시스템에 악영향을 주기 때문에 회생에너지를 활용하는 방법을 이용하여 가선전압을 안정화 한다. 회생에너지 활용방법의 하나인 회생에너지 저장 시스템을 적용할 때 고려해야 될 사항은 회생에너지의 발생 양이다. 회생에너지의 양이 적어 활용가치가 떨어지는 구간에서는 적용하지 않기 때문에 회생량에 대한 사전 정보가 필요하다. 회생에너지의 양은 실측을 통해 얻을 수 있지만 측정을 위한 시간이나 고가의 장비를 사용해야하는 단점이 있다. 본 논문에서는 회생에너지 예측이 가능한 직류지하철 시스템의 모델링을 통해 실측시 발생하는 시간 및 비용적인 문제점을 해결할 수 있다. 회생에너지의 예측은 시뮬레이터를 이용하여 구배 및 곡선, 차량 데이터 등의 운전특성을 바탕으로 이루어진다.

1. 서론

현재의 전철 시스템은 DC 급전시스템과 AC 급전시스템으로 분류되어 있다. DC 급전시스템은 1500[V]의 가선전압이 전동차에 공급되어 차량부하의 요구에 따라 에너지를 소모하게 되는 방식이다. 가선으로 공급되는 에너지는 차량의 편성 및 무게, 운행환경 등의 여러 요소에 따라 그 양이 결정된다.

그리고 전동차의 운행시 전력의 흐름은 공급뿐 아니라 전동차에서 발생하는 회생전력을 고려하여야한다. 회생전력은 전동차의 운전모드 중 회생제동 구간에서 발생한다. 회생제동시 발생하는 회생전류는 가선으로 유입되어 가선전압을 상승시키는 요인이 된다. 상승된 가선전압이 전동차에 공급되면 DC 1500[V] 급전 시스템에 적용된 전동차 시스템에 지속적인 부담을 주게 된다. 그리고 전동차의 제동시에 회생제동을 사용할 수 있는 시간이 줄어들게 되어 공기제동을 이용하는 비율이 늘어난다. 공기제동은 분진, 소음 등이 발생하며 브레이크 시스템의 마모로 인해 정비비용이 증가하는 단점을 갖는다. 이와 같은 단점들로 인해 회생전력을 저장기의 열로 소모하여 가선전압을 안정화하는 방법을 사용한다.^[1]

하지만 현재는 저장기를 사용하는 방법보다 회생에너지를 효율적으로 사용하기위한 방법들이 적용되고 있다. 효율적인 회생에너지의 활용 방법의 하나로 슈퍼커패시터와 같은 저장장치를 이용하여 회생에너지를 저장하고 재사용하는 방법이 있

다. 가선전압이 상승하면 회생에너지를 저장장치에 저장하여 가선전압을 안정화한다. 반면에, 전동차의 기동이나 다수의 차량이 역행할 때 급격한 부하증가로 인해 가선전압은 강하된다. 저장된 회생에너지는 전압 강하시 가선으로 유입시켜 안정적인 부하공급에 기여한다.

회생에너지 저장 시스템을 적용하기 위해 고려하는 중요한 요소는 운행구간에서 발생하는 회생에너지의 양이다. 회생에너지의 양이 적은 구간에 고가의 시스템인 회생에너지 저장 시스템을 적용하는 것은 비용적인 측면에서 이용가치가 떨어진다. 그래서 회생에너지 저장시스템을 적용하기 전에 운행구간에서 발생하는 회생에너지의 양에 대한 데이터가 필요하다. 하지만 실측을 하여 회생량에 대한 데이터를 얻는 경우 시간 및 고가의 장비가 필요하다.

반면에 회생에너지의 양을 예측할 수 있는 시뮬레이션을 사용한다면 이러한 문제점들을 해결할 수 있다. 발생하는 회생에너지의 양은 전동차 및 급전시스템에 대한 직류지하철 시스템 모델링을 통해 추정할 수 있다. 전동차가 운행되는 환경 및 차량 데이터에 의한 직류지하철 시스템 모델링은 PSIM 및 C 프로그래밍을 사용하였다.

본 연구에서는 회생에너지 저장 시스템의 적용을 위해 운행 구간내의 회생에너지량을 예측할 수 있는 시뮬레이터를 제작하였다.

2. 직류지하철 시스템 모델링

2.1 운전특성의 추정

전동차는 역과 역간에 기동-타행-제동-정지의 패턴으로 노선별 지정된 속도에 따라 기동하도록 그림 1과 같이 정해진다. 전동차는 속도에 따라 역행·회생전류를 발생하며 이 동작에 따라 가속도 또는 감속도를 얻어 전동차의 운전상태와 속도를 결정한다. 따라서 전동차는 매시간별로 그림 1의 운전모드 중 하나의 운행상태를 가지게 된다. 즉, 전동차는 속도에 따라 매시간별 위치가 결정되고 속도·위치가 결정되면, 표준운전곡선에 따라 운전모드가 정해져 해당 운전모드에서의 전압, 전류 특성이 결정된다.^[1]

그림1의 운전곡선은 일반적인 경우의 운전특성 그래프로 각 노선별 상태나 전동차의 운행량에 따라 조금씩 다른 기준치를 가지고 결정된다. 그러나 일반적인 운행 형태는 유사하다. 최초 기동으로 전동차는 역에서 출발하여 역행동작으로 ①의 속도가

지 도달한다. 운전특성그래프는 해당 노선의 구간별 목표속도를 지정하므로 이 속도에 도달하면 역해 동작에서 타행 동작으로 이행한다. ②의 목표속도에 도달하게 되면 다시 역해 동작으로 변경하여 ③의 목표속도에 도달한다. 이후 타행으로 ④의 목표속도에 도달하여 회생제동과 공기제동으로 ⑤와 ⑥의 목표속도를 거쳐 도착역에 정차하게 된다. 회생에너지는 회생제동시 발생하므로 ⑥의 제동구간에서 발생한다.

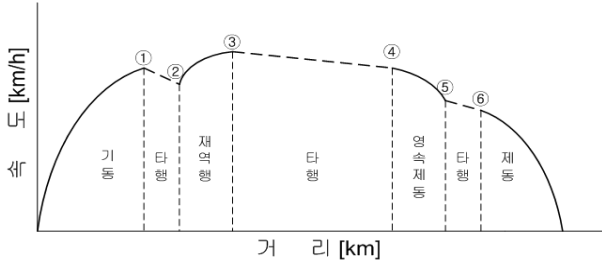


그림 1 철도차량의 운행특성 그래프
Fig 1 Operating Characteristic Graph of Subway

이와 같은 운행특성그래프는 아래의 열차운행 관계식으로 추정한다.^[2]

가속도가 일정할 때 시간에 대한 속도의 함수 $v(t)$ 와 거리 함수 $x(t)$ 는 식(1), (2)와 같다.

$$v(t) = at + v_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \dots\dots\dots (2)$$

전동차는 운행시 저크한계(Jerk Limit)를 고려해야한다. 저크한계란 전동차가 운행할 때 승객의 쾌적한 승차감을 보장하기 위해 가속도의 변화율을 제한하는 것을 말한다. 가속도는 시간의 함수로 표현되며, 식(3)과 같다.

$$a = JL \cdot t \quad JL: \text{Jerk Limit } [m/sec^3] \quad (3)$$

전동차가 현재 상태에서 낼 수 있는 가속도는 모터의 견인력과 열차저항에 관계된다. 전동차가 현재 상태에서 낼 수 있는 가속도는 식(4)와 같다.

$$a = \frac{EF}{m} \dots\dots\dots (4)$$

EF : 유효견인력 [kN], a : 가속도 [m/sec^2], m : 동적질량 [tons]

동적질량은 실제질량에 관성질량을 포함한 것으로 전동차의 바퀴가 직선운동뿐만 아니라 회전운동을 함으로써 필요한 힘을 고려한 것이다. 유효견인력은 식(5)와 같다. 열차 저항은 커브 저항 및 주행저항 그리고 구배저항을 합한 값이다.

$$EF = MF - TR \dots\dots\dots (5)$$

MF : 모터 견인력 [kN], TR : 열차 저항 [kN]

위와 같은 관계식을 이용하여 현재 열차의 속도 및 위치, 진행거리 등의 운전특성그래프를 얻게 된다.

2.2 회생에너지 추정 알고리즘

그림2는 회생에너지 추정 알고리즘의 흐름도이다. 먼저 입력 데이터로 구배, 커브, 역거리 등의 파라미터를 입력 받고, 현재 위치와 속도에서의 열차저항을 계산한다. 현재속도에서의 모터 견인력과 계산된 열차저항을 이용하여 유효견인력을 구한다. 유효견인력과 전동차의 동적 질량을 이용하여 현재 전동차가 낼 수 있는 가속도를 구한다. 가속도는 최대가속도를 넘지 않는 범위에서 결정된다. 이때 가속도는 저크한계를 고려하기 위해 이전가속도와 비교되고 만약 가속도의 변화율이 저크한계를 넘어서면 가속도가 시간에 따라 변화하게 되므로 그에 따른 현재속도와 진행거리를 계산하게 된다. 그리고 가속도의 변화율이 저크한계를 넘어서지 않을 때는 일정한 가속도에서의 수식을 사용하여 현재속도와 거리를 계산하게 된다.

다음으로 제동모드를 결정하기 위해 계산된 현재속도와 진행거리를 이용하여 제동거리를 계산하고, 만약 제동거리가 다음역까지 남은 거리보다 초과하게 되면 이전속도와 이전 전동차위치를 이용하여 제동모드로 들어가서 제동 감속도에 따른 속도와 위치가 계산된다. 제동거리가 다음 역까지 남은 거리보다 작을 때는 현재 제한속도와 다음제한속도를 비교하여 제동모드로 들어갈 것인지를 다시 결정한다.^{[2][3]}

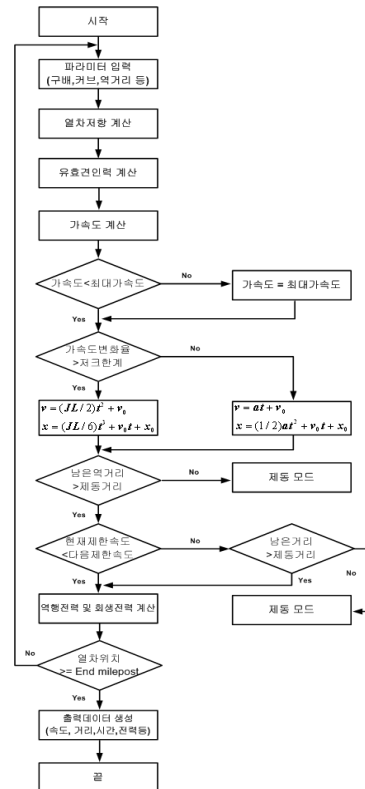


그림 2 회생에너지 추정 흐름도
Fig 2 The Flow Chart for Estimating Regeneration Energy

다음으로 운행모드에 따라 역행전력과 회생전력을 계산한다. 전동차의 현재위치를 종단위치와 비교하여 현재위치가 종단위

치보다 작다면 위의과정을 되풀이하고 현재위치가 중단위치보다 크다면 현재 속도, 열차위치, 경과시간과 공급 및 회생된 에너지 출력한다. 이때 회생된 에너지는 시간에 따른 순시적인 전력량으로 표현된다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 구성

회생에너지 추정을 위한 직류지하철 시스템 모델링은 PSIM 및 C프로그래밍을 이용하여 그림 3과 같이 구성하였다. 차량의 무게, 편성, 가속도, 감속도 등의 차량 데이터와 구배 및 곡선의 환경 데이터를 입력하여 시뮬레이션 한다. 또한 시뮬레이션은 시간에 따른 위치 및 속도, 가속도, 공급전력, 회생전력을 출력한다.

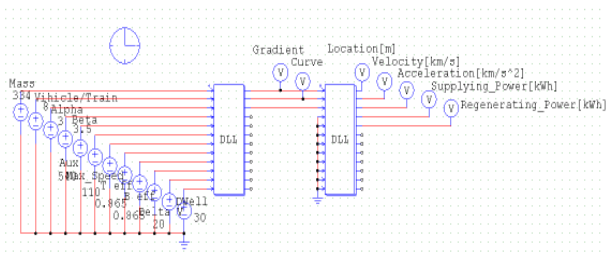
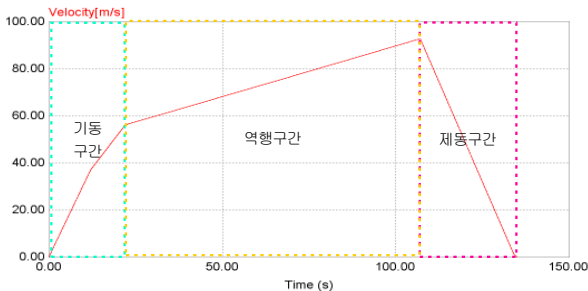


그림 3 직류지하철 시스템 모델링
Fig 3 The Modeling of DC Subway System

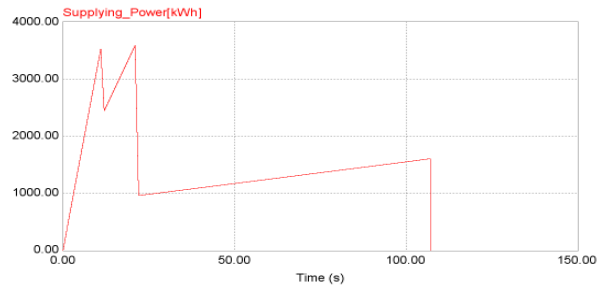
시뮬레이션은 1호선의 시흥역과 석수역 사이에서 실측된 구배 및 곡선 데이터를 이용하여 모의한다.

3.2 시뮬레이션 결과

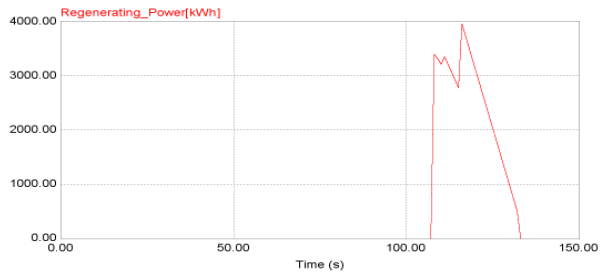
그림 4는 시흥역과 석수역 사이의 구배 및 곡선 데이터를 기준으로 모의된 시뮬레이션의 출력 그래프이다. 그림 4의 (a)는 시간에 따른 속도 그래프이며 운전특성곡선을 나타낸다. 그림 4는 그림 1의 일반진인 운행특성그래프와 유사한 패턴을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 4의 (b)는 역행 혹은 기동과 같은 전력소모시에 차량에 공급되는 전력이다. 그림 (a)의 전동차가 운행을 시작한 이후로 제동구간 이전까지 기동 및 역행구간에서 전력이 공급되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 (c)는 회생제동시 발생하는 회생 전력을 나타내며, 그림 (a)의 제동구간을 시작으로 회생전력이 발생하는 것을 볼 수 있다.



(a)The Graph of The Velocity [m/s]



(b)The Graph of The Supplying Power [kWh]



(c)The Graph of The Regenerating Power [kWh]

그림 4 (a) 운전특성곡선 및 (b)공급전력량, (c)회생전력량 그래프

전동차가 시흥역에서 석수역으로 운행되는 동안 공급된 전력은 44.98[kWh]이며, 회생된 에너지는 14.79[kWh]로 공급전력의 33.88%이다.

4. 결론

본 논문에서 DC급전시스템의 회생저장시스템 적용을 위해 회생에너지를 고려한 직류지하철 시스템 모델링을 구성하였다. 역과 역 사이에서 발생하는 회생에너지를 추정하기 위해 실측된 환경데이터와 운행되는 차량 데이터를 이용하였다. 직류지하철 시스템의 모델링은 그림 4의 운전특성곡선 및 공급전력량, 회생전력량의 그래프에서와 같이 운행모드에 따른 전력의 소모량 과 회생량을 추정한다. 실제 운행되는 역과 역 사이의 모든 차량 데이터로 모델링된 시뮬레이션이 적용될 경우, 회생 에너지의 실측으로 인한 시간 및 비용적 문제점을 해결하며, 더욱 손쉽게 회생저장시스템 적용여부를 판단할 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 김민철, “에너지저장장치를 활용한 DC급전시스템에서의 회생전력 이용에 관한 연구”, 성균관대학교 전자전기공학과 석사학위 논문, 2005
- [2] 안태기, “열차 성능 시뮬레이션 소프트웨어 개발”, 한국철도기술연구원 기술자료
- [3] 정상기, “회생차량을 포함한 DC급전시스템 시뮬레이터 개발”, 명지대학교 전기공학과 박사학위 논문, 2003