

전동열차의 주행에너지 소비를 최소화하는 최적운전

Optimal Operation for Minimizing Energy Consumption in Electric Multiple Unit

김치태 * 김동환 ** 한성호 *** 박영일 ****
Chi Tae Kim, Dong Hwan Kim, Sung-Ho Han, Yung-II Pak

Abstract

Train driving should be satisfied to run fixed distance within given time, and it is desirable to minimize energy consumption. Minimizing energy consumption depends on the train operation modes by driver or automatic operation. In this article, an optimal operation to minimize energy consumption by changing modes of train operation by a driver is investigated. First, powering model, braking model and consumed energy calculation model are introduced by using Matlab software. The accuracy of the model established by simulation is compared with the real experimental data, which is obtained from an authorized institution. Second, several simulations under a variety of operations in the ideal track are executed, and then the optimal pattern of train driving is found.

1. 서론

최근 전기철도는 타 교통시스템에 비하여 환경친화성, 정시성, 안전성측면에서 사회적 주요 관심 대상이 되고 있으며 보다 효율적인 최적의 주행을 위하여 승차감 향상, 주행에너지의 절감, 정시성의 확보를 위한 최적운전에 관한 연구가 계속 되어져 오고 있다.[1-3]

그러나 역간거리와 운전시분이 짧고 회생제동을 사용하는 전동열차의 경우 주행에너지의 소비를 절감시키기 위한 최적주행에 관한 연구는 아직까지 미비한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 전동열차의 주행시 소비되는 에너지를 최소화하기 위한 최적 주행패턴을 찾아보고 특히 회생제동을 얼마나, 어떻게 사용해야 주행시 소비되는 에너지를 절감할 수 있는지에 대해 시뮬레이션을 통해 알아보하고자 한다.

특히 수도권 전동열차의 경우 혼잡시간대를 제외하면 승객의 승하차시간의 단축으로 여유 운전시분이 더 발생하게 되는데 이 여유 운전시분을 잘 활용하여 주행에너지 소비를 최소화할 수 있는 주행패턴을 찾는다면 대단히 유용할 것으로 기대된다. 따라서 열차의 주행패턴을 몇

* 철도청 기관사, 정회원
** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 비회원
*** 철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템 엔지니어링 팀장, 정회원
**** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

가지 모드로 만들고 이를 시뮬레이션을 통해 주행에너지 소비를 계산해 보면 어떠한 주행패턴으로 운전하는 것이 에너지 소비를 최소화하는 최적주행이 될지 알 수 있을 것이다. 이러한 시뮬레이션을 특정역 사이의 실제 실험 결과와 비교하여 모델의 유용성을 검증하였다.

2. 열차의 운전과 주행에너지

열차는 여러 가지 선로의 조건, 차량의 특성, 운전시각의 단축을 위한 운행제어, 승차감 향상, 그리고 역간 주행에너지 소비의 감소 등 많은 것을 고려하면서 운전하게 된다. 이러한 여러 가지 조건을 만족하면서 주행에너지의 소비를 최소화하는 최적주행은 열차의 운전모드에 따라 결정되는데 열차의 운전모드는 역행운전모드, 타행운전모드, 제동운전모드로 나누어지며 [3] 역행운전모드를 짧은 시간 적용하면 주행에너지는 적게 소비되지만 운행속도가 낮아져 정해진 운전시분을 만족할 수 없게 되고 제동운전모드를 빨리 적용하면 정해진 거리를 만족할 수 없으므로 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 타행운전모드의 시작점을 결정하는 것이 최적주행을 결정하는 중요한 변수가 된다.

이와 같이 열차의 역행, 타행, 제동모드시 열차에 공급되는 에너지는 연료의 연소나 전기적인 에너지로 열차에 공급되는데 이 에너지는 추진시스템에 의해 기계적 에너지로 바뀌어 열차의 주행저항, 구배저항, 곡선저항등에 의해 손실되며, 제동작용에 의해 소비된다.[1]

본 논문에서는 역행(powering)시 소비되는 에너지와 제동(braking)시 회생되는 에너지, 즉 역학적 에너지를 주행에너지로 다루게 되는데, 열차의 주행에 따른 전체 소비에너지 $J [kWh]$ 는 식 (1)과 같이 표현되며, 여기서 J_p 는 역행시 소비된 에너지이고 J_{rg} 는 회생제동시 회생된 에너지이다.

$$J = J_p - J_{rg} \quad (1)$$

$$J_p = \int_0^T F_+(t)v(t)dt \quad (2)$$

역행시 소비된 주행에너지는 위의 식(2)와 같이 나타내고, 여기서 $F_+(t)$ 는 양(+)의 방향의 힘이며, 회생에너지 J_{rg} 의 계산은 3.3절의 식(3)과 같이 계산한다.

3. 시뮬레이션을 위한 Matlab 모델

3.1 역행(powering)모델

견인력은 열차성능곡선에 나타나는 동륜주(wheel rim)에서의 견인력[kgf]을 시뮬레이션상의 입력으로 사용하며 견인력과 제동력 모두 M-car 5량에서 담당하는 것으로 시뮬레이션 한다. Fig. 1은 Matlab으로 구현한 시뮬링크 메인 블럭 다이어그램(simulink block diagram)이다.

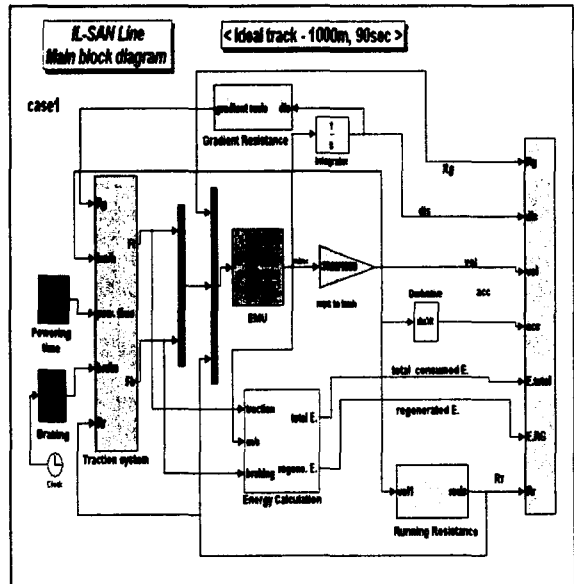


Fig. 1 Main block diagram of Matlab

3.2 제동(braking)모델

제동방식은 공기제동(M-car: 담면제동, T-car: 디스크제동)과 회생제동(M-car)이 병용으로 일괄교차제어방식[5]에 따라 혼합 사용되며 제동시 요구되는 감속도 만큼 회생제동이 먼저 사용되고 그 부족분을 T-car의 공기제동이, 그래도 부족하면 M-car의 공기제동이 추가로 사용된다. Fig. 2의 제동력 분담선도에서 볼 수 있듯이 제동 7스텝에서는 M-car의 회생제동력 만으로는 요구되는 제동력을 만족하지 못하여 추가로 T-car의 공기제동이 사용되는 것을 볼 수 있다.

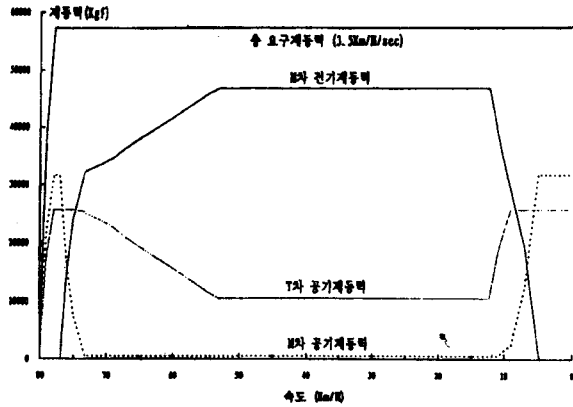


Fig. 2 Cross blending(7 step, fully loaded)

3.3 주행에너지 산출(Consumed energy calculation) 모델

주행에너지의 계산은 식 (1)과 같이 열차를 견인하는데 공급된 견인력 $F_+(t)$ 와 열차의 속도 $v(t)$ 의 곱을 적분함으로써 구할 수 있고[1], 회생에너지는 Fig. 3과 같이 인버터 제어 모드에 의한 속도에 따른 회생제동력 $F_-(t)$ 와 열차

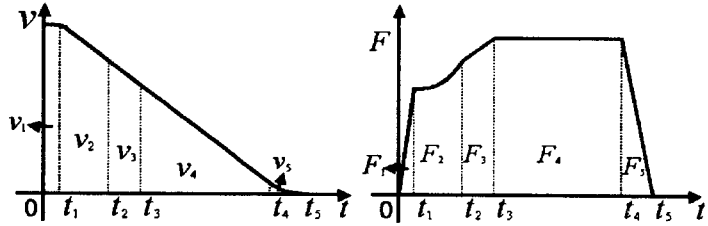


Fig. 3 Regenerative braking force and velocity for consumed energy calculation

의 속도 $v(t)$ 의 곱을 적분하여 역행시 공급된 에너지에서 빼주어야 한다.[2]

회생제동에 의한 회생에너지 $[J_{reg}]$ 의 계산에서, 기관사가 제동을 적용하고 제동력이 발휘되기까지의 공주시간 1초를 고려하고, 또한 제동신호가 인가되면 회생제동이 지연되는 시간동안 인서트(inshot)기능[5,7]에 의해 0.08 sec내에 공기제동이 비상제동신호로 작용하여 저크(jerk)제어, 옹하중제어의 연산과정을 거치지 않고 회생제동이 제동력을 발휘 할 때까지 적용된다.[5] 이때 회생제동이 지연되는 시간은 1.15 sec인데[7] 여유시간을 고려하여 약 1.5 sec 동안은 공기제동이 전체제동력을 대신하는 것으로 하여 회생에너지는 0으로 계산한다. 이때의 시간은 Fig. 3의 시간 0 ~ t_1 에 해당된다. 또 정차직전 10 km/h이하에서는 회생제동력이 급격히 약화되므로 이때도 공기제동으로 처리하고 이때의 시간은 $t_4 \sim t_5$ 이므로 회생에너지도 0으로 계산한다.

$$J_{reg} = \int_0^{t_1} F_1 v_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} F_2 v_2 dt + \int_{t_2}^{t_3} F_3 v_3 dt + \int_{t_3}^{t_4} F_4 v_4 dt + \int_{t_4}^{t_5} F_5 v_5 dt \quad (3)$$

4. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 진행방법

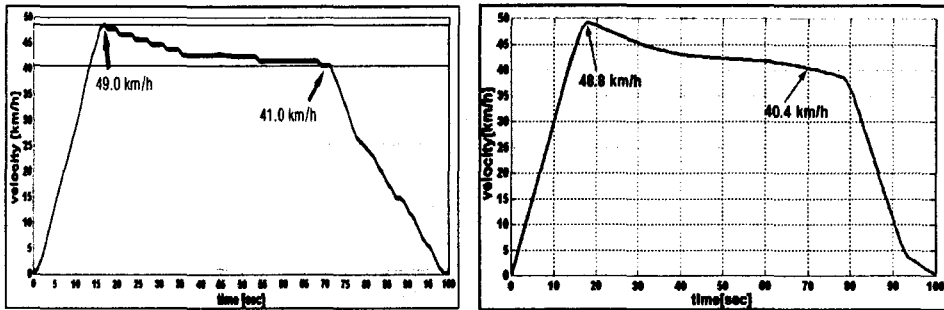
먼저 시뮬레이션을 실행하기 전에 Matlab으로 구현한 시뮬레이션 모델을 실노선의 주행결과와 비교하여 구현된 모델이 정확한지를 확인한 다음, 가상의 선로상에서 다양한 형태로 열차를 주행시켜 어떤 주행패턴이 에너지 소비를 최소화하는 최적주행이 될 지 알아본다.

Table 1 Case study of simulation

	track condition		case 1	case 2	case 3
Mode A	ideal track	1000 m 90 sec	brake 3 step	brake 5 step	brake 7 step
Mode B	ideal track	1000 m 100 sec	brake 3 step	brake 5 step	brake 7 step

4.2 실노선 대상으로 시뮬레이션 모델 비교

Fig. 4는 일산선 마두 - 정발산 역간에서 운전한 차량에서 출력한 속도그래프이며 실주행 결과와 같은 조건을 주어 시뮬레이션의 정확성을 검증한다.



(a) Experimented result

(b) Simulation result

Fig. 4 Experimented simulation data of speed profile of Madu-Jeongbalsan stations

먼저 실주행 결과의 속도그래프에서는 역행시간이 약 17 sec, 타행속도 49.0 km/h, 타행운전을 계속하여 70 sec에서의 속도가 41.0 km/h로 나타난 반면, 시뮬레이션에서는 역행시간 약 17 sec, 속도는 48.8 km/h, 타행후 70 sec에서의 속도는 40.4 km/h가 되었다. 이 차이는 실주행시의 전차선 전압, 승객의 하중 등에 따라 다소 차이를 보일 수 있을 것으로 추측된다.

4.3 모드 A : 계획운전시분을 이용한 시뮬레이션 결과

가상시험선로의 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Ideal track conditions for simulation

inter-station distance	scheduled time	gradient	curve	speed limit	passenger loads
1000 [m]	90 [sec]	0	0	80 [km/h]	10 [ton]

Table 3의 시뮬레이션 결과를 보면 모드 A-case1의 경우 제동 3스텝을 사용하기 위해서는 타행시점의 속도를 75.8 kWh까지 대단히 높게 해야만 정해진 역간거리, 1000 m를 90 sec내에 주행할 수 있으나 대신 제동거리가 길어짐에 따라 회생에너지가 대단히 많아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 3스텝 제동의 경우 소비된 총주행에너지는 9.1 kWh이고 5스텝 제동의 경우 7.6 kWh가 된다. 이것은 낮은 감속도의 제동을 사용하면 역행시의 최고속도와 제동을 시작하는 속도가 높아져야 하고 제동을 시작하는 속도가 높아지면 전동기 특성영역(110~70 km/h)이나 정출력 영역(70~52 km/h)에 속하게 되어 정토크 영역(52~10 km/h) 보다 회생제동력이 훨씬 약해져 회생에너지가 적어지기 때문이다.[4,5] 또한 모드 A-case2의 5스텝 제동과 모드 A-case3의 7스텝 제동의 주행패턴을 비교하여 보면 역행시 소비된 에너지는 모드 A-case2가 1.8 kWh 더 많지만 소비된 총주행에너지를 보면 오히려 0.5 kWh 더 적게 소비하고 있음을 알 수 있다. 모드 A-case 3의 7스텝 제동을 사용하는 경우, 이미 밝힌 대로 회생제동 부담을 이상의 제동이 가해짐으로써 회생에너지는 더 이상 증가하지 않고 요구되는 제동력의 부족분을 공기 제동이 담당하게 되어[4,5] 5스텝 제동시 회생된 에너지로 인한 주행에너지 절감효과가 제동 7스텝을 사용하여 역행에너지를 절감한 경우보다 주행에너지 절감효과가 큰 것을 알 수 있다.

Table 3 Simulation results of Mode A

MODE A	case1	case2	case3
maximum speed [km/h]	75.8	59.4	56.0
powering time [sec]	32.6	22.9	21.1
consumed powering energy [kWh]	26.3	15.7	13.9
applied braking step	3	5	7
starting velocity of braking [km/h]	74.7	51.5	46.9
regenerated energy [kWh]	17.3	8.2	5.8
total consumed energy [kWh]	9.1	7.6	8.1

4.4 모드 B : 여유운전시분을 이용한 가상선로에서의 운전

모드 B는 승객의 승차차 시간 단축으로 인한 10 sec 의 시분이 발생한 것으로 한다. 나머지 선로조건은 모드 A와 같다. 따라서 모드 B의 경우는 1000 m를 100 sec에 주행하도록 한 결과이다. Table 3과 Table 4를 비교하여 보면 모드 A의 3스텝 제동을 사용하여 1000 m를 90 sec에 주행하는 경우 75.8 km/h까지 가속하여 26.3 kWh의 주행에너지를 소비하였고 모드 B의 경우 운전시분이 10 sec 늘어남에 따라 54.7 km/h까지 가속하여 무려 21.1 km/h나 최고속도가 낮아져 주행에너지는 13.2 kWh 밖에 소비되지 않은 것을 알 수 있다.

또한 모드 B-case1의 3스텝 제동과 모드 B-case3의 7스텝 제동을 비교하면 모드 A와 결과가 달라진 것을 알 수 있는데 모드 A-case1의 3스텝 제동을 사용한 경우는 제동을 시작하는 속도가 74.7 km/h로 전동기 특성영역과 정출력 영역에 속하게 되어 회생제동력이 약하기 때문에 회생에너지가 적은 것을 알 수 있다. 또한, 여유시분이 10 sec가 늘어남에 따라 모드 B-case1은 모드 A-case1에 비하여 2.6 kWh 절감되었고 모드 B-case2는 모드 A-case2에 비하여 1.4 kWh 절감되었다. 모드 B-case3는 모드 A-case3에 비하여 1.3 kWh 절감된 것을 알 수 있다. 5스텝 제동을 사용한 경우는 18.4 %, 7스텝 제동을 사용한 경우는 16.1 %가 절감되어 여유운전시분을 잘 활용하면 주행에너지 절감에 큰 효과가 있을 것으로 생각된다.

지금까지 모드 A와 모드 B 두 경우의 시뮬레이션을 통해 회생제동을 사용하는 전동열차의 주행에너지 소비를 최소화하는 최적 운전에 대해 알아보았다. 또한 시뮬레이션 결과는 단일열차의 주행을 모델로 했기 때문에 실주행 결과와는 다소 차이를 보일 것으로 예상된다.[6]

5. 결론

본 논문에서는 회생제동을 사용하는 전동열차의 주행에너지 소비를 최소화하는 최적 운전에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Matlab으로 구현한 시뮬레이션 모델의 유용성을 검증하였다.

둘째, VVVF인버터제어 전기동차의 회생제동력은 기관사가 요구하는 상용 최대제동력을 만족하지 못하므로 회생제동력 한계 내에서 감속도가 높은 5스텝 제동을 적용할 수 있는 타행시점을 선정하여야 한다.

셋째, 운행중 승객의 승하차시간 단축 등으로 여유운전시분이 10 sec라도 발생하면 이를 계획시분으로 주행할 때보다 역행시의 최고속도를 낮추는데 활용하면 약 15% 이상의 많은 주행에너지를 절감 할 수 있게 된다.

Table 4. Simulation results of Mode B

MODE B	case1	case2	case3
maximum speed [km/h]	54.7	50.0	49.4
powering time[sec]	20.4	18.1	17.9
consumed powering energy [kWh]	13.2	10.9	10.7
applied braking step	3	5	7
starting velocity of braking [km/h]	46.9	40.3	39.3
regenerated energy [kWh]	6.7	4.8	3.9
total consumed energy [kWh]	6.5	6.2	6.8

Reference

- [1] P.G. Howlett and P.J. Pudney(1995), "Energy-Efficient Train Control", Springer, pp. 1~24
- [2] C.S. Chang and S.S. Sim(1997), "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms", IEE proc. Electr. Power. Vol. 144, pp. 65~73
- [3] S.H. Han et al.(1999), "An Optimal Automatic Train Operation(ATO) Control Using Genetic Algorithms(GA)", Proc. of the IEEE Region 10 Conference - Vol. 1,
- [4] 산업자원부(1998), "전동차 추진장치 기술개발 중간보고서 부록", pp. 39~49
- [5] 현대정공주식회사(1995), "KNR 일산선 전기동차(교육용교재)", pp. 3~16, 301~316
- [6] 철도청(1995), "철도청 일산선용 직류전동차 시운전 보고서", pp.7-129~7-267
- [7] 철도청(1993), "철도청 과천/분당선용 교직전동차 시운전 보고서", pp. 8-277~8-496