2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

에너지소비를 최소로 하는 고속전철 최적제어 전략

이태형*, 박춘수*, 서승일*, 김기환*, 신중린**
한국철도기술연구원*, 건국대학교**

Optimal Control Strategy of Korea High Speed Train Prototype for the Minimization of Energy Consumption

Tae-Hyung Lee*, Choon-Soo Park*, Sung-Il Seo*, Ki-Hwan Kim*, Joong-Rin Shin**
Korea Railroad Research Institute*, Konkuk University**

Abstract - This paper presents a modelling methodology using fuzzy logic and train performance simulation for determining an economical running pattern for a high speed train which minimizes energy consumption under an given trip margin. The economical running pattern is defined with an economical maximum speed in traction phase, a speed at the end of coasting. As a case study, the simulation is carried out for an economical run of korea high speed train prototype, and the results of fuzzy model described.

1. 서 론

고속철도는 주행시간을 비약적으로 단축시켜 국민 생활을 혁신적으로 바꿔놓은 반면 운행시마다 대량의 에너지를 소모하게 된다. 따라서 주어진 운행 시간 요구 조건을 만족시키면서 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방안이 있으면 대단히 유용할 것이다. 에너지 소비는 운행시간에 대략 반비례하기 때문에 운행 시간과 에너지 소비간의 절충이 이루어져야 한다.

전기에너지를 효율적으로 사용하기 위해 에너지 소비를 줄이는 경제운전 전략에 관한 연구동향을 살펴보면 Miloy는 가속구간에서 소비되는 기계적 에너지를 최소화하는 주행 조건을 찾기 위해 경험적 방법인 Pontryagin 원리를 응용하였다[1]. Khmelnitsky과 Golovitcher은 Maximum 원리를 응용하여 얻어진 최적해의 해석적 특성을 탐색하는 수치해석적 방법을 사용하였다[2, 3]. Weidong은 국부 최적화(local optimization)와 전역 최적화(global optimization)를 조합하여 문제를 풀고자 하였으며 국부최적화에는 신경회로망을, 전역최적화에는 유전알고리즘을 사용하였다[4]. 한성호는 유전알고리즘을 사용하여 ATO(Automatic Train Control)에 응용할 수 있는 최적제어 알고리즘을 제안하였다[5].

본 논문에서는 고속철도의 운행 시간 여유분을 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 경제 운전 패턴을 찾는 방안을 제시한다. 경제 주행 패턴은 추진단계에서의 경제속도와 제동단계에서의 타행 끝점 속도에 의해 정의된다. 이를 위해 기존의 TPS(Train Performance Simulation)를 경제운전까지 계산할 수 있도록 기능을 확장하였다. 고속선구간에서 시운전시험 수행중인 한국형 고속전철 시제차량을 대상으로 데이터를 추출하고 퍼지를 이용하여 모델링한 결과를 제시한다. 본 연구는 별도의 추가 비용 없이 노선의 특성을 고려하여 에너지 소비를 절감하므로써 운영 비용을 줄일 수 있는 운전 전략을 찾는데 최종적인 목적이 있으며, 향후 시운전시험 주행을 통해 그 실효성을 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

상업운행을 위해서는 주행시간을 고정해야하며 이 주행시간은 최대 성능 계산 즉, 정상조건에서의 최소 주행시간을 기반으로 해서 일정한 여유분을 추가하여 결정되게 된다. 여기서 정상조건이라함은 견인과 제동특성이 정상이며 반마모된 차륜, 정상조건의 선로와 차륜의 슬립과 슬라이드가 발생하지 않은 것을 의미한다. 이런 상태에서 최대 성능 계산은 사구간에서의 타행과 급전설비와 신호에 의해 결정되는 속도제한을 포함하여 수행된다. 여유분은 외란으로 인한 운행 방해를 조정하기 위해 실제 주행시간에 부가된 것이다. 따라서 각 주행패턴에 대한 주행시간 여유분은 아래 식(1)과 같이 계산된다.

$$M_{econo-trip-time} = \frac{(T_{econo-trip} - T_{econo-dwell}) - (T_{max-trip} - T_{max-dwell})}{T_{max-trip} - T_{max-dwell}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 $M_{econo-trip-time}$, $T_{econo-trip}$와 $T_{econo-dwell}$는 각기 경제 운전의 주행시간 여유율, 주행시간과 정차시간이고, $T_{max-trip}$와 $T_{max-dwell}$는 각각 최대 성능에 의한 주행시간과 정차시간이다.

주어진 조건하에서 에너지 저감은 식(2)에 의해 계산된다.

$$E_{econo-saving} = \frac{E_{max} - E_{econo}}{E_{max}} \times 100 \quad (2)$$

$E_{econo-saving}$은 경제 주행을 통한 에너지 소비 저감 비율이고 E_{max}와 E_{econo}는 각기 최대 열차 성능에 의한 에너지 소비와 경제 주행에 의한 에너지 소비량이다.

경제운전에서 에너지 저감은 속도의 최적선택에 의해 달성되며 문제는 주어진 주행시간 제약조건하에서 에너지 소비를 최소로 하는 경제최고속도와 타행끝점속도를 원소로 하는 속도집합 V_{speed} = { $V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$}를 찾는 것으로 정식화된다. 따라서 에너지 저감에 대한 최적화문제로 식(3)과 같이 정식화할 수 있다.

목적함수 최대화 : $E_{econosaving}$
제약조건 : $T_{econotrip} \leq t_i$(주어진 주행시간 제한) (3)
속도구하기 : V_{speed} = { $V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$}

타행끝점속도가 결정되면 타행구간이 결정되게 되는데 이것은 불필요한 견인과 제동을 인가하지 않게 되어 Fig. 1의 음영부분 만큼 에너지를 저감할 수 있게 된다.

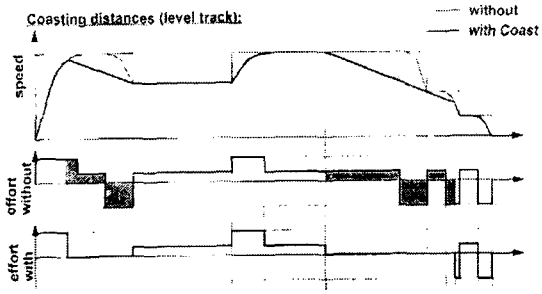

Figure 1. Energy saving due to coasting

2.2 문제 해결 방법론

주행하는 선로에 존재하는 수많은 곡선과 경사 조건 때문에 열차 성능 계산시 열차의 견인, 제동특성은 비선형으로 되어 해석적인 방법으로 해를 구하는데 어려움이 많다. 그러므로 독립변수의 변화에 따른 열차 성능을 분석하는 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 적절한 해를 제공해준다. 식(3)의 목적함수는 두 독립변수의 공간에 위치하는 표면을 구성하게 된다. 이 함수는 비선형 특성 때문에 표면에 국부최소값을 갖을 것이다. 주행시간은 에너지 소비에 반비례하므로 주행시간이 주어진다면 랜덤 탐색 기법이 유효하겠지만 주행시간은 열차의 효율적인 운용을 위해 결정되어져야 하는 것이므로 격자탐색기법(grid search technique)을 사용하여 두 개의 입력($V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$)을 사용하여 두 개의 출력을 결정하는 것이 효율적이다. 다음은 각 격자점 V_{speed}에서 격자탐색기법을 사용하여 최적화하는 과정이다.

1) $V_{econospeed}$, $V_{coastspeed}$를 사용하여 열차 성능 계산을 수행한다.

2) 열차의 속도가 $V_{coastspeed}$보다 크지 않은 구간에서 견인과 제동에 소비되는 에너지의 합이 0이 되는 $V_{coastspeed}$를 사용하여 에너지 소비를 최소로 하는 타행구간을 탐색하도록 한다.

3) 타행구간에서 $V_{econospeed}$를 사용하여 열차 성능 계산을 수행한다. 목적함수와 주행시간 여유분, 즉, $E_{econosaving}(V_{speed})$와 $M_{econo-trip-time}(V_{speed})$을 평가한다.

2.3 퍼지 모델

주행시간과 에너지 소비, 경제최고속도와 타행끝점속도 사이의 관계를 표현하는 데이터를 격자탐색기법을 사용하여 얻을 수 있고 이 데이터를 인간이 다루기 쉬운 언어적인(linguistic) 모델로 표현하고 이를 인식하기 위한 방법을 제시한다. 이 모델은 철도운영자가 에너지 소비를 저감하는 제어전략을 수립하는데 도움을 줄 수 있다.
다음 식(4)는 다중입력과 다중출력 시스템에 대한 퍼지 모델이다.

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i(x_1) \text{ and } \cdots \ x_k \text{ is } A_k^i(x_k) \text{ then } y_1 \text{ is } B_1^i \text{ and } \cdots \ y_q \text{ is } B_q^i \quad (4)$$

여기서 R^i : i 개 규칙 ($1 \le i \le r$), r : 퍼지 규칙의 수, $x_j(1 \le j \le k)$: 입력 변수, $y_p(1 \le p \le q)$: 출력 변수, $A_j^i(x_j)$: 식(5)에 의해 정의되는 퍼지 변수, B_p^i : 퍼지 싱글톤이다.

$$A_j^i = \begin{cases} 0 & \text{if } x_j < (c_{ij} - d_{ij}^l) \\ \dfrac{(x_j + d_{ij}^l - c_{ij})}{d_{ij}^l} & \text{if } x_j < (c_{ij} - d_{ij}^l) \le c_{ij} \\ \dfrac{(-x_j + d_{ij}^r + c_{ij})}{d_{ij}^r} & \text{if } c_{ij} \le x_j \le (c_{ij} + d_{ij}^r) \\ 0 & \text{기타} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 c_{ij} : 중심점, d_{ij}^l : Fig. 2와 같이 중심점에서 좌측까지의 거리, d_{ij}^r : Fig. 2와 같이 중심점에서 우측까지의 거리이다.

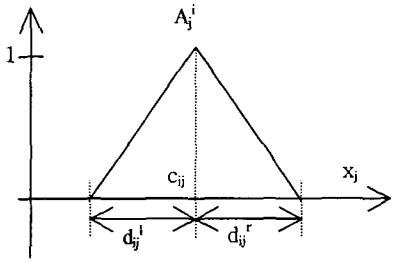

Figure 2. The shape of membership function in the premise

식(4)를 단순하게 다음 식(6)으로 쓸 수 있다.

$$R^i: \text{if } x \text{ is } A^i(x) \text{ then } y \text{ is } B^i \quad (6)$$

여기서 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_k)$, $A^i = (A_1^i, A_2^i, \cdots, A_k^i)$, $y = (y_1, y_2, \cdots, y_q)$, $B^i = (B_1^i, B_2^i, \cdots, B_q^i)$이다.
퍼지 모델에 대한 추론 절차는 다음과 같다.

1) l 개 입력/출력데이터 $\{x_{1l}, x_{2l}, \cdots, x_{kl}, y_{1l}, y_{2l}, \cdots, y_{ql}\}$가 주어졌을 때, i개의 규칙에 대한 만족도 w_i를 아래 식(7)과 같이 계산한다.

$$w_i = A_1^i(x_{1l}) \times A_2^i(x_{2l}) \times \cdots \times A_k^i(x_{kl}) \quad (7)$$

2) B_p^i의 가중치 평균을 w_i에 따라 곱해서 추론값 y_{ip}^*을 식(8)과 같이 계산한다.

$$y_{ip}^* = \frac{\sum_{i=1}^{r} w_i \times B_p^i}{\sum_{i=1}^{r} w_i} \quad (8)$$

여기서 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_k)$, $A^i = (A_1^i, A_2^i, \cdots, A_k^i)$, $y = (y_1, y_2, \cdots, y_q)$, $B^i = (B_1^i, B_2^i, \cdots, B_q^i)$이다.
n개 데이터집합 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n \mid x_l = (x_{1l}, x_{2l}, \cdots, x_{kl}, y_l)\}$이 주어졌을 때 퍼지 모델 인식은 다음의 절차를 통해서 식(9)로 정의된 퍼지모델의 에러를 최소화하는 것이다.

1) FCM 클러스터링을 사용한 구조인식
   - 퍼지규칙의 수를 찾아내고 클러스터의 중심을 좌표축에 투영함으로써 입출력공간의 퍼지 분할수를 획득한다.
2) 파라미터 인식
   - 제약조건이 있는 최적화 문제를 구성하고 차분진화 알고리즘을 사용하여 해를 찾아낸다.

$$E = \frac{1}{n}[\frac{1}{2q}\sum_{p=1}^{q}\sum_{n=1}^{n}(y_{lp} - y_{lp}^{*})^2] \qquad (9)$$

여기서 n : 입력/출력 데이터의 수, y_{lp} : 목표 출력, y_{lp}^{*} : 퍼지모델로부터 추론된 출력이다.

2.4 적용사례

한국형 고속전철 시제차량이 시운전시험을 수행하는 구간인 고속전철 광명역(KP21.9)과 오송기지(KP123.0) 구간을 대상으로 경제운전 시뮬레이션을 수행하여 데이터를 취득하였다. Fig. 3과 4는 각각 경제운전 시뮬레이션을 통해 얻어진 타행끝점속도의 변화에 대한 주행시간 그래프와 에너지 소비 그래프로서 주행시간 모델과 에너지 소비 모델의 데이터가 된다. 타행끝점속도가 증가할수록 주행시간은 감소하지만 에너지 소비는 증가하는 추세를 볼 수 있다. Fig. 6은 차분진화를 이용하여 구축한 퍼지모델 중 시간모델의 진화세대수에 대한 적합도값을 보여주고 있다. 2000세대에서 최대의 적합도를 보이고 있다. 시간모델의 오차는 0.0098, 에너지소비 모델의 오차는 3.5932로 계산되었다.

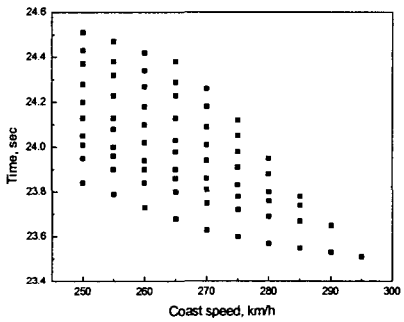

Figure 3. Graph of time vs. coast speed

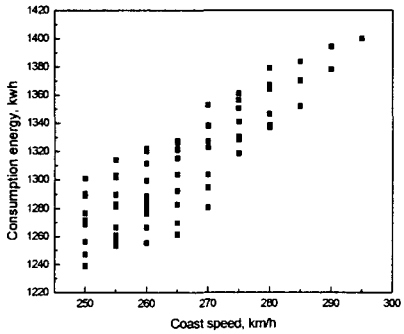

Figure 4. Graph of consumption energy vs. coast speed

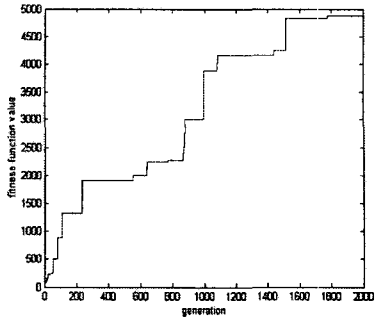

Figure 5. Fitness value vs. generation for time model

3. 결 론

본 논문에서는 별도의 추가 비용 없이 주어진 주행시간 여유분을 만족하면서 에너지 소비를 최소로 할 수 있는 주행패턴 전략을 위한 퍼지모델링 기법을 제안하였다. 이를 위해 열차 성능 해석 프로그램에 경제운전시뮬레이션 기능을 추가하고 경제최고속도와 타행끝점속도에 대한 주행시간과 에너지 소비 데이터를 추출하였다. 퍼지모델을 사용하여 시간과 에너지모델을 구축하였으며 차분진화를 이용하여 모델 인식을 수행하였다. 아울러 한국형 고속전철 시제차량을 대상으로 모델의 실효성을 검증하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 차분진화를 이용한 퍼지모델을 통해 경제운전 전략 수립의 가능성을 확인하였다.
- 적합도값은 2000세대에서 수렴되는 것을 알 수 있었다.
- 구축된 퍼지모델을 차분진화 및 유전알고리즘을 사용하여 최적화된 경제운전 패턴을 탐색하고 이를 실제 시운전시험에 반영하여 그 결과의 실효성을 입증하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] I.Milroy, "Aspects of automatic train control", Ph.D. Thesis. Loughborough University, 1980

[2] E.Khmelnitsky, "On an Optimal Control Problem of Train Operation", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.45, No.7, July 2000

[3] Iakov M.golovitcher, "Energy Efficient Control of Rail Vehicles", 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Page(s): 658 - 663 vol.1

[4] Jin Weidong, Li Chongwei, Hu Fei, Jin Fan, "A study on intelligent computation of methods of optimization operation for train", 2000 International Workshop on Autonomous Decentralized Systems, 2000. Proceedings. Page(s): 97 - 102

[5] Seong Ho Han, Yun Sub Byen, Jong Hyen Baek, Tae Ki An, Su Gil Lee, Hyun Jun Park, "An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA)", TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference Page(s): 360 -362 vol.1