경량전철의 자동운전패턴에 관한 기법

論 文
53B-5-10

The Method of Automatic Train Control Pattern for Light Rail Transit

李 恩 圭* · 崔 載 昊**
(Eun-Kyu Lee · Jae-Ho Choi)

Abstract - This paper proposes the train control system for the LRT(light rail transit). With regard to information processing in car, we build a computer network in the car, turned the hardware required for train control into software, and developed the train control monitoring system(TCMS) and ATC. Drive type of train control system car can drive with driverless mode basically, and this paper applied special communication type for car control, data analysis, the propulsion efforts and breaking effort can control the cars. It is used vector control in propulsion control and proposed operating pattern for propulsion control thinking operating data of rubber tire LRT.

Key Words : LRT, TCMS, MATLAB, 추진제어장치, 주행패턴

1. 서 론

최근 도시 철도 차량의 경우 차량의 운전과 관련하여 모니터링과 차량의 통합 제어가 요구되어져 왔고, 이에 따라서 차량의 운전 방식의 자동화 및 검수 방식의 편리화, 차량의 유지 보수의 간편화와 관련하여 기술의 발전이 이루어져 왔다. 일반 통근형 전동차와는 운행 방식에서 많은 차이를 가지고 있는 경량 전철 경우, 운행 시스템의 형태에서도 대도시의 순환 노선이 아닌 대도시와 주변 위성도시와의 연계 수송망과 도심의 교통난 해소가 기대되는 단거리 순환 노선으로 운행되기 때문에 무인 자동 운전 시스템화를 연구하고 있으며, 또한 차량의 유지 보수를 위해 빠른 데이터 전송과 안전한 통신방식을 기반으로 차량의 자동 검사 기능을 갖춘 차량의 통합 제어 기법에 대하여 연구되고 있다.

수동 운전방식의 기존 통근형 열차의 경우는 차량의 제어와 운전을 위하여 최대 2[Mbps]의 통신 방식이 사용되어져 왔다. 그러나 이와 같은 통신 속도로는 경량 전철의 기본 운전 방식인 자동 운전과 차량의 빠른 제어를 수행하기가 어려웠었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 차량의 제어와 데이터 분석을 위하여 10[Mbps]의 전용 통신 방식을 적용하여, 차량의 운행 데이터를 통한 차량의 상태를 점검 및 제어가 가능한 열차 종합 제어장치(Train Control Monitoring System : 이하 TCMS)와 차량의 추진력 제어 성능을 향상하기 위하여 차량의 트랙 데이터를 기본으로 차량의 자동 운전 패턴을 제시하고자 한다.

경량전철의 자동운전을 위해서는 차량의 추진 제어는 토크의 제어가 빠르고, 정확한 벡터 제어 기법을 사용하여 토크 제어를 수행하며, 제동제어로는 회생제동이 기본이 되도록 제동력을 조절하는 토탈 제동 제어를 수행하도록 하며, 제안된 주행 패턴은 TPS(Train Performance Simulation)와 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 시제 차량을 2량1편성 유닛으로 제작하여 추진 제어 장치, TCMS, ATC 장치를 연계하여 차량 제어 성능을 확인하였다.[1][2][3]

2. 경량전철용 열차제어시스템의 구성

경량전철의 자동운전을 위해 차상장치로는 차량의 추진력을 담당하는 추진제어장치와 제동을 담당하는 제동제어장치 및 차량의 속도제한을 위한 지상 신호와 차상 신호장치 및 승객서비스와 차량의 제어전원을 공급하는 보조전원장치, 그리고 차량의 제어를 위한 TCMS로 구성되어 있으며, 경량전철의 운전제어는 TCMS에 의하여 차량의 자동운전제어를 위하여 차량의 트랙 데이터를 중심으로 차량의 운전 패턴을 결정하게 된다. 이는 경량전철이 목표속도에 도달하도록 제어하기위하여 차량의 자동 운전 패턴의 설정 및 차량의 추진 토크의 제어를 수행한다. 그림 1은 차량 제어를 위한 차상 장치의 구성을 나타내었다.

장치의 구성은 차량의 편성에 따라 확장할 수 있지만 최소 차량의 운행이 가능한 2량 1편성의 구성과 운행 수요량에 따라 4량과 6량으로 증설 운행될 수 있도록 한다. 차상장치들은 통신라인을 통하여 제어지령 및 상태를 확인하고 제어된다. 차량의 상태 및 제어를 수행하기 위해서는 추진 및 제동장치 등의 하부 장치와 빠른 연계를 통한 데이터 공유가 필요하게 된다.

* 正 會 員 : 宇進産電 技術硏究所 首席硏究員
** 正 會 員 : 忠北大 工大 電氣電子工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 1月 20日
最終完了 : 2004年 3月 18日

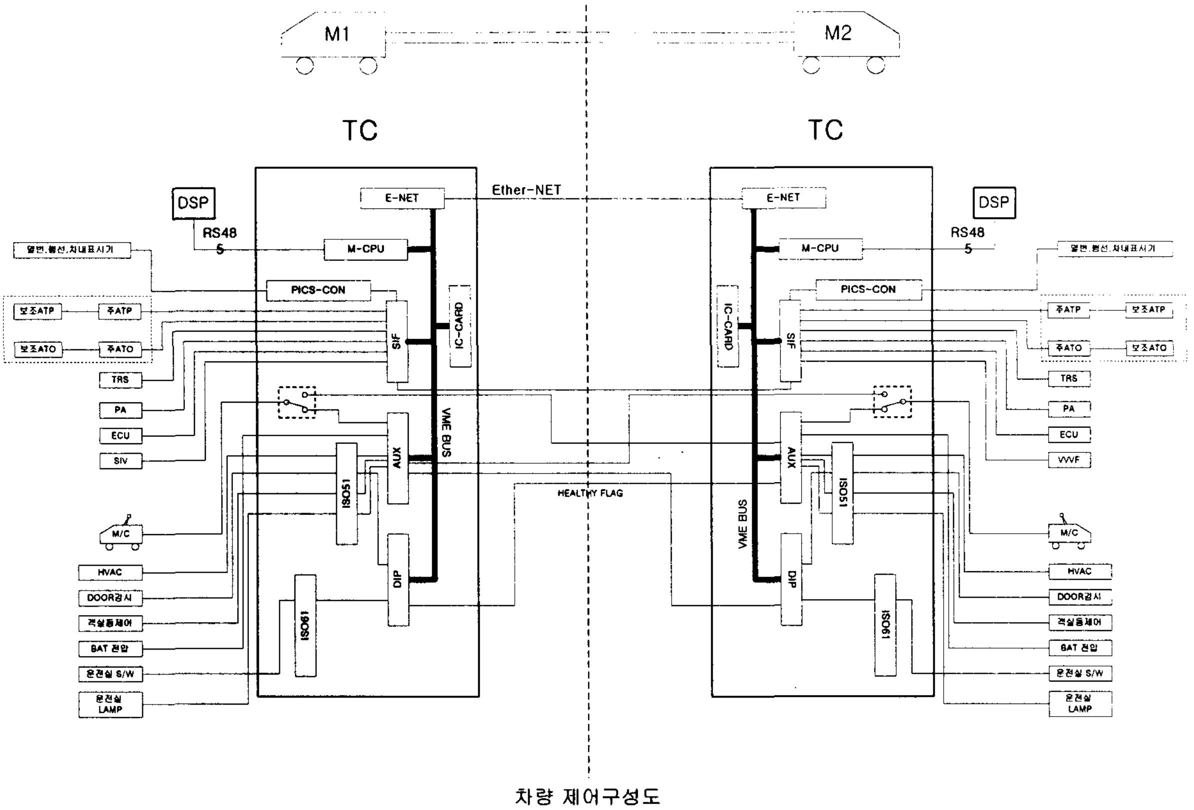

그림 1 차량제어를 위한 차상장치의 구성도

Fig. 1 Schematic diagram of train device for vehicles control구성도

TCMS는 경량전철의 운행 트랙 데이터를 기반으로 차량의 자동운전 패턴과 실제 운행 속도를 비교하여 추진 장치의 토크 프로 파일을 공급하여 차량의 속도 및 차량의 위치 제어를 수행하도록 한다. 본 연구에서는 장치들 간의 인터페이스를 위하여 빠른 통신 라인을 갖는 최소 편성인 2량 1편성으로 장치를 구성하였다.

3. 차량의 제어

3.1 역행 토크제어

차량제어를 위해 필요한 차량의 주행 저항 및 추진 토크를 계산한다. 추진 토크를 계산하기 위한 고무차륜 경량전철의 사양은 표 1과 같으며, 차량의 주행 저항을 계산하면 다음과 같다.

$$R = 114M + (0.2 + 0.3N)V^2$$

M: 차량의하중, N: 차량수, V: 차량속도 (1)

이를 기반으로 차량의 성능을 결정하는 추진력과 제동력을 계산하여 차량의 토크 패턴을 계산할 수 있다. 차량의 추진 토크를 계산하면 다음과 같다

$$T_E = \left\{28.35\left(\left(0.1 \times \frac{W_O}{2} + 0.05 \times \frac{W_O}{2}\right) + W\right) \times \frac{a}{W} + R_0\right\} \times W \quad (2)$$

W_O:공차중량, W:차량중량, a:가속도, R_0:출발저항

표 1 고무차륜 경량전철의 사양

Table 1 Specification of rubber tire LRT

		사 양
편성		2량 1편성
공차중량		22t/편성
만차중량		36t/편성
가속도		3.5km/h/s
감속도	상용	3.5km/h/s
	비상	4.5km/h/s
최고 속도		60km/h
표정 속도		30 km/h 이상

그림 2는 고무 차륜 경량전철의 역행 특성 곡선을 보인다. 차량의 역행 토크 제어는 차량 운행 노선의 구배 조건 및 곡선 상태, 승객의 하중 등의 차량 조건을 고려하여 차량의 추진 토크를 제어한다.

차량의 TCMS는 차량의 운행 선로 데이터를 기반으로 신호장치의 운행 속도 제한 값을 고려하여, 차량의 추진토크를 계산하고, 이를 VVVF 장치로 토크 지령을 지시하고, 실제 차량의 속도와 제동력, 승객 하중을 검토하여 차기 추진력을 계산하여 차량의 속도 제어를 수행한다.[4]

3.2 제동력 제어

제동시에는 차량의 속도, 응하중, 그리고, 회생 제동력을 계산하여 빠른 응답성을 갖도록 차량의 제동력의 종합 제어

를 수행하도록 한다.

일반적으로 차량의 공기 제동력은 전기 제동력인 회생 제동에 비해 반응속도가 느리며, 제동장치에서 제어가 쉽지 않기 때문에 최소 5km/h 까지 전기 제동력을 수행하여 공기 제동의 부족분을 전기 제동을 통하여 보충 제어하는 방식으로 제어하여 차량의 제동력이 일정하도록 제어한다. 그림 3은 제동 특성 곡선이다.

$$B_E=\left\{28.35\left(\left(0.1\times\frac{W_O}{2}+0.05\times\frac{W_O}{2}\right)+W\right)\times\frac{\beta}{W}-0.5R_0\right\}W \qquad (3)$$

W_O:공차중량, W:차량중량, β:감속도, R_0:출발저항

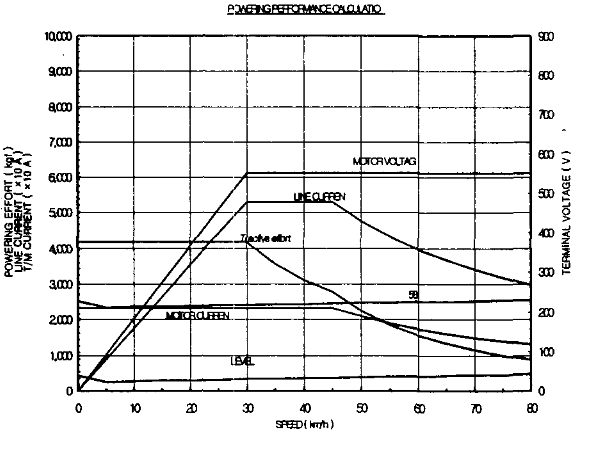

그림 2 역행 특성 곡선

Fig. 2 Powering performance curve

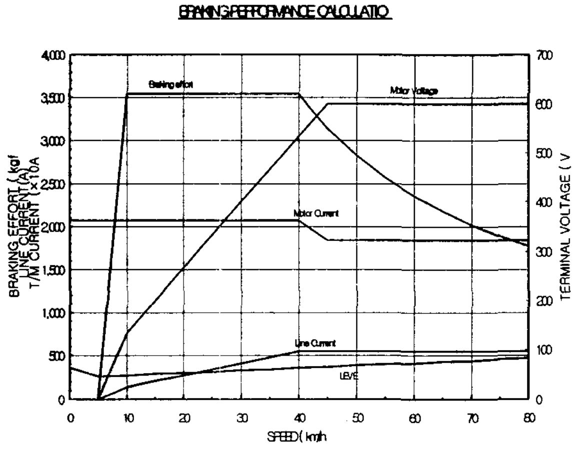

그림 3 제동 특성 곡선

Fig. 3 Braking performance curve

3.3 벡터 제어

추진 인버터의 제어방식으로는 출력 전압의 선형 제어가 가능한 저속 영역에서는 정밀한 순시 토크 제어를 위하여 벡터 제어를 적용하였다. 벡터 제어는 회전자 자속각을 추정하여 제어하는 직접 벡터 제어를 사용하였다. 그림 4는 견인 전동기 구동 시스템을 위한 벡터 제어 블록도를 보여준다. 토크와 자속의 지령치는 유도 전동기의 특성과 그림 2와 그림 3의 역행, 제동 특성을 고려하여 각각의 속도에 따라 노선의 데이터와 승객의 승차율을 고려하여 계산된다.

계산된 값으로부터 VVVF 장치로 토크 지령치를 전송하면, 유도 전동기의 전압 방정식과 자속 방정식을 이용하여 토크분 전류와 자속분 전류 지령치를 얻어낸다. 전류 지령치는 피드백된 전류와 비교하여, 동기좌표계상에서 PI 전류 제어기로서 제어되며, 정밀한 제어를 위하여 전향 보상(Feed-forward)을 이용하였다. 동기 좌표계 변환을 위한 회전자의 자속각은 전류 모델과 전압 모델을 결합한 자속 추정 방법을 사용하였다.[5]

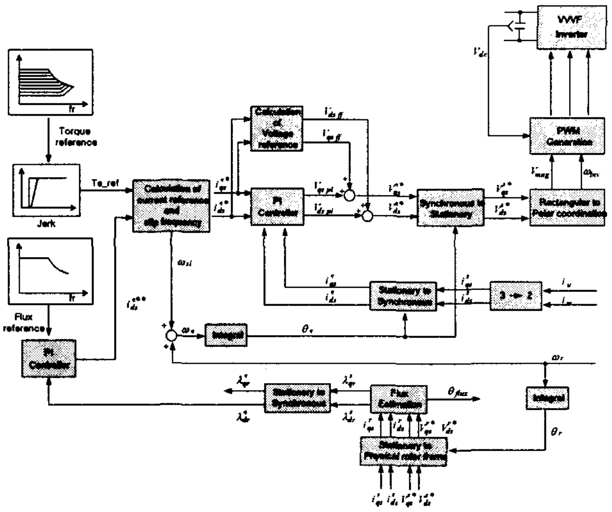

그림 4 벡터 제어 블록도

Fig. 4 Block diagram of vector control

동기좌표계상에서 구현된 그림 4의 제어기에서 피드백된 상전류 i_u, i_w는 정전류 제어를 위해 PI 제어기를 거친다. PI 제어기를 거친 항을 각각 $V_{ds\,pi}$, $V_{qs\,pi}$라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{ds\,pi} = K_p(i^{e*}_{ds} - i^{e}_{ds}) + K_i\int(i^{e*}_{ds} - i^{e}_{ds})dt \qquad (4)$$

$$v_{qs\,pi} = K_p(i^{e*}_{ds} - i^{e}_{ds}) + K_i\int(i^{e*}_{ds} - i^{e}_{ds})dt \qquad (5)$$

비간섭(Decoupling)제어를 위한 전향보상항(Feed forward)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds\,ff} = R_s i^{e*}_{ds} - \omega_e L_s' i^{e*}_{qs} \qquad (6)$$

$$v_{qs\,ff} = R_s i^{e*}_{qs} + \omega_e L_s' i^{e*}_{ds} + \omega_e \lambda^{e*}_{dr} \qquad (7)$$

위 식 (4), (5)의 PI제어기의 출력은 식 (6), (7)의 전향 보상항과 더해져 최종적으로 PWM (Pulse Width Modulation) 인버터로서 전동기를 제어하게 된다. 즉, 최종적인 전압 지령치는 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$v_{ds}^{e*} = v_{ds\,pi} + v_{ds\,ff} \tag{8}$$

$$v_{qs}^{e*} = v_{qs\,pi} + v_{qs\,ff} \tag{9}$$

식 (8), (9)과 같이 구해진 d축과 q축의 전압 지령 v_{ds}^{e*}, v_{qs}^{e*}는 슬립 주파수 제어로 변환되어도 같은 형식을 가져야 하기 때문에, 전압의 크기 V_{mag}와 인버터의 주파수 ω_{inv}로 변환되어 사용된다.[6]

4. 운전 패턴의 계산

차량의 자동 운전 패턴을 결정하는 방법은 여러 가지가 있지만, 운행 노선의 트랙 데이터에 가장 많은 영향을 받는다. 고무 차륜 경량전철의 경우, 기존의 철제 차륜과는 달리 출발 저항 및 마찰 저항이 상당히 크기 때문에 출발과 제동시에 정확한 토크 제어를 수행하여야 한다.

운전 패턴을 계산하기 위하여 그림 2와 그림 3에서 제시된 토크 패턴을 바탕으로 운전 패턴을 계산하였다. 운전 패턴을 계산하기 위하여 역행시와 타행 및 제동시를 구분하여 계산하며 구배의 유무를 고려하여 다음의 식(10), (11), (12)을 적용하여 운전 패턴을 계산한다.[7]

$$S = \frac{4.2832(\,V_2^{\,2} - \,V_1^{\,2})}{(F - \,R_g)} \tag{10}$$

$$S = \frac{4.2832(\,V_2^{\,2} - \,V_1^{\,2})}{(\,R_r - \,R_g)} \tag{11}$$

$$S = \frac{V^2}{7.2\beta} \tag{12}$$

단, R_r : 속도마다 평균 주행 저항(Kg/t)

R_g : 구배 저항치 (Kg/t)

최적의 주행 패턴을 계산하기 위하여 차량의 운행 선로 데이터를 참조하며, 차량의 속도 제한 조건과 역간 운행 시간 및 표정속도를 고려하고, 추진 장치의 전력 소모를 최소화하는 운전 패턴을 선정한다.

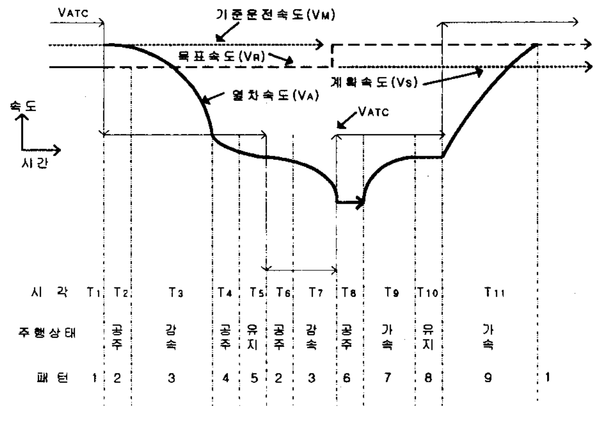

그림 5 차량의 운전 패턴

Fig. 5 Driving pattern of vehicle

자동 무인 운전시 속도 제한 범위는 추정 속도의 3km/h 속도 편차 내에서 속도 제어를 수행한다. 차량의 정위치 정차를 수행하기 위해서는 TCMS, ATC, 제동장치 그리고 추진 제어 장치 간 통신 주기 및 계산 처리 시간은 공주(空走)시간 1초 이내에 처리가 되어야 한다. 그림 5는 차량의 운전 패턴을 보여주며, 주행 상태는 가속, 감속, 유지 및 공주 구간으로 구분한다.

또한 열차의 자동운전과 관련하여 운전 패턴의 구성을 그림 6에 나타내었으며, 열차의 위치 제어 블록다이어그램을 그림 7에 나타내었다. 지상신호의 속도제한 값을 받아서 차량의 속도와 위치를 제어하기위하여 정위치 정차 패턴(TASC1, TASC2)을 추종하도록 제어한다.

경량전철의 자동운전을 위하여 차량의 속도와 차량의 위치와 트랙데이터를 기준으로 차량의 운전을 위한 자동운전 패턴을 설정한다.

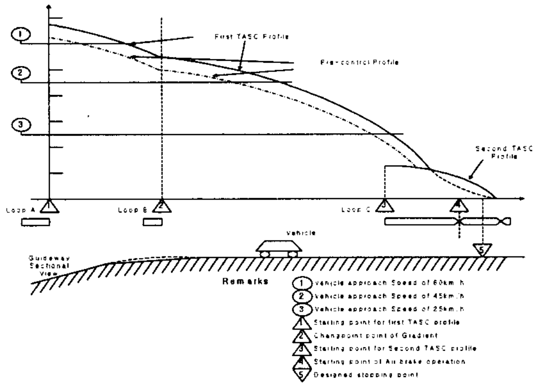

그림 6 자동운전 패턴의 구성

Fig. 6 Composition of Automatic driving pattern

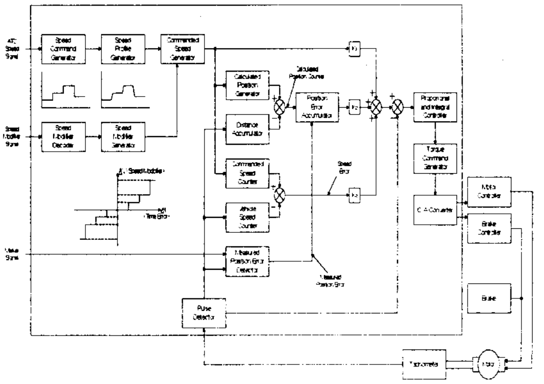

그림 7 자동 운전 제어의 블록도

Fig. 7 Block diagram of Automatic driving control

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 2가지로 구분하여 수행을 하였다. 추진제어 장치의 제어성능을 확인하기 위해 정상적인 추진 토크를 계산하고 MATLAB을 통하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 8은

추진 제어 시스템의 모델링을 나타내었으며, 그림 9와 그림 10은 자속분 전류와 토크분 전류의 지령치 및 값들을 보여준다.

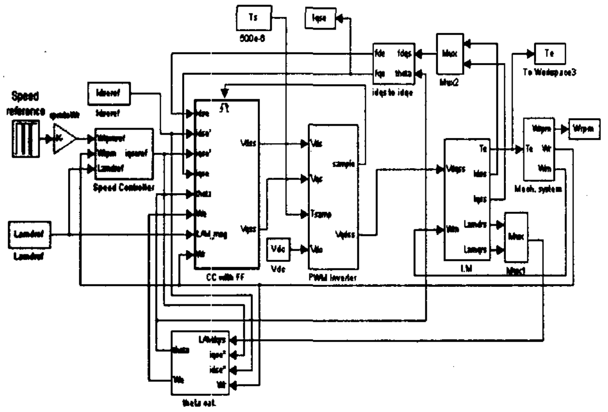

그림 8 추진제어 시스템의 모델링
Fig. 8 Modelling of Propulsion system

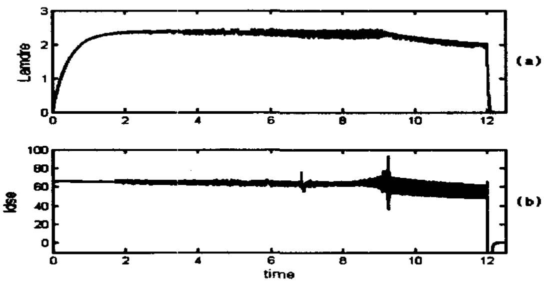

그림 9 자속분 전류 및 지령치
(a) 발생 자속 (b)자속분전류
Fig. 9 Flux and d-axis current
(a)Flux (b) d-axis flux current

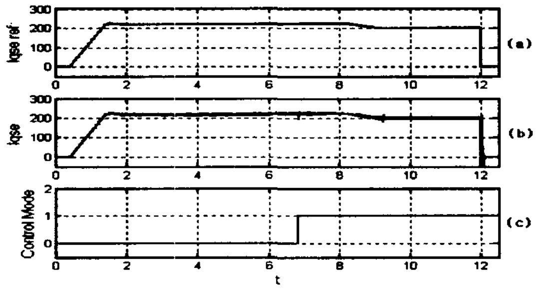

그림 10 토크분 전류 및 지령치, 제어모드
(a) 토크 지령치 (b) 토크분 전류 (c) 제어모드
Fig. 10 Torque current and control mode
(a) Torque command (b) Torque current
(c) Control Mode

그림 9와 그림 10에서 보듯이 발생 자속과 자속 전류가 전 영역에서 정상적으로 발생하고 있다. 과변조 영역에서 자속 전류의 리플이 커진 것으로 보이는데, 이것은 1펄스 영역으로 넘어가면서 펄스 수의 감소로 인한 것이다. 또한, 차량의 운행 데이터 및 운행 패턴을 고려하여 주행 시뮬레이션(TPS)을 실시하였다. 시뮬레이션은 국내에서 고무 차륜 경량 전철의 운영이 예상되는 구간의 선로 데이터를 참조로 하여 주행 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 11은 상행 노선이며, 그림 12는 하행 노선으로 거리축에 따른 결과 데이터를 나타내었다.

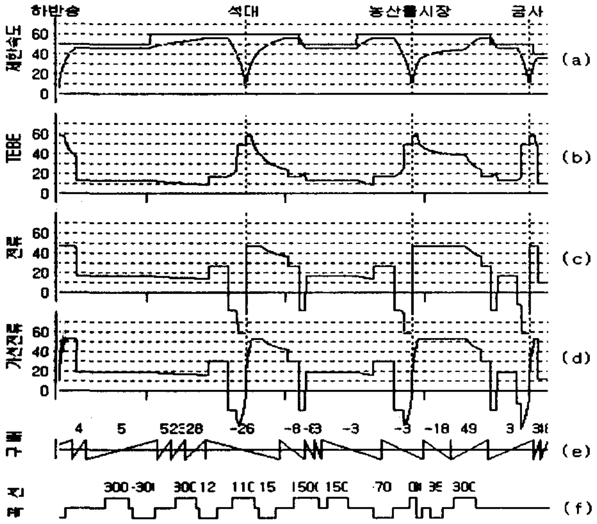

그림 11 주행 시뮬레이션 - 상행
(a) 속도 (b) 추진토크 (c)견인전동기전류
(d) 가선전류 (e) 구배 (f) 곡선
Fig. 11 Running simulation - going up
(a) speed (b) torque (c) motor current
(d) line current (e) grade (f) curve

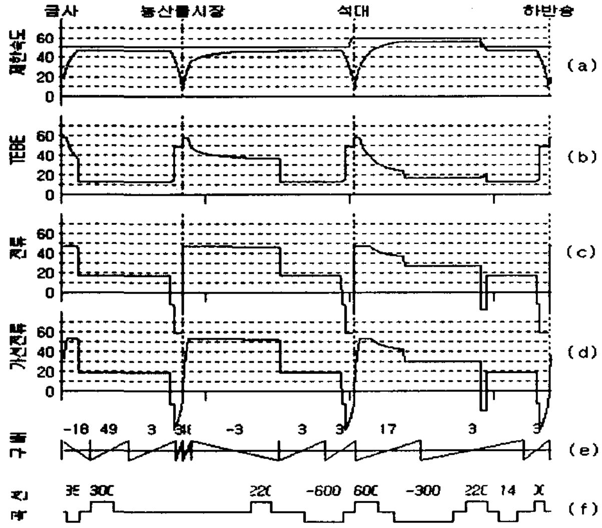

그림 12 주행 시뮬레이션 - 하행
(a) 속도 (b) 추진토크 (c)견인전동기전류
(d) 가선전류 (e) 구배 (f) 곡선
Fig. 12 Running simulation - going down
(a) speed (b) torque (c) motor current
(d) line current (e) grade (f) curve

제작된 경량 전철은 차량의 하부에 추진 제어 장치를 구성하였고, 실내에는 TCMS와 차상 ATC 장치를 설치 하였다. 가선전압은 측면에 있는 3궤조로 직류 750V를 수전한다.

고무 차륜의 주행을 무리 없이 하기 위하여 하부에 주행 roller를 설치하여 차량의 주행 시험을 수행하도록 하였다. 고무 차륜의 경우, 마찰력이 크기 때문에 roller로는 실제 노선 조건과 많은 차이가 나지만, 기본적인 추진 장치의 성능 및 차량의 주행 성능을 확인하기에는 무리가 없다.

자동 운전의 경우 지상의 무선 장치로부터 운행의 속도 제한치를 수령하면 차상의 ATC 장치로부터 운행 패턴을 입력받아 TCMS는 차량의 상태 및 각 하부 장치의 상태를 점검한 후 VVVF 장치를 제어한다.

그림 13과 그림 14는 750[V]의 가선 전압을 인가한 상태에서 ATC, TCMS, 그리고 추진제어장치를 조합하여 주행 시험을 실시한 파형이다.

그림 13과 그림 14에서 보이는 속도는 TCMS에서 각 역간 데이터에 따라 만들어지는 속도의 지령치와 추진제어장치에 의해 제어되는 속도를 나타낸다. ATC에서는 추진제어장치로부터 차량의 속도를 입력받아 운행거리를 계산하고 그에 따라 토오크의 지령치(TEBE)와 가속(Powering), 감속(Braking)여부를 TCMS를 통하여 추진제어장치에 전달한다.

추진제어장치는 토오크의 지령치를 입력받아 그에 따라 그림과 같이 제어를 수행한다. 실험에서의 파형은 시간 축에 따른 결과 데이터를 측정한 파형이며, 시뮬레이션에서 보인 거리의 증감에 따른 계산 결과와 비교하여 볼 때 시간 축을 기점으로 한 역행 및 회생의 측정 결과의 증감과 형식이 같음을 볼 수 있다.

고무 차륜 경량 전철의 운행에 대한 구배 및 곡선에 따른 노선 data에 따른 종합적인 제어와 안정성의 시험을 위해서는 시험 노선에서 적용하여 시험해야 할 것이다.

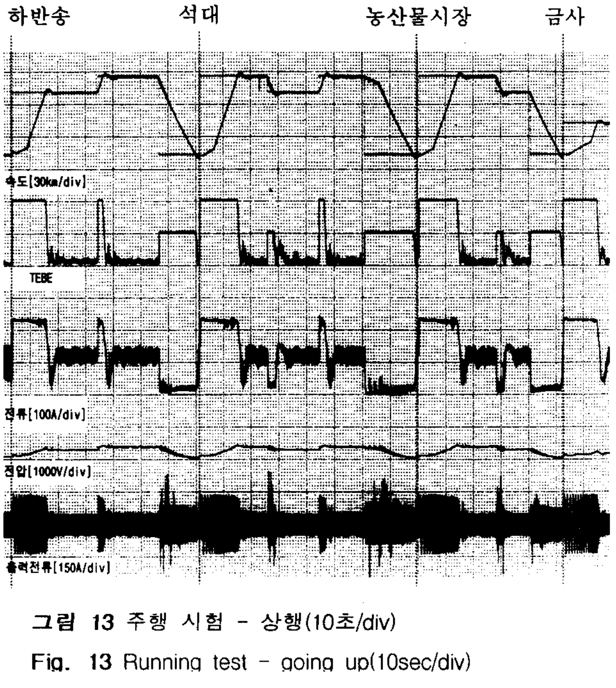

그림 13 주행 시험 - 상행(10초/div)

Fig. 13 Running test - going up(10sec/div)

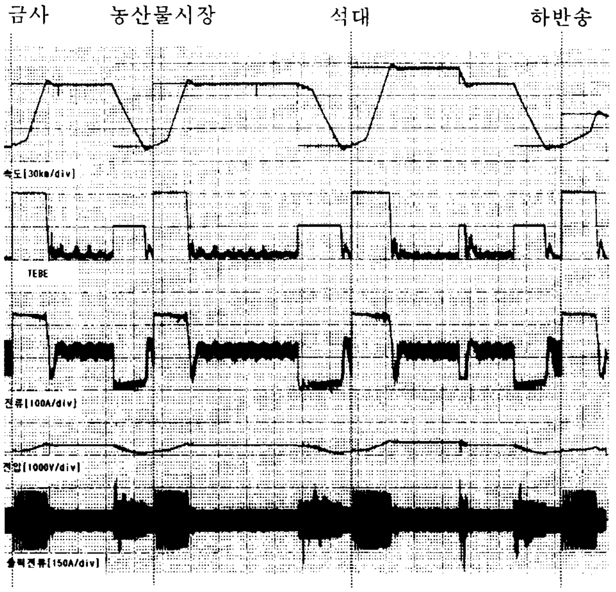

그림 14 주행 시험 - 하행(10초/div)

Fig. 14 Running test - going down(10sec/div)

6. 결 론

경량 전철의 추진력과 제동력의 제어 및 차량의 서비스 제어 기능을 갖는 TCMS와 차량의 자동제어가 가능한 차량의 구성 및 추진제어장치를 제안하였다.

차량의 자동화 운전을 가능하게 하기 위하여 지상 장치인 신호 장치와 연계된 속도 제한 값을 기준으로, 선로 데이터를 고려하여 운행패턴을 만들어냈으며 그에 따라 추진제어장치를 제어하였다.

또한, 토크와 자속의 일정 제어를 위한 벡터 제어 방식에 대하여 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 수행하였고, 경량 전철의 실제 노선 데이터를 바탕으로 주행 시뮬레이션을 통하여 차량의 기본 성능 및 최적의 주행 패턴을 제시하였다. TCMS를 개발하여 고무 차륜 경량전철에서 추진제어 장치와 조합하여 모의시험을 실시하여 차량의 자동운전 제어에 대한 타당함을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] 경량전철시스템 기술개발사업 연구결과 보고서 (2000), 건설교통부

[2] Rolling Stock & technology, 1999, Jan, vol. 5-1 No. 42, 일본

[3] 安波政弘, 栗原皿郎 "札幌市交納東西線自動運轉システム",第13回鐵道の於けるサイベネティクス利用國内シンポジウン No.410, 1976

[4] 이은규, 김상용, 한석윤 "주행 조건을 고려한 고무차륜 경량전철의 기본설계"2001.철도학회

[5] 김상훈, 배본호, 설승기, "벡터제어를 적용한 전동차 구동 시스템 개발", 전력전자학회논문지 제6권 제2호, pp.125- 131, 2001

[6] H.J.Schwartz, R..KreBe, " Implementation of an Advanced Wheel Creep Control with Searching Strategy on a Light Rail Vehicle", In Proc. EPE 97, pp3.434-3.438, 1997
[7] 小山敏博,江連久 "列車制御綜合シミュレータ 計測と制御 第32巻 第7号 1993

저 자 소 개

이 은 규(李 恩 圭)
1966년 12월 5일생. 1998년 아주대 전자공학과 졸업. 1990년 동대학원 제어공학과 석사. 2000년 충북대 전기공학과 수료(박사). 현 (주)우진산전 기술연구소 수석연구원
Tel : (043) 820-4111
Fax : (043) 836-7405
E-mail : eklee@wjis.co.kr

최 재 호(崔 載 昊)
1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 1981~1983 중경공업전문대 전자과 전임강사, 1983~2002년 충북대학교 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto(Visiting Professor).
Tel : (043) 261-2425
Fax : (043) 276-7217
E-mail : choi@power.chungbuk.ac.kr