

고무차륜 경량전철용 자동운전 시스템의 제어방법

Automatic train control system of Light rail transit for Rubber Tire

이 은 규¹, 최 재 호²

Eun-Kyu Lee, Jae-Ho Choi

Key Words : 열차제어, 종합제어장치(TCMS), 운행패턴, 자동운전**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 10Mbps 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.

1. 서론

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 그 운행의 방식이 많은 차이를 가지고 있는 경량 전철 경우, 운행 시스템의 형태에서도 대도시의 순환 노선이 아닌 대도시와 주변 위성도시와의 연계 수송 망과 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.

기존 통근형 전동차의 경우 최대 2Mbps의 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 10Mbps의 전용 통신 방식을 적용하여, 차량의 운행 데이터를 통한 차량의 상태를 점검 및 제어가 가능한 열차 종합 제어 장치(Train Control Monitoring System : 이하 TCMS)를 소개한다.[1][2]

또한, 차량의 추진력 제어 성능을 향상하기 위하여 차량의 트랙 데이터를 기본으로 차량의 주행 패턴을 제시하고자 한다. 차량의 추진 제어 방식은 토크의 제어가 빠르고, 정확한 벡터 제어 기법을 사용하여 토크 제어를 수행하며, 제동시에는 전제동이 기본이 되도록 제동력을 조절하는 종합 제어를 수행하도록 처리하였다. 제안된 주행 패턴은 TPS(Train Performance Simulation)와 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 시제 차량을 2량1편성 유니트로 제작하여 추진 제어 장치, TCMS, 그리고, ATC 장치를 연계하여 차량 제어 성능을 확인하였다.[3]

2. 경량 전철용 열차제어시스템의 구성

Fig. 1은 열차의 자동 운전, 검수, 및 차량의 상태의 분석을 위해 제안된 TCMS의 외형을 보여준다.

¹ 정회원, 우진산전(주) 기술연구소, 수석연구원

² 비회원, 충북대학교 전기전자공학부, 교수

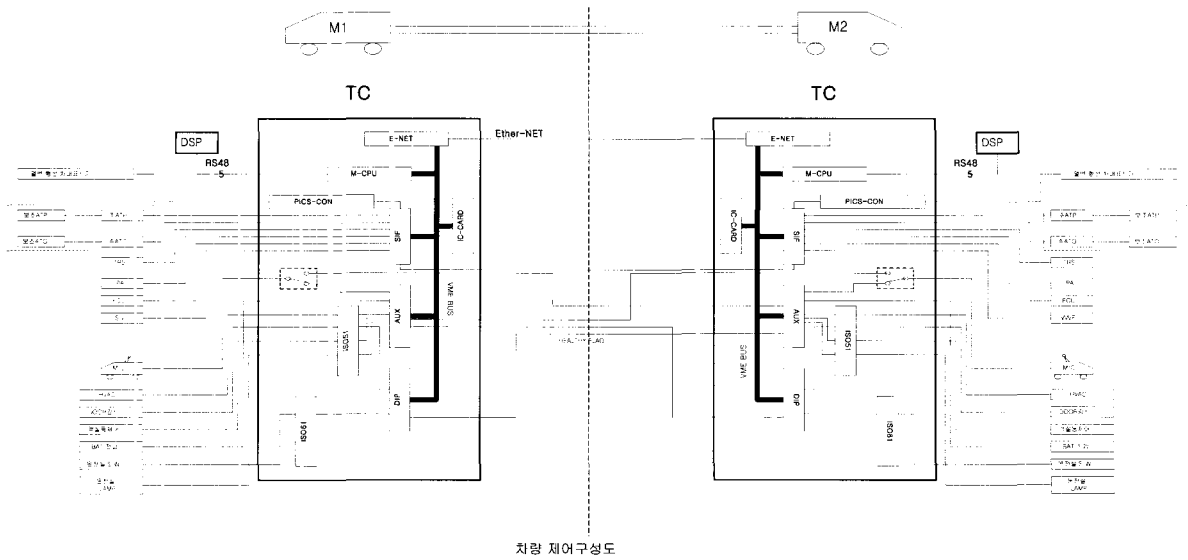


Fig. 2 The structure of Car control system



Fig. 1 The outline of TCMS

차량의 상태 및 제어를 수행하기 위해서는 추진 및 제동장치 등의 하부 장치와 빠른 연계를 통한 데이터 공유가 필요하게 된다.

TCMS의 시스템 구성으로는 기본 편성인 4량으로 중앙 장치와 단말장치, 운전 상태 및 차량의 상태를 확인하기 위한 DISPLAY 유니트로 구성되지만, 본 연구에서는 장치들간의 인터페이스를 위하여 빠른 통신 라인을 갖는 최소 편성인 2량 1편성으로 장치를 구성하였다.

Fig. 2는 차량 제어를 위한 차상 장치의 구성을 나타내었다. 장치의 구성은 차량의 편성에 따라 구성 형태를 변경하여 차량의 적용시 효율을 높일 수 있도록 하였다.

2.1 통신 라인

차량에 사용되는 통신 라인은 고속 통신, RS-485, 그리고, Current loop가 사용된다.

첫째, 고속 통신은 전송 속도는 10Mbps를 갖도록 하여 기존의 76.8kbps나 2Mbps에 비해 고속화를 실현하였고, 맨체스터 동기 통신 방식을 채용한 이더넷 통신을 통하여 메인 통신을 구현하였다. 고속 통신 라인의 통신 주기는 50ms로 구성하였다. 또한, 철도 차량의 특성상 전송 통신 라인에 대해서도 내 노이즈성을 충분히 갖도록 하였다. 둘째, RS-485와 Current loop 통신은 추진제어장치와 제동장치, 그리고, 기타 하부 장치들간의 통신을 위하여 12채널을 확보하여 장치간 인터페이스를 원활히 할 수 있도록 확장성을 고려하였다. 장치들과 TCMS간의 통신방식과 전송속도 및 사양은 Table 1과 같다.

차량의 전·후부 제어 및 TCMS의 내부 계산 시간, 통신 주기, 제동장치, ATC, 그리고, 추진 장치의 계산 시간 및 통신 주기 등을 감안한다면, 고속 통신의 경우에는 최소 통신 주기를 50ms로 유지하여야 정밀 제어가 가능하다.

따라서, 차량의 데이터전송 및 제어를 위하여 10Mbps의 통신을 수행할 필요가 있다.

Table 1. The specification of communication

인터페이스 장치	통신방식	통신 속도	통신 주기
ATC	RS-485	19.2kbps	100ms
VVVF	RS-485	100kbps	40ms
ECU	RS-485	19.2kbps	50ms
PIS	RS-485	9600bps	500ms
TRS	Current loop	2400bps	150ms
PA	RS-485	9600bps	500ms
SIV	Current loop	9600bps	200ms

약어) ATC : Automatic Train Control
 VVVF : Variable Voltage Variable Frequency
 ECU : Electric Control Unit
 PIS : Passenger Information System
 TRS : Train Radio System
 PA : Public Address System
 SIV : Static Inverter

2.2 차량 내 인터페이스 신호

TCMS는 차량 내 각종 장치의 디지털 접점과 아날로그 신호 및 차량의 배전반 내의 동작 감시와 상태를 검지하고, 각 장치를 구동시키기 위한 접점 출력을 할 수 있도록 구성하였다.

- 차량제어용 입력 신호 : 144점
- 차량제어용 출력 신호 : 96점
- 아날로그 입력 신호 6점

차량의 신호의 추가를 고려하여 충분한 여유를 갖도록 설계하였다.

2.3 표시 장치 유니트

TCMS의 사용자 인터페이스를 위하여 COLOR LCD를 취부하여, 장치의 동작 및 상태를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 차량의 시험을 자동으로 수행할 수 있도록 하여 차량의 출고 전, 후 및 월상 검사를 수행할 수 있도록 하였고, 운행 상태를 기록할 수 있도록 하였다.

3. 차량의 제어

3.1 역행 토크제어

차량제어를 위해 차량의 주행 저항 및 추진 토크를 계산한다. 추진 토크를 계산하기 위하여 고무차륜 경량전철의 사양은 Table 2 와 같다.

Table 2 The 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

차량의 주행 저항을 계산하면 다음과 같다.

$$R = 114M + (0.2 + 0.3N)V^2 \tag{1}$$

M: 차량의 하중 N:차량의 량수 V:차량 속도

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

$$T_F = \left\{ 28.35 \left(\left(0.1 \times \frac{W_0}{2} + 0.05 \times \frac{W}{2} \right) + W \right) \times \frac{a}{W} + R_0 \right\} \times W \tag{2}$$

W₀ : 공차중량 W : 차량중량 a: 가속도

R₀ : 출발저항

Fig. 3은 고무차륜 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 ATC 장치의 운행 속도 제한 값을 고려하여, 차량의 추진력을 계산하고, 이를 VVVF 장치로 토크 지령을 지시하고, 실제 차량의 속도와 제동력 승객 하중을 검토하여 차기 추진력을 계산하여 차량의 속도 제어를 수행한다.[4]

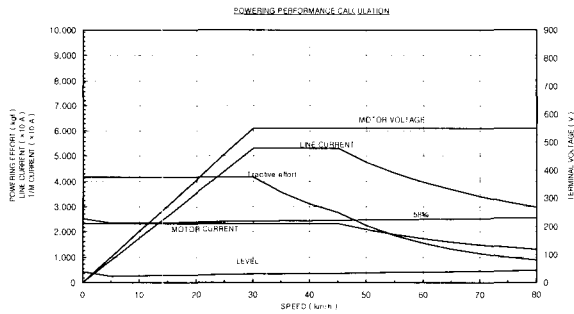


Fig. 3 Powering performance curve

3.2 제동력 제어

제동시에는 차량의 속도, 용하중, 그리고 회생 제동력을 계산하여 빠른 응답성을 갖도록 차량의 제동력의 종합 제어를 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. Fig. 4는 제동 특성 곡선이다.

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

W_D : 공차중량, W : 차량중량, β : 감속도, R_0 : 출발저항

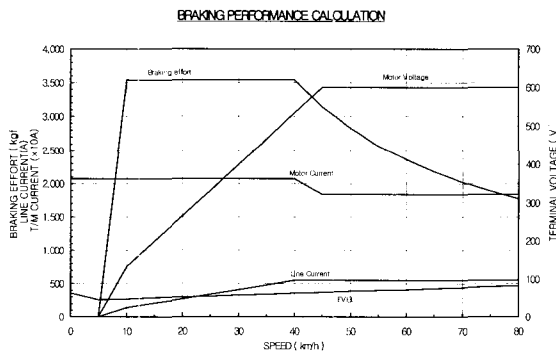


Fig. 4 Brake performance curve

3.3 벡터 제어

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. Fig. 5는 견인 전동기 구동 시스템을 위한 벡터 제어 블록도를 보여준다.

토크 지령치와 자속 지령치는 유도 전동기의 특성과 Fig. 3과 Fig. 4의 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.[4]

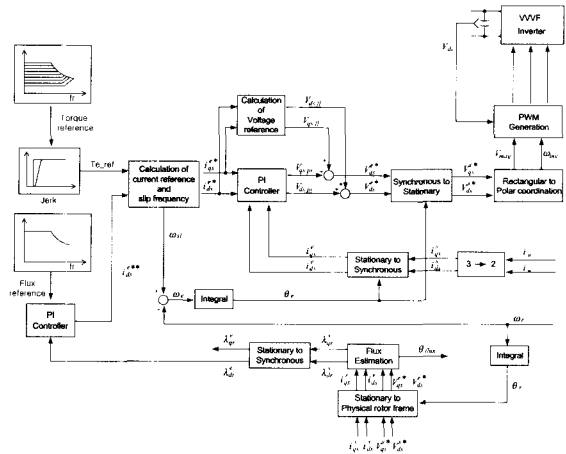


Fig. 5 Block diagram of Vector control scheme

동기좌표계상에서 구현된 Fig. 5의 제어기에서 피드백된 상전류 i_u, i_w 는 정전류 제어를 위해 PI 제어기를 거친다. PI제어기를 거친 항을 각각 $V_{ds\ pi}, V_{qs\ pi}$ 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{ds\ pi} = K_p(i_{ds}^{e*} - i_{ds}^e) + K_i \int (i_{ds}^{e*} - i_{ds}^e) dt \quad (4)$$

$$v_{qs\ pi} = K_p(i_{qs}^{e*} - i_{qs}^e) + K_i \int (i_{qs}^{e*} - i_{qs}^e) dt \quad (5)$$

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

$$v_{ds\ ff} = R_s i_{ds}^{e*} - \omega_e L_s' i_{qs}^{e*} \quad (6)$$

$$v_{qs\ ff} = R_s i_{qs}^{e*} + \omega_e L_s' i_{ds}^{e*} + \omega_e \lambda_{dr}^{e*} \quad (7)$$

단, i_{qs}^e, i_{ds}^e : d, q축 고정자 전류

$\lambda_{qs}^e, \lambda_{ds}^e$: d, q축 고정자 자속

ω_e : 전기각으로 표현된 인버터 주파수

L_s' : $L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$

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.

$$v_{ds}^{e*} = v_{ds\ pi} + v_{ds\ ff} \quad (8)$$

$$v_{qs}^{e*} = v_{qs\ pi} + v_{qs\ ff} \quad (9)$$

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.[5][6]

4. 주행 패턴의 계산

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

주행 패턴을 계산하기 위하여 Fig. 3과 Fig. 4에서 제시된 토크 패턴을 바탕으로 주행 패턴을 계산하였

다. 주행 패턴을 계산하기 위하여 역행시와 타행 및 제동시를 구분하여 계산하며 역행시는 구배의 유무를 고려하여 다음의 식(10), (11), (12)를 적용하여 주행 패턴을 계산한다.

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

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

$$S = \frac{V^2}{7.2\beta} \quad (12)$$

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 표정 속도를 고려하고, 추진 장치의 전력 소모를 최소화하는 주행 패턴을 선정한다. 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 장치간 통신 주기 및 계산 처리 시간은 공주(空走)시간 1초 이내에 처리가 되어야 한다.

Table 3 Running State Pattern of Train

패턴	열차의 주행상태
1	열차가 목표 속도 V_R 에서 주행하고 있는 상태 (통상 상태)
2	열차가 공주하고 있는 상태 (단, 열차 속도 $V_A > ATC$ 제한 속도 V_{ATC})
3	열차가 감속하고 있는 상태
4	열차가 공주하고 있는 상태 (단, 열차 속도 $V_A < ATC$ 제한 속도 V_{ATC})
5	열차가 V_{ATC} 를 유지하고 있는 상태, 타행
6	열차가 V_{ATC} 에 도달하여 가속하기 전의 공주하고 있는 상태
7	열차가 V_{ATC} 를 도달하기 위하여 가속하는 상태
8	열차가 V_{ATC} 를 유지하고 있는 상태. (V_{ATC} 보다 일정치만큼 낮은 속도로 유지)
9	열차가 목표 속도를 향하여 가속하는 상태

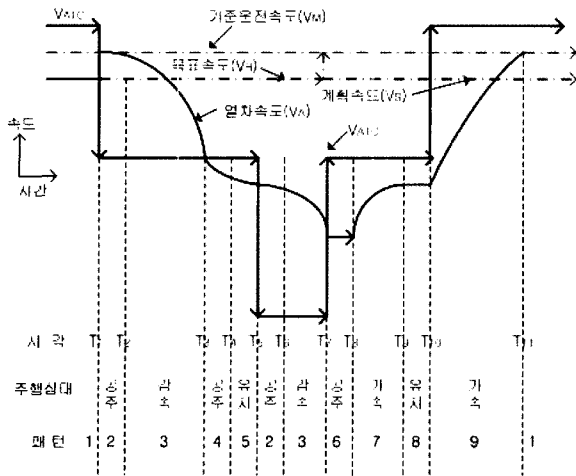


Fig. 6 Running pattern of LRV

Table 3은 차량 주행 패턴을 나타내었고, 이를 고려한 주행 패턴을 Fig. 6에 보여준다. 차량의 주행 상태는 가속, 감속, 유지 및 공주 구간으로 구분한다.[7]

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 2가지로 구분하여 수행을 하였다. 추진제어장치에서 정상적인 추진 토크를 계산하고, 정상적인 제어를 MATLAB을 통하여 시뮬레이션을 하였으며, Fig. 7은 추진 제어 시스템의 모델링을 나타내었다.

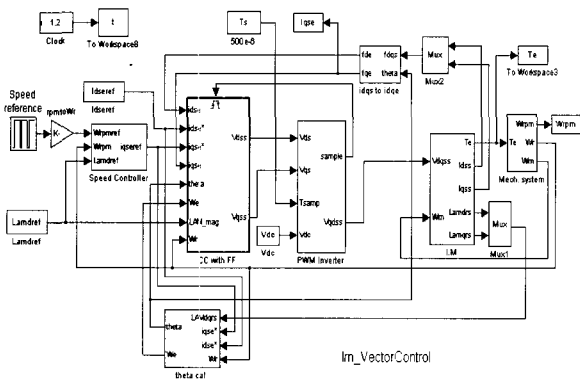


Fig. 7 The modelling of propulsion system

Fig. 8과 Fig. 9는 자속분 전류와 토크분 전류의 지령치 및 값들을 보여준다.

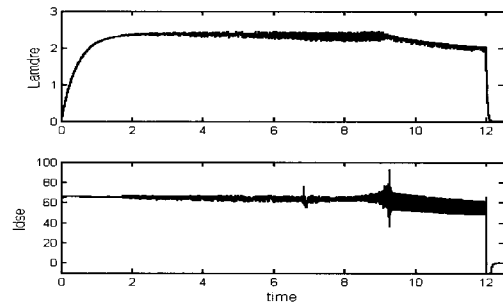


Fig. 8 Flux and axis current

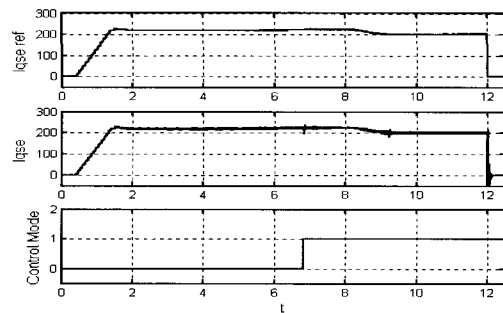


Fig. 9 Command of Torque current, Torque current, control mode

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.

Fig. 10은 견인 전동기의 발생 토크와 지령치를 보여주며, 토크의 지령치에 따라 발생 토크가 전 영역에서 잘 추종함을 알 수 있다.

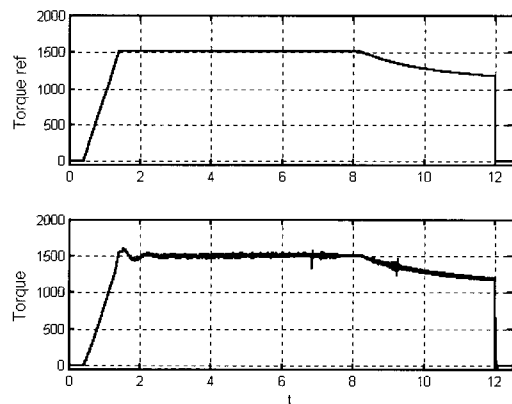


Fig. 10 Command of Torque, Torque

위의 그림에서, 자속의 감소가 일어나는 부분이 1 펄스 모드로 들어가는 시점이며, 큰 충격 없이 부드럽게 모드 변환되는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션에서는 0.4초 후에 Notch On 하였으며, 12초에서 Notch Off해서 타행 모드로 변환하였다. Notch On 후에는 토크 패턴의 갑작스런 변화를 줄이기 위해 2초 정도 Jerk제어하여 기울기를 갖고 상승하도록 만들었다.

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. 시뮬레이션의 결과를 Fig. 11, Fig. 12에 표시하였다. Fig. 11은 상행 노선으로 주행한 상태를 나타내며, Fig. 12는 하행 노선으로 주행한 상태를 표시한다. 각 주행 상태에 따라서 그 결과를 나타내었다.

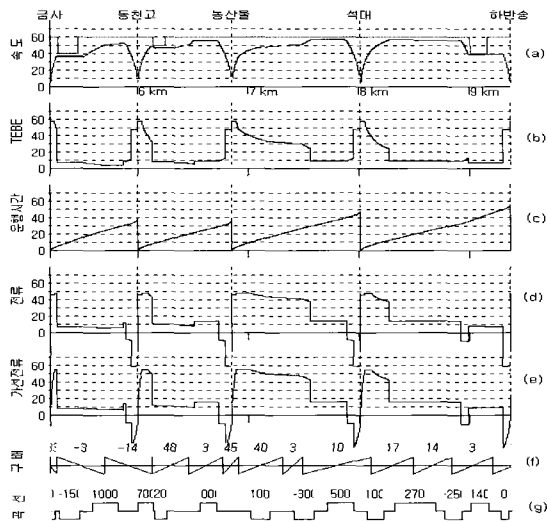


Fig. 11 The result of Route simulation - Upper

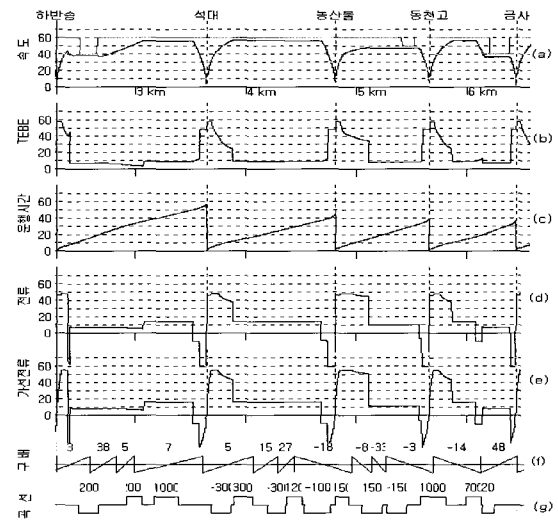


Fig. 12 The result of Route simulation - Down
(a) 속도 (b) 추진 토크 (c) 운영시간
(d) 견인전동기 전류 (e) 가속 전류
(f) 구배 (g) 곡선

시뮬레이션의 조건을 변화하여 차량의 주행에 따른 표정 속도의 변화 및 소비 전력의 변화를 통하여 최적의 주행 패턴을 선정할 수 있고, 추진 인버터의 용량을 살펴볼 수 있으며, 최고 속도의 도달 시간 및 모터의 용량을 검토해 볼 수 있다.

실제로 차량을 운영하는 입장에서는 차량의 가속도의 변화 및 표정 속도가 높은 것을 선호하게 되지만, 차량의 크기가 일정하고 장치의 취부에 제한을 받는 제작 업체의 입장에서는 소모 전력량이 적으며, 최소의 냉각 용량을 갖는, 설계 자유도가 높은 것을 선호하게 된다.

따라서, 최적의 주행 패턴은 두 가지의 상관관계를 비교하여 설정하게 되는데, 본 논문에서는 승차감과 인버터의 용량을 고려하여 가속도의 범위를 3.0~3.96 km/h/s의 범위로 변화시키고, 표정 속도의 변화 범위를 시뮬레이션하였다. 이것에 따른 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

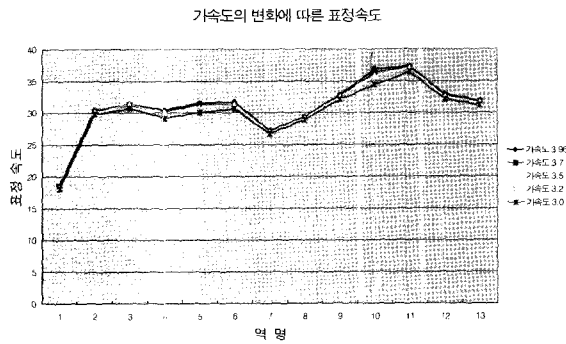


Fig. 13 Commercial Speed - Acceleration

그 결과 선로 데이터의 곡선과 많은 구배에 의해 표정 속도에 가속도의 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

따라서, 구배 기동 및 구원 운전을 고려하여 고무 차륜의 경우 기동 가속도는 3.5km/h/s가 최적인 것을 알 수 있다.

6. 시험 결과

Fig. 14는 제작된 경량 전철의 외형을 보여준다. 차량의 하부에 추진 제어 장치를 구성하였고, 실내에는 TCMS와 차상 ATC 장치를 설치하였다.

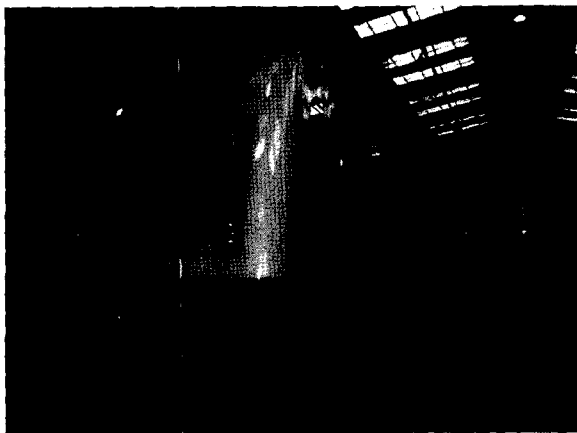


Fig. 14 The photo of Light Rail Transit

전원 입력은 측면에 있는 3궤조로 고압(DC 750V)을 수전한다.

고무 차륜의 주행을 무리 없이 하기 위하여 하부에 주행 roller를 설치하여 차량의 주행 시험을 수행

하도록 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.

Fig. 15는 750[V]의 가선 전압을 인가한 상태에서 1개의 역간의 운행인 역행 시험과 회생 시험을 한 것이다. 이 시험에서는 실효치 전류 제어를 하였으며, 1펄스 영역까지 무리 없이 진행되는 것을 확인할 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.

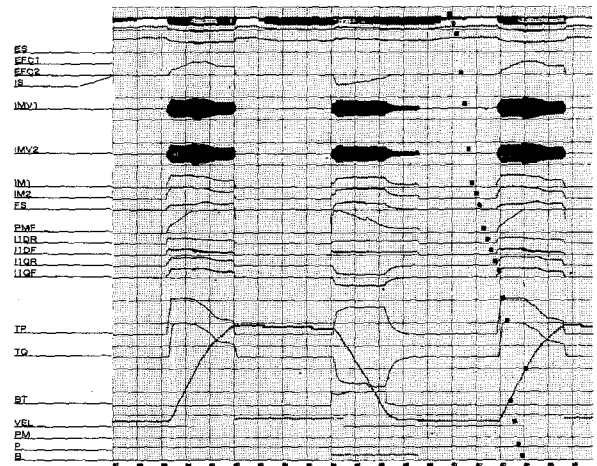


Fig. 15 The data of Route - A section

7. 결론

경량 전철의 추진력과 제동력의 제어 및 차량의 서비스 제어 기능을 갖는 TCMS를 제안하였다. 차량의 자동화 운전을 가능하게 하기 위하여 지상 장치인 ATC 장치와 연계된 속도 제한 값을 기준으로, 선로 데이터를 고려하여, 차량을 자동 제어가 가능한 차량의 구성 및 차량의 추진 제어 방식으로 VVVF 제어 알고리즘을 제시하였다.

또한, 토크와 자속의 일정 제어를 위한 벡터 제어 방식에 대하여 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 수행하였고, 경량전철의 실제 노선 데이터를 바탕으로 주행 시뮬레이션을 통하여 차량의 기본 성능 및 최적의 주행 패턴을 제시하였다. TCMS를 개발하여 고무 차륜 경량전철에서 모의 시험을 실시하여 차량의 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転 システム", 第13回鐵道の於けるサイベネティクス利用國內シンポジウム No.410, 1976
- [4] 이은규, 김상용, 한석운 "주행 조건을 고려한 고무차륜 경량전철의 기본설계" 2001.철도학회
- [5] 김상훈, 배분호, 설승기, "벡터제어를 적용한 전동차 구동 시스템 개발", 전력전자학회 논문지 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卷 第7号 1993