

추진 장치의 전기적 성능 시험을 위한 열차 운행 모의 성능 분석 연구

金映贊*, 徐永巨*, 李炳松**, 洪淳瓚***, 高宗宣†

A study of Train Running Simulation for Electronic Performance Analysis of Propulsion

Young-Chan Kim, Young-Ger Seo, Byung-Song Lee, Soon-Chan Hong and Jung-Sun Ko

요 약

본 논문의 목표는 열차의 노선 운영을 모의하여 시뮬레이션 상에서 실제 열차 운행과 똑 같은 실험 결과를 얻을 수 있는 프로그램을 만들어, 이를 이용하여 구동 장치의 특성을 평가하고 에너지 절약에 대한 연구를 하는 것이다. 열차 주행 시뮬레이션은 실제 대전 지하철 노선 데이터를 이용하여 출발역에서부터 네 번째 정차역까지 구현 한다. 열차의 구동 에너지를 절약하기 위한 전동기 제어 방식과 발전기의 회생 에너지에 관한 연구를 선택한다. 열차의 추진 장치는 (Space Vector Modulation)SVM - (Direct Torque Control)DTC로 구현된 M-G Set으로 구성하여 열차가 주행 시 전동기에서 소비되는 에너지와 제동 시 발전기에서 발생하는 회생 에너지를 Simplorer 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한다. 시뮬레이션 결과를 통해 열차의 소비 에너지와 회생 에너지를 연구한다.

ABSTRACT

The aim of the paper is to analysis on train propulsion system and to study for energy saving. For this study, we make the program that simulate actual operation of the train route. The train running simulation is performed from starting station to 4th station by using the route datas of Deajeon Metro Subway. The study for control method of electrical motor and energy recovery to save energy is selected. The train propulsion system is constituted as a M-G Set, which is realized via Space Vector Modulation(SVM) - Direct Torque Control(DTC), the energy consumption during train operation and energy recovery during breaking is simulated by Simplorer program. From this result, the energy consumption and recovery of train with SVM-DTC is studied.

Key Words : Train propulsion system, M-G set, SVM, Energy consumption, Energy recovery

1. 서 론

현재 국가물류 수송의 경쟁력 향상과 증가되는 교통 수요에 부응하기 위해 정부 고속철도의 건설 등 철도의 고속화와 수송량 증대에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있지만, 점점 상승하는 유가 에너지의 비용에 대한 문제가 발생하고 있다. 이에 전기철도의 역할이 증대되어 가고 있지만, 철도차량 및 철도기반 시설에서 전기장치의 고성능화와 안전성이 확보 되어야한다. 이를 위한 주요 연구로 철도전력 품질보상 장치, 집전

†교신저자 : 정회원, 단국대 전기전자컴퓨터공학부 교수

E-mail : jsko@dku.edu

*학생회원, 단국대 대학원 전기공학과 석사과정

**정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

***정회원, 단국대 전기공학전공 교수

접수일자 : 2007. 9. 6 1차 심사 : 2007. 10. 1

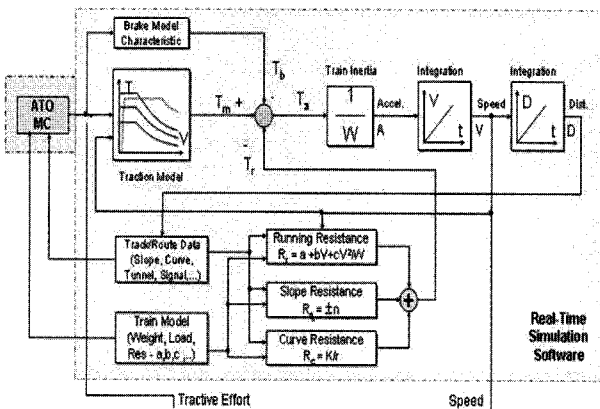
2차 심사 : 2007. 10. 19 심사완료 : 2007. 10. 31

장치 및 주행시험기, DC 급전 지락보호계전시스템, 전자기파 및 추진 장치 성능시험 설비에 대한 연구가 이루어지고 있다.

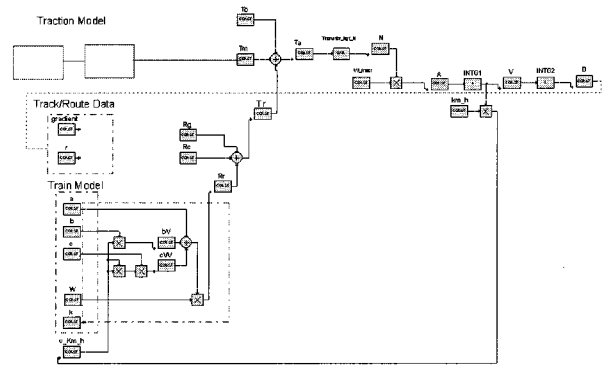
본 논문에서는 추진 장치에 대한 성능시험과 추진 장치 성능시험기의 열차운행모의에 대한 연구를 수행하였다. 열차운행모의 시험은 추진 제어 장치를 차량에 탑재하기 전, 차량의 본선운행 환경에 맞추어 가상적으로 시운전함으로써, 실제 운행 시의 성능을 미리 점검하고 확인하기 위한 시험항목입니다. 이를 통해 성능시험시의 사고방지와 안전성 확보, 추진 장치 성능시험의 안전성 및 신뢰성을 확보해 유지비용 절감에 기여할 수 있을 것이다^[1]. 추진 장치에 들어가는 유도전동기는 PMSM과 비교하여 제작이 용이하고 안정성이 높은 장점이 있으나 특히, 회전자속의 관측이 어려워 정밀 위치제어가 복잡한 단점이 있다. 정확한 전류 제어의 수행과 함께 파라미터 변동 시에 요구되는 제어기의 강인성은 필수 특성이 되었다. 열차가 실제 노선을 운행하는 것을 모의함에 있어서 구동 장치 부분과 부하에 대한 영향을 연구하였다. 여기서 사용되는 유도전동기는 매우 복잡한 식으로 구성되고, 벡터 제어를 이용한 인버터 또한 복잡하다. 따라서 간단한 회로도도 구성하여 개발자가 수시로 모의할 수 있는 프로그램이 필요하다. 이러한 연구에 있어서 열차의 중심부를 모의할 수 있는 시뮬레이션을 Simplorer 프로그램을 사용하여 완성하였다.

이 프로그램은 도시 철도차량, 고속철도차량의 실제 노선을 모사한 주행 시뮬레이션에 적용하여 소비 및 회생 에너지에 대한 연구를 하였다.

2. 열차 주행



(a) 실제 열차 주행 시스템 블록도
(a) Block diagram for Actual Train Running System



(b) Simplorer 열차 주행 블록도
(b) Block diagram for Simplorer Train Running

그림 1 열차 주행 시스템 블록도
Fig. 1 Block diagram for Simplorer Train Running System

열차의 주행은 출발 후 가속하여 제한속도 까지 속도를 증가시킨 후, 타행, 제동, 정지의 순으로 주행된다^{[2][3]}. 그림 1의 (a)는 실제 열차 주행 시스템을 블록도로 나타낸 것으로 열차 주행에 관련된 식들을 바탕으로 구성하였고, 그림 1의 (b)는 Simplorer 프로그램에서 이와 똑같은 형태로 구성하여 사용자가 프로그램의 이해 및 수정이 편하도록 하였다.

열차 주행 시스템은 견인력 (T_m), 열차 저항 (T_r), 공기저항 (T_b), 열차관성 (T_a)으로 크게 네 부분으로 나눌 수 있으며 각각의 관계를 다음 식들에 나타내었다^{[4][5]}.

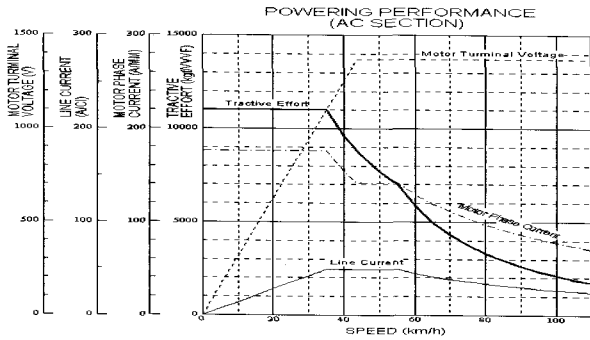
$$T_m - T_r - T_b = T_a \text{ (kgf)} \quad (1)$$

$$\text{Accel} = (T_a \times 9.8) / W \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (2)$$

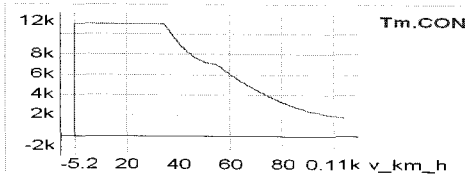
$$\text{Velocity} = \int_t \text{Accel} dt \text{ (m/s)} \quad (3)$$

여기서 W 는 열차의 무게로 만차 시 무게인 113ton이다. 견인력 (T_m)이 주어지면 식 (1)과 같이 공기 저항과 열차저항에 의해 기차 관성이 정해지고 이를 통해 식 (2)와 같이 가속도가 주어지면 식 (3)에 의해 열차 속도가 정해진다.

프로그램에서 열차의 견인력은 그림 2의 (a)와 같이 실제 열차의 속도(km/h)에 따른 견인력 그래프를 모사해 식 (3)에 의해 출력되는 속도(m/s)를 (km/h) 단위 변환하여 그림 2의 (b)와 같이 견인력이 출력 되도록 하였다. 이 값은 전동기의 토크 지령치로 들어가 가속 시 소비에너지에 대한 연구를 할 수 있다.



(a) 교류 전동기의 견인력 성능 그래프
(a) Traction Performance Graph of AC Motor



(b) Simplorer 견인력 그래프
(b) Simplorer Traction Graph

그림 2 열차의 견인력 - T_m
Fig. 2 Train Traction - T_m

열차저항 (T_r)을 나타낸 그림 3을 보면 주행저항 (R_r), 구배저항 (R_g), 곡선저항 (R_c)로 세 개의 식으로 이루어져 있으며 식 (4)와 같다. 열차의 속도, 거리 값을 피드백해서 노선데이터에 의해 구배와 곡선의 크기가 정해지고 이 값들은 각각의 식에 들어가 다음의 식들을 완성한다^[4].

$$T_r = R_r + R_g + R_c \text{ (kgf)} \quad (4)$$

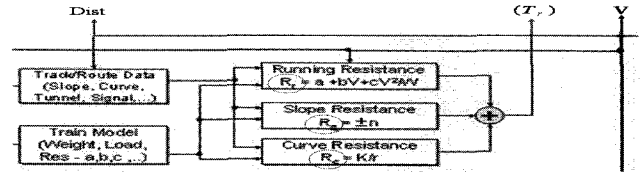
$$R_r = (1.867 + 0.0359 V + 0.000745 V^2) \times W \text{ (kgf)} \quad (5)$$

$$R_g = W \times (i \times m) \text{ (kgf)} \quad (6)$$

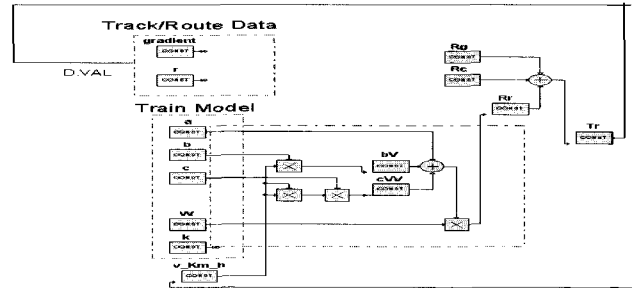
$$R_c = 600/r \text{ (kgf)} \quad (7)$$

$$\text{Distance} = \int_t \text{Velocity} dt \text{ (m)} \quad (8)$$

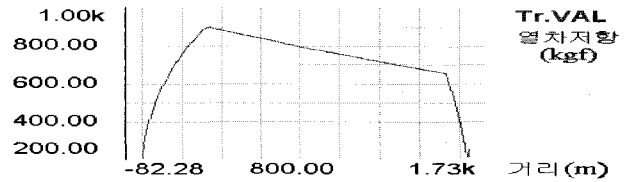
주행저항을 나타낸 식 (5)에서 1.867은 기계부분 마찰 저항, 0.0359는 차축과 궤조간 마찰저항, 0.000745는 공기저항을 나타낸 것이고, V는 열차의 속도(Km/h)이다. 식 (6)은 구배저항으로 m은 구배거리이고, i는 구배 높이다. 식 (7)은 곡선저항으로 600(m)은 궤간과 고정축 거리의 합이고, r(m)은 곡선의 반경이다. 이 값들은 노선 데이터를 이용하여 열차의 주행거리 식 (8)에 따라 변화하도록 프로그램 하였다.



(a) 열차저항 블록도
(a) Train Resistance Block diagram



(b) Simplorer 열차저항 블록도
(b) Simplorer Train Resistance Block diagram



(c) Simplorer 열차저항 출력파형
(c) Simplorer Train Resistance Output Waveform

그림 3 열차저항 - T_r
Fig. 3 Train Resistance

$$\text{Brake} = 28.34 \times (113 + 40 \times 0.14 + 33 \times 0.06) \times 3.5 \quad (9)$$

$$= 11960 \text{ kgf}$$

열차의 회생제동(역토크)을 나타낸 식 (9)에 의해 계산된 값은 11960kgf 이다. 이 값은 공기제동 (T_b)과 차량제동 ($T_m - \text{brake}$)이 합해진 값으로, 위에서 설명한 견인력과 마찬가지로 열차의 속도에 맞는 역토크를 발생시켜 열차의 제동 작용을 한다. 이 값은 열차가 제동을 거는 순간부터 정차구간에 근접하여 속도가 5km/h이하일 때까지만 역토크를 발생 시킨다. 그 이후로는 공기제동으로만 열차를 정지 시킨다. 그림 4는 열차의 전기제동 성능 그래프로 Simplorer에서 속도에 맞는 값이 출력되도록 프로그램화 하였다. 전기제동 성능 그래프 수치는 본 연구 대상인 열차의 전기제동력 값하고는 차이가 있지만 속도에 따른 견인력의 변화는 같다.

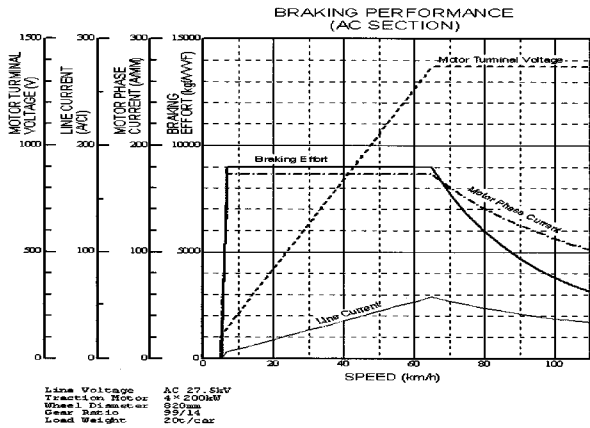


그림 4 전기제동 성능 그래프
Fig. 4 Braking Performance Graph

공기제동 (T_b)은 위에서 설명한 거와 같이 열차가 제동을 시작하는 시점부터 정차하는 순간까지 발생하여 열차가 정확한 정차구간에서 정지하도록 한다. 이 값은 1262kgf로 M카(추진 장치가 있는 차량)의 요구 제동력계산식 식(10)에서 나온 값을 총 제동력 값에서 빼주면 된다. 식 (11)은 공기제동을 구하는 일반적인 형태의 식이다^{[2][4]}.

$$60 \times 1000 \times 0.1783 = 10698 \text{ kgf} \quad (10)$$

$$11960 - 10698 = 1262 \text{ kgf} \quad (11)$$

제동 시 전동기에는 역토크가 인가되어 역 회전을 하게 된다. 이 때 맞물려 있는 발전기는 정 회전을 하게 되어 발전기로서 구동 한다. 이를 통해 본 연구의 궁극적인 목표인 소비에너지와 회생에너지에 대한 연구를 할 수 있다.

3. 열차 추진 장치 제어를 위한 M-G set SVM 알고리즘

교류 전동기를 구동하는 경우 전 운전 영역에서 최대의 토크를 얻을 수 있으려면 주어진 일정한 직류단 전압에서 최대한 많은 교류 전압을 얻어야 하기 때문에, 전동기의 인버터에 주어진 직류단 전압, V_{dc} 로부터 어느 정도까지 선형적으로 출력 상전압을 합성할 수 있는가 하는 것은 전압 변조 방식의 성능을 가늠하는 중요한 척도라고 할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 공간 벡터 전압 변조(SVM)에 의한 전압 변조 방식이 주어진 직류단 전압에서 가장 큰 교류 전압을 얻을 수 있고, 출력 상전류의 고조파 함유율에서 다른

어떠한 종류의 변조 방식보다도 우수하다고 알려져 있다. 부하의 상전압(V_{as} , V_{bs} , V_{cs})과 존재 함수와의 관계를 살펴보면, 존재 함수에 따라 8개의 전압이 출력 가능하고 이를 a, b, c상의 3상 좌표계(고정자 기준 d-q 좌표계)에서 그림 5와 같이 표시할 수 있다. 유효 전압 벡터 $V_1 \sim V_6$ 는 위상적으로 60° 차이를 지니며 그 크기는 $2V_{dc}/3$ 로 고정되어 있다. 영 전압 벡터 V_0 , V_7 은 부하에 실제 전압이 출력되지 않는다^[6].

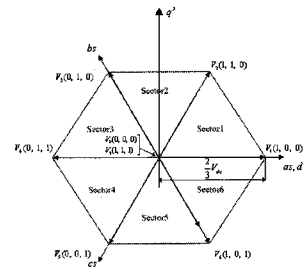


그림 5 존재 함수에 따른 공간 상태 전압
Fig. 5 Space voltage vector by Existence Function

공간 벡터 전압변조 방식의 기본 원리는 한 주기 내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터들을 이용하여 합성해 내는 것이다. 즉, 지령 출력 전압 벡터, V^* 가 주어진 경우 일정 제어 주기 T_s 동안 지령 전압 벡터에 가장 가까운 두 유효 전압 벡터(V_n , V_{n+1})와 영 벡터(V_0 , V_7)를 이용하여 평균적으로 전압 지령 벡터와 동일한 전압을 발생시켜야 한다. T_1 , T_2 , T_0 를 각각 V_n , V_{n+1} 영 벡터의 인가 시간이라 할 때 다음 식이 성립하고,

$$\int_0^{T_s} V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_{0,7} dt \quad (12)$$

스위칭 주기, T_s , 동안 V^* 와 V_{dc} 가 일정하다면 식(12)는 아래와 같이 표현된다.

$$V^* T_s = V_n T_1 + V_{n+1} T_2 \quad (13)$$

밑에 나온 그림 6과 같이 구역(Sector) 1에서 전압 지령치가 주어진 경우에는 식(13)을 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

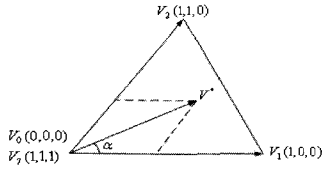


그림 6 지령 전압 벡터
Fig. 6 Reference Voltage Vector

$$T_s |V^*| \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 α 의 크기는 $0 \leq \alpha \leq \pi/3$ 이다. 따라서 지령 전압 벡터가 구역 1에 위치한 경우 최종적으로 계산된 유효 벡터 및 영 벡터의 인가 시간은 일반식 (15), (16), (17)을 이용하여 나타낼 수 있다^{[3][4][7]}.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[\sin\left(\frac{\pi}{3} m\right) V_{ds}^* - \cos\left(\frac{\pi}{3} m\right) V_{qs}^* \right] \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{\pi}{3} (m-1)\right) V_{ds}^* \\ + \cos\left(\frac{\pi}{3} (m-1)\right) V_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (17)$$

여기서, $m = \text{sector number}(1, 2, \dots, 6)$ 이다.

공간 벡터 전압 변조 방식에서는 0과 1 사이의 k 값에 따라 다양한 전압 변조 방식을 구현할 수 있다. 만약 k 가 $0 < k < 1$ 의 범위의 값이면, 한 주기 내에서 모든 스위치가 상태를 절환하게 되는데 이를 연속 전압 변조 방식 또는 3상 전압 변조 방식이라 부른다. 만약 k 가 0 또는 1이면 3상(6개의 스위치)중 두 상(3개의 스위치)만이 상태를 절환하게 되므로 이를 불연속 전압 변조 방식 또는 2상 전압 변조 방식이라 부른다. 공간 벡터 전압 변조 방식의 경우에 대해서는, 다양한 연속 또는 불연속 전압 변조 방식이 가능하다^{[7][8][9][10]}.

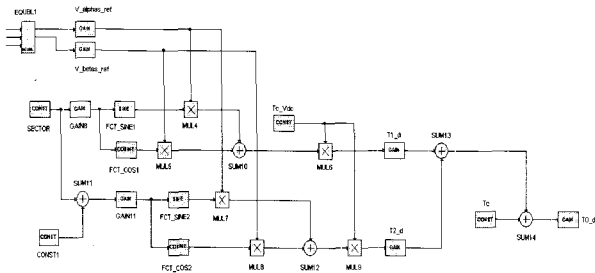
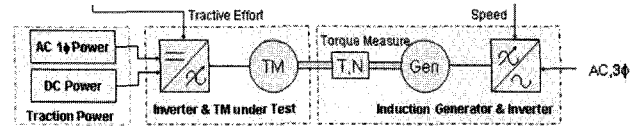


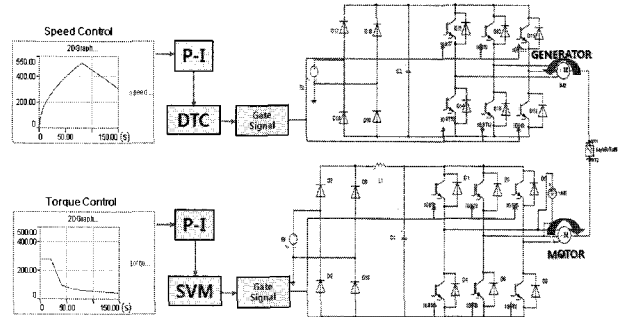
그림 7 Simplorer SVM 블록도
Fig. 7 Simplorer SVM Block diagram

위에 나타낸 그림 7은 Simplorer 프로그램에서 SVM에 관한 식들을 수정 및 구현하기 편하도록 블록도로 나타내었다. 좌측 위 상단의 입력으로 들어오는 값들은 V_{ds}^* , V_{qs}^* , θ_e 로서 이 값을 통해 전체적인 SVM을 구현하였다.

열차 추진 장치의 일반적인 형태를 블록도로 나타낸 그림 8의 (a) 그림을 바탕으로 이와 유사한 형태를 그림 8의 (b)와 같이 Simplorer에서 사용자가 시스템을 쉽게 이해할 수 있도록 만들었다^[11]. 전동기의 전원 장치는 AC와 DC를 선택해서 사용할 수 있는 시스템이지만 본 연구에서는 AC만 사용하여 구현하였다.



(a) 추진 장치 블록도
(a) Propulsion System Block diagram



(b) Simplorer 추진 장치 블록도
(b) Simplorer Propulsion System Block diagram

그림 8 열차 추진 장치 블록도
Fig. 8 Train Propulsion System Block diagram

4. 시뮬레이션

표 1 전동기와 발전기 파라미터
Table 1 Motor and Generator parameter

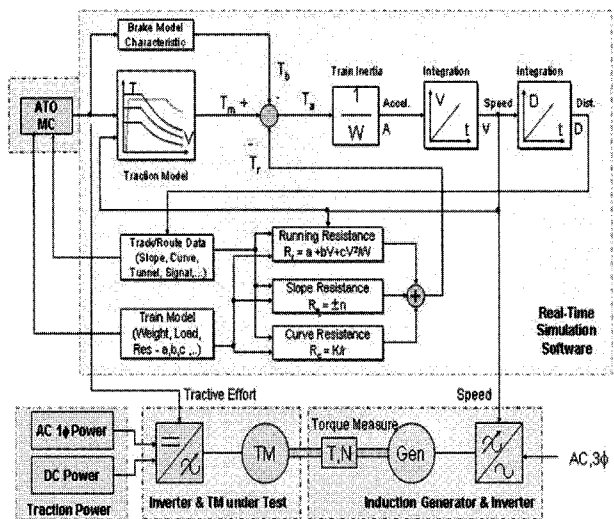
	MOTOR	GENERATOR		MOTOR	GENERATOR
전압	11000[V]	11000[V]	고정자 인덕턴스	0.0482[H]	0.00454[H]
토크	99.082[Nm]	3524[Nm]	회전자 인덕턴스	0.0483[H]	0.00457[H]
회전자 저항	0.13448[Ω]	0.00509[Ω]	상호 인덕턴스	0.047[H]	0.00439[H]
고정자 저항	0.0777[Ω]	0.00388[Ω]	관성모멘트	42.62[kg·m ²]	42.62[kg·m ²]

시뮬레이션에 사용된 유도기기의 파라미터를 표 1에 나타내었다. 그림 9처럼 열차 주행을 모사한 프로그램과 추진장치를 모사한 프로그램을 합쳐 전체적인 열차 구동 시스템을 완성하였다. 실제 견인 열차의 M-G set은 총 4대가 들어가지만 프로그램이 복잡해지고 계산량이 많아져 컴퓨터가 프로그램을 실행시키지 못한다. 하지만 전체 시스템이 선형적이므로 하나의 M-G set으로 실험을 하였다. 본 연구의 목적인 회생에너지 연구를 위해 주행 시 발생하는 열차의 견인력을 단위 변환하여 전동기에 토크 지령치로 입력시키고 속도 또한 rpm으로 단위 변환하여 발전기에 지령치로 인가시켰다.

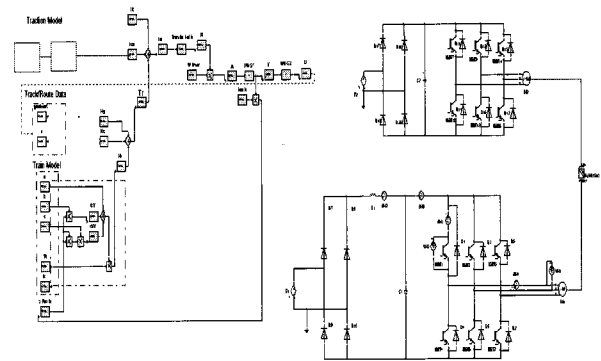
$$Nm = kgf \cdot \{ (9.8 \times 2) / 0.82 \} \quad (18)$$

$$rpm = Velocity \times \frac{7.07}{\pi \times 0.82} \times 60 \quad (19)$$

열차의 견인력을 토크단위로 변환하는 식을 식 (18)에 나타내었고 식 (19)는 열차의 속도 km/h m/s로 바꾼 후 rpm으로 변환시키는 식이다. 식 (18), (19)에서 0.82는 차륜지름으로 단위는 m이고 7.07은 기어비이다. 이 값이 추진 장치의 지령치로 들어가기 전 각각 4로 나누어준다. 열차 주행에 관한 시뮬레이션에서 구현한 구간은 4 번째 역까지 구현하였지만, 추진 장치 프로그램에 적용했을 시 프로그램의 양이 너무 커서 컴퓨터가 다운되는 현상이 발생하여 첫 구간을 출발해서 다음 역에 도착한 후 다시 출발 하는 구간까지만 프로그램을 실행 하였다.



(a) 열차 구동 시스템 블록도
(a) Train Operation System Block diagram



(b) Simplorer 열차 구동 시스템 블록도
(b) Simplorer Train Operation System Block diagram

그림 9 열차 구동 시스템
Fig. 9 Train Operation System

SVM의 섹터판별을 위한 스위칭 테이블도를 나타낸 그림 10의 구성 원리는 $V_{\beta s}^*$ 가 0보다 크다, 작다 의 두 가지 경우로 구역 1~3과 4~6으로 나누고 각 구역에서도 $V_{\beta s}^*/V_{\alpha s}^*$ 의 크기에 따라 각 구역이 정해진다.

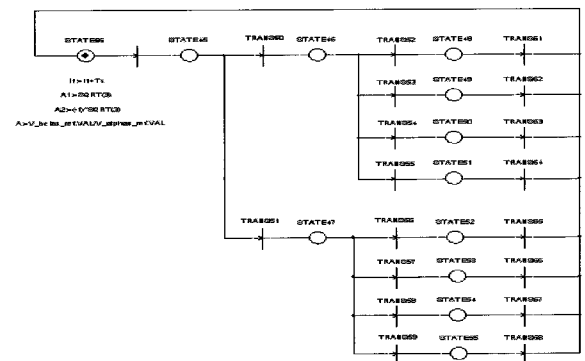
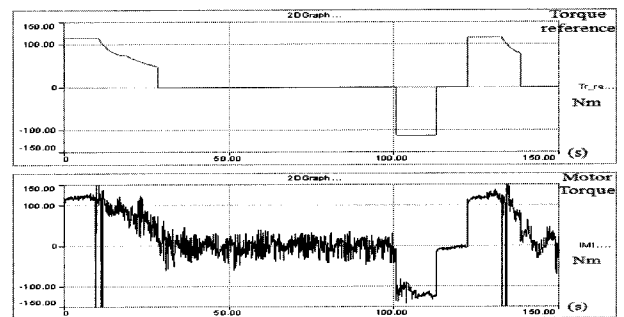
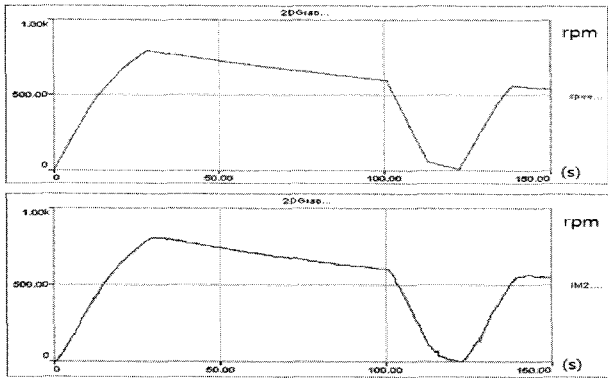


그림 10 구역 판별 스위칭 테이블
Fig. 10 Simplorer Total Induction Motor Control Block diagram



(a) 토크 레퍼런스와 결과 파형
(a) Torque Reference and Result Waveform



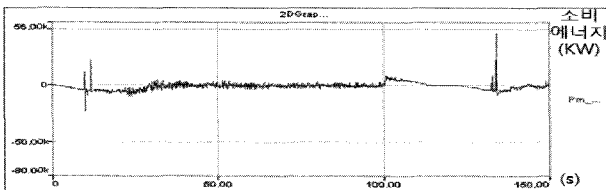
(b) 속도 레퍼런스 결과 파형
(b) Speed Reference and Result Waveform

그림 11 Simplorer 시뮬레이션 결과 파형
Fig. 11 Simplorer Simulation Result Waveform

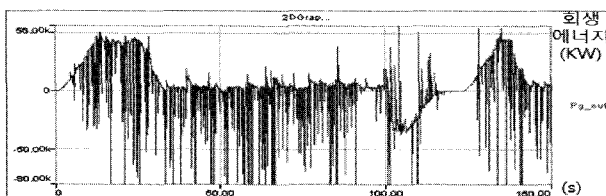
토크와 속도 지령치에 따른 전동기와 발전기의 출력 파형과 비교해 놓은 그림 11을 보면 각각 지령치를 잘 따라가고 있다. 식 (20)과 식 (21)은 전동기와 발전기에서 발생하는 전력을 구하는 공식으로 토크와 회전 각 속도로 구하였다. 이 식에 의해 나온 값들이 소비 에너지와 회생 에너지이다.

$$P_{m-out} = IM1 \cdot MI \times IM1 \cdot rad/s \quad (20)$$

$$P_{g-out} = IM2 \cdot MI \times IM2 \cdot rad/s \quad (21)$$



(a) 소비 에너지 결과 파형
(a) Consumption Energy Waveform



(b) 회생 에너지 결과 파형
(b) Recovery Energy Waveform

그림 12 Simplorer 에너지 결과 파형
Fig. 12 Simplorer Simulation Result Waveform

소비에너지와 회생에너지의 시뮬레이션 결과를 나타

낸 그림 12는 열차가 첫 구간을 주행하여 정차역에 도착한 뒤 다시 출발하는 시점까지의 전동기에서 소비되는 소비에너지와 발전기에서 회생되는 회생에너지의 결과 파형이다. 그림 12의 (a)를 보면 열차 주행 시 에너지 소비가 일어나고 그림 12의 (b)를 보면 제동 시 에너지 회생이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

열차 운행에 관한 연구에 있어서 실제 노선에서 열차를 운행시키지 않고, 열차 운행에 관한 모든 데이터를 바탕으로 실제와 유사하게 실험할 수 있는 프로그램을 완성한다. 이 프로그램을 이용하여 대전 지하철 노선에 관한 데이터를 바탕으로 열차가 첫 구간을 주행했을 시 전동기에서 소비되는 에너지와 발전기에서 회생되는 에너지를 연구할 수 있다. 이러한 데이터는 실제 실험 장치의 토크 지령치와 속도 지령치를 시간에 따라 입력하여 장비의 효율 및 손실 측정시험, 온도 상승 시험, 견인 및 제동 특성 시험, 효율 측정 시험에 적용할 수 있다. 본 시험이 완료 되면 현재 쓰이고 있는 차량의 소비되는 에너지와 비교하여 에너지 소비가 적은 추진 장치를 선택할 수 있어 에너지 절약에 많이 도움이 될 것이고, 추진 장치의 구성과 제어 방식에 따른 여러 가지 시험을 할 수 있어 한국의 철도차량 연구에 큰 기여를 하게 된다.

이 논문은 2006년도 한국철도 기술 연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 한국철도기술연구원, "틸팅 시스템 실용기술 개발" 한국철도기술연구원, 2004. 7.
- [2] 한세희 외, "추진 장치 성능시험설비 실시설계 기술자문 완료 보고서, 설비 기술 검토서", 한국 철도 기술 연구원 pp.14-15, 시험설비 시뮬레이션, 2000. 10.
- [3] 백문홍, "전동차형 VVVF 추진 장치 개발", 한국생산기술연구원, 1~2장 추진 제어장치, 2000. 12.
- [4] Fei Lu, Mumin Song, Guohui Tian, Xiaolei Li, "The Application of Robot Formation Approach in the Control of Subway Train", IEEE International Conf. 06, pp.5937-5941. 2006.
- [5] Lee-Gunther, J., Bolduc, M., Butler, S., "Vista rail

network simulation" IEEE Railroad Conf. pp.93-98, 1995.

[6] D.Rathnakumar, J.KakshmanaPerumal and T.Srinivasan "A New Software Implementation of Space Vector PWM" IEEE SoutheastCon 2005, pp131-136, 2005, April.

[7] 홍순찬, 윤덕용, 차민, 유영석, "2.2kw급 유도전동기-인버터 시스템의 과도특성 해석 및 제어알고리즘 연구", 단국대학교, 1997.

[8] 정문구, 백병산, 김태완, 류승표, 김남해, "SVPWM을 이용한 전기철도용 회생인버터 개발", 전력전자학술 논문집. pp15-18, 2003.

[9] 이재도, 황재호, 이학주, 김영록, 이기홍, 정세진, "Simulink를 이용한 공간전압벡터 PWM 인버터 모델링 및 시뮬레이션", 전력전자 학술대회 논문집. pp413-416, 2000.

[10] Ma Hao, Lang Yunping, and Chen Huiming "A Simplified Algorithm for Space Vector Modulation of Three-phase Voltage Source PWM Rectifier" IEEE PESC '04, vol. 5, pp3665-3670, 2004, June.

[11] 정삼용, 이진섭, 서지연, 김동휘, 최연옥, 조금배, "비선형 관측기에 의한 유도전동기 간접 벡터제어", 전력전자학술대회 논문집. pp336-370, 1998.



홍순찬(洪淳瓚)

1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1975~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학실 전임강사. 1978년~현재 단국대 전기공학 전공 교수. 1986년~1987년 미국 텍사스 A&M 대학교 방문교수. 1997년~2000년 대한전기학회 이사. 2002년 당 학회 회장. 2002년~2005년 단국대 공과대학 학장.



고종선(高宗宣)

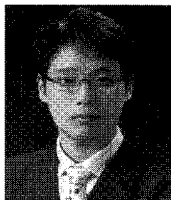
1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내교수(부장). 1999년 2월~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대 (UT) Post-Doc. 1996년~2003년 7월 원광대 전기전자 및 정보공학부 조교수. 2003년 8월~현재 단국대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사. 전기학회 편집위원. 전자 공학회 전력전자 연구위원장.

저 자 소 개



김영찬(金暎贊)

1980년 6월 24일생. 2006년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2006년~현재 단국대 대학원 전기공학과 석사과정.



서영거(徐永巨)

1982년 6월 20일생. 2007년 단국대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



이병송(李炳松)

1988년 서울산업대 졸업. 1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박) 1997년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.