

열차 추진 장치 모사를 위한 시뮬레이터 개발

고성환, 채수용, 홍순찬, 고종선, 배창한, 이병송, 박현준
 단국대학교 전기공학과, 철도기술연구원

A Study on the Simulator for Performance to Train Drive System

SungHwan-Ko, SooYong-Chae, ChangHan-Bae, ByungSong-Lee, Soon-Chan Hong,
 JungSun-Ko
 Dankook Univ.

ABSTRACT

본 연구에서는 열차 추진 장치 시스템에 엔진의 중심부를 모의할 수 있는 Simplorer의 프로그램을 개발하여 M-G Set으로 모사한다. 열차의 엔진부와 발전기 구동에서의 제어는 DTC(Direct Torque Control) 제어로 모사 하였다. M-G Set을 구성은 견인력 토크지령을 받아 엔진부에서 DTC제어를 하였고, 발전기 구동 부는 속도지령을 받는 DTC제어로 하여 추진 장치 성능시험설비 열차운행모의에 의한 전력 조류 해석, 소비 및 회생전력을 분석할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

최근에 유도전동기는 DSP, 마이크로프로세서의 발달과 현대 제어이론의 적용으로 산업현장에서 사용 영역이 점차 확대되어 가고 있다. 또한, 유도전동기의 벡터제어는 전류의 크기와 순시 위상각의 동시 제어를 통해 고정자 전류를 토크 성분과 자속 성분으로 분리하여 독립적인 제어를 행하는 것으로, 순시 토크 제어 특성이 얻어 질 수 있다. 유도전동기는 PMSM과 비교하여 제작이 용이하고 안정이 높은 장점이 있으나 특히, rotor flux 관측이 어려워 정밀 위치제어가 복잡한 단점이 있다. 정확한 전류제어의 수행과 함께 파라미터 변동 시에 요구되는 제어기의 강인성은 제어기의 필수 특성이 되었다. 외란에 의한 변화를 갖는 시스템에서 정밀 위치제어를 할 수 있으며 안정성과 효율성을 전체가 Simplorer의 simulink로 구성된 시뮬레이션으로 입증된다.

열차가 실제 노선을 운행하는 것을 모의함에 있어서 구동 장치의 부분과 부하에 대한 영향을 연구하였다. 여기에 사용되는 IM는 매우 복잡한 식으로 구성되고 여기에 사용되는 벡터 제어기를 이용한 인버터 또한 복잡하다. 따라서 간단한 그래픽으로 구성되어 개발자가 수시로 모의할 수 있는 프로그램이 필요하다. 따라서 이러한 연구에 있어서 엔진의 중심부를 모의할 수 있는 Simplorer의 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 전동차(도시철도차량, 고속철도차량)의 시뮬레이션에 적용된다.

2. 제어 알고리즘

DTC의 제어에는 DSC(Direct Self Control), ST (Switching Table)의 방법이 있다. 본 논문에서는 ST를 적용하였으므로

ST에 대해 설명한다. 스위칭 테이블 기법에서는 토크와 고정자 자속 크기를 제어하기 위하여 그림1과 같이 인버터 전압벡터를 적절히 선택한다. 그림 1 (a)은 인버터의 전압벡터에 따른 고정자 자속과 토크의 변화를 나타내고 있다. 여기서 가로축은 자속을 세로축은 토크를 의미한다. 그림 1 (a)에서 리사주 도형의 큰 궤적을 따라 고정자 자속과 토크를 제어하기 위해서는 각각의 위치에 따라 적절한 전압벡터를 선정해야한다. 전압벡터의 선정은 토크와 고정자 자속의 오차에 근거하여 수행된다. 편의상 고정자 자속벡터가 섹터1에 위치하고 있는 경우를 고려하자. 여기서 섹터는 그림 1 (a)과 같이 구분된다.

그림 1 (b)에서 나타난 바와 같이 전압벡터 V2는 고정자 자속과 토크를 증가, V3은 자속은 감소시키고 토크는 증가, V5는 자속과 토크를 모두 감소, V6은 자속 증가시키고 토크는 감소시킨다. 그리고 V1은 자속은 증가시키고 토크는 거의 변화시키지 않는다. 또한 V4는 자속을 감소시키며, 토크는 V1과 동일하게 작용한다. 남은 영 전압 벡터 V0, V7은 자속을 감소시키며, 전동기의 속도와 방향에 따라 토크를 증가시키거나 감소시킨다. 유사하게 다른 섹터에서도 적절히 인버터의 전압벡터를 선택함에 따라 고정자 자속과 토크를 원하는 방향으로 제어할 수 있다.

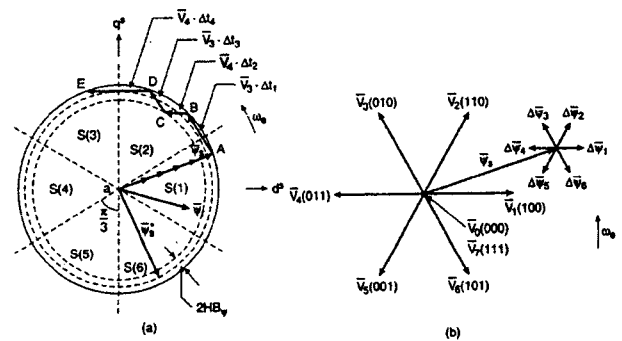


그림 1 (a) 인버터의 전압벡터 (b) 고정자 자속 섹터1
 Fig. 1 (a) Vector voltage of inverter (b) Stator flux sector1

자속 제어기는 다음과 같이 자속을 증가 시킬 것인가, 감소시킬 것인가를 결정하기 위한 2-레벨 히스테리시스 비교기로 구성되며 이 제어기의 출력이 전압벡터 선정부에 인가된다. 토크 히스테리시스 비교기는 응용분야에 따라 여러 형태가 될 수

있으며, 적용 형태에 따라 제어시스템의 동작영역, 성능, 인버터의 스위칭 주파수가 결정된다. 전동기의 회전방향에 관계없이 3-레벨 히스테리시스 비교기를 쓰는 방식을 사용하였으며, 이 경우 인버터의 스위칭 주파수가 높지만 저속에서의 제어 성능이 좋기 때문에 서보 구동 장치에 적합하다.

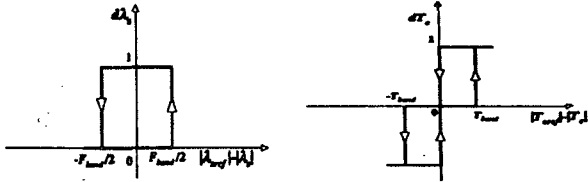


그림 2 (a) 히스테리시스 자속 비교기 (b) 히스테리시스 토크 비교기
Fig. 2 (a) Hysteresis flux comparator
(b) Hysteresis torque comparator

$$\begin{aligned} |\lambda_{sref} - \lambda_s| \geq F_{band}/2 & \quad d\lambda_s = 1 \\ |\lambda_{sref} - \lambda_s| \leq -F_{band}/2 & \quad d\lambda_s = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} |T_{eref} - T_e| \geq T_{band} & \quad dT_e = 1 \\ |T_{eref} - T_e| = 0 & \quad dT_e = 0 \\ |T_{eref} - T_e| \leq -T_{band} & \quad dT_e = -1 \end{aligned} \quad (2)$$

히스테리시스 자속비교기는 자속의 지령 치와 실제 자속 값을 비교하여, 두 값의 차인 오차가 히스테리시스 밴드 폭의 바깥보다 크면 활성화를 의미하는 1을 출력으로 내보내고 오차가 밴드 폭의 안쪽 면보다 작을 경우는 0을 출력으로 내보낸다.

표 1 고정자 자속과 토크의 변화
Fig. 1 A simple power transmission system

	v_k	v_{k+1}	v_{k+2}	v_{k+3}	v_{k+4}	v_{k+5}	$v_{0,7}$
λ_s	↑↑	↑	↓	↓↓	↓	↑	↓
T_e ($\omega_m > 0$)	↓	↑	↑	↓	↓↓	↓↓	↓
T_e ($\omega_m < 0$)	↑	↑↑	↑↑	↑	↓	↓	↑

히스테리시스 토크 비교기는 3 레벨로 동작하며 각각의 경우에 1, 0, -1을 출력으로 내보낸다. 전압벡터 선정부분은 자속과 토크제어기로부터 신호를 받아서 인버터의 전압벡터를 선정하는 곳으로 일반적인 k섹터에 대하여 전압벡터의 영향을 요약하면 표 1과 같다. 여기서 화살표의 개수는 영향의 정도를 표시한다.

표 2 인버터의 전압벡터 선택
Fig. 2 Selection voltage vector of inverter

$d\lambda_s$	dT_e	θ_s					
		섹터1	섹터2	섹터3	섹터4	섹터5	섹터6
1	1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1
	0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0
	-1	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
0	1	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2
	0	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7
	-1	v_5	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4

3. DTC의 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터를 표 3에 나타내었다. 시뮬레이션 주기는 $T_s = 1/60[s]$ 이다.

표 3 모터 파라미터
Fig. 3 Motor parameter

	MOIEB	GENERATOR		MOIEB	GENERATOR
전압	1100[V]	690[V]	고정자인덕턴스	0.0482[H]	0.00454[H]
토크	99.082[N.m]	3524[N.m]	회전자인덕턴스	0.0483[H]	0.00457[H]
고정자저항	0.13448[Ω]	0.00509[Ω]	상호인덕턴스	0.047[H]	0.00439[H]
회전자저항	0.0777[Ω]	0.00388[Ω]	관성모멘트	42.62[Kg-m ²]	42.62[Kg-m ²]

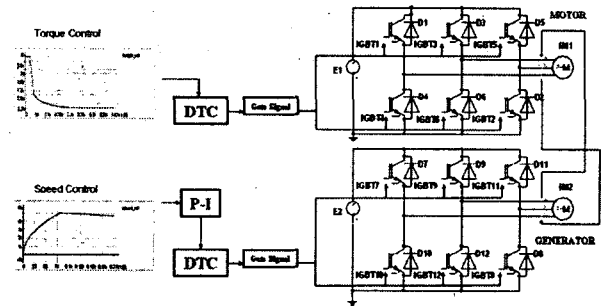


그림 3 열차 시뮬레이션의 블록선도
Fig. 3 Block diagram of train simulation

그림 3에 상단은 열차의 시간에 따른 견인력이 토크 제어로 들어가고 우측은 실제 구동된 열차의 속도가 발전기의 속도 명령으로 들어간다. 열차 동작의 특성 모사 프로그램을 완성하기 전에 열차 견인과 부하동작을 확인하려는 것이다. 전동차의 견인력을 발생시키는 모터의 토크에 대하여 실제 열차가 부하로 작용하여 나타나는 시간에 따른 속도를 발전기에 역으로 제어한다. 결과적으로 열차부하에 따른 동작을 시뮬레이션 할 수 있다. 토크명령을 P-I제어기를 통해 DTC제어로 하여 인버터를 스위칭 할 수 있도록 하였다. 발전기부 또한 같은 방법으로 구현하였다.

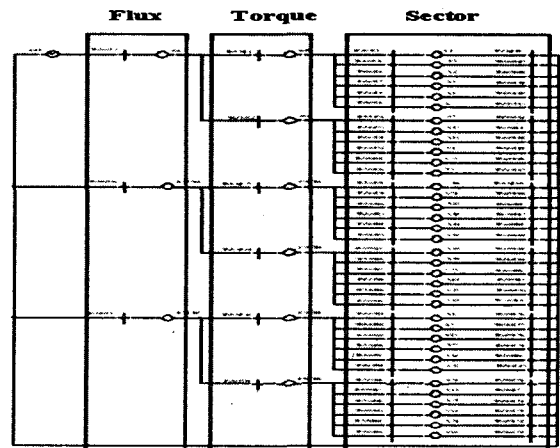


그림 4 열차 시뮬레이션의 상태제어 블록도
Fig. 4 Block diagram state control of train simulation

그림 4는 인버터의 전압벡터를 구현하고자 Simplorer를 사용하여 자속 선택 범위와, 토크 선택, 섹터 6가지로 구분하여 상태를 고려하여 시뮬레이션 하도록 프로그램을 작성하였다.

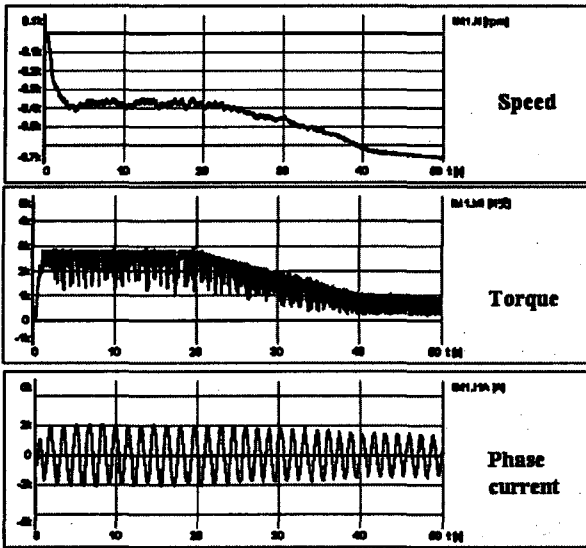


그림 5 모터 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Result of simulation motor

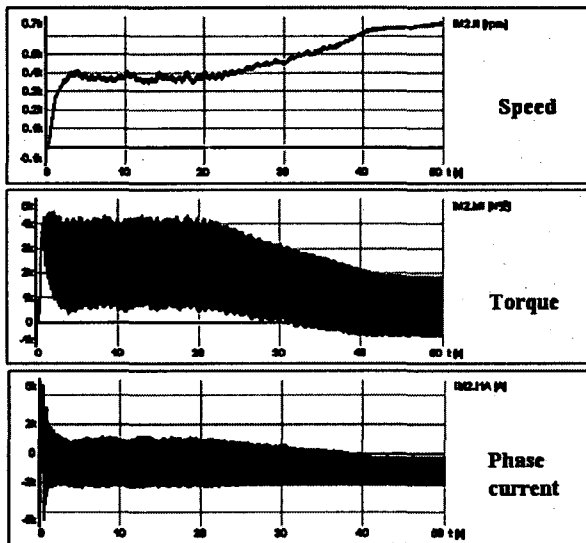


그림 6 발전기의 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Result of simulation generator

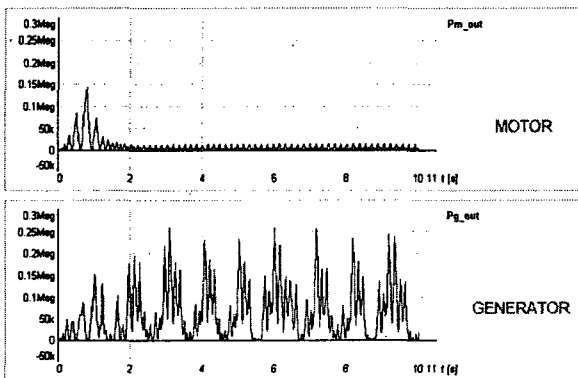


그림 7 총 소비 전력
Fig. 7 Total consume power

그림 5와 그림 6의 결과는 모터와 발전기의 스피드지령에 따른 스피드 결과를 나타내고, 토크 및 상전류를 결과를 나타낸다. 그리고 열차 모사 결과로써 견인력과 그때 소모 전류를 나타낸다. 환류 되는 에너지를 제외한 구동부와 견인부의 최종 소비전력을 그림 7과 같이 결과를 얻을 수가 있었다.

4. 결 론

인버터와 기계적 부하를 고려한 M-G set을 Simplorer로 구현 하였고 이 프로그램으로 전력의 흐르는 방향과 그 크기 등을 분석할 수 있게 되었다. 열차 모의를 위해서는 차량 제어부, 차량 중량 및 부하의 기계적 특성 식, 그리고 선로의 구배와 킬딩 등을 고려하는 식을 추가하여야 한다. 순간 전류와 전력을 기반으로 열차 운용 모사에 필요한 모든 데이터를 생성할 수 있다. 역률 또한 계산이 가능하다. 특성곡선을 데이터로써 직접 모사하여 수행하였으면 의미 있는 데이터를 얻었다.

이 논문은 2005년도 철도 기술 연구원의 전기시스템 핵심기술연구의 위탁과제인 "추진 장치 성능시험설비 성능분석연구"과제에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 이남진, 강철구, 2002.1, "동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션" 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol.8, No.1, pp.46~53.
- [2] 박찬경, 최강운 외 2명, 2001.1, "고속전철의 와전류 제동장치 동적 거동특성 연구", 한국 철도 학회춘계 학술 대회 논문집, pp.147~154.
- [3] ViJay K.Garg, 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems.
- [4] 김완두, 함동호, 1994, "고속전철의 제동장치 기술개발", 대한기계학회지, Vol.34, No.6, pp.446~453.
- [5] 킬딩 시스템 실용기술 개발, 2004.7, 한국철도기술연구원
- [6] K.H.Hunt, F.R.E.Crossley, 1975, "Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact", Transactions of the ASME, pp.440~445.
- [7] 백남옥, 이상진, 장경수, 2003, 철도기술총서.
- [8] 서사범, 2002, 철도공학의 이해.