

# SVM-DTC 방식의 열차 추진 장치 모사를 위한 시뮬레이터 개발

김영찬, 서영거, 배창한\*, 이병송\*, 홍순찬, 고종선  
 단국대학교, \*한국철도 기술연구원

## A Study on the Simulator for the Train Propulsion System of SVM-DTC

Young-Chan Kim, Young-Ger Seo, Chang-Han Bae\*, Byung-Song Lee\*, Soon-Chan Hong,  
 Jung-Sun Ko

Dankook Univ. \*Korea Railroad Research Institute

### ABSTRACT

현재 국가물류 수송의 경쟁력 향상과 증가되는 교통수요에 부응하기 위해 경부 고속철도의 건설 등 철도의 고속화와 수송량 증대에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있지만, 점점 상승하는 유가 에너지 비용에 대한 문제가 발생하고 있어 전기 철도차량의 개발이 시급하다. 본 논문은 Simplorer 프로그램을 이용하여 열차 추진 장치에 관한 연구와 추후 열차 회생 에너지에 관한 연구를 하기 위해 추진 장치를 M-G set으로 구성하였고 모터는 SVM(Space Vector PWM)방식으로, 제너레이터는 DTC(Direct Torque Control) 방식으로 제어하였다.

### 1. 서론

최근에 유도전동기는 DSP, 마이크로프로세서의 발달과 현대 제어이론의 적용으로 산업현장에서의 사용 영역이 점차 확대되어가고 있다. 또한, 유도전동기의 벡터제어는 전류의 크기와 순시 위상각의 동시 제어를 통해 고정자 전류를 토크 성분과 자속 성분으로 분리하여 독립적인 제어를 행하는 것으로, 순시 토크제어 특성이 얻어 질 수 있다. 유도전동기는 PMSM과 비교하여 제작이 용이하고 안정성이 높은 장점이 있으나, rotor flux 관측이 어려워 정밀 위치제어가 복잡한 단점이 있다. 정확한 전류제어의 수행과 함께 파라미터 변동 시에 요구되는 제어기의 강인성은 제어기의 필수 특성이 되었다.

열차가 실제 노선을 운행하는 것을 모의함에 있어서 구동 장치 부분과 부하에 대한 영향을 연구하였다. 현재 사용되는 인덕션 모터는 매우 복잡한 식으로 구성되고, 벡터 제어를 이용한 인버터 또한 복잡하다. 따라서 간단한 Schematic으로 구성되어 개발자가 수시로 모의할 수 있는 프로그램이 필요하다.

이러한 연구에 있어서 열차의 중심부를 모의할 수 있는 시뮬레이션을 Simplorer 프로그램을 사용하여 완성하였다. 이 프로그램은 전동차(도시철도차량, 고속철도차량)의 실제 노선을 모사한 주행 시뮬레이션에 적용하여 소비 및 회생 에너지에 대한 연구를 할 것이다. 본 연구실에서 DTC-DTC 방식에 대한 논문 발표를 했기 때문에 이번 논문에서는 SVM방식에 대한 부분을 중심으로 설명한다.

### 2. SVM 제어 알고리즘

교류 전동기를 구동하는 경우 전 운전 영역에서 최대의 토크를 얻을 수 있으려면 주어진 일정한 직류단 전압에서 최대한 많은 교류 전압을 얻어야 하기 때문에, 모터의 인버터에 주어진 직류단 전압,  $V_{dc}$ 로부터 어느 정도까지 선형적으로 출력 상전압을 합성할 수 있는가 하는 것은 전압 변조 방식의 성능을 가능하게 하는 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 상전압의 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 1과 같이 표시할 수 있다. 유효 전압 벡터  $V_1 \sim V_6$ 는 위상적으로  $60^\circ$  차이를 지니며 그 크기는  $2V_{dc}/3$ 로 고정되어 있다. 영 전압 벡터  $V_0$ ,  $V_7$ 은 부하에 실제 전압이 출력되지 않는다<sup>[1]</sup>.

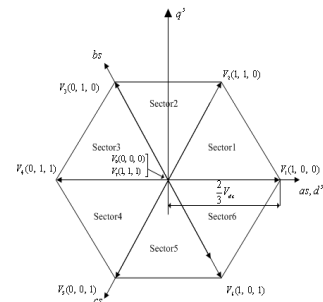


그림 1 존재 함수에 따른 공간 상태 전압  
 Fig. 1 Space voltage vector by Existence Function

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,

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

스위칭 주기,  $T_s$ , 동안  $V^*$ 와  $V_{dc}$ 가 일정하다면 식 (1)은 아래와 같이 표현된다<sup>[2]</sup>.

$$V^* T_s = V_n T_1 + V_{n+1} T_2 \quad (2)$$

그림 2와 같이 구역(Sector) 1에서 전압 지령치가 주어진 경우에는 식(2)을 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

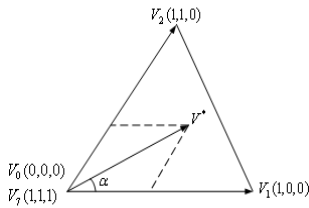


그림 2 지령 전압 벡터  
Fig. 2 Reference Voltage Vector

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

여기서  $\alpha$ 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 (4), (5), (6)를 이용하여 나타낼 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{3}m\right) V_{ds}^* - \cos\left(\frac{\pi}{3}m\right) V_{qs}^* \right] \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ -\sin\left(\frac{\pi}{3}(m-1)\right) V_{ds}^* + \cos\left(\frac{\pi}{3}(m-1)\right) V_{qs}^* \right] \quad (5)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (6)$$

여기서,  $m$ =sector number(1,2,...,6)이다.

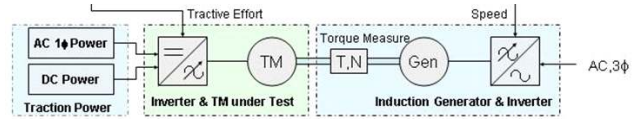
### 3. SVM - DTC 열차 추진 장치 시뮬레이션

표 1 모터와 제너레이터의 파라미터  
Table 1 Parameter of Motor and Generator

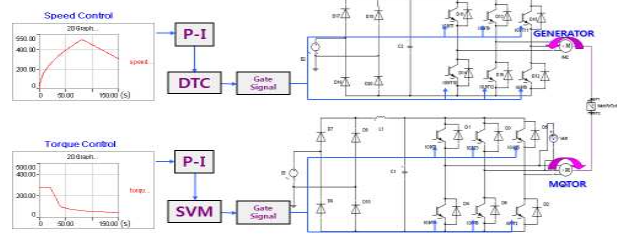
	MOTOR	GENERATOR		MOTOR	GENERATOR
전압	11000[V]	690[V]	고정자 인덕턴스	0.0482[H]	0.00454[H]
최대 토크	239.98[N.m]	10,396[N.m]	회전자 인덕턴스	0.0483[H]	0.00457[H]
회전자 저항	0.0777[Ω]	0.00388[Ω]	상호 인덕턴스	0.047[H]	0.00439[H]
고정자 저항	0.13448[Ω]	0.00509[Ω]	관성 모멘트	42.62[kg·m <sup>2</sup> ]	42.62[kg·m <sup>2</sup> ]

시뮬레이션에 사용된 인덕션 모터와 제너레이터의 파라미터

를 표 1에 나타내었다. 그림 3의 (a)는 열차 추진 장치의 구성을 나타낸 그림이다. 그림 3의 (b)는 Simpler의 시뮬레이터 상에서 구현된 열차 추진 장치를 나타낸 것이다. SMV 방식의 모터에는 열차의 견인력이 토크 레퍼런스로 입력되고, DTC 방식의 제너레이터에는 열차의 속도가 입력되는 형식으로 구성하였다.



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



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

그림 3 열차 추진 장치 블록도  
Fig. 3 Train Propulsion System Block diagram

그림 3의 (a)를 보면 모터에서는 AC와 DC 둘 다 전원으로 사용할 수 있다. 실제 실험 장치 역시 전원을 AC와 DC 실험 목적에 따라 선택 할 수 있도록 되어있다. 본 논문에서는 모터의 전원을 AC로 하여 컨버터, 인버터를 걸쳐 모터를 구동시켰으며, 제너레이터 또한 이러한 구조이다<sup>[5~7]</sup>. 토크 레퍼런스는 실제 열차의 토크 파형과 유사하게 기동 시 큰 토크를 필요로 하다가 어느 정도 열차의 속도가 증가하면 토크는 감소된다. 속도 레퍼런스도 실제 열차의 주행속도처럼 출발 시 가속되어 열차의 속도가 제한 속도에 도달하면 타행 운전으로 구동되어 속도가 차츰 감소한다. 실제 견인 열차는 총 4대의 M-G set으로 구성되어 이를 시뮬레이션하면 프로그램이 복잡해지고 계산량이 많아져 프로그램이 실행되지 않는다. 하지만 전체 시스템이 선형적이므로 하나의 M-G set으로 실험을 하였다. 실제 Simpler에서는 모터와 제너레이터는 직렬로 연결시켰지만 전체 구성을 한눈에 볼 수 있게 그림 3의 (b)처럼 구성하였다.

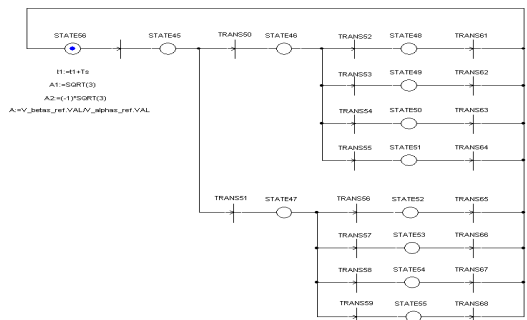


그림 4 구역 판별 스위칭 테이블  
Fig. 4 Sector Distinction Switching Table  
그림 4는 SVM의 색터판별을 위한 스위칭 테이블도이다. 구

성 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.

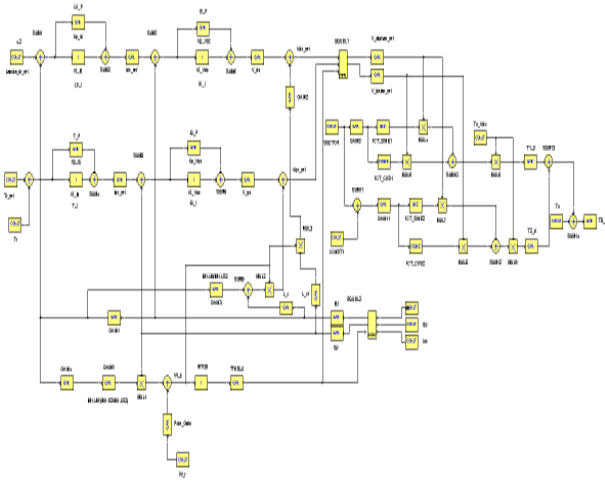
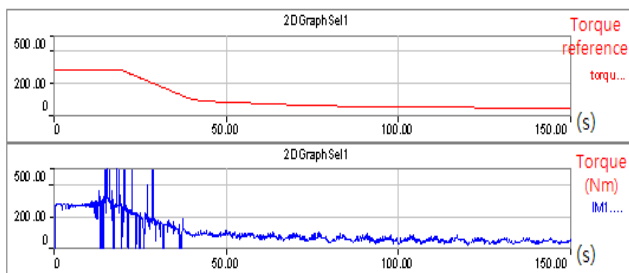
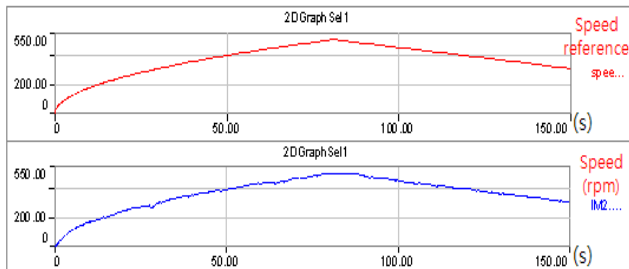


그림 5 Simplorer 전체 인덕션 모터 제어 블록도  
Fig. 5 Simplorer Total Induction Motor Control Block diagram

그림 5는 인덕션 모터의 제어를 위해 간접벡터제어와 비간섭 전류제어, SVM 제어에 관한 식들을 블록도로 만들었다. 간접벡터제어 방식은 구현이 용이하며 저속영역에서 고속영역까지 비교적 정확도가 높을 뿐만 아니라, 부가적인 장치 없이 표준적인 모터를 그대로 사용할 수 있다는 매력이 있어서 널리 쓰이고 있는 제어 방식이다. 고정자 dq축 간의 역기전력의 영향을 피하기 위해 d축과 q축 전류의 상호 간섭을 제거하는데, 이를 dq축 전압분리제어 또는 비간섭 제어라고 한다.



(a) 모터의 토크 레퍼런스와 토크파형  
(a) Torque reference and Torque Waveform of Motor



(b) 제너레이터의 속도 레퍼런스와 속도파형  
(b) Torque reference and Torque Waveform of Motor

그림 6 모터와 제너레이터의 출력파형  
Fig. 6 Output Waveform of Motor and Generator

그림 6은 Simplorer 시뮬레이션의 실험 결과파형으로 모터와 제너레이터의 출력 값이 각각에 입력되는 레퍼런스를 잘 따라 가고 있다. 토크 레퍼런스의 형태는 실제 추진 장치의 모터에서 발생하는 토크의 모양과 비슷하게 구현했으며, 속도 레퍼런스 또한 실제 열차 주행 속도의 변화와 유사하게 만들었다. 이 결과로서 본 프로그램이 열차 추진 장치 모사함에 있어서 적합하다는 것을 확인 할 수 있었다. 열차 주행을 모사한 프로그램과 합치기 위해 열차의 견인력(kgf)은 토크(Nm)로, 속도(Km/h)는 발전기의 레퍼런스로 입력하기 위해 rpm으로 변환해 주어야 한다.

#### 4. 결론

한국 철도 기술 연구원으로부터 받은 전기 철도 차량의 추진 장치인 M-G set의 모든 데이터를 바탕으로 Simplorer 시뮬레이터를 이용하여 실제 장치와 유사한 프로그램을 만들어 실험 결과파형을 확인한 결과 시뮬레이션이 추진 장치와 유사한 출력 값이 나온다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구실에서는 정확한 전기철도 차량의 추진 장치 성능시험을 위해 실제 대전지하철에 관한 노선 데이터를 바탕으로 차량 제어부, 차량 중량 및 부하의 기계적 특성식, 그리고 선로의 구배와 킬팅 등이 고려된 열차 주행 시뮬레이션을 만들어 열차 추진 장치 시뮬레이션과 합쳐 열차가 주행 시 소비되는 에너지와 제동 시 회생되는 에너지에 관한 연구를 할 것이다.

이 논문은 2006년도 철도 기술 연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참고 문헌

- [1] D.Rathnakumar, J.KakshmanaPerumal and T.Srinivasan "A New Software Implementation of Space Vector PWM" IEEE SoutheastCon 2005, pp131-136, 2005, April
- [2] 홍순찬, 윤덕용, 차민, 유영석, "2.2kw급 유도전동기-인버터 시스템의 과도특성 해석 및 제어알고리즘 연구", 연구보고서, 1997, 11.
- [3] 정문구, 백병산, 김태완, 류승표, 김남해, "SVPWM을 이용한 전기철도용 회생인버터 개발", 전력전자학술 논문집. pp15~18, 2003, 7.
- [4] 정삼용, 이진섭, 서지연, 김동휘, 최연옥, 조급배, "비선형 관측기에 의한 유도전동기 간접 벡터제어", 전력전자학술대회 논문집. pp336~370, 1998, 7.
- [5] 한국철도기술연구원, "틸팅 시스템 실용기술 개발", 2004, 7.
- [6] 한국철도기술연구원, "추진 장치 성능시험설비 실시설계 기술자문 완료 보고서, 설비 기술 검토서", pp.14~15, 시험설비 시뮬레이션, 2000, 10.
- [7] 산업자원부, 2000. 12, "전동차형 VVVF 추진 장치 개발", 1~2장 추진 제어장치.