

## Simulink를 이용한 전동차용 전력변환장치의 시뮬레이션에 관한 연구

강문호<sup>\*</sup>, 한문섭, 이재호, 창상훈, 이종우  
한국철도기술연구원

A study on the simulation for the power converting system of the electric train  
using Simulink

Kang Moon Ho<sup>\*</sup>, Han Moon Seob, Lee Jae Ho, Chang Sang Hoon, Lee Jong Woo  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract**

Recent power converting system for an electric train has characteristics of a complex electromechanical system, which includes VVVF inverter, bidirectional converter, ac motor and controller and etc. So in order to analysis its dynamic characteristics reliably, a powerful and flexible simulation technique is needed. Concerned with this respect, because the Simulink has a variety of powerful functions and analysis tools not available in conventional power electronics simulation packages, it can be effectively applied to the simulation of the power converting system. In this paper, a schematically similar model for an electric train power converting system is derived on the Simulink Window, based on the Dynamic Node Technique, and several simulations have been implemented with the model. With the simulation results, the characteristics of the power converting system and the easiness of the proposed Simulink-based simulation technique could be verified clearly.

1. 서 론

전력변환장치를 시뮬레이션하기 위한 많은 소프트웨어들이 있지만, 현대의 전력변환장치는 다양한 토플로지와 함께 정교한 제어기를 필요로하기 때문에 종래의 소프트웨어 를로써는 이러한 복합시스템의 특성을 정확히 분석하는데 어려움이 있다. 특히, 최근의 철도 전동차의 전력변환장치는 기본적인 VVVF 인버터외에 전력 회생용 컨버터를 포함하여 외로구성이 복잡하고, 또한 전동차의 기계적 특성까지도 고려하여 고성능 제어를 실현하기 위한 제어부를 포함한 복합시스템 특성을 갖기 때문에, 전체 시스템의 신뢰도 있는 특성분석을 행하기 위해서는 동·정특성분석시 신뢰성과 함께 유연성을 가질 수 있는 시뮬레이션 툴이 요구된다.

이러한 관점에서 볼 때, Simulink는 Matlab을 기본으로 하여 종래의 시뮬레이션 툴에서는 구현하기 힘든 제반 수학적 함수와 Analysis 툴들을 이용할 수 있어 전력변환 시스템의 시뮬레이션에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

다양한 전력전자 계통의 시뮬레이션을 위해 Simulink[1]가 적용되고 있으나, 일반적으로는 계통의 상태방정식이나 전달함수를 유도하고 이를 근거로 하여 계통을 불복화하여 시뮬레이션하는 방식을 사용하고 있다.[2][3] 이 경우, 계통의 수식적 표현이 우선적으로 요구되고 계통이 약간만 변경되더라도 새로운 수식을 유도해야 하는 번거러움이 있으며, 일반적으로 전력변환계통에 포함되는 스위칭소자의 특성 및 구동방식에 대한 고려가 부족한 면이 있다. 한편, [4]에서는 Simulink의 다양한 그래픽-인터페이스 기능과 함께 Dynamic Node Technique을 이용하여 전력회로를 소자단위로 모델링하고 이를 결합하여 전체 시스템을 구성하므로써 실제 전력

변환회로와 유사한 토플로지를 갖는 회로를 모델링하여 시뮬레이션에 사용하고 있다. 이 경우 시스템의 변경이 용이하고, 실제 실험과 동일한 조건을 구현하기가 쉬워 시뮬레이션의 신뢰도를 향상시킬 수가 있다.

본 논문에서는 [4]에서 제시된 기법을 기본으로 하여, 전력용 스위칭소자를 더욱 실제와 가깝게 모델링하고 역률제어 기능을 갖는 PWM 컨버터, VVVF 인버터 및 유도기 백터제어기를 포함하는 전동차용 전력변환장치를 축소모델링하여 시뮬레이션을 행하므로써 제안된 전동차용 전력변환장치의 특성분석을 행하고 Simulink를 이용한 시뮬레이션 기법의 유용성을 보인다.

2. Dynamic Node Technique(DNT)[4]

Dynamic Node Technique(DNT)은 회로를 구성하는 소자들 사이에 기생 capacitance가 존재함을 가장하여, 입출력 전류를 측정시키는 기생 capacitance를 소자사이의 노드에 위치시킨다. 이때 짧은 과도기간동안에는 노드에 입·출력되는 전류에 있어서 차이가 생기나, 정상상태에서는 노드에서 입·출력 전류의 균형을 이루어 기생 capacitance로 흐르는 전류는 0이 되고 노드전압이 일정해 진다. 이 경우 고려할 사항은 일반적으로 기생 capacitance값을 적게 설정하면 과도시 실제 회로와 유사한 특성을 얻을 수 있다는 점이다.

그림1에서 보이는 바와 같이 DNT를 이용한 모델링 기법에 있어서 노드는 소자들 사이의 인터페이스 블록역할을 하여, 일반적인 수동 소자들을 노드들 사이의 전압차이에 따라 노드로 전류를 인가하거나 노드로 부터 전류를 입력하는 형태로 간단히 모델링할 수 있고 따라서 실제의 토플로지와 유사하게 시뮬레이션 회로를 구성 할 수 있다.

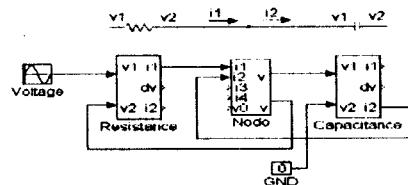
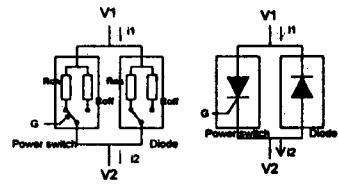


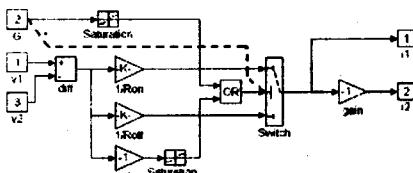
그림 1 DNT를 이용한 R-C 직렬회로 모델링

스위칭 소자는 소자의 온·오프시 저항값을 고려하여 온·오프저항이 병렬로 연결되고 소자의 구동조건에 의해 온·오프저항 중의 하나가 선택되는 형태로 모델링한다. 일반적으로 전력용 스위칭 소자는 역도통 다이오드를 포함하므로, 역도통 다이오드를 포함하여 스위칭 소자를 모델링한 경우를 보이면 그림2와 같다. 이 경우 스위칭 소자와 다이오드

각각의 스위칭 논리를 결합하면, 계이트신호가 인가되거나 V2가 V1 보다 클 경우에 소자양단간은 온저항으로 동가될 수 있으므로 그림2(b)와 같은 Simulink 블록을 유도할 수 있다.



(a) 전력용 스위칭소자 모델링



(b) 전력용 스위칭소자의 Simulink 모델

그림2. DNT를 이용한 스위칭 소자 모델링

3. Simulink를 이용한 전동차 전력변환장치 모델링  
전기 기관차에 대한 견인 전력변환기는 그림3의 구조를 네리 사용하고 있다. 유도전동기가 PWM 인버터로 부터 전원을 공급받고, 다시 인버터는 dc 중계회로로 부터 직류전원을 공급받는다. dc링크 전압은 4상한 컨버터를 이용하여 단상 AC 전압으로 부터 발생된다. 컨버터의 입력은 변압기를 통해 주전원과 입력 필터에 연결된다. 4상한 운전 컨버터는 입력역률을 1로 하면서 dc링크 전압을 일정하게 유지하고 [5][6], 인버터와 4상한 컨버터의 수는 특정한 구동시스템에 필요한 정격전력에 따라 다양한 값들을 갖는다.

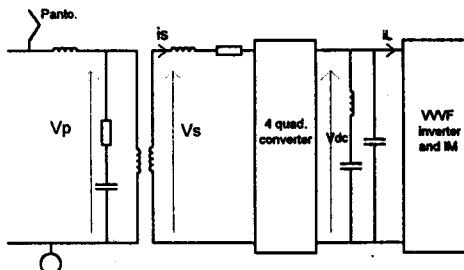


그림 3. 전동차용 전력변환 시스템의 구성도

실제 전동차에 부착되는 견인 전동기에 대한 정확한 파라미터값들을 확보하기가 어려웠기 때문에 본 논문에서는 파라미터값들을 알고 있는 2.2kW급 유도전동기를 사용하여 그림3의 계통에 대한 축소모델을 설정하고 각부분에 대한 특성분석을 행하였다. 이때, 구성의 간략화를 고려하여 주전원 입력필터와 컨버터 출력필터는 생략하였고, 주변압기 1.2차 전압은 60Hz의 실효치 100V로 설정하였다. 4상한 PWM 컨버터의 전류제어를 위해서 가변구조방식을 사용하였고, 유도전동기는 벡터제어방식으로 구동하였다.

3.1 가변구조제어기법을 이용하는 PWM 컨버터 모델링  
가변구조제어이론은 불연속적인 제어입력을 이용하여 제어기의 구조를 의도적으로 가변시킴으로써 강인한 제어특성을 얻는 기법으로, 슬라이딩 평면상에서 상태벡터들이 수렴하는 슬라이딩모드를 발생시켜 계통의 안정성과 함께 파라미터 및 외란에 대한 둔감성을 보장할 수 있다.[7]

컨버터의 역률1 제어를 위해서는 전원전류를 전원전압 ( $v = V_m \sin \omega t$ )과 동상으로 해야한다. 따라서 이를 위한 전원전류의 기준치를 dc링크 전압제어부 출력과 부하의 전향보상값을 고려하여 다음 식(1)과 같이 설정한다.

$$i_s^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) + \frac{2 V_{dc}^* i_L}{V_m^2} v_s \\ = k v_s \\ [k = (k_p + \frac{k_i}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) + \frac{2 V_{dc}^* i_L}{V_m^2}] \quad (1)$$

식(1)과 같이 정의되는 전류기준값과 실제전원 전류를 이용하여 슬라이딩평면을 식(2)와 같이 결정할 경우, 슬라이딩모드가 존재하기 위해서는 식(3)과 같은 슬라이딩 모드 존재조건이 만족되어야 한다.

$$S = i_s - i_s^* \quad (2)$$

$$S \dot{S} < 0 \quad (3)$$

식(3)은 S의 부호에 따라 S의 부호를 제어해야함을 의미하며 이는 곧  $i_s$ 의 부호를 제어해야 함을 의미한다. 이때,  $i_s$ 의 부호변경은 실시간 전원전압과 전원전류의 상태를 고려하여 컨버터의 스위치를 적절하게 동작시킴으로써 가능하고, 이는 표1과 같이 요약되는 비선형 제어기법에 의해 실현될 수 있다.[6]

표 1. 컨버터 역률1 제어를 위한 가변구조 제어 법칙

	$i_s < k v_s$	$i_s > k v_s$
$S_1$	off	on
$S_2$	on	off
	$v_s < 0$	$v_s > 0$
$S_3$	on	off
$S_4$	off	on

이상과 같은 제어방식을 갖는 4상한 컨버터의 제어부와 회로부가 DNT 기법에 의거하여 모델링되고, Simulink 윈도우에서 블록화 된 경우를 보면 그림 4와 같다. 이때, 구성의 간략화를 고려하여 주전원 입력필터와 컨버터 출력필터는 생략하였고, 주변압기 1.2차 전압은 60Hz, 실효치 100V로 설정하였다. 그림 5는 그림 4의 전체 컨버터제어 시스템 중에서 컨버터부만을 나타낸 그림이다. 그림5에서 보이는 것과 같이 시뮬레이션 모델을 실제의 회로구성과 유사하게 할 수 있기 때문에 시스템에 대한 이해가 쉽고, Simulink가 제공하는 시스템 요소의 블록화와 강력한 그래픽 인터페이스 기능에 의해 시스템의 변동이 매우 자유롭다.

### 3.2 유도기 벡터제어계통 모델링

유도 전동기는 무정류자 구조를 가짐으로써 유지·보수가 간단하고 정류한계가 없어 고압화 및 고속화가 용이하다. 특히 벡터제어방식을 적용할 경우 속도변동에 대한 토크변화에 잘 적응하게 되므로 저속제어성능을 향상시킬 수 있기 때문에 유도기를 구동원으로 하는 차량의 제동 및 점착특성

을 향상시킬 수 있다.

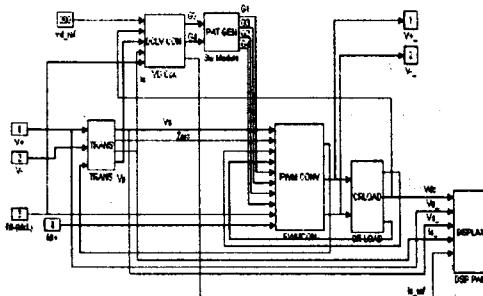


그림 4 컨버터 제어 시스템 Simulink 모델

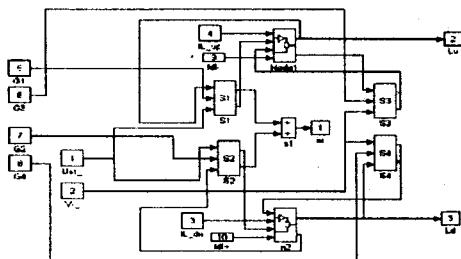


그림 5. 그림4의 컨버터부 Simulink 모델

유도기 제어시스템은 주전동기인 유도전동기, VVVF 인버터, 비간섭 간접 벡터제어기[8] 등으로 구성된다. 컨버터와 마찬가지로 DNT에 이거하여 스위칭 소자 및 병렬 다이오드로 구성되는 VVVF 인버터를 모델링하였으며, 비간섭 전류제어 및 속도제어를 위해서는 PI제어기를 구성하고, 인버터의 전압변조방식은 삼각과 변조방식을 사용하였다.

Simulink상에서 불특화 되고 시뮬레이션되는 전체시스템에 대한 구성도를 나타내면 그림 6과 같다. 그림 7은 그림 6의 전체 유도기 제어시스템중에서 인버터부만을 나타낸 그림이다.

#### 4 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 유도기 속도기준값을 1000rpm 으로 설정하고 0~0.6초까지는 무부하로 하여 유도기가 전동기 동작을 하도록 하고, 0.6~0.7초 사이에서는 -14Nm의 (-)정격부하를 인가하여 유도기가 회생동작을 하도록 하였다. 이 때의 속도변화를 보면 그림8과 같다. 전동기 속도를 보면 0.6초 이후 속도가 1100rpm으로 약간 증가하는데, 이때 (-)부하의 영향으로 전동기는 발전기로써 동작한다. 그림9는 0.5~0.7초 사이의 컨버터 입력전압과 입력전류 및 입력전류의 기준값을 보이는 그림으로, 전원으로부터 부하로의 전력공급(그림 9.a)과 부하로부터 전원으로의 전력회생(그림9.b)현상이 잘 나타나 있다. 이와 동시에 전력공급(그림9.a)시 전압과 전류가 동상을 이루고 전력회생(그림9.b)시 전압과 전류가 역상을 이루어 컨버터의 역률1제어 및 전류제어가 바람직하게 실행되고 있음을 보인다. 그림10.a는 전제어영역에서의 dc 링크전압을 보이는 것으로, PI 제어방식에 기인하여 과도시 약간의 오버슈트가 보이나, 전구간 기준전압의 ±10V 내에서 dc 링크 전압이 유지되고 있음을 알 수 있다. 그림10.b,c는 dc 링크전압을 확대하여 본 것으로, 전파정류 특성상 전원 주파수의 2배인 120Hz로 맥동하는 교류성분을 포함할 수 있다.

있다. 한편, 컨버터의 스위칭 동작에 기인하여 고주파 리플 성분이 dc 링크 전압에 포함됨을 살 볼 수 있는데, 이러한 고주파성분은 dc 링크콘덴서와 병렬로 고주파 필터를 설계하면 제거될 것으로 생각된다.

시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터들과 제어변수들을 보면 표2와 같다.

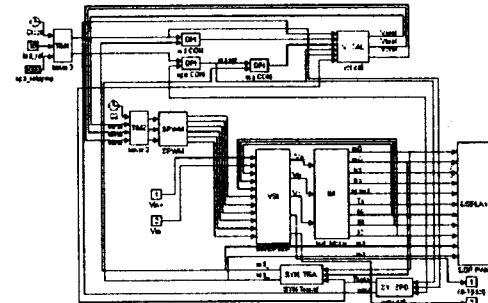


그림 6. 유도기 벡터제어 시스템 Simulink 모델

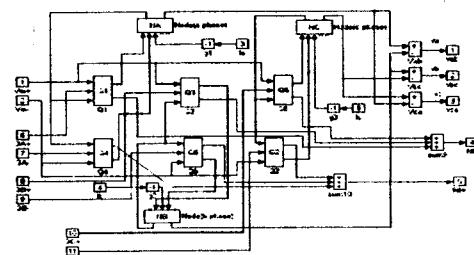


그림 7. 그림6의 VSI Simulink 모델

#### 5. 결론

본 논문에서는 Dynamic Node Technique를 이용하여 역률1제어 기능을 갖는 PWM 컨버터, VVVF 인버터 및 유도기 벡터제어기를 포함하는 전동차용 전력변환장치의 축소모델을 Simulink 윈도우상에서 모델링하고 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 전력변환장치의 타당성 및 제어성능을 확인할 수 있었고 Simulink를 이용한 시뮬레이션 기법이 복잡한 전력전자계통에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

소자 모델링시 소자의 여러 가지 다이나믹 특성을 고려하여 모델링하고, Matlab에서 제공하는 다양한 해석들을 이용한 경우, 더욱 정확한 시뮬레이션의 수행과 함께 해석의 용이성과 다양성을 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 향후, 본 논문에서 제시한 모델링기법을 이용하여 전력변환장치에서 발생되는 고조파를 고려한 더욱 고성능의 전력변환 및 제어기술연구에 주력할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Math Works inc, Simulink Users Guide, March 1992.
- [2] P. Marino et al, "A simulation tool for induction motor control", Proc. of EPE'95, Sevilla, vol.3, pp.610-615, 1995.
- [3] R. Teodorescu et al, "A Simulink approach to power electronics simulations", Proc. of EPE'95, Sevilla, vol.3, pp.954-958, 1995.
- [4] W. Oghanna et al, "mixed Electrical and Mechanical

Simulations Using Dynamic Systems Analysis Packages",  
Proc. of the IEEE-ASME Joint Railroad Conf., Pittsburgh,  
pp.87-93, April, 1993.

[5] T. Takehita."Performance of single-phase PWM ac-dc converter with reduced smoothing capacitor", IPEC'95 Yokohama, pp.276-280, 1995.

[6] D.A. Torry et al, "Single phase active power filters for multiple nonlinear loads", Trans. on Power Electronics vol.10, no.3, pp.263-272, May, 1995.

[7] V.I. Utkin, "Sliding mode in control optimization", Springer Verlag, 1992.

[8] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 1987.

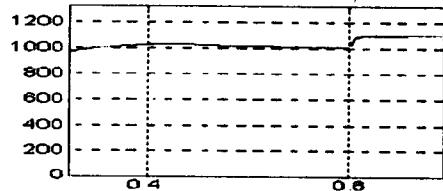
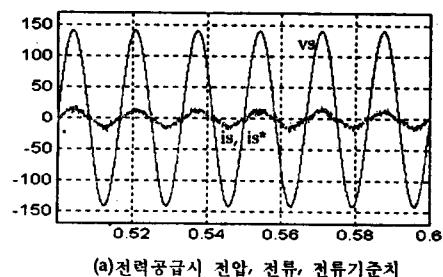
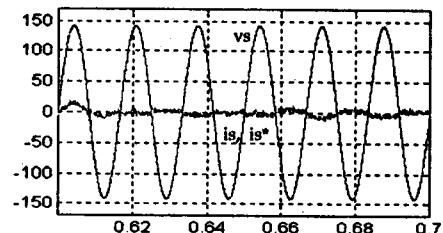


그림 8 유도기 속도

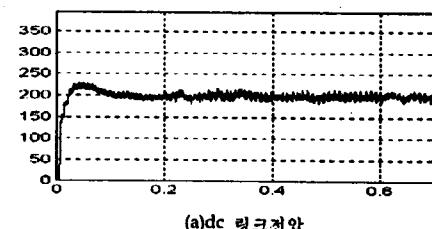


(a) 전력공급시 전압, 전류, 전류기준치

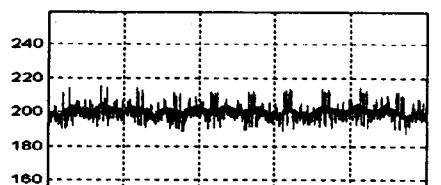


(b) 전력회생시 전압, 전류, 전류기준치

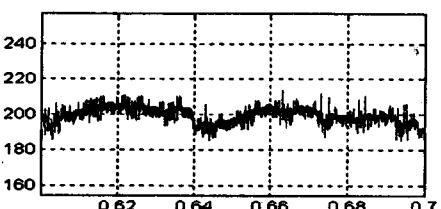
그림9. 컨버터 입력전압, 입력전류, 출력전류의 기준치



(a) dc 링크전압



(b) 전력공급시만 확대한 dc 링크전압



(c) 전력회생시만 확대한 dc 링크전압

그림 10. dc 링크전압

표 2. 전체 제어계통의 파라미터와 제어변수

컨버터회로 파라미터와 컨버터 제어변수	
컨버터 입력전원	단상 100V, 60Hz
컨버터 전원측 인덕턴스	2.5mH
컨버터 저위측 저항	0.2Ω
dc 링크 컨덴서	4000μF
제어주기	100μs
dc 링크전압 기준값	200V
dc 링크전압 PI제어기 이득	K <sub>p</sub> =0.05, K <sub>i</sub> =0.15
dc 링크전압 필터 밴드폭	86Hz
부하전류 필터 밴드폭	8.6Hz
유도기정격 및 파라미터와 배터리 제어변수	
정격	2.2kW, 3φ, 60Hz, 220V, 14A, 14Nm, 1500rpm
고정자 저항(r <sub>s</sub> )	0.345Ω
회전자 저항(r <sub>t</sub> )	0.342Ω
고정자 인덕턴스(L <sub>s</sub> )	0.03257H
회전자 인덕턴스(L <sub>t</sub> )	0.03245H
자화 인덕턴스(L <sub>m</sub> )	0.03132H
관성 모멘트(J)	0.0088kgm <sup>2</sup>
제어주기	100μs
속도기준값	1000rpm
부하	0.6 초에서 -14Nm(회생제동)
속도제어기 이득	K <sub>p</sub> =3, K <sub>i</sub> =1
자속성분전류 기준값	10A
전류제어기 이득	K <sub>p</sub> =5, K <sub>i</sub> =1
삼각파 주파수	2kHz
DNT 변수	
기생 capacitance	10nF
스위칭소자 은·오프저항	0.1Ω · 1MΩ