

# MATLAB을 이용한 HVDC 시스템 시뮬레이터 개발

조 신, 박인규, 안태천  
원광대학교 전기전자및정보공학부

## Development of HVDC System Simulator Using MATLAB

Shin Cho, In-Gyu Park, Taechon Ahn  
Division of Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University

**Abstract** - 디지털 프로세서의 성능이 크게 향상됨에 따라 HVDC (High Voltage Direct Current) 시스템의 제어에 고급 지능형 제어 기술의 적용이 연구되고 있다. 이러한 연구의 일환으로, 본 논문에서는 MATLAB을 이용한 HVDC 시스템 시뮬레이터의 개발 결과를 소개한다. 시뮬레이터는 MATLAB의 프로그램 언어와 행렬 연산 기능을 이용하였으며, 회로의 수식화는 전압원 및 스위칭 소자, 변압기를 포함할 수 있는 수정된 마디 해석법(modified nodal analysis)을 사용하였다. 적분법은 Backward Euler 적분법을 사용하여 수치적 진동(numerical oscillation) 문제가 발생하지 않도록 하였다. 개발 결과, 본 시뮬레이터가 향후의 HVDC 시스템 지능형 제어 기술 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

## 1. 서 론

최근에 디지털 프로세서의 성능이 비약적으로 향상됨에 따라 HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템의 고급 지능 제어 기술의 적용이 연구되고 있다. 본 논문에서는 HVDC 시스템의 지능형 제어 기술을 시험하고 검증하기 위해 개발한 HVDC 시스템 시뮬레이터의 결과를 소개한다. MATLAB은 제어공학 분야에서 널리 활용되고 있는 언어로서[1], 지능형 제어기의 개발을 용이하게 하기 위하여, 본 연구에서는 MATLAB의 프로그램 언어와 행렬 연산 기능을 활용하여 시뮬레이터를 개발하였다. 회로의 수식화는 전압원 및 스위칭 소자, 변압기를 포함할 수 있는 수정된 마디 해석법(modified nodal analysis)을 사용하였고[2][3], 적분법은 Backward Euler 적분법을 사용하여 수치적 진동(numerical oscillation) 문제가 발생하지 않도록 하였다[4]~[6]. 논문에는 HVDC 시스템의 주요 회로들을 시뮬레이션하여 각 회로 요소의 파형을 예시하였으며, 비례(proportional)-적분(integral) 제어기를 활용한 전류 제어 및 소호각(extinction angle) 제어의 시뮬레이션 결과를 예시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 사이리스터 3상 브리지 컨버터 시뮬레이션

그림 1은 커뮤테이션(commutation) 인덕터를 포함한 사이리스터 3상 브리지 컨버터 회로도이며, 표 1은 그림 1. 시뮬레이터 입력 리스트이다. 그림 1.의 각 회로 요소의 연결 상태를 마디(node) 번호와 가지(branch) 번호를 이용하여 표 1.과 같이 입력한다. 입력 리스트는 시뮬레이터로 입력되어 수식화 및 회로방정식 풀이 과정을 거쳐 각 회로 요소의 전압 및 전류 파형을 출력하게 된다. 그림 2~그림 5는 점호각(firing angle)  $\alpha$ 가 20°일 때의 트리거 회로 및 주요 회로 요소들의 시뮬레이션 결과이며, 그림 6~그림 8은 사이리스터의 commutation failure 시의 결과들을 나타내었다.

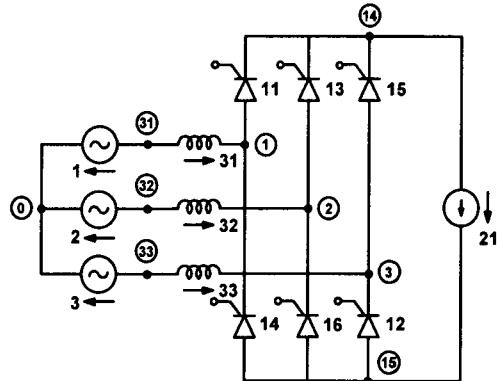


그림 1. 커뮤테이션 인덕터 포함 사이리스터 3상 브리지 컨버터 회로도

표 1. 그림 1.의 시뮬레이터 입력 리스트

```
f=60; t1=0; t2=4/f; Nsample=4000;
Lc=2e-4; theta=pi/6;
nb=nb+1; dbranch(1)=nb; te(nb)=Eb; sn(nb)=31; en(nb)= 0; d(nb)=100;
nb=nb+1; dbranch(2)=nb; te(nb)=Eb; sn(nb)=32; en(nb)= 0; d(nb)=100;
nb=nb+1; dbranch(3)=nb; te(nb)=Ec; sn(nb)=33; en(nb)= 0 ; d(nb)=100;
nb=nb+1; dbranch(11)=nb; te(nb)=T; sn(nb)= 1; en(nb)=14 ; d(nb)=0;
nb=nb+1; dbranch(13)=nb; te(nb)=T; sn(nb)= 2; en(nb)=14 ; d(nb)=0;
nb=nb+1; dbranch(15)=nb; te(nb)=T; sn(nb)= 3; en(nb)=14 ; d(nb)=1;
nb=nb+1; dbranch(14)=nb; te(nb)=T; sn(nb)=15; en(nb)= 1 ; d(nb)=0;
nb=nb+1; dbranch(16)=nb; te(nb)=T; sn(nb)=15; en(nb)= 2 ; d(nb)=0;
nb=nb+1; dbranch(12)=nb; te(nb)=T; sn(nb)=15; en(nb)= 3 ; d(nb)=1;
nb=nb+1; dbranch(21)=nb; te(nb)=J; sn(nb)=14; en(nb)=15 ; d(nb)=100;
nb=nb+1; dbranch(31)=nb; te(nb)=L; sn(nb)=31; en(nb)= 1 ; d(nb)=Lc;
nb=nb+1; dbranch(32)=nb; te(nb)=L; sn(nb)=32; en(nb)= 2 : d(nb)=Lc;
nb=nb+1; dbranch(33)=nb; te(nb)=L; sn(nb)=33; en(nb)= 3 ; d(nb)=Lc;
nt6=nt6+1;
dt6(nt6,1)=11; dt6(nt6,2)=12; dt6(nt6,3)=13;
dt6(nt6,4)=14; dt6(nt6,5)=15; dt6(nt6,6)=16;
alp=155/180*pi; ie=zeros(nb,1); ve=zeros(nb,1);
```

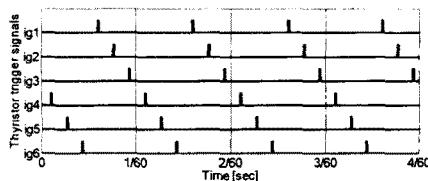


그림 2. 사이리스터 트리거 신호 ( $\alpha=20^\circ$ )

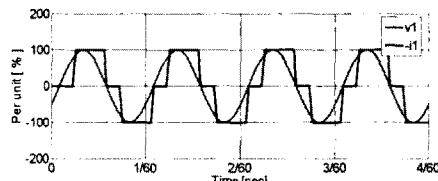


그림 3. 전원 전압 및 전류 ( $\alpha=20^\circ$ )

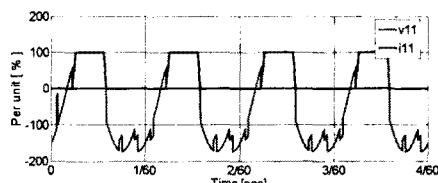


그림 4. 전원 전압 및 전류 ( $\alpha=20^\circ$ )

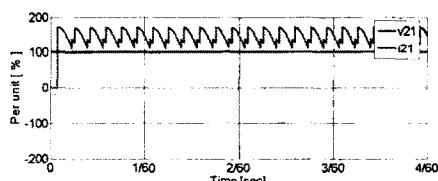


그림 5. 출력 전압 및 전류 ( $\alpha=20^\circ$ )

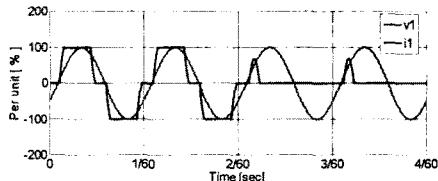


그림 6. 전원 전압 및 전류 (commutation failure)

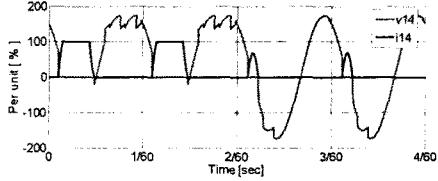


그림 7. 사이리스터 전압 및 전류 (commutation failure)

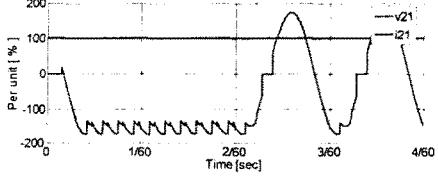


그림 8. 출력 전압 및 전류 (commutation failure)

## 2.2 HVDC 시스템 시뮬레이션

그림 9는 HVDC 시스템의 시뮬레이션 모델로서 인버터 측을 직류 전압원으로 치환한 12-펄스 사이리스터 컨버터 회로이다. 그림 10과 그림 11은 점호각  $\alpha$ 가  $30^\circ$ 로 일정하게 유지되었을 때의 결과이다.

HVDC 시스템은 그림 12에 나타낸 것과 같이, 기본적으로 입력 점호각  $\alpha$ 에 대해 직류 전압  $v_{dc}$ 가 출력되는 제어시스템으로 볼 수 있다. 그림 13은  $\alpha$ 의 정현파 변화에 따른 출력 전압을 나타내고 있다. 그림 14는 dc-link 인버터의 전류를 제어하기 위한 비례-격분 제어기이며, 기준 전류  $idref$ 의 변동에 따른 제어기의 동작을 그림 15에 나타내었다. 그림 16은 인버터 측 사이리스터들의 소호각을 제어하기 위한 비례-격분 제어기이며, 기준 소호각  $gamref$ 의 변동에 따른 제어기의 동작을 그림 17에 나타내었다.

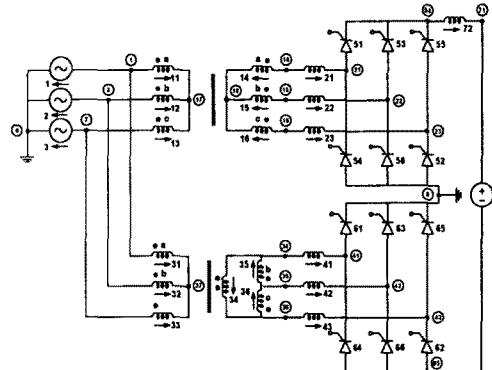


그림 9. HVDC 시스템 회로도

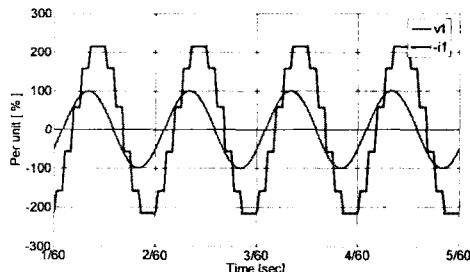


그림 10. 전원 전압 및 전류 ( $\alpha=30^\circ$ )

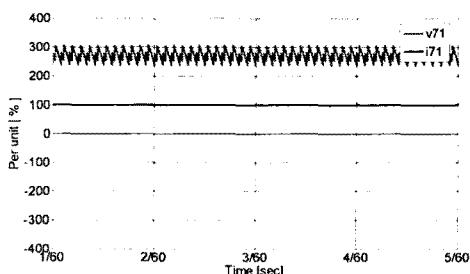


그림 11. 출력 전압 및 전류 ( $\alpha=30^\circ$ )

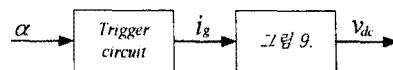


그림 12. 입력 점호각  $\alpha$ 에 대한 출력 전압

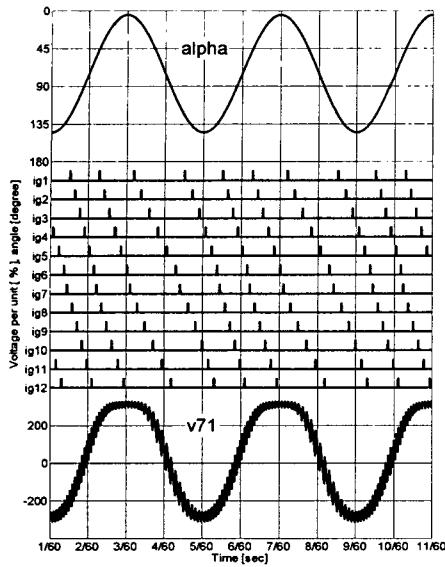


그림 13.  $\alpha$ 의 정현과 변화에 따른 출력 전압의 변화

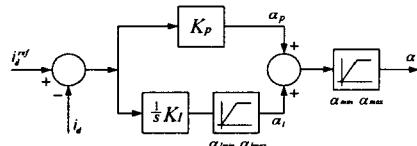


그림 14. 비례-적분 전류 제어기

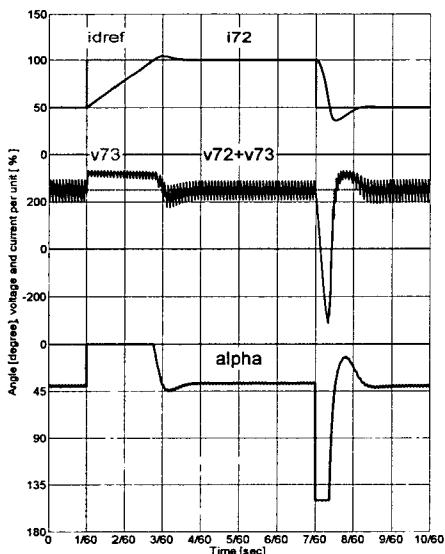


그림 15. 비례-적분 제어기 동작 파형 (기준 전류 변동)

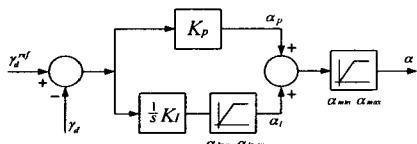


그림 16. 비례-적분 소호각 제어기

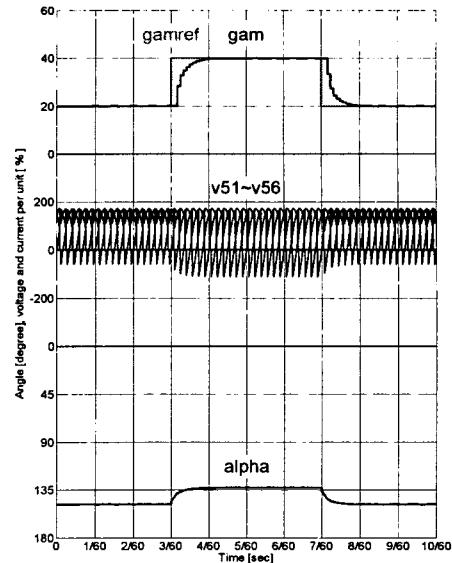


그림 17. 비례-적분 제어기 동작 파형 (기준 소호각 변동, 6개의 사이리스터 전압 도시)

### 3. 결 론

디지털 프로세서의 성능 향상과 함께 HVDC 시스템에 고급 지능형 제어기를 적용하기 위한 연구들이 진행되어 오고 있다. 본 논문에서는 이러한 고급 지능형 제어기의 시험 및 검증을 위해 개발한 HVDC 시스템 시뮬레이터의 결과를 소개하였다. 본 시뮬레이터는 MATLAB으로 프로그램하였으며 수정된 마디 해석법을 이용한 수식화와 Backward Euler 적분법을 활용하였다. 본 시뮬레이터가 앞으로의 HVDC 시스템 지능형 제어 기술 연구를 위한 유용한 도구가 될 것으로 기대한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jean Mahseredjian and Fernando Alvarado, "Creating an Electro-magnetic Transients Program in MATLAB: MatEMTP", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, No. 1, pp. 380-388, 1997.
- [2] Chung-wen Ho, Albert E. Ruehli, and Pierce A. Brennan, "The Modified Nodal Approach to Network Analysis", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. CAS-22, No. 6, pp. 504-509, Jun 1975.
- [3] L. M. Wedepohl and L. Jackson, "Modified nodal analysis: an essential addition to electrical circuit theory and analysis", *ENGINEERING SCIENCE AND EDUCATION JOURNAL*, pp. 84-92, Jun 2002.
- [4] Kai Strunz, "Flexible Numerical Integration for Efficient Representation of Switching in Real Time Electromagnetic Transients Simulation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, No. 4, pp. 1276-1283, 2004.
- [5] Mustafa Celik and Lawrence T. Pileggi, "Simulation of Lossy Multiconductor Transmission Lines Using Backward Euler Integration", *IEEE Trans. on Circuits And Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 45, No. 3, pp. 238-243, Mar 1998.
- [6] Cheng-Tsung Liu and Wen-Lin Chang, "Synchronized Solution for Power Electronics System Equations Using Flexible MODELS Component Connected to the EMTP", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, No. 4, pp. 1868-1873, Oct 1996.