

전력 전자회로의 디지털 시뮬레이션에 관한 연구

황선진*, 정태경, 윤병도
중앙대학교 전기공학과

A Study on the Digital Simulation of Power Electronic Circuits

Sun Jin Hwang * , Tae Kyung Chung , Byung Do Yoon
Department of Electrical Engineering , Chung Ang University

ABSTRACT

In recent, due to the advanced development of the power semiconductor devices, the Digital Simulation becomes essential in order to investigate the behavior of the system before the manufacturing of the system by using computer for design and analysis of Power Electronic systems. This paper develops the program, so-called PECA, which can be applied for the Power Electronic circuits composing of power transistors, thyristers, GTOs and power FET, etc. We consider transistor DC chopper circuit and prove the effectiveness of our program by both the experiment and simulation.

1. 서 론

전력전자회로의 디지털 시뮬레이션은 약 1970년대부터 시작되었다. [1] 이러한 시뮬레이션 방법은 전력용 반도체소자의 발달에 의해 인버터, 컨버터등의 개발이 향상됨에 따라 시스템을 제작하기 전에 시스템의 특성을 미리 판단 하는데 필수적으로 사용되게 되었다. [2]

전력전자회로 해석방법으로는 회로동작을 선형 시불변 미분방정식으로 표시하여 이를 한 주기간의 모드의 나열로 모델화하고 적절한 초기치로 부터 과도현상을 포함하여 수치해석하여 나가는 방법이 많이 이용되고 있다. 이러한 시뮬레이션은 해석의 일반성, 해의 精度 등의 우수한 점이 많고, 이에 대한 프로그램이 많이 개발되어 있다. [3] [4] [5] [6]

시뮬레이션 법에 있어, 중요한 것은 반도체 모델의 선택이다. [1] 이는 시뮬레이션의 정확성에 가장 큰 영향을 미친다. [7] [8] [9] 본 논문에서는 반도체 소자를 도통 상태에 따라 크게 다른 값을 갖는 저항소자로 모델링 하였으며, 이 저항값은 반도체 소자에 걸리는 전압에 따라 그 값이 결정된다.

그러나, 이렇게 되면 회로 시정수의 변화가 매우 크므로 회로가 stiff 하게 될 염려가 있으나, e^{At} (state-transition matrix) 를 빠른 시간에 정확히 구하였고, 반도체 소자의 on, off 시간을 정확하게 구하여 이에 대한 문제를 해결 하였다.

본 논문에서는 최근 절전형 전력기기 (인버터 장치등)

및 공작기계나 산업용 로보트, 공장 자동화기기등, DC 서보장치 및 AC 서보장치 등에 고속스위칭소자로 전력용 트랜지스터가 각광을 받고 있고, 고전압, 대전류용 제어로, 가전제품, 사무자동화기기, 산업용기기등의 전력제어 분야에 널리 다이리스터가 이용되고 있다. [10] 이러한 장점을 들어 트랜지스터 뿐만 아니라 다이리스터에 잘 적용되는 프로그램 PECA (Power Electronics Circuit Analysis program)를 개발하였다.

그리고 실험과 시뮬레이션을 통해 프로그램의 유용성을 검증하였다.

2. 상태방정식의 컴퓨터 해

2-1. 반도체 소자 모델링

모든 회로 소자 (저항, 인덕턴스, 콘덴서)는 선형이다. 본 논문에서는 반도체 소자를 도통상태에 따라 크게 변하는 저항값을 갖는 저항 소자로 모델링 하였으므로, 반도체 소자를 저항 소자로 본다.

2-2. 상태 방정식의 수치해

상태 변수를 통해 회로의 모든 branch의 전압과 전류를 나타낼 수 있는데, RLCM 회로에서는 상태변수로 V_c (콘덴서의 전압)와 I_L (인덕터에 흐르는 전류)로 정한다 일반적인 회로의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \tag{1}$$

$$Y = CX + DU \tag{2}$$

여기서 X : 상태 벡터, U : 입력 벡터, Y : 출력 벡터
 $\dot{X} = AX$ 의 일반적인 해는 식 (3)과 같다.

$$X(t) = e^{At}K \tag{3}$$

여기서 K 는 $n \times 1$ vector

$$\dot{X} = \frac{d}{dt} (e^{At} K) = Ae^{At} K = AX \tag{4}$$

식(1)의 해를 구하기 위해서 K 를 t 의 함수로 놓으면 다음과 같다.

$$\dot{X}(t) = e^{At}K(t) \quad (5)$$

식 (5)를 식 (1)에 대입하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$A e^{At}K(t) + e^{At}\dot{K}(t) = A e^{At}K(t) + BU(t) \quad (6)$$

식 (6)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{K}(t) = e^{-At}BU(t) \quad (7)$$

식 (7)를 $t=t_0$ 에서 t 까지 적분하면 다음 식과 같다.

$$\int_{t_0}^t \dot{K}(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t e^{-A\tau}BU(\tau) d\tau \quad (8)$$

또는

$$K(t) = \int_{t_0}^t e^{-A\tau}BU(\tau) d\tau + K(t_0) \quad (9)$$

여기서 식 (9)와 식 (5)로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$X(t) = e^{At} \left[\int_{t_0}^t e^{-A\tau}BU(\tau) d\tau + K(t_0) \right] \quad (10)$$

또는

$$\begin{aligned} X(t_0) &= e^{A t_0} K(t_0) \\ K(t_0) &= e^{-A t_0} X(t_0) \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 식 (1)의 해는 다음과 같다.

$$X(t) = e^{At} \int_{t_0}^t e^{-A\tau}BU(\tau) d\tau + e^{A(t-t_0)} X(t_0) \quad (12)$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y(t) &= C e^{A(t-t_0)} X(t_0) + \left[C e^{At} \int_{t_0}^t e^{-A\tau}BU(\tau) d\tau + \right. \\ &\quad \left. + DU(t) + D_1 \dot{U}(t) \dots \dots \dots \right] \quad (13) \end{aligned}$$

2-3. e^{At} 의 계산 방법

식 (1)에서 시스템 방정식의 해는 수치적으로 다음과 같은 점화식 (recurrent equation) 으로 주어진다. [10]

$$X(t + hT) = e^{AhT} X(t) + A^{-1}(e^{AhT} - 1)BU(t) \quad (14)$$

여기서

$X(t + hT)$ 는 $(t + hT)$ 순간의 상태벡터, hT :계산스텝 구간 $X(t)$ 는 t 순간의 상태벡터, 1 은 단위행렬

Taylor 급수전개에 의하여

$$\begin{aligned} e^{AhT} &= 1 + AhT + \frac{1}{2!}(AhT)^2 + \dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots + \frac{1}{n!}(AhT)^n \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14)에서 t 와 $(t + hT)$ 구간에서 입력 U 는 일정하다고 본다. 식 (15)에서 계산구간 hT 는 임의의 값을 갖는데 A 의 절대값을 고려하여 비교적 큰 구간을 잡아서 계산할 수 있다.

3. 전체 프로그램 구성

3-1. 반도체 도통상태의 변화

반도체가 on 또는 off로 변화하는 순간을 정확히 구하는 것은 Simulation의 가장 중요한 점이다. 본 논문에서는

반도체의 모델링을 저항소자로 하였으므로 on 또는 off 상태의 결정은 반도체에 걸린 전압으로 결정해야 하고, 다이리스터의 경우는 firing signal을 고려하고, 트랜지스터의 경우에는 베이스 전류를 고려해야 한다.

이 경우 다음의 논리를 거치게 된다.

- (1) 반도체의 구성의 변화 조사
- (2) 이 변화가 실제로 상태(State)를 변화시키는 것을 다시 결정

이에 대한것이 그림.1.에 나타나 있는데 이때 상태가 변화했다면, 이것이 실제로 상태를 변화 시키는지를 검사하고 반도체 양단의 전압이 영으로 되는 시각을 정확히 결정하는 것이다. 이것은 계산 스텝을 크게 잡았으므로 전류(commutation)순간이 계산 스텝 사이에서 생기는 것을 찾기위한 것이다.

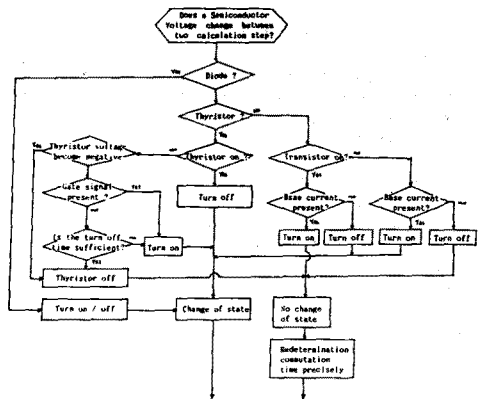


그림 1. 반도체 상태 변화 흐름도

3-2. 상태 행렬의 계산

그림 2 는 상태행렬 계산의 흐름도 이다. 전력전자회로는 선형소자와 반도체 스위치 로 구성된다. 그러므로 반도체 스위치의 on, off 에 따라 회로의 토폴로지가 변화므로, 상태 방정식도 변화게 된다. [9] [12] 그러므로 반도체 스위칭 소자의 도통상태의 변화에 따라 상태 방정식의 해를 다시 구해야 한다.

단계적으로 살펴 보면 다음과 같다.

- (1). 주어진 스위치 상태의 조합으로 행렬 A,B,C,D 를 계산하고, 이때 계산한 것이 처음 계산한 것이라면, Memory에 저장한다.
- (2). 각 계산 step 에서, 모든 스위치에 대해서 상태 변화가 가능한가를 판정한다.
- (3). 새로운 반도체 스위치 상태 조합이 발견되면 상태행렬을 계산하고, 이때 계산한 상태행렬이 이미 Memory에 저장되어 있나를 판단하고, 만일 이미 계산되어 Memory에 저장 되었다면, 다음 step으로 넘어가고, Memory에 없다면, Memory에 저장하고, 다음 계산 step 으로 넘어 간다.

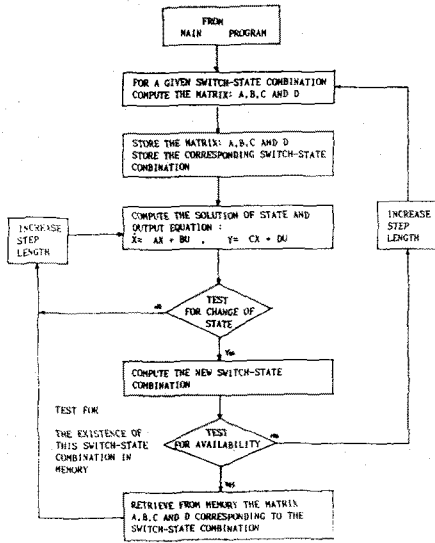


그림 2. 상태 행렬 계산의 흐름도

3-3. 전체 시뮬레이션 프로그램

단계적으로 살펴 보면 다음과 같다.

- (1) 입력으로써 회로 소자의 접속상태와 각 소자값, 주기T, Thyristor의 trigger 시각, trigger 지속시간과 turn off time을 입력시키고, Transistor에 대하여 Base current가 흐르는 시각과 지속시간을 입력하고 Graphic 으로 출력 할 것을 지정한다.
- (2) 반도체 소자의 저항값을 제외하고 시스템 방정식을 세운다. 이때 만들어진 방정식의 모드에 따라 반도체의 순방향 저항과 역방향 저항이 자동으로 대입되므로 한번 계산된 것은 계속 사용한다.
- (3) 초기치는 모두 0으로 설정하고 반도체의 상태를 off로 한다. 이때 방정식을 풀어 반도체의 상태를 자동으로 다시 조정하고 상태 방정식의 A B C D 와 e^{AhT}의 값을 기억시킨다.
- (4) 모드가 변화에 따라 계산된 A B C D와 e^{AhT}의 값을 기억시켜 두므로 한 주기 내에서 같은 모드가 생길때와 다음 주기에서 계산할때 memory 에서 읽으면 되므로 계산시간이 줄어든다.
- (5) 반도체의 극성이 바뀌게되면 그 시각에서 극성을 바꾸어주고, 다음계산 스텝으로 넘어가지 않고 전압이 0이 되는 점을 정확히 찾은 후, 그 시각에서 다시 모드를 검사한 후 다음 step의 시뮬레이션을 하게 된다
- (6) 출력에서는 원하는소자의 전류와 전압파형을 그릴수 있고, 모드가 변하는 시각과 그때의 모드를 write 하게 된다.

3-4. 응용 예

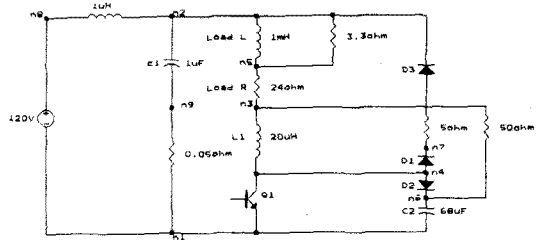


그림 3. 보호소자를 갖는 트랜지스터 스위치 회로

그림 3 에서 주파수는 20 KHz 로 동작하고, Transistor의 보호회로 소자는 두개의 에너지 저장소자 (L₁ , C₁) 와 두개의 방출소자(R₁ , R₂) 와 두개의 다이오드 (D₁ , D₂) 로 구성된다. 그림 4 는 시뮬레이션 결과이다.

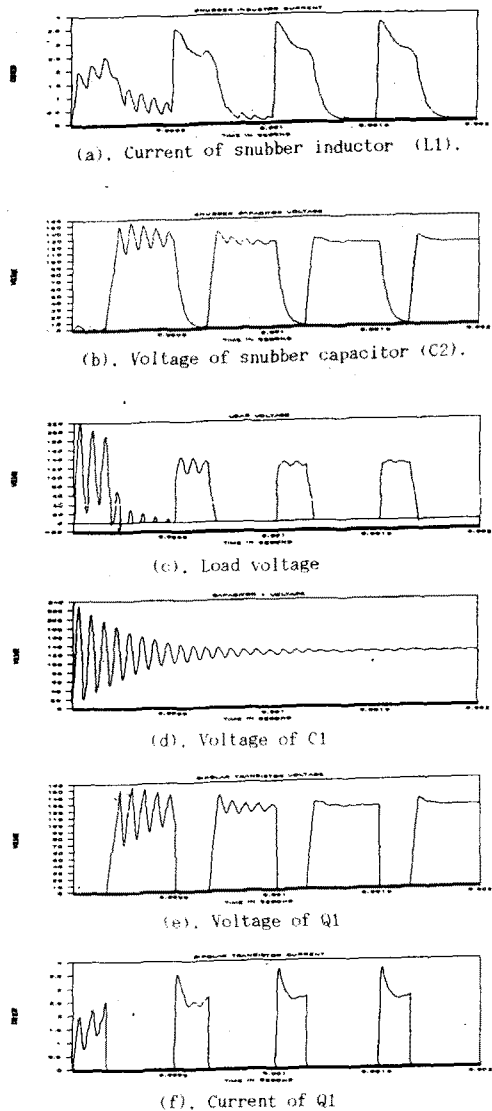


그림 4. 트랜지스터 스위치 회로의 시뮬레이션 결과

4. 실험 및 시뮬레이션

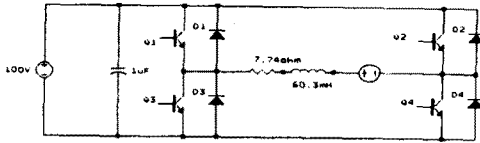
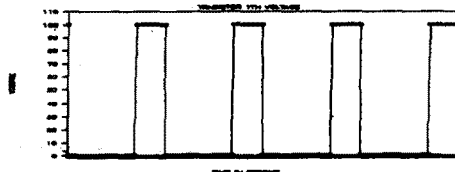
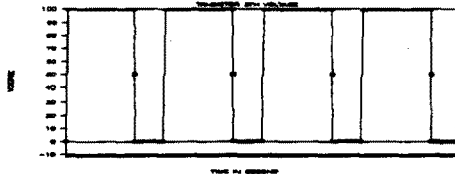


그림 5. Transistor 초퍼회로

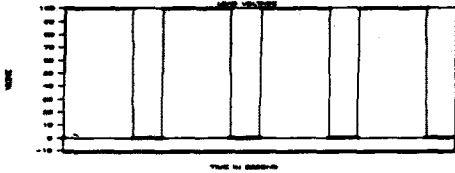
주파수는 12kHz이고, Q₁, Q₄ 를 Turn on 시켜 전기자 전압이 입력 전압의 75%가 될 때에 대해 시뮬레이션하여 그림 6 과같은 결과를 얻었고, 그림 7 은 실험결과이다.



(a). 트랜지스터 1의 전압파형



(b). 트랜지스터 3의 전압파형



(c). 부하전압 파형



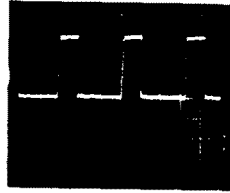
(d). 부하전류 파형

그림 6. 트랜지스터 초퍼회로의 시뮬레이션 결과

[10] 윤병도, 정재훈 공저
"최신 전력전자 공학" 김영사 (1987)

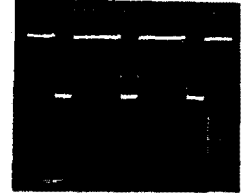
[11] L.O.Chua, & P.M. Lin,
"Computer - Aided Analysis of Electronic Circuits : Algorithms & Computational Techniques", Prentice Hall (1975)

[12] G.N. Revankar, B.E.,
"Topological Approach to Thyristor - Circuit Analysis" PROC. IEE, Vol. 120, No.11, pp 1403 - 1405 November (1973)



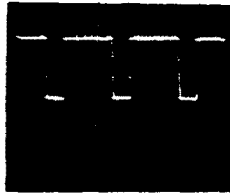
(a). 트랜지스터 1의 전압파형

V: 33(V)/div
H: 2.6(μs)/div



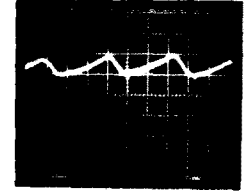
(b). 트랜지스터 3의 전압파형

V: 33(V)/div
H: 2.6(μs)/div



(c). 부하전압 파형

V: 33(v)/div
H: 2.6(μs)/div



(d). 부하전류 파형

V: 0.1(A)/div
H: 2.6(μs)/div

그림 7. 트랜지스터 초퍼회로의 실험 결과

5. 결론

본 논문에서는 전력전자회로를 해석하거나 설계하기 위하여 회로 방정식을 컴퓨터 프로그램화 하여 수치해를 구하는 방법에 대하여 설명하였다.

그리고 본 논문에서 개발한 프로그램 PECA에 대하여 설명하고, Transistor 초퍼회로를 구성하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 프로그램의 유용성에 대해 검증하였다.

참고 문헌

[1] BORDRY F. & FOCH H.
"Computer - Aided Analysis of Power - Electronic Systems", IEEE TRANS. pp 516 - 522 (1985)

[2] A. Coffetti, G. Petrecca & A. Savini,
"A Digital Simulation of Converter circuits" Proc. 2nd IFAC Symp. On Control in power Electronics and Electrical Drives. pp7-14(1977)

[3] G.N. Revankar, et al,
"Computer Analysis of SCR circuit" IEEE TRANS. IECI, pp 22 -28 (1975)

[4] H. Foch, et al,
"A General Digital Computer Simulation Program for Thyristor Static Converters (Program SACSO) Application Examples" Proc. 2nd IFAC Symp. On Control in Power Electronics and Electrical Drives ppl - 5(1977)

[5] V. Rajagpalam,
"Computer Aided Analysis of Power Electronic System", IECON' 88 pp 528 - 533 (1988)

[6] Hiromasa Haneda, et al,
"Digital Simulation of Thyristor Circuits via Tableaw Approach", JIEE 54-B53 pp17-24 (1979)

[7] Yasuaki Kuroe, et al,
"Steady - State Analysis of Thyristor Circuits Based Adjoint Network Approach and General Analysis Program ANASP", JIEE 56 - C24 (1981)

[8] J. Schonek,
"Simulation Numerique de Convertisseurs Statiques. Elaboration dun Programme General Application a la conception et a l'optimisation des Convertisseurs" Thèse de Docteur Ingenieur, Toulouse (1977)

[9] V. Rajagopaiaim,
"Computer - Aided Analysis of Power Electronic System", MARCEL DEKKER, INC (1987)