

SPICE를 이용한 직류서보전동기 속도제어시스템의 해석

*민인규 · 유상규 · 장성수 · 박영진 · 홍순찬

단국대학교 전기공학과

SPICE Based Analysis of a DC Servo Motor Speed Control System

*Een-Kyu Min, Sang-Gyu Yoo, Seong-Su Jang, Young-Jeen Park, and Soon-Chan Hong

Dept. of Electrical Eng., Dankook University

Abstract - This paper deals with the analysis of a DC servo motor speed control system with PI-controller using the SPICE, which was developed as a simulation program for electronic circuits. The system including PI-controller is needed to be modelled for SPICE analysis. The system is divided to motor part, power conversion part, and control part for effective simulations. The overall system is reconstructed by using the above models and the steady-state and transient state are analyzed through SPICE simulations. The simulation results are verified by comparing with the results obtained by conventional simulations.

1. 서 론

근래에 이르러 전자회로는 새로운 소자들이 개발되고 점점 복잡해짐에 따라 회로동작에 대한 좀더 정확한 평가방법이 필요하게 되었으며 이에 부응하여 컴퓨터를 사용한 회로해석이 이루어지고 있다. SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)는 디지털회로, 아날로그회로 및 디지털-아날로그 혼합회로에 대해 직류, 교류, 과도해석 등 회로의 다양한 해석이 가능할 뿐만 아니라 다양한 전기전자회로 소자의 모델을 가지고 있어서 대부분의 전자회로에 대해서 모의실험이 가능하고 비선형성을 모두 고려할 수 있다.

SPICE를 이용한 논문들이 많기는 하지만 그 대부분은 반도체 소자에 대한 특성해석이고, [1][2]에서 제어회로를 포함하는 전동기 운전특성에 대한 해석은 미미한 실정이다. 그러나 전동기 구동계통도 각 구성요소들을 적절히 모델링하면 SPICE를 이용하여 해석이 가능하다. 본 논문에서는 SPICE를 이용하여 비례적분제어기를 포함하고 4상한 초퍼로 구동되는 직류서보전동기 속도제어시스템의 각 구성요소들을 모델링하고 해석한다.

2. SPICE 모델링

SPICE를 이용하여 전자회로를 효율적으로 모의실험하기 위해서는 우선 모의실험을 하고자 하는 대상에 대해서 SPICE 모델을 세운다. SPICE로 설계하고자 하는 시스템을 모델링할 때 가능한 한 반도체 소자의 수를 줄여서 모델링하고 전체 시스템을 단순하게 하는 것이 중요하다. [3]

SPICE를 이용하여 해석할 때 중속전원을 적절히 이용하면

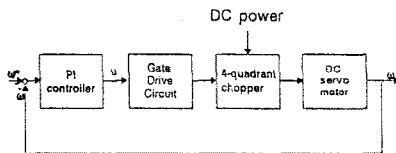


그림 1. 직류서보전동기 속도제어시스템의 블럭선도

매우 편리한데 이들 중속전원들은 제어전원과 계수 사이의 선형관계 외에 여러개의 제어전원들과 계수들의 조합에 의해 비선형의 관계를 가질 수 있다.

본 연구에서 대상으로 선정된 직류서보전동기 속도제어시스템은 그림 1과 같이 비례적분제어기를 포함하는 시스템이다.

2.1 직류서보전동기 모델링

그림 2는 직류서보전동기의 등가회로이며 전동기 특성방정식은 다음과 같다.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_b \omega_m \quad (1)$$

$$T_e = k_t i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (2)$$

우선 그림 2와 식 (1)에서 R_a 와 L_a 는 SPICE의 회로소자 모델에서 저항 R과 인덕터 L을 사용하고 저항, 인덕터, 역기전력이 직렬로 연결된 회로로 모델링할 수 있다.

또한 식 (2)의 토크관계식에서 T_e 는 $k_t i_a$ 이므로 전류제어 전류원 F로 등가시킬 수 있다. 또한 부하토크 T_L 은 원하는 시간에 부하가 투입되는 효과를 가져야 하므로 PWL(Piecewise Linear)전류원이어야 한다. 식 (2)의 토크관계식에서 각항의 합이 출력토크와 같아야 하므로 전류원에 대한 RC병렬회로와 같은 관계를 가진다. 따라서 관성 모멘트 J는 콘덴서 C로, 점성마찰계수 B는 콘덕턴스 G(1/R)로 등가되어진다. 이때 콘덴

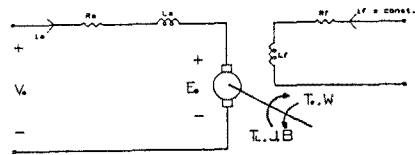


그림 2. 직류서보전동기 등가회로

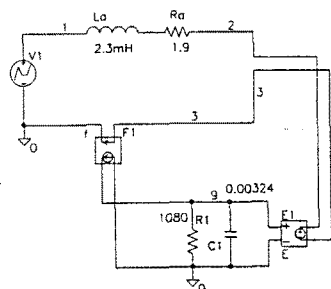


그림 3. 직류서보전동기의 SPICE모델

서 C양단에 형성되는 전압이 전동기속도 w_m 으로 전동기의 실제속도와 일대일로 대응되어진다.

2. 2 전력변환회로의 모델링

1) IGBT의 모델링

SPICE의 소자모델중에는 IGBT의 모델이 없으므로 등가회로로 모델링을 한다.

IGBT의 외부특성은 전압구동형으로 게이트와 에미터간의 순방향 바이어스 전압을 인가하여 온-오프제어하고 낮은 온상태 도통손실을 나타낸다. 이러한 외부특성을 반영하기 위해 게이트용으로는 전압구동형인 MOSFET를 사용하고 진력전달용으로는 Bipolar Transistor를 사용하여 그림 4와 같이 IGBT의 등가모델을 구할 수 있다. 이 등가모델에서 전압원 V_m 과 저항 R_m 은 Bipolar Transistor가 전류구동형이므로 베이스단자에 전류를 공급하여 트랜지스터를 도통시키기 위한 소자들이다.

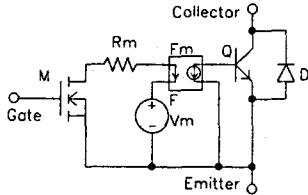


그림 4. IGBT의 등가회로

2) 4상한 쇼퍼

IGBT를 이용하여 4상한 쇼퍼를 구성한 회로는 그림 5와 같으며 이 4상한 쇼퍼는 환류모드로 동작시킴으로 각각의 IGBT들은 따로 동작하여야 한다.

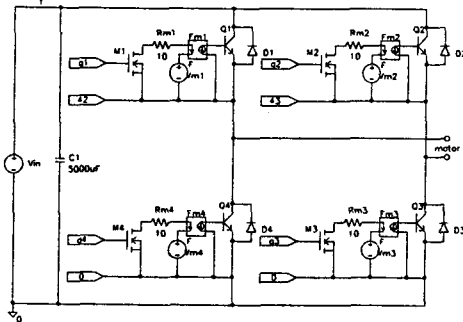


그림 5. 4상한 쇼퍼의 SPICE모델

3) 게이트구동회로의 모델링

그림 6은 게이트구동회로의 SPICE모델로서 Q1과 Q2의 게이트 구동회로는 PWM방식을 사용한다. 일정삼각파는 PULSE전원에서 TR(Rising Time)과 TF(Falling Time)을 원하는 주기내에서 거의 절반씩 차지하도록 크게 주고 PW(Pulse Width)를 매우 작게 하면 삼각파를 구현할 수 있다.

그림 5의 4상한 쇼퍼에서 Q3과 Q4의 게이트구동회로는 일정삼각파에서 제어기출력 u 를 비교하는 방식을 사용한다. 제어기의 출력 u 가 (+)일때는 Q3의 게이트구동회로는 +15[V]를 유지하고 Q4의 게이트구동회로는 Q1과 반대로 동작하도록 하여 역전류가 흐를 수 있도록 게이트신호를 만든다. 제어기의 출력 u 가 (-)일 때는 Q3과 Q4의 게이트구동회로는 u 가 (+)일

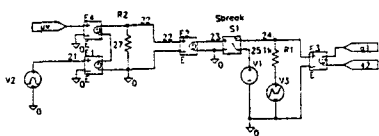


그림 6. 게이트구동회로 SPICE모델

때와 반대로 동작한다. 이러한 게이트구동회로의 동작으로 4상한 쇼퍼를 환류모드로 동작시킬 수 있다.

2. 3 제어기의 모델링

1) 부궤환회로의 모델링

전동기의 속도는 그림 3에서 C의 양단에 형성되는 전압과 일대일 대응이 된다. 이 전압이 기준속도 w^* 와 비교되어야 하므로 계수 -1을 갖는 전압제어 전압원 E의 제어전압이 되어야 한다. 전동기의 속도 w 가 전압의 형태로 부궤환되어지므로 독립전압원 V로 등가되어진다. 전동기의 속도전압 w 와 기준속도전압 w^* 를 비교하기 위해 w^* 의 극성과 반대의 극성이 되도록 w 를 직렬연결함으로써 궤환회로를 모델링할 수 있다.

2) 비례적분제어기의 모델

비례적분제어기에서 출력 u 는

$$u = k_p e + k_i \int e dt \quad (3)$$

으로 표현이 되어진다. 식 (3)에서 제어기 출력 u 는 속도오차 e 를 k_p 배한 값과 e 를 적분한 값에 k_i 배한 값의 합으로 표현되어지므로 SPICE소자모델 중에서 INTEG와 GAIN을 사용한다. INTEG는 속도오차 e 를 받아서 k_i 배한 후 적분하여 출력을 내보내고 GAIN은 속도오차 e 를 받아서 k_p 배한 출력을 내보낸다. 따라서 이 두개의 소자를 속도오차 e 에 대해서 병렬로 연결하고 출력값을 더해줌으로 비례적분기 출력 u 를 생성할 수 있다. 이 출력 u 는 전압의 형태이고 게이트구동회로의 삼각파와 비교되어야 하므로 일정한 비율로 감소시켜야 한다. 이 비례적분제어기의 SPICE모델을 그림 7에 보였다

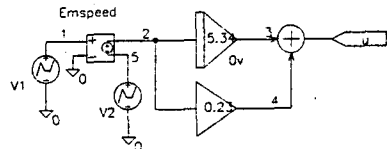


그림 7. 비례적분제어기의 SPICE모델

3. 직류서보전동기 속도제어시스템의 SPICE모델

그림 8은 직류서보전동기 속도제어시스템의 상세한 블럭도이다. 이 직류서보전동기 속도제어시스템은 기준속도와 전동기의 속도가 비교되어서 그오차값이 전압의 형태로 비례적분제어기의 입력이 되고 제어기를 거쳐 속도오차에 대해 보상이 되어진 출력 u 는 IGBT의 게이트신호를 만들어 줄 게이트구동회로의 입력이 되어진다. 게이트구동회로에서는 4상한 쇼퍼가 환류모드로 동작할 수 있도록 게이트 신호가 만들어지고 이 신호에 따라 4상한 쇼퍼가 동작을 하여 전기자회로에 전압을 공급하게 된다. 이러한 동작을 하는 직류서보전동기 속도제어시스템의 전체 SPICE모델을 그림 9에 보였다.

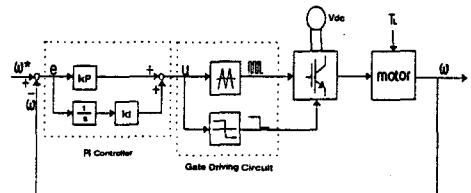


그림 8. 직류서보전동기 속도제어시스템

4. 시뮬레이션 및 검토

모델링되어진 직류서보전동기 속도제어시스템의 모델이 정확히 동작함을 보기 위해 기존의 시뮬레이션 방법인 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용한 시뮬레이션의 결과와 비교 검

도하였다. 본 연구에서 사용한 직류서보전동기의 각 상수값들은 표 1과 같다. 또한 비례적분제어기의 제어이득 k_p , k_i 값은 각각 0.23과 5.34로 선정한다.

그림 10, 11, 12는 Runge-Kutta 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 샘플링 시간은 0.2[ms]로 하였으며 그림 12는 900[rpm]으로 기동시키고 500[ms] 후에 50%부하를 인가하였을 때의 결과이다.

그림 13, 14, 15는 SPICE를 이용하여 시뮬레이션한 결과로써 그림 10, 11, 12와 같은 조건에서의 결과이다. Print Interval은 2[ms]로 하였고, 전류와 전압파형의 정확도는 ABSTOL은 500[uA], VNTOL은 700[uV], RELTOL은 0.1로 하였다.

그림 10, 11, 12와 그림 13, 14, 15에서 알 수 있듯이 두 시뮬레이션의 결과는 잘 일치함을 알 수 있고 직류서보전동기 속도제어시스템이 잘 모델링되었음을 알 수 있다.

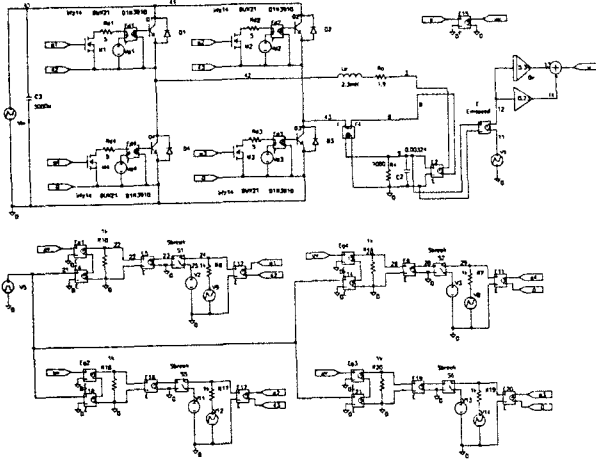
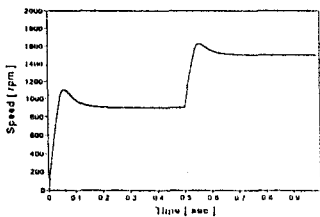


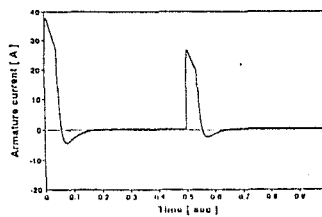
그림 9. 직류전동기 속도제어시스템의 SPICE모델

표 1. 직류서보전동기의 상수

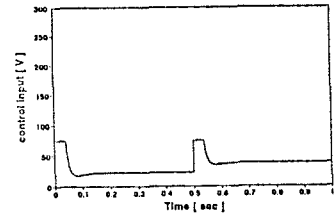
전동기 정수	값	단위
정격출력	300	W
정격전압	75	V
정격전류	5	A
정격토크	9.5	kgf·cm
정격회전속도	2700	rpm
토크정수	2.4	kgf·cm/A
유기전압정수	24.6	V/krpm
관성모멘트	3.24	g·cm·s ²
점성마찰계수	0.926	g·cm/rpm
전기적시정수	1.93	ms
기계적시정수	8	ms
전기자저항	1.9	Ω
전기자인덕턴스	2.3	mH



(a) 전동기속도

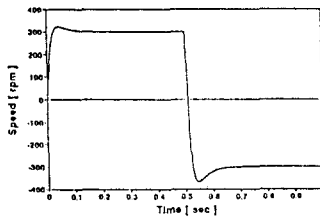


(b) 전기자전류

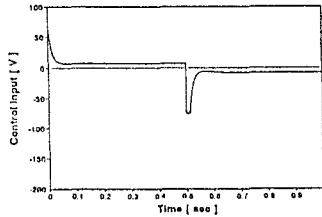


(c) 제어입력

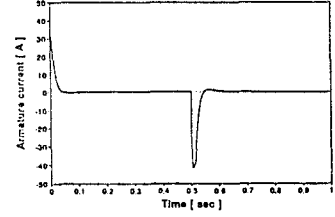
그림 10. 900[rpm]에서 1500[rpm]으로 가속시 기존의 방법에 의한 시뮬레이션 결과



(a) 전동기속도

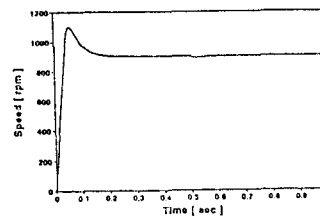


(b) 전기자전류

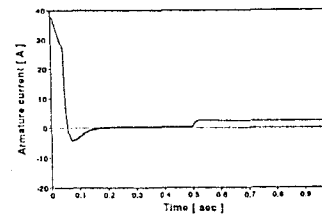


(c) 제어입력

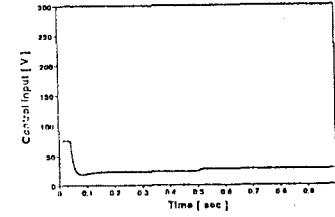
그림 11. 300[rpm]에서 -300[rpm]으로 역회전시 기존의 방법에 의한 시뮬레이션 결과



(a) 전동기속도



(b) 전기자전류



(c) 제어입력

그림 12. 부하투입시 기존의 방법에 의한 시뮬레이션 결과

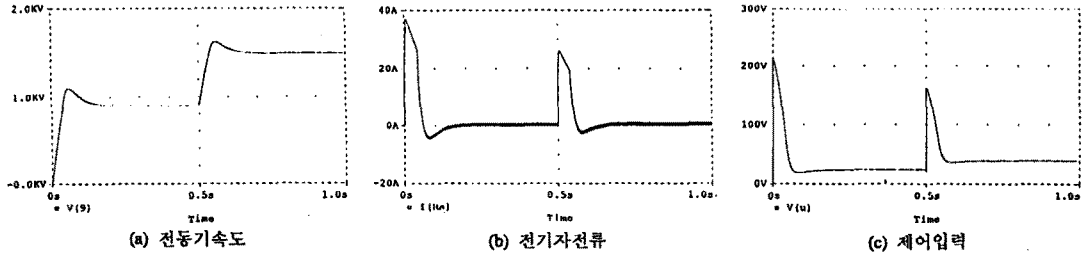


그림 13. 900[rpm]에서 1500[rpm]으로 가속시 SPICE를 이용한 시뮬레이션결과

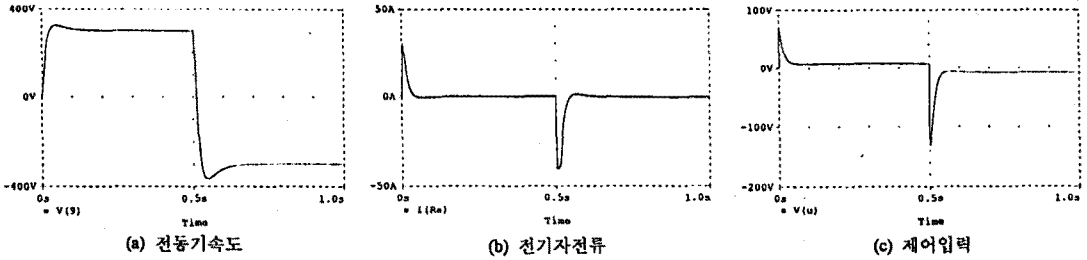


그림 14. 300[rpm]에서 -300[rpm]으로 역회전시 SPICE를 이용한 시뮬레이션결과

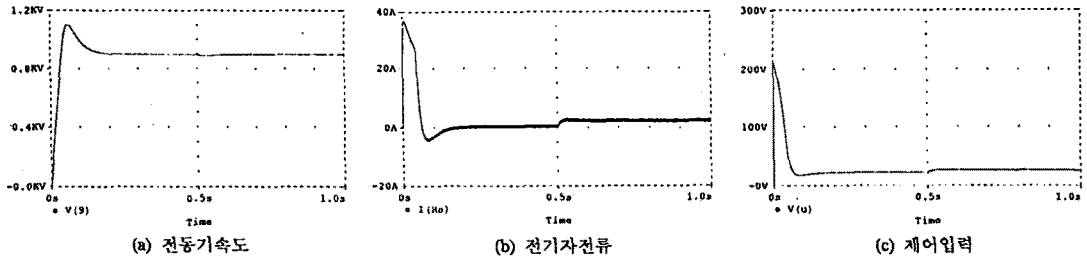


그림 15. 부하투입시 SPICE를 이용한 시뮬레이션결과

5. 결론

본 연구에서는 SPICE를 이용하여 비례적분제어기를 포함하는 직류서보전동기 속도제어시스템을 각 부분별로 모델링하고 해석하였다.

SPICE로 시뮬레이션을 하기 위하여 직류서보전동기 속도제어시스템을 전동기부분, 전력변환회로부분, 제어기부분으로 나누어서 모델링을 하고, 모델링되어진 각부분들을 모아서 전체 시스템을 구성하였다.

SPICE로 시뮬레이션하여 제어입력, 전기자전류, 전동기속도 등을 해석하였으며 기존의 시뮬레이션 방법에 의한 결과와 비교하였다. 그 결과 SPICE로 모델링되어진 직류전동기 속도제어시스템이 실제의 동작을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

SPICE를 이용하면 기존의 전자회로 해석뿐만 아니라 전동기 구동시스템도 해석이 가능함을 확인하였다. 따라서 실제상의 오류를 줄이고 원하는 파형의 점검이 훨씬 용이해질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Robert S. Scott, Gerhard A. Franz, and Jennifer L. Johnson, "SPICE-compatible circuit model including interelectrode capacitances for power DMOSFETs", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 2, April 1991.
- [2] Soib B. Taib, L. N. Hulley, Zhaolin Wu, and W. Shepherd, "Thyristor switch model for power electronic circuit simulation in modified SPICE2", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [3] Franc Mihalic, Miro Milanovic, Danilo Zdravec, Karel Jezernik, Erwin Reisinger, Klaus Krischan, Robert Filipitsch and Manfred Rentmeister, "IGBT SPICE macro model", IECON Proc., 1992.
- [4] Yung-Chii Liang and Victor J. Gosbell, "Diode Forward and Reverse Recovery Model for Power Electronic SPICE Simulations", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, No. 3, July 1990.
- [5] L. Salazar, P. Ziogas, and D. Vincenti, "Simple models for SPICE assisted power electronics circuit simulation on PC's", IEEE IAS, Annual Meeting, Pittsburgh, PA, October 1988.

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한
결과일 부분임. 과제번호 : 92-2200-01-01-3