

# SPICE에 의한 브러쉬없는 직류전동기의 전압원 인버터 구동 해석

김 일 환\*

Analysis of VSI Fed Brushless DC Motor Driving Characteristics used by SPICE

Kim Eel-Hwan\*

## Summary

It is very difficult and complicated to analyze the characteristics of inverter fed driving system used by conventional computer simulation. This paper represents the method, which is easy to simulate the inverter fed motor driving system used by SPICE, which was developed as a simulation program for electronic circuits. The results of SPICE simulation are accomplished by the equivalent circuit of model motor and inverter system. The system has 3-phase voltage source inverter fed 120° conduction period using power transistor. Finally, the results of SPICE simulation are verified by comparing with the conventional computer simulation and experiment.

## 서 론

컴퓨터의 발달은 산업자동화 속도를 점점 가속시키고 있다. 이것은 산업현장에서 시스템의 제어성을 향상시키고 고신뢰성의 요구조건을 충족시키고 있다. 반면에 시스템의 구조는 점점 복잡하여짐에 따라 일반적인 컴퓨터 해석방법으로는 시스템의 특성을 정확하게 해석하는데 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 1972년 버클리대학에서 범용 전자회로 모의실험용 프로그램을 개발한것이 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)이다. [1], [5]

이 프로그램은 디지털과 아날로그 및 디지털 아날로그 혼합회로에 대해 직류, 교류, 과도해석등 다양한 해석이 가능할 뿐만 아니라 다양한 전기, 전자회로에 대해서 모의 실험이 가능하고 비선형요소 모두 고려할 수 있다는 특징을 가지고 있다. [5]

또한 회로 해석시 모든 접속점에서의 원하는 특성을 확인할 수 가 있다. 그러나 SPICE를 이용한 논문들은 많지만 그 대부분은 반도체 소자의 특성 해석이고 인버터를 채용한 전동기의 운전특성에 대한 해석은 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 역기전력이 제형파인 브러쉬없는 직류전동기를 120°도통 전압원 인버터로 정상상태로 구동하기 위한 SPICE 모델링 및 해석방법을 제시하고 이를 행한다. 또한

\* 공과대학 전기공학과(Dept. of Electrical Eng., Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

일반적인 컴퓨터 해석방법의 결과와 실제실험의 결과를 비교분석한다.

### 브러쉬없는 직류전동기의 수학적 모델링

브러쉬없는 직류전동기는 회전자가 영구자석으로 되어있고 고정자권선은 3상 Y결선으로 되어있다. 회전자에 유도되는 자속은 일정하며 기동을 위한 재동권선은 고려하지 않는다. 또한 회전자에 유도되는 와전류는 무시한다. (1), (2), (3)

그림1에서 3상 고정자 권선의 회로 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{as} \\ E_{bs} \\ E_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

단  $p=d/dt$

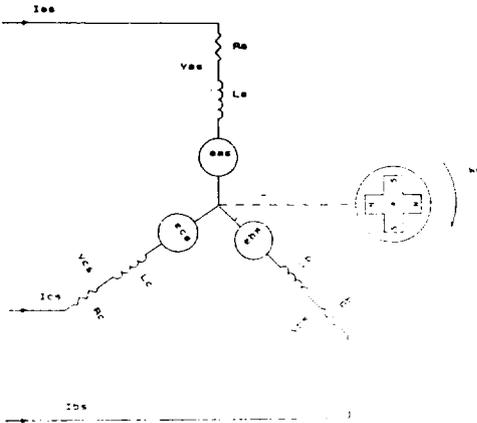


그림 1. 브러쉬없는 직류전동기의 고정자회로  
Fig 1. Stator circuit of brushless dc motor.

각상의 저항과 인덕턴스가 동일하고 회전자 위치에 따른 자기저항의 변화를 무시하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= R_a = R_b = R_c, \quad L = L_a = L_b = L_c, \\ M &= L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에 의해 식(1)은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot p \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{as} \\ E_{bs} \\ E_{cs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

고정자 권선이 3상 Y결선으로 되어있기 때문에

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (4)$$

$$M i_{bs} + M i_{cs} = -M i_{as} \quad (5)$$

이다.

식(4)와 식(5)를 식(2), (3)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \cdot p \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{as} \\ E_{bs} \\ E_{cs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러나 브러쉬없는 직류전동기는 역기전력이 제형파이기 때문에 고정자와 회전자사이의 인덕턴스가 비정현적인 특성을 갖는다. 따라서 영구자석 동기전동기와 같은 dq등가 좌표변환은 큰 의미가 없다. (4)

그러므로 식(5)에서 전개된 a, b, c상 변수 모델을 이용하여 브러쉬없는 직류전동기의 상태방정식을 구하면 다음과 같다.

$$p \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{as} \\ E_{bs} \\ E_{cs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $L_s = L - M$ 이다.

또한 토오크는 a, b, c상에서 발생하므로 발생토오크 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = (E_{as} * i_{as} + E_{bs} * i_{bs} + E_{cs} * i_{cs}) / \omega_m \quad (8)$$

## SPICE 해석

브러쉬없는 직류전동기를 120° 도통 구형과 전압으로 구동하는 인버터 시스템을 SPICE로 해석하기 위한 회로도에는 그림2와 같다. 이때 시스템은 정상 상태로 운전된다. SPICE로 해석하기 위해서는 시스템 회로의 모든 소자에 대해서 접속점을 잡고 각 접속점에 대해 입력 프로그램을 작성하여 실행한다. 그런데 시스템의 회로에서 여러가지의 스위칭 소자가 많은 경우 해석시간을 지연시키는 결과를 초래한다. 이러한 것을 줄이기 위해 각종 소자를 동가화하여 해석한다. 그러나 본 연구에서 사용된 트랜지스터는 6개이므로 트랜지스터를 전압원 스위

표 1. 모델 전동기의 파라미터

Table 1. Parameter of model motor.

정격출력 : 200 [W]	정격전압 : 300 [V]
정격전류 : 0.9 [A]	정격속도 : 1750 [RPM]
상당저항 : 30.4 [ $\Omega$ ]	상당인덕턴스 : 0.121 [H]
역기전력상수 : 0.0514[V/RPM]	
정격토크 : 8.0[Kg-cm]	
관성모멘트 : 5.96[Kg-cm <sup>2</sup> ]	극수 : 4 [poles]

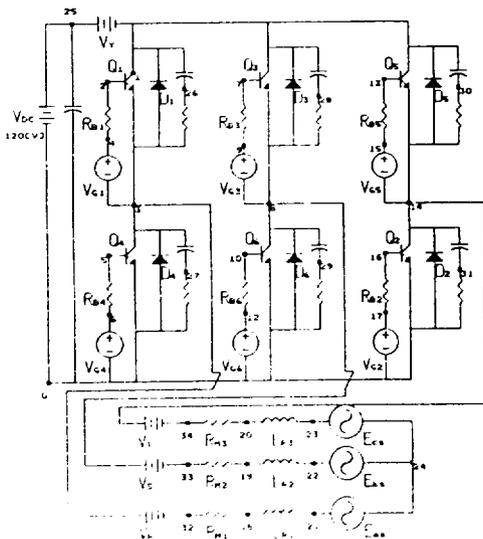


그림 2. 전압원 인버터 시스템 회로  
Fig 2. Circuit of VSI system.

칭소자로 바꾸지 아니하여도 해석하는데는 별다른 지장이 없으므로 트랜지스터 소자를 직접 이용해서 해석하였다.

그림 2는 SPICE로 해석하기 위한 전압원 인버터 시스템 회로이다. 그림 2의 시스템 회로를 SPICE로 해석하기 위한 소스프로그램은 부록과 같다.

## 결과 및 고찰

표 1에서 나타난 모델전동기의 파라메타를 이용하여 전동기의 공급전압은 120[V], 회전속도는 700 [rpm]으로 120°도통 구형과 전압으로 인버터를 구동한다. SPICE해석, 일반적인 컴퓨터 시뮬레이션 그리고 실제실험을 했을때 구동전압, 전류 그리고 발생토크 특성을 나타낸다.

그림 3, 4, 5는 120° 도통 구형과 전압 구동 인버터로 브러쉬없는 직류전동기를 구동할때의 SPICE로 해석하기 위한 여러가지의 파형들이다. 그림 3은 그림 2의 각 Tr에 공급되는 게이팅 펄스 신호이다. 그림 4는 모델전동기의 역기전력 파형이다. 그림 5는 SPICE로 120°도통 구형과 전압 인버터를 구동할때의 전압, 전류, 발생토크 파형이다.

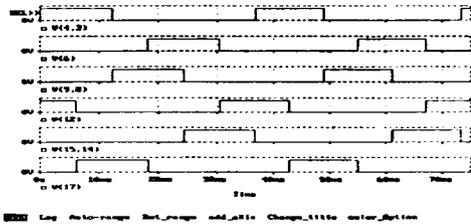


그림 3. 게이팅 펄스  
Fig 3. Gating pulse.

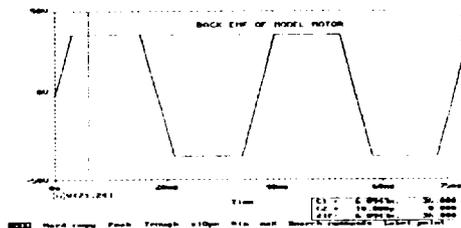


그림 4. 모델전동기의 역기전력 파형  
Fig 4. Waveform of back emf.

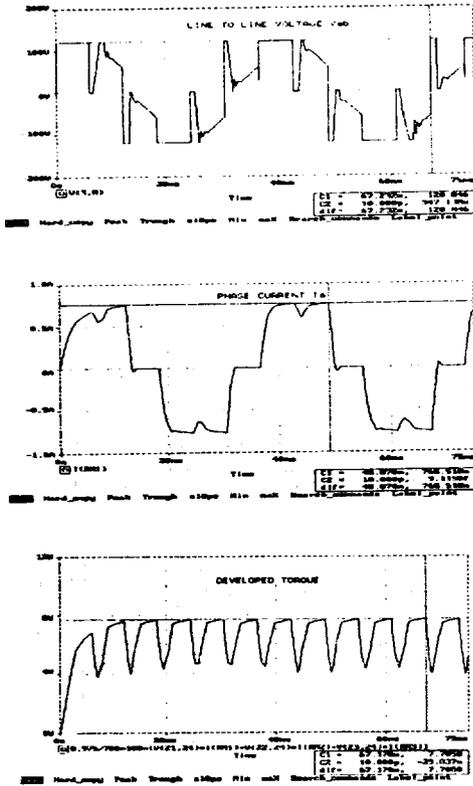


그림 5. 구동 전압, 전류, 발생토크 파형  
Fig 5. Waveform of voltage, current and developed torque.

그림 6은 식 (7), 식 (8)을 이용하여 Runge-Kuntta의 해석 방법으로 일반적인 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였을 때의 전압, 전류, 발생토크 파형이다.

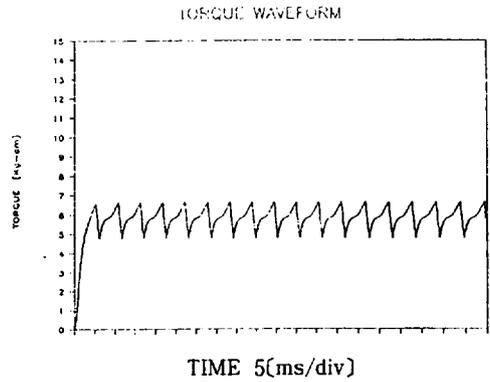
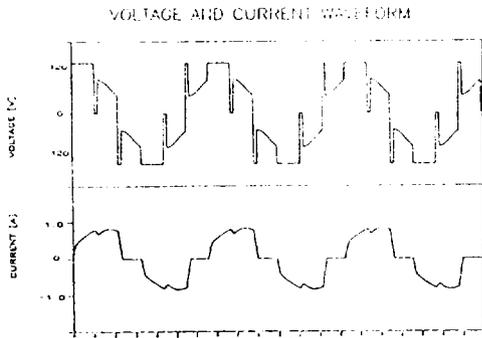


그림 6. 구동전압, 전류, 발생토크 파형  
Fig 6. Waveform of voltage, current and developed torque.

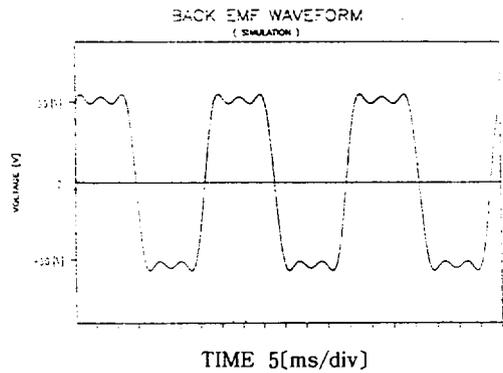


그림 7. 시뮬레이션을 위한 역기전력 파형  
Fig 7. Back emf for computer simulation.

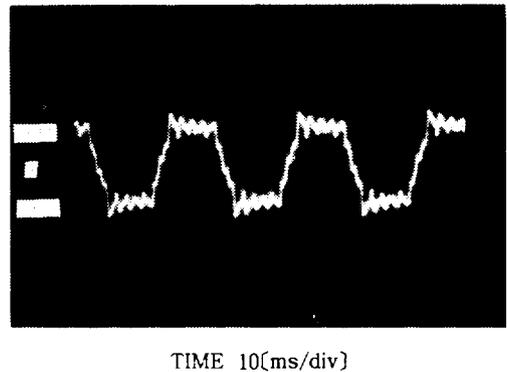
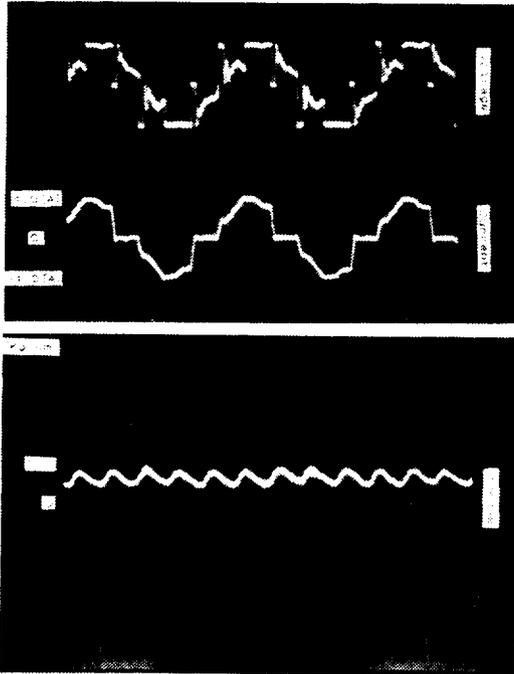


그림 8 모델전동기의 역기전력 파형  
Fig 8. Back emf of model motor.

그림 7은 일반적인 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 모델전동기의 역기전력 파형이다.



TIME 10(ms/div)

그림 9. 구동전압, 전류, 발생토크 파형

Fig 9. Waveform of voltage, current and developed torque.

그림 8은 모델 전동기의 실제 역기전력 파형이다.

그림 9는 실제실험을 했을때의 전압, 전류, 발생토크의 파형이다. 그림 5, 6, 7, 8, 9의 결과를 고찰해 보면 SPICE로 해석할때나 일반적인 컴퓨터 해석시나 실제실험을 통한 파형과 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 인버터 시스템을 설계하는데 아주 간단하게 모의실험을 가능하게 하여 시스템 개발을 하는데 많은 시간을 절약할 수 있고, 또한 모든 접속점의 상태를 정확하게 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

## 적 요

본 연구에서는 SPICE를 이용하여 역기전력이 제형파인 브러쉬없는 직류전동기를 정상상태의 120°동 구형파 전압으로 구동할때의 해석방법을 제시하였다. SPICE로 시뮬레이션하여 전압, 전류 그리고 발생토크를 해석하였으며 기존의 해석방법에 의한 결과와 실제실험에 의한 결과를 비교분석 하였다. 그 결과 전압, 전류, 발생토크 특성이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 SPICE를 이용하면 새로운 시스템을 설계하는데 많은 소요시간과 오류를 줄일 수 있고 원하는 접속점의 파형을 쉽게 점검하는 것이 용이해질 것으로 사료된다.

## 參 考 文 獻

- B. K. Bose, 1986, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 376-373.
- George A. Kaufman and Allan B. Plukett, 1984, Steady-State Performance of Voltage Source Inverter /Synchronous Machine Drive System, IEEE Tran. on Appl., Vol. IA-20, No. 4, July/August, 562-569.
- M. Rashid, Spice for Power Electronics and Electric Power, 1993, Prentice-Hall, 298-308.
- P. Pilly and R. krishnan, 1989, Modeling, Simulation and Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor, IEEE IAS. Annual Meeting, 7-14.
- Roberto R. Nucera, Scott D. Sudhoff and Paul C. krause, 1989, Computation of Steady-State Performance of an Electrically Commutated Motor, IEEE Tran. nInd. Appl., Vol. 25, No. 6, NOV./ DEC., 1098-1105.

부	록	
		RS1 26 3 30
		CS2 3 27 0.01UF IC=0
· OPTIONS WIDTH=80		RS2 27 0 30
VDC 25 0 DC 120		CS3 1 28 0.01UF IC=0
VY 25 1 DC 0		RS3 28 8 30
VR 3 32 DC 0		CS4 8 29 0.01UF IC=0
VS 8 33 DC 0		RS4 29 0 30
VT 14 34 DC 0		CS5 1 30 0.01UF IC=0
VEAS 21 24 PULSE(-36 36 -3.055MS 6.11MS		RS5 30 14 30
6.11MS 12.22MS 36.67MS)		CS6 14 31 0.01UF IC=0
VEBS 22 24 PULSE(-36 36 9.165MS 6.11MS		RS6 31 0 30
6.11MS 12.22MS 36.67MS)		Q1 1 2 3 QMOD
VECS 23 24 PULSE(-36 36 -15.275MS 6.11MS		Q2 14 16 0 QMOD
6.11MS 12.22MS 36.67MS)		Q3 1 7 8 QMOD
D1 3 1 DMOD		Q4 3 5 0 QMOD
D2 0 14 DMOD		Q5 1 13 14 QMOD
D3 8 1 DMOD		Q6 8 10 0 QMOD
D4 0 3 DMOD		· MODEL QMOD NPN (IS=2.2E-15 BF=150 TF
D5 14 1 DMOD		=26.5NS CJC=1PF)
D6 0 8 DMOD		VGR 4 3 PULSE(0 20 0 1NS 1NS 12.2MS
· MODEL DMOD D (IS=2.2E-15 BV=1200 CJO		36.67MS)
=0 TT=0)		VGR1 6 0 PULSE(0 20 18.3MS 1NS 1NS 12.2MS
RB1 2 4 50		36.67MS)
RB2 16 17 50		VGS 9 8 PULSE(0 20 12.2MS 1NS 1NS 12.2MS
RB3 7 9 50		36.67MS)
RB4 5 6 50		VGS1 12 0 PULSE(0 20 -6.11MS 1NS 1NS
RB5 13 15 50		12.2MS 36.67MS)
RB6 10 12 50		VGT 15 14 PULSE(0 20 24.4MS 1NS 1NS
RM1 32 18 30.4		12.2MS 36.67MS)
RM2 33 19 30.4		VGT1 17 0 PULSE(0 20 6.11MS 1NS 1NS
RM3 34 20 30.4		12.2MS 36.67MS)
LM1 18 21 0.121H		.TRAN 10US 75MS UIC
LM2 19 22 0.121H		.OPTIONS ABSTOL=1.00N RELTOL=0.01
LM3 20 23 0.121H		VNTOL=0.01 ITL5=10000.PROBE
CS1 1 26 0.01UF IC=0		.END