

마이크로 프로세서를 이용한 전동차의 4상한 운전에 관한 연구

김 운 호 윤 병 도 * 임 응 규
 중앙 대학교 공과대학 전기공학과

Microprocessor Controlled Four-Quadrant Operation of an Electric Vehicle

Yoon-Ho Kim, Byung-Do Yoon, *Eung-Kyu Lim
 Dept. of Electrical Engineering Chung-Ang University

ABSTRACT

This paper describes an electric vehicle DC-DC drive system capable of delivering motoring current and of generating braking current. The power transistor chopper is adopted to operate a DC series motor. The transistor chopper allows a high chopping frequency and avoids additional inductance in series with the armature winding.

The four-quadrant drive is applied to save the energy. The energy saving is critical in operating the independent power source electric vehicle. Using software simulation, regeneration and braking characteristics are investigated. The microprocessor-based controller is used to operate the whole system.

1. 서 론

전동차에는 기동 모드가 큰 직류 직권 전동기가 일반적으로 쓰이고 있다. 그러나 단일 또는 독립전원을 사용하는 전동차에 있어서는 연료절약이 무엇 보다도 시급한 문제가 된다. 이에 계동이 잦은 차량에서는 마찰제동이나 다이내믹 제동등으로 그 운동 에너지를 모두 소비시켜야만 했으나[6], 제동시 운동 에너지를 발전기에 제부입 함으로써 회생제동을 걸 수 있고 에너지를 재흡수 할 수 있다[1]. 더우기 회생제동을 지하철에 적용시키는 경우에는 지하철도의 온도상승도 막을 수 있으므로 그 이점은 크다. 그러나 회생제동 장치는 다른 제동장치보다 설계가 복잡하다. 이 실험을 위해 초퍼중에서 기동과 회생제동을 검할수 있는 4상한 초퍼를 전력용 트랜지스터와 마그네틱 스위치로 꾸며으며, 이론적으로 기동과 회생제동을 시뮬레이션으로 살펴 보고 실험을 통해 그 결과치를 비교, 검토하였다.

그리고 모든 제어는 Intel 16 bit 8086 마이크로프로세서로 하였고 더우기 본 논문에서는 기동과 정지까지의 모든 과정을 지게차의 경우에 적용시켜 프로그램화 시켰다. 또한 산업현장의 추세에 따라 Intel사의 8051 one-chip 프로세서 회로를 구성하고, 전체 실험을 옮겨 제어 부분의 하드웨어를 더욱 축약시켜 실험성과 경제성까지도 고려하였다.

본 연구에서는 이론적 고찰을 위해 직류 직권 전동기의 수치해석 방법과 선형화 모델로 시뮬레이션을 하였고, 각 초퍼의 구조 및 특성, 몇가지 제동방법의 비교, 그리고 회생제동의 결과를 나타내 보이고 있다.

II. 직류 직권 전동기의 모델링

직류 직권 전동기의 모델은 비선형이며 그 방정식들은 다음과 같이 주어진다[1].

$$e_a = R a_i + L a \frac{di_a}{dt} + k_a \omega + k_{rea} n \quad (1)$$

$$k_a \tau i_a^2 = J \frac{dn}{dt} + B n + T_L \quad (2)$$

위에서 주어진 비선형 방정식을 해석하는 방법은 두가지로 구분될 수 있는데 하나는 비선형 방정식을 선형화 시켜서 선형화 해석을 적용하는 것이고, 다른 하나는 비선형 방정식을 그대로 해석하는 방법이 있다. 먼저 선형화 모델을 살펴보면 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 선형화 모델 해석

정상 상태로 운전중이라 하면 전류는 단방향이기에 때문에 한 주 기동만 인덕턴스를 지나는 평균 전압은 zero이다. 그러므로 식 (1), (2)는 다음과 같이 된다.

$$E_a = I_a R_a + k_a \tau I_a n + k_{rea} n \quad (3)$$

$$k_a \tau I_a^2 = J \frac{dn}{dt} + B n + T_L \quad (4)$$

동작점 부근에서 소신호 왜만을 주고, 라플라스 영역으로 옮기면 그림 (1)과 같은 블록 선도를 얻을 수 있다.

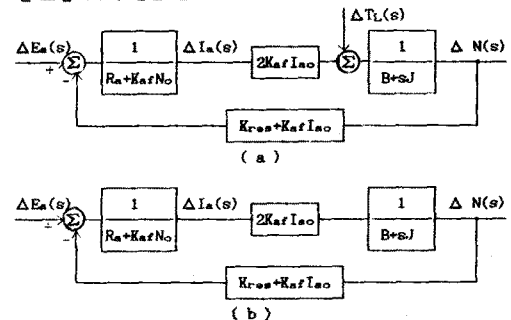


그림 (1) 직류 직권 전동기의 전달 함수 블록 선도

모터 전압의 변화에 대한 응답만을 고려하여 보면 그림 1-a)로부터 그림 (1-b)를 얻을 수 있다.

여기서,

$$\frac{\Delta N(s)}{\Delta E_a(s)} = k_{BN} \frac{1}{1 + s \tau_o} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta I_a(s)}{\Delta E_a(s)} = k_{EI} \frac{1 + s\tau_m}{1 + s\tau_o} \quad (6)$$

2. 비선형 모델 해석

모터 특성을 디지털 컴퓨터에서는 식 (1), (2)의 비선형 미분방정식을 수치적으로 풀어 얻어 낼 수 있다.

식(1), (2)으로부터

$$pI_a = \frac{e_a - R_a I_a - k_a \omega - k_{ra} \omega}{L_a} \quad (7)$$

$$p\omega = \frac{k_a I_a^2 - B\omega - T_L}{J} \quad (8)$$

를 얻을 수 있고, (7)과 (8)의 1계 미분 방정식은 룬지 룬타의 4계 근사법으로 풀 수 있다.

그림 (2)는 수치 해석에 의한 직권 직동기의 기동시 전류와 속도에 대한 그래프이다. 그리고 그림 (3)은 정상 상태에서 전압 왜탄을 주었을 때의 전류 변화를 수치 해석과 선형화 모델로부터 얻은 값을 비교해 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 선형화 모델을 사용하는 경우와 비선형화 모델을 사용하는 경우에는 해석결과에 약간의 차이가 있음을 보여준다. 따라서 본 논문의 전동기 모델의 해석에 있어서는 비선형모델을 사용함으로써 정확도를 갖도록 하였다. 이때 사용된 전동기의 파라미터와 상수 값은 표 (1)에 있다.

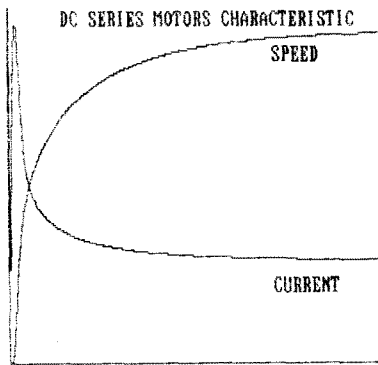


그림 (2). 수치 해석에 의한 직권 전동기의 기동시 전류와 속도 변화

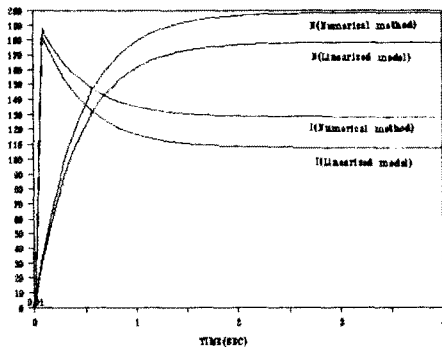


그림 (3). 전압 왜탄시 선형화 모델과 수치해석의 비교

Ⅲ. 직류 직권 전동기의 초퍼 제어

1. 초퍼

초퍼는 직권 전동기의 속도 제어에 있어 전기자와 직렬로 연결되는 저항 대신 쓰일 수 있으며, 또한 초퍼는 모터의 회생제동을

Supply	$I\phi$, 120 V, 60 Hz
Converter	Semi-converter
Motor parameter	K_{af} = 0.027 H
	K_{ra} = 0.0273 V sec/rad
	R_a = 1 Ω
	L_a = 32 mH (include added inductance of 20mH in the armature circuit)
	J = 0.0465 kg-m ²
	B = 0.004 N m sec/rad
Disturbance	ΔE = 5.4 V
Steady-state Operating Point	
	α = 25.8°
	E_a = 102.62 V
	N_o = 1485 rpm
	I_{a0} = 18.72 A
	T_L = 9 N m
Constants	
	R_o = 0.108
	τ_o = 0.432
	τ_m = 11.625
	k_{EN} = 1.807
	k_{r1} = 0.007

표 (1) 직권 전동기의 모델링을 위한 파라미터와 상수값

가능하게 해주기 때문에 에너지를 다시 전원으로 보낼 수 있으며 특히 에너지 절약이 요구되는 맞대리와 같은 독립전원으로 운전되는 차량에 효과적이다.

그림 (4)에서 보는 4상한 초퍼는 E_o , I_o 모두 양방향인 된다. S4는 on, S1이 off일때 S1과 S2는 E_o 를 +, I_o 는 양방향 S2는 on, S1이 off, S3와 S4는 E_o 를 -, I_o 를 양방향으로 만든다. 이 초퍼는 양방향으로 회생시킨다.

4상한 초퍼는 그림(5)에 주어진 두개의 2상한 초퍼의 결합이라 할 수 있다. 본 논문에서는 4상한 초퍼 대신에 2상한 초퍼를 채택하고, 방향전환시는 마그네틱 스위치를 이용하여 4상한 운전을 달성하면서 필요한 소자를 반으로 줄일 수 있도록 설계하였다.

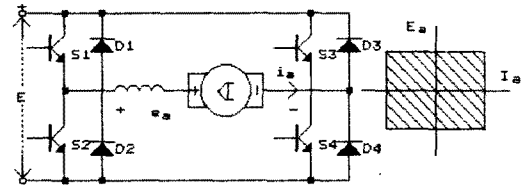


그림 (4) 4상한 초퍼

2. 초퍼 구동에 의한 회생제동

구동 모드에서 전동기 전력을 제어하는 초퍼는 회생제동 모드에서 제동전력을 제어할 수 있다. 회생제동시 초퍼와 프리윙링 다이오드의 위치는 모터링과 반대로 되어야 하지만 구동과 제동시 초퍼의 기능은 같다. 또한 페루프 제어 시스템에 요구되는 제동전류를 유지하기 위하여 on-off비는 조절되어야 한다. 회생제동시 S2는 on되고 양단은 단락된다. 이때 전기자 전류는 상승하고 에너지는 전기자에 직렬로 연결된 리액터에 저장되고, 초퍼가 off되면 아마추어 전류는 전원으로 간다. 따라서 전기자로부터 리액터에 저장된 에너지는 전원으로 방출된다.

그림 (5)는 구동시와 회생제동시 초퍼의 동작을 보여 준다. 회생제동 초퍼의 on-off비를 조절하며 페루프에서 I_a 를 일정하게 유지 할 수 있다. 그리고 속도가 서서히 줄어들어 따라 E_a 도 준다. 그러므로 전기자 전류를 구축하기 위해선 S2의 시간을 더 길게 해 주어야 한다.

3. 소프트웨어 시뮬레이션에 의한 제동 특성 고찰

이상의 식들과 표(1)의 값들로부터 다음의 그림과 같이 전류와 속도에 관한 특성을 얻을 수 있다.

그림 (6)은 기동시 전기자 전류를 정격 전류 (18.72[A])와 정

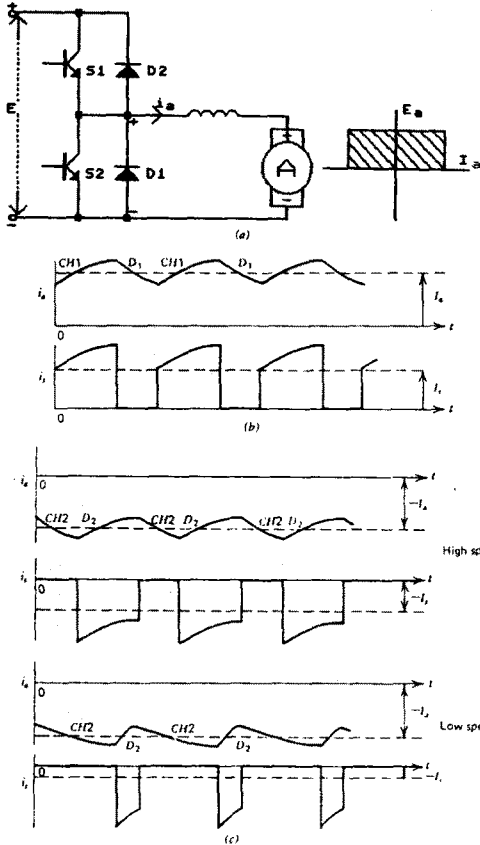


그림 (5) 2상한 초퍼의 응용 (a) 기본 회로, (b) 기동시, (c) 회생제동시

격전류의 1.5배 (28.08[A])에서 초퍼를 on-off한 결과이다. 나머지 상수값들은 표 (1)에 있다. 단위시간을 1/1000초로 하면 결과에서 보듯이 0.4초 후의 속도는 471.2 rpm이다.

정상상태에서 회생제동을 진 결과는 그림 (7)에서 보여 주고 있다. -10[A]와 -20[A]에서 각각 S2를 on-off한 결과 0.4초후의 속도는 1485 rpm에서 1261.8 rpm으로 줄어들었음을 볼 수 있다.

다음에는 회생제동시 제동 정도와 모터의 관성 모멘트에 따라 속도의 감속에 대하여 고찰하여 보았다. 그림 (8)에서는 관성 모멘트 값을 0.0465 [kg m²] 에서 부터 0.3365 [kg m²]까지 단위 0.01 [kg m²] 씩 증가 시켰을때 속도가 정적 속도의 1/2로 줄어들 때까지의 소요 되는 시간을 보여주고 있다. 여기서는 제동을 이 관성모멘트와 거의 선형적임을 알 수 있다.

그림 (9)에서는 관성 모멘트가 각각 0.0456, 0.0565, 0.0665, 0.0765, 0.0865 [kg m²] 에서 초퍼의 제동 전류를 또한 1 [A]부터 30 [A] 까지 변화 시켰을 때 속도가 정적 속도에서 1/2까지 감속 되는데 소요되는 시간을 보여주고 있다. 그림으로 살펴보면 전류 변화에 대한 속도 감쇄율은 비선형적임을 알 수 있고 따라서 이 회생 제동을 디지털 마이크로프로세서에 적용 시킬때에는 각각의 파라미터에 대한 표를 작성하여 원하는 제어를 해야 할 것이다. 또한 관성모멘트의 변화에 대해서는 감쇄율이 비례 적임도 살펴볼 수 있다.

회생제동에 있어선 모터의 운동에너지를 리액터에 에너지를 충전 방전 시키는데 속도의 감속에 따라 어느 속도 이하에서는 초퍼

S2를 on 시켜도 리액터에 원하는 만큼의 충전이 되지 않는다. 그러므로 이 속도 이하에선 초퍼가 더이상 전원에 에너지를 충전 시키지 못하므로 마찰 제동이나 다이나믹 제동등을 같이 해서 모터를 정지 시켜도 된다. 그리고 S2의 on-off 동작이 소멸되는 시간은 각 파라미터와 초퍼의 제한 전류마다 다르다.

그림 (10)의 시뮬레이션 에서는 관성 모멘트를 0.0465부터 0.0865 [kg m²]까지 0.01씩 변화 시키고 각각의 관성 모멘트마다 제한 전류를 1부터 30 [A] 까지 변화 시켰을 때의 S2 소멸 시간을 보여 주고 있다. 이 역시 비선형적임을 알 수 있으므로 회생 제동 이용시 이 시간값들을 표로 작성하여 제동 방식을 바꿔줄 수 있다.

이상의 시뮬레이션들은 오차를 최대한으로 줄이기 위해서 단위 시간 1/30000초로 하였고 앞으로도 더욱 많은 연구가 이루어 지리라 생각한다.

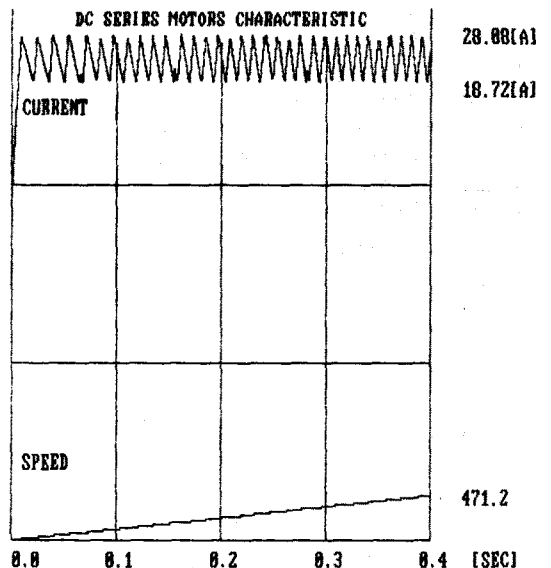


그림 (6) 전동기 기동시 전기와 전류와 속도 특성

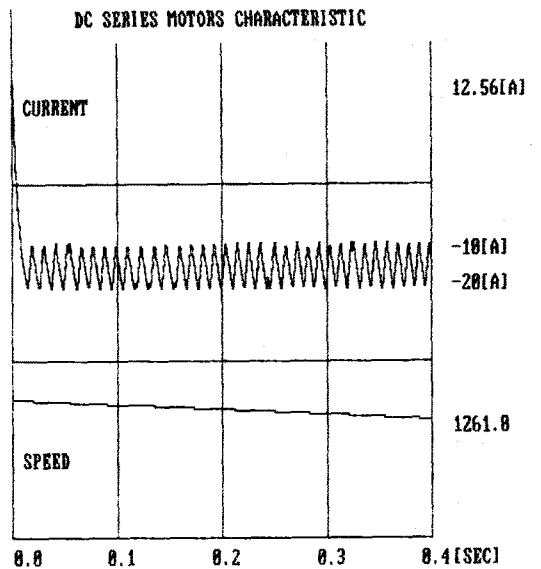


그림 (7) 회생제동시 전기와 전류와 속도 특성

소 주기가 일치하지 않고 있다.

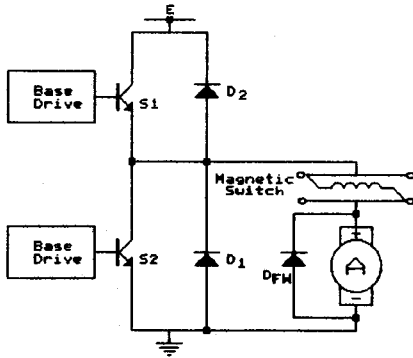


그림 (13) 전동기와 쇼퍼의 구성

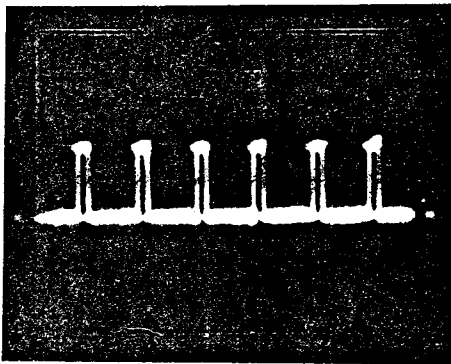


그림 (14) 회생제동시 S2의 on-off 파형

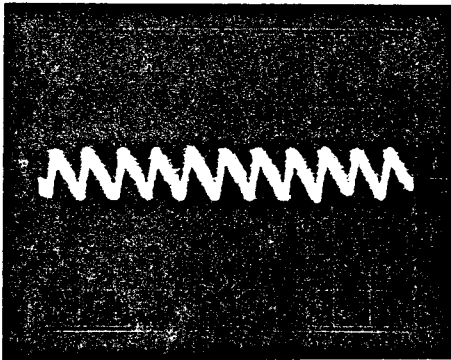


그림 (15) 회생제동시 전기자 전류 파형

V. 결론

본 논문은 직류 직권 전동기의 선형화 모델과 그에 대한 수치 해석과의 비교를 하여 보았고, 파워 트랜지스터를 사용한 쇼퍼의 각 동작을 시뮬레이션과 실험으로 비교, 확인하였다. 특히 직류 직권 전동기를 지계차에 적용한 경우의 운전을 중심으로 모은 하드웨어와 소프트웨어 프로그램을 구성하여 실험하였고 배터리로 운전되는 차량의 에너지 절약에 착안하여 회생제동에 대한 집중 연구를 하여 결과를 얻어 내었다. 또한 모든 제어는 마이크로프로세서를 기초로 하였으며, 더우기 산업현장 추세에 따라 One-Chip 프로세서로도 실험으로 옮겨, 보다 저렴하고, 규격에

있어서도 하드웨어를 최소로 구성하였다. 본 논문의 연구 및 실험 결과는 실제 산업 현장에서 매우 유용하게 이용 될 수 있으리라 기대하고 앞으로 회생 제동에 대한 더욱 많은 연구가 이루어 지리라 생각한다.

참고문헌

1. P.C SEN : " Thyristor DC Drives ", JOHN WILEY & SONS.
2. Intel : " 8-bit Embedded Controller Hand Book "
3. 황 희 용 : " MS-DOS 매크로 어셈블러 ", 교학사.
4. W.G.DUNFORD, S.B.DEWAN : " The design of a Control Circuit for Two-quadrant chopper Based on the Motorola 6800 Microprocessor ", IEEE Trans. on IAS pp.495-500, 1980.
5. VLADIMIR BLASKO : " A Model of Chopper-Controlled DC Series Motor ", IEEE Trans. on IAS pp.207-217, 1985.
6. WILLIAM L. ERDMAN : " Dynamic Braking of DC Machines: A Mathematical Approach ", IEEE Trans. on IAS pp.388-392, 1983.
7. S.B.Dewan and A.Straughen : " Power Semiconductor circuits ", John Wiley & Sons. Inc, 1975.