

# Hybrid Stepping Motor의 Driving Controller 설계와 응용에 관한 연구

(A Study on Applications and Design of Driving Controller Circuit in hybrid Stepping Motor)

최도순\*  
(Do-Sun Choi)

**요약** 로봇과 자동화기에 범용으로 사용되는 Stepping Motor의 Driving을 위하여 unipolar 방식과 bipolar 방식의 Controller Circuit를 design 하였으며 특히 design시 Digital logic을 이용하여 Controller를 설계 제작하여 실험을 통해 그 응용성을 실험하였다. 또한 Motor의 효율 향상을 위하여 Motor의 Winding에 흐르는 전류를 제어하기 위하여 constant Current Limit Methode와 Constant Voltage Limit Methode를 분석하고 설계 회로 제작 시 응용하여 Motor의 효율을 향상시켰다.

**Abstract** The Stepping Motor has applied for engineering technology and that special used to auto mobile technology, robot technology and still more automatic machinery. If it make used to the motor for automatic machinery, that have high precision step of motor and high efficiency. In order to operation in this paper, the static position of motor to have analyzing, comparison of constant voltage control methode and constant current methode. And designd to a controller circuit of 4 phase unipolar driving and 2 phase bipolar driving of stepping motor

## 1. 서론

Stepping motor는 기계를 동작시키는 중요한 부분으로서 산업기계 전반에서 사용된다. 특히 자동차공학, 그리고 많은 중소형 자동화기에 사용된다.

Stepping motor는 field coil의 설치방식에 따라 unipolar 와 bipolar의 두 가지 형태의 운전방식으로 나뉘며 이 두 가지 운전 방식은 다같이 digital control impulse에 의해 stepping motor가 동작한다. motor의 shaft는 매 control impulse에 의해 정해진 만큼의 step을 회전하게되며 control impulse의 속도에 의해 motor의회전속도가 정해지며 rotor position sensing을 위한 sensor는 필요하지 않다. 대부분의 stepping motor는 stator에서 magnet field를 일으키며 여러 개의 독립된 field coil을 가지고 있다. 이에 의해 발생된 magnet field는 그 방향과 intensity를 조절할 수 있다. 이 논문에서는 motor의 효율과 motor step의 정밀도를 높이고 current flow를 보상하기 위하여

\*관동대학교 산업시스템공학과 부교수

current limit를 위한 constant voltage control 과 constant current control 방법에 대하여 분석해 보며 stepping motor의 구동을 위한 unipolar와 bipolar driving circuit를 digital logic을 이용하여 의해 설계하였다.

## 2. Driving Circuit Current Limit

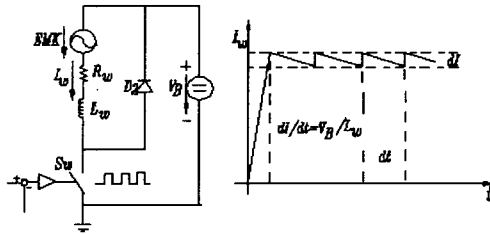
### 2.1. Constant Voltage Control

stepping motor의 coil winding은 inductance  $L_w$  와 resistant  $R_w$ 로 이루어지는데 control을 위하여 control resistant  $R_c$ 를 부가시키면, 이 control resistant  $R_c$ 는 coil winding에 흐르는 전류를 제어한다. <그림1>(a)의 electronic switch  $S_w$ 가 on이 되면 winding에 흐르는 전류  $I_w$ 는 time constant

$\tau = L_w(R_w + R_c)$ 에 의해

$$I_w = \frac{V_B}{R} [1 - e^{-t/\tau}] \quad (1)$$

로 주어지고 <그림1>(b)와 같아진다.



<그림1> (a)voltage control (b) current flow

switch  $S_w$ 가 off 될 때 inductance  $L_w$ 에 저장되었던 에너지는 다이오드  $Z_1$ 과  $D_1$ 을 통해 흐르며 역기전압 (EMK)은 큰 영향을 미치지 않는다.

switch가 ON-OFF될 때 전류의 상승과 하강 곡선이 시간을 따라 곡선을 유지하여 회전 속도는 motor가 얻을 수 있는 최대 회전 속도에 도달하지 못한다. 이 방식은 적절한 인가전압  $V_B$ 와 적절한 control 부가 저항값  $R_c$  그리고 다이오드  $D_1$ 의 전압  $V_2$ 을 선택 하므로써 전류의 상승과 하강 곡선의 상태를 개선시킬 수 있다.  $V_B$ 와  $R_c$  그리고  $V_2$ 는 가능하면 큰 값을 선택해야 한다. 그러나 constant voltage control는 control resistance를 통하여 leakage power  $P_1 = V_B / (R_w + R_c)$ 가 발생하는데 이 leakage power는 motor 내에 열을 발생시킴과 동시에 winding에 흐르는 전류 량을 감소시킨다.

## 2.2. Constant Current Control

<그림2>(a)는 constant current control을 위한 회로도 를 나타낸 것이다. inductance와 resistance로 구성되어 있는 motor의 winding에 주기적으로 변하는 동작전압  $V_B$ 을 인가하여 ON이 되면 time constant  $\tau$ 에 의해 winding에 흐르는 전류  $I_w$ 는 서서히 변한다. 이때 winding의 저항이 적으므로(약 1~2 Ohm) 고려하지 않으면 winding의 전류는

$$\frac{dI_{on}}{dt} = \frac{V_B}{L_w} \quad (2)$$

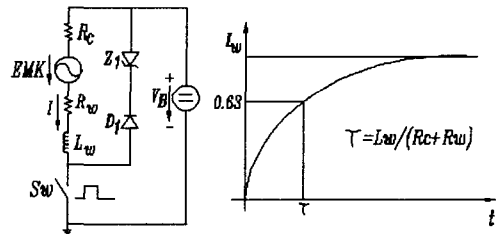
이 되어 급격히 상승하게 된다. current value가 rated value에 도달하면 controller는 인가전압  $V_B$ 을 OFF 시키며 전류는 다이오드  $D_2$ 로 흐른다.

$D_2$ 에서 전압강하  $V_D$ 가 발생하여 current drop이 다음과 같이

$$\frac{dI_{off}}{dt} = \frac{(V_D + I_w \cdot R_w)}{L_w} = \frac{V_D}{L_w} \quad (3)$$

가 일어난다. current controller는 current가 rated value에 도달하면 다시 인가 전압을 ON 시키고 계속 OFF와 ON을 반복하여 <그림2>(b)와 같은 current 파형을 얻게 된다.

<식2>과 <식3>는 current drop이 매우 천천



<그림2> (a) current control (b)current flow

히 일어나며 <그림2>(b)에서 보는 바와 같이 current의 alternating component는 대략적으로 dc current와 같고 current value는 operating current에 거의 가까이 도달하게 된다. 이 때 system의 효율은 constant voltage control /1/ 보다 훨씬 좋아진다.

$dI_{ON}$ 과  $dI_{off}$ 는 절대값에서 같아져 <식2>과

<식3>를  $dI$ 에 대하여 풀고 line current flow에 의해 time difference  $dt$ 를  $\Delta t$ 로 바꾸면

$$\frac{V_B}{L_w} \cdot \Delta t_{on} = \frac{V_D}{L_w} \Delta t_{off} \quad \text{그리고 } L_w \text{는 그 값이 적}$$

으므로

$$V_B \cdot \Delta t_{on} = V_D \cdot \Delta t_{off} \quad (4)$$

가 된다.

주기는  $T = 1/f = \Delta t_{on} + \Delta t_{off}$  이므로

$$\Delta t_{off} = T - \Delta t_{on} \quad (5)$$

이다. <식5>을 <식4>에 대입하면

$$\begin{aligned} V_B \cdot \Delta t_{on} &= V_D \cdot (T - \Delta t_{on}) \\ &= V_D \cdot T - V_D \cdot \Delta t_{off} \end{aligned}$$

$$\Delta T_{on} \cdot (V_B + V_D) = V_D \cdot T$$

$$\Delta t_{on} = V_D \cdot T / (V_B + V_D) \quad (6)$$

이 된다. 전류의 상승 분은

$$dI_{on} = V_B / L_w \cdot \Delta t_{on} \quad (7)$$

<식6>을 <식7>에 대입하고  $V_B/V_D$ 을 매우 크다고 가정하면

$$dI_{on} = T/L_w \cdot V_D \text{가 되며 } T=1/f \text{를 대입하면}$$

$$dI_{on} = V_D/(F \cdot L_w) \quad (8)$$

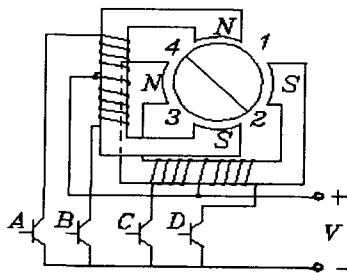
를 얻는다. 위 과정에서 인가전압은 current의 alternating component에 직접적인 영향을 미치지 않지만 인가전압이 증가하면  $V_D$ 와 frequency  $f$ 는 증가하며 motor의 인덕턴스  $L_w$ 는 적어진다. 이때 frequency  $f$ 를 증가 상태로 유지시키면 switching loss가 커지므로 frequency  $f$ 는 16kHz에서 20kHz를 유지시키는 것이 좋다. winding에 흐르는 <그림1>(b)의 전류는 1/2주기의 time constant  $3\tau$ 에 최대치의 95%에 해당하는 값에 이르게 된다. motor의 효율을 높이기 위하여 이 두 가지 형태의 control method가 사용하며 이는 coil winding에 최대의 유효전류를 흐르게 하여 최대 torque를 얻기 위함이다.

### 3. Design of Driving Circuit in Stepping Motor

#### 3.1 Unipolar 구동 Controller

design된 unipolar 구동 controller 회로에 사용되는 stepping motor는 <그림3>와 같으며 상수는 4상이고 2상 여자의 unipolar로 구동된다.

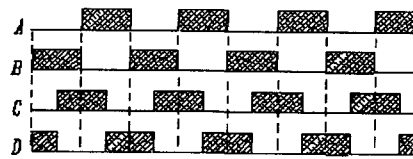
<그림3>에서 철심코일 A와 C가 여자(勵磁) 되면 회전자는 1로 움직이며 철심코일 A와 D가 여자



<그림3> 4상 unipolar stepping motor의 구조

표3.1 unipolar 구동시 철심여자와 회전자 위치

A	B	C	D	rotor위치
0	1	0	1	1
0	1	1	0	2
1	0	1	0	3
1	0	0	1	4



<그림4> motor의 time plan

되면 회전자는 2로 움직인다. 또한 철심코일 D와 B가 여자 되면 회전자는 3의 위치로 움직이며 철심코일 B와 C가 여자 되면 회전자는 4의 위치로 움직이게 된다. 표3.1은 철심의 여자 상태와 그에 따른 회전자 위치를 나타낸 것이다.

<그림4>은 motor의 time plan을 나타낸 것이다

회로를 설계하기 위하여 flipflop이 사용되며 그중 D-Flipflop를 사용한다. D-Flipflop의 출력은  $Q$ 와  $\bar{Q}$ 가 있으며 서로 반대되는 signal을 출력시킨다. <표3.2>은 D-Flipflop의 truth table을 나타낸 것이다.

<표3.1>에 의하면 철심 A의 여자는 철심B의 여자와 각각 반대이고 철심C의 여자와 철심 D의 여자 역시 각각 반대이다.

$$A = \bar{B}$$

$$C = \bar{D} \quad (9)$$

<식9>에 의해 입력단자를 A와 C로 줄일 수 있다. 2개의 D-Flipflop을 사용한다. D-Flipflop의

출력이  $Q$ 와  $\bar{Q}$ 가 있으므로  $D_A$ -flipflop과  $D_C$ -flipflop의 출력에 각각  $Q_A$ 와  $\bar{Q}_A$ 에  $Q_B$ 를

그리고  $Q_C$ 와  $\bar{Q}_C$ 에  $Q_D$ 를 각각 인가시킨다.

표3.2 D-Flipflop의 Truth table

Implus				Output	
PR	CLR	CLK	D	Q	$\bar{Q}$
L	H	x	x	H	L
H	L	x	x	L	H
L	L	x	x	H*	H*
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	x	$Q_0$	$\bar{Q}_0$

여기에 정회전과 역회전을 위하여 control단자  $D_i$ 을 추가하면 입력단자는  $Q_A$ 와  $Q_C$ , 그리고  $D_i$ 가 되며 <표 3.3>와 같은 진리표가 주어진다.

표3.3 좌우회전을 위한 control 단자  $D_i$ 을 추가한 진리표

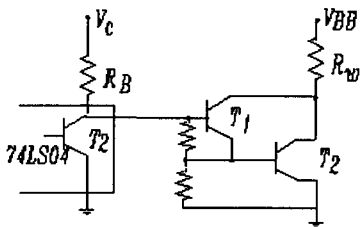
$D_i$	$Q_A$	$Q_C$
0	0	0
0	0	1
0	1	1
0	1	0
1	1	0
1	1	1
1	0	1
1	0	0

여기서  $D_i$ 가 0 일 때는 시계방향으로 그리고 1일 때는 반 시계방향으로 회전한다. 또한 입력에 Emergency switch를 추가하였다.

<표3.3>에 의해 출력

$$\begin{aligned} D_A &= \overline{D_i} Q_C^t + D_i \overline{Q_C}^t \\ D_C &= D_i Q_A^t + \overline{D_i} \overline{Q_A}^t \end{aligned} \quad (10)$$

power transistor는 darlington transistor인 BD679를 사용한다. <그림5>은 transistor BC679를 사용하였을 때 stepping motor의 한 phase 에 흐르는 전류를 제어하기 위하여 open collector resistor을 결정하기 위한 회로도이다. 계산되어진 pull up resistor  $R_b$ 는 motor의 구동전압을 12[V]라 하고 motor one phase 의 coil resistance  $R_w$ 가 24Ω 일 때 47kΩ 이 되고 각 phase에 흐르는 전류는 0.5[A]가 흐른다.



<그림5> pull up resistor를 위한 회로도

pull up resistance의 크기는

$$\begin{aligned} V_C &= R_b(I_B + I_1) + V_{BE1} + V_{BE2} \\ I_1 &= V_{BE1}/10K, \quad V_B = 3.6/R_b \\ V_{BB} &= R_w \cdot I_c + 0.2 \end{aligned} \quad (11)$$

$I_c = \beta \cdot I_B$ ,  $R_b = 3.6/I_B$ 에 의해 구해진다.

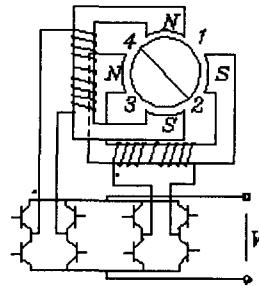
<그림6>는 전체 회로도를 나타낸 것이며 voltage control을 사용한 회로이다.

### 3.2 Bipolar 구동 Controller

design된 bipolar 구동 controller 회로에 사용되는 stepping motor는 <그림7>와 같으며 상수는 2상이고 2상 여자의 bipolar로 구동된다. bipolar 구동은 각상에 흐르는 전류를 +, - 로 교환

하므로써 각상의 극을 주기적으로 바꾼다. <그림7>에서 A상에 + 전류, B상에 - 전류를 흘리면 철심코일 A와 D가 勵磁 되고 회전자는 1로 회전하며, A상의 전류는 그 상태로 두고 B상의 전류를 -에서 +로 변환시키면 철심코일 D와 B가 勵磁되고 회전자는 2로 회전한다. 다음은 B상의 전류를 그대로 두고 A상의 전류를 +에서 -로 변환시키면 철심코일 B와C가 勵磁되고 회전자는 3의 위치로 움직인다.

A상의 전류는 그대로 두고 B상의 전류를 +에서 -로 전환시키면 철심코일 A와 C가 勵磁되면 회전자는 4의 위치로 움직이게 된다.

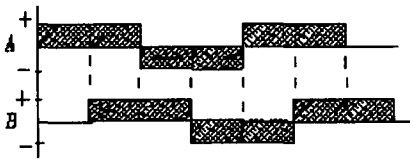


<그림7> bipolar stepping motor

표3.4는 철심의 勵磁 상태와 그에 따른 회전자 위치를 나타낸 것이다. <그림8>은 bipolar stepping motor의 time plan 이다.

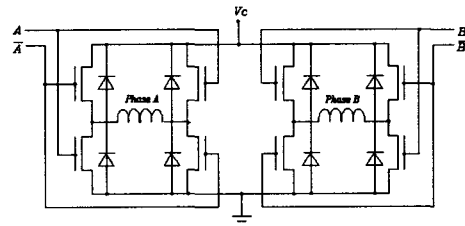
표3.4 bipolar 구동시 철심여자와 회전자 위치

A상	B상	rotor 위치
+	-	1
+	+	2
-	+	3
-	-	4



<그림8> motor의 time plan

motor의 bipolar 구동을 위해 1상에 4개의 transistor가 사용되며 총 8개의 transistor가 사용된다. transistor는 MOS-FET transistor BUZ20를 사용한다. <그림9>은 bipolar 구동회로를 보인 것이며 A상에 +전류가 흐를 때  $T_1$ 과  $T_4$ 가 그리고 -전류가 흐를 때  $T_2$ 와  $T_3$ 이 동작한다.



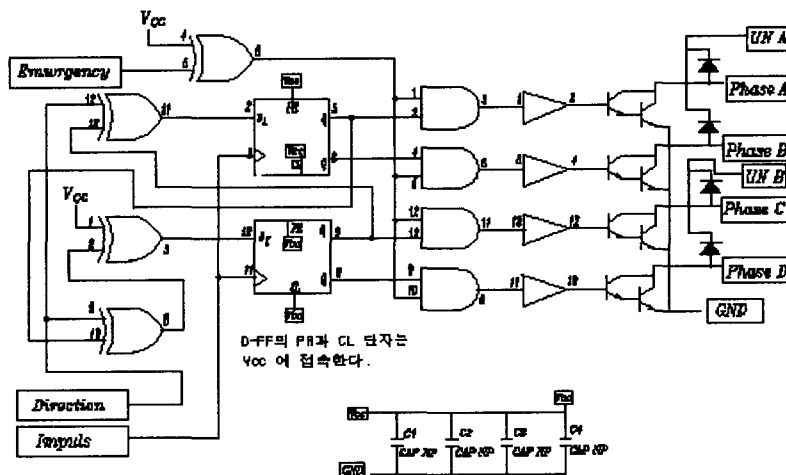
<그림9> bipolar driver circuit

controller 회로를 design하기 위하여 D-Flipflop을 사용 하였으며 2개의 D-Flipflop의 출력은  $Q_A$ 와  $\overline{Q_A}$  그리고  $Q_B$ 와  $\overline{Q_B}$ 의 control signal은 시프트 레지스터 회로를 위해 사용된다.

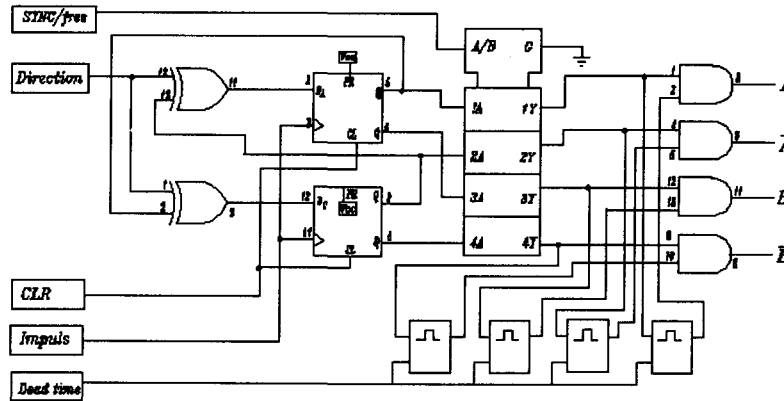
$$D_A = D_i \overline{Q_B} + \overline{D_i} Q_B$$

$$D_B = D_i \overline{Q_A} + \overline{D_i} Q_A \quad (12)$$

<그림9>은 bipolar driving controller 회로를 보인 것이 다.



<그림6> unipolar driving controller circuit



<그림10> bipolar driving controller circuit

<그림10>에서 SYNC/free는 control logic을 결정한다. 즉 full step 혹은 half step/3/

dead time는 transistor on/off시 transistor의 on/off에 충분한 시간을 주기 위한 signal의 time delay를 발생시키기 위한 단자.

#### 4. 결 론

stepping motor의 효율적 사용을 위한 저 전력 고효율을 위하여 current limit를 분석해 보았다. constant current control은 switching시 stator current의 increase을 유도 할 수 있어서 구형파 전류를 얻을 수 있으며 voltage control은 leakage power로 인한 전력 손실과 winding에 흐르는 전류 량을 감소시킨다. 또한 stepping motor의 구동을 위하여 4 phase unipolar 구동controller 회로와 2 phase bipolar 구동 controller 회로를 design 하였다. bipolar 구동 controller 회로는 범용으로 사용 가능하며

특히 unipolar 구동controller 회로는 open collector chip의 pull up resistance를 변화시킴으로써 광범위하게 크고 작은 stepping motor에 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] P.P. Acarnley and P. Gibbons  
Closed-loop Control of Stepping Motors  
IEE.vol.129.Pt.B.no4.1982.pp211~216

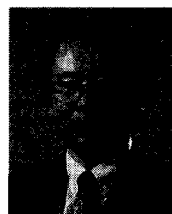
[2] P.P. Acarnley

Stepping Motor Guide to modern Theory and Practice. Revised 3rd Edition  
IEE Control Engineering Series 19 Peter Perengrinus Ltd. London 1992.

[3] L.W.Langlay and H.K.Kidd

Closed-loop Operation of Linear Stepping Motor Under Microprosser Control  
Proc. international Conference On Stepping Motors and System University of. Leeds England. 1979 pp 32~36

[4] B.C .Kuo Step Motor and Control System Chapter 6 SRL. Publishing Company Champaign Illinois 1999.



최 도 순 (Do-Sun Choi)

1972년 숭실대학교 전자공학과  
공학사

1988년 독일 Berlin 공대 전기  
전자공학 공학석사

1993년 독일 Berlin 공대 전기  
기계공학 박사

현재 관동대학교 산업 시스템 공학과 부교수

관심분야 : motor control, sensor 전기기계