

# Bifilar-Wound Hybrid Step Motor의 상호 인덕턴스를 고려한 구동회로

김 운 호, 윤 병 도, 이 백 행\*  
 중앙대학교 공과대학 전기공학과

## A new drive circuit for the Bifilar-Wound Hybrid Step Motor considering mutual inductance

Yoon-Ho Kim, Byung-Do Yoon, Baek-Hang Lee\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Chung-Ang Univ.

**Abstract** - In this paper, a drive circuit for a bifilar-wound hybrid step motor considering mutual inductance and back-emf is investigated. For the suppression circuit, the variation of average torque and torque ripple due to the effect of mutual inductance and back-emf is presented. In order to improve the performance of the motor, a new control scheme is also proposed.

### 1. 서 론

스텝 모터는 입력 펄스 신호를 기계적인 회전으로 변환하는 모터로 최근 사무 자동화나 공장 자동화와 관련한 디지털 장치들에 유용하게 사용될 수 있으며, 일반적으로 개루프 제어로 위치제어나 속도제어가 가능하고, 각 스텝 마다의 오차가 누적되지 않는다는 등의 장점을 갖고 있다. 그러나 스텝 모터 시스템의 특성은 기계적인 구조, 구동회로, 전류(commutation)방식, 그리고 제어 방법과 밀접한 관계를 가지게 된다.

스텝 모터는 순수한 릴럭턴스 성분에 의해 회전하는 가변 자기제어형과 영구자석 성분에 의한 영구자석형, 그리고 영구자석형과 가변 자기제어형의 복합형인 하이브리드형으로 크게 나눌 수 있다.

스텝 모터의 권선방식은 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 각 극(pole)에 한 방향으로만 권선을 감는 방식인 유니파일러 권(unifilar winding)과 한 극에 서로 다른 방향으로 두 번 권선을 감아서 반대의 극성을 갖도록 하는 방식인 바이파일러 권(bifilar winding)이 있다. 바이파일러 권은 유니파일러 권에 비해 더 큰 토크를 발생시킬 수 있고, 덜핑 특성이 좋으며, 단극성 전원에 의해 양 방향 구동이 가능하다는 장점이 있는 반면, 권선의 이용 효율이 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 바이파일러 권(bifilar-wound) 하이브리드 스텝 모터 구동시, 권선의 상호 인덕턴스와 역기전력에 의한 영향을 고려해 운전 특성을 개선하는 구동회로와 제어방식을 제안하였다.

### 2. 모터 모델링

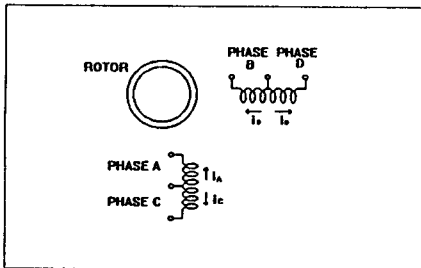


그림1. 2상 바이파일러 권선 하이브리드 스텝 모터의 모델링

그림1에 나타난 것과 같은 2상 바이파일러 권(bifilar wound) 하이브리드 스텝 모터를 모델링 하였으며, 중간에 탭이 있는 것을 알 수 있다. 여기서 상 a와 c, 그리고 상 b와 d는 거의 완벽하게 자속결합이 되어있다고 가정한다.

따라서 k번째 상의 자속 쇄고수는 k 번째 상 권선 전류에 의한 자속 쇄고수와, 권선상의 다른 반쪽 전류에 의한 자속 쇄고수, 그리고 영구 자석에 의한 자속에 기인하는 것을 알 수 있고 이것은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \lambda_{aa} + \lambda_{ac} + \lambda_d \\ \lambda_b &= \lambda_{bb} + \lambda_{bd} + \lambda_c \\ \lambda_c &= -\lambda_a \\ \lambda_d &= -\lambda_b \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_k$ 는 권선 k에서의 전체 자속이고,  $\lambda_{kj}$ 는 권선 j에 흐르는 전류에 의한 권선 k에서의 자속이다. 그리고  $\lambda_{kj}$ 는 영구자석에 의한 권선 k에서의 자속이다.

모든 k번째 상의 인덕턴스가  $L_k = L$ 이고 와류전류(eddy current)가 무시된다면, 자기 인덕턴스로 인한 자속쇄고수는  $\lambda_{kk} = Li_k$ 가 되고, 상호 인덕턴스로 인한 j번째 상의 자속쇄고수는  $\lambda_{jk} = -\lambda_{kj}$ 가 된다.

이러한 자속과 전류사이의 관계에 의해 식(1)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L(i_a - i_c) + \lambda_d \\ \lambda_b &= L(i_b - i_d) + \lambda_c \end{aligned} \quad (2)$$

이다.

모터의 단자에서 측정되는 전압은

$$v_k = r\dot{i}_k + \frac{d\lambda_k}{dt} \quad (3)$$

과 같이 표현되며, 여기에서  $k=a, b, c, d$  이고  $r_0$ 는 상당 저항이다.

식(2)를(3)에 대입하면 아래식을 얻을 수 있다.

$$v_a = r\dot{i}_a + L(i_a - i_c) + \dot{\lambda}_d \quad (4a)$$

$$v_b = r\dot{i}_b + L(i_b - i_d) + \dot{\lambda}_c \quad (4b)$$

$$v_c = r\dot{i}_c - L(i_a - i_c) - \dot{\lambda}_d \quad (4c)$$

$$v_d = r\dot{i}_d - L(i_b - i_d) - \dot{\lambda}_c \quad (4d)$$

또, 식(2)와(3)에서

$$\dot{\lambda}_a = \frac{1}{2} [v_a - v_c] - \frac{r_0}{2L} \lambda_a + \frac{r_0}{2L} \lambda_d \quad (5a)$$

$$\dot{\lambda}_b = \frac{1}{2} [v_b - v_d] - \frac{r_0}{2L} \lambda_b + \frac{r_0}{2L} \lambda_c \quad (5b)$$

을 얻을 수 있다.

$\lambda_d, \lambda_c$ 는 영구자석으로 인한 자속쇄고수로서 모터의 회전자 위치에 영향을 받게되며

$$\lambda_a = k_0 \cos(\theta) \quad (6a)$$

$$\lambda_b = k_0 \sin(\theta) \quad (6b)$$

로 표현되고, 여기서  $k_0$ 는 영구자석으로 인한 자속상수이고,  $\theta$ 는 회전자의 위치이다.

(단,  $\theta = N_{\text{pole}} \theta_m$ 이고,  $\theta_m$ 는 회전자의 기계적 위치,  $N_{\text{pole}}$ 는 회전자의 치수)

순시 상전류 방정식은 모터의 모델에서 찾을 수 있으며, 상전압과 상태변수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$i_a = \frac{1}{2r_0} [v_a + v_c] + \frac{1}{2L} [\lambda_a - \lambda_b] \quad (7a)$$

$$i_b = \frac{1}{2r_0} [v_b + v_d] + \frac{1}{2L} [\lambda_b - \lambda_a] \quad (7b)$$

$$i_c = \frac{1}{2r_0} [v_a + v_c] - \frac{1}{2L} [\lambda_a - \lambda_b] \quad (7c)$$

$$i_d = \frac{1}{2r_0} [v_b + v_d] - \frac{1}{2L} [\lambda_b - \lambda_a] \quad (7d)$$

2상 하이브리드 스텝 모터에 의해 발생하는 순시 토크는

$$T_B = \left[ \frac{K_T}{L} (-\lambda_a \sin(\theta) + \lambda_b \cos(\theta)) - k_m \sin(4\theta) \right] \quad (8)$$

이고, 여기서  $k_T$ 는 토크 상수,  $k_m$ 는 영구자석으로 인한 최대 토크이다.

순시 토크를 한주기 동안 적분하면 평균 토크를 구할 수 있으며, 평균 토크는 아래와 같이 표현된다.

$$T_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \frac{k_T}{L} (-\lambda_a \sin(\theta) + \lambda_b \cos(\theta)) \right] d\theta \quad (9)$$

토크 리플은 아래와 같이 정의 할 수 있고,

$$T_{ripple} = \sqrt{T_{rms}^2 - T_{avg}^2} \quad (10)$$

여기에서

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_B^2 d\theta}$$

이다.

### 3. 구동회로와 시스템의 운전 특성

일반적으로 이용되는 2상 바이파일러 권선 하이브리드 스텝 모터의 전체적인 구동 시스템은 그림 2 와 같다.

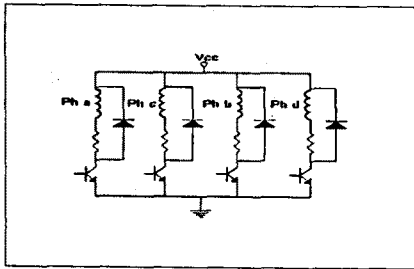


그림 2. 스텝 모터의 일반적인 구동회로

스텝 모터의 한 상에 대한 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있고,

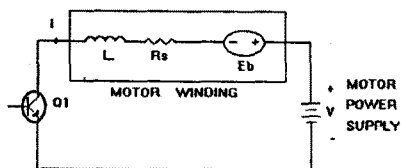


그림 3. 스텝모터 권선의 등가회로

여기서 역기전력은

$$E_b(t) = -K_0 \sin(N_p \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (11a)$$

$$E_b(t) = K_0 \cos(N_p \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (11b)$$

으로 나타낼 수 있으며, 바이파일러 (bifilar) 권선의 경우 여자되지 않은 권선 양단의 상 전압을 측정하면 역기전력 전압과 인덕턴스에 의한 전압강하의 합이 된다.

즉, A 상을 여자했을때 C 상의 전압을 측정하면

$$V_m = M \frac{di_a}{dt} - K_0 \sin(N_p \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (12)$$

의 전압이 나타난다. 이 식에서 우변의 첫번째 항은 상호인덕턴스의 영향에 의한 유기전압을 나타내고 있다.

이때 여자되지 않은 코일에 유기된 전압에 의해 제한 (suppression) 회로를 통한 전류가 흐르게 하고, 이때 흐르는 전류는 모터의 발생 토크와 토크 리플을 좋지않은 영향을 미친다. 본 논문에서는 상호 인덕턴스와 역기전력에 의해 여자되지 않은 상에 전류가 흐르는 것을 제한함으로써 모터의 운전 특성을 개선하는 방법에 대해 고찰한다.

#### 3.1 다이오드 제한(suppression) 회로

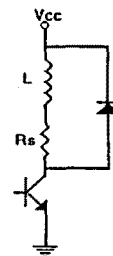


그림 4. 다이오드 제한(Suppression) 회로

트랜지스터의 턴-오프시 권선에 자기 인덕턴스의 영향에 의해 순간적으로 매우 높은 전압이 유도되어 트랜지스터가 파괴 되는 일이 발생하는 경우가 있는데, 이것을 방지하기 위해 제한(suppression) 회로를 사용한다.

그러나, 다이오드 제한회로를 사용하는 경우, 여자되지 않은 상에 역기전력과 상호 인덕턴스에 의해 다른 제한회로에 비하여 큰 전류가 흐르게 되고, 이는 토크 식과 그림 6과 7에서 알 수 있는 것처럼 발생 토크를 감소시키고 리플을 증가시키는 부정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점들을 비교적 간단하게 보완할 수 있는 회로가 다음에 설명하는 다이오드-저항 제한(suppression) 회로이다.

#### 3.2 다이오드-저항 제한(suppression) 회로

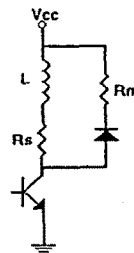


그림 5. 다이오드-저항 제한(Suppression) 회로

그림 5.에 나타난 다이오드-저항 제한(suppression) 회로는 다이오드 제한회로에 저항을 추가하여 트랜지스터가 턴-오프 되었을 때 자기 인덕턴스에 의해 순간적으로 유기된 전압에 때문에 흐르는 활류(free-wheeling) 전류의 감소를 빠르게 하는 장점이 있는 반면에, 저항값이 너무 크면 트랜지스터의 에미터-컬렉터 간의 전압이 상승하여 트랜지스터를 효과적으로 보호하기가 어렵다.

제한(suppression) 회로에 저항을 삽입하면 역기전력과 상호 인덕턴스에 의해 흐르는 전류를 감소시켜주는 역할도 하게 되는데, 다이오드에 부가된 저항  $R_m$ 과 평균 토오크의 관계가 그림 6에 나타나 있고,  $R_m$ 과 토오크 리플 인자(torque ripple factor)와의 관계를 그림 7에 나타내었다.

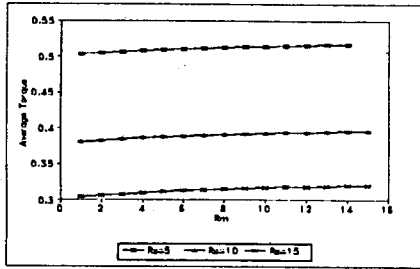


그림 6. 다이오드에 직렬로 연결된 저항  $R_m$  값의 변화에 대한 평균 토오크의 변화

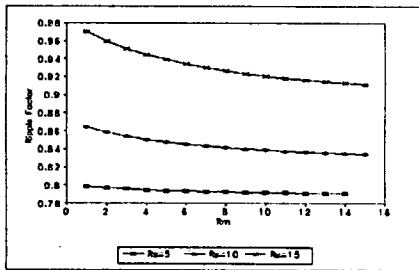


그림 7. 다이오드에 직렬로 연결된 저항  $R_m$  값의 변화에 대한 토오크 리플 인자(factor)의 변화

다이오드 제한회로에서 저항값이 증가함에 따라 모터의 특성은 좋아지나, 손실도 같이 증가하게 되는데 이 관계가 그림 8에 나타나 있다.

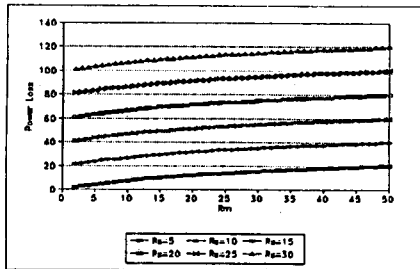


그림 8 다이오드에 직렬로 연결된 저항  $R_m$ 의 변화에 대한 소비전력의 변화

이때 저항  $R_m$  값을 크게 하면 여자되지 않은 상에 흐르는 전류를 제한해서 발생 토오크를 크게하고, 토오크 리플을 줄이는 등의 장점이 있으나, 앞에서 언급한 것 처럼 그 상이 여자되었다가 턴-오프 될 때에는 코일의 자기 인덕턴스에 의해 트랜지스터 양단에 큰 전압이 유기되어 트랜지스터가 손상될 우려가 있으므로 저항값을 크게 하는에는 한계가 있다.

#### 4. 상호 인덕턴스의 영향을 최소화하는 새로운 구동회로

다이오드-저항 제한(suppression) 회로에서 저항값이 커지면 역기전력과 상호 인덕턴스에 의한 전류를 줄이는데는 효과적이지만, 그 상이 여자되어 트랜지스터가 턴-오프 될 경우에는 자기인덕턴스에 의해 유기된 전압이 트랜지스터를 파괴할 우려가 있으므로, 트랜지스터를 보호하면서 유도 전류를 효과적으로 차단하는 방법을 제안한 것이 그림 9에 나타나 있다. 여기에서는 다이오드-저항에 스위치를 추가로 삽입하여 활류(free-wheeling) 전류가 흐르는 순간에만 스위치를 온(ON) 상태로하고 그 이외의 순간에는 오프로하여 역기전력과 상호 인

덕턴스에 의해 흐르는 전류를 완전히 차단하는 방법이다. 이 경우 스위치를 추가해야 하는 번거로움이 있으나, 모터의 운전 특성을 현저히 개선할 수 있다.

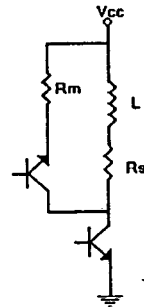


그림 9. 저항과 스위치를 추가한 제한(Suppression) 회로

공급전압 30V, 권선의 자기 인덕턴스  $L=40mH$ , 권선에 직렬로 연결된 저항  $R_s=10$  [ohm] 이라할 때, 각각의 제한(suppression) 회로에 대한 특성을 비교한 것이 표 1에 나타나 있다.

	평균 토오크	실효 토오크	토오크 리플	리플 인자
다이오드만 있는 경우	0.380221	0.502574	0.328653	0.864374
$R_m=20$ [ohm] 인 경우	0.398765	0.518795	0.331867	0.822237
$R_m=50$ [ohm] 인 경우	0.404904	0.525783	0.335411	0.828373
스위치가 추가된 경우	0.533596	0.680371	0.422114	0.791074

표 1. 각 제한(suppression) 회로에 의한 특성 비교

#### 5. 결 론

스텝 모터의 각 상이 여자되었다가 오프될 때, 권선의 자기 인덕턴스에 의해 순간적으로 유기되는 높은 전압으로부터 트랜지스터를 보호하기 위해 제한(Suppression) 회로가 필요하다. 그러나 이 제한회로를 통해서 바이파일러(Bifilar) 권선의 상호 인덕턴스와 모터의 역기전력때문에 유도된 전류가 흐르게 되어 모터의 특성 - 평균 발생 토오크나 토오크 리플 등 - 에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이런 문제를 어느 정도 해결할 수 있는 방법이 다이오드에 직렬로 저항을 삽입한 제한회로이지만, 이 방법에서는 저항값을 크게하여 유도전류를 줄일 경우 트랜지스터의 보호에 문제가 생기게 된다.

이런 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 제한(suppression) 회로에 스위치를 추가하여 적절한 순간에 스위칭 함으로써 트랜지스터를 효과적으로 보호하면서 모터의 운전 특성도 개선하는 구동방식을 제안하였다.

#### 참고문헌

- [1] Takasi Kenjo, *Stepping motor and their Microprocessor Controls*, Clarendon Press, Oxford 1984.
- [2] B.C.KUO ed. *Incremental Motion Control Step Motor and Control System*. VOL 2. SRL Publishing Company, Champagin ILLINOIS 1979.
- [3] Maher Jaroudi and Ronald H.Brown 'Torque Prediction for Efficient Commutation Strategy of Bifilar Hybrid Step Motors', IEEE. pp.411-pp.417, 1989.
- [4] Delgads, M.A. 'Mathematical Model of a Stepping Motors', IEEE trans. on Automatic Control, Vol.AC-14, No.4 pp.394 - pp.397, Aug. 1969.