

## 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터의 모델링 및 토크특성해석

최두성\*<sup>o</sup> 백수현\* 김용\* 윤신용\* 정일록\*\* 장흥순\*\*\*  
 \*동국대학교 \*\*국립환경연구원 \*\*\*중소기업청

### Analysis of Torque Characteristics And Modeling of 4Phase And 5Phase Hybrid Type Step Motors

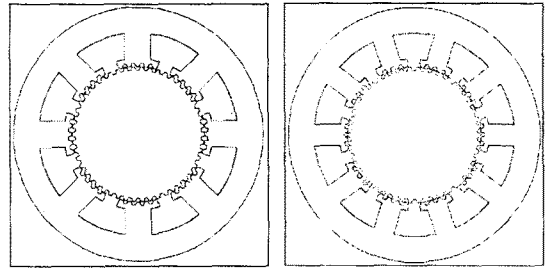
D.S.CHOI\*<sup>o</sup> S.H.BAEK\* Y.KIM\* S.Y.YUN\* I.R.CHUNG\*\* H.S.CHANG\*\*\*

\*Dongguk University \*\*National Institute of Environmental Research \*\*\*S.M.B.A

**Abstract** - 영구자석형 하이브리드 스텝모터는 저가이며 개루프 제어 장치와 더불어 기계적인 제어시스템분야에서 광범위하게 이용되어 왔다. 서보모터 기술의 발달에 따라 영구자석형 스텝모터는 고토크, 정밀제어의 응용분야에 있어 중요한 위치를 계속 점유하고 있다. 스텝모터는 외관으로서 작용하는 부하의 영향에 대해 안정한 견고성을 가지며, 적당한 속도와 양호한 분해능의 조합으로 신뢰도가 높고, 구조상 단순한 특징을 갖고 있다. 최근 저가의 개루프 위치제어 장치에 2상 스텝모터와 5상 스텝모터 중에서 어느 것이 더 적합한가에 대한 기술적인 주제가 주목할 만한 문제로 대두되고 있다. 이 두 기기의 구조는 거의 유사하며 같은 원리로 동작한다. 본 논문에서는 이 두 기기의 동작이 명백히 비교될 수 있는 기본적인 수준으로 돌아가서 두 모델을 고찰했다.

#### 2.1 치의 경계면

그림 1의 (a), (b)는 각각 4상모터와 5상모터의 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 모델에서 단지 고정자의 구조만이 서로 다르다.



(a)4상 스텝모터 (b)5상 스텝모터  
 그림1. 하이브리드형 스텝모터의 단면

#### 1. 서론

정밀 소형 모터의 설계기술은 대부분 실험적 데이터에 기반을 두어왔다. 따라서 제조공정에 있어서 많은 비용, 경험, 그리고 시간을 필요로 한다. 최근 고성능 컴퓨터가 등장함에 따라 많은 기술자들이 전기기계를 해석, 설계하는데에 수학적 방법을 채택하고 있다. 다른 전기기계들과는 달리 그 구조상 스텝모터는 매우 작은 공극을 갖고, 고정자 치와 회전자 치의 형상은 토크특성에 커다란 영향을 준다. 그리고 대부분의 스텝모터는 치 끝에서의 자속밀도가 철심재료가 갖고 있는 자속밀도의 포화점 부근에서 동작되고 있기 때문에 스텝모터의 설계시 자계 해석과 비선형 계산이 반드시 필요하다. [1]~[4]

본 논문에서는 전자장 수치해석을 이용하여, 모터 내부의 형상을 모델링하고 유한요소법 패키지인 MAXWELL 3D Simulator를 사용하여 정확한 자장해석을 함으로써 4상과 5상 하이브리드형 스텝모터를 모델링하고 토크특성을 해석하고자 한다.

#### 2. 모터의 동작원리 및 구조

영구자석형 하이브리드 스텝모터는 영구자석에 의해 자화된 회전자의 치를 고정자 극면에 감겨진 권선에 다양한 조합과 순서로 전류를 흘려 자화된 고정자 치와 배열시킴으로써 얻는다. 회전자는 공극의 기자력과 외부에서 작용된 회전력 사이에서 평형을 찾는데 이 회전력은 회전자를 이동시킨 변위의 함수에 대해서 반환토크를 발생한다. 고정자권선에 흐르는 전류의 설정은 일정한 위치로 회전자를 이동시키기 위한 시퀀스를 미리 설정한다. 4상과 5상모터의 고정자 구조와 치 배열의 차이에서 기인하는 서로 다른 토크특성을 비교하기 위해 먼저 두 스텝모터에 대한 고정자 치와 회전자 치 사이의 관계를 고찰함으로써 공극퍼미언스 모델을 구현하고, 자기회로의 해를 얻음으로써 모터의 토크 식을 도출할 수 있다.

회전자 치와 고정자 치의 배열을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 그림 2에 하나의 고정자 극면에 있는 치와 회전자 사이의 경계면을 나타내었다. 전 경계면에 있어 회전자 치가 7.2° 이동할 때 공극의 위상은 360° 변화한다. 즉, 임의의 한 회전자 치가 고정자 치와 일렬로 배열된 상태에서 회전자가 7.2° 이동하게 되면 회전자 치는 또다른 고정자 치와 일직선으로 위치한다.

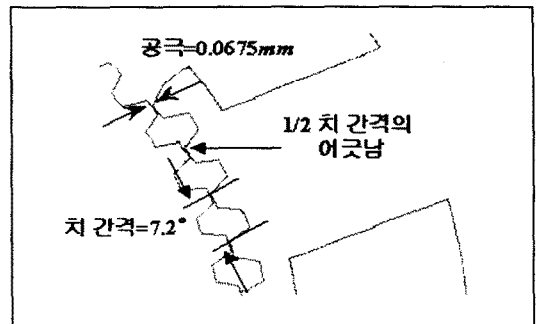


그림2. 회전자와 고정자 치의 경계면

축을 중심으로 마주하고 있는 극면 쌍의 극면은 전자기적으로 하나의 상을 형성하도록 동일한 공극위상으로 치를 두고 있다. 이러한 EM위상의 수는 위상정수 k로 나타낸다. 또한 위상당 치의 수  $\tau$ 는 연합된 극면에 존재하는 치의 합이 된다. 4상 스텝모터와 5상 스텝모터에 있어서  $\tau$ 는 상대적으로 10과 8이다. 그러므로 그림 1에 보듯이 5상모터는 4상모터에 비해 더 좁은 극면을 갖

는다. 고정자 내에서 회전자를 회전시키면 극면에 있는 치는 공극 위상의 증가분  $\delta$  만큼 위상이 이동한다.

$$\delta = \frac{2\pi}{k} \text{ radians} \quad (1)$$

이제 우리는 회전자의 위치에 따른 모터 변수의 변화를 고찰하기 위해 치 경계면 상의 공극위상  $\theta$ 를 정의할 필요가 있다. 회전자의 치가 극면에서 정확히 치 대 치로 배열되어 있다면  $\theta=0$ 이 된다. 물론 이러한 배열은 50개의 회전자 치일 경우 발생된다. 이때 회전자의 기계적 위치  $\theta_r$ 은  $\theta_r = \frac{\theta}{50}$ 로 정의된다. 그러므로 회전자 N극 스택의 x상 극면에 대한 공극위상은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\theta_{xN} = \theta + x\delta \quad (2)$$

여기서 x는 위상지수이며  $x=0, 1, \dots, k-1$ 이다.

또한 회전자의 N극 스택으로부터 x상의 r치로 공극을 통해 흐르는 자속은 식(3)과 같다.

$$\phi_{xN} \text{ (weber)} \quad (3)$$

## 2.2 회전자의 구조

지금까지는 회전자의 N극 스택에 대해서만 논했지만 모터의 완전한 모델링을 위해 측면으로 바라본 회전자의 구조를 고려해야만 한다. 그림 3에서 보듯이 회전자는 두 개의 분할된 스택과 그 사이에 일정한 양의 자속  $\phi_{PM}$ 을 발생하는 영구자석으로 구성되어 있다.

$\phi_{PM}$ 은 축방향으로 N극 스택에서 공극을 통해 고정자 극면으로 흐르며, 방사방향으로는 회전자로부터 고정자 극면으로 치의 경계면을 통해 흐르고 있다.

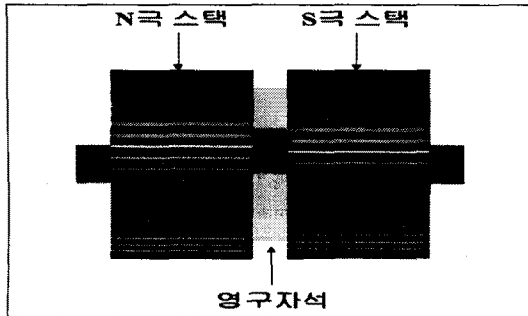


그림3. 4상과 5상모터의 회전자구조

그림 3에서 회전자 S극 스택의 치들이 N극 스택의 치와 치간격의 반 피치만큼씩 어긋나 있는 점에 주목해야 한다. 이것은 극면상에 또다른 공극 경계면을 부여한다. 식(2)의 우변에 치간격의 반피치에 해당하는  $\pi$  (radians)를 더함으로써 우리는 회전자 S극 스택에 대한 공극의 위상은 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_{xS} = \theta + x\delta + \pi \quad (4)$$

또한 S극 스택에서 x상의 극면을 통과하는 자속은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{xS} \text{ weber} \quad (5)$$

## 2.3 모터의 수학적 모델 및 동작 토크

고정자 극면에 감긴 권선에 흐르는 위상이  $\Psi$ 인 여자 전류에 의해 x상에서 발생하는 기자력은 식(6)과 같이 표현된다.

$$F_x(\Psi) = NI \cos(\Psi - x\delta) \quad (6)$$

전기적위상은 모터가 일정한 속도로 회전하는 경우 식(7)과 같이 표현된다.

$$\Psi(t) = \omega t + 2\pi f t \quad (7)$$

여기서 f는 구동전류의 주파수이다. 모터는 회전자로 하여금 공극의 위상이 전기적위상과 같게 되도록 토크를

발생하게 된다. 이것을 동작 Detent 토크라 하여  $T(\theta, \Psi)$ 로 표시하며 이것은 모터에 전류가 흐르지 않을 경우의 무여자 Detent와는 구별된다. 왜냐하면 고정자 권선에 흐르는 전류의 위상  $\Psi$ 가 변화함에 따라 동작 Detent가 이동하고 형태가 변형되기 때문이다. 이러한 형상의 변화는 토크맥동과 주기적인 오차를 발생하는 원인이 된다. 따라서 스텝모터에 있어서 이런 요인들을 제거하는 것이 설계상의 주안점이 되고 있다. 동작 Detent를 해석하기 위해 본 논문에서는 선형적인 모델을 채택하였으며 제시된 공극퍼미언스 모델은 강자성체 철심이 그 B-H특성곡선의 선형영역에서 동작하는 것을 전제로 하였다. 회전자 N극 스택의 x상에서 발생하는 토크는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_x(\theta) = -\frac{\partial W_x(\phi_x, \theta)}{\partial \theta} \quad (8)$$

$W_x$ : 공극에서의 에너지

여기서 공극에너지  $W_x$ 는 식(9)와 같다.

$$W_x = \frac{\phi_x^2}{2P_x} \quad (9)$$

$P_x$ : x상의 공극 퍼미언스

$\phi_x$ 가 일정한 경우  $\theta_r = \frac{\theta}{50}$ 임을 고려하여 식(9)를 식(8)에 대입하여 풀면 식(10)과 같이 표현된다.

$$T_x(\theta) = 25 \frac{\phi_x^2}{P_x^2} \cdot \frac{\partial P_x}{\partial \theta} \quad (10)$$

식(10)은 모터의 전체 토크 식을 도출하는데 기준이 된다. 식(10)을 풀기 위해서는 그림 4와 같이  $U_x$ 와  $P_x(\theta)$ 로 표현되는 자기회로 모델의 해석이 필요하다.  $\phi_x = U_x P_x$ 임을 고려한 토크 식(10)은 식(11)과 같이 표현된다.

$$T_x(\theta) = 25 U_x^2 \cdot \frac{\partial P_x}{\partial \theta} \quad (11)$$

그림 4에서 회전자 N극 스택에서의 공극퍼미언스  $P_x(\theta)$ 는 식(12)와 같이 표현된다.

$$P_x(\theta) = r \sum_{h=0}^{\infty} P_h \cos(h\theta + hx\delta) \quad (12)$$

$P_h$ : h차 고조파 퍼미언스

r: 위상당 치의 수

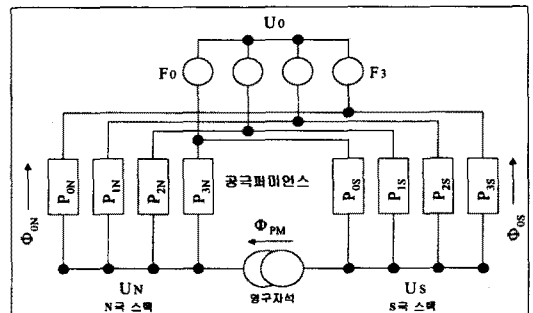


그림4. 4상모터의 등가 자기회로

그림 4의 자기회로모델에서 회전자 N극 스택에 대하여 절점방정식을 적용하면

$$\phi_{PM} = \sum_{x=0}^3 (U_{Nx} + F_x(\Psi)) P_x \quad (13)$$

식(13)으로 되며 N극과 S극 스택 공극에서의 자기 포텐셜은 각각 식(14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{xN} = \frac{\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{N-1} F_x(\Psi) P_x(\theta)}{\sum_{x=0}^{N-1} P_x(\theta)} + F_x(\Psi) \quad (14)$$

$$U_{xS} = \frac{-\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{N-1} F_x(\Psi) P_x(\theta + \pi)}{\sum_{x=0}^{N-1} P_x(\theta + \pi)} + F_x(\Psi) \quad (15)$$

따라서, 모터 전체의 발생 토크는 식(16)과 같다.

$$T(\theta, \Psi) = \sum_{x=0}^{N-1} (T_{xN} + T_{xS})$$

$$= 2S \sum_{x=0}^{N-1} \left\{ \left| \frac{\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{N-1} F_x(\Psi) P_x(\theta)}{\sum_{x=0}^{N-1} P_x(\theta)} + F_x(\Psi) \right|^2 \frac{\partial P_x(\theta)}{\partial \theta} \right.$$

$$\left. + \left| \frac{-\phi_{PM} - \sum_{x=0}^{N-1} F_x(\Psi) P_x(\theta + \pi)}{\sum_{x=0}^{N-1} P_x(\theta + \pi)} + F_x(\Psi) \right|^2 \frac{\partial P_x(\theta + \pi)}{\partial \theta} \right\} \quad (16)$$

### 3. 4상 모델과 5상 모델의 시뮬레이션 결과 비교

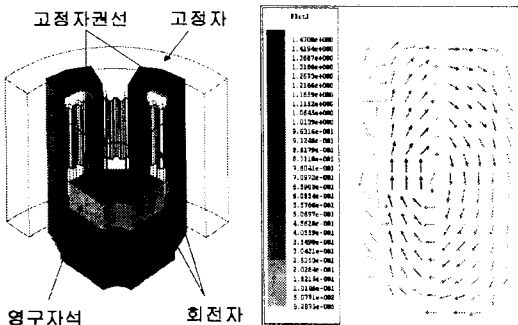
이상에서 살펴본 이론을 바탕으로 본 논문에서는 회전자, 영구자석, 회전자와 고정자의 치 형상, 그리고 고정자 권선의 NI값이 동일한 4상과 5상 하이브리드형 스텝 모터에 대하여 동작 Detent 토크를 해석하기 위해 유한요소법 비선형계산 패키지인 Maxwell 3D Simulator를 사용했다. 또한 권선의 발열에 대하여 두 시스템을 비교한다. 해석될 모델의 기본적인 사양은 표.1과 같이 나타내었다.

표.1. 4상과 5상 모터의 치수

	4상 모터	5상 모터
회전자 반경	22.5325mm	22.5325mm
회전자 폭(스택당)	25mm	25mm
회전자 치의 수	50	50
고정자 내경(외경)	21.45(40.25)mm	21.45(40.25)mm
고정자 폭	61mm	61mm
고정자 치의 수	40	40
공극의 길이	0.0675mm	0.0675mm
영구자석	AlNiCo5	AlNiCo5
영구자석 반경	17.3mm	17.3mm
영구자석 폭	11mm	11mm
NI값	168AT	168AT
위상당 치의 수	10	8

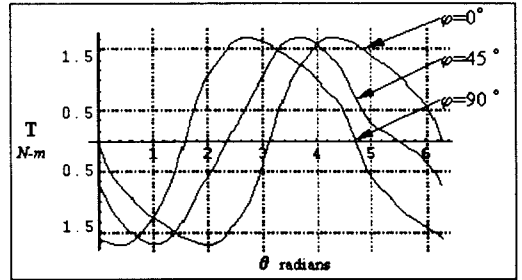
#### 3.1 4상 모델

그림 5는 4상 모터의 모델을 보이고 있다. 그림 5의 (b)는 정자계영역에서 해석한 모터 표면에서의 자속밀도를 나타낸다. 동작 Detent에 가장 크게 영향을 미치는 것이 공극에서의 퍼미언스 값이므로 공극에 대한 해석은 매우 중요하다.

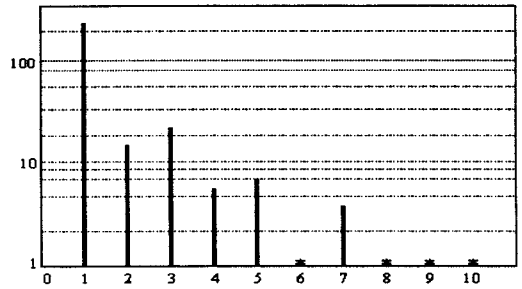


(a) 4상 모터의 외관 (b) 4상 모터의 자속밀도 분포  
그림5. 4상 스텝모터의 외관 및 자속밀도 분포

4상모터의 동작 Detent 토크의 파형은 그림 6에 나타낸 것이다. 그래프의 수평축은 회전자의 기계적 변위를 나타내며, 수직축은 동작 Detent값을 나타낸다. 만약 회전자가 자유롭게 움직이고 마찰이나 외부토크에 영향을 받고 있지 않다면, 그림 6.(a)의 Detent파형은 수평축을 지나는 점에서 평형이 될 것이다. 이 그래프에서 전기적 위상  $\Psi$ 의 값은 각각  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 전기적 위상이 변화하면 Detent의 파형이 왜곡되고 있다. 이러한 요인은 스텝모터의 실제적인 구동 시 전기적 위상이 균일한 증분으로 진행하게 되면 회전자는 주기적인 위치오차를 갖도록 만든다. 그림6, (a)는 파형에서 나타난 고조파 성분을 해석하기 위해 FFT변환을 적용한 결과 동작 Detent의 스펙트럼은 그림 6, (b)와 같이 나타난다. 그림에서 수직축은 Detent의 log값이다.



(a) 4상 모터의 동작 Detent 토크 파형



(b) 고조파 스펙트럼

그림6. 4상 모델의 동작 Detent 해석결과

#### 3.2 5상 모델

그림 5 (a)에 보인 4상 모터의 고정자를 5상 모터의 고정자로 대체할 경우 5상 모터의 모델을 얻을 수 있다. 4상모델에서와 같이, 5상 모터에 대하여 해석과정을 진행한 결과 5상 모터의 동작 Detent의 스펙트럼을 그림 7에 보이고 있다. 이 그림에서 기본파와 제2고조파 성분의 크기가 4상과 일치하는 것으로부터 두 모델에서 발생하는 유효토크는 동일하다는 것을 알 수 있다. 하지만 4상에서 보이던 제3~제8고조파 성분은 나타나지 않고 있다. 이것으로 5상 모터가 회전자의 주기적인 위치오차나 토크맥동이 4상 모터에 비하여 월등히 저감된다는 사실을 알 수 있다.

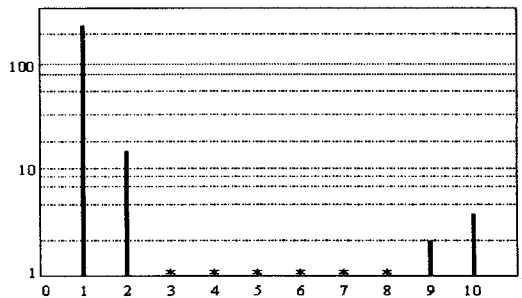


그림 7. 5상 모터의 동작 Detent 스펙트럼

### 3.3 권선의 발열

앞에서 비교된 모델은 동일한 회전자, 같은 크기의 기자력과 NI값을 갖는다는 전제에 기초를 두고 있었다. 마지막으로 두 모델의 서로 다른 고정자 구조로 인한 열손실의 차이를 살펴보고자 한다. 그림 8은 고정자극편에 감겨 있는 권선의 단면을 나타낸다. 권선의 유효단면적은 A로 표시되어 있다. 비교를 하기 위해 식 (6)을 다시 표현하면 식(17)과 같다.

$$F_x(\Psi) = NI \cos(\Psi - x\delta) = A J_x(\Psi) \quad (17)$$

여기서  $J_x(\Psi)$ 는 x상의 전류밀도이다.

윗 식을  $J_x(\Psi)$ 에 대하여 정리하고 권선의 고유저항을  $\rho$ , 권선의 길이를 l 이라고 하면 x상에서의 손실 p는 식(18)과 같이 된다.

$$p_x = 2\rho J_x^2 A l = \frac{2\rho(NI \cos(\Psi - x\delta))^2 l}{A} \quad (18)$$

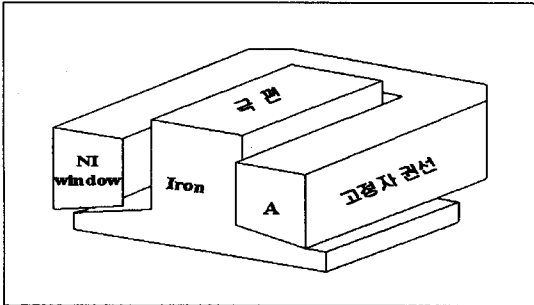


그림8. 고정자 권선의 유효단면적

4상과 5상 모델의 권선 유효단면적은 각각 1A와 0.8A로 들 수 있으므로 두 모델에서 발생하는 총 열 손실은 식 (19), (20)으로 표현된다.

$$p_4 = \frac{8\rho(NI)^2 l}{1A} \quad (19)$$

$$p_5 = \frac{10\rho(NI)^2 l}{0.8A} \quad (20)$$

5상에서의 열손실은 4상모터보다 약 56%이상 높기 때문에 고정자의 온도상승은 결과적으로 권선의 저항을 증가시키게 되어 이것은 발열문제를 더욱 악화시키는 결과를 초래하게 된다.

## 4. 결 론

본 연구에서 5상 스텝모터는 동일한 NI값에 대해 4상 스텝모터와 같은 크기의 Detent 토크를 발생한다. 또한 5상 모터는 토크맥동과 주기적인 오차를 야기시키는 고조파성분이 4상에서보다 훨씬 작다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 5상 하이브리드형 스텝모터는 정밀한 위치 제어나 부드러운 동작을 요구하는 시스템에 적합할 것이다. 하지만 4상 모델보다 열손실이 56%이상 높기 때문에 5상 하이브리드형 스텝모터를 일정한 온도로 동작하도록 하기 위해서는 NI값을 줄여야 할 것이다. 또한 이것은 NI값의 감소에 비례하여 동작 Detent 토크가 감소할 것이다. 추후 스텝모터의 구동방식(full step, half step, microstep)에 대하여 두 모델의 동작 Detent 토크의 타당성을 검증하고, 그리고 가상의 모델에 대한 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 일반적인 시스템에 사용되고 있는 실제 모터에 대해 실험함으로써 본 논문에서 해석한 결과를 입증하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

[1] Nobuyuki Matsui, "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, NO. 5, pp.1176~1180, 1996

[2] Jack Nordpuist, "Technological Review of 5-Phase and 4-Phase Step Motors", Intelligent Motion, October 1993 Proceedings, pp.259~274, 1993

[3] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", pp.25~99, 1992

[4] Benjamin C. Kuo, "Theory and Applications of Step Motors", pp.120~153, 1974