

## 자동제어용 스텝핑 모터(I)

- 원리와 응용 -

## Principle and Application of Control Stepping Motors

이대원\*

D. W. Lee

## 1. 서 언

제어용 구동장치는 증분구동 구동장치(Incremental-drive actuator)와 연속구동 구동장치(Continus-drive actuator)로 구분할 수 있다. 증분구동 구동장치로 스텝핑 모터가 있고, 연속구동 구동장치(Continus-drive actuator)로 AC 모터, DC 모터, 유압장치 등이 있다. 여기서는 스텝핑 모터(Stepper Motor), 스텝 모터(Step Motor)라고도 부르는 디지털 스텝핑 모터(Stepping Motor)에 관하여 기술하고자 한다.

스텝핑 모터는 고출력, 고응답성, 고분해능이 아닌 정보기기나 사무기기 등의 분야에서 급속히 발전하여 왔다. 그래서 많은 응용분야에서 스텝핑 모터에 요구되는 점은 고출력, 고응답성, 고분해능, 소형, 박형화이다. 입력 펄스(Pulse) 즉 디지털 명령(Digital Command)으로 스텝핑 모터는 구동된다. 특히 디지털 제어 명령회로가 마이크로 프로세서의 단일칩화로 저가격화, 고기능화되어 마이컴 응용기기 분야에서 광범위하게 스텝핑 모터를 이용하고 있다.

시스템의 구동장치를 제어할 때 요구되는 소

요 속도, 토오크, 분해능(Resolution), 반복성(Repeatability) 등을 고려한 적당한 구동장치의 선택은 매우 중요하다. 제어용 모터를 처음 사용할 때 적당한 모터의 구입은 무엇보다 중요하다. 다른 종류의 제어용 모터와 스텝핑 모터의 장단점을 비교한 후 스텝핑 모터의 장점을 많이 가진 경우에는 스텝핑 모터를 선택하고 그렇지 않으면 다른 종류의 모터를 선택하여야 할 것이다. 스텝핑 모터를 구입하기로 결정한 후에 어떤 종류의 스텝핑 모터를 구입하여야 적당한 한지를 결정하여야 할 것이다. 적당한 스텝핑 모터를 구입하기 위해서는 스텝핑 모터의 종류에 따른 원리, 선택 그리고 적용에 관하여 이해하는 것이 필요할 것이다. 이들에 관한 이해를 돕기 위하여 이것들에 관하여 서술하고자 한다.

## 2. 스텝핑 모터의 분류

스텝 운동에 의한 모든 구동장치를 스텝핑 모터라고 부르기 때문에 스텝핑 모터를 자세하게 분류한다는 것은 어렵다. 가장 널리 사용되고 있는 회전자 성질 또는 스택(Stack)의 갯수에 따

\* 성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

큰 스텝핑 모터를 분류하고자 한다.

스텝핑 모터의 회전자 성질에 따라 연성금속(Soft-iron) 회전자를 가진 VR(Variable-reluctance) 스텝핑 모터와 자장을 띤 회전자를 가진 PM(Permanent-magnet) 스텝핑 모터로 구별하며 VR 모터와 PM 모터의 두가지 특성을 모두다 가진 하이브리드(Hybrid) 모터가 있다. 이 종류의 모터들은 다소 비슷한 방식으로 작동한다.

VR 스텝핑 모터는 회전자가 자장을 띠지 않기 때문에 고정자 권선에 전류가 흐르지 않을 때 정지 토크(Holding Torque)가 존재하지 않는다. 따라서 기계적인 브레이크를 사용하지 않을 경우 전원이 공급되지 않으면 어떤 하중 상태에도 견딜 수 없다. 그렇지만 영구적으로 자장을 띤 회전자를 가지고 있는 PM 스텝핑 모터는 자력에 의한 정지 토크를 가지고 있다. 그러므로 정지 토크를 요구하는 곳에서는 모터의 생산성, 가격면, 성능면을 고려하여 PM형과 HB형 스텝핑 모터가 주류를 이루고 있다. 현재 구입할 수 있는 이들 모터의 일반적 특징은 표 1과 같다.

Table 1 Characteristics of PM, HB and VR stepping motors

kinds	PM type	HB type	VR type
step angle	large	small	large
torque	low	high	medium, high
cost	low	high	high

회전자 축의 존재 즉 “스택(Stack)”의 갯수에 따라 단스택 모터와 다스택 모터로 분류할 수 있다. 더 세부적인 분류는 회전자 치차의 피치와 고정자 치차의 피치를 고려할 경우에 가능하다. 단스택 스텝핑 모터에서 회전자 피치와 고정자 피치는 일반적으로 같지 않도록 해야 한다. 왜냐하면 어느 순간에도 고정자의 모든 치차가 회전자의 치차와 일렬로 되지 않기 때문이다. 각 운동의 스텝이 증가할 때 회전자는 고정자의 극 분표에 대응하는 최소 자기저항 위치로 회전한다.

적어도 회전자 치차의 한 스택이 다른 스택으로부터 회전 이동하면, 다스택 스텝핑 모터에

있어서 등 피치 스텝핑 모터의 작동이 가능하다. 각각의 운동 스텝을 위하여 구동토크를 발생시키는 내부 스택은 일직선이 아니기 때문이다. 또한 비등 피치 다스택 스텝핑 모터가 또한 실제적으로 가능하다. 좀더 자세한 설명은 작동의 원리를 참고하기 바란다. 지금까지 묘사된 스텝핑 모터의 분류가 그림 1에 요약되어 있다.

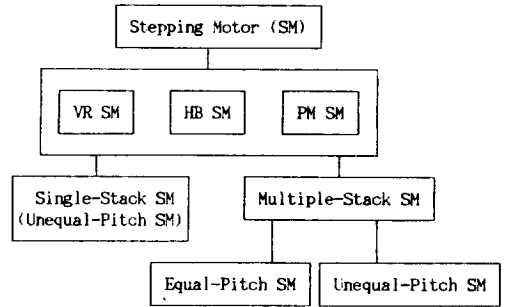


Fig. 1 Classifications of stepping motors

### 3. 작동의 원리

스텝핑 모터는 고정자의 양쪽 극(Pole)을 N, S로 전환할 수 있는 몇 쌍(Pair)의 전자계 권선(Winding)을 갖고 있다. 양극의 극성이 전환될 때 스텝핑 모터는 회전한다. 두가지 방법으로 극성을 전환할 수 있다. 한 방법은 권선의 전류 방향을 변환하는 것이고 다른 한 방법은 권선의 두쌍(Two Pairs)을 이용하여, 이들 양쪽 쌍의 극성을 반대가 되도록 하는 것이다.

그림 2는 스텝핑 모터의 작동원리를 설명하기 위한 스텝핑 모터의 개략도이다. 고정자는 90°로 배치된 2조의 권선 즉 2상(Phase)을 가지고 있다. 이러한 배열은 고정자 내에서 4개의 돌출극(Salient)을 가지고 각각의 극은 인접한 극으로부터 기하학적으로 90°이다. 회전자는 N극과 S극으로 이루어진 영구자석이다. 각 상은 3개의 상태 즉 1, 0, -1 중에 하나를 가진다. 여기서 1 상태를 양 방향으로 전류가 흐르는 상태, -1 상태를 음 방향으로 전류가 흐르는 상태, 그리고 0 상태를 전류가 흐르지 않는 상태라고 정의 한

다.

적당한 순서대로 두 상의 전류 방향을 바꾸어서 시계방향 혹은 반시계 방향으로 회전하도록 할 수 있다. 연속적인 시계 방향의 회전은 그림 3에 나타나있다.  $S_i$ 는  $i$  번째 상을 표시한다. 이 모터에 있어서 스텝각은  $45^\circ$ 이다. 한 스텝의 회전 후에는 항상 회전자는 고정자 내에서 최소 리럭턴스(Reluctance) 위치에 놓인다. 이것은 정상 평형배치 상태이며 여기서 회전자가 멈춤으로 최소 자기 저항 멈춤위치라고 한다. 다음 스텝을 위하여 고정자 전류 상태가 전환되면 최소 자기저항 위치는 스텝각 만큼 회전하고 회전자는 그에 대응하는 정상 평형위치에 놓인다.

표 2는 완벽한 시계방향 회전과 반시계 방향으로 회전하는 연속적인 방법을 보여준다. 시계 방향의 스텝핑 연속성은 상하 방향으로 표를 읽는 것과 같으며, 반시계 방향의 스텝핑 연속성은 반대 방향으로 똑같은 표를 읽는 것과 같다. 표 2에 주어진 연속성은 스텝각  $45^\circ$ 를 가진 반 스텝핑(Half-stepping)에 대응하며 표 3에 주어진 연속성은 스텝각  $90^\circ$ 를 가진 완전 한 스텝핑(Full-stepping)에 대응한다. 그림 1에 나타난 고정자와 회전자의 배열에 대한 완전 한 스텝핑(Full-stepping)의 스텝각  $90^\circ$ 이다. 이 경우 단 한개의 상은 단 한번에 자성화된다.

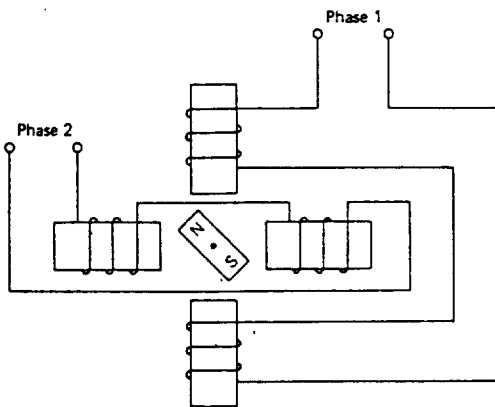


Fig. 2 Schematic diagram of a two-phase stepping motor

상의 권선을 위한 연속적인 변화를 위한 발생 논리가 소프트웨어 접근방식으로 마이크로 프로세서에 의해 주어질 수 있지만 자동중계기(Translator) 라고 불리는 하드웨어 주변장치로 변화를 발생시키는 것이 보편화되어 있다. 논리구조가 고정되어 있기 때문에 하드웨어적인 접근이 더욱더 효과적이다.

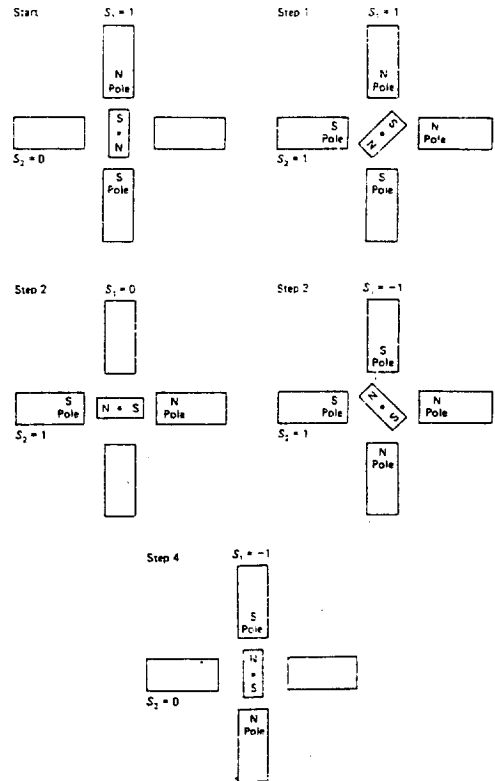


Fig. 3 Half-stepping sequence for a two phase stepping motor for clockwise rotation

Table 2 Half-stepping sequence for a two phase stepping motor with two rotor poles

Step number	Clockwise rotation		Counterclockwise rotation	
	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$
1	1	1	1	-1
2	0	1	0	-1
3	-1	1	-1	-1
4	-1	0	-1	0
5	-1	-1	-1	1
6	0	-1	0	1
7	1	-1	1	1
8	1	0	1	0

Table 3 Full-stepping sequence for a two phase stepping motor with two rotor poles

State		State	
S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>	
1	0		
Clockwise ↓	0	1 ↑	Counterclockwise
-1	0		
1	-0		

스테핑 모터의 시계방향 회전을 위한 완전 한 스테핑(Full-stepping) 배열이 그림 4에 나타나 있다. 스텝각이 60°인 한 스텝핑을 수행하기 위해서는 한순간에 1 개의 상만이 자성화 되어야 한다. 스테핑 모터에서 한 스텝핑을 회전하는 동안에 전류의 방향은 바뀌지 않고 다만 1과 0의 상태만이 각 상에서 바뀐다. 시계방향 회전을 위한 반 스테핑은 그림 5에 나타나 있다. 이 경우 몇 단계를 진행하는 동안에 2개의 상이 동시에 자성화 되어야 한다. 더우기 전류의 방향 변환이 필요하기 때문에 더욱 정교한 스위치 회로가 요구된다. 그러나 이것의 장점은 스텝각이 30°로 반으로 줄어들어 분해능을 증가시킨다. 2개의 상이 동시에 자성화 되면 최소 자기저항 위치는 양극 사이에 위치 한다.

단스택과 다스택 스테핑 모터의 실제적인 기하학적 치차 배열은 일직선이 아니다. 하나의 운동 스텝은 간단하게 고정자의 극성을 재 분배하여 회전자가 최소 자기저항 위치 상태에서 멈춘다. 정상 평행위치에 도달되면 새로운 멈춤위치에 도달하기 위하여 고정자의 극성이 다시 바뀐다. 단스택과 다스택 스테핑 모터의 원리를 좀더 자세히 설명하고자 한다.

### 3.1 단스택 스테핑 모터

그림 6에서 보여지는 단스택 스테핑 모터를 생각해 보자. 고정자는 세개의 상(p=3)을 가지며, 회전자는 여덟개의 치차(n<sub>r</sub>=8)을 갖는다. 세개의 상을 1, 2, 3이라고 하고, 각 상(Phase)은

4개의 고정자 극을 하나의 그룹으로 한다. 그러므로 고정자 극(n<sub>s</sub>)의 합은 12개다.

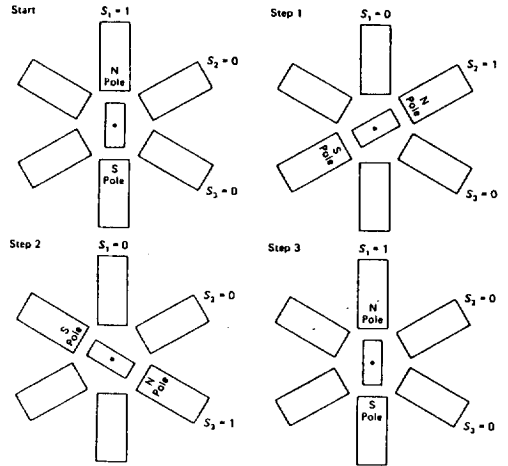


Fig. 4 Full-stepping sequence for the three phase stepping motor for clockwise rotation (step angle= 60°)

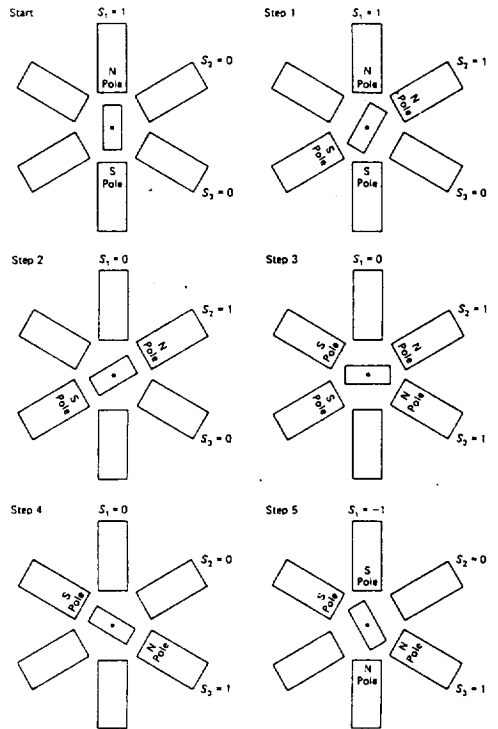


Fig. 5 Half-stepping sequence for the three phase stepping motor for clockwise rotation (step angle= 30°)

상 1이 자성화 되었을 때 직경 반대에 있는 극의 한 쪽은 N극이 되고 그 상에 90°의 각을 이룬 다른 쪽은 S극이다. 더욱이 회전자 치의 기하학으로 적교인 네개의 치차는 네개의 고정자극과 배열이 완전히 일치한다. 이것을 최소 자기저항이라고 하며 다른 두 상이 자성화 되지 않으면 회전자는 정상 평행상태가 된다. 그러나 나머지 회전자 치차와 고정자극의 극 사이에 15°의 부정렬이 된다.

인접한 치차 사이의 각도인 피치각을, 치차수를 n으로 표시하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{n_s}$$

$$\theta_r = \frac{360^\circ}{n_r}$$

스텝각 Δθ는 고정자 치차와 회전자 치차 사이에 가장 작은 부정렬의 각이다.

$$\Delta\theta = \theta_r - \theta_s (\theta_r > \theta_s) \dots\dots\dots (1)$$

그림 6을 참고로 하여 얻은 완전한 스텝각은 고정자 피치각이 45°, 회전자 피치각이 30°이므로 15°이다. 만약 이제 상 1을 끄고 상 2를 켜면 회전자는 최소 자기저항 위치까지 반시계 방향으로 15°회전한다. 만약 상 2 대신에 상 3을 켜면 회전자는 시계방향으로 15°회전한다. 이 스텝각의 절반인 7.5°로 유지하는 것도 이 모터에서 가능하다. 가령 예를 들어 상 1이 전처럼 커진 상태에서 상 2가 켜져 있을때, 같은 두개의 극이 양쪽에 인접하게 되어 회전자는 대응하는 최소 자기저항 위치까지 반시계 방향으로 회전한다. 양쪽 두극이 같으면 회전자의 치차가 양극 중간에 위치하므로 반시계 방향으로 전 멈춤 위치로부터 7.5°도 만큼 회전한다. 그 다음에 반시계 방향으로 반 스텝 더 회전하기 위하여 상 2가 커진 상태에서 상 1을 끈다.

이를 요약하면 다음과 같다. 완전한 스텝각이 15°인 경우에 반시계 방향 회전을 위한 한회전의 스텝은 1-2-3-1, 시계 방향 회전을 위한 한회전의 완전한 스텝각은 1-3-2-1이다. 스텝각이 7.5°, 즉 반스텝각인 경우에 반시계 방향 회전을 위

한 한회전의 스텝은 1-12-2-23-3-31-1, 시계방향 회전을 위한 한회전의 스텝은 1-31-3-23-2-12-1이다.

고정자 안의 상의 갯수가 P개 일때 회전자 치의 피치각 θr은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_r = P\Delta\theta \dots\dots\dots (2)$$

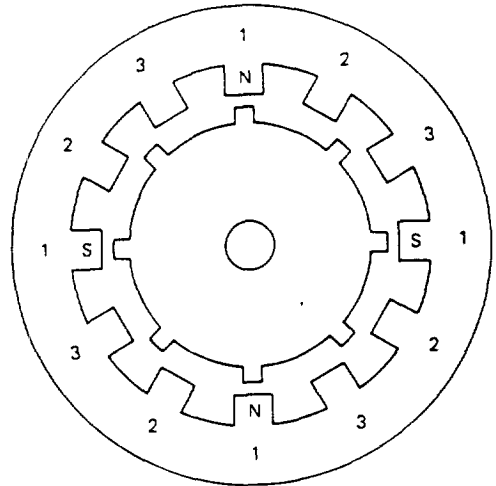


Fig. 6 Three-phase single-stack stepping motor with twelve stator poles (teeth) and eight rotor teeth

이 식을 1 식에 대입하면 다음과 같다.

$$\theta_r = \theta_s + \theta_r/P (\theta_r > \theta_s) \dots\dots\dots (3)$$

피치각의 정의에 의하여 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\frac{360^\circ}{n_s r} = \frac{360^\circ}{n_s r} + \frac{360^\circ}{P \cdot n_s r}$$

$$n_s = n_r + n_s/P (n_s > n_r) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 nr은 회전자의 치차 수이고, ns는 고정자의 치차 수이다. 결국 회전당 스텝의 수는 다음과 같다.

$$n = \frac{360^\circ}{\Delta\theta} \dots\dots\dots (5)$$

앞에서 언급한 것 처럼 스텝각은 회전자 치차 수와 고정자 극의 수를 증가함으로써 작아진다. 스텝핑 모터에서 극 수는 실제적으로 제한이 따른다. 이 문제를 해결하기 위해서 그림 7 a에서 보는 것 처럼 고정자 안의 치차를 사용한다. 고정자의 치차는 회전자 치차와 동일한 공간을 갖지만 동일한 갯수는 아니다. 고정자의 치차 구조에서  $n_s$ 는 고정자 안에 있는 극의 수가 아니라 치차의 수이다.

스텝각에 대한 식 1, 3, 4는 고정자 극의 수가 고정자 치차의 수와 동일하다고 가정하였다. 이 식들은 각 고정자 극 위에 많은 치차들이 있을 경우에 수정되어야 한다. 치차 극구조에 있어서 스텝각 방정식의 일반화는 그림 7 b를 참고로 하여 만들어 질 수 있다. 그림 7 b는 단스택 치차극 구조를 위한 기하학적 개략도이다. 이 경우에 있어서 회전자 치차 피치는 고정자 치차 피치와 동일하지 않다.

$\theta_r > \theta_s$ 인 경우를 고려해 보자. 전형적으로  $n_s = n_r + 2$  이며 극 1의 중심 치차가 회전자 치차와 함께 정렬 되어질 때 극 1'의 중심 치차는 또한 그것과 함께 정렬 되어진 회전자 치차를 가진다. 그러나 남아 있는 모든 고정자 극의 중심 치차는 그것과 함께 정렬 되어진 회전자 치차를 가질 수 없다. 극 1과 극 1'는 반대 극성을 가진다. 고정자 안에는  $2P$  ( $P$ 는 상의 수) 극이 있기 때문에, 극 1의 중심치차와 극 2의 중심치차 사이의 각이  $180^\circ/P$  이다는 것은 그림 7 b로부터 알 수 있다. 치차 각 안에 고정자 치차가  $n_s/2P$ 이고 고정자 안의 총 치차 수는  $n_s$ 가 된다. 극 1의 중심 치차에 일직선을 이룬 회전자 치차와 극 2의 중심 치차에 가장 가까운 회전자 치차 사이의 각은  $(n_s/2P)\theta_r$  이다. 여기서  $\theta_r$ 은 회전자 치차 피치이다. 그것은 같은 스텝각  $\Delta\theta$ 를 가지고 있는 2극에서 고정자-회전자 치차의 부정렬이며 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\theta = \frac{n_s}{2P}\theta_r - \frac{180^\circ}{P}$$

이제  $n_s$  대신  $360^\circ/\theta_s$ 을 대입하면 다음을 얻는다.

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2P\cdot\theta_s}\theta_r - \frac{180^\circ}{P} = \frac{360^\circ}{2P\cdot\theta_s}(\theta_r - \theta_s)$$

다음을  $360^\circ/\theta_s$  대신  $n_s$ 를 역으로 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{n_s}{2P}(\theta_r - \theta_s) \dots\dots\dots (6)$$

식 6은 직관적으로 명백해진다. 특히  $(\theta_r - \theta_s)$ 는 한 고정자 피치각 이내에 가장 가까운 고정자 치차에 대한 회전자 치차의 차이이다. 그리고 두 개의 인접한 고정자 극에 의해서 만들어진 부체폴 안의 회전자 치차는  $n_s/2P$ 이기 때문에 두번째 극에서의 전체 치차 차이가 식 6에 의해 주어진다.

만약 각 상 마다 극이  $m$  이라면 부체폴 안의 고정자 치차 수는  $n_s/m_p$ 이다. 그러므로 이 경우에 있어서 식 6에서  $2P$ 를  $m_p$ 로 대치된다. 고정자 치차가 고정자의 극  $n_s = 2P$ 로 해석되어질때 식 6은 식 1로 바뀌어진다. 치차 극구조에 대한  $n_s$ 는  $2P$ 의 몇배이다. 이 경우에 있어서 식 6은 식 1을 대신하여 사용되어진다. 예를 들면  $\theta_r - \theta_s$ 을 위한 식 3은 다음과 같다.

$$\theta_r = \theta_s + \frac{2\theta_r}{2P} \dots\dots\dots (7)$$

식 4는 기대한 것과 같다.

$$n_s = n_r + 2 \dots\dots\dots (8)$$

치차를 가진 구조에서 식 7, 8은  $\theta_r = \theta_s/P$  이고, 이것을 식 6에 대입함으로써 직접 유도될 수 있다. 일반적으로 치차가 없는 극 구조에 대한 식을 치차를 가진 극 구조에 대한 식으로 변환할 때에는  $P$ 를  $n_s/2$ 으로 대치하여야 한다. 결국 그림 7 b로부터 연속적인 변환 1-2-3-- $P$ 는 반시계 방향으로 회전하며, 1- $P$ -( $P-1$ )-- $2$ 는 시계 방향으로 회전한다는 것을 알 수 있다.

앞서 말한 단스택 치차 구조에서  $\theta_r \neq \theta_s$ 이다. 다른 가능성은  $\theta_r = \theta_s$ 이고 고정자 극은 고정자 주위에 위치한다. 즉 상들 중 하나에 대응하는

고정자의 치차가 회전자의 치차와 완전히 정렬 될 때, 다른 상 안에서 고정자 치차가 이웃 회전자 치차와 일정한 간격을 가진다. 이 구조에서 토크 크기는 아마 상 마다 균일한 치차 간격으로 인하여 더 좋을 것이다. 그러나 토크파는 역시 불안정하게 커진다. 상이 바뀌는 동안 극과 극으로 부터 자기저항의 갑작스런 변화에 기인 되기 때문이다.

이러한 구조를 다루는 몇개의 관계를 얻기 위하여 그림 7 a는 이런 종류의 스텝핑 모터 이다고 상상하라. 극 1의 고정자 치차가 완전히 회전자 치차와 정렬 될때, 극 2의 고정자 치차는 이웃 회전 치차와  $\Delta\theta$ 의 간격을 가진다. 치차 고정자 치차의 간격이 반시계 방향이라고 가정하고 극 피치가  $360^\circ/pm$  인 경우에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{1}{\theta_r} \left( \frac{360}{pm} + \Delta\theta \right) = r \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $r = 360^\circ/(pm) + \Delta\theta$ 의 각 구역이내에 포함된 회전자 치차의 정수,  $\Delta\theta$ 는 스텝각,  $\theta_r$ 은 회전자 치차 피치,  $p$ 는 상의 수,  $m$ 은 상당 고정자 극의 수이다. 똑 같은 상에 감겨진 두 연속하는

극 안에서  $n_r/m$ 은 회전자의 치차이다. 각각의  $\Delta\theta$ 크기의 간격  $p$ 는  $\theta_r$ 의 전체 간격에 기인하며 하나의 회전자 치차 만큼  $pr$ 이  $n_r/m$  보다 크다. 따라서 다음식을 얻는다.

$$n_r + m = pmr \dots\dots\dots (10)$$

회전자 치차의 수인  $n_r$ 을 위한 식은 다음과 같이 주어진다.

$$n_r = \frac{360^\circ}{\theta_r} \dots\dots\dots (11)$$

만약 식 9에서  $r$ 를 식 10에 대입하면 기대한 것처럼  $\Delta\theta = \theta_r/p$ 를 얻는다. 역으로 식 9에  $\Delta\theta = \theta_r/p$ 를 대입하면 식 10를 얻는다.

적당한 변환장치의 사용으로 완전 한 스텝핑 (Half-stepping) 또는 반 스텝핑 (Full-stepping) 이 어떻게 얻어지는가를 살펴 보았다. 반 스텝핑은 하나의 상이 켜진 상태에서 두개의 상이 켜진 상태로 상이 변화할 때 일어난다. 완전 한 스텝핑은 하나의 상 혹은 두개의 상이 켜질 때 발생한다. 마이크로 스텝핑은 각 스텝에서 상 전류의

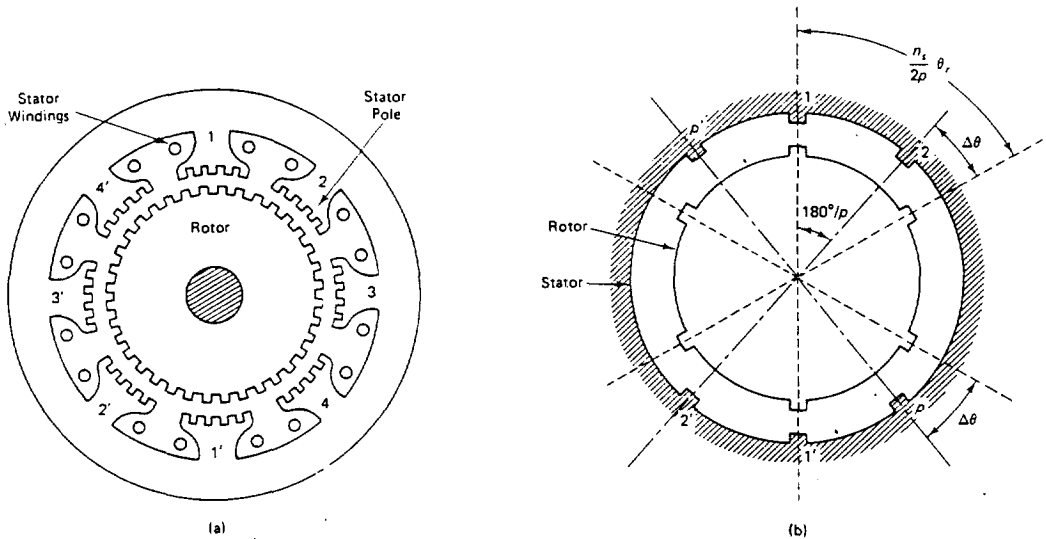


Fig. 7 A possible toothed-pole construction for a stepping motor : (a) an eight-pole, four-phase motor, (b) schematic diagram for generalizing the step angle equation

적당한 변화로 얻어진다.

이상에서의 원리는 동일 권선으로 감겨진 두 개의 동일한 회전자 극을 고려한 것이다. 권선을 통한 전류의 크기와 방향이 동일할 때 그 결과 자기장은 두 극사이에 대칭으로 놓일 것이다. 만약 전류가 변하지 않는 동안에 극에서 전류가 감소하다면 합성 자기장은 더 큰 전류값을 가지고 극 쪽으로 더 가깝게 움직인다. 멈춤위치는 합성 자기장의 위치에 의존하기 때문에 매우 작은 스텝각은 상 전류의 조절로 형성된다.

완전 한 스텝각이  $1/121^\circ$  혹은 더 작은 경우에는 마이크로 스텝핑을 통해 얻어진다. 마이크로 스텝핑 용량의 모터구동 장치는 비용이 비싸지라도 마이크로 스텝핑은 정확한 동작 능력의 장점이 있고 또한 모터-하중 조합에서 이웃하는 공진을 더 줄어준다.

### 3.2 다스택 스텝핑 모터

다스택 스텝핑 모터에서는 등피치구조( $\theta_r = \theta_s$ )와 비등피치구조( $\theta_r > \theta_s$  또는  $\theta_r < \theta_s$ ) 둘 모두가 가능하다. 원리에 있어서 비등피치구조는 단스택 스텝핑 모터의 직렬연결과 같이 작동한다. 비등피치구조의 장점은 같은 크기(스택의 수와 지름)의 등피치구조에서 보다 더 작은 스텝각이 가능하다는 것이다. 그러나 연속적인 변환은 비등피치 다스택 스텝핑 모터에서 다소 더 복잡하다. 먼저 등피치 다스택 모터의 작동원리를 앞에서 언급한 단스택 모터의 분석을 이용할 수 있다.

그림 8은 3스택 스텝핑 모터(Three-stack stepper motor)의 측면도 나타낸다. 이 측면도에서 동일 회전축에 장착된 동일한 세개 치차의 스텝을 볼 수 있다. 이것은 세개의 단스택 회전자를 직렬로 연결한 것이다. 치차 회전자는 동일한 피치각을 가진다. 각 회전자 부위의 몇개의 극은 표준 다상 단스택 모터의 극이지만 각 회전자 부위의 모든 극들은 등피치구조 안에서 같은 상에 감긴다. 그러므로 이것들은 동시에 자성화되거나 되지 않는다. 구동토크의 생성에 필요한 부정렬은 다음 두 방법중 하나이다.

1. 3개 고정자 부위의 치차는 완전히 정렬되

어 있지만 3개 회전자 스택의 치차는 1/3 피치각의 간격으로 연속적으로 부정렬되어 있다.

2. 3개 회전자 스택의 치차는 완전히 정렬되어 있지만 3개 고정자 부위의 치차는 1/3 피치각의 간격으로 연속적으로 부정렬되어 있다.

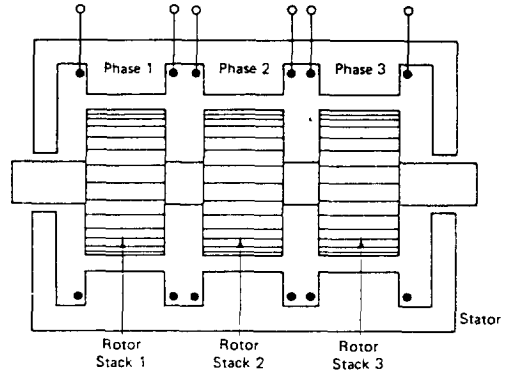


Fig. 8 Longitudinal view of a three-stack (three-phase) stepping motor

상 1이 자성화 되었다고 가정하자. 이 때 스택 1의 치차는 상 1의 회전자 치차와 완벽하게 정렬되나 스택 2의 치차는 상 2의 회전자 치차로부터 한 방향으로 1/3 피치각 만큼 회전하게 된다. 또한 스택 3의 치차는 상 3의 회전자 치차로부터 같은 방향으로 2/3 피치각 만큼 같은 방향으로 회전하게 된다. 만약 상 1이 지금 자성화되지 않고 상 2가 자성화되면, 회전자는 1/3 피치 만큼 회전 한다. 만약 상 3이 상 1 뒤에 자성화되면 회전자는 반대 방향으로 1/3 피치 만큼 회전한다. 명백하게 스텝각은 3스택 3상 구조에서 1/3 피치각이다. 변화하는 상의 순서 1-2-3-1 과 1-3-2-1 은 회전자의 회전방향은 반대이다. 일반적으로 회전축에 s 스택이 있을 경우 한 스텝각은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{\theta}{s} \dots\dots\dots (12)$$



스텝각은 회전자 치차의 스택의 수를 증가시킴으로서 감소시킬 수 있지만 이것은 모터의 크기를 증가시키고 힘, 진동문제, 공기간격 접촉문제, 큰 베어링 하중 등을 수반할 수 있다. 완전한 스텝각의 반인 반 스텝핑은 두 상을 동시에 자성화 하여 얻어진다. 그러므로 반 스텝핑 회전 순서는 1-12-2-23-3-31-1 이고 이에 반대 방향의 회전 순서는 1-13-3-32-2-21-1 이다.

비등피치 다스택 스텝핑 모터는 실질적으로 유용하다. 미세한 분해능에 의한 스텝각은 모터 크기에 관계없이 설계될 수 있다. 각 회전자 부위는 비등피치 스텝핑 모터에서 하나 이상의 상을 가진다. 단스택의 스텝각  $\theta_r - \theta_s$  를 내부 스택의 부정렬을 사용한 동일한 스텝  $s$  로 나누어 더 세분할 수 있다. 그러므로  $\theta_r$  가  $\theta_s$  보다 클때 치차 극이 없는 비등 피치 다스택 스텝핑 모터의 스텝각은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\theta = \frac{\theta_r - \theta_s}{s} \dots\dots\dots (13)$$

다른 방법으로, 치차 극이 있는 다중스택 모터에서 스텝각은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{n_s(\theta_r - \theta_s)}{2ps} \dots\dots\dots (14)$$

상 마다 두 고정자 극이 있다고 가정하고 식 2를 사용하여 치차극과 비치차극 모터에서 다 사용할 수 있는 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\theta = \frac{\theta_r}{p \cdot s} \dots\dots\dots (15)$$

#### 4. 스텝핑 모터의 선택과 응용

##### 4.1 스텝핑 모터의 선택

기계의 작동을 위하여 제어용 모터가 필요할 때 제어용 모터 중에 어떤 모터를 이용할 것인가를 선택하는 것은 매우 중요하다. 제어용 모터

중에서 스텝핑 모터를 선택할 것인지 혹은 다른 종류의 모터를 선택할 것인지를 선택의 여부는 스텝핑 모터의 장단점을 비교한 후 스텝핑 모터의 장점을 많이 가진 경우에는 스텝핑 모터를 선택하고 그렇지 않으면 다른 종류의 모터를 선택하여야 할 것이다. 다른 종류의 제어용 모터와 비교한 스텝핑 모터의 장단점은 다음과 같다.

스텝핑 모터는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

1. 위치 오차가 누적되지 않는다.
2. 디지털 컴퓨터 제어에 의한 디지털 입력제어에 반응한다.
3. 기계적으로 단순하여 유지비가 없거나 거의 없다.
4. 주위를 더럽히지 않는다.
5. 개방 루프모드를 사용할 때 측정 시스템의 센서와 콘트롤러의 비용이 적다.
6. 개방 루프제어에서 조차 안전성에 관한 문제가 없다.
7. 피해없이 반복하여 엔진을 멎게할 수 있다.
8. 상대적으로 단단하고 내구력이 있다.
9. 토오크 용량, 동력 요구도를 최적화 시키고 반응은 전기적으로 조절된다.

스텝핑 모터는 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

1. 스텝각 분해능의 유통성이 없다.
2. 일반 구동장치에 비해 효율이 낮다.
3. DC 토오크 모터에 비해 낮은 토오크 용량을 가진다.
4. 스텝 방식의 운동에 기인한 큰 진동을 가질 수 있다.
5. 큰 관성부하에 용량이 제한된다.
6. 출력원과 이용할 수 있는 크기가 제한된다.
7. 개방 루프제어에서 한 필스를 놓쳤을 때 큰 오차와 진동을 초래한다.

스텝핑 모터의 장단점을 고려한 후 스텝핑 모터를 선택하였다고 하자. 스텝핑 모터 중에서 어떤 종류의 모터를 선택할지는 고정자의 극수, 극

당 치차의 수, 회전자 치차 의 수를 고려하여야 할 것이다. 그러나 스텝핑 모터의 선택은 기본적인 기하학적 변수만으로 만들어질 수 없다. 토오크와 속력을 고려한 스텝핑 모터의 선택이 종종 더 중요할 때도 있다. 스텝핑 모터의 선택은 요구도에 따라 다르지만, 다음에 기술한 단계에 이용한다면 스텝핑 모터의 선택이 용이할 것이다.

1 단계 : 적용 요구도에 알맞는 주요사항의 목록을 작성하라.

속력, 가속력, 정확도, 분해능, 크기, 관성, 기본 고유 진동수, 저항 토오크 등을 포함한다.

2 단계 : 특정 적용에 대한 운전 토오크와 스텝핑 비율을 계산하라.

뉴우톤의 제 2 법칙은 이 단계에서 요구되는 기본 방정식이다. 특히 요구 되는 정적 토오크는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$T = T_{12} + J_{eq} \frac{W_{max}}{\Delta t} \dots\dots\dots (16)$$

여기서  $T_R$  : 정미 저항 토오크

$J_{eq}$  : 회전자, 하중, 기어, 제동기 등의 동가 관성 모멘트

$W_{max}$  : 최대 운전속력

$\Delta t$  : 최대속력까지 부하를 가속시키는 데 걸린 시간

3 단계 : 상업적으로 사용할 수 있는 토오크 대 스텝핑 비율 곡선을 사용한 후 적당한 스텝핑 모터를 선택하라.

2 단계에서 결정된 속력과 토오크와 1 단계에서 정의된 정확도와 분해능을 3 단계에서 적용한다.

4 단계 : 만약 적당한 스텝핑 모터를 구입할 수 없다면 기본설계를 수정하라.

기어 시스템과 증폭기등의 장치를 첨가한후 이 때 속력과 토오크의 요구도를 다시 계산한다.

5 단계 : 모터에 부합되고 단계 1의 운전요구도에 알맞는 구동 시스템을 선택하라.

간단한 적용을 위하여 손으로 조작되는 프리

셋 색인(Preset Indexer) 또는 오실레이터로 구성된 개방루프 시스템과 변환기를 사용할 수 있다. 좀더 일시적으로 복잡한 일을 수행하기 위하여 마이크로프로세서와 하드웨어 컨트롤러가 개방루프제어에서 요구되는 펄스 명령을 만들기 위하여 사용되어진다. 높은 정확도를 요구하는 일을 조작하기 위해서는 엔코더 피드백이 달린 디지털 프로세서의 페루프 제어를 사용한다.

스텝핑 모터의 종류를 선택할 때 가장 유용한 정보는 토오크 대 스텝핑 비율곡선이지만 필요로 하는 다른인자들은 다음과 같다.

1. 스텝각
2. 정지상태의 토오크
3. 최고 회전 스텝율(Slew Rate)
4. 최고 회전 스텝율에 대한 모터 토오크
5. 최고 감속도와 가속도(Ramping Slope)
6. 무부하 전기 시상수와 기계 시상수
7. 모터의 고유진동수
8. 모터의 크기
9. 동력 공급용량

스텝핑 모터를 평가하기 위한 많은 인자들이 있다. 예를 들어 정지상태 토오크는 공기 간격 넓이와 치차 넓이를 감소시키고 회전자 직경과 스텝 길이를 증가시킨다. 더욱더 최소허용 공기 간격 넓이는 온도에 의한 변형과 변하는 부하 즉, 자성체, 정적 동적 기계하중 등으로 야기되는 회전자 축의 최대 측면 편향을 초과할 수 있어야 한다. 이런 관점에서 몸체의 유연한 견고성, 베어링의 특성과 온도, 총결합의 확장적 특성도 중요하다. 자계 결선 인자인 직경, 길이, 내구성 등은 요구되는 토오크, 힘, 전기적 시상수, 열 발생율, 모터의 크기를 고려하여 선택 되어진다. 이런 것들의 대부분은 모터의 선택 단계에서 변경되어 질 수 없는 설계 인자이다.

#### 4.2 스텝핑 모터의 응용

증분구동 전동기인 스텝핑 모터는 디지털 제어 응용에 적당하다. 초기에 스텝핑 모터는 저속

참 고 문 헌

력, 저토포크로 한정되어 사용되었다. 마이크로 프로세서에 기초한 펄스 생성기와 컨트롤러의 빠른 발전으로 인하여 스테핑 모터는 고토오크와 고속력에서도 응용되고 있다.

스테핑 모터는 수 많은 곳에 이용되고 있다. 특히 항공기 제어장치(Aircraft Control Systems), 섬유기계(Textile Machines), 리모트 지시 장치(Remote Indicating Devices), NC 기계 구동, 광학장치(Optical Equipment), 농업기계, 프린터, 플로터, 전기 타자기, 자기 테이프, 디지털 컴퓨터의 디스크 구동장치 등 수많은 곳에 사용되고 있다. 또한 자동 공정응용에 있어 스테핑 모터는 조인트 구동장치, 로버트의 손 구동장치, 로그래픽한 장치의 구동장치, 부분위치 설정 테이블, 기계공구의 고정기에서 사용된다. 자동 카부레이터 조절기, 공정조절, 밸브 원동기, 기계부품 공급장치에도 스테핑 모터가 사용된다. 스테핑 모터의 다른 적용은 의학이나 야금의 방사선 사진의 물질 위치 설정, 자동 초점 카메라의 렌즈 구동장치, 컴퓨터 영상 시스템의 카메라 움직임 장치, 그리고 복사기 종이 방출 장치에 이용된다. 농업기계의 분야에서는 소형 작업기, 즉 파종기, 이식기 등의 제어용 구동장치로 스테핑 모터가 이용된다. 특히 소형 농작업기계에 적용한다면 경제적이고 제어하기가 쉬울 것이다. 그리고 다음 기회에 스테핑 모터제어에 대하여 자세히 소개하고자 한다.

1. DeSilva C. W. 1989. Control Sensors and Actuators. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
2. Kenjo T., Nagamori S. 1985. Permanent-Magnet and Brushless DC Motors. Clarendon Press.
3. Kuo, B. C. 1979. Step Motors and Control Systems. SRL Publishing.
4. Lee, Dae-Weon. 1990. A Robotic and Vision System for Locating and transferring Container Grown Tobacco Seedling. Ph. D. Thesis. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, NC. USA.
5. Stephen L. H., Walter N. A. 1990. Industrial Motor Control. Delmar Publishers Inc.
6. 이용국의 3인. 1992. 산학협동재단 최종보고서. ROBOT식 多目的 播種機 開發에 관한 研究
7. 자동화기술 편집부. 1991. 메카트로닉스를 이용한 최첨단 제어용 모터. 성안당