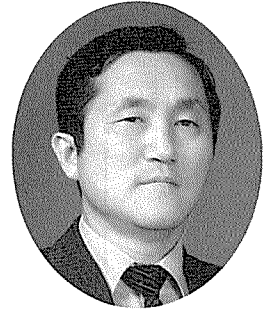


각종 스텝모터의 구조 및 동작특성 비교분석



단국대학교 공과대학
전기공학과 교수 黃錫永

직류 전원을 한 번 스위치 온 하면 연속적으로 회전운동을 하는 직류전동기와 달리 스텝모터는 직류전원을 한 번 스위치 온 하면 일정한 각도(스텝각)만큼 회전한 후 정지한다. 따라서 스텝모터를 회전시키려면 한 정지 위치에서 한 스텝씩 동작하여야 하므로 일련의 스텝동작에 맞는 스위칭을 계속 행해야 한다.

스텝모터는 이와같이 스텝각을 스위칭 회수만큼 움직이는 즉 스위칭과 스텝각이 1대 1로 대응하는 일종의 동기동작을 하므로 위치제어를 쉽게 할 수 있는 모터이다. 이러한 특징 때문에 스텝모터는 공작기계의 수치제어 장치등과 같은 서보기구에 쓰이는 대형 스텝모터에서 부터 전자계산기 주변장치나 사무기기(OA)에 쓰이는 소형에 이르기까지 다종다양하게 응용된다.

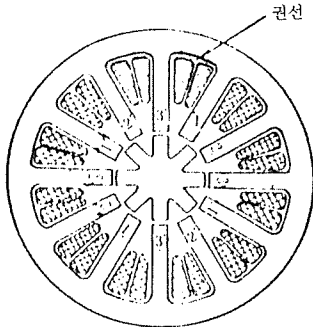
이와같은 다종다양한 스텝모터 전반에 대한 이해에 도움이 될 수 있도록 스텝모터의 종류별 구조 및 동작특성을 비교분석하여 보고자 한다.

1. 스텝모터의 종류의 다양화 실현 방법의 근거

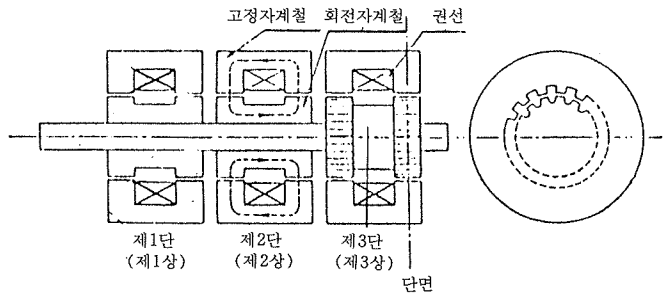
스텝모터의 구분류는 토오크의 발생방법에서 VR형(variable reluctance type), PM형(permanent magnet type), HB형(hybrid type)로 나누어지고 이를 모체로 소요 스텝각과 소요 토오크와 소요 스텝동작을 위한 여자권선의 상수, 여자극수, 여자자극군의 여자권선방식, 모터의 단수라는 5개 관점에서 (그림 1)~(그림 4)와 같이 다양하게 분화(分化)된다.

스텝모터는 이와같이 다양한 종류형식이 있지만 공통점은 직류로 여자되는 여자권선이 모두 고정자에 있고 여자권선은 분포권이 아닌 집중권으로 돌출자극을 여자하며 또 여자권선에 흐르는 전류는 브러쉬레스 전동기와 같이 한 권선에 양방향으로 흐르지 않고 한 방향으로만 흐르는 일방향성 전류이다.

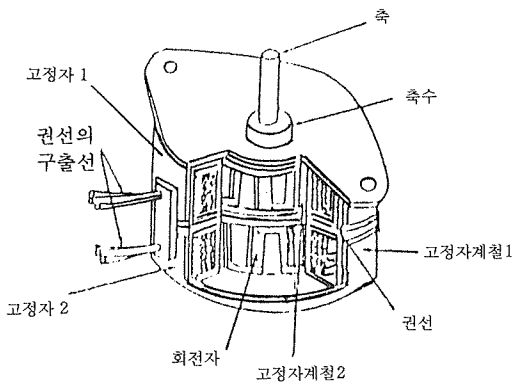
이러한 공통점을 염두에 두고 스텝모터의 종류형식과 관련되는 상기 용어의 개념을 확실하게 파악해 두면 그것에서 스텝모터의 구조 및 동작의 특징을 쉽게 알 수 있다고 본다.



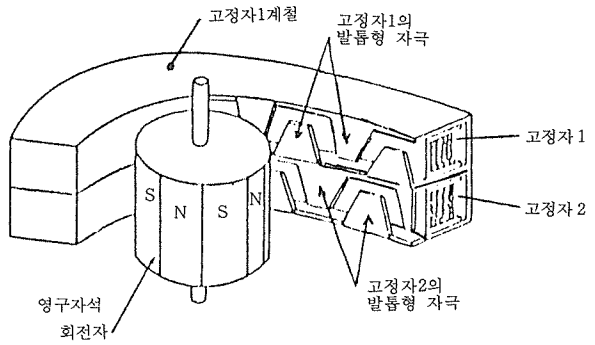
(그림 1) 4극, 3상, 집중권, 단단식, VR형 스텝모터



(그림 2) 단극, 3상, 집중권, 3단식 VR형 스텝모터

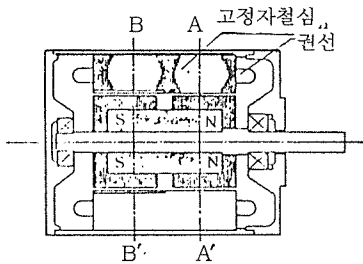


(a) 단면도

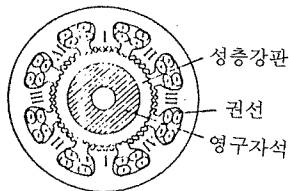


(b) 전개도

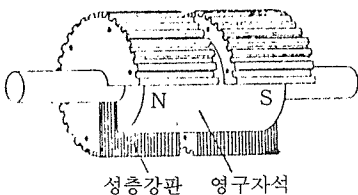
(그림 3) 단극, 2상, 집중권, PM형 스텝모터



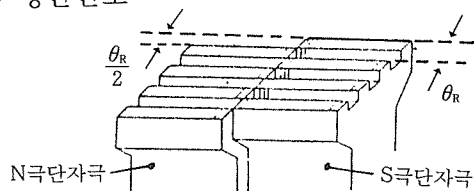
(a) 종단면도



(b) 횡단면도



(c) 회전자 구조



(d) 고정자의 2단자극의 어긋남

(그림 4) 4극, 4상, 집중권, HB형 스텝모터

2. 스텝모터의 토크 발생 방법

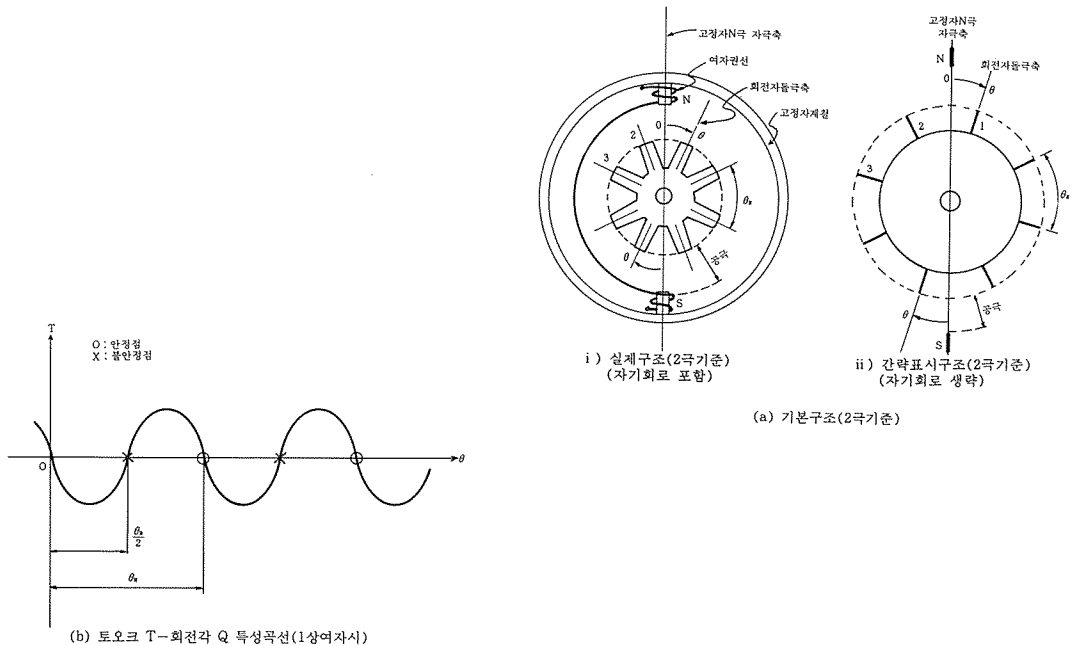
2.1 VR형

VR형은 여자자극과 철편간의 흡인력을 이용하여 토크를 발생시키는데 철편이 흡인될 때 철편의 움직임은 자기저항이 적게되도록 변화시킨다는 의미에서 가변자기저항(VR)형이란 명칭이 붙게 된 것이다.

철편의 흡인력을 이용하기 위하여 VR형은 (그림 1)과 같이 철심으로 된 회전자의 표면에 고정자의 극수보다 많은 돌출부(돌극)를 돌극의 핏치각 θ_R 만큼씩 일정간격으로 배열하고, 고정자는 한 상의 권선이 여자되면 극수만큼의 돌출자극이 여

자되도록 한다.

이러한 구조에서 고정자의 한 상이 여자될 때 토크 발생기구를 쉽게 알 수 있는 기본구조는 그림 5(a)와 같은 2극기로서 고정자 자극과 회전자 돌극간의 상대적 관계가 쉽게 확인되도록 자극과 돌극을 각각 자극축과 돌극축에 집중시켜 나타낸 것이며 고정자의 돌출자극폭은 회전자의 돌극폭과 같다고 가정한다. 그림 4(b)와 같이 고정자의 자극표면에 회전자의 돌극과 같은 핏치각의 돌극을 많이 둘때는 고정자 자극에 돌극이 1개 있는 것에 해당하는 그림 5(a)의 토크의 크기만 돌극의 수만큼 곱한 것과 같은 토크 특성이 되므로 토크 특성곡선의 이해를 쉽게 할려면 그림 5(a)의 모델이 효과적이다.



(그림 5) VR형의 기본구조와 토크 특성

그림 5(a)는 고정자의 한 상이 여자될 때 각 여자자극에서 본 회전자 돌극과의 상대위치관계가 모두 같음을 보이는데 2극이상의 다극기에서도 이러한 상대위치관계가 유지되도록 회전자 돌극의 수를 조정한다.

그림 5(a)에서 고정자 자극이 여자되면 회전자 돌극이 흡인되어 고정자 자극축과 회전자 돌극축이 일치한 상태에서 정지할 것이다. 이 위치에서 회전자를 조금 움직일려고 하면 원위치로 되돌아갈려는 토오크가 발생하므로 이 위치는 안정정지 위치(안정점)이다.

지금 그림 5(a)와 같이 고정자의 한 상이 여자된 상태에서 회전자를 회전시킬 때 회전에 따른 토오크의 변화특성을 살펴보기로 한다. 회전자의 회전각 θ 의 원점을 그림 5(a)와 같이 안정정지 위치를 취하고 회전자를 θ 의 정방향으로 회전시킬 때 고정자의 어느 한 여자자극(그림 5(a)에서 N극)을 취하여 토오크 변화특성을 보면 그림 5(b)와 같다. 고정자의 나머지 자극에 의한 토오크도 상기 상대위치 관계의 조건을 고려하면 그림 5(b)와 똑같으므로 한 상이 여자될 때 전 여자자극에 의한 합성토오크 특성은 그림 5(b)에서 토오크 크기만 [여자자극수 \times 여자자극의 돌극수]의 수치값을 곱한 것과 같은 상사형으로 된다.

그림 5(a)와 관련하여 그림 5(b)의 의미를 살펴보기로 한다. 회전자를 회전시킬 때 $\theta=0 \sim \frac{\theta_R}{2}$ 되는 구간은 돌극 1이 돌극 2보다 자극 N에 가깝기 때문에 돌극 1의 흡인력이 돌극 2의 것보다 우세하여 회전을 저지하는 부의 토오크가 발생하는데 $\theta=\frac{\theta_R}{4}$ 에서 최대치가 생긴다. $\theta=\frac{\theta_R}{2}$ 일때는 돌극 1과 2의 흡인력이 같기 때문에 토오크는 0이지만 이 위치에서 회전자가 어느 방향이든 조금 움직이면 흡인력의 차이가 생겨 움직일려고 하

로 이 위치는 회전자가 안정하게 정지될 수 없는 불안정 위치이다. $\theta=\frac{\theta_R}{2} \sim \theta_R$ 의 구간은 돌극 2가 돌극 1보다 자극 N에 가깝기 때문에 돌극 2의 흡인력이 우세하여 회전을 도와주는 정의 토오크가 발생하는데 $\theta=\frac{3}{4}\theta_R$ 에서 최대치가 생긴다. $\theta=\theta_R$ 일때 돌극 2가 돌극 1의 초기위치에 오고 돌극 1은 고정자 자극 N의 세력권을 벗어나게 되나 돌극 2가 대신에 돌극 1과 같은 과정을 반복하므로 그림 5(b)와 같은 토오크-회전각 특성이 생긴다고 볼 수 있다.

또 같은 조건에서 고정자의 여자자극의 극성을 반대되게 하여도 VR형은 돌극의 흡인력만 이용하므로 여자자극과 영구자석간의 힘을 이용하는 PM형이나 HB형과 달리 토오크 특성곡선은 하등 변화가 생기지 않는다.

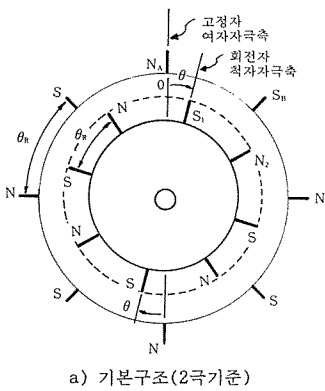
이상에서 VR형의 토오크 특성의 특징은 그림 5(b)에서와 같이 토오크는 회전자의 돌극 핏치각 θ_R 을 한 주기로 교번하고 토오크의 최대치는 $\frac{1}{4}\theta_R$ 과 $\frac{3}{4}\theta_R$ 되는 위치에 생기며 안정점과 불안정점간의 간격은 반핏치각($\frac{\theta_R}{2}$)이고 또 여자자극의 극성으로는 토오크 특성을 변경할 수 없는 점등이다. VR형은 토오크의 이러한 특징을 이용하여 후술하는 바와같이 스텝동작을 하도록 한다.

2.2 PM형

PM형은 여자자극과 영구자석간의 흡인·반발력을 이용하여 토오크를 발생시킨다. 이의 실현은 (그림 3)과 같이 회전자는 VR형의 돌극대신에 원통형의 회전자 표면에 연속적으로 N, S, N, S로 교대착자한 영구자석으로 대체하고 고정자도 한 상이 여자되면 회전자의 전 착자자극과 작용하여 토오크를 발생하도록 착자 자석과 같은 수의 고정

자 돌출자극을 모두 여자한다.

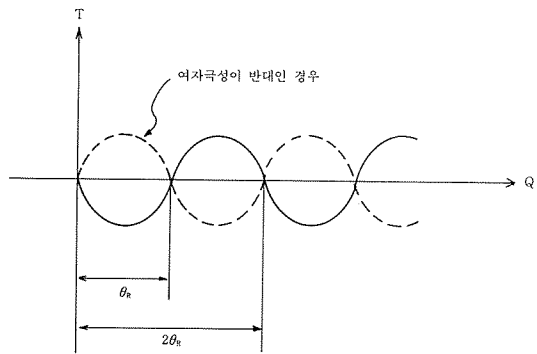
이러한 구조에서 고정자의 한 상이 여자될 때 토오크 발생기구를 쉽게 알 수 있는 기본구조는 그림 6(a)와 같이 고정자의 전 돌출자극이 N, S, N, S로 여자되고 회전자의 착자자극은 이해의 편



a) 기본구조(2극기준)

의상 고정자의 것과 같이 돌출 자극으로 나타낸 것이며 이들 회전자의 돌출 자극의 철심은 VR형과 같이 자기저항의 변화에 의한 토오크는 생기지 않는다고 가정한다.

그림 6(a)에서 보는 바와같이 고정자의 여자자



b) 토오크 T-회전각 θ 의 특성곡선(1상여자시)

(그림 6) PM형의 기본구조와 토오크 특성

극과 회전자의 착자자극은 둘다 자극의 수와 극성 배열이 같으므로 고정자의 어느 자극을 취하더라도 그 자극에서 본 회전자 착자 자극과의 상대적 관계가 똑같고 역으로 회전자 축에서 보더라도 고정자 자극과의 상대적 관계가 같음을 알 수 있다. 또 회전자의 착자자극은 그림 5(a)의 VR형의 회전자 돌극과 같이 고정자 자극의 세력권을 벗어나는 구간이 생기지 않고 어느 위치이든 고정자 자극과 작용함을 알 수 있다.

지금 그림 6(a)와 같이 고정자의 1상이 여자된 상태에서 회전자의 안정정지위치를 회전각 θ 의 원점으로 취하여 θ 의 정방향으로 회전시킬 때 회전자의 어느 한 착자자극(그림 6(a)와 S_1)을 취하여 토오크 변화특성을 보면 그림 6(b)와 같다.

회전자의 나머지 착자자극에 의한 토오크도 상기 회전자 자극과 고정자간의 상대적 관계를 고려하면 그림 6(b)와 똑같으므로 전 착자자극에 의

한 합성토오크 특성은 그림 6(b)에서 토오크의 크기만 착자자극의 수만큼 곱한 것과 같은 상사형으로 된다.

그림 6(a)와 관련하여 그림 6(b)의 의미를 살펴보기로 한다. 회전자의 안정정지위치는 고정자의 N극과 S극의 자극축이 각각 회전자의 S극과 N의 착자자극축과 일치할 때이다. 이 위치를 회전각 θ 의 원점으로 하면 착자자극 S_1 이 $\theta=0\sim\theta_R$ 되는 구간은 고정자 N_A 자극의 흡인력과 S_B 자극의 양측에 있는 N_A 자극과 N_C 자극이 S_1 을 흡인하는 힘이 똑같기 때문에 토오크는 0이지만 이 위치는 불안정 위치이다.

$\theta=\theta_R\sim2\theta_R$ 되는 구간은 고정자 S_B 자극의 반발력과 N_C 자극의 흡인력이 합세하여 회전을 도와주는 정의 토오크가 발생하는데 $\theta=\frac{3}{2}\theta_R$ 에서 최대치가 생긴다. $\theta=2\theta_R$ 일때는 착자자극 S_1 고정자의 N_C 자극과 일치하여 앞의 과정을 반복하므로 그림

6(b)와 같은 토오크-회전각 특성이 생긴다고 볼 수 있다.

한편 같은 조건에서 고정자의 여자자극의 극성을 반대로 하면 회전자의 착자자극 S_1 에서 본 고정자 자극의 극성관계가 앞의 경우와 정반대이므로 토오크 특성은 그림 6(b)의 토오크-회전각 특성과형을 그림의 점선과 같이 회전각 θ 의 좌표축 방향으로 파형의 반주기인 θ_R 만큼 평행이동 시킨 것과 같게 된다.

이상에서 PM형의 토오크 특성의 특징은 그림 6(b)에서와 같이 토오크는 VR형과 달리 회전자의 착자자극의 핏치각 θ_R 를 반주기로 교번하고 토오크의 최대치는 $\frac{\theta_R}{2}$ 과 $\frac{3\theta_R}{2}$ 되는 위치에 생기며 안정점과 불안정점간의 간격은 한 핏치각(θ_R)이고 또 여자자극의 극성을 반대로 하면 토오크파형을 반주기(θ_R)만큼 회전각 좌표축 방향으로 평행이동 시킨 것과 같이 변경되는 점등이다. PM형은 토오크의 이러한 특징을 이용하여 후술하는 바와 같이 스텝동작을 하도록 한다.

2.3 HB형

HB형은 스텝각을 적게하는데 유리한 VR형과 토오크를 크게 하는데 유리한 PM형의 장점을 모두 취하기 위하여 VR형과 PM형의 구조를 혼성한 것으로 여자자극과 자화돌극(영구자석에 의한)간의 흡인력과 반발력을 이용하여 토오크를 발생시킨다.

이의 실현은 그림 4(c)와 같이 회전자는 PM형의 착자자극 대신에 회전자의 중심부에 회전축 방향으로 2극의 원통형 영구자석을 두고 N극 부분과 S극 부분으로 나누어 각각 VR형의 회전자와 같이 돌극을 갖는 철심을 쌓아서 영구자석에 의하여 N극

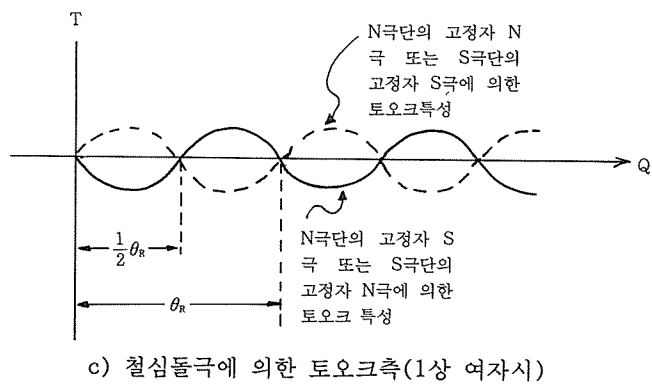
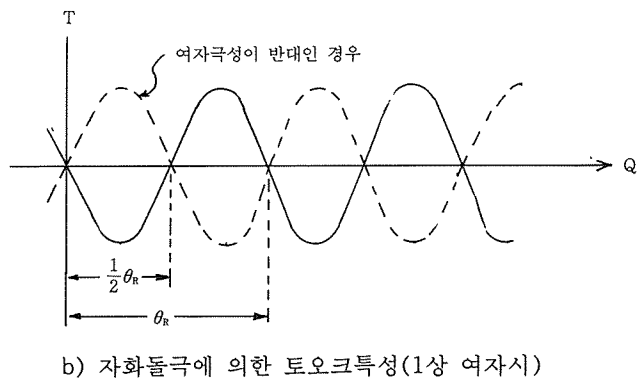
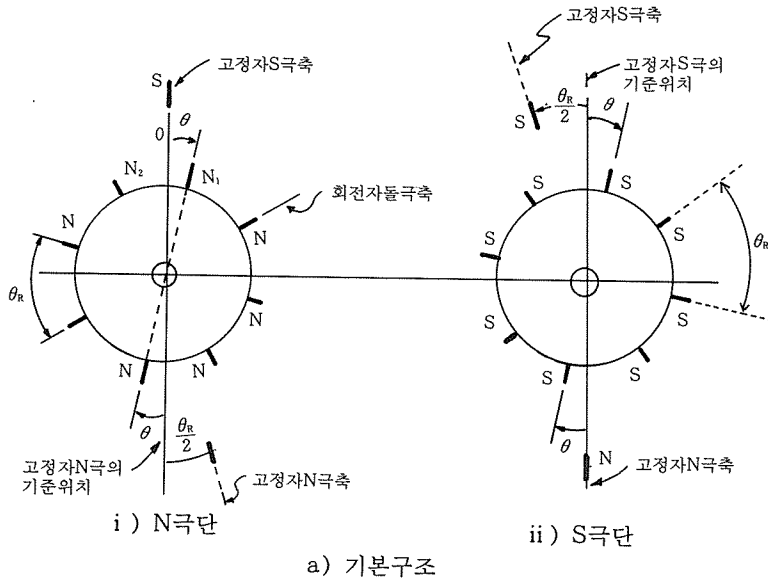
위의 공극면의 전 돌극은 모두 N극을, S극 위의 것은 모두 S극으로 자화되도록 한다(단극형 자화).

고정자는 VR형과 같이 한 상이 여자되면 극수만큼의 돌출자극이 여자되어 이것의 세력권에 있는 회전자의 자화 돌극과 작용하여 토오크를 발생하는데 회전자의 N극 부분과 S극 부분의 자화돌극이 고정자 돌출자극에 의하여 다같이 토오크를 발생하도록 고정자 자극도 회전자와 같이 두단으로 나누어 그림 4(d)와 같이 각 단의 돌출 자극축은 서로 회전자의 돌극 핏치각 θ_R 의 절반만큼 어긋나게 한다.

이러한 구조에서 고정자의 한 상이 여자될 때 토오크 발생기구를 쉽게 알 수 있는 기본구조는 그림 7(a)와 같은 2극기로서 회전자의 N극 부분과 S극 부분의 상호관계를 알 수 있도록 두 부분을 같이 나타내는데 두 부분의 회전자 돌극은 회전축에서 보면 일직선으로 정렬된 것이고 고정자의 돌출자극쪽은 그림 5(a)의 VR형에서와 같이 회전자의 돌극쪽과 같다고 가정한다.

지금 그림 7(a)와 같이 고정자의 한 상이 여자될 때 회전자의 N극 부분과 S극 부분의 자화돌극을 다같이 이용하려면 각 부분의 고정자 자극이 회전자의 자화돌극에 대하여 안정위치에 있어야 하므로 이러한 관점에서 고정자 자극의 배치를 살펴보기로 한다.

VR형은 한 상이 여자될 때 여자된 고정자 자극축을 N, S극이 교대로 단순히 등간격으로 배치하지만 HB형은 VR형과 같은 등간격 배치를 기준으로 하면 N극단에서는 이것과 같은 극성인 고정자의 N극측만 N극의 기준위치에서 어느 한 방향(그림 7(a)에서는 반시계방향)으로 회전자 돌극 핏치각의 절반($\frac{\theta_R}{2}$)만큼 이동시킨 위치에 두고 S극단에서도 고정자의 S극측만 그것의 등간격 배치



(그림 7) HB형의 기본구조와 토크특성

의 기준위치에서 N극단의 이동방향과 같은 방향으로 $\frac{\theta_R}{2}$ 만큼 이동시킨 위치에 둔다.

고정자 자극을 이렇게 배치하면 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 N극단과 S극단의 고정자 자극축은 $\frac{\theta_R}{2}$ 만큼 어긋나게 된다. 또 N극단에서는 고정자의 S극축은 회전자의 N극 돌극축과 일치하고 N극축은 회전자의 인접 두 N극 돌극축의 중앙에 놓이며, S극단에서는 고정자의 N극축은 회전자의 S극 돌극축과 일치하고 S극축은 인접 두 S극 돌극축의 중앙에 놓인다. 고정자 자극에 대하여 회전자의 자화돌극이 앞에서와 같은 위치에 있으며 토오크가 0이 되어 회전자는 안정하게 정지할 수 있다. 즉 이 위치에서 회전자를 조금 움직이려고 하면 N극단이나 S극단에서 다같이 원위치로 되돌리려는 토오크가 발생하므로 이 위치는 안정정지 위치이다.

그림 7(a)와 같이 고정자의 한 상이 여자된 상태에서 회전자의 안정정지위치를 회전각 θ 의 원점으로 취하여 θ 의 정방향으로 회전시킬 때 두 극단 중 어느 한 극단(그림 7(a)에서 N극단)에서 고정자의 어느 한 자극(그림 7(a)에서 S극)을 취하여 토오크의 변화특성을 보면 그림 7(b)와 같다. 같은 극단에 있는 고정자의 다른 자극에 의한 토오크도 고정자 자극과 회전자 자화돌극간의 상대적 관계가 상기 고정자 자극의 것과 같으므로 그림 7(b)와 똑같다.

또 다른 극단에서도 고정자 자극에 의한 토오크는 같은 조건이므로 그림 7(b)와 똑같고 고정자 자극에 회전자의 돌극과 같은 핏치각의 돌극을 여러개 들때 각 돌극에 의한 토오크도 VR형에서 설명한 바와 같이 그림 7(b)와 똑같다. 따라서 HB형의 전 합성 토오크 특성은 그림 7(b)에서 토오크의 크기만 [여자자극수×2(단수)×여자자극의

돌극수]의 수치값을 곱한 것과 같은 상사형으로 된다.

HB형에서도 고정자와 회전자의 돌극간에 자기저항변화에 의한 VR형 토오크가 생길 것 같지만 같은 극성의 고정자 자극을 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 회전자의 N극단과 S극단에서 회전자 돌극의 핏치각 θ_R 의 절반만큼 어긋나게 하였으므로 N극단에서 생기는 VR형의 토오크와 S극단의 것이 그림 7(c)에서와 같이 상쇄되어 실제로는 생기지 않는다.

따라서 HB형의 토오크는 여자자극과 자화돌극간의 흡인력과 반발력에 의한 PM형과 유사한 토오크뿐이다. 그림 7(a)에서 고정자 S극을 보면 N극단에서는 자화돌극 N극과 고정자의 S극간의 흡인력으로 토오크가 생기고, S극단에서는 자화돌극 S극과 고정자의 S극간의 반발력으로 토오크가 생김을 알 수 있다.

그림 7(a)와 관련하여 그림 7(b)의 의미를 살펴보기로 한다. N극단에서 고정자의 S극과 작용하는 자화돌극 N_1 은 $\theta=0$ (안정정지위치)에서 회전자를 회전시킬 때 $\theta=0\sim\frac{\theta_R}{2}$ 되는 구간은 자화돌극 N_1 이 N_2 보다 S극에 가깝기 때문에 N_1 의 흡인력이 N_2 의 것보다 우세하여 회전을 저지하는 부의 토오크가 발생하는데 $\theta=\frac{\theta_R}{4}$ 에서 최대치가 생긴다. $\theta=\frac{\theta_R}{2}$ 일 때는 N_1 이 N_2 의 흡인력이 같기 때문에 토오크는 0이지만 이 위치는 회전자가 안정하게 정지할 수 없는 불안정 위치이다. $\theta=\frac{\theta_R}{2}\sim\theta_R$ 의 구간은 N_2 의 흡인력이 N_1 의 것보다 우세하여 회전을 도와주는 정의 토오크가 발생하는데 $\theta=\frac{3}{4}\theta_R$ 에서 최대치가 생긴다. $\theta=\theta_R$ 일 때 N_2 는 N_1 의 초기위치에 오고 N_1 은 고정자자극 S의 세력권을 벗어나며 대신에 N_2 가 N_1 과 같은 과정을 반복하므로 그림 7(b)와 같은 토오크-회전각 특성이

생긴다고 볼 수 있다.

같은 조건에서 고정자의 여자자극의 극성을 반대로 하면 회전자의 자화자극 S_1 에서 본 고정자 자극의 극성관계가 앞의 경우와 정반대이므로 토오크 특성은 PM형에서와 같이 그림 7(b)의 토오크 파형을 회전각 θ 의 좌표축 방향으로 반주기인 $\frac{\theta_R}{2}$ 만큼 평행이동 시킨 것과 같게 된다(그림 7(b)의 점선과 같음).

이상에서 HB형의 토오크 특성의 특징은 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 토오크 파형은 VR형의 것과 같으나, 여자자극의 극성을 반대로 하면 PM형에서와 같이 변경되는 점등이다. HB형은 토오크의 이러한 특징을 이용하여 후술하는 바와 같이 스텝동작을 하도록 한다.

3. 모터의 단수

모터의 고정자와 회전자는 공극을 통하는 자속으로 양자가 자기적으로 결합된 구조이므로 고정자와 회전자는 한 조를 이룬다. 이러한 조가 하나뿐인 경우를 단단식(single stack type)이라 하고, 같은 축에 여러개의 조를 직렬로 연결하여 1개의 모터 기능을 하도록 한 경우에 다단식(multi-stack type)이라 한다.

스텝모터를 모터 단수에서 보면 VR형에는 (그림 1)과 같은 단단식과 (그림 2)와 같은 다단식이 있는데 다단식은 최소 단수인 3단식이 주로 실용된다. PM형은 (그림 3)과 같이 2단식이고, HB형은 (그림 4)에서 보는 바와 같이 고정자와 회전자의 자기회로 구조는 2단식과 같으나 1단(N극단)과 2단(S극단)의 고정자 자극은 한 개의 권선으로 여자하므로 실질적 동작은 단단식과 같다.

4. 여자권선의 상수 및 극수, 자극수, 여자자극군의 여자권선 방식

다단식 스텝모터는 각단에서 고정자의 한 권선이 여자되면 고정자의 돌출자극을 모두 동시에 여자하여 토오크를 발생하게 한다. 따라서 토오크 특성이 여자전류의 극성에 의하여 변경되지 않는 VR형의 경우는 각단의 고정자에는 여자권선이 1개 이상은 필요없고, 여자전류의 극성으로 토오크 특성을 변경할 수 있는 PM형의 경우는 각 단의 고정자에는 여자권선이 2개 이상은 필요없다.

이에 대하여 단수가 하나뿐인 단단식 스텝모터는 고정자의 한 권선이 여자되면 고정자의 돌출자극중 몇 개를 선택 여자하여 토오크를 발생하게 하므로 고정자의 전 자극을 고루 이용하려면 여자권선이 여러개 필요하다. 이때 여자권선의 수가 상수이고 한 여자권선의 여자시 선택되어 여자되는 고정자의 돌출자극수가 극수인데 이렇게 하면 한 상의 여자시 여자되는 자극군에서 기준으로 취한 자극축과 다른상의 여자시의 것 간에 일정 간격을 쉽게 둘 수 있다. 단단식의 스텝동작은 후술하겠지만 이 간격을 이용한다. 따라서 단단식은 공극원주를 따른 고정자 자극의 분포는 이산적이야(hetero-polar)하고 또 전자극의 수는 극수와 상수에 의한 제한이 있음을 할 수 있다.

단단식의 상수와 극수의 개념을 다단식에 적용하면 각단의 상수는 앞에서와 같이 1개 또는 2개로 한정되며, 극수는 고정자에 있는 전 자극의 수와 같고 고정자의 전 자극(또는 극수)이 한꺼번에 여자되므로 이들과 작용하는 회전자의 자극수도 고정자의 것과 같아야 한다(1대 1의 대응). 다단식의 이러한 자극의 공극원주에 따른 분포는 단단식과 달리 연속분포이고 전 자극의 수는 단단식에

서와 같이 극수와 상수에 의한 제한을 받지 않으므로 임의로 취할 수 있다. 또 다단식은 한 번 여자시 고정자의 전 자극이 여자되므로 여자 자극군은 단단식과 달리 1개뿐이다. 따라서 다단식의 스텝동작은 후술하겠지만 1개뿐인 각 단의 여자 자극군에서 기준으로 취한 자극축이 회전축에서 볼 때 단단식에서와 같이 일정간격을 갖도록 같은 회전축에 몇 개의 단을 연결할 때 가능함을 알 수 있다.

또 전 고정자 자극은 단단식의 경우는 1개의 자극군이지만 단단식의 경우는 한 상의 여자시 극수만큼의 자극이 여자되므로 전 고정자 자극의 수를 극수로 나눈 수만큼의 자극군이 생긴다. 이러한 자극군의 여자극성의 변경여부에 따라 각 자극군에 여자권선이 1개인 경우와 2개인 경우가 있는데 전자를 모노파일러(monofilar)권이라 하고 후자를 바이파일러(bifilar)권이라 한다. 바이파일러 권은 여자자극의 극성에 의하여 토오크 특성이 변경되는 PM형이나 HB형에 쓰이고, 토오크특성이 여자자극의 극성과 무관한 VR형은 1상 여자방식의 경우는 모노파일러 권 방식 뿐이다. 이와같은 관점에서 다단식과 단단식을 비교하면 다음과 같다.

1) 다단식

다단식에는 (그림 2)와 같은 3단식 VR형과 (그림 3)과 같은 PM형이 있는데 각각의 여자구조의 특성은 다음과 같다.

a) PM형

여자자극군이 1개 뿐이므로 회전자에 연속분포된 착자자극과 1대 1로 작용하도록 (그림 3)과

같이 각 단은 여자권선을 감는 철판의 공극면에 발톱형 자극(craw pole)으로 틈을 만들 때 N, S로 여자되는 여자 자극수를 회전자의 착자자극수와 같게 한다. 따라서 한 개의 여자권선으로 여자되는 자극의 수는 발톱형 자극의 수와 같으므로 여자 자극의 수는 발톱형 자극의 수에 의하여 임의로 취할 수 있고 또 한 개뿐인 자극군의 극성을 변경할 경우에 여자 권선방식은 바이파일러 권을 쓴다.

b) VR형(다단식)

각 단의 회전자는 착자자극을 쓰지않는 단순한 돌극철심이므로 이것과 작용할 고정자의 돌출자극의 수도 회전자의 연속분포된 돌극의 수와 같아야 하며 또 고정자의 전돌출 자극이 한 여자권선에 의하여 한꺼번에 여자하여야 하므로 단극형(homopolar type) 여자방식을 이용한다. 따라서 (그림 2)에서 보는 바와같이 각 단에서는 2개의 공극을 통하는 자기회로가 되도록 여자하며 각 공극면의 고정자의 돌극수와 회전자의 것이 같고 그 수는 임의로 취할 수 있으며 또 여자권선방식은 앞에서 언급한 바와 같이 모노파일러 권 밖에 쓸 수 없다. 두 공극면의 것이 똑같고 또 한권선으로 다같이 여자되므로 여자자극군은 1개인 것과 같다.

2) 단단식

단단식에는 (그림 1)과 같은 VR형과 (그림 4)와 같은 HB형이 있는데 이들의 여자구조의 특징을 살펴보기로 한다.

단단식은 2극기의 여자구조를 기본단위로 하며 극수가 2극이상인 다극기는 회전축 주위로 2극기를 반복배치한 구조로 된다. 단단식에서 고정자의

돌출자극의 배치는 VR형의 경우는 등간격으로 배치하고, HB형의 경우는 등간격 배치를 기준으로 한 위치에서 그림 7(a)에서와 같이 일부 돌출자극을 이동시킨다.

단단식에서 여자자극군은 고정자의 돌출자극수를 극수로 나눈 수만큼 생기는데 고정자의 돌출자극수 N_p 는 상수 m 가 짝수인가 홀수인가에 따라 또 상권선의 배치를 1극단위로 또는 쌍극단위로 할 것인가에 따라 <표 1>과 같이 정해진다.

<표 1> 단단식의 고정자 돌출자극수

	상수가 홀수인 경우	상수가 짝수인 경우
1극단위 상배치	$N_p = m \cdot P$	$N_p = m \cdot P$
쌍극단위 상배치	$N_p = m \cdot P$	$N_p = m \frac{P}{2}$

<표 1>에서 여자자극군의 수는 상수가 홀수인 경우 상권선의 배치방법과 무관하게 상수 m 만큼 생기나, 상수가 짝수인 경우는 상권선의 배치를 쌍극단위로 할 때는 상수의 절반 ($\frac{m}{2}$)만큼 생김을 보인다.

여자자극군중에서 어느 하나를 기준 여자자극군으로 취하면 기준 여자자극군의 돌출자극수는 극수와 같고 자극의 배치는 공극원주를 극수만큼 등분한 위치에 자극축이 놓이도록 한다. 다른 여자자극군의 자극배치는 상권선을 1극단위로 배치한 경우는 한 극절을 상수만큼 등분한 위치에 기준 여자자극군의 자극들을 그대로 회전이동 시킨것과 같이, 또 상권선을 쌍극단위로 배치한 경우는 쌍극절을 상수만큼 등분한 위치에 기준 여자자극군의 자극들을 그대로 회전이동 시킨것과 같이 배치하면 고정자의 전 자극의 배치가 완성된다.

단단식에서는 이와같이 한 여자자극군과 인접

여자자극군간에는 한극절 또는 쌍극절을 상수만큼 등분한 간격을 갖고 여자되며 상수가 짝수인 경우에 쌍극단위의 상배치를 하면 한 여자자극군을 두 상권선이 여자하되 극성이 반대가 되는 바이파일러권을 이루기 때문에 여자자극군의 수가 상수의 절반만큼 된다. 모노파일러권을 쓰는 VR형도 철심의 자료를 효과적으로 이용하기 위하여 2상여자를 전제로 할 때는 각 자극에 권선을 1개 추가하여 의도적으로 바이파일러권으로 할 수 있다.

5. 스텝각의 크기와 연속 스텝동작 조건

5.1 스텝각의 크기

스텝모터는 (그림 8)과 같이 앞의 상이 여자될 때 그 상의 토크곡선상의 한 안정점인 a점에서 정지되어 있다고 하면 앞의 상을 소자하고 다음상을 여자하면 정의 토크가 발생하여 a점에서 정의 회전방향으로 회전하여 이 상의 안정점인 b점까지의 회전각이 스텝각이다. 또 이 그림에서 스텝각은 앞의 상의 안정점(정지위치)에서 가장 가까운 다음 상의 안정점까지이고 이 각은 두 토크곡선의 위상각차와도 같음을 알 수 있다.

스텝모터는 어떤 종류의 것이라도 어느 한 스텝모터에서는 각 고정자 자극에서 본 회전자의 돌극(또는 착자자극)의 상대적 조건이 같으므로 각상의 여자시 만드는 토크특성 곡선의 패턴은 똑 같으나 각 상의 여자자극군에서 대응되는 고정자 자극간의 간격으로 인하여 토크곡선간에 위상각차가 (그림 8)과 같이 생긴다. (그림 8)과 같은 전 상의 토크곡선은 한상의 것만 알면 다른 상의 것은 두 상의 대응되는 고정자 자극간의 간격을 원점에서 본 위상각차로 보고 평행이동시켜 그린 것이다.

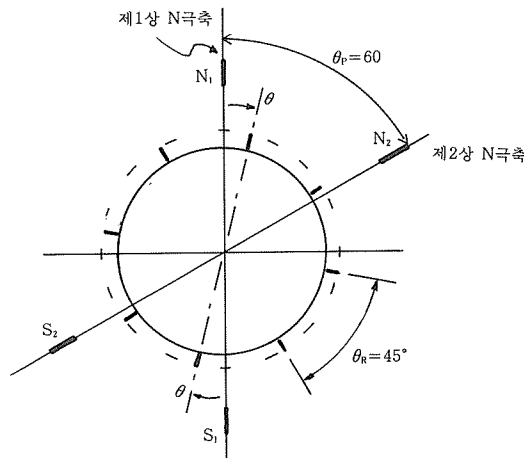
스텝모터는 이러한 위상각차를 스텝각으로 이용하기 때문에 각 상의 여자시 대응되는 고정자 자극간의 간격을 다단식과 단단식은 다음과 같이 되도록 하여 스텝각 α 을 얻는다.

1) 다단식

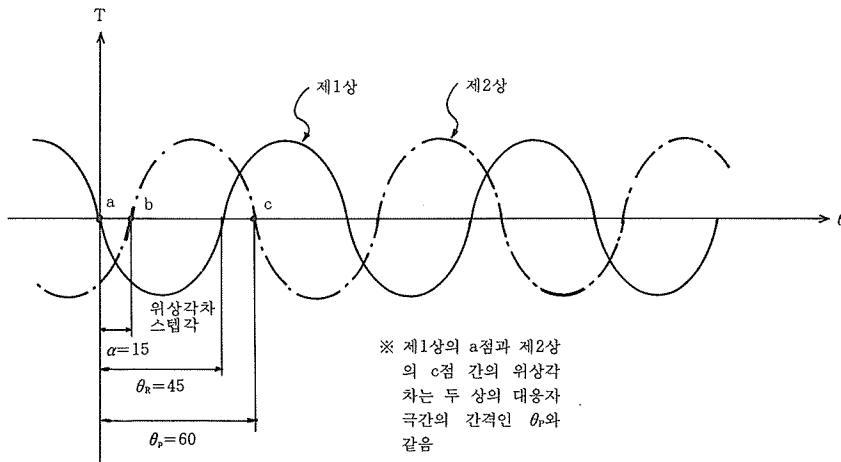
a) VR형(다단식)

(그림 2)와 같은 다단식 VR형은 각 단의 고정

자와 회전자 돌극축을 회전축에서 전단의 것을 일직선으로 정렬시킨 상태에서 고정자의 돌극축만 식(1)과 같이 돌극의 핏치각 θ_R 를 단수 m 로 나눈 각(θ_R/m)을 한 단위로 하여 2단은 θ_R/m 만큼, 3단은 $2 \times \theta_R/m$, 4단은 $3 \times \theta_R/m \dots$ 만큼 회전시킨 위치에 고정하는 방법을 써서 위상각차 $\Delta\theta$ 를 만들므로 일종의 기계적 방법이라 할 수 있다.



a) 두상의 고정자 자극배치(2극기준)



b) 각상의 토크특성 곡선(VR형의 경우)

(그림 8) 토크 특성곡선과 스텝각

$$\Delta\theta = \frac{\theta_R}{m} \quad (1)$$

여기서, m : 모터의 단수

어떠한 스텝모터라도 확실한 기본적인 스텝동작을 하려면 식(1)의 위상각차 $\Delta\theta$ 가 한상 여자시의 토오크곡선의 안정점과 인접 불안정점간의 간격보다 적어야 한다.

VR형은 안정점과 불안정점간의 간격이 그림 5(b)에서와 같이 $\theta_R/2$ 이므로 다단식의 최소단수는 3이고, 핏치각 θ_R 의 크기는 단단식과 달리 극수와 무관하므로 임의로 취할 수 있는 이점이 있다. 따라서, 다단식 VR형은 최소단수인 3단이 대부분이며 이 경우에 스텝각은 θ_R 의 1/3이다.

b) PM형

(그림 3)과 같은 PM형도 다단식의 일종이므로 토오크곡선의 위상각차가 생기게 하기 위해서 다단식 VR형과 같이 각단의 회전자 착자자극은 일직선으로 정렬시키고 각 단의 고정자의 것만 식(1)과 같이 일직선에서 어긋나게 한다.

PM형은 안정점과 불안정점간의 간격이 그림 6(b)에서와 같이 θ_R 이므로 최소단수는 2이고 θ_R 의 크기는 임의로 할 수 있다.

따라서 PM형은 최소단수인 2단이 대부분이며 이 경우에 스텝각은 θ_R 의 1/2이다.

2) 단단식

단단식은 (그림 1)의 VR형과 (그림 3)의 HB형과 같이 한 단에서 각 상의 토오크곡선간에 위상각차가 생기도록 하는데 위상각차 $\Delta\theta$ 는 식(2)와 같이 고정자의 돌출자극간의 간격 θ_p 에서 토오크곡선의 1 싸이클에 해당하는 회전자 돌극의 핏치각 θ_R 의 임의의 정수 n를 곱한 값과의 차와 같

고 크기는 θ_R 보다 적다.

$$\Delta\theta = \theta_p - n\theta_R \quad (2)$$

여기서, $\theta_p = 360/N_p$: 고정자 자극 핏치각

$N_p = m_1P$: 고정자 돌출자극수

$\theta_R = 360/N_R$: 회전자 돌극핏치각

N_R : 회전자 돌극수

m_1 : 여자자극군의 수

P : 극수

n=1, 2, 3... : 임의의 정수

식(2)의 위상각차 $\Delta\theta$ 는 크기가 식(3)~(4)와 같이 회전자 돌극 핏치각 θ_R 를 여자자극군의 수 m_1 으로 나눈 값과 같게 되도록 회전자 돌극수 N_R 를 주어진 극수, 상수에 맞추어 조정하여 취한 것이 스텝각으로서의 의미를 갖는다.

$$\Delta\theta = \frac{\theta_R}{m_1} \quad (3)$$

여기서,

상수 m가 홀수 : $m_1 = m$

$$m_1 \begin{cases} \text{상수 m가 짝수} \begin{cases} 1\text{극단위배치} : m_1 = m \\ \text{쌍극단위배치} : m_1 = \frac{m}{2} \end{cases} \end{cases}$$

식(2)와 식(3)에서 회전자 돌극수 N_R 를 구하면 N_R 는 식(4)의 조건을 충족하여야 하므로 단단식의 것과 같이 임의로 취할 수 없고 또 극수 P가 많으면 N_R 이 많게 되어 스텝각이 작게 됨을 알 수 있다.

$$N_R = m_1 P n \pm P \quad (4)$$

여기서 \pm : 다음상 여자시 움직이는 방향과 관계됨.

식(3)의 m_1 은 단단식의 단수에 해당하는 것으로

다단식에서와 같이 VR형은 m_1 의 최소치가 3이므로 상수가 3상이어야 하고 3상의 경우에 스텝각은 회전자돌극의 핏치각 θ_R 의 1/3이다.

3상4극 단단식 VR형에 대하여 식(4)를 적용하면 회전자의 가능 돌극수 N_R 과 스텝각 α 는 다음과 같다.

	$N_R = m_1 P n = 12n$	$\theta_R = \frac{360}{N_R}$	$\alpha = \frac{\theta_R}{m_1} = \frac{\theta_R}{3}$
$n = 1$	8, 16	45, 22.5	15.03, 11.25
$n = 2$	20, 28	18, 12.8	6, 4.3
$n = 3$	32, 40	11.25, 9	3.7, 3

HB형도 토오크곡선의 안정점과 불안정점간의 간격은 VR형과 같이 $\theta_R/2$ 이므로 m_1 의 최소치는 3이나, 후술하겠지만 여자의 극성변경으로 토오크 특성을 변경할 수 있는 점 등을 이용하면 m_1 이 2이라도 스텝동작이 가능하다.

5.2 연속 스텝동작 조건

스텝모터는 스텝동작을 하면서 일반 모터와 같이 정회전 또는 역회전을 할 수 있어야 한다. 이러한 연속 스텝동작의 실현은 같은 자극에 여자 전류의 방향을 변경하면 토오크특성이 반대로 되는 PM형과 HB형이 용이하다.

VR형의 토오크특성은 여자전류의 방향과 무관하므로 연속 스텝동작을 위해서는 다단식의 경우는 최소 3단, 단단식의 경우는 최소 3상 이상이 필요하다. 그러나 PM형과 HB형은 고정자의 여자권선을 바이파일러권으로 하여 여자방향을 변경함에 의하여 다음과 같이 쉽게 연속 스텝동작을 할 수 있다.

1) PM형

PM형은 단수를 2단으로 최소화하더라도 고정자의 각단에 극성만 다른 2개의 여자권선 즉 바이

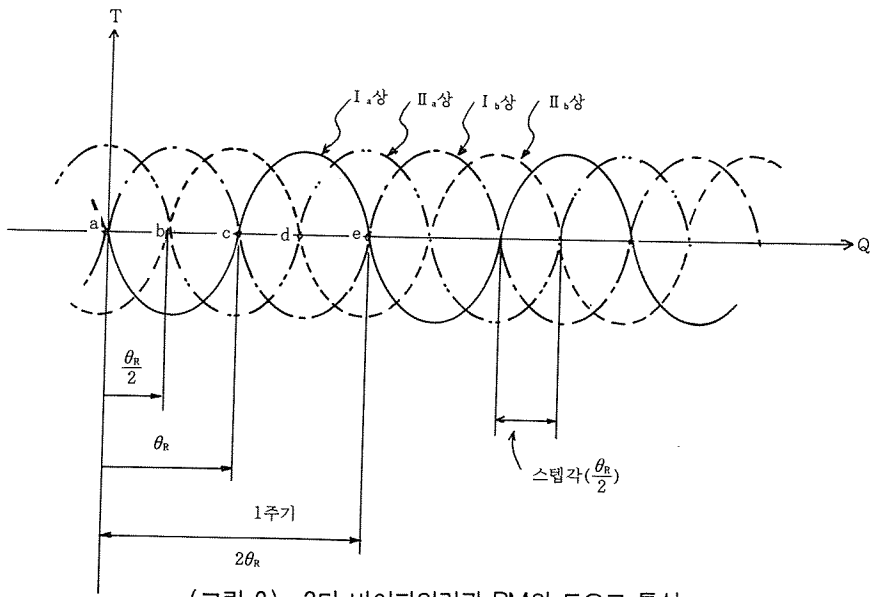
파일러권으로 하면 각 여자권선에 의한 토오크특성은 (그림 9)와 같다.

(그림 9)에서 I_{a1} 와 I_{a2} 는 1단과 2단의 같은 극성의 여자권선에 의한 토오크를 나타내고 I_{a1} 와 I_{a2} 의 위상각차가 $\frac{\theta_R}{2}$ 인 것은 1단과 2단의 고정자 여자자극축이 $\frac{\theta_R}{2}$ 만큼 서로 어긋나게 했기 때문이며 또 I_{b1} 와 I_{b2} 는 여자권선의 극성을 각각 I_{a1} 와 I_{a2} 의 것과 반대로 한 권선에 의한 토오크 특성을 나타낸다.

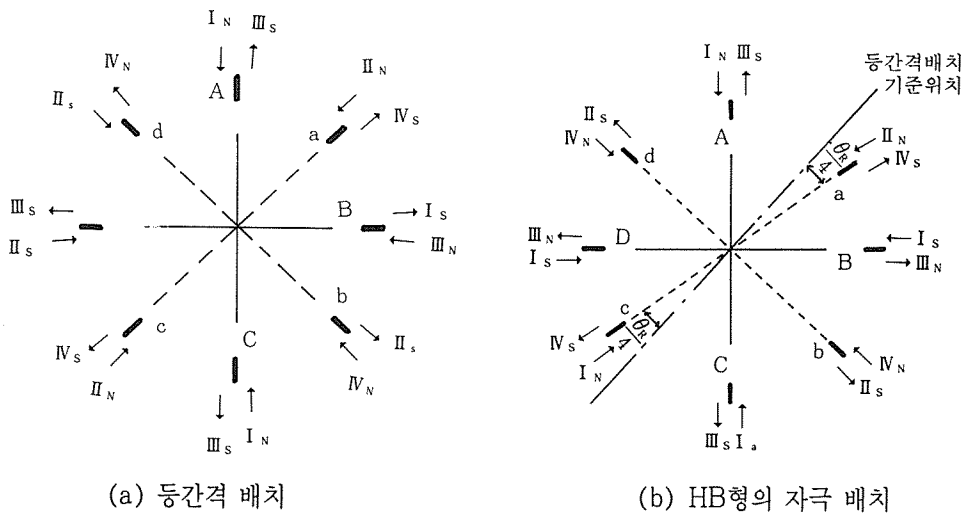
(그림 9)에서 I_{a1} 상이 여자되어 그것의 안정점인 a점에 정지해 있을 때 θ 의 정방향으로 스텝동작을 시키려면 권선 I_{a1} 를 소자하고 I_{a2} 를 여자하면 정의 토오크가 생겨 정방향으로 그것의 안정점인 b점으로, 또 b점에서 I_{b1} 를 여자하면 c점으로, c점에서 I_{b2} 를 여자하면 d점으로, d점에서 I_{a1} 를 여자하면 e점으로 한 스텝씩 움직이므로 연속 스텝동작이 가능함을 알 수 있다. 여기서 스위칭은 4모드가 1사이클을 이루고 1사이클의 스위칭에서 두 핏치각을 회전하며 스텝각은 토오크곡선에서 볼 때 안정점에서 인접 안정점까지의 회전각으로 $\frac{\theta_R}{2}$ 임을 알 수 있다.

2) HB형

4극 HB형을 예를 들면 3상의 경우는 고정자의



(그림 9) 2단 바이파일러권 PM의 토크 특성



(그림 10) 4상 4극의 자극 배치

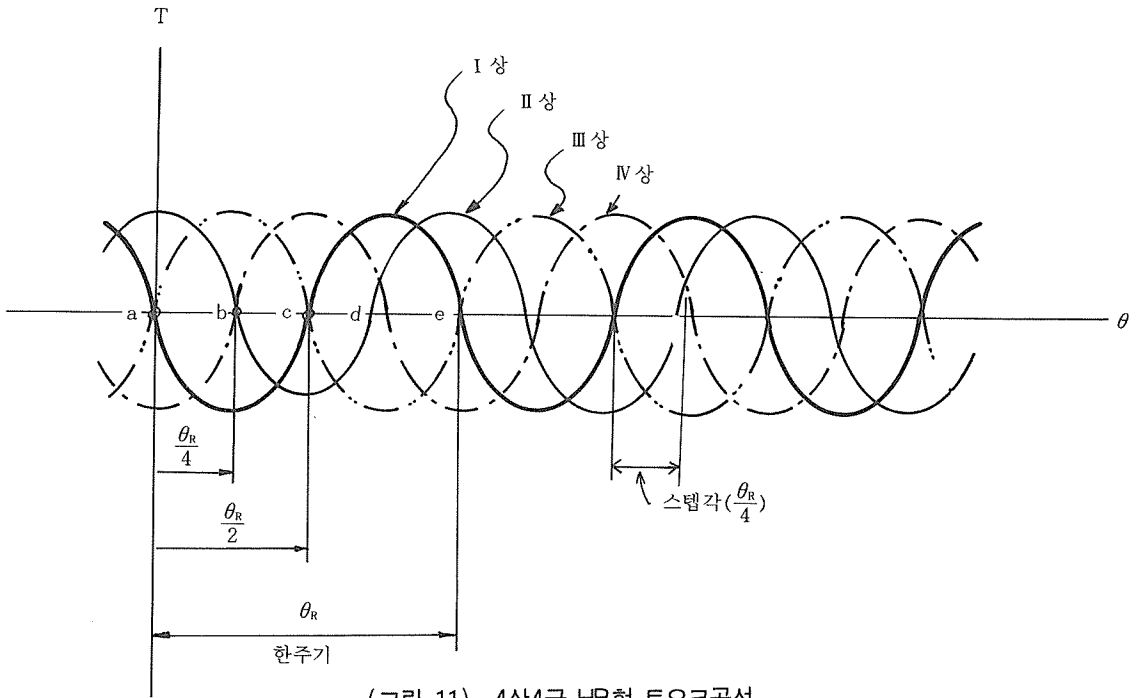
돌출자극수 N_p 는 $12(=3 \times 4)$ 개로 많고 이것을 그림 7(a)와 같이 배치하여 모노파일러권으로 하면 $\frac{\theta_R}{3}$ 의 스텝각으로 연속 스텝동작을 시킬 수 있다. 이 경우 회전자 돌극수의 조건은 식(4)와 같다.

이에 대하여 4상으로 하면 쌍극단위의 상배치의 경우는 I상과 III상권선, II상과 IV상권선이 각각 (그림 10)에서와 같이 ABCD의 자극과 abcd의 자극에 대하여 바이파일러 권선의 기능을 하고

두 군의 자극은 각각 4극이나 서로 45°로 어긋나 있다. 45°는 앞에서 언급한 바와 같이 4상4극에서 쌍극단위로 상권선을 배치하면 쌍극절이 180°이고 상수가 4이므로 쌍극절을 상수로 나눈값이다.

(그림 10)은 I상이 여자되면 자극 A와 C는 N극으로, 자극 B와 D는 S극으로 여자되나 III상이 여자되면 반대로 자극 A와 C는 S극으로 자극 B와 D는 N극으로 여자되어 I상과 III의 권선은 바이파일러 권선으로 되고 II상과 IV상의 권선도 마찬가지로 바이파일러 권선으로 됨을 보인다.

이와 같이 쌍극단위의 상배치의 4상은 자극군이 2(=m₁=4/2)개 밖에 생기지 않는 점과 HB형의 토오크특성 곡선은 여자의 극성으로 변경되는 점을 이용하여 그림 10(b)에서와 같이 그림 10(a)의 등간격 배치를 기준으로 한 위치에서 II상과 IV상권선이 만드는 자극군만 어느 한 방향(그림에서 시계방향)으로 $\frac{\theta_R}{4}$ 만큼 다같이 이동시키면(그림 11)과 같이 I상과 II의 토오크곡선은 $\frac{\theta_R}{4}$ 만큼 위상각차가 생기고 III상과 IV상의 것을 각각 I상과 II의 것과 반대로 된다.



(그림 11) 4상4극 HB형 토오크곡선

(그림 10)에서 I상이 여자되어 정지한 a점에서 II→III→IV→I상 순으로 여자하면 PM형에서와 같이 a→b→c→d→e로 연속 스텝동작을 하고 스텝각은 $\frac{\theta_R}{4}$ 임을 알 수 있다. 이 경우 회전자의 돌극수 N_R의 조건은 각 자극이 등간격 배치의

위치에 있을 때 회전자 돌극축이 각 자극축과 일치하면 두 자극군중 하나를 등간격 배치의 기준위치에서 $\frac{\theta_R}{4}$ 만큼 이동시킬 경우 그군의 고정자 자극축은 회전자 돌극축에서 이동시킨 방향으로 다 같이 $\frac{\theta_R}{4}$ 만큼 이동되므로 N_R은 고정자 돌출자극수

N_p 의 정수배가 되어야 한다.

한편 같은 4상이라도 1극단위의 상배치를 하면 돌출 자극수 N_p 는 $16(=4 \times 4)$ 로 3상의 경우와 같이 각 자극은 모노파이어권으로 되고 $\frac{\theta_R}{4}$ 의 스텝각으로 동작한다. 이 경우 회전자의 돌극수 N_R 의 조건은 식(4)와 같다.

이상에서 HB형의 실현은 극수와 무관하게 상수를 4상으로 하고 쌍극단위의 상배치를 하는 것이 가장 유리함을 알 수 있다.

6. 다상여자의 효과

스텝모터의 여자 방식에는 한 번에 1상씩 여자하는 1상 여자, 한 번에 두 상씩 여자하는 2상 여자, 한 번은 1상여자 다음번은 2상을 여자하는 1-2상 여자등이 있다. 2상 여자의 경우 토오크특성곡선은 철심의 자기포화를 무시하면 여자되는

두 상의 토오크곡선을 합성한 것과 같으므로 토오크의 크기는 위상각차 때문에 한 상분 토오크의 두배로 되지 않으며 2상여자의 경우에 합성토오크곡선간의 위상각차는 1상여자시의 것과 같다.

7. 결 언

지금까지 각종 스텝모터에 대하여 각각의 토오크 발생기구를 쉽게 알 수 있는 기본구조에 입각하여 구조와 기본 동작특성의 특징을 중점 비교하여 보았다. 이해에 도움이 되는 그림의 제시가 지면관계로 여의치 못하였지만 스텝모터의 기본구조 및 기본 동작과 그리고 관련 주요용어의 개념을 확실히 해두는 것은 스텝모터 전반에 대한 이해뿐만 아니라 스텝모터의 제어 및 특성 개선에 필수적이라고 볼 수 있다.

경청하는 사람이 가장 잘 설득할 수 있다.