

# 히스테리시스 동기 전동기 응용

홍선기\*, 정 훈\*\*, 윤중석\*\*\*

(\*호서대 교수, \*\*(주)하우 대표, \*\*(주)코모텍 연구소장)

## 1. 서 론

오늘날 특수 소형 전동기는 소형화, 토크 증가, 노이즈 감소에 관심이 집중되고 있다. 이는 가전에서 뿐 만 아니라, 산업용, 군사용에 이르기까지 요구되고 있는 요소이다. 특히 특수 소형 동기 전동기로서 1918년 처음 개발된 히스테리시스 전동기는 구조가 간단하고, 특별한 구동장치 없이도 스스로 기동이 되고, 전원주파수에 동기되어 안정한 운전이 가능한 동기 전동기이다. 간단한 구조를 갖는 히스테리시스 전동기는 사용 수명이 길어 가전용으로는 타이머용, 시계용 등에 널리 사용되어 왔는데 처음에는 단극형으로 개발되었고, 소형화, 토크 증대를 목적으로 개선되어 현재의 다극형 전동기에 이르기까지 여러 부분에서 사용분야가 확대되어 교류 전기시계, 냉장고, 전자레인지, 카운터, 릴레이, 자동 판매기, 점등장치, 경보장치 외에 타이머 스위치 등 널리 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 군사용으로는 동조자이로스코프와 같은 고속 동기운전이 요구되는 분야에 사용되고 있다.

본 연구에서는 소형가전에서 군사용에 이르기까지 이용되고 있는 히스테리시스 전동기의 구조, 원리 및 해석방법을 이해하고 응용분야를 알아보아, 새로운 응용 분야 적용에 도움이 되고자 한다.

## 2. 히스테리시스 전동기

### 2.1 전동기의 구조 및 특징

히스테리시스 전동기는 강자성체의 히스테리시스 현상을 이용한 동기 전동기로서, 특별한 구동법이 없이 운전시의 주

파수를 바로 인가하여도 자기동이 가능하고 구조가 간단하며, 특히 다상형 히스테리시스 전동기는 고속, 정속도 회전용에 적합하다<sup>(2)</sup>. 그림 1은 2상 히스테리시스 전동기의 구조로 16 슬롯을 갖고 있다.

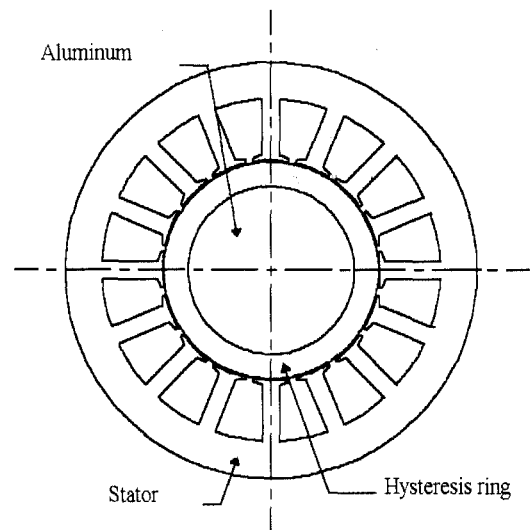


그림 1 히스테리시스 전동기 구조

다극형의 경우 고정자는 유도 전동기나 동기기와 같이 일반적인 AC 전동기의 구조와 비슷하여 회전자계를 만들어내는 역할을 한다. 회전자 부분은 반경질 자성재료(semi-hard magnetic material)로 이루어진 히스테리시스 링과 축, 중간

지지를 위한 알루미늄과 같은 비자성체로 구성되어 있다. 회전자의 구조가 원통형이기 때문에 토크 리플(ripple)이 적고, 풍손이 적어 고속에서도 조용히 회전할 수 있기 때문에 자이로스코프의 회전자 구동용에도 사용되고 있다<sup>3)</sup>.

단극형 또는 셰이딩 코일(shaded-coil)형이라고 하는 히스테리시스 전동기는 그림 2와 같이 1개의 권선으로 고정자 권선이 구성되며, 단상 전원만으로 회전하게 된다<sup>1)</sup>. 그림 1의 다극형에서도 마찬가지로, 단극형은 유도전동기의 Shading coil형 전동기와 유사하게 극에 단락환이 존재한다. 이 전동기는 낮은 효율, 작은 토포크라는 단점이 있지만 매우 간단한 구조와 소형화가 가능하고 동기기라는 점에서 타이머 모터 등 저출력, 동기속도가 요구되는 분야에서 매우 널리 사용되고 있는 전동기이다. 히스테리시스 전동기는 전원 및 운전 방식에 따라 표 1과 같이 분류하기도 한다.

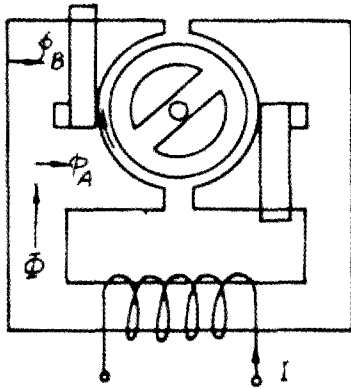


그림 2 셰이딩 코일 히스테리시스 전동기

표 1 히스테리시스 전동기 분류

다상형	2상 또는 3상	다상 전원
단상형	콘덴서형	단상전원
	셰이딩코일형	단상전원

단상형은 상용전원에 대한 동기속도가 요구되는 타이머나 턴테이블 구동과 같은 분야에서 사용되므로 특별한 구동장치 없이 상용 전원을 직접 인가하여 사용한다. 콘덴서형은 단상 전원만 가능한 곳에서 다상형과 유사한 성능을 발휘하기 위해 그 구조는 그림 1과 같은 다상형과 동일한 구조를 갖으면서, 보조 권선에 콘덴서를 연결하여 주권선과 위상차를 만들어 회전자계를 발생시킨다. 이 회전자계는 정확한 원형이 아닌 타원이 되기 쉬워서 효율은 우수하지 못하다. 그림 1과

같은 다상형은 단상형에 비해 상대적으로 큰 토포크와 고속 운전이 필요한 분야에 이용되며, 특히, 동조 자이로스코프와 같이 큰 관성부하를 갖는 경우는 빠른 기동을 위해 다상형 히스테리시스 전동기가 사용된다. 이 경우는 요구되는 속도에 대한 높은 주파수가 인가되어야 하므로 히스테리시스 모터 구동용 인버터가 필요하게 된다. 히스테리시스 모터의 인버터는 보통 정현파 전압 또는 구형파 전압형으로 운전되며, 운전 주파수에 동기되어 동기속도로 구동된다.

2.2 히스테리시스 전동기의 특성 해석

히스테리시스 전동기의 토포크식은 히스테리시스 링 내에 축적된 자기 에너지의 관점에서 가상 일(virtual work)의 원리를 사용해서 유도되며, 그 유도과정은 다음과 같다<sup>2)</sup>.

히스테리시스 링 내의 자계 및 자화의 세기를 각각  $\vec{H}$  및  $\vec{M}$  이라고 하고 링 내부의 임의의 점에서 미소체적  $dV$ 를 취하면  $dV$ 내에 축적되는 자기 에너지는 극좌표계를 사용하여 성분별로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$dW = (J_r H_r + J_\theta H_\theta + J_z H_z) dV \tag{1}$$

여기서  $z$ 는 회전자의 축방향 성분을 나타낸다.

지금 회전자가 미소각  $\Delta\theta$  만큼 이동하였다면 가상 일의 원리에 의해  $\tau\Delta\theta$ 만큼의 기계적 일을 하였다. 이것은 회전자의 축적된 자기 에너지의 미소 소비로 나타나며

$$\tau\Delta\theta = -\Delta(dW) \tag{2}$$

가 성립하여야 한다. 따라서 미소체적  $dV$ 를 극좌표계로 나타내어 벡터관계식  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$ 를 사용하면 전동기의 발생토포크는

$$\tau = p \int_0^L \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi/p} [B_r \frac{\partial H_r}{\partial \theta} + B_\theta \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} + B_z \frac{\partial H_z}{\partial \theta}] r dr d\theta dz \tag{3}$$

로 주어진다. 위 식에서 0에서 1극 한 쌍의 자극  $2\pi/p$ 까지의 적분에 있어서 자속 밀도와 자계의 세기는 1주기분의 변화를 하고 있으므로 처음 값으로 되돌아온다. 따라서 적분은 주회적분으로 표시할 수 있으며, 토포크 식은 다음과 같이 된다.

$$\tau = p \int_0^L \int_{r_1}^{r_2} \oint (B_r dH_r + B_\theta dH_{\theta 1} + B_z dH_z) r dr dz \tag{4}$$

이 식을 실제로 적용하려면 히스테리시스 링 내의 모든 점에서 자속 밀도  $B$ 와 자계  $H$ 가 주어져야 한다. 히스테리시스 링 내의 히스테리시스 현상에 기인하여 이러한 성분간에는

위상차가 존재하며 자속 밀도는 자계에 대해 어떤 위상각 만큼 늦어진다. 실제의 전동기를 보면 자계의 z축 성분은 링 회전자의 z축 방향 링부의 근처를 제외하고는 대단히 적어서 무시할 수 있으며 더욱 간략화해서 끝부분의 자계의 흐트러짐을 무시하면 기본 토크 식의 제 3항을 무시해서 식 (5)와 같이 간단히 표기될 수 있다.

$$\tau = pL \int_{r_1}^{r_2} \oint (B_r dH_r + B_\theta dH_\theta) r dr \quad (5)$$

일반적으로 이 식을 가지고 히스테리시스 전동기의 기본 토크 식으로 하고 있으며 실제 전동기의 이론 토크 식의 기초가 되고 있다. 링 회전자의 반경 방향의 두께  $r_2 - r_1$ 이 아주 얇다고 하면 반경방향 자계 성분은 무시할 수 있으며 윗식의 제 1항을 생략하면, 토크 식의 적분 계산은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{p}{2\pi} L \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr \oint B_\theta dH_\theta \\ &= \frac{pV_r}{2\pi} \oint B_\theta dH_\theta = \frac{1}{2\pi} pV_r E_h \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식에서 적분값  $E_h$ 은 링 재질에서의 히스테리시스 루프 면적이 되며, 결국 전동기의 토크를 계산하기 위해서는 링에서 생기는 히스테리시스 루프의 정확한 면적이 계산되어야 한다.

먼저의 토크 계산에서는 동기시를 가정하였으나 회전자기 슬립 s로 회전하고 있는 경우를 알아보자. 이 경우 회전자기 자계는 슬립주파수 sf 로 이동해 가는 회전자계로 된다.

원주방향 성분만을 대상으로 자계를

$$H = H_p \cos(swt - p\theta) \quad (7)$$

로 가정할 수 있다. 자속 밀도는 이것으로부터 위상차  $\alpha$  만큼 늦지만 토크 계산 시에는 그 기본과 만을 고려하면 충분하여 자속 밀도를

$$B = B_q \cos(swt - p\theta - \alpha) \quad (8)$$

로 놓을 수 있다. 앞의 토크 기본식 (5)에 대입해서 순시 토크를 계산하면

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{pV_r}{2\pi} B_q H_p \int_0^{2\pi} \cos(swt - p\theta - \alpha) \cos(swt - p\theta) d(p\theta) \\ &= \frac{pV_r}{2\pi} B_q H_p \pi c p s \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다.

이 계산결과로부터 주목할 것은 순시토크가 시간 t 및 슬립 s와는 전혀 무관하다는 점이다. 다른 전동기에서 볼 수 있는 토크의 변동, 소위 진동성의 토크를 가지지 않고, 시동 시에서 동기 시까지의 모든 속도에서 정토크 특성을 가지는 전동기이다. 히스테리시스 전동기 특유의 성질이며 토크 불균일 또는 회전 불균일은 원리적으로는 발생하지 않는다. 음향기 기용 혹은 자이로스코프의 회전자 구동용처럼 진동 및 회전 불균일이 극도로 배제되어야 하는 용도에는 가장 적합한 특성의 전동기라 할 수 있다.

이제까지의 설명과 같이 히스테리시스 모터의 출력은 히스테리시스 루프의 면적에 비례한다. 그러나, 히스테리시스와 같은 비선형 특성을 갖는 현상에 대한 정확한 해석은 매우 어렵다. 따라서, 어느 정도의 오차를 감수하면서 간단하면서 근사적인 방법으로 가장 많이 사용되었던 것이 타원 근사법 혹은 쌍곡선 근사법 등의 등가 루프법<sup>[2]</sup>이다. 타원 근사법은 그림 3과 같이 정현파 자속밀도와 자계로 가정하여 등가화하여 히스테리시스 현상을 해석하는 가장 간단한 방법이다<sup>[4]</sup>. 즉, 그림 3과 같이 고정자의 회전자계에 대해 자속밀도의 지연이  $\alpha$  라는 가정으로부터 히스테리시스 루프 면적을 구하여 특성을 해석한다. 하지만 이러한 근사법은 시간 및 공간고조파 자계에 의한 영향을 고려하기 어렵기 때문에 링에서의 정확한 자계 계산이 어려운 점이 있다.

히스테리시스 전동기에 대한 정밀한 해석을 위하여는 히스테리시스 현상을 정량적으로 해석할 수 있는 기법이 필요하며, 가장 대표적인 것이 프라이자흐 모델<sup>[3]</sup>을 이용한 것이다. 프라이자흐 모델은 히스테리시스 현상을 해석하기 위해 개발된 모델로, 히스테리시스 현상이 자기 쌍극자의 모임에서 나타나는 현상으로 이산화하였다. 이로부터 자기 쌍극자들의

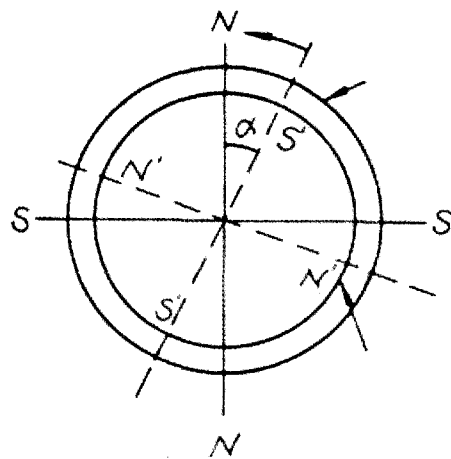


그림 3 히스테리시스 모터 기동 원리

밀도와 상태를 적분함으로써 히스테리시스의 현상을 해석하고 있다. 특히 히스테리시스 현상의 더욱 정확한 해석을 위해 벡터 히스테리시스 모델을 이용한 특성 해석 노력이 많이 기울여 지고 있다.<sup>(5)</sup>

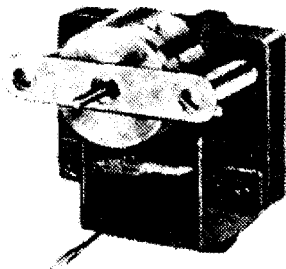
### 3. 히스테리시스 전동기 응용분야

히스테리시스 전동기는 소형화 및 자기동이 가능한 특수 소형 동기 전동기이다. 그림 3과 같은 세이딩코일형 히스테리시스 전동기는 타이머 등 출력은 미미하지만 정확한 동기 속도가 요구되는 분야에 이용되고 있다. 그림 3(a)는 2극이기 때문에 속도가 빠르지만, 그림 3(b)는 다극형이어서 속도도 저속으로 운전가능하다. 즉, 제작시 극수를 고려하여 설계하면 감속기 없이도 저속을 얻을 수 있다. 이런 것들의 출력은 보통 1 W 미만으로 매우 작은 출력을 갖고, 또한 효율도 낮은 편이다. 하지만 토크를 요하지 않고, 동기속도가 요구되는 분야에서는 매우 유리한 전동기이다. 수와트 급의 단상 콘덴서형 히스테리시스 전동기는 최근에는 그 수요가 매우 감소하게 되었다. 그 이유는 주로 브러시리스 직류 전동기와 같은 것들이 전력전자 기술에 힘입어 구동장치부가 성능이 우수하면서 저가로 생산이 가능해짐에 따라 특수한 분야를 제

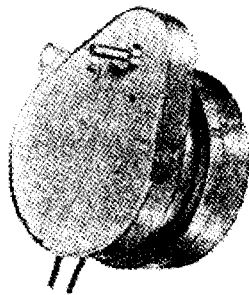
외하고는 낮은 효율로 인하여 대체되고 있기 때문이다. 즉, 상용 전원을 이용한 경우는 저출력 동기 전동기로 사용되고 있다.

한편, 동조 자이로스코프와 같이 고속(12,000 - 24,000 rpm)의 속도를 요하며, 자기동, 초소형, 저소음 등 까다로운 조건이 필요한 특수 분야에 히스테리시스 전동기가 사용되고 있다. 그림 5는 외전형 히스테리시스 전동기의 단면도이며, 외전형이어서 안정한 정속 운전에 유리하다. 이러한 고속용 히스테리시스 전동기는 원심 분리기와 같은 분야에 응용에도 유리하다고 할 수 있다.

이러한 것들은 상용 전원이 아닌 전용 인버터를 요구하게 되지만, PWM과 같은 운전 기법은 요구되지 않고 주로 구형파 또는 정현파 전압운전을 하는 것이 보통이다. 또한 동기 전동기이므로 제어용 궤환(feedback) 회로도 필요하지 않다. 유도기나 직류기는 기동시 큰 전류가 흐르게 되지만, 히스테리시스 전동기는 기동에서 동기에 이르기까지 전동기의 임피던스는 크게 변화하지 않는다. 이러한 면에서 전류 제어회로도 필요하지 않다. 따라서 구동용 인버터도 매우 저가로 개발할 수 있는 특징이 있다. 이러한 점으로부터 히스테리시스 전동기는 고속, 자기동 및 동기 특성이 요구되는 분야에 매우 유리한 장점을 갖고 있다고 할 수 있다.



(a) 2극형 세이딩코일



(b) 다극형 세이딩코일

그림 4 세이딩코일 히스테리시스 전동기

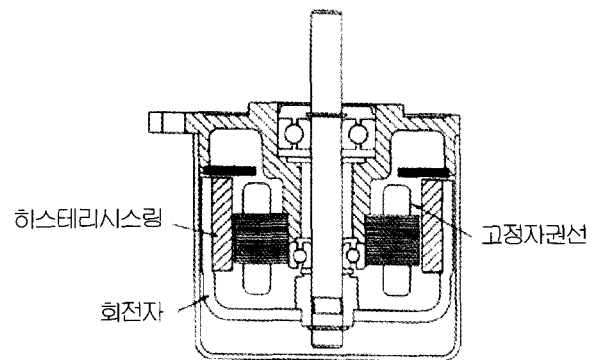


그림 5 외전형 히스테리시스 모터

### 4. 결 론

이제까지 히스테리시스 전동기의 구조 및 원리, 특성 해석법과 응용분야에 대하여 살펴보았다. 히스테리시스 전동기는 크게 두 분야에 사용되고 있다. 즉, 상용전원을 사용하며, 저출력 동기속도가 요구되는 타이머 및 그 유사분야와 인버터로 구동되며 고속 저소음 저진동 동기기의 특성을 갖는 자이로스코프와 같은 분야이다. 아직은 이러한 분야에서 히스테

리시스 전동기를 대처할 만한 전동기는 없어 보인다. 특히 고속용으로는 동조 자이로스코프 뿐만 아니라 원심분리기 등과 같은 분야에도 응용되고 있으며, 그 응용분야는 더욱 넓어질 것이 기대되는 바이다. ㉑

참고 문헌

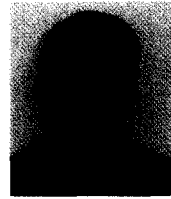
- [1] 精密小形モータ總合資料集 Vol. 1. 總合電子リサーチ, 昭和 57.
- [2] 원종수 역, 페라이트 磁石 回轉機의 設計, 동일출판사, 1995.
- [3] Sun-Ki Hong, Hong-Kyu Kim and Hyun-Kyo Jung, "Finite Element Analysis of Hysteresis Motor Using the Vector Magnetization-dependent Model", IEEE Trans. on Magn. Vol. 34, No.5, pp. 3052~3055, September, 1998.
- [4] 宮入 歷太, 片岡 昭雄, "ヒステリシス電動機の基本等價回路", 電氣學會雜誌, 85, p. 1740, (昭 40-10).
- [5] Sunki Hong, Deokgeun Kim, Hoon Jung and Jongsoo Won, "Vector Hysteresis Model for Unoriented magnetic materials", IEEE Trans. on Magn., Vol. 30, No.5, pp. 3371~3374, September 1994.

〈 저 자 소 개 〉



**홍선기(洪瑄基)**

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박). 1993년~1995년 렉스산전(주) 선임연구원. 1999년~2000년 8월 미국 위스콘신 메디슨 대학 방문교수. 1995년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.



**정훈**

1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년~1993년 LG전자 책임연구원 역임. 1993년~ 현재 (주)하우 대표이사.



**윤중석(尹重錫)**

1964년 5월 30일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~2000년 LG산전 책임연구원 역임. 2000년 5월~현재 (주)코모텍 연구소장.