

와전류 커플링의 특성 비교

장석명, 조성국, 이성호
충남대학교.

Characteristic Comparison of Three Types of Eddy Current Coupling

Seok Myeong Jang, Sung Kook Cho, Sung Ho Lee,
Chungnam National Univ.

Abstract - Electric control of eddy coupling offers many new possibilities in process control and other industrial control applications. And a form of speed control for the load is affected for a system driven by constant frequency induction motor.

This paper compare speed-torque characteristic of three types of eddy-current coupling by using the analytical method. And characteristic experiment of three types of eddy current coupling is put into operation. And then, this paper will discuss operational and magnetic field characteristic of three types model.

1. 서 론

와전류 커플링은 일정속도로 회전하는 전동기의 축에 맞물려 여자 전류의 양을 조절함으로써 출력속 속도를 비 접촉식으로 가변할 수 있는 전자기 에너지 전달장치이다. 유도전동기는 가격이 저렴하고, 힘이 좋으며, 간단하여 유지보수가 편리한 등의 탁월한 장점에 불구하고 속도제어가 불리하다는 단점이 있어 제어계통의 구동력 발생장치로는 직류전동기가 대부분 사용되었다. 최근에는 전력반도체 및 회로 설계 기술의 발전으로 산업현장에서 인버터, 컨버터와 같은 가변속 전원 시스템이 거의 일반화 되고 있다.

따라서 와전류 커플링에 의한 전동기의 속도 변화 및 제어는 인버터 전원을 사용하는 시스템과는 달리, 모터의 비효율운전의 결정적인 원인이 되는 고조파를 전혀 발생시키지 않는다. 그러면서도 전동기의 속도에 비례하여 힘이 발생하도록 하여 일정한 속도로 변속이 가능하므로, 부드러운 제어가 가능하여 전동기와 부하에 큰 무리를 주지 않는 것이 큰 장점이다.

와전류 커플링은 유도자의 형태에 따라 출력 특성에 있어서 많은 차이가 있다. 그 대표적인 예로 인덕터 형 와전류 커플링은 단일 방향의 자극이 드럼을 쇠교하여 자계를 형성하는 방식이고, Claw Pole 형 커플링은 유도자내에 N극과 S극의 두 개의 자극이 형성되며 폴의 형상이 Claw의 형상의 구조를 갖는다. Claw Pole 와전류 커플링중에는 누설자속의 영향을 최소화하기 위하여 폴이 끝의 갈수록 조금씩 좁혀들어가는 Tapered type의 와전류 커플링이 있다.

이에 본 논문에서는 세 가지 타입의 와전류 커플링에 대하여 구조적인 특징을 설명하고 자계 특성을 일반 해석법을 통하여 특성 해석하고, 각각의 타입에 대하여 장단점 및 특성을 비교 검토하고자 한다. 또한 각각의 해석 모델에 대하여 속도 및 토크, 여자 전류에 관한 특성 실험을 통해 특성을 검토하고자 한다.

단, 세가지 타입 모델에 대한 재질 특성이 일치하지 않기 때문에 재질 분석하여 B-H 특성을 제시하였다.

2. 세가지 타입의 와전류 커플링의 특성

2.1 구조 및 특성 비교

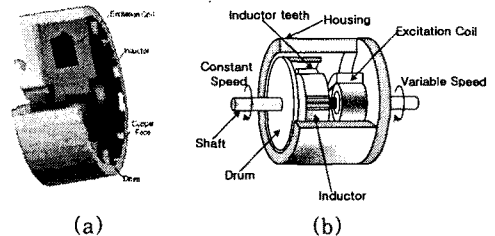


그림1 두가지 타입의 와전류 커플링 구조
(a) Claw-pole 형 (b) 인덕터형

그림1은 Claw-pole 타입과 인덕터 타입의 와전류 커플링 구조를 나타낸다. 두가지 타입의 와전류 커플링의 동작 원리는 비슷하나 유도자의 형태에서 차이가 있다. 인덕터에 하나의 극만 존재하는 형태를 갖는 와전류 커플링을 Homopolar 타입의 와전류 커플링이라 하며 Inductor 커플링이 이에 속한다. 이러한 타입의 커플링의 동작은 자계의 극성에 의지하지 않으며 단지 자계의 최대값과 최소값의 사이를 변동하는 것만으로도 충분히 동작을 한다. 하지만 이러한 구조의 커플링은 Heteropolar가 갖는 구조에서 주어진 자계의 세기에서 얻을 수 있는 토크에 비하여 적은 힘을 얻는다는 단점을 가지고 있다.

그림 1(b)는 유도자의 극이 단일극으로 구성되어 있는 Homopolar 타입의 와전류 커플링의 구조도를 보여주고 있다. 이러한 종류의 와전류 커플링은 자극이 N극과 S극의 극성 변화의 변화가 없고 다만 자계 세기의 최대값과 최소값의 차이만 있게 된다.

하지만 이러한 구조를 갖는 와전류 커플링은 유도자 내에 N극과 S극이 모두 존재하는 Heteropolar 타입의 와전류 커플링에 비하여 토크의 약 1/4정도만 발생한다. 몇몇 종류의 Homopolar 타입은 인덕터와 함께 회전하지 않는 고정 계자 시스템을 갖고 있어 여자 전류는 슬립이나 브러쉬를 거치지 않고 전달될 수 있다.

2.1.1 계자 시스템에 따른 구분

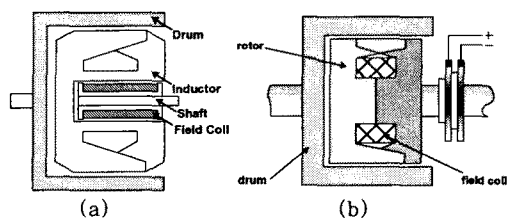


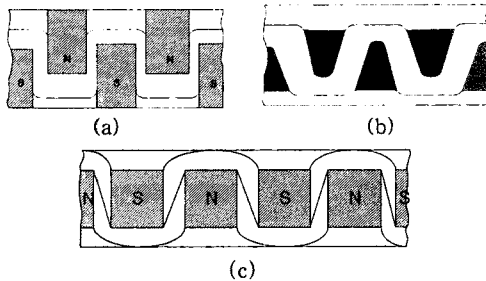
그림2 계자시스템에 따른 구분

현재 상업적으로 사용되어지는 와전류 커플링은 형상에 따라 여러 종류가 사용되어지고 있다. 그중에서 그림 2(b)에서처럼 대칭형 Lundell Pole 또는 Claw Pole 을 가지고 있으며 유도자내에 있는 코일이 유도자와 같이 회전하며 전원인가방식은 슬립링을 통하여 인가되는 방식인 회전형 계자 시스템을 지니고 있다. 이 시스템의 장점은 구조적으로 간단하며 고정형 계자 시스템에 존재하며 제한된 철심내에 누설자속을 증가시키고 포화를 증가시키고 결과적으로 토크를 감소시키는 기생공극이 존재하지 않기 때문에 성능상 효율적이다. 하지만 슬립링의 마모로 인하여 고장이 잦다는 단점이있어 유지 보수가 필요하다(1).

고정형 계자 시스템의 경우 자속 경로에 있어서 자기 저항이 크고 구조가 복잡하며 제한적인 철심 영역이 존재하기 때문에 지속적인 토크의 감소가 초래된다. 하지만 낮은 출력 관성과 브러쉬가 없기 때문에 산업용으로 많이 사용된다.

그림 2(a)는 고정형 계자시스템을 갖는 와전류 커플링의 단면을 보여준다. 완전삽입형 Lundell 타입과 비슷하나 유도자의 형태가 Lundell pole 을 갖는다는 점에서 비슷하나 폴의 끝에서 중심으로 들어갈수록 점점 좁아지는 Tapered pole(또는, Claw Pole)을 가지고 있으며 유도자에 인가되는 전원의 인가 방식에 있어서 이 타입은 슬립링을 사용하지 않는 대신에 코일이 유도자와 함께 회전하지 않고 고정되어 있다. 반면에 기생공극이 존재하기 때문에 회전형 계자 시스템에 비하여 토크 발생 효율면에서는 다소 떨어진다. 하지만 슬립링을 사용하지 않기 때문에 회전형 계자 시스템에 비해 브러쉬 마모가 존재치 아니하는 장점이 있다.

2.1.2 유도자 폴의 모양에 따른 구분



(a) 부분 삽입형 (b) Tapered type
(c) 완전 삽입형

그림3 폴의 형상에 따른 구분

그림 3은 Claw Pole 또는 Lundell 커플링이라 불리는 와전류 커플링의 고정자의 폴의 형상을 나타내고 있다. 이러한 종류의 와전류 커플링은 폴의 삽입 정도에 따라 완전 삽입형 또는 부분 삽입형으로 나뉘어 진다. 보통 이러한 타입은 높은 전력의 전달시에 주로 이용된다. 그리고 자극의 모양이 끝으로 가면서 조금씩 좁혀져어가는 tapered type등이 있다.

2.2 일반 해석적인 방법에 의한 특성 비교

일반적으로 3가지 타입의 와전류 커플링에 대해서 특성적인 차이점은 유도자의 퍼미언스에 의한 공극 자속밀도의 차이에 많이 나타난다. 일반 자성체내에서 기자력과 자속과의 관계식은 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$\Phi = P \times NI \quad (1)$$

여기에서 P 는 공극 퍼미언스이고 NI 는 기자력은 나타낸다.

먼저 공극에서의 퍼미언스를 푸리에 급수로 전개하여 표현하면

$$P = P_0 + P_1 \cos \theta + P_2 \cos 2\theta + P_3 \cos 3\theta \quad (2)$$

$$= P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cos n\theta$$

기자력에 관한식을 푸리에 급수 전개하여 표현하여 정리하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$F_f = F_0 + F_1 \cos \theta - F_3 \cos 3\theta + F_5 \cos 5\theta \dots$$

$$= F_0 + \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos m\theta \cos \left(\frac{m-1}{2} \right) \pi \quad (3)$$

식(1),(2)과 (3)으로부터 의하여 기자력에 따르는 자속량에 관련된 식을 정리하면 식(4)와 같이 표현된다.

$$\Phi = PF_f = \left[P_0 F_0 + F_0 \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cos n\theta + P_0 \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos m\theta \cos \left(\frac{m-1}{2} \right) \pi + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} P_n F_m \cos n\theta \cos m\theta \cos \left(\frac{m-1}{2} \right) \pi \right] \quad (4)$$

2.2.1 Lundell coupling에 관한 자속 특성식

먼저 Lundell Pole을 갖는 경우는 기자력은 식(5)와 같다.

$$F_0 = 0 \quad (5)$$

그러므로 기자력은 식(6)과 같다.

$$F_f = \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos \theta \cos \left(\frac{m-1}{2} \right) \pi \quad (6)$$

퍼미언스는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = P_0 + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} P_n \cos n\theta \quad (7)$$

그러므로 식(6)과 (7)에 의하여 자속 밀도는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_f = PF_f$$

$$= P_0 \sum_{m=1}^{\infty} F_m \cos m\theta \cos (m-1) \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$+ \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ F_m P_n \cos n\theta \cos m\theta \cos \left(\frac{m-1}{2} \right) \pi \right\}$$

2.2.2 인덕터 커플링에 대한 자속 특성식

먼저 인덕터 커플링의 기자력 분포에 관련된 특성식을 유도하기 위하여 공극에서의 형상을 고려하여 푸리에 급수 전개를 하면 식(3)에서 계수는 각각 다음과 같다.

$$F_1 = F_3 = F_5 \dots = 0 \quad (9)$$

그러므로 공극 자속밀도는

$$B_f = PF_f = F_0 \left(P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cos n\theta \right) \quad (10)$$

지금까지 다루어진 자체특성식으로부터 해석 모델에 대하여 적용하여 특성을 검토하여 보면, 먼저 Lundell coupling에 대하여 자속 밀도를 구하여 보면

$$B_f = \frac{4}{\pi} \sin \frac{k\pi}{2} \frac{\mu_0}{g} F_f \cos \theta \quad (11)$$

$$B_f = \frac{2}{\pi} \sin k' \pi \frac{\mu_0}{g} F_f \cos \theta \quad (12)$$

여기서 계수 k 와 k' 의 전형적인 값들은 인덕터와 Lundell coupling에 대하여 $k=0.7$ 이고 $k'=0.45$ 이므로 기자력과 공극이 같다고 할때, 자속 밀도의 측면에서 볼 때, Lundell coupling이 Inductor coupling 보다 대략 $2 \sin k\pi / \sin k' \pi = 1.8$ 배 우수하다. 또한 같은 폴수와 축방향 길이를 가지고 있다고 볼 때, 동일한 슬립에 대하여 (1.8)^{2.86} = 5.4배 크다는 것을 의미한다.

2.3 해석 및 실험 결과

유도전동기의 출력속도가 1780rpm으로 일정하다고 가정하면 정격토크에서의 출력속도는 각각 다음과 같다. Tapered type coupling은 대략 1560rpm, Lundell coupling은 약 1470rpm, Inductor coupling은 대략 1360rpm정도이다. 그림5와 그림6은 측정된 재질값을 통해 해석된 결과 및 측정된 특성 결과를 보여준다. 정격에서 여자 전류를 인가하였을 때, 실험 결과와 해석적인 방법을 통한 결과값이 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 그림6의 Lundell coupling은 드럼의 비투자율이 866이 입력되어 해석되었고, Tapered type coupling은 1438의 비 투자율값이 입력되었다.

그림7은 4가지 타입의 모델에 대하여 구동 특성 실험을 실시하여 구한 속도-토크 특성 그래프이다. 단 실험에서 재질 특성은 그림5에 제시된 결과와 같다. 실험에 사용된 와전류 커플링은 동일한 여자조건하에서 실시되었으며 공극 직경과 극수 등의 조건은 동일하지 아니다. 그림8은 여자전류에 따른 출력 속도를 비교한 그래프이다.

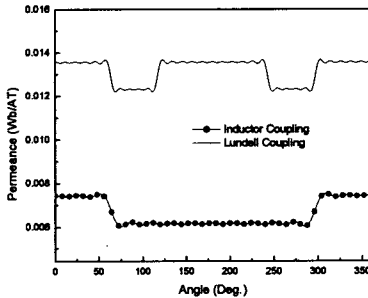


그림4 인덕터 및 Lundell 커플링의 퍼미언스 비교

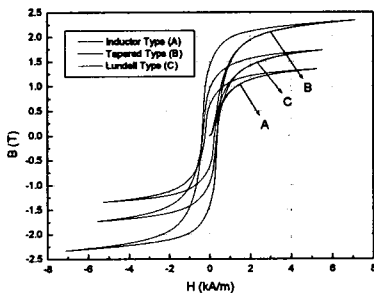


그림5 세가지 와전류 커플링의 재질 특성 비교

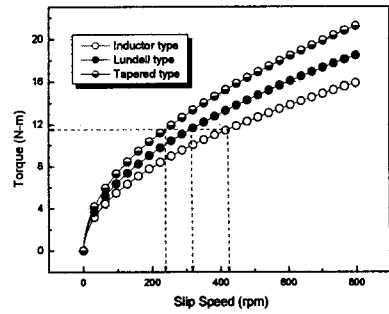


그림6 해석적인 방법에 의한 세가지 타입의 와전류 커플링의 속도-토크 특성 비교

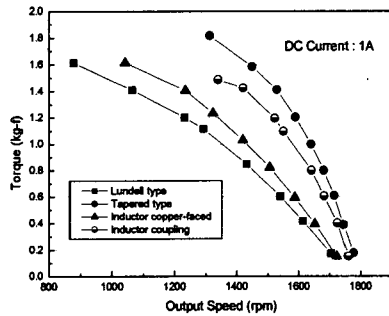


그림7 실험에 의한 4가지 타입의 와전류 커플링에 대한 속도-토크 특성 비교

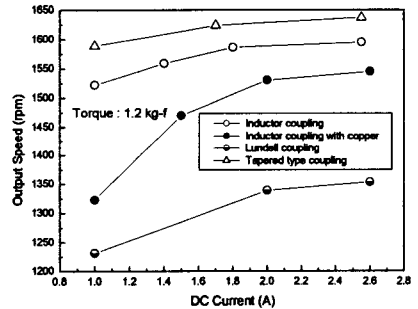


그림8 실험에 의한 여자전류에 따른 출력 속도 비교

3. 결 론

본 논문에서는 여러 가지 종류의 와전류 커플링에 대하여 구조 및 동작원리를 살펴보고 유도자 및 폴의 형상에 따라 여러 타입의 와전류 커플링의 자체 분포 특성이 어떻게 다르게 나타나는지에 대하여 살펴보았다. 또한 계자 시스템의 변화에 따른 장단점을 파악하였다. 실제로 해석적인 방법을 통하여 동일한 조건하에서 토크 특성을 비교하였으며 제작 및 실험을 통하여 다양한 종류의 와전류 커플링에 대한 속도-토크 특성을 검토하였다.

(참 고 문 헌)

- (1) E.J.Davies, "Three-dimensional theory of eddy current coupling with copper-faced loss drums", *PROC. IEE, Vol. 124, No.12, DECM 1977*
- (2) E.J.Davies, "General theory of eddy current couplings and brakes", *PROC. IEE, Vol. 113 No. 5, May 1966*
- (3) D.A.Blaxham, "Eddy current couplings as an industrial variable speed drive", *PROC. IEE, Vol. 119, No. 8, August 1972*