

회전기계의 전자기 축전류에 대한 이론 및 실험

김재실*

Theory and Experiment for Electromagnetic Shaft Current in Rotating Machinery

Chaesil Kim*

ABSTRACT

Electrical damages to critical parts in rotating machinery have caused many machinery failures and hours of costly downtime. The problem of shaft currents generated in non-electrical machines have puzzled both users and manufacturers of these machines. The main solution for preventing electro-magnetic type damage is to demagnetize all of the machinery parts, however this is costly and time consuming. Therefore a thorough investigation into the causes and physical characteristics of electro-magnetic shaft currents is needed. In this paper, the self excitation theory was developed for a simple model, an axial flux Faraday disk machine surrounded by a long solenoid. Experimental tests were conducted to investigate the physical characteristics on an electromagnetic self excitation rig. The theory showed that the directions of both the shaft rotation and the coil turns should be identical if self excitation is to occur. From the tests, the electromagnetic type shaft current had both AC and DC components occurred at all vibration frequencies. This could point to the way to detect small instabilities or natural frequency locations by monitoring shaft currents.

Key Words : Self-Excitation(자력), Shaft Current(축전류), Rotating Machinery(회전기계)

1. 서론

회전기계의 베어링이나 다른 중요 부품의 축전류 (shaft current)에 의한 전기적 손상은 기계의 파손이나 작업중지를 유발하여 많은 손해를 끼친다. 전기 기계에서의 축전류의 발생은 알려져 있지만 비전기적인 회전기계에서 발생하는 축전류는 제작자나 사용자에게 의문이 되고 있다. 축전류는 정전기적 (electrostatic) 형태와 전자기적 (electromagnetic) 형태로 분류되며 정전기형 축전류는 회전체 (rotor)가

외부의 정전기에 노출되어 있어, 회전체와 고정체 (stator) 부품인 베어링이나 시일 (seal)에 손상을 입히는 경우로써 축 브러시를 사용하여 접지 시킴으로써 방지할 수 있다.^{(1),(9),(10)} 그러나 전자기형 축전류는 회전체가 어떤 자장 속에 존재할 때, 축에 전류가 전자기적으로 유도되는 자력 (self-excitation)형으로 회전체에 수천 암페어의 전류가 생성되어 고정체와 순간적으로 아크 용접과 같은 효과를 발생시켜 회전기계의 파괴를 야기하는 경우로써, 많은 연구가 진행되었지만⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾ 지금까지 전자기형 축전류의 원인 및 물리적

* 창원대 기계공학과

특징에 대해서는 체계적으로 밝혀져 있지 않고 있으며, 현재까지 사용하고 있는 그 방지대책은 비용과 시간 소모가 많은 모든 기계부분의 자장을 제거하는 것이 유일한 방법이다. 본 논문에서는 전자기형 축전류의 자력발생 현상을 해석하기 위한 이론적 모델을 제시하였고, 3 디스크 회전체 주위에 코일을 감은 실험장치에 대하여 전자기형 축전류의 여러 가지 물리적인 특징을 밝혀내기 위한 실험을 수행하였다.

2. 이론적인 전자기형 축전류 모델

Fig. 1처럼 긴 솔레노이드에 의해 둘러 싸여진 축방향 자속 페러데이 디스크 기계는 전자기형 축전류에 대한 해석적 모델로 이용되었다.⁽¹¹⁾ 투자율이 비선형인 자성재료의 해석은 복잡하므로 디스크의 투자율이 균일하다고 가정한다.

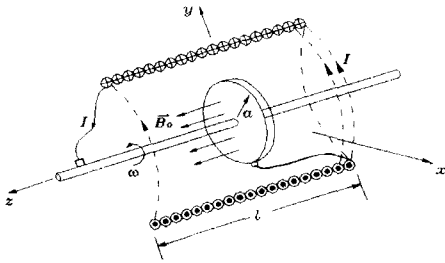


Fig. 1 Model for self excitation analysis

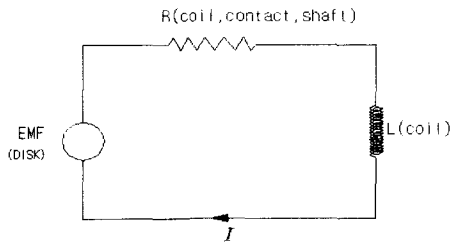


Fig. 2 Equivalent diagram for the model

Fig. 2는 이상적인 자력 축전류 모델에 대한 등가회로로 회전하는 디스크에서 발생하는 역기전력(EMF) $\epsilon(+\hat{z}$ 에 대해 시계방향으로 회전하면 $\epsilon > 0$)을 포함한다. Kirchhoff의 법칙으로부터

$$IR + L \frac{dI}{dt} = \epsilon \quad (1)$$

여기서

I : 회로의 전류흐름(+z 에 대해 시계방향으로 회전하면 $I > 0$)

R : 전체저항(코일, 접촉 및 축 저항 포함)

L : 솔레노이드의 자기 인덕턴스

자기정역학(magnetostatics)으로부터 자장밀도는 식(2)와 같다.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu(\vec{H}_s + \vec{H}_m) \quad (2)$$

여기서, $\vec{B}_0 (= B_0 \hat{z})$ 는 초기 자속밀도이고 솔레노이드에 의해 발생하는 자장세기, \vec{H}_s 는

$$\vec{H}_s = aNI\hat{z} \quad (3)$$

로 되고, 여기서 \hat{z} 는 축방향의 단위벡터이며, a 는 $+\hat{z}$ 에 대해 코일을 감은 방향이 시계방향 또는 반시계방향에 따라 $+1(-1)$ 이고, 솔레노이드 내부의 자기장은 균일하다. 그리고, 디스크에 유도된 자장세기 \vec{H}_m 은

$$\vec{H}_m = -\nabla\phi \quad (4)$$

로써 ϕ 는 스칼라 포텐셜이다.

식 (3), (4)를 Maxwell 방정식 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 에 대입하면

$$\nabla \cdot \vec{B}_0 - \nabla \cdot (\mu \nabla \phi) + \nabla \cdot (\mu \vec{H}_s) = 0 \quad (5)$$

이다. 여기서 \vec{B}_0 는 상수이고 $\nabla \cdot \vec{H}_s = 0$ 는 항상 성립하므로 식 (5)의 중간항은 식 (6)과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

솔레노이드 내부 공기층의 자장은 $(B_0 + aNI)\hat{z}$ 로 균일하고, 투자율이 서로 다른 물체가 자장 속에 분포할 때 그 경계에서는 자장의 연속성이 만족되어야하므로 식 (6)으로부터 \hat{x} 및 \hat{y} 방향을 무시하고($\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$), 그 해를 구하면 다음과 같다.

$$\phi = cz \quad (7)$$

그러므로

$$\vec{H}_m = \begin{cases} -c\hat{z} & \text{inside the disk} \\ 0 & \text{within the solenoid} \end{cases} \quad (8)$$

이고, 여기서 c 는 투자율이 서로 다른 물체의 경계조건으로부터 결정된다. 그 경계조건은 다음과

같다.⁽¹²⁾

$$\mu_0 \vec{H}_s = \mu (\vec{H}_s + \vec{H}_m) \quad (9)$$

식 (9)에 식 (3)과 (8)을 대입하여 다음 식을 구한다.

$$c = aNI(1 - \frac{\mu_0}{\mu}) \quad (10)$$

식 (2)에 식 (3), (8) 그리고 (10)을 대입하여 다음과 같이 디스크의 자속밀도 \vec{B} 를 구한다.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= a\mu NI \hat{z} - a\mu NI(1 - \frac{\mu_0}{\mu}) \hat{z} + B_0 \hat{z} \\ &= (B_0 + a\mu_0 NI) \hat{z} \end{aligned} \quad (11)$$

디스크에 발생하는 전기장 \vec{E} 는

$$\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B} = \vec{\omega} \times \vec{r} \times \vec{B} \quad (12)$$

이고, 이때 축의 중심과 디스크의 가장자리 사이의 역기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_0^a \vec{E} \cdot d\vec{r} \\ &= \int_0^a \omega Br dr = \frac{1}{2} \omega Ba^2 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 ω 는 \hat{z} 축에 대해 회전이 시계방향 혹은 반시계방향에 따라 양과 음이 된다.

식 (11)을 식 (13)에 대입하면 역기전력은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{2} \omega a^2 (B_0 + a\mu_0 NI) \quad (14)$$

마지막으로 식(1)에 식 (14)을 대입하면 페루프 회로 아날로그 방정식이 구해진다.

$$IR + L \frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} \omega a^2 (B_0 + a\mu_0 NI) \quad (15)$$

초기조건이 $I(t=0)=0$ 일 때, 식 (15)의 일차 미분 방정식의 해는

$$I(t) = -\frac{B_0 \omega a^2}{2L\lambda} (1 - e^{\lambda t}) \quad (16)$$

이고, 여기서 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = (-2R + a\mu_0 Na^2 |\omega|) / 2L \quad (17)$$

이론적으로 축전류의 자려현상은 λ 가 0보다 클 때 발생하게 될 것이다. R, N, a, μ_0 그리고 L 의 값은 모두 양이므로 $\lambda > 0$ 일 조건은 축회전 방향과 코일을 감는 방향이 동일할 때에만 만족될 수 있다. 그러므로 ω 와 코일을 감는 방향이 동일하다면 식 (18)로부터 자려발생의 조건은 다음과 같다.

$$R < \frac{\mu_0 Na^2 |\omega|}{2} \quad (18)$$

즉, 자려현상이 발생하려면 자장을 형성하는 코일의 감긴 수 및 저항이 일정할 때(실제 산업현장 조건), 축회전과 코일을 감는 방향이 동일(즉, 주위의 자장원에 의해 생성된 자장의 방향과 축의 회전에 의해 발생하는 자장의 방향이 일치)하여야 하고 디스크의 반지름(a) 및 축속도(ω)가 증가하여야 한다.

그리고 불안정이나 공진과 같은 두 번째 형태가 식 (16)의 분모가 0이 될 때 발생한다. 즉,

$$\omega = \frac{2R}{a\mu_0 Na^2} \quad (19)$$

으로써 식 (17)의 불안정 초기 속도와 같다.

안정한 시스템에 대한 정상상태($t \rightarrow \infty$) 전류는 다음과 같다.

$$I_{t \rightarrow \infty} = \frac{-B_0 \omega a^2}{-2R + a\mu_0 Na^2 \omega} \quad (20)$$

회전과 코일이 감긴 방향이 같거나 반대인 두 경우에 대한 축전류(I) 대 회전속도(ω)의 그래프는 Fig. 3에 보여진다. 이 그래프에서 사용되어진 값은 $R=0.01\Omega$, $B_0=50$ gauss, $a=0.1m$ 그리고 미터당 $N=1,000$ 회이다. 코일을 감은 방향과 축회전이 같은 방향일 때 로터의 속도가 증가하면 전류는 지속적으로 증가하고 식 (19)을 만족하는 로터 속도에서는 축전류가 자려 발생적으로 무한히 증가됨을 보여준다.

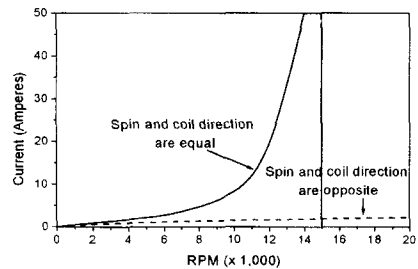


Fig. 3 Steady state current $I_{t \rightarrow \infty}$ versus shaft speed ω

초기 자속밀도 \vec{B}_0 가 Fig.4에서 보여지는 것처럼 정현파적으로 분포되어져 있다면, 자속밀도 \vec{B} 는 다음과 같다.

$$\vec{B} = (B_0 \sin \omega t + a\mu_0 NI) \hat{z} \quad (21)$$

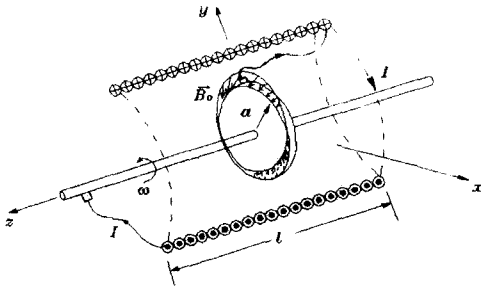


Fig. 4 Disk in the sinusoidally distributed \vec{B}_0

식 (11)에 식 (21)을 대입하면 역기전력은

$$\epsilon = \frac{1}{2} \omega a^2 (B_0 \sin \omega t + \alpha \mu_0 NI) \quad (22)$$

이다. 그리고 식 (1)에 식 (22)를 대입하면 다음이 산출된다.

$$IR + L \frac{dI}{dt} = \frac{1}{2} \omega a^2 (B_0 \sin \omega t + \alpha \mu_0 NI) \quad (23)$$

초기조건 $I(t=0)=0$ 일 때 식 (23)의 해는

$$I(t) = \frac{B_0 \omega a^2}{2L\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}} \left\{ \frac{\omega}{\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}} e^{\lambda t} + \sin(\omega t - \delta) \right\} \quad (24)$$

로 되고, 다음을 알 수 있다.

$$\lambda = \frac{-2R + \alpha \mu_0 N a^2 \omega}{2L} \quad (25)$$

$$\delta = \tan^{-1}(\omega/\lambda) \quad (26)$$

그러므로 식 (24)로부터 \vec{B}_0 가 정현파적으로 분포되어 있다면 전류 I 는 AC성분과 DC성분 모두를 가지고 있다. 만약 \vec{B}_0 가 복잡하게 분포되어 있다면, 축전류는 많은 조화항을 가지게 된다.

3. 전자기형 축전류 실험

전자기형 축전류 테스트 장치는 회전 기계에서의 전자기적 축전류의 거동과 물리적인 특성을 조사하기 위하여 Fig.5에서 보이는 바와 같이 자화된 3개의 디스크(약 45gauss 정도)와 전기적 및 자기적 폐환 회로(electric and magnetic return paths)를 갖춘 축, 진동 측정용 갭 센서(gap sensor; 0.2 v/mil), 전류 측정용 2방향 전류센서(0.1 v/A; S273-50, American Aerospace Control, Inc) 및 SD380 스펙트럼 분석기를 갖춘 실험장치가 사용되었다.

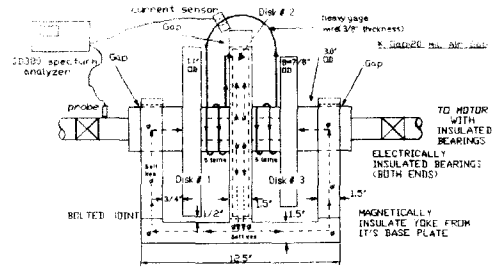


Fig. 5 Concept of the electromagnetic shaft current test rig

4. 실험결과

Fig. 6은 전기폐환회로의 두 접촉점이 중앙 디스크에 있는 경우이고, Fig. 7은 한 접촉점은 디스크에 다른 한 접촉점은 로터의 끝단에 위치시킬 경우에 디스크 #3에 갭센서를 수직으로 설치하고 700~800rpm의 회전속도를 유지하여 센서와 동일방향으로 충격시험을 가할 때의 주파수 스펙트럼으로써 그림의 상부는 전류센서 출력이고 하부는 축의 진동을 나타내고 있다. Fig. 6과 7을 대조하여 볼 때, 코일을 통한 전류가 접촉점의 위치와 로터 속도에 의존하여 변화될 수 있음을 보여주고 있다. 전류 진폭이 Fig. 6에서는 0.02amp이고 Fig. 7에서는 0.15amp라는 사실을 주목해야 한다. 이 원인은 회전축에 의해 발생된 역기전력이 접촉점의 위치에 의존할 수 있다고 볼 수 있다. 그리고, 두 그림으로부터 축전류가 DC와 AC를 모두 가진다는 것을 알 수 있다. AC요소들은 회전주파수들에서만 아니라 진동 주파수에서도 발생한다. 이것들은 Fig. 8에서 상·하부 그림의 대조에 의해 분명하게 보여지고 있다. 하부 그림은 39.1Hz의 축속도와, 19.5Hz의 구동모터 속도성분이 나타나는 축 진동의 주파수 스펙트럼이다. 상부 그림에서 전류 센서의 출력 전압은 하부의 진동 스펙트럼과 일치되는 주파수 요소들을 가진다. 이 진동 요소는 아주 작지만(0.024 mils) 전류 신호는 현저하게 나타난다(0.213 amps). 이것은 축전류의 모니터링에 의해서 작은 불안정이나 고유주파수의 위치를 발견할 수 있음을 제시한다.

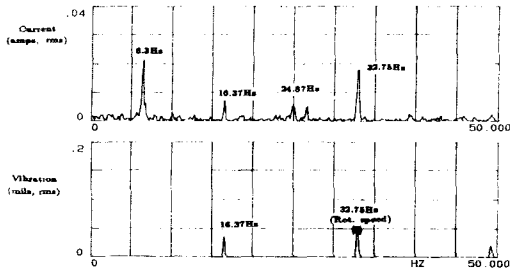


Fig. 6 Frequency spectra with both contact points at the center disk

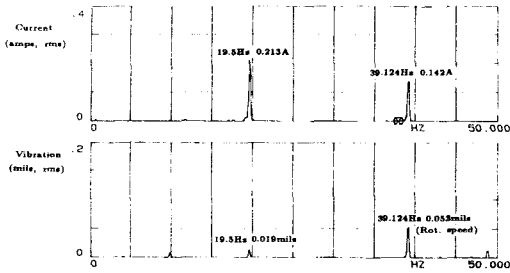


Fig. 7 Frequency spectra with contact points at the center disk and at the end of shaft

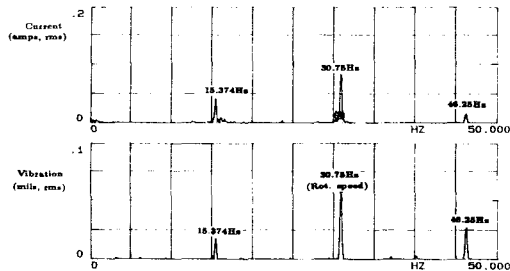


Fig. 8 Vibration and current with contact points at the center disk and at the end of shaft

Fig. 9 및 Fig. 10은 한 접촉점이 중간 디스크에, 다른 한 점은 로터의 끝단에 위치시켰을 경우 400rpm부터 3100rpm까지 축의 진동과 전류 센서 출력의 Cascade 선도를 각각 나타낸다. 진동 Cascade 선도에서는 축회전 속도와 모터속도만을 나타내지만 전류 신호에서는 두 속도 외에 알 수 없는 성분이 포함되어 있다. Fig. 11은 1900rpm에서의 충격 테스트의 결과로써 Fig. 10의 전류 신호에서 관찰되지 않았던 주파수들은 시스템의 고유주파수일 것으

로 판단된다.

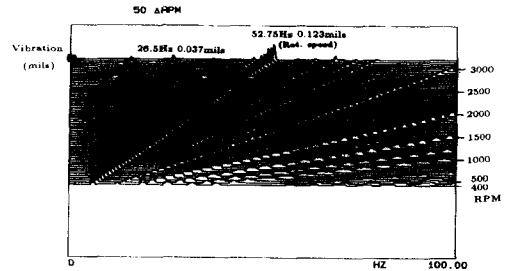


Fig. 9 Cascade plot of the vibration of rotor

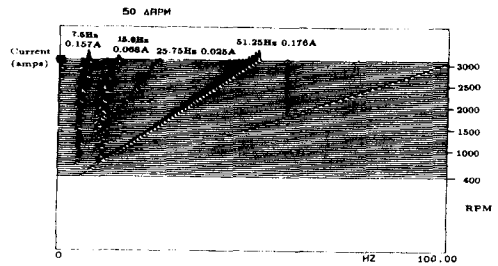
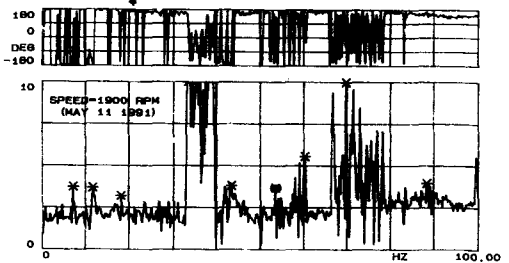


Fig. 10 Cascade plot of current sensor's output



MARK	LIST X	Y (U)	Y (L)
0			
1	7.0000	-188.0	3.79
2	11.5000	-188.0	3.89
3	18.0000	188.0	3.21
4	33.2500	79.8	21.3
5	43.2500	-177.0	3.81
6	60.0000	-23.2	5.88
7	69.5000	-46.7	9.97
8	88.2500	160.0	4.00
9			

Fig. 11 Vibration/force for the impact test at 1900rpm

5. 결론

1. 전자기형 축전류의 자력발생 원인을 설명하기 위해 긴 솔레노이드에 둘러싸인 축방향 자속 폐

- 러데이 디스크 모델을 개발하였다.
2. 자러현상이 발생되게 하기 위해서는 자장을 형성하는 코일의 감긴 수 및 저항이 일정하다면 (실제 산업현장 조건), 축회전과 코일을 감는 방향이 동일해야만 즉, 주위의 자장원에 의해 생성된 자장의 방향과 축의 회전에 의해 발생하는 자장의 방향이 일치하여야 하고 디스크의 반지름(a) 및 축속도(ω)가 증가하여야 한다.
 3. 실제 산업현장에서는 전자기적 축전류의 생성을 억제하기 위하여 주위에 자장원의 존재를 미리 파악하여 회전체를 설치하는 것이 중요하고, 무엇보다도 주위의 자장원의 존재 하에서 설치할 경우, 자장원에 의한 자장의 방향과 회전체의 회전에 의해 발생하는 자장의 방향을 고려하여 설치할 것을 제안하고자 한다.
 4. 전자기적 축전류의 불리적인 특성을 파악하고자 실시된 실험으로부터 전자기적 축전류는 AC 및 DC 성분을 모두 갖고 있으며, 축전류의 AC 성분은 모든 진동주파수에서 발생하였다.
 5. 이론적으로 제시한 자러발생 현상은 새로운 실험장치를 고안하고 그 실험결과로써 비전기적 회전기계에서 발생하는 전자기적 축전류의 근본적인 방지대책을 수립하기 위한 기틀을 제공하였다.

참고문헌

1. Merrick, E. G., "Bearing Currents," General Electric Review, Vol. 17, pp. 936-941, 1914.
2. Buchanan, W., "Currents in Bearings of Electric Generators," The Electrician, Vol. 75, pp. 266-267, 1915.
3. Alger, P. and Samson, H., "Shaft Currents in Electric Machines," Transactions of AIEE, Vol. 43, pp. 235-245, 1924.
4. Pearce, C. T., "Bearing Currents-Their Origin and Prevention," The Electric Journal, Vol. 24, pp. 372-376, 1927.
5. Boyd, J. and Kaufman, H., "The Causes and Control of Electrical Current in Bearings," Lubrication Engineering, Vol. 1, pp. 28-35, 1959.
6. Cullwick, G., "The Fundamentals of Electromagnetism," Cambridge University, New York, 1939.
7. Tsien, T. N., "Electromagnetic Induction of Rotating Magnets," Ph. D. Dissertation, University of Houston, 1970.
8. Schier, W., "Self Excited Homopolar Direct Currents in the Shafts of Machines," Electrotek ZA, 86, (23), pp. 737-741, Translation No. 3925, Associated Electrical Industries Power Group, 1965.
9. Sohre, J. S. and Nippes, P., "Electromagnetic Shaft Currents in Turbo - Machinery - An Update," AICHE 25th Symposium in Ammonia Plants, Portland, Oregon, 1980.
10. Vance, J. M., Palazzolo, A. B. and Zeiden F. Y., "Electric Shaft Currents in Turbomachinery," 16th Turbomachinery Symposium, pp. 51-63, Gas Turbine Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M Univ., 1986.
11. Sears, F. and Zemansky, M., "University Physics," Fourth Edition, Addition Wesley, Massachusetts, 1970.
12. Marion, J. B., "Classical Electromagnetic Radiation," Academic Press, New York, 1965.