

Hybrid PM 스텝모터의 고정자 코일의 인덕턴스 변화에 따른 특성해석

오철수 서영택
경북대학교 전기공학과

A Characteristics Analysis of a Hybrid PM Step Motor
by Varying Stator Coil Inductances

Chul-Soo Oh Young-Taek Seo
Dept. of Electrical Eng. Kyung-Pook Nat. Univ.

Abstract

The effect of inductance for optimal design of Hybrid permanent magnet step motor is presented on this paper. A pull-out torque of Hybrid permanent magnet step motor is measured and calculated by varying stator coil inductances, and power consumption of the step motor also is calculated and compared to the measured value.

The relation of developed torque to power consumption by the changing of magnetomotive force magnitude in a rotor permanent magnet is studied, which is the essence of the step motor design.

1. 序 論

스텝모터(Step Motor)는 디지털(Digital) 입력펄스를 아날로그 출력으로 변환하는 電磁氣의 變換裝置로, (1,14) 1920년 대에 개발되어 한동안 사용범위가 극히 일부분으로 제한되어 사용 되었다. (2,4)

그러나 1960년대 이후 디지털 컴퓨터기술의 발달로 그 사용이 급격히 증가되어, 지금에 와서는 각종 컴퓨터 周邊機器뿐만 아니라 Robotics, 프린터(Printer), 프로세서 제어 시스템(Process Control System), 공업용 정밀 Servo 구동등 그 사용범위가 광범위하게 확장되고 있어, 尖端 산업사회에서의 그 중요성 또한 대단히 높은 위치를 차지하고 있다. (1,2)

특히 스텝모터는 그 동작이 分離 Motion 장치로 디지털 제어 기술과 調和를 잘 이룰 뿐만 아니라, 位置 誤差(Error)가 非 蓄積的이라 개루우프 제어(Open Loop Control)가 가능하여 고정밀도를 요하는 곳의 정확한 위치와 속도제어를 가능하게 한다. (4,14)

본 논문에서는 VR 스텝모터와 PM 스텝모터의 混合形인 Hybrid PM 스텝모터를 실험 모델로 이용하여, 스텝모터에서 가장 중요한 특성중의 하나인 Torque 특성을, 고정

자 권선의 인덕턴스(Inductance)를 변화 시킴으로서 Torque의 변화상태를 考察하고, 이에 따른 소비전력의 변화, 應答速度 및 회전자 영구자석과의 관계를 分析하므로, 스텝모터 설계에 따른 諸般 문제를 검토 하였다.

2. 特性方程式

본 논문에서는 스텝모터의 각종 특성방정식의 數學的 해석을 線形(Linear)으로 가정하여 適用 하였으며, 飽和(Saturation) 현상은 무시 하였다. 이상적인 線形모델(Linear Model)에서의 Torque 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. (11)

$$T \sim (NI) \Phi_m \tag{1}$$

이때 각상 및 영구자석의 鎖交磁束은

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{af}i_f \\ \lambda_b &= L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bf}i_f \\ \lambda_f &= L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{ff}i_f \end{aligned} \tag{2}$$

로 나타낼 수 있으며 두 極端에서 k번째 고정자 齒牙로 流入되는 순수자속은 식 (3)이 된다.

$$\Phi_k = F_{k1}P_{k1} + F_{k2}P_{k2} \tag{3}$$

또 모터 전체의 鎖交磁束은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \sum_{k=0}^{N_p-1} N_{ka} \Phi_k = N_p^2 P_a N_a i_a + N_p N_r P_v N_a \cos(N_r \theta) i_r \\ \lambda_b &= \sum_{k=0}^{N_p-1} N_{kb} \Phi_k = N_p^2 P_a N_a i_b + N_p N_r P_v N_a \sin(N_r \theta) i_r \\ \lambda_{ff} &= \sum_{k=0}^{N_p-1} N_{fk} \Phi_k = N_r^2 P_a N_a i_f \end{aligned} \tag{4}$$

식 (2), (4)에서 자기 및 相互 인덕턴스는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} L_{aa} &= N_p^2 P_a N_a \\ L_{bb} &= N_p^2 P_a N_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{ff} &= N_f^2 P_a N_a \\
 L_{ab} &= L_{ba} = 0 \\
 L_{af} &= L_{fa} = N_p P_v N_a \cos N_r \theta \\
 L_{bf} &= L_{fb} = N_p P_v N_a \sin N_r \theta
 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 스텝모터 설계에 필요한 각종 媒介變數 (parameter)가 유도되어 다음과 같은 특성방정식이 유도된다.

1) 電壓 方程式

$$\begin{aligned}
 V_a &= i_a r_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = i_a r_a + N_p^2 P_a N_a \frac{di_a}{dt} - \\
 & N_p F_r P_v N_a N_r \sin(N_r \theta) \frac{d\theta}{dt} \\
 V_b &= i_b r_b + \frac{d\lambda_b}{dt} = i_b r_b + N_p^2 P_a N_a \frac{di_b}{dt} + \\
 & N_p F_r P_v N_a N_r \cos(N_r \theta) \frac{d\theta}{dt}
 \end{aligned} \quad (6)$$

2) 電流 方程式

$$\begin{aligned}
 \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{N_p^2 P_a N_a} \times \\
 & \{ V_a - i_a r_a + N_p F_r P_v N_a N_r \sin(N_r \theta) \frac{d\theta}{dt} \} \\
 \frac{di_b}{dt} &= \frac{1}{N_p^2 P_a N_a} \times \\
 & \{ V_b - i_b r_b - N_p F_r P_v N_a N_r \cos(N_r \theta) \frac{d\theta}{dt} \}
 \end{aligned} \quad (7)$$

3) Torque 方程式

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_{aa}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_{bb}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_f^2 \frac{dL_{ff}}{d\theta} \\
 &+ i_a i_b \frac{dL_{ab}}{d\theta} + i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} + i_b i_f \frac{dL_{bf}}{d\theta} \\
 &= N_p F_r P_v N_a N_r (-i_a \sin N_r \theta + i_b \cos N_r \theta)
 \end{aligned} \quad (8)$$

이상과 같이 3가지 側面에서 본 Hybrid PM 스텝모터 설계에 필요한 기본적인 방정식이 誘導 되었으며, (2) 각종 인덕턴스는 식 (5)에서 나타난 바와 같이 N_p 및 N_f 의 곱과 제곱의 비례로 나타난다. 이를 이용하여 코일권수의 변화로 하여금 위의 3 특성方程式의 parameter의 변화를 誘導함으로써, 요구하는 특성方程式을 실험을 거쳐 얻고져 시도 하였다.

스텝모터의 3가지 특성方程式이 결과적으로 Torque와 電力으로 나타나므로, 본 논문에서는 Torque와 消費電力을 중점적으로 測定 考察 하였다.

3. 實驗 및 結果考察

3-1. 驅動裝置

본 논문의 실제 실험에서는 교류 2상 전원을 사용하였고, 실험에 사용된 스텝모터의 인덕턴스를 주어진 모터의 機械的인 設計에 적용하여 可變 시켰기 때문에, 인덕턴스의 변화에 따라 전압 및 전류가 변하므로, 이에

適應될 수 있는 장치를 FEEDBACK 사에서 제작된 전원 공급장치 PS-189 2조와 TRANSFORMER TRAINER TT-179 2조를 이용하여 2상 전원으로 사용 하였다.

또한 Pull-out Torque의 測定裝置는 YAMASAKI'S ROTARY-TORQUE-METER와 여러개의 용수철 저울을 並行하여 사용 하였으며, 驅動에 필요한 制御裝置는 SERIES ONE Programmable Controller를 사용 하였다.

3-2. 結果考察

실험 모델로 사용한 스텝모터를 주어진 機械的인 設計要素에 맞추어 전기적인 要素, 즉 인덕턴스를 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 각종 특성의 변화상태를 관찰할 수가 있었다.

그림 1은 磁束密度가 5.5 mWb/m²인 영구자석이 內裝된 경우의 Pull-out Torque-전류 곡선으로, 전류의 증가에 따라 Torque가 약 1100 - 1300 (g-cm) 까지 거의 直線的으로 증가하나, 그 이상의 전류에서는 飽和現象을 나타내었다.

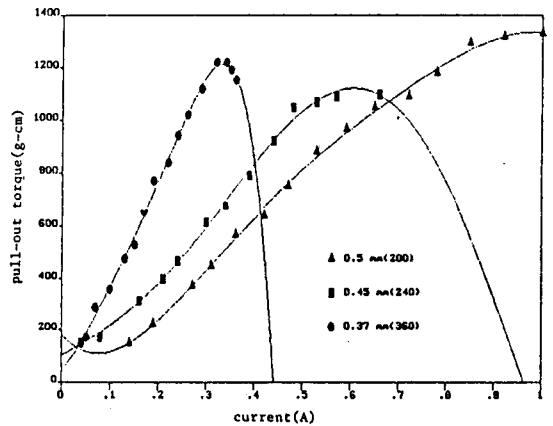


그림 1. 제1 모터의 Torque-전류 특성곡선

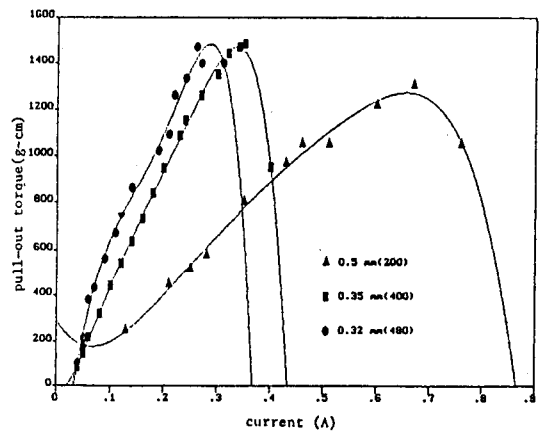


그림 2. 제2 모터의 Torque-전류 특성곡선

한편 그림 2는 磁束密度가 9 mWb/m^2 인 영구자석이 내장된 경우의 Pull-out Torque-전류 특성곡선으로, 전류의 증가에 따라 Pull-out Torque는 약 1300-1500(g-cm)까지 직선적으로 증가하다, 그 이상 전류가 증가하면 Torque는 급격히 감소하였다.

그림 3은 인덕턴스 변화에 의한 소비전력의 변화상태를 나타낸 것으로 같은 Pull-out Torque를 발생시킬때, 제원 1 모터의 경우 相當 0.37 mm 360회 일때의 소비전력이 0.5 mm 200회 일때의 소비전력보다 약 35(%)정도 감소되었다.

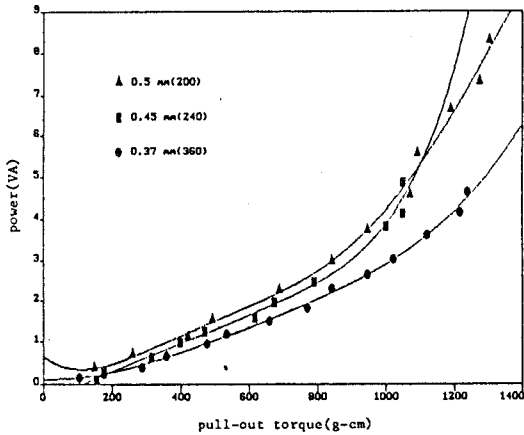


그림 3 제원 1 모터의 소비전력-Torque 곡선

그림 4는 제원 2 모터의 인덕턴스 변화에 따른 소비전력의 변화상태를 나타낸 것으로, 같은 Pull-out Torque를 발생시킬때 相當 0.32 mm 480회인 경우가 0.5 mm 200회 일때의 소비전력보다 약 20(%)정도 감소되었다.

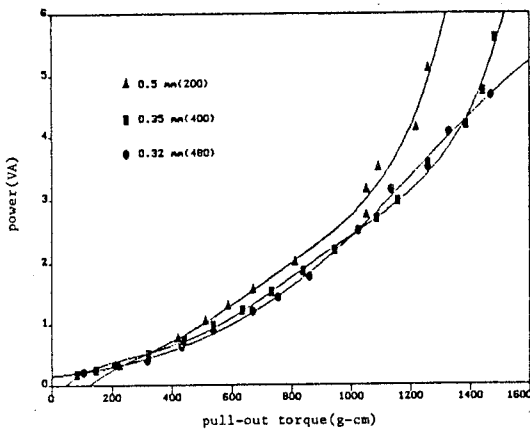
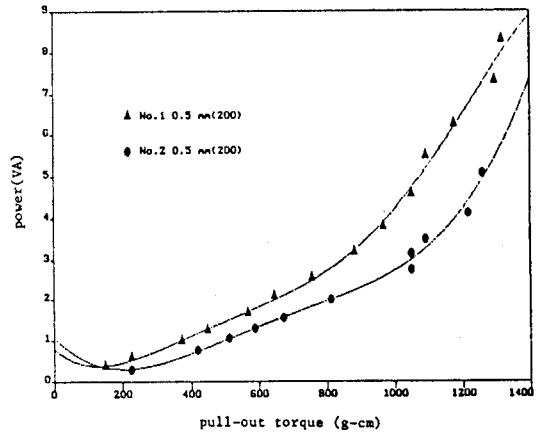


그림 4. 제원 2 모터의 소비전력-Torque 곡선

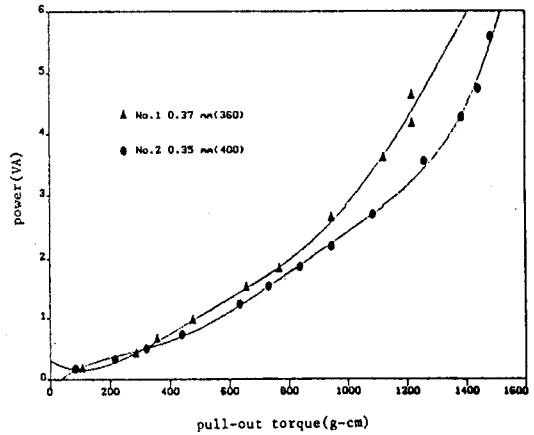
그림 5는 같은 크기의 Torque를 발생시킬때 동일 인덕턴스에 대한 제원 1 및 제원 2 모터의 소비전력의 비교로, (a)는 相當 0.5 mm 200회인 경우의 소비전력을 비교한 것으로 제원 2 모터가 제원 1 모터보다 약 30(%)정도 감소

되었다고 하며, (b)에서는 제원 2 모터가 제원 1 모터보다 소비전력이 약 20(%)정도 감소 되었다.

결국 이러한 결과를 종합해 볼때 인덕턴스의 증가에 따라 소비전력은 감소하며 영구자석 起磁력의 증가에 따라서도 소비전력은 감소됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. 제원 1,2 모터의 소비전력 비교

4. 結 論

스텝모터의 인덕턴스를 변화시킴에 의한 모터 특성의 변화상태를 考察한 결과 다음과 같은 結論을 얻게 되었다.

1. 전류-Torque 관계는 일정범위 내에서는 비례관계가 성립하나, 그 범위를 넘어서면 오히려 Torque는 감소하는데, 이는 磁體의 磁束飽和 현상으로 판정되며 이때 고정자와 회전자 자속의 均衡이 깨어 지는데 원인 한다고 사료된다.
2. 인덕턴스의 증가에 따라 소비전력이 감소되고 Pull-out Torque는 거의 일정하나 전류가 감소하기 때문에 발생열이 감소한다.

3. 영구자석 磁束量의 증가에 따라 Pull-out Torque는 약간 증가하나 소비전력은 감소 하였다.

본 논문에서는 주어진 機械的인 要素下에 인덕턴스를 변화 시켰으나 回轉子 및 固定子鐵心, 永久磁石 등 각종 機械的인 要素의 다양한 변화와 並行하여 실험이 이루어 진다면 스텝모터의 最適設計를 위한 보다 나은 결과가 기대된다.

참 고 문 헌

1. 오 철 수, "자속형방향형 Hybrid PM Step Motor의 특성해석", 영남대 학위 논문, 1989.
2. B.C.Kuo, "Theory and Application of Step Motor", West Publishing Co. 1974.
3. P. C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley and Sons, Inc. pp. 450-463, 1987.
4. L. W. Matsch, J. D. Morgan, "Electromagnetic and Electromechanical Machines", John Wiley and Sons, Inc. pp. 474-500, 1986.
5. G. R. Slemon, A. Straughen, "Electric Machines", Addison - Wesley Publishing Co., 1981.
6. T. Kenjo, S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Sogo Electronics Publishing Co., 1984.
7. C. G. Veinott, "Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motor", McGraw - Hill Book Co., 1986.
8. Albert C. Leenhouts, "The Effect of Inductance On Step Motor Performance", International Motor-Con'86, Intertec Co. Inc., PP. 89-94, 1986.
9. A. J. C. Bakhuizen, "Torque vs Inertia in Step-motor Design" Conference on Small Electrical Machines, IEE, pp. 104-108, 1976.
10. 송 영두, "회로류 영구자석의 기술동향", 전기기기 연구회 1989년도 춘계 Symposium 논문집, pp. 1-4, 1989.
11. Hi - Dong Chai, "Tutorial on Roll of Neodymium Magnets in Actuators for Computer Peripherals", International Motor-Con'86, Intertec Co. Inc., pp. 144-170, 1986.
12. A. P. Russel, I. E. D. Pickup, "Calculation of the Pull-out Torque of Hybrid Stepping Motor in the Half-step mode", Electric Machines and Electromechanics, 1982.7. pp. 103-114.

13. A Hughes, P.J.Lawrenson, T.S.Davies, "Pull-out - Torque Characteristics of Hybrid Stepping Motor", Conference on Small Electrical Machines, IEE, pp. 117-119, 1976.
14. 정 태경, "회전 왕복 운동 스텝모터에 관한 연구", 서울대 학위논문, 1986.

부 록

모터제원

본 논문에 이용된 스텝모터의 電氣的, 機械的 제원은 다음과 같다.

스텝 각 : 1.8 Degrees / Step, 상수 / 극수 : 2 / 8

	고정자	회전자
철심외경	: 53.6 mm	29.4 mm
철심내경	: 29.6 mm	
철심길이	: 28.6 mm	28.6 mm
총 회전자 길이		30.6 mm
치아수	: 40	50
전 돌레에의 환산 고정자 치아수		48
치아 폭	: 0.7 mm	0.7 mm
홈 폭	: 1.2 mm	1.2 mm

영구자석

외경	: 23.1 mm
자속밀도	: 5.5×10^{-3} (Wb/m ²) : 제원 1 모터 : 9×10^{-3} (Wb/m ²) : 제원 2 모터
제조원	: MINEBEA Co.LTD. (SINGAPORE) : SHINKOH Co.LTD. (SINGAPORE)