

영구자석형 전자접촉기의 설계기법

조현길*, 이은웅**, 김길수*, 김준호**, 정종호**, 임수생**
 LG산전*, 충남대학교 전기공학과**

Designing Techniques of PM-type MAGNETIC CONTACTOR

Hyun-Kil Cho*, Eun-Woong Lee**, Kil-Su Kim*, Jun-Ho Kim**, Jong-Ho Jeong**, Su-Saeng Lim
 LGIS*, Chungnam Nat'l Univ.**

Abstract - This paper describes the design and the analysis of permanent magnetic actuator "Magnetic Switch" using classical method and 2D finite element method. The classical method gives an outline of permanent magnet size and analysis is carried out by finite element method. Therefore, we make use of the result in specific detail size of magnet. The transient state is simulated in order to calculate the response time of "Magnetic Switch". The simulation is based upon a step-by-step integration of the electric circuit equations and the core movement. The contactor uses a permanent magnet for maintaining the closed state. The presented solution takes account of non-linear magnetic material property and spring force controlled by core position. The dynamic response of "Magnetic Switch" is predicted by the simulation agrees closely with the required condition.

그림 1에서 영구자석의 방향과 여자코일에 흐르는 전류의 방향이 일치하도록 전원을 인가하면 여자코일에 의한 전자력과 영구자석에 의한 전자력의 합으로 가동철심에 작용한다. 영구자석에 의하여 가동철심에 전자력이 작용하여 전자접촉기는 투입된 상태는 계속 유지된다. 그러므로, 전자접촉기를 개방하기 위해서는 코일에 여자전류 방향을 투입시와 반대로 하면 여자전류에 의한 자속과 영구자석에 의한 자속이 상쇄되어 합성자속이 "0"이 되면서 복귀 스프링력에 의하여 개방된다.

1. 서론

1970년대 초반부터 switch gear 분야에서 영구자석을 이용한 actuator에 관한 연구가 진행되었다. 영구자석과 솔레노이드 이용한 Actuator는 구조가 간단하고, 부품수가 적어, 신뢰성 향상에 크게 기대할 수 있다. 그러나, stroke가 길어지면 구동에 어려움이 있다. 그래서, 1990년 후반부터 페라이트 영구자석을 이용한 actuator의 실용화와 최적 설계에 관한 연구에 급속히 진행되고 있으며[1][2], 고속 동작을 구현 할 수 있게 되었다 [3]. 또, 모터 제어용으로 손쉽게 사용하는 전자접촉기에 영구자석형 actuator를 사용하여 생에너지, 저소음, 기억 가능 회로가 구현된다.

그래서, 본 논문은 영구자석을 이용한 전자접촉기의 동작원리를 기술하고, 개략설계 기법으로 설계한 후 유한요소법을 이용하여 변위에 따른 흡인력 특성을 해석하므로써 자석을 설계하고, 전기회로 방정식과 유한요소법에 의한 전자력 운동방정식을 연립하여 시간응답을 구해 동작 특성을 면밀히 검토하여 설계방향을 제시하였다.

2. 본론

2.1 영구자석형 전자접촉기 기본 모델

전자접촉기는 고정철심, 가동철심과 조작 코일로 이루어진 구동부, 3상 전원을 개폐하는 접촉부로 구성된다. 전자접촉기는 조작코일에 전원을 인가하면 고정철심과 가동철심이 여자된다. 여자된 가동철심과 고정철심은 전자흡인력이 작용하고, 크로스바로 지지된 가동철심에 붙은 가동 접촉자는 가동철심의 움직임에 따라 고정접촉자에 접촉상태를 유지한다. 또, 코일의 전원이 끊어지면 복귀스프링에 의하여 접점은 개방된다. 접촉자의 접촉상태를 안정적으로 유지하기 위한 접촉스프링이 있다. 그림 1의 설계 모델은 전동기 운전 전류 100[A]를 제어하기 위한 모델이다.

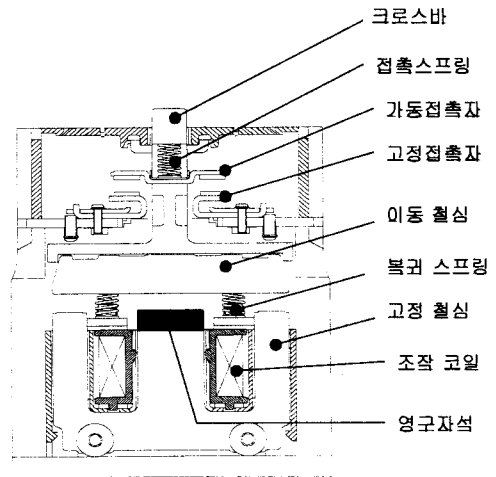


그림 1. 영구 자석형 전자 접촉기 모델

2.2 개략 설계 기법

전자 접촉기는 접촉부 및 전자석 설계에 있어서 접촉 저항과 회로에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 접점의 온도상승을 고려하여야 한다. 온도 상승은 접점의 재질과 접촉 스프링의 하중에 많은 영향을 받는다. 그러므로 전자석의 흡인력은 접촉부의 스프링력과 복귀 스프링력의 합보다 크도록 설계하여야 한다. 철심에 여자에 의한 전자석의 흡인력은 식(1)과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 B_m^2 S_m \quad (1)$$

여기서, B_m 는 공극 자속밀도, S_m 는 공극의 단면적이다.

영구자석은 높은 자속밀도를 가지는 alnico 9와 NdFe 35 자석을 사용하여 동작점의 자속밀도(B_m)는 1.1[T]이다. 누설계수 γ 는 1.2, 철심의 기자력이 감소 20%로 가정하면 공극의 자속밀도는 식(2)와 같다.[4]

$$B_a = B_m \times 0.8 / 1.2 \quad (2)$$

영구자석의 단면적 S_m 과 길이 l_m 는 식(3), (4)에 의하여 결정하였다.

$$S_m = \frac{\gamma B_a S_a}{B_m} \quad (3)$$

$$l_m = \frac{B_a l_a}{\mu_0 H_m} \quad (4)$$

단, l_a 는 공극의 길이, H_m 은 동작점에서 자계의 세기이다. NdFe35의 H_m 은 11,000[Oe]이고, 자석의 길이 l_m 은 4.3[mm]이다.

2.3 유한요소법에 의한 해석

2.3.1 유한요소법의 정식화

영구자석의 자화 M , 자계중의 자계 세기 H 라 하면, 영구자석중의 자속밀도 B 는 식(5)와 같다.

$$B = \mu_0 H + M \quad (5)$$

계의 전류 밀도와 벡터 포텐셜은 식(6), (7), (8)과 같다.

$$J_0 = \nabla \times \frac{H}{\mu_0} (B - M) \quad (6)$$

$$\nabla \times \nu_0 (\nabla \times A - M) - J_0 = 0 \quad (7)$$

$$\nu_0 \nabla \times (\nabla \times A) = J_0 + \nu_0 \nabla \times M \quad (8)$$

Galerkin Method에 의한 정식화 식은 (9)와 같다.

$$G_i = \int_{\text{rot}} N_i (\nabla \times A) dv - \int N_i J_0 dv - \int N_i (\nabla \times M) dv \quad (9)$$

가동철심에 작용하는 힘을 계산하기 위한 방법은 가상변위 힘은 식 (10)이다.

$$F_e(i, x) = -\frac{\partial W}{\partial x} (i, x) \quad (10)$$

2.3.2 흡인력 해석

영구자석의 흡인력을 식(10)으로 구하여, 스프링의 하중과 비교하여 영구자석의 재질과 자석의 길이 변화에 정지 흡인력을 비교하여 사양을 확정하였다. 이와 같이 정지 특성을 고려하여 영구자석이 사양이 결정되면, 철심의 동작 특성에 적합하게 설계하기 위하여 시간 영역에서 해석하였다. 권선의 설계에 기초자료로 활용하기 위하여 ampere turn 변화하면서 흡인력을 구하고, 그 결과를 권선의 저항, 단면적, turn수를 선정 후 전압 방정식과 운동방정식을 연립하여 해석하였다. 해석 영역의 전압방정식은 식(11)와 같다.

$$V_0 - \frac{d\psi}{dt} - RI_0 - L \frac{dI_0}{dt} = 0 \quad (11)$$

여기서, V_0 는 단자전압, R 은 여자권선 저항, L 은 누설 인덕턴스, ψ 는 권선과의 총쇄교자속, I_0 는 외부인가 여자전류이다.

식(10)의 전자력 특성방정식과 식(11)의 전압방정식을 결합하여 유한요소법에 의한 정식화를 한다. 그 다음 시간미분항의 처리를 위해 시간차분법중 후퇴차분법을 이용하고 비선형 계산을 위해 뉴턴랩슨법을 적용하며 계방정식이 일는다. 전자력에 의한 가동부의 운동방정식은 식(12)와 같다.

$$m \frac{dv}{dt} = F_e(i, x) - k(x - x_0) - F_0 \quad (12)$$

여기서, m 은 가동부 질량, k 는 스프링상수, $v = dx/dt$, F_0 는 최초 스프링력이다.

전자접촉기의 과도특성 해석은 유한요소법을 이용하여 시간차분법으로 자장의 분포를 구하고, 식(10)으로 부터 가동철심에서 발생하는 힘을 계산하여, 이를 식(12)에 대입하여 다음 상태에서의 가동철심의 속도와 위치를 구한다. 이와같은 과정을 그림 2처럼 가동철심을 변위시키고 공극의 요소를 재분할하여 반복한다.

3 설계사양과 해석 결과

3.1 설계 사양

전자 접촉기의 변위에 따른 스프링 하중곡선을 그림3에 나타

내었다. 유한 요소법 해석에 의하여 철심의 공극과 영구자석의 길이에 따라 발생하는 흡인력을 그림 4에 나타내었다. 자석의 길이를 5[mm]로 선정하였으며, 그 결과 개략설계 기법에 의하여 4[mm]이상이어야 하는 자석의 길이와 부합하였다.

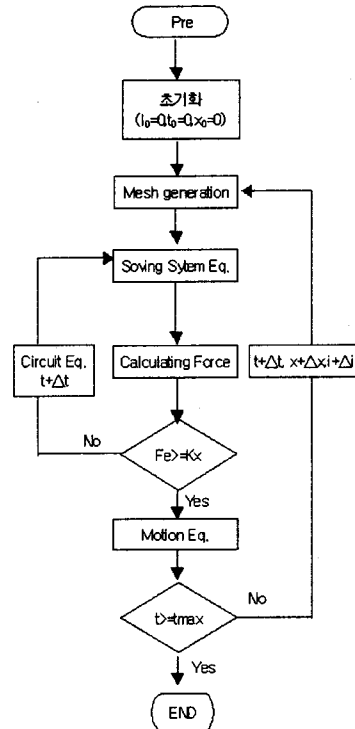


그림 2. 전자 접촉기의 과도특성 해석

흡인 동작을 위한 권선 설계를 위하여 동작에 영향을 크게 미치는 공극 길이 6.8, [mm]에서 권선 전류를 변화시켜 그 결과를 그림 5에 나타내었다. Gap=6.8[mm]에서 10[N]이상의 흡인력이 발생하는데 필요한 권선전류는 750[AT]이상 되어야 한다.

그림 6에 750AT에서 철심 공극(Gap)의 변화에 따른 흡인력 특성을 나타내었다. Gap=2[mm]에서 충분한 흡인력이 나타나게 되므로 스위칭 지점은 Gap=2[mm]로 결정하고, 그 이후 Gap=2[mm]에서 0까지의 구간은 영구자석의 흡인력과 이동철심의 관성에 의하여 이동하도록 한다.

영구 자석길이 5[mm]에서 개방 권선의 사양 결정을 위하여 투입 권선의 전류 방향과 반대로 전류를 인가하여 그림 7을 얻었다. 흡인력이 최소가 되는 AT는 600[AT]이다. 개략 설계법과 유한 요소법의 정특성 해석 결과에 의한 설계사양을 표1과 그림8에 나타내었다.

표 1 정특성 해석에 의한 설계 사양

구성 요소	ON권선	OFF권선
DC	220V	
코일 저항[Ω]	310	543
코일 권수[T]	1080	1500
Core stroke[mm]	6.8	
Mass of moving core[kg]	0.4	
k of kick out spring[N/m]	203	
k of contact spring[N/m]	500	
Material of Core	SCP1	
철심의 Z 방향 길이[mm]	19.5	

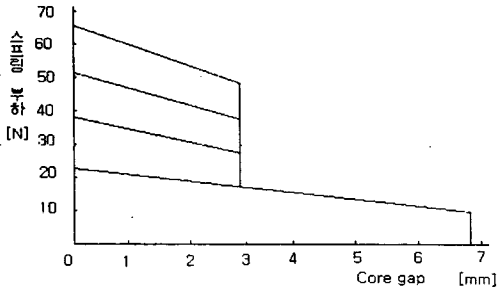


그림 3. Core gap에 따른 스프링 하중

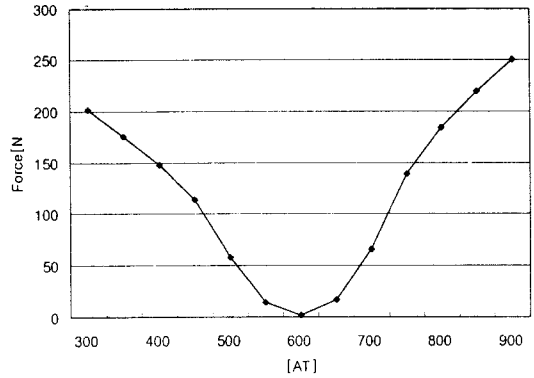


그림 7. OFF권선에 전류변화에 따른 흡인력(Gap=0)

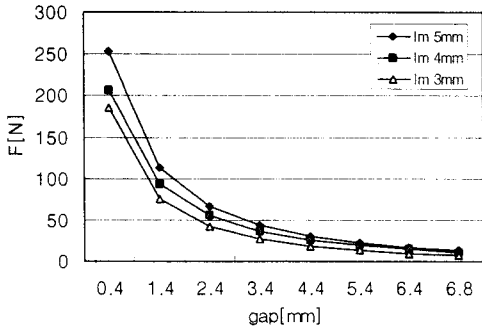


그림4. 철심 공극, 자석 길이별 흡인력 특성

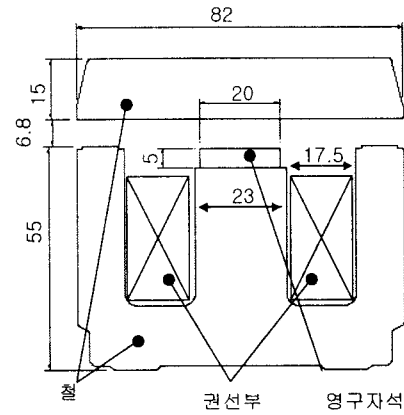


그림 8. 설계 사양

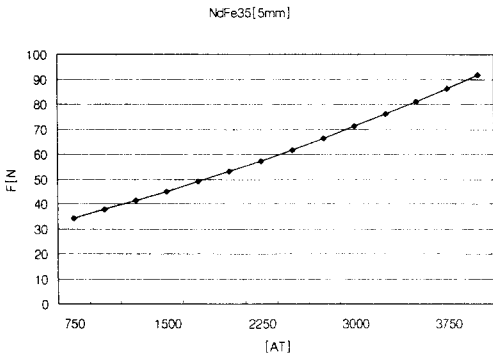


그림 5. 전류변화에 따른 흡인력(Gap=6.8mm)

3.2 동작 특성 해석 결과

3.2.1 투입시 동작 특성

철심의 흡인력 부족에 의하여 접촉시간이 길어지거나 접촉 불안정 상태로 되면 접촉시 선로에 점점의 용량에 비하여 큰 전류가 흐르는 경우에 점점은 용착되거나 점점의 많은 소모를 초래하여 점점의 수명은 단축된다.

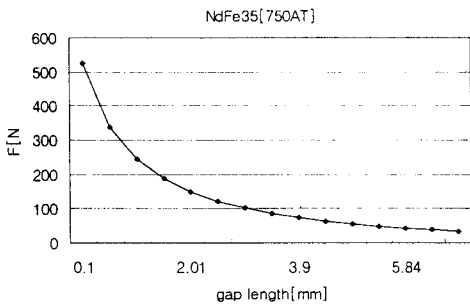


그림 6 Gap 변화에 따른 흡인력 특성(I=2000AT)

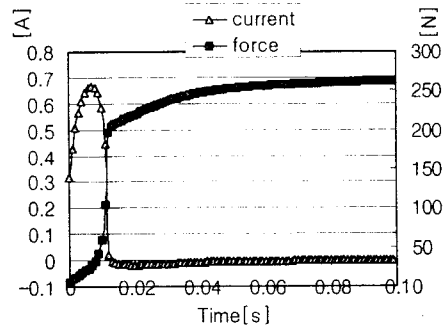


그림 9. 정격전압 인가시 전류, 전자력특성(V=220 DC)

그림 9에 권선의 정격 전압 인가시 흡인 전류와 전자 흡인력을 그림9에 나타내었고, 그림 10에 가동 철심의 변위를 나타

내었다. 0.013[s]에서 권선의 전류는 OFF되고, 철심의 공극이 "0"으로 되어 가동철심이 완전히 밀착되는 시간은 0.015[ms]이다. 전자 접촉기의 동작특성에 고려되어야 할 것은 전압변동에 대한 동작특성이다. 모선의 전압 변동으로 인하여 정격 전압의 85%까지 제어 전압이 떨어져도 동작에 지장을 초래하면 되지 않는다. 또한, 계통 전압의 부하감소에 의하여 정격 전압의 110%까지 전압 상승시에도 이상이 발생되지 말아야 한다. 전압 변동을 고려한 흡인력을 그림 11에 나타내었다.

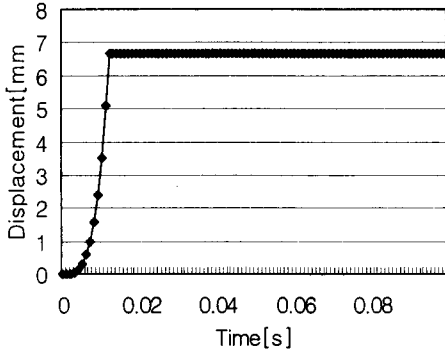


그림 10. 시간에 따른 가동철심의 변위 (V=DC220V)

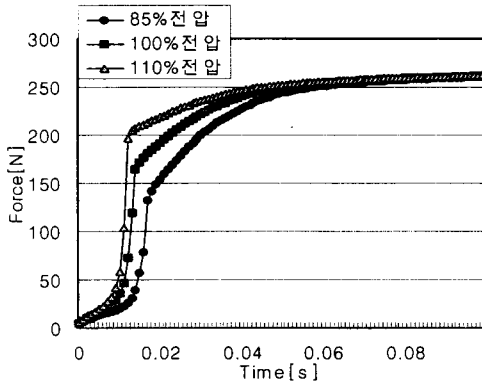


그림 11. 전압 변화에 따른 흡인력 특성 (정격전압 DC220V)

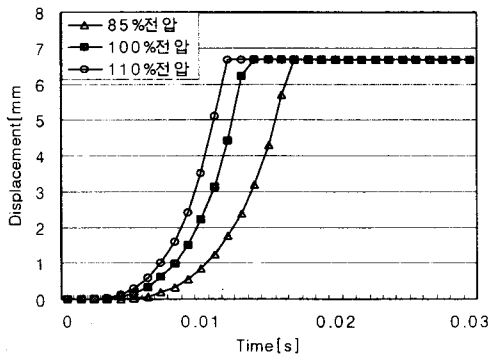


그림 12. 전압 변화에 따른 가동 철심 이동시간 (정격 전압 DC220V)

3.2.2 개방시 동작 특성

표 1의 권선 설계사양으로 개방 동작 철심의 변위와 인가 전압을 그림 13에 나타내었다. 스위칭 지점은 철심이 흡인된 지점에서 변위 3[mm]까지 전원이 인가되도록하였다. 전원 인가후 개방동작이 완료되기까지 21[ms]의 시간이 소요된다.

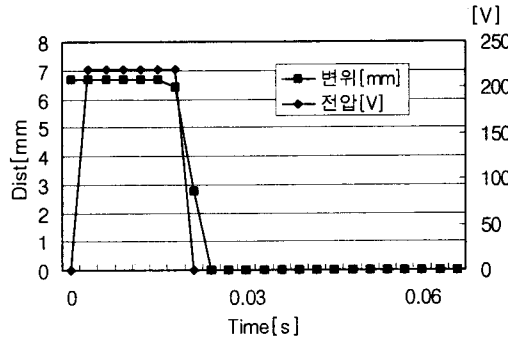


그림 13. 개방 동작 특성

4. 결 론

본 논문에서 영구자석을 응용하는 전자접속기 Actuator 구동 원리를 설명하고, 개략 설계법을 이용하여 치수를 정하였다. 그리고, 정지 상태에서 유한요소법으로 해석하여 사양을 확정하고, 전압방정식, 전자흡인력과 가동철심의 운동방정식을 time-step법으로 해석하여 동작특성을 얻었다. 그 결과 actuator의 요구성능에 적합한 사양에 접근한 설계가 가능하였고, 이것을 토대로 설계 기법에 유한요소법을 활용하는 알고리즘을 제안하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] AJ W Lammers의 2인 "MV VACUUM SWITCHGEAR BASED ON MAGNETIC ACTUATORS", Rrends in Distribution Switchgear, IEE.CON. No.459, PP.86-90, 1998.10
- [2] B.R.Varlow의 3인 "Optimal Design of autorecloser electromagnetic actuator" IEE Proc-Electr. Power Appl. Vol.147, No.5, PP.431-435, 2000.9
- [3] Nobutaka Kubota의 3인, "Development of Permanent Magnetic Actuator", JIEE. Con. 6-224, 2001. 4
- [4] 河津順洋 外 1人, 電氣電子器機の 實用解析, 化出版株式會社, pp.52-83, 1997