

회로정수를 이용한 직류전동기의 정류 특성 해석

김영선* 이주호 이기식
 단국대학교 전기공학과, 성균관대학교

Commutation Characteristic Analysis of DC Motor for Circuit Parameters

Young-Sun Kim*, Joon-Ho Lee and Ki-Sik Lee
 Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ., Sungkyunkwan Univ.

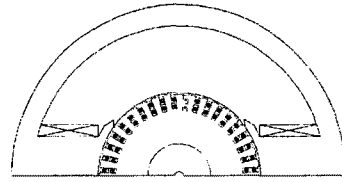
Abstract - Because of high torque and easiness of speed control, Direct Current(DC) motors are used long time. But, its applications are limited in circumstance and performance, since they contained brush and commutator. The commutation characteristic gives effect to life and performance of DC motor. Naturally, the commutation characteristic analysis is strongly required.

In this paper, With the result of finite element analysis, The inductance is calculated each rotor position and applied to the voltage equations coupled with commutation equation. The time derivative term in the differential equation is solved in time difference method.

This algorithm was applied to 2-pole shunt DC motor. We considered commutation characteristic by changing contact resistance between brush and commutator segment.

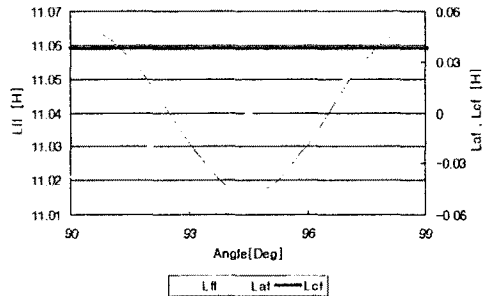
스도 회전자의 위치에 대하여 한주기만을 사용하였다. 각각의 자기 및 상호 인덕턴스는 그림 2와 같고 다음과 정의 하였다.

- L_{ff} : 계자 권선의 자기인덕턴스
- L_{af}, L_{cf} : 계자 권선의 상호인덕턴스
- L_{aa} : 전기자 권선의 자기인덕턴스
- L_{fa}, L_{ca} : 전기자 권선의 상호인덕턴스
- L_{cc} : 정류 권선의 자기인덕턴스
- L_{fc}, L_{ac} : 정류 권선의 상호인덕턴스

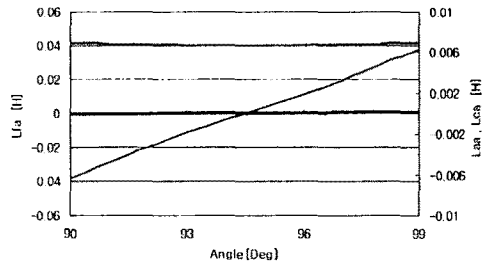


계자권선 전기자 권선 정류권선

그림 1 인덕턴스 계산을 위한 유한 요소 모델



a) 계자 권선의 인덕턴스



b) 전기자 권선의 인덕턴스

1. 서 론

직류전동기는 역사적으로 가장 오래되고, 회전속도를 용이하게 또 광범위하게 변화시킬 수 있고 고출력 특성을 가지므로 전기철도나 선박용으로 많이 사용되어 왔다. 그러나 브러쉬와 정류자를 포함하고 있어 환경 및 특성에 제약을 받는다. 특히 직류기의 생명이라 할 수 있는 정류현상은 브러쉬와 정류자의 수명과 그 특성에 많은 영향을 주고 있으므로 직류전동기의 개선을 위해서는 정류특성 해석이 불가피하다.

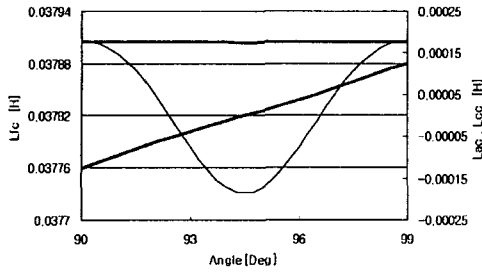
본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 직류전동기의 매 위치마다 권선의 자기 및 상호 인덕턴스를 계산하였다. 이를 전동기의 전기자 전압방정식, 계자 전압방정식 및 정류방정식에 적용하였다. 시간미분방정식은 후퇴차분법을 이용하여 해석하였으며, 2극 전동기에 적용하여 전동기의 전기자 전류, 계자 전류 및 정류코일의 정류특성을 살펴보았다. 향후 지속적인 연구는 직류전동기의 정류 특성을 파악하여 브러쉬와 정류자면 사이의 불꽃 방지나 보극 설계시에 유용하게 이용되리라 사료된다.

2. 본 론

2.1 인덕턴스 계산

전동기의 인덕턴스를 계산하기 위하여 2극 직류 분권 전동기를 채택하였으며, 그림 1과 같은 1/2 해석모델을 유한요소법을 이용하여 전자장 해석을 하였다. 이를 계자 회로, 전기자 회로 그리고 브러쉬에 의해 단락되어 전류의 변화가 일어나고 있는 정류회로로 구분하여 각각 자기 및 상호 인덕턴스를 구하였다.

해석모델은 슬롯의 수가 40개이고, 정류시 브러쉬의 폭이 정류자면의 폭과 동일하다고 가정하였으므로 1/40 회전시마다 주기적인 현상이 반복된다. 그러므로 인덕턴



c) 정류 권선의 인덕턴스

그림 2 각 권선의 자기 및 상호인덕턴스

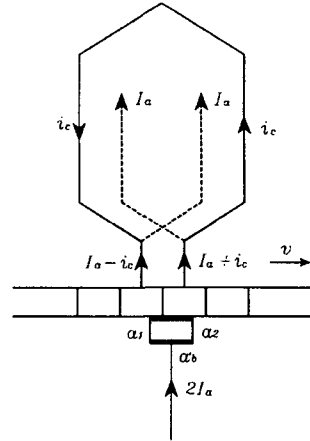


그림 3 정류회로

2.2 전압 방정식

직류전동기의 회로방정식의 계자 전압방정식과 전기자 전압방정식으로 식 (1) 및 (2)와 같다. 여기에 정류가 일어날 경우에는 정류방정식이 추가된다.

$$R_f I_f + \frac{d\phi_f}{dt} = V_{dc} \quad (1)$$

$$R_a I_a + \frac{d\phi_a}{dt} = V_{dc} \quad (2)$$

여기서,

- I_f, I_a : 계자 및 전기자 전류
- R_f, R_a : 계자 및 전기자 권선의 저항
- ϕ_f, ϕ_a : 계자 및 전기자 권선에 쇄교하는 자속

식 (1)과 (2)에서 역기전력 항인 좌변의 두번째 항은 전동기의 회전에 따른 각 권선의 시간당 자속변화율로 인덕턴스와 전류를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\frac{d\phi_k}{dt} = \frac{dL_{fk} I_f}{dt} + \frac{dL_{ak} I_a}{dt} + \frac{dL_{ck} i_c}{dt} \quad (3)$$

그리고, 각각의 시간미분항은 식 (4)와 같이 후퇴차분법을 적용하여 이산화 한다.

$$\frac{dL(\theta) I(t)}{dt} = \frac{L(\theta)^{t+\Delta t} \cdot i^{t+\Delta t} - L(\theta)^t \cdot i^t}{\Delta t} \quad (4)$$

2.3 정류방정식

정류자기에서는 한 인접 브러쉬 영역에 속하던 코일이 다른 인접 브러쉬 영역으로 들어갈 때 그 영역의 지배를 받아야 한다. 즉, 그 전의 영역에서 취했던 전압, 전류를 소멸하고 현재 영역에 맞는 전압, 전류로 전환하여야 한다. 이와 같이 전압, 전류를 전환시키는 작용을 정류작용이라 한다. 정류작용의 주체가 되는 것은 정류자와 브러쉬에 의한 기계적 스위칭인데, 이 경우 정류를 받는 코일의 인덕턴스와 유기전압이 전류의 전환에 장애요소가 된다. 그림 3은 브러쉬와 정류자편의 폭이 같은 경우, 브러쉬에 의하여 전기자 권선이 단락된 정류회를 나타내고 있다.

$$\frac{d\phi_c}{dt} + (r_c + r_1 + r_2)i_c - r_1(I_a - i_c) + r_2(I_a + i_c) = 0 \quad (5)$$

여기서,

- ϕ_c : 정류 권선에 쇄교하는 자속
- r_c : 정류 권선의 저항
- r_1, r_2 : 브러쉬와 정류자편 사이의 접촉저항

시간미분항은 전압방정식과 마찬가지로 후퇴차분법을 이용하여 정리하였고, 전동기의 회전에 따른 브러쉬와 정류자편간의 접촉저항은 그림 4와 같이 각각의 접촉저항을 병렬로 보아 모델링하였다. 식 (6)과 (7)은 각각의 접촉저항을 나타내며, 그림 5에 도시하였다.

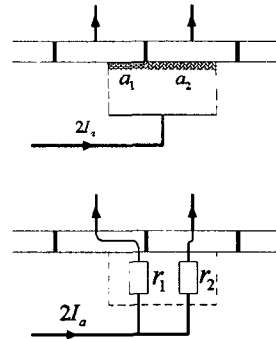


그림 4 접촉저항 모델링

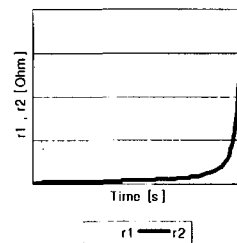


그림 5 정류주기 동안의 접촉저항의 변화

$$r_1 = r_b(a_b/a_1) \quad (6)$$

$$r_2 = r_b(a_b/a_2) \quad (7)$$

여기서,

a_1, a_2 : 브러쉬와 정류자편과의 접촉면적

a_b : 브러쉬의 총면적

r_b : 정류자편 1개의 모든 면적이 브러쉬와 접촉된 경우의 저항

2.4 계방정식

앞 절에서의 계자 및 전기자 전압방정식에 정류가 일어난 경우 정류 회로 방정식을 추가하여 계 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$[L + R]^{t+\Delta t} \{I\}^{t+\Delta t} = [L]^t \{I\}^t + \{V\}^{t+\Delta t} \quad (8)$$

여기서,

$$L = \sum_i \sum_j L_{ij}$$

$$i = f, a, c, \quad j = f, a, c$$

$$R = \begin{bmatrix} \Delta t R_f & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t R_a & 0 \\ 0 & -\Delta t(r_2 - r_1) & \Delta t(r_c + r_1 + r_2) \end{bmatrix}$$

$$I = \{I_f, I_a, i_c\}$$

$$V = \{V_{dc}, V_{dc}, 0\}$$

3. 결과 및 검토

제안한 방법을 이용하여 2극 직류 분권전동기에 적용하였다. 적용모델의 사양은 인가전압 110[V], 정격속도 1150[rpm], 슬롯수 40이고, 전기자의 권선은 이층권으로 한 단중 중권으로 되어있다.

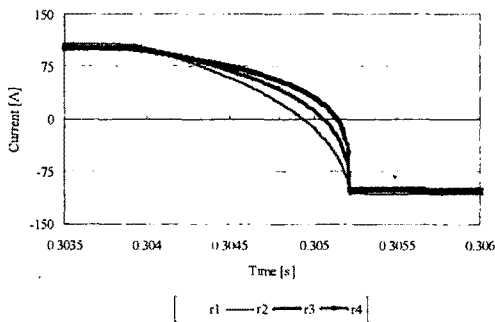


그림 6 접촉저항변화에 따른 정류 곡선

그림 6은 브러쉬가 정류자편 하나와 완전히 접촉한 경우의 저항 r_b 의 변화에 따른 정류 곡선의 변화를 나타내었다. 각 경우에 사용된 접촉저항은 $r_1 = 0.09 [\Omega]$,

$r_2 = 0.05 [\Omega]$, $r_3 = 0.03 [\Omega]$ 및 $r_4 = 0.02 [\Omega]$ 이다. 저항이 작은 r_4 의 경우 정류시간 후반부에서의 정류의 변화가 심하므로 전기자 회로와의 전류차가 생길 수 있다. 이런 현상을 부족정류라 말하며 그 부분에서 불꽃이 발생한다. 이는 저항을 증가시킴으로 점차적으로 정류특성이 개선되어지는 것을 볼 수 있다. 과거의 금속 브러쉬에서 탄소 브러쉬를 사용하는 것도 이런 이유에 기인한다.

4. 결론

본 연구에서는 직류전동기의 정류특성을 파악하기 위하여 전동기의 인덕턴스를 유한요소법을 이용하여 계산한 다음, 계자 및 전기자 전압방정식과 정류방정식에 적용하여 정류특성을 살펴보았다. 또한 브러쉬와 정류자편 사이의 접촉저항의 변화에 대한 영향을 고려하여 결과의 타당성을 검증하였다.

직류기에서의 정류특성은 브러쉬와 정류자의 소손과 밀접한 것으로 정류의 개선은 기계의 수명에 직결된다고 할 수 있다. 본 연구 결과는 향후 직류전동기의 정확한 특성 해석 및 보국 설계시에 도움이 되리라 생각된다.

[참고문헌]

- [1] Kailchro Hrayama, "Practical Detailed Model for Generators", IEEE Power Engineering Review, March, 1995.
- [2] Orlando Silvio Lobosco, "Modeling and Simulation of DC Motors in Dynamic Conditions Allowing for the Armature Reaction", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.
- [3] Roderick N. Ebben, "Performance Curves of a Series DC Motor Predicted Using Parameter Finite Element Analysis", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, May 1999.
- [4] M. G. Say, E. Openshaw Taylor, *Direct Current Machine*, Pitman, 1980.
- [5] 磯部昭二, 電氣機械設計法, 開發社, 1988.