전동기 제어와 응용(1)

역/대한전기기사협회

머리말

현대산업에 있어서는 전동기로 구동되는 부하가 플렌의 일환이고 또 그 상호간 시스템으로서 관련을 갖게 하여 운전하는 것이 일반적이다. 따라서 전기 기술자만이 아니고 플랜트를 계획하는 모든 분야의 기술자들도 전동기의 제어와 그 시스템에의 응용에 대한 지식이 필요해지고 있다.

본 연재는 다음과 같은 점에 요점을 맞추어 계속해 나갈 예정이다.

즉, 중요한 기초적 사항을 중심으로 어려운 이론은 가급적 피하고 알기 쉽게 실제 응용을 주로 취급한다. 따라서 플랜트를 계획하고 또 메이커에게 시방서를 제시하며 토의하는 포인트를 파악하는데도 도움이 될 것으로 생각한다. 자칫 어렵게 되기 쉬운 피드백 제어, 시퀀스 조직, 전자응용회로 등과 같은 방법에 대해서도 실제적이고도 수치적인 이해가 쉽도록 정리하였다.

현재는 제어방식, 기구, 장치 등이 시시각각 진보되고 있다. 예를 들면 시퀀스 컨트롤러나 컴퓨터 등 디지털 제어가 많이 보급되고 있다. 이에 대해 본 연재에서는 가급적 새로운 것을 취급하도록 노력하였다. 그러나 이에 대한 올바른 이용을 위해 기초적 사항의 이해가 한층 더 필요하다고 생각하고 상호연관되는 점을 중시하면서 언급하기로 하였다.

이 연재에 있어서는 전동기 자체의 이론, 구조에 대해서는 다른 전문적 서적에 양보하기로 하고 그 개요를 소개하기로 하였다. 전동기에는 교류, 직류 각종의 것이 있지만 이것들은 형태만 다를 뿐 공통 원리, 해석법으로 취급할 수 있다는 것을 소개하고 또한 그 제어방식, 특성 역시 동일한 원리에서 시작된 것으로 정리되는 것을 제시 하였다.

이렇게 함으로써 전동기를 전체적으로 장악하여 제어와 응용에 대한 이해를 용이케 하고 또한 신방식을 탐색하는 데 있어 보다 효과적일 것으로 생각한다.

제1장 전동기와 그 토크

1.1 에너지 변환과 전동기의 토크

전동기는 여러가지가 있다. 그러나 그 본질은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 부하를 회전시키는 에너지 변환기계이고 그 변환이 자계를 거쳐 시행된다는 점에서는 동일하다. 그 에너지 변환에 있어서 여러가지 특성을 내기 위해 각종 전동기가 있다고도 할 수 있겠다.

따라서 전동기는 에너지 변환이라고 하는 하나의 기준에서 공통된 일관성을 가지고 논할 수가 있고 또 특성해석이나 제어면에서도 각 전동기 공통의 방식으로 종합되는 것이다.

[1] 전동기의 에너지

지금, 순시의 전원에서 전동기로의 전기적 입력 에너지를 dA_e, 기계적 출력 에너지를 dA_m, 자계의 에너지 증가를 dA_f라고 하고 전동기 내의 손실을

무시하면

$$dA_e = dA_m + dA_f \tag{1.1}$$

이다.

여기서 코일의 유기전압을 e, 전류를 i라고 하면 전기적 입력 에너지 dA_e는

$$dA_e = eidt \tag{1.2}$$

로 표시되지만 자속을 ϕ, 유효권수를 ω, 자속쇄교수를 Ψ라고 하면

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = \omega\frac{d\phi}{dt} \tag{1.3}$$

이므로

$$dA_e = id\Psi = \omega id\phi = Ud\phi \tag{1.4}$$

여기서 U : 기자력($\equiv \omega i$)

으로 표시할 수가 있다.

기계적 운동에 없는 단순한 전자석에서는 $dA_m=0$이므로

$$dA_e = dA_f \tag{1.5}$$

식 (1.4)와 (1.5)에 의해 자속쇄교수가 Ψ, 자속이 ϕ일 때의 자계의 에너지 A_f는

$$A_f = \int dA_f = \int dA_e = \int_0^{\Psi} id\Psi = \int_0^{\phi} Ud\phi \tag{1.6}$$

로 표시된다. 자로에 갭을 포함하고 자화곡선이 직선적일 때는 식 (1.6)은 간단히 적분할 수 있어 다음과 같이 된다.

$$A_f = \frac{1}{2}i\Psi = \frac{1}{2}U\phi \tag{1.7}$$

자로의 리액턴스를 $R[AT/Wb]$, 퍼미언스를 $\lambda[Wb/AT]$라고 하면

$$\lambda = \frac{1}{R} = \frac{\phi}{U} \tag{1.8}$$

이고, 또 자기 인덕턴스 $L=\Psi/i$이므로 식 (1.7)의 자계의 에너지는 변형해서 다음과 같이 표시할 수도 있다.

$$A_f = \frac{1}{2}R\phi^2 = \frac{1}{2}U^2 = \frac{1}{2}Li^2 \ [J] \tag{1.9}$$

이들 관계식으로 전동기의 토크를 구하게 되는데, 우선 간단한 직선적인 흡인력으로 부터 시작하면 이해하기 쉽다.

[2] 전자석의 흡인력

지금 <그림 1.1>과 같은 플랜저형 전자석으로, 가동자가 흡인력에 의해 운동하는 경우를 생각해 보면

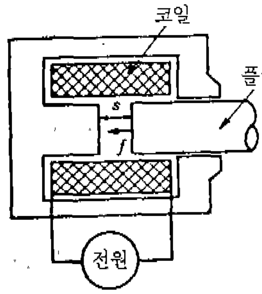
전기적 입력 증가는 식 (1.4)에 의해 $dA_e = Ud\phi$

자계 에너지 증가는 식 (1.8), (1.9)에 의해

$$dA_f = \frac{1}{2}\phi^2 dR + R\phi d\phi = \frac{1}{2}\phi^2 dR + Ud\phi \tag{1.10}$$

또한 흡인력 $f[N]$, 이동거리를 $d_s[m]$라고 하면

$$dA_m = fd_s \tag{1.11}$$



<그림 1.1>플랜저형 전자석의 흡인운동

이것들을 식 (1.1)에 대입하여 변형, 식 (1.9)와 비교하면 흡인력 f는 다음과 같은 형태로 표시할 수가 있다.

$$f = -\frac{1}{2}\phi^2\frac{dR}{ds}$$

$$= -\frac{\partial A_f}{\partial_s}\ \phi = \text{일정} \tag{1.12}$$

또, 동일하게 하여 $dA_e = id\Psi$, $A_f = \frac{1}{2}Li^2$에서

$$f = \partial A_f \partial_{si} = \text{일정} \tag{1.13}$$

와 같이도 표시할 수 있다.

즉, 전자석의 흡인력은 그 자계 에너지의 스트로크에 대한 변화율로 표시되며, 자속이 일정할 때는 에너지가 감소하는 방향으로, 전류가 일정할 때는 에너지 증가방향으로 힘이 작용한다.

[3] 전동기의 토크

<그림 1.2>와 같이 고정자, 회전자 공히 코일을 가지는 일반적인 전동기는 식 (1.11)의 힘 f대신 토크 $T[N\cdot M]$, 스트로크 s 대신 각도 $\theta[red]$를 사

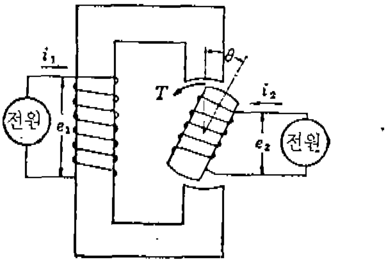
용해서

$$dA_m = Td\theta[\mathrm{J}] \tag{1.14}$$

이므로 에너지 밸런스의 식 (1.1)은 다음과 같이 된다.

$$dA_e = Td\theta + dA_f \tag{1.15}$$

이 식의 각 항에 대해서 생각하고 토크를 구해 보자.



<그림1.2>일차, 이차의 코일이 있는 전동기

우선 dA_e는

$$dA_e = e_1 i_1 dt + e_2 i_2 dt = i_1 d\Psi_1 + i_2 d\Psi_2 \tag{1.16}$$

여기서 e_1: 고정자 코일에 가해지는 전압

i_1: 고정자 코일의 전류

e_2: 회전자 코일에 가해지는 전압

i_2: 회전자 코일의 전류

Ψ_1, Ψ_2: 코일 1 및 2의 각 합성 자속쇄교수이며, 1차, 2차 각 코일의 자기 인덕턴스를 L_{11}, L_{22}, 상호 인덕턴스를 M_{12}라고 하면

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_{11} i_1 + M_{12} i_2 \\ \Psi_2 &= L_{22} i_2 + M_{12} i_1 \end{aligned} \tag{1.17}$$

으로 표시된다.

여기서 미소각변위 $d\theta$가 있다고 하면 L과 M 모두 변화하므로 dA_e는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} dA_e &= i_1 d\Psi_1 + i_2 d\Psi_2 \\ &= L_{11} i_1 di_1 + M_{12} i_1 di_2 + i_1^2 dL_{11} + i_1 i_2 dM_{12} \\ &\quad + L_{22} i_2 di_2 \\ &\quad + M_{12} i_2 di_1 + i_2^2 dL_{22} + i_1 i_2 dM_{12} \end{aligned} \tag{1.18}$$

또 자계의 에너지 A_f는

$$A_f = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + M_{12} i_1 i_2 \tag{1.19}$$

이므로 dA_f는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} dA_f &= L_{11} i_1 di_1 + \frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + L_{22} i_2 di_2 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22} \\ &\quad + M_{12} i_1 di_2 + M_{12} i_2 di_1 + i_1 i_2 dM_{12} \end{aligned} \tag{1.20}$$

식 (1.18), (1.20)을 식 (1.15)에 대입해서 변형하면 토크 T는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\theta} + i_2 i_2 \frac{dM_{12}}{d\theta} \tag{1.21}$$

또는 이것을 식 (1.19)에 비해서

$$T = + \frac{\partial A_f}{\partial\theta} \quad \text{전류} = \text{일정} \tag{1.22}$$

와 같이 표시할 수 있다.

전동기의 철심이 원형이고 갭이 일정할 때 자기 인덕턴스는 θ에 의해 변화하지 않으므로 식 (1.21)의 1항과 2항의 토크(리액턴스 토크라고 한다)는 없어진다. 따라서 회전자 코일에 작용하는 토크는 식 (1.21)에서 다음과 같이 된다.

$$T = i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial\theta} \tag{1.23}$$

회전자를 계자로 생각하고 그 기자력에 의해 회전자(전기자로 생각한다)에 쇄교하는 자속을 ϕ_{12}라고 하면

$$i_1 M_{12} = \Psi_{12} = \omega_2 \phi_{12}$$

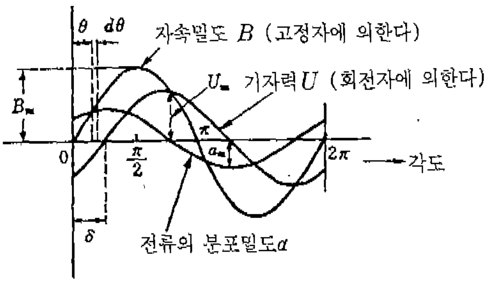
이므로 이것을 사용하여 식 (1.23)을 변형하면

$$T = i_2 \quad i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial\theta} = i_2 \frac{\partial \Psi_{12}}{\partial\theta} = U_2 \frac{\partial \phi_{12}}{\partial\theta} \tag{1.24}$$

가 된다. 여기서 $U_2 = \omega_2 i_2$, 즉 전기자 기자력이다.

식 (1.24)는 전기자의 토크가 전기자 코일의 기자력과 계자전류에 의한 계자와의 상호작용에 의한 것이라는 것을 표시하고 있다.

또한 고정자, 회전자 모두 분포권선을 가지고 있을 때는 식 (1.24)의 i_2에 상당하는 것은 그림 <1.3>과 같은 전류의 주변분포이다. 이것을 정현파 분포로 하고 그 분포밀도를 α로 한다. 고정자 자속밀도 $\beta=0$에서의 각도를 θ로 잡고 고정자 자속과 회전자 기자력의 상차각 (즉 <그림 1.3>의 자속밀



<그림1.3>전류의 주변분포

도 β와 기자력 U와의 위상차)을 δ로 하고

$$i_2=a d\theta=a_m \cos(\theta-\delta)d\theta$$

로 표시할 수가 있다. 또 자속 쇄교수는

$$\Psi_{12}=\int_{\theta}^{\theta+\pi} Blr d\theta=2B_m \cos\theta \cdot lr$$

여기서 l : 철심의 길이, r: 회전자 갭면의 변경

$l_r d\theta$: 미소각 $d\theta$에서의 회전자 표면적,

B_m : B의 최대값

$$\therefore \frac{d\Psi_{12}}{d\theta}=-2B_m l_r \sin\theta$$

그러므로 $d\theta$간에 작용하는 토크는

$$dT=-2a_m B_m l_r \cos(\theta-\delta) \sin\theta d\theta$$

따라서 토크는

$$T=\int_0^{\pi} dT=-\pi a_m B_m lr \sin\delta$$

이고 a_m은 수치적으로 U_m과 같으므로

$$T=\pi U_m B_m l \sin\delta$$

이상과 같은 점에 의해 전동기의 토크는 「계자에 의한 자속과 전기자 코일에 의해 생긴 자계가 이극끼리 서로 끌어 당겨서 생긴다.」고 해석할 수 있으며, 그때 내부 상차각 δ가 중요한 의미를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

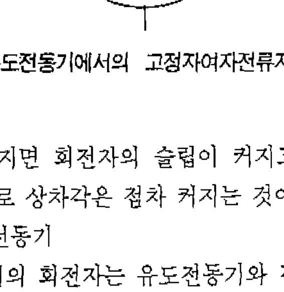
실제의 기계에서는 공간에 존재하는 자속이 계자 기자력과 전기자 기자력의 합성에 의해 생긴다. 이 합석자속과 전기자 기자력의 생차각 δ'를 δ대신 사용하기도 한다. 합성자속의 최대값을 B_m'라고 하면 $B_m \sin\delta=B_m' \sin\delta'$의 관계에 있으므로 어느 방식이나 동일한 결과가 된다.

[4] 각종 전동기와 상차각

(1) 유도전동기

유도전동기는 고정자 권선의 여자전류에 의한 회전자계에 의해 회전자 권선에 전압이 유기되고 전류가 흘러 회전자 자극을 만든다. 회전자 자극은 회전자계와 동일한 속도로 회전하지만 회전자 그 자체의 기계적 회전은 이 자계의 속도보다 약간 늦다. 즉, 슬립 s가 있다.

그러나 그 슬립은 보통의 부하상태에서는 극히 작기 때문에 (수 %이하) 회전자의 교류 주파수 sf는 전원주파수 f에 대해서 극히 작다. 따라서 회전자의 리액턴스는 저항에 비해서 작고 회전자 유기전압과 전류가 거의 동상이기 때문에 회전자 자극과 회전자계간의 상차각 δ는 대략 90° 상태로 운전되며 무부하에서나 전부하에서나 그리 다르지 않다. 즉, 회전자에 생기는 자극이 고정자의 회전자계에 거의 90° 위상각을 유지하면서 끌어 당겨져 회전하는 상태를 유지할 수 있도록 회전자가 어떤 슬립을 가지고 회전하는 것이다. 이 상태를 <그림 1.4>에 나타낸다.



<그림1.4>유도전동기에서의 고정자여자전류자계와 회전자의 자극

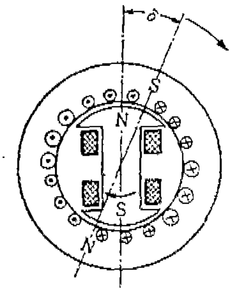
부하가 커지면 회전자의 슬립이 커지고 리액턴스분이 커지므로 상차각은 점차 커지는 것이다.

(2) 동기전동기

동기전동기의 회전자는 유도전동기와 같이 고정자로부터의 유도로 자극을 만드는 것이 아니고 회전자극에 직류여자를 가해서 자속을 만든다.

이 자속과 고정자의 전기자 전류기자력(동기속도로 회전하는 회전자계)의 이극끼리가 서로 끌어 땅

기는 힘에 의해 회전자가 회전자계와 동일한 속도로 회전하고 무부하에서는 상차각 δ=0, 부하가 증가하는 것과 동시에 δ가 증가하며, δ가 60~90° 를 δ=90° 를 초과하면 동기에서 벗어나 정지해 버리게 된다. 이 상태를 <그림 1.5>에 나타낸다.



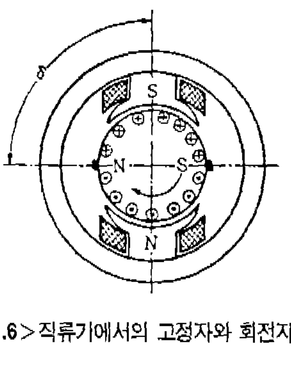
<그림1.5>동기전동기에서의 전기자회전자계와 회전자의 자극

(3) 직류전동기

직류전동기는 직류여자에 의한 고정자계 안에서 회전자가 회전하는 것인데, 회전자 전류에 의한 자극, 즉 전기자 반작용은 브러시와 정류자의 작용에 의해 고정자 자극과 90° 상이한 위치에 발생한다.

이 자극도 회전하지 않는 고정자계이다. 즉, 상차각 δ는 무부하시나 부하시나 거의 90°로서 양 자계의 흡인력으로 회전력이 유지되어 있다고 생각할 수가 있다.

이와 같이 직류전동기 역시 상차각 δ에 입각한 자계에너지 방식으로 통일시킬 수 있다. <그림 1.6>에 이 상태를 나타낸다.



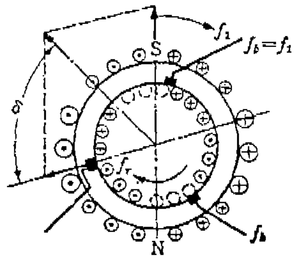
<그림1.6>직류기에서의 고정자와 회전자의 자극

그리고 직류전동기의 자계는 고정자, 회전자 모두 정지되어 있어 유도전동기나 동기전동기의 회전자계와는 상태가 다르게 생각되지만 만일 직류기의 고정자를 전기자로서 전기자 코일을 분포 수납하고 또 고정된 정류자를 달고 회전자를 계자자극으로 하여 브러시를 회전자와 함께 회전시키면 회전자 자극도 고정자 자극도 회전자의 속도로 회전하게 되어 회전자계가 된다. 요컨대 좌표가 달라진 것 뿐이다.

반대로 회전전기자형의 동기전동기를 생각하면 사계가 고정하는 것이 직류와 동일하다. 또 유도전동기에 있어서도 회전자에 1차 권선을 설치하여 슬립링을 통해서 교류전원에 접속하고 고정자를 2차측으로 하면 자계는 정지하게 된다.

(4) 교류정류자 전동기

동기전동기나 유도전동기나 주파수에 의해 정해지는 동기속도에 구속되어 일반적으로 회전속도의 자유가 듣지 않는다. 그러나 교류권선과 직류기와 같은 정류자 권선을 조합하면 속도제어가 가능한 교류전동기가 만들어진다. 이것이 교류정류자 전동기이다.



<그림1.7>교류정류자전동기의 자계

지금, <그림 1-7>과 같이 고정자의 교류권선에 의해 생긴 주파수 f_1의 회전자계 안에서 그 속도와 다른 속도 f로 회전자의 정류자 권선이 회전하면 그 코일에는

$f_2 = f_1 - f_r$

인 주파수의 전압이 유기한다. 그러나 고정된 브러시를 정류자와 습동시켜서 그곳에서 전압을 인출하

변 브러시에 나타나는 전압의 주파수 f_b는 내부주파수 f_2와 회전속도의 주파수 f_r의 합이므로

$$f_b = f_2 + f_r = f_1$$

으로, 회전자계의 속도와 동일해진다.

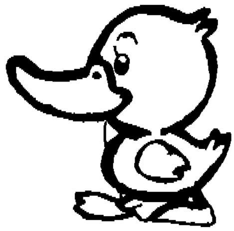
즉, 정류자는 주파수 변환의 작용을 하는 것이다. 따라서 회전자를 흐르는 전류에 의해 생기는 기자력의 속도는 회전자에 대해서는 f_2라도 공간에 대해서는 f_1으로서 고정자의 기자력과 회전자의 기자력은 동일속도로 회전하는 것이 다른 전동기와 동일하다.

양 기자력의 상차각 δ는 브러시의 위치에 따라 변화시킬 수가 있으며 $\delta=0$ 및 $180°$ 의 위치에서는 토크가 생기지 않고 $90°$ 부근에서 토크가 가장 커진다.

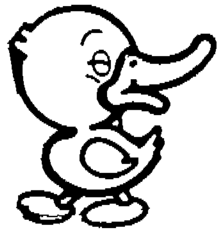
이와 같은 이유에 의해 교류정류자 전동기는 동기속도와 상이한 속도에서 토크를 발생할 수 있는 것이다.

그리고 직류전동기의 정류자도 넓은 의미에서의 주파수 변환을 하고 있는 것이다. 다만 고정자 자계가 정지해 있으므로 브러시 전압은 직류가 되고 회전자 도체 그 자체에는 회전속도와 동일한 주파수의 교류가 흐르고 있는 것이다.

<다음호에 계속…>



웃으며 삽시다



할매의 초행길

버스를 처음 타는 할머니가 남대문에
갈일이 있어 물어 물어 버스를
탔는데(종로 5가에서)
운전기사 : 오(5)가입니다. 오가
내리세요. 사람들이 우르르 내린다.
(다시 버스는 종로 2가에서 섰다.)
운전기사 : 이(2)가 입니다. 이가
내리세요.
그러자 맨뒤에 앉아 계시던
할머니께서 큰소리로
할머니 : 아따, 운전 기사 양반, 김가는
언제 내린다요.

치질 있어요?

한 신사가 식당에 갔다.
그래서 메뉴판을 보고 있었다.
그런데 옆에 서있던 웨이터가 자꾸
엉덩이를 긁는 것이었다.
신사는 찝찝해서 말했다.
"치질 있어요?"
그러자 웨이터가 말했다.
"죄송합니다, 손님. 메뉴판에 있는 것
외에는 주문이 안 되는데요."

영자와 맹구

햇빛이 쨍쨍 내리쬐는 무더운 날.
영자가 낑낑거리며 나무에 올라가고
있다.
그걸 본 맹구.
맹구 : 아니…. 영자야. 너 지금
뭐하고 있니?
영자 : 응. 나무 높이를 재고 있슈.
맹구 : 바보. 나무를 잘라 땅에 놓고
재면 쉬운 것을.
그러자 영자가 열을 내며,
영자 : 이 멍청아! 그렇게 하면 그게
높이냐? 길이지.