

동기기의 구조와 운전

김동조 / 기술사사무소 고려기술단 대표
건축전기, 전기응용기술사

본 내용은 kentucky 대학의 Syed A. Nasar 교수가 저술한 "ELECTRIC MACHINES & POWER SYSTEMS" 중 동기기의 요점에 대하여 직역과 함께 약간의 해설을 추가하였습니다. 직역에 있어서 다소 문장 구성이 매끄럽지 못한 점에 대하여 양해 바랍니다. 조금 더 깊은 자료에 대하여는 e-mail(dj51004@naver.com)로 연락바랍니다.

동기기는 발전기와 전동기로 사용할수 있는 기기이며 전동기의 경우 대형 플랜트 현장에서 정속도 용으로 사용되어 지고 있다. 본고에서는 동기기의 구조와 기본적 원리에 대하여 기술하고자 한다.



목 차

1. 동기기의 개요

1.1 동기발전기의 운전

1.2 동기기의 운전상 특징

1.2.1 여자형태

1.2.2 계자구조와 속도

2. STATOR

3. COOLING

4. DAMPER BARS

5. 동기전동기 운전

5.1 동기기 해석

5.1.1 전기자 권선

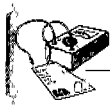
5.1.2 원통형 회전자를 갖는 동기발전기의 성능

1. 동기기의 개요

- 공통적 모습의 전기기기: 동기기, 직류정류자기, 다상유도기
- 동기발전기 : 정격출력 수백 MVA
- 동기기의 특징
 - ① 정상상태에서 정속도, 정주파수 운전
 - ② 전동기와 발전기로 운전 가능
 - ③ 전동기는 정속도 운전용으로 사용되어지고 가변속 운전이 요구되는 경우 inverter나 cycloconverter 와 같은 전용의 주파수 변환기를 사용한다.

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

- 동기발전기는 페러데이의 전자유도법칙에 기본하며 도체와 자속 간의 연속적인 운전에 의해 emf(electromotive force)가 발생한다.
- 동기기의 구조: 직류 여자권선이 있는 계자부와 전기자로 구분되며 전기자는 주로 3상 권선으로서 기전력을 발생시킨다. 대



부분의 동기는 고정적인 전기자와 회전계자 구조로서 회전계자의 직류권선은 slip ring과 brush를 통하여 외부전원에 연결한다.

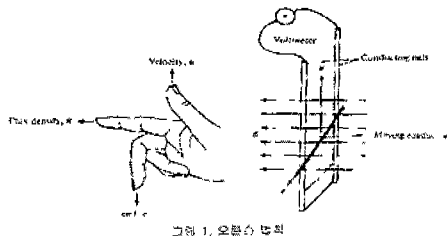


그림 1. 오른손 법칙

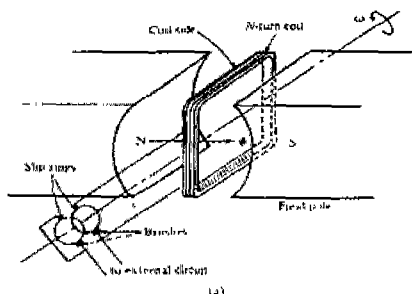
1.1 동기발전기의 운전

Faraday의 전자유도법칙에 의해 emf가 발생하며 emf는 (1)자계중의 회로에서 자속이 회로와 시간적으로 변화하거나 (2)회로와 자계사이에서 도체로 이루어진 회로가 자기력선을 쇄교(cross cut)할 때 발생한다. 위에서 (1)은 변압기 운전의 기본이 되며 (2)는 발전기 운전의 기본원리이다. 그림1에서와 같이 평등 자속밀도 B와 직각으로 이루어진 도체길이 l과를 고찰할 때 도체를 폐회로 형상으로 고정시키고 도체를 레일에서 sliding 할 수 있게 하여 연속적인 자속을 회로에 대해 변화시키면 페러데이 법칙에 의해 회로에는 emf가 유기되고 전압계에 의해 전압을 측정할 수 있게 된다. 단위시간에 대한 자속을 B, l, u로 표시할 수 있으며 유도기전력 $e = Blu$ (1.1)의 등식으로 나타낸다.

▶오른손 법칙

자속밀도 B와 직각으로 도체가 속도 u로 움직이면 도체에 기전력이 유기된다.

즉 e, b, l과 u와의 상호간 관계를 말한다.



(a)

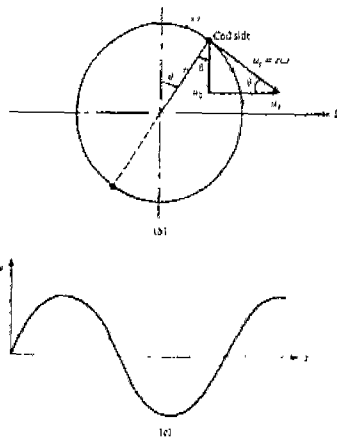


그림 2.

(a) An elementary generator, (b) resolution of velocities into "parallel" and "perpendicular" components, (c) voltage waveform at the brushes.

그림2(a)에서 평등자계내 N회의 코일이 일정 각속도로 회전하는 경우 l은 코일의 축 방향 r은 반경의 경우 (1.1)식에 의해 코일에 기전력이 유도된다.

여기서 속도 u는 자속밀도 B와 직각이다.

접선방향속도 $u_t = r\omega$ m rad/sec

한 변의 코일길이를 l이라고 하면 N회 코일의 전 유효길이는 $2Nl$ 이로서 (1.1)식의 l로 대체할 수 있다. 따라서 (1.1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e = B(2Nl)u_t \dots\dots(1.2)$$

u_t 는 자속을 가로지르는(또는 직각) 속도이다.

그림2(b)로 부터 $u_t = u_t \sin\theta = \omega r \sin\theta$

여기서 $\theta = \omega t$ 따라서 (1.2) 식을 정리하면

$$e = 2BNl\omega r \sin\omega t = E_m \sin\omega t$$

여기서 $E_m = 2BNl\omega r$ 이다.

결과적으로 slip ring이나 brush를 통하여 교류전압을 얻는다.

또 다른 방법으로는 페러데이 법칙에 의해 자속의 시간적 변화에 의한이다.

그림3에서와 같이 회전자가 3상이고 공극에서의 자속밀도가 균일하며 회전자가 일정 각속도일 경우 자속 $\lambda = N\phi \cos\theta$ 일 때 ad에서의 유도기전력 e_a 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d}{d\theta} N\phi \cos\theta \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ &= \omega N\phi \sin\omega t = E_m \sin\omega t \end{aligned}$$

여기서 $E_m = \omega N \phi$ 따라서 $e_b = E_m \sin(\omega t - 120)$,
 $e_c = E_m \sin(\omega t + 120)$

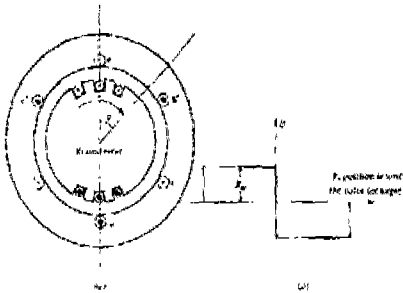


그림 3. (a) A round or cylindrical rotor synchronous machine. (b) Flux density distribution due to the field winding.

1.2 동기기의 구조상 특징

① 구조: 전기자권선과 계자(영구자석 또는 전자석)로 구성

1.2.1 여자형태

- DC 여자권선으로부터 자속 발생
 - DC 여자는 자여자 직류발전기로부터 전원 공급 (동기기의 동일 축에 연결)
 - Silicon diode나 thyristor 사용
- a. 정지형은 slip ring을 통하여 회전자에 전류 공급
- b. 브러시리스 시스템은 회전자와 함께 회전하는 축에 설치된 정류기-브러시와 슬립링을 필요로 하지 않는다.

1.2.2. 계자구조와 속도

동기기는 정속도 기기이며 동기속도는 다음과 같다.

$$N_s = \frac{120f}{P} \cdot rpm$$

결과적으로 기기의 회전속도는 계자구조에 의존한다. 따라서 터빈발전기는 고속형 기기로서 회전자는 원통형이며(원심력이 작다) 수력발전기나 디젤발전기는 저속기로서 돌극형 구조이다.(원심력이 크다) 동기기는 고속기로서 적절한 크기가 되어야 하며 그 이유로서 과도한 원심력과 기계적 STRESS를 고려하여 3600

rpm 근처로 개발한다.

2. STATOR

다상 유도전동기와 비슷하며 본질적으로 원형 회전자기(cylindrical-rotor)와 돌극형 회전자기(salient rotor)의 stator와 다르지 않다. 수차발전기의 stator는 다른 형태의 발전기와 비교하면 매우 큰 직경의 전기자를 갖는다.(저속이므로)

3. COOLING

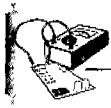
동기기는 종종 매우 큰 size로 만들어지는데 이는 대전류를 보낼 수 있게 설계하기 때문이다. 전형적인 전기자 전류 밀도는 $10[A/mm^2]$ 로 설계하며 또한 core의 자기부하(magnetic load)는 많은 계에서 포화에 이르는 것들이다. 극심한 전기적 자기적 부하는 동기기에서 발열하며 이들을 적절하게 분산시켜야 하며 부수적인 공기와 물을 포함한 수소, 헬륨 등을 냉각제로 사용한다.

4. DAMPER BARS (제동자)

동기기는 정상상태에서는 동기속도로 정속도 운전을 하나 타 전기기기와 같이 동기기도 기동중이거나 비정상적인 상태와 같은 과도적인 기간을 경험하는데 과도시의 회전자는 기계적인 진동과 동기속도를 이탈하는 바람직하지 않는 현상을 발생하게 된다. 이를 극복하기 위해 부수적인 권선을 setting하게 되는데 유도전동기의 cage와 비슷하고 회전자에 설치하며 이것을 damper winding(제동권선)이라 한다.

회전자 속도는 동기속도와 다르게 되며 전류는 댐퍼권선 내에서 유도된다. 발생 torque는 동기속도로 반환되며 damper bars는 기동기기를 뜻한다.

▶해설 회전자 속도와 동기속도가 다르다는 것은 회전자 자속이 제동권선을 쇄교(CUT CROSS)하고 전자유도에 의한 유도기전력이 제동권선에 유기하게 됨을 뜻한다. 따라서 토오크가 발생되고 회전자는 동기속도로 회전하며 당연히 제동권선에는 유도전류가 발생하지 않



는다.

- ① 원칙적인 3개의 권선——전기자 권선, 계자권선, damper권선

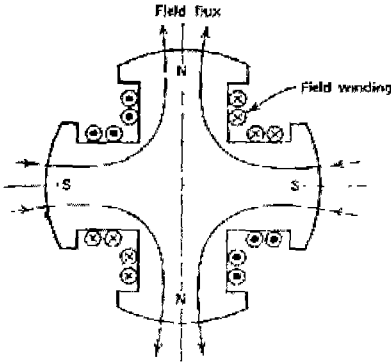


그림 4.

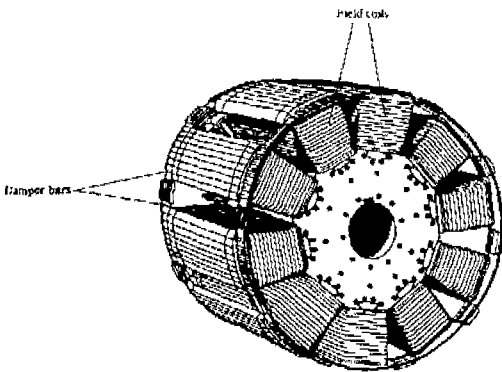


그림 5.

A salient rotor showing the field windings and damper bars (shaft not shown).

5. 동기전동기 운전

동기기는 동기전동기나 동기발전기로 운전이 가능하며 3상 동기기의 고정자는 3상 유도전동기와 비슷하다. 고정자 권선(전기자)은 3상 전원을 공급받을 때 돌극기의 공극 내에서 회전자계를 가진다. 회전자는 최소의 자기저항 경로를 갖기 위해 항상 계자와 일직선이 되게 하는 경향이 있다.

원통형 회전자는 회전자계를 따라오지 않는다. 왜냐하면 전체 공극주위가 동일한 자기저항의 균등공극이고 회전자는 자계(고정자)에 대하여 일직선으로 똑바르지 않기 때문이며 이것을 자기저항 토크라고 한다. 그것은 기기 원주 주변 자기저항의 변화에 의해 나타난다.

계자권선에 직류source 공급. 즉 회전자가 여자기이다. 여자는 고정자의 자계와 일직선의 경향이며 회전자계와 같이 회전할 것이고 돌극형 회전자는 추가적인 자기저항 torque를 가져야 한다.

- ▶요약 고정자계는 회전자를 질질 끌어당긴다 라고 말할 수 있다. 고정자의 N극과 회전자의 S극이 함께 구속된 것처럼 된다. 여기서 회전자가 정지중의 경우 고정자극은 한 방향으로 회전자를 회전시키려 할 것이고 다른 것들은 회전자극을 가로질러 회전할 것이다. 따라서 동기전동기는 자기기동을 할 수 없다.

① 앞서 언급하였듯 회전자에 유도전동기의 형태와 같은 damper bars를 설치하여 기동토크를 공급한다.

② 회전자 기동시 대개 동기속도에 도달하며 damper bars에서 유도된 전류에 기인하여 동기속도로부터 벗어나지만 동기속도로 반환한다. damper bars가 없는 기기나 damper bars를 갖는 대형기기들은 보조전동기로 기동한다.

- ▶참고 농형 유도전동기는 회전자 권선(또는 bar)을 단락하여 큰 단락전류를 얻고 이 전류로 torque를 발생하게 한다.

5.1 동기기 해석

- 발전기 운전과 전동기 운전으로 구분
- 원통형 회전자기의 분석은 돌극형 기기의 절차와는 다소 다름.

5.1.1 전기자권선

- 전기자권선은 저항이 있으며 이 저항 값은 운전 중 온도와 전기자 도체 내에 교류전류의 흐름에 영향을 끼치는 요소 중 하나이다. (예: 표피효과와 원인)
- 전기자저항 값은 직류저항에 비해 매우 크다.——저항효과 $R_{ac} = 1.6R_{dc}$ 에 가깝다.
- 전기자 권선의 누설reactance는 전기자 도체의 누설자속이 원인이고 도체 내 전류 때문이며 이 자속은 계자권선과 연결

되지 않는다. 유도전동기에서의 누설 reactance는

- (1) end-connection 누설 reactance
- (2) slot 누설 reactance
- (3) tooth-top과 zigzag 누설 reactance
- (4) belt 누설 reactance로 구분

그러나 이들 요소는 모든 동기기마다 중요하지는 않다. 대형기에서는 (3), (4)항의 누설 reactance는 전체 누설 reactance에서 작은 부분이다. 자속경로에 기여하는 리액턴스는 (1), (2)항의 리액턴스이다.

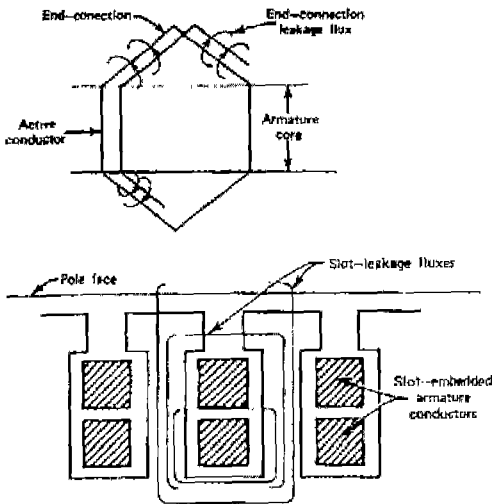


그림 6. (a) End-connection leakage flux path. (b) Slot-leakage flux paths.

X_a : 전기자 권선의 1상당 total 누설 reactance를 나타내며 동기기 특성에 중요한 parameter이다.

5.1.2 원통형 회전자를 갖는 동기발전기의 성능
 V_o : 회로개방시의 상전압(발전기 내부전압)—유도기전력

I_f : 계자전류 (포화되지 않은 상태에서의 전류) 전기자 단자(terminal)가 단락일 때에도 불변

I_a : 전기자 상전류

Z_s : 동기임피던스

$V_o = I_a Z_s \quad Z_s = R_a + jX_s \quad X_s \gg X_a$

일정 역률 부하에 상전류 I_a 와 단자전압 V_t 로 공급 그림7에서 $V_a = V_t + I_a R_a + I_a X_a$ 로 표시할 수 있으며 2개의 mmf(magnetomotive force)는 F_a (전기자전류에 의한)와 F_f (계자전류에 의한)로 구분하고 기자력 F_a 은 V_a 를 만든다.

※ 전기자 반작용: 전기자전류(부하전류)에 의해 자속이 발생하고 이 자속에 의해 주 자속(계자자속)이 영향을 받아 부하에 따라 전압의 증감이 발생하는 현상.

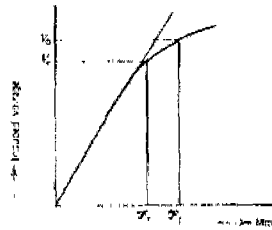


그림 7. Open-circuit characteristics of a synchronous generator

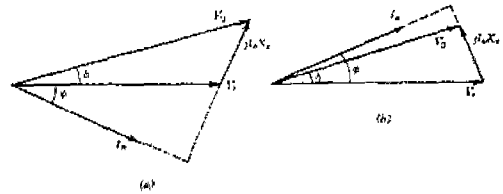


그림 8. Phasor diagrams (a) Lagging power factor (b) Leading power factor

$$emf = N \frac{d\theta}{dt}$$

기전력 e 는 mmf 보다 90° 뒤진다. 즉 F_a 은 V_a 보다 90° 앞선다.

여기서 X_s 는 동기리액턴스, X_a 는 전기자 반작용에 의한 것으로 임시적 리액턴스이며 부하 중에만 존재한다. $X_s \gg R_a$ 이므로 $Z_s \approx jX_s$ 가 된다.

동기리액턴스는 전압변동과 출력각 특성에 매우 중요한 요소이며 전압변동률은 다음과 같다.

$$\epsilon = - \frac{V_o - V_t}{V_t} \times 100$$

V_t 는 부하시 단자전압 V_o 는 무부하시 단자전압

(끝)