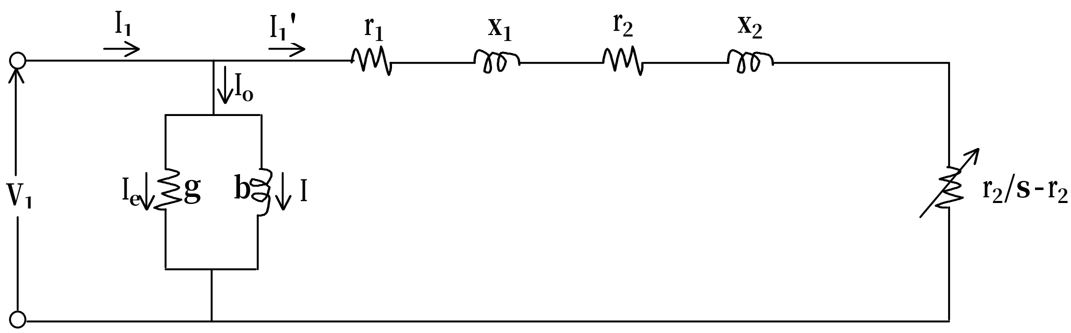
유도전동기 기동 방법

작성일자 : 2000.08.14
작성자 : 중형설계/안완도

1. 유도전동기 등가회로 및 관련식



I_1 : 입력전류
I_o : 무부하전류
I_1' : 부하전류
I_e : 철손전류
I_ϕ : 자화전류

g : 여자콘덕턴스
b : 여자서셉턴스
r_1 : S/T 저항
x_1 : S/T 리액턴스
r_2 : R/T 저항
x_2 : R/T 리액턴스

1.1 입력전류와 부하전류

입력전류

$$I_1 = \frac{P_o}{\sqrt{3}V_1 \times \cos\theta \times \eta}$$

Po : 전동기 출력[kW] : 회전자 출력 + 기계손

부하전류

$$I_1' = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

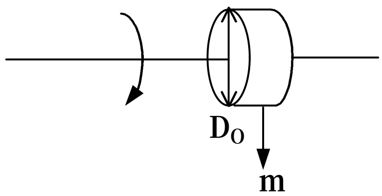
$$\underline{I_1 = I_o + I_1'}$$

유도 전동기 기동

1. 플라이휠 효과(GD^2)

농형 전동기로 FAN과 같은 고관성 부하를 기동할 경우, 기동 가속중에 회전자 도체에 발생하는 큰 손실로 인한 온도상승을 전동기 설계시 검토해야 한다.

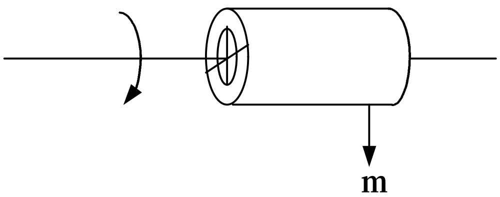
1) 원판상의 경우 GD^2



D_O : 직경 [m]

$$GD^2 = \frac{1}{2} m \times {D_O}^2 [kgm^2]$$

2) 원통형상의 경우 GD^2



D_O : 외경 [m]

D_i : 내경 [m]

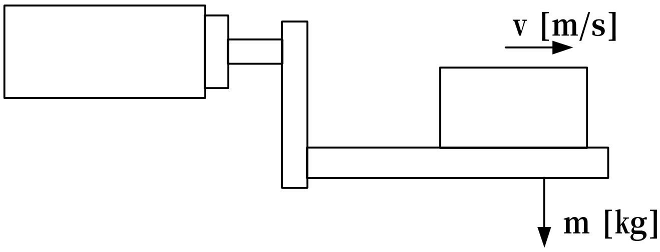
$$GD^2 = \frac{1}{2} m \times ({D_O}^2 + {D_i}^2)[kgm^2]$$

3) 부하를 벨트 등과 같이 비직결로 결합하는 경우

$$[GD^2]_{ML} = [GD^2]_L \times (\frac{N_L}{N_M})^2$$

$[GD^2]_{ML}$: 전동기 축으로 환산한 부하의 GD^2
$[GD^2]_L$: 부하축에서의 부하 GD^2
N_L : 부하축 회전속도
N_M : 전동기축 회전속도

4) 직선 운동하는 부하의 경우, 전동기 축으로 환산한 부하의 GD^2



회전운동에너지 = 직선운동에너지

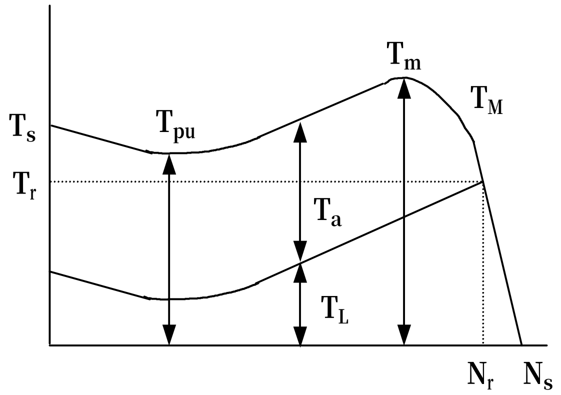
$$W = \frac{1}{2} Jw^2 = \frac{1}{2} mv^2$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{GD^2}{4} \times (2p \times \frac{N_M}{60})^2 = \frac{1}{2} mv^2$$

$$GD^2 = \frac{mv^2 \times 3600}{p^2 {N_M}^2}$$

2. 농형 전동기의 기동시 토오크

부하를 정격 회전속도까지 가속시키기 위해서는 가속중 전동기 토오크가 부하 토오크보다 상당히 커야 한다. 즉, 고관성 부하(GD^2가 큰 부하)를 기동시킬 경우 토오크가 큰 전동기를 필요로 한다.



전동기 토오크 >> 부하 토오크

3. 기동시 열손실

임의의 GD^2를 가진 부하를 무부하 기동할 때 회전자에 발생하는 손실은 이론적으로는 가속에너지 즉,가속후 회전체에 축적된 에너지에 상당한다.

$$W_s = \frac{1}{2} J v^2 = \frac{1}{2} \times \frac{GD^2}{4} \times (2p \times \frac{N}{60})^2 = \frac{GD^2 N^2}{730}$$

W_s : 에너지 [Ws]

J : SI 단위의 관성 모멘트 [kgm^2]

GD^2 : 플라이휠 효과 [kgm^2]

N : 가속후의 회전속도 [rpm]

실제 기동시는 부하 토오크가 존재하므로 회전자에 발생하는 손실은 상기 값보다도 증가한다.

$$W_s' = W_s \times \frac{T_M}{T_a}$$

W_s' : 부하 토오크를 고려한 경우의 에너지

T_M : 전동기 토오크

T_a : 가속 토오크

고정자에는 아래와 같은 손실이 발생한다.

$$W_{ss}' = W_s' \times \frac{R_1}{R_2}$$

W_{ss}' : 고정자 권선에 발생하는 에너지 [Ws]

R_1 : 한 상당 고정자 권선 저항

R_2 : 한 상당 회전자 권선 저항 (1차 환산치)

Note : 감전압 기동시 전전압 기동시 보다 손실이 증가한다.

4. 농형 전동기의 기동시간

$$t_a = \frac{\Sigma GD^2 \times N}{375 \times \overline{T_a}[kgm]} = \frac{\Sigma J \times N}{9.55 \times \overline{T_a}[Nm]}[\text{sec}]$$

ΣGD^2 : 전동기축으로 환산한 부하와 전동기 회전자의 전관성 모멘트 [kgm^2]
J : 전동기축으로 환산한 부하와 전동기 회전자의 SI단위 전관성 모멘트 [kgm^2]
N : 가속 완료시의 회전속도 [rpm]
$\overline{T_a}$: 평균 가속 토오크 [kgm 또는 Nm]

전전압 기동시의 평균 가속 토오크 개략치는 다음과 같이 구한다.

$$\overline{T_a} \cong 0.8(\frac{T_s + T_m}{2}) - \overline{T_L}$$

$\overline{T_L}$: 가속중 평균 부하 토오크

가속중 평균 부하 토오크의 개략치는 다음과 같이 결정합니다.
1) 정토오크 부하의 경우, 가속후 부하 토오크가 T_r과 같은 경우 : $\overline{T_L} = T_r$
2) 부하토오크가 회전속도의 2승에 비례하는 부하의 경우
   a) 가속후 부하 토오크가 T_r과 같은 경우 : $\overline{T_L} = 0.34T_r$
   b) 가속후 부하 토오크가 $T_r/2$과 같은 경우 : $\overline{T_L} = 0.17T_r$

짧은 주기로 반복하여 재기동하는 전동기의 경우 세밀한 설계 검토가 필요하며, 고관성 및 부하 토오크가 큰 경우는 전동기의 기동불능 현상이 발생할 경우도 있으므로 큰 사이즈의 전동기를 사용하거나 권선형 전동기를 사용하여야 한다.

5. 기동시 온도상승

1) Stator Winding

$$\Delta V_{cu\,1s} = \frac{(0.87 \times I_a)^2 \times 3 \times R_{1w}}{C \times G_{cu\,1} \times (1.0 \sim 1.5)} \times t_a [°C]$$

I_a : 기동전류
R_{1w} : Stator 권선 저항
G_{cu1} : Stator 권선의 Copper 중량
t_a : 기동시간
C : 비열 (Copper : 388, Al : 897)
1.0~1.5 : Factor for Temp. flow from coil to core

2) Rotor Bar

$$\Delta V_{cu2s} = \frac{\Sigma GD^2 \times N_s^{\ 2}}{730} \times \frac{\overline{T_M}}{\overline{T_M} - \overline{T_L}} \times \frac{1}{C \times G} \times F_A [°C]$$

ΣGD^2 : 전동기축으로 환산한 부하와 전동기 회전자의 전관성 모멘트 [kgm^2]
N_s : 동기속도 [rpm]
$\overline{T_M}$: Motor 토오크 평균치[kgm 또는 Nm]
$\overline{T_L}$: 부하 토오크 평균치[kgm 또는 Nm]
C : 비열 (Copper : 388, Al : 897)
G : Al Bar + 1/2(Ring 무게)
F_A : Reducing factor for Temp. rising at starting

6. 기동 능력 (Starting Capability)

1) Cold Condition에서의 연속 기동 가능 회수

$$\frac{350 - (ambient - temp)}{\Delta V_{cu2s}} = n[times]$$

2) Hot Condition에서의 연속 기동 가능 회수

$$\frac{350 - (hot - state - temp)}{\Delta V_{cu2s}} = n[times]$$

7. Thermal Limit Curve

Rotor 구속시 시간당 온도 상승을 η라 하면,

1) 열상태(Hot Condition)에서 Motor가 견딜수 있는 시간

$$\frac{350 - (hot - state - temp)}{h} = A[\sec]$$

즉, Rotor 구속시 열상태에서는 Motor가 A sec 견딜수 있다.

2) 냉상태(Cold Condition)에서 Motor가 견딜수 있는 시간

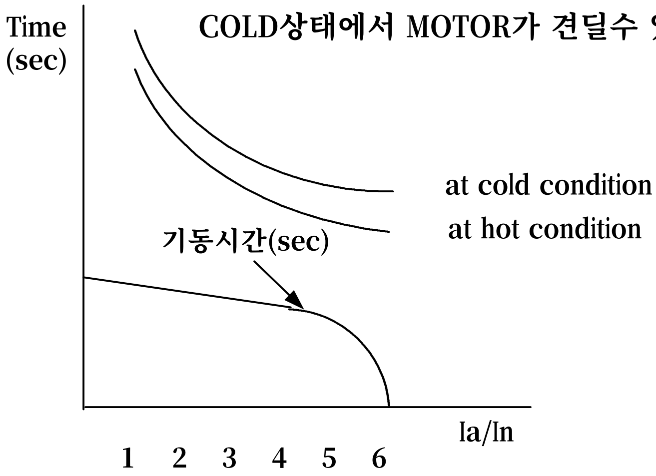
$$\frac{350 - (ambient - temp)}{h} = B[\sec]$$

즉, Rotor 구속시 냉상태에서는 Motor가 B sec 견딜수 있다.

<Example> **기동전류 600%,**

HOT상태에서 MOTOR가 견딜수 있는 시간 A : 9 sec

COLD상태에서 MOTOR가 견딜수 있는 시간 B : 11 sec



① $(\frac{I_a / I_n}{6})^2 \times A(orB)$

② $(\frac{I_a / I_n}{5})^2 \times A(orB)$

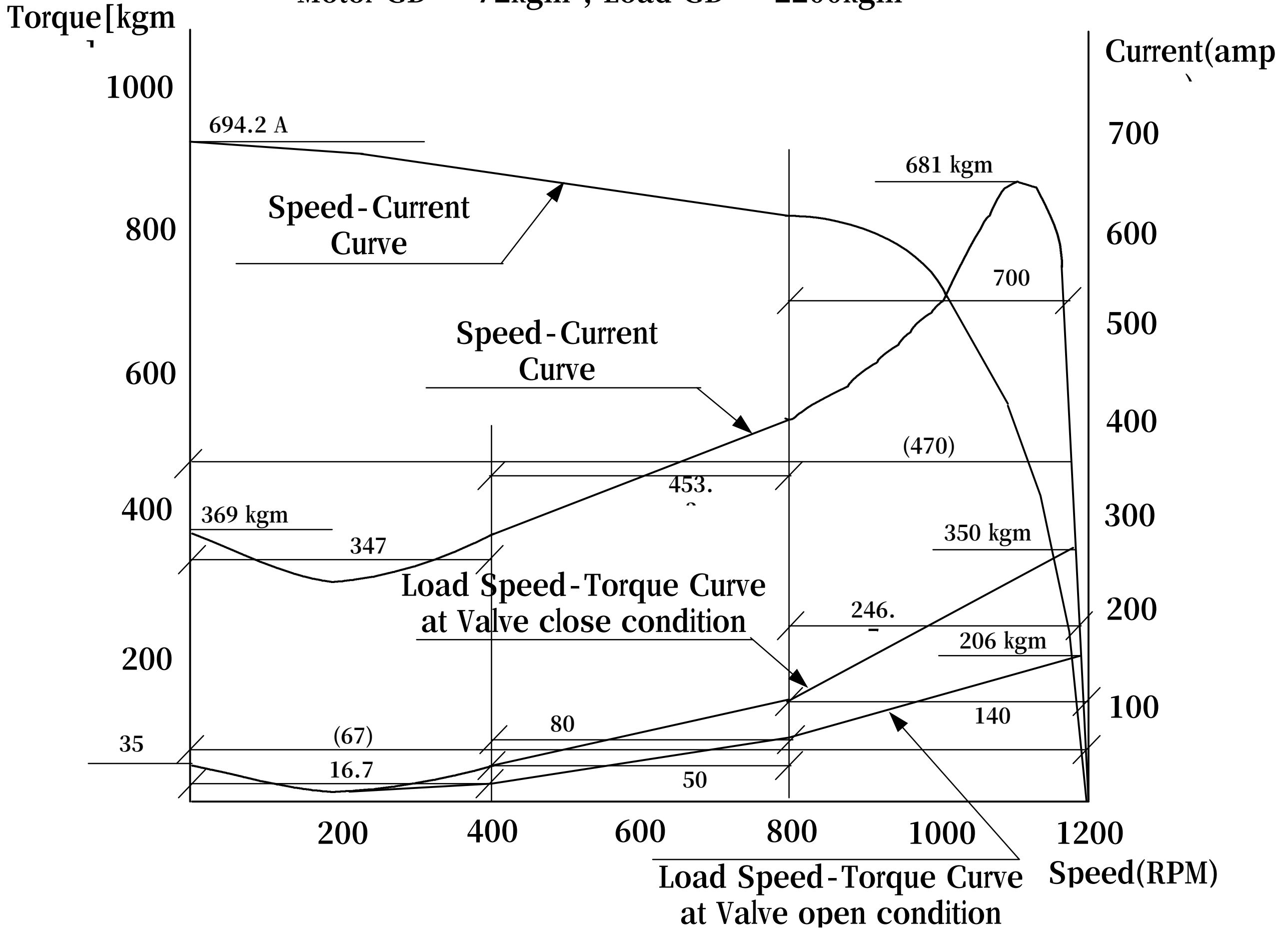
*

*

⑥ $(\frac{I_a / I_n}{1})^2 \times A(orB)$

<Exercise>

Motor GD^2 = 72kgm^2, Load GD^2 = 2200kgm^2



1. 기동시간(Starting time calculation)

$$t_a = \frac{\Sigma GD^2 \times N}{375 \times \overline{T_a}[kgm]} = \frac{\Sigma J \times N}{9.55 \times \overline{T_a}[Nm]}[\text{sec}]$$

1) Pump valve close condition에서의 기동시간

$$t_{a1} = \frac{(72+2200)}{375} \times \left(\frac{400}{347-16.7} + \frac{400}{453.3-80} + \frac{400}{700-246.7}\right) = 19.17(\text{sec})$$

2) Pump valve open condition에서의 기동시간

$$t_{a2} = \frac{(72+2200)}{375} \times \left(\frac{400}{347-16.7} + \frac{400}{453.3-50} + \frac{400}{700-140}\right) = 17.68(\text{sec})$$

2. 기동시 온도 상승

1) Stator winding

$$\Delta V_{cu\,1s} = \frac{(0.87 \times I_a)^2 \times 3 \times R_{1w}}{C \times G_{cu\,1} \times (1.0 \sim 1.5)} \times t_a [°C]$$

$$\Delta V_{cu1s} = \frac{(0.87 \times 694.2)^2 \times 3 \times 0.1921}{388 \times 203.2 \times 1.2} \times 18 = 39.99[°C]$$

2) Rotor Bar

$$\Delta V_{cu2s} = \frac{\Sigma GD^2 \times N_s^{\ 2}}{730} \times \frac{\overline{T_M}}{\overline{T_M} - \overline{T_L}} \times \frac{1}{C \times G} \times F_A [°C]$$

$$\Delta V_{cu2s} = \frac{(72 + 2200) \times 1200^2}{730} \times \frac{470}{470 - 67} \times \frac{1}{388 \times (62 + 9.1)} \times 0.65 = 123.2(°C)$$

3. 기동 능력(Starting Capability)

1) Cold Condition에서의 연속 기동 가능 회수

$$\frac{350 - (ambient - temp)}{\Delta V_{cu2s}} = \frac{350 - 40}{123.2} = 2.52$$

2회 가능

2) Hot Condition에서의 연속 기동 가능 회수

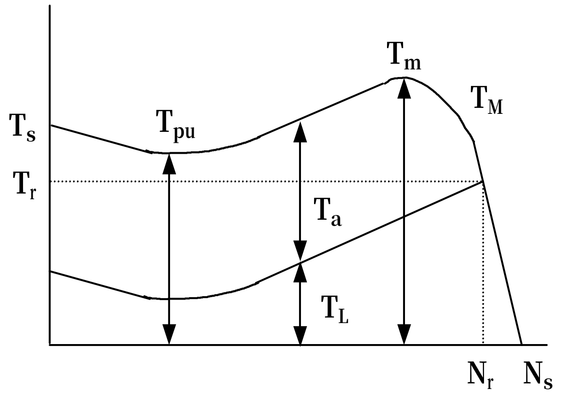
$$\frac{350 - (hot - state - temp)}{\Delta V_{cu2s}} = \frac{350 - 105}{123.2} = 1.98$$

1회 가능

Staring time & thermal limit of Induction motor

1. Starting torque of inductin motor

To accelerate the load(Fan, Pump, Blower..) to the rated speed, the torque of the motor should be much bigger than the torque of the load during acceleration. Especially, in case of accelerating the load with large GD^2 like the fan, the motor with high torque should be applied to accelerate the load and reduce starting time.



<u>Torque of motor >> Torque of load</u>

Ta : Acceleration torque($T_a = T_M - T_L$)
T_r : Rated torque of load
T_L : Torque of load at specific speed
T_M : Torque of motor at specific speed
T_s : Starting torque of motor
T_{pu} : Pull-up torque of motor
T_m : Maximum torque of motor

2. Starting time of induction motor

$$t_a = \frac{\Sigma GD^2 \times N}{375 \times \overline{T_a}[kgm]} = \frac{\Sigma J \times N}{9.55 \times \overline{T_a}[Nm]}[\sec]$$

<u>4J = GD²</u>

ΣGD^2 : Load GD^2 referred to motor shaft plus motor(rotor) GD^2 [kgm^2]
ΣJ : Moment of inertia of load referred to motor shaft plus moment of inertia of motor [kgm^2]
N : Rated speed after acceleration [rpm]
$\overline{T_a}$: Average acceleration torque [kgm or Nm]

3. Thermal Limit of induction motor

when we call " η " as temperature rise value of rotor per second at rocked rotor condition,

1) Time for which the motor can endure at hot condition

$$\frac{350 - (hot - state - temp)}{h} = A[\sec]$$

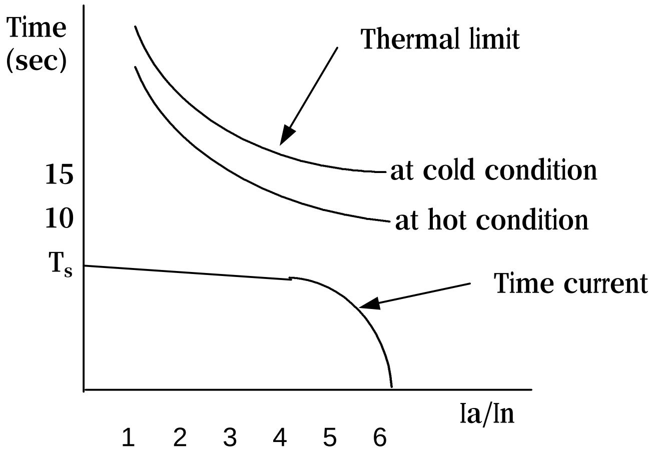
That is, the motor can endure rising temperature at hot condition when starting.

2) Time for which the motor can endure at cold condition

$$\frac{350-(ambient-temp)}{h} = B[\sec]$$

That is, the motor can endure rising temperature at cold condition when starting.

Let suppose that A and B are 10 and 15 seconds repectively at full voltage starting.



① $(\frac{I_a/I_n}{6})^2 \times A(orB)$

② $(\frac{I_a/I_n}{5})^2 \times A(orB)$

*

*

⑥ $(\frac{I_a/I_n}{1})^2 \times A(orB)$

I_a : Starting current of motor
I_n : Rated current of motor
T_s : Starting time

The thermal limit curve should always be above the time current curve. Unless otherwise, the rising heat will give the motor bad effect.
Staring current at Star-Delta starting is one third of it at full voltage starting.

I_s(star-delta starting) = 1/3 x I_s(full voltage starting)

Thermal limit, that is the rocked time which the motor can endure, is reversely propostional to the square of starting current. Namely, when applying star-delta starting, the motor has 9 times of rocked time at full voltage starting. In other words, the motor can endure for 90 seconds at hot condition and 135 seconds at cold condition in case of applying star-delta starting.

Thermal limit(star-delta starting) = 9 x Thermal limit(full voltage starting)

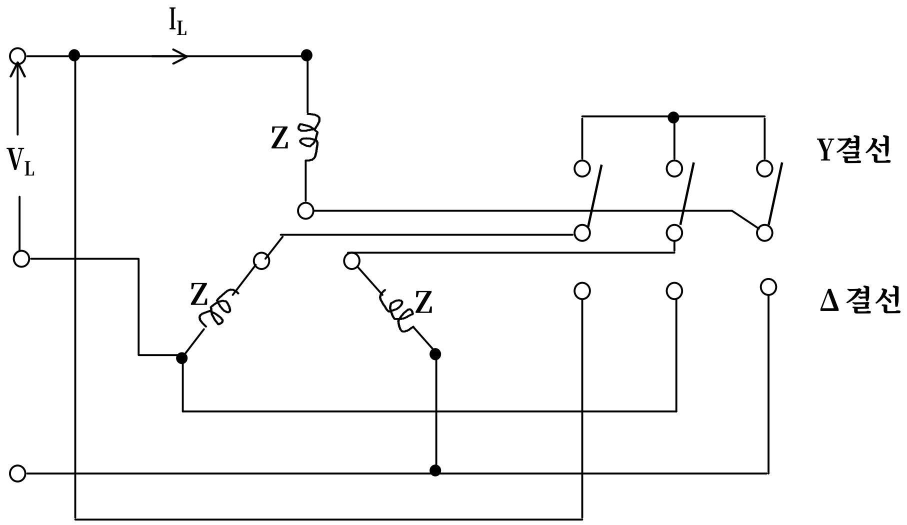
Although thermal limit curve is above time current curve, frequent starting will effect the motor badly. HHI recommend that starting frequency is within 5 times daily.

<Starting time of 90kW 4P F.D. Fan>
Under the condition of closed at 15℃ and star-delta starting, the starting time is about 45 seconds.

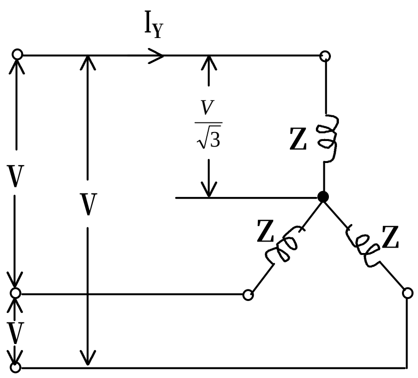
유도전동기 감전압 기동법

1. Y-Δ (Star-Delta) 기동법

<회로도>



<Y 결선 기동시>



기동전류

$$I_Y = \frac{V}{\sqrt{3}} \bullet \frac{1}{Z} = \frac{V}{\sqrt{3}Z}$$

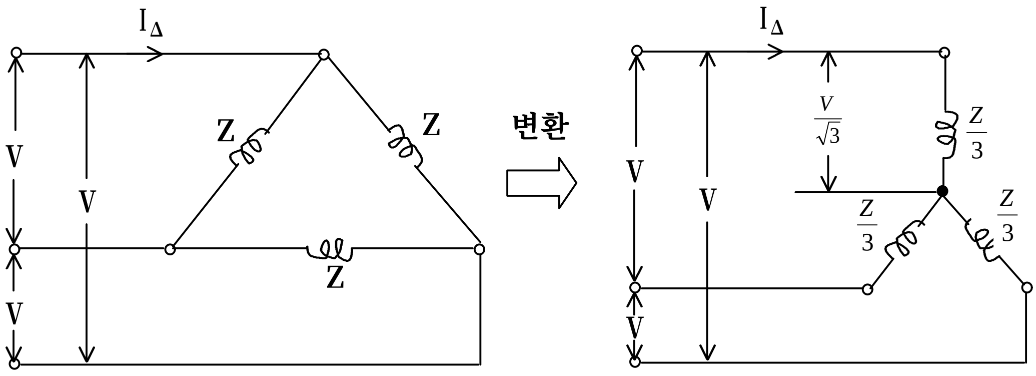
상전압

$$V_Y = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

기동토오크(상전압의 2승에 비례)

$$T_Y = K(\frac{V}{\sqrt{3}})^2 = K\frac{V^2}{3}$$

<Δ결선 기동시>



선전류를 구하기 위해 임피던스를 Δ-->Y로 변환하면

기동전류

$$I_\Delta = \frac{V}{\sqrt{3}} \bullet \frac{3}{Z} = \frac{\sqrt{3}V}{Z}$$

상전압

$$V_\Delta = V$$

기동토오크(상전압의 2승에 비례)

$$T_\Delta = KV^2$$

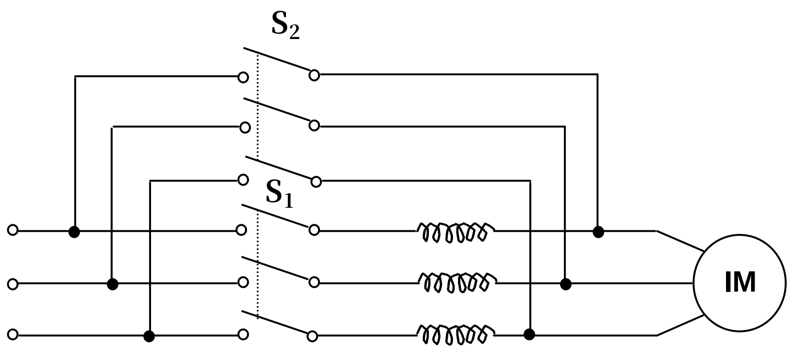
위의 Y결선과 Δ결선시의 상전압,기동전류 및 기동토오크를 비교하면,

$$\boxed{\frac{V_Y}{V_\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}} \qquad \boxed{\frac{I_Y}{I_\Delta} = \frac{1}{3}} \qquad \boxed{\frac{T_Y}{T_\Delta} = \frac{1}{3}}$$

즉, Y-Δ 기동시 전전압 기동에 비해 상전압은 $1/\sqrt{3}$ **로 감소하고, 기동전류 및 기동토오크는 1/3로 감소한다.**

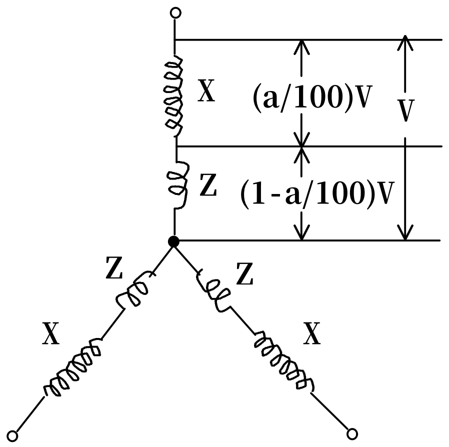
2. 리액터(Reactor) 기동법

<회로도>



전동기 단자 사이에 리액터를 삽입해서 기동하고, 기동 완료후 리액터를 단락한다.
기동시 S1 스위치를 닫으면 직렬로 접속된 리액터의 전압 강하에 의해 전동기에 가해지는 전압이 내려가고 전류가 제한된다.

예를 들어, 전동기에 80%만 전압이 가해지도록 리액터 탭을 조정하면(a=20%),



X : **리액터의 리액턴스**
Z : **전동기 각 상의 임피던스**

전동기 각 상에 가해지는 전압 $(1-\frac{a}{100})V = 0.8V$

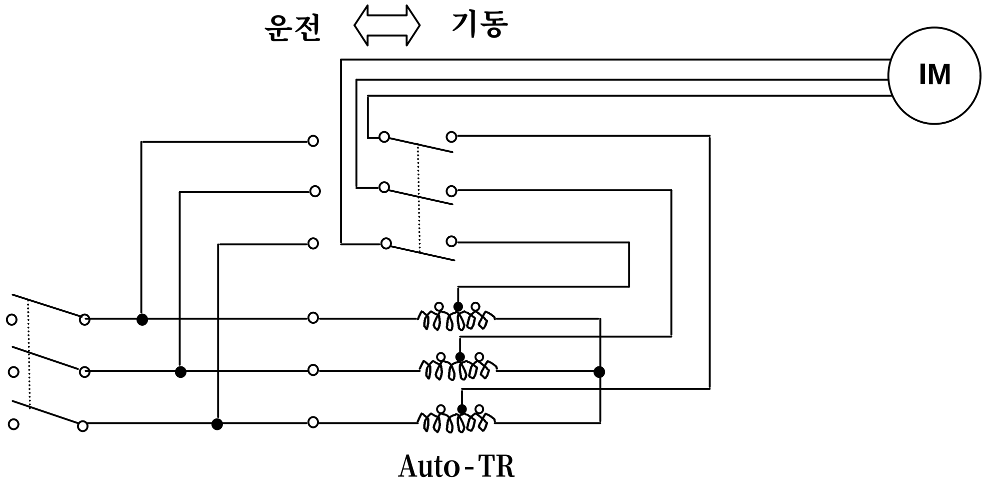
기동전류 $(1-\frac{a}{100})V \div Z = (1-\frac{a}{100})I = 0.8I_S$

기동토오크는 상전압의 2승에 비례하므로 $K(1-\frac{a}{100})^2V^2 = (1-\frac{a}{100})^2T_s = 0.64T_S$

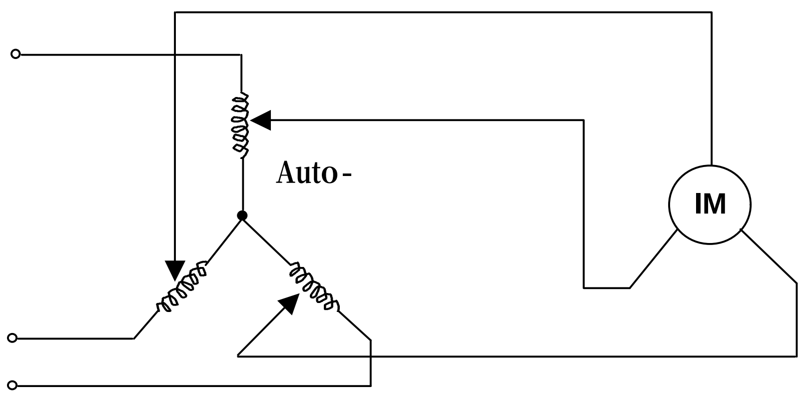
즉, 탭을 a%로 하여 리액터 기동을 하였을 경우, 전전압 기동에 비해 전압은 배로, 기동전류는 $(1-\frac{a}{100})$ **배로, 기동토오크는** $(1-\frac{a}{100})^2$ **로 낮아진다.**

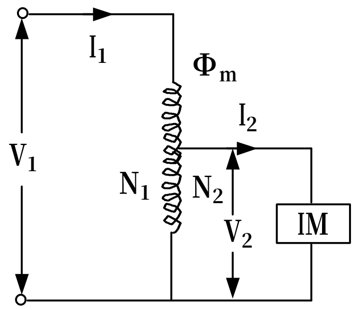
3. 기동보상기에 의한 기동법(Auto-TR 기동법,콘돌파기동)

<회로도>



상기 회로도를 간략히 그리면 아래의 회로도와 같다.





변압기 공식

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = a$$

전전압 기동기 전동기 단자전압, 기동전류, 기동토크를 각각 V_1, I_S, T_S라 하면,

Auto-TR 탭 a%를 적용하여 기동시, 전동기 단자전압 V_2는 $V_2 = aV_1$

따라서 Auto-TR 기동시 기동토크(T_{TR})는 $T_{TR} = a^2T_S$

이 때의 전동기에 흐르는 전류 I_2는 $I_2 = aI_S$

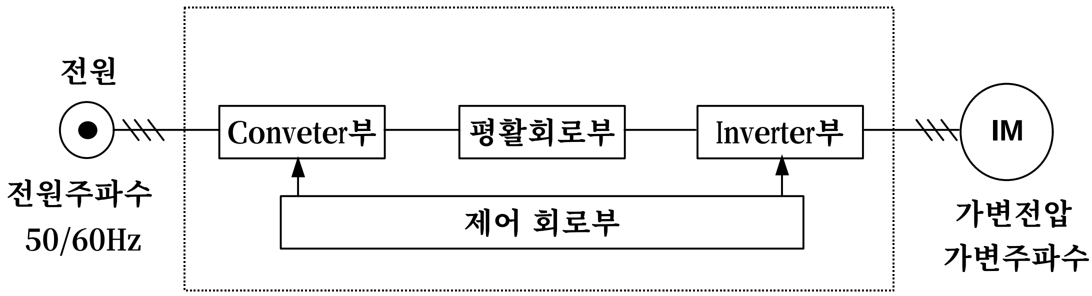
따라서 Auto-TR로 기동시 흐르는 기동전류 I_1은 $I_1 = aI_2 = a \times aI_S = a^2I_S$

Auto-TR로 기동시 기동토크는 전동기 단자전압의 2승에 비례하므로 전전압 기동시 토크의 a^2배로 감소하고, 기동전류또한 전전압 기동시 기동전류보다 a^2배로 감소한다.

4. 인버터 기동법

인버터(Inverter)에 의해 상용 교류 전원을 직류전원으로 변환시킨 후, 다시 임의의 주파수와 전압의 교류로 변환시켜 유도전동기를 기동하고 속도를 제어하는 방식이다.

<회로도>



* VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) : 가변전압 가변주파수

토오크 식에서

$$T = \frac{PV^2}{4p \times f} \times \frac{\frac{r_2}{s}}{(1+\frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad [N.m]$$

기동시 s=1이므로, 기동토오크 Ts는 $T_s = \frac{PV^2}{4p \times f} \times \frac{r_2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}$

f와 V을 제외한 나머지 변수들은 주어진 값이므로, 전동기 입력 전압(V)과 주파수(f)를 조정하여 기동토오크를 크게할 수 있다.

기동전류식에서 $I_s \cong I_1' = \frac{V}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}$

기동전류는 입력전압(V)에 비례하므로 입력전압을 감소시킴으로써 기동전류을 제한할 수 있다.

5. 농형 유도전동기 기동방법 비교

기 동 방 법		단자 전압	기동 토오크	기동 전류
전전압 기동(직입기동)		V	T_s	I_s
Y-Δ 기동		$V \times \frac{1}{\sqrt{3}}$	$T_s \times \frac{1}{3}$	$I_s \times \frac{1}{3}$
리액터기동	a=a%탭	$V \times (1 - \frac{a}{100})$	$T_s = (1 - \frac{a}{100})^2$	$I_s \times (1 - \frac{a}{100})$
	a=35%탭	$V \times 0.65$	$T_s \times 0.42$	$I_s \times 0.65$
	a=50%탭	$V \times 0.50$	$T_s \times 0.25$	$I_s \times 0.50$
기동보상기법 (Auto-TR)	a=a%탭	$V \times a$	$T_s \times a^2$	$I_s \times a^2$
	a=80%탭	$V \times 0.80$	$T_s \times 0.64$	$I_s \times 0.64$
	a=65%탭	$V \times 0.65$	$T_s \times 0.42$	$I_s \times 0.42$
	a=50%탭	$V \times 0.50$	$T_s \times 0.25$	$I_s \times 0.25$

■중형 전동기 기동검토 및 기동시간 계산 SHEET

전동기 GD^2	1.86	$kg.m^2$	기동토오크(T_s)	150	%
부하 GD^2	52	$kg.m^2$	최대토오크(T_m)	220	%
ΔN=(Ns/5)	720	RPM	정격토오크(T_r)	24.59	kgf.m
ΔN'=(Nr-ΔN*4)	685	RPM	전동기 출력	90	KW
Nr	3565	RPM	극수	2	P
			주파수	60	Hz

	Tap	기동시(N=0)	N=0.4Ns	N=0.6Ns	N=0.8Ns	최대T 발생시	기동시간(sec)	기동가능여부
부하토크 [kgf.m]		1.50	1.80	4.32	7.80	12.00		
정격토크 대비 부하토크[%]		6%	7%	18%	32%	49%		
전전압 기동시 토크[%]		150.00	120	120	135	220.00		
전전압 기동시 토크[kgf.m]		36.88	29.51	29.51	33.20	54.10	17.17	기동가능
Y-Δ 기동시 토크[kgf.m]		12.29	9.84	9.84	11.07	54.10	75.21	기동가능
Y-Δ 기동시 토크[%]		50%	40%	40%	45%	220%		
80% Tap기동시 토크[kgf.m]	80	23.61	18.88	18.88	21.24	34.62	29.87	기동가능
80% Tap기동시 토크[%]		96%	77%	77%	86%	141%		
65% Tap기동시 토크[kgf.m]	65	15.58	12.47	12.47	14.02	22.86	55.41	기동가능
65% Tap기동시 토크[%]		63%	51%	51%	57%	93%		
50% Tap기동시 토크[kgf.m]	50	9.22	7.38	7.38	8.30	13.52	-437.49	기동불가
50% Tap기동시 토크[%]		38%	30%	30%	34%	55%		

<NOTE>

1. 전전압 기동시 기동시간이 15초 이상 걸릴 경우 정밀한 기동 검토가 이루어져야 하오니 전기설계 담당자에게 확인바랍니다.
2. 감전압 기동(Y-△,AUTO-TR,리액터 등)시 기동시간이 30초 이상 걸릴 경우 전기설계 담당자에게 문의바랍니다.
3. [ ] : 기동검토 입력값, [ ] : 기동검토 출력값