

相變位에 의한 同期電動機의 過渡安定度 개선

Improvement of Synchronous Motor Transient Stability by Phase Slipping

논문
21~2~3

한 송 엽*
(Song Yop Hahn)

Abstract

The transient stability of the synchronous motor is generally improved by damper winding or flywheel. However the synchronous motor at full load will be pulled out from normal operation state when the period of power failure exceeds approximately ten cycle per second.

This paper studies the method of improving the stability of synchronous motor by equipping the phase slipping switch between the motor and power source.

This paper shows the motor does not pull out, which results from the decrease of power angle to about 30 electrical degrees by means of the switch even when the relatively long period of power failure brings the power angle to some 150 electrical degrees.

1. 서 론

同期電動機는 力率과 效率이 높고 일정속도로 운전될 수 있는 좋은 점이 있어 오늘날 비료공장의 압축기나 세멘트공장의 분쇄기 등 대 출력 원동기로서 많이 사용되고 있다. 그러나 起動토크가 적고 起動장치가 복잡하며 난조현상이 생기는 등 다른 電動機에 비하여 단점도 많이 가지고 있다.

특히 負荷의 변화가 심하거나 전력계통에서 수 싸이를 정도의 정전이 일어나는 경우 전동기가 계통에서 동기 탈조되는 현상은 同期電動機의 치명적인 결점이다. 특히 오늘날 대형 공장의 생산계통은 전부 일관된 연속 작업 형태로 되어 있어 생산계통의 어떤 한 부분에서라도 그 기능이 마비되면 생산계통의 전체 기능이 정지되게 된다.

그러므로 同期電動機를 原動機로 사용하는 경우 電動機의 安定度 문제는 매우 중요한 문제가 되고 있다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 磁極의 표면에 制動捲線을 설치하거나 回轉子에 후라이 휠을 달아 回轉子の 관성모멘트를 증가 시키는 방법이 강구되고 있다.

본 논문에서는 위에서 열거한 방법을 사용하여도 同期電動機가 탈조되는 경우에 同期機의 탈조를 방지하는

새로운 방법에 대하여 취급하였다.

2. 계통의 구성

그림 1은 3相同期電動機와 負荷의 모의계통도이다. 同期電動機의 電源側에는 相變位스위치가 설치되어 있고 同期電動機의 勵磁은 起動時에 계통의 電源을 整流하여 사용하고 정상 운전시에는 同期電動機와 같은 軸에 연결되어 있는 直流勵磁機에 의하여 공급된다. 이렇게 하므로서 계통의 순간적인 정전시에 同期電動機의 過渡安定度を 높일 수 있다.

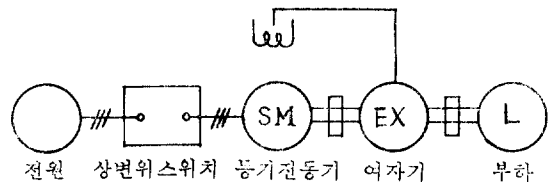


그림 1. 모의 同期電動機 및 負荷系統
Fig. 1. Synchronous motor and load.

여기서 相變位 스위치는 同期電動機의 過渡安定도를 개선하기 위하여 설치한 것으로 그림 2는 이것의 詳細圖이다.

* 정회원 : 서울대학교 공과대학 공업교육학과 전임강사

스위치가 ①의 위치에 있을때는 선 R와 선 A 선 S와 선 B 선 T와 선 C가 각각 연결되는데 여기서 스위치가 ②의 위치로 바뀌면 선 R와 선 C 선 S와 선 A 선 T와 선 B가 각각 연결되게 되어 있다.

이 스위치는 同期電動機에서 계통의 순간적인 정전등의 원인으로 回轉子가 감속되어 負荷角이 매우 커졌을 때 이것을 전기적으로 감소시키는 역할을 하게 된다. 현재 스위치가 ①의 위치에서 電源과 回轉子와의 負荷角이 δ (그림 3)일때 스위치가 ②의 위치로 바뀌면 負荷角이 $\delta-120^\circ$ (그림 4)가 된다. 즉 負荷角이 150° 정도 되었을때 相變換 스위치를 한번 동작시키면 負荷角이 30° 가 된다.

이렇게 하면 回轉子에 가속에너지를 많이 주게 되어 同期電動機의 탈조를 방지할 수 있다.

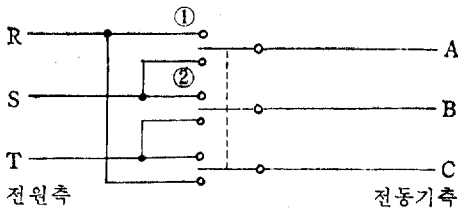


그림 2. 相變位 스위치
Fig. 2. Phase slipping switch

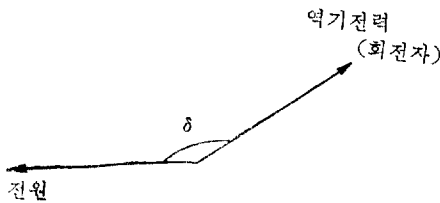


그림 3. 스위치의 위치 ①일때 位相關係
Fig. 3. Phase relation at switch position ①

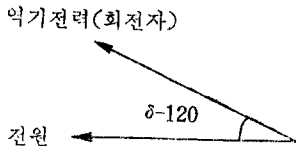


그림 4. 스위치의 위치 ②일때 位相關係
Fig. 4. Phase relation at switch position ②

3. 過渡安定度

그림 1과 같은 계통에 대하여 過渡安定도를 계산하여 보자.

安定度 계산을 간단히 하기 위하여 同期電動機의 電機子 및 勵磁回路에 대하여 아래와 같은 가정을 하였다

(1) 電機子 捲線은 공격을 따라 正弦波와 같은 모양

으로 분포되어 있다.

(2) 電機子 抵抗은 무시한다.

(3) 電機子의 transformer e. m. f.는 speed e. m. f.에 비하여 근소하므로 이를 무시한다.

(4) 電機子 및 界磁回路의 磁氣飽和는 무시한다.

(5) 過渡期間中 界磁電壓은 일정하게 유지된다.

(6) 過渡期間中 리액턴스의 변화는 무시한다.

(7) 制動捲線에 의한 制動力은 따로 운동방정식에서 고려한다.

이상과 같은 가정을 하면 同期電動機의 電壓 電流 관계식(부록 1 참고)은

$$v_d = -x_d i_q \quad (1)$$

$$v_q = x_d i_d + x_{af} i_f \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = \omega_0 (v_f - r_f i_f) \quad (3)$$

$$\psi_f = x_{af} i_d + x_{ff} i_f \quad (4)$$

와 같이 되고 電動機의 전기적 入力은

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (5)$$

와 같이 된다.

端子電壓과 負荷角 사이에는

$$v_d = -V \sin \delta \quad (6)$$

$$v_q = V \cos \delta \quad (7)$$

의 관계가 있다. 電動機의 回轉子에 대한 운동방정식(부록 2 참고)은

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt} \quad (8)$$

가 된다. 계통의 정수는 단위법으로

$$x_d = 1.2 \quad x_q = 0.8$$

$$x_{af} = 1.0 \quad v = 1.0$$

$$x_{ff} = 1.1 \quad r_f = 0.001$$

$$D = 0.035 \quad \omega_0 = 314.16 \text{ (rad/sec)}$$

를 취하고 미분방정식의 해는 fourth order classical runge-kutta method⁽¹⁾로 계산 하였다.

그림 5는 同期電動機가 초기 負荷角 40° , 界磁電流 $1.3[pu]$, 관성정수(M) 7.0, 부하 $0.9[pu]$ 로 운전 되던 중 전원에 3相 短絡이 생긴 경우의 負荷角 變化 곡선인데 A곡선은 단락 사고가 일어난후 $3[Hz]$ 에 계통이 개로 되고 이로부터 $7[Hz]$ 뒤에 재폐로된 경우의 전동기 부하각 변화이고, B곡선은 단락 사고가 일어난후 $3[Hz]$ 에 계통이 개로 되고 이로부터 $12[Hz]$ 뒤에 재폐로된 경우의 전동기 부하각 변화 곡선이다.

A의 경우는 相變位 스위치가 동작하지 않고서 계통이 안정하게 되었으나 B의 경우는 相變位 스위치가 한번 동작하여 계통이 안정하게 되었다.

즉 B의 경우는 계통의 단락 사고가 생긴후 약 0.34초 후에 부하각이 150° 가 되어 이때 相變位 스위치가

동작하였는데 이 스위치의 동작기간은 1 [Hz]로 하였고 이 기간 동안의 부하각 변화는 약 10°였다. 그리하여 이 스위치의 동작이 끝났을때 부하각은 약 40°가 되어 전동기는 안정한 상태로 돌입하였다.

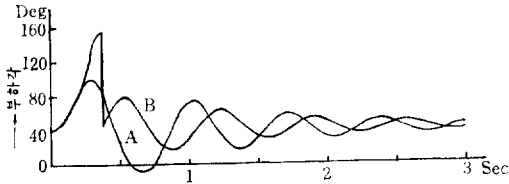


그림 5. 전동기의 부하각 변화
 $P_m=0.90, D=0.035, M=7.0$
 Fig. 5. Transient load angle of motor.

그림 6은 그림 5에서와 같은 조건일때 回轉子의 각속도 변화를 나타낸 그림이다. 즉 곡선 A는 계통의 고장이 일어난후 10[Hz] 뒤에 계통이 정상화된 경우인데 이때 각속도는 同期速度에 비하여 약 2.2[%] 정도까지 감소하고, 곡선 B는 계통의 고장이 일어난지 15[Hz] 후에 계통이 정상화된 경우인데 이때 각속도는 同期速度에 비하여 약 3.2[%] 정도까지 감소되었다.

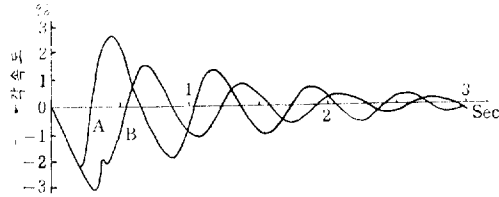


그림 6. 전동기의 각속도 변화
 $P_m=0.90, D=0.035, M=7.0$
 Fig. 6. Transient angular velocity of motor.

그림 7과 그림 8도 그림 5와 같은 조건일때 각각 電動機의 전기적 입력과 電動機의 전류를 나타낸 그림이다.

여기서도 곡선 A는 고장이 복구될때까지의 기간이 10[Hz] 일때의 경우이고, 곡선 B는 고장이 복구될때까지의 기간이 15[Hz] 일때의 경우이다.

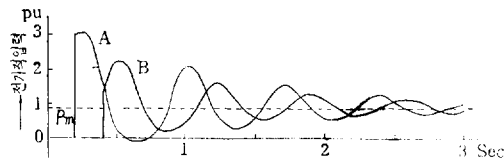


그림 7. 전동기의 전기적 입력 변화
 $P_m=0.90, D=0.035, M=7.0$
 Fig. 7. Transient electric power input of motor.

그림 9는 부하가 0.82[pu] 즉 초기 부하각 35°, 界磁電流 1.3[pu], 권성정수 [M] 10, 계동계수 0.035일때 전원에 3상 단락 사고가 생긴 경우의 負荷角 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 곡선 A는 전원이 단락된지 3 [Hz] 후에 전원이 개로 되고 이로부터 12[Hz] 뒤에 전원이 재폐로 된 경우이고, 곡선 B는 전원이 단락된지 3 [Hz] 후에 전원이 개로 되고 이로부터 17[Hz] 뒤에 전원이 재폐로 된 경우이다.

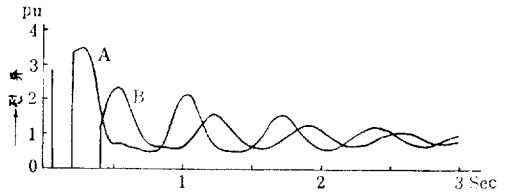


그림 8. 전동기의 전류 변화
 $P_m=0.90, D=0.035, M=7.0$
 Fig. 8. Transient current of motor.

그림 5와 비교하여 볼때 그림 9의 경우는 부하가 적고 권성정수가 커서 곡선 A에서 볼 수 있는 바와 같이 전원의 회복 시간이 5[Hz] 정도 늦어도 電動機가 탈조되지 않았다.

그러나 그림 9의 곡선 B와같이 전원의 사고가 생긴 후 다시 회복될때까지의 기간이 20[Hz]에 달하면 負荷角이 150° 이상으로 증가하기 때문에 여기서 相變位 스위치가 동작하여 電動機가 탈조되지 않았다.

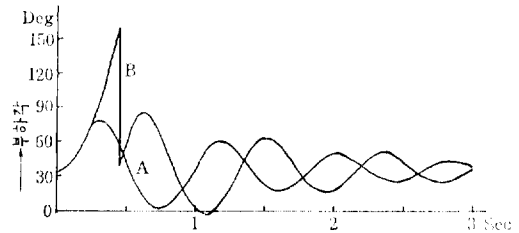


그림 9. 전동기의 부하각 변화
 $P_m=0.82, D=0.035, M=10$
 Fig. 9. Transient load angle of motor.

그림 10은 그림 9에서와 같은 조건일때 전동기의 전류 변화를 나타낸 그림이다.

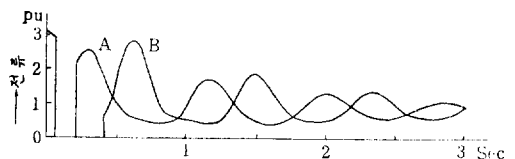


그림 10. 전동기의 전류 변화
 $P_m=0.82, D=0.035, M=10$
 Fig. 10. Transient current of motor.

4. 결 론

본 논문은 相變位 스위치를 도입하여 전원의 순간적인 정전시에 同期電動機가 安定度를 잃지 않게 하는 방법에 대하여 연구한 것이다.

그 결과를 종합하여 보면 전원의 고장기간에는 電動機에 전기적 입력이 인가되지 못하므로 고장기간이 비교적 긴 경우 回轉子는 많은 감속력을 받아 制動捲線이나 후라이 휠을 설치 하였어도 負荷角이 크게 증가하여 電動機는 安定度를 잃게 되는데 이 경우 負荷角이 150° 근방에 이르렀을때 相變位 스위치로 負荷角을 순간적으로 120° 만큼 감소시키므로서 電動機는 탈조되지 않고 안전한 운전을 할수 있었다.

즉 전원의 정전기간이 비교적 긴 경우 同期電動機의 탈조를 방지하는데 있어서 이 새로운 방법은 매우 효과가 크다고 생각된다.

앞으로 여러가지의 負荷와 電源의 고장조건에 대한 이 相變位 스위치의 효과에 대하여 연구가 있어야 할 것이며 또한 이 방법의 실험적 연구도 뒤따라야 할 것이다.

부록 1. 同期電動機의 전압 전류 관계식

制動捲線에 의한 차과도항을 무시하면 R. H. Park (2) (3) (4)의 방정식은

$$v_d = \frac{d\phi_d}{dt} - \omega\phi_q + r_d i_d \quad (9)$$

$$v_q = \frac{d\phi_q}{dt} + \omega\phi_d + r_q i_q \quad (10)$$

$$v_f = \frac{d\phi_f}{dt} + r_f i_f \quad (11)$$

이고 여기서

$$\begin{pmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 & L_{afd} \\ 0 & L_q & 0 \\ L_{afd} & 0 & L_{ffd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{pmatrix} \quad (12)$$

이다. (9) (10)에서 transformer voltage 와 저항강하는 speed voltage 에 비하여 무시되므로

$$v_d = -\omega\phi_q \quad (13)$$

$$v_q = \omega\phi_d \quad (14)$$

라고 쓸 수 있다.

식 (12)(13)(14)를 정리하면

$$v_d = -\frac{\omega}{\omega_0} x_q i_q$$

$$v_q = \frac{\omega}{\omega_0} (x_d i_d + x_{afd} i_f)$$

이다. 여기서 $\omega/\omega_0 \approx 1$ 이라고 놓으면

$$v_d = -x_q i_q \quad (17)$$

$$v_q = x_d i_d + x_{afd} i_f \quad (18)$$

이고 식 (12)(11)에서

$$\frac{d\psi_f}{dt} = \omega_0 (v_f - r_f i_f) \quad (19)$$

$$\psi_f = x_{afd} i_d + x_{ffd} i_f \quad (20)$$

이다.

부록 2. 회전자 운동 방정식

回轉體의 관성모멘트 각변위 加速토크 사이에는

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_a \quad (21)$$

의 관계가 있다. 양변에 각속도를 곱하면

$$I\omega \frac{d^2\theta}{dt^2} = \omega T_a \quad (22)$$

이고 식 (22)를 단위법으로 고치면

$$\frac{I\omega}{G} \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\omega T_a}{G} \quad (23)$$

이다.

$$H = \frac{1}{2} I \omega_0^2 / G \quad (24)$$

$$P_a = \omega T_a / G \quad (25)$$

라고 하면 식 (23)은

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{P_a}{\omega/\omega_0} \quad (26)$$

여기서 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 이다. 또

$$\theta = \omega_0 t - \delta \quad (27)$$

$$P_a = P_e - P_m - D(\omega - \omega_0) \quad (28)$$

라고 놓으면 식 (26)은

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt}}{1 - \frac{d\delta}{dt} / \omega_0} \quad (29)$$

이다. 여기서

$$\frac{d\delta}{dt} \ll \omega_0$$

$$M = 2H/\omega_0$$

라고 하면 식 (29)는

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt} \quad (30)$$

가 된다.

부록 3. 기 호

v_d, v_q : 直軸 및 橫軸 電機子 전압

v : 電機子 단자전압

i_d, i_q : 直軸 및 橫軸 電機子 전류

ϕ_d, ϕ_q : 直軸 및 橫軸 電機子 자속회교

x_d, x_q : 直軸 및 橫軸 電機子 리액턴스

x_{afd} : 電機子와 界磁 상호 리액턴스

v_f : 界磁 전압

i_f : 界磁 전류

ϕ_f : 界磁 磁速 회교

x_{ffd} : 界磁 自己 리액턴스

r_f : 界磁 저항

δ : 負荷角

I : 관성 모멘트

H : 관성 정수
 ω : 回轉子 角속도
 P_e : 전기적 입력
 P_m : 기계적 출력
 D : 制動계수

참 고 문 헌

- [1] K. Prabhashankar and W. Janischewsyj, "Digital Simulation of Multimachine Power Systems for Stability Studies," IEEE Trans. (PAS), Vol. PAS-87, No 1 pp. 73-79, January 1968.
- [2] T. J. Hammons and D. J. Winning, "Comparisons of Synchronous-Machine Models in the Study of the Transient Behavior of Electrical Power Systems", Proc. IEE, Vol. 118, No. 10 pp.1422-1458, October 1971.
- [3] S. A. Nasar, "Electromagnetic Energy Conversion Devices and Systems," Prentice-Hall, 1970(Book)
- [4] R.H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machine-pt. 1" AIEE Trans., Vol. 48, pp. 716-730, July 1929.