

동기전동기의 안정된 운전을 위한 퍼지 부하각 제어시스템에 관한 연구

A Study on the Fuzzy Load Angle Control System for the Stable Drive of Synchronous Motor

이관태¹, 지석준², 이준탁³

¹ 부산시 사하구 하단 2동 동아대학교 교육대학원

E-mail: ktleeic@donga.ac.kr

² 부산시 강서구 송정동 1610-5 한라레벨(주)

E-mail: seokjunji@yahoo.co.kr

³ 부산시 사하구 하단 2동 동아대학교 전기공학과 교수

E-mail: jtleee@dau.ac.kr

요 약

동기기가 전동기의 모드로 운전하고 있을 때, 동기속도로 안정된 운전을 하는 중 순간적으로 과부하가 인가되게 되면 이로 인해 동기 이탈 현상이 발생한다. 동기속도로 운전 중인 동기전동기가 동기이탈을 하게 되면 계통의 역률, 안정도 등에 치명적인 악영향을 미치게 되어 여러 가지 손실을 가져오게 된다. 동기전동기가 안정된 운전을 할 수 있도록 하기 위한 한 가지 요인인 부하각을 제어하게 되면 앞에서 말한 위험한 상황을 예방 할 수가 있다. 본 논문에서는 동기전동기의 부하각을 마이크로프로세서에 의해 퍼지 부하각 제어 기법을 적용하여 동기전동기의 안정된 운전을 행하고자 하였다.

Key Words : Synchronous Motor, Fuzzy Control, Load Angle Control

1. 서 론

동기기는 정상운전 시 일정 주파수 전원에서 동기속도로 회전하는 교류기로서 계자를 직류 여자하여 유기기전력, 출력전압, 역률 및 전기자 전류의 크기를 조정하도록 되어 있다.[1] 그리하여 일반적으로 동기 발전기로서 이용되어 왔다. 한편, 동기기가 동기전동기로 이용될 때에도 동작원리상 난조나 불안정 현상 그리고 부하에 따른 역률의 저하문제 등을 극복하기 위해 여자특성 조정은 필수적이다. 동기전동기가 정상상태로 운전 중 부하각이 약 90°가 넘는 정도의 부하가 인가하게 되면 부하토크가 동기전동기의 탈출토크이상으로 되어 동기속도에서 이탈 하여 난조 현상이 발생한다. 난조가 발생하면 계통의 안정도에 치명적인 악영향을 미칠 수가 있다.[2] 그러므로 이러한 현상을 방지하기 위해 동기전동기에서도 동일한 이차 제어 시스템으로 동기전동기의 입력전류, 역률,

안정도를 조정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 동기기를 전동기로 사용할 때 안정된 운전특성을 요구하기 위해 FLC(Fuzzy Logic Controller)를 이용한 퍼지 부하각 제어 시스템을 설계하여 실험하였는데, 그 과정은 첫 번째로 동기전동기의 입력전류인 전기자 전류의 위상을 검출하고, 동기전동기와 기계적 커플링으로 연결된 동기발전기의 발전 전압 위상을 검출하여, 두 위상의 위상차를 검출하게 된다. 이 위상차가 곧 동기전동기의 부하각이 된다. 두 번째로 검출된 부하각을 보상회로에 입력하여 제어된 PWM 펄스의 듀티비를 제어하여 초퍼회로에 인가하여 동기전동기의 여자전류를 제어하게 된다. 본 논문에서 적용된 퍼지 부하각 제어기는 마이크로 프로세서형 PLC(Programmable Logic Controller)를 이용하여 퍼지 알고리즘을 구현하여 실험하였다. 부하의 변화에 따른 동기전동기의 부하각을 실시간으로 감시하고, 부하각이 변하지 않도록 퍼지 알고리

즘을 이용한 정밀한 제어를 행하여 동기전동기가 어떠한 부하의 변화에도 항상 안정된 운전을 행하도록 하여 안정도 개선은 물론 수전설비의 용량 감소에도 기여하게 하였다. 이처럼 각종 부하에 대한 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 퍼지 부하각 제어 시스템의 우수성을 입증하고자 하였다.

2. 동기전동기의 동특성 모델링

동기전동기의 토크 운동 특성방정식은

$$\frac{4\pi J}{360P} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + T_{im} \cdot (1 - b \cdot \cos 2\delta) \cdot \frac{d\delta}{dt} + T_{sm} \cdot \sin\delta \cdot F(t, \theta_f) + T_r \cdot \sin 2\delta = T_l \quad (2)$$

와 같이 표현된다.[1] 여기서, δ 는 고정자 단자전압과 직류여자에 의해 동일 상에서 유기되는 전압과의 위상차이다. 식 (2)의 첫 항의 계수 $\frac{4\pi J}{360P}$ 는 회전자와 이에 접속된 부하 회전체의 가속에 기인한 토크 성분으로서, 관성에 비례하고 극수에 반비례한다. 식(2)의 제 2항은 슬립이 $\frac{d\delta}{dt}$ 에 비례하므로, 평행 다상 회전자구조에 대한 통상의 유도전동기 토크 항으로서, 회전자가 돌극일 경우 $(1 - b \cdot \cos 2\delta)$ 를 포함한다. b 는 제동권선의 비대칭 및 돌극에 의한 맥동계수로서 동기인입에 앞선 슬립 맥동의 크기를 증가시키는데 기여하며,

$$b = \frac{\frac{X_q' \cdot T_{d0}''}{X_{d0}' \cdot T_{q0}''} - \frac{X_q' - X_q''}{X_{d'} - X_d''}}{\frac{X_q' \cdot T_{d0}''}{X_{d0}' \cdot T_{q0}''} + \frac{X_q' - X_q''}{X_{d'} - X_d''}} \quad (3)$$

단, T_{d0}'' : 직축 전기자 권선의 단락회로

시정수

T_{q0}'' : 횡축 전기자 권선의 단락회로

시정수

$X_{d'}$: 직축 과도리액턴스

$X_{d''}$: 직축 초기과도리액턴스

로 정의된다. 식 (2)의 제 3항 및 제 4항은 여자투입 후의 동기전동기의 동기화 토크를 나타내고 있다.

$$T_s = \frac{N}{w_s} \cdot \frac{V \cdot E \cdot \sin\delta \cdot F(t, \theta_f)}{X_d} + \frac{V \cdot (X_d - X_q \cdot \sin 2\delta)}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \quad (4)$$

다시 간단히 쓰면,

$$T_s = T_{sm} \cdot \sin\delta \cdot F(t, \theta_f) + T_r \cdot \sin 2\delta \quad (5)$$

로 된다. 여기서,

$$T_{sm} = \frac{N}{w_s} \cdot \frac{V \cdot E}{X_d} \quad (6)$$

및

$$T_r = \frac{N \cdot V \cdot (X_d - X_q)}{2 \cdot w_s \cdot X_d \cdot X_q} \quad (7)$$

이다. 여기서, X_d 및 X_q 는 동기기의 직, 횡축 리액턴스이다. 그런데 식 (5)에서 동기화에 대한 여자 시정수항의 영향은 $F(t, \theta_f)$ 로 식 (8)과 같이 표현 된다. [3]

$$F(t, \theta_f) = 1 - \exp(-t/T_d) \cdot \sin\theta_f \quad (8)$$

식 (2)를 간단히 하기 위해 독립변수를

$$t = \tau \cdot \sqrt{\frac{4J\pi}{360P} \cdot T_{sm}} = \alpha \cdot \tau \quad (9)$$

으로 변환하면,

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{\alpha \cdot d\tau} \quad (10)$$

및

$$\frac{d^2}{dt^2} = \frac{d^2}{(\alpha \cdot d\tau)^2} \quad (11)$$

로 되므로, 식 (12) 및 식 (13)을 얻을 수 있

다.

$$T_{sm} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + T_{im} \cdot (1 - b \cdot \cos 2\delta) \cdot \frac{d\delta}{dt} + T_{sm} \cdot \sin\delta \cdot F(\tau, \theta_f') + T_r \cdot \sin 2\delta = T_l$$

(12)

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + D \cdot (1 - b \cdot \cos 2\delta) \cdot \frac{d\delta}{dt} + s\delta \cdot F(\tau, \theta_f') + \frac{T_r}{T_{sm}} \cdot \sin 2\delta = \frac{T_l}{T_{sm}}$$

(13)

또한, $g = \frac{T_r}{T_{sm}}$ 및 부하비를 $\beta = \frac{T_l}{T_{sm}}$ 로

정의하면,

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + D \cdot (1 - b \cdot \cos 2\delta) \cdot \frac{d\delta}{dt} + \sin\delta \cdot F(\tau, \theta_f) + g \cdot \sin 2\delta = \beta$$

(14)

로 된다. 단 $D = \frac{T_{im}}{\alpha}$ 이다. 원통형인 경우,

$X_d = X_q$ 이므로, $g = 0$, $b = 0$ 이 된다.

3. 퍼지 부하각 제어기 설계

3.1 제어 기법

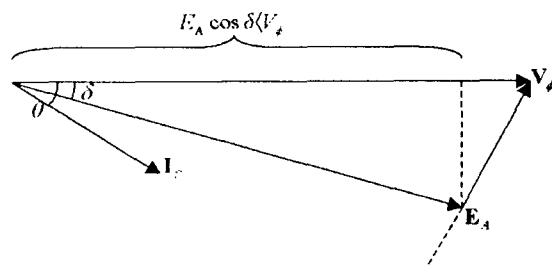


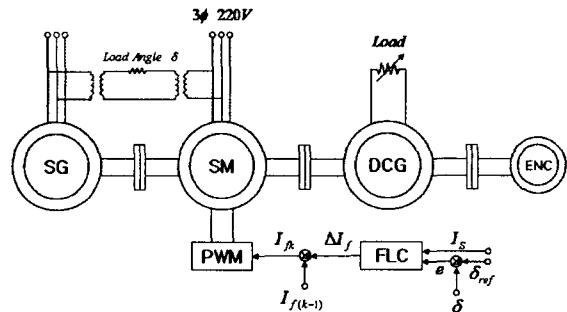
그림 1. 과 여자시 페이저도

본 실험에서 제어 되어야 할 대상은 동기전 동기의 부하 변화에 따라 변화하는 부하각 δ 이다. 동기전동기가 정상상태로 운전중 어떠한 부하가 인가되어 증가하다 보면 I_f 의 위상과 E_A 위상 간의 각이 벌어지게 된다. 이때 벌어 지는 각을 부하각 이라 하는데, 이 부하각은 부하의 크기에 따라 변화한다. 이 부하각이 약 90°를 넘어서게 되면 동기전동기의 부하토크가 단출토크 이상에 되어 동기이탈 현상이 발생한다.

다. 이러한 현상을 방지하기 위해 두 위상의 차, 즉 부하각을 검출하여 여자전류의 양을 조절 함으로써, 부하의 증가에 따른 부하각의 각도를 조절할 수 있다. 부하각의 검출은 동기전동기의 입력전원 중 한 상의 위상과, 동기전동기와 기계적으로 연결된 동기발전기의 출력전압 중 한상의 위상을 비교하여 두 위상간의 차이만 검출하게 된다. 이 검출된 값을 마이크로프로세서 형 PLC(Programmable Logic Controller)에 입력하여 퍼지제어 기법을 통해 최종적으로 직류초퍼 부분에 인가될 PWM펄스의 듀티비가 출력되게 된다.

3.2 퍼지 부하각 제어기

퍼지 부하각 제어기를 설계하기 위한 첫 단계는 입출력 제어기의 변수를 결정하고, 제어기의 입출력 변수의 값의 범위를 결정해야 한다. 두 번째는 각 입출력을 위해 멤버쉽 함수로 결정된 각 입출력 퍼지값을 사용하기 위하여 선택해야하고, 세 번째는 퍼지 제어 규칙 베이스를 구성해야 한다. 멤버쉽 함수와 퍼지 제어 규칙의 구성은 FLC를 구성하는데 있어 매우 중요하다. 보상기 시스템에 기반을 둔 퍼지 논리의 기본적인 블록 다이어그램의 구성은 그림 2와 같다.



SG : Synchronous Generator
 SM : Synchronous Motor
 DCG : DC Generator
 ENC : Incremental Encoder

그림 2. 퍼지 부하각 제어 시스템 블록

퍼지 제어기를 구성하는 입력변수는 부하각의 오차 e 와 전기자 전류 I_f 이다. 여자전류의 변화 ΔI_f 는 출력 변수로 정의 되고, 부하각 오차 e 는 기준 부하각 δ_{ref} 과 측정되어진 부하각 δ 의 차로써, 식 (15)와 같이 정의 된다.

$$e = \delta_{ref} - \delta$$

(15)

전기자 전류는 입력전원에 연결된 전류계에 의해 측정되고 퍼지제어기의 입력에 접속된다. 퍼지제어기의 출력은 여자전류의 편차 ΔI_f 를 결정하게 된다. 동기전동기의 여자 전류 I_{fk} 는 식 (16)에 주어진 여자전류의 이전 값 $I_{f(k-1)}$ 에서 여자전류의 변화량 ΔI_f 를 더함으로써 계산된다.

$$I_{fk} = I_{f(k-1)} + \Delta I_f \tag{16}$$

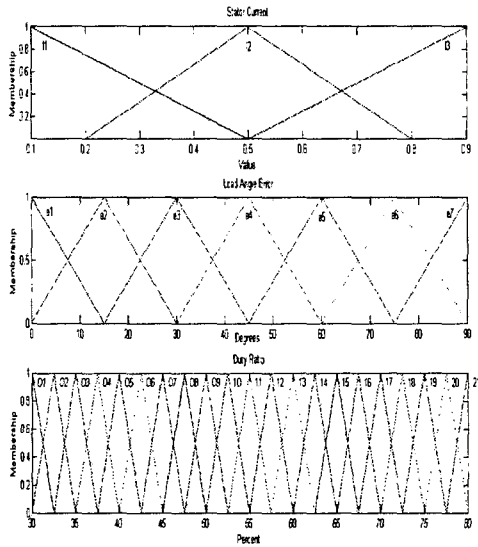


그림 3. 전기자 전류 I_s , 부하각 오차 δ , PWM펄스의 Duty ratio의 멤버십 함수

본 논문에서는 e 의 7개의 언어 레벨, I_s 를 위해 3개의 언어 레벨 및 ΔI_f [PWM]을 위해 21개의 언어 레벨이 선택되었다. 퍼지 입력 변수 e 와 I_s , 출력변수 ΔI_f 의 멤버십 함수는 대칭 삼각형 모양으로 설계되고 그림 3에 각각 보여진다.

본 연구에서, 퍼지 제어 규칙 테이블은 시스템의 수학적 모델링을 사용하는 것을 대신하여 경험적 수치에 의해 얻어진 PWM 펄스의 duty비, 전기자전류의 범위, 오차를 사용하여 만든다. 표 1에 주어진 퍼지 여자 제어기 설계에 사용된 21개의 제어규칙이 있는데, 이는 몇 번의 실험을 거쳐 얻어진 결과이다. 분리된 규칙은 테이블 안에 주어진 각각의 경우에 설계되고, 테이블에서 보다시피 전체 규칙의

수는 21이다. 얻어진 규칙은 아래에 주어진 형태와 같다.

표 1. 퍼지제어를 위한 룰 테이블.

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7
I_1	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7
I_2	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}	O_{14}
I_3	O_{15}	O_{16}	O_{17}	O_{18}	O_{19}	O_{20}	O_{21}

if ($I_s = I_1$) and ($e = e_1$) then $\Delta I_f = O_1$
 if ($I_s = I_2$) and ($e = e_3$) then $\Delta I_f = O_{10}$
 if ($I_s = I_3$) and ($e = e_4$) then $\Delta I_f = O_{18}$

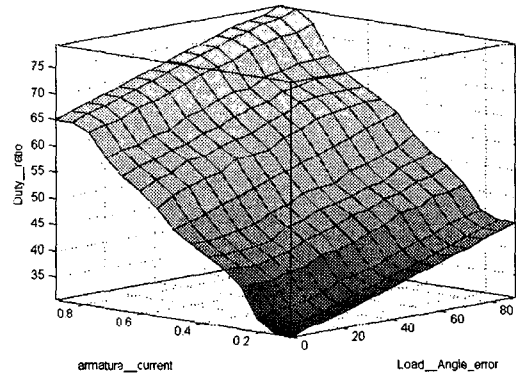


그림 4. 듀티비 제어를 위한 추론결과

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 시스템의 제원

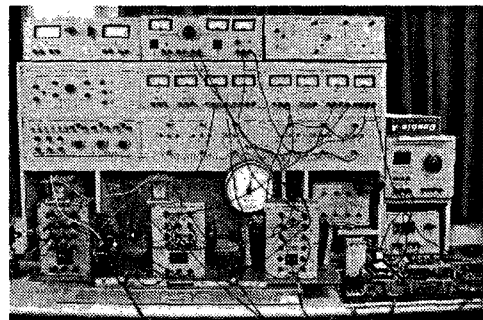


그림5. 실험을 위한 전동/발전기세트

본 실험은 (주)ED에서 생산된 M/G실험세트를 이용하여 진행하였다. 먼저 동기기를 전동기모드로 결선하여 그 왼쪽에는 커플링을 이용하여 또 다른 동기기를 발전기 모드로 결선하여 기계적으로 연결하였다. 오른쪽에는 동력계

를 타력식 발전기모드로 결선하여 그 부하로 가변저항기를 접속해 2단으로 조종하여 시스템의 부하로 사용하였다.

가로 인해 부하각이 약 35° 정도 벌어졌다가 퍼지제어로 인해 다시 0°에 수렴하여 안정된 운전은 함을 알 수 있었다.

표 2. 사용된 기기의 제원

Synchronous Motor (ED-SM-250-3)		Electro-Dynamometer (ED-DYN-250)	
Speed	1800 RPM	Speed	1800 RPM
Voltage	208V-3φ(Y)	Winding Type	ShuntSeries Compound
Alternator Power	120 VA	Motor Power	1/3 HP
Load Current	0.2 A	Armature Voltage	130 V DC
Motor Power	1/3 HP	Armature Current	2.4 A DC
Motor Current	1.7A	Generator Output	130 V, 2.3 A
Frequency	60 Hz	Shunt Field Exc.	0.5A(125 V)

4.2 시스템의 특성 측정

동기 전동기의 부하각을 검출하여 제어하기 위해 제어 대상인 PWM 펄스의 듀티비로 변화하는 여자전류 I_f , 전기자 전류 I_s , 부하각 δ 를 측정하였고, 또한 부하의 변화에 따른 파라미터들의 변화와 퍼지제어에 의한 제어결과를 도시하였다.

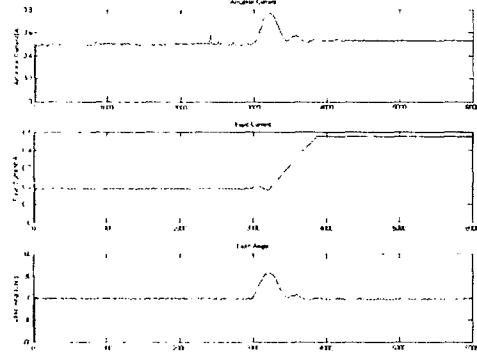


그림 6. 부하 인가 시 파라미터 변화

그림 6은 무부하로 운전중인 동기전동기에 약 300[Ω]의 부하를 인가하였을 때 여러 특성을 측정하여 도시하였다. 첫 번째 파형은 전기자 전류 I_s 의 변화를 나타내었는데, 약 0.5[A]로 운전 중 부하의 변화로 인해 0.8[A]가까이 상승하였으나, 퍼지 부하각 제어기에 의해 다시 감소함을 보였고, 두 번째 파형은 부하가 증가함에 따라 벌어지는 부하각을 제어하기 위해 여자전류 I_f 가 약 0.2[A]에서 0.48[A]로 증가함을 알 수 있었다. 세 번째 파형은 부하인

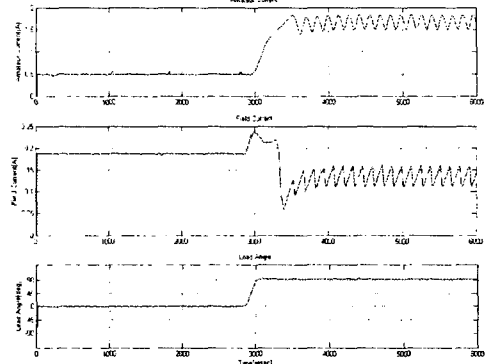


그림 7. 과 부하로 인한 동기이탈 현상

그림 7은 동기전동기가 안정된 상태로 운전 중 과부하 인가로 인해 부하각이 90° 이상이 되어 동기이탈이 된 상태를 도시하였다. 이로 인해 전기자 전류 I_s , 여자전류 I_f 가 계속하여 진동하여 불안정한 상태가 유지되었다.

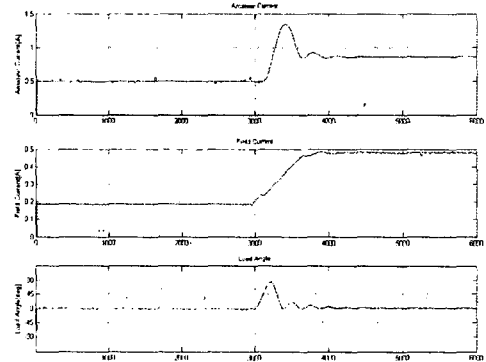


그림 8. 퍼지제어기에 의한 동기이탈현상 방지

그림 8은 그림 7의 조건에서 운전중 퍼지 부하각 제어기에 의해 동기이탈 현상을 방지하여 과부하의 인가에도 불구하고 부하각은 원래대로 복귀하여 동기전동기가 안정된 운전을 하고 있음을 알 수 있었다.

4.3. 결과 고찰

본 논문에서는 동기 전동기의 안정된 운전에 영향을 미칠 수 있는 부하각을 검출하여 퍼지 제어기에 의해 제어하도록 하였다. 실험결과에 나타난 것처럼 부하의 변화에도 물론, 과부하로 인한 동기이탈의 현상에서도 퍼지제어기에 의한 안정된 운전이 가능함을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이준탁, “Lyapunov 函數에 依한 交流電
動機의 安定度解析에 관한 研究”, 박사학위
논문, 중앙대학교, 1988
- [2] 송호신, “자기 조정 퍼지 제어기에 의한
유도전동기의 가변속 운전”, 박사학위논문,
동아대학교, 1993.
- [3] 강만원, “동기전동기의 정상상태 특성해
석”, 대전공업대학 논문집 제13권