

# SFC를 이용한 약계자 영역에서 가스터빈용 동기 전동기의 기동 알고리즘에 관한 연구

柳皓善\*, 李柱鉉\*\*, 姜潤宗\*\*\*, 黃善煥\*\*\*\*, 金長睦†

## A Study on Starting Algorithm of Large Synchronous Motor for Gas Turbine in Field-Weakening Region using SFC

Ho-Seon Ryu, Joo-Hyun Lee, Youn-Jong Kang, Seon-Hwan Hwang and Jang-Mok Kim

### 요 약

대용량 동기 발전/전동기 기동운전에는 주로 사이리스터를 이용한 정지형 주파수 변환 장치(SFC : Static Frequency Converter)시스템이 널리 사용되고 있다. 지금까지의 국내 SFC에 대한 연구는 주로 양수 발전 시스템에 관한 연구가 주류를 이루고 있어 가스터빈용 SFC 시스템에 관한 구체적인 기동 알고리즘에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 PI 전류 제어기의 안티 와인드업 출력 신호를 이용한 가스터빈 동기 전동기의 기동을 위한 새로운 약계자 제어 알고리즘을 제안하였으며 이에 대한 실효성과 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

### ABSTRACT

SFC(Static Frequency Converter)system has come to be used as start up drive system for large synchronous motor in many industry applications. Many papers have been presented the control algorithm for pumped storage power generation using SFC system but they did not included about start up algorithm of SFC system for gas turbine. This paper presents the field weakening control algorithm for a large synchronous motor using output signal of anti-windup in PI current regulator and the results of experiment show that the proposed algorithm is proper and effective.

**Key Words** : SFC, Large synchronous motor, Field weakening control algorithm, PI current regulator

### 1. 서 론

동기 발전/전동기 운전을 위한 SFC 시스템은 사이리스터 전력 소자를 활용한 부하 전류형 인버터(LCI :

Load Commutated Inverter) 시스템으로 구성되어 있다. 부하 전류형 인버터는 대용량 시스템일수록 경제적인 면과 효율적인 면에서 많은 장점을 가지고 있으므로 대형 발전 시스템에 주로 응용되고 있다 [1],[2],[3],[4],[5].

SFC는 대용량 양수, 가스터빈, 화력, 열병합 발전소 등에서 적용되고 있는데 양수 발전의 경우 1대의 동기기로 전동기 및 발전기 기능으로 양수/발전 운전을 동시에 운용하며 전동기 운전시 큰 토크를 필요로 한다. 반면, 가스 터빈 및 화력, 열병합 발전에서는 터빈을 빠른 시간 내에 효율적으로 정격 속도로 운전시키

†교신저자 : 정회원, 부산대 전자전기통신공학부 부교수

E-mail : jmok@pusan.ac.kr

\*정회원, 한전전력연구원 발전연구소 선임연구원

\*\*정회원, 한전전력연구원 발전연구소 책임연구원

\*\*\*정회원, 효성중공업 연구소 일반연구원

\*\*\*\*정회원, 부산대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2008. 7. 31 1차 심사 : 2008. 8. 19

2차 심사 : 2008. 10. 2 심사완료 : 2008. 10. 13

기 위한 기동 토크가 필요하며 양수 발전에 비해서는 상대적으로 작은 용량의 SFC가 사용된다.

가스터빈용 SFC는 부하 토크 특성상 기동시 큰 기동 토크가 필요하므로 큰 계자 전류를 인가하여 기동한다. 그러나 전동기가 기동되어 정격속도에 도달하기 전에 전동기의 역기전력은 정격전압에 도달하게 되어 전동기가 더 이상 가속할 수 없는 전압 부족 현상이 나타난다. 이러한 상황에서 전동기를 가속하기 위하여 전동기 속도에 반비례하게 계자 전류를 감소시키는 약계자 제어가 필요하다.

지금까지의 국내 SFC에 관한 연구는 주로 양수 발전 시스템에 관한 연구가 주류를 이루고 있어 가스터빈 시스템에 관한 구체적인 기동 알고리즘에 관한 연구는 미흡한 실정이다<sup>[6],[7]</sup>.

본 논문에서는 SFC 시스템을 이용하여 가스터빈용 동기 전동기의 기동 제어를 위한 새로운 약계자 제어 알고리즘을 제안하였으며 이에 대한 실효성과 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 가스터빈용 SFC 시스템의 구성

가스터빈용 SFC 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 전원측 컨버터(Network Converter), 전동기측 컨버터(Machine Converter), 그리고 직류단 리액터로 구성된다. 전원측 컨버터는 전원측 전압으로부터 교류 전원의 위상각을 받아 전동기 속도와 직류단 전류를 제어하기 위한 직류단 전압을 만든다. 전동기측 컨버터는 회전자 위치에 따라 전동기에 전압을 인가하므로 직류단 에너지를 전동기 측으로 전달하는 역할을 한다. 그리고 직류단 리액터는 전원측 컨버터에서 인가되는 전류의 급격한 변화를 제한하는 역할을 한다.

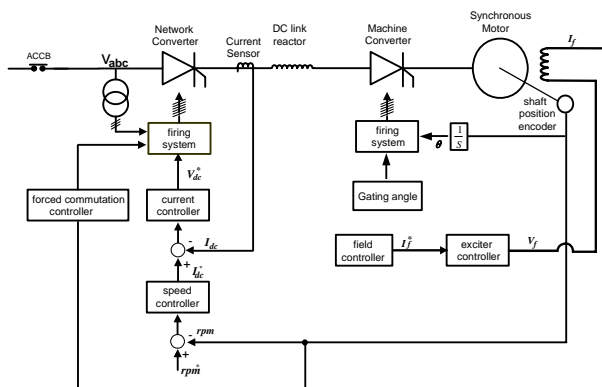


그림 1 가스터빈용 SFC 시스템의 제어 블록도  
Fig. 1 Control block diagram of SFC system for gas turbine

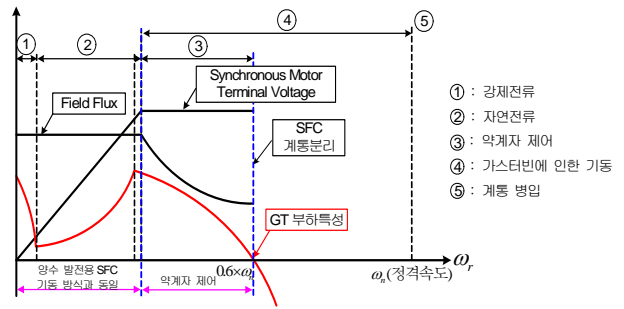


그림 2 가스터빈용 부하, 직류단 전압 및 자속 특성  
Fig. 2 Features of load, dc-link voltage and flux level for gas turbine

기준에 연구되었던 양수 발전용 SFC의 기동 운전에는 동기 전동기를 펌프(Pump)모드로 하여 강제 전류, 자연 전류로 나누어 전동기를 정격 속도까지 도달하게 된다. 반면에 가스터빈용 SFC 운전은 그림 2의 부하 특성 곡선과 같이 강제 전류, 자연 전류, 약계자 영역으로 나누어 전동기를 정격 속도의 60%까지 도달하게 하므로 양수 발전의 운전 특성과 차이점을 가지게 된다<sup>[5],[6],[7]</sup>.

### 2.1 강제 전류<sup>[2]</sup>

사이리스터의 턴 오프 방법으로는 애노드와 캐소드 사이에 전류가 역으로 흐를 정도의 역전압을 걸어주거나 소자에 전류가 흐르지 않도록 한다. 저속에서는 동기 전동기의 역기전력이 작아 전동기측 컨버터 사이리스터에 턴-오프하는 역전압을 인가하기에 불충분하여 다음 스위치 모드로의 전환이 힘들게 된다. 따라서 이 구간에서는 스위치 모드 전환 시 임의로 직류단 전류를 '0[A]'로 만들어서 전환이 될 사이리스터를 턴-오프시킨다.

그림 3은 직류단 전류를 '0[A]'로 만들어 스위치 전환이 일어나는 예를 보여주고 있다.

직류단 전류를 '0[A]'로 만들어 T5, T6을 턴-오프시킨 후 T1, T6을 온과 동시에 직류단 전류를 다시 흐르게 하여 스위칭 모드 전환이 이루어진다. 강제 전류 시 직류단 전류를 '0[A]'로 만들기 위해서 직류 링크단에 역전압이 인가되도록 점호한다.

단방향으로만 전류가 흐르는 동안 사이리스터의 특성에 따라 직류단 리액터를 통해 흐르는 전류는 상쇄되고 전동기측 컨버터 사이리스터에 흐르는 전류는 '0[A]'로 되는 구간으로 토크가 발생하지 않고 전동기의 기계적인 관성으로 회전하게 되는 구간이다. 이러한 강제 전류 구간은 정격 속도의 5~8%이다.

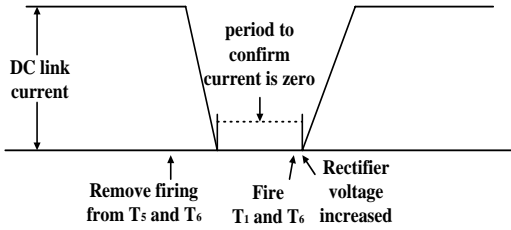


그림 3 강제 전류  
Fig. 3 Forced commutation

2.2 자연 전류<sup>[2]</sup>

동기 전동기 역기전력이 전동기측 컨버터단의 사이리스터를 턴 오프하기에 충분하면 자연 전류 모드로 동작한다. 그림 4는 전동기측 사이리스터 T4가 턴 온 되어 있는 가운데 사이리스터 T6을 턴 온 함으로써 사이리스터 T4에서 T6으로 전류(commutation)되는 과정을 보여준다. 사이리스터 T6을 턴 온 시키는 시점에서  $V_b$ 가  $V_a$ 보다 크기 때문에 사이리스터 T4에 흐르는 전류를 감소하고 사이리스터 T6에 흐르는 전류는 증가한다.

두 개의 사이리스터가 동시에 턴 온 되어 있는 구간 즉, 중복각(Overlap angle)구간이 존재한다. X점에 도달하기 전까지 사이리스터 T4가 턴 오프 되지 않는다 면 회로에 큰 단락 전류가 흐른다. 즉, X점에 사이리스터 T6이 충분한 시간을 가지고 턴 온 되어 사이리스터 T4에 흐르는 전류가 '0[A]'가 되는 시간과 사이리스터의 역 저지 회복 능력을 회복할 수 있는 시간을 보장해야 한다. 전동기에 흐르는 전류는 그림 4에서 X 점전에 흐르기 때문에 항상 전류가 전압에 비해 앞선다. 그러므로 전동기는 항상 진상 역률로 동작하여야 한다.

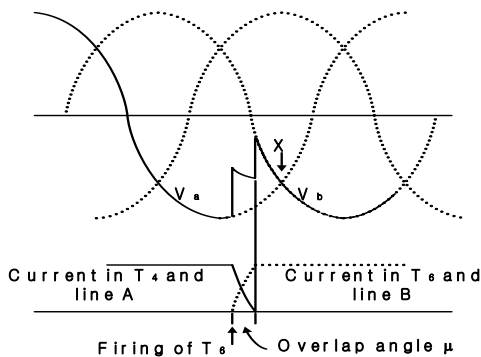


그림 4 자연 전류  
Fig. 4 Natural commutation

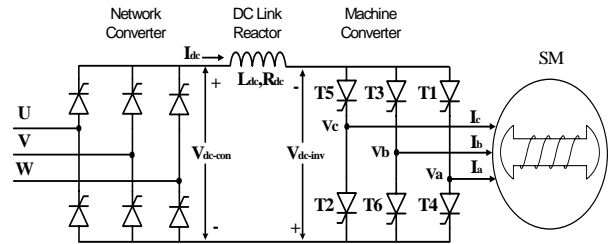


그림 5 부하 전류형 인버터의 회로 구성  
Fig. 5 Schematic diagram of the LC

3. 가스 터빈용 SFC시스템의 제안된 약계자 제어 알고리즘

3.1 직류단 전류와 컨버터단 최대 직류 전압

부하 전류형 인버터의 회로 구성은 그림 5와 같고 직류단 전류는 식 (1)과 같이 전원측 컨버터단과 전동기측 컨버터단의 직류 전압으로 표현할 수 있다<sup>[1],[2],[3]</sup>.

SFC의 전류 제어기는 그림 1에서와 같이 직류단의 전류를 궤환하여 전원측 컨버터단의 직류 전압을 제어한다. 직류단의 전류는 그림 5에서 알 수 있듯이 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{dc} = \left\{ \frac{V_{dc\_con} + V_{dc\_inv}}{R_{dc}} \right\} \quad (I_{dc} \geq 0) \quad (1)$$

여기서,  $I_{dc}$ 는 직류단 전류,  $R_{dc}$ 는 직류단 저항,  $V_{dc\_con}$ 는 전원측 컨버터단 직류 전압,  $V_{dc\_inv}$ 는 전동기측 컨버터단 직류 전압이다.

또한 전류 제어기를 통한 전원측 컨버터단 직류 전압 지령치는 식 (2)와 같이 전원측 사이리스터의 점호각으로 결정된다.

$$V_{dc\_con} = \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s\_ll} \right) \times \cos(\alpha) \quad (2)$$

여기서,  $V_{s\_ll}$ 는 전원측 선간 전압이며  $\alpha$ 는 전원측 컨버터단 점호각이다.

전동기측 컨버터단의 전동기측 d-q축 전압 방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 고속 영역의 정상상태에서  $R_s \ll X_{ds}^r (= L_{ds}^r \omega_r)$ ,  $R_s \ll X_{qs}^r (= L_{qs}^r \omega_r)$ 이 되므로 저항에 의한 전압 강하 성분과 자속의 변화량에 의한 전압 성분을 무시하면 전동기측 최대 상전압은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^r &= R_s i_{ds}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r \\ V_{qs}^r &= R_s i_{qs}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $L_m$ 은 d-q축 상호 인덕턴스,  $\omega_r$ 은 회전자 각속도,  $i_{fd}^r$ 은 계자 전류이다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^r &\approx -\omega_r \lambda_{qs}^r = -\omega_r L_m i_{qs}^r \\ V_{qs}^r &\approx \omega_r \lambda_{ds}^r = \omega_r L_m (i_{ds}^r + i_{fd}^r) \end{aligned} \quad (4)$$

전동기측 최대 상전압은 식 (4)를 통해 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_m = \sqrt{V_{ds}^{r^2} + V_{qs}^{r^2}} = \omega_r L_m \sqrt{(i_{ds}^r + i_{fd}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2} \quad (5)$$

여기서,  $V_m$ 는 전동기측 최대 상전압이다.

전동기측 상전압을 이용하여 전동기측 컨버터단 직류 전압을 나타내면 식 (6)과 같다. 또한 전동기측의 점호각은 직류단의 에너지를 최대로 전동기에 전달하기 위해 최대로 열어준다.

$$\begin{aligned} V_{dc,inv} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times V_m \times \cos\gamma \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(V_{ds}^r)^2 + (V_{qs}^r)^2} \times \cos\gamma \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \cos\gamma \times \omega_r L_m \sqrt{(i_{ds}^r + i_{fd}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\gamma$ 는 전동기측 컨버터의 점호각 ( $90^\circ \leq \gamma \leq 150^\circ$ )이다.

식 (1)을 이용하여 직류단 전류를 전원측과 전동기측 단자전압으로 표현하면 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{V_{dc,con} + V_{dc,inv}}{R_{dc}} \\ &= \frac{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s,ll} \times \cos\alpha\right)}{R_{dc}} + \frac{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \cos\gamma \times \omega_r L_m \sqrt{(i_{ds}^r + i_{fd}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2}\right)}{R_{dc}} \end{aligned} \quad (7)$$

제한된 전동기측 컨버터 직류단 전압 크기로 인해 전동기의 속도 상승이 제한되므로 전동기의 속도 상승에 따른 전동기의 역기전력 크기를 제한할 필요가 있다. 전동기의 역기전력 크기 제한은 동기 전동기의 계자 전류의 크기를 가스터빈의 부하 특성 곡선에 맞춰 속도에 반비례하게 감소시키면 가능하다.

### 3.2 전동기측 컨버터단 직류 전압 제한 조건

컨버터단의 최대 직류 전압은 식 (2)에서  $\alpha = 0^\circ$ 로 놓으면 식 (8)과 같이 컨버터의 최대 전압  $V_{con,max}$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{con,max} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s,ll} \times \cos(0^\circ) \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s,ll} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $V_{con,max}$ 는 전원측 컨버터단 최대 직류 전압이다.

식 (8)을 이용하여 전류 제어기가 동작하는 전동기측 컨버터단의 직류 전압 제어는 식 (9)로 제한할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{inv,max} &= V_{con,max} - R_{dc} I_{dc,rated} \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s,ll} - R_{dc} I_{dc,rated} \geq |V_{dc,inv}| \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $V_{inv,max}$ 는 전동기측 컨버터단 최대 직류 전압,  $I_{dc,rated}$ 는 직류단 정격 전류이다.

식 (9)와 같이 전동기측 컨버터단의 직류 전압이 제한되어 있기 때문에 전동기에 인가할 수 있는 최대 전압의 크기도 제한되므로 이로 인해 전동기 역기전력의 크기가 제한된다.

### 3.3 전동기측 단자 전압 제한 조건과 약계자 시작 운전점

식 (9)에서 전동기측 컨버터단에서 출력할 수 있는 최대 직류 전압 제한값이 결정되면 전동기측 최대 전압 제한값이 식 (10)과 같이 결정된다. 이를 이용하여 제한되는 전동기 단자 전압은 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{max} &= \left| V_{inv,max} \times \frac{\pi}{3\sqrt{3} \times \cos\gamma} \right| \\ &= \left| \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{s,ll} - R_{dc} I_{dc,rate} \right) \times \frac{\pi}{3\sqrt{3} \times \cos\gamma} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

$$V_{max} \geq \sqrt{(V_{ds}^r)^2 + (V_{qs}^r)^2} \quad (11)$$

전동기 속도가 상승하여 일정 속도 이상에서 제어 전압 부족으로 전류 제어기가 포화되었을 경우, 제어기의 제어 전압을 확보하기 위한 약계자 제어가 필요

하다. 그리고 전류 제어가 포화 되는 시점에서 약계자 제어 모드로 자연스럽게 넘어가기 위해 최적의 약계자 시점을 식 (12)와 같이 결정하여야 한다.

식 (12)에서 알 수 있듯이 전동기가 최적의 약계자 운전 시작점에서 운전되기 위해서는 최대 전압 정보  $V_{max}$ , 전동기 상수  $L_m$ ,  $R_{dc}$  그리고 전동기측 컨버터 접호각  $\gamma$ 에 대한 정보를 정확히 알아야 된다. 그러나 실제 시스템에서 이러한 상수를 정확히 추정하기 어렵다.

$$\omega_b = \frac{V_{max}}{L_m \sqrt{(i_{ds}^r + i_{fd}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2}} \quad (12)$$

$$= \frac{\left| \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s,LL} - R_{dc} J_{dc,rate} \right) \times \frac{\pi}{3\sqrt{3} \times \cos\gamma} \right|}{L_m \sqrt{(i_{ds}^r + i_{fd}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2}}$$

여기서,  $\omega_b$ 는 약계자 시점을 위한 기저속도이다.

### 3.4 최대 토크 운전을 위한 약계자 전류 궤적<sup>[2]</sup>

돌극형 동기 전동기의 토크는  $i_{qs}^r$ 와  $i_{fd}^r$ 에 각각 비례한다.  $i_{qs}^r$ 와  $i_{fd}^r$ 는 서로 독립된 값이므로 각각 최대가 될 때 발생하는 토크가 최대가 된다.

#### 3.4.1 $i_{qs}^r$ 이 최대가 되는 조건

약계자 제어 조건은 식 (13)에서와 같이 SFC 시스템의 정격 용량에 의해 직류단 전류가 제한된다.

$$I_{max} \geq I_{dc} = \sqrt{i_{ds}^{r2} + i_{qs}^{r2}} \quad (13)$$

$$= \sqrt{avg(i_{ds}^r)^2 + avg(i_{qs}^r)^2}$$

여기서,  $I_{max}$ 는 직류단 최대 전류이다.

직류단에서 전동기측 컨버터의 이상적인 출력 전류의 경우 그림 6과 같이 구형파의 전류 파형을 갖는 상전류를 나타내므로 상전류를 푸리에 변환하여 동기 좌표계로 표현하면 식 (14) 및 식 (15)와 같이 접호각에 의한 상수항과 회전자 각속도의 짝수 고조파 성분을 갖는  $i_{ds}^r$ 과  $i_{qs}^r$ 로 표현할 수 있다.

$$i_{ds}^r = I_{dc} \left[ \sin(\gamma) + \frac{1}{5} \sin(6\omega_r t - 5\gamma) + \frac{1}{7} \sin(6\omega_r t - 7\gamma) - \frac{1}{11} \sin(12\omega_r t - 11\gamma) - \frac{1}{13} \sin(12\omega_r t - 13\gamma) \right] \quad (14)$$

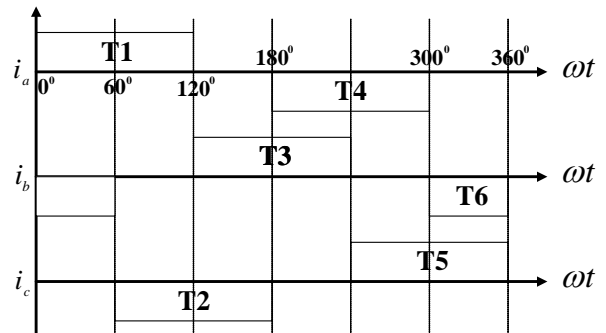


그림 6 전동기측 컨버터의 이상적인 출력 전류  
Fig. 6 Idealized output currents of Machine converter

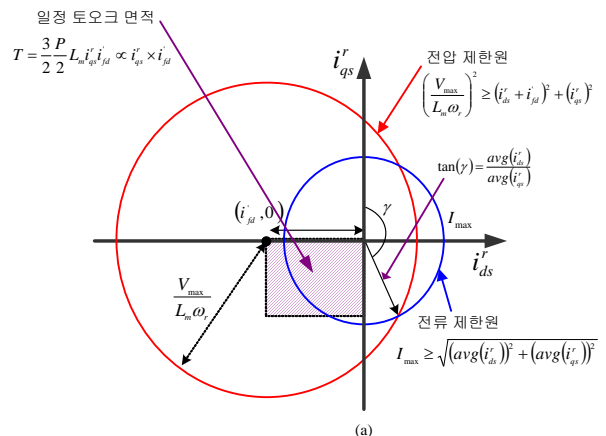
$$i_{qs}^r = I_{dc} \left[ \cos(\gamma) + \frac{1}{5} \cos(6\omega_r t - 5\gamma) - \frac{1}{7} \cos(6\omega_r t - 7\gamma) - \frac{1}{11} \cos(12\omega_r t - 11\gamma) + \frac{1}{13} \cos(12\omega_r t - 13\gamma) \right] \quad (15)$$

전동기측 컨버터단의 경우, 기동 운전시 사이리스터 접호각( $\gamma = 150^\circ$ )은 일정하게 두어 제어하므로 식 (14)와 식 (15)를  $\frac{\pi}{3}$  주기로 평균값을 구하면 일정한 상수로 표현되므로 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \tan(\gamma) = \frac{avg(i_{ds}^r)}{avg(i_{qs}^r)}, \quad (\gamma = 150^\circ) \quad (16)$$

#### 3.4.2 $i_{fd}^r$ 가 최대가 되는 조건

고속에서 최대 토크 발생을 위하여 약계자 제어기는 기저속도 이후 속도 상승에 대한 계자 전류 제어가 필요하다. 식 (4)를 식 (11)에 대입하여 식 (17)과 같이 전압 제한 조건을 전류에 관한 식으로 표현할 수 있다.



(a)

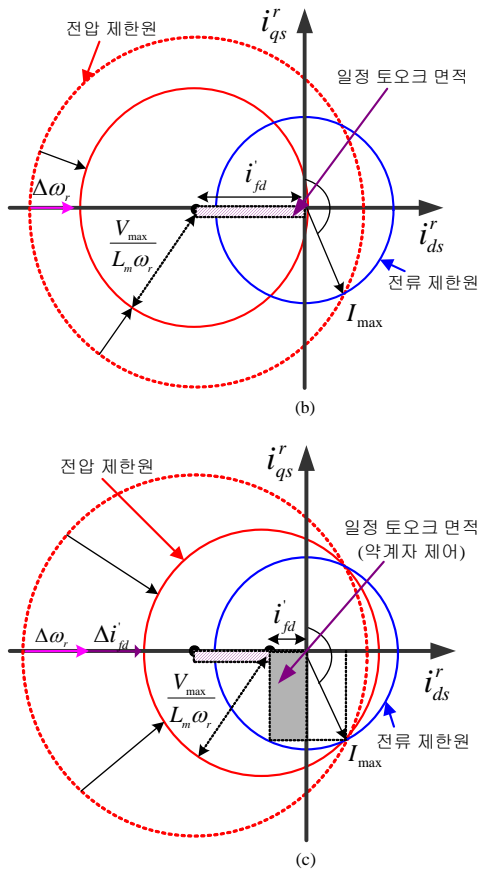


그림 7 최대 토크 운전을 위한 전압과 전류 제한  
 (a) 일정 토크 영역에서 운전  
 (b) 일정 계자 전류에 의한 운전  
 (c) 약계자 제어에 의한 운전

Fig. 7 Voltage and current limit diagram for maximum torque operation  
 (a) Operation of the constant torque region  
 (b) Operation of the constant field current control  
 (c) Operation of the field weakening control

$$\left(\frac{V_{max}}{L_m \omega_r}\right)^2 \geq (i'_{ds} + i'_{fd})^2 + (i'_{qs})^2 \quad (17)$$

식 (17)을  $\omega_r$ 에 대한  $i'_{fd}$ 로 나타내면 식 (18)과 같고  $i'_{fd}$ 가 최대가 되는 조건은 식 (18)에서 양변의 항이 같을 경우이다.

$$i'_{fd} \leq \sqrt{\left(\frac{V_{max}}{\omega_r L_m}\right)^2 - (i'_{qs})^2} - i'_{ds} \quad (18)$$

식 (13)의 전류 제한 조건과 식 (17)의 전압 제한 조건을  $i'_{ds}$ 와  $i'_{qs}$ 의 평면에 나타내면 원점을 중심으로 하고 반지름이  $I_{max}$ 가 되는 전류 제한원과 중심이  $(-i'_{fd}, 0)$ 가 되고 반지름이  $\frac{V_{max}}{L_m \omega_r}$ 가 되는 전압 제한원을 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

전동기의 기동 시점부터 기저속도까지 전동기의 최대 전압이 전동기 속도에 비례하여 증가하므로 그림 7의 (a)와 같이 일정한 반지름을 가지는 원으로 나타나고 직류단 전류는 최대로 유지된다. 전류 제어가 포화된 후 일정한 계자 전류에 대한 전동기의 속도 증가는 식 (17)의 전압 제한원 반지름  $(\frac{V_{max}}{L_m \omega_r})$ 을 감소시키고 그림 7의 (b)와 같이 직류단 전류와 토크가 급속하게 감소하여 전동기 속도가 증가하지 못하게 된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 약계자 제어를 하면 그림 7의 (c)와 같이 전동기 속도 증가에 대한 전압 제한원의 반지름은 감소하지만 전압 제한원의 중심인 계자 전류( $i'_{fd}$ )가 이동하면서  $I_{max}$ 를 일정하게 유지시키며 최대 전류 제한원에 위치되고 발생 토크 역시  $i'_{fd}$ 와  $i'_{qs}$ 의 곱으로 이루어지기 때문에 최대 토크를 유지하며 전동기 속도를 지속적으로 증가시킨다.

#### 4. 약계자 영역에서 제안된 약계자 제어 알고리즘

제안한 약계자 제어 블록도는 그림 8과 같이 전원측 컨버터단을 제어하기 위한 PI 전류 제어기의 안티와인드업 출력을 이용한 약계자 제어기 형태를 갖는다.

그림 8에서 안티 와인드업 구성에 의해 제한되는 직류단 전압은 수식 (17)의 전압 제한 조건과 동일한 역할을 하며 전류 제어기는 전류 지령치와의 오차를 줄이기 위해 전류 제한 조건을 만족하는 전압 지령치를 결정하게 된다. 전압 제한 조건과 전류 제한 조건을 만족하는 안티와인드업의 출력은 약계자 제어기의 입력으로 들어가고 이러한 입력은 PI 제어기를 통하여 최적의 계자 전류 지령치를 결정하게 된다.

제안된 약계자 제어기의 장점은 제어기의 구조가 간단하며, 제어 전압의 부족에 의하여 전류 제어가 포화된 때 안티 와인드업의 값을 감지하여 자동적으로 약계자 제어가 시작되며, 전동기의 속도 및 전동기의 계자 자속 정보가 불필요하다.

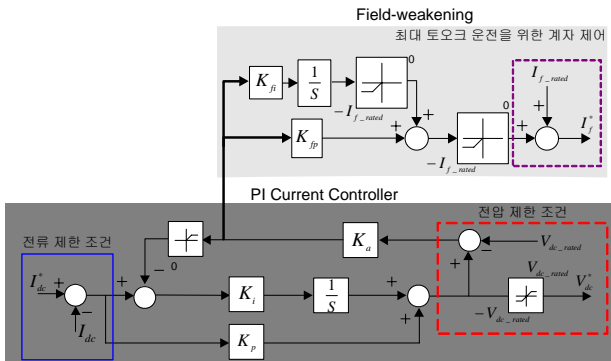


그림 8 제안된 약계자 제어 블록도  
 Fig. 8 Block diagram of proposed field weakening control

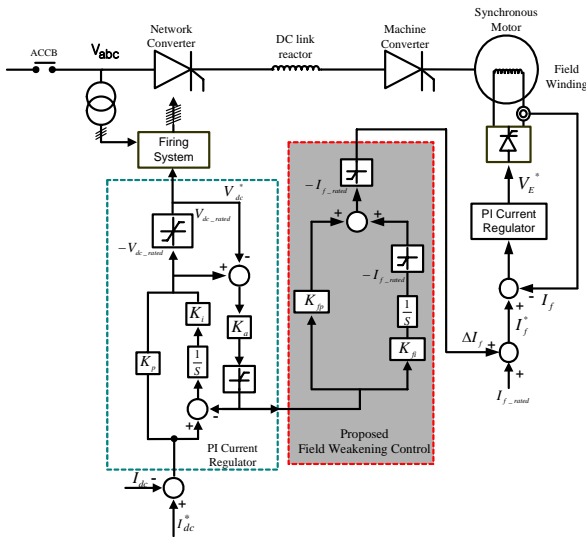


그림 9 제안된 약계자 제어를 포함한 전체 제어 블록도  
 Fig. 9 Overall Block diagram using the proposed field weakening control

그리고 안티 와인드업의 출력만 이용하여 약계자 제어를 하므로 전원측 컨버터단과 전동기측 컨버터단의 직류전압을 고려하지 않아도 된다.

그림 9는 제안한 약계자 제어를 포함한 전체 제어 블록도를 보여주고 있다. 그림 9에서 알 수 있듯이 전원측 컨버터단을 제어하기 위한 PI 전류 제어기의 안티와인드업 출력을 이용하여 약계자 제어를 함을 알 수 있다.

안티 와인드업 출력이 양으로 전환되는 시점은 전압이 포화되는 시점이며 최대 토크 시점으로 최적의 약계자 운전 시작점이라 할 수 있다. 안티와인드업을 통해 직류단 전류가 일정하게 유지될 수 있는 시점이 최적의 계자 전류 시점이라 볼 수 있다. 또한 궤환되

는 값의 크기는 제어기의 포화정도를 나타내며 계자 전류의 오차 크기를 나타낸다. 만약 최적의 계자 전류 시점이 아닐 경우 직류단 전류가 더욱 증가하거나 감소해야 한다.

### 5. 실험 결과

실험을 위한 전체 시스템 블록도는 그림 10과 같다. 구동 시스템은 900W 동기 전동기, 직류 링크단 리액터, 사이리스터 모듈을 이용한 전원측 컨버터와 전동기측 컨버터 및 여자 시스템, TMS320VC33와 FPGA 등을 이용한 주 제어 보드, 그리고 사이리스터 점호 회로로 구성되어 있다. 전동기측에는 속도 및 위치 정보 검출을 위해 2,000펄스 엔코더가 부착되어 있다. 적용된 돌극형 동기 전동기의 제정수는 표 1과 같다.

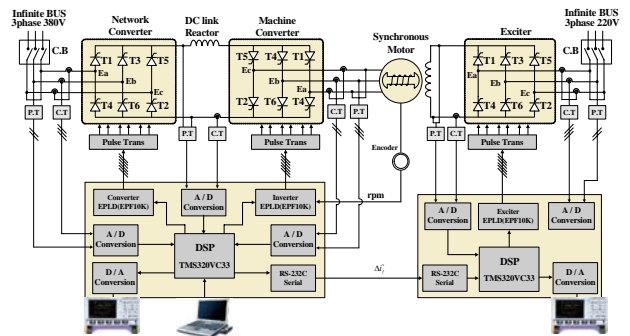


그림 10 가스터빈용 SFC 제어 시스템 전체 제어 블록도  
 Fig. 10 Overall control block diagram for gas turbine

#### 5.1 약계자 제어 실험 결과

그림 11은 약계자 제어를 하지 않았을 경우의 실험 파형이다. 약계자 제어를 하지 않았을 때 전동기의 속도는 980[rpm]까지 상승하였다. 이때 직류단 전압은 최대값이 되며 전류 제어기는 제어 전압 부족에 의하여 직류단 전류가 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 12는 약계자 제어를 하였을 경우의 실험 파형이다. 실험 파형에서 알 수 있듯이 약계자 제어가 진행될 동안 계자 전류는 서서히 감소함과 동시에 전동기의 속도 상승 기울기가 토크 감소에 의하여 서서히 감소함을 알 수 있다. 전동기가 기동하여 거의  $t=5[\text{sec}]$ 가 되는 시점에서 약계자가 시작되어  $t=7[\text{sec}]$  일 때 전동기는 정상 상태에 도달함을 확인할 수 있다.

이와 같이 약계자 제어가 진행될 동안 직류단 전압과 전류는 최대값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

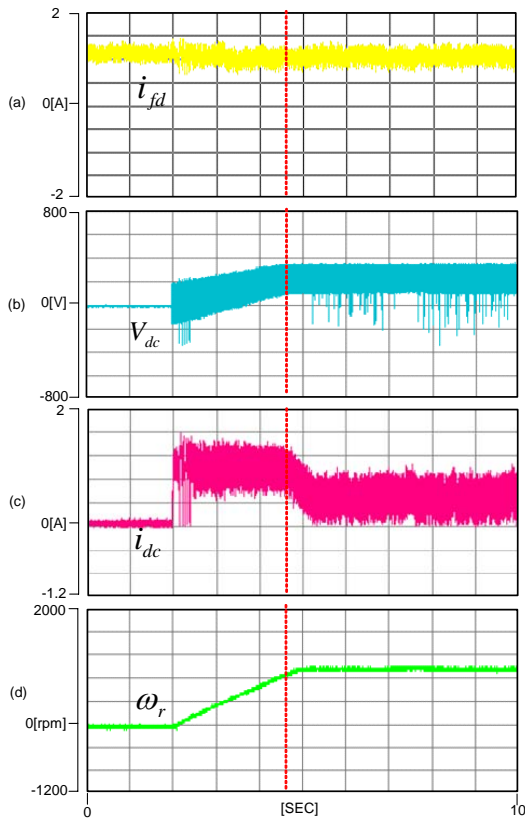


그림 11 일정 계자 전류에 의한 운전  
 (a) 여자 전류 (b) 직류단 전압  
 (c) 직류단 전류 (d) 전동기 속도  
 Fig. 11 Operation of the constant field control  
 (a) Field current (b) DC-link voltage  
 (c) DC-link current (d) Motor speed

### 6. 결 론

본 논문에서는 기존의 양수 발전용 SFC 기동 방법과는 달리 가스 터빈용 SFC 시스템의 동기 전동기의 기동 제어를 위한 새로운 약계자 제어 알고리즘을 제안하였다.

최적의 약계자 제어를 위해서는 약계자 시작점, 전압 및 전류 제한 조건, 최대 토크 조건이 필요하다. 이러한 조건은 전동기 속도, 전동기 상수 및 고정자 전류 등 다양한 파라미터 정보가 요구되며 이는 가스 터빈용 SFC 시스템의 제어를 복잡하게 할 뿐만 아니라 구현 또한 쉽지 않다.

제안된 약계자 제어 알고리즘은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 전류 제어기의 안티 와인드업 출력신호를 이용하여 전동기 속도, 전동기 상수 그리고 고정자 전류에 관한 정보 없이 PI 제어기만을 이용하여 제

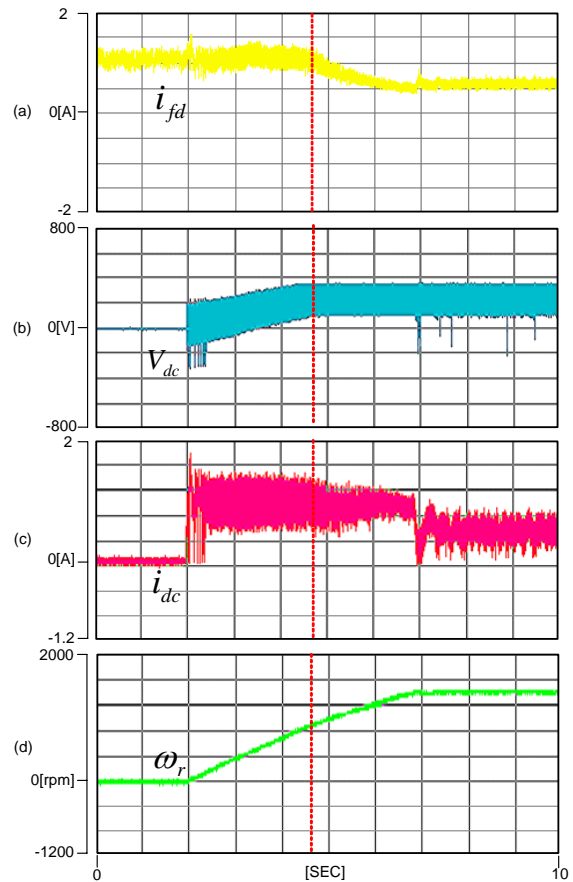


그림 12 약계자 제어에 의한 운전  
 (a) 여자 전류 (b) 직류단 전압  
 (c) 직류단 전류 (d) 전동기 속도  
 Fig. 12 Operation of the field weakening control  
 (a) Field current (b) DC-link voltage  
 (c) DC-link current (d) Motor speed

어를 구성함에 따라 간단한 제어기의 구현이 가능하다. 제안된 알고리즘의 실효성을 실험을 통해 검증하였다.

표 1 돌극형 동기 전동기 제정수  
 Table 1 Parameters of Salient Synchronous Motor

|       |             |          |                   |
|-------|-------------|----------|-------------------|
| 극 수   | 4           | 정격 속도    | 1800 [RPM]        |
| 정격 출력 | 900 [W]     | 고정자 권선저항 | 8.2 [ $\Omega$ ]  |
| 정격 전압 | 231/400 [V] | Xbase    | 133.3             |
| 정격 전류 | 2 [A]       | 회전자 권선저항 | 67.5 [ $\Omega$ ] |
| 권선 방식 | Y결선         | 계자 전류    | 1.2 [A]           |



**참 고 문 헌**

- [1] 이영복, 김장목, 임익현, 류호선, 송승호, “대용량 전력 변환용 사이리스터 디지털 점호제어”, *전력전자학회 학술대회논문집*, pp. 565-568, 2003. 7.
- [2] 박신현, 김장목, 임익현, 류호선, “정지형 주파수 변환 장치를 활용한 대용량 동기 발전 전동기 운전 에 관한 연구”, *전력전자학회 논문지*, 제8권, 제6호, pp. 496-503, 2003. 12.
- [3] 류호선, 이주현, 박요집, 강윤중, 김장목, “대용량 동기 발전 전동기의 회생 제동 제어 알고리즘에 관한 연구”, *전력전자학회 논문지*, 제11권, 제2호, pp. 104-112, 2006. 4.
- [4] P. Kundur, “Power system stability and control”, McGraw-Hill, Inc., 2003.
- [5] Bojtor, L, E. Paal “High power frequency converters for industrial and power plant drives”, Pergamon, 1998.
- [6] F. Peneder, R. Lubasch, A. Vonmard, “Static equipment for starting pumped storage plant, synchronous condensers and gas turbine sets”, *Brown Boveri Rev.* 61, pp. 440-447, 1974.
- [7] Kolb, Peneder, Suchenek, “Static Equipment for Gas Turbosets”, *Revue Brown Boveri*, 66-1979(2), pp. 104-112.



**황선환(黃善煥)**

1978년 7월 15일생. 2004년 부산대 전기공학과 졸업. 2006년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김장목(金長睦)**

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 부산대 전자전기통신공학부 부교수. 현재 당 학회 평의원.

**저 자 소 개**



**류호선(柳皓善)**

1970년 7월 21일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한국전력연구원 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 선임연구원.



**이주현(李柱鉉)**

1964년 2월 1일생. 2000년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 한국전력공사 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 책임연구원.



**강윤중(姜潤宗)**

1978년 11월 25일생. 2004년 동의대 전기공학과 졸업. 2006년 부산대 대학원 전기공학과 졸업. 현재 효성중공업 연구소 일반연구원.