

SFC 시스템의 약제자에 대한 연구

류호선, 임익현
전력연구원

A Study of Field Weakening Control for Static Frequency Converter System

Ryu Ho-Seon, Lim Ick-Hun
KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)

Abstract - SFC(Static Frequency Converter)system has come to be used as start-up drive system for large synchronous machine 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 the detailed start-up algorithm of gas turbine using SFC system. This paper presents the important field weakening control algorithm of a large synchronous machine using SFC system and the results of experiment show that the proposed algorithm is proper and effective about this.

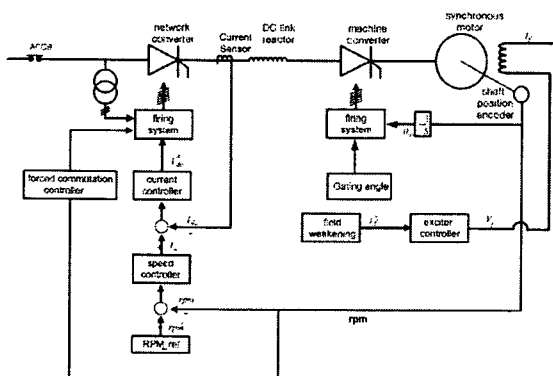
1. 서론

동기 발전/전동기 운전을 위한 SFC 시스템은 싸이리스터 전력 소자를 활용한 부하 전류형 인버터(LCI : Load Commutated Inverter) 시스템으로 구성되어 있다. 부하 전류형 인버터는 대용량 시스템일 수록 경제적인 면과 효율적인 면에서 많은 장점을 가지고 있으므로 대형 발전 시스템에 주로 응용되고 있다. SFC의 응용분야로는 양수, 가스터빈, 화력, 열병합 발전소등 대용량 시스템에서 적용되고 있다. 가스터빈 및 화력, 열병합 발전소에서의 SFC는 발전기의 기동 시 터빈이 빠른 시간 내에 효율적으로 정격속도에 도달할 수 있도록 보조 역할을 한다. 가스터빈용 SFC는 기동시 부하 토크 특성상 큰 기동 토크가 필요하므로 계차 전류를 크게 둔다. 그러나 전동기가 기동되어 정격속도에 도달하기 전에 전동기의 역기전력은 정격전압에 도달하게 되어 전동기가 더 이상 가속할 수 없는 전압 부족 현상이 나타난다. 이런 전압 부족 현상시 동기 전동기의 계차 전류를 적절히 제어하여 전동기가 가속할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 기존의 이런 현상에 대한 약제자 제어를 개선하여 SFC 가스터빈용 새로운 약제자 알고리즘을 제안하였으며 이에 대한 실효성과 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 본론

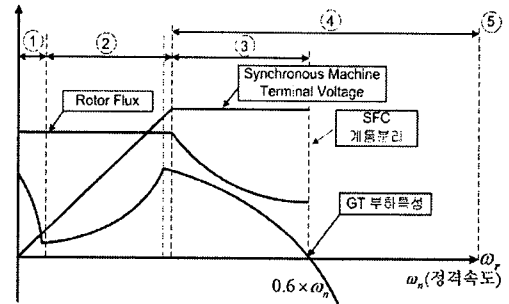
2.1 가스터빈용 SFC 시스템의 구성

가스터빈 시스템용 SFC의 전체 제어 블록도는 <그림 1>과 같다. 전원측 컨버터(NB : network bridge), 전동기측 컨버터(MB : machine bridge), 그리고 직류단 리액터로 구성된다. 전원측 컨버터는 전원측 전원으로 만들어진 교류 전원의 위상각을 받아 전동기 속도와 직류단 전류를 제어하기 위한 직류단 전압을 만든다. 전동기측 컨버터는 회전자 위치에 따라 전동기에 전압을 인가하므로 직류단 에너지를 전동기측에 전달하는 역할을 한다. 그리고 직류단 리액터는 전원측 컨버터에서 인가되는 전류의 급격한 변화를 제한하는 역할을 한다.



<그림 1> 가스 터빈용 SFC 전체 블록도

그림 2와 같이 가스터빈 발전에서의 부하 특성 곡선에 의해 SFC의 기동 운전은 강제전류, 자연전류, 약제자 제어 모드로 나누어 정격속도의 60%까지 운전된다.

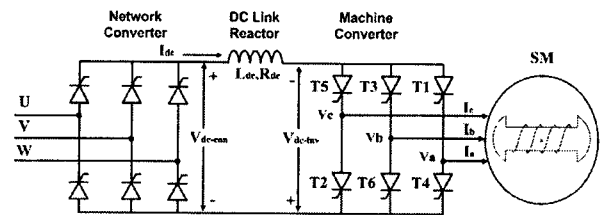


<그림 2> 가스터빈용 부하, 직류단 전압 및 자속특성

2.2 SFC에 이용되는 약제자 이론

2.2.1 직류단 전류와 컨버터단 최대 직류 전압

부하 전류형 인버터의 회로 구성은 <그림 3>과 같고 직류단 전류는 식(1)과 같이 컨버터단 직류 전압과 인버터단 직류 전압에 의해 결정되어진다.



<그림 3> 부하 전류형 인버터의 회로 구성

$$I_{dc} = \left\{ \frac{V_{dc-con} + V_{dc-inv}}{R_{dc}} \right\} \quad (I_{dc} \geq 0) \quad (1)$$

전동기의 고속 영역의 정상상태에서는 저항에 의한 전압 강하 성분과 자속의 변화량에 의한 전압 성분을 무시하였을 때 전동기측 직류전압은 (2)와 같다.

$$V_{dc-inv} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times \cos \gamma \times \omega \cdot L_m \sqrt{(i_{ds}^* + i_{fd})^2 + (i_{qs}^*)^2} \quad (2)$$

γ : 인버터측 점화각 ($\gamma = 150^\circ$)

식(2)를 이용하여 직류단 전류를 전원측과 전동기측 단자전압으로 표현하면 아래식과 같다.

$$I_{dc} = \frac{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{s-n} \cos \alpha \right)}{R_{dc}} + \frac{\left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \gamma \times \omega \cdot L_m \sqrt{(i_{ds}^* + i_{fd})^2 + (i_{qs}^*)^2} \right)}{R_{dc}} \quad (3)$$

V_{s-n} : 전원측 선간전압 α : 컨버터단 선간전압

제한된 인버터 직류단 전압 크기로 인해 전동기의 속도 상승이 제한되므로 전동기의 속도 상승에 따른 전동기의 역기전력 크기를 제한할 필요가 있다. 전동기의 역기전력 크기 제한은 동기 전동기의 계차 전류 크기를 가스터빈의 부하 특성 곡선에 맞춰 속도에 반비례하게 감소시켜야 한다.

2.2.2 인버터단 직류 전압 제한 조건

전류 제어가 포화되는 시점은 컨버터단 평균 직류 전압이 식(4)와 같이 최대가 될 때이다.

$$V_{con-max} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s-l} \quad (4)$$

$V_{con-max}$: 컨버터단 최대 직류 전압

식(4)를 이용하여 전류 제어가 작동하는 인버터단의 직류 전압 제어는 식(5)로 제한할 수 있다.

$$V_{inv-max} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{s-l} - R_{dc} I_{dc-rate} \geq |V_{dc-me}| \quad (5)$$

$V_{inv-max}$: 인버터단 최대 직류 전압

$I_{dc-rate}$: 직류단 정격 전류

2.2.3 전동기속 단자 전압 제한 조건과 약계자 시작 운전점

인버터단 평균 직류 전압이 제한되므로 전동기에 인가할 수 있는 최대 전압의 크기도 제한된다. 그러므로 전동기의 최대 전압을 식(6)까지 제한하여 제어할 필요가 있다.

$$V_{max} = \left| V_{inv-max} \times \frac{\pi}{3\sqrt{3} \times \cos \gamma} \right| \quad (6)$$

전류 제어가 포화 되는 시점에서 약계자 제어 모드로 자연스럽게 넘어가기 위한 최적의 약계자 시점을 식(7)과 같이 결정하여야 한다. 식(7)에서 알 수 있듯이 전동기가 최적의 약계자 운전 시작점에서 운전되기 위해서는 전동기속 최대 전압 정보 V_{max} , 전동기 상수 L_m, R_{dc} 그리고 인버터 점호각 γ 에 대한 정보를 정확히 알아야 된다. 그러나 실제 시스템에서 이러한 상수를 정확히 추정하기 어렵다.

$$\omega_b = \frac{V_{max}}{L_m \sqrt{(i_{fd}^* r_{ds} + i_{fd}^*)^2 + (i_{qs}^*)^2}} \quad (7)$$

ω_b : 약계자 시점을 위한 기저속도

2.2.4 최대 토크 위한 약계자 전류 계획

원통형 동기 전동기의 토크는 i_{qs}^* 와 i_{fd}^* 에 각각 비례한다. i_{qs}^* 와 i_{fd}^* 는 서로 독립 값이므로 각각 최대가 될 때 발생하는 토크도 최대가 된다.

(1) i_{qs}^* 이 최대가 되는 조건

약계자 제어조건은 SFC 시스템의 정격 용량에 의해 직류단 전류가 제한된다.

$$I_{max} \geq I_{dc} = \sqrt{i_{qs}^{*2} + i_{fd}^{*2}} \quad (8)$$

I_{max} : 직류단 최대 전류

인버터단 사이리스터 점호각은 일정하게 두어 제어하므로 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 의 관계는 식(9)와 같고 I_{dc} 와 i_{qs}^* 는 서로 비례하므로 i_{qs}^* 가 최대가 되기 위한 조건으로 I_{dc} 가 I_{max} 가 되어야 한다.

$$K = |\tan(\gamma)| = \frac{\text{avg}(i_{ds}^*)}{\text{avg}(i_{qs}^*)} \quad (9)$$

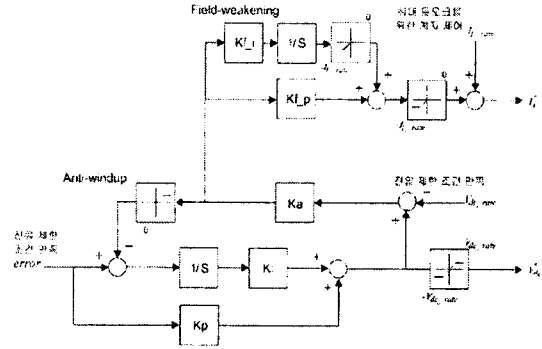
(2) i_{fd}^* 가 최대가 되는 조건

고속에서 최대 토크 발생을 위한 약계자 제어는 기저속도 이후 속도 상승에 대한 계자 전류 제어가 필요하다. 약계자 제어시 식(2)의 전동기 최대 전압은 식(6)의 최대 전압 제한 조건을 만족해야 하고 i_{fd}^* 는 식(10)와 같이 제어되어야 한다.

$$i_{fd}^* \leq \sqrt{\left(\frac{V_{max}}{\omega_r L_m}\right)^2 - (i_{qs}^*)^2 - i_{ds}^{*2}} \quad (10)$$

2.2.5 SFC 약계자 제어기 구성

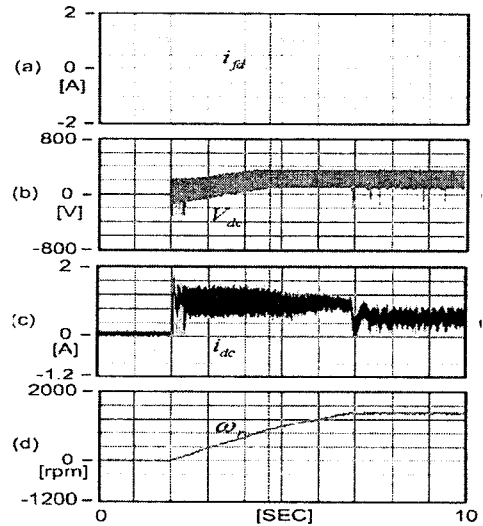
SFC용 약계자 제어기는 <그림 4>와 같이 전류제어기의 안티와인드업 출력을 이용한 약계자 제어기 형태를 갖는다. 제안된 약계자 제어기의 장점은 제어기의 구조가 간단하며, 제어 전압의 부족에 의하여 전류 제어가 포화될 때 안티 와인드업의 출력을 감지하여 자동적으로 약계자 제어가 시작되며, 전동기의 속도 및 전동기의 계자 자속 정보가 불필요하다. 그리고 안티 와인드업의 출력만 이용하여 약계자 제어를 하므로 컨버터단과 인버터단의 직류전압을 고려하지 않아도 된다.



<그림 4> SFC에 연계된 동기기의 약계자 제어 블록도

2.3 실험

<그림 5>에서 알 수 있듯이 약계자 제어가 진행될 동안 계자 전류는 서서히 감소함과 동시에 전동기의 속도 상승이 서서히 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 약계자 제어가 진행될 동안 직류단 전압과 전류는 최대값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 5> 약계자 제어 통한 운전
(a) 여자 전류 (b) 직류단 전압
(c) 직류단 전류 (d) 전동기 속도

3. 결 론

제안된 SFC 연계형 동기기의 약계자 제어기는 안티와인드업의 출력신호를 이용하여 전동기 속도, 전동기 상수 그리고 고정자 전류에 관한 정보 없이 PI 제어기를 구성하였으므로 제어기의 구현이 간단하고 전류 제어를 통해 약계자 제어를 하고 그성능의 뛰어난을 실험을 통해 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이영복 "대용량 전력 변환용 사이리스터 디지털 점호제어" 전력전자 학술대회 2003 제2권 pp565-568
- [2] 박신현 "정지형 주파수 변환 장치를 활용한 대용량 동기 발전 전동기 운전제에 관한 연구" 전력전자 학술대회 2003, 제8권 6호 pp496-503
- [3] 류호선 "대용량 동기 발전 전동기의 회생 제동 제어 알고리즘에 관한 연구" 전력전자 학회지, 11-2-2호 2006.4.
- [4] P.Kundur "Power system stability and control"
- [5] Bojtor, L, E. Paal "High frequency converter for industrial and power plant drives" 1998. Pergamon
- [6] F.Peneder, R.Lubasch, A.Voumard "Static equipment for starting pumped-storage plant, synchronous condensers and gas turbine sets" Brown Boveri Rev. 61 1974 440-447
- [7] David Finney "Variable frequency AC motor drive systems" Peter Pergrinus LTD 1998