

183MW 대용량 동기기 구동 LCI 시스템 기동운전 분석 및 시험

Start-up Analysis and Commissioning Test of LCI System for 183MW Large Synchronous Machine

류 호 선* · 차 한 주*
 (Hoseon Ryu · Hanju Cha)

Abstract - Gas turbine systems are applied extensively in energy supplies to cover peak load requirements. The gas turboset must be accelerated by starting device up to 60%~80% of rated speed to ignite the gas turbine. Recently, the most favorable and economical starting device is the LCI(Load Commutated Inverter). The LCI runs up the gas turboset by feeding the generator as a synchronous motor. In this paper, we discuss in detail the driving principles and features of 183MW gas turbine system. During field application of LCI system, many tests have been conducted and the results were described in this paper. The test results will be considered as the important resources for development in future.

Key Words : LCI(Load Commutated Inverter), Excitation system, SFC(Static Frequency Converter)

1. 서 론

대용량 가스터빈 발전소의 동기발전기는 기동초기에 가스 터빈의 특성상 압축기를 회전시켜 연소용 공기를 연소기에 공급한 후 연소기에서 연소할 수 있는 조건을 만족하게 하기 위하여 일정 속도 이상으로 승속시켜 주는 구동 시스템이 필요하다. 정격 속도 3600rpm의 가스터빈 발전기인 경우 2000~2500rpm(대략 60%)까지 승속이 되었을 때 가스터빈이 정상운전 상태가 되어 자체 연소가 가능한 것으로 알려져 있다. 이런 대용량 기동시스템은 초기에 DC 전동기나 권선형 유도전동기가 사용되었으나, 1990년 이후로 정지형 SFC(Static Frequency Converter)가 보급되어 사용되고 있다. 다른 회전형 시스템보다 SFC를 이용한 기동방법의 장점은 발전기 축이 짧아져 진동이 줄어들 수 있으며, 1대의 SFC 시스템으로 여러 대의 동기발전기에 적용 가능하여 초기 투자비를 절감할 수 있는 장점을 갖고 있다. 가스터빈 동기기 초기기동을 위한 SFC 시스템은 현재 싸이리스터 전력반도체 소자를 활용한 부하 전류형 인버터 시스템(LCI : Load Commutated Inverter)으로 상용화되어 많이 사용되고 있다. 이러한 LCI시스템에 관한 연구가 선진 외국에서는 지속적으로 유지 되었지만, 국내에서는 아직까지 제품 생산이 가능할 정도까지 연구되지 않았으며 국산화 제품 또한 발전소 현장에 적용된 사례가 전무한 실정이다[1][2][3].

본 논문에서는 국산화의 토대를 만들고자 국내 A-발전소

에 적용된 최신 183MW 동기기 구동용 부하전류형 인버터 시스템의 기동방법을 상세히 분석하였고, 현장 시운전 시험 절차와 그 결과를 상세히 기술하였다. 향후 기술된 내용은 국산 개발시 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 동기기 구동을 위한 시스템의 주요 구성

2.1.1 구동 시스템

구동 시스템(부하 전류형 인버터 시스템)은 전동기로서 발전기를 가스터빈의 점화가능 속도까지 승속시키는 장치이다. 가스터빈이 점화를 하면, 일정속도 동안 같이 운전되다가 차단기에 의하여 구동 시스템은 발전기의 고정자로부터 분리되며, 이때 가스터빈 조속기는 속도제어를 시작하여 계통병입이 가능한 정격속도까지 승속하게 된다. 현장 시험된 발전기와 구동시스템 사양은 다음과 같다[2].

표 1 동기 발전기 및 SFC 시스템 데이터

Table 1 Synchronous generator and SFC system data

발전기 주요 데이터			
정격용량	230 MVA	Xd	2.04 P.U.
단자전압	18,000 V	Xq	2.14 P.U.
정격속도	3600 rpm	H	5.32 S
SFC 시스템 데이터			
정격용량	2.3 MVA	정격전압	2,100 V
정격전류	633 A	DC 전압	2,196 V
DC 전류	745 A	주파수	0-60 Hz

* Corresponding Author : Korea Electric Power Company Research Institute

E-mail : hsryu@kepri.re.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Chung-Nam University, Korea

Received : September 13, 2012; Accepted : April 2, 2013

2.1.2 여자시스템

구동시스템이 운전을 시작하기 전에 정지형 여자시스템은 회전자의 위치를 알아내기 위하여 순간적으로 전류를 계자에 주입한다. 이때 유기된 출력 단자 전압을 적분하여 로터의 위치를 찾아내게 된다. 또한 승속시 과도한 동기기 출력 전압을 방지하기 위하여 약계자 모드로 운전되며, 가스터빈이 점화되면, 여자시스템의 계자 차단기가 개방된다. 그리고 다시 가스터빈이 정격속도에 도달하면, 동기 발전기 출력 전압을 생성시키기 위하여 여자시스템이 동작하게 된다[4].

표 2 여자시스템 데이터

Table 2 Excitation system data

정격용량	592 kVA	입력전압	563 V
출력전압(Vf)	441 V	출력전류(If)	1,344 A
Ceiling 전압(Vc)	617 V	주파수	60 Hz

2.1.3 차단기

그림 1처럼 1대의 SFC 시스템으로 여러 대의 가스터빈 동기 발전기를 구동하기 위해서는 차단기가 필요하게 된다. 이때 다병렬로 연결된 차단기는 서로 인터록 시퀀스가 동작하고 있어서 상대방이 운전 중일 때는 절대로 투입하지 않게 설계되어 있다.

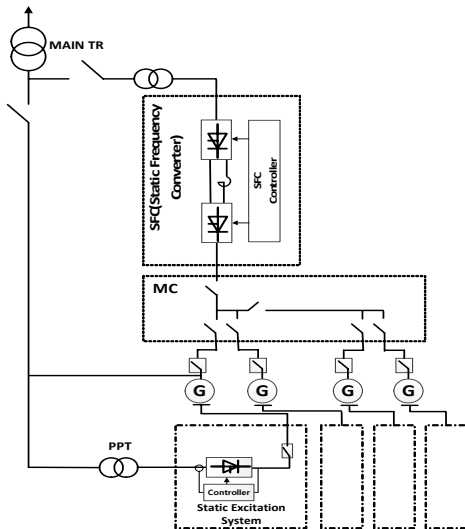


그림 1 다수개의 동기기와 연결된 SFC 시스템

Fig. 1 SFC system connected with several synchronous generators

2.2 대용량 동기기 구동시스템의 회로구성 및 점호방법

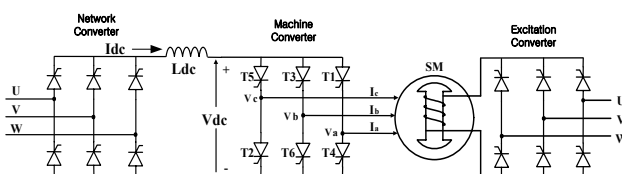


그림 2 LCI 시스템의 회로 구성

Fig. 2 Configuration of Load Commutation Inverter

LCI의 전력회로의 구성을 나타내면 그림 2와 같다. 계통측 컨버터(Network Converter)와 전동기측 컨버터(Machine Converter), 직류단 리액터(DC Link Reactor)로 구성된다. 전류형 인버터에서의 스위칭 동작 모드와 그때 전동기 각상에 흐르는 전류를 살펴보면 표 3과 같다[6].

표 3 전동기측 컨버터 스위칭 순서와 출력 전류의 관계
Table 3 Relation of switching sequence and output current

모드	mode1	mode2	mode3	mode4	mode5	mode6
전류	T6, T1	T1, T2	T2, T3	T4, T5	T5, T6	T6, T1
Ia	Idc	Idc	0	-Idc	-Idc	0
Ib	-Idc	0	Idc	Idc	0	-Idc
Ic	0	-Idc	-Idc	0	Idc	Idc

출력전류가 모두 '0'이 되는 상태는 존재하지 않고, 한번에 부하의 2상에 전류를 공급한다. 각 스위칭 소자는 120도 동안 도통되며, 표 3에서와 같은 6개의 다른 스위칭 모드를 갖는다. 출력전류는 120도 동안 도통하고 구형파의 형태를 취하게 되며 한 스위칭 모드는 60도 동안 동작한다.

기동시 전동기측 컨버터의 경우 인버터로써 동작하며 고정자 자속과 회전자 자속간의 상호관계 및 역률에 따라 위상각을 제어한다. 그러나 LCI 시스템의 경우 인위적인 신호에 의해 on은 가능하나 off는 불가능한 사이리스터를 사용하였다. 따라서 일반적인 전동기 구동과는 달리 운전영역이 크게 두 영역으로 나눌 수 있다. 첫번째 강제전류 모드(FCM : Forced Commutation Mode), 두번째는 자연전류 모드(NCM : Natural Commutation Mode)로 나뉘게 된다. 사이리스터의 턴 오프는 소자 양단에 역전압이 인가되어 소자에 흐르는 전류를 '0'이 되게 함으로써 이루어진다. 그러나 저속에서는 동기전동기의 역기전력이 작아 전동기측 컨버터 사이리스터에 턴 오프하는 역전압을 인가하기에 불충분하여 다음 스위치 모드의 전환이 힘들게 된다. 따라서 이 구간에서는 스위치 모드 전환 시 임의로 직류단 전류를 '0'으로 만들어 전환이 될 사이리스터를 턴오프 시킨다. 이러한 강제전류 구간은 정격 속도의 10% 운전 범위 내에서 되도록 작은 비율을 차지하도록 설정한다[8][9]. 동기전동기의 역기전력이 전동기측 컨버터 사이리스터를 턴오프 하기에 충분하면, 자연전류 모드로 동작한다.

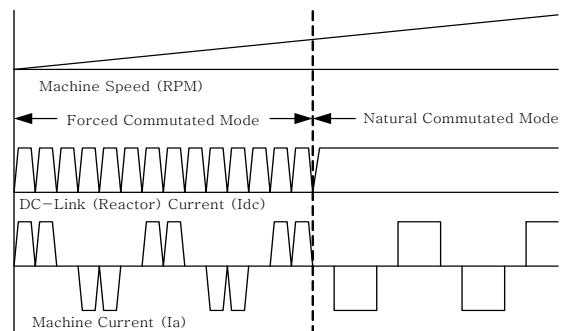


그림 3 저속도에서의 동기기 단자의 이상적인 전류파형

Fig. 3 Synchronous machine ideal currents at low speed

전동기측 입력 전류 I_a 는 직류단 리액터스 성분 때문에 거의 사각 형태가 되는데 그때의 전류값은 다음과 같다[6].

$$I_a = I_{dc} \times \sqrt{\frac{2}{3}} [A] \quad (1)$$

여기서, 계통측 컨버터에 의한 출력전압은

$$V_{dc} = 1.35 \times V_{uv} \times \cos(\alpha) [V] \quad (2)$$

이고, 전동기측 전압은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$V_{ab} = \frac{V_{dc}}{1.35 \times \cos(\beta - \mu/2)} [V] \quad (3)$$

이때, μ 는 LCI 시스템에서의 전류 중복각이다. 이때 회로의 손실은 무시하면, 전동기의 파워는 입력 전력과 같다.

$$P_m = V_{dc} \times I_{dc} = 3 \times V_a \times I_a \times \cos(\beta - \mu/2) [W] \quad (4)$$

또한, 전동기 토크는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_m = \frac{P_m (KW) \times 1000 \times 60}{Speed(rpm) \times 2 \times \pi} = \frac{P_m \times 9550}{speed(rpm)} [N \cdot m] \quad (5)$$

위 4-5식으로 부터 다음과 같이 전동기 토크와의 관계식을 얻을 수 있다.

$$T_m \propto I_a \times flux \times Motor \ power \ factor (\cos\phi) \quad (6)$$

2.3 LCI 시스템의 제어블럭

대용량 동기기 구동시스템의 주요 제어 블럭은 두 부분으로 나눌 수 있다. 그림 2에서처럼 부하 전류형 인버터는 계통측 컨버터와 전동기측 컨버터로 두개로 구성되어 있으며, 각기 다른 루프를 형성하고 있다. 제어루프는 전통적인 캐스캐이드 제어 형태를 갖고 있어 안쪽 루프에 전류제어기 바깥쪽에 속도 제어기로 되어있다. 동기 전동기의 토크는 수식 (6)에서처럼 직류단 전류, 변위율(Displacement Factor), 동기 전동기 자속에 비례하게 된다. 따라서 전류제어기는 직접 계통 컨버터의 직류 전압을 변동함으로써 동기기의 토크를 직접 제어할 수 있다.

$$T_m = k \times id \times \cos\phi \times \Psi (U_m/n) \quad (7)$$

T_m : 동기 토크, id : 직류단 전류
 $\cos\phi$: 동기기 기본과 역률, ψ : 동기기 자속
 U_m : 단자전압, n : 동기기 속도, k : 상수

β 제어블럭은 피드퍼워드 방식으로 동기 전동기의 토크에 맞게 미리 셋팅값 ($\alpha = 180^\circ - \beta$)로 설정한다. 점호 펄스는 회전자의 위치에 따른 전동기의 단자전압 출력에 맞게 발생된다. 인버터 측의 위상각 β 는 전류중복 시간, 싸이리스터

역회복 시간 등을 고려하여 설정하며, 일반적으로 직류단 전류(idx : 계통측 컨버터 출력전류)와 속도(nx : 전동기측 실제 속도)의 함수로서 결정된다. 동기기 출력 단자전압 제어 블럭 또한 캐스캐이드 방식으로 속도에 비례하여 동기기 전압이 출력되며, 이때 계자자속은 일정 값으로 유지된다.

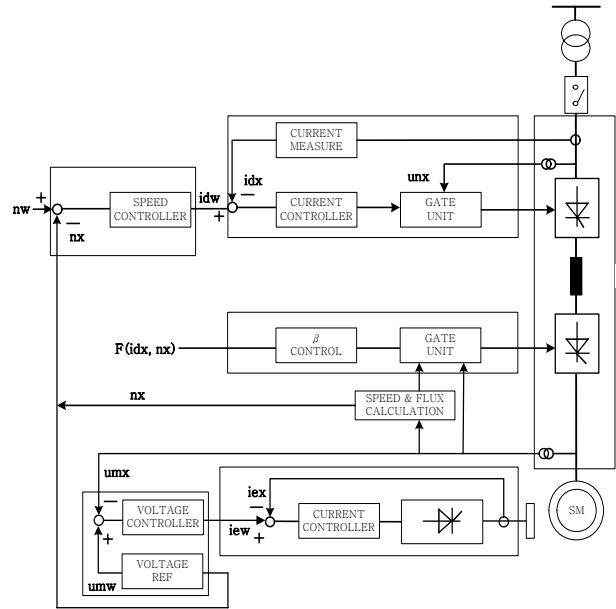


그림 4 제어 블럭도
 Fig. 4 Control block diagram

2.3.1 전동기측 컨버터 초기점호 및 자속제어

전동기측의 컨버터 6개 소자의 기동시 초기 점호방법은 그림 5와 그림 6에 나타나 있다. 초기 선간전압을 적분하여 보다 고조파가 적은 파형을 이용한다. 보통 자속제어라고 불리는 초기 강제전류를 위한 점호 방법은 싸이리스터 THI를 기준으로 할 때 V_{ca} 파형을 시간에 대하여 적분하여 자속(Ψ_{ca})을 얻고, (-)를 곱하여 최종 아크코사인 방식의 기준파형을 얻을 수 있다[5][7]. 이 기준신호에 전동기 컨버터 측의 β 제어 출력값을 비교하여 점호를 얻게 된다. 0-180까지 제어가 가능하여 전범위 영역 사용이 가능하다. β 제어 출력값은 그림 6처럼 최대, 최소값이 자속의 크기에 따라서 제한을 받게 되는데 그 수식은 다음과 같다.

$$\int V_{ab} dt + K\hat{i}_{ab} = \Psi_{ab} \quad (8)$$

$$\int V_{bc} dt + K\hat{i}_{bc} = \Psi_{bc} \quad (9)$$

$$\int V_{ca} dt + K\hat{i}_{ca} = \Psi_{ca} \quad (10)$$

$$\Psi_{MAX} = Peak(\Psi_{ab}, \Psi_{bc}, \Psi_{ca}) \quad (11)$$

$$Angle \ Max = \Psi_{MAX} \times 0.97 \quad (12)$$

$$Angle \ Min = \Psi_{MAX} - KI_{dc} - Margine \quad (13)$$

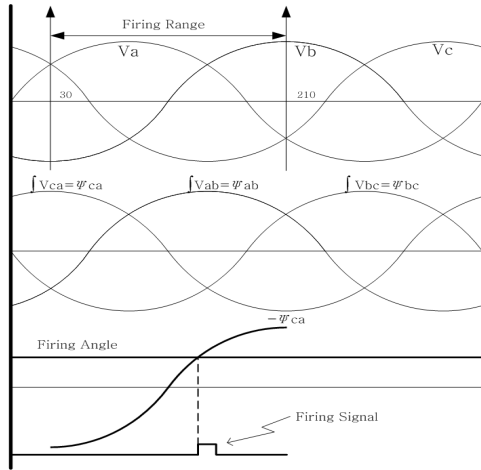
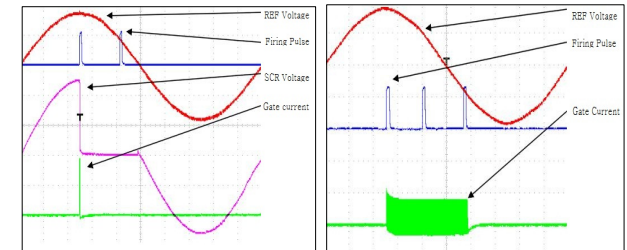
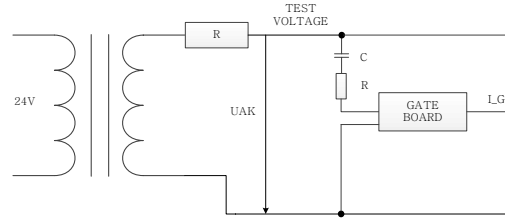


그림 5 전동기 측의 TH1 점호신호 발생 원리
Fig. 5 Firing principle of machine side TH 1



a) 계통측 컨버터 b) 전동기측 컨버터

그림 7 싸이리스터 시험 방법 및 점호펄스 파형
Fig. 7 Thyristor test method and firing pulse waveform

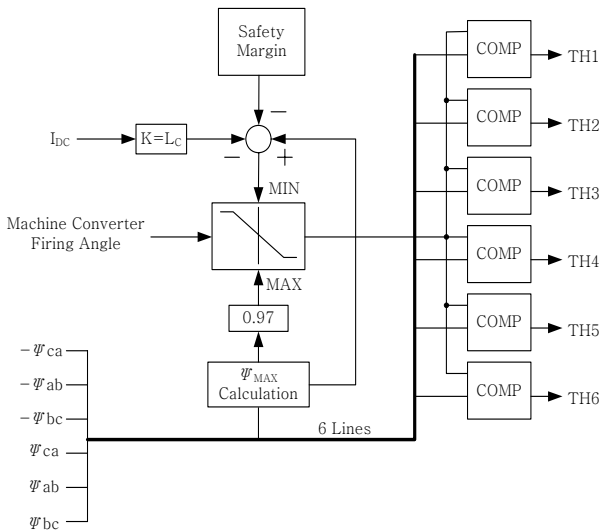


그림 6 전동기 측 6개의 싸이리스터 점호신호 블럭도
Fig. 6 Six thyristor firing circuit diagram of machine side

2.4 구동시스템의 주요 시운전 절차 및 결과

2.4.1 싸이리스터 점호 펄스 확인 시험

시스템이 현장에 설치된 후 각종 I/O 결선 확인 작업 후 본격적인 정지중 기능시험이 실시된다. 첫 번째로 실시되는 것이 직렬로 연결된 싸이리스터 도통시험이다. 보통 고전압 시스템은 싸이리스터가 직렬로 연결되는데, 소자를 보호하기 위하여 동시에 ON되는 것이 중요하다. 외부에 단상 24V AC 전원을 인가하여 각각의 싸이리스터 도통시험을 하게 된다. 그림 7처럼 a)는 계통측 컨버터의 도통과형을 나타내고 있고, b)는 전동기측 컨버터의 점호펄스 파형인데, 다펄스인 이유는 전동기측의 주파수보다 높은 계통측 컨버터의 점호신호에 따라서 인버터의 점호신호도 같이 도통시키기 때문이다.

2.4.2 계통측 컨버터 직류단 단락후 전류 응답 시험

두번째로 실시되는 시험이 직류단을 단락시켜 놓고 계통측 컨버터의 전류루프에 대한 응답시험이다. 이 시험은 부하의 변동에 따른 빠른 전류제어기의 특성을 시험하는 것으로서 0.15 → 0.25 P.U.로 기준신호 10% 변화를 주었을 때 100ms 이내에 목표치에 도달하는 것을 볼 수 있다. 전류 제어기는 프로그램에서 2ms 이내의 주기를 갖고 있다.

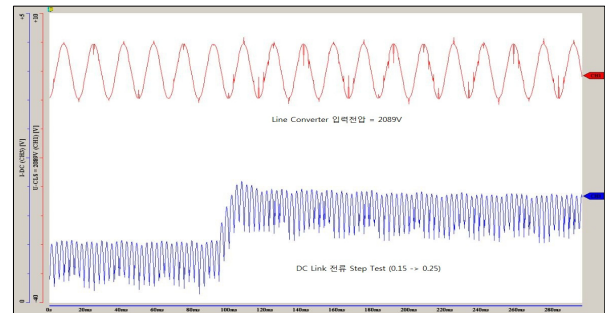


그림 8 직류단 전류 루프 응답 시험 파형
Fig. 8 DC current loop response test waveform

2.4.3 ICB Trip 시험

고전압 대전류 전력변환 시스템은 고장발생 시 과급효과를 줄이기 위하여 신속히 입력전원을 차단하여야 한다. 그림 9처럼 시스템의 중요 고장이 발생하였을 경우 제어기의 주 프로세서를 거치지 않고, FPGA 내에서 수십ns로 점호펄스 차단신호를 내보내며, 그 후에 주제어기에서 고장을 인식하고 입력차단기(Incoming Circuit Breaker)를 개방하게 된다. 싸이리스터 점호펄스 블록킹후 50ms 이내에 차단기가 개방된 것을 확인 할 수 있다.

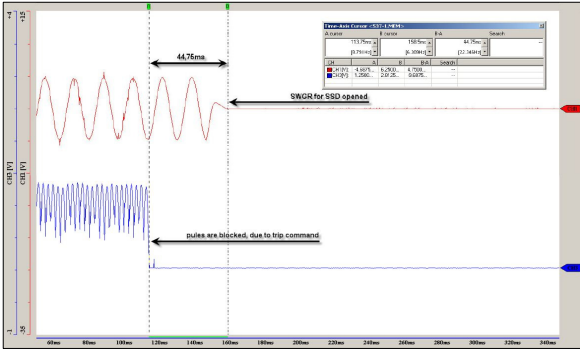


그림 9 고장 시 사이리스터 점화신호 블로킹 시험
Fig. 9 Thyristor firing signal blocking test

2.4.4 초기 Flux 연산 시험

구동 시스템은 초기 최대 가능토크로 기동하기 위하여 로터의 위치를 알아야 한다. 그림 10은 로터의 위치를 얻기 위하여 초기 자속 연산을 한 파형으로서 먼저 계자에 전류를 인가하면, 고정자에 유기기전력이 발생하는데 이 성분을 적분하여 자속파형을 얻게 된다. 그때 삼상 자속의 파형으로 회전자의 위치를 알 수 있다. 이 시험은 여자전류 정격의 5-10% 스텝신호를 주어서 자속이 정확히 계산되는지 여러 번 반복하여 회전자 위치를 똑같이 얻는지 확인하게 된다.

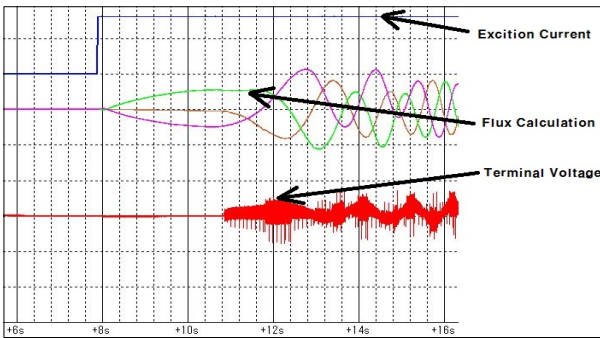


그림 10 여자전류, 초기 Flux 연산 및 동기기 단자전압
Fig. 10 Excitation current, initial flux calculation and synchronous terminal voltage

2.4.5 강제전류에서 자연전류 모드전환 시험

LCI 시스템은 초기 기동시에 강제로 사이리스터에 흐르는 전류를 “0”를 만들어 턴 오프 되게 한다. 보통 강제전류 모드제어는 동기기의 역기전력이 생성되어 자연전류가 가능할 때 모드 전환이 발생하는데, 보통 정격속도의 10%가 되었을 때 안정적으로 사이리스터가 자연 턴 오프 할 수 있다. 아래 파형은 실제 기동시 정격 속도의 10%에서 강제전류에서 자연전류 모드로 전환될 때의 파형을 나타내고 있다. 파형에서 알 수 있듯이 계통측 컨버터의 사이리스터를 턴 오프하여 직류단 전류를 “0”까지 하여 전동기측 컨버터 사이리스터가 자기유지 전류이하로 떨어져 턴 오프 됨을 알 수 있다.

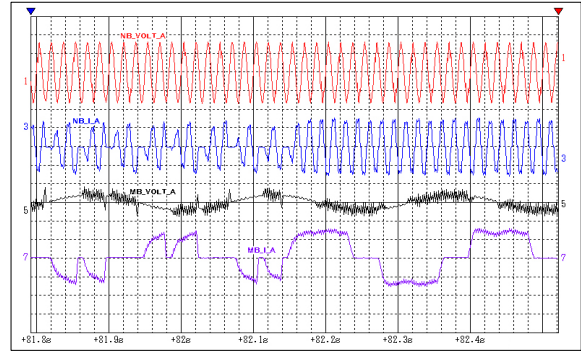


그림 11 강제모드에서 자연모드로의 전환시 LCI 입출력 전압/전류 파형
Fig. 11 LCI Input/output voltage/current waveform of forced commutation to natural commutation Mode change

2.4.6 기동 시험

정지 중 시험이 완료되면, 승속시험을 하게 된다. 구동 시스템은 동기 발전기를 전동기로 일정속도(2500rpm)까지 상승시키는데, 그림 12는 측정된 속도, LCI 시스템의 직류단 전류 그리고 여자 전류를 나타내고 있다. 초기위치를 찾은 후에 강제전류모드로 운전을 시작하게 된다. 동기기가 일정속도(보통 6Hz)이상이 되면, 자연전류 모드 운전이 가능할 정도로 출력파형이 형성되고, 제어 로직은 강제모드->자연모드로 운전을 시작하여 동기기를 목표 속도값에 도달하도록 제어하게 된다. 초기 목표속도는 가스터빈의 퍼지모드(Purge Mode) 속도값까지 상승한다. 퍼지는 가스터빈 및 연소기내의 이물질에 대한 청소작업이라고 보면 된다. 보통 수분동안 지속되며, 퍼지가 끝나면 가스터빈 연소가능 속도까지 감속한 후 점화되면, 다시 승속을 하게 된다. 동기기가 목표속도에 도달하기 직전에 DC 전류와 여자전류를 감소시켜, LCI 시스템은 정지되고, 이때부터 자발적으로 연소하여 정격 속도까지 승속한다.

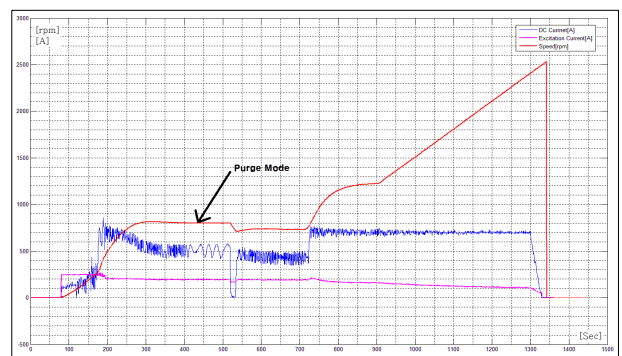


그림 12 기동시의 동기기 속도, 직류단 전류, 여자전류
Fig. 12 Synchronous speed, dc current, excitation current during start up

3. 결 론

본 논문에서는 대용량 동기 발전 전동기 속도제어 시스템에 널리 이용되고 있는 구동 시스템의 기동방법을 분석 하

였다. 국내 A-발전소에 적용된 시스템은 위치/속도 센서리스 방식의 구동 시스템으로 가장 최신의 183MW 동기기 구동용 부하 전류형 인버터이다. 계통측 컨버터와 전동기측 컨버터의 제어원리와 대형 동기기에 대한 제어방식을 상세히 기술하였다. 중요시험으로는 전류응답시험, 비상정지시험, 센서리스 제어를 위한 초기 자속 연산시험, 전부하 정격속도가속시험 등이 이루어 졌으며 시험결과 파형을 분석하고, 설명하였다. 향후 본 시험결과는 국내에서 개발되는 LCI 시스템의 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.



차 한 주 (車翰周)

1988년 서울대학교 전기공학과 졸업.
1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station (공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 부교수

References

[1] Hoseon Ryu, Hanju Cha, "Commissioning Test of LCI System for 183MW Large Synchronous Machine", KIEE Summer Annual Conference 2012.
[2] "SFC Operation and Maintenance Manual", ABB/GE, 2002/2010.
[3] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications, and Design", John Wiley & Son, Inc., pp.143-146, 1995.
[4] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc, pp. 500-523, 1994.
[5] US patent "Flux Feedback Firing Control for a Load Commutated Inverter", 4449087, 1987, 5
[6] David Finney, "Variable frequency AC motor drive systems", peter Peregrinus LTD, pp.202, 1988.
[7] Beat Mueller, Thomas Spinanger, and Dieter Wallstein, "Static Variable Frequency Starting and Drive System for Large Synchronous Motors", IEEE IAS 1979, 13B, pp429-438.
[8] O. Kolb, F. Pender, V. Suchanek, "Static starting equipment for gas turbosets", Brown Boveri REV. 66 1979 (2) 104-112.
[9] F. Peneder, R. Lubasch, A. Vonmard, " Static equipment for starting pumped storage plant, synchronous condensers and gas turbine sets", Brown Boveri Rev. 61 1974 (9/10), pp. 440-447.

저 자 소 개



류 호 선 (柳皓善)

1993년 충남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한전전력연구원 선임연구원