

가스터빈 기동장치 센서리스 속도제어로직 성능실험

Performance Test of Sensorless Speed Control Logic for Gas Turbine Starter

류 호 선[†] · 문 주 영^{*} · 이 의 택^{*} · 이 주 현^{*} · 강 윤 모^{**} · 박 만 기^{***}

(Hoseon Ryu · Jooyoung Moon · Uitaek Lee · Joohyun Lee · Yunmo Kang · Manki Park)

Abstract - The gas turbine static starter rotates the stationary synchronous machine by the interaction of the rotor and the stator. The detection from the initial position of the rotor has been an important issue to drive with optimum torque. Previously, the gas turbine starter was used by attaching the encoder to the synchronous machine, but the position and velocity of the rotor have been estimated by sensor-less method until recently due to the difficulty in attaching and detaching and damage caused by the shaft voltage noise. In this paper, Rotor initial(stationary state) position estimation, forced commutation control(speed less than 10%), and natural commutation control(speed more than 10%) method using magnetic flux with integrated terminal voltage were presented and the sensor-less speed control performance was verified. As a result of making and evaluating the 29 kVA synchronous machine and the starting device, the performance of each control mode was satisfactory. Furthermore, the applied technology is expected to be used for the development of the gas turbine starter of tens of MW class and the field application.

Key Words : Load commutated inverter, Excitation system, Sensorless speed control

1. 서 론

발전산업용 가스터빈 발전기는 터빈과 압축기, 그리고 동기발전기가 일축형으로 구성된 브레이튼사이클 발전방식을 사용하고 있다. 이 방식에서 필요로 하는 가스터빈의 회전력을 얻는 방법은 초기 터빈로터를 직접 구동시키는 토크컨버터를 사용했으나, 1990년대부터 전력변환기술의 급속한 발전으로 대형 동기발전기를 전동기 형식으로 구동하는 기술이 적용되면서 지속적인 기술개발이 이어지고 있다. 대용량(수 백MW) 가스터빈 발전기는 증기터빈 발전기와 달리 압축기와 한 몸체로 구성된 가스터빈 로터가 일정속도 이상의 회전상태가 되어야 압축되는 공기와 LNG연료의 혼합연소가 가능하다. 일반적인 가스터빈 발전기의 운전특성은 정격속도 3600rpm 기준으로 360~1,500rpm(대략 10%~40%)까지 상승이 되었을 때 LNG연료 점화와 연소 유지가 가능한 것으로 알려져 있으며, 그 후 속도특성은 공급되는 연료량에 의한 연소가스와 기동장치에 의한 동기회전력에 따라 결정된다. 기동장치의 역할은 정격속도의 대략 90% 시점까지이며, 정격속도까지는 연소가스에 의한 자력으로 도달된다. 가스터빈 발전기의 초기기동을 위한 기동장치는 현재 사이

리스터 전력반도체소자를 활용한 정지형 부하전류형 인버터 시스템이 상용화되어 많이 운전되고 있다[1, 2]. 이 시스템은 정지상태에 있는 동기기를 회전자와 고정자의 상호작용에 의하여 회전시키며, 최대 토크로 구동하기 위하여 회전자의 초기위치 감지가 중요한 문제로 대두되어 있다. 초기 제품은 회전자의 위치를 검출하는 엔코더를 동기기에 부착하여 사용하였으나, 탈부착의 어려움, 축전압, 노이즈에 의한 소손 등으로 최근에는 엔코더 없는 센서리스로 회전자 위치 및 속도를 추정하고 있다[3-6]. 국내에서는 2015년부터 국산화 개발이 시작되어 수행되고 있으며, 10MW급 시작품이 2019년 A발전소에 현장 적용 예정으로 지속적인 실험이 수행되고 있다. 본 논문에서는 초기 기동시의 고조파 성분을 최대한 줄이기 위하여 단자전압을 적분한 자속과 일정 기율기까지는 고역필터를 이용하여 회전자 초기(정지상태) 위치 추정, 속도추정을 하였다. 부하전류형 인버터를 사용하는 기동장치 특성상 강제전류(強制轉流)제어(속도 10%미만), 자연전류(自然轉流)제어(속도 10%이상)방법도 제시하였다. 제안한 각각의 주요 제어블럭에 대하여는 매트랩 시뮬레이션을 실시하여 1차 검증하였고, 실험을 위하여 29kVA 동기기와 유도기 및 기동장치를 제작하여 성능평가 하였다.

[†] Corresponding Author : Korea Electric Power Company Research Institute, Korea

E-mail : hoseon.ryu@kepco.co.kr

* Korea Electric Power Company Research Institute, Korea

** Korea Western Power Company, Korea

*** Korea Midland Power Company, Korea

접수일자 : 2017년 4월 19일

수정일자 : 2017년 5월 23일

최종완료 : 2017년 5월 25일

2. 본 론

2.1 회전자 초기위치 추정제어 방법 및 구현

가스터빈 동기기 초기기동은 고정자권선에 인가되는 3상 부하전류형 인버터의 6개 사이리스터 회로 중 각기 다른 위상에서의 양(+)과 부(-) 측의 사이리스터 한 쌍이 도통함으로써 시작되고, 회전자의 위치에 따라서 도통되는 사이리스

터는 달라진다. 즉, 회전자의 위치에 따라서 고정자 자속과 계자전류에 의한 회전자계에 의하여 최대토크를 발생하도록 스위칭되어야 한다. 만일 회전자의 위치에 따라서 정확하게 스위칭되지 않는다면 낮은 토크 또는 원하지 않는 방향으로 회전자가 움직이게 된다. 동기기 정지 중 회전자를 최대토크로 최초 기동하는 가장 좋은 방법은 회전자 위치를 알 수 있는 엔코더를 설치하는 것이다. 이 방법은 20여년 전부터 거의 모든 제작사에서 사용하던 방법으로 아직도 광범위한 속도제어에 이용되고 있다. 그러나 회전자 위치센서는 대용량 동기기 축에 설치의 어려움, 노이즈에 의한 오동작 발생, 축전압에 의한 소손 등으로 이용이 점차 줄어들고 있고 센서리스 회전자 위치추정 방법이 최근에 개발되고 있다. 여러 센서리스 회전자 위치추정 방법 중 동기기의 고정자 전압의 위상으로부터 회전자의 위치를 추정하는 것이 많이 고려되고 있다. 이 방법은 동기기의 속도가 낮을 때 기전력에 의한 단자전압이 너무 작아서 정확한 검출하는데 한계가 있으나, 다양한 방법을 사용하여 극복할 수 있다. 그림 1은 가스 터빈 기동장치 및 여자시스템의 연결 개략도이다. 타여자 방식인 대형 동기기의 경우 고정자와 회전자 자속생성을 위하여 일정전류를 공급하여야 하므로 고정자에는 회전자속 생성을 위하여 교류를 회전자에는 직류를 공급하게 되어있다.

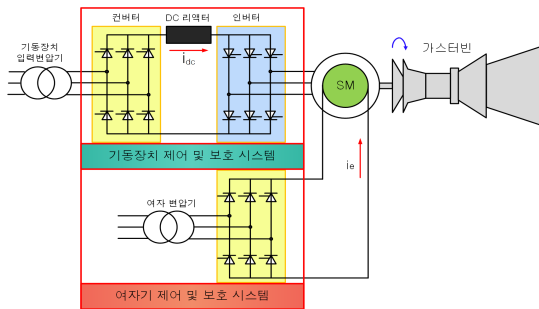


그림 1 가스터빈 동기기 기동장치 및 여자시스템
Fig. 1 Starting device and excitation system for gas turbine synchronous generator

2.1.1 회전자 위치에 따른 동기기 단자전압 위상변화

가스터빈 기동장치인 부하전류형 인버터는 싸이리스터에 점호펄스를 인가하기 전에 회전자의 위치정보를 정확히 알고 있어야 한다. 동기기 회전자의 위치를 알기 위하여 동기기의 계자에 전류를 인가하면, 전류의 변화량에 따라서 3상 동기기에 기전력이 발생하게 된다. 이때 발생하는 기전력은 회전자의 위치에 따라서 위상이 달라지게 되는데, 단자전압 위상에 따라서 부하전류형 인버터 싸이리스터를 스위칭 하게 된다. 3상 동기기 고정자 전압방정식은 식(1)과 같이 표현될 수 있다[7, 8].

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\Psi_{abc}}{dt} \tag{1}$$

V_{abc} : 고정자 a, b, c상 단자전압
 i_{abc} : 고정자 a, b, c상 전류
 R_s : 고정자 저항 Ψ_{abc} : 고정자 권선 쇄교 자속

Ψ_{abc} 는 고정자 전류에 의해 발생한 자속 Ψ_{abc-s} 과 회전자 전류에 의한 계자자속이 고정자 권선에 쇄교하는 자속 Ψ_{abc-f} 의 합으로 식(2)와 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \Psi_{abc} &= \Psi_{abc-s} + \Psi_{abc-f} \\ &= L_s(\theta) i_{abc} + L_f(\theta) i_{fd} \end{aligned} \tag{2}$$

L_s : 고정자 인덕턴스 L_f : 고정자와 회전자 상호인덕턴스

기동장치는 회전자에 계자전류만 공급하고 아직 고정자 전류가 흐르지 전이므로 $i_{abc} = 0$ 이다. 식(1)과 (2)에 의하여 동기기 단자전압은 회전자 위치에 따라서 계자자속이 고정자 권선에 쇄교하는 양이 달라지므로 상호 인덕턴스 L_f 의 크기도 변화된다. 식 (1)과(2)에 의하여 3상 동기기 단자전압은 식(3)과 같이 회전자의 위치와 계자자속의 변화량에 따라서 달라진다.

$$V_{abc} = \frac{d\Psi_{abc}}{dt} = L_f(\theta) \frac{di_{fd}}{dt} = L_f \frac{di_{fd}}{dt} \sin\theta_{abc} \tag{3}$$

(3)식에 의하여 초기 기동 시 부하전류형 인버터의 싸이리스터는 모두 오프상태를 유지하고, 계자전류 변화에 따른 동기기 단자전압을 관찰하여 최대 토크 발생할 수 있는 싸이리스터 쌍을 찾아서 스위칭 시퀀스에 의하여 점호한다. 그림 2는 고정자 각 상을 기준으로 회전자 N극과의 각도를 표시하고 있다. 만일 회전자 위치가 각 상을 기준으로 그림 2와 같은 상태에서 계자전류를 상승시킨다면 각 상에는 식 (3)에 의하여 그림 3과 같은 단자전압이 발생된다.

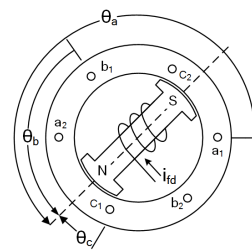


그림 2 고정자 a, b, c 상과 회전자 위치
Fig. 2 Stator a, b, c phase and rotor position

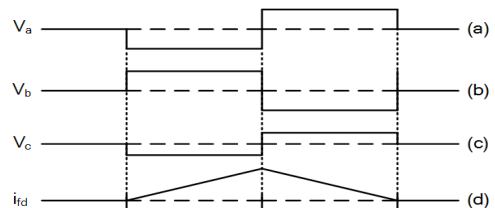


그림 3 계자전류 상승/하강에 따른 단자전압
Fig. 3 Terminal voltage as to the field current ramp applied to the rotor

2.1.2 최대 토크 발생을 위한 사이리스터 점호순서

부하전류형 인버터는 동기기 초기기동을 위하여 최적의 토크로 운전되어야 한다. 강제전류 제어에서 동기기 측 인버터 점호각은 180°로 하며, 계자전류는 최대토크를 위해 약 계자로 제어하지 않을 때는 일정전류제어를 하고 있으므로 일정자속을 가진 영구자석 형태로 표현할 수 있다. 동기기 토크는 고정자 자속과 회전자 자속의 크기, 그리고 자속각에 의하여 결정된다. 고정자 자속과 회전자 자속의 크기는 일정 제어를 하고 있으므로 최대 토크를 발생하기 위해서는 θ 값이 90°가 되도록 하는 것이 최선이다. 그러나 사이리스터 쌍이 60° 간격으로 전류되므로 평균 토크를 최대로 하기 위하여 120°~90°~60°로 운전되는 것이 최적이다. 그림 4는 회전자의 위치가 단자전압 V_a 기준으로 30°에 위치에 있을 때 최적의 토크를 발생하기 위해서 인버터 사이리스터 3, 4 번이 스위칭 ON 되어야 하고 반시계 방향으로 회전을 나타내었다. 표 1은 회전자 위치에 따른 단자전압 극성으로, 회전자 위치에 따라서 결정된 사이리스터 스위칭 번호 쌍을 나타내고 있다.

$$T_m = K \times \Psi_s \times \Psi_r \times \sin\theta \quad (4)$$

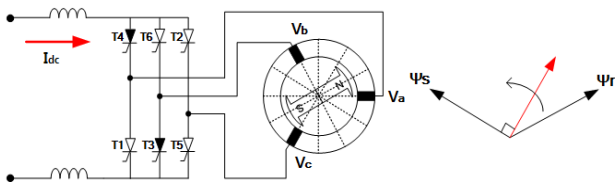


그림 4 회전자 위치와 고정자 전류 경로
Fig. 4 Path of starter current and position of rotor

표 1 최대 평균토크를 위한 사이리스터 스위칭 번호
Table 1 Thyristor switching number for Max. average torque

회전자 위치	Vac	Vba	Vcb	Ψ_α	Ψ_β	Thy No.
30°~90°	+	-	+	+	-	T3, 4
90°~150°	+	-	-	+	-	T4, 5
150°~210°	+	+	-	+	+	T5, 6
210°~270°	-	+	-	-	+	T6, 1
270°~330°	-	+	+	-	+	T1, 2
330°~30°	-	-	+	-	-	T2, 3

2.2 기동장치 강제전류제어 방법

사이리스터 턴-오프 방법은 일반적인 전력반도체소자와 다르게 스위치의 애노드와 캐소드 사이에 전류가 역으로 흐를 정도의 역전압을 인가하거나 소자에 전류가 흐르지 않도록 하여야 한다. 하지만 정지 상태에서 초기기동을 하는 동기기의 경우 저속에서 유도되는 역기전압이 작아 동기기 측과 연결된 인버터 사이리스터 턴-오프가 어렵고 다음 스위치로의 전환이 힘들게 된다. 따라서 이 구간에서는 스위칭 전환 시 강제적으로 컨버터에서 공급되는 전류를 0[A]로 만들어서 인버터의 사이리스터 턴-온 상태를 강제로 턴-오프 시키는 것이다. 강제전류제어 시 직류단 전류를 0[A]로

만드는 방법으로 컨버터 제어기는 직류링크단에 역전압이 인가되도록 점호한다[8]. 동기기의 정지상태에서 10% 미만의 속도구간에서는 기전력이 작고 고조파 함유율이 높을 뿐만 아니라 상대적으로 고정자 전압이 작기 때문에 정확한 회전자 위치가 추정이 어려워 자속추정 방식을 사용하였다. 그림 5는 3상 고정자 전압과 전류로 회전자 측변환 후 적분하여 자속을 계산하는데, 필터효과를 볼 수 있다. 또한, 자속은 입력과형을 90° 지연시키는 효과가 있어서, 다시 자속을 3상 전압으로 측변환을 하면 90° 지연이 발생한다. 전체적으로는 180°를 지연시킨 단자전압이 생성되는데, 이 과정을 다시 180° 반전시키면 입력과형과 동상인 비교적 정형과에 가까운 파형을 얻을 수 있고, 강제전류제어에서 회전자 위치를 알 수 있다.

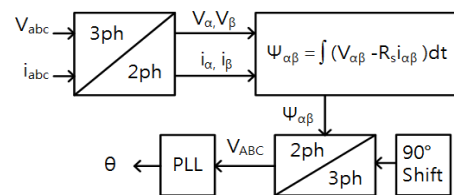


그림 5 자속연산을 사용한 회전자 위치추정
Fig. 5 Rotor position estimation using flux calculation

2.3 기동장치 자연전류제어 방법

정격속도 10% 이상에서는 단자전압이 동기기 측에 연결된 인버터 사이리스터를 턴-오프하기에 충분하여 자연전류 모드로 동작한다. 그림 6은 그림 4의 사이리스터 T1이 턴-온 되어있는 가운데 사이리스터 T3를 턴-온 함으로써 사이리스터 T1에서 T3으로 전류되는 과정을 보여주고 있다. 사이리스터 T3를 턴-온 시키는 시점에서 V_a 가 V_b 보다 크기 때문에, 사이리스터 T1에 흐르는 전류는 감소하고 사이리스터 T3에 흐르는 전류는 증가한다. 두 개의 사이리스터가 동시에 턴-온 되어 있는 구간 즉, 중복각(Overlap angle)구간이 존재한다. X점에 도달하기 전까지 사이리스터 T1이 턴-오프 되지 않는다면 회로에 큰 단락 전류가 흐른다. X점에 사이리스터 T3이 충분한 시간을 가지고 턴-온 되어 사이리스터 T1에 흐르는 전류가 0[A]가 되는 시간과 사이리스터의 역지회복능력을 가질 수 있는 시간을 보장해야 한다 [9, 10].

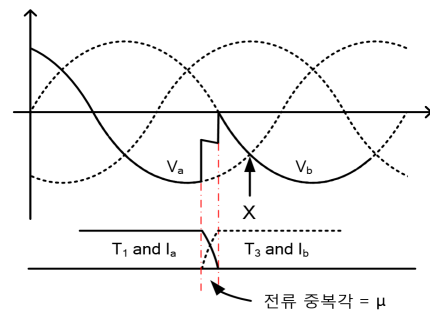


그림 6 자연전류 전류 중복각
Fig. 6 Overlap angle of natural commutation

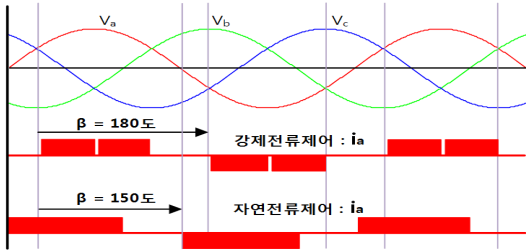


그림 7 상전압, 강제 및 자연전류 시의 단자전류 i_a
 Fig. 7 Phase voltage and Terminal current i_a during forced and natural commutation

2.4 기동장치 센서리스 속도계산 방법

동기기 기동장치의 센서리스 속도계산에 대한 계산식은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 동기기 고정자 전압과 전류를 정지좌표 변환한 후 자속을 계산한다. 자속계산은 부가적으로 저속에서 고조파 및 노이즈에 대한 필터 기능을 함으로써 보다 정현파에 가까운 파형을 얻을 수 있다. 정지좌표에서 자속 $\Psi_{\alpha\beta}$ 의 주파수 성분은 PLL 등의 여러 방법으로 추출할 수 있는데, 본 논문에서는 일정 기울기를 가진 고역 필터를 사용하여 주파수 변화분만을 추출하는 방식을 사용하였다. 이 방법의 장점은 초기 기동 시 자속계산에서 오프셋이 존재하게 되는데, 주파수 성분만을 추출하므로 오프셋에 강한 장점이 있다. 또한, 취약하다고 생각되는 고조파 및 노이즈 부분도 이미 단자전압, 전류로부터 자속계산 시 적분값을 취하였기 때문에 비교적 정현파에 가까운 파형을 사용한다고 볼 수 있다.

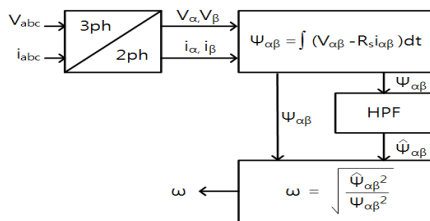


그림 8 센서리스 속도추정 블럭도
 Fig. 8 Block diagram of sensorless speed estimation

2.5 기동장치 제어로직 해석

그림 9의 동기기 기동장치 제어블럭은 전통적인 캐스케이드 제어방식을 사용한 형태를 갖고 있으며, 내부 루프에 전류제어기, 외부에는 속도 제어기를 두고 있다. 동기기의 토크는 식(5)와 같다[11, 12].

$$T_m = k \times i_{dc} \times \cos\phi \times \Psi (= V_{abc}/n) \tag{5}$$

T_m : 동기기 토크 i_{dc} : 직류단 전류
 $\cos\phi$: 동기기 기본파 역률 Ψ : 동기기 자속
 V_{abc} : 단자전압 n : 동기기 속도 k : 상수

동기기 측 인버터 위상점호각은 속도와 직류링크단 전류의

크기에 따라서 전류중복각이 변화되므로 이 값과 비례하게 마진을 주도록 하였다. 그래서 인버터 제어는 일정값 제어로 거의 150도 구간에서 점호하고 있다. 컨버터는 선간전압을 검출하여 전원전압과 동기된 기준각을 설정하고, 전류제어기 출력점호각에 따라서 6개의 사이리스터에 점호신호를 출력한다. 속도추정부의 출력신호 Nx부터 동기기 속도와 속도지령치의 오차를 "0"으로 수렴하는 비례-적분제어기로 구성하였다. 이의 출력은 동기기 토크와 연관되는 직류링크단의 전류지령치가 된다. 마찬가지로 전류제어기는 속도제어기로부터의 출력과 직류링크단의 전류값의 오차를 "0"으로 수렴하도록 비례-적분제어기로 구성된다. 동기기 출력 단자전압 제어블럭은 회전자 위치 추적을 위하여 사용되었으며, 속도 증가에 따라서 약제자 제어가 되게 하였다.

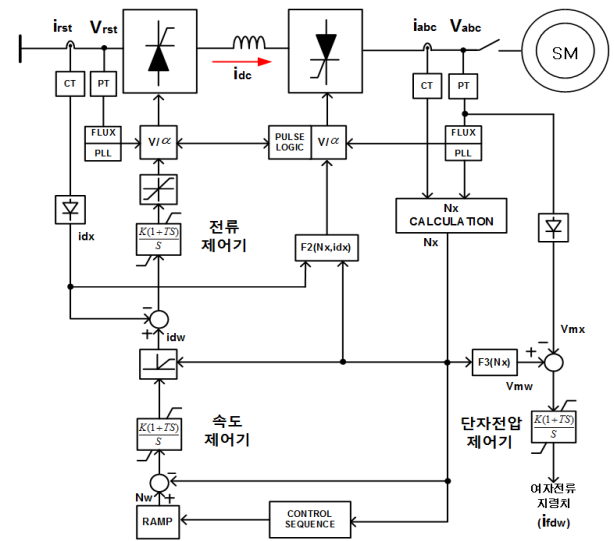


그림 9 기동장치 제어블럭도
 Fig. 9 Control block diagram of starter

2.6 기동장치 회전자 위치 및 속도추정 시뮬레이션

기동장치 주요 제어블럭의 성능은 매트랩 시뮬레이션을 실시하여 사전 검증하였다. 그림 10은 기동장치의 주요 제어부분인 회전자 위치 및 속도추정 시뮬레이션 블럭도를 나타내고 있다. 동기기 단자전압은 필터를 거친 후 속도연산 및 자속연산 블럭으로 입력되며 그림 8에서처럼 속도 상승에 따라서 주파수가 계산이 된다. 연산된 자속은 그림 5와 같이 제로 크로싱 신호를 검출하게 된다. 그림 11은 시뮬레

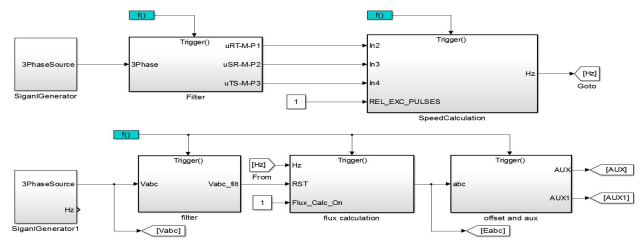


그림 10 회전자 위치 및 속도추정 시뮬레이션 블럭도
 Fig. 10 Simulation block diagram of rotor position and speed estimation

이전 결과인 속도상승에 따른 단자전압 파형, 자속연산 파형, 제로크로싱 신호와 연산된 속도 추정값을 나타내고 있다.

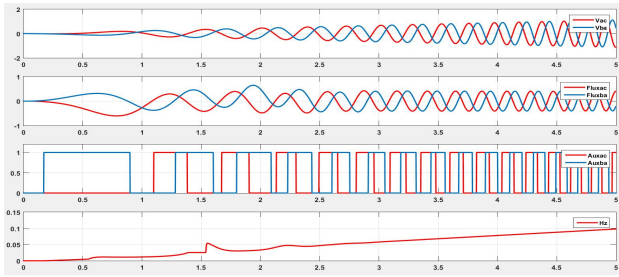


그림 11 회전자 위치 및 속도 시뮬레이션 파형
 Fig. 11 Simulation waveform of rotor position and speed estimation

2.7 기동장치 및 실험설비

그림 12는 왼쪽부터 기동장치를 구성하는 제어패널, 컨버터 및 인버터 패널, 여자시스템 패널이다. 기동장치 부하실험 대상이 되는 가스터빈 발전기를 모의한 유도기와 동기기, 이를 부하모의하기 위한 계통 회생형 인버터는 네 번째 판넬과 같이 제작하였다. 실험설비에 대한 기술규격 및 실험조건은 표 2로 알 수 있다. 기동장치 제어기는 광이더넷으로 보드 간 통신할 수 있고, HMI(panel PC)로 외부에서 동작시킬 수 있게 하였다. 제어에 필요한 전원 측 또는 동기기 측의 단자전압과 전류, 직류 측의 전압과 전류는 전압 PT와 전류 CT로 측정하게 하였다. 전원 측 변압기는 380V/190V의 Δ -Y 결선, 직류 리액터는 두 개의 5mH를 배치하여 10mH의 크기를 사용하였다.

그림 13은 제어로직 실험을 위하여 축소형으로 제작된 29kVA 동기기-유도기 실험설비이다. 동기기는 4극 돌극형 타여자 방식을 사용하였고, 유도기와 동기기 속도측정을 위하여 엔코더가 부착되었다. 부착된 엔코더로 실제속도를 계



그림 12 기동장치 프로토타입 실험설비 시작품
 Fig. 12 Initial product of prototype starter test equipment

표 2 29kVA 동기기 사양
 Table 2 29kVA synchronous machine specification

정격전압	380V	주파수	60Hz(1800rpm)
정격출력	29kVA	계자전압	21V
계자전류	35A	d.q 리액턴스	48.9mH, 29.3mH

산하고, 센서리스로 속도 추정값과의 비교실험을 실시하였다.

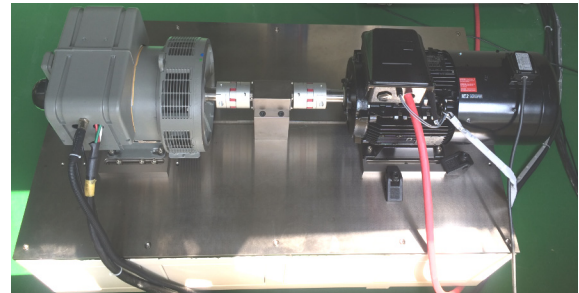


그림 13 실험대상인 29kVA 동기기 및 유도기
 Fig. 13 29kVA Synchronous and induction Machine for test

2.8 기동장치 실험결과

프로토타입으로 제작된 기동장치 제어로직은 실제 현장에서 사용이 가능할 정도로 상세하게 코딩되었다. 모든 제어로직은 기능블럭형 구조로 되어 있으며, 제어변수를 외부에서 취출하여 분석할 수 있도록 8채널의 아날로그 출력포트가 구성되어 있다. 동기기 회전자의 센서리스 초기위치 감지, 강제전류제어와 자연전류제어의 성능실험을 진행하였고, 그림 14는 동기기 정지 중 초기기동 시 표 1에 의하여 삼상 선간전압을 이용하여 자속을 계산하고, 다시 축변환을 이용하여 선간전압으로 전환시켜 비교적 고조파 함유율이 적은 기동신호를 만든 파형을 나타내고 있다. 계자전류 상승시의 변화율에 의하여 기전력이 고정자에 유기되어 나타난 것을 알 수 있다. 그림 15는 초기위치 추정 후 점호를 시작하여 기동하는 파형을 나타내고 있다. 초기 10%이하의 속도에서는 강제전류 제어로 직류링크단 전류의 단속이 발생하며, 저속에서는 단자전압 파형에 상당한 고조파가 함유되는 것을 알 수 있었다. 그림 16은 강제전류 기동 시 회전자의 위치가 정확하게 추정되었는지를 확인하기 위하여 회전자 위치와 V_{ac} 기준으로 인버터 싸이리스터 T1의 점호펄스가 발생하는 것을 측정하였다. 파형에서 알 수 있듯이 강제전류 인버터 점호신호는 180° 간격의 일정값 제어를 하고 있다. 그림 17은 동기기 속도가 10% 이상이 된 후 자연전류제어로 운전되다가 사용자의 정지명령에 의하여 강제 정지되는 파형을 나타내고 있다. 그림 18은 제어로직에서는 정지명령에 의하여 컨버터의 전류제어 출력신호 점호각을 150°로 하여 리액터에 남아있는 잔류자기를 “0” 전류로 한 후 안정적으로 전원 입력 측 차단기를 개방하는 실험파형이다. 이때 기동장치의 안정적인 운전을 위하여 여자전류 출력은 컨버터 전류가 최소가 되는 일정 시간 후에 차단기 개방과 함께 정지한다. 그림 19는 기동장치 성능평가 중 가장 중요한 요소 중의 하나인 초기 기동시의 실제 회전자 위치와 추정 회전자 위치의 오차를 나타내고 있다. 실제 회전자 위치는 축에 엔코더를 설치하여 V_{ac} 기준으로 0~2 π 를 계산하였고, 추정값도 V_{ac} 기준으로 제로 크로싱 신호로 연산되게 하였다. 실제값과 추정값의 오차는 초기 기동시에는 10% 차이를 보이고 있으며, 속도가 증가됨에 따라서 오차는 1% 이하로 급속히 감소됨을 알 수 있었다.

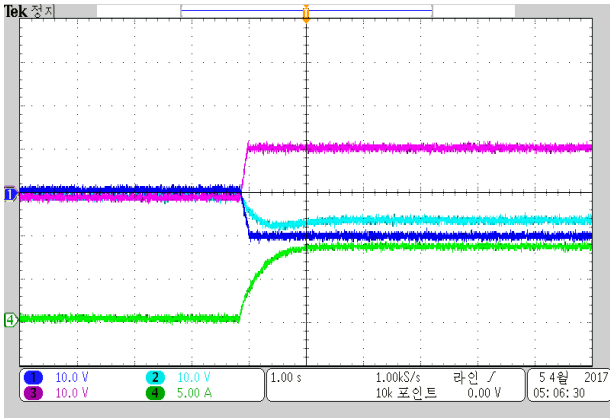


그림 14 회전자 초기위치 추정, (ch1) 연산된 단자전압 V_{AC} (ch2) 연산된 단자전압 V_{BA} (ch3) 연산된 단자전압 V_{CB} (ch4) 여자전류 i_{fd}

Fig. 14 Initial position estimation of the rotor

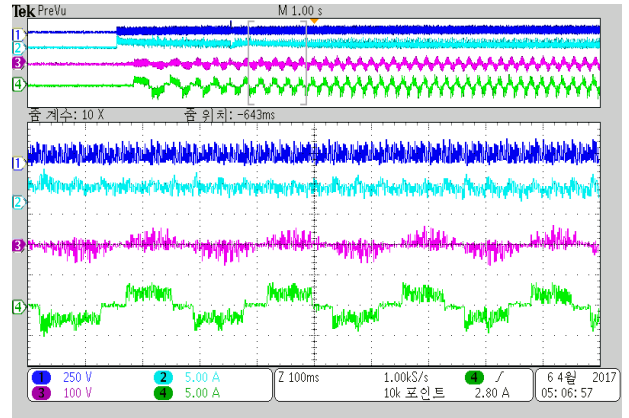


그림 17 자연전류 기동 (ch1) 컨버터 출력 전압 V_{dc} (ch2) 직류 링크 전류 i_{dc} (ch3) 단자전압 V_a (ch4) 고정자 전류 i_a

Fig. 17 Natural commutated mode Start-up

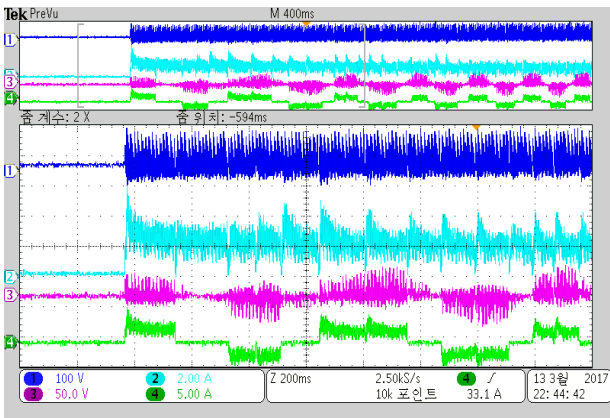


그림 15 강제전류 초기기동, (ch1) 컨버터 출력 전압 V_{dc} (ch2) 직류링크 전류 i_{dc} (ch3) 단자전압 V_{ac} (ch4) 단자전류 i_a

Fig. 15 initial start-up of forced commutated mode

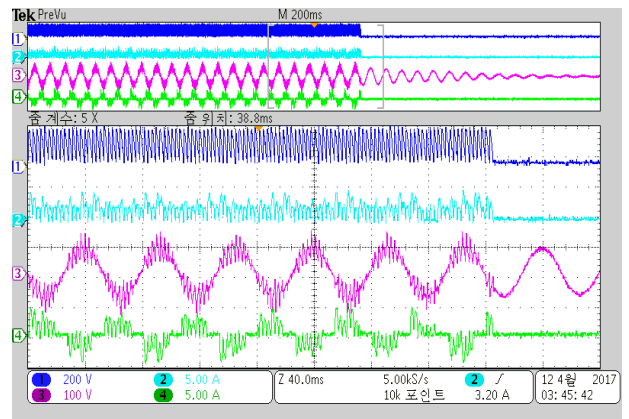


그림 18 기동장치 정지 (ch1) 컨버터 출력 전압 V_{dc} (ch2) 직류 링크 전류 i_{dc} (ch3) 단자전압 V_a (ch4) 단자전류 i_a

Fig. 18 Emergency Stop of Starter

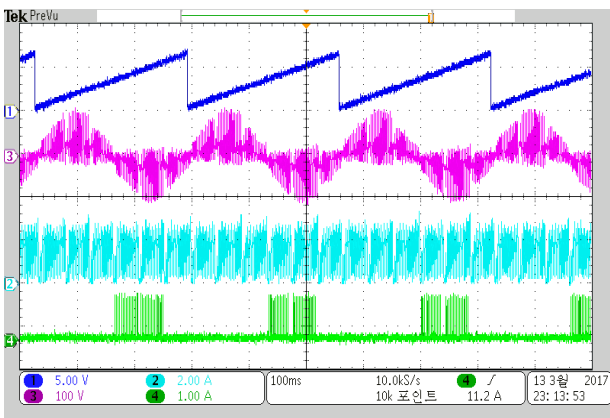


그림 16 강제전류모드에서 회전자 위치에 따른 인버터 점호신호 (ch1) 회전자 위치 θ (ch2) 직류링크 전류 i_{dc} (ch3) 단자 전압 V_{ac} (ch4) 인버터 싸이리스터 1번 점호신호

Fig. 16 Inverter thyristor firing signal as to rotor position of forced commutated mode

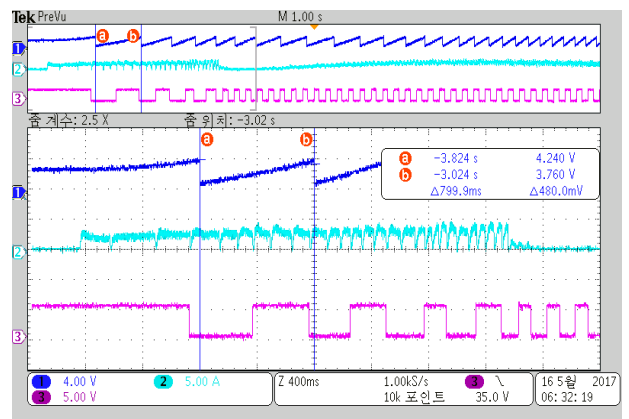


그림 19 초기 기동시의 회전자 실제 값과 추정 값 (ch1) 회전자 위치변화 엔코더 값 (ch2) 직류링크 전류 i_{dc} (ch3) 위치 추정값의 제로 크로싱 신호

Fig. 19 Rotor real position values and estimation values during initial start-up

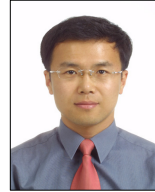
3. 결 론

기동장치는 정지상태의 동기기를 회전자와 고정자의 상호 작용에 의하여 회전시키며, 원하는 속도까지 최적의 토크로 구동하기 위하여 회전자의 위치검출이 중요하다. 본 논문에서는 동기기 단자전압을 적분하여 자속 계산한 후 제한한 회전자의 위치, 속도추정 로직을 사용하여, 동기기 초기구동 제어(정지상태), 강제전류제어(정격속도의 10% 미만), 자연전류제어(정격속도의 10% 이상)까지 센서리스 속도제어 전반에 대하여 성능실험을 실시하였다. 29kVA 동기기와 기동장치를 제작하여 성능을 평가한 결과, 초기 기동시의 회전자 위치검출은 실제값과 최대 10% 오차가 있었으며 속도증가에 따라서 오차가 급속히 감소됨을 확인하였다. 또한, 속도 추정값은 정격속도 1800RPM에서 실제속도와 0.2% 이하로 연산되었다. 향후 본 기술은 10MW급 가스터빈 기동장치 시작품 제작 및 현장 적용에 사용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

References

- [1] Beat Mueller, Thomas Spinanger, and Dieter Wallstein, "Static variable frequency starting and drive system for large synchronous motors", IEEE IAS 1979, 13B, pp. 429-438.
- [2] O. Kolb, F. Pender, V. Suchanek, "Static starting equipment for gas turbosets", Brown Boveri REV. 66 1979 (2) 104-112.
- [3] Hoseon Ryu, Hanju Cha, "Development of Integrated Start-up and Excitation System for Gas Turbine Synchronous Generator", *KIEE* vol. 63P, no. 3, pp 183-188, 2014
- [4] Hoseon Ryu, Hanju Cha, "Start-up analysis and commissioning test of LCI System for 183MW large synchronous machine", *KIEE* vol. 62, no. 5, pp 626-631, 2013.
- [5] Jin Guangzhe etc, "Research on system of Self controlled soft start with variable frequency for synchronous motor", 2012 ECCE Asia.
- [6] Hiroshi Ogino etc, "Static starting device for the start-up of the gas turbine using position sensorless control method", 2011 ECCE Asia.
- [7] Sanghoon Kim, "DC, AC, BLDC motor control", Bogdoo publishing company, 2011.
- [8] Seungki Sul, "Electric machine control theory", Brain Korea publishing company, 2002.
- [9] P. Kundur, "Power system stability and control" McGraw-Hill Inc., 1994.
- [10] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, "Power electronics, converters, applications, and design", John Wiley & Son, Inc., pp. 143-146, 1995.
- [11] Shinhyun Park etc, "Study of developing control algorithm for pumped storage synchronous motor drive", *KIEE* vol. 5-B, no. 1, pp 84-89, 2005.
- [12] David Finney, "Variable frequency AC motor drive systems", peter Peregrinus LTD, pp. 202, 1988

저 자 소 개



류 호 선 (柳 皓 善)

1993년 충남대학교 전기공학과 졸업.
1995년 동 대학원 졸업(석사), 2015년 동 대학원 졸업(박사). 1995년~현재 한전전력연구원 책임연구원



문 주 영 (文 柱 泳)

2011년 연세대학교 전기전자공학과 졸업.
2013년 동 대학원 졸업(석사), 2015년~현재 한전전력연구원 일반연구원



이 의 택 (李 義 澤)

2007년 명지대학교 통신공학과 졸업.
2009년 연세대학교 컴퓨터과학과 졸업(석사). 2009년~2012년 포스코 ICT 기술연구소 연구원. 2012년~현재 한전전력연구원 선임연구원



이 주 현 (李 柱 鉉)

1990년 울산대학교 전기공학과 졸업.
2000년 홍익대학원 전기공학과 졸업(석사), 2011년 충남대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~현재 한전전력연구원 수석연구원



강 윤 모 (姜 倫 模)

2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업.
2004년 동 대학원 졸업(석사), 2015년~현재 한국 서부발전 일반기술전문원



박 만 기 (朴 萬 基)

2003년 한밭대학교 전기공학과 졸업.
2015년 충남대학교 대학원 석사과정, 1996년~2013년 한국중부발전 전기설계원, 본사 발전계획담당, 한국발전교육원 근무, 2014년~현재 기술연구센터 선임기술전문원