

양수발전용 디지털 조속기의 wicket gate 및 feedback 모의시험장치 구현

이진호, 최성문, 김경화, 박동명, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:k3nsh1n@koreatech.ac.kr

An Implementation of Wicket Gate and Feedback Diagnosis Device for Digital Governor in Pumped-storage Power Plant

Jin-Ho Lee, Sung-Moon Choi, Kyung-Hwa Kim, Dong-Myoung Park and Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

양수발전소의 디지털 조속기는 발전모드 시 수차발전기의 회전을 제어하여, 수력터빈으로 전기를 생산하는 핵심역할을 수행하며, 펌프모드 시는 잉여전력을 위치에너지로 변환하여 안정적인 전기저장장치역할을 수행한다. 이러한 양수발전소용 디지털 조속기의 고장진단을 수행하기 위하여 조속기의 모의 제어시험을 수행해야 하지만, 터빈모드, 수동모드, 펌프모드 등의 시험 분석 시 동작 특성을 파악하기 어려운 실정이다. 즉, 발전소용 디지털 조속기는 DCS 모듈과 달리, 터빈모드 등 조건 입력 후 즉시 power stage에서 PWM 펄스가 출력되고 이에 따라 피드백을 공급해야 하며, 열린 개도만큼의 적절한 피드백이 이루어지지 않으면 조속기의 동작상태를 파악하는 것이 매우 어렵고, wicket gate를 모의할 대체 장치도 없는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 디지털 조속기의 오프라인 진단 시 반드시 필요한 wicket gate 및 feedback 모의시험장치를 제안한다. 이 장치는 전위차계 피드백 액추에이터부에서 디지털 조속기의 출력 PWM 펄스에 의해 열림 및 닫힘 동작을 수행하고, 전위차계에서 공급된 신호를 통해 열림 및 닫힘 개도를 파악할 수 있으며, voltage range converter부를 이용하여 약 1.3Vdc-3.5Vdc의 전위차계 피드백을 1-5Vdc로 변환하고, 이 신호를 4-20mA loop powered converter로 변환하며, 디지털 조속기에 피드백을 공급하여 wicket gate와 동일한 동작을 수행한다. 상기에서 제시한 장치를 바탕으로 디지털 조속기의 wicket gate 및 feedback 모의 진단시험을 수행한 결과, 조속기의 loop power인 15Vdc에서 디지털 조속기의 열림 및 닫힘 개도의 추종제어를 구현할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

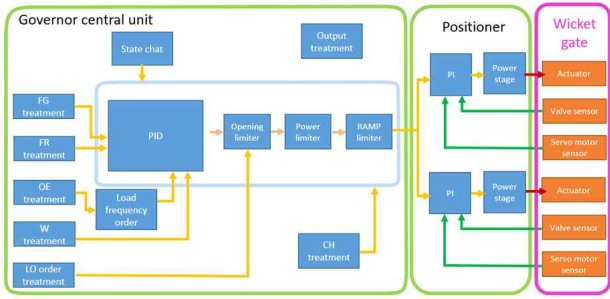
1. 서론

양수발전소의 디지털 조속기는 발전모드 시 수차발전기의 회전을 제어하여, 수력터빈으로 전기를 생산하는 핵심역할을 수행하며, 펌프모드 시는 잉여전력을 위치에너지로 변환하여 안정적인 전기저장장치역할을 수행한다. 즉, 양수발전소는 잉여전력을 저장함으로써 경제성을 확보할 수 있고, 전력 수급 조절에 유연하게 대응하며, 대규모 정전사고 발생 시 전력복구를 수행하는 중요 발전설비이다. 이러한 양수발전소용 디지털 조속기의 고장진단을 수행하기 위하여 조속기의 모의 제어시험을 수행해야 하지만, 터빈모드, 수동모드, 펌프모드 등의 시험 분석 시 동작 특성을 파악하기 힘든 실정이다. 즉, 발전소용 디지털 조속기는 DCS모듈과는 달리 터빈모드 등 조건 입력 후 즉시 power stage에서 PWM펄스가 출력되고 이에 따라 피드백을 공급해야 하며, 열린 개도만큼의 적절한 피드백을 주지 않으면 조속기의 동작상태를 파악하는 것이 매우 어렵고, wicket gate를 모의할 대체 장치도 없는 실정이다.

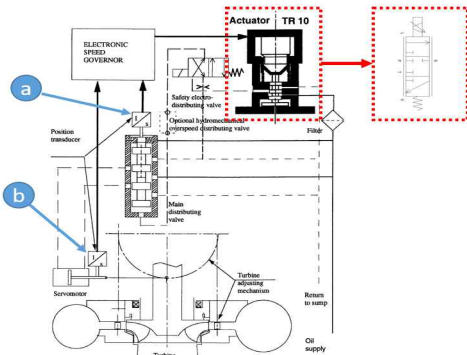
따라서, 본 논문에서는 디지털 조속기의 오프라인 진단 시 반드시 필요한 wicket gate 및 feedback 모의시험장치를 제안한다. 이 장치는 전위차계 피드백 액추에이터부에서 디지털 조속기의 출력 PWM 펄스에 의해 열림 및 닫힘 동작을 수행하고, 전위차계에서 공급된 신호를 통해 열림 및 닫힘 개도를 파악할 수 있으며, voltage range converter부를 이용하여 약 1.3Vdc-3.5Vdc의 전위차계 피드백을 1-5Vdc로 변환하고, 이 신호를 4-20mA loop powered converter로 변환하며, 디지털 조속기에 피드백을 공급하여 wicket gate와 동일한 동작을 수행한다. 상기에서 제시한 장치를 바탕으로 디지털 조속기의 wicket gate 및 feedback 모의 시험을 수행한 결과, 조속기의 loop power인 15VDC에서 디지털 조속기의 열림 및 닫힘 개도의 추종제어를 구현할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

2. 디지털 조속기 및 wicket gate 구성

디지털 조속기의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, governor central unit는 입출력 및 제어 프로세스 처리를 수행하고, positioner는 wicket gate의 개도 및 servomotor position을 governor central unit으로 전송하여 수차발전기의 수량제어를 수행한다. 또한, wicket gate는 전기식 모터가 아닌 일종의 servo valve와 같이 스프링의 위치를 PWM의 펄스폭으로 제어하고, 유량을 제어하여 main valve를 콘트롤 하므로 servomotor position 및 valve position 피드백의 두가지 신호를 governor central unit으로 공급한다. 한편, 그림 2는 wicket gate의 제어계통도를 나타낸다. 여기서, 그림 2의 ①는 valve position 피드백 센서이고, ②는 servomotor position 피드백 센서이다. 따라서, wicket gate당 2개의 피드백 신호를 공급해야 한다.



[그림 1] 디지털 조속기의 구성

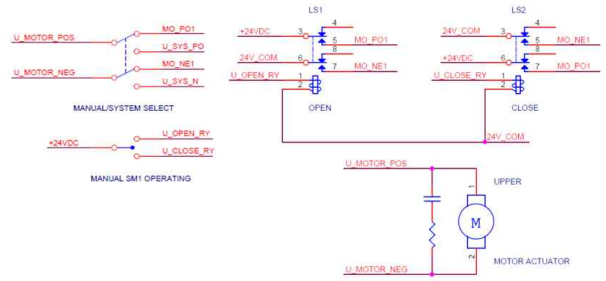


[그림 2] Wicket gate 제어계통도

3. Wicket gate 및 feedback 모의시험장치의 구현

3.1 전위차계 모터 액추에이터부

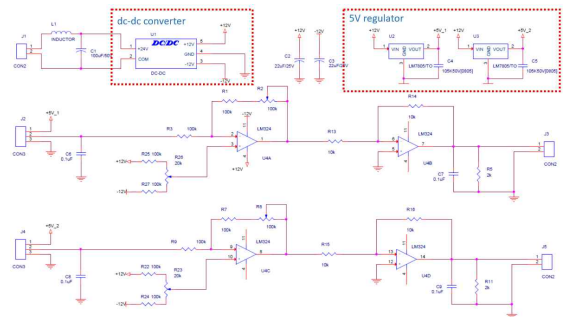
전위차계 모터 액추에이터부의 구성은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 자동모드는 모터 액추에이터부를 조속기의 신호에 따라 열림, 닫힘 동작을 수행하고, 수동모드는 오픈 방향을 조작하여 100% 열림 상태의 교정을 수행하고, 닫힘 방향을 조작하여 0% 열림 상태의 교정 시 사용하도록 구현한다.



[그림 3] 모터 액추에이터 자동/수동 조작 구현회로

3.2 Voltage range converter부

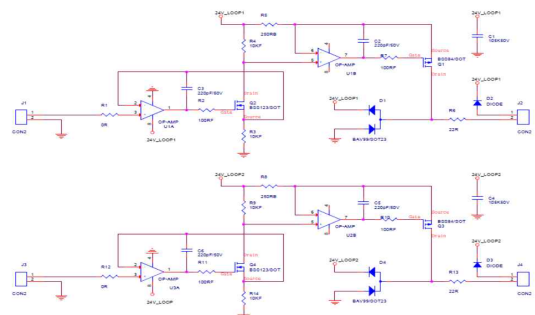
Voltage range converter부는 그림 4와 같이 24Vdc를 공급받아 ±12Vdc를 출력하는 dc-dc converter 및 액추에이터 센서 공급용 5Vdc 정전압 레귤레이터로 구성된다. 여기서, zero 세팅용 전위차계를 이용하여 약 1.2Vdc의 0% 열림 시 센서 출력전압을 1Vdc로 세팅할 수 있도록 하고, span 전위차계는 약 3.7Vdc의 출력전압을 5Vdc로 조정할 수 있도록 구성한다. 또한, valve position 피드백 및 servomotor position 피드백을 위해 2개의 채널로 구성되며, op-amp는 4개의 op-amp를 내장하고 있는 범용 op-amp를 선정하여 선형성이 우수한 반전 증폭기로 이루어진다.



[그림 4] Voltage range converter의 구성

3.3 Loop powered 4-20mA converter부

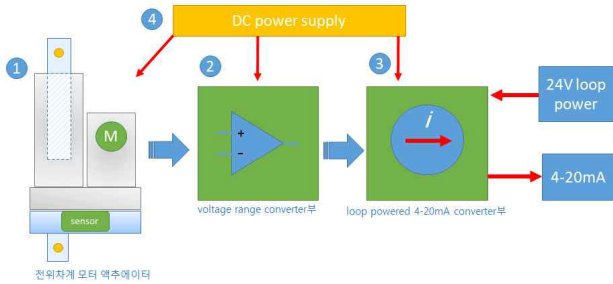
Loop powered 4-20mA converter부는 그림 5와 같이 구성하며, 본 모의시험장치에서는 zero 및 span의 조정이 voltage range converter에서 가능하므로 교정이 필요 없는 회로로 구현한다.



[그림 5] Loop powered 4-20mA converter의 구성

3.4 전체 시험 장치 구현

Wicket gate 모의시험장치는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 6의 ①은 전위차계 모터 액추에이터부, ②는 voltage range converter부, ③은 loop powered 4-20mA converter부이며, ④는 24Vdc 전원을 공급하는 dc power supply부로 구성한다. 이 그림에서와 같이, 전위차계 모터 액추에이터는 전위차계 피드백을 가지고 있어서 5V의 레퍼런스 전압을 공급하면 최대 닫힘 구간의 전압과, 최대 열림구간의 전압 범위를 얻을 수 있다.



[그림 6] 전체 시험 장치 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 모의 시험장치를 바탕으로 wicket gate 및 feedback 특성을 분석하기 위한 시험 조건은 표 1과 같다. 여기서, voltage range converter는 입력전압을 calibrator를 이용하여 1Vdc에서 5Vdc까지 가변하여 출력전압을 기록하고 선형성을 분석한다. 한편, loop powered 4-20mA converter는 입력전압을 calibrator를 이용하여 출력전류를 기록하고 선형성을 분석한다. 또한, 신호변환의 선형성이 확보되면, wicket gate 0% 열림 신호를 4mA, 100% 열림 신호를 20mA로 교정한다. 한편, 일반적인 4-20mA converter의 loop power는 24Vdc를 사용하지만, 본 시험장치의 디지털 조속기 사양에서 센서 피드백 전원(loop power)은 표 1과 같이 loop power가 15Vdc이고, 입력 임피던스는 250Ω 일 때 전류출력 기준값을 만족해야 한다. 또한, 전위차계 모터 액추에이터부에 레퍼런스 5Vdc 전압을 인가하였을 때 출력되는 전압은 표 2와 같다. 이 범위는 일반적인 산업용 전압 범위가 아니므로, voltage range converter부를 이용하여 1-5Vdc 전압 범위의 출력을 변환해야 한다.

[표 1] Loop power 15Vdc에서 무부하 시, 250Ω부하 시 전류 출력 기준값

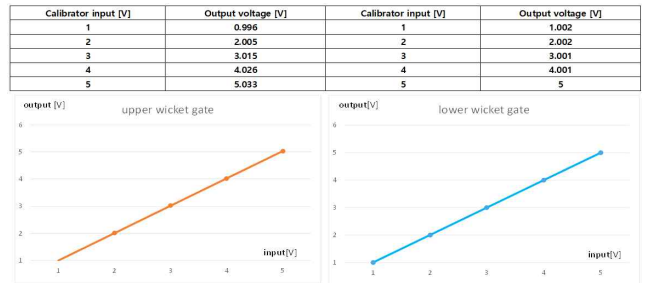
Upper wicket gate position sensor		Lower wicket gate position sensor	
Fully closed (Min)	Fully opened(Max)	Fully closed (Min)	Fully opened(Max)
loop power 15Vdc 무부하 시			
4.000 mA	20.000 mA	4.000 mA	20.000 mA
loop power 15Vdc 250Ω 부하 시			
4.000 mA	20.000 mA	4.000 mA	20.000 mA

[표 2] Upper wicket gate 및 lower wicket gate용 모터액추에이터 출력전압

Upper wicket gate position sensor		Lower wicket gate position sensor	
Fully closed (Min)	Fully opened(Max)	Fully closed (Min)	Fully opened(Max)
1.224 Vdc	3.757 Vdc	1.123 Vdc	3.761 Vdc

4.2 Voltage range converter부 입출력 특성

상기에서 제시한 시험장치를 바탕으로, voltage range converter부의 입출력 특성은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 5점 교정을 수행하는 동안 입출력 특성의 선형성이 매우 양호한 것을 알 수 있다. 한편, 표 3은 상기의 voltage range converter를 이용하여 액추에이터 출력을 교정한 데이터로 0%의 열림 개도에서는 1.001 Vdc, 100% 열림 개도에서는 upper wicket gate는 5.006 Vdc, lower wicket gate는 5.003 Vdc가 나타나므로, voltage range converter의 출력전압에 따라 wicket gate의 열림 개도를 파악할 수 있음을 알 수 있다.



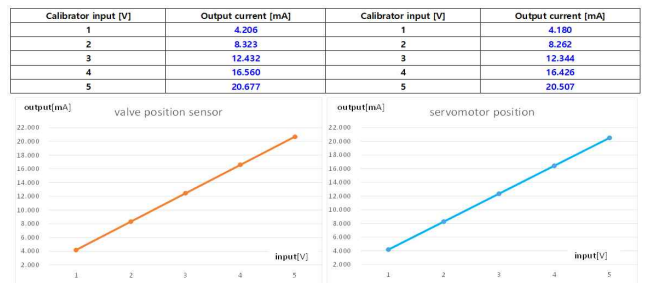
[그림 7] Voltage range converter 전압변환특성

[표 3] Voltage range converter 액추에이터 피드백 연동 교정특성

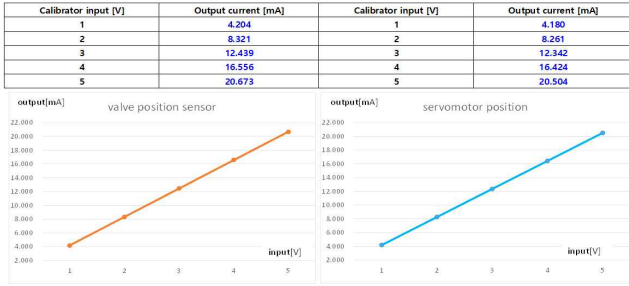
Upper wicket gate position sensor		Lower wicket gate position sensor	
Fully closed (Min)	Fully opened(Max)	Fully closed (Min)	Fully opened(Max)
1.001 Vdc	5.006 Vdc	1.001 Vdc	5.003 Vdc

4.3 Loop powered 4-20mA converter부 입출력 특성

상기에서 제시한 loop powered 4-20mA converter부를 바탕으로, loop power가 24Vdc인 경우, 무부하 시의 출력특성은 그림 8, 250Ω 시의 출력특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 5점 교정을 수행하는 동안 입출력 특성의 선형성이 양호한 것을 알 수 있다.

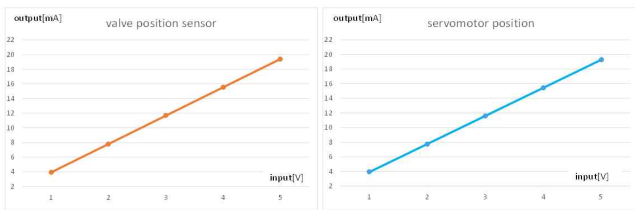


[그림 8] Loop power 24V 무부하 시 converter 변환특성

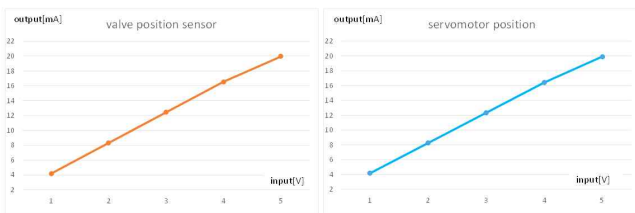


[그림 9] Loop power 24V 250Ω load시 converter 변환특성

한편, 상기에서 제시한 loop powered 4-20mA converter부를 바탕으로, 본 논문에서 제시한 디지털 조속기의 사양에 따라 loop power가 15V인 경우의 변환특성은 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10의 (a)는 입력 임피던스가 무부하인 경우, (b)는 입력 임피던스가 250Ω인 경우를 각각 나타낸다. 이 그림에서와 같이, 5점 교정을 수행하는 동안 입출력 특성의 선형성이 양호한 것을 알 수 있다. 또한, 이를 바탕으로 전체 모의 시험장치의 액추에이터 피드백 연동특성을 나타내면 표 4의 (a)와 같고, 열림 동작 및 닫힘 동작을 반복하여 교정한 최종 데이터는 (b)와 같다. 여기서, upper wicket의 경우, 0%의 열림 개도에서는 3.994 mA, 100% 열림 개도에서는 19.994mA가 나타나고, lower wicket gate의 경우, 0%의 열림 개도에서는 3.996mA, 100% 열림 개도에서는 20.006mA가 각각 나타나므로, loop powered 4-20mA converter의 출력 전류에 따라 wicket gate의 열림 개도를 파악할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 무부하 시



(b) 250Ω 시

[그림 10] 15Vdc loop power converter 특성

[표 4] 모의시험장치 완성 후 액추에이터 피드백 연동 교정특성

(a) 각 converter 개별 교정 후 연동 측정데이터

Upper wicket gate position sensor		Lower wicket gate position sensor	
Fully closed (Min)	Fully opened(Max)	Fully closed (Min)	Fully opened(Max)
4.190 mA	19.421 mA	4.176 mA	19.417 mA

(b) 모터 액추에이터 반복동작 교정 후 최종 측정데이터

Upper wicket gate position sensor		Lower wicket gate position sensor	
Fully closed (Min)	Fully opened(Max)	Fully closed (Min)	Fully opened(Max)
3.994 mA	19.994 mA	3.996 mA	20.006 mA

5. 결 론

본 논문에서는 디지털 조속기의 오프라인 진단 시 반드시 필요한 wicket gate 및 feedback 모의시험장치를 제안한다. 이 장치는 전위차계 피드백 액추에이터부에서 디지털 조속기의 출력 PWM 펄스에 의해 열림 및 닫힘 동작을 수행하고, 전위차계에서 공급된 신호를 통해 열림 및 닫힘 개도를 파악할 수 있으며, voltage range converter부를 이용하여 약 1.3Vdc-3.5Vdc의 전위차계 피드백을 1-5Vdc로 변환하고, 이 신호를 4-20mA loop powered converter로 변환하며, 디지털 조속기에 피드백을 공급하여 wicket gate와 동일한 동작을 수행한다. 상기에서 제시한 장치를 바탕으로 디지털 조속기의 wicket gate 및 feedback 모의 시험을 수행한 결과, 조속기의 loop power인 15VDC에서 디지털 조속기의 열림 및 닫힘 개도의 추종제어를 구현할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] German Ardul Munoz-Hernandez Sa'ad Petrous Mansoor. Dewi Ieuan Jones. "Modeling and controlling Hydropower plants. Springer 2013.
- [2] Jinho Lee, Jin-Ho Lee, Jin-Taek Jeon, Sung-Duck Cho, Kyung-Hwa Kim, and Dae-Seok Rho. "An Implementation of Diagnosis Equipment for Digital Governor". 2022년 한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집.
- [3] Thomas Mosteller, Field Applications Engineer, Linear Technology Corp, "Convert 1V to 5V Signal to 4mA to 20mA Output". <http://www.linear.com>
- [4] Alstom Hydro France, "Neyrpic TR10 actuator description and operation". https://www.comprasestatales.gub.uy/Aclaraciones/clar_llamado_i297936_3.pdf