

7MW급 소수력발전의 아날로그 여자시스템 제어 모듈용 고장 진단 장치의 구현에 관한 연구

이진호*, 이승호*, 남양현*, 왕종용*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:k3nsh1n@naver.com

Implementation of Fault Diagnosis Device for Analog Excitation System Control Module in 7MW Small Hydroelectric Power Generation

Jin-Ho Lee*, Seung-Ho Lee, Yang-Hyun Nam, Jong-Yong Wang,
Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근 발전설비의 제어시스템 디지털화가 진행되고 있으나, 소용량 설비 및 장기간 운전된 설비의 경우 여전히 아날로그 방식을 사용하고 있어 고장 발생 시 신속한 진단과 유지보수에 어려움이 존재하는 실정이다. 특히, 아날로그 제어시스템은 디지털 시스템에 비해 제한적인 상태 모니터링 및 알람 기능을 가지고 있으므로, 별도의 진단 장비 없이 운용할 경우, 유지보수의 부담이 크게 증가할 수 있다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 7MW 소수력 발전소의 여자시스템 제어 모듈을 대상으로 독립형 고장 진단 장치를 제안한다. 이 장치는 제어 모듈 서브랙부, 램프 표시부, 조작 및 신호 측정부, 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부로 구성하며, 각 모듈의 기능을 개별적으로 점검할 수 있다. 상기의 진단장치를 바탕으로 고장이 발생한 제어 모듈의 진단을 수행한 결과, 고장 모듈이 정상적으로 동작함을 알 수 있다. 또한, 고장이 제거된 모듈을 실제 발전소 현장에서 적용한 결과, 정상적으로 동작되어 제안한 진단장치가 유지보수 효율성을 향상시키고, 고장 진단의 정확도를 높이는 데 효과적임을 알 수 있다.

1. 서론

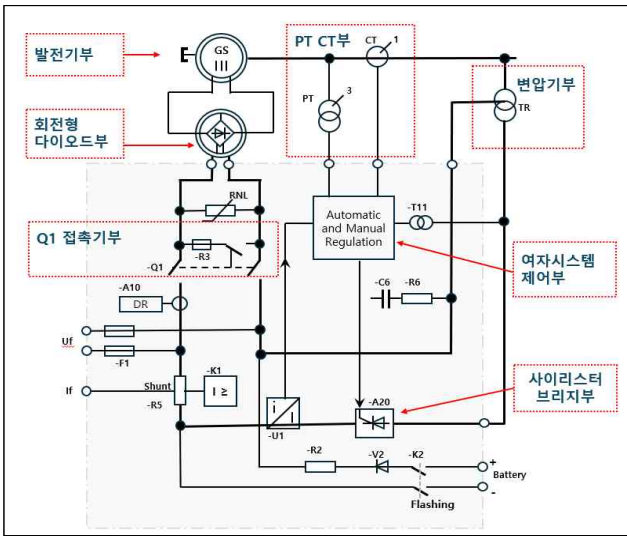
최근, 전력 설비 제어 기술의 디지털화가 급속도로 진행되면서, 대부분의 제어장치에는 마이크로프로세서와 다양한 통신 기술이 적용되어 발전설비의 운용 효율성과 유지보수성이 크게 향상되고 있다. 하지만, 소용량 설비 및 노후 발전설비의 경우 여전히 아날로그 방식을 사용하고 있어 고장 발생 시 신속한 진단과 유지보수에 어려움이 존재하는 실정이다. 특히, 아날로그 제어시스템은 디지털 시스템에 비해 제한적인 상태 모니터링 및 알람 기능을 가지고 있으므로, 별도의 진단 장비 없이 운용할 경우, 유지보수의 부담이 크게 증가할 수 있다. 이에 따라, 유지보수 경험이 풍부한 설비 관리자는 제어 모듈의 건전성 진단을 중요시하고 있으며, 주요 발전설비에서는 건설 단계부터 이러한 진단 장비를 별도로 구축하여 운영하고 있다. 하지만, 별도의 테스트 벤치가 구축되지 않은 경우, 고장 모듈을 진단하기 위해 제어 모듈을 시스템에 직접 연결해야 하므로, 시험 과정에서 설비 운전 안정성 저하 및 유지보수 부담이 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 문제는 특히 현장 대응 시간이 중요한 발전설비 운용 환경에서 큰 제약 요소로 작용한다. 따라서, 본 논문에서는 7MW 소수력 발전소의 아날로그 여자시스템 제어 모듈을 대상으로 효율적인 고장 진단을 위한 독립

형 진단 장치를 제안한다. 이 장치는 여자기 제어 모듈 서브랙부, 램프 표시부, 조작 및 신호 측정부, 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부로 구성하며, 각 모듈의 기능을 개별적으로 점검할 수 있다. 상기의 진단장치를 바탕으로 고장이 발생한 제어 모듈의 진단을 수행한 결과, 고장 모듈이 정상적으로 동작함을 알 수 있다. 또한, 고장이 제거된 모듈을 실제 발전소 현장에서 적용한 결과, 정상적으로 동작되어 제안한 진단장치가 유지보수 효율성을 향상시키고, 고장 진단의 정확도를 높이는 데 효과적임을 알 수 있다.

2. 아날로그 여자시스템의 구성

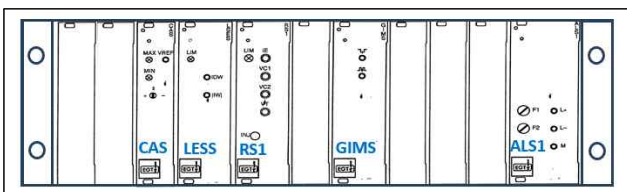
7MW급 소수력발전용 아날로그 여자시스템은 그림 1과 같이, 발전기부와 회전형 다이오드부, 주 접촉기부, PT CT부, 변압기부, 여자시스템 제어부, 사이리스터 브리지부 등으로 구성된다. 여기서, 발전기부는 수력터빈과 연결되어 전기를 생산하는 발전기이고, 여자기부는 계자권선은 고정되어 있고 전기자 권선이 회전하는 회전전자자형으로서 회전 정류다이오드에 의한 브러리스 방식의 여자기이다, 초기 여자 시에는 그림 1의 K2 스위치를 통한 DC125[V] 전압을 공급받아 여자 되고 여자기의 전기자 권

선에서 발생된 출력은 발전기 로터에 설치된 회전 정류기를 통해 정류되어 발전기의 계자권선에 공급된다. 이 때 발전기의 전기자로부터 출력이 생성되면 K2 스위치는 오프되고 변압기부에서 공급받은 전원을 통해 사이리스터를 통해 정류되어 여자전류를 계속 공급한다. PT CT부를 통해 발전기 출력전압 및 출력전류를 읽어내고 여자시스템 제어부에서 게이트 펄스를 통해 발전기의 출력전압을 조절한다.



[그림 1] 소수력발전용 아날로그 여자시스템의 구성

그림 2는 여자시스템 제어부의 제어 모듈이 설치된 서브-랙으로 발전기 전압 설정값(Reference)을 생성하는 CAS, 병렬운전 시 선로 전압강하 보상(Line drop compensation)을 수행하는 LESS, 발전기 전압제어(PID)와 계자전류 연속 제한 및 고정자 전압 급강하 시 계자전류 제한 5초간 일시 해제 등을 수행하는 RS1, 사이리스터 게이트 펄스를 생성하는 GIMS, 자동제어 채널 전원공급(안정화 전원)을 수행하는 ALS1 총 5개의 아날로그 제어카드로 구성되어 있다.



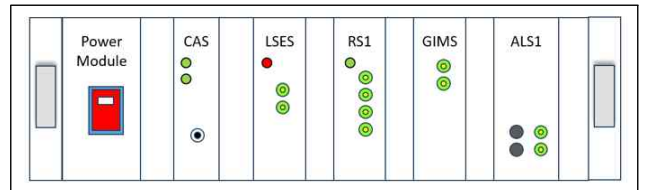
[그림 2] 소수력발전용 여자시스템 제어부

3. 아날로그 여자시스템 제어 모듈용 고장 진단 장치의 구현

3.1 여자기 제어 모듈 시험용 서브 랙부 구성

아날로그 여자시스템 제어 모듈 고장 진단 장치의 구성은 그림 3과 같이 제어 모듈을 설치할 수 있도록 준비된 여자기 제어 모

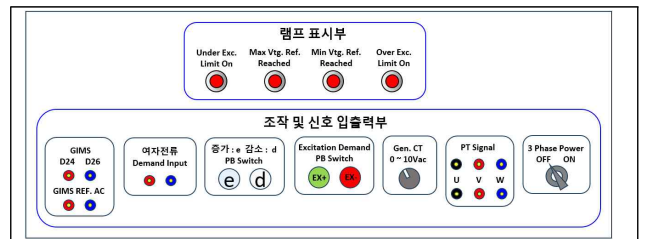
듈 서브랙 좌측에 DC 전원공급장치를 설치하고, 서브랙의 후면부에 래핑 와이어용 커넥터를 설치한 후 도면을 참고하여 배선한다. 제어 모듈 사이에 주고 받는 신호는 직결하고, 램프 표시부, 조작 및 신호 입출력부, 측정 및 모니터링부, 시험용 신호 발생기부와 연결하는 신호는 터미널 블록 등을 이용하여 구성하였다.



[그림 3] 여자기 제어 모듈 시험용 서브 랙부

3.2 램프 표시부와 조작 및 신호 입출력부 구성

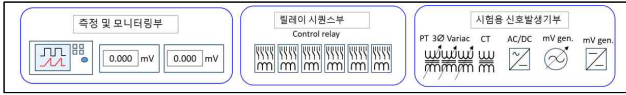
부족여자 제한/최대 및 최소 자동 전압 기준값/과여자 제한 등을 표시해 주는 램프 표시부와 GIMS 모듈에 기준 교류전압을 공급하고 여자전류 요구 입력을 공급하며, CT/PT 신호 및 여자 증가/감소 등의 명령을 입력하는 푸시버튼 스위치 등으로 구성된 조작 및 신호 측정부는 그림 4와 같이 진단의 용이성을 위해 한 패널에 동시에 설치되며 터미널 블록을 통하여 여자기 제어 모듈과 연결되어 구성된다.



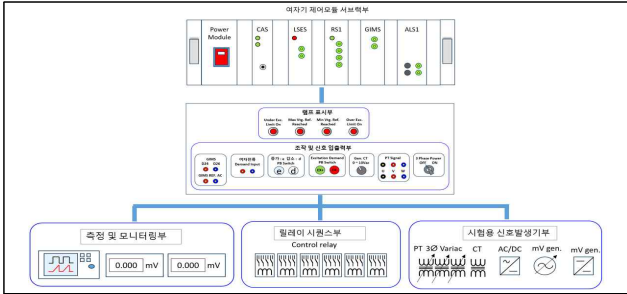
[그림 4] 고장 진단장치 램프 표시부와 조작 및 신호 입출력부

3.3 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부의 구성

교류 레퍼런스 전압 대비 게이팅 펄스를 확인하고 각종 피드백 신호를 계측하는 측정 및 모니터링부는 계측용 기기와 연결할 수 있도록 터미널 블록 및 테스트 포인트로 구성되고, 램프 표시부와 조작 및 신호 측정부를 제어 모듈과 연동시켜주는 릴레이 시퀀스부는 터미널 블록을 통해 여자기 모듈과 연결되어 제어로직 동작을 수행한다. 한편 시험용 모의신호 발생기부는 PT/CT모의 제어부로 PT 신호용 트랜스포머와 CT 신호용 트랜스포머 발전기 출력 신호용 Variac 연결 단자로 구성된다. 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부는 그림 5와 같이 모두 고장 진단장치 함체 내부에 설치되어 구성된다. 그림 6은 아날로그 여자시스템 제어 모듈 고장 진단장치의 전체 구성도를 나타낸다.



[그림 5] 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부



[그림 6] 아날로그 여자시스템 제어 모듈 고장 진단 장치

[표 1] 여자기 제어 모듈 입력용 PT/CT부 Transformer 구성

1차측	2차측		수량	용도
220V	35V	0V 35V	3	PT 220V △결선
220V	35V	0V 35V 0V	1	ALS1 SUPPLY
220V	12V	0V 12V 0V	1	POT와 연결 - CT 용
220V	6V	0V 35V 0V	1	REF. AC, 35V - GIMS용

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

여자기 제어 모듈 서브랙부에 각 모듈을 전부 설치한 다음 Line BRK를 on 시키고, 증가(e) 스위치를 누르면 Vref를 조정할 수 있도록 로직이 구성된다. 발전기 출력전압 가변 시험 조건은 표 3와 같고 Variac으로 198~240[Vac]까지 가변 시험한다. +EX/-EX 버튼을 통한 Vref 조정 시험 조건은 표 4과 같고 +EX 버튼으로 4.5~5.5[V](Max vtg ref. reached)까지 가변하여 시험하고, 각 테스트포인트의 전압을 기록한다. 여자전류 제어 가변 시험 조건은 표 5와 같고, 발전기 전류 신호 가변 시험 조건은 표 6와 같다. 아날로그 여자시스템은 초기 튜닝 데이터를 제공하므로, 시험 결과의 추세는 표 2와 유사한 추세로 나타나는지 확인하면 된다.

[표 2] 아날로그 여자시스템 튜닝 및 세팅 기준치

±EX	Vg(V)	VT(V)	VG(V)	If(A)	VEV(V)	비고
1	90	4.561	3,211.2	28.08	87.88	
2	92	4.605	3,240.7	26.22	90.62	
3	95	4.732	3,297.8	28.85	93.02	
4	98	4.860	3,382.1	31.19	95.50	
5	100	4.988	3,476.0	32.18	97.97	
6	103	5.115	3,563.4	33.93	100.34	
7	105	5.241	3,656.4	35.21	102.78	
8	108	5.369	3,744.7	36.92	105.23	
9	110	5.497	3,834.5	38.46	107.67	

[표 3] 시험 종류별 시험조건

[1] 발전기 출력전압 가변 시험 조건	
상태	상태설명
line BRK	on
"e" 증가스위치 누름	Vref 조정 가능 모드
Vref	5.001[V]로 조정
여자전류 Demand 30mA set	IF=3.843로 조정
발전기 CT값	1.001[Vac]로 set
[2] +EX/-EX를 통한 Vref 조정 시험 조건	
line BRK	on
여자전류 Demand 30mA set	IF=3.843으로 조정
발전기전압(3상 PT)값	70[Vac](3450[Vac])로 조정
발전기 CT값	1.001[Vac]로 조정
"e" 증가스위치 누름	Vref 조정 가능 모드
"d" 감소스위치 누름	Vref = 4.5[V] min exc vtg limit 점등
"e" 증가스위치 누름	+EX 동작가능모드
[3] 여자전류 가변 제어 시험 조건	
line BRK	on
+EX 버튼으로 조작	Vref = 5.001[V]로 조정
발전기전압(3상 PT)값	70[Vac](3450[Vac])로 조정
발전기 CT값	1.001[Vac]로 조정

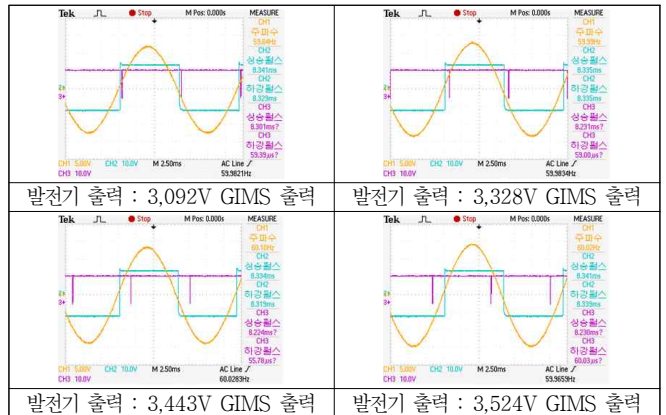
4.2 제어 모듈용 고장 진단 장치의 운용 특성

4.2.1 발전기 출력전압 가변 시험

여자시스템 제어 모듈 고장 진단장치의 발전기 출력 가변 시험은 표 3의 [1]시험 조건을 바탕으로 Variac의 출력전압을 198~240[Vac]까지 가변하며 시험하면 표 4 및 그림 4와 같은 결과를 확인할 수 있다.

[표 4] 발전기 출력전압 가변 시험 결과

Vg [V]	모듈 입력 R상	VT [V]	Variac R상 [V]	VG [V]
90	62.74	4.479	198.3	3,092
93	64.76	4.629	204.7	3,192
95	66.26	4.742	209.6	3,266
97	67.53	4.828	213.4	3,328
100	69.85	5.001	220.7	3,443
103	71.51	5.133	226.1	3,524
105	73.18	5.255	231.1	3,607
107	74.33	5.335	235.1	3,663
110	75.88	5.449	240.2	3,740



[그림 4] 발전기 출력전압 가변에 따른 GIMS 출력파형 변화

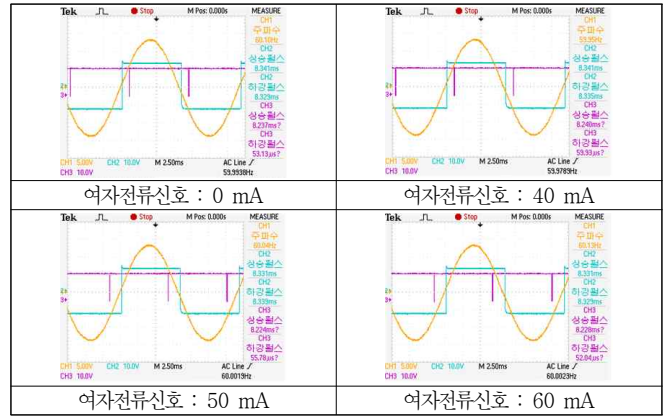
4.2.2 Vref 조정 시험

여자시스템 제어 모듈 고장 진단장치를 표 3의 [2]의 시험 조건에 맞게 세팅한 후 +EX 버튼을 눌러 4.5~5.5V(Max voltage reference reached)까지 가변하여 시험하면 표 5 및 그림 5와 같은 결과를 확인할 수 있다.

[표 5] +EX/-EX 버튼을 통한 Vref 조정 시험 결과

모듈명	CAS	LSES		RS1				
Vref 세팅	Vref [V]	IDW [V]	W [V]	IF [V]	VC1 [V]	VC2 [V]	VT [V]	INJ [mV]
4.5	4.502	-0.893	0.464	3.833	-12.253	-11.993	4.998	-1.851
4.75	4.752	-0.891	0.465	3.839	-10.129	-11.993	5.003	0.453
5	5.000	-0.891	0.465	3.839	8.393	-11.993	4.999	0.473
5.25	5.249	-0.894	0.466	3.839	10.887	-11.993	5.009	0.473
5.5	5.503	-0.896	0.464	3.839	12.516	-11.993	5.011	-1.941

MAX 5.5V에서 특이사항 : CAS MAX 점등, MAX VTG. REF. REACHED 점등



[그림 6] 여자전류 Demand 가변에 따른 GIMS 출력파형 변화

5. 결 론

본 논문에서는 아날로그 여자시스템 제어 모듈의 효율적인 고장 진단을 위한 독립형 고장 진단장치를 제안한다. 제안하는 고장 진단장치는 여자기 제어 모듈 서브랙부, 램프 표시부, 조작 및 신호 측정부, 측정 및 모니터링부, 릴레이 시퀀스부, 시험용 신호 발생기부로 구성되며, 발전기 출력 가변 시험, +EX/-EX 버튼을 통한 Vref 조정 시험, 여자전류 제어 가변 시험 등의 모의 운전 시험을 수행할 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 제안된 진단 장치를 이용하여 고장이 발생한 제어 모듈에 대한 진단을 수행하여, 이상이 확인된 모듈에 대해 정비를 완료한 후 실제 발전소 현장에 설치 시운전한 결과 정상 동작함을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 고장 진단장치의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 박용환, "동기발전기 여자시스템의 신뢰도 향상을 위한 시험 진단장치 구현에 관한 연구", 석사학위논문 연세대학교 공학대학원, 2003.
- [2] 신만수, 류호선, 이주현, 임익현, 김봉석, 송성일, "여자시스템 제어 및 진단기법 개발", 대한전기학회 학술대회 논문집, 2005, pp. 2597-2599.
- [3] 김찬기, 김수열, 류호선, 정창기, 이주현, 임익현, 류홍우, "발전소용 여자시스템의 기술동향", KIEE Vol. 46 No. 9 SEP 1997.
- [4] 이진호, 김윤호, 이승호, 김경화, 노대석 "5MW급 소수력발전용 여자시스템 제어기의 고장진단 알고리즘에 관한 연구", 한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집, 2025, pp 1627-1636.

4.2.3 여자전류 제어 가변 시험

여자시스템 제어 모듈 고장 진단장치를 표 3의 [3]과 같이 세팅하고 DC 0~60 [mA] 전류 신호를 LT200s test point 단자에 공급하여 시험하면 표 6 및 그림 6과 같은 결과를 확인할 수 있다.

[표 6] 여자전류 제어 가변 시험 결과

모듈명	CAS	RS1					
측정점 [mA]	여자전류 [A]	VREF [V]	IF [V]	VC1 [V]	VC2 [V]	VT [V]	INJ [mV]
0	0	5.001	-4.002m	8.371	-0.886	5.007	-0.942
10	30	5.001	1.284	8.417	9.227	5.002	-1.426
20	60	5.001	2.557	8.356	-10.703	5.004	0.001
30	90	5.001	3.839	8.366	-11.997	5.005	0.475
40	120	5.001	5.124	8.266	-13.278	5.008	0.948
50	150	5.001	6.411	-11.858	-14.242	5.012	-0.722
60	180	5.001	7.699	-12.316	-14.242	5.016	-0.246
OVER EXC. LIMIT ON 전류 : 42.29mA (127A)							
60	180	5.001	7.699	-12.316	-14.242	5.016	-0.246
특기사항 : VC1값은 OVER EXC. LIMIT ON 발생 시 크게 변함.							