

양수발전기 보호 분석 및 개선

김천겸

한국서부발전주식회사

The Analysis and Improvement of Generator Protection System in Pumped Storage Hydro plant

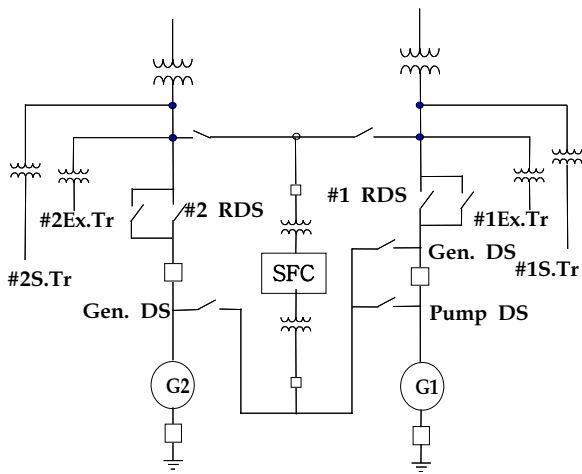
Chun-Kyum KIM

Korea Westernpower co., Ltd

Abstract - 통상 발전원으로서의 역할만을 담당하는 일반 화력발전기와는 달리 양수발전기는 발전원으로서의 역할뿐 아니라 계통운영의 경제성과 운영방향에 따라 부하로서의 역할을 수행한다. 이때는 동기기로서 조상기 혹은 전동부하가 되며 이로 인하여 일반 화력발전기와는 다르게 양수운전등 부하로서의 역할을 위한 또 다른 보호시스템을 적용하고 있다. 대용량 발전기와 전동부하로서의 역할을 겸용함으로써 필연적으로 나타나는 화력발전기와와의 보호방식 차이를 비교 분석하고 보다 안정된 설비운전을 위한 보호시스템 적용에 대해 논하고자한다.

1. 서 론

양수발전소는 발전기로서의 효율보다 동기전동기로서의 효율을 우선적으로 고려하여 설계되어 수차의 기계적 형상이 동력원으로서 터빈보다는 부하펌프에 가깝게 설계되며, 양수운전을 위한 별도의 기동장치를 갖추는 등 발전원보다는 부하로서의 운영과 제어가 한층 강화된 발전소이다. <그림1>은 2011년 8월 준공예정으로서 건설되는 예천양수발전소의 계통도이다.



<그림 1> 양수발전소 전력계통도

양수기동을 위한 기동장치로 SFC가 설치되었으며, 양수기동시 수면압하를 통한 수차의 무부하 상태에서 SFC를 통해 전동기의 과전류를 방지하며 정격속도까지 속도를 올린다. SFC의 비정상 상황에서 양수운전이 필요할 경우 1호기측에 설치된 Gen. DS를 통해 2호기 양수기동을 하는데, Synchronizer와 AVR과 Governer 시스템을 통해 1호기 발전운전과 2호기 양수운전과의 동기 및 속도조정이 이루어진다(Back to Back 모드). 발전과 양수변경을 위한 상변환장치로 RDS(Reverse Phase Disconnect Swith)를 조작하여 발전기와 동기전동기 운전을 선택한다. 본 논문은 예천양수발전소 보호시스템을 예로하여 보호계전기의 상변환 인식기능과 일반화력과 다른 양수발전 보호기능을 비교,분석하고자 한다.

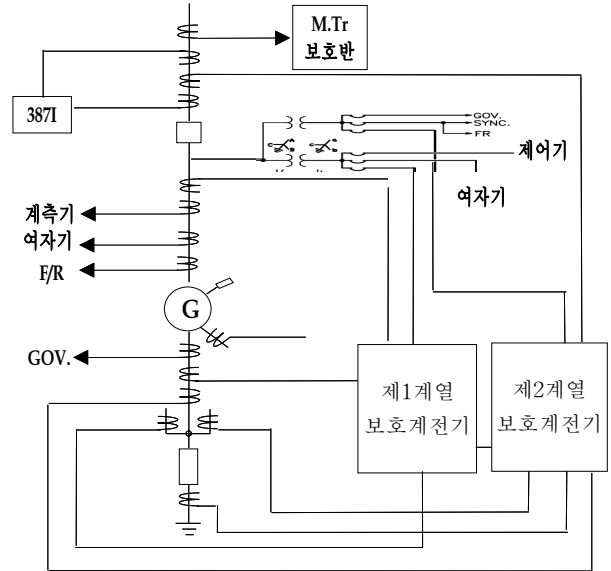
2. 본 론

2.1 양수발전 보호구성

양수발전소 보호시스템의 기본설계는 일반화력과 동일하지만, 하나의 동기기를 두 개의 조건에 의해 발전기 또는 전동기로 운전함으로써 보

호방식역시 두 가지 경우를 상정하여 계획되며, 디지털계전기를 채용함으로써 두가지 보호기능을 하나의 계전기에 수용한다. 하나의 계전기에 각기 다른 운전상황에 맞는 보호 기능을 수행함에 따라 각 계통운전에 따른 운전모드별 계전기 보호 기능전환이 필요한데, 이는 RDS의 조작을 감지하는 기계식 보조릴레이의 접점을 입력받아(Binary Input) Mode가 변환되며 각 Mode별 채용 Funtion은 다음과 같다.

1. Generator : 2I, 24G(59/81G), 27, 32-1G, 32-3G, 40, 46G, 49G, 50BF, 51-1G, 51-2G, 59G, 64G, 64F, 81G, 87G, 60, 51NG, 47G&M
2. Motor : 2I, 27, 32-2M, 40, 46M, 49M, 50BF, 51-1G, 9M, 64F, 78M, 81M, 87M, 60



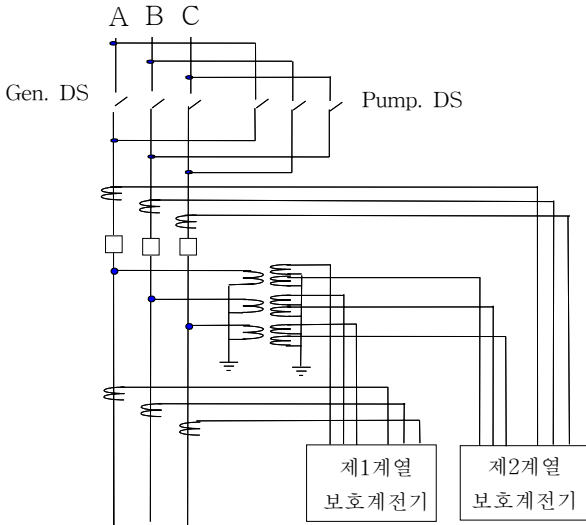
<그림 2> 양수발전소 보호계통도

일반 대용량 화력발전소와는 달리 계통발전 및 계통부하로서의 역할을 담당하고, 별도의 양수기동을 위한 기동장치의 운영에 따라 그에 맞는 보호시스템을 구성하고 있어, 일부 보호시스템 구성에서 일반 화력발전기와는 다른 기능이 있으며, 특히 RDS 변환에 따른 발전기와 전력계통간의 상변환이 이뤄지고 있어 계전기의 연산도 변환되어야한다.

2.2 발전,양수모드전환에 따른 PT,CT 입력 상변환

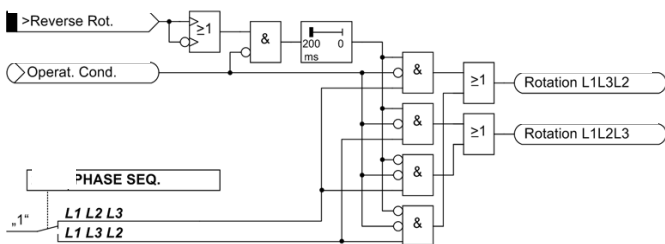
디지털계전기를 채용함으로써 하나의 계전기에 발전모드와 양수모드를 모두 채용하며, 모드전환은 RDS의 기계식접점을 통해 RDS 조작정보를 입력받아 행해진다. 계전기는 A,B 두가지 모드를 구비하고 있는데, A와 B모드 전환시 CT, PT에서부터 입력되는 동일한 AC Source를 내부 계전기에서는 전력의 방향을 바꾸어 인식한다. 이는 발전과 양수운전시 전력을 발생시키고 소모하는 상황을 인식하는 것이며, A와 B중 어느 모드를 발전모드 및 양수모드로 인식하게 할지는 사용자가 직접 정할 수 있도록 하였다. RDS는 계통의 두상을 전환함으로써 Gen/Motor의 회전방향을 전환하는데, Gen/Motor 보호계전기에 입력되는 CT와 PT Source는 그림3.과같이 RDS의 발전기측에 설치되어있다. 계전기에 입력되는 CT,PT 입력점은 발전,양수와 상관없이 일정하다. 결과적으로 RDS에 의한 상변환시 CT와 PT에서 공급되는 계전기 AC 입력 Source의 상이 변환된다. 계통 전압 및 전류는 발전모드 기준으로 RDS 발전기측과 계

통측의 위상이 같아 CT, PT를 통한 AC Source(A∠0° ,B∠-120° ,C∠120°)가 계전기에 입력된다.



〈그림 3〉 보호계전기 CT,PT 입력회로도

그러나 양수모드전환시 계통전원은 RDS를 거치면서 발전기 단자측에서는 A∠0° ,B∠120° ,C∠-120° 로 변경된다. 이는 곧 발전기 단자측 CT,PT에서 계전기에 입력되는 AC Source는 A∠0° ,B∠120° ,C∠-120° 가 되며, 계전기는 이를 역상전력 발생으로 인식하여 동작하게된다. 두상이 바뀜으로서 상과 연관된 다른 모든 기능도 영향을 받게된다. 현장에서 계전기 교체시험시 상변환인식기능을 "OFF"한 상태에서 모드변환후 계전기에 입력하는 CT, PT Source(A∠0° ,B∠120° ,C∠-120°)를 입력하였을때 1계열과 2계열 주계전기 모두 46과 47Function이 동작하였다. 또한 32F는 전압과 전류중 하나라도 역상이 입력되면 MW계산을 중지하고, 27 Function은 정상분 전압을 감지하기 때문에, 역상분 입력시 그 크기와 상관없이 바로 동작하였다. 또한 78과 40은 전압과 전류중 하나라도 역상이 입력되면 모두 부동작하였다. 양수발전기와 같이 계통의 상회전방향이 수시로 바뀌는 경우 계전기에 입력되는 AC Source의 상회전역시 변경되어야 하는데, 이를 물리적으로 구성하려면 CT 2차측 회로를 RDS를 거쳐 계전기에 입력해야 한다. 그러나 RDS 보조접점의 용량문제와 CT 2차회로 변경에 따른 위험부담이 있어 이의 구성은 실질적으로 곤란하다. 대신 계전기에 입력되는 AC Source회로를 변경하지 않고, 단지 계통의 상회전 변환신호를 받아 내부 프로그램 연산방식을 바꾸어준다면 이러한 문제가 해소된다. 때문에 양수발전기는 RDS 위치변환을 입력으로하여(Binary Input) 일시적으로 상변환 순서를 바꾸어 보호연산을 수행하는 보호계전기를 채택한다. 〈그림4〉는 Binary Input에 의한 상회전 변환의 로직구성이다.



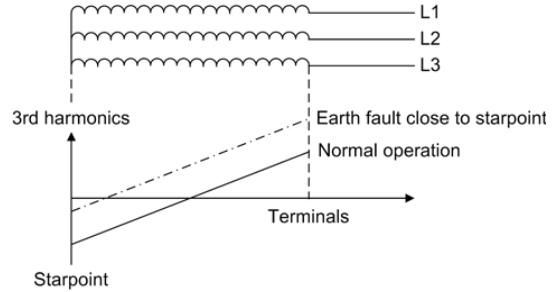
〈그림 4〉 상회전 변경 로직

상회전은 계통이 비운전중일때, 일정시간(200ms) 상회전입력이 있을 경우 수행되며, 이 기능을 "ON"시킨 상태에서 시험했을 경우 계전기는 상회전방향을 바꾸어 인식하고 있었으며, 상과 관련된 보호기능들이 앞서 언급한 오,부동작이 없이 정동작하였다.

2.3 전기자 지락검출(Zero-sequence Overvoltage protection, 64)

국내 대용량 화력발전기의 경우 발전기의 중성점 접지는 일반적으로 접지변압기를 사용한다. 그러나 양수발전기는 고저항접지방식을 채용하였다. 접지변압기를 적용한 일반화력의 경우 변압기 2차측 저항과 함께 전압계전기를 적용하여 지락검출을 하며, 이 경우 중성점 가까이에 지락발

생시 지락전류는 작은 반면, 이를 검출하기 위해 계전기 Pick-up치를 무리하게 낮출 경우 오동작 우려가 있어 일반적으로 중성점측 95%까지를 보호범위로 한다. 그 이상의 지락보호로는 중성점측과 단자측에서 검출되는 제3고조파를 비교하여 보호하기도 하며 중성점에 20Hz의 전압을 흘려 검출되는 전류를 계산, 임피던스를 측정하여 보호하는 방식을 적용한다. 〈그림5〉는 발전기 전기자권선위치에 따른 제3 고조파성분의 분포를 나타내었다.



〈그림 5〉 전기자권선 3차고조파

발전기 전기자권선에서 지락이 발생할 경우 지락이 발생한 권선의 정전용량이 지락에 의해 단락되었기 때문에 권선의 정전용량이 변한다. 이 경우 중성점측에서 측정되는 3차고조파는 줄어드는 반면, 단자측에서 측정되는 제3차고조파는 늘어나는 현상이 나타난다. 변압기접지방식을 사용하는 화력발전소의 경우 중성점측 제3고조파를 측정할 수 있어 중성점측과 발전기 단자측 제3고조파를 검출하여 비교함으로써 100% 발전기 접지보호를 구성하고 있다. 그러나 고저항접지방식을 채용한 양수발전소의 경우 중성점측 접지변압기가 없기때문에 중성점측의 제3차고조파를 측정할 수 없어 단순히 발전기 단자측에 나타난 제3고조파의 크기 변화만을 검출하여 중성점근처의 지락보호를 할 수 있도록 하였다. 사용자가 이 기능을 선택할 경우 제3고조파는 발전기 운전점(P,Q)에따라 크기가 달라지므로 유효전력에 비례한 보정계산식이 내부 프로그램에서 수행된다.

- 식 1) $U_{3H,corrected} = U_{3H} + U_{corr} * (100\% - P_{meas})$
- $U_{3H,corrected}$: Internally used pickup value
 - U_{3H} : Value set with an active power of 100%
 - U_{corr} : correction factor in 3H volt/percent
 $-(U_{3H1} - U_{3H2}) / (P1\% - P2\%)$
 - P_{meas} : Measured active power: $(P / (P + Q))\%$

2.4 비정상 출력 감시(No Power Protection, 32-2M)

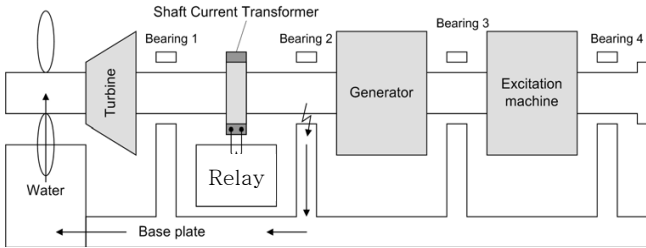
양수발전기와 화력발전기의 가장 큰 차이점은 전동기역할의 겸용이다. 발전운전은 고온고압의 증기원을 사용하는 화력과 달리 상온상태의 물의 위치에너지를 이용하기에 예열이나 증기조건을 맞추는 복잡한 기동절차는 없으며, 일정출력의 변동역시 가능하여 정해진 출력이상시 급전운영에 따라 AGC¹⁾운전을 할 수 있다. 그러나 양수운전을 할 경우 동기전동기 정격을 벗어난 입력이 있을 수 없으며, 정격출력을 소비하지 않을 경우 비정상상태라는 것을 알 수 있다. 양수운전중 정격전력을 소모하지 않는다면 수차와 상부댐사이의 관로막힘, 펌프나 Wicket Gate의 위치불량, 수차내의 공기유입 현상등을 추정할 수 있으며 이를 방지하였을 경우 지하구조물과 기계설비의 손상 또는 공기유입으로 인해 수차에 손상을 일으킬 수 있다. 이를 보호하기위해 Motor의 역전력을 검출하여 적용하는데, 기본원리는 발전기 역전력 검출과 동일하다. 발전기의 역전력보호는 발전기의 모터링을 방지하기 위해 보호하는데, 역전력보호 동작기준은 발전기에 유입되는 전력중 해당발전기 모터링전력의 50%를 기준으로 정하는데 반해 양수운전중인 동기전동기는 전출력의 50%를 기준으로 하며 그 이하의 전력소모는 비정상상황으로 판단하여 차단기를 분리하도록 하였다.

2.5 회전자 축전류 감시(Shaft current Protection, 64G)

터빈과 증기와의 마찰, 발전기 자계의 불균형등에 의한 회전자에 축전류는 고조파를 포함한 전압을 유기하며 이 전압은 일반화력의 경우 05~2V, 양수와 같은 수력의 경우 10~30V까지 유기된다. 로터를 지탱하는 베어링의 하우징은 접지되어 있고, 축과 베어링의 낮은 저항형성으로

1) AGC(Automatic Generation Control, 자동발전제어) : 전력계통의 수요변화에 따라 발전기출력을 급전자동화 시스템으로 자동제어하는 운전방식

큰 전류가 베어링을 통해 흐를 수 있으며, 이는 유막과 베어링을 파괴하기도 한다. 양수발전소와 같은 수력발전기에서는 축전류의 영향을 중요하게 고려해야하는데 그 이유는 상대적으로 로터의 길이가 길고, 로터에 직결된 수차가 상온의 물과 직접 접촉함으로써 접지가 되어있는 상태이기 때문인데, 이는 <그림6> 과 같이 축전류가 흐르는 폐회로를 형성하게 된다.



<그림 6> 축전류 폐회로구성도

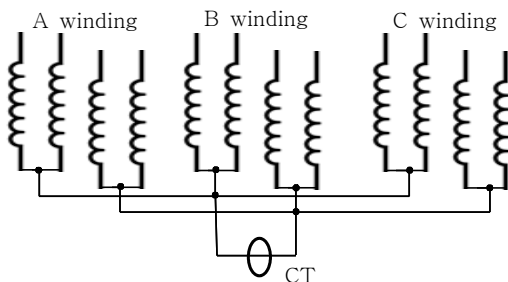
통상 화력발전소에서는 발전기와 터빈사이 로터에 접지 Brush를 설치하여 유기된 축전류를 대지로 상시 방전시키며 이에 대한 보호역시 경보 수준으로 한정한다. 다만 최근 일부 화력발전소에서도 설비 사용연한 증가에 따른 고장예방을 위해 축전류 상시감시장치를 설치하며, 일정기간 Trend 분석을 통해 축전류 크기와 주파수성분을 비교하여 터빈 및 발전기측의 이상현상 추정 및 운전패턴 조정에 참고하기도 한다. 그러나 이 경우에도 로터에 연결된 접지 Brush에 흐르는 축전류를 감시하며 별도의 CT를 사용하지는 않는다. <그림6> 은 축전류를 감시하기위해 축자체에 CT를 설치한 구조를 나타내었다. 로터에 직결된 수차의 접지로 인해 폐회로가 형성되어 발생하는 축전류의 크기가 큰 양수발전소의 경우, 축전류에 의한 베어링 파손가능성이 더욱 크기 때문에 로터자체에 별도 CT를 설치하여 축전류를 감시하고, 일정시간 이상 축전류가 발생할 경우 발전기를 정지하는 기능까지 선택할 수 있도록 하였다.

2.6 VTF(Fuse Fail Monitor)

계전기가 디지털화되어 내부의 다양한 연산처리로 많은 기능을 수용한다 하더라도 결국 연산처리를 위한 Analog Input과 Binary Input등 물리적인 값을 입력받기 위한 입력 Point의 확장은 한계가 있을 수 밖에 없다. 발전기와 모터에 보호하기위한 하나의 계전기에서 많은 Function을 수행하기 위한 입력 Point 수의 한계가 있어 별도의 계전기를 추가 설치하여 64, 51G1-1,2, 51NG기능을 수용하였다. 문제는 추가 설치된 계전기에 3상의 PT전압은 입력되지만 3상의 전류가 입력되지 않아 전압과 전류를 동시에 감시하여 PT의 이상유무를 확인할 수 있는 VTF 감시기능이 없었다. 이에 대한 대책은 주계전기에서 VTF를 감시하여 별도로 추가된 계전기에 AI입력을 제공하던지, 사용 PT를 Open 델타 PT로 변경할 수 있는데, 현장 구조 및 전체 보호설계변경에 따른 부담으로 PT의 교체가 어려워 주계전기의 VTF기능을 입력받도록 회로를 구성했다. 자체내 VTF기능 없이 타 계전기의 기능에 의존하는 것은 보호시스템구성에서 바람직하지 않으며, 향후 계전기 수용성 문제로 인한 별도의 계전기를 추가로 설치할 경우 계전기 기종선정에 따른 AC Source 입력 및 보호방식과 현장에 설치된 PT 결선방식과의 호환성을 고려하여 선정하여야한다.

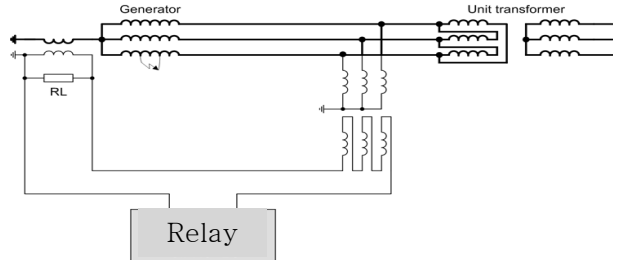
2.7 고정자 권선 Turn to Turn 감시(51NG)

발전기 고정자 턴간 Short 발생시 폐회된 턴사이 큰 전류가 흐르며 권선과 고정자에 피해를 일으킨다. 양수발전소에서는 <그림7> 과 같은 구성을 통해 턴간단락시 불평형으로 발생하는 전류를 검출하여 턴간 Fault 감시를 수행하도록 했다.



<그림 7> Turn Fault 보호구성

국내 화력발전소에는 아직 턴 Fault 감시에 대한 중요성을 크게 고려하여 채용하지 않고 있으나 양수발전소에서는 이 기능에 대한 별도의 CT를 증성측에 설치하였고, 일정시간 Setting값 이상의 전류 Pick-up시 차단을 분리하도록 하였다. 비록 발생빈도가 낮아 일반 화력발전소에서는 이에 대한 기능을 선택하고 있지 않으나, 좀더 개선된 보호계통을 구성하고자 한다면 양수발전소와 같은 턴간 Fault감시 적용을 고려해볼 수 있을 것이다. <그림8> 은 변압기접지방식의 일반화력에서 적용할 수 있는 턴간 Fault 검출개념을 나타내었다.



<그림 8> 변압기접지방식 채용시 Turn to Turn Fault 보호구성

증성점에 설치된 변압기 및 저항은 고정자 지락보호에도 사용된다. Turn Fault가 발생되면 발전기 출력단 PT의 2차측 Open Delta측 전압의 변화를 감지함으로써 보호할 수 있다. 권선 지락발생시에는 발전기 증성측 PT전압과 발전기 출력단 PT의 3V0의 전압이 서로 상쇄되어 계전기에 입력되는 값이 "0"이 되며, Turn Fault 발생시에는 전압의 차이가 발생하여 이를 계전기가 감지한다.

3. 결 론

본 논문은 발전과 양수등 각기 다른 운전모드를 가진 양수발전계통에서 RDS 위치변화시 발생하는 상변환을 어떻게 계전기가 인식하고 연산하는지, 또한 일반화력과는 다른 보호구성 및 기능들에 대해 살펴보았다. 동기전동기역할검용에 따른 별도의 기능과 상온의 물에 상시 접지되어 있는 구조에 따른 축전류감시 강화기능, 또한 발전기 접지방식의 차이로 인한 화력과 다른 지락검출방식과 화력발전소에서는 거의 사용하지 않는 고정자 턴간 Fault기능 채택에 대해 살펴보았다. 양수발전소는 지하공간에 수직구조로 설치하기 때문에 정비공정을 상부기로부터 하부기까지 순차적으로 적용할 수밖에 없어 정비기간이 길어 내부고장시 오랜 기간 운영을 할 수 없기에 그만큼 높은 수준의 보호설계가 요구된다. 디지털기술과 통신기술의 발전으로 양수발전소의 보호시스템이 소수의 계전기에 통합되고 개선되었으나, 많은 기능들을 수용하는 계전기 수용성 부족문제와 이로 인해 발생하는 계전기 추가사용시 CT, PT회로의 호환성 문제가 발생되기도 한다. 그러나 물리적인 입력 Point 확장의 한계에도 불구하고 향후 관련기술의 진화에 맞춰 보호 연산기술을 개발하여 보다 개선된 양수발전소 보호설계기술을 확보한다면, 향후 더욱 첨단화되고, 복잡해지는 발전계통 및 중요전기설비 보호시스템설계에 적용할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] GE Steam Turbine Pyongtaek Combined Cycle Powerplant Maintenance & System Description, Volume 92111A, Steam Turbine & Generator Gen. No. 290T256
- [2] Multifunctional Machine Protection 7UM62 V4.6