

시화호조력발전소 수차발전기를 모델로 한 발전기 고정자권선 지락사고에 대한 100%보호방안 고찰

강동형*, 박성호, 김종득, 남진극, 최형철
(한국수자원공사)

The study of the complete protection for ground-fault of the generator stator winding based on the sihwa tidal power plant's hydraulic turbine generator

Dong-Hyung Kang, Sung-Ho Park, Jong-Deug Kim, Jin-Geuk Nam, Hyeong-Cheol Choi
Korea Water Resources Cooperation

Abstract - 절연물의 열화가 진행되면 최초로 1선 지락사고가 발생할 가능성이 많고 1선 지락사고는 2선 지락 및 단락사고로 파급되어 설비에 심각한 손상으로 이어지게 된다. 따라서, 1선지락 사고에 대한 완전한 보호방식의 적용은 설비 신뢰성 증대라는 측면에서 매우 중요한 사항이라고 판단된다. 이에 시화호조력발전소에 설치될 수차발전기는 고정자권선의 지락사고에 대한 100%보호방식을 적용하였으며 이 설계사례를 토대로 실제적으로 적용가능한 발전기 고정자권선의 지락보호중대방식을 공유코자 한다.

1. 서 론

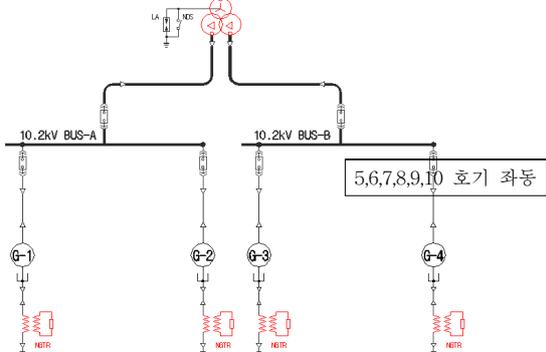
국내에서 적용하고 있는 발전기 고정자권선에 대한 지락사고 보호방식은 접지변압기를 이용한 고저항접지방식으로 지락사고시 발생하는 영상전압을 접지변압기 2차측에 연결된 과전압계전기로 보호하는 방식을 채택하여 왔으나 이 경우 지락사고점이 중성점에 가까우면 가까울수록 지락전류가 작아 감지가 곤란하여 완전한 보호가 어렵다. 따라서, 기존의 방식에서 고정자권선 지락사고의 보호범위는 최대 95%로 제한되고 실제 정정사례를 보면 과전압계전기의 동작감도를 감안하여 80% ~ 85%까지 보호하는 범위로 정정한다. 이 의미는 발전기 중성점으로부터 약 20%범위 내 지락사고는 과전압계전기의 보호범위에 두지 않겠다는 의미이나 IEEE에서는 이러한 기존의 접근방식이 심각한 2차 파급과 연결된다고 경고하고 있으며 그 대책으로 100%보호방식을 제시하고 있다. 시화호조력은 IEEE에서 제시하는 발전기 고정자권선에 대한 100%보호방식 적용과 특히, 3권선변압기를 채용하고 1권선에 2대의 발전기를 병입하는 계통구조에서 문제가 될 수 있는 선택보호에 대해 본 논문을 통해 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1 당초 설계의 문제점 분석

2.1.1 당초 설계현황

시화호력은 25,000[kW] 용량의 수차발전기 10대를 설치할 것이며 3권선변압기를 적용하여 변압기 1차측 1권선에 2대의 발전기를 접속하는 형태로 계통을 구성하였다.

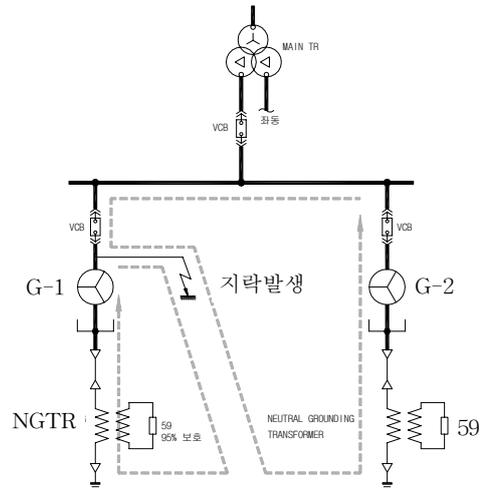


<그림1> 시화호 조력발전소의 발전전력계통도

발전기 고정자의 지락사고 보호방식은 발전기 중성점에 접지변압기를 이용한 고저항 접지방식으로 이 방식은 발전기의 고정자 지락사고 시 지락전류를 최대 10 ~ 15A 이하로 억제하여 고정자 손상을 최소화하기 위한 방식으로 한전의 표준원전발전기도 이 방식을 채택하고 있을 정도로 많이 적용되고 있는 방식이다.

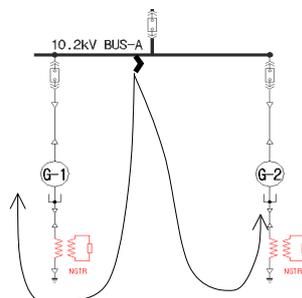
2.1.2 당초 설계의 문제점

3권선변압기를 적용하여 1개 발전기의 지락사고에 대하여 고장 전류가 분류됨으로 감도가 저하되고 선택차단이 어렵다.



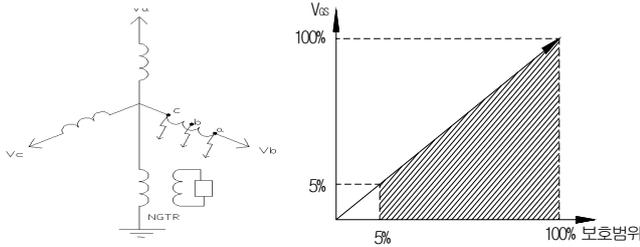
<그림2> 지락사고 시 고장전류 흐름도

G-1의 발전기 고정자에서 지락사고가 발생했다고 보면 그림과 같이 지락전류를 대지를 귀로로 G-2발전기로 흐른다. 지락여부의 판단은 지락전류가 접지변압기를 흐름으로써 발생하는 영상전압을 과전압계전기가 검출하게 되는데 지락전류가 50%로 반감되어 감지감도는 그 만큼 저하되며 G-1에서 사고가 발생했는지 G-2에서 사고가 발생했는지 알 수 없는 상태가 되어 정확한 선택차단이 어렵다. 또한 아래의 그림과 같이 발전기 출력의 10.2kV 모선 측 지락사고에 대한 판단에 어려움이 발생한다



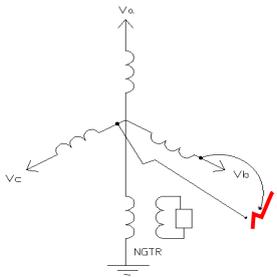
<그림3> 발전기 모선측 지락사고에 대한 고장전류 흐름도

또 하나의 문제점은 접지변압기를 이용한 고저항 접지방식의 경우 지락사고점이 중성점에 가까우면 가까울수록 고장전류가 작아지게 된다. 따라서, 중성점으로부터 5%범위 내 권선의 지락사고는 이 방식으로 검출할 수 없다. 즉, 접지변압기를 이용한 고저항접지방식의 고정자 지락사고에 대한 최대 보호범위는 권선의 95%로 제한된다.



<그림4> NGTR 적용방식에서 지락검출 감지 불가범위 발생

그림에서 a점에서 사고가 나면 시화조력 발전기의 선간전압 10.2kV의 $1/\sqrt{3}$ 배에 해당하는 상전압이 NGTR 1차에 그대로 걸린다고 볼 수 있으나 사고점이 중성점으로 가면 갈수록 NGTR 1차에 걸리는 전압은 낮아져서 결국 감지할 수 없는 범위가 발생한다. 만일, 기존의 방식이 감지하지 못한 중성점으로부터 5%범위 내 지락사고를 차단하지 않고 운전 중 2차 지락사고가 재차 발생한다면 선간단락 또는 상간단락 등 2차 과급이 고장자 권선을 소손시키기에 충분한 고장전류가 발생한다. 이 경우는 NGTR의 고저항에 의하여 제한된 고장전류가 발생하는 것이 아니고 2차 지락점에서 1차 지락점으로 대지의 고유저항만으로 제한되는 고장전류가 발생함으로 매우 위험한 상황에 처할 수 있다.



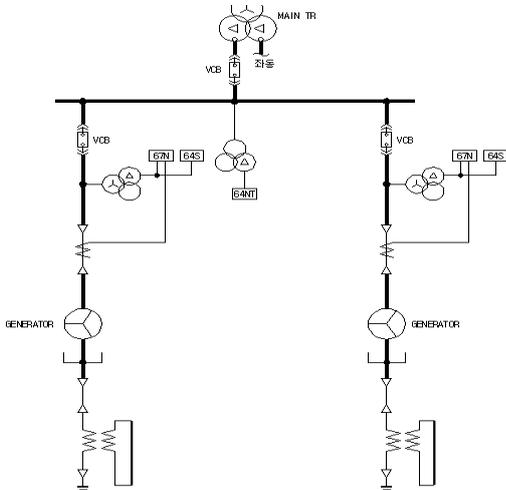
<그림5> 2차지락사고 발생 시 위험상황도

그림에서 C상에서 중성점 가까운 곳에 지락사고가 발생하고 그것을 차단하지 않은 채 운전 중 b상에서 1선 완전지락이 발생하면 지락전류를 제한하는 저항이 대지의 고유저항에 국한됨으로 매우 큰 고장전류가 발생하고 당초의 고저항접지방식은 지락전류에 대한 고속도차단방식을 채택하고 있지 않기 때문에 고장자 소손으로 이어질 수 있다

2.2 개선방안 연구

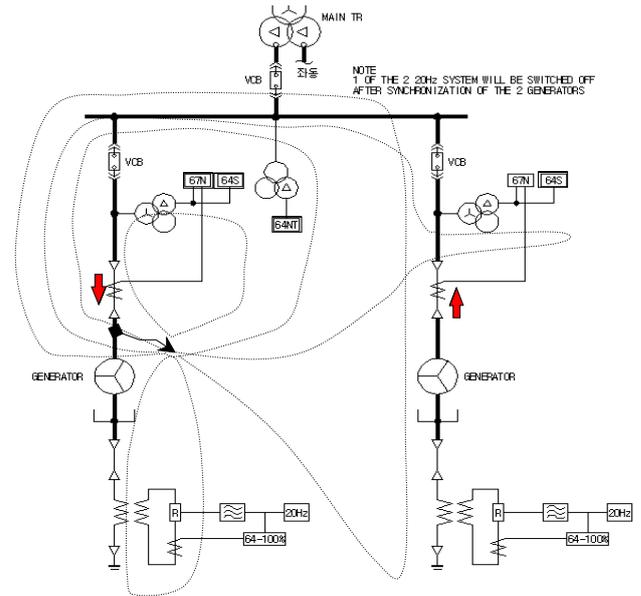
2.2.1 선택보호

선택보호를 하기 위해서 지락방향계전기(67N)를 적용하고 ZCT를 설치를 설계에 반영하였다. 또한 모선 측 지락사고와 발전기 측 지락사고를 구분하기 위하여 모선 측 GPT 2차측에 지락과전압계전기(64NT)를 설치하였고 계통병입 전 발전기의 기동 시 지락사고를 검출하는 지락과전압계전기(64S)를 추가 설치하여 완전한 선택보호가 가능하도록 보완 구성하였고 그 예상되는 상황을 계속해서 알아보기로 한다.



<그림6> 선택보호를 위한 추가계전기 설치도

▶ 1호기 운전 중 고장자 권선 지락사고(보호범위 90%)

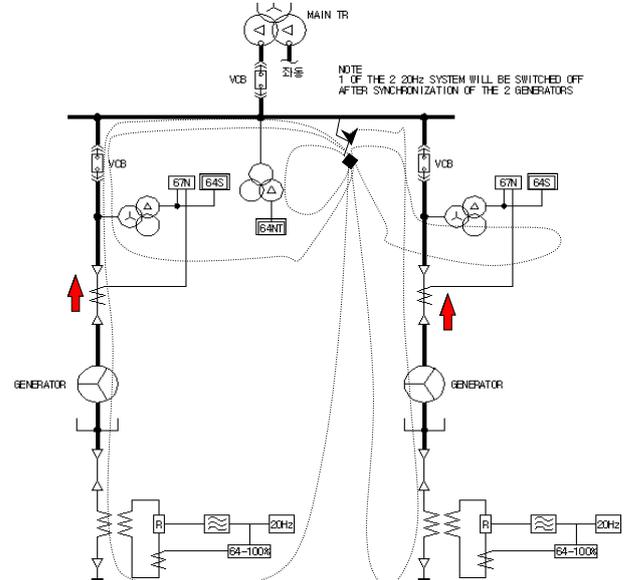


<그림7> 1호 발전기 지락사고 시 지락전류의 흐름과 동작계전기

1호기 고장자 권선에서 1선 완전지락이 발생하였다면 1호기 측 ZCT의 고장전류 방향과 2호기 측 고장전류 방향이 반대방향이므로 1호기의 67N만 동작하여 선택보호가 가능하다. 단, 이 경우 모선 측 64NT도 동작을 하게되는데 발전기 측 67N이 동작하였을 때 64NT가 동작치 않도록 보호협조를 한다면 모선 측과는 완전히 구분되는 선택보호가 가능하다. 만일 계통병입 전 지락사고가 발생하였다면 발전기의 주차단기가 투입되기 전이므로 이때 동작하는 67N과 64S로써 보호가 가능하다.

▶ 모선 측 접지사고

모선 측에서 접지사고가 발생하면 64NT와 64S가 동작하고 67N은 고장전류의 방향이 반대이므로 동작하지 않는다. 이 경우는 모선측 차단기를 Trip토록 구성하면 된다.



<그림8> 모선 측 지락사고 시 지락전류의 흐름과 동작계전기

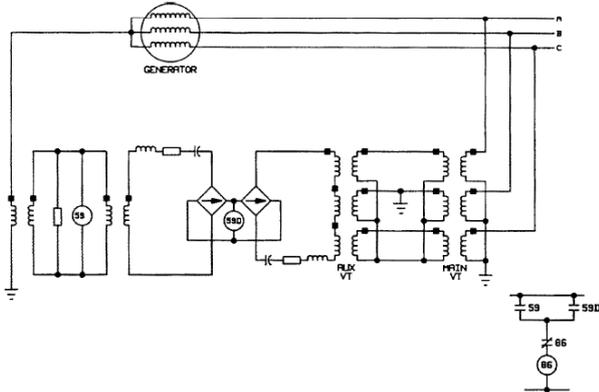
상기에 언급한 바와 같이 보호계전기의 추가설치 및 동작협조를 통하여 3권선변압기를 적용함으로써 도출되었던 선택보호의 어려운 점을 극복하였다. 이때 중요하게 고려하여야 할 사항은 ZCT의 적절한 선정이다. 기존에 선택보호를 위해 적용하는 ZCT는 비접지방식에서 적용하는 mA용 ZCT로써 비접지방식의 경우 지락사고 지락전류는 대지정전용량에 의하여 발생하는 매우 작은 전류를 감지하기 위한 용도이다. 이때 mA용 ZCT를 고저항접지방식에 그대로 적용하면 과전류정수에 의한

오차범위로 인하여 지락사고를 정확히 감지하기 어려울 수 있다. 따라서, mA용 보다 더 큰 전류의 범위에서 고장의 유무를 판단할 필요가 있으므로 A용 ZCT를 적용하였다.

2.2.2 고정자권선의 지락사고 100% 보호방안 적용

IEEE std C37. 101-1993에서는 발전기 고정자권선의 지락사고에 대한 기준방식에 문제점을 언급하면서 100%보호방안을 크게 두 가지로 제시하고 있다. 하나는 발전전압에 포함되어 있는 제3고조파를 이용하는 방법과 저주파로 code화된 신호를 NGTR 2차측에서 임의로 주입하여 지락사고 시 이 신호를 감지하는 계전기인 64-100%를 설치하는 방안이다.

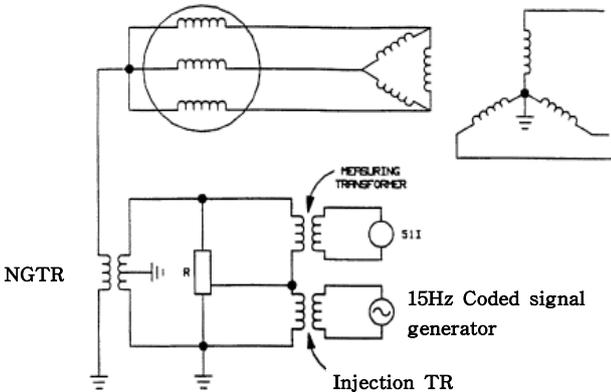
▶ 제3고조파 비율비교방식(Third harmonic ratio comparator)



<그림9> IEEE에서 제시하는 제3고조파 비율비교방식

지락사고 시 제3고조파성분이 발전기의 모선측은 증가되고 NGTR측은 감소된다는 사실을 활용한 것이다. 그 이유는 정상 운전 시 제3고조파의 흐름은 모선 측 GPT의 1차측 중성점 접지와 발전기의 중성점을 하나의 회로로 흐르게 되는데 지락이 발생하면 제3고조파가 고정자권선 발전기의 중성점으로 흐르지 못하고 지락점으로 흐르게 되기 때문이다. 일반적인 발전기권선 지락사고 발생 시 60Hz 상용주파수의 지락전류는 접지변압기를 통하여 귀로하여 교류과전압계전기 59계전기로 검출하여 발전기 고정자권선 지락보호를 하게된다. 하지만 발전기 권선의 중성점 부근에 지락고장이 발생하면 기전력이 작기 때문에 59계전기로는 검출할 수가 없다는 것은 이미 설명하였다. 따라서, 발전기 중성점에 가까운 지락고장을 검출하기 위해 발전기 모선측과 NGTR 측의 제3고조파 전압을 비교하여 차전압의 크기로 동작하는 제3고조파 전압검출계전기(59D)를 별도로 적용한다. 만일, 발전기의 중성점에서 지락사고가 발생하였다고 가정하면 지락점의 임피던스는 발전기의 중성점보다 낮으므로 제3고조파는 지락점으로 흐르게 되고 이에 NGTR에서 검출되는 제3고조파전압은 급격히 저하되므로 59D가 동작하는 원리이다.

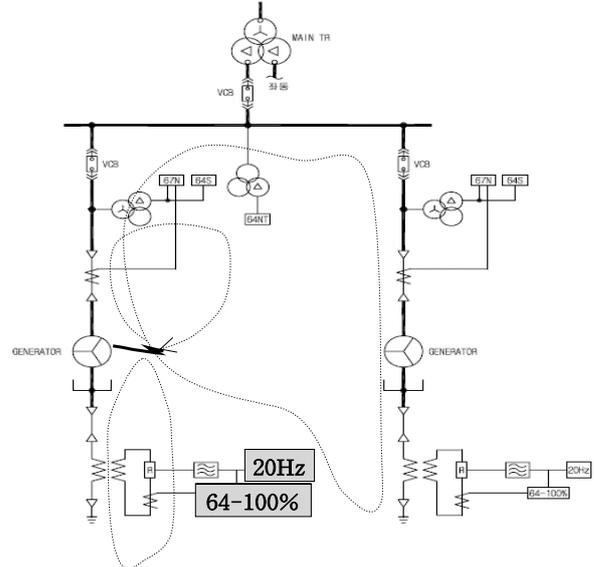
▶ 저주파로 code화된 신호 주입방식(Neutral or residual voltage injection)



<그림10> IEEE에서 제시하는 저주파 주입방식

IEEE에서는 위의 그림과 같은 저주파 주입방식을 제시하면서 고정자권선의 중성점을 포함한 어느 지점에서의 지락사고도 검출할 수 있다고 설명하고 있다. 이 방식은 계통의 주파수와 동기화 할 수 있도록 저차 수고조파로 code화된 신호를 주입하는 것으로 계통주파수의 약 1/4배의 주파수로 발전기의 고임피던스회로를 형성함으로 민감도가 매우 우수할

것으로 판단된다. 시화호조력발전소는 IEEE에서 제시하는 저주파고조파로 code화된 신호를 주입하는 방식을 채택하여 발전기 고정자권선의 지락사고에 대한 100%보호방안을 적용하였다. 아래의 그림과 같이 20Hz 저주파고조파를 NGTR 2차측에서 주입하고 지락사고 시 code화된 신호를 64-100% 보호계전기가 감지하여 고정자 권선의 어느 지점에서의 지락사고도 감지할 수 있도록 구성하였다.



<그림11> 시화호조력발전소에서 적용한 저차수고조파 주입방식

1호기 발전기의 중성점에서 지락사고가 났다고 가정하면 기존의 교류과전압계전기나 지락과전압계전기는 감지할 수 없고 임의로 주입한 20Hz 신호를 64-100%가 감지하여 지락여부를 판단하게 한다. 이때 시화호조력 3권선 변압기를 채용함으로써 봉착되는 문제가 있다. 바로 선택보호 가능여부로서 그림과 같이 이 경우는 지락방향계전기 67N이 감지할 수 있는 영상전압의 범위를 벗어나므로 선택보호는 불가능한 상황이 된다. 그러나 시화호조력이 발전기 고정자권선 지락사고 100%보호방식을 적용하는 가장 큰 이유는 중성점으로부터 5%범위 내 지락사고의 지락전류가 고정자 권선에 즉각적인 문제를 야기시켜서 아니고 2차 사고발생시의 과급사고를 방지하겠다는 의미인 것을 강조한다. 즉, 당초의 목적을 달성코자 하는 취지라면 지락여부의 경보로써도 충분하다고 판단된다. 발전기 운전 중 64-100%가 경보를 발생하였다고 하면 발전정지 중 지락사고 가 난 발전기가 어느 것인지를 판별하고 지락점을 찾아 보수하여 2차 지락사고 시의 과급을 차단할 수 있다면 본 설비의 구성은 충분한 역할을 수행하는 것이라 판단된다.

3. 결 론

고전압 대형회전기의 고정자절연은 Mica-tape와 Epoxy-resin으로 구성되어 있으며, Coil의 절연 시스템은 전기적 부하변동, 기동과정에서의 Heat-cycle, 기계적 및 열적 stress, 그리고 환경적 원인으로 열화가 진전된다. Coil의 절연은 초기에는 견고한 결합형태를 가지나, 운전년수에 따라 절연체내의 작은 공극이 점점 확대되어 결국 Mica-tape에 Crack이 생기고 권선으로부터 분리되어 절연능력을 상실하게 되며 결국에는 지락사고 등으로 이어질 수 밖에 없다. 발전기 고정자권선의 중성점으로부터 5%범위는 발전전압의 5%정도이므로 전체 권선에 비한다면 전압이 매우 낮아 그 만큼 사고의 확률도 낮다고 볼 수 있다. 그렇지만 사고의 확률은 분명 내재하고 있고 중요한 것은 그 이후에 2차 과급이 발전기를 손상시킬 정도로 과대하게 된다는데 있다. 시화호조력발전소는 국내최초로 건설하는 세계최대규모의 조력발전소로써 최고 품질의 설비구축을 위해 노력하고 있다. 특히, 조력발전소가 해상에 위치하여 염해에 의한 부식환경이 다른 지역보다 높은 관계로 발전기 절연능력의 저하와 관련된 사항에 대해서는 보다 세심한 배려가 요구되어 국내최초로 code화된 저주파 신호를 이용한 고정자 지락사고에 대한 100%보호방식을 설계에 적용하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE std C37. 101-1993 (IEEE Guide for Generator Ground Protection)
- [2] IEEE Tutorial on the protection of synchronous Generator
- [3] 유상봉, 임성준, 강창원, 이순형, 한찬호, 박용덕, 전명수, 김정철 “보호계전시스템의 실무활용기술” p230-233.2002.