

**발전기 보호계전기용 계기용변성기(PT) 손상 사례에 관한 연구**

**박진엽\***, 진수환, 박인규  
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

**Study on the Failure Case of Potential Transformer for Generator Protection Relay**

Jin-Yeub Park\*, Soo-Hwan Chin, In-Kyoo Park  
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Nuclear Engineering Technology Institute[NETEC]

**Abstract** - 기계적에너지를 전기적에너지로 변환하는 발전기를 내·외부 고장으로 부터 보호하기 위해 보호계전기가 설치되어 있으며, 이러한 보호계전기의 동작신호 중 하나인 전압신호를 검출하기 위해 발전기와 변압기를 연결하는 모선에 설치된 계기용변성기를 이용한다.

본 논문은 발전기의 보호계전기용 계기용변성기 손상원인에 관한 연구로서, 계기용변성기의 철공진에 의한 손상가능성을 고찰하였고 발전소에 많이 사용되는 G사의 계기용변성기와 손상된 I사의 계기용변성기에 대한 전기적 시험결과를 비교하였으며, 계기용변성기를 직접 절개하여 제작 및 적용특성을 분석하였다. 그 결과 발전기 전압신호 검출용 계기용변성기는 발전기 중성점 접지형태에 관계없이 반드시 Line to Line type을 적용해야 함을 도출했다.

**1. 서 론**

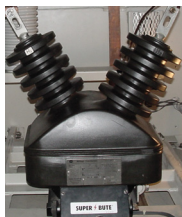
화력, 원자력 등을 이용하여 발생하는 열에너지를 터빈을 거쳐 전기적 에너지로 변환시키는 발전기를 고장으로 부터 보호하기 위해 비움차동계전기 등 여러 종류의 보호계전기가 설치되어 있으며, 보호계전기는 전압, 전류, 위상, 주파수 등의 신호를 기반으로 동작한다. 이 중 전압신호는 발전기 출력전압을 계기용변성기를 사용하여 120VAC로 변압하여 사용한다[1]. 보통 이러한 계기용변성기는 자기특성이 우수한 철심에 1차와 2차 코일을 감고 절연처리를 한 다음 에폭시로 몰딩 한 후 1차와 2차 연결단자만 인출하는 형태로 제작되어 일반적인 변압기에 비해 신뢰성이 높고 수명이 길다. 그러나 이러한 계기용변성기도 수명이 오래되거나 제작에 문제가 있으면 운전 중 코일 단선이나 절연과피 등으로 전압신호가 상실되거나 과도한 전압이 유기되어 보호계전기의 오동작 또는 손상을 유발할 수 있다.

본 논문에서는 계기용변성기 손상원인을 분석하기 위해 철공진에 의한 손상가능성을 분석하였고, 국내발전소에 많이 적용된 G사의 계기용변성기와 손상된 I사의 계기용변성기에 대하여 전기적 시험결과를 비교하였다. 또한, 계기용변성기를 직접 절개하여 고장원인 및 적용상의 문제점을 분석하여 발전소의 발전기 보호용 계기용변성기 적용에 있어 고려해야 할 점을 도출하였다.

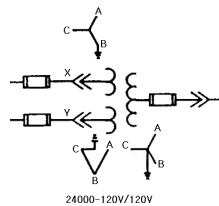
**2. 본 론**

**2.1 계기용변성기(PT)**

발전기 보호를 위한 보호계전기 동작용 전압신호 검출을 위해 사용되는 계기용변성기는 보통 에폭시 몰드형을 많이 사용하고 있으며 외관상으로는 <그림 1>과 같이 계기용변성기 몸체에 1차, 2차 단자만 보이지만 내부적으로는 철심에 1차(고압권선)와 2차권선(저압권선)을 감고 절연처리를 한 다음 절연강도 유지 및 습분유입방지 등을 위해 에폭시로 몰딩한 후 1차와 2차 단자를 인출한다. 그리고 <그림 2>와 같이 계기용변성기 고장으로 인한 고장파급방지 및 2차측 단락으로부터 계기용변성기를 보호하기 위해 1차와 2차측에 보호용 퓨즈를 설치한다.



<그림 1> PT 구조



<그림 2> PT 회로도

**2.2 계기용변성기 사양 및 고장**

발전소에는 발전기 보호계전기용으로 4대의 계기용변성기가 설치되어 있으며, 제작사는 프랑스의 I사, 정격은 24kV/120V-120V,400VA, 기준충격절연강도(BIL)는 150kV이다. 발전소 상압운전 시작 후 3년 동안 계기용변성기 층간단락 2회, 보호용 퓨즈 용단 3회가 발생되었다.

**2.3 철공진에 의한 손상가능성 고찰**

**2.3.1 공진현상**

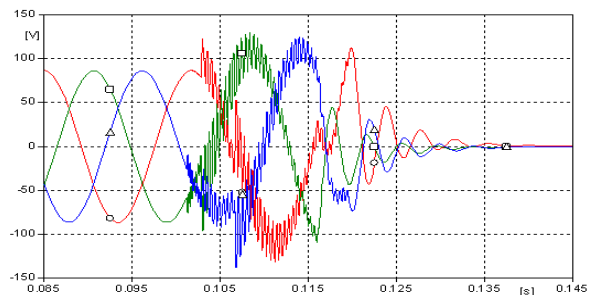
변압기, 리액터 등의 유도성 리액턴스와 대지 정전용량, 기기, 부싱 등의 표유 정전용량과 같은 용량성 리액턴스의 작용으로 직렬 또는 병렬공진이 발생할 수 있다. 직렬공진의 경우 리액턴스 양단에 매우 큰 전압이 나타나며 병렬공진의 경우 순환성 진동전류를 유발한다.

**2.3.2 철공진 발생시 증상**

철공진은 기본과 철공진과 철심의 포화에 따른 고조파 철공진으로 구분한다. 철공진 발생시 증상은 지속적이고 매우 높은 과전압, 과전류, 지속적인 전압 또는 전류파형의 비틀림, 중성점 전위변동, 변압기과열(무부하인 경우), 과열 또는 절연과피에 의한 전기기기(콘덴서 뱅크, 계기용변성기 등)의 손상, 변압기 또는 리액터의 큰 소음 등이다[2].

**2.3.3 철공진에 의한 손상가능성**

철공진에 의한 계기용변성기 손상가능성을 검토하기 위하여 ATP-EMTP 프로그램을 사용하여 5가지 사례로서 C-1 : 초기 역가압 운전, C-2 : 정상운전 중 발전기차단기 개방, C-3 : 정상운전 중 소내 부하운전, C-4 : 역가압 운전 중 345kV 차단기 개방, C-5 : 정상운전 중 발전기차단기 및 345kV 차단기 동시개방 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 <그림 3>과 같이 C-1-5에서는 345kV 차단기 투입직후 약 0.25Cycle 범위에서 계기용변성기 2차측에 최고 1.6배(1차측 기준 약 27.3kV)의 개폐찌지에 의한 과전압이 나타났지만 이 전압은 계기용변성기 기준충격절연강도(BIL)인 150kV 이내이므로 계기용변성기 설계조건을 만족하며 철공진현상으로 추정되는 이상과전압이나 LC진동현상은 나타나지 않았다. 또한 C-2,3,4에서는 차단기 동작시 개폐찌지 고조파 전압이 발생하지만 이러한 현상은 정상적으로 발생할 수 있는 과도전압이며, 마찬가지로 철공진현상이나 LC진동현상은 나타나지 않았다. 따라서 철공진에 의한 손상가능성은 없는 것으로 나타났으며 실제 철공진 발생시 소음과 전압변동을 동반하여야 하나 고장 당시의 고장기록 파형에 전압 과도현상이 없었으므로 철공진에 의한 손상은 아닌 것으로 확인되었다[3].



<그림 3> C-5, 정상운전 중 GCB 및 345kV 차단기 개방(0.1초)조건 시뮬레이션 결과(○:A상 전압, □:B상 전압, △:C상 전압)

〈표 1〉 계기용변성기 전기적 시험결과

시험항목	판정기준	I사	G사
절연역률시험	<2%	3.0~4.88	1.5
유도전압시험	40초 견딜	양호	양호
내압시험	60초 견딜	양호	양호
부분방전시험	<25pC	0.7~3.6	0.7
충격전압시험	파형비교	양호	양호

2.4 계기용변성기 전기적 시험

계기용변성기의 건전성을 확인하기 위하여 손상이 예상되는 I사와 발전소에서 많이 사용되는 미국 G사의 계기용변성기에 대하여 시험기준[4,5]을 적용하여 1차측 절연역률시험, 유도전압시험, 내압시험, 부분방전시험, 충격전압시험을 수행하였으며 시험결과는 <표 1>과 같다.

시험에서 I사 PT의 경우 절연역률시험을 위해 인가전압을 증가시켰을 때 절연역률값이 큰 폭으로 증가하면서 변동이 심하였고 다른 특성들은 양사의 계기용변성기 모두 양호한 특성을 보였다.

2.5 계기용변성기 절개

정확한 계기용변성기의 고장원인 확인을 위해 양사의 계기용변성기를 절개하여 내부 철심 및 권선의 배열상태, 절연상태 등을 확인하였다.

2.5.1 I사 계기용변성기

I사 계기용변성기를 절개한 결과 <그림 4>와 같이 고압측 권선 중성점측 끝에서 3~10번째 층(총 층수 : 40)에서 내부고장(단락)이 발생하였으며, 내부 단락에 의해 열이 발생하고 층간절연지와 예폭시 수지가 녹아 내려 최종적으로 외함 균열과 함께 고압권선 일부가 바깥쪽으로 밀려나간 형태로 고장이 진행되었음을 확인하였다.

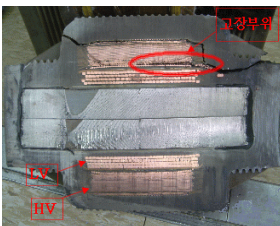
I사 계기용변성기 권선의 세부구조는 <그림 5>와 같이 고·저압 모두 에나멜 동선을 사용하였으며 고압권선의 선로측은 임펄스 내량을 갖도록 굵은 선을 사용하여 턴간과 층간 간격을 크게 하고, 특수절연물을 추가하여 절연강도를 높였지만, 중성점측은 임펄스에 취약하도록 제작되어 있었다. 고압과 저압권선사이의 절연은 고압 중성점측이 접지되어 사용되는 것을 고려하여 절연강도를 낮춘 일종의 단절연 형태를 취하였으며 기계적인 강도를 높이기 위하여 보강재를 삽입하였다.

2.5.2 G사 계기용변성기

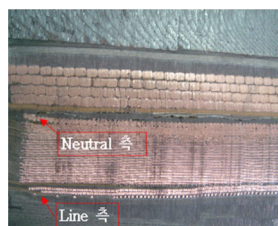
G사의 계기용변성기는 <그림 6>과 같이 권선은 고·저압 모두 I사와 동일하게 에나멜 동선을 사용하였으며, 고압권선의 선로측 첫 번째 턴은 임펄스 서지내량을 갖도록 편조선 형태로 제작하여 단면적을 증대시켰다. 또한 두 번째 턴과의 간격을 크게 하여 절연강도를 높였다. 고압권선은 격자 형태로 4개 부분으로 나뉘어져 있으며 각 소선사이를 균등하게 배치하여 소선간의 전압분포를 고르게 하고, 여기에 예폭시 절연재가 스며들도록 주조 형태로 제작하였다. 이러한 격자권선은 임펄스 서지에 대하여 우수한 내량을 가진다. 또한 고압권선 주변을 차폐하여 누설자속의 영향을 차단하도록 하였다.

2.5.3 계기용변성기 절개결과 비교

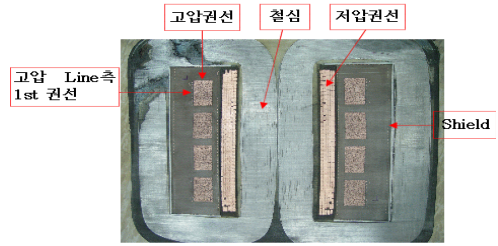
I사 계기용변성기의 경우 단절연 형태로 제작되어 선로측에 비에 중성점측이 절연에 취약한 구조였으며 실제적으로 절연역률시험을 위해 시험전압을 2~3kV 증가하였을 때 부분방전으로 인해 절연역률이 큰 폭으로 증가하였다. 이는 I사의 계기용변성기가 선로 측, 중성점 측 구분 없이 절연강도를 동일하게 설계한 Line to Line Type인 G사 계기용변성기와 달리 Ground Type임을 의미하므로, I사 계기용변성기가 G사에 비해 상대적으로 절연구조가 취약하다는 것을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 I사 PT 절개결과



〈그림 5〉 PT 권선구조



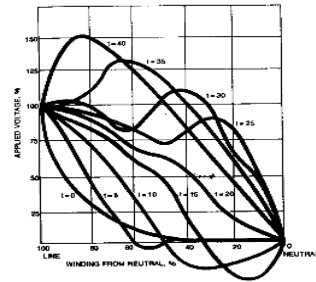
〈그림 6〉 G사 PT 절개결과

2.6 계기용변성기 구조와 임펄스 전압의 영향

발전기와 변압기 사이에 설치된 계기용변성기에는 뇌서지 또는 개폐서지에 의해 정격보다 훨씬 큰 전압이 인가될 수 있으며 이때 계기용변성기 권선에 걸리는 전압은 <그림 7>과 같이 시간에 따라 다른 임펄스 전위경도 분포를 갖는다.

과도 초기에는 선로측 권선의 끝부분에 높은 전위경도가 발생하며 시간이 경과함에 따라 반사파 등의 영향으로 전위경도 분포가 진동하면서 중성점측 권선 끝부분에도 높은 전위경도가 걸린다. 이러한 현상은 비접지 계통에서 가장 심하게 발생되며, 발전기의 경우 비접지 방식과 유사한 고저항 접지방식이므로 높은 전위경도가 걸린다. 그러므로 선로 측과 중성점 측 끝부분의 권선은 높은 절연강도가 요구되며 특히, 발전기용차단기가 개방된 상태에서 주변압기가 가압되는 경우 주변압기 저압측은 비접지 상태이므로 가압되는 순간 개폐서지 유입에 따른 영향은 발전기 정상운전시보다 훨씬 크다고 할 수 있다.

따라서 I사의 계기용변성기는 Ground Type으로서 선로측은 절연강도를 보강하였으나 단절연 형태로 제작되어 중성점측 끝부분은 절연강도가 약해 뇌서지 또는 개폐서지에 의해 반복되는 임펄스에 의해 손상된 것으로 판단된다.



〈그림 7〉 시간에 따른 임펄스 전압분포

3. 결 론

본 논문에서는 발전기의 보호계전기 전압신호 제공을 위해 사용된 계기용변성기의 손상원인을 분석하였다. 이를 위해 철공진에 의한 손상가능성과 전기적 시험결과를 검토하였으며, 계기용변성기를 절개하여 권선제작형태에 따른 임펄스 영향을 비교분석하였다.

계기용변성기가 손상된 원인은 단절연 형태로 제작된 Ground Type의 계기용변성기가 고저항 접지 또는 비접지 계통 특성으로 인해 반복적으로 발생하는 임펄스를 견디지 못하여 절연강도가 취약한 중성점 측 권선 끝부분에서 절연파괴가 발생된 것이다. 이러한 Type의 계기용변성기는 주발전기와 같은 고저항 접지계통이나 비접지 계통에는 적합하지 않으므로 발전기 보호를 위한 보호계전기 전압신호 검출용 계기용변성기는 발전기 중성점 접지형태에 관계없이 반드시 임펄스 내량이 우수한 Line to Line type의 계기용변성기를 적용해야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] IEEE C37.101-1993 "Guide for Generator Ground Protection"  
 [2] 김병한 "삼진강수력발전소 변압기 철공진 현상 및 대책 기술 지원 보고서" 전력연구원, 2002  
 [3] KOPEC 계기용변성기(PT) 및 퓨즈 고장관련 기술검토 보고서, 2004  
 [4] IEEE Std C57.13-1993(R2003) "IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers"  
 [5] GET-7015 "An Evaluation of 34.5kV Outdoor Voltage Transformers", 2001