

154 kV GIS의 PT 철공진 소손사례와 원인규명

우정욱*, 심웅보*, 김승규**
 한전 전력연구원*, 한국전력공사**

A analysis result on the PT ferroresonance at 154 kV GIS substation

J.W.Woo*, E.B.Shim*, S.K.Kim**
 KEPRI*, KEPCO**

Abstract - This paper describes the analysis results on the PT ferroresonance at 154 kV GIS(gas Insulated substation by EMTP(Electromagnetic Transient Program).

We had simulated the PT ferroresonance between a potential transformer(PT) and an open circuit breaker's grading capacitance. The ferroresonance leads to very large power frequency overvoltages on PT bus and subsequent insulation failure. The large power can be supplied to the PT by the high voltage on the opened circuit due to the grading capacitance and equivalent capacitance of the buses during the ferroresonance.

The damping circuit connected on the secondary winding were considered in the model. The actual countermeasure include a saturable inductor and a resistor series-mounted, but the 2 ohms of damping resistance was used in the computational model.

1. 서 론

철공진은 정현파 전원에 의해 커패시터와 직렬로 연결된 포화특성을 지닌 인덕턴스 사이에서 나타나는 비선형성을 지닌 진동현상이다.

계통에서 나타나는 철공진 현상은 유도성 변압기가 차단기 후단에서 변전소 BUS에 연결되어 있는 경우에 차단기 챔버의 grading 커패시터와 PT가 연결되어 있는 BUS Bar와 대기간 사이의 커패시턴스에 의해, 차단기가 열려있을 때 각 커패시터에 전압이 걸리게 되는데 이때의 전압은 개폐시간에 영향을 받는다. 따라서, 커패시터 분압기처럼 동작하는 C의 증가 커패시턴스를 통하여 PT에 지속적인 전압이 공급된다. 이때 PT에 공급된 DC 전압은 코어 포화의 원인이 된다.

이러한 철공진 현상은 철심형 PT를 사용하는 경우에 발생하며 최근 개스차단기를 많이 사용하게 됨에 따라 발생 가능성이 매우 높아지고 있다. 유입차단기와는 달리 개스차단기에는 근거리 차단 또는 모선고장 차단등에 대비한 차단기의 TRV(Transient Recovery Voltage) 성능을 향상시키기 위하여 차단기 극간에 capacitor를 사용하고 있다. 따라서 차단기가 개방된 이후에도 이 capacitor와 모선의 capacitance에 분압에 의한 전압이 지속적으로 걸리게 되며, 차단기의 차단에 의한 개폐 찌지 등 진동을 유발하는 원인에 의해 한번 트리거 된 공진회로는 포화된 철심에 과전류를 공급하게 된다.

이 공진현상을 유발하기 위해서는 PT회로의 인덕턴스와 모선의 정전용량이 공진조건을 만족하여야 하는데, 육외철구형 변전소에서는 모선의 정전용량이 작기 때문에 문제가 없었으나, GIS형 변전소에서는 정전용량이 상대적으로 커짐에 따라 철공진이 발생한 것으로 보인다.

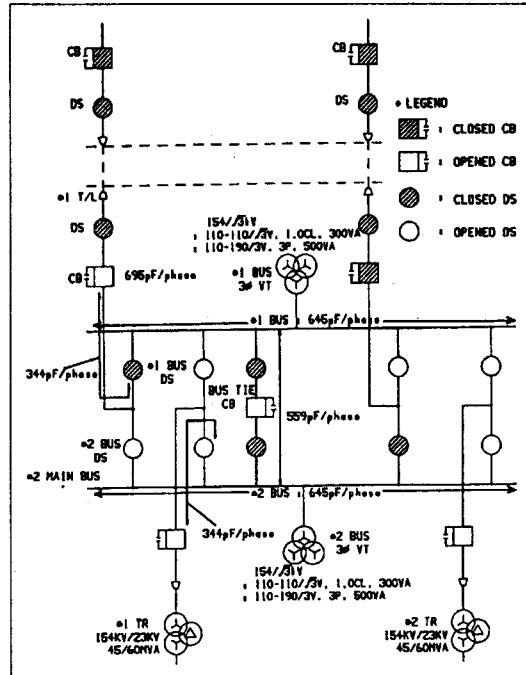


그림 1. 해석대상 계통

이 논문에서는 최근에 보고된 고장 중에서 PT가 철공진으로 인하여 소손된 경우에 대해 이론적으로 검토하고, EMTP를 이용하여 해석하였다.⁽¹⁾ 또한, 제작사측에서 제시한 내용의 타당성에 대하여서도 검토하였다.

2. 본 론

2.1 EMTP 해석대상 계통 및 해석조건

그림 1은 해석대상 변전소를 EMTP로 모의하기 위한 등가회로도이다. 대상변전소는 인입 송전선로가 2개, 주 변압기가 45/60 MVA짜리 2 bank를 가진 154 kV 개스절연변전소로 1.5 차단방식을 사용하고 있으며, 인입 송전선로쪽의 #1 BUS에 연결되어 있는 PT(2차측 300 VA)가 특정 조건에서 파손된 경우이다.

파손될 당시의 계통 조건은 #2 BUS는 #2 T/L에 의해 가압되어 있으나 BUS TIE CB에 의해 #1 BUS와는 분리되어 있었다. #1 T/L도 인입부의 CB에 의해 분리되어 있으나, 단로기는 들어가 있는 상태로 #1 BUS는 전기적으로는 직접 연결되지 않은 상태이었다. 이때, #1 T/L을 분리하기 위한 CB에는 grading C가 695 pF이 달려 있었고, 이때의 #1 BUS는 대기간 C 값이 약 1200 pF이었다.

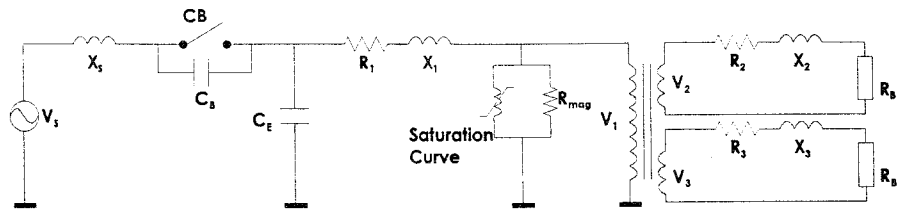


그림 2. 해석대상 계통의 등가회로

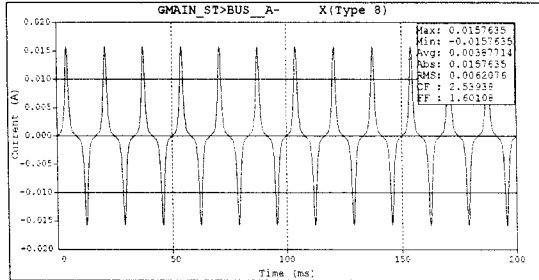


그림 3. PT 1차측 여자전류 파형(정상상태)

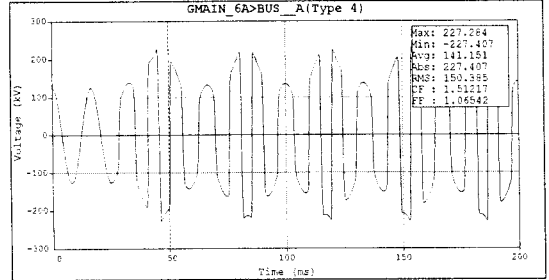


그림 4. PT 1차측 전압 파형

PT 2차측 WYE 권선의 용량이 300 VA, 3차측 DELTA 권선의 용량은 500 VA로 설계되어 있다. 종래의 변전소에 실제로 걸리는 부하는 보통 100~150 VA 정도로 추정되나, 최근에는 보호계전기 등 PT 2차에 연결된 기기들이 모두 디지털화 되면서 실제 조건에서는 약 50 VA의 부하가 걸린 것으로 추정하여 그 값을 계산에 사용하였다.

또한, EMTP 모의시에 PT의 포화특성은 제작사로부터 정확한 데이터를 얻지 못하여 EMTP 관련 문헌의 345 kV급 PT의 I- ϕ 특성곡선을 154 kV급으로 근사화시켜 모의하였다.⁽²⁾ 구하여진 가상 비선형특성을 이용하여 EMTP 상에서 여자시험을 하여 모형을 검증한 결과 2차측에 정격전압인 110 V를 가할 때 여자전류가 약 5 ARMS 가 흐름을 확인하였고 포화특성에 대한 시험결과와 비교하였다. 그림 3은 PT 1차측에 정격전압을 가하였을 때의 전형적인 여자전류를 보여주고 있다.

PT의 모델은 1차, 2차, 3차 권선, 비선형 magnetic branch 및 철손 등의 파라미터로 표현되며, 히스테리시스 손은 무시되었다.

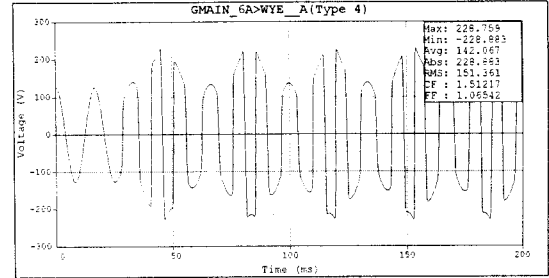


그림 5. PT 2차측 전압 파형

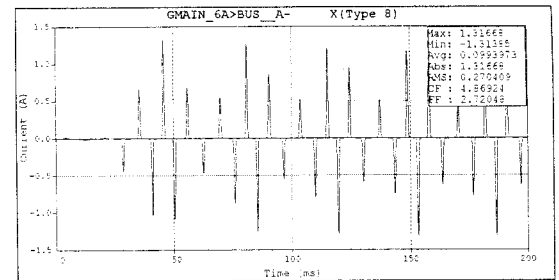


그림 6. PT 1차측 전류 파형

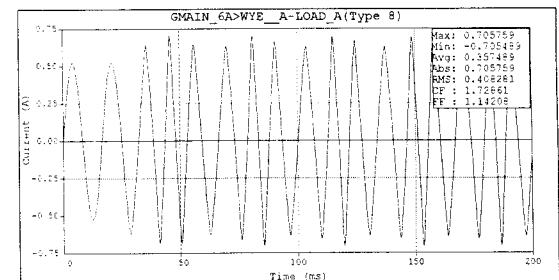


그림 7. PT 2차측 전류 파형

2.2 해석결과

2.2.1 고장시의 조건에 따른 해석결과

그림 4는 대상 변전소에서 실제 PT가 파손될 당시에 해당되는 정수들을 이용하여 EMTP를 모의한 결과로 차단기의 C_B 와 BUS와 대지간의 C_E 의 분압비에 의한 전압이 PT 1차측 코일에 걸린 전압으로 C_E 와 1차측 코일 L값이 공진을 일으킬 수 있는 특정 값이 되어 높은 전압이 코일에 유기되는 결과를 보여주고 있다.

그림 5는 그림 4와 같은 전압이 1차측에 걸렸을 때 2차측에 걸리는 전압 파형을 보여주고 있다. 역시 정격 전압보다 높은 파형이 코일에 걸리고 있음을 보여준다.

그림 6과 7은 동일 조건에서 1, 2차측 코일에 흐르는 전류 파형과 크기를 보여주고 있다. 정상상태에서의 1차측 여자전류는 약 0.006 ARMS 이므로 PT의 용량이 750 VA임에 비하여, 공진시에 흐르는 여자전류는 0.27 ARMS가 흐르고 전압도 약 1.18 p.u.가 되어 40,000 VA에 해당되어 PT를 소손시키는데 충분한 용량을 알 수 있다.

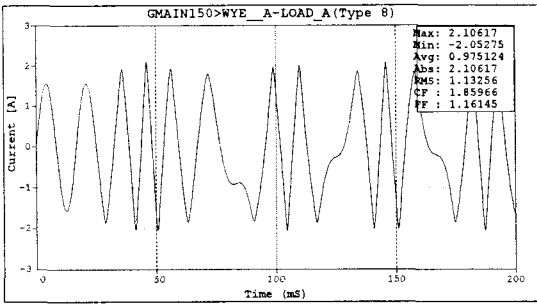


그림 8. PT 2차측 전류 파형(150 VA 부담)

PT 2차부담의 변화에 의한 철공진 억제 가능성을 검토하기 위하여 PT의 2차부담을 50 VA, 100 VA 및 150 VA로 하여 각각 모의하였으나 150 VA인 경우 공진이 가장 심하게 나타나 효과가 없음이 확인되었다.

그림 8은 이 때 PT 2차측 WYE 권선에 흐르는 전류 파형으로 심한 왜형이 발생하고 있음을 알 수 있다.

2.2.2 운전조건에 따른 해석결과

표 1. BUS C값 변화에 따른 PT 전압/전류 특성

C [pF]	V ₁ [kV]	V ₂ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]
669	247	248	1.19	0.69
869	239	240	1.23	0.70
1069	232	234	1.28	0.70
1269	227	229	1.31	0.71
1469	223	224	1.35	0.71
1669	217	219	1.38	0.71
1869	215	216	1.42	0.72

표 2. CB C값 변화에 따른 PT 전압/전류 특성

C [pF]	V ₁ [kV]	V ₂ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]
695	227	229	1.31	0.71
1390	263	265	1.80	0.75
2085	250	252	1.90	0.77

위와 같은 특정한 경우 이외에 CB의 투입 조건과 BUS의 연결상태 변화, 즉 차단기의 C_B와 모선의 C_B값의 변화에 따라서 철공진현상이 일어날 수도 있다. 따라서, 두 C값의 변화에 따른 영향을 살펴본 결과가 표 1과 표 2이다.

표 1은 대시간 C값이 변화할 때, 즉, 계통의 조건에 따라 모선의 길이가 변경될 때의 PT에 걸리는 전압/전류 특성이다. PT에 걸리는 전압은 대시간에 걸리는 C값이 커질수록 적어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 특정 공진영역을 피하려면 C값을 크게 할 필요가 있다. 실제의 경우에서도 양쪽 모선이 모두 가압된 조건에서는 철공진이 일어나지 않았다.

또한, 표 2에 의하면 CB의 C 값 변화에 따른 영향은 C의 값이 커질수록 적은 전압이 PT에 걸리게 됨을 볼

수 있다. 즉 변전소의 규모가 커지고 차단된 차단기의 병렬회로수가 많은 경우에 유리함을 알 수 있다. 그러므로 변전소 초기규모에서 발생한 이와 같은 고장 사례는 변전소 규모의 증대에 따라서 자연적으로 해소될 수 있는 가능성이 있다.

2.2.3 철공진 방지대책을 위한 해석결과

철공진 회로는 가해진 전압 또는 회로의 기기들을 통해서 흐르는 전류에 따라서 특성이 부여되는 주파수에 의해 진동을 나타낸다. 이러한 주기적인 진동의 지배적인 주파수는 계통주파수(기본주파수 철공진) 또는 파생된 주파수(부고조파 철공진)이다.

이 현상은 기기의 고장을 초래하거나 보호기기의 오동작 및 PT에 연결된 측정기기를 손상시킬 수도 있는 과전압 또는 과전류에 의해서 특성이 나타난다.

철공진현상의 발생을 피하거나 신속하게 제동시킬 수 있는 새로운 기술적인 해법을 추구하기 위하여, PT의 2차권선에 제동 리액터와 제동 직렬 저항을 삽입하여 가속제동 시키는 방법이 제안되고 있다.

제동 리액터는 전자 스위치로서 동작한다. 정상적인 운전조건하에서 제동 리액터는 측정 기기의 교란을 방지하기 위해 높은 임피던스를 가진다. 철공진이 발생하면, 리액터의 인덕턴스는 리액터의 포화상태(매우 낮은 임피던스 특성을 가짐)에 이르게 되므로, PT가 포화되기 전에 이러한 현상을 방지하기 위한 직렬저항을 삽입한다.

제동저항 2Ω을 2차측 WYE 권선에 추가한 경우 철공진이 잘 제동됨을 알 수 있었으며 그림 9에 그 파형을 나타내었다. 제작사로부터 상세한 PT의 포화특성 곡선이 확보되면 보다 상세한 모의가 가능할 것이다.

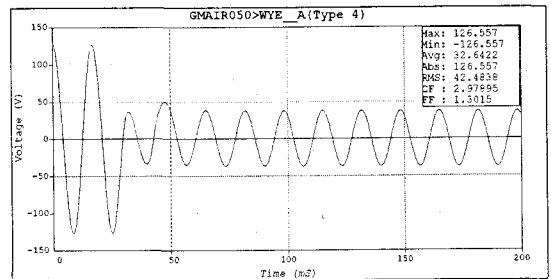


그림 9. PT 2차측 전압 파형(제동저항 사용)

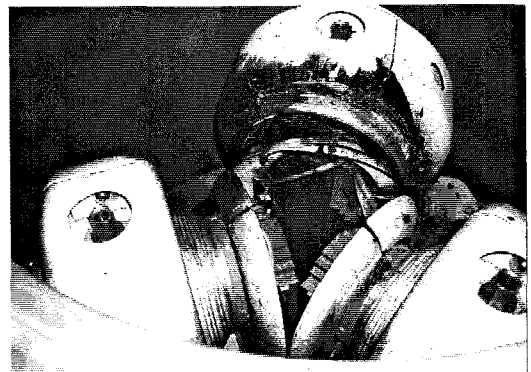


그림 10. 철공진으로 파손된 PT

그림 10은 실제 대상 PT의 손손된 모습이다. 고장조사에 의하면 기기 외부의 외상이나 이물질 등의 흔적 또는 아크에 의한 절연물의 손상 흔적은 없고, 코일이 열에 의하여 파손된 것으로 보여 과전류에 의한 열적 손상으로 판명되어 본 해석결과와 일치함을 알 수 있다.

3. 결 론

이 논문은 154 kV 개스절연 변전소에 설치된 PT가 차단기 개방시에 철공진을 일으켜 열적으로 소손된 사례를 EMTP를 이용하여 모의 계산하고 현장 실측결과와 상호 비교하였다. 철공진을 일으킬 수 있는 조건은 매우 제한적이거나 최근 GIS형 변전소의 증가와 차단기에 grading capacitor의 사용에 따라서 그 발생 가능성이 점점 증가되고 있다. 여기서 개발된 EMTP 모델은 이러한 가능성에 대비하여 철공진이 일어날 수 있는 가능성을 사전에 예측하여 피해사례의 재발을 막는 동시에, 고장 발생시의 원인 분석과 적절한 대책을 세우는데 기여할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] EMTP Rule Book, ATP Salford Version, I, II, 1987
- [2] EMTP Primer, EPRI EL-4202, Project 2149-1, Final Report, September 1985
- [3] EMTP Case Study Workbook I~IV, Electrotek Concept, Inc, January 1997
- [4] R.P Aggarwal and others, "Failure of Electromagnetic Voltage Transformer due to Sustained Overvoltage on Switch-Off. Preventive measures", IEEE Trans. On PAS, Vol. PAS-101, Dec.1982, pp.4536-4541
- [5] N. Janssens and others, "Elimination of Temporary Overvoltages Due to Ferroresonance of Voltage Transformers : Design and Testing of Damping System", CIGRE, Session 1990, Report 33-204
- [6] R. mareachen, A. cristen, G. Poletto, "Ferroresonance on 345 kV bus kills PT", Electrical World, No.4, 1986, pp.69-70
- [7] D. Shein, S. Zissu, W. Schapira, "Voltage Transformer Ferroresonance in one 400 kV GIS Substation", IEEE The Sixteenth Conference of Electrical & Electronics Engineers in Israel, March 7-9, 1989.
- [8] J. Berdy, "Potential Transformer Ferroresonance Engineers Conference, Schenectady, NY.