

## Gas 絶緣 開閉裝置의 鐵共振 制御對策에 관한 研究

### A Study on the Elimination of Temporary overvoltage Due to Ferroresonance at Gas Insulated Switchgear

김승규\*\*, 김태성\*

한국전력공사\*\*, 전남대학교\*

S.K.Kim\*\*, T.S.Kim\*

KEPCO\*\*, Chonnam National Univ\*

#### Abstract

This paper describes the analysis results on the PT ferroresonance at 154 kV GIS(gas Insulated substation) by EMTP(Electro-magnetic 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

전력계통의 대형화에 맞추어 변전소 건설형태는 육외철구형 변전소에 비하여 소요부지가 적게 들고 주위와 환경조화를 꾀할 수 있으며 설비 운전신뢰도가 높은 육내의 GIS(Gas Insulated Switchgear)형 변전소가 1981년부터 건설되기 시작하였다. GIS형 변전소는 주설비가 아주 Compact화되어 있어 모선의 대지간 정전용량이 크며 모선에 연결되는 전위변성기는 권선형이 사용되고 있다. 전력계통 대형화에 따라 계통의 고장용량도 증가되며 전력계통 고장시 고장개소를 분리하는 차단기도 계통 고장용량 증가에 상응하도록 그 성능이 향상되어 왔다. 즉 고장전류 차단능력이 31.5[KVA]인 차단기를 주로 사용하였으나 그 능력이 부족하여 50[KVA] 차단기를 개발하여 사용하고 있다. 고장전류가 커짐에 따라 차단기 차단시 극간에 나타나는 과도회복전압이 문제가 되는데 그 전압을 줄이기 위해 고장전류 차단능력이 50[KVA]인 차단기는 극간에 일정한 정전용량을 갖는 캐패시터(Grading Capacitor)를 취부하고 있다.

캐패시터가 취부된 차단기를 사용하는 변전소에서 모선을 계통에서 분리할 경우 차단기가 모선을 차단하는 순간 차단기 Grading Capacitor의 정

전용량, 모선과대지간의 정전용량과 권선형 전위변성기의 인덕턴스로 인해 공진현상이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 전위변성기 내부 Core의 자화특성으로 인해 일정전압에서 포화되게 된다. 즉 포화특성을 지닌 인덕턴스 역할을 하게 된다. 이렇게 전력계통에서 발생하는 공진현상을 철공진이라 한다.

즉, 철공진현상이란 정현파 전원에 의해 캐패시터와 직렬로 연결된 포화특성을 지닌 인덕턴스 사이에서 나타나는 비선형의 진동현상이다.

철공진 현상이 발생되면 공진과전압으로 모선의 절연이 파괴될 우려가 있고 전위변성기 2차측에 연결된 보호계전기나 각종 계측기에 과전압이 인가될 뿐만아니라 전위변성기가 포화되어 여자과전류가 변성기 권선에 흐르게 되며 결국에는 변성기가 소손되게 되어 전력계통 운전이나 부하공급에 막대한 지장을 초래하게 된다.

우리 전력계통에서 철공진 현상으로 보이는 이상현상을 154kV GIS 변전소에서 수차례 경험한 사례가 있어 철공진 현상규명과 대책이 강구되어야 한다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 철공진 현상의 수리적 접근을 통해 각 변전소별로 철공진 발생 가능성을 쉽게 판별할 수 있도록 하였으며 전자과도 해석프로그램(EMTP)를 이용하여 본 현상을 해석 하였다. 변전소에서 철공진 현상이 발생

되는가를 확인하기 위해 철공진 현상이 발생되기 쉽도록 계통을 구성하여 차단기를 조작한 결과 철공진 현상이 발생되어 그 파형을 실측 하였으며 E.M.T.P 해석 결과 나타난 파형과 현장에서 실측한 파형을 비교 하였다. 또한 철공진 현상을 억제하기 위한 제동장치를 제작하여 취부한 결과 E.M.T.P해석 및 현장실측을 통해 제동효과를 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 우리 계통에 적용시 철공진으로 인한 문제점이 해소되어 안정적으로 전력계통 운전에 기여할 것으로 판단된다.

## 2. 본 론

### 2.1 EMTP 해석 및 실증시험 대상 계통 해석조건

그림 1은 해석대상 변전소를 EMTP로 모의하기 위한 계통도이다. 대상변전소는 인입 송전선로가 2개, 주변압기가 45/60 MVA짜리 2 bank를 가진 154 kV 개스절연변전소로 2중모선방식을 사용하고 있으며, 인입 송전선로쪽의 #1 BUS에 연결되어 있는 PT(300 VA)가 파손되었다.

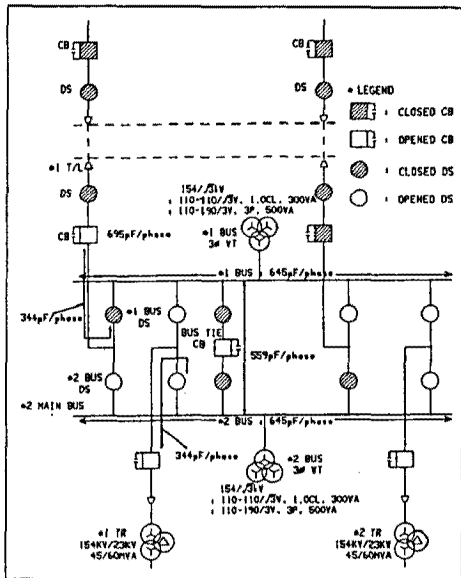


그림 1. 해석대상 계통

그림 2는 소손된 PT의 모습이다. 고장조사 결과에 의하면 기기 외부의 외상이나 이물질 등의 흔적 또는 아크에 의한 절연물의 손상 흔적은 없고, 코일이 열에 의하여 파손된 것으로 보여 과전류에 의한 열적 손상으로 판명되었으며, EMTP 해

석시에 철공진으로 인한 과전류 유입 가능 여부를 검토하였다.

파손될 당시의 계통 조건은 그림 1에서 처럼 #2 BUS는 # 2 T/L에 의해 가압되어 있으나 모선 연결 차단기(BUS TIE CB)에 의해 #1 BUS와는 분리되어 있었다. #1 T/L도 인입부의 차단기(CB)에 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 대지간 C값이 약 1,200 pF이었다. 이때의 차단기 극간의 C는 앞에서도 언급되었지만 근거리 차단 또는 모선고장 차단 등에 대비한 차단기의 과도회복전압 성능을 향상시키기 위한 커패시터이다.

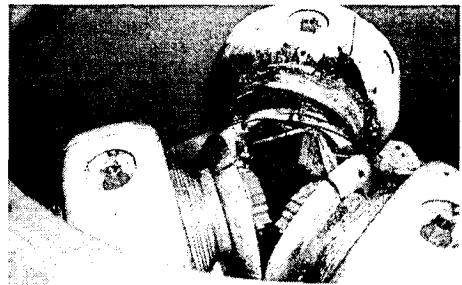


그림2. 철공진으로 인한 파손된 PT

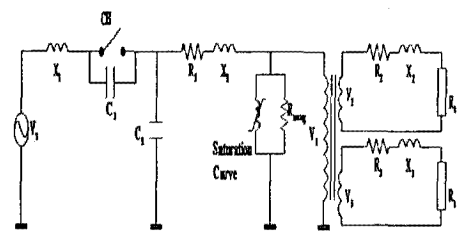


그림3 해석대상 계통의 등가회로

EMTP 해석데이터에 사용되는 등가회로는 그림 3의 전원( $V_s$ )과 전원등가 임피던스( $X_s$ )는 PSS/E의 고장전류 계산에 의한 설계산 값을 사용하였으며, 차단기 극간의  $C_B$ 와 모선과 대지간의  $C_B$ 는 제작사에서 제공된 값이다.

PT 2차측 Y 권선의 용량이 300 [VA], 3차측 DELTA 권선의 용량은 500 [VA]로 설계되어 있다.

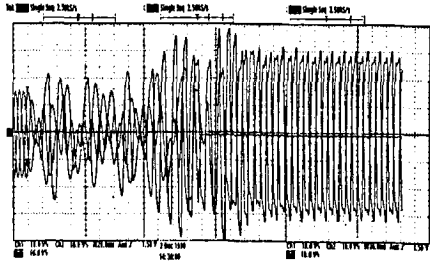


그림. 4. 실제 계통시험에서의 철공진 파형

종래의 변전소에 실제로 걸리는 부하는 보통 100~150 [VA] 정도이나, 최근에는 보호계전기 등 PT 2차에 연결된 기기들이 모두 디지털화 되면서 실제부하 부담이 적어지는 경향이다. 따라서 모의 조건에서는 약 50 VA의 부하가 걸린 것을 것으로 계산에 사용하였으며, 또한 부하의 조건에 따른 상태도 검증하기 위하여 부하 크기별 특성도 검토하였다.

또한, 처음 EMTP 모의시에는 PT의 포화특성은 제작사로부터 정확한 데이터를 얻지 못하여 EMTP 해석 모델의 정확성 여부를 판단하기 위하여, EMTP 관련 문헌의 345 kV급 PT의 I- $\phi$  특성곡선을 154 kV급으로 이상적으로 근사화시켜 모의하였다

구하여진 가상 비선형특성을 이용하여 EMTP에서 여자시험을 통하여 모델을 검증한 결과 2차측에 정격전압인 110 [V]를 가할 때 여자전류가 약 5 ARMS 가 흐름을 확인하였고 포화특성에 대한 시험결과와 비교하였다. PT의 모델은 1차, 2차, 3차 권선, 비선형 magnetic branch 및 철손 등의 파라미터로 표현되며, 히스테리시스손은 무시되었다. 그 후 제작사(2개사)로부터 PT 포화특성 시험곡선을 얻어 실제 계통에서의 조건과 동일한 상태로 만들어 모의하였다.

해석 조건별로 케이스를 분리해 보면, 먼저 고장 당시와 동일한 조건에서 철공진 현상을 모의하였으며, 모의 결과와 실증시험 결과를 비교 검토하였다. 두 번째로는 개방된 모선에 연결되는 차단기의 대수가 항상 일정하지 않기 때문에 연결된 차단기의 대수에 따라 변화되는 C값의 영향과 모선의 중설에 따라 증가하는 모선 C값의 변화에 따른 영향을 검토하였다.

또한, 특정조건에서의 철공진 현상을 방지하기 위하여 사용되는 여러 가지 방법중 포화 리액터에 의한 철공진 제동방법을 제안하고, 실현장에 맞는 리액터를 제작하여 특성실험을 실시하였으며, 역시

EMTP에 의한 검증을 통하여 최적 조건을 확인 제시하였다.

## 2.2 EMTP 해석 및 실증시험 결과

### 2.2.1 실 계통에서의 고장현상 검증 및 모의

앞에서 설명된 것과 같이 대상 변전소에서 차단기의  $C_B$ 와 BUS와 대지간의  $C_E$ 의 분압비에 의한 전압이 PT 1차측 코일에 걸려,  $C_E$ 와 1차측 코일 L값이 공진을 일으킬 수 있는지의 여부를 검토하였다.

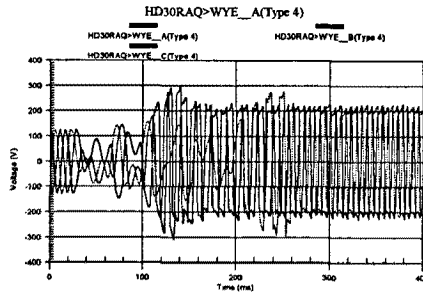
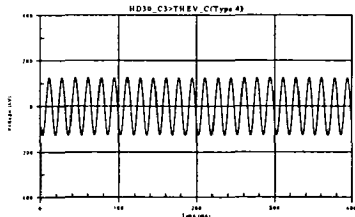


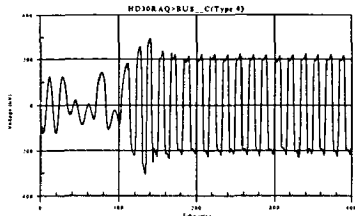
그림. 5. E.M.T.P 계산 결과

그림 5는 대상 변전소에서 PT가 파손될 당시의 계통조건으로 정수들을 적용하여 EMTP로 모의한 결과이다. 차단기의  $C_B$ 와 BUS와 대지간의  $C_E$ 의 분압비에 의한 전압이 PT 1차측 코일에 걸린 전압과  $C_E$ 와 1차측 코일 L값이 공진을 일으킬 수 있는 조건이 만족되어 높은 전압이 코일에 유기되는 결과를 보여주고 있다. 전원이 가압되어 있는 상태에서 차단기가 분리되면 초기에는 약 1.5 p.u.의 유기전압이 걸려있다가 약 10주기 이후에 2 p.u. 이상의 과전압이 발생하는 철공진현상이 지속됨을 보여주고 있다. 또, 실증시험시 나타난 결과들을 살펴보면, 위의 그림 4파형은 대상 차단기를 수십차례 차단을 반복하여 얻은 실험결과 중 하나의 파형으로 각 케이스별로 파형이 다르게 나타났다. 그 이유는 차단기가 차단되는 각 시점에서의 전원전압 상태가 각기 다르므로 각각의 결과는 다르게 나타났다.

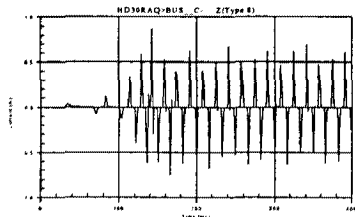
역시 그림 5의 결과로 알 수 있는 것은 고장 당시의 실제 계통상황을 나타내는 차단기의 차단 상태에 따른 극간의 C값과 모선과 대지간의 C값 및 P.T의 비선형 특성을 나타내는 각종 변수들을 정확히 모의하여 나타난 결과임을 알 수 있다.



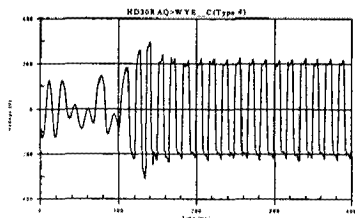
(a) 전원전압 파형



(b) PT 1차 전압



(c) PT 여자전류 파형



(d) PT 2차 전압

그림. 6 위치별 전압/전류 파형

역시 그림 6은 측정 위치별 전압 전류 파형을 보여준 것이다. (a)와 같은 전원 전압이 C값의 분압에 의해 (b)에 상당하는 전압이 PT 1차측에 걸렸을 때, 2차측에 걸리는 전압 파형이 (d)임을 보여주고 있다. 정격 전압보다 높은 파형이 코일에 걸리고 있음을 보여준다. 이때 PT의 여자전류 파형이 (c)이다.

1, 2차측 코일에 흐르는 전류 파형과 크기를 보여주고 있다. 정상상태에서의 1차측 여자전류는 약 0.006 [A<sub>RMS</sub>] 이므로 PT의 용량이 750 VA임에 비하여, 공진시에 흐르는 여자전류는 0.85 [A<sub>PEAK</sub>]

가 흐르고 전압도 약 2.00 p.u.이상이 되어 130 [KVA]이상이 되어 PT를 소손시키는데 충분한 용량을 알 수 있다.

### 2.3 철공진 방지대책을 위한 해석 결과

그림 7과 같이 철공진이 발생하는 계통조건에서 리액터를 직렬저항 2[Ω]과 함께 PT 2차 부하에 병렬로 연결된 경우의 EMTD 해석결과는 그림 8과 같이 철공진 현상이 현저히 제동되고 있는 것을 알 수 있다.

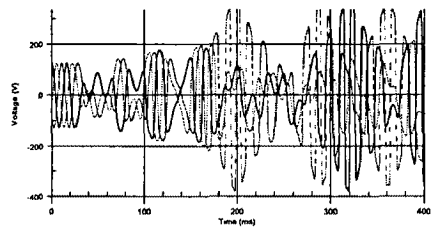


그림. 7. 고장계통의 파형

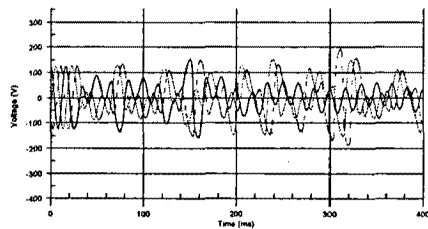


그림. 8 damping reactor를 취부한 파형

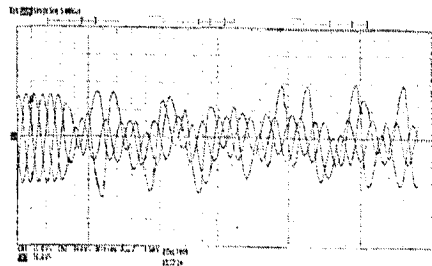


그림. 9 그림7과 같은 경우 실제시험결과

그림 9는 실제 제작한 리액터를 부착시킨 상태에서의 특성파형으로 그림 30과 아주 비슷한 결과의 파형으로 계측되었다.

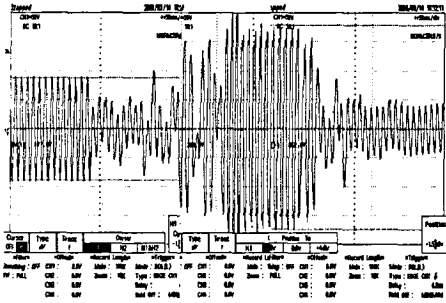


그림.10 Damping reactor 효과 검증 시험

그림 10은 제동리액터의 효과검증을 위한 실증 시험 결과이다. 그래프 상에서 보면 처음 전원이 가압되어 있는 시점에서부터 차단기가 차단되어 전압이 낮아지는 영역과 철공진 현상이 유발되어 일정시간 지속된 후에 별도의 수의치 장치에 의해 제동리액터를 투입하여 철공진이 억제되는 파형을 잘 나타내고 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 170 kV GIS 변전소중 고장전류 차단용량이 50[Ka]인 차단기를 사용하는 변전소에 대한 철공진 발생 가능성을 검토하기 위해 수리적 접근방법, E.M.T.P해석, 현장실측을 통해 다음과 같은 결과를 얻을수 있었다.

- 1) 철공진 현상은 계통 운전 조건과 회로변수에 매우 민감하다.
- 2) 모선을 계통에서 분리시 Grading Capacitor가 취부된 차단기로 개방 할 경우 철공진 현상이 발생할 수 있다.
- 3) 국내 3개 제작사의 GIS 설비 모두 철공진 현상이 발생할 수 있다.
- 4) 철공진 발생을 억제하기 위한 대책이 수립되어야 한다.

철공진을 억제시키는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나 리액터의 포화특성을 이용한 포화리액터와 제동저항을 직렬로 연결하여 전위변성기 2차 회로에 연결하는 방법으로 요구되는 특징과 적정 크기는,

- 1) 제동리액터의 포화전압은 전위변성기 포화전압보다 낮아야 한다.

- 2) 포화리액터가 포화되기 시작하면 매우 급한 Curve를 갖는 포화특성을 갖어야 한다.
- 3) 제동저항의 크기는 약  $2[\Omega]$ 이 가장 적절하다.

결과적으로 철공진 현상은 Grading Capacitor 차단기와 권선형 전위변성기를 사용하는 모선에서 발생할 가능성이 높은 것으로 나타난 이상 154kV GIS 변전소에 철공진 발생 방지장치를 취부하면 철공진으로 인한 고장발생은 예방될 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.
9. Instrument Transformers, Westinghouse Electric Technical Data 44-060, November, 1971
10. D.R Smith, "Three Phase Distribution Transformer Application Problems",1973, Electric Utility Engineering Conference, April, 1973
11. J.Lewis Blackburn,Protective Relaying Principles and Practice,Dekker,1987
12. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS

1997, Vol 33, Iss 4, p 2495-2500

13. R. mareachen, A. cristen, G. Poletto,  
"Ferroresonance on 345 kV bus kills PT",  
Electrical World, No.4, 1986, pp.69-70
14. N. Janssens and others, "Elimination of  
Temporary Overvoltages Due to Ferrosonance of  
Voltage Transformers : Design and Testing of  
Damping System", CIGRE, Session 1990, Report  
33-204
15. General Information on Distribution Transformers,  
Westinghouse Distribution Division, march, 1980
16. ANSI/IEEE Std. C57.105-1978, "IEEE Guide for  
Application of Transformer"
17. R. F. Karlic다, E. R. Taylor, JR., "Ferroresonance  
of Grounded Potential Transformers on  
Ungrounded Systems", AIEE Power Apparatus  
and Systems, August, 1959
18. D. R. Crane, G. W. Walsh, "Large Mill Power  
Outages Caused by Potential Transformer  
Ferroesonance", IEEE IAS Transsactions,  
July/August, 1988