

154kV GIS 변전소 P.T 철공진 규명 및 방지대책

최원수, 김승규, 지성구, 김순태
한국전력공사

Investigation and Countermeasure of P.T Ferroresonance in the 154kV GIS Substation

W.S Choi, S.K Kim, S.K Jee, S.T Kim
KEPCO

Abstract - This paper describes the analysis results on the P.T ferroresonance at 154kV GIS(Gas Insulated Substation) by EMTP (Electromagnetic transient program).

We had simulated the P.T ferroresonance between a potential transformer(PT) and open circuit braker's grading capacitance. The ferroresonance leads to very large power frequency overvoltage on PT bus and subsequent insulation failure.

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

인류의 산업화와 더불어 가장 심각한 문제중에 하나로 대두되고 있는 환경문제와 관련한 친환경 송변전설비 건설이라는 사회적 요구에 따라 송변전설비의 지중화, 옥내화 등이 추진되고 있다. 이 중에서 변전설비 옥내화의 경우는 GIS(Gas Insulated Switchgear)형 설비 설치가 불가피한데, GIS형 설비는 여러 가지 기기들(모선, 차단기, 단로기, 권선형 전위변성기 등)의 절연간격을 축소시켜 하나의 기기로 제작함으로써 모선과 대지간 정전용량이 크고, 고장시 파급효과가 큰 단점을 지니고 있다. 더불어 계통 고장전류 증가에 따라 50[kA]이상 차단기에 대해서는 차단시 차단기 극간에 발생하는 과도 회복전압감소 목적의 커패시터(Grading Capacitor)를 극간에 취부하여 운전하고 있다.

이와 같은 조건으로 인해 GIS형 변전소 운영에 있어, 여러 가지 예기치 못한 현상들이 나타나고 있는데, 그 중 하나가 모선을 계통에서 분리하는 차단조작시 GIS 내,외부 정전용량(차단기 Grading Capacitor, 모선과 대지간 정전용량 등)과 권선형 전위변성기 인덕턴스간의 전기적인 상호작용에 의한 공진현상 발생이다. 이러한 공진현상은 전위변성기 내부철심이 자화특성에 의해 인 정전압에서 포화되는 포화특성을 지닌 인덕턴스 역할을 하기 때문에 발생되는데, 이와같이 전력계통에서 발생하는 공진현상을 「철공진(Ferroresonance)」이라 한다.

이러한 철공진 현상은 철심형 P.T를 사용하는 경우에 발생하며, 이때 발생한 공진 과전압으로 인해 모선의 절연파괴, P.T 2차 측에 연결된 보호계전기나 계측기의 오동작 및 포화 P.T 권선에 여자 과전류가 흘러 P.T가 소손 되는 고장 등 전력계통 운영에 큰 영향을 끼치고 있는 실정이다. 실제 이와 같은 철공진현상으로 인한 고장이 표 1-1에 나타난 고장사례와 같이 최근 지속적으로 발생하고 있는데, 주로 변압기 2Bank에 송전선로 2개 정도의 설비를 보유한 소규모 변전소에서 발생되고 있다.

표 1-1 철공진현상에 의한 고장발생 사례

발생 연월일	변전소	고장발생 상황	고장내용	PT규격	GIS규격
'98.12.22	154kV 고홍	변전소 주공시행 후 모선부리를 위한 BUS Tie CB 개방 조작 약 3초후 과전압 경보발생	△ #1BUS P.T 소손 △ 154kV 모선 보호반 UFR Surge Absorber 소손 △ PT 2차회로 퓨즈 용단	154kV/110V /63.5V 300/500VA (GEC, '98)	154kV 2000A 50kA (현대, '98)
'99.09.07	154kV 달성	#2BUS 유전률 위해 #1BUS측 T/L 및 M.Tr 절연후 BUS Tie CB 개방조작시 UFR 동작	△ 10개 D/L Trip	154kV/110V /63.5V 300/500VA	154kV 2000A 50kA (효성, '97)
'01.12.31	154kV 금오	154kV 급포 T/L 설부 이시할 완료후 최종 가압을 위한 BUS Tie CB 투입조작 약 7초후 모선 Trip	△ #2BUS P.T 소손 * 시험중 BUS Tie CB 개방시 BUS PT 2차 과부하 보호용 NFB 동작	154kV/110V /63.5V 300/500VA (Alstom, '97)	154kV 2000A 50kA (현대, '01)
'02.02.08	154kV 교대	154kV T/L 및 BUS Tie CB 점검후 #1 BUS 가압을 위한 교대 #1 T/L CB 투입 및 #1 BUS Trip 및 연계변전소 M.Tr Trip	△ #1BUS P.T 소손 △ 절연 스페이서 파손 △ 방압변 동작 △ BUS E.S 내부 오염	154kV/110V /63.5V 300/500VA (Alstom, '01)	154kV 2000A 50kA (현대, '01)

본 논문에서는 철공진현상의 현상실측 및 전자과도해석프로그램 (EMTP : Electromagnetic Transient Program)에 의한 철공진 방지대책을 제시하고, 「철공진방지장치」의 제작 및 현장설치에 의한 실증시험결과 분석을 통해 철공진 예방효과를 확인하여, 154kV GIS형 변전소의 철공진에 의한 고장예방에 기여하고자 한다.

2. 본 론

2.1 철공진현상 현상실측

154kV GIS 변전소의 철공진현상 현상확인을 위해 실제 계통 변전소를 대상으로 현상실측을 수행하였다. 대상 변전소는 154kV 고홍, 장성, 구룡 변전소를 대상으로 하였으며, 선정조건은 154kV GIS 변전소중 차단기의 고장전류 차단능력이 50[Ka]인 변전소중 국내 GIS 제작사별 각 1개 변전소 선정을 원칙으로 하였다. 측정 측기는 오시모스코프(Yokogawa DL1540), Probe(Tektronik P6015A)를 사용하였고, 측정위치는 계통에서 분리하고자 하는 모선의 P.T 2차측 단자로 하였으며, 측정방법은 계통에서 분리하고자 하는 모선에 연결된 주 변압기와 송전선로를 모두 다른 모선으로 전환시킨 다음 Bus-Tie 차단기로 차단 및 투입을 반복하면서 P.T 2차측에 나타나는 공진 파형을 측정하거나, 분리 하고자 하는 모선에 연결된 차단기중 1대를 차단시킨 후 분리 하고자 하는 모선에 남겨두고 나머지 송전선로와 주변압기기를 다른 모선으로 전환시킨 다음 Bus-Tie 차단기로 차단, 투입을 반복하면서 측정하였다. 철공진현상이 지속될 경우는 P.T 2차회로나 P.T 자체에 악영향을 끼치므로 Bus-Tie 차단기를 차단한 후 3-4초 이내에 계 투입하였다. 측정대상 변전소별 측정결과는 그림2-1, 2-2, 2-3과 같이 나타났다.

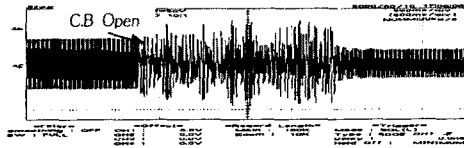


그림2-1 154kV 고충변전소 철공진 파형

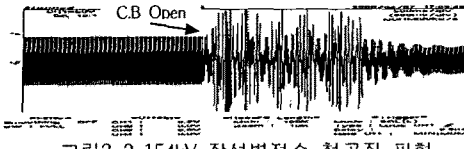


그림2-2 154kV 장성변전소 철공진 파형



그림2-3 154kV 구룡변전소 철공진 파형

각 변전소별 측정파형의 특징을 보면, 고충변전소의 경우 Bus-Tie 차단기를 차단한 후 300-500[msec]동안은 저주파수인 12[Hz], 20[Hz], 30[Hz]로 교번 진동을 하다가 제1주파수인 60[Hz]로 안정적인 진동을 지속하거나, 저주파수와 60[Hz] 주파수로 교번진동을 지속하였고, 공진전압 크기는 저주파수 진동인 경우 전원 전압의 0.5-1.5배, 60[Hz] 진동인 경우는 전원 전압의 1.8-2.2배까지 나타났다. 이때 나타난 현상은 P.T 포화로 인한 P.T철심의 이음발생, P.T 2차 회로의 보호계전기 및 계측장치 전압회로의 떨림현상이 나타났다.

154kV 장성변전소의 경우는 저주파수와 60[Hz] 주파수로 교번 진동을 계속하거나, 교번 진동후 12[Hz]로 안정적이고 지속적인 진동을 계속하였다.

154kV 구룡변전소의 경우는 저주파수와 60[Hz]로 교번 진동후 12[Hz]로 안정적이고 지속적인 진동을 계속하거나, 일정시간 후 공진현상이 소멸되는 경우도 있었다.

2.2 EMTP 해석

154kV GIS 변전소에서 모선분리시 발생하는 철공진 현상에 대한 EMTP(Electromagnetic Transient Program) Simulation 결과 다음과 같이 나타났다.

우선, EMTP 모의대상 변전소는 154kV GIS 6Bay (T/L:2, M.Tr:2, Bus-Tie:1, P.T:1) 규모의 고충변전소를 선정하였고, 향후 설비증설에 따른 모선길이 연장, 모선에 연결되는 차단기 대수 증가 등을 고려한 몇 가지 경우에 대해 모의하였다. EMTP 해석대상 단선도 및 등가회로는 그림 2-4 및 2-5와 같다.

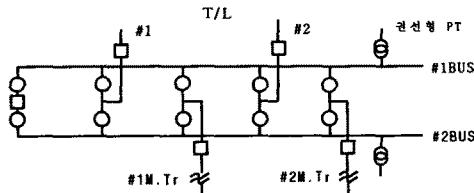


그림2-4 GIS 변전소 154kV 모선 단선계통도

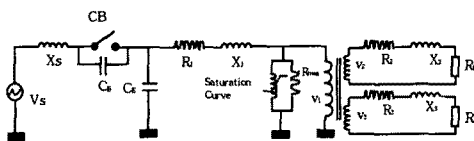


그림 2-5 EMTP 해석을 위한 등가회로

- C_B : 차단기 Grading Capacitor의 정전용량
- C_e : 모선의 대지간 정전용량(모선도체, 모선 지지대자, 전위변성기 고압전선, 붓싱 포함)
- R_B : 전위변성기 2차 부담
- R_{mag} : 철손 (Iron Loss)
- $R_{1,2,3}$: 전위변성기 1,2차 저항
- $X_{1,2,3}$: 전위변성기 1,2차 리액턴스

EMTP 모의결과, 그림 2-6에 나타난바와 같이 모선이 가압된 상태에서 차단기가 분리되면 약 80[msec] 동안은 과도상태로 진행하다가, 일정시간 후 주파수는 전원전압과 같아지고, 전압은 전원전압의 2배 이상 크기로 되어 공진현상이 지속되는 형태로 나타났다.

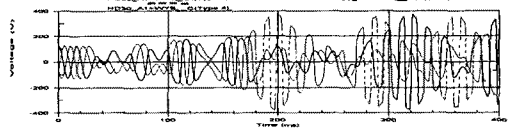


그림2-6 Ferreresonance waveform of EMTP analysis(3상)

또한 P.T 2차측 단상에 대한 공진현상 파형은 그림 2-7과 같이 나타났다.



그림2-7 Secondary voltage waveform of P.T.

그리고 철공진을 일으키는 주요변수인 정전용량 변화에 따른 공진특성을 검토한 결과 동일조건 모선에서 모선에 연결되는 차단기가 적을수록 모선의 길이가 길수록 공진발생 가능성이 적은 것으로 나타났다.

2.3 철공진 방지대책

철공진현상은 모선의 운전조건(차단기 정전용량, 모선의 대지정전용량), 차단기 개방시점, 회로정수(P.T포화특성, 부담) 등의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났다. 이에 대한 방지대책으로는 신설설비의 경우 극간 커패시터가 없는 차단기를 사용하거나 P.T 포화특성(비선형특성)을 개선(선형특성)한 Air-Gaped Core P.T를 사용하는 방법이 가능하고, 기설 154kV GIS변전소의 경우는 철공진 제동장치인 "철공진방지장치"를 P.T 2차 회로에 부가 설치하는 방법이 가능하다. 기설 변전소에 적용 가능한 철공진방지장치에는 철공진 제동을 위한 과포화 리액터와 일정각도의 저항을 직렬 연결하여 P.T 2차 회로에 삽입하여야 한다. 이때 과포화리액터는 정상상태에서는 높은 임피던스로 작용하여 전류가 흐르지 않도록 하고 공진시에만 포화되어 전류를 흐르게 하는 스위치역할을 할 수 있도록 리액터 포화전압이 P.T 포화전압보다 낮은 특성을 가져야 한다. 따라서 현장 적용 철공진방지장치의 과포화리액터 포화전압은 P.T 포화전압(2차 정격전압 110V기준 170-180V) 보다 낮은 150V(110V의 135%) 정도에서 포화되도록 하였고, 일단 포화되면 그림 2-8과 같이 급격히 포화되는 특성을 가지도록 하였다.

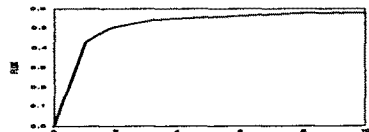


그림 2-8 리액터 포화특성 곡선

그리고 철공진시 제동역할을 하는 제동저항(Damping Resistance) 크기는 GIS 제작사별로 차단기의 등가 정전용량과 모선의 등가 정전용량 변화 등을 고려한 EMTP 모의를 통해 산정 하였는데, 제동저항 크기가

2[Ω] 정도인 경우에 제동역할이 가상 효과적인 것으로 나타났다. 제작사별 EMTP 모의결과는 표 2-1 및 표 2-2에 나타난바와 같다.

표 2-1 현대제 GIS EMTP 모의결과

區分	CB, BLS		Divided Volt.(P.U.)	Damping Resistance Ω						
	C.PF	B.PF		0.5	1.0	2.0	3.0	10	5.0	
1	695	1269	0.35	x	△	○	○	○	○	○
2	695	2538	0.21	△	○	○	○	○	○	
3	1390	2538	0.35	△	△	△	△	△	△	
4	2085	2538	0.15	△	△	△	△	x	x	
5	2085	3807	0.35	△	△	△	△	x	x	
6	2780	3807	0.42	x	x	x	x	x	x	

표 2-2 L.G제 GIS EMTP 모의결과

區分	靜電容量(pF)		母線電壓 (P.U.)	制動抵抗(Ω)					
	CB	BLS		0.5	1.0	2.0	3.0	10	5.0
1	1100×1	1.158×1	0.13	x	○	○	○	○	○
2	1100×1	1.158×2	0.27	○	○	○	○	○	○
3	1100×2	1.158×2	0.13	○	○	x	x	○	○
4	1100×3	1.158×2	0.53	x	○	○	○	x	x
5	1100×3	1.158×3	0.43	x	○	○	○	x	x
6	1100×1	1.158×3	0.50	○	x	○	○	○	x

2.4 철공진방지장치 현장 적용 및 효과 분석

154kV GIS변전소 철공진현상에 대한 EMTP 해석결과에 의거 철공진방지장치(Damping Resister)를 그림 2-9와 같은 회로로 제작하여 현장에 설치하고, 철공진 제동효과 확인을 위한 EMTP 해석 및 현장실측결과 다음과 같이 나타났다.

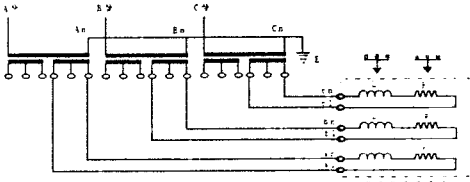


그림 2-9 철공진방지장치(Damping Resister) 회로도

2.4.1 EMTP 해석

그림 2-10과 같은 철공진 발생 계통조건에서 그림 2-8과 같은 특성을 지닌 리액터를 직렬저항(2Ω)과 함께 P.T 2차부하에 병렬연결 하는 조건에서 EMTP 해석결과 그림 2-11과 같이 철공진현상이 현저히 제동되는 결과를 얻었고, 실제 철공진방지장치 부착상태에서 측정된 결과 또한 그림 2-12와 같이 제동된 형태로 나타났다.

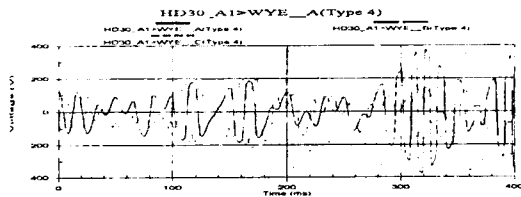


그림 2-10 Ferroresonance waveform of EMTP analysis.

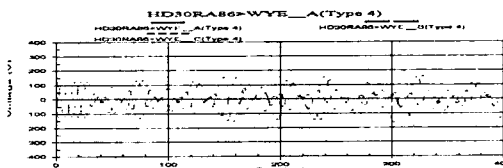


그림 2-11 철공진방지장치 설치조건 EMTP해석 파형

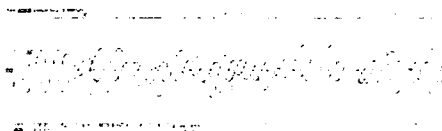


그림 2-12 철공진방지장치 설치후 현장 실측파형

2.4.2 현장 실측결과

철공진방지장치를 현장에 설치한 후 전원주파수와 같은 60[Hz]로 공진시 제동효과를 측정한 결과 그림 2-13과 같이 나타났다. 저주파수 공진시에는 전원전압 주파수의 1/2(30Hz), 1/3(20Hz), 1/5(12Hz) 형태로 나타났는데, 제동효과 파형은 그림 2-14와 같다.

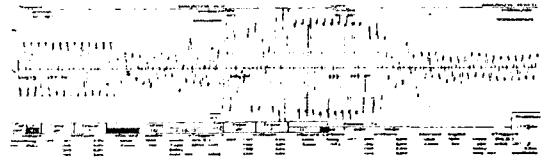


그림 2-13 60[Hz]공진시 제동효과

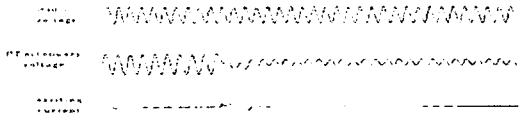


그림 2-14 저주파 공진시 제동효과

3. 결론

154kV GIS 변전소의 철공진현상에 대한 고장방지대책으로, 포화특성을 갖는 리액터와 저항의 직렬회로를 P.T 2차회로에 연결하여, P.T 2차측 손실을 크게 함으로써 철공진현상을 방지하는 방법을 선정하고, EMTP 해석 및 현장실증 시험을 통해 철공진 억제에 가장 효과적인 제동장치 특성을 도출하여, 철공진방지장치를 제작 설치후 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

3.1 철공진방지장치(Damping Resistance) 특성

- 3.1.1 포화리액터의 포화전압은 P.T의 포화전압인 170~180[V] 보다 낮은 150[V]
- 3.1.2 포화리액터는 포화시점에서부터 완전포화까지의 급격한 Curve를 갖는 특성을 지닐 것
- 3.1.3 제동저항 크기는 2[Ω], 용량은 140[W] 이상

3.2 철공진방지장치 설치효과 분석

철공진방지장치 설치조건에 의한 EMTP 해석 및 현장 설치후 현장 실측결과 철공진현상이 현저하게 감소하는 결과를 얻었다.

따라서 기설 154kV GIS 변전소의 철공진 방지대책으로는 EMTP 해석 및 현장실증 시험에 의해 선정된 특성을 지닌 철공진방지장치를 설치함으로써 철공진현상 억제가 가능할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] D. Shein, S. Zissu, W. Schapira, "Voltage Transformer Ferroresonance in One 400kV GIS Substation", IEEE The Sixteenth Conference of Electrical & Electronics Engineers in Israel, March 7-9, 1989.
- [3] D. Shein and Zissu "Domains of Ferroresonance Occurance In Voltage Transformers With or Without Damping Reactors" 12. T. Tran-Quoc and Others "A Dynamic Model of Power Transformers" IEEE 1996.
- [4] "500kV Gas Insulated Voltage Transformer's Ferroresonance Suppression Ref. No. LE84-1082. Nissin Electric CO.
- [5] EMTP Rule Book, ATP Salford Version, I, II, 1987.