

고압계통 변류기 동작 특성 검토

최기열, 이덕수, 박문빈, 김희택, 장기풍
한국전력기술(주) 전기기술처

A Study on Performance of Current Transformer in High Voltage System

Choi Ki Yeol, Lee Duck Soo, Park Moon Bin, Kim Hee Taek, Chang Ki Poong
Korea Power Engineering Company, INC.(KOPEC)

Abstract - Current transformers(CTs) whose rating is selected per a full load current of a feeder in high voltage system can be easily saturated due to high fault current that may be several hundred times of the full load current of the feeder. However, the protective relay shall operate properly at the fault without mis-operation under the CT saturation. So, in selecting the CT rating, it is necessary to consider the behaviour of CT and a performance of protection scheme in condition where CT can be saturated. In this paper, a performance of CT and a degree of saturation are studied and verified whether its ratings are proper for the operation of the protective relay.

1. 서 론

전력계통에서의 보호계전설비가 전기적 사고를 적절히 감지하고 그 사고를 제거하여 계통의 안정적 운전과 전력공급의 신뢰성을 높이기 위해서는 보호계전기 뿐만 아니라 계전기 입력 요소로 사용되는 변류기(Current Transformer, CT)와 변성기(Potential Transformer, PT) 또한 그 성능이 적절히 발휘되어야 한다. 특히 변류기는 전기적 고장시 급격히 증가되는 고장전류와 직류성분 등에 의해 포화될 수 있으며, 이로 인해 계전기 오동작으로 이어질 수 있으므로 변류기 포화가 예상되는 계통에서는 충분한 검토를 통해서 적절한 변류기가 선정될 수 있도록 해야 한다.

본 검토서에서는 보호계전설비와 관련하여 IEEE[4] 기준에 근거하여 원자력 발전소 고압차단기반에 설치되는 변류기의 정격과 포화 특성을 먼저 검토하고, 과도현상 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC의 모의분석 결과를 근거로 계전기 동작 측면에서 변류기의 적정성과 신뢰성 있는 보호설비를 구성하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 계통 현황

발전소 소내 고압계통(4.16kV 이상)에서는 대용량 전동기와 저압 계통 배전반에 전력을 공급한다. 인입변압기와 선로는 한시 과전류 계전기와 차동계전기로 보호되며, 각 부하 feeder는 한시/순시 과전류 계전기에 의해 과부하와 단락 사고로부터 보호된다. 각 계전기 및 계측기에 필요한 입력전류는 계전기용 단일 변류기를 통해 공급된다.

변류기는 일반적으로 각 피더 전부하 전류의 125%를 기준으로 그 정격이 정해지며 최소 정격은 150:5A(100:5A 정격은 200:5A 두 개를 병렬로 사용) 변류기가 사용되고 있다. 모든 변류기는 13.8/4.16kV 계통의 최대 고장전류 40/50kA에 대해 과전류 강도나 Accuracy를 만족할 수 있어야 한다.

하지만, 고장 전류가 상당히 커서 부하전류를 기준으로 선정되는 변류기가 관련 요건을 만족하기에는 현실적으로 어렵다.

2.2 변류기 특성 검토

2.2.1 과전류 강도

과전류 강도는 변류기 1차측에 과전류가 흐를 때 변류기 내부 온도 상승이 허용치 이내이며 구조적(기계적) 파손이 발생하지 않는 정도를 규정하는 정격으로 1) 열적 강도와, 2) 기계적 강도 두 가지가 요구되며 IEEE 와 IEC 기준에는 표1과 같이 기술하고 있다.

〈표 1〉 CT 과전류 강도

규 격	열 적 강 도	기 계 적 도
IEEE C57.13	표준 : 1초(rms) 1.5초 : 시간환산($1/\sqrt{t}$)	Peak
IEC 60044-1	1초	Peak

일반적으로 상용 변류기의 과전류 강도는 변류기 정격의 75배 정도로 제작되므로 600:5A(고장전류 최대 50kA 기준) 이하의 변류기가 사용되는 계통에서는 표 1의 열적 강도를 만족하기 위해서는 구대시 변류기가 견뎌야 할 최대 고장전류 값을 제시하여 특수 주문 품으로 구매될 수 있도록 해야 한다. 이와는 달리 상용품을 이용할 경우 고장이 지속되는 동안 변류기가 열적으로 견딜 수 있는지 확인하여야 한다.

발전소내 고압계통의 고장전류 최대 지속시간을 7 cycle(0.12초)¹⁾로 할 경우 변류기 열적 강도는 216배($75/\sqrt{0.12} = 216$)정도까지는 허용할 수 있으므로 열적 강도 측면에서 변류기의 최소 정격은 300:5A($300 \times 216 = 64.6$ kA) 이상이면 가능한 것으로 판단된다.

기계적 강도의 경우 IEEE C57.13 6.6.3 항에서는 Window type 이나 붓성형의 경우 변류기 1차측 회로가 변류기의 일부분이 아니라 케이블이나 모선이므로 변류기에 요구되는 기계적 강도는 필요치 않은 것으로 기술하고 있다. 따라서 붓성형 변류기를 적용하고 있는 고압계통에서는 기계적 강도에 대한 요건을 적용할 필요는 없는 것으로 판단된다.

2.2.2 변류기 포화특성

변류기는 대칭 및 비대칭 고장전류에 대해 포화되지 않도록 설계되어야 한다.

변류기의 정밀도나 포화특성과 관련된 기준은 IEEE C57.13에서는 표준부담에 대해 2차 전류의 20배(2차전류 5A 기준 100A)에서 10% 이내의 변류비 오차를 요구하고 있으며, 대칭성분으로부터 변류기의 포화현상을 피하기 위한 조건을 다음과 같이 기술하고 있다.

$$V_{CT2} > I_s \times Z_s \text{ -----(1)}$$

V_{CT2} : 변류기 포화전압, I_s : 변류기 2차측 전류
 Z_s : 변류기 2차측 부담

하지만, (1)식은 대칭전류를 기준으로 기술된 것이므로 (1)식을 만족하더라도 고장전류에 직류성분이 포함되면 변류기는 포화될 수 있다. 따라서 IEEE C37.110에서는 비대칭 조건에서도 변류기 포화를 피하기 위해서는 (2)식의 요건을 만족하도록 기술하고 있다.

$$V_{CT2} > I_s \times Z_s \left(1 + \frac{X}{R}\right) \text{ -----(2)}$$

$X/R=20$, $I_f=50$ kA, 부담 0.44 Ω , 150:5A 변류기를 기준으로 (2)식을 만족하기 위한 포화전압을 계산해 보면 15,400V(C16000) 이상이어야 한다. 이러한 계산 결과와 상용변류기 최대 Accuracy C800과 비교하여 볼 때 포화현상을 피하기 위한 변류기 선정은 현실적으로 가능치 않음을 보여주는 것이다.

이러한 현상은 발전소 고압계통에만 해당되는 것은 아니다. 용량이 큰 일반 고압계통이 모두 해당될 수 있으며, 이 경우 어느 정도의 변류기 포화는 허용할 수밖에 없을 것으로 판단된다.

2.3 변류기 포화특성 모의분석

2.2에서 검토한 결과로부터 변류기의 포화는 피할 수 없음을 알 수 있다.

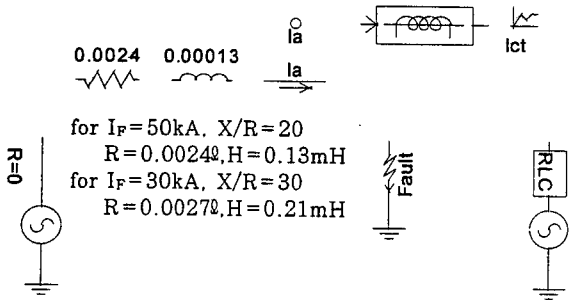
이러한 포화현상에도 보호계전기가 정상적으로 동작할지의 판단은 2.2에서 살펴본 내용만으로는 충분치가 않으므로 본 절에서는 PSCAD/EMTDC 모의 분석을 통하여 변류기가 어느 정도로 포화되는지를 검토하고 이를 근거로 보호계전기 동작측면에서 변류기의 적정성을 검토하기로 한다.

2.3.1 계통모의 및 기기 모델링

1) 등가회로

모의분석 대상은 원자력 발전소내 고압계통(13.8/4.16kV)이며, 고장시 계통의 X/R은 부하 Feeder 계전기 검토시 X/R=20, 인입선로 변압기 차동계전기 동작특성 검토시 X/R=30을 적용하여 그림 1와 같이 등가회로를 구성하였다.

¹⁾ 보호계전기 동작시간 2 cycle + 차단기 동작시간 5 cycle



<그림 1> 등가회로

2) 변류기 모델링
PSCAD/EMTDC의 JA model을 이용하였으며, 국내 D사의 변류기 자료(표2)를 근거로 하여 모델링 하였다.

<표 2> 변류기 규격

변류기 정격	Accuracy	철심단면적 (m ²)	자로길이 (m)	내부임피던스 (Ω)
150:5A	C50	3.6e-3	0.653	0.091
200:5A	C100			0.121
300:5A	C100			0.182
400:5A	C200			0.244
600:5A	C200			0.386
1200:5A	C400	1.26e-3	0.653	0.4
3000:5A	C400	2.47e-3		1.92
4000:5A	C400	1.68e-3		2.13
6000:5A	C400	0.96e-3		3.25
4000:5A	C800	3.00e-3		2.2
6000:5A	C800	2.30e-3		4.0

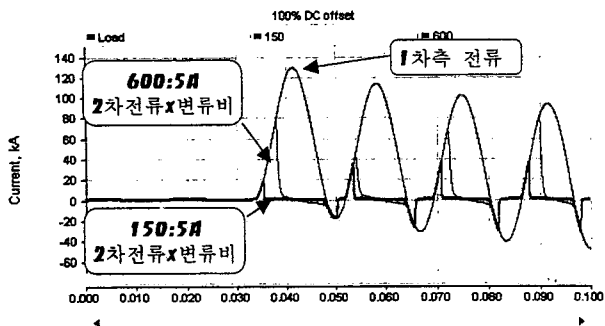
3) 모의 분석 조건

- 변류기 잔류자속 : 0 % (채폐로 조건 무시)
- DC offset 100% 조건
- 고장전류 : 50/30 kA rms (feeder/인입 선로)
- 변류기 부담 : 0.35/0.80 (과전류/자동 계전기)
- * 유도성분 무시

2.3.2 모의분석 결과

고장전류 50kA에 대해 정도의 차이는 있으나 부하 Feeder에 설치되는 모든 변류기(150:5~600:5A)는 심하게 포화됨을 그림 2의 결과로부터 알 수 있다.

포화에 이르는 시간은 100% DC offset 조건에서 150:5A의 변류기는 2.2 ms, 600:5A의 경우 5.1 ms 정도에서 포화되는 것으로 분석되었다.



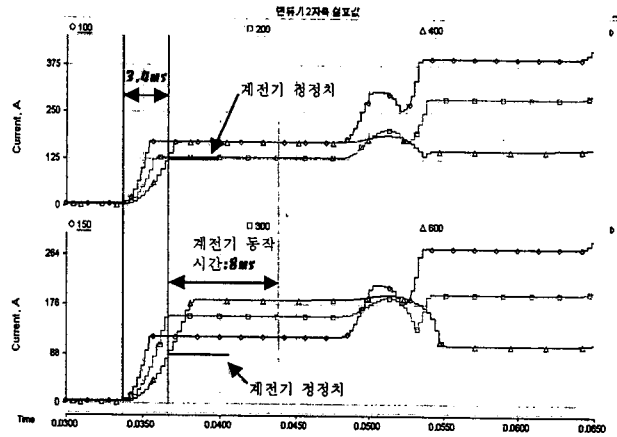
<그림 2> 변류기 1,2차측 전류비교(@ 50kA)

2.3.3 보호계전기 동작 검토

2.3.3.1 Feeder 보호용 계전기

원자력 발전소 고압계통에 설치된 계전기의 정정값은 34~125A 정도로 고장 전류에 대해 변류기 2차측 실효값은 변류기가 포화되기 전에 모두 계전기 정정값을 초과하는 것으로 검토되었다. 계전기 입력전류가 정정치에 이르는 시간은 1.9~3.4ms 정도이며, 이후 변류기 포화가 시작되어도 과전류계전기 동작시간(8ms)까지의 실효 전류값은 정정값 이상으로 유지되는 것으로 분석 되었으므로 Feeder 보호용 순시 과전류계전기는 시간지연 없이 정상적으로 동작할 것으로 분석되었다.

2.3.3.2 인입선로 보호계전기



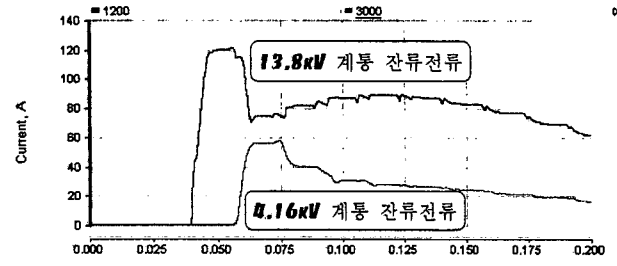
<그림 3> 변류기 2차측 실효전류값(DC offset 100%)

1) 과부하 보호용 한시계전기(51)

부하 Feeder에 설치된 순시 과전류계전기가 시간지연 없이 정상적으로 동작되는 것으로 검토되었으므로 상하위 계전기 간의 보호협조 요건은 충분히 만족되는 것으로 판단된다.

2) 지락 보호용 한시계전기(51N)

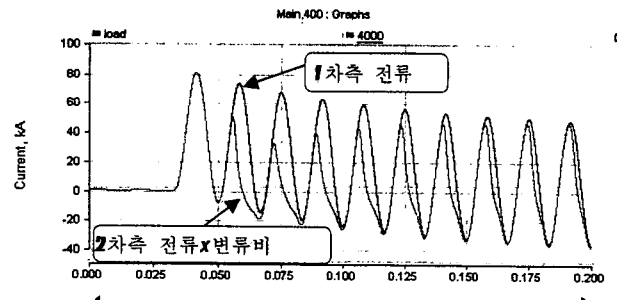
계전기 입력전류는 3상 변류기의 잔류회로에서 공급된다. 3상 단락으로 인해 변류기가 포화될 경우 각 상의 변류기 포화특성 차이로 인해 잔류회로에 불평형 전류가 생성되어 계전기로 유입된다. 그림 4는 13.8/4.16kV 고압배전반의 인입선로에 설치된 지락 보호용 과전류 계전기에 입력되는 잔류전류를 도시한 것이다. 그림 4의 전류값은 계전기 정정값 0.5A(TD=0.5 sec at 5A) 보다 상당히 큰 값이므로 계전기가 충분히 동작할 수 있지만 보호계전기가 갖는 시지연 특성이 150ms²⁾ 이상으로 고장이 제거되는 시간 61.4ms³⁾ 보다 길어 부하 Feeder에서의 단락 고장으로 인한 계전기 오동작은 없을 것으로 판단된다.



<그림 4> 변류기 포화로 인한 2차측 잔류전류 (30kA rms, 100% DC offset, X/R=30)

2.3.3.3 변압기 차동보호계전기

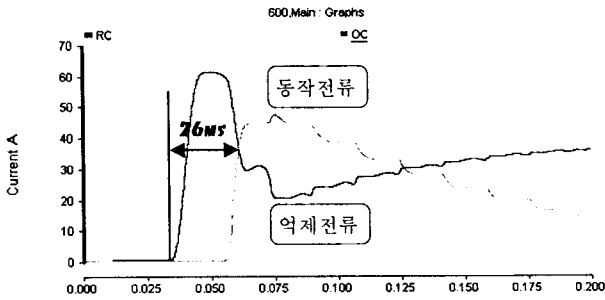
소내/대기 보조변압기 보호용 차동계전기 입력 중 13.8kV 측에 설치된 4000:5A, C400 변류기의 동작 특성이 고장전류 30kA에서 그림 5와 같이 1.5cycle 이내에는 포화되는 것으로 분석되었다.



<그림 5> 4000:5A, C400 변류기 동작특성 (30kA rms, 100% DC offset, X/R=30)

- 2) A사 Inverse type 과전류 계전기 기준: 200배 전류에서 150ms 이상 (동작 특성 곡선으로부터 추정)
- 3) 동작 설정치에 이르는 시간(3.4ms) + feeder 보호용 순시계전기 동작 시간(8ms) + 차단기 CPT(50ms) = 61.4ms

소내보조/대기 변압기의 저압측 변류기가 포화될 경우 차동보호계전기는 차전류의 정도에 따라 외부사고(부하 feeder)에 대해서도 오동작할 수 있으며, 국부 사고가 모선 전체를 정전시키는 사고로 파급 될 수 있다. 그림 6은 4000:5A 변류기가 포화되었을 경우(1차측 변류기는 포화되지 않은 것으로 가정) 차동계전기의 동작/억제 코일에 흐르는 전류의 변화를 나타낸 것으로 Feeder에서의 고장이 59ms⁴⁾ 정도 이내에 제거되지 않으면 차동보호계전기가 오동작하여 모선 전체를 정전시킬 수 있음을 보여주고 있다.



〈그림 6〉 차동계전기 동작/억제 전류

부하 feeder의 고장제거 시간이 61.3ms(계전기 동작시간 11.3ms 고압차단기 점점분리시간 50ms) 인 점을 고려하면 부하 feeder용 보호계전기가 정상적으로 동작하더라도 변압기 보호용 차동계전기의 오동작 발생 가능성은 있는 것으로 검토 되었다.

2.3.4 적정 변류기 적용 검토

2.3.4.1 부하 Feeder 보호용 변류기

최대 고장전류에서 비록 보호계전기는 정상적으로 동작할 수 있는 것으로 검토되었지만 계전기 입력으로 사용되는 변류기의 심각한 포화현상은 바람직하지 않으므로 변류기의 포화정도를 감소시킬 필요성이 있는 것으로 판단된다.

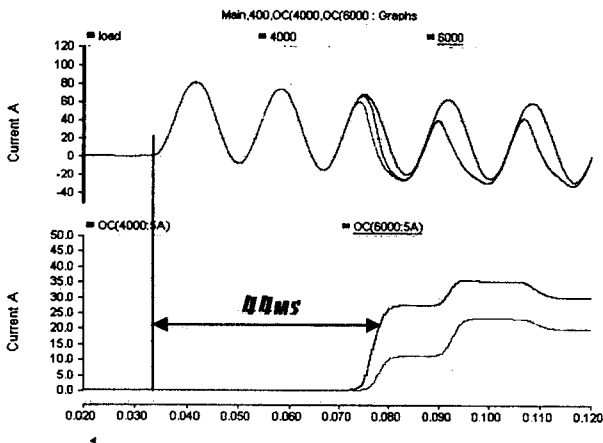
변류기의 포화정도를 감소시킬 수 있는 방안으로 변류기의 정격을 크게 하는 방법이 고려될 수 있으며, 이를 위해 고압계통 전체에 대해 정격이 큰 단일정격의 변류기(예 800:5A)를 사용하는 방법이 추천될 수 있다.

정격이 큰 단일정격으로 변류기를 통일 할 경우 아날로그 형식의 전류계 지시값이 적절치 않으므로 보완해야 한다. 이를 위하여 1) 디지털 형식 전류계로 변경하거나, 2) 계전기용과 계기용 변류기를 분리 적용하는 두 가지 방법을 고려할 수 있다. 후자의 방법은 변류기의 물량이 다소 늘어나게 되므로 경제적인 측면과 변류기 설치 공간이나 유지보수 측면에서 불리하므로 본 검토서에서는 전자를 추천한다.

전자를 따를 경우 변류기 2차측에 설치된 아날로그 전류계를 모두 디지털 형식으로 변경해야만 적절한 전류값을 표시할 수 있다.

2.3.4.2 변압기 차동보호계전기용 변류기

3상 단락 고장시 적어도 한 상에는 직류성분이 최대로 포함되므로 그림 5와 같은 포화현상은 피할 수 없으므로 변압기 차동보호계전기용 변류기의 정격 또한 상향 조정할 필요가 있다.



〈그림 7〉 4000:5A, 6000:5A 동작특성(C800)

4) 계전기 동작 설정치에 이르는 시간(26ms) + 차동계전기 동작 시간(33ms) = 59ms

그림 7은 그림 5의 변류기 특성 대비 Accuracy를 상향 조정(C400 → C800)하여 분석한 그래프로 30kA 고장 전류에 대하여 비록 포화는 되나 그 정도는 그림 5에 비해 상당히 완화된 것으로 계전기 동작가능 시간(44+33ms=77ms)이 Feeder의 고장제거 시간 61.3ms 보다 낮으므로 비록 변류기가 부분적으로 포화되더라도 차동계전기의 오동작은 발생되지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 30kA 이상의 고장전류가 예상되는 계통에서는 변압기 차동계전기용 변류기의 정격을 4000:5A, C800 이상의 것으로 선정할 것을 추천한다.

3. 결 론

일반 고압계통의 최대 고장전류 크기에 비해 대부분의 변류기 정격은 상당히 낮기 때문에 고장전류로 인한 포화현상은 피할 수 없을 것으로 판단되어 IEEE의 설계 요건과 PSCAD/EMTDC 모의 분석을 통하여 변류기의 적정성을 검토 하였다.

IEEE C37.110을 기준으로 검토한 결과 정격이 낮은 변류기(600:5A 이하)의 경우 포화에 관련된 요건을 전혀 만족하지 못하는 것으로 검토 되었으며, 모의분석을 통해서 이러한 결과를 확인하였다. 특히, 600:5A 이하의 변류기는 직류성분과는 상관없이 고장전류가 최대가 되기 전에 포화되는 것으로 분석되었으나 Feeder 보호용 과전류계전기는 정상적으로 동작되는 것으로 검토 되었다. 하지만, 계전기 입력으로 사용되는 변류기의 포화 정도가 심각하므로 보호계전기의 오동작이나 동작 신뢰성 향상을 위하여 변류기의 정격을 올리는 방안과 설계 및 유지 보수 측면을 위하여 변류비가 큰 단일 정격의 변류기 사용을 권장한다.

또한, 변류기 포화시 계통 전체를 정전시킬 수 있는 변압기 차동보호계전기의 오동작을 방지하기 위한 방안으로는 변압기 1,2차측의 변류비가 허용하는 범위 내에서 가능한 높은 정격을 사용하는 것이 바람직하므로 고장전류 30kA 이상의 계통에서는 최소 4000:5A, C800의 변류기를 추천한다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] U. D. Annakkage, P. G. McLaren etc., "A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis", IEEE transactions on power delivery, Jan. 2000.
- [2] J.R.Lucus, "Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studys", IEEE transactions on power delivery, Jan. 1992.
- [3] IEEE std C57.13-1992, "Standard Requirements for Instrument Transformer"
- [4] IEEE std C37.110-1996, "Application of Current Transformers used for Protective Relaying Purpose"
- [5] IEC 60044-1-2003 "Current Transformer"
- [6] IEEE Power Engineering Society, "Transient Response of Current Transformer", IEEE Special Publication, 76-CH1130-4 PWR, Jan.1976
- [7] 한국전력기술(주), 기술개발 보고서-1993 "계기용 변성기 과도 특성 해석"