특 집

산업용 수배전설비의 보호계전기술

이 종 철*
(*한국전력기술(주) 전기기술처 기술표준 1팀장)

1. 머릿말

보호계전의 목적은 인명의 보호는 물론 전기설비나 계통의 사고를 조기에 검출, 사고구간을 분리하므로써 전력설비 자체의 손상을 경감시키고 생산설비의 가동중단이 없도록 신뢰성을 높이는 것이다.

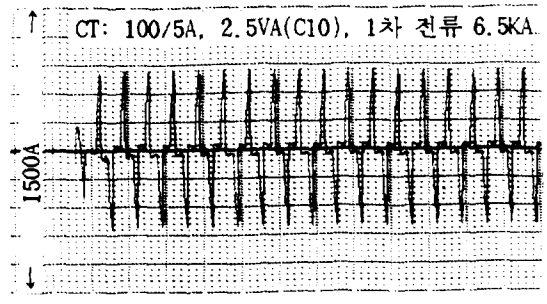
본고에서는 산업용 수배전설비의 보호를 위한 보호계전기가 적정하게 동작하도록 입력요소를 제공하는 변류기 및 계기용 변압기 선정에 대한 고려사항과 수배전계통을 구성하는 중요설비의 보호를 위해 세심한 주의가 요구되는 사항에 대해 기술한다.

2. 보호계전기의 입력요소 고찰

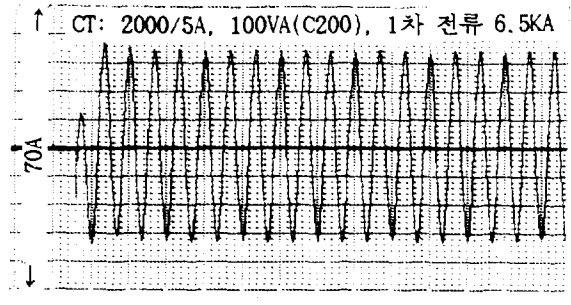
2.1 변류기의 포화

보호계전기가 사용목적에 부합되도록 적절히 동작하기 위해서는 일차회로의 전류변화가 정해진 변류비대로 정확하게 복제되어 계전기에 입력되어야 된다. 일반적으로 변류기의 변류비는 해당 선로의 최대부하 전류의 125~150%를 일차 정격전류로하여 정상운전시 지시계기의 지침이 계기의 정확도가 높은 중앙에 오도록 선정되며 주선로와 같이 시설초기에는 부하가 작으나 장래 증설계획이 있는경우 다중변류비의 변류기를 선정 사용하고 있으며 설비증대에 따른 큰 고장전류에 의해 변류기의 포화에 대한 고려가 부족하다.

변류기의 포화는 초기의 고장전류에 포함된 직류성분에 의해 포화되기도하나 변류기 철심의 포화자속밀도를 넘게되는 큰 교류전류에 의해서도 포화되어, 포화되어 있는동안 시간에 대한 자속의 변화가 없게되므로 결국 2차전류를 흐리게하는 유기전압의 발생도 없게된다. 포화의 정도는 일차회로 고장전



(a)



(b)

그림 1. 변류기 2차출력 파형

류의 크기에도 관계가 있으나 변류기 2차회로에 연결된 부담에도 직접적인 관계가 있다.

설비용량의 증대에 따라 계통의 단락전류가 증가하는 추세이고 22.9kV, 6.6kV 및 3.3kV계통에서는 특정 Feeder의 부하전류에 대한 단락전류가 표준규격에서 정한 오차보장 과전류정수를 넘는 경우가 많다. 일례로 단락전류가 15kA인 6.6kV 계통에서 500마력 전동기 Feeder에 75 : 5A의 변류기를 사용했을 경우 단락전류는 변류기정격의 약 200배이므로 표준규격에 정한 과전류 정수를 초과, 변류기 2차출력의 정확성을 보장할 수 없다.

그림 1(a)는 ABB사의 100/5A C10(2.5VA) 변류기에 [0.0735+j0.015 ohm]의 계전기 부담을 걸고 변류기 정격전류의 65배인 6.5kA의 일차전류를 흘렸을 때 변류기의 2차 전류파형이며 그림 1(b)는 동일회로, 동일전류 조건에서 2000/5A, C200 변류기를 통한 2차전류파형이다.

2000/5A 변류기를 통한 2차전류의 파형은 정상적이나 100/5A 변류기의 파형은 Spike 형태로 변형된 모양이다.

2.2 변류기의 포화를 저감하기위한 대책

변류기의 1차 정격정류가 낮고 고장전류가 상대적으로 높은 계통의 경우 보호계전기의 정정범위에 제한이 있으므로 변류기의 변류비를 고장전류에 대해 포화가 일어나지 않는 정격으로 선정하는데는 한계가 있다. 또한 수배전반 자체의 설치공간의 제약등에 의해 변류기를 직렬로 연결하기 위해 변류기의 수량을 증가시키거나 정격부담을 증대시킬 수 있는 여지도 좁다. 이와같은 현실적 제약조건을 감안 다음과 같은 대안이 있으나, 실제 설계시 적용가능한 대안을 검토하여 적용토록 한다.

1) 계기용과 계전기용의 변류기를 별도로 사용하여 계전기용 변류기의 부담 경감

2) 정지형과 같은 부담이 낮은 계전기 사용

3) 정정전류치가 낮은 계전기의 채택과 높은 변류비의 변류기 사용

4) 보호계전기전용 변류기의 경우 공극형 변류기 사용 고려

5) 변류기의 직렬연결에 의한 상대적 부담 경감

6) 변류기 2차전류의 정격이 낮은 (1A) 변류기를 사용, 변류비의 상대적 증대

2.3 계기용변압기의 철공진

2.3.1 철공진 현상

비접지계통이나 고저항 접지계통에서 계기용변압기(이하 PT)의 1차측 중성점이 접지된 상태로 개폐기 접점의 상별 부동시 개폐, 지락사고, 부하차단, 단선등의 동요가 발생하면 PT의 철심이 포화되어 인덕턴스가 비선형적으로 급격히 변하게되므로 이 과정에서 계통의 케패시턴스와 직렬공진을 일으켜 과전압을 유발한다.

철심의 포화는 상기와 같은 계통의 동요에 의해 PT에 포화수준이상의 과전압이 인가되거나 전원으로부터의 분리시 PT가 설치된 계통의 케패시턴스에 의한 잔류전압(직류성)에 기인하며 철심이 포화되면서 큰 여자돌입전류가 흐름과 동시에 철심은 비선형 인덕턴스화되어 계통의 케패시턴스와의 직렬공진으로 인해 포화와 불포화를 반복하는 전기적 진동현상이 발생하며 회로내의 저항성분의 크기에 따라 진동의 감쇠가 결정된다.

계통동요시 PT가 포화되면 PT로의 돌입여자전류에 의해서 PT 1 차측의 퓨즈가 용단되거나 PT가 과열되고 과전압에 의해서는 기기의 절연파괴, 계기나 계전기의 절연파괴 및 오동작을 유발한다.

2.3.2 철공진 방지대책

포화전압이 높은 PT를 사용, 계통동요시의 과전압에 포화가 일어나지 않도록 할 수도 있으나 현실적인 한계가 있으므로 계통의 1상당 용량성 리액턴스 Xc와 PT의 상시 여자리액턴스 Xm의 비가 계통의 동요시에도 공진의 범위를 벗어나도록 하는 방법이다. 정상운전시 저항이 작은 계통에서 Xc/Xm비가 0.1에서 10사이에 있으면 흔히 철공진이 발생할 수 있으므로 이 범위를 벗어나도록 설계하는 것이다.

그러나 초기 계통구성시 Xc/Xm의 비를 특정값으로 유지되도록 하는 것이 어렵고 추후 설비의 증설등도 있게될 것이므로 이 방법도 현실적이지 못하다. 따라서 돌입여자전류를 제한함과 동시에 공진에 의한 진동의 감쇠가 빠르도록 공진회로내에 직렬로 저항을 삽입하는 방법이 실용적이다. 즉 PT 1차회로의 중성점과 대지간에 저항을 설치하는 대신 2차회로의 상과 중성점사이에 저항을 넣거나

영상전압 검출용 개방삼각 결선의 PT인 경우 개방단자간에 계전기와 병렬로 저항을 삽입, 공진의 영향을 경감할 수 있다.

2차 저항에 의해 PT에 부과되는 부담, 계기 및 계전기의 부담의 합이 PT의 정격부담을 초과하지 않도록 배려하여야 하고 PT의 정격부담별로 적용할 수 있는 2차 저항의 크기는 참고 문헌 [3]에 있다.

3. 변압기 보호

3.1 퓨즈에 의한 보호

변압기의 1차측에 퓨즈를 설치하여 보호할 경우에는 변압기의 정격부하 전류나 허용과부하 전류에 의해 경년 열화가 일어나지 않도록 충분한 용량으로 선정해야 함은 물론 가압시 돌입여자전류에 의해서도 용단 또는 경년 열화가 일어나지 않도록 여자돌입전류의 시간특성을 고려 퓨즈의 허용전류 시간특성이 상위인 정격의 것을 선택하여야 한다.

물론 1차측의 단락고장전류를 차단할 수 있는 차단용량이어야하고 2차의 단락사고에 대해서는 변압기의 단락전류 지속시간내에 확실히 용단되는 특성을 갖는 것으로 선택하며 퓨즈가 설치되는 곳의 온도가 규정사용온도를 초과할 경우 이를 고려하여야 한다.

퓨즈에의한 보호는 경제적인 측면에서는 유리하나 주로 내부 단락사고 제거에 유효하므로 1,2차측 한시 과전류계전기와의 시간협조는 사실상 어렵다.

3.2 변압기 전류차동보호

변압기는 초기가압되거나, 고장후 전압회복시 또는 타뱅크의 변압기가 병렬가압될 때 고조파를 함유하는 돌입여자전류가 흘러 차동보호 계전기의 적용에 주의를 요한다. 소용량의 변압기로 돌입여자전류의 크기가 작고 시간이 짧은 경우에는 고조파 억제요소가 없는 유도원판형을 사용해도 문제가 없으나 중·대형의 중요변압기는 고조파 억제요소가 있는 비율차동계전기를 사용하는 것이 오동작방지에 효율적이다. 돌입여자전류의 크기는 냉간압연 강판을 사용했을때가 열간압연강판을 사용한 경우보다 크다.

3.2.1 차동보호용 변류기의 결선

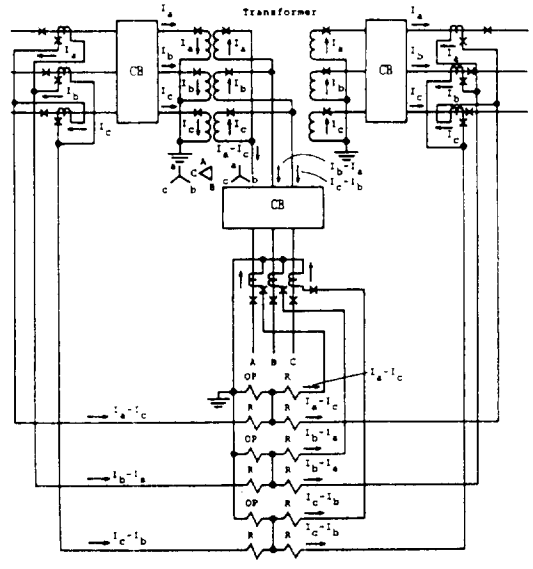


그림 2. Y−Y 변압기의 변류기 결선예

차동보호용으로 결선되는 두 변류기의 2차 전류는 정상운전시 억제코일과 두 변류기의 2차 코일을 통해 환류하고 동작코일로는 유입되지 말아야하므로 위상과 크기가 같도록 결선되어야 한다.

변압기의 권선이 Y−△ 결선인 경우 1, 2차측의 변류기 2차전류의 위상이 같아지도록 변류기는 그림 2와 같이 결선, 변압기 1, 2차간 위상차를 보상하여야 한다. 그림 2의 변압기는 결선이 Y−△−Y인 3권선 변압기로 △측이 30° 늦은 경우이다. Y−△ 결선에서는 결선 방법에 따라 위상이 ±30°, ±90°, ±150°의 차가 날 수 있으므로 주의를 요하나 수배전용 변압기의 대부분은 ±30°차의 결선이거나 위상차가 없는 Y−Y나 △−△ 결선으로 채택되고 있다.

매입 3차권선(△결선)이 있는 Y−Y 결선 변압기의 어느 한쪽의 중성점이 접지된 경우 변류기를 Y−Y 결선하면 보호구간 외부의 지락사고시에도 동작하므로 △−△ 결선을 하여야 한다.

변압기의 결선방식별 변류기 결선방식은 아래와 같으나 어느경우에도 위상차가 없도록 결선하여야 한다.

변압기 결선	변류기 결선
△−Y	Y−△
Y−△	△−Y

△-△	Y-Y
Y-Y	△-△
△-Zigzag	△-△

또한 다중권선 변압기나 변압기의 2차가 여러모선에 연결되는 계통에서는 변류기들의 2차회로를 병렬 연결하는 것보다 다중억제 코일이 있는 계전기를 사용하는 것이 오동작 방지에 유리하다.

3.2.2 변류비 및 탭선정

△결선으로되는 CT의 2차회로의 전류는 △결선으로 되기전에는 일차전류를 변류비로 나눈값이나 △결선후의 계전기로 가는 각상전류는 $\sqrt{3}$배가 되고 단상 3대로 구성된 △결선 뱅크의 각 변압기 내장 변류기들을 Y결선시에는 CT의 상전류가 3상 △권선 변압기 상전류의 $1/\sqrt{3}$배가 되므로 변류비 선정에 주의를 요한다.

계전기 구매시 계전기자체에 변류비 조정탭이 갖추어진 것으로 선택하여 변류기의 변류비 선정에 여유가 있도록하고 가능한한 보조변류기를 사용하지 않는 것이 좋다. 특히 보조변류기를 사용하여 전류를 증가시킬 경우 보조변류기 1차로 환산했을 때의 보조변류기의 2차의 부담은 증가변류비 제곱에 비례하므로 주의를 요한다.

3.3 기계적인 보호장치

기계적인 보호장치로는 Buchholz 계전기, 충격압력 계전기, 방압장치등이 있으나 부분방전등 초기의 내부이상 상태에서 발생되는 가스를 포집하는 가스검출계전기가 있다. 중용량 이상의 유입변압기에는 이 가스검출계전기를 설치, 내부이상 초기에 소량의 가스발생시 예비점검을 실시하는 것이 불시정전을 예방하는 방법이다. 가스의 성분중 아세틸렌(C_2H_2)이 함유된 경우에는 점검을 실시하는 것이 좋다.

가스검출계전기는 대체로 400㎤ 안밖의 적은 포집용량을 가지고 있으므로 내부이상 발생의 초기에 가스발생이 검출되기 위해서는 변압기 설계시 구조적으로 내부에서 발생한 가스 모두가 검출기로 모일 수 있도록 하여야하며 변압기 설치시에도 특히 주의를 요한다.

4. 지락보호

4.1 접지변압기

비접지계통에서의 지락보호에는 대부분 접지변압기를 설치하여 지락전류를 검출하고 있으나 지락전류의 크기결정은 지락검출 감도에만 맞출것이 아니라 1선지락 발생시 기기에 손상을 줄 수 있는 과도과전압이 발생하지 않도록 크기를 결정하여야 한다. 3상접지 변압기 1차측의 전압정격은 접지변압기가 연결된 계통의 선간전압과 동일정격으로 하고 중성점과 대지간에 삽입되는 한류저항은 상전압 정격으로 한다. 특히 저항체의 발열에 의한 열화로 저항이 단선되지 않도록 충분한 열용량으로 선정하는 것이 차라리 경제적이며 지락사고에 대한 주선로의 후비보호 시간도 감안토록 한다.

4.2 지락보호

지락검출계전기의 동작전류치가 보호대상 Feeder의 충전전류보다 작을 경우에는 보호대상 구간외의 사고시에도 Feeder 케이블의 케패시턴스를 통해 흘러 오동작하게 되므로 방향지락 과전류 계전기를 사용, 보호구간 선택이 되도록 하여야 한다.

지락전류의 크기는 계통의 충전전류보다 크고 지락사고시의 과전압이 기기의 절연을 위협하지 않는 수준이 되도록 높이는 것이 합리적이다.

고압케이블 Feeder의 지락전류 검출용으로 설치되는 영상변류기는 대체로 케이블의 단말후단에 설치되므로 케이블의 차폐접지선이 영상변류기를 관통하여 접지되지 않으면 상도체를 통해 지락점으로 가는 전류와 케이블내의 차폐층으로 회귀하는 전류가 상쇄되어 부동작하게 된다.

차폐층이 없는 저압케이블 Feeder의 경우 케이블 길이가 길고 순시지락 과전류계전기의 검출감도를 높게하였을 때 개폐기접점의 접촉시간의 상별 불일치로 인한 불평형 충전전류에 의해 오동작하는 수도 있으므로 0.1초 정도의 시지연을 두는 것이 좋다.

5. 저압발전기의 중성점 접지 및 지락보호

5.1 발전기 중성점 접지

중성점이 직접접지된 저압계통의 모선에 연결되어 병렬운전으로 상시 전력공급을 하거나 정상전원 상실시 비상용 전력공급용으로 사용되는 저압발전기의 경우 발전기의 중성점을 직접접지하고자 할

경우에는 세심한 주의를 요한다.

일반적으로 발전기의 영상분 임피던스는 정상분 및 역상분에 비하여 훨씬 낮기 때문에 (통상1/2X"d 정도) 직접접지된 발전기로부터 가까운곳에서 1선지락이 생기면 1선지락 고장전류가 3상단락전류보다 크기때문에 3상단락전류 기준으로 설계된 발전기의 권선이 1선지락 고장전류에 의한 전자기계력을 감당하지 못하므로, 1선지락 전류를 3상단락전류 이하로 제한할 수 있도록 발전기의 중성점과 대지사이에 지락전류제한 장치를 삽입할 필요가 있다.

중성점이 직접접지된 저압계통의 모선과 중성점이 직접접지된 발전기를 병렬운전할 경우 변압기나 발전기로부터의 3배수 고조파 전압에 의해 발전기의 중성점과 전원변압기의 중성점을 통해 3배수 고조파전류가 순환하여 변압기 또는 발전기의 중성선에 설치된 지락계전기가 오동작한다. 이 순환하는 3배수 고조파전류는 영상전류로, 발생되는 3배수 고조파 전압 및 순환 전류 회로의 영상임피던스에 좌우되고 이 순환 전류가 클경우 변압기나 발전기의 과열을 초래할 수도 있고 발전기의 3배수 고조파 전압의 발생은 코일핏치 설계에 따라 다르나 기본파의 약 15% 정도까지 발생한다.

발전기의 중성점 접지는 1선지락전류가 3상단락전류보다 작도록하고 중성선에 설치되는 지락검출계전기는 고조파억제형 과전류 또는 과전압계전기를 사용한다.

6. 전동기 보호

6.1 대용량 유도전동기의 보호

6.1.1 고관성(High Inertia) 부하구동 전동기의 기동시 보호

대형 송풍기와 같은 고관성 부하를 구동하는 전동기는 기동시간이 길어 정격전압보다 낮은 전압에서 기동될 경우 기동시간이 회전자 구속 내열한계시간보다 길어져 회전자 구속 내열한계곡선(Locked-Rotor Thermal Limit Curve)과 기동시간/전류곡선(StartingTime-Current Curve) 사이의 보호협조 여유가 작아 한시과전류계전기 1대만으로는 정상운전시의 경미한 과전류에 대한 보호와 기동중 또는 회전자 구속(기동실패)에 대한 보호가 불가능하게 되므로 이러한 경우에는 다음과 같은 방법으로 보호한다.

1) 영속도 스위치와 과전류계전기

회전자의 영속도(Zero-Speed) 스위치와 과전류계전기의 접점을 직렬로 연결하여 전동기의 기동실패에 대한 보호를 하는 방법으로 전동기가 정상기동을 한 후에는 과전류계전기에 의해 보호하고 회전자가 회전자구속 내열한계시간 전까지 일정속도에 도달치 못하면 회전자 구속 내열한계곡선보다 아래로 정정된 한시과전류계전기와 영속도 스위치의 접점을 직렬로 연결 전동기를 트립시킨다. 이 방법을 적용키 위해서는 전동기구매시 영속도 스위치를 구비토록 발주하여야 한다.

2) 임피던스 및 과전류 계전기에 의한 보호

전동기가 정지상태로부터 기동하게되면 전원측에서 본 전동기의 임피던스가 낮은 상태로부터 증가하게되므로 이 원리를 이용 임피던스 계전기와 과전류계전기를 조합하여 기동시에 대한 보호를 하는 방법으로 과전류계전기의 전류는 높은텝에 시간은 낮은텝에 정정하여 동작 특성곡선이 구속회전자 열적 한계곡선 아래에 배치되도록 한다. 임피던스 계전기는 통상 회전자의 속도가 50% 정도에서의 임피던스에 정정하여 기동시에는 과전류계전기와 임피던스 계전기의 동작접점을 직렬로 연결, 두대의 계전기가 동시에 동작하였을 때 전동기를 트립시켜 기동실패에 대한 보호를 하는 방법이다.

3) 2대의 한시계전기에 의한 보호

동작특성이 다른 2대의 과전류계전기를 사용하여 회전자구속 내열 한계곡선과 기동시간/전류곡선 사이에 2대의 계전기의 동작특성 곡선이 배치되게하는 방법으로 1대의 계전기는 장한시형으로 낮은 텝에 정정하여 저전압 기동시나 정상운전중의 경미한 과전류에 대해 동작토록하고, 다른 1대의 계전기는 반한시 또는 강반한시형으로 높은 텝에 정정하여 계전기의 동작특성곡선이 구속회전자 열적한계곡선과 기동시간/전류곡선 사이에 배치되도록하여 정상전압 기동시와 회전자 구속에 대한 보호를 하는 방식이나 이경우 구속회전자 열적 한계곡선과 기동시간/전류곡선사이에 시간 여유가 있어야 한다.

6.1.2 순시과전류 계전기의 정정

순시과전류 계전기는 전동기 기동시에는 절대로

동작하지 않도록하면서 가능한 낮게 정정되어야 한다. 순시형 과전류 계전기는 DC Offset 전류에도 동작하게 되므로 기동전류보다 약간 높게 정정하였더라도 기동시 트립되는 경우가 있다. 전원투입시 과도분인 DC Offset 전류를 포함한 비대칭 실효치가 대칭분 회전자 구속전류의 1.5배 정도에 달하므로 여기에 약간의 여유를 두어 회전자 구속전류의 1.6~1.9배 정도에 정정토록 한다.

6.1.3 한시과전류 계전기의 적용 유의사항

전동기의 기동시간/전류곡선은 시간에 대한 전류의 궤적이나 한시과전류 계전기의 전류/시간 동작특성곡선은 어떤 불변의 연속 전류에 대한 동작시간의 점의 연속선이므로 열동형 계전기가 아닌 한시과전류 계전기의 동작곡선이 전동기의 기동시간/전류곡선보다 위에 있다하더라도 두곡선이 가까울경우 전동기가 정상 기동중 계전기가 동작할 수 있어 계전기 정정에 주의를 요한다.

정정치전류 초과분 과전류의 시간에 대한 적분값, 즉 $\int(I-1)^n dt$가 계전기의 동작상수 K를 초과하는 조건이 되면 계전기가 동작하게 된다.

일례로 어떤 계전기의 동작특성이 2배의 정정치(Pickup)에서 23초에 동작하고 3배의 정정치에서는 8.7초에 동작된다면 $(2-1)^n \times 23 = (3-1)^n \times 8.7$로 되어 n은 1.4, K는 23이 된다.

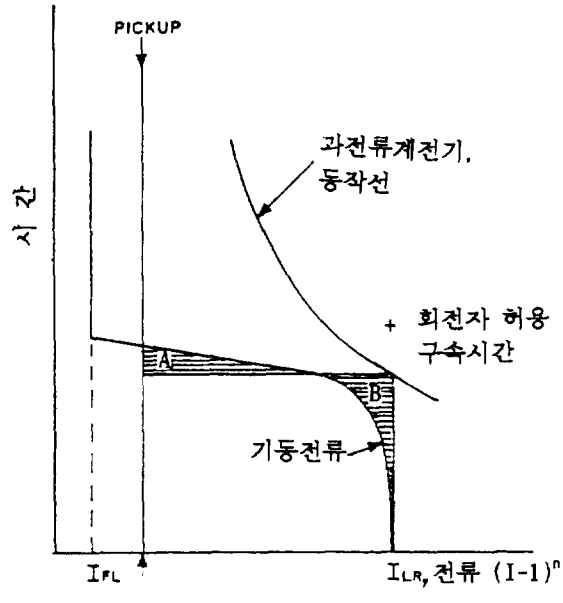


그림 3. 과전류 계전기 정정 등면적법

기동시 전류의 변화가 선형이 아니므로 전류와 시간을 각각 비례축으로한 그래프상에서 변하는 전류에 대한 계전기의 동작여부를 쉽게 판정할 수 있다.

그림 3에서 줄친면적 A가 B보다 크면 계전기는 동작하게 된다. 계전기의 오동작을 막기 위해서는 면적 A가 B보다 약 20% 정도 작도록 계전기의 동작특성 곡선을 배치하는 것이 적절하다.

그러나 최근의 Microprocessor 계전기는 열동형 특성을 가진것이 있으므로 상기의 오동작에 대한 염려가 없다.

6.2 저압전동기의 결상보호

전동기 제어반에 전원을 공급하는 변압기의 전원측 1상이 퓨즈의 용단, 케이블 연결단자의 헐거워짐, 개폐기 접점의 개리 등으로 결상이 일어났을 경우 전원변압기의 결선이 △-Y 또는 Y-△이더라도 전동기의 권선이 △권선이면 부하상태에 따라 결상이 아닌 다른 2상의 전류가 정상전류의 $2/\sqrt{3}$ (115%)배를 넘지 않아 열동형 과전류계전기로 보호되지 않는 경우가 생긴다.

이런 경우에는 정상전류보다 낮은 차동전류에서도 동작하는 기능을 가진 열동형 과부하계전기로 보호할 수 있으며 전원변압기의 결선방식에 불구하고 열동형 계전기의 열동소자가 3상에 다 갖추어진 계전기를 사용하는 것이 효과적이다.

참 고 문 헌

[1] Relay Performance Considerations with Low Ratio CTs and High Fault Currents, IEEE PES Power System Relaying Committee, 92SM-382-2PWRD, 1992

[2] Edson R.Detjen et al, Grounding Transformer Applications and Associated Protection Scheme, IEEE Trans on IA Vol.28. No.4 Aug. 1992

[3] Electrical Engineering Guide and Data, Ebasco Services Inc. 1991.

[4] Transients in Power Systems, Advanced School in Power System Engineering Lec-

ture ABB, 1990
[5] J.L.Blackburn, Protective Relaying, Marcel Dekker, Inc 1987
[6] J.L.Backburn, Applied Protective Relaying, Westinghouse, 1979.
[7] W.A.Elmore, Some Thoughts on Large Motor Protections, Westinghouse RPL 76-2A, 1978.

이종철(李鍾哲)
1951년 1월 11일생. 1977년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1977~80년 (주)현대양행 발전사업부 근무. 1981년 한국전력기술(주) 근무. 현재 한국전력기술(주) 전기기술처 기술표준 1팀장, 기술사(발송배전)