

불평형 고장해석시 대칭좌표법을 이용한 영상 및 역상 회로의 해석

김세동 <두원공과대학 교수/공학박사, 기술사> · 남재경 <(주)파워 토스 기술이사, 기술사>

1 개 요

가공송전선로 또는 지중송전선로이건 간에 사고를 전혀 일으키지 않고 운전한다는 것은 불가능한 일이다. 특히 가공송전선로는 직접 자연에 노출되어 모든 기상 조건의 영향을 받게 되므로 뇌해, 풍수해, 설해, 염진해, 기타 등으로 사고를 일으킬 우려가 많다.

송전선로에서 발생하는 사고중 가장 많은 것은 1선 지락이지만, 이밖에 선간 단락, 2선 지락, 심할 경우에는 3선 지락(단락)으로까지 진전되는 사고가 있을 뿐만 아니라 때에 따라서는 단선 사고까지 발생하는 경우도 있다.

송전선에 지락 또는 단락 사고가 발생하면 얼마만한 크기의 지락 전류 또는 단락 전류가 흐를 것인가 하는 것을 미리 알아둔다는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐하면 고장에 대비한 차단기의 용량 결정 또는 차단기를 동작시키기 위한 보호 계전기의 정정 등에 이를 전류값이 사용되기 때문이다.

또, 지락 전류가 대지에 흐르게 되면 이 전류에 의해서 전력선 부근을 통과하고 있는 통신선에 유도 장애를 일으키기 때문에 사전에 그 영향이 어느 정도에 달할 것인가도 알아둘 필요가 있다.

이러한 의미에서 고장 계산은 송전 계통에서 고장시의 상태를 해석하여 지락 전류라든지 건전상의 전압 상승 등을 수치 계산으로 구함으로써 고장시의 상황에 대처할 수 있게 하는 것이라 하겠다.

3상 단락 고장처럼 각 상이 평형된 고장에서는 고장점을 중심으로 여기에 인가된 전압과 임피던스를 구해서 쉽게 고장 해석할 수 있다. 그러나, 각 상이 불평형되는 1선 지락과 같은 불평형 고장에서는 각 상에 걸리는 전압을 따로 따로 구해야 하는데, 실제적으로 고장 계산이 매우 복잡해져 대칭좌표법을 빌리지 않고서는 3상 회로의 불평형 문제를 다룰 수 없다. 즉, 비대칭성의 불평형 전압이나 전류를 대칭성의 3 성분으로 분해하여 해석하는 대칭좌표법(method of symmetrical coordinate)을 이용하면 보다 용이하게 회로 해석을 할 수 있는 경우가 많다.

대칭좌표법이란 한마디로 말해서 3상 회로의 불평형 문제를 푸는 데 사용되는 계산법이다. 이것은 불평형인 전류나 전압을 그대로 취급하지 않고, 대칭적인 3개의 성분으로 나누어서 각각의 대칭분이 단독으로 존재하는 경우의 계산을 실시한 다음, 마지막으로 그들 각 성분의 계산 결과를 중첩시켜서 실제의 불평형인 값을 알고자 하는 방법이다. 그러므로, 계산 도중에는 언제나 평형 회로의 계산만 하게 되고, 각 성분의 계산이 끝난 다음 이들을 중첩함으로써 비로소 불평형 문제의 해가 얻어지게 되는 것이다.

대칭좌표법이 보호 계전의 동작 관계 및 불평형 회로의 고장 계산을 검토하는데 매우 큰 도움을 주고 있으며, 본고에서는 보호 계전 기술의 기초를 이해하기 위해서 3상 평형 상태에서의 영상 및 역상의 개념에 대해서 살펴 보고, 영상 및 역상 회로에 대해서 설명하고자 한다.

2. 영상과 영상회로

2.1 영상의 개념

정상전류는 3상회로 내부만을 왕복하는 전류로 이 때문에 중성점 접지회로나 대지에는 결코 흐르지 않는 성질을 갖게 되었다. 그러면 대칭좌표법의 또 하나의 요소를 정상분과는 다른 3상, 각 상에 흐르는 전류를 모두 중성점 접지회로에서 대지로 흘러 나가는

성분으로 보자. 이와, 같은 전류, 성분은 3상, 각 상의 전류 크기나 위상도 아주 같은 성분이 된다. 왜냐하면 그림 1과 같이 1 상으로만 전류가 흐르고, 다른 상에는 흐르지 않는 성분을 생각할 수 있다. 이것은 3상의 각 상 안에서만 완전하게 순환하는 성분과 단순히 각 상에 똑같은 동위상의 전류에 의해 완전히 중성점 접지회로 - 대지와 3상 회로와의 사이를 순환하는 전류로 인해 치환이 가능하기 때문이다.

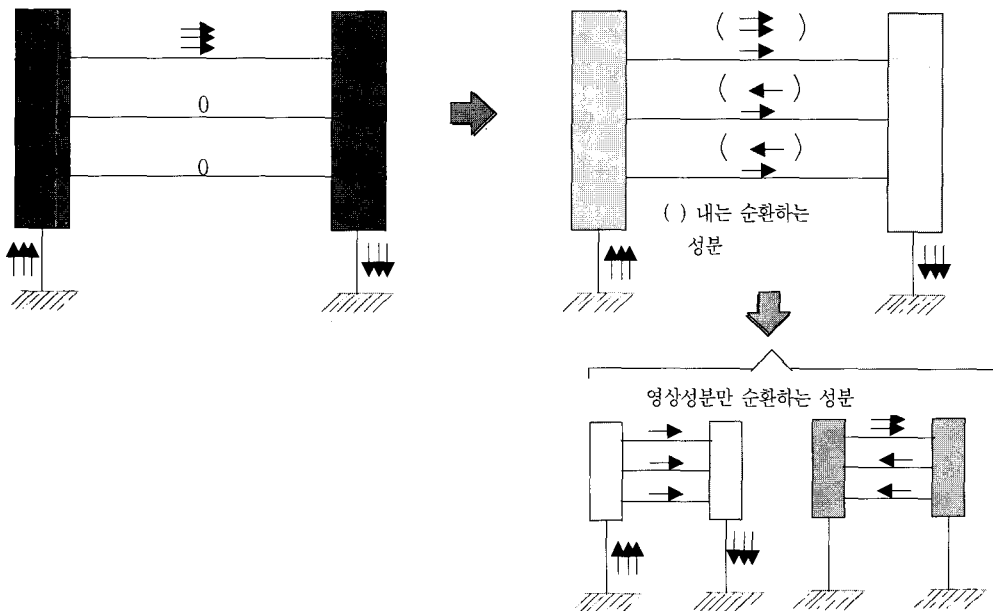
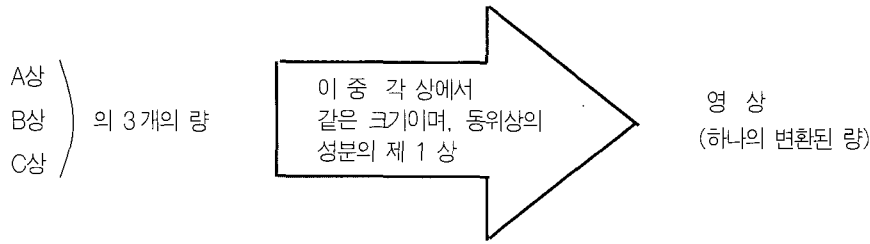


그림 1. 영상 성분의 개념
(3상 3선 회로내의 순환 전류분 제외)

그래서, 이것은 다른 어떤 전류 패턴을 생각해 보더라도 결국은 3상 각 상 안에서만 순환하는 성분을 0으로 할 수 없기 때문이며, 결국 정상분과 같은 성질을 갖고 3상회로 안에서만 순환하는 성분이 완전히 포함되지 않고, 또 전부의 3상 회로를 통하는 전류가 그대로 중성점 접지회로에서 대지로 흐르는 성

질을 갖기 위해서는 3상의 각상 전류의 크기와 위상이 똑같은 성분이어야 한다. 여기에서 이와 같은 성분을 전압에도 적용하여 이것을 영상이라고 부른다. 그래서, 정상분의 개념과 마찬가지로 영상 성분도 제 1 상만을 알면 충분하고 하나의 량으로서 취급하면 된다. 영상의 의미를 정리하면 다음과 같다.



2.2 3상 회로와 등가 영상 회로

영상과 그 영상회로는 어떻게 생각할 수 있고 어떻게 되는가를 검토해 보자. 우선, 첫째로 3상 회로에 포함되는 유기 전압 (발전기 등)은 어떻게 될까? 이것은 정상편에서 설명한 대로 3상 회로의 유기 전압은 100% 정상분이기 때문에 각 상의 동위상 성분인 영상성분은 전혀 포함되지 않는 것이다. 따라서 유기 전압은 완전히 0이다. 그러나 그림 2와 같이 유기

전압은 분명히 0이지만, 회로에서 보는 바와 같이 아무것도 없다는 것과는 전혀 다르다.

이 유기 전압으로 3상 회로의 단자 A와 같은 중성점 N 사이에 선을 연결하면 영상전류는 흐를 수 있어 결국 A-N 간에는 전선만의 회로로 치환하는 것이 된다. 이것은 정상 회로에서 유기 전압이 1/3로 감소된 것과 어울려 영상 회로는 반드시 무유기 전압으로 되어 고장 계산이나 회로의 이해를 아주 쉽게하는 이유이기도 하다.

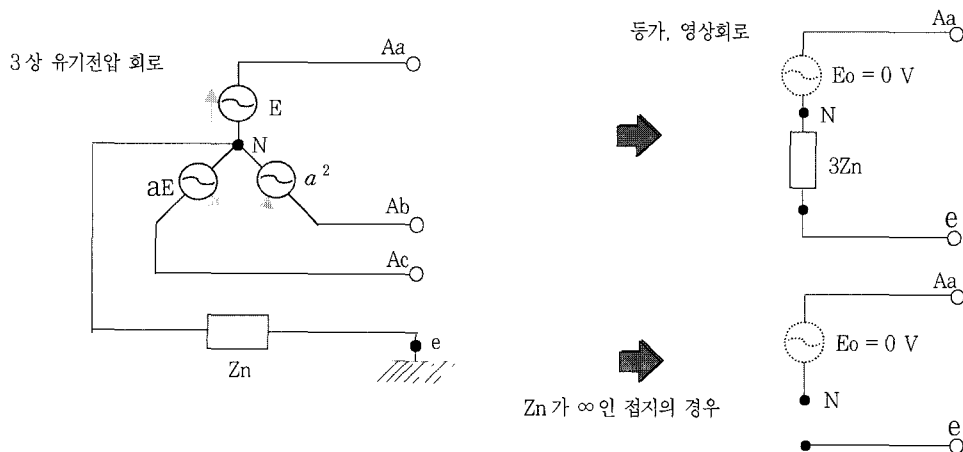


그림 2. 3상 전원의 영상 회로

다음에 그림 3에서 보는 바와 같이 3상 회로를 영상 회로로 치환해 보자. 이 그림의 계통도 A점과 B점 사이는 같은 그림의 3상 회로도처럼 중성점이, 발전기측 An은 대지로 접지되고 변압기 측 Bn은 비접지

로 되어 있어 영상회로도에서는 A점 측에 해당하는 An과 Ae가 3상회로의 접지 임피던스에 대응한 영상등가 임피던스로서 3배의 접지 임피던스로 묶이게 되어 계통도의 B점에 해당하는 영상회로의 Bn-Be

사이에는 열린상태가 된다. 그리고 영상 회로의 Ae-Be 사이에는 3상회로의 A점 및 B점의 대지점을 연결한 것으로 A점, B점간의 대지 임피던스를 무시할 수 있다.

따라서, 이 사이의 선은 A점, B점 간의 대지에 따라 형성되는 영상 회로라고 생각해도 지장이 없다. 이 사이의 대지의 임피던스까지는 무시할 수 없는 것처럼 엄밀한 등가회로가 요구되는 경우에는 이 영상회

로의 Ae-Be 간에 해당하는 대지의 임피던스를 넣은 그림으로도 되지만, 이같은 경우에는 그림 4와 같이 대지에 대응하는 Aa-Ba 간의 전선의 임피던스도 무시할 수 없어 이 임피던스와 대지 임피던스의 양자를 정리하여 이 Aa-Ba 간에 넣어 나타낸 것이 편리하게 취급할 경우가 많으므로 일반적으로는 그림 4의 ③과 같이 취급하는 것이 널리 이용되고 있다.

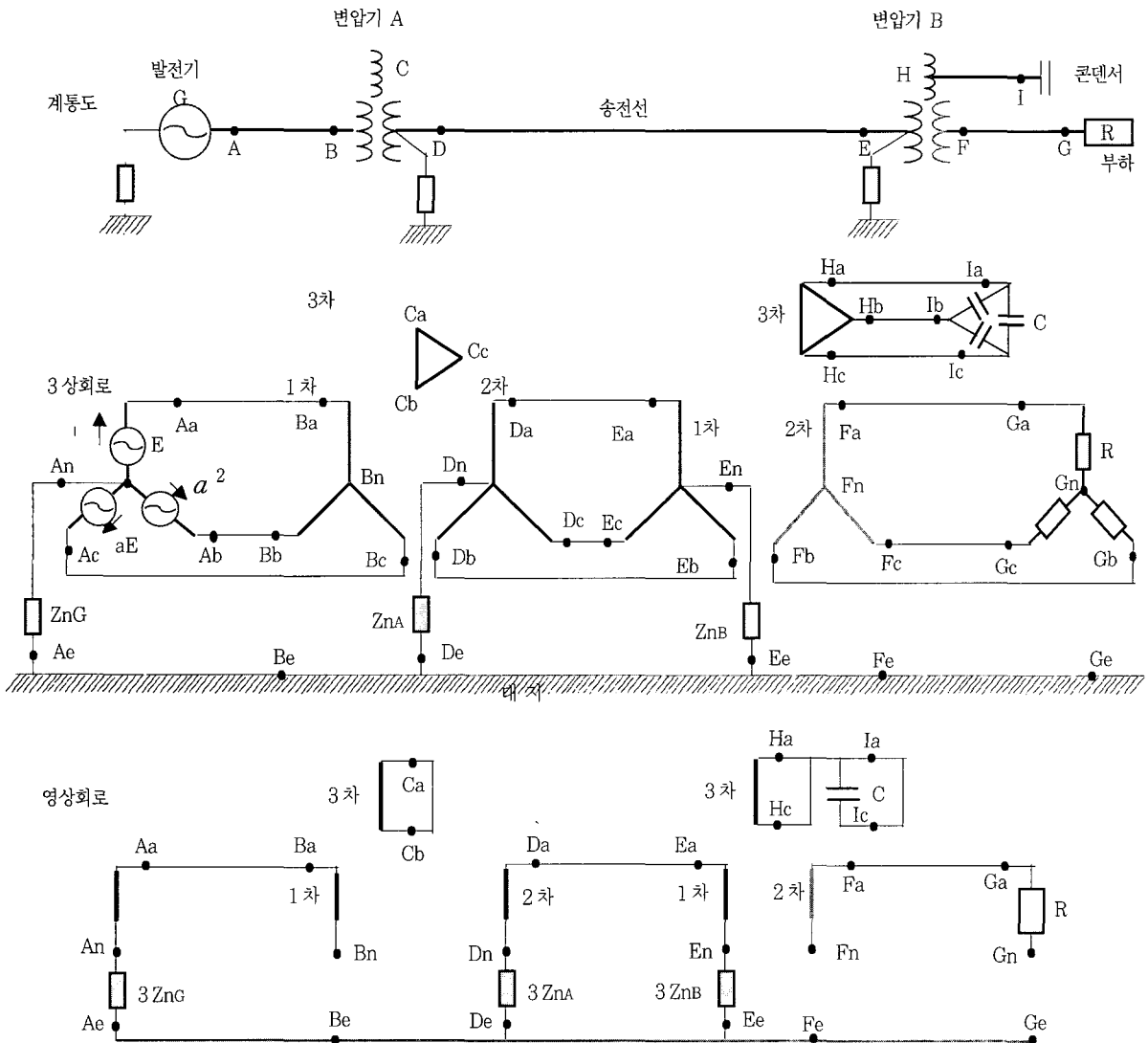


그림 3. 3상 회로와 등가 영상 회로의 예

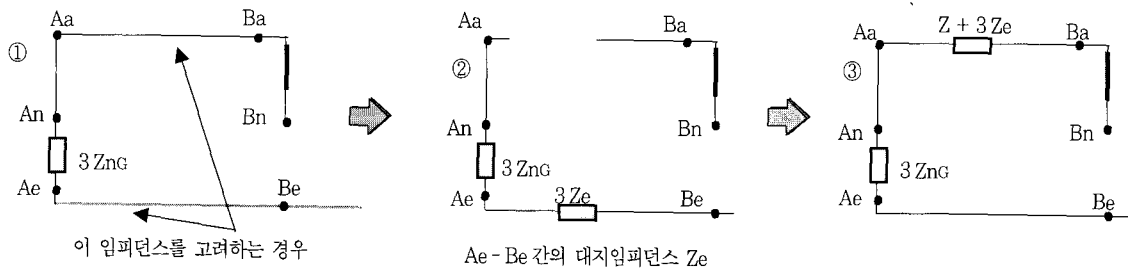


그림 4. 등가 영상 회로에서 대지 임피던스를 고려하는 경우의 예

또, 중성점 접지 임피던스나 대지 임피던스가 3상회로의 임피던스에 비례하여 영상 회로에서는 3배가 되는 것은 그림 5와 같이 3상 회로에 영상 전류가 흐른 경우 그 3배의 전류가 중성점 접지 회로나 대지로 흐르는 것을 영상 회로에서는 제 1 상의 1 상분 회로로 치환한다. 이 중성이 접지 회로나 대지에 해당하는 영상 회로에는 1 상분의 1/3의 전류 밖에 흐르지 않기 때문에 전압 강하를 같게 하고, 회로의 등가성을 가지도록 하기 위해서는 3배로 환산할 필요가 있는 것이다.

그림 4의 계통도에서 C점에 해당하는 3상 회로의

Ca, Cb, Cc 단자는 개방 상태로 되어 있음에도 불구하고 영상 회로에서는 Ca - Cc 단자로 단락되어 있다. 이 Ca - Cb 단자를 단락하고 있는 선은 원 3상 회로에는 없는 것인데, 여분의 것이 저절로 생겨 버렸다고 생각할지도 모르지만, 이것은 계통도에서 변압기의 3차 권선에 영상전류가 흐른 경우, 3차 권선이 3상 회로도처럼 Δ 결선 되어 있고, 이 Δ 결선 내를 그림 6과 같이 영상 전류가 단락 상태로 순환할 수 있음과 같이 영상 전류가 순환한 경우라도 이 3차 권선의 단자에는 영상 전압이 생길 수 없다.

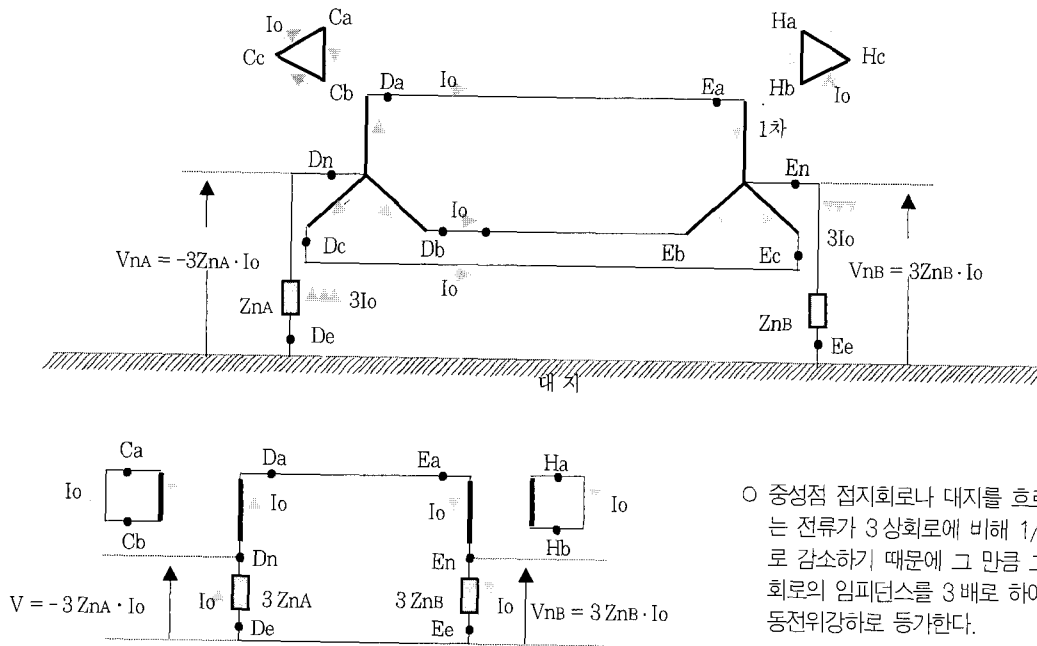


그림 5. 중성점 접지 회로의 임피던스의 취급

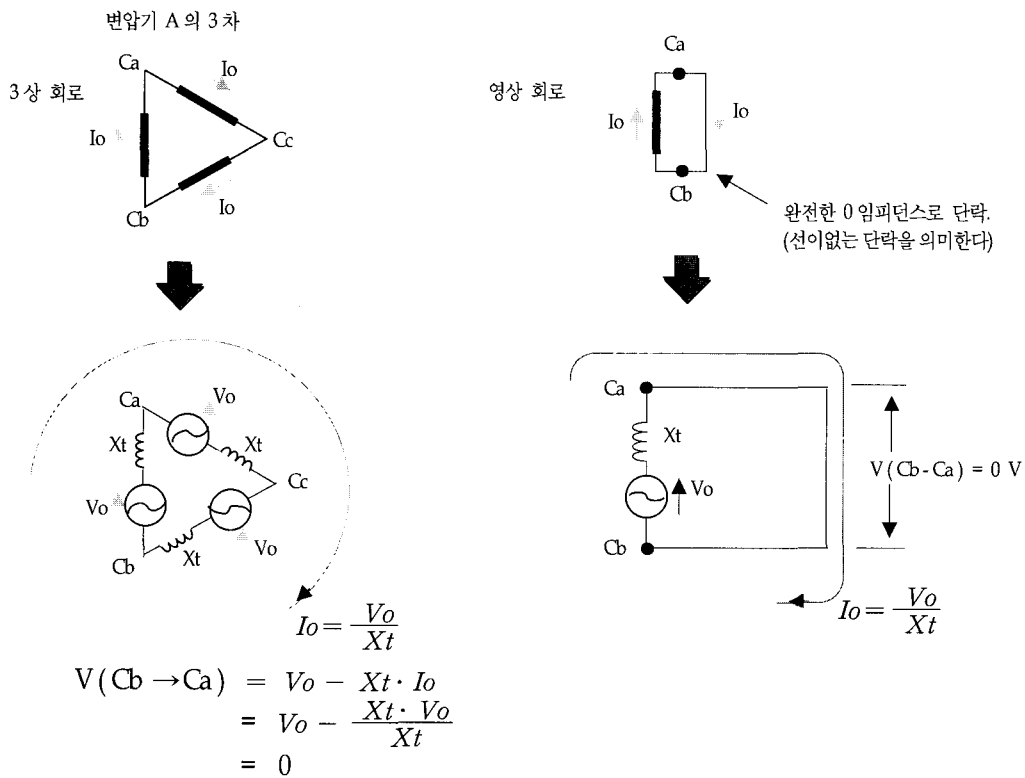


그림 6. Δ 결선의 영상 회로의 취급

그래서, 영상에 대해서는 3상 회로의 3차 권선의 Δ 결선은 3상 권선의 각각을 단락하여 놓은 것과 같다는 것을 알 수 있다. 따라서, 영상 회로에서는 Ca-Cc 단자가 단락 상태로 되어 있는 셈이므로, 이 단자 간에 리드선이 추가되었다는 인식에서 Ca 단자와 Cc 단자가 단락되어 있다고 해석할 수 있겠다.

이렇게 하여 3상 회로가 주어지면 이 3상 회로에 아주 물리적으로 대응하는 영상 회로가 존재한다고 생각할 수 있어 그 영상 회로는 그림 4의 예처럼 어떠한 3상 회로라도 영상 회로로 치환할 수 있게 되는 것이다.

2.3 영상의 성질

우선 영상 전류인데, 영상의 정의에서 이 전류가

흐르려면, 정상 3상 회로에는 유기 전압이 0이기 때문에 영상 회로에도 정상시에는 유기 전압은 전혀 없고, 외부로부터 어떤 인가 전압이 걸리지 않으면 안 되는 것이다. 따라서, 3상 회로가 정상인 경우는 영상 회로는 있어도 영상 전압이나 영상 전류는 회로의 어떤 곳에서도 0으로 되어 전기적으로는 아무것도 생기지 않는다.

그러나, 3상 회로에 어떤 이상이 생기거나 3상 회로 자체에서 아무런 고장이 없는 상태에서도 외부로부터 전자 유도나 정전 유도를 받는 경우에는 이 영상 회로에 외부로부터 인가 전압이 주어지게 되어 영상 회로의 각 개소에 영상 전압이나 영상 전류가 생기게 된다.

단, 여기서 말하는 것은 영상 회로에 전류가 흐르려면 그 원래 회로인 3상 회로가 병행 2회선 송전선

이나 루프 송전 계통 등과 같이 3상 회로로 루프로 되어 있는 경우 이외에는 반드시 중성점 접지 회로에서 대지로 밖에는 영상전 류가 3상 회로로 흐를 수 없다고 말할 수 있기 때문에(왜냐하면, 영상 전류는 3상 회로의 각 상에 위상과 크기가 같은 전류가 흐르기 때문에 반드시 중성점에서 중성점 접지회로로 3배의 영상 전류로 되어 흐르기 때문이다) 1선 지락 고장이나 2선 지락 고장 혹은 1선 단선이나 2선 단선 고장으로 양단 중성점이 접지되는 경우 및 다른 전기 회로로부터 유도를 받는 경우에 한정한다. 간단히 말하면, 전력 계통이나 3상 회로의 중성점 접지 회로에 전류가 생기거나 중성점과 대지와 사이에 전압이 발생한 때는 반드시 영상 전압, 영상 전류가 발생하고 있다고 할 수 있다.

또, 다른 전기 회로에 미치는 전자 유도나 정전 유

도에는 영상분의 영향이 있지만, 영상 회로는 반드시 3상 회로에 해당하는 전기 회로와 그것에 상대하는 대지에 의한 회로로 구성되어 있다. 따라서, 영상분의 전류나 전압이 발생하고 있다는 것은 대지와 계통 그리고 3상 회로와의 사이에 전류가 순환하거나 전압이 발생하고 있다는 물리적인 의미이기 때문에 영상분은 좀 더 다른 쪽으로의 유도 작용이 크다고 할 수 있다.

이것은 전술한 정상분과 같이 대지에 대해 중성적인 행동을 하는 것과 본질적으로 다른 점이다. 또, 3상 회로에 영상분이 생기더라도 3상의 각 상에는 동상의 전압, 전류로 되어 있어서 성질은 단상적이며, 정상분처럼 회전 자계를 발생하지는 않는다. 참고로 표 1은 영상분의 성질을 요약한 것이다.

표 1. 영상분의 성질

항 목	영 상	영 상 전 류	영 상 전 압
계통 및 회로 내의 전기적 성질	루프 계통 이외에서는 반드시 영상 전류의 3배의 전류가 계통 또는 3상 회로로부터 외부의 대지로 흘러나간다. 루프 계통에서도 영상 전류의 루프 내 순환전류를 제외하면 상기와 같다.		각 상 전위가 대지에 대해 같은 크기를 갖는 것으로 중성점 전위도, 각 상의 전위도 영상 전압과 동등하게 된다.
계통 및 회로가 고장인 경우	정상시에는 외부로부터 유도를 받는 경우를 제외하면 완전 0이지만, 불평형 지락고장 (1선 지락, 2선 지락사고)이나, 불평형 단선고장 (1선단선, 2선단선고장)인 때에 생긴다.		좌 동
외부회로에의 영향	계통이나 3상 회로의 각 상을 일괄한 회로와 대지와 사이에 전류가 순환하기 때문에 전자 유도를 생기게 하는 성질이 있다. 그러나, 고장 전류가 흐르는 시간이 아주 짧게 되도록 고속도 차단기 및 보호장치 적용 등의 조치를 취하고 있다.		대지에 대해 계통이나 3상 회로의 각 상전압이 일괄해서 생기기 때문에 정전 유도를 발생하는 성질이 있다. 그러나, 극히 짧은 시간이 되도록 조치하는 등 문제를 발생하지 않도록 하고 있다.
회전 자계를 갖는 회전기(동기기, 유도기)에의 영향	회전기에는 영상 전류가 흐르더라도 회전계자가 생기지 않기 때문에 열적 허용한도, 기계적 허용한도 이내라면 특별히 문제가 생기지 않는다. 실제로도 영상 전류가 흐르도록 할 필요가 없기 때문에 일반적으로는 회전기의 중성점을 비접지와 동등한 고 임피던스로 접지함으로써 큰 영상 전류가 흐르는 일은 거의 없다.		영상 전압은 3선을 일괄해서 인가하는 전압과 동등하기 때문에 3상 회전기에 있어서도 영상 전압은 3상적인 영향을 미치는 일은 전혀 없다. 따라서, 대지에 대한 절연 이외에는 아무런 문제가 되지 않고 절연 강도 면에서도 그 이상의 높은 영상전압을 발생치 않도록 회전기 중성점 접지 임피던스를 정하고 있기 때문에 문제가 되지 않는다고 생각해도 된다.

3. 역상과 역상 회로

3.1 역상의 개념

정상인 경우는 3상 회로의 A상, B상 및 C상의 각상 중 3상 평형으로 상회전이 정상인 성분을 정상

으로 정의하며, 역상은 상회전만이 역회전되는 성분으로 정의한다. 이와 같이 역상은 그림 7과 같이 정상과 비슷한 벡터도로 보이지만, 유기 전압은 완전히 0이고 유기 전압을 갖지 않는다는 점에서는 영상과 같다. 역상의 개념을 정리하면 다음과 같다.

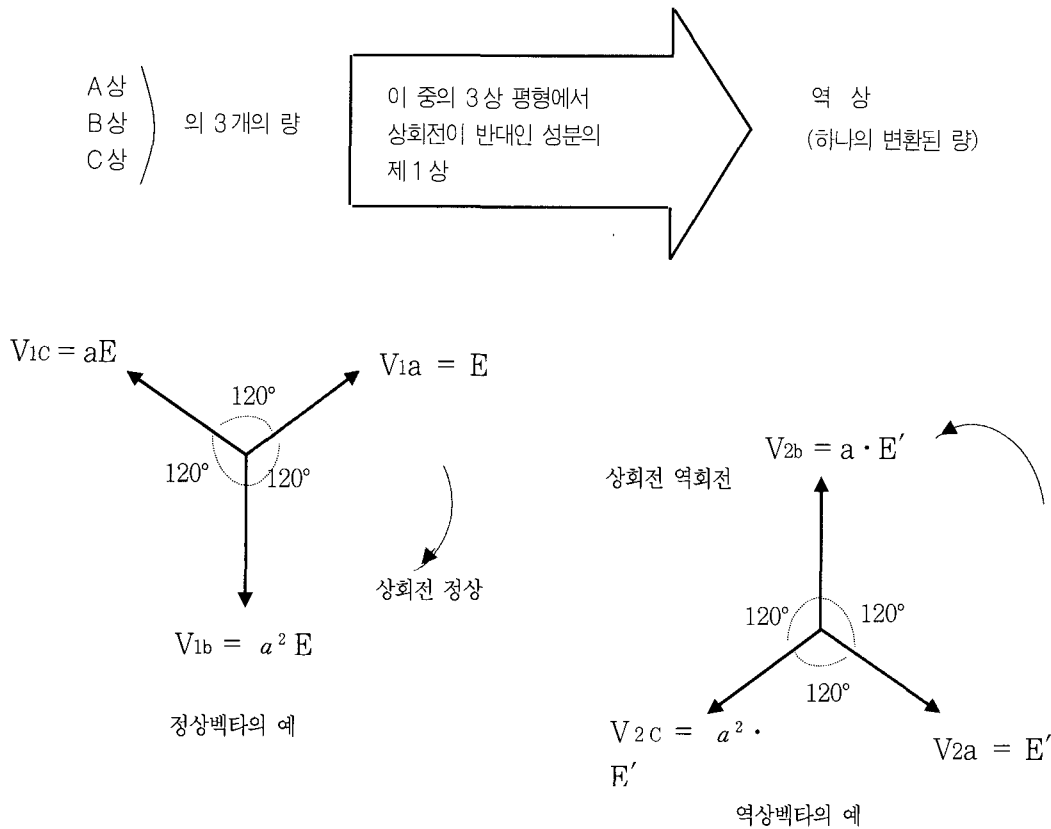


그림 7. 역상의 벡터도(정상 벡터와의 비교)

3.2 역상 회로와 역상의 성질

역상 회로는 회로의 형태로는 정상 회로의 유기전압을 영으로 한 것과 같다. 단, 발전기나 전동기의 임피던스의 크기는 일반적으로는 달라진다. 또한, 역상의 성질은 역상 회로에는 유기 전압을 가지고 있지 않

아, 3상 회로가 정상인 경우는 역상 회로는 있어도 역상전압 및 역상 전류는 전혀 발생하지 않는다.

따라서, 역상이 3상 회로 내에 발생하는 것은 영상이 발생하는 것과 같은 경우 이외에 2상 단락 고장이 발생한 경우이다. 외부 전기 회로에 주어지는 유도가 양적으로 같다면 정상과 같게 되지만, 일반적으로는

정상보다 양적으로 동등 이하이고, 발생 빈도도 극히 적기 때문에 3상 회로의 고장 이외에는 고려할 필요가 없다고 생각하여도 상관은 없다.

역상이 발생하면, 발전기나 전동기 등의 회전 자계

를 갖는 회전기에는 역회전 자계를 발생하게 되어 이들 회전기에 고주파 발생에 의한 파형의 찌그러짐이나 국부 과열 혹은 진동 발생 등의 고장을 일으키는 성질이 있다. 표 2는 역상의 성질을 요약한 것이다.

표 2. 역상분의 성질

항 목 \ 역 상	역 상 전 류	역 상 전 압
계통 및 3상회로의 전기적 성질	정상분의 경우와 같다.	정상분의 경우와 같다.
계통 및 3상회로가 고장인 때	상시 외부로부터 유도를 받는 경우를 제외하면, 0 이지만 불평형 고장(3선 지락, 3상 고장, 3선 단선 이외의 고장)인 경우에는 발생하게 된다.	좌 동
외부회로에의 영향	정상분의 경우와 같다.	정상분의 경우와 같다.
회전자계를 갖는 회전기(동기기, 유도기)에의 영향	역상 회전 자계를 만들기 때문에 이것에 의한 회전기내에 고조파 전압을 유기하거나, 국부 과열을 생기게 하며, 진동을 생기게 하는 등 악영향을 발생시킬 우려가 있다.	비교적 작은 역상 전압이라도 회전기의 역상 임피던스는 비교적 작기 때문에 왼쪽과 같이 역상 전류가 회전기에 흐르게 되어 좌기와 같은 장해를 발생시킬 우려가 있다.

4. 맺 음 말

본고에서는 보호 계전 기술의 기초를 이해하기 위해서 3상 평형 상태에서의 영상 및 역상 회로에 대해서 설명하였다.

대칭좌표법이 보호 계전의 동작 관계 및 불평형 회로의 고장 계산을 검토하는데 매우 큰 도움을 주고 있으며, 표 1과 표 2에서 설명하고 있는 영상 및 역상분의 성질을 잘 이해하게 되면 불평형 고장 사고 해석 및 보호계전기의 동작 관계를 이해하는 데 매우 유리함을 알 수 있다.

보호계전기의 중요성은 사고가 발생하였을 때 만일에 동작하지 않을 경우를 상정한다면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 사고점의 손상이 커질 뿐만 아니라 건전한 부분에도 그 영향이 미치게 되어 정전시키지 않아도

되는 범위까지 전력 공급 중지라는 피해를 주게 된다.

이와 같이 인체의 신경 조직과 비유될 수 있는 보호 계전기 시스템은 산업 현장에서 매우 중요하게 취급되고 있는 반면에 전기 기술자들로 하여금 보호 계전 기술을 습득할 수 있는 교육 여건이 매우 부족한 것으로 지적되고 있다.

그래서, 보호 계전 기술에 대해 깊이 있게 이해하기 위해서는 3상 회로의 이상 상태에 어떠한 성질이 있는지를 파악하는 것이 무엇보다도 중요한 일이다. 이러한 점에 있어서 전기의 성질을 이해하면서 보호 계전기의 동작 원리를 파악한다든가 또는 회로의 이해, 더 나아가서는 실무적인 검토를 하는 것이 보호 계전 기술을 마스터하는데 무엇보다도 빠른 길이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 남재경, 김세동, 보호계전의 기초, 전기저널, No. 5, 대한전기협회, 2002.
- [2] 송길영, 최신 송배전공학, 통일출판사, 2001.
- [3] 백영기 외, 전력계통 보호계전 시스템 기술의 현황과 전망, 대한전기학회 기술조사보고서, 1999.
- [4] 신대승 편저, 보호 계전 시스템 기술, 기다리출판사, 1993.
- [5] 이종률 편저, 보호 계전기 독본, 성안당, 1999.
- [6] 植木久之, 모선과 전력 기기의 보호 계전 시스템, 일본전기서원, 1976.

◇ 저 자 소 개 ◇



김 세 동(金世東)

1956년 3월 3일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업. 2000년 서울시립대 전기전자공학부 대학원 졸업(박사). 한국전력공사(1979~1984) 근무. 한국건설기술연구원(1984~1997.2) 수석연구원 역임, 현재 두원공과대학 전기공학과 교수. 전기설비기술사. 본 학회 학술이사. 관심분야 : 전력설비 진단 및 DSP. 전기설비 최적설계.



남 재 경(南在京)

1957년 2월 18일생. 1990년 2월 대전공업대학교 전기공학과 졸업. 1976. 10~1994. 8 한국전력공사 근무. 1994. 8 ~ 2001. 3 한국전기안전공사 전력설비 검사처 근무. 2001. 3 ~ 현재 (주) 파워투스 기술이사 근무중. 발송배전기술사. 관심분야 : 전력계통 보호제어, 전력기기 절연진단.