

보호계전의 실무 이론

—대칭좌표법에서 3상 각 상과 정상, 영상, 역상과의 관계—

남 재 경 (주)파워 토스 기술이사, 기술사
 김 세 동 두원공과대학 교수/공학박사, 기술사

1. 머리말

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, 실제로는 고장 계산이 매우 복잡해져 대칭좌표법을 빌리지 않고서는 3상 회로의 불평형 문제를 다룰 수 없다. 즉, 비대칭성의 불평형 전압이나 전류를 대칭성의 3성분으로 분해하여 해석하는 대칭좌표법(Method of Symmetrical Coordinate)을 이용하면 보다 용이하게 회로 해석을 할 수 있는 경우가 많다.

대칭좌표법이란 한마디로 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 회로 계산만 하게 되고, 각 성분의 계산이 끝난 다음 이들을 중첩함으로써

써 비로소 불평형 문제의 해가 얻어지게 되는 것이다.

대칭좌표법이 보호 계전의 동작 관계 및 불평형 회로의 고장 계산을 검토하는데 매우 큰 도움을 주고 있으며, 본 고에서는 3상의 각 상에서 정상, 영상 및 역상을 얻을 수 있는 방법과 정상, 영상, 역상에서 3상 각 상을 얻는 방법에 대해서 설명하고자 한다.

2. 3상의 각 상에서 정상, 영상 및 역상을 얻을 수 있는 방법

A상, B상, C상의 3상 회로의 임의의 1점에서 3개의 양은 정상, 영상, 역상의 3개의 양으로 등가적으로 치환할 수 있으며, 다음과 같은 관계가 있다.

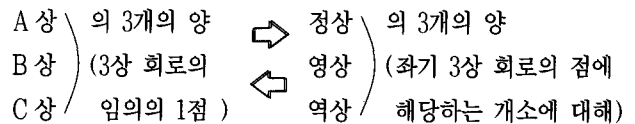
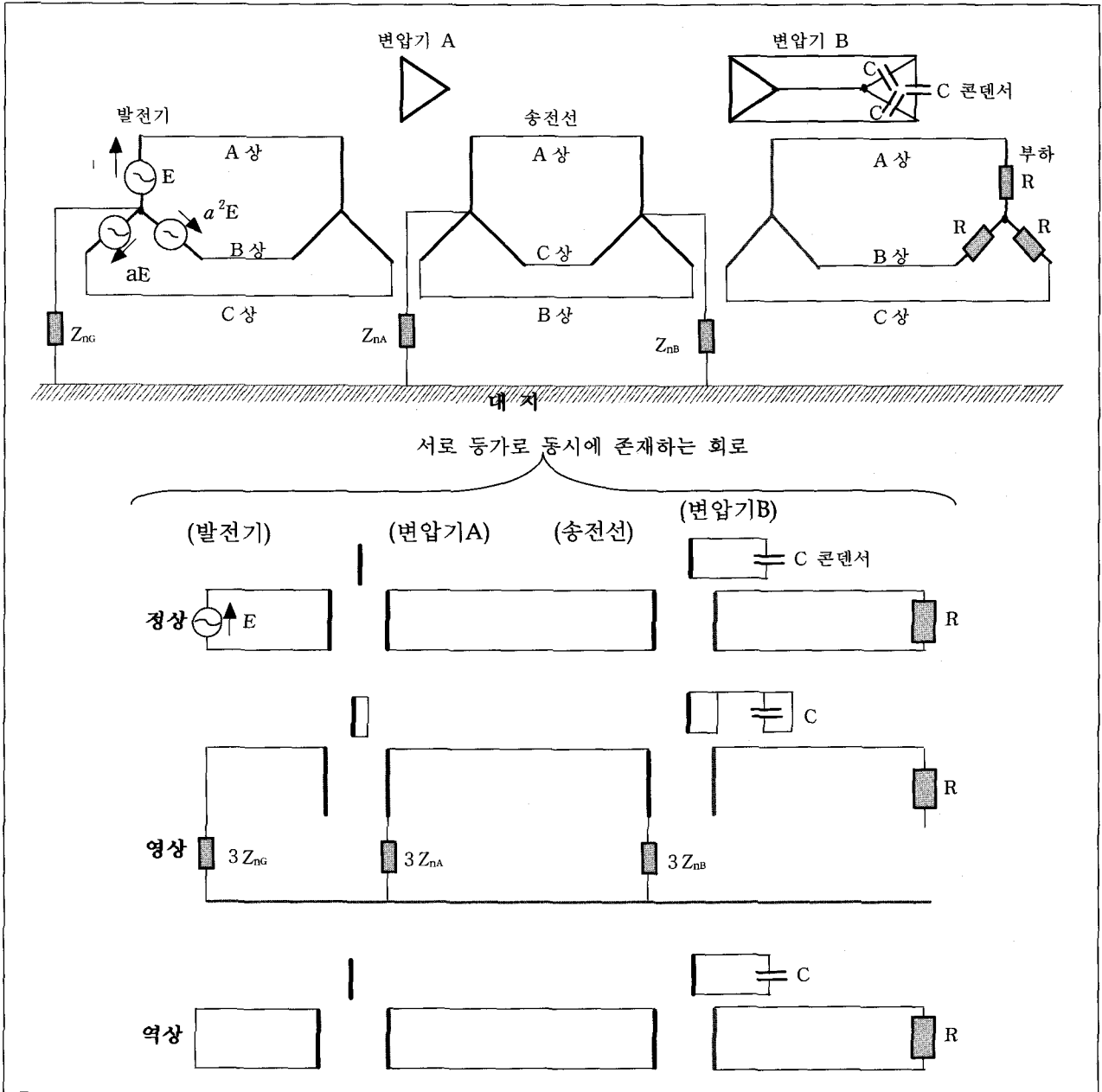


그림 1은 3상 회로와 정상, 영상 및 역상의 대칭분 회로의 관계를 나타낸 것이며, 주어진 3상 회로에서 A상, B상, C상의 3상 회로에 대응하는 정상, 영상 및 역상 3개



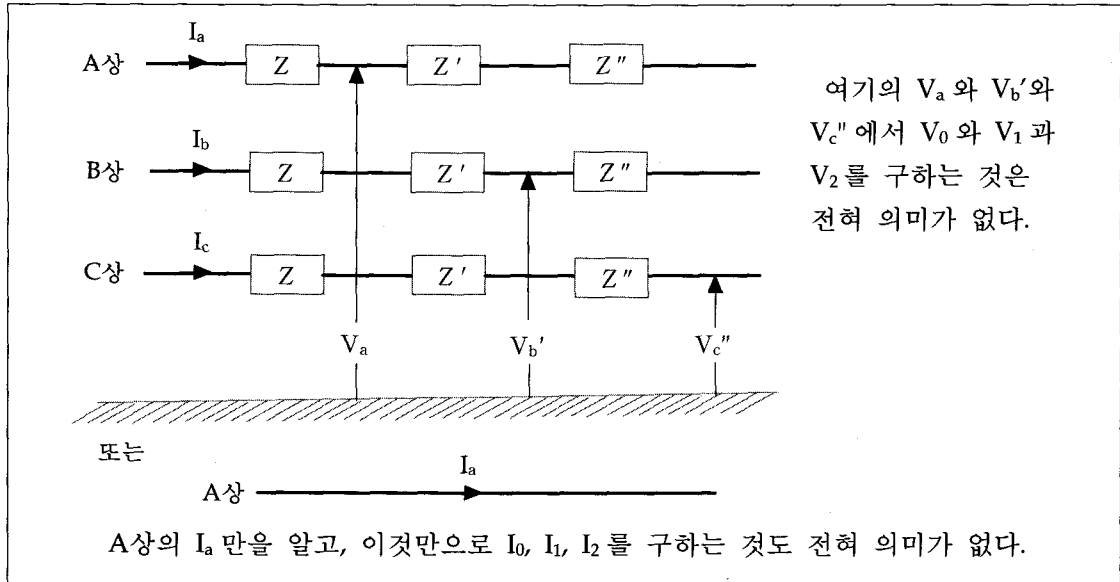
〈그림 1〉 3상 회로와 대칭분회로의 관계

의 회로가 등가적으로 존재한다는 것을 알 수 있다.

여기서 말하는 각 상의 양은 어느 점의 양이라도 상관 없으나, 반드시 A상, B상, C상, 정상, 영상 및 역상의 6

개의 양은 회로상의 동일점에서 논하고 있다.

여기서, 대칭좌표법을 이용하는 경우에는 다음의 사항을 고려해야 한다.



〈그림 2〉 대칭좌표법으로 변환할 때의 주의할 예

- 1) (A상, B상, C상)과 (정상, 영상, 역상)의 관계는 1조대 1조로 대응해서 취급한다.
예를 들어, A상의 I_a 만을 알고, 이것만으로 I_0, I_1, I_2 를 구하는 것도 전혀 의미가 없다.
- 2) 취급하는 3상의 양은 일반적인 회로와 동일 지점의 것이어야만 한다.

그림 2에서 보는 바와 같이 회로의 내부에서 위치가 떨어진 각 상의 값을 뒤섞는 것은 아주 불합리하다. 예를 들어, V_a 와 $V_{b'}$ 와 $V_{c''}$ 에서 V_0 와 V_1 과 V_2 를 구하는 것은 전혀 의미가 없다.

가. 3상 각 상에서 정상을 구하는 방법

A상, B상, C상이 정상과 영상과 역상으로 구성되어 있다고 하면, 이 주어진 A상, B상 및 C상의 3개의 양에서 정상분을 구하는 방법을 설명한다.

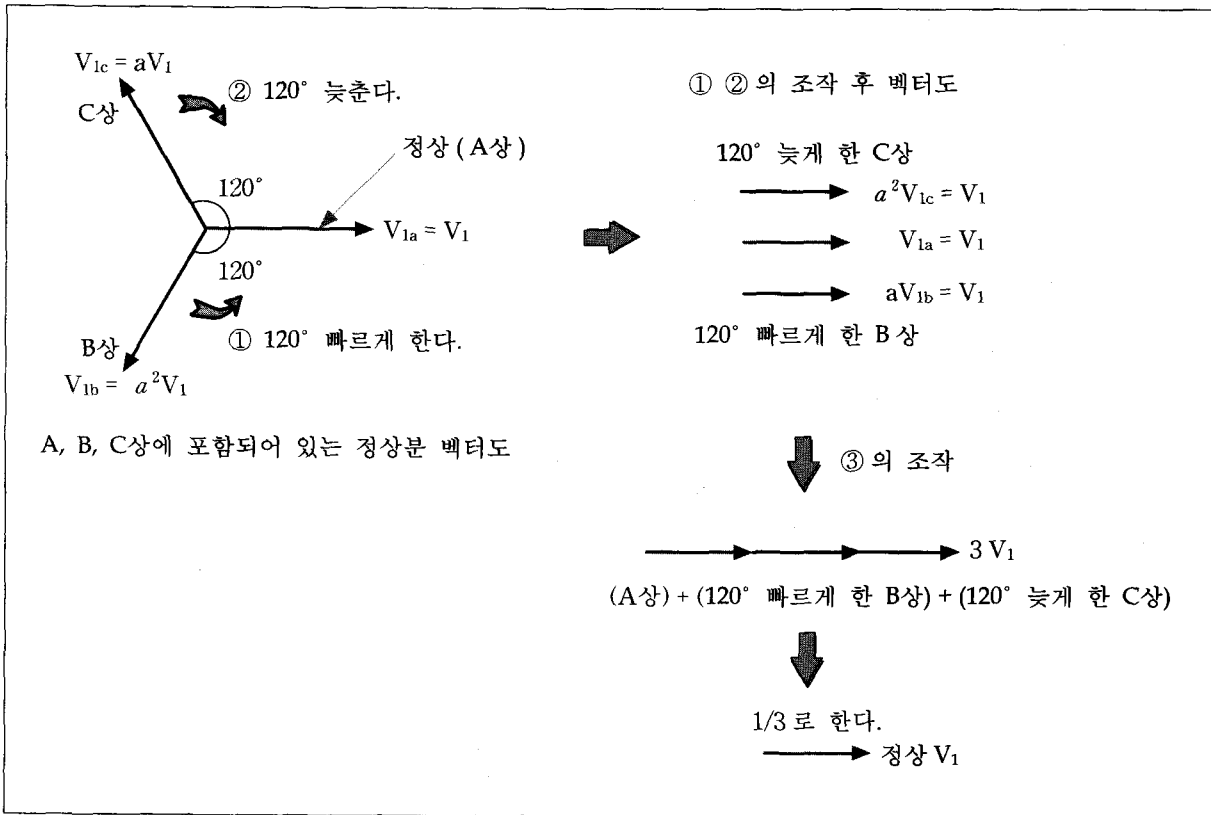
그림 3은 A상, B상 및 C상으로부터 정상분을 구하는 방법을 보여주고 있다. 정상분 중 A상(제1상)에 대해, B상(제2상)은 120° 늦은 위상이며, C상(제3상)은 다시

120° 늦은 위상이기 때문에 다음의 절차를 생각한다.

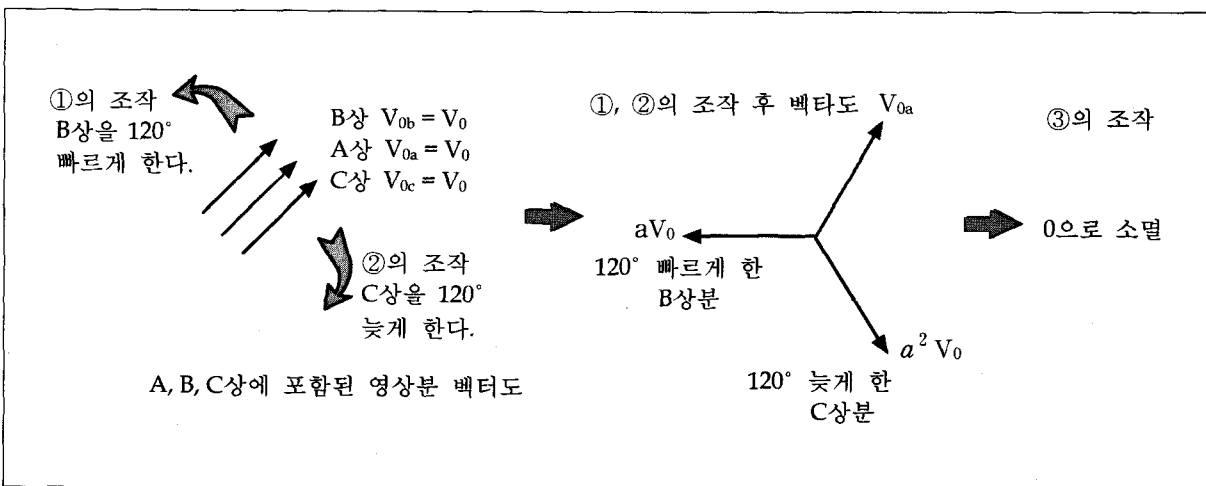
- ① B상을 120° 빠르게 하여 정상분의 A상과 정상분의 B상과를 동위상으로 취급한다.
- ② C상을 240° 빠르게 해서(120° 늦게 해도 같다) 정상분의 A상과 정상분의 C상과를 동위상으로 취급한다.
- ③ 이들을 동상으로 취급한 A상, B상, C상을 서로 합치면 정상의 3배를 얻을 수 있기 때문에 이것을 $1/3$ 로 한다. 그렇게 하여 A상, B상 및 C상으로부터 구할 수 있을 것 같다.

이 경우 ①, ② 및 ③을 조작했을 때 부드럽게 영상과 역상이 소멸해 주면 그림 4와 같이 된다. 여기에서 순수하게 정상분을 구할 수 있게 되는 것이다.

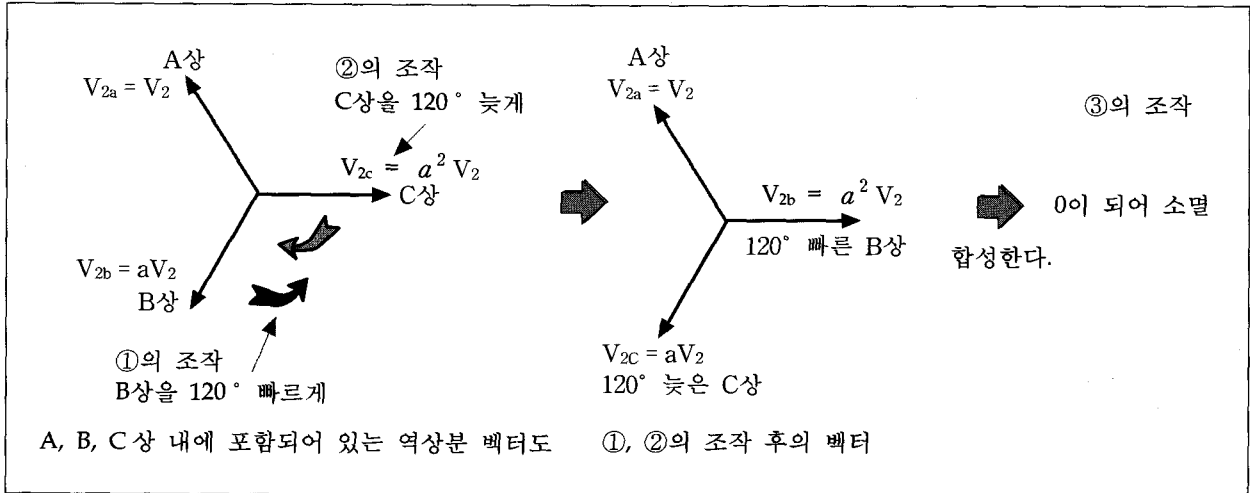
그러면, 그림 4에서 ①, ② 및 ③의 조작으로 영상은 어떻게 되는지를 검토해 보자. 이것은 그림에서 보는 바와 같이 ①, ②의 조작으로 영상분 중 A상에 대해, B상은 120° 빠르고, C상은 120° 늦은 소위 역상과 같은 관계로 된다.



<그림 3> A, B, C상으로부터 정상분을 구하는 방법



<그림 4> 영상성분이 정상을 구해내는 과정에서 소멸되는 이유



〈그림 5〉 역상성분이 정상을 구하는 과정에서 소멸되는 과정

그래서 ③의 조작으로 이들이 합성되기 때문에 벡터 합이 영이 되어 소멸해 버린다. 즉, 영상은 정상을 구하는 ①, ② 및 ③의 조작으로 소멸된 것이다.

역상에 대해서도 ①, ② 및 ③의 조작으로 소멸됨을 쉽게 알 수 있다. 그림 5는 역상 성분이 정상을 구하는 과정에서 소멸되는 과정을 나타내고 있다.

따라서, 정상은 식 (1)과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{정상} = (\text{A상} + 120^\circ \text{ 빠르게 한 B상} + 120^\circ \text{ 늦게 한 C상}) \times \frac{1}{3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \\ \text{단, } a &= \epsilon^{j120} = 1 \angle 120^\circ \\ I_1 &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \\ a^2 &= \epsilon^{j240} = 1 \angle 240^\circ \\ &= \epsilon^{-j120} = 1 \angle -120^\circ \end{aligned}$$

나. 3상 각 상에서 영상을 구하는 방법

가항에서 설명한 정상을 구하는 방법과 같은 방법으로 영상만 남고 정상과 역상을 소멸하는 방법을 생각하면 된다. 영상은 영상분의 A상이 되는 것, B상으로 되는 것 및

C상으로 되는 것, 어느 것이나 동상으로 그림 6과 같이 그대로 각 상을 합성하여 1/3로 하면 되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 정상, 역상은 그림 6에서 ④의 방법으로 소멸됨을 알 수 있다. 따라서, 영상은 식 (2)와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{영상} = (\text{A상} + \text{B상} + \text{C상}) \times \frac{1}{3} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \\ I_0 &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \end{aligned}$$

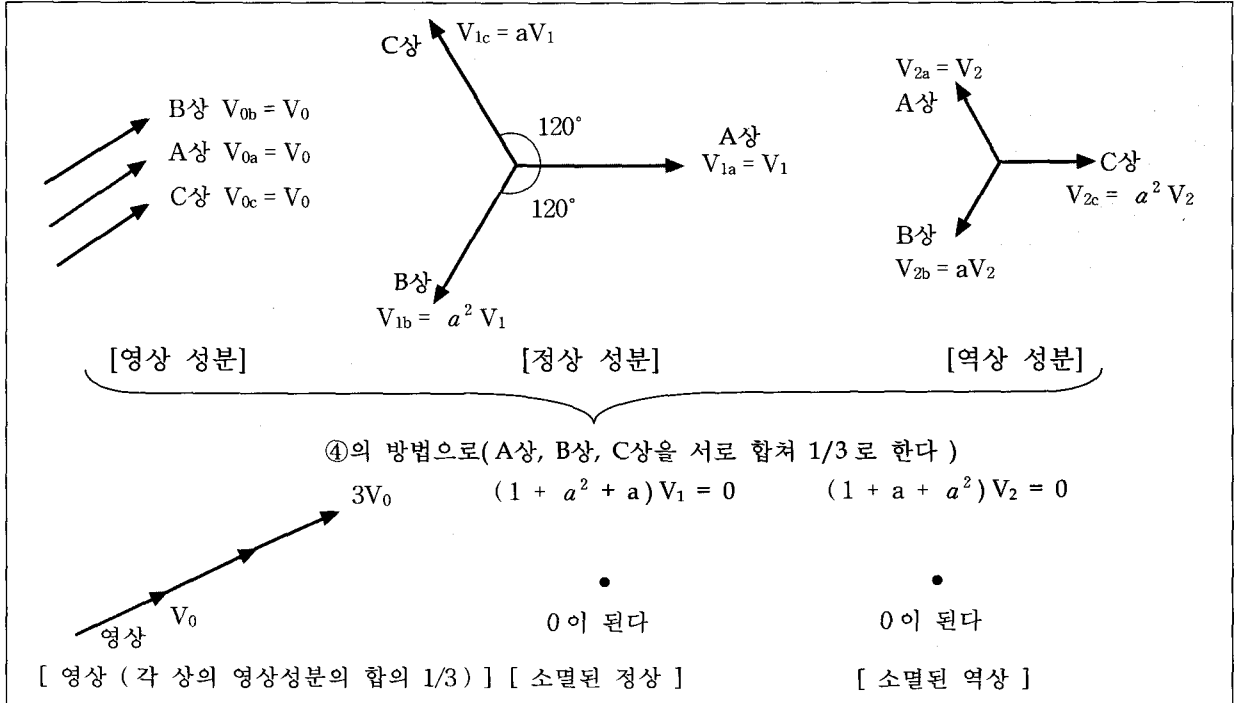
다. 3상 각 상에서 역상을 구하는 방법

역상을 구하는 방법도 가항에서 설명한 정상을 구하는 방법과 같은 방법으로 역상 성분의 위상 관계를 고려하여 그림 7에서 보는 바와 같이 쉽게 이해할 수 있다.

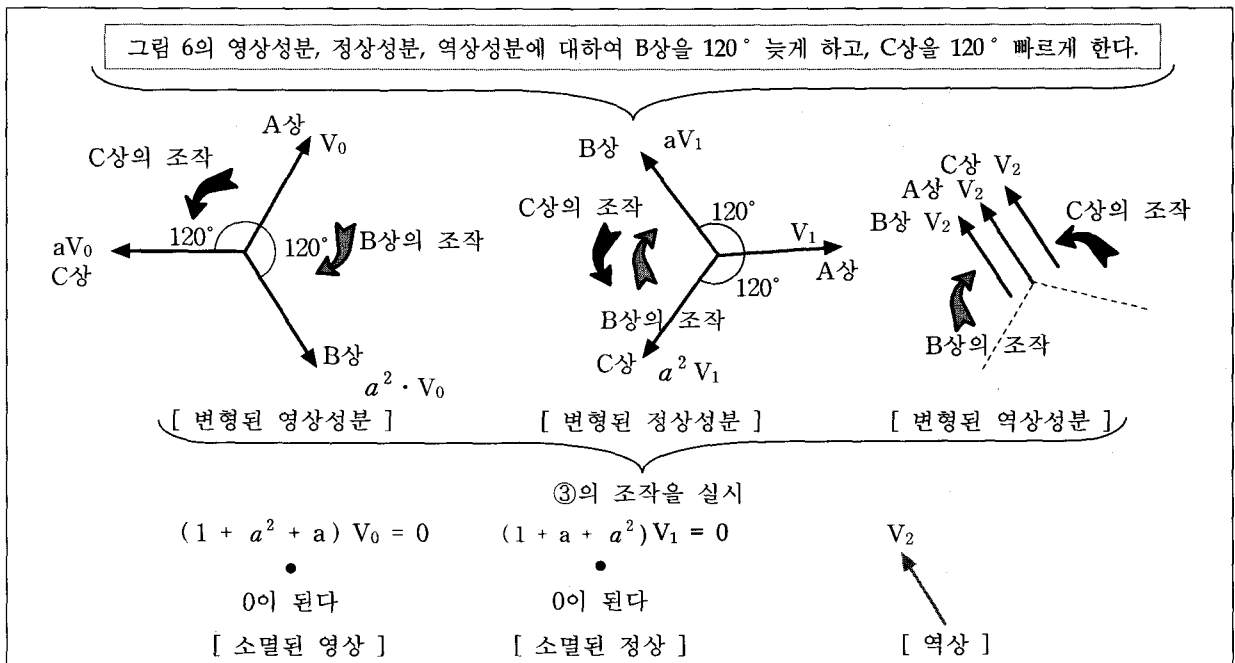
따라서, 역상은 식 (3)과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{역상} = (\text{A상} + 120^\circ \text{ 늦게 한 B상} + 120^\circ \text{ 빠르게 한 C상}) \times \frac{1}{3} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \\ I_2 &= \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \end{aligned}$$



〈그림 6〉 영상 성분을 구하는 방법



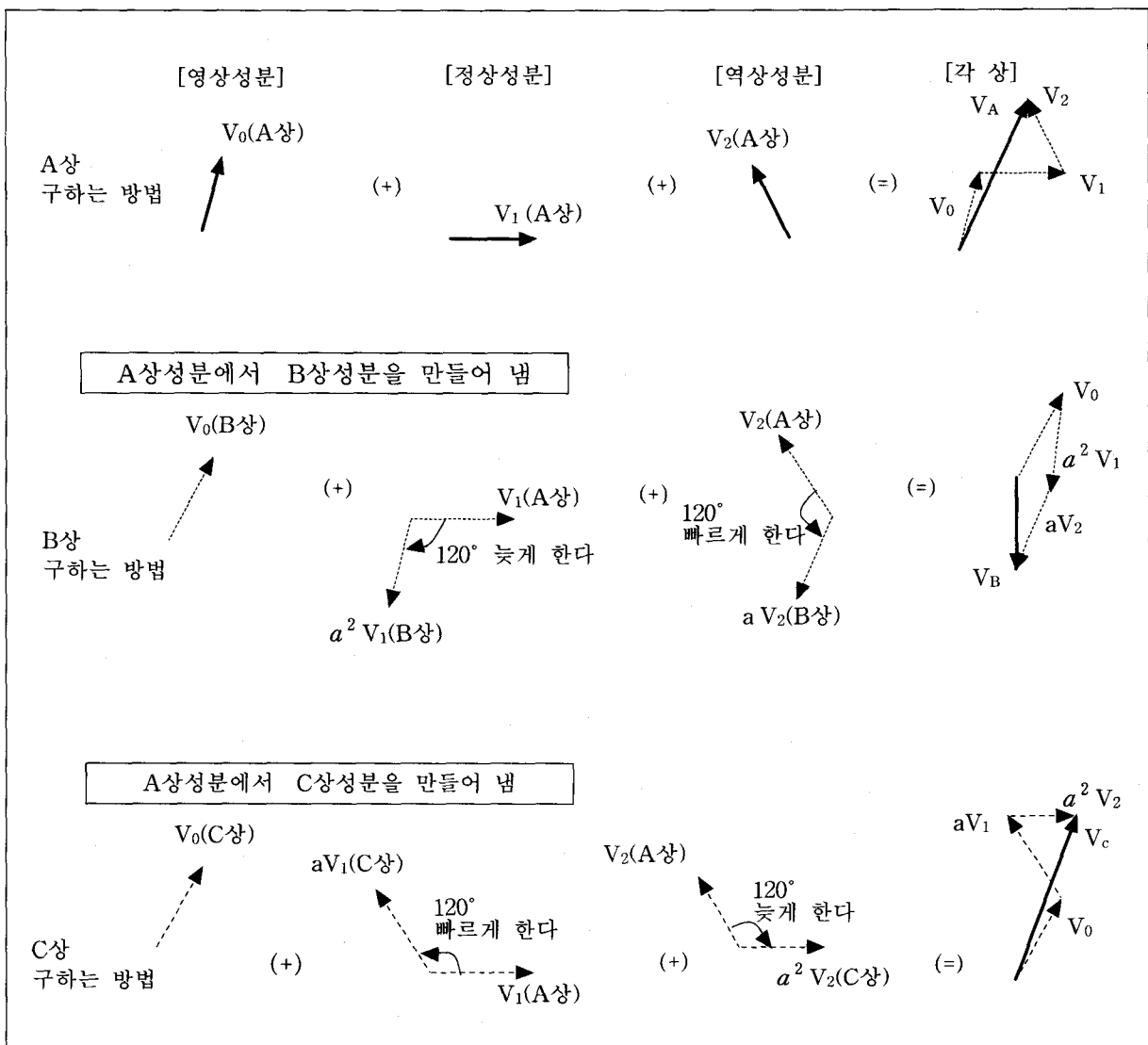
〈그림 7〉 역상만을 구하는 방법

3. 정상, 영상, 역상에서 3상 각 상을 얻는 방법

세 상의 공통 성분인 V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} 를 영상분(零相分)이라 하며, V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} 은 원래의 전압(불평형 전압)과 상순이 같으므로 정상분(正相分), V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} 는 원래

의 전압과 상순이 반대이므로 역상분(逆相分)이라 한다. 그리고, 이들 영상분, 정상분, 역상분을 총칭하여 대칭분이라고 한다.

특히, 세 전압 V_a, V_b, V_c 의 합이 0이 되는 경우에는 위의 식으로부터 영상분은 0이 되며, V_a, V_b, V_c 가 상순이 a, b, c 인 평형 전압의 경우 $V_b = a^2 V_a, V_c = a V_a$ 를



〈그림 8〉 대칭분에서 각 상을 구해내는 방법

식(1), (2), (3)에 대입해 보면, $V_{a0}=0$, $V_{a1}=V_a$, $V_{a2}=0$ 이 됨을 알 수 있다.

이것은 평형 전압에는 영상분과 역상분의 전압이 포함되지 않음을 의미한다. 한 상의 세 성분이 결정되면 다른 상의 성분도 결정되므로 통상 불평형 전압이나 전류의 대칭분이라 하면 한 상에 대한 대칭분을 의미하기도 한다.

그림 8은 대칭분에서 각 상을 구하는 방법을 나타낸 것이며, 정상(A상)을 120° 늦게 하면 되고, 역상에서도 B상은 A상보다 120° 빠르기 때문에 역상(A상)을 120° 늦게 하면 된다. 이렇게 하여 그림 8에서 보는 바와 같이 A상에서 B상을 만들어 내고, A상에서 C상을 만들어 낸다.

따라서, 정상, 영상, 역상의 관계에서 A상, B상, C상의 관계를 다음과 같이 구한다.

$$A상 = (영상+정상+역상) \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} V_a &= V_0 + V_1 + V_2 \\ I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \end{aligned}$$

$$B상 = (영상+120^\circ \text{ 늦게 한 정상}+120^\circ \text{ 빠르게 한 역상}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} V_b &= V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \\ I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \end{aligned}$$

$$C상 = (영상+120^\circ \text{ 빠르게 한 정상}+120^\circ \text{ 늦게 한 역상}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} V_c &= V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \\ I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned}$$

대칭좌표법에 의한 계산에서는 통상 행렬이 많이 사용되므로 식 (1)~(6)을 행렬로 표시하면 식 (7), (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

〈참고문헌〉

1. 남재경, 김세동, 보호계전의 기초(고장사고시 전류의 흐름 관계), 전기저널, 통권 298호, No. 10, 대한전기협회, 2001
2. 남재경, 김세동, 보호계전의 기초(대칭좌표법에서 정상 회로의 이용 관계), 전기저널, 통권 303호, No. 3, 대한전기협회, 2002
3. 남재경, 김세동, 보호계전의 기초(대칭좌표법에서 영상 및 역상 회로의 이용 관계), 전기저널, 통권 305호, No. 5, 대한전기협회, 2002
4. 송길영, 최신 송배전공학, 동일출판사, 2001
5. 이덕출 외, 회로 이론, 동일출판사, 2002
6. 백영기 외, 전력계통 보호계전 시스템 기술의 현황과 전망, 대한전기학회 기술조사보고서, 1999
7. 植木久之, 모선과 전력 기기의 보호계전 시스템, 일본전기서원, 1976