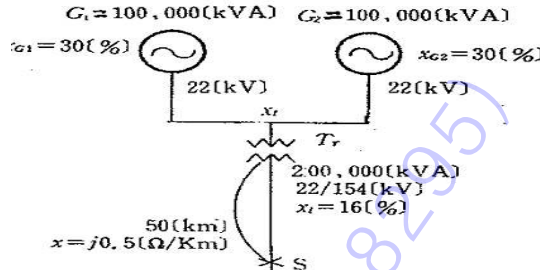
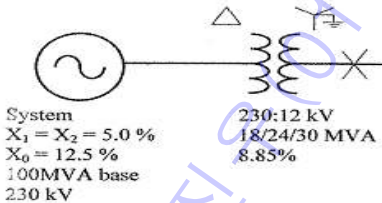
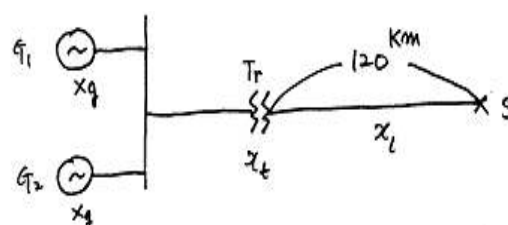
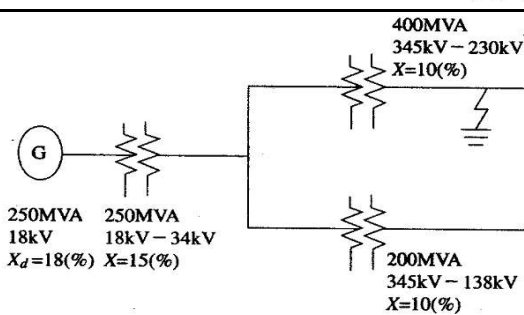
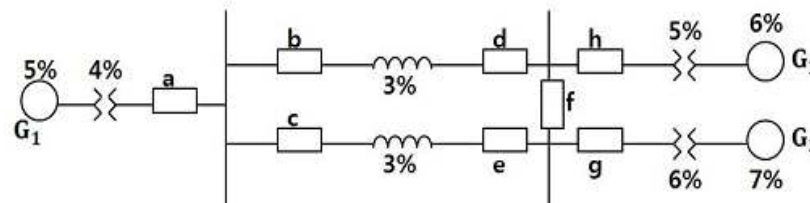


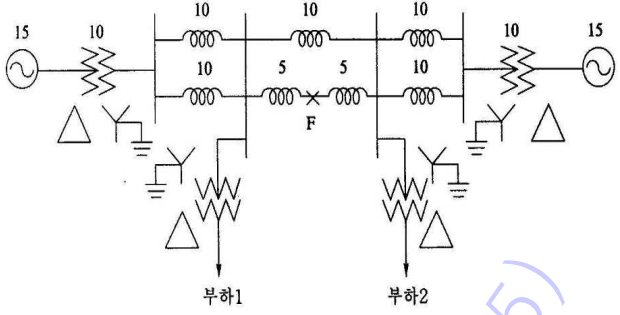
## 제7장 고장계산

| 분류   | no. | 문제                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 회수 | 배점 |
|------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 평형고장 | 1   | 어느 발전소에서 합성임피던스는 0.4% (100MVA기준)이다. 이곳에 설치될 차단기 용량(MVA)는 얼마인가                                                                                                                                                                                                                                                    | 59 | 20 |
| 평형고장 | 2   | 그림과 같은 송전선 S점의 3상 단락전류를 다음 방법으로 각각 계산하시오.<br>(1) $\Omega$ 법 (2) %법<br>                                                                                                                                                         | 90 | 25 |
| 평형고장 | 3   | 154/22.9 KV, 50MVA 3상 변압기의 단위법(per unit) 임피던스가 0.15일 때 2차측으로 환산한 실제 리액턴스[ $\Omega$ ] 값과, 정격운전중 2차측 단자에서 발생한 3상 단락전류의 크기(A)를 구하라.                                                                                                                                                                                 | 44 | 15 |
| 평형고장 | 4   | 계통의 고장 계산에서 기준전력을 100[MVA]로 할때 22.9[kV]와 154[kV]의 기준전류, 기준 임피던스를 구하시오.                                                                                                                                                                                                                                           | 84 | 10 |
| 평형고장 | 5   | 아래 계통에서, 그림과 같이 변압기 출력단에 삼상 단락고장이 발생하였다. 고장전류를 구하시오.<br>                                                                                                                                                                       | 92 | 10 |
| 평형고장 | 6   | 다음 그림에서 S점에서 3상단락이 발생하였다. 이때의 3상 단락전류 및 3상 단락 용량을 계산하시오.<br>단, G1, G2 : 30,000[kVA] 22[kV] 리액턴스 30[%]<br>변압기 Tr는 60,000[kVA] 22/154[kV] 리액턴스 10[%]<br>송전선 Tr, S간은 120[km]로 하고 선로임피던스는 $Z=0+i0.5[\Omega/\text{km}]$ 라 한다.<br> | 71 | 25 |
| 평형고장 | 7   | 그림과 같은 전력계통이 있다.<br>1) 전력 Base를 100(MVA)로 본 PU계통도를 그려라<br>2) 230KV측에 3상 단락고장이 발생하였다. 18KV 및 345KV측 선로에 흐르는 고장 전류의 PU 및 (A)값을 구하라.<br>                                                                                        | 59 | 25 |
| 평형고장 | 8   | 다음 그림과 같은 전력계통에서 차단기 a와 차단기 b의 차단용량[MVA]를 각각 구하시오. (단, 차단기 f는 개방 되어 있는 것으로 가정하고, 주어진 % 임피던스는 20[MVA] 기준으로 환산한 값이다.)<br>                                                                                                      | 95 | 25 |

| 분류     | no. | 문제                                                                                                                                                                                                                                                     | 회수 | 배점 |
|--------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 평형고장   | 9   | <p>아래 그림의 전력계통에서, 차단기의 비대칭계수(1.2적용)와 표준용량을 고려한, 차단기 a와 b의 최소차단용량을 각각 구하시오. 여기서, %Z는 100[MVA] 기준이다.</p> <p>단, c점의 한다.</p>                                                                                                                               | 78 | 25 |
| 평형고장   | 10  | <p>그림과 같은 전력계통에서 차단기 B의 차단용량[MVA]은 얼마인가? 단, 그림의 각 부분은 % 임피던스이고 모든 값은 100[MVA]로 환산한 값이다.</p>                                                                                                                                                            | 71 | 25 |
| 평형고장   | 11  | <p>그림은 발전기, 변압기, 송전선로 및 차단기로 구성된 전력계통이다. F점에서 3상 단락사고가 발생한 경우, 다음 물음에 답하시오.</p> <p>(단, 모선전압은 154[kV]이고 각 부분의 설비용량과 임피던스는 그림과 같다)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) F점에 유입되는 고장전류[kA]를 구하시오.</li> <li>2) 차단기 C의 차단용량[MVA]를 구하시오.</li> </ol> | 92 | 25 |
| 대칭좌표법  | 12  | 전력 계통의 고장계산에서 대칭좌표법은 어떠한 경우에 이용하고, 각 성분에 대한 설명 및 물리적 특성을 설명하시오.                                                                                                                                                                                        | 84 | 25 |
| 대칭좌표법  | 13  | 대칭좌표법의 기본개념을 간단히 설명하시오                                                                                                                                                                                                                                 | 59 | 20 |
| 발전기기본식 | 14  | 3상 교류발전기 기본식을 유도하시오.                                                                                                                                                                                                                                   | 62 | 25 |
| 발전기기본식 | 15  | 발전기 기본식을 쓰고 불평형고장 계산시 적용과정을 설명하시오.                                                                                                                                                                                                                     | 60 | 25 |
| 발전기기본식 | 16  | 발전기의 기본식을 밝히고 이를 계통사고해석에 적용되는 방법을 설명하시오.                                                                                                                                                                                                               | 56 | 25 |
| 대칭좌표법  | 17  | <p>그림과 같은 3상 교류발전기의 Sequence Network를 그리시오.</p>                                                                                                                                                                                                        | 74 | 10 |
| 1선지락   | 18  | <p>다음 그림에서 무부하 발전기 α상에 1선 지락고장이 발생한 경우, 고장상의 지락 전류와 건전상의 전압식을 유도하시오.</p>                                                                                                                                                                               | 75 | 25 |

| 분류    | no. | 문제                                                                                                                                                                                                                                                               | 회수 | 배점 |
|-------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 1선지락  | 19  | <p>다음 그림과 같은 발전기에서 a상이 저항 <math>R[\Omega]</math>을 통하여 지락이 된 경우의 a상의 전압 <math>V_a[V]</math> 전류 <math>I_a[A]</math>를 구하시오.</p> <p>이 때, 발전기의 영상, 정상, 역상 임피던스는 각각 <math>Z_0, Z_1, Z_2[\Omega]</math>이다.</p>                                                          | 72 | 25 |
| 선간단락  | 20  | <p>그림과 같은 3상 교류발전기에서 2상 단락이 발생할 경우 단락전류와 건전상의 전압을 구하라.</p>                                                                                                                                                                                                       | 61 | 25 |
| 선간단락  | 21  | <p>아래 그림과 같이 3상 교류발전기의 b상, c상이 임피던스를 통해 단락한 경우, 각 상의 전압과 단락전류를 구하시오</p>                                                                                                                                                                                          | 80 | 25 |
| 선간단락  | 22  | 3상교류발전기에서 2상 단락시 단락단자(b,c)의 전압은 개방단자(a상)전압의 얼마로 되겠는가                                                                                                                                                                                                             | 57 | 25 |
| 선간단락  | 23  | 발전기에서 b, c상이 선간 단락되었을 때 단락단자의 전압이 개방단자 전압의 1/2로 됨을 증명하시오.                                                                                                                                                                                                        | 87 | 25 |
| 선간단락  | 24  | 발전기 단자에서 2상 단락사고 전류의 크기가 3상 단락사고 전류크기의 86.6%가 됨을 증명하시오.                                                                                                                                                                                                          | 52 | 20 |
| 선간단락  | 25  | 무부하 3상 교류 발전기에서 선간단락이 발생한 경우 단락전류와 건전상 전압을 구하고, 선간단락 전류가 3상 단락전류의 86.6% 됨을 기술하시오.                                                                                                                                                                                | 74 | 25 |
| 1선단선  | 26  | <p>발전기가 송전선을 거쳐 무한대 모선에 접속되어 있는 아래의 전력계통에서 모선 입구의 P점에 설치된 차단기의 1상만이 개방되었다. 영상, 정상, 역상 임피던스가 동일한 값일 때 대칭좌표법을 이용하여 회복전압을 구하시오. (단, 발전기의 내부 유기 상전압은 <math>E_s</math>, 수전단 상전압 <math>E_R</math>, 이 P점에서 송전단을 본 영상, 정상, 역상 임피던스는 각각 <math>Z_0, Z_1, Z_2</math>이다)</p> | 69 | 25 |
| 대칭분회로 | 27  | 전력계통 고장시 대칭분 회로 구성 방법을 설명하시오.                                                                                                                                                                                                                                    | 56 | 25 |
| 대칭분회로 | 28  | <p>그림과 같은 회로의 영상, 정상 및 역상임피던스를 구하시오.</p>                                                                                                                                                                                                                         | 84 | 10 |

| 분류         | no. | 문제                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 회수 | 배점 |
|------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 고장전류<br>방향 | 29  | <p>아래와 같은 세가지 경우의 회로에 대해 1선지락고장이 발생하였을 경우, 고장 전류의 흐름을 아래와 같은 그림을 그려서 그 위에 나타내시오. (단, 방향은 화살표로, 크기는 화살표의 갯수로 나타내시오) 또한 각각의 경우에 대하여 설명하시오.</p> <p>◇ Case : 1                      ◇ 일러두기    ⊕ : 발전기</p> <p>◇ Case : 2</p> <p>◇ Case : 3</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 89 | 25 |
| 1선지락       | 30  | <p>그림과 같은 22.9.kV 배전선로에서 C점으로부터 2km 지점에 고장저항 <math>5[\Omega]</math>의 1선지락 고장이 발생하였을 경우 고장 전류를 구하시오.</p> <p>단, 선로의 단위길이당 임피던스는 다음과 같다. 또한, 구간별 선로길이는 0-A:2km, A-B:4km, A-C: 2km, C-D:4km, C-E:2km이다.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 62 | 25 |
| 1선지락       | 31  | <p>그림과 같은 전력계통에서 선로의 F점에서 지락이 발생했을 경우 고장점의 지락 전류를 구하시오.</p> <p>(단, 그림에 표시된 수치는 정상분에 대한 %리액턴스를 나타내며, 역상 리액턴스는 정상리액턴스와 같고, 영상리액턴스는 정상리액턴스의 3배와 같다고 가정한다. 또한 부하측으로부터 지락전류 유입은 없는 것으로 가정한다.)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 86 | 25 |
| 1선지락       | 32  | <p>154KV 1회선 거리 100KM인 송전선로의 중앙에서 1선지락고장이 발생하였을때 1선 지락전류의 크기를 구하라.</p> <p>발전기                      200MVA, <math>X_{1g} = X_{2g} = 20\%</math> (자기용량기준)<br/> 발전기용 변압기        200MVA, <math>X_{1t} = X_{2t} = 10\%</math> (자기요량기준) 직접접지<br/> 동기전동기              100MVA, <math>X_{1m} = X_{2m} = 40\%</math><br/> 동기전동기용 변압기 100MVA, <math>X_{1t} = X_{2t} = 10\%</math> 저항접지 (<math>R=2.3716\text{ohm}</math>)<br/> 선로작용인덕턴스 = <math>5/\pi \text{mH/KM}</math>, 선로의 <math>Z_1 = Z_2</math><br/> 선로의 영상임피던스는 정상임피던스의 2배 저항과 정전용량은 무시한다.<br/> 각 변압기의 영상임피던스는 정상임피던스와 같다고 본다.</p> | 50 | 25 |

| 분류   | no. | 문제                                                                                                                                                                                                                                                             | 회수 | 배점 |
|------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 1선지락 | 33  | <p>다음과 같은 회로에서 고장점 F에서 1선 지락 전류를 계산하시오. 단, 회로에 표시된 수치는 정상분에 대한 %리액턴스를 나타내며 역상 리액턴스는 정상 리액턴스와 같고 영상리액턴스는 정상리액턴스의 3배와 같다고 가정한다. 부하임피던스는 대단히 커서 <math>\infty</math>로 가정한다.</p>  | 61 | 25 |

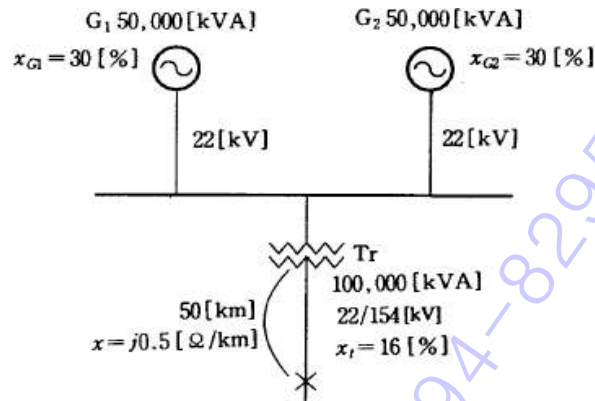
[어느 발전소에서 합성임피던스는 0.4% (100MVA기준)이다.

이곳에 설치될 차단기 용량(MVA)는 얼마인가?]

$$P_s = 100 P_N / \%Z = 100 * 100 / 0.4 = 25,000[\text{MVA}]$$

[그림과 같은 송전선 S점의 3상 단락전류를 다음 방법으로 각각 계산하시오.]

(1) Ω법 (2) %법



1) Ω법에 의한 계산

선로측 전압 154KV에 맞추어서 발전기 및 변압기 리액턴스를 [Ω]값으로 산출한다.

$$\%Z = \frac{Z \cdot P}{10 V^2} \quad \text{식을 이용하여 발전기 리액턴스 산출}$$

$$x_{G1} = x_{G2} = \frac{10 \times (154)^2 \times 30}{50,000} = 142.3[\Omega]$$

발전기 2대가 병렬이므로 합성 리액턴스는  $x_G = \frac{142.3}{2} = 71.15[\Omega]$

변압기 리액턴스는  $x_{tr} = \frac{10 \times (154)^2 \times 16}{100,000} = 37.95[\Omega]$

선로 리액턴스는  $x_l = 0.5 \times 50 = 25[\Omega]$

고장점에서 전원측을 본 합성 리액턴스는  $x = x_G + x_{tr} + x_l$   
 $= 71.15 + 37.95 + 25 = 134.1[\Omega]$

따라서 단락전류  $I_s$ 는  $I_s = \frac{V}{\sqrt{3}x} = \frac{154,000}{\sqrt{3} \times 134.1} = 663.1[\text{A}]$

2) %Z법에 의한 계산

기준용량으로 100,000KVA를 선정한다.

발전기의 환산 %Z는  $\%x_{G1} = 30 \times \frac{100,000}{50,000} = 60[\%]$

발전기 2대가 병렬이므로 합성 %Z는  $\%x_G = \frac{60}{2} = 30[\%]$

변압기 %Z는 변함이 없으므로 16%

선로의 %Z는  $\%x_l = \frac{Z \cdot P}{10 V^2} = \frac{(0.5 \times 50) \times 100,000}{10 \times (154)^2} = 10.54[\%]$

고장점에서 전원측을 본 전 %Z는  $\%x = \%x_G + \%x_{tr} + \%x_l$   
 $= 30 + 16 + 10.54 = 56.54[\%]$

단락 전류는  $I_s = I_n \times \frac{100}{\%x} = \frac{100,000}{\sqrt{3} \cdot 154} \times \frac{100}{56.54} = 663.1[\text{A}]$

[154/22.9 KV, 50MVA 3상 변압기의 단위법(per unit) 임피던스가 0.2일 때 2차측으로  
환산한 실제 리액턴스[Ω] 값과, 정격운전중 2차측 단자에서 발생한 3상 단락  
전류의 크기(A)를 구하라.]

$$Z = \frac{10V^2 \times \%Z}{P} [\Omega]$$

공식에 의거

$$22KV측 환산 임피던스는 \quad Z = \frac{10(22.9)^2 \times 20}{50,000} = 2.098 [\Omega]$$

단위법으로 0.2 PU는 %Z법으로 20%임

$$3상 단락 전류는 \quad I_s = \frac{V}{\sqrt{3}Z} = \frac{22900}{\sqrt{3} \times 2.098} = 6302.05 [A]$$

[계통의 고장 계산에서 기준전력을 100[MVA]로 할때 22.9[kV]와 154[kV]의  
기준전류, 기준 임피이던스를 구하시오.]

## 1. 22.9KV 기준

$$1) \text{ 기준 전류 } I_N = P_N / \sqrt{3} * V_N = 100 * 10^6 / (\sqrt{3} * 22.9 * 10^3) = 2,521 [A]$$

$$2) \text{ 기준 임피던스 } Z = V^2 / P_N = (22.9 * 10^3)^2 / 100 * 10^6 = 5.2441 [\Omega]$$

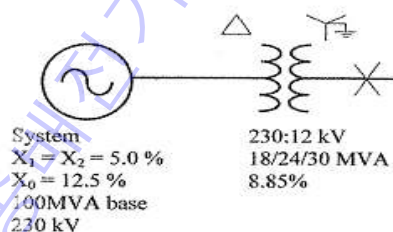
## 2. 154KV 기준

$$1) \text{ 기준 전류 } I_N = P_N / \sqrt{3} * V_N = 100 * 10^6 / (\sqrt{3} * 154 * 10^3) = 375 [A]$$

$$2) \text{ 기준 임피던스 } Z = V^2 / P_N = (154 * 10^3)^2 / 100 * 10^6 = 237.16 [\Omega]$$

이로부터 기준전류는 1/변압비에 비례하고, 기준 임피던스는 변압비의 2승에 비례한다.

아래 계통에서, 그림과 같이 변압기 출력단에 삼상 단락고장이 발생하였다.  
고장전류를 구하시오.



1. 3상 단락 고장이므로 발전기에 표시된 임피던스중 정상임피던스(5%)를 사용한다.

2. 변압기의 18/24/30MVA의 의미

345KV 변압기 명판에 정격용량이 유입자냉(OA)/송유풍냉(FOA<sub>1</sub>)/송유풍냉(FOA<sub>2</sub>),

100/133.33/166.67로 표기된 것은 냉각방식에따라 변압기 용량이 1/3씩 증가를 의미함

154KV 변압기 명판에 정격용량이 유입자냉(OA)/유입풍냉(FA),

30/40 또는 45/60로 표기된 것은 냉각방식에따라 변압기 용량이 1/3씩 증가를 의미함

그러므로 변압기 용량은 30MVA로 보고 계산하여야 한다.

$$\%Z_T' = 8.85 \times (100/30) = 29.5\%$$

$$\text{합성 \%임피던스} = 5 + 29.5 = 34.5\%$$

변압기 2차측 전압이 12KV이므로 기준 전류를 산출하면

$$I_N = 100 \times 10^6 / (\sqrt{3} \times 12 \times 10^3) = 4,811 [\text{A}]$$

$$\text{단락 전류 } I_s = 100 \times I_N / \%Z = 100 \times 4,811 / 34.5 = 13,945 [\text{A}]$$

다음 그림에서 S점에서 3상단락이 발생하였다. 이때의 3상 단락전류 및 3상단락 용량을 계산하시오.

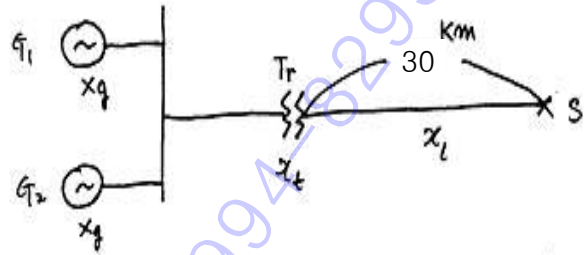
단, G1, G2 : 20,000[kVA] 6.6[kV] 리액턴스

20[%], 변압기 Tr는 40,000[kVA]

6.6/66[kV] 리액턴스 8[%]

송전선 Tr, S간은 30[km]로 하고 선로

임피던스는  $Z=0+j0.6[\Omega/\text{km}]$ 라 한다.



옴법과 %Z법으로 계산 할 수 있으며 본 문제는 옴법으로 계산한다.

1. 발전기의 리액턴스를 66KV 기준으로 환산하면

$$Z_{G1} = \frac{10 V^2 \cdot \%Z}{P} = \frac{10 \times 66^2 \times 20}{20,000} = 43.56 [\Omega]$$

발전기 2대가 병렬이므로 합성 리액턴스는

$$Z_G = \frac{43.56}{2} = 21.78 [\Omega]$$

2. 변압기 리액턴스를 66KV 기준으로 환산하면

$$Z_T = \frac{10 V^2 \cdot \%Z}{P} = \frac{10 \times 66^2 \times 8}{40,000} = 8.712 [\Omega]$$

3. 선로 리액턴스는

$$Z_L = 30 \times 0.6 = 18 [\Omega]$$

4. 3상 단락 전류는

$$I_s = \frac{V}{\sqrt{3}Z} = \frac{66,000}{\sqrt{3}(21.78 + 8.712 + 18)} = 785.83 [\text{A}]$$

그림과 같은 전력계통이 있다.

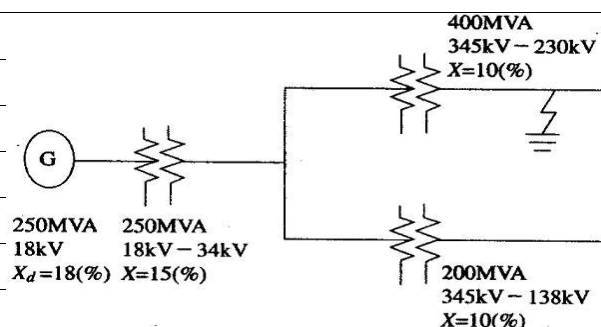
1) 전력 Base를 100(MVA)로 본

PU계통도를 그려라

2) 230KV측에 3상 단락고장이 발생하였다.

18KV 및 345KV측 선로에 흐르는

고장 전류의 PU 및(A)값을 구하라.



1. 발전기 및 변압기를 100MVA 기준 PU를 구하면

|                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) 발전기 PU = (%Z / 100) * (P <sub>BASE</sub> / P <sub>SELF</sub> ) = (18/100) * (100/250) = 0.072[PU]                      |
| 2) 발전기측 변압기 PU = (%Z / 100) * (P <sub>BASE</sub> / P <sub>SELF</sub> ) = (15/100) * (100/250) = 0.06[PU]                  |
| 3) 사고선로측 변압기 PU = (%Z / 100) * (P <sub>BASE</sub> / P <sub>SELF</sub> ) = (10/100) * (100/400) = 0.025[PU]                |
| 4) 다른선로측 변압기 PU = (%Z / 100) * (P <sub>BASE</sub> / P <sub>SELF</sub> ) = (10/100) * (100/200) = 0.05[PU]                 |
| 5) PU도                                                                                                                    |
|                                                                                                                           |
| 2. 230KV측 3상 단락 전류 계산                                                                                                     |
| 1) 230KV측 기준 전류 $I_N = P_N / \sqrt{3} * V_N = 100 * 10^6 / (\sqrt{3} * 230 * 10^3) = 251[A]$                              |
| 2) 230KV측 3상 단락 전류 $I_s = I_N / PU = 251 / (0.072 + 0.06 + 0.025) = 1,599[A]$                                             |
| 3. 18KV측 3상 단락 전류 계산                                                                                                      |
| 1) 18KV측 기준 전류 $I_N = P_N / \sqrt{3} * V_N = 100 * 10^6 / (\sqrt{3} * 18 * 10^3) = 3,207[A]$                              |
| 2) 18KV측 3상 단락 전류 $I_s = I_N / PU = 3,207 / (0.072 + 0.06 + 0.025) = 20,427[A]$                                           |
| [다음 그림과 같은 전력계통에서 차단기 a와 차단기 b의 차단용량[MVA]을 각각 구하시오. (단, 차단기 f는 개방 되어 있는 것으로 가정하고, 주어진 % 임피던스는 20[MVA] 기준으로 환산한 값이다.)]     |
|                                                                                                                           |
| 1. a차단기의 좌측에 사고시에는 무측 G2, G3의 합성 유입전류를 차단 가능하여야 하고, 우측에 사고시에는 좌측 G1에 의한 유입 전류를 차단 가능하여야 하므로 2개중 큰 것을 기준으로 차단 용량을 선정하면 된다. |
| 1) a 차단기 좌우측 % 임피던스 합성                                                                                                    |
| (1) 좌측(G1측)                                                                                                               |
| 5 + 4 = 9%                                                                                                                |
| (2) 우측(G2, G3 측)                                                                                                          |
| $\frac{(3+5+6) * (3+6+7)}{(3+5+6) + (3+6+7)} = 7.93\%$                                                                    |
| 고로 a차단기 좌측에서 사고시 유입전류가 크므로 이것을 기준으로 선정한다.                                                                                 |
| 2) a 차단기 용량 계산                                                                                                            |
| $P_s = 100 * P_n / \%Z = 100 * 20 / 7.93 = 253.2[MVA]$                                                                    |
| 2. b차단기의 좌측에 사고시는 무측 G2의 유입전류를 차단 가능하여야 하고, 우측에 사고시는 좌측 G1, G3에 의한 합성 유입 전류를 차단 가능하여야 하므로 2개중 큰 것을 기준으로 차단 용량을 선정하면 된다.   |
| 1) b 차단기 좌우측 % 임피던스 합성                                                                                                    |

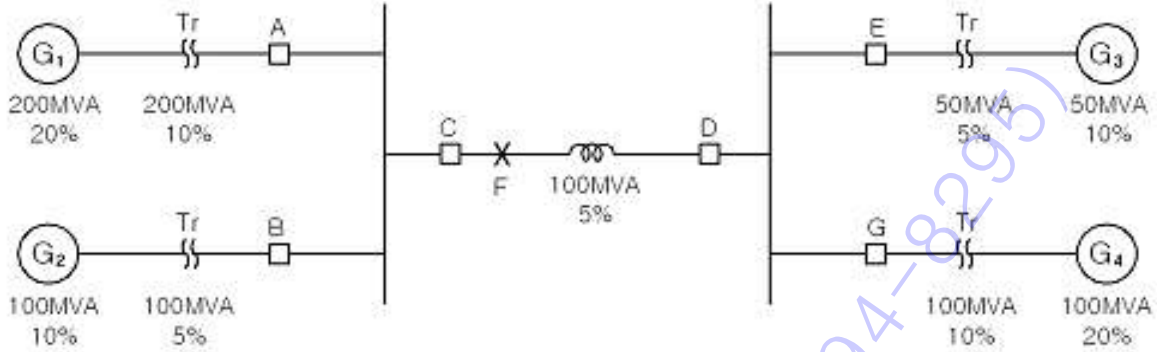


그림은 발전기, 변압기, 송전선로 및 차단기로 구성된 전력계통이다. F점에서 3상 단락사고가 발생한 경우, 다음 물음에 답하시오.

(단, 모션전압은 154[kV]이고 각 부분의 설비용량과 임피던스는 그림과 같다)

1) F점에 유입되는 고장전류[kA]를 구하시오.

2) 차단기 C의 차단용량[MVA]를 구하시오.



### 1. 100MVA 기준으로 %Z를 환산하면

$$\%Z_{G1}' = \%Z_{G1} * (P_{BASE}/P_{SELF}) = 20 * (100/200) = 10\%$$

$$\%Z_{T1}' = \%Z_{T1} * (P_{BASE}/P_{SELF}) = 10 * (100/200) = 5\%$$

$$\%Z_{G2}' = 10\%$$

$$\%Z_{T2}' = 5\%$$

$$\%Z_{G3}' = \%Z_{G1} * (P_{BASE}/P_{SELF}) = 10 * (100/50) = 20\%$$

$$\%Z_{T3}' = \%Z_{T3} * (P_{BASE}/P_{SELF}) = 5 * (100/50) = 10\%$$

$$\%Z_{G4}' = 20\%$$

$$\%Z_{T4}' = 10\%$$

$$\%Z_{RE}' = 5\%$$

### 2. 고장 전류 계산

고장점을 기준으로 양측이 병렬회로이므로 합성 %Z를 계산하면

$$G1, G2 \text{ 측 합성 } \%Z = 7.5\%$$

$$G3, G4 \text{ 측 합성 } \%Z = 20\%$$

$$\text{기준 전류 } I_N = P_N / \sqrt{3} * V_N = 100 * 10^6 / \sqrt{3} * 154 * 10^3 = 374.9 \text{ [A]}$$

$$G1, G2 \text{ 측 에서 유입되는 고장 전류 } I_S = 100 I_N / \%Z = 100 * 374.9 / 7.5 = 4,998.7 \text{ [A]}$$

$$G3, G4 \text{ 측 에서 유입되는 고장 전류 } I_S = 100 I_N / \%Z = 100 * 374.9 / 20 = 1,874.5 \text{ [A]}$$

$$F \text{ 점의 합성 고장 전류 } = 4,998.7 + 1,874.5 = 6,873.2 \text{ [A]}$$

### 3. C 차단기의 차단용량 선정

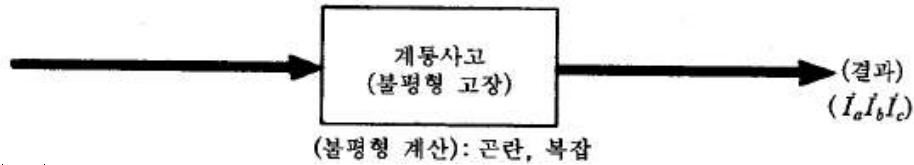
차단기를 기준으로 양측 고장 전류중 큰 전류를 기준으로 산정한다.

$$P_S = 100 P_N / \%Z = 100 * 100 / 7.5 = 1,333.3 \text{ [MVA]}$$

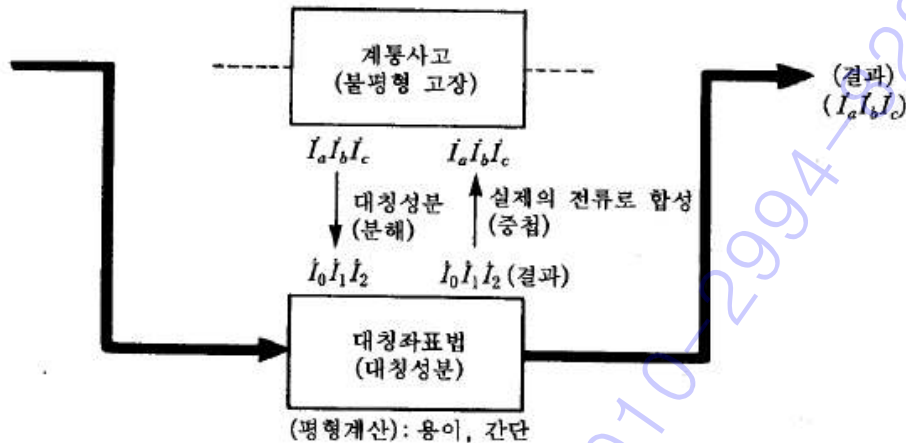
## [대칭 좌표법]

## 1. 개요

- 1) 대칭좌표법이란 3상 회로의 불평형 문제를 푸는데 사용되는 계산법임.
- 2) 대칭 좌표법을 이용한 계산법의 개념도



(a) 불평형 고장을 직접 계산하는 방법



(b) 불평형 고장을 간접적으로 푸는 방법

## 2. 대칭분 전류

- 1) 선로정수가 평형된 3상 회로에 임의의 불평형 3상전류  $I_a, I_b, I_c$ 가 흐를때 대칭분 전류는

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \\ I_1 &= \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \\ I_2 &= \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \end{aligned} \right\}$$

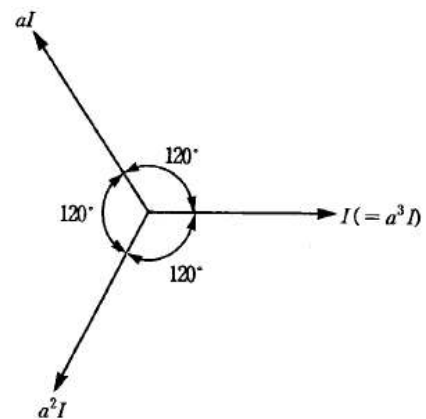
이를 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

여기서,  $a = 1/120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$a^2 = a \cdot a = 1/240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = a \cdot a^2 = 1/360^\circ = 1$$



전류 벡터 오퍼레이터

- 2) 반대로 임의의  $I_0, I_1, I_2$ 가 주어 졌을 때 실제 각상의 전류  $I_a, I_b, I_c$ 는

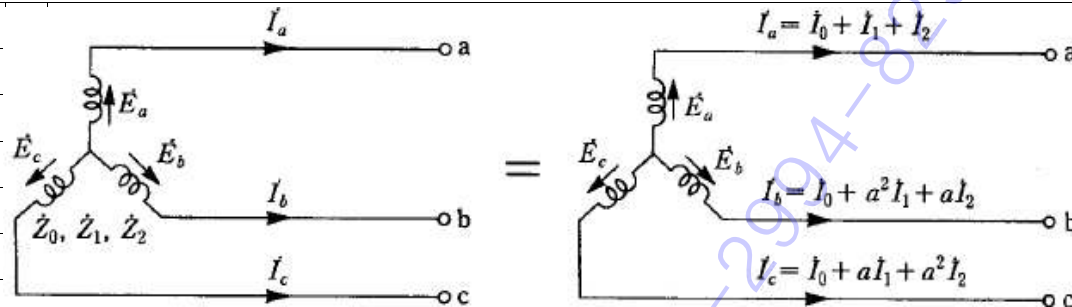
$$\left. \begin{aligned} 1 + a + a^2 &= 0 \\ a^3 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

관계를 이용해서 풀면

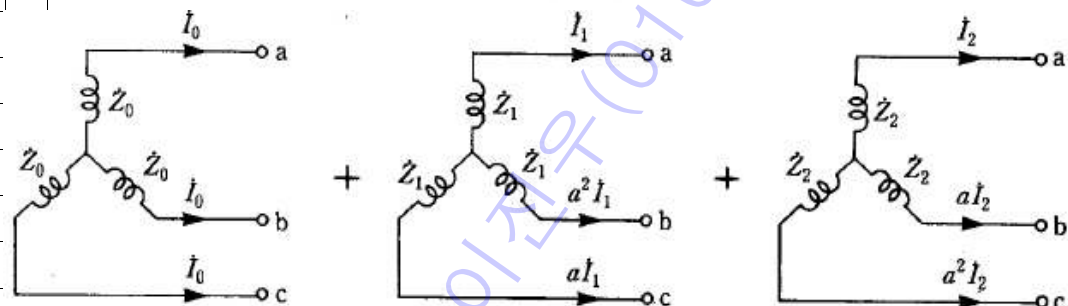
$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \\ I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

즉, 불평형 3상전류  $I_a, I_b, I_c$ 는 각각 평형된  $I_0, I_1, I_2$ 의 합으로 구성 되어 있다.



(a) 고장시의 전류



(b) 영상 전류

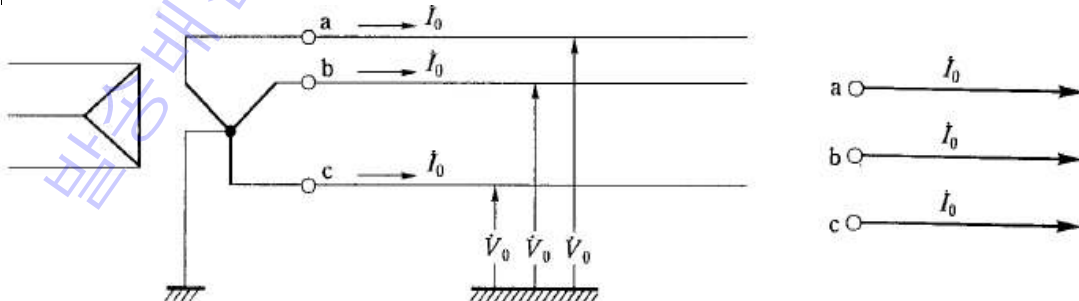
(c) 정상 전류

(d) 역상 전류

3. 불평형 고장 발생시 불평형 전류를 각 대칭분 전류로 분해하면

(1) 영상 전류( $I_0$ )

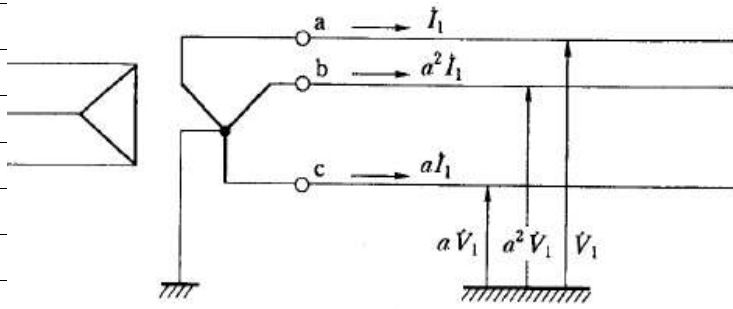
- ㄱ) 제 1성분인  $I_0$ 는 크기, 위상각이 같은 평형 단상 전류임
- ㄴ) 지락 고장시 접지 계전기를 동작시킴
- ㄷ) 통신선에 전자 유도 장애를 일으킴



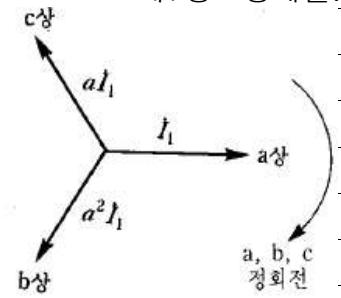
(b) 영상 전류

(2) 정상 전류( $I_1$ )

- ㄱ) 제2성분인  $I_1$ 은  $I_1, a^2 I_1, a I_1$  형태로 된 평형 3상 교류로서 전원과 동일한 상회전 방향임
- ㄴ) 이 전류가 전동기에 흐르면 회전 토크를 발생한다.

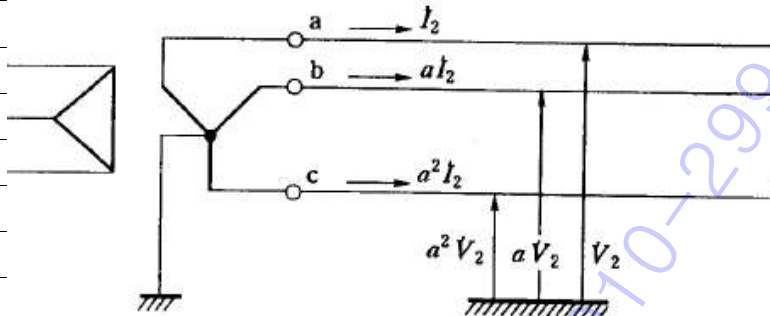


(c) 정상 전류

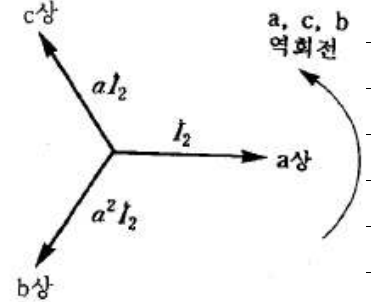
(3) 역상 전류( $I_2$ )

ㄱ) 제3성분인  $I_2$ 은  $I_1$  과 상회전이 반대인 평형 3상 전류임

ㄴ) 이 전류가 전동기에 흐르면 제동 작용을 해서 출력을 감소시킴



(d) 역상 전류



## 3. 대칭분 전압

1) 전압에 대해서도 대칭분 전류를 구하는 것과 같다.

$$\begin{cases} \dot{V}_0 = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \\ \dot{V}_1 = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + a \dot{V}_b + a^2 \dot{V}_c) \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + a^2 \dot{V}_b + a \dot{V}_c) \end{cases}$$

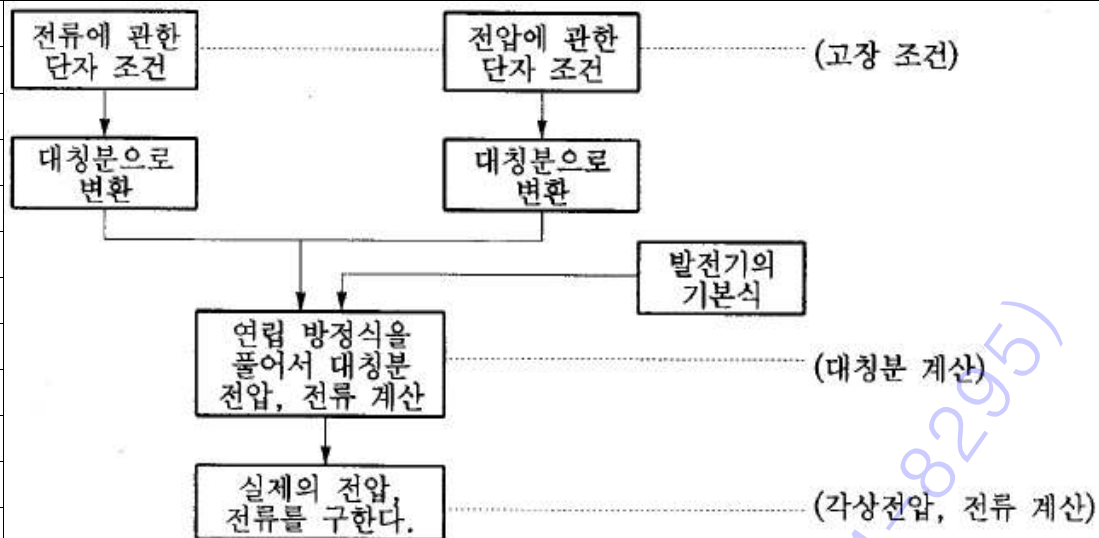
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

2) 반대로 대칭분 전압이 주어진 경우 실제 각 상의 전압은

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ \dot{V}_b = \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 \\ \dot{V}_c = \dot{V}_0 + a \dot{V}_1 + a^2 \dot{V}_2 \end{cases}$$

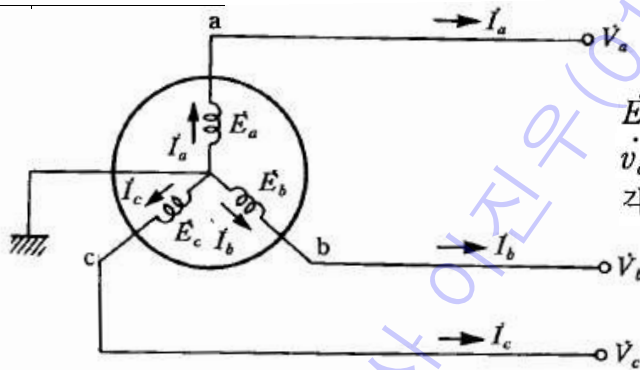
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

## 4. 대칭 좌표법에 의한 고장 계산 개요도



## [발전기 기본식 유도]

## 1) 계통도



$\vec{E}_a, \vec{E}_b, \vec{E}_c$ 를 각 상의 무부하 유도 전압  
 $\vec{v}_a, \vec{v}_b, \vec{v}_c$ 를 각 상의 전압 강하  
 각 상의 단자 전압  $\vec{V}_a, \vec{V}_b, \vec{V}_c$ 는

## 2) 조건

발전기는 대칭이고 무부하 유도전압은 3상이 평형이 됨

## 3) 각상의 단자전압

$$\left. \begin{aligned} \vec{V}_a &= \vec{E}_a - \vec{v}_a \\ \vec{V}_b &= \vec{E}_b - \vec{v}_b = a^2 \vec{E}_a - \vec{v}_b \\ \vec{V}_c &= \vec{E}_c - \vec{v}_c = a \vec{E}_a - \vec{v}_c \end{aligned} \right\} \text{--- ①}$$

$a^2 + a + 1 = 0, a^3 = 1$  이용하면

$$\left. \begin{aligned} V_a &= E_a - v_a = V_0 + V_1 + V_2 \\ V_b &= a^2 E_a - v_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \\ V_c &= a E_a - v_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \end{aligned} \right\} \text{--- ②}$$

② 식을  $V_a + V_b + V_c$ 하면

$$-(v_a + v_b + v_c) = 3V_0$$

$$\therefore V_0 = -\frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c)$$

② 식을  $V_a + aV_b + a^2V_c$  하면

$$3E_a - (v_a + av_b + a^2v_c) = 3V_1$$

$$\therefore V_1 = E_a - \frac{1}{3}(v_a + av_b + a^2v_c)$$

② 식을  $V_a + a^2V_b + aV_c$  하면

$$-(v_a + a^2v_b + av_c) = 3V_2$$

$$\therefore V_2 = -\frac{1}{3}(v_a + a^2v_b + av_c)$$

$$V_0 = -\frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c)$$

$$V_1 = E_a - \frac{1}{3}(v_a + av_b + a^2v_c)$$

$$V_2 = -\frac{1}{3}(v_a + a^2v_b + av_c)$$

-- ③

4) 전기자 전압강하는 대칭분 전류가 흘렀을 경우 각 성분 전압강하를 중첩시켜 구한다.

$$v_a = Z_0 I_0 + Z_1 I_1 + Z_2 I_2$$

$$v_b = Z_0 I_0 + a^2 Z_1 I_1 + a Z_2 I_2$$

$$v_c = Z_0 I_0 + a Z_1 I_1 + a^2 Z_2 I_2$$

-- ④

④를  $v_a + v_b + v_c$  하면

$$v_a + v_b + v_c = 3Z_0 I_0$$

$$\therefore Z_0 I_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c)$$

④ 식을  $v_a + av_b + a^2v_c$  하면

$$v_a + av_b + a^2v_c = 3Z_1 I_1$$

$$\therefore Z_1 I_1 = \frac{1}{3}(v_a + av_b + a^2v_c)$$

④ 식을  $v_a + a^2v_b + av_c$  하면

$$v_a + a^2v_b + av_c = 3Z_2 I_2$$

$$\therefore Z_2 I_2 = \frac{1}{3}(v_a + a^2v_b + av_c)$$

$$Z_0 I_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c)$$

$$Z_1 I_1 = \frac{1}{3}(v_a + av_b + a^2v_c)$$

$$Z_2 I_2 = \frac{1}{3}(v_a + a^2v_b + av_c)$$

-- ⑤

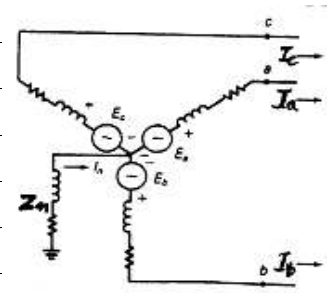
⑤식을 ③식에 대입하면

$$\dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_a - \dot{Z}_1 \dot{I}_1$$

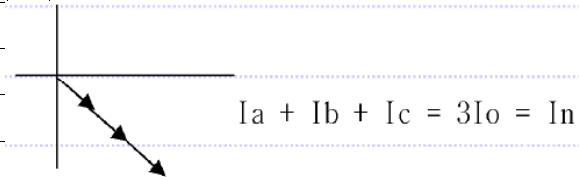
$$\dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2$$

[그림과 같은 3상 교류발전기의 Sequence Network를 그리시오.]

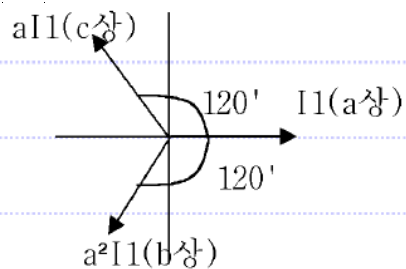


상순을 a, b, c로 하고 기전력의 크기를 E라하면, 3상 평형 유기기전력은  
 각각  $E_a = E \angle 0^\circ$ ,  $E_b = a^2 E_a = E \angle -120^\circ$ ,  $E_c = a E_a = E \angle 120^\circ$

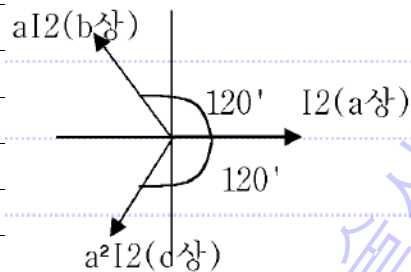
1) 영상회로



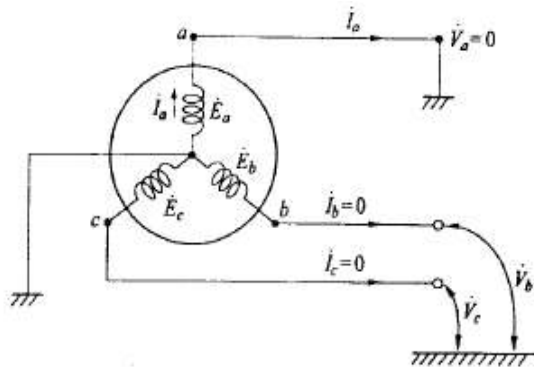
2) 정상회로



3) 역상회로



## [1선지락고장]



[1선 지락시 고장의 표현]

## 1. 고장 조건

1) 기지량은  $\dot{V}_a = 0, \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$ 2) 미지량은  $\dot{I}_a$  및  $\dot{V}_b, \dot{V}_c$  이다.

## 2. 대칭분 전압, 전류

1)  $\dot{I}_b$  및  $\dot{I}_c$ 의 대칭분으로 나타내면

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 = 0 \end{aligned} \right\} \text{--- ①}$$

이로부터  $\dot{I}_b - \dot{I}_c$ 는

$$\dot{I}_b - \dot{I}_c = (a^2 - a) \dot{I}_1 + (a - a^2) \dot{I}_2 = (a^2 - a)(\dot{I}_1 - \dot{I}_2) = 0$$

이때  $a^2 - a \neq 0$ 이므로  $\dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0 \quad \therefore \dot{I}_1 = \dot{I}_2$  이다.이 관계를  $\dot{I}_b$ 의 식에 대입하면

$$\dot{I}_b = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2$$

$$= \dot{I}_0 + (a^2 + a) \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_1 = 0 \quad \therefore \dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \text{가 됨.}$$

즉, 1선 지락시 3개의 대칭분 전류는 크기와 위상이 모두 같다.

2) 다음은 a상이 접지되고 있으므로 이 때  $\dot{V}_a = 0$  (발전기 기본식을 대입하면)

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ &= -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \dot{E}_a - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 - \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = 0 \end{aligned}$$

$$\text{이 때 } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \text{임.} \quad \dot{E}_a - (\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) \dot{I}_0 = 0$$

$$\therefore \dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \text{임.}$$

즉 고장 직전의 고장점 전압  $\dot{E}_a$ 만 알면  $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ 의 크기를 계산할 수다.

$$\dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \text{임.}$$

3) 다음은 건전상의 전압  $\dot{V}_b, \dot{V}_c$ 는 위의 대칭분 전류를 발전기 기본식에 대입

$$\dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 = -\frac{\dot{Z}_0 \dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_a - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_a - \frac{\dot{Z}_1 \dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2) \dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

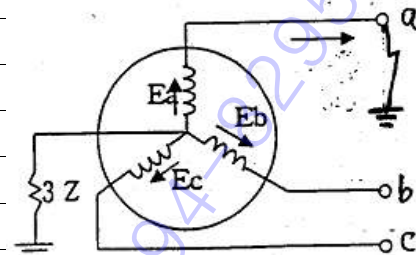
$$\dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 = -\frac{\dot{Z}_2 \dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

그러므로

$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 = \frac{(a^2 - 1) \dot{Z}_0 + (a^2 - a) \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \cdot \dot{E}_a$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + a \dot{V}_1 + a^2 \dot{V}_2 = \frac{(a - 1) \dot{Z}_0 + (a - a^2) \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \cdot \dot{E}_a$$

[다음 그림에서 무부하 발전기 α상에 1선 지락  
고장이 발생한 경우, 고장상의 지락 전류와  
건전상의 전압식을 유도하시오.]



1. 고장 조건은 위의 1선 지락 사고와 동일하고 유도 과정도 동일함

2. 1선 지락 전류 산출

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 - 3ZI_a = 0$$

$$V_a = -Z_0 I_0 + E_a - Z_1 I_1 - Z_2 I_2 - 3ZI_a = 0$$

이때  $I_0 = I_1 = I_2$  이고  $I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0$  임

$$V_a = -Z_0 I_0 + E_a - Z_1 I_0 - Z_2 I_0 - 3Z3I_0 = 0$$

$$E_a = Z_0 I_0 + Z_1 I_0 + Z_2 I_0 + 3Z3I_0$$

$$I_0 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} \quad I_a = 3I_0 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z}$$

3. 건전상 B,C상 전압 산출

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 - 3ZI_a = -Z_0 I_0 + a^2 (E_a - Z_1 I_0) - a Z_2 I_0 - 9Z I_0$$

$$= -Z_0 I_0 + a^2 E_a - a^2 Z_1 I_0 - a Z_2 I_0 - 9Z I_0$$

$$= \frac{-Z_0 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} + \frac{a^2 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} - \frac{a^2 Z_1 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} - \frac{a Z_2 E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} - \frac{9Z E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z}$$

$$= \frac{-Z_0 E_a + (a^2 Z_0 + a^2 Z_1 + a^2 Z_2 + a^2 9Z) E_a - a^2 Z_1 E_a - a Z_2 E_a - 9Z E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z}$$

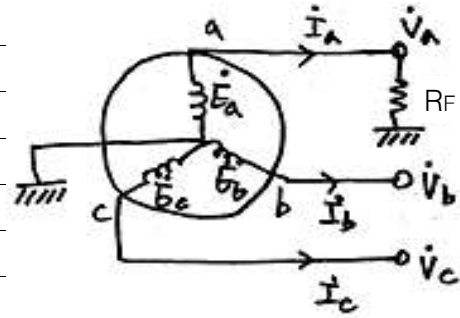
$$= \frac{(a^2 - 1)Z_0 + (a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1)9Z}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} E_a$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 - 3ZI_a = -Z_0 I_0 + a (E_a - Z_1 I_0) - a^2 Z_2 I_0 - 9Z I_0$$

계산 과정은  $V_b$ 와 동일함(생략)

$$= \frac{(a - 1)Z_0 + (a - a^2)Z_2 + (a - 1)9Z}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 9Z} E_a$$

[다음 그림과 같은 발전기에서 a상이 저항  $R_f[\Omega]$ 을 통하여 지락이 된 경우의 a상의 전압  $V_a[V]$ , 전류  $I_a[A]$ 를 구하시오.  
이 때, 발전기의 영상, 정상, 역상 임피던스는 각각  $Z_0, Z_1, Z_2[\Omega]$ 이다.]



## 1. 고장 조건

$$I_b = I_c = 0[A]$$

a상의 대지전위는 완전지락이 아니므로 0이 아니라  $V_a = R_F I_a$ 이다.

## 2. 대칭분 전류

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}(I_a + 0 + 0) = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}(I_a + a \times 0 + a^2 \times 0) = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}(I_a + a^2 \times 0 + a \times 0) = \frac{1}{3} I_a$$

$$\therefore I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a, \quad I_a = 3I_0$$

## 3. 지락 전류 산출

$$V_0 = -Z_0 I_0, \quad V_1 = E_a - Z_1 I_1, \quad V_2 = -Z_2 I_2$$

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = -Z_0 I_0 + E_a - Z_1 I_1 - Z_2 I_2$$

$$= E_a - (Z_0 + Z_1 + Z_2) I_0 = R_F I_a = 3R_F I_0$$

$$E_a = (Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F) I_0$$

$$\therefore I_0 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F} = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a$$

그러므로 a상 지락전류는

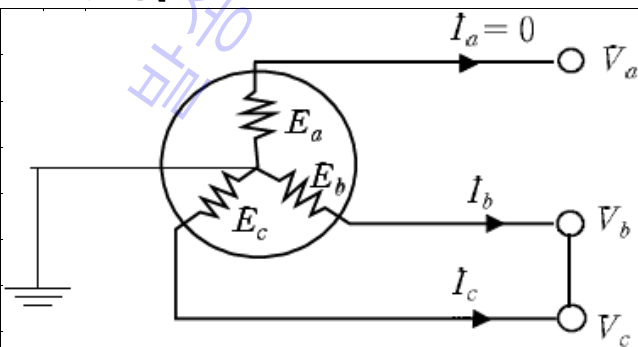
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F}$$

## 4. 지락점 전압 산출

지락조건에서  $V_a = I_a R_F$ 라고 하였으므로

$$V_a = I_a R_F = 3 E_a R_F / (Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F)$$

## [선간단락고장]



## 1. 고장 조건

$$V_b = V_c, \quad I_a = 0 \text{ 및 } I_b = -I_c$$

## 2. 대칭분

고착조건에서  $I_a = 0$  및  $I_b + I_c = 0$ 이므로

$$I_o = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}(0 + 0) = 0$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}(aI_b - a^2I_b) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}(a^2I_b - aI_b) = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b = -\frac{1}{3}(a - a^2)I_b = -I_1$$

또한  $V_b = V_c$ 이므로

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) = \frac{1}{3}\{V_a + (a + a^2)V_b\}$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) = \frac{1}{3}\{V_a + (a^2 + a)V_b\} = V_1$$

$$\therefore I_o = 0 \quad I_1 = -I_2 \quad V_o = -Z_o I_o = 0 \quad V_1 = V_2$$

## 3. 발전기 기본식과 연립

$$V_1 = V_2 \text{ 및 } I_2 = -I_1 \quad E_a - Z_1 I_1 = -Z_2 I_2 = Z_2 I_1$$

$$\therefore I_1 = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} = -I_2$$

## 4. 고장 전류

$$I_b = I_o + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 = \frac{(a^2 - a) E_a}{Z_1 + Z_2} = -I_c$$

3상 단락전류  $I_s$ 가  $I_s = \frac{E_a}{Z_s}$  이고(단,  $Z_s$ 는 동기 임피던스),

$a^2 E_a = E_b$ ,  $a E_a = E_c$  이므로  $(a^2 - a) E_a = E_b - E_c = V_{bc}$ ( $b-c$ 간 선간전압)이고

$Z_1 \approx Z_2 \approx Z_s$  이므로 선간 단락 고장전류는

$$|I_b| = \left| \frac{(a^2 - a) E_a}{Z_1 + Z_2} \right| = \left| \frac{V_{bc}}{2Z_1} \right| = \frac{\sqrt{3} E_a}{2Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_s$$

즉, 선간 단락전류는 3상 단락전류의  $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 = 86.6[\%]$ 이다.

## 5. 각 상전압

$$V_a = V_o + V_1 + V_2 = 2V_2 = -2Z_2 I_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_a = E_a$$

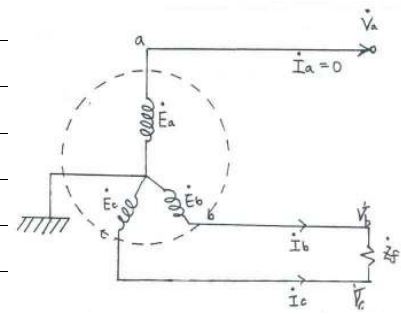
현재 계통이 직접접지 방식이므로 건전상인 a상은 전압이 거의 변동이 없다.

$$V_b = V_c = V_o + a^2 V_1 + a V_2 = (a^2 + a) V_1 = -V_1 = -V_2$$

$$= Z_2 I_2 = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} E_a = -\frac{1}{2} E_a$$

단락이 된 b상 및 c상의 전압은 건전상인 a상 전압의 절반으로 줄어든다.

[아래 그림과 같이 3상 교류발전기의  
b상, c상이 임피던스를 통해 단락한  
경우, 각 상의 전압과 단락전류를  
구하시오]

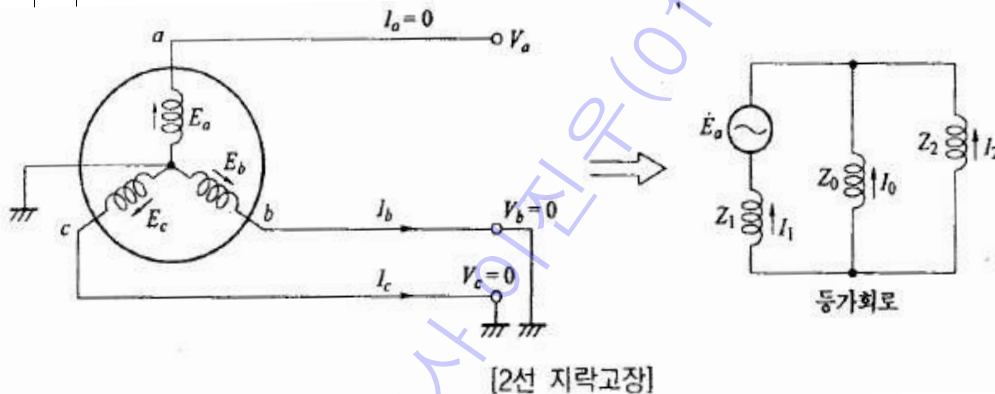


$$I_b = \frac{(a^2 - a)E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$V_a = \frac{2(Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} E_a$$

$$V_b = V_c = -\frac{Z_2 + Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} E_a$$

[2선 지락 고장 = 1선 단선 고장]



[2선 지락고장]

1. 고장 조건

1) 기지량 :  $I_a = 0, V_b = V_c = 0$

2) 미지량 :  $V_a$  및  $I_b, I_c$

2. 대칭분 전압

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2$$

$$V_b - V_c = (a^2 - a)V_1 + (a - a^2)V_2 = 0$$

$$= (a^2 - a)(V_1 - V_2) = 0$$

$$\therefore V_1 = V_2 \quad \text{--- ①식}$$

① 식을  $V_b$  식에 대입

$$V_b = V_0 + (a^2 + a)V_1 = V_0 - V_1 = 0$$

$$\therefore V_0 = V_1$$

$$\therefore V_0 = V_1 = V_2 \quad \text{----- ②식}$$

즉, 2선 지락 고장시에는 3개의 대칭분 전압의 크기 및 위상각이 모두 같다.

3. 대칭분 전류

② 식을 발전기 기본식에 대입

$$-Z_0 I_0 = E_a - Z_1 I_1 = -Z_2 I_2 \quad \text{--- ③}$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = 0 \quad \text{--- ④}$$

③과 ④식을 3원 연립방정식으로 풀면(크레머 공식 이용)

$$I_0 = \frac{-Z_2 E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \quad \text{--- ⑤}$$

$$I_1 = \frac{(Z_0 + Z_2) E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \quad \text{--- ⑥}$$

$$I_2 = \frac{-Z_0 E_a}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \quad \text{--- ⑦}$$

※ 크레머 공식 이용 계산

$$V_0 = V_1 = V_2 \rightarrow -Z_0 I_0 = E_a - Z_1 I_1 = -Z_2 I_2$$

$I_0$ 를 기준

$$-Z_0 I_0 = E_a - Z_1 I_1 \quad \therefore -Z_0 I_0 + Z_1 I_1 = E_a \quad \text{--- ①}$$

$$-Z_0 I_0 = -Z_2 I_2 \quad \therefore -Z_0 I_0 + Z_2 I_2 = 0 \quad \text{--- ②}$$

행렬식 표현방법

$$\begin{bmatrix} I_0 + I_1 + I_2 = 0 \\ -Z_0 I_0 + Z_1 I_1 + 0 = E_a \\ -Z_0 I_0 + 0 + Z_2 I_2 = 0 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$|\Delta| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Z_0 & Z_1 & 0 \\ -Z_0 & 0 & Z_2 \end{vmatrix} = Z_1 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_0 Z_2$$

크레머 공식적용

$$I_0 = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ E_a & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{vmatrix}}{|\Delta|} = \frac{-Z_2 E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2} \quad \therefore I_0 = \frac{-Z_2 E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2}$$

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -Z_0 & E_a & 0 \\ -Z_0 & 0 & Z_2 \end{vmatrix}}{|\Delta|} = \frac{Z_2 E_a - (-Z_0 E_a)}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2} = \frac{(Z_0 + Z_2) E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -Z_0 & Z_1 & E_a \\ -Z_0 & 0 & 0 \end{vmatrix}}{|\Delta|} = \frac{-Z_0 E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2} \quad \therefore I_2 = \frac{-Z_0 E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2}$$

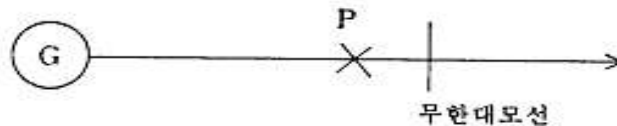
#### 4. 미지량 합성

$$\begin{aligned} 1) I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = \frac{-Z_2 + a^2 Z_0 + a^2 Z_2 - a Z_0}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \cdot E_a \\ &= \frac{(a^2 - a) Z_0 + (a^2 - 1) Z_2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \cdot E_a \end{aligned}$$

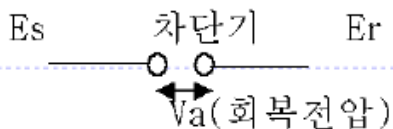
$$2) I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = \frac{(a-a^2)Z_0 + (a-1)Z_2}{Z_0(Z_1+Z_2) + Z_1Z_2} \cdot E_a$$

$$3) V_a = V_0 + V_1 + V_2 = -3Z_0I_0 = \frac{3Z_0Z_2}{Z_0(Z_1+Z_2) + Z_1Z_2} \cdot E_a$$

발전기가 송전선을 거쳐 무한대 모선에 접속되어 있는 아래의 전력계통에서 모선 입구의 P점에 설치된 차단기의 1상만이 개방되었다. 영상, 정상, 역상 임피던스가 동일한 값일 때 대칭좌표법을 이용하여 회복전압을 구하시오. (단, 발전기의 내부 유기 상전압은  $E_s$ , 수전단 상전압  $E_R$ , 이 P점에서 송전단을 본 영상, 정상, 역상 임피던스는 각각  $Z_0, Z_1, Z_2$ 이다)



1. a상만 개방을 상정하면



2. 고장 조건

$$I_a=0, V_b=V_c=0, V_a \neq 0$$

(여기서,  $V_a, V_b, V_c$ 는 고장점 좌, 우간의 전압)

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \text{로부터 } V_b = V_c, V_1 = V_2$$

$$V_b=0 \text{이므로 } V_0 = V_1 = V_2 \text{ --- ①}$$

3. 발전기 기본식에 대입

$$V_0 = V_1 \quad -Z_0 I_0 = E_a - Z_1 I_1 \quad I_1 = (E_a + Z_0 I_0) / Z_1$$

$$V_0 = V_2 \quad -Z_0 I_0 = -Z_2 I_2 \quad I_2 = Z_0 I_0 / Z_2$$

고장조건  $I_a = 0$ 로 부터  $I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0$  이다.

여기까지 조건을 보면 이선 지락 고장과 모든 조건이 동일한 것을 알수 있다.

고로 회복 전압  $V_a$ 는

$$3) V_a = V_0 + V_1 + V_2 = -3Z_0I_0 = \frac{3Z_0Z_2}{Z_0(Z_1+Z_2) + Z_1Z_2} \cdot E_a$$

## [대표적인 고장 종류와 계산식]

## (1) 1선 지락고장

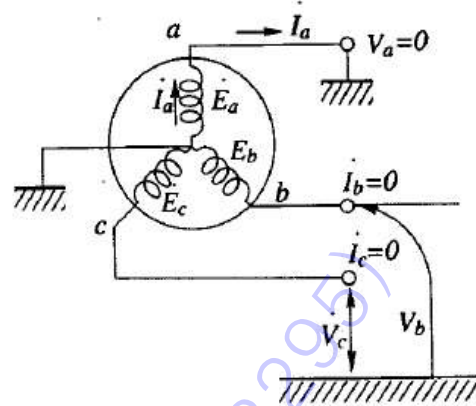
고장 발생시(a상)의 고장 전류  $I_a$ 

$$I_a = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

건전상의 전압  $\dot{V}_b, \dot{V}_c$ 

$$\dot{V}_b = \frac{(a^2 - 1)\dot{Z}_0 + (a^2 - a)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_a$$

$$\dot{V}_c = \frac{(a - 1)\dot{Z}_0 + (a - a^2)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_a$$



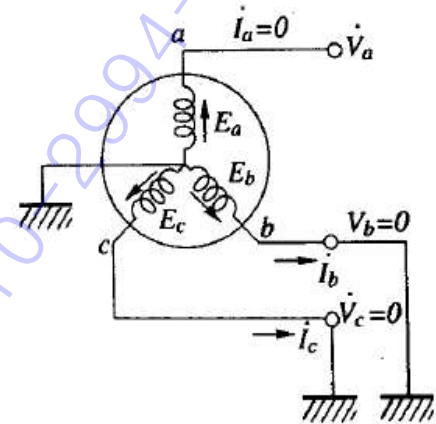
## (2) 2선 지락 고장

지락 전류  $I_b, I_c$  및 건전상의 전압  $\dot{V}_a$ 는

$$I_b = \frac{(a^2 - a)\dot{Z}_0 + (a^2 - 1)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2} \dot{E}_a$$

$$I_c = \frac{(a - a^2)\dot{Z}_0 + (a - 1)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2} \dot{E}_a$$

$$\dot{V}_a = \frac{3\dot{Z}_0\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1\dot{Z}_2} \dot{E}_a$$



## (3) 선간 단락 고장

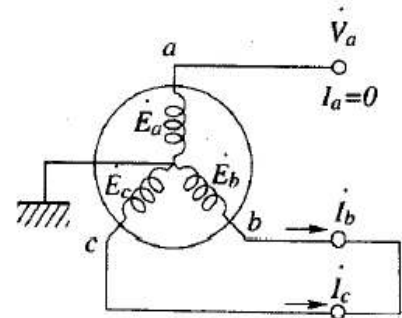
단락 전류  $I_b$ 는

$$I_b = \frac{\dot{E}_{bc}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

건전상 a 및 단락상 b, c의 전압은

$$\dot{V}_a = \frac{2\dot{Z}_2\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = -\frac{\dot{Z}_2\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$



## (4) 3상 단락 고장

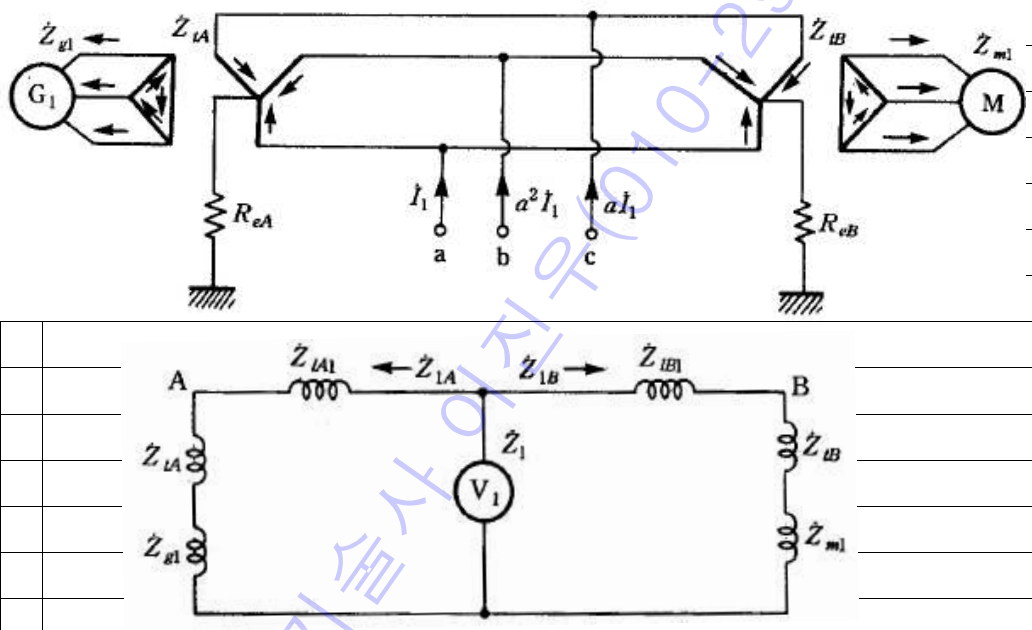
3상 단락하였을 경우는 각 상이 다같이 평형되고 있으므로

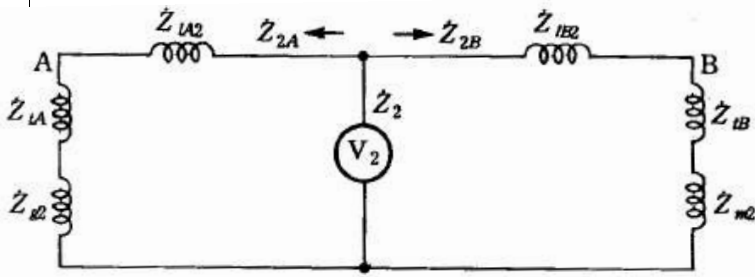
$$I_a = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1} \quad \text{— 선간 전압은 모두 영이므로 — } \dot{V}_a = \dot{V}_b = \dot{V}_c = 0$$

[고장 종류별 등가 회로]

(1) 1선 지락 고장

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

|                                                                                                                              |                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2) 영상 임피던스                                                                                                                   |                                                                                                                                   |
| $\dot{Z}_0 = \frac{\dot{Z}_{0A} \dot{Z}_{0B}}{\dot{Z}_{0A} + \dot{Z}_{0B}}$                                                  | 여기서, $\dot{Z}_{0A} = \dot{Z}_{lA0} + \dot{Z}_{lA} + 3R_{eA}$<br>$\dot{Z}_{0B} = \dot{Z}_{lB0} + \dot{Z}_{lB} + 3R_{eB}$           |
| $\dot{I}_{0A} = \dot{V}_0 / \dot{Z}_{0A}$                                                                                    | $\dot{I}_{0B} = \dot{V}_0 / \dot{Z}_{0B}$                                                                                         |
| 3) 정의 : 3상1회선 송전선에서 고장점 단자 a,b,c를 일괄하고 이것과 대지 사이에 단상 전원을 인가하여 단상교류를 흘릴 때 흘러가는 범위의 회로                                         |                                                                                                                                   |
| 4) 영상회로는 변압기의 $\Delta$ 결선 내로만 순환하므로 변압기의 임피던스 $Z_t$ 까지만으로 구성                                                                 |                                                                                                                                   |
| 5) 이때 중성점 접지 저항에는 1상의 영상전류의 3배( $3I_0$ )가 흐르므로 이 저항값을 3배로 취급함( $R_3 = 3R_e$ )                                                |                                                                                                                                   |
| 6) 지락 고장시 선로정수는 대지로 귀로하는 인덕턴스를 사용하며(평상시는 작용인덕턴스 사용) 대지 정전용량을 사용한다. 영상 인덕턴스는 대략 1회선에서는 작용인덕턴스의 약 4배, 2회선에서는 약 7배 정도임          |                                                                                                                                   |
| 2. 정상회로의 해석과 등가 회로                                                                                                           |                                                                                                                                   |
| 1) 정상회로의 등가 회로                                                                                                               |                                                                                                                                   |
|                                           |                                                                                                                                   |
| 2) 정상 임피던스                                                                                                                   |                                                                                                                                   |
| $\dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}_{1A} \dot{Z}_{1B}}{\dot{Z}_{1A} + \dot{Z}_{1B}}$                                                  | 여기서, $\dot{Z}_{1A} = \dot{Z}_{lA1} + \dot{Z}_{lA} + \dot{Z}_{g1}$<br>$\dot{Z}_{1B} = \dot{Z}_{lB1} + \dot{Z}_{lB} + \dot{Z}_{m1}$ |
| 3) 정의 : 고장점에서 회로망 전체의 정상 임피던스를 구하기 위해 단자 a,b,c에 정상인 3상 평형 전압을 인가해서 각각 $I_1$ , $a^2 I_1$ , $a I_1$ 의 평형 3상 교류가 흘러가는 회로의 범위    |                                                                                                                                   |
| 4) 정상회로는 대칭 3상 교류이므로 중성점을 통과하지 않음<br>(즉, $I_1 + a^2 I_1 + a I_1 = 0$ )                                                       |                                                                                                                                   |
| 5) 전원측의 발전기나 부하측의 전동기에는 변압기의 $\Delta$ 회로를 통해서 전류가 흐르므로 발전기의 정상임피던스 $Z_g$ , 부하측의 정상임피던스 $Z_m$ , 변압기의 임피던스 $Z_t$ 도 정상 임피던스로 본다 |                                                                                                                                   |
| 6) 선로정수는 평상시의 작용인덕턴스 및 작용정전용량을 사용한다.                                                                                         |                                                                                                                                   |
| 3. 역상회로의 해석과 등가 회로                                                                                                           |                                                                                                                                   |
| 1) 역상회로의 등가 회로                                                                                                               |                                                                                                                                   |



2) 역상 임피던스

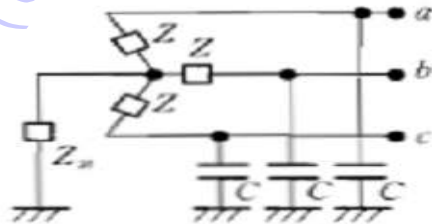
$$\dot{Z}_2 = \frac{\dot{Z}_{2A}\dot{Z}_{2B}}{\dot{Z}_{2A} + \dot{Z}_{2B}} \quad \text{여기서, } \dot{Z}_{2A} = \dot{Z}_{IA2} + \dot{Z}_{IA} + \dot{Z}_{g2} \\ \dot{Z}_{2B} = \dot{Z}_{IB2} + \dot{Z}_{IB} + \dot{Z}_{m2}$$

3) 정의 : 정상회로의 그림에서 a,b,c에 상회전 방향이 역상인 3상 평형회로에서 통전되는 범위의 회로

4) 변압기나 선로의 임피던스는 정상, 역상이 동일하다고 간주함

5) 고장전류의 순시값 계산시에도 과도 임피던스를 써야 하는데 이경우  $Z_1 = Z_2$ 로 보아도 지장이 없다.

그림과 같은 회로의 영상, 정상 및 역상임피던스를 구하시오.



$Z_0 = Z + 3Z_n - 1/WC$  여기서 C는 대지정전용량을 사용한다.

$Z_1 = Z_2 = Z - 1/WC$  여기서 C는 작용정전용량( $C_n = C_s + 3C_m$ )을 사용한다.

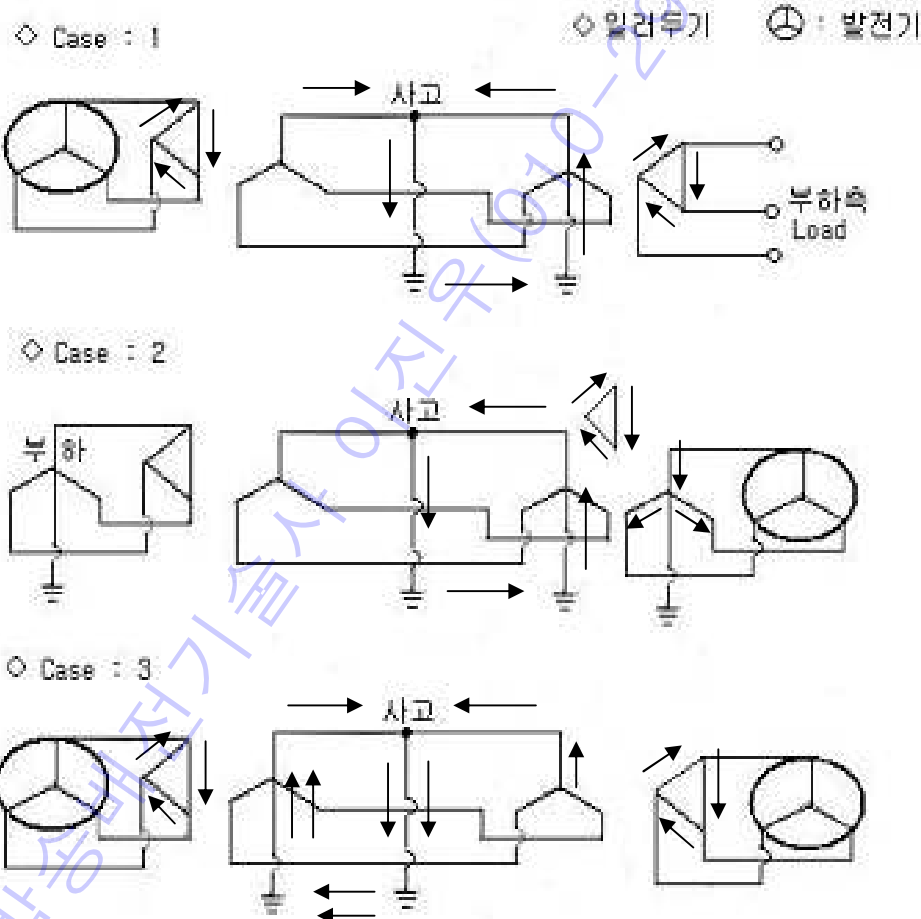
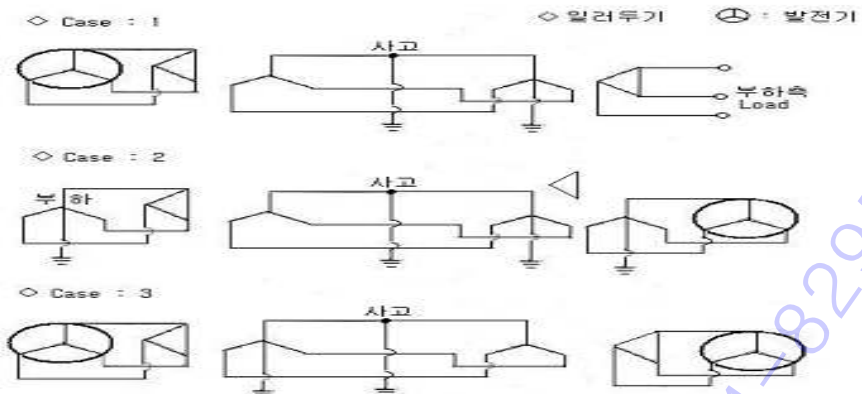
본문제의 그림에는 대지정전용량만 표기되어 있다.

단도체 방식 3상 선로에서의 작용정전용량 ( $C_n$ )은 회선수에 관계없이  $0.009\mu F/km$  정도이고 대지정전용량 ( $C_s$ )은 1회선의 경우  $0.005\mu F/km$ , 2회선의 경우  $0.005\mu F/km$

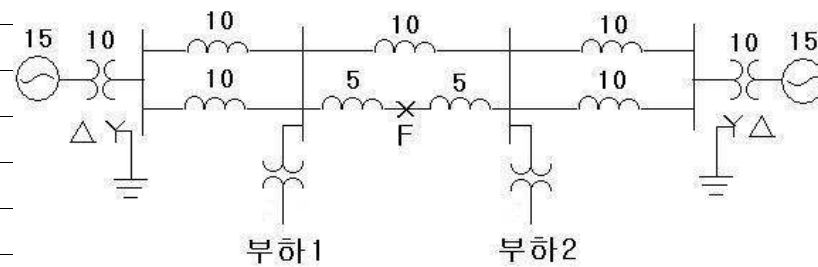
$Z_n$ 은 중성점 임피던스이므로 영상임피던스 산출시에는 3배하고, Z는 변압기 리액턴스로 가정하고 산출한다.

아래와 같은 세가지 경우의 회로에 대해 1선지락고장이 발생하였을 경우, 고장전류의 흐름을 아래와 같은 그림을 그려서 그 위에 나타내시오. (단, 방향은 화살표로, 크기는 화살표의 갯수로 나타내시오) 또한 각각의 경우에 대하여 설명하시오.

(단, 각 요소는 발전기, 변압기, 선로 및 부하로 이루어져 있음)

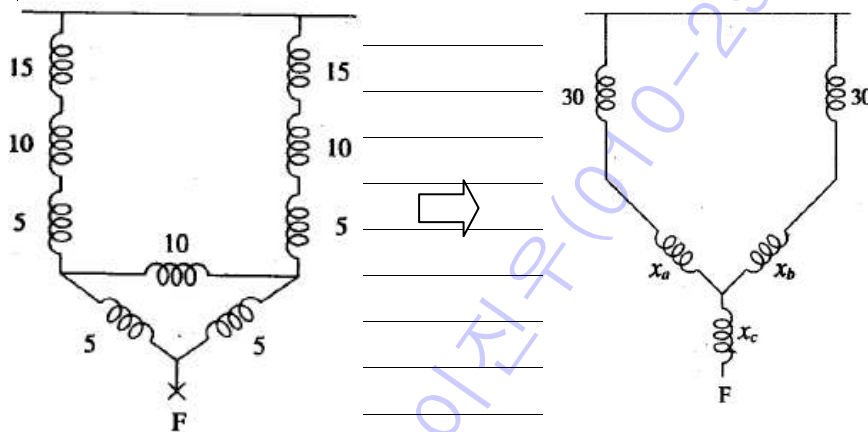


그림과 같은 전력계통에서 선로의 F점에서 지락이 발생했을 경우 고장점의 지락전류를 구하시오. (단, 그림에 표시된 수치는 정상분에 대한 %리액턴스를 나타내며, 역상 리액턴스는 정상리액턴스와 같고, 영상리액턴스는 정상리액턴스의 3배와 같다고 가정한다.) 또한 부하측으로부터 지락전류 유입은 없는 것으로 가정한다.)



(1) 정상 및 역상 임피던스 ( $X_1 = X_2$ )

부하측은  $\infty$ 이므로 정상, 역상은 0 (정상, 역상 전류가 흐르지 않으므로)



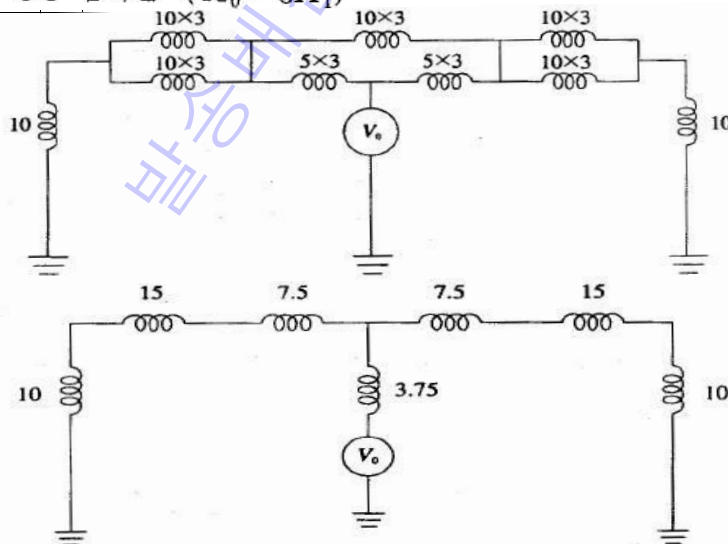
$$x_a = \frac{10 \times 5}{10 + 5 + 5} = 2.5$$

$$x_b = \frac{10 \times 5}{20} = 2.5$$

$$x_c = \frac{5 \times 5}{20} = 1.25$$

$$\therefore x_1 = x_2 = \frac{30 + 2.5}{2} + 1.25 = 17.5$$

(2) 영상 임피던스 ( $X_0 = 3X_1$ )



$$x_0 = \frac{25 \times 7.5}{25 + 7.5} = 5.56$$

$$\therefore x_0 = 3.75 + \frac{25+7.5}{2} = 20.0$$

(3) 1선 지락전류

$$I_g = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{3 \times 100}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2} I_n$$

$$= \frac{3 \times 100}{20 + 17.5 + 17.5} I_n = 5.45 \text{ [PU]}$$

154KV 1회선 거리 100KM인 송전선로의 중앙에서 1선지락고장이 발생하였을때

1선 지락전류의 크기를 구하라.

발전기 200MVA,  $X_{1g} = X_{2g} = 20\%$  (자기용량기준)

발전기용 변압기 200MVA,  $X_{1t} = X_{2t} = 10\%$  (자기용량기준) 직접접지

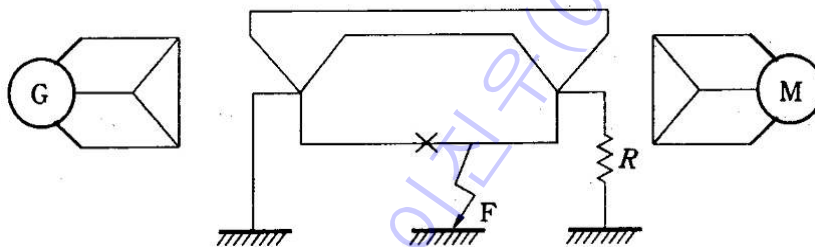
동기전동기 100MVA,  $X_{1m} = X_{2m} = 40\%$

동기전동기용 변압기 100MVA,  $X_{1t} = X_{2t} = 10\%$  저항접지 ( $R=2.376 \text{ ohm}$ )

선로작용인덕턴스 =  $5/\pi \text{ mH/KM}$ , 선로의  $Z_1 = Z_2$

선로의 영상임피단스는 정상임피단스의 2배 저항과 정전용량은 무시한다.

각 변압기의 영상임피단스는 정상임피단스와 같다고 본다.



기준 용량을 100 [MVA]로 하고, 각 %임피던스를 구한다.

우선 선로 리액턴스는

$$X_l = \omega l = 2\pi f l = 2\pi \times 60 \times \left(\frac{5}{\pi} \times 10^{-3}\right) \times 100 = 60 [\Omega]$$

$$\%X_l = \frac{X_l \cdot P}{10 V^2} = \frac{60 \times (100 \times 10^3)}{10 \times 154^2} = 25.3 [\%]$$

$$\%X_{1l} = \%X_{2l} = 25.3 [\%]$$

$$\%X_{0l} = \%X_{1l} \times 2 \text{ 배} = 25.3 \times 2 = 50.6 [\%]$$

발전기 %리액턴스는

$$\%X_{1g} = \%X_{2g} = 20 \times \frac{100}{200} = 10 [\%]$$

발전기용 변압기의 %리액턴스

$$\%X_{1t} = \%X_{2t} = 10 \times \frac{100}{200} = 5 [\%]$$

중성점 접지 저항

$$R_n = 3 \times R = 3 \times 2.376 = 7.1148 [\Omega]$$

$$\%R_n = \frac{7.1148 \times 100 \times 10^3}{10 \times 154^2} = 3[\%]$$

고장점 F에서 본 합성 임피던스를 구한다.

$$\%X_{1A} = \%X_{1g} + \%X_{1f} + \frac{\%X_{1l}}{2} = 10 + 5 + \frac{25.3}{2} = 27.65[\%] = \%X_{2A}$$

$$\%X_{0A} = \%X_{0f} + \frac{\%X_{0l}}{2} = 5 + \frac{50.6}{2} = 30.3[\%]$$

$$\%X_{1B} = \%X_{1m} + \%X_{1f} + \frac{\%X_{1l}}{2} = 40 + 10 + \frac{25.3}{2} = 62.65[\%] = \%X_{2B}$$

$$\%X_{0B} = \%X_{0f} + \frac{\%X_{0l}}{2} = 10 + \frac{50.6}{2} = 35.3[\%]$$

따라서,  $\%X_1 = \%X_2 = \frac{X_{1A} \times X_{1B}}{X_{1A} + X_{1B}} = \frac{27.65 \times 62.65}{27.65 + 62.65} = 19.18[\%]$

$$\%Z_0 = \frac{jX_{0A} \times (R_n + jX_{0B})}{jX_{0A} + (R_n + jX_{0B})} = \frac{j30.3 \times (3 + j35.3)}{j30.3 + (3 + j35.3)}$$

$$= 0.63 + j16.33 = 16.34[\%]$$

$$I_0 = \frac{E}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \text{에서 } \%Z = \frac{Z_n I_n}{E} \times 100 \text{ 이므로}$$

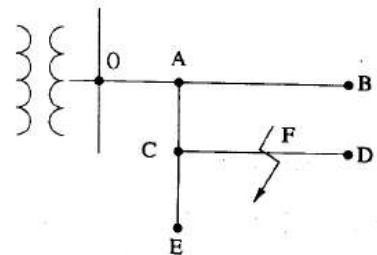
$$I_0 = \frac{100 I_n}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2} = \frac{100 \times \frac{100000}{\sqrt{3} \times 154}}{16.34 + 19.18 + 19.18} = 685.4[\text{A}]$$

$$I_0 = I_1 = I_2$$

그러므로, 지락 전류는 다음과 같다.

$$I_g = 3I_0 = 3 \times 685.4 = 2056.2[\text{A}]$$

그림과 같은 22.9.kV 배전선로에서 C점으로부터 2km 지점에 고장저항 5[Ω]의 1선지락 고장이 발생하였을 경우 고장 전류를 구하시오. 단, 선로의 단위길이당 임피던스는 다음과 같다. 또한, 구간별 선로길이는 0-A:2km, A-B:4km, A-C: 2km, C-D:4km, C-E:2km이다.



$$I_g = \frac{3 \cdot E}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

$$Z_0 = (1 + j2) \times 6[\Omega] = 6 + j12[\Omega]$$

$$Z_1 = Z_2 = (0.3 + j0.4) \times 6[\Omega] = 1.8 + j2.4[\Omega]$$

$$Z_F = 5[\Omega]$$

$$\therefore I_g = \frac{3 \cdot \frac{22.9}{\sqrt{3}} \times 10^3}{6 + j12 + 2(1.8 + j2.4) + 5} = \frac{22.9 \times 10^3 \times \sqrt{3}}{24.6 + j16.8}$$

$$= \frac{22.9 \times 10^3 \times \sqrt{3}}{\sqrt{24.6^2 + 16.8^2}} \angle -\tan^{-1} \frac{16.8}{24.6} = 1.331 \angle -34.3^\circ[\text{A}]$$

