단락전류 개념 및 계산방법

작성자 : 이 종 수

목 차

내용 페이지

1 기본개념 1

2 단락고장의 개념 1

2.1 단락의 의미 (Short Circuit) 1

2.2 전력계통 고장의 종류 3

2.2.1 1 선 지락 고장 (Single Line-to-Ground Short Circuit) 3

2.2.2 2 선 지락 고장 (Double Line-to-Ground Short Circuit) 3

2.2.3 선간 단락고장 (Line-to-Line Short Circuit) 3

2.2.4 3 상 단락고장 (Three-Phase short Circuit) 4

2.2.5 고장종류별 비교 4

3 단락전류의 계산 5

3.1 전력계통 분석의 종류 5

3.1.1 전력조류계산 (Load Flow Analysis) 5

3.1.2 단락전류 계산 (Short Circuit Analysis) 5

3.1.3 안정도 해석 (Stability Analysis) 5

3.1.4 Motor 기동 특성분석 (Motor Stating Analysis) 6

3.1.5 고조파 분석 (Harmonic Analysis) 6

3.1.5 스위칭 과도현상 분석 (Switching transient Analysis) 6

3.2 단락전류의 계산 7

3.2.1 전력계통의 구성 8

3.2.2 3 상 단락전류계산의 기본가정 9

3.2.3 임피던스도의 작성 (Impedance Map) 9

3.2.4 회로의 단순화 및 단락전류 계산 11

4 단락전류 계산에 필요한 요소 12

4.1 %Z 의 개념 12
4.2 기준전압 및 기준용량으로 환산 17
4.3 선로 임피던스의 환산 19
4.4 발전기의 임피던스 20
4.4 전동기의 임피던스 21

5 단락전류의 특성 22

6 단락전류의 계산과정 29

6.1 Step 1 30
6.2 Step 2 30
6.3 Step 3 30
6.4 Step 4 33
6.5 Step 5 33
6.6 Step 6 34

단락전류의 개념 및 계산방법

1 기본개념

전력계통은 항상 고장의 위험에 노출되어 있으며 고장원인 또한 다양하여 고장없이 전력계통을 운용하는 것은 현실적으로 불가능한 것이 사실이다.

또한 전력계통에서 고장이 발생하면 대전류가 흐르거나 과전압이 발생하여 기기의 절연을 위협하거나 기기에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 고장이 발생했을 경우에 대한 대책은 매우 중요하다고 할 수 있다.

다양한 전력계통의 고장 중에서 단락고장의 경우 단락지점으로 일시에 대전류가 흐르게 되어 전력계통에 가장 심각한 파급영향을 미치며 신속히 고장구간을 선택하여 차단하지 않으면 전계통으로 파급되어 예기치 못한 정전사고로 발전하게 된다.

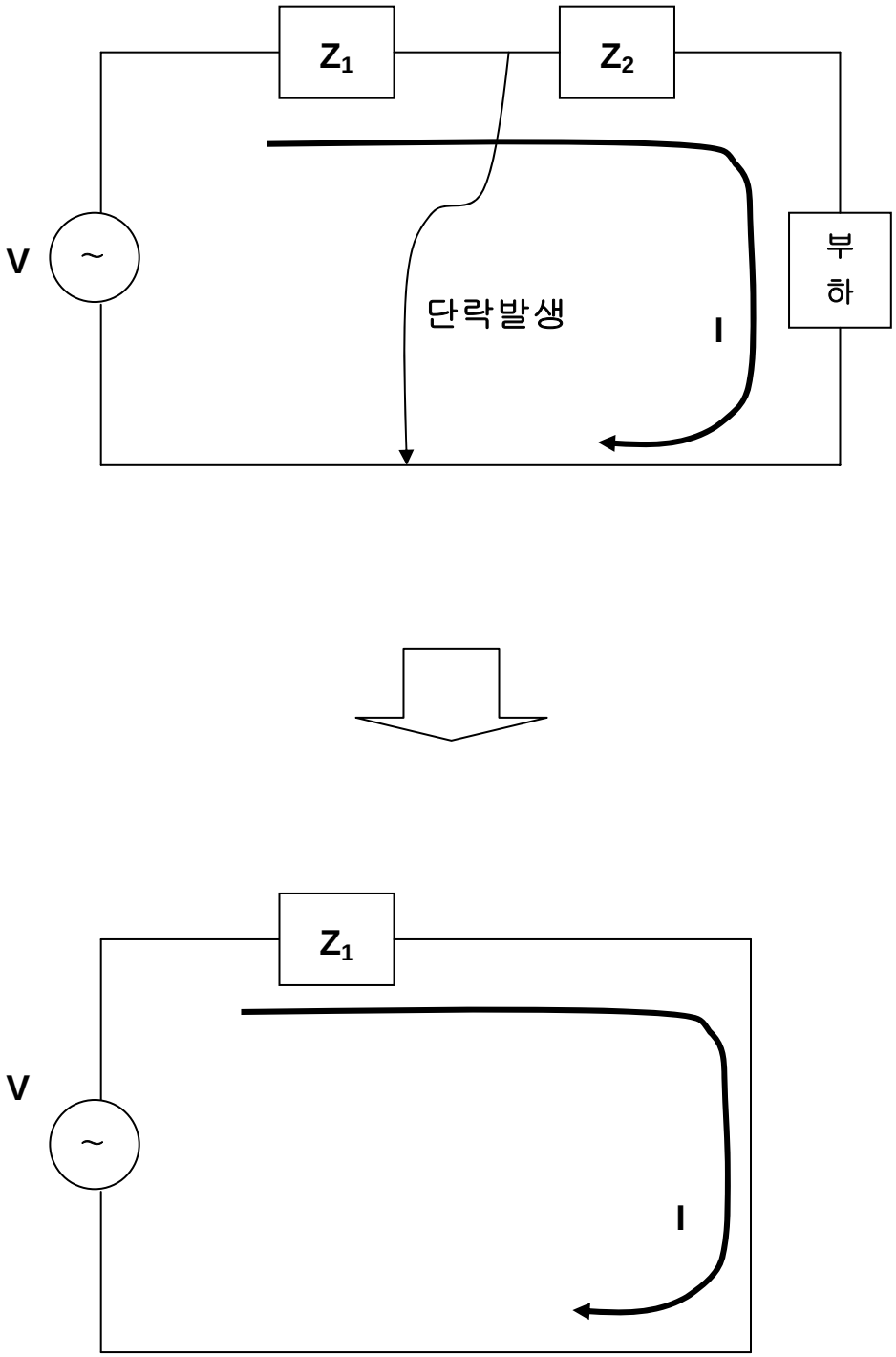
따라서 전력계통을 구성할 경우 차단용량의 계산 및 이에 적합한 기기의 선정, 보호계전기의 협조 등을 위하여 이에 대한 검토가 반드시 필요하게 된다.

2 단락고장의 개념

2.1 단락의 의미 (Short Circuit)

전력계통에서 단락 (Short Circuit) 이란 말 자체가 의미하듯이 회로가 짧아졌다는 것으로서 단락고장이 발생하면 원래 정상적인 회로의 기능을 잃고 단락지점까지만 회로로 취급할 수 있다는 것을 뜻한다.

이를 이해하기 쉽도록 단상 회로를 가지고 그림으로 설명하면 다음과 같은 개념이다.



[단락발생 회로의 등가모델]

2.2 전력계통 고장의 종류

우리가 사용하는 전력계통은 대부분 교류 3 상 회로로 구성되며 여기서 발생할 수 있는 대표적인 고장의 종류는 가공선에서의 단선사고 및 가공선로와 지중 Cable 선로의 지락사고, 단락사고이며 여기서는 단락전류의 개념을 다루고 있으므로 지락고장과 단락고장에 대하여 기술하도록 한다.

2.2.1 1 선 지락 고장 (Single Line-to-Ground Short Circuit)

3 상중 1 상이 접지된 고장으로서 전력계통의 고장 중 80% 이상을 차지하는 가장 빈번히 발생되는 고장이며 지락이 포함되지 않은 단락고장은 없다고 할 정도이며 즉시 제거되지 않으면 더 큰 단락고장으로 발전하게 된다.

지락고장 발생 시 지락전류가 대지를 통해 전원으로 귀환하므로 전류로서 지락고장을 검출하기 위해서는 전원의 중성점을 접지하는 것이 매우 중요하며 중성점의 접지가 현실적으로 어려운 경우 중성점의 전위변동으로 지락고장 유무를 검출하는 전압검출방식을 사용하기도 한다.

2.2.2 2 선 지락 고장 (Double Line-to-Ground Short Circuit)

3 상중 2 상이 동시에 지락되는 고장으로서 비접지 계통 및 고 저항접지 계통에서 1 상이 지락 되어 있는 상태에서 또다른 1 상이 접지되는 경우에 해당하며 확률적으로는 매우 낮다고 한다.

하지만 2 상 접지고장은 전력계통의 고장 중 가혹한 고장중의 하나이디.

2.2.3 선간 단락고장 (Line-to-Line Short Circuit)

3 상중 2 상이 서로 단락되는 고장으로서 작업실수 및 가공선의 1 상이 단선되면서 다른 상에 접촉되는 경우 등 특별한 경우가 아니면 잘 발생하지 않는 고장이라 한다.

또한 고장전류의 계산 및 예측도 간단하게 되는 경우가 대부분이다.

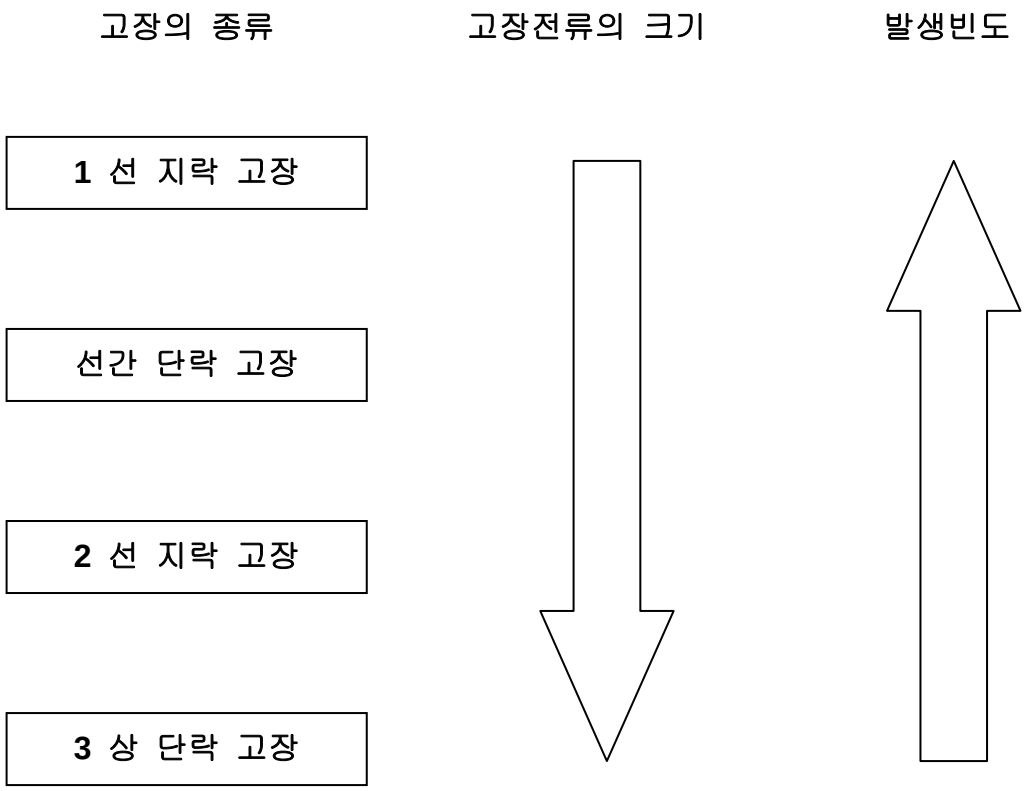
2.2.4 3 상 단락고장 (Three-Phase short Circuit)

3 상이 전부 단락되는 고장으로서 주로 1 선 지락고장에 의한 Flashover 로 주변의 절연이 파괴되면서 확대 파급되는 2 차 고장이라고 볼 수 있다.

이 3 상 단락고장은 전력계통의 고장 중 계통에 주는 충격이 가장 큰 가장 가혹한 고장 이다.

2.2.5 고장종류별 비교

위에서 언급한 고장의 종류별로 특징을 요약하면 다음과 같다.



[화살표 방향이 증가를 나타냄]

3 단락전류의 계산

전력계통을 구성계획을 검토할 경우 단락전류를 계산하는 것은 경제적인 전기설비의 구성, 보호계전 시스템의 협조, 계통의 안정도 등을 예측하는데 매우 중요하며 필수적인 사항이며 전력계통을 분석하는 종류에는 다음과 같이 활용목적에 따라 분류된다.

3.1 전력계통 분석의 종류

3.1.1 전력조류계산 (Load Flow Analysis)

전력계통을 흐르는 무효 및 유효전력의 크기, 전입 및 전류의 분포를 분석하여 각종 설비의 정격용량, 보호계전기의 과전류 Setting, Load Shedding, 향후 증설 및 유지보수 계획 등을 파악함을 목적으로 하는 수행하며 계통이 복잡해질수록 수작업으로 하는 것이 불가능하여 주로 컴퓨터 Simulation 으로 수행한다.

또한 단순한 방사상 계통으로 구성되며 대용량 자가용발전기가 없는 수용가에서는 전력조류를 단순히 부하분포로서 알 수 있으므로 별로 실시하지 않는다.

3.1.2 단락전류 계산 (Short Circuit Analysis)

앞에서 설명한 대로 전력계통의 운용에 커다란 영향을 미치는 단락고장이 발생했을 때 각 지점에서의 단락전류 분포 및 전압강하 등을 분석하여 각 설비의 단락용량, 보호계전기의 동작시간을 결정함을 목적으로 하며 가장 기본적이면서 중요한 분석으로서 이 역시 계통이 단순하면 수작업으로 가능하지만 정확한 분석을 위하여 컴퓨터 Simulation 을 이용하여 수행한다.

3.1.3 안정도 해석 (Stability Analysis)

전력계통에서 발생하는 대용량 부하의 분리 및 투입, 고장발생에 따른 계통이 받는 충격에 대하여 지속적인 운전의 가능여부를 알아보기 위한 것으로서 전력회사 및 대용량 열 병합 발전기를 병렬 운전하는 대규모 수용가에서 수행한다.

이를 통해 안정도를 유지하기 위한 부하의 급변허용범위, 보호계전기의 임계 동작시간 (CCT : Critical Clearing Time), 단락전류의 최대 허용범위, 필요한 차단기의 동작성능이 결정되는 중요한 분석이다.

3.1.4 Motor 기동 특성분석 (Motor Stating Analysis)

석유화학공장, 제철공장과 같은 대규모 수용가에서는 대용량 유도전동기를 다수 포함하고 있는데 유도전동기의 특성상 저 역률의 커다란 기동전류를 필요로 하며 이로 인해 수용가 내의 계통에 순간적인 전압강하를 유발하게 되어 운전중인 다른 설비에 영향을 미칠 수 있는데 이를 방지하기 위해 대용량 유도전동기 기동시의 전압강하를 허용 범위 내로 한정시킬 수 있도록 계통을 구성함을 목적으로 하는 분석이며 이를 통해 대용량 유도전동기의 기동방식이 결정된다.

참고로 대용량 유도전동기의 기동방법에는 전전압 기동법과 기동전류를 제한하기 위한 감전압 기동법이 있으며 감전압 기동법에는 Star-Delta 기동법, 리액터 기동법, 단권변압기 기동법 (Auto-Transformer, Condolfa) 등이 대표적이다.

3.1.5 고조파 분석 (Harmonic Analysis)

우리가 사용하는 전력계통은 이론적으로 완전한 Sine 파의 형태로 취급하지만 여러 가지 이유로 인해 양간의 고조파를 함유하고 있는 약간은 불완전한 형태를 가지게 되는데 이 고조파가 너무 많이 존재하게 되면 전력의 품질을 저하시킴은 물론 무효전력 보상용 진상콘덴서와 같은 고조파에 대한 내역이 약한 설비의 수명단축, 안정도의 저하, 불필요한 손실 등이 발생하게 된다.

특히, 전력전자설비의 급속한 발전에 따라 수용가의 전력계통에서도 VVVF, DC Motor Controller, Static Condenser 등 다수의 전력 변환용 전력전자설비가 접속되어 다량의 고조파가 존재하게 되어 많은 문제를 야기하게 되었다.

따라서 이를 방지하여 전력의 품질향상을 하기 위해서는 적절한 장소에 고조파 제거용 Filter 의 설치필요성이 대두 되었으며 여기에 필요한 것이다.

3.1.5 스위칭 과도현상 분석 (Switching transient Analysis)

전력계통의 운용에는 고장의 차단, 전력조류의 제어 등을 위해 차단기의 동작이 필요하게 되는데 차단기 동작 시 급격한 전류변화에 따라 Surge 가 발생하게 되며 높은 과전압에 의해 예기치 못한 사고가 발생할 수 있으므로 이 스위칭 과전압을 적절히 해소 시켜야 하며 이 분석을 통해 발생가능 최대 Surge 전압을 분석하여 Surge Arrester 의 설치필요 유무를 파악할 수 있다.

3.2 단락전류의 계산

위에서 설명된 각 분석은 그 목적대로 대단히 중요하지만 주로 대전력 장거리의 전력을 수송하는 전력회사에서 주로 수행하는 분석은 제외하고 Complex 와 같은 대규모 수용가의 전력계통 운용에 가장 기본이 되는 단락전류 계산에 한하여 그 계산을 위한 방법 및 절차에 대하여 간단히 알아보도록 한다.

또한 단락전류의 계산 중에서도 계통에 가장 가혹한 3 상 단락 고장시의 전류를 구하는 방법에 한해서 설명하도록 한다.

참고로 앞에서 설명된 고장종류 중 3 상 단락고장 이외의 고장이 발생되었을 경우 이들의 개략적인 크기를 접지방식에 의해 구분하면 다음과 같다.

[다른 고장의 3 상 단락전류에 대한 개략 값]

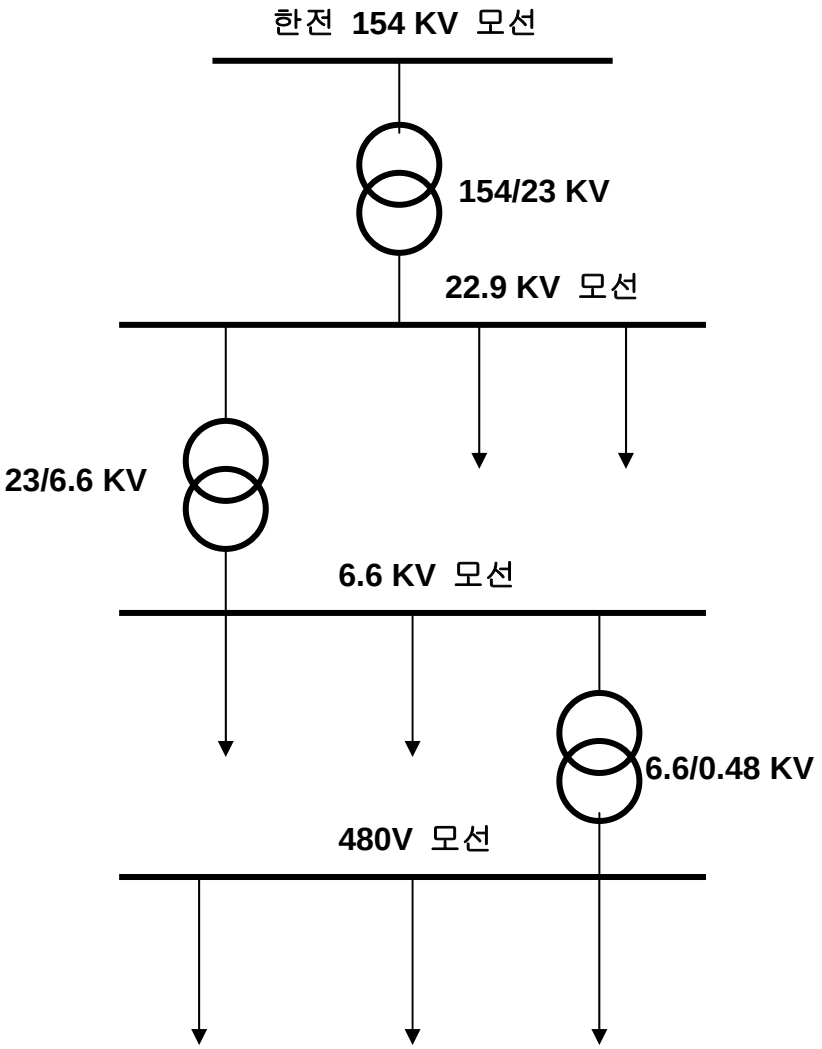
접지방식 / 고장종류	직접접지	저항접지	비접지
3 상 단락	100 %	100 %	100 %
1 선 지락	40 % 이내	저항 값에 의함	0 %
2 선 지락	90 % 이내	86.6 % 이상	86.6 %
2 상 단락	86.6 %	86.6 %	86.6 %

위의 표는 고장 지점의 저항을 무시할 수 있는 (즉, $\mathbf{R_F = 0}$) 이상적인 고장이 발생했을 경우를 가정한 것이며 단순히 개략 값으로서 정확한 값은 계통을 분석하여 얻어야 한다.

특히 지락고장에 의한 전류의 경우 중성점의 접지방식 및 지락 지점의 형상과 밀접한 관계가 있으므로 지락보호 계전기의 Setting 값을 결정할 경우와 같이 정확한 지락 전류의 크기를 알고자 할 때는 정확한 데이터를 입력을 통해 컴퓨터 Simulation 을 실시하여야 함을 밝혀 둔다.

3.2.1 전력계통의 구성

전력계통의 구성방법에는 규정으로 정해진 일정한 형태는 없으며 Complex 와 같은 대부분의 수용가에서 실제로 사용하는 배전계통은 대부분 방사상 계통 (Radial System) 으로 구성되어 있으므로 이를 기준으로 설명하도록 한다.



[대규모 수용가의 단순 방사상 배전 계통]

3.2.2 3 상 단락전류계산의 기본가정

대규모 수용가의 전력계통에서 3 상 단락전류를 계산할 경우에는 다음과 같은 기본 가정을 기준으로 수행한다.

한전의 수전 모선을 무한 모선으로 함

3 상은 평형 되어 있고 따라서 어느 한상만을 계산의 기준으로 하여 수행함.

모든 임피던스는 한곳에 집중되어 있는 임피던스 소자로 취급함.

계산의 기준이 되는 모선들의 임피던스 및 각 선로의 정전용량 성분에 의한 임피던스는 무시함.

역기전력을 갖는 유도전동기가 공급하는 단락전류는 일괄 취급함.

위와 같은 가정을 기준으로 주어진 전력계통을 우리에게 익숙한 1 개의 전압원과 1 개의 임피던스 소자를 갖는 단상회로로 등가화 하여 단락전류를 계산한다.

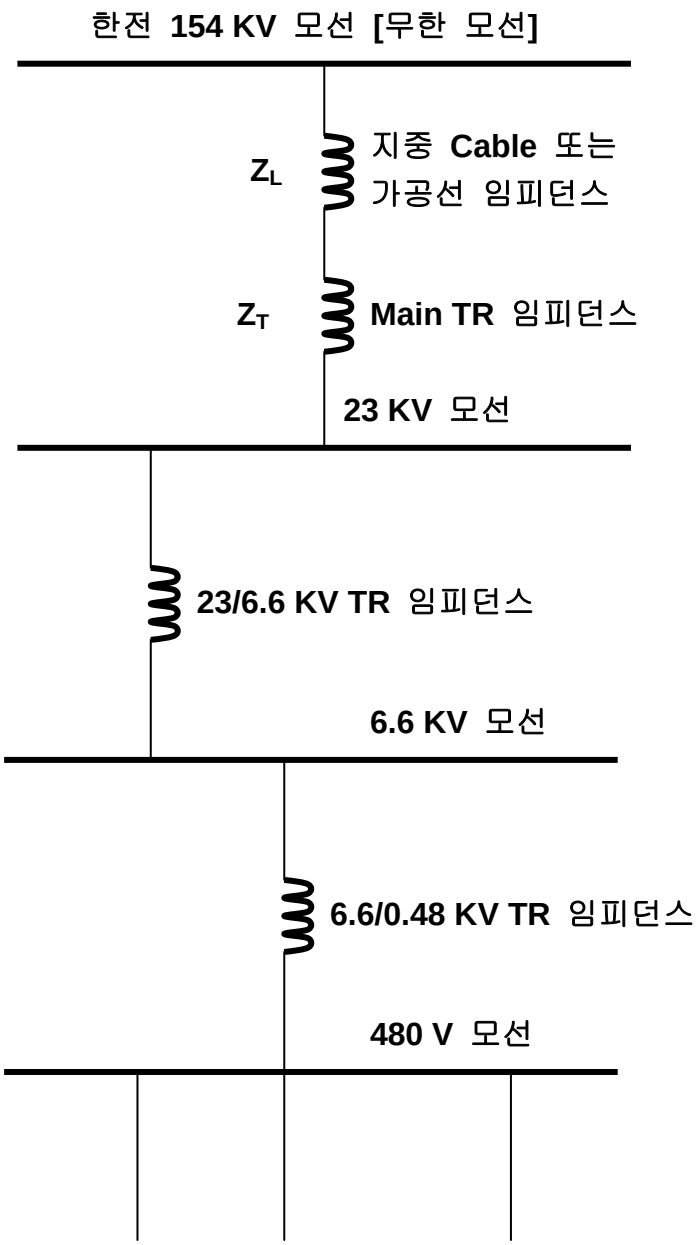
다음에 설명되는 임피던스 도 (Impedance Map) 를 작성하고 이를 직●병렬회로의 임피던스 합성규칙에 의해 단순화 해 가면 된다.

3.2.3 임피던스도의 작성 (Impedance Map)

주어진 전력계통에 대한 임피던스 도는 임피던스를 갖는 소자들만을 표시한 회로도를 의미하며 여기에 사용되는 임피던스의 값은 Percentage (%) 또는 단위법 (Per Unit) 을 사용하며 컴퓨터 Simulation 에는 주로 단위법을 사용한다.

어느 것으로 표시하나 결과는 마찬가지이며 다만 단락전류 계산에 사용되는 임피던스 값은 동일한 기준전압과 기준용량을 적용한 값임을 알아 두어야 한다.

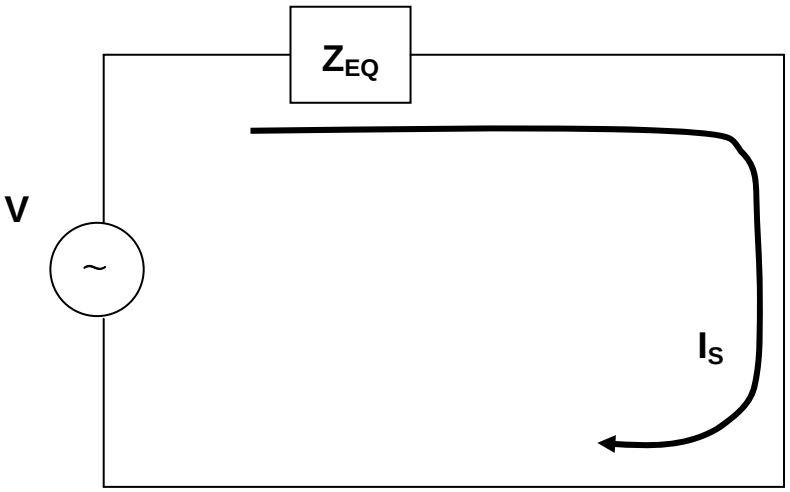
이러한 내용들에 대한 설명은 다소 복잡한 내용을 포함하고 있으므로 생략하며 지금까지의 설명을 종합적으로 이해하는 측면에서 앞에서 기술한 전력계통 도면을 가지고 이에 대한 임피던스 도를 작성해 보도록 한다.


한전 154 KV 모선 [무한 모선]
Z_L
지중 Cable 또는
가공선 임피던스
Z_T
Main TR 임피던스
23 KV 모선
23/6.6 KV TR 임피던스
6.6 KV 모선
6.6/0.48 KV TR 임피던스
480 V 모선

[임피던스 Map]

3.2.4 회로의 단순화 및 단락전류 계산

앞의 임피던스 도를 고장점의 위치에 따라 합성해 나가면 결국 다음과 같이 될 것이다.



[단순화된 등가회로]

여기서

V : 계산에 사용된 기준전압

$\mathbf{Z_{EQ}}$: 고장발생 지점에서 합성한 등가 임피던스

$\mathbf{I_S}$: 고장발생 지점에서의 단락전류 ($\mathbf{I_S = V / Z_{EQ}}$)

앞에서 설명한 개념을 기준으로 이와 같은 과정을 거쳐 단락전류가 계산된다.

물론 복잡한 과정은 컴퓨터가 해결해 주어 문제는 없지만 앞에서 언급된 개념은 아주 기본적인 것으로서 정확한 이해를 통해 컴퓨터의 Simulation 결과를 예측할 수 있으며 입력된 Data 의 오류여부 등도 찾아낼 수 있는 것이다.

4 단락전류 계산에 필요한 요소

단락전류를 계산하기 위해서는 단락전류의 통로가 되는 설비들의 임피던스 값을 알아야 하며 대부분의 물리량들은 제작사의 관련자료 및 단선도상에 잘 나타나 있다.

여러 설비의 임피던스중 단락전류의 크기를 결정하는 가장 중요한 것은 변압기의 임피던스 및 Cable 의 임피던스이며 이들의 결정요령을 알아보도록 한다.

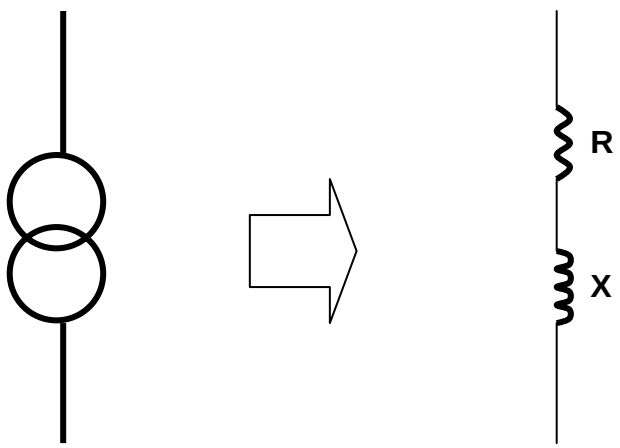
또한 퍼센트 임피던스 (**% Z**) 의 개념을 파악하여 계산을 좀더 용이하게 수행하는 방법을 알아보도록 한다.

4.1 %Z 의 개념

변압기에 관련된 자료를 검토하거나 전문서적을 읽다 보면 **%Z** (Percent Impedance) 라는 용어를 자주 접하게 되는데 아주 쉬운 개념이며 다음과 같이 정의된다.

%Z 는 "**변압기에 정격전류가 흘렀을 때 변압기 자체 임피던스에 의한 전압강하의 2 차 정격전압에 대한 퍼센트**" 라고 정의 되어 있다.

다음 그림을 가지고 개념을 잡아보자.



[변압기의 임피던스 표시]

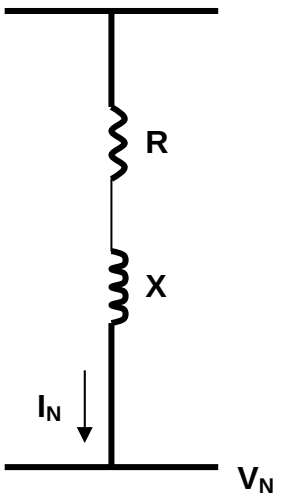
전기 회로적인 측면에서 보면 변압기도 철심과 권선으로 이루어진 다시 말해서 저항과 리액턴스로 구성된 자체의 내부 임피던스를 갖는 전기소자의 하나이다.

따라서 전력계통을 설계하고 해석할 경우에는 앞의 그림과 같이 변압기를 회로 소자로 변환시킬 수 있는데 변압기에 전류가 흐르면 당연하 변압기 자체에 전압강하가 생기기 마련이다.

특히 2 차에 정격전류가 흐를 때의 전압강하가 얼마가 되는 지가 중요한 요소로 되는데 이는 정격부하가 인가되었을 때 변압기의 2 차 전압이 얼마가 되는 지를 알아야 그때의 현상을 예측할 수 있기 때문이다.

따라서 정격부하 상태의 2 차 전압 강하를 표시해 주는 것이 바로 **%Z** 이며 변압기의 정격 2 차 전압을 $\mathbf{V_N}$ 및 정격 2 차 전류를 $\mathbf{I_N}$, 그리고 자체 임피던스를 **Z [Ω]** 이라고 하면 정의한 대로 **%Z** 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\% Z = \frac{Z[\Omega] \bullet I_N}{V_N} \times 100\ [\%]$$



정격 2 차 전압 : $\mathbf{V_N}$

정격 2 차 전류 : $\mathbf{I_N}$

변압기 자체 임피던스

Z = R + jX [Ω]

[변압기의 회로 모델]

그런데 One Line Diagram 이라든지 다른 자료에 보면 통상 변압기의 전압과 용량만 및 **%Z** 만을 기록하고 정격전류는 없는 경우가 대부분이며 따라서 전압과 용량만 주어도 **%Z** 를 계산할 수 있어야 한다.

이를 위해서 앞의 식을 전압 [KV] 과 용량 [KVA] 을 사용하여 **%Z** 를 구할 수 있는 식으로 변환해 보자.

$$\%Z = \frac{Z[\Omega] \bullet I_N}{V_N} \times 100[\%]$$

$$= \frac{Z[\Omega] \bullet I_N \bullet V_N}{V_N \bullet V_N} \times 100 = \frac{Z[\Omega] \bullet P[VA]}{V_N{}^2} \times 100[\%]$$

$$= \frac{Z[\Omega] \bullet P[KVA]}{1000\, V_N{}^2[KV]} \times 100[\%] = \frac{Z[\Omega] \bullet P[KVA]}{10 V_N{}^2}[\%]$$

식이 변환되는 과정은 이해하는데 별 어려움이 없을 것이므로 설명은 생략하며 용량과 전압 및 자체 임피던스 값을 알면 **%Z** 는 바로 구해지며

반대로 전압과 용량 및 **%Z** 가 주어지면 자체 임피던스 역시 다음과 같이 바로 구해낼 수 있음을 위 식으로부터 알 수 있을 것이다.

$$\%Z = \frac{Z[\Omega] \bullet P[KVA]}{10\, V_N{}^2[KV]}[\%]$$

$$\therefore\ Z[\Omega] = \frac{\%Z \bullet 10\, V_N{}^2[KV]}{P[KVA]}$$

그러면 **[Ω]** 으로 표시되는 내부 임피던스를 그대로 사용하지 이런 불편한 계산 과정을 거치게 하여 그렇지 않아도 이해하여야 할 것이 너무 많은 우리 전기쟁이들에게 부담을 주는가 하고 불평을 할 수도 있는데 만약 이렇게 하지 않으면 아마도 엄청나게 불편할 것이다.

왜냐 하면 우리가 알고 있듯이 변압기의 자체 임피던스란 1 차와 2 차의 임피던스를 합성한 것인데 전압 (권수 비) 에 따라 그때마다 일일이 계산을 해주어야 하는 그야말로 귀찮은 일이 발생하게 되므로 **%Z** 를 사용하는 주 목적은 바로 편리함에 있다는 사실만큼은 기억하기 바란다.

%Z 의 결정 및 대표적인 개략 값

그러면 변압기를 제작할 때 **%Z** 는 어떻게 결정되며 사용자는 **%Z** 를 어떤 근거로 제작사에게 요청하는지 알아보도록 한다.

변압기를 제작할 때 **%Z** 는 고압권선 및 저압권선의 절연 층의 두께, 즉 전압에 따라 정해지며 주로 정해지며 용량에는 별 영향을 받지 않는다고 한다.

물론 변압기의 용량이 커지면 단락전류가 증가하게 되고 이로 인해 후단 설비의 단락용량이 증가하게 되어 설비가 그만큼 튼튼해 져야 한다.

따라서 사용자는 전압에 의해 결정되는 제작사의 표준에 따른 **%Z** 를 단락전류 등 경제적인 점을 고려하여 사용자의 설비에 가장 적합하고 안정적인 **%Z** 를 결정하고 제작사에 주문 시 요청하게 되는 것이다.

이렇게 하여 변압기의 **%Z** 는 결정되며 다음 표는 전압에 따른 대표적인 **%Z** 의 예를 보여준다.

[전압에 따른 변압기의 대표적인 %Z]

사용 선간 전압 **[KV]**	**%Z**
3 ~ 6	3
10 ~ 20	5
30	5.5
60 ~ 70	7.5
100	9
140 ~170	11
250	12

Note : 본 표의 자료는 송길영 교수의 "송배전공학" 에서 인용했음

%Z 가 너무 작으면 (즉 내부 임피던스가 너무 작으면) 단락전류가 증가하여 설비가 비경제적으로 될 수 있고 너무 크면 정상운전 시 손실이 증가하여 운전효율이 저하하게 되어 역시 비경제적으로 되므로 이점을 고려하여 최적의 **%Z** 가 선정될 수 있도록 이 개념을 잘 파악하고 있어야 한다.

작성자의 경험으로 볼 때 우리 전기쟁이들이 개념적으로 혼돈하고 있는 또 한 가지 사항이 있는데 그것은 정격전류가 흐를 때 2 차의 전압이 정격에서 **%Z** 만큼 강하 하는 것으로 알고 있는데 이는 그렇지 않다.

예를 들어 5 % 의 **%Z** 를 갖는 2 차 전압이 6.6 KV 인 변압기에 정격전류가 흐르면 6.6 KV 에서 이것의 5% 인 330 V 만큼 강하하여 2 차 전압이 6270 V 가 되는 것으로 잘못 알고 있다는 것이다.

그러나 사실은 2 차 정격전압은 정격전류가 흐를 때 **%Z** 에 의한 전압강하를 고려하여 결정된 것이며 위의 예에서 정격전류가 흐를 때 5% 강하를 빼낸 2 차 전압이 6.6 KV 라는 의미이다.

다시 말해 6.6 KV 변압기의 %Z 가 5 % 이면 무부하의 경우에는 6.6 KV 보다 5 % 높은 6930 V 가 되며 만약 정격부하의 반 (0.5) 이 인가되면 무부하 전압인 6930 V 에서 2.5 % 인 165 V 가 강하하여 6765 V 가 되며 정격부하가 인가되면 330 V 가 강하하여 6600 V 가 된다는 의미이다.

반대로 만약 정격부하에서 이미 **%Z** 만큼 떨어져 버린다면 어떻게 되겠는가 생각해 보면 금방 이해할 수 있는 일이며 이 개념을 잘 이해하고 있어야 한다..

따라서 변압기는 부하에 따라 미세 하게나마 2 차 전압이 변하게 되므로 전압변동에 취약한 부하용이나 또는 양질의 전력품질이 요구되는 곳에는 부하 시 전압조정기 (OLTC or ULTC) 를 적용하여 부하에 따른 전압변동을 보상 함으로서 항상 2 차 전압이 일정하게 유지될 수 있도록 하는 것이다.

4.2 기준전압 및 기준용량으로 환산

앞에서 언급했듯이 변압기는 1 차와 2 차의 전압이 다르며 용량도 각각 다르기 때문에 **% Z** 를 그대로 합계해 나갈 수는 없으며 반드시 기준용량 및 기준전압에 맞도록 모두 통일을 시킨 후에 집계를 해야 한다.

다시 말해 **% Z** 는 다음과 같은 식으로 표시되므로

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

만약 위의 식에서 기준전압과 기준용량이 각각 $\mathbf{V_1}$ 과 $\mathbf{P_1}$ 으로 바뀌며 $\mathbf{\%Z_1}$ 이라면 다음과 같이 될 것이다.

$$\%Z_1 = \frac{Z[\Omega] \bullet P_1[KVA]}{10V_1^{2}[KV]}$$

따라서 원래의 기준전압 및 기준용량에서의 **% Z** 는 새로운 기준용량 및 기준전압에서의 **% Z_1** 으로 다음과 같은 과정을 거쳐 바뀌게 된다.

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

$$\%Z_1 = \frac{Z[\Omega] \bullet P_1[KVA]}{10V_1^2[KV]}$$

$$\frac{\%Z_1}{\%Z} = \frac{\dfrac{Z[\Omega] \bullet P_1[KVA]}{10V_1^2[KV]}}{\dfrac{Z[\Omega] \bullet P[KVA]}{10V^2[KV]}}$$

$$\%Z_1 = \%Z \bullet \frac{P_1}{P} \bullet \left(\frac{V}{V_1}\right)^2$$

즉 새로운 % Z 는 용량에 비례하고 기준전압의 제곱에 반비례함을 보여준다.

이해를 돕기 위해 기준전압 100 KV, 기준용량 100 KVA 에서 % Z 가 5 % 인 것을 기준전압 200 KV, 기준용량 200 KVA 로 했을 경우의 새로운 값은 위 식으로부터 다음과 같이 된다는 것이다.

$$\%Z_{NEW} = 5\% \bullet \frac{200[KVA]}{100[KVA]} \bullet \left(\frac{100[KV]}{200[KV]}\right)^2$$

$$= 5\% \bullet 2 \bullet \frac{1}{4} = 2.5\%$$

이제는 기준용량 및 기준전압 변경에 따른 환산방법을 이해했을 것으로 본다.

기준용량과 기준전압을 결정하는 규칙은 없으며 계산하고자 하는 계통을 보고 가장 환산작업이 적은 것을 선택하는 것이 바람직하다.

4.3 선로 임피던스의 환산

단락전류를 결정하는 또 다른 중요한 것은 전류가 흐르는 선로의 임피던스로서 배전계통에서는 Cable 의 임피던스로 보면 된다.

앞에서도 언급했지만 배전계통에서 선로의 임피던스는 한곳에 집중된 것으로 취급하며 각 Feeder 에 사용된 Cable 의 임피던스는 제작사의 Catalog 에 잘 나와 있으므로 문제가 되지 않는다.

주어진 Z [Ω] 을 %Z 로 환산하는 것은 앞에서 설명된 식을 이용하면 되므로 매우 간단하며 환산하는 예를 들어본다.

Cable 의 포설길이가 500 [m], Catalog 의 선로정수가 저항은 1 [Ω/km], 인덕턴스가 20 [mH/km] 라고 하면 전체의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z = R + j2\pi fL\,[\Omega]$$
$$= 0.5 + j1.2\pi\,[\Omega]$$

만약 기준전압 및 기준용량을 22.9 [KV], 10000 [KVA] 라고 하면 주어진 식대로

$$\%Z = \frac{(0.5 + j1.2\pi) \bullet 10000}{10 \bullet 22.9^2}$$

와 같이 환산되며 결과는 직접 구해보기 바란다.

이와 같이 어떤 경우이던지 주어진 임피던스 [Ω] 는 위와 같은 환산과정을 거쳐 %Z 로 나타내면 된다.

4.4 발전기의 임피던스

발전기는 단락전류를 제공하는 전압원으로서 대부분 리액턴스 성분만으로 구성된 내부 임피던스를 가지며 단락 지속시간의 경과에 따라 다음과 같이 3 가지 종류로 구분한다.

초기과도 리액턴스 (X_d'' : Sub-Transient Reactance)

단락발생 직후 전기회로는 자체 특성으로 인해 직류성분이 나타나며 이 구간의 리액턴스를 말하며 통상 단락 후 수 사이클 이내의 값을 의미한다.

이 구간에서는 발전기의 단자전압, 내부유도기전력 및 여자전류 등 모든 조건이 고장전과 동일하다는 가정하에서 산정되는 값이다.

과도 리액턴스 (X_d' : Transient Reactance)

직류성분이 소멸되고 회로에 순수한 대칭성분의 단락전류가 흐르는 상태의 리액턴스로서 단락 후 수 시이클에서 2 초 이내의 값을 의미하며 이 경우에 있어서도 발전기의 모든 조건이 고장전과 동일한 것으로 보고 산정한다.

동기 리액턴스 (X_d : Synchronous Reactance)

단락 후 과도구간이 지나면 대부분 지상성분인 단락전류에 의해서 발전기 내부의 전기자 반작용이 발생하여 단자전압을 급격히 떨어뜨리게 되며 이로 인해 정격전류의 2 배 미만인 적은 단락전류로 안정하게 되는데 이때의 리액턴스를 의미하는 것이며 이 경우에 있어 발전기는 발전기의 내부유도기전력은 동일한 것으로 보고 산정한다.

이러한 모든 데이터들은 물론 발전기의 명판이나 매뉴얼에 자세히 기술되어 있어 용이하게 알아낼 수 있다.

여기서 설명한 과도현상 및 단락전류의 시간의 경과에 따른 변화과정은 뒤에서 다시 설명하도록 한다.

4.4 전동기의 임피던스

유도전동기의 단락전류 공급분은 용량 및 회전수에 따라 다양하며 그 지속시간도 매우 짧아 정확하게 산정하는 것은 불가능하며 모든 유도전동기가 한곳에 집중된 것으로 하되 **X_d''** 만을 고려하고 다음과 같은 용량기준으로 구분하여 취급한다.

용량	리액턴스	비고
50 HP 미만	1.67 **X_d''**	**X_d''** : 100 / 기동전류의 정격전류 배수 [%]
50 HP 이상	1.2 **X_d''**	통상 정격의 6 배로 함 (약 16.7 %)

이 이외에도 전력용 콘덴서의 전하방전에 따른 단락전류 공급분, 동기전동기의 공급분 등이 있으며 배전계통을 다룰 때 현실적으로 중요한 요소가 아니므로 상세한 내용은 생략한다.

따라서 유도전동기의 단락전류 공급분은 50 HP 미만의 용량 군에서는 전체의 정격전류에 3.2 배, 50 HP 이상의 용량 군에서는 전체의 정격전류에 5 배로 취급하면 되는 것으로 이해하면 된다.

위 표에 나타난 수치의 의미는 정격전류는 전동기의 입력전압을 정상상태 리액턴스로 나눈 값으로서 단락직후 공급전류를 제한하는 과도리액턴스의 6 배가 되므로 전동기의 정격전압을 **V_N**, 정격전류를 **I_N**, 동기리액턴스를 **X_d** 라고 하면

$$I_N = \frac{V_N}{Xd}$$

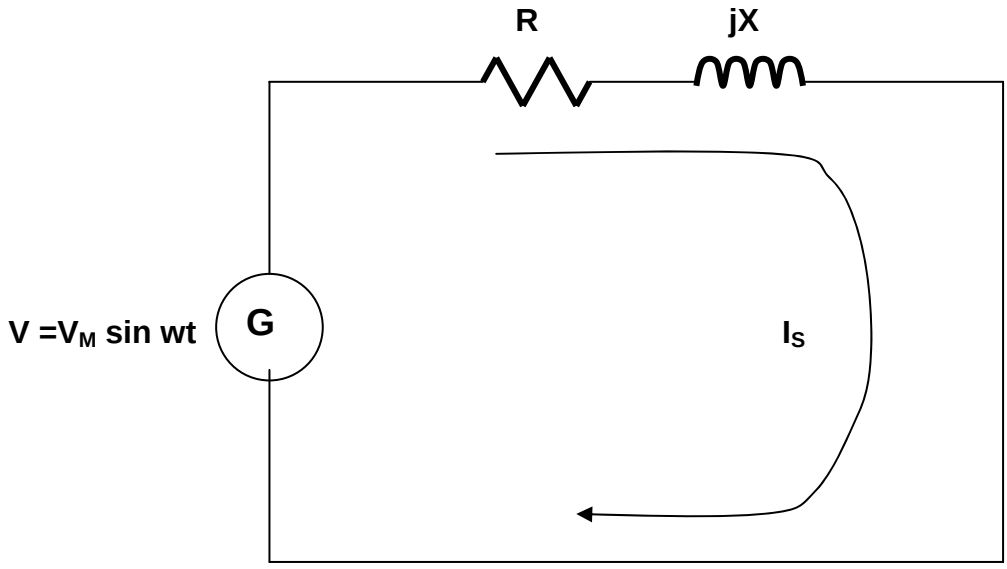
$$I_S = \frac{V_N}{X_d''} = \frac{V_N}{\frac{X_d}{6}} = 6 \bullet I_N (\because X_d'' = \frac{X_d}{6})$$ 와 같이 되기 때문이다.

표에 나타난 배수를 고려하면 앞에서 설명한 수치로 되는 것을 알 수 있다.

5 단락전류의 특성

앞에서 설명한 개념들을 가지고 단락전류의 특성에 대하여 알아본다.

전력계통에서 고장점이 어디든 관계없이 고장점에서 전원을 바라본 임피던스는 기준용량 및 기준전압으로 환산한 값을 가지고 집계할 수 있으며 최종적으로는 다음과 같은 회로로 될 것이다.



[단락회로의 등가모델]

위 그림에서 사용된 기호의 의미는 다음과 같다.

G : 계통의 등가 전압원 (발전기)

R : 단락지점까지의 총 저항

X : 변압기 내부 리액턴스를 포함한 총 리액턴스 **($X = 2\pi fL$)**

I_S : 등가모델 회로의 단락전류

w : 전원전압의 주파수 (또는 각속도 : **$w = 2\pi f$**)

약간 복잡하게 느낄 수 있겠지만 개념을 파악한다는 의미에서 등가모델의 전압 평형 방정식을 세우고 단락전류를 구해보도록 한다.

$$RI_S + L\frac{dI_S}{dt} = V_M \sin wt$$

먼저 단락직전의 전류의 초기조건은 부하전류를 무시하여 Zero 로 하고 양변을 Laplace 변환하면

$$RI + LsI = \frac{V_M \bullet w}{s^2 + w^2}$$

$$I = \frac{V_M \bullet w}{(R + sL)(s_2 + w_2)}$$

$$= \frac{V_M \bullet w}{L \bullet (s + \frac{R}{L})(s + jw)(s - iw)}$$

와 같이 된다.

$$= \frac{V_M \bullet w}{L} \bullet \frac{1}{(s + \frac{R}{L})(s + jw)(s - jw)}$$

이것을 Heaviside 의 부분분수 전개를 하여 각 항의 계수를 구하면

$$\frac{V_M \bullet w}{L} \bullet \frac{1}{(s + \frac{R}{L})(s + jw)(s - jw)}$$

$$= \frac{V_M \bullet w}{L} \bullet [\frac{A}{s + \frac{R}{L}} + \frac{B}{s + jw} + \frac{C}{s - jw}]$$

참고로 기억을 되살린다는 의미에서 **(사실 전기 엔지니어한테는 매우 기본적이며 필수적인 과정임)** 부분분수 전개항의 계수를 구하는 방법은 다음과 같다.

먼저 A 를 구하기 위해서는 위 식의 양변에 (s+R/L) 을 곱한 후에 이를 zero 로 하는 s 의 값, 즉, s= - R/L 을 대입하면 되는 것이다.

B, C 의 경우도 마찬가지이며 차례로 구해보자.

$$A = \frac{1}{(-\frac{R}{L} + jw)(-\frac{R}{L} - jw)} = \frac{L^2}{R^2 + w^2L^2} = \frac{L^2}{R^2 + X^2}$$

$$B = \frac{1}{(-jw + \frac{R}{L})(-2jw)} = -\frac{L}{j2w(R - jwL)} = -\frac{L}{j2w(R - jX)}$$

$$C = \frac{1}{(jw + \frac{R}{L})(2jw)} = -\frac{L}{j2w(R + jwL)} = -\frac{L}{j2w(R + jX)}$$

이렇게 구한 각 계수 A, B, C 를 부분분수로 전개해 놓은 원래의 식에 대입하고 Laplace 역 변환을 통해 최종적으로 $\mathbf{I_S}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I = \frac{V_M \bullet w}{L}[\frac{L^2}{R^2 + X^2} \bullet \frac{1}{s + \frac{R}{L}} - \frac{L}{j2w(R - jX)} \bullet \frac{1}{s + jw}$$

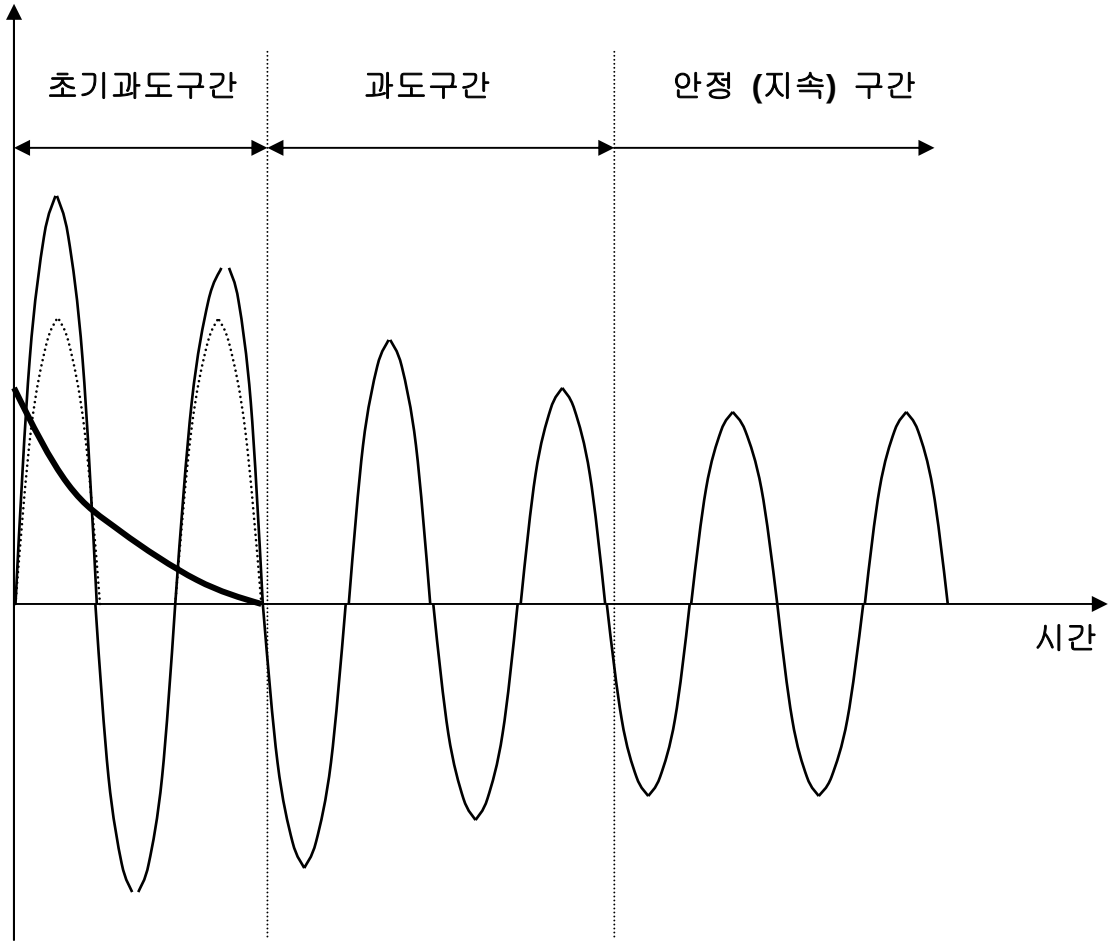
$$+ \frac{L}{j2w(R + jX)} \bullet \frac{1}{s - jw}$$

$$\therefore I_S = \frac{V_M \bullet X}{R^2 + X^2} e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_M}{R + jX} \sin wt$$

$$= \frac{V_M \bullet X}{R^2 + X^2} e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_M}{\sqrt{R^2 + X^2}} \sin(wt - \theta)[\theta = \tan^{-1}\frac{X}{R}]$$

이 결과식의 제 1 항이 직류성분을, 제 2 항이 교류성분을 나타내며 이 직류성분이 포함됨에 따라 초기 과도 단락전류가 비대칭 정현파로 되는 것이며 이 둘을 합성한 것으로 사고직전의 전압을 나눈 값이 바로 초기과도 리액턴스가 되며 시간이 경과함에 따라 점차 대칭 정현파로 안정해 가는 것이다.

이를 그림으로 나타내면 다음과 같이 구분된다.



[단락전류의 변화과정]

여기서 이제 위 식에서 나타난 몇 가지 물리적인 개념을 짚어보고 가도록 한다.

직류성분의 크기는 비대칭 (Asymmetrical) 교류성분의 크기를 결정하는 요소이며 이는 단락회로의 R : X 의 비율 **(R : X Ratio = X/R)** 및 전원전압의 최대치인 $\mathbf{V_M}$ 에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

$$I_{dc} = \frac{V_M \bullet wL}{R^2 + X^2} e^{-\frac{R}{L}t} = V_M \bullet \frac{\frac{X}{R}}{R(1+\frac{X^2}{R^2})} e^{-\frac{R}{L}t}$$

전체 전류의 실효치 (R.M.S) 는 당연히 다음과 같이 될 것이다.

$$I_{S.RMS} = \sqrt{I_{dc}^{\ 2} + I_{ac.RMS}^{\ 2}}$$

그런데 이를 매번 계산하는 것은 매우 번거로운 일이 되므로 대표적인 R : X 비율에 대한 연산 표를 만들어 활용한다.

즉, 단락회로의 R : X 비율에 따라 단락전류의 최대치 및 단락전류의 지연각인 역률 (Power Factor) 이 결정되므로 관련된 제반 사항을 고려하여 R : X 비율에 따라 직류성분의 기여에 따른 실제 최대 단락전류가 교류성분의 몇 배만큼 상승하는지 표에서 알 수 있는 것이다.

따라서 전력계통을 해석하여 단락전류를 계산할 경우 순수히 대칭교류대칭 성분만을 계산하고 여기에 배수 (Multiplying Factor, or, Asymmetrical Factor) 를 곱해서 전체전류를 구해내면 된다.

역시 전동기의 기여분에 대한 설명은 앞에서 설명한 내용을 참고하기 바란다.

대표적인 Asymmetrical Factor 의 값은 다음 표와 같다.

[Typical Asymmetrical Factors]

R : X Ratio (X/R)	대칭 교류성분에 대한 배수		
	단상 순시치	최대 단상 실효치	**3** 상 평균치
∞	2.828	1.732	1.394
100	2.785	1.697	1.374
50	2.743	1.662	1.354
33.3	2.702	1.630	1.336
25	2.663	1.599	1.318
20	2.625	1.569	1.302
16.6	2.589	1.540	1.286
14.25	2.554	1.512	1.271
13.46	2.520	1.486	1.256
11.01	2.487	1.461	1.242
9.93	2.455	1.437	1.229
7.07	2.336	1.350	1.182
6.17	2.282	1.312	1.162
4.90	2.183	1.247	1.127
4.05	2.095	1.193	1.099
3.07	1.960	1.122	1.062
2.04	1.765	1.045	1.023
1.732	1.694	1.026	1.013
1.02	1.517	1.002	1.001
0.88	1.486	1.0008	1.0004
0.75	1.460	1.0002	1.0001
0.62	1.439	1.00004	1.00002
0	1.414	1.0000	1.0000

Notes ; **1.** 위 표의 **Factor** 값은 **0.5 Cycle** 에서의 값임

2. 위 표는 **NEMA Publication AB-1 1986** 에서 발췌한 내용임

또한 차단기, Power Fuse, Bus Bar 등 접촉단자를 갖는 모든 전선로는 이에 상응하는 임피던스를 가지며 이들 역시 단락전류를 제한하는 요소가 되므로 정밀한 계산을 필요로 할 경우 이들에 대한 값들도 고려되어야 한다.

하지만 수용가 배전선로의 단락전류를 계산할 때는 실용적으로 이들의 값을 무시하여도 별 지장은 없다고 생각한다.

이들에 대한 내용은 IEEE Std 242 ; 1986 에 표로 요약되어 상세히 기술되어 있으며 이를 참고하라.

다음 표는 저압 차단기의 리액턴스 관련 데이터를 참고로 인용한 것이다.

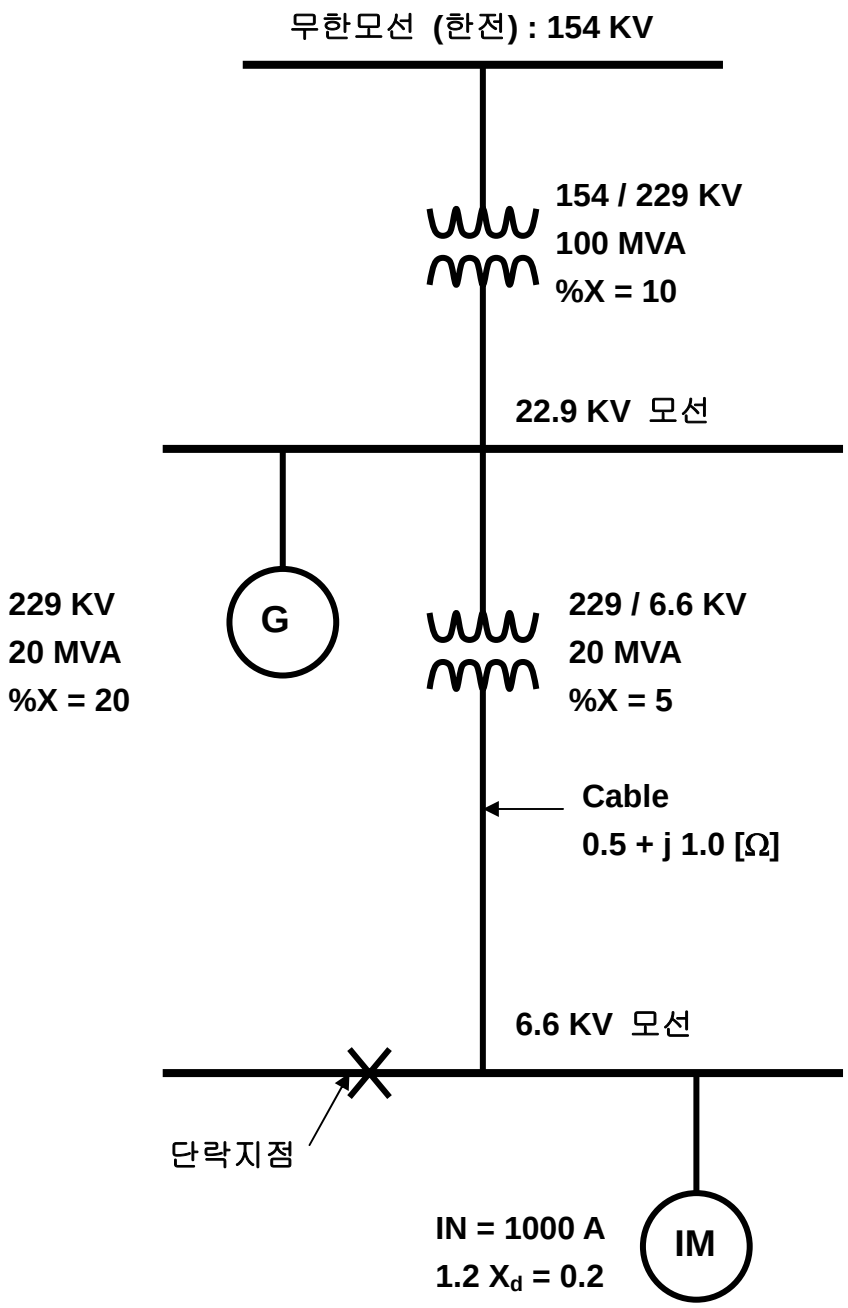
저압 차단기 리액턴스		
차단용량 [A]	**정격전류 [Ω]**	**리액턴스 [Ω]**
15000 and 25000	15 ~ 35	0.04
	50 ~ 100	0.004
	125 ~ 225	0.001
	250 ~ 600	0.0002
50000	200 ~ 800	0.0002
	1000 ~ 1600	0.0007
75000	2000 ~ 3000	0.0008
100000	4000	0.0008

MCCB 임피던스		
정격용량 [A]	**저항 [Ω]**	**리액턴스 [Ω]**
20	0.00700	무시
40	0.00240	무시
100	0.00200	0.00070
225	0.00035	0.00020
400	0.00031	0.00039
600	0.00007	0.00017

6 단락전류의 계산과정

이제는 수용가의 배전계통 하나를 예로 들어 단락전류를 계산해 가는 과정을 설명하도록 한다.

단락전류를 계산하고자 하는 배전계통은 다음과 같다.



6.1 Step 1

기준용량 및 기준전압을 결정

기준용량 **: 100 MVA,** 기준전압 **: 154 KV (∴** 기준정격전류 **I_N = 375 A)**

6.2 Step 2

각 **%Z** 및 선로 임피던스의 환산

이미 %Z 로 나타내어진 것은 용량만 고려하고 임피던스로 나타내어진 것은 앞에서 설명한 절차에 의해 환산

154/22.9 KV 변압기 **: j20 %**

229/6.6 KV 변압기 **: j25 % (**용량이 **5** 배로 됨**)**

22.9KV 발전기 **: j100 % (**용량이 **5** 배로 됨**)**

Cable : 2 + j4 %

이와 같이 계산된 결과를 기준으로 임피던스 Map 을 작성하고 고장지점에서 전원을 바라본 등가 %Z 를 임피던스의 직렬 및 병렬회로 합성규칙과 동일한 방법으로 구함.

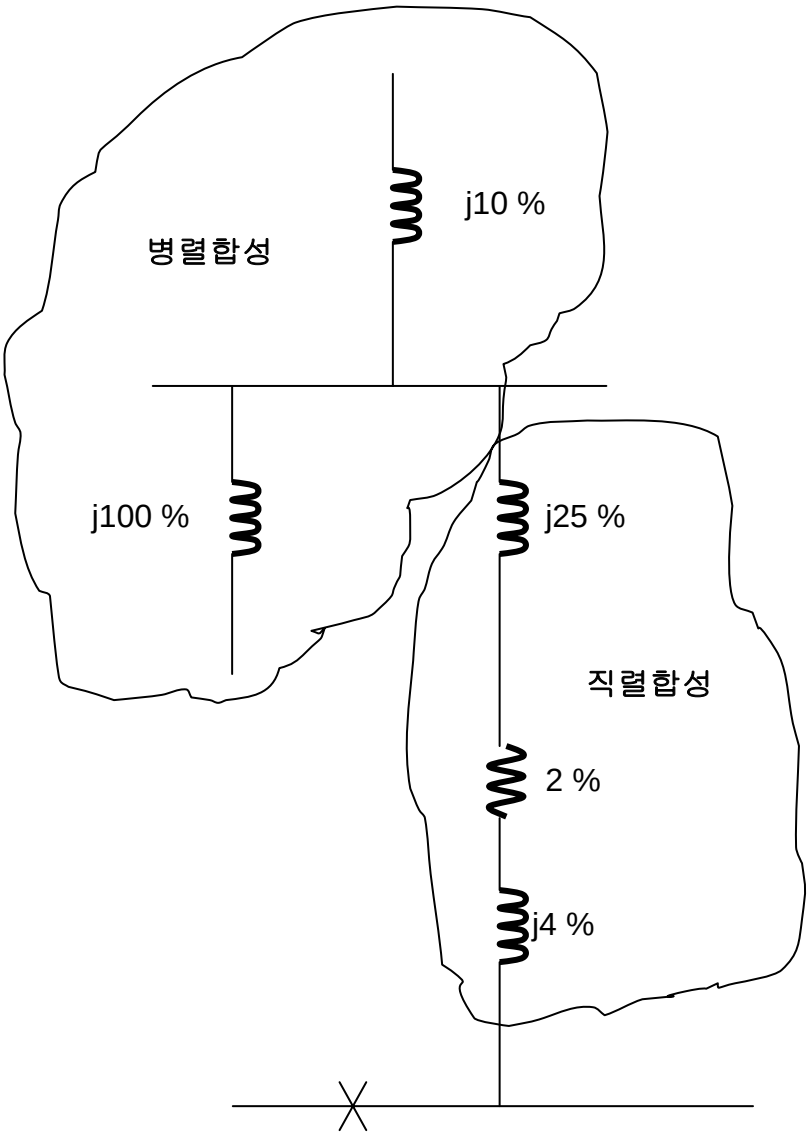
6.3 Step 3

대칭분 단락전류의 크기 계산

앞에서 구한 등가 %Z 를 가지고 대칭분 단락전류를 계산함.

$$\%Z = \frac{Z_{EQ} \bullet I_N}{V_N}$$

$$I_S = \frac{V_N}{Z_{EQ}} = I_N \bullet \frac{100}{\%Z}$$



[임피던스 Map]

병렬합성 부분의 %Z 는

$$\%Z = \frac{j100 \bullet j10}{j(100+10)} = j\frac{1000}{110}$$

와 같이 되며

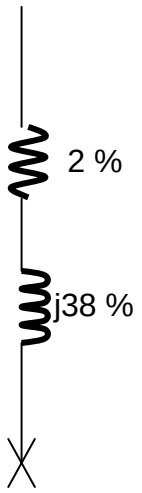
$$= j9.1$$

직렬합성 부분의 %Z 는

$$\%Z = j25 + 2 + j4 = 2 + j29$$ 와 같이 된다.

따라서 고장지점에서 전원을 바라본 전체의 등가 %Z 는 이 두 값이 직렬로 연결되어 있으므로

$$\%Z_{EQ} = j9 + 2 + j29 = 2 + j38$$ 로 단일화 된다.



[등가 임피던스 Map]

따라서 대칭 단락전류의 크기는

$$I_S = I_N \bullet \frac{100}{2 + j38} = I_N \bullet 2.63 \angle -87°$$ 와 같이 계산된다.

결과식의 의미는 주어진 배전계통의 **6.6 KV** 선로에서 3 상 단락이 발생하면 **154 KV** 선로에 흐르는 전류는 변압기 정격용량을 기준용량으로 했으므로 변압기 정격전류의 2.63 배가 흐른다는 것이다.

물론 22.9 KV 및 6.6 KV 선로에 흐르는 전류는 다음과 같이 변압비에 따라 결정되게 되는 것은 당연한 일이다.

$$I_{S,6.6KV} = I_{S,154\ KV} \bullet \frac{154}{6.6}$$

$$I_{S,22.9KV} = I_{S,154\ KV} \bullet \frac{154}{22.9}$$

6.4 Step 4

계통의 R : X Ratio 에 따른 비대칭 성분의 고려한 단락전류 계산

계통의 R : X ratio (X/R) 은 19 이므로 Asymmetrical Factor 를 요약해 놓은 표에서 해당되는 값을 구하면 약 2.6 정도이며 비대칭 성분을 포함한 전체의 단락전류는 이 값을 곱해주면 된다.

$$I_{S,Total} = I_{S,Sym} + I_{S,Asym}$$

$$= \left(\frac{X}{R}\ Factor\right) \bullet I_{S,Sym}$$

6.5 Step 5

전동기의 단락전류 기여부분 계산

앞에서 설명한 대로 전동기의 단락전류 기여분을 계산하여 전체 단락전류에 포함 시키며 여기서 주의할 점은 전동기의 기여전류는 설치된 모선의 전압하의 값이라는 것이다.

즉, 이는 기준용량 및 기준용량과는 관계없이 결정되는 값으로서 전동기의 정격에 의해 결정되는 값이라는 것을 파악하기 바란다.

6.6 Step 6

전체 단락전류의 합산

앞의 단계에서 계산된 단락전류를 각각 합하면 고장지점에서의 총 단락전류가 되는 것이다.

$$I_{S,Sum} = I_{S,Sym} + I_{S,Asym} + I_{S,Motor}$$

이렇게 구해진 단락전류는 차단기의 용량선정, 설비의 차단용량 결정, 보호계전기의 Setting 등 전력계통 구성 전반에 대한 기본 자료로서 활용한다.

이상으로 부족하나마 단락전류를 구해가는 과정을 간략하게 설명했으며 실제로 요즈음 단락전류를 구해가는 모든 과정은 Computer 를 통해 Simulation 되므로 우리는 정확한 Factor 만을 입력하면 되는 편리함이 있지만 컴퓨터에 입력되는 각 Factor 의 정확한 물리적 개념을 알고 있어야 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있기 때문에 단락전류를 구하는 기본적인 Procedure 를 이해하고 활용할 수 있는 지식을 가지고 있어야 하는 것은 주지의 사실이라고 생각한다.

[끝]