

계통의 고장전류 계산 ①

대다수의 엔지니어는 전기설비의 설계, 감리 및 유지관리업무에 종사하면서 계통의 고장전류 계산을 소홀히 다루어 왔던 것이 현실이다. 이에 따라 계통구성이 잘못되었거나 MOF 등의 기기강도 부족·차단기의 차단용량 부족에 따른 폭발사고, 보호계전기 설정 잘못에 따른 소손 및 정전 범위 확대 등의 많은 문제점을 노출시키고 있다.

고장전류 계산 방법은 ANSI/IEEE, IEC, VDE 등 각 국가 및 단체에 따라 다소 차이가 있고 임피던스 계산을 위한 제 정수 선정이 까다로워 고장전류를 정확히 계산하는 것은 어렵지만 이를 간단히 하여 현장 실무에 바로 적용할 수 있도록 하였다. 고장전류 계산 결과를 이용한 현장 활용은 다음 기회에 기술하고자 한다.



글/강창원 [No. 27179]

(주)서울유일엔지니어링 대표이사/기술사

1. 고장전류 계산 목적

고장전류 계산은

- (1) 차단기 차단용량 결정
- (2) 전력기기의 기계적 강도 및 정격 결정
- (3) 보호계전기 Setting
- (4) 통신 유도장해 검토
- (5) 계통 구성
- (6) 유효접지조건 검토 및 154kV TR 1차측 Y결선 중성점 운영 등을 위하여 수행한다.

2. 고장전류 종류

2.1 고장전류 형태

계통에 고장이 발생한 경우의 고장전류는 그림 1과 같이 횡축에 대하여 비대칭인 전류가 흐르며 이 전류는 횡축에 대하여 대칭인 대칭(Symmetrical) 분 교류전류와 DC 성분으로 나뉘어진다. 고장전류 속에 포함되어 있는 직류분은 회로정수(X/R 비)에 따라 크기가 정해지고 시간과 함께 감쇄한다. 계통에 회전기가 연결되어 있는 경우는 교류 대칭분 고장전류도 시간에 따라 크기가 변화한다.

차 례

1. 고장전류 계산 목적
2. 고장전류 종류
3. 고장전류 공급원
4. 임피던스
5. 비대칭 계수
6. 고장전류 계산(3상 단락전류)
7. 1선 지락전류
8. 고장전류 계산 예

계통의 고장전류중 1/2 Cycle 시점의 고장전류를 First Cycle Fault Current라 하고 차단기가 동작하는 수 Cycle 후(3~5 Cycle)의 고장전류를 Interrupting Fault Current, 회전에 의한 영향이 없어지는 안정된 후의 고장전류를 Steady State Fault Current라 한다.

2.2 First Cycle Fault Current (Momentary Fault Current)

- 고장전류는 초기 1/2 Cycle에서 가장 크며 이 때의 고장전류를 First Cycle Fault Current라 한다.
- 발전기, 전동기, 한전계통 등 모든 단락전류에 대하여 고려한다.
- 모든 회전기는 차과도 리액턴스(x_d'')를 적용(전동기는 x_d'' 에 1~1.2배 적용)한다.
- 케이블의 굵기점토, 변성기 정격점토, 보호계전기 순시 TAP Setting, 저압 차단기용량 선정, 고압 FUSE용량 선정 등에 사용된다.

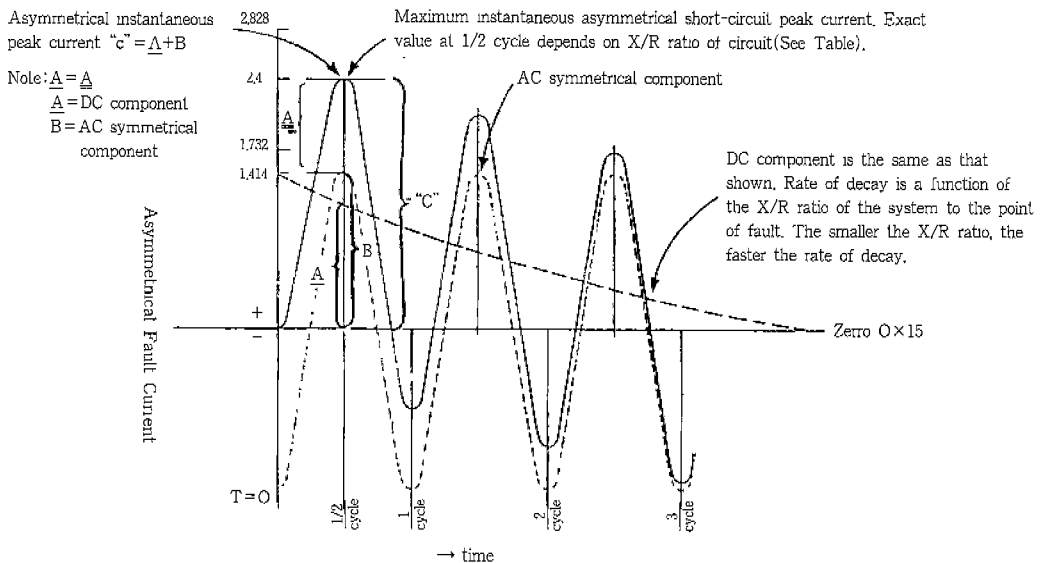
2.3 Interrupting Fault Current

- 차단기 접점이 개시되는 시점(3~8 Cycle)의 고장전류를 Interrupting Fault Current라 한다.
- 발전기, 전동기, 한전계통 등 모든 단락전류에 대하여 적용한다.
- 발전기는 차과도 리액턴스(x_d''), 기타 회전기는 과도 리액턴스(x_d')를 적용한다(전동기는 x_d'' 에 1.5~3배 적용).
- 고압 및 특별고압용 차단기 차단용량 선정에 사용된다.

2.4 Steady State Fault Current (30 Cycle Fault Current)

- 계통 임피던스의 변화가 안정된 시점의 고장전류를 Steady State Fault Current라 하며 보호계전기 동작시점(예 : 30 Cycle)의 고장전류를 30 Cycle Fault Current라 한다.
- 발전기, 한전계통의 단락전류에 대하여 고려한다.
- 발전기는 과도 리액턴스(x_d')를 적용한다.

Asymmetrical fault current (circuit with resistance and reactance)
Showing how ac and dc components add to produce asymmetrical peak current

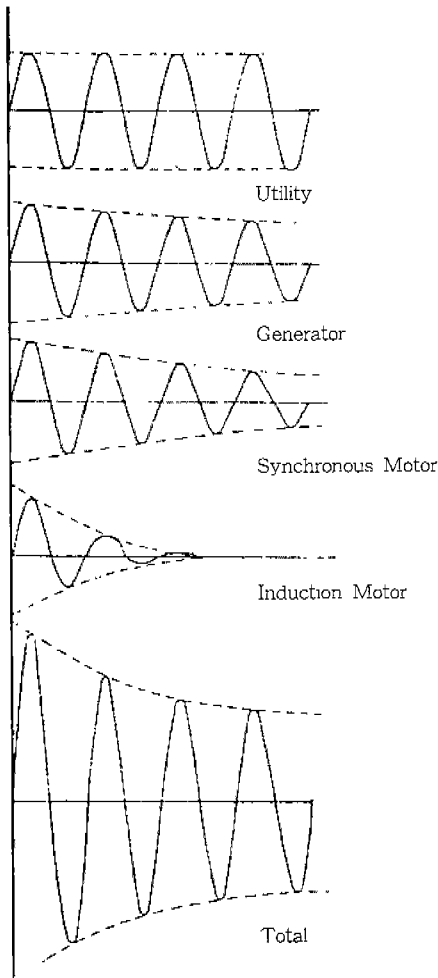


<그림 1> 고장전류의 시간에 따른 변화 형태

○ 보호계전기 한시 TAP Setting에 사용된다.

3. 고장전류공급원(Sources of Short Circuit Current)

계통에 고장이 발생하면 한전(UTILITY) 계통에서 고장전류를 공급하게 됨은 물론 회전기에서도 고장전류를 공급하게 된다(그림 2). 전동기가 연결되어 있는 계통에 고장이 발생하면 고장후 수 Cycle까지는 전동기와 이것에 직결된 부하의 회전



<그림 2>

Symmetrical Short-Circuit Currents from Four Sources Combined into Total

에너지(관성)에 의해 전동기는 발전기로 작용하고 자신의 과도 리액턴스에 반비례한 고장전류를 사고점으로 공급한다. 이를 전동기 기여(寄與)전류(Motor Contribution Current)라 하며 유도전동기는 잔류자속만이 영향을 미치므로 그림 2와 같이 수 Cycle 후에는 소멸되고 말지만 동기전동기는 타여자방식이므로 감쇄가 비교적 느리다. 전력용 콘덴서도 큰 과도 고장전류를 공급하게 되나 공급 지속시간이 아주 짧고 주파수가 계통의 주파수보다 아주 높기 때문에 일반적으로 고장전류 공급원에 포함하지 않는다.

4. 임피던스

4.1 전원(한전)측 Impedance

한전에서는 발전소 및 변전소에 대하여 정기적으로 계산하여 제시하고 있으며 한전에 협조를 요청하여 구한다. 22.9kV로 수전받는 수용가는 한전 154kV 변전소의 변압기 표준용량이 60MVA (%Z : 14.5%)이므로 이것으로부터 계산하거나 개략 500MVA(X/R비 : 10)정도로 하면 실용적으로 문제가 없다.

한전에서 제시되는 임피던스는 100MVA를 기준으로 하여 제시되고 있으며 이를 기준용량의 임피던스로 환산하고자 할 경우 다음과 같이 환산한다.

kVA_{BASE1}의 Z_{p.u. BASE1}을 kVA_{BASE2}의 Z_{p.u. BASE2}로 환산

$$Z_{p.u. BASE2} = \frac{kVA_{base2}}{kVA_{base1}} \times Z_{p.u. BASE1}$$

또한, 한전측의 임피던스를 정확히 알지 못하여 22.9kV 계통에서 임의의 값을 잡고 이를 기준용량의 임피던스로 환산할 때 다음과 같이 환산한다.

$$Z = \frac{kVA_{bus}}{kVA_{sc-3p}}$$

$$\%R = \frac{Z}{\sqrt{1+(X/R)^2}}, \quad \%X = \%R \times X/R$$

예 1) 22.9kV 수용가의 전원측 임피던스를 500 MVA로 할 경우 이를 1000kVA 임피던스로 환산하면

<표 1> 22.9kV-Y 다중접지 계통의 가공전선 임피던스 참고값

구 분	R [%/km]	X [%/km]	
		1800 mm 원금	2400 mm 원금
ACSR 160 mm	3.86	6.98	7.42
ACSR 150 mm	4.05	7.11	7.46
ACSR 95 mm	7.71	8.80	9.24

<표 2> 변압기

계통전압[kV]	권선의 BIL[kV]		임피던스 전압 [%]	
	고전압	저전압	표 준	저 감
22.9	125	-	6.0	
	150	60	6.0	
154	650	150	11.0	10.3
			14.5	13.5

※자 료 : 한전표준설계기준

정상임피던스

$$X_{pu} = \frac{1000kVA}{500MVA \times 1000} = 0.002_{pu} [0.2\%]$$

예 2) 한전에서 제시하여준 임피던스 %Z=0.14 + j 1.24(ON 100MVA)이고 이를 10MVA로 환산하면

$$\begin{aligned} \%Z &= \frac{10MVA}{100MVA} \times (0.14 + j 1.24) \\ &= 1.4 + j 12.4[\%] \text{가 된다.} \end{aligned}$$

4.2 케이블 및 전선

전기설비 기술계산 핸드북 등의 자료집 Data를 참조하거나 제작업체의 Data를 이용하여 계산한다. 일반적으로 케이블은 [Ω/km]로 Data가 주어지므로 이를 %Z나 Z_{pu}로 환산하여야 한다.

※ 22.9kV-Y 다중접지 계통의 가공전선 임피던스 참고값(표 1)

※ 22.9kV CNCV Cable 임피던스 참고값

CNCV 60 mm : 0.3874 + j 0.1632[Ω/km]

CNCV 100 mm : 0.2305 + j 0.1502[Ω/km]

CNCV 200 mm : 0.1194 + j 0.1354[Ω/km]

케이블의 임피던스가 [Ω/km]로 주어졌을 때 다

음과 같이 환산한다.

$$\%Z = \frac{kVA \text{ base} \times ohm[\Omega]}{10 \times kV^2}$$

$$Z_{pu} = \frac{kVA \text{ base} \times ohm[\Omega]}{1000 \times kV^2}$$

$$Z_{pu} = \frac{\%Z}{100}$$

예 3) 22.9kV 60mm CV Cable의 선로정수가 0.389 + j 0.175[Ω/km]로 주어지고 선로의 길이가 1.5km라 하면 기준용량(Base)을 1000 kVA로 했을 경우의 %임피던스 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \%Z &= \frac{kVA \text{ base} \times ohm[\Omega]}{10 \times kV^2} \\ &= \frac{1000 \times (0.389 + j0.175[\Omega/km]) \times 1.5 \text{ km}}{10 \times 22.9^2} \\ &= 0.1113 + j 0.05[\%] \end{aligned}$$

4.3 변압기

변압기 %임피던스는 변압기 명판에 표시되어 있으므로 이것을 이용하여 계산하되 신설인 경우는 제작사에 문의 하거나 표 2를 참조한다.

X/R비는 여러 가지 자료가 있으며 그림 3을 참

<표 3> Typical Reactance Values for Induction and Synchronous Machines, in Per-Unit of Machine kVA Ratings*

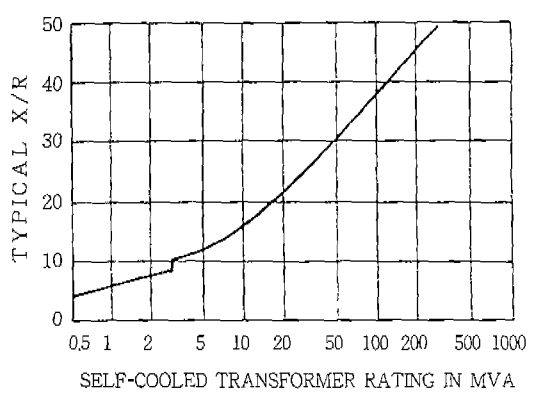
	X_d''	X_d'
Turbine generators †		
2 poles	0.09	0.15
4 poles	0.15	0.23
Salient-pole generators with damper windings †		
12 poles or less	0.16	0.33
14 poles or more	0.21	0.33
Synchronous motors		
6 poles	0.15	0.23
8-14 poles	0.20	0.30
16 poles or more	0.28	0.40
Synchronous condensers †	0.24	0.37
Synchronous converters †		
600 V direct current	0.20	-
250 V direct current	0.33	-
Individual large induction motors, usually above 600 V	0.17	-
Smaller motors, usually 600 V and below	표 4 참고	

Note : Approximate synchronous motor kVA bases can be found from motor horsepower ratings as follows :

0.8 power factor motor - kVA base = Hp rating
 1.0 power factor motor - kVA base = 0.8 · Hp rating

* Use manufacture's specified values if available

† X_d' not normally used in short-circuit calculations



<그림 3>

X/R Ratio of Transformers
 (Based on ANSI/IEEE C37.010-1979[2])

고한다.

예 4) 변압기용량 1000kVA, %임피던스가 6%인 변압기를 사용하고 그림 3에서 X/R비가

약 7정도라면 $R = 6/7 = 0.857$ 따라서 %임피던스는 $0.857 + j6$ 이다.

4.4 회전기 임피던스

회전기 임피던스는 표 3, 표 4의 임피던스와 그림 4, 그림 5의 X/R비를 참고한다. 이들을 조합하여 표 5에 일반적으로 적용할 수 있는 Data를 제시하였다.

예 5) 5000kVA 발전기의 %Z를 17%라 하고 X/R비를 30이라 할 때 10MVA 임피던스로 환산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_{p.u} &= \frac{kVA \text{ base} \times \%X/100}{kVA} \\
 &= \frac{(10 \times 1000) \times 17/100}{5000} = 0.34
 \end{aligned}$$

<표 4> Rotating-Machine Reactance (or Impedance) Multipliers

Type of Rotating Machine	First-Cycle Network	Interrupting Network
All turbine generators : all hydrogenerators with amortisseur windings, all condensers	1.0 X"d	1.0 X"d
Hydrogenerators without amortisseur windings	0.75 X'd	0.75 X'd
All synchronous motors	1.0X"d	1.5X"d
Induction motors		
Above 1000 Hp at 1800 r/min or less	1.0 X"d	1.0 X"d
Above 250 Hp at 3600 r/min	1.0 X"d	1.0 X"d
All others, 50 Hp and above	1.2 X"d	3.0 X"d
All smaller than 50 Hp	Neglect	Neglect

From ANSI/IEEE C37.010 - 1979 [2] and ANSI/IEEE C37.5 - 1979 [3]

$$R_{p.u} = \frac{X_{p.u}}{X/R} = \frac{0.34}{30} = 0.0113$$

$$Z_{p.u} = 0.0113 + j 0.34$$

예 6) 250Hp, 역률 80%인 3.3kV 고압 유도전동기가 3.45kV 모선에 접속되어 있을 경우 임피던스를 10MVA로 환산하면 다음과 같다. 유도전동기 임피던스는 17%, Demand Factor는 95%로 한다.

$$X_{p.u} = \frac{kVA \text{ base} \times \%X/100 \times (MV/SV)^2}{kVA \times DF/100}$$

$$= \frac{(10 \times 1000) \times 17/100 \times (3.3/3.45)^2}{250 \times 95/100} = 0.6549$$

※ MV : Motor Voltage

※ SV : System Voltage

※ DF : Demand Factor

$$R_{p.u} = \frac{X_{p.u}}{X/R} = \frac{0.6549}{14} = 0.0468$$

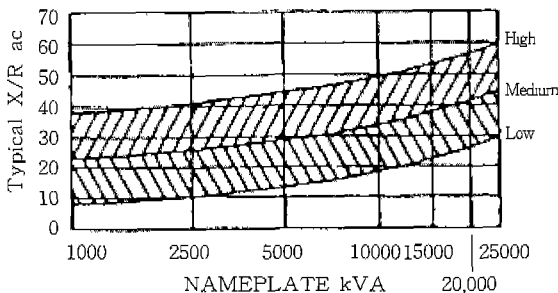
※ Interrupting Fault Current 계산시는 위의 값에 1.5배 한다.

$$Z_{p.u} = 0.0468 + j 0.6549$$

※ 회전기 임피던스의 시간에 따른 변화

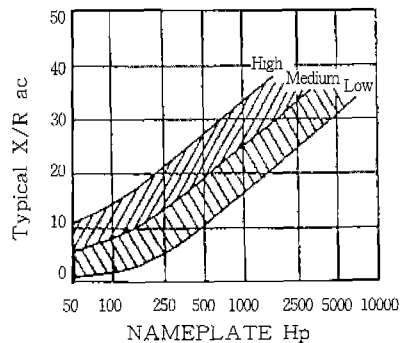
고장전류 공급원이 회전기인 경우 회전기 임피던스는 일정하지 않고 시간에 따라 그림 6과 같이 변화되기 때문에 고장전류도 이에 따라 변화된다.

· Xd" : 차과도 리액턴스(Subtransient Reactance)



<그림 4>

X/R Range for Small Generators and Synchronous Motors (Solid Rotor and Salient Pole) (From ANSI/IEEE C37.010-1979[2])



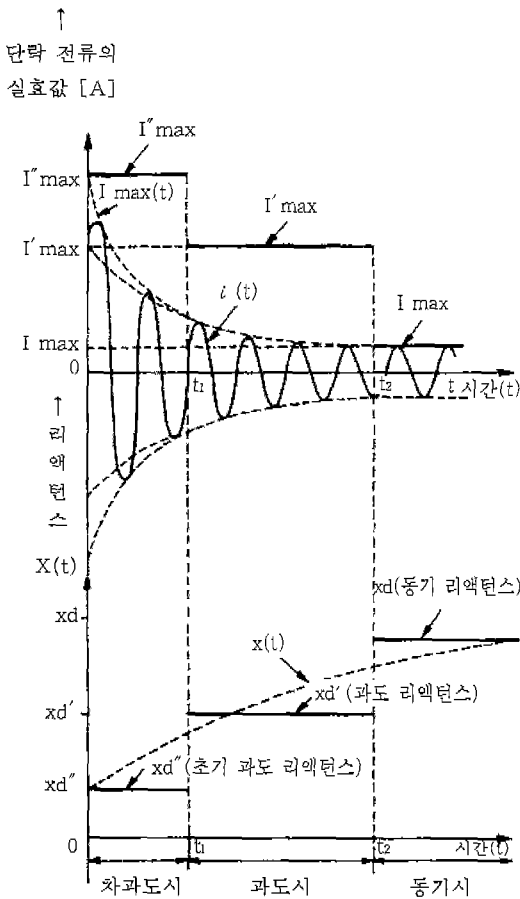
<그림 5>

X/R Range for Three-Phase Induction Motors (From ANSI/IEEE C37.010-1979[2])

기술자료 1

<표 5> Typical X/R, X'' AND MULTIPLYING FACTOR (MF) FOR ANSI FAULT CALCULATION BASED ON ANSI/IEEE STANDARDS

MOTOR TYPE		1st CYCLE FAULT			INTERRUPTING DUTY			MINIMUM FAULT		
		X/R	X''	MF	X/R	X''	MF	X/R	X''	MF
Synchronous Motors	S	30	20	1	30	20	1.5	30	20	0
Generator	G	29/45	9	1	29/45	9	1	29/45	9	
Induction Motors less than 50 Horse Power	I < 50H	9	17	1.67	9	17	0	9	17	0
Induction Motors of 50 to 150 Horse Power	I = 50 - 150H	9	17	1.2	9	17	3	9	17	0
Induction Motors of over 250 Horse Power	I > 250H	9	17	1	9	17	1.5	9	17	0
Induction Motors of over 1000 Horse power	I > 1000H	30	17	1	30	17	1.5	30	17	0



<그림 6> 회전기 단락 전류의 시간적 변화 상황

고장이 일어난 첫번째 사이클(First Cycle) 동안의 전류를 결정하는 임피던스로 0.1초 이내에 리액턴스는 증가한다.

- X_d' : 과도 리액턴스(Transient Reactance)
고장이 일어난 수 사이클 후의 고장전류를 결정하는 것으로 1/2~2초 이내에 리액턴스는 증가한다.
- X_d : 동기 리액턴스(Synchronous Reactance)
안정된 상태에 도달한 후에 흐르는 전류를 결정하는 값이다.

○ 다음호에 계속 됩니다

인도의 공사감독

룩펠러 센터가 건설될 때 존 D. 룩펠러 2세가 벽 밖에서 굴착공사 진행광경을 좀 더 잘 보려고 기웃거릴 때 그를 몰라본 경비원이 "위험하니 썩 비키시오." 하고 그를 쫓아냈다. 그러나 며칠 후 이 공사를 구경하고 싶어하던 다른 구경꾼들은 안이 편리하게 들여다보이는 벽의 구멍을 발견했다. 그 구멍에는 「당신은 이제 인도 공사감독 클럽의 명망있는 회원입니다.」 라고 쓰여진 카드가 들어 있었다. 그 후 뉴욕시에서는 큰 구조물이 세워질 때마다 의례히 들여다보는 구멍을 뚫어 구경꾼들에게 서비스하는 것이 관례가 되었다.