직류회로의 단락전류 계산 ①

글/ 이 성 우 (주)서울유일엔지니어링 실장 · 전기안전기술사
☎ 02)592-4595, www.psdtech.com

◈ 목 차

1. 밧데리(battery)의 단락전류 계산
2. 정류기(rectifier)의 단락전류 계산
3. DC 발전기 단락전류 계산
4. Total DC 고장전류 계산
5. DC 단락전류의 특성
6. 맺음말

전회에 걸쳐서 AC 전력계통의 3상 단락전류와 1선 지락전류 및 계통접지 방식에 대하여 살펴 보았다. 본 장에서는 실제로 현장에서 사용되고 있는 Batteries, Rectifiers, DC Generators 등으로 구성되는 DC System의 제반특성과 고장전류계산을 쉽게 이해하도록 해설하고자 한다. DC System의 단락고장 보호는 아직까지도 회로에 사용되는 보호장치를 구성하기가 용이하지 않으며 System 사고시 사용목적에 따라서는 그 피해가 치명적일 수 있으므로 소홀히 다룰 수 없게 되었다. 따라서, System 구성시 설계자, 엔지니어, 현장기술자에게 기본자료로 활용되기를 기대해 본다.

1. 배터리(Battery)의 단락전류 계산

1-1. 단락전류 계산시 고려사항

단락전류의 초기상승률 $\frac{di}{dt}$ 는 배터리를 포함한 전회로의 인덕턴스로 결정된다.

즉, $\frac{di}{dt} = \frac{E}{L}$ [A/sec]

여기서 E = 배터리 기전력 [V]
L = 전회로의 인덕턴스 [H]

따라서, 베터리의 단락전류 계산에 있어서는 다음 제반 사항이 필요하다.

① 직렬로 접속된 전지의 개수 N개
② 전지의 8시간 방전율 I_{8HR}
③ 전회로의 도체길이와 형태 (배터리 상호간을 접속하는 전선 포함)
④ 음, 양도체의 극간 거리

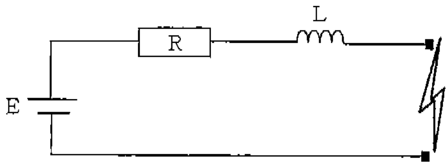


그림 1 배터리의 등가회로

배터리 회로의 단락전류 계산은 이 동가회로를 기본으로 해서 E-R-L회로의 계산을 다음식으로 하면 된다.

$$RI + L\frac{di}{dt} = E$$

여기서 초기 상승률 $\frac{di}{dt}=0$ 이라 놓으면

정상단락전류는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\therefore\ I = \frac{E}{R} \quad \cdots\cdots (1)$$

배터리는 온도 25℃, 완전충전상태에서 내부저항은 최소가 되며, 단락전류는 시간의 경과와 더불어 감소하긴 하지만 비교적 장기간에 걸쳐 대전류가 지속되는 것을 그림 2에 나타낸다.

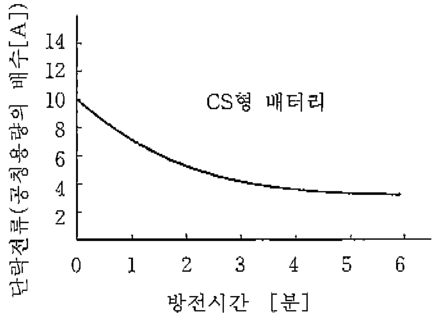


그림 2 배터리 단락시의 전류전화

1.2 배터리회로 단락 특성

이제 1.1 단락전류 계산시 고려사항을 이해하고 다음에 해설하는 단락특성을 살펴보고 나면 쉽게 계산이 가능해진다.

베터리 DC System에서 고장발생시 제반 조건들을 살펴보면 다음과 같다.

$$Eb = 2 \times \text{No. of Cells (2Volts/cell)} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$Rb = \frac{Eb}{100 \times I_{8HR}} \quad \cdots\cdots (3)$$

where : Rb = 배터리 내부저항
Eb = 배터리 내부전압
I_{8HR} = 배터리의 8시간 방전률(amps)
100 = based on IEEE std.946-1992 section 7.9.1

1) 최대단락전류

$$Ib = \frac{Eb}{Rb+Rc}\ (A) \quad \cdots\cdots (4)$$

where : Rc = 베터리 상호간을 접속하는 전선을 포함한 외부저항 (Resistance of cell connectors)

2) 단락전류의 초기 최대 상승률

$$\frac{di}{dt} = \frac{Eb}{LBC+LCC}\ \text{amps per sec} \quad \cdots\cdots (5)$$

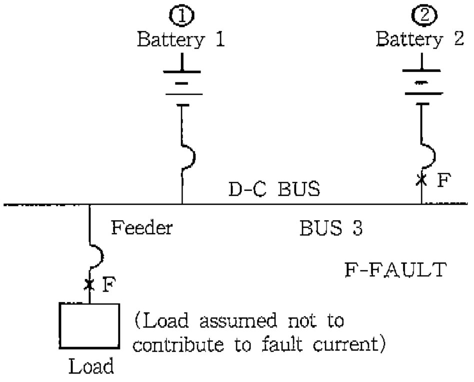


그림 3 One-line Diagram of Simple of dc System

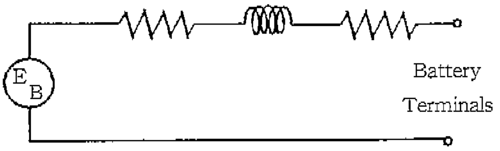


그림 4 등가회로

where: LBC = 배터리의 회로 인덕턴스 (mh)
LCC = 배터리 cell 접속단자 인덕턴스 (mh)
XBC = 배터리 회로 리액턴스 (ohm)
XCC = 배터리 cell 접속단자 리액턴스 (ohm)

1.3 배터리 단락전류 계산 예

그림 3과 같이 DC BUS에 동일 용량의 배터리가 병렬로 접속된 경우 고장 발생시 고장전류를 계산해 보기로 한다.

1) 계산 조건

- Battey 회로 Resistance = 0.05 (Ω)
  Reactance = 0.0060432 (Ω)
- For Battery 1
  Given : Eb = 250 (V)
  I_{8HR} = 25 (A)
  Rc = 0.01 (Ω)
  XCC = 0.015086 (Ω)
  XBC = 0.0060342 (Ω)
  BCR (배터리 회로 Resistance) = 0.05 (Ω)
- For Battery 2
  Given : Eb = 250 (V)
  I_{8HR} = 25 (A)
  Rc = 0.01 (Ω)
  XCC = 0.015086 (Ω)
  XBC = 0.0060342 (Ω)
  BCR (배터리 회로 Resistance) = 0.05 (Ω)

2) 계산 예

① Calculation for Battery 1 :

$$Rb = \frac{250}{100\times 25} = 0.1\ (\Omega) \quad \cdots\cdots (6)$$

이므로 배터리회로의 Total 저항은

$$TBRES = Rb + Rc + BCR = 0.1 + 0.01 + 0.05 = 0.16\ (\Omega)$$

$$LCC = \frac{XCC\times 1000}{2\pi f} = \frac{0.015086\times 1000}{2\times 3.14286\times 60}$$

$$= 0.04\ (mh) \quad \cdots\cdots (7)$$

$$LBC = \frac{XBC\times 1000}{2\pi f} = \frac{0.0060342\times 1000}{2\times 3.14286\times 60}$$

$$= 0.016\ (mh) \quad \cdots\cdots (8)$$

이므로 배터리 회로의 Total 인덕턴스는

$$TBL = LCC + LBC = 0.04 + 0.016 = 0.056\ (mh)$$

② Calculation For Battery 2 :

배터리 1과 2는 동일용량으로 병렬접속되어 있으므로 배터리 회로의 전 체저항과 인덕턴스는 다음과 같다.

$$TBR = \frac{TBRES}{2} = 0.08\ (\Omega) \quad \cdots\cdots (9)$$

$$TBLL = \frac{TBL}{2} = \frac{0.056}{2} = 0.028\ (mh) \quad \cdots\cdots (10)$$

따라서 최대 단락전류 결과는 3125(A) 이며

$$Ib = \frac{Eb}{Rb+Rc} = \frac{Eb}{TBR} = \frac{250}{0.08} = 3125(A) \quad \cdots\cdots (11)$$

단락전류의 초기 최대 상승률은 8.928495×10^6 (A/sec)값을 나타낸다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{Eb}{LBC+LCC} = \frac{Eb}{TBLL} = \frac{250\times 1000}{0.028}$$

$$= 8.928495\times 106\ (A/sec) \quad \cdots\cdots (12)$$

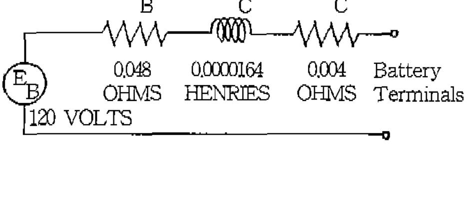


그림 5 Equivalent Circuit for Example Calculation

3) 컴퓨터 시뮬레이션 결과

File:BB-EX1 Project Number :
Total Cumulative DC Short Circuit Results

Node Ident	Node Code	Node Description	-----Thevenin Equivalent----- R(Ohms)	X(Ohms)	L(mH)	Sustain Fault (Amps)	Cumulative Rate of Rise (Amps/Sec)
1	B	BATTERY 1	8.00E-02	1.06E-02	2.80E-02	3125	8924852.000
2	B	BATTERY 2	8.00E-02	1.06E-02	2.80E-02	3125	8924852.000
3	M	MAIN BUS 1	8.00E-02	1.06E-02	2.80E-02	3125	8924852.000

File:BB-EX1 Project Number :
DC Branch Currents in Amps

Branch From	To	Fault at 1	Fault at 2	Fault at 3
1	3	-1562	1562	1562
2	3	1567	-1567	1567

* Computer program calculation results match 100% the Longhand Calculation results

2. 정류기 (Rectifier)의 단락전류 계산

2.1 개 요

정류회로의 고장전류를 구하는 일은 각 기기의 설계, 부품의 관리, 보호방식 및 개폐장치의 결정을 위해서 필요하다. 고장의 원인으로서는 정류장치의 내부에 있는 경우와 외부에 있는 경우가 있다. 본 장에서는 정류장치의 내부 고장계산 대신 직류 출력측에서의 단락전류에 대해서 알아보고자 한다(정류기 특성은 "5. DC 단락전류 특성" 의 해설 참고).

2.2 정류기 단락전류 계산방법

정류기회로의 등가저항과 등가인덕턴스 계산 심볼과 수식에 대하여 다음과 같이 소개한다.

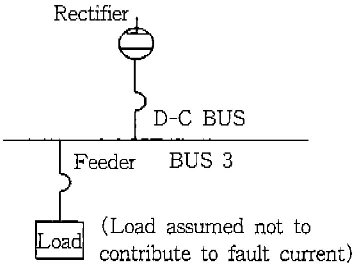


그림 6 One-line Diagram of a Simple DC System

$$RR = \frac{ZCP \times ER}{1.15\ ID} \quad \cdots\cdots (13)$$

$$IDS = \frac{1.02\ ID}{ZCP} \quad \cdots\cdots (14)$$

$$LR = \frac{ER}{360 \times IDS} \quad \cdots\cdots (15)$$

$$IDC = \frac{ER}{RR + RDC} \quad \cdots\cdots (16)$$

$$RRDC = \frac{ER}{LR + LD} \quad \cdots\cdots (17)$$

여기서,
ER : 정류기 정격 DC 전압 (V)
ID : 정류기 정격 DC 전류 (A)
IDS : 단락고장동안 정류기회로 단락전류 (A)
IDC : Final 단락전류 (A)
ZCP : 정류기의 AC 임피던스 (pu)
RDC : 정류기회로 ~ BUS간 저항 (Ω)

RR : 정류기 등가저항(Ω)
RRDC : IDC의 상승률(A/sec)
LR : 정류기 등가인덕턴스(h)
LD : 정류기회로 ~ BUS간 인덕턴스 (h)
XD : 정류기회로 ~ BUS간 리액턴스 (Ω)

2.3 정류기 단락전류 계산 예

그림 6과 같은 System에서 정류기 500kW일 때 Terminal과 Bus 지점에서 단락사고시 고장전류계산은 다음과 같이 예를 들어 해설한다.

1) 계산조건

- 정류기 회로
  저항 (RDC) = 0.0003 (Ω)
  리액턴스 (XD) = 0.0015085 (Ω)
- DATA : ER = 250 (V)
  ID = 2000 (A)
  ZCP = 0.076 (pu)
  RDC = 0.0003 (Ω)
  XD = 0.0015085 (Ω)

2) 계산 예

$$RR = \frac{ZCP \times ER}{1.15\ ID} = \frac{0.076 \times 250}{1.15 \times 2000}$$

$$= 0.0082608\ (\Omega) \quad \cdots\cdots (18)$$

$$IDS = \frac{1.02\ ID}{ZCP} = \frac{1.02 \times 2000}{0.076}$$

$$= 26842.105\ (A) \quad \cdots\cdots (19)$$

$$LR = \frac{ER}{360 \times IDS} = \frac{250 \times 1000}{360 \times 26842.105}$$

$$= =0.0258714(mh) \quad \cdots\cdots (20)$$

$$IDC = \frac{ER}{RR+RDC} = \frac{250}{0.0082608+0.0003}$$

$$= 29202.887(A) \quad \cdots\cdots (21)$$

$$LD = \frac{XD \times 1000}{2\pi f} = \frac{0.0015085 \times 1000}{2 \times 3.14286 \times 60}$$

$$= 0.004(mh) \quad \cdots\cdots (22)$$

$$RRDC = \frac{ER}{LR+LD} = \frac{250 \times 10^3}{0.0258714+0.004}$$

$$= 8.369209 \times 10^6\ (A/sec) \quad \cdots\cdots (23)$$

3) 컴퓨터 시뮬레이션 결과

```
EDSA-Micro Corporation - (C) Copyright 1983-1993   DC Short Circuit Analysis v.5
Cyc/Sec: 60       SysVlt: 250       Date:04/28/93     Time:09:42:41am      Page  1

File:R-EX2                Project Number :
Total Cumulative DC Short Circuit Results

                                                                  Sustain  Cumulative
Node  Node Node                   -----Thevenin Equivalent-----   Fault   Rate of Rise
Ident Code Description             R(Ohms)    X(Ohms)    L(mH)    (Amps)   (Amps/Sec)
-------- - ---------------- ---------- --------- ---------- ------- ------------
1        R RECTIFIER 1       8.56E-03  1.13E-02  2.99E-02   29203  8368794.500
3        M MAIN BUS 1        8.57E-03  1.13E-02  2.99E-02   29169  8368720.500
```

* Computer program calculation results match 100% the Longhand Calculation results

3. DC 발전기 단락전류 계산

3.1 개 요

본 장에서는 DC발전기의 단락회로 특성에 관한 기본요소를 이해함으로써 모선사고시 단락전류를 계산할 수 있도록 하고자 한다.

DC 회전기기 (발전기, 전동기)는 단락회로에서 고장전류 공급원이 되므로 제반 특성을 충분히 이해할 필요가 있다.

3.2 단락회로 특성

그림 7과 같은 System에서 모선사고시 수식과 특성은 다음과 같이 해설한다.

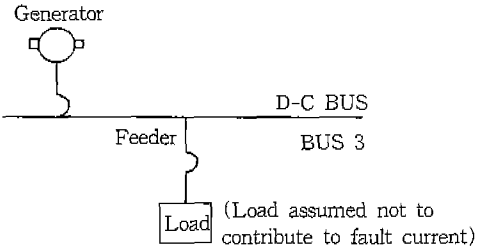


그림 7 One-line Diagram of a Simple DC System

$$F = \frac{PN_1}{120} \quad \cdots\cdots (24)$$

$$RRG = \frac{EG}{LLA+LG} \quad \cdots\cdots (25)$$

$$RDD = RD \cdot \frac{EG}{IG} \quad \cdots\cdots (26)$$

$$IMAXG = \frac{EG}{RDD+RG} \quad \cdots\cdots (27)$$

여기서, f = 주파수 (Hz)

CX = 인덕턴스 Factor

LAA = 전기자회로의 불포화 인덕턴스 (mh)

P = 극수

N_1 = Base Speed (rpm)

IG = 정격전류 (A)

EG = 정격전압 (V)

RD = 전기자회로 과도저항 (pu)

RDD = 전기자회로 과도저항 (Ω)

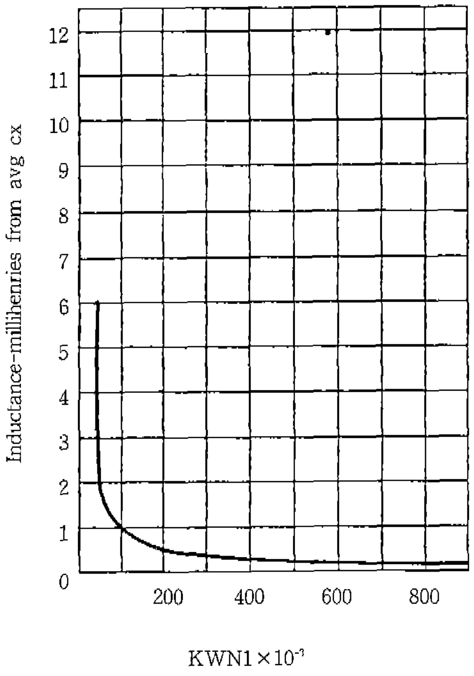
IMAXG = 최대 단락전류 (A)

RRG = 단락전류의 초기 상승률 (A/sec)

RG = 발전기회로 저항 (Ω)

LG = 발전기회로 인덕턴스 (mh)

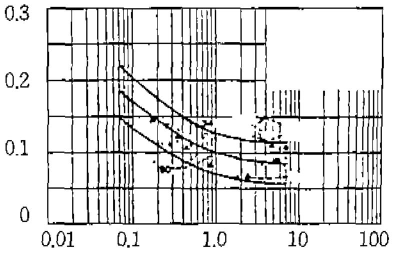
XG = 발전기회로 리액턴스 (Ω)



DC Generator

Temp. rise	40℃
Loading	Continuous
Ventilation	Open
Speed	Constant
Volts, rated	230, 240, 250, 300, 600

그림 8 전기자회로 불포화 인덕턴스 (mh)



KWN1×10^{-5}

DC Generator

Temp. rise	40℃
Loading	Continuous
Ventilation	Open
Speed	Constant
Volts, rated	230~250
Field winding	Shunt or compound wound

그림 9 전기자회로 과도저항 (pu)

3.3 계산 예

그림 7과 같이 BUS 3에 DC 발전기가 접속되어 운전중 발전기 Terminal에서 단락사고가 발생하면 회전기기 특성상 그림 8 전기자 회로의 불포화 인덕턴스(mh)와 그림 9 과도저항(pu) 값이 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

1) Data : KW = 500

$EG = 250\ (V)$
$f = 60\ (Hz)$
$N_1 = 600\ (rpm)$
$RG = 0.0003\ (\Omega)$
$XG = 0.0015085\ (\Omega)$
$IG = 2000\ (A)$
$KWN_1 = 500 \times 600 = 3 \times 10^5$
$= 300 \times 10^3$ 이므로

그림 8, 그림 9로 부터
RD = 0.07 (pu) LAA = 0.3 (mh) 값을 구한다.

2) 계산 예

$$RDD = RD \cdot \frac{EG}{IG} = \frac{0.07 \times 250}{2000}$$

$$= 0.00875\ (\Omega) \qquad \cdots\cdots (28)$$

$$IMAXG = \frac{EG}{RDD+RG} = \frac{250}{0.00875+0.0003}$$

$$= 27624.309\ (A) \qquad \cdots\cdots (29)$$

$$LG = \frac{XG \times 1000}{2\pi f} = \frac{0.0015085 \times 1000}{2 \times 3.14286 \times 60}$$

$$= 0.004\ (mh) \qquad \cdots\cdots (30)$$

$$RRG = \frac{EG}{LAA+LG} = \frac{250 \times 1000}{0.3+0.004}$$

$$= 822368.420\ (A/sec) \qquad \cdots\cdots (31)$$

3) 컴퓨터 시뮬레이션 결과

File:G-EX3 Project Number :
Total Cumulative DC Short Circuit Results

Node Ident	Node Code	Node Description	-----Thevenin Equivalent----- R(Ohms)	X(Ohms)	L(mH)	Sustain Fault (Amps)	Cumulative Rate of Rise (Amps/Sec)
1	G	GENERATOR 1	9.05E-03	1.15E-01	3.04E-01	27624	822364.5000
2	M	MAIN BUS	9.06E-03	1.15E-01	3.04E-01	27594	822363.8125

다음호에 계속 됩니다