

직류회로의 단락전류 계산 ②

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

4. Total DC 고장전류

4.1 DC System 고장전류 계산방법

1) 고장전류 공급원

전술한 바와 같이 고장전류 공급원을 배터리, 정류기, DC 발전기 등으로 개별로 살펴 보았으나 본 장에서는 그림 10과 같이 시스템을 구성하였을 때 모선별 고장전류를 계산하여 보고자 한다.

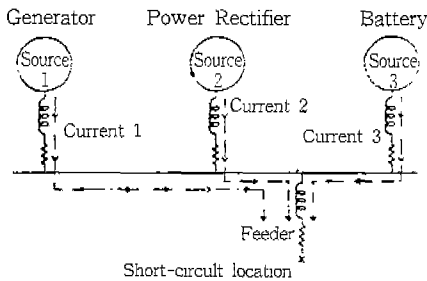


그림 10 Diagram for a Feeder Circuit Showing the current Sharing the Path through the Common Circuit Element

2) 리액턴스 다이어그램

그림 11 다이어그램은 어느 모선에서 단락 고장 발생시 최대 단락전류 계산을 위해 이용되며 total 단락전류는 등가저항을 계산하여 구할 수 있다.

$$I_T = \frac{E}{R_{eq}} \text{ (A)} \quad \dots \dots (32)$$

where E = System 전압 (V)
 R_{eq} = System 등가저항 (Ω)
 I_T = Total 최대단락전류 (A)

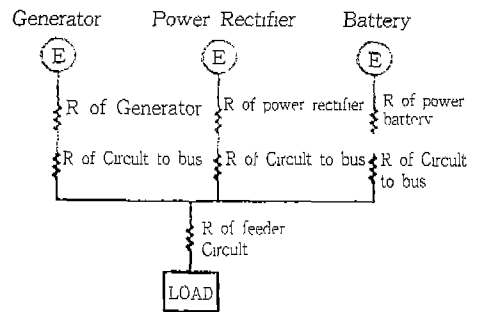


그림 11 Resistance Diagram for DC System of <그림 10>

3) 인덕턴스 다이어그램

그림 12 Diagram은 단락고장 발생시 Total 단락전류의 초기상승률을 계산하는데 이용되며 시스템의 등가 인덕턴스를 계산하여 구할 수 있다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{E}{L_{eq}} \text{ (A/sec)} \quad \dots \dots (33)$$

where L_{eq} = 시스템 등가 인덕턴스 (h)

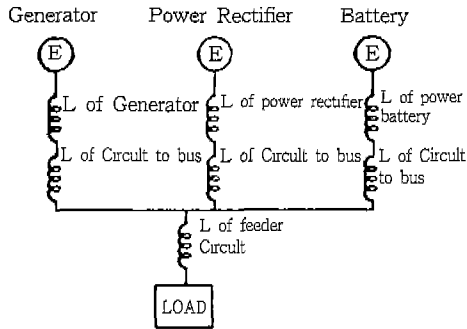


그림 12 Inductance Diagram for DC System of 그림 10

4.2 고장전류 계산 예

1) 계산 조건

배터리, 정류기, 발전기의 계산조건은 전술한 조건으로 하고

Feeder 저항 (FR) = 0.05 (Ω)

리액턴스 (FX) = 0.0037714 (Ω) 로 한다.

2) 계산 예

① 동가저항 및 최대 단락전류

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{RB+RC+BCR} + \frac{1}{RR+RDC} + \frac{1}{RDD+RG}$$

EDSA DC FAULT ANALYSIS

File:BRGF-EX7 Project Number :
DC Faults and Eq. Impedances of Contributing Sources

Node Ident	Node Code	Node Description	Resistance (Ohms)	Reactance (Ohms)	Inductance (mHenries)	MaxFlt (Amps)	Rate of Rise (A/S)
1	B	BATTERY 1	1.600E-01	2.112E-02	5.602E-02	1562.50	4462448
2	R	RECTIFIER 1	8.561E-03	1.126E-02	2.987E-02	29202.6	8368795
3	G	GENERATOR 1	9.050E-03	1.146E-01	3.040E-01	27624.3	822364.5

File:BRGF-EX7 Project Number :
Total Cumulative DC Short Circuit Results

Node Ident	Node Code	Node Description	Thevenin Equivalent			Sustain Fault (Amps)	Cumulative Rate of Rise (Amps/Sec)
			R(Ohms)	X(Ohms)	L(mH)		
1	B	BATTERY 1	4.30E-03	6.90E-03	1.83E-02	58196	13653440.000
2	R	RECTIFIER 1	4.29E-03	6.90E-03	1.83E-02	58325	13653554.000
3	G	GENERATOR 1	4.29E-03	6.90E-03	1.83E-02	58318	13653325.000
4	M	MAIN BUS 1	4.29E-03	6.90E-03	1.83E-02	58325	13653509.000
5	L	LOAD 1	9.29E-03	1.07E-02	2.83E-02	26921	8829473.000

File:BRGF-EX7 Project Number :
DC Branch Currents in Amps

Branch From	To	Fault at 1	Fault at 2	Fault at 3	Fault at 4	Fault at 5
1	4	-56633	1567	1553	1556	718
2	4	29102	-29110	29117	29156	13458
3	4	27533	27562	-30695	27597	12738
4	5	*****	*****	*****	*****	26921

표 1 컴퓨터 시뮬레이션 결과

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{0.16} + \frac{1}{0.0085608} + \frac{1}{0.00905} \\
 &= 0.0042815 \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots (34)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total 저항} &= R_{eq} + FR \\
 &= 0.0042815 + 0.005 \\
 &= 0.0092815 \text{ (}\Omega\text{)}
 \end{aligned}$$

따라서, 최대 단락전류는

$$\begin{aligned}
 IT &= \frac{E}{R_{eq}+FR} = \frac{250}{0.0092815} \\
 &= 26935.301 \text{ (A)} \dots\dots (35)
 \end{aligned}$$

② 등가인덕턴스 및 초기 최대상승률

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{L_{eq}} &= \frac{1}{LCC+LBC} + \frac{1}{LR+LD} + \frac{1}{LAA+LG} \\
 &= \frac{1}{0.056} + \frac{1}{0.0298714} + \frac{1}{0.304} \\
 &= 0.018355 \text{ (mh)} \dots\dots (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Feeder 리액턴스 (FL)} &= \frac{FX \times 1000}{2\pi f} \\
 &= \frac{0.0037714 \times 1000}{2 \times 3.14286 \times 60} = 0.010 \text{ (mh)} \dots\dots (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total 리액턴스} &= L_{eq} + FL \\
 &= 0.018355 + 0.01 = 0.028355 \times 10^{-3} \text{ (h)}
 \end{aligned}$$

따라서, 초기상승률은

* Initial rate of rise of current

$$\begin{aligned}
 &= \frac{250 \times 10^3}{0.028355} = 8.833922 \times 10^6 \text{ (A/sec)} \dots\dots (38)
 \end{aligned}$$

3) 컴퓨터 Simulation 결과(표 1)

Total DC 고장전류 계산은 컴퓨터 시뮬레이션 결과 아래와 같으며 전술한 Longhand calculation result와 비교해서 검토해 볼 수 있다.

참고로 본장에서 수행한 프로그램은 EDSA (Computer Aided Engineering software for Windows 95/98)임을 소개한다.

5. DC 단락전류의 특성

전술한 바와 같이 DC 단락전류를 계산해 보았으나 제 특성을 이해하기가 난해하므로 본장에서는 3상 브리지의 DC 출력측 단락 고장시 예를 들어 보충 해설하고자 한다.

정류회로의 동작은 각 아암이 ON/OFF 상태의 조합에 따라 형성되는 회로가 다르고 아암의 상태가 변할 때 마다 시간을 구분해서 계산을 한다.

최근에는 전문가 프로그램이 개발되어 각종의 회로정수, 고장조건을 입력하여 계산의 편리를 도모하고 있다.

직류출력회로의 단락전류를 구할 때 회로중의 임피던스가 배치될 수 있는 상태는 그림 13과 같다.

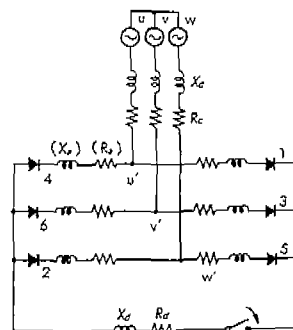


그림 13 3상 브리지 접속에서의 직류단락

그러나 여기에 표시한 모든 임피던스를 고려하면 해석이 복잡해지므로 보통 아암의 임피던스 X_a, R_a 는 무시하고 취급한다.

직류측의 임피던스 X_d, R_d 에 따라 각 부의

전류 정상치는 다른 것은 물론이고 과도시의 전류차이도 심하다.

따라서, 가장 간단한 경우는 직류측 임피던스를 0 으로 하는 경우 “완전단락”이고, 이 때의 전류는 다음과 같이 해서 구해진다. 교류측의 전압을 (39)식처럼 할 때

$$\begin{aligned} e_u &= \sqrt{2} \cdot E_s \cdot \sin \{ \omega t + (2\pi/3) \} \\ e_v &= \sqrt{2} \cdot E_s \cdot \sin \omega t \\ e_w &= \sqrt{2} \cdot E_s \cdot \sin \{ \omega t - (2\pi/3) \} \end{aligned} \quad \dots \dots (39)$$

t = 0에서 무부하 상태의 정류기 직류단자간을 갑자기 단락할 때의 각 상전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_u &= (\sqrt{2} E_s / Z_c) \cdot [\sin(\omega t + 2\pi/3 - \psi) \\ &\quad - \sin(2\pi/3 - \psi) \cdot e^{-\left(\frac{RC}{XC}\right)\omega t}] \\ i_v &= (\sqrt{2} E_s / Z_c) \cdot [\sin(\omega t - \psi) \\ &\quad + \sin \psi \cdot e^{-\left(\frac{RC}{XC}\right)\omega t}] \\ i_w &= (\sqrt{2} E_s / Z_c) \cdot [\sin(\omega t - 2\pi/3 - \psi) \\ &\quad + \sin(2\pi/3 + \psi) \cdot e^{-\left(\frac{RC}{XC}\right)\omega t}] \end{aligned} \quad \dots \dots (40)$$

여기서, $\frac{X_c}{R_c} = 8$ 인 경우 각 상전류의 파형은 그림 14와 같이 나타낼 수 있다.

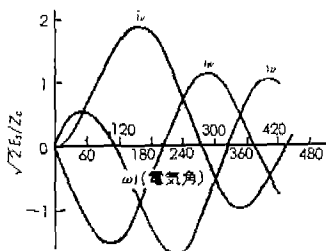


그림 14 직류 돌발 완전단락시 각 상전류 (Xa, Ra = 0, Xd, Rd = 0)

이 전류는, 가령 u상에 대해서는 iu의 정파가 야암 1에, 부파가 야암 4에 배분되고, 따라서 직류전류는 야암 1, 3, 5의 합으로 구해진다(야암 2, 4, 6의 합도 같다).

이렇게 해서 구한 $\frac{X_c}{R_c} = \infty, 12, 8, 6, 4$ 일

때의 직류전류는 그림 15와 같이 표현된다.

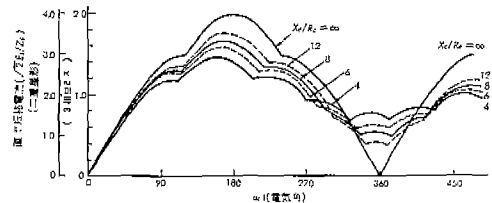


그림 15 직류 돌발 완전단락시 직류 전류 (Xa, Ra = 0, Xd, Rd = 0)

직류측 고속도 차단기를 켜 때는 약 20ms 정도로 차단이 끝나게 되며, 이 동안 각 야암 중에서 가장 큰 전류가 흐르는 야암은 단락 후 약 반 사이클의 시각에 생기는 직류 단락전류가 통과하는 야암이 된다.

각 야암의 전류를 꺼내서 나타내면 그림 16과 같이 표현된다.

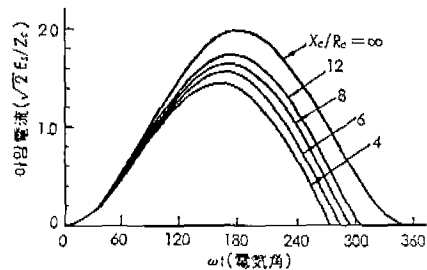


그림 16 직류 돌발 단락시 최초의 1 사이클 중에 생기는 최대의 야암전류

이 전류의 피크치와 피크치를 취하는 시각을 나타내면 그림 17과 같다.

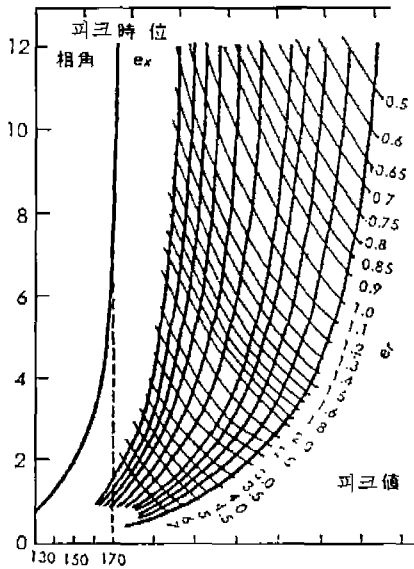


그림 17 단락 개시 시각 부터의 전기각 (deg)

예로서, 직류 돌발 완전단락시의 아암전류를 그림에서 구하는 예를 해설한다.

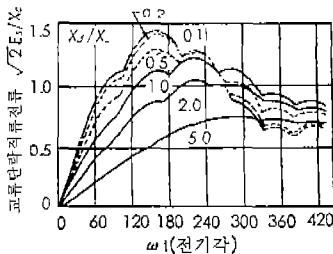


그림 18 3상브리지 접속에서 직류측에 임피던스가 있는 경우 돌발 단락 직류전류의 경과 (Rd/Rc = 0.1, Rc/Xc = 0.15 의 경우)

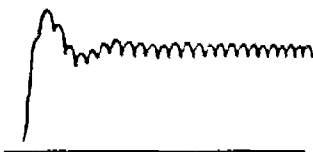


그림 19 Typical Current-time curve for Bolted Fault at Rectifier Teinals

ex) $ex = 8\%$, $er = 1\%$ 일 때 직류 돌발 완전 단락전류는 정격 직류전류의 25배, 시각은 그림 16을 보면 단락 후 170° 의 위상에 나타내는 것을 알 수 있다.

$$\therefore \text{직류 돌발 완전 단락전류}(idp) = 1.67 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.816 \cdot Idn / (ex/100) = 25 \cdot Idn$$

다음은 J.Pfotenhauer에 의해 각 임피던스 비율의 조합에 따른 직류 돌발 단락시의 고장 전류가 어떻게 변화되는지 그래프화한 것을 살펴보고자 한다.

$$\text{임피던스의 비가 } \frac{Xd}{Rc}, \frac{Rd}{Rc}, \frac{Rc}{Xc} \text{ (직류측에)}$$

임피던스가 있는 경우)의 조합에 있어서는 그림 18과 같고 그림 18에 대한 예로서 정류기 터미널 단자에서 단락 사고시 전형적인 전류-시간 특성은 그림 19와 같이 표현된다.

따라서 단락 후 반사이클에 피크치를 가진 아암전류는 그림 20과 같다.

이제 우리는 3상 브리지의 직류 돌발시 직

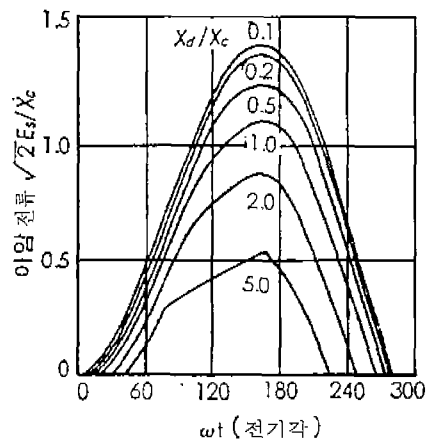


그림 20 3상 브리지 접속의 직류 돌발 단락 후 반사이클 부근에 피크치를 취하는 아암전류의 경과 (Rd/Rc = 0.1, Rc/Xc = 0.15 의 경우)

류전류 피크치(idp)와 정상 단락 전류(Ids)와의 비를 확인 할 수 있다.

그림 21은 L.Jensen이 도해한 것을 나타낸다.

그림 21의 특성을 그림 22와 그림 23의 전류-시간 특성 curve로 나타 내면 쉽게 이해할 수 있을 것으로 본다.

이제까지는 DC 단락전류의 특성을 이해하

기 위해 정류기(3상브리지)를 예로서 살펴보았다. 참고로, DC 발전기 및 전동기와 Feeder의 단락전류 시간특성 곡선을 나타내면 그림 24, 그림 25와 같고 초기 상승률의 예는 그림 26과 같이 표현되며, 본 장에서 언급한 DC 단락전류의 특성은 전술한 고장 전류 계산을 이해하는데 기초 자료로써 다시한번 강조하고 싶다.

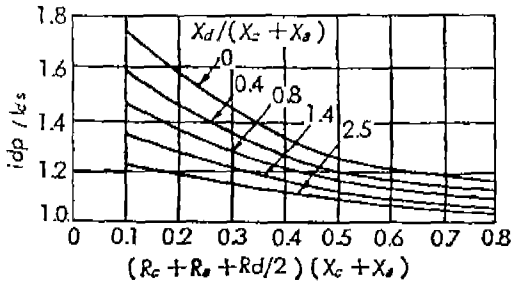


그림 21 3상 브리지의 직류 돌발시의 직류전류 피크치(idp)와 정상 단락 직류전류(Is)와의 비

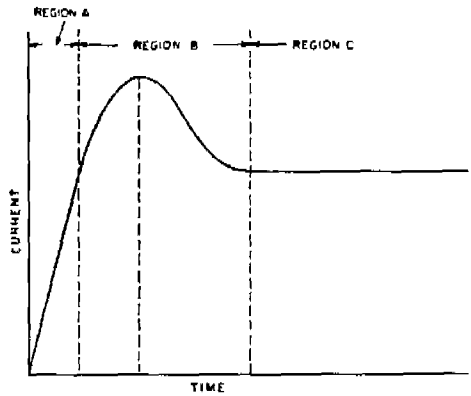


그림 22 Typical Current-Time for Rectifier Short-Circuit Current

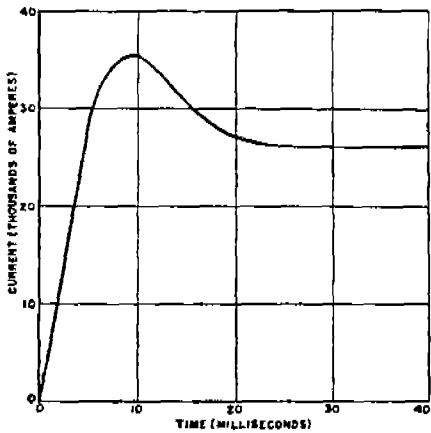


그림 23 Current-Time Curve of Rectifier Short-Circuit for fault in dc system with Appreciable Inductance and resistance in the dc system

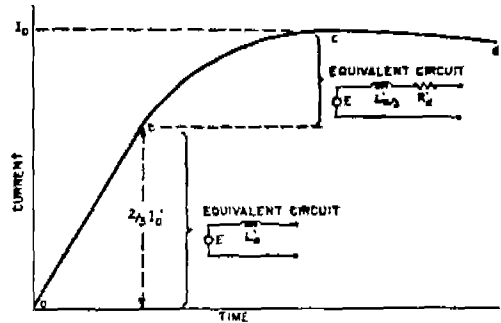


그림 24 Typical Short-Circuit Characteristic of dc Motor or Generator

6. 맺음말

최근까지 국내에서는 고장전류를 계산할 때 AC 전력계통에 대한 기술만을 다루어 온 것이 현실이다.

물론 AC 고장전류계산의 목적은

- 차단기 차단용량 결정
- 전력기기의 열적 및 기계적 강도 결정
- 보호계전기 Setting
- 계통구성 검토
- 유효접지 조건 검토
- 통신유도장해 검토

등에 활용하여 전력계통의 신뢰성과 경제성을 향상시키는 데 있으며, DC Power System은 사용목적이 광범위하고 그 중요성이 강조되고 있는 추세이다. 이러한 시스템은 DC 단락고장시 1차보호에 실패하고 2차적으로 피해가 파급될 경우 시스템 신경이 마비되므로써 산업시설 전반에 걸쳐 물적, 경제적 손실이 발생할 수도 있을 것이다. 따라서, DC System의 기본설계 또는 운용과 관련하여 DC 고장전류

를 계산하고 보호장치의 적절한 선정을 검토하는 일은 엔지니어, 또는 운용자의 기본업무임을 간과해서는 안될 것으로 생각된다.

끝으로 5. DC 단락전류의 특성을 충분히 이해하고 전술한 계산 예들을 연구하여 DC System 구성과 현장운용에 기본자료로 활용되기를 바랍니다.

- Switchgear and load center control, tripping, closing, and indicating devices
- Inverter (dc to ac) load
- Emergency turbine lube-oil pump
- Protective relaying
- Fire Protection
- Annunciators
- Turbine generator excitation breakers and controls
- DC emergency lighting
- Communications

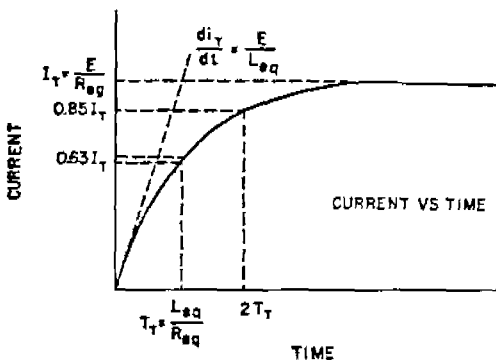


그림 25 Typical Time-Current Curve for Feeder Short-Circuit

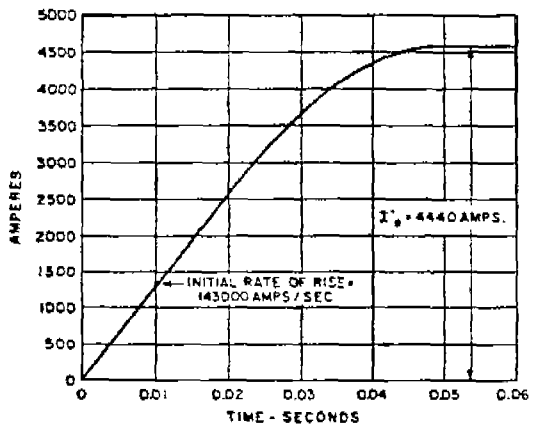


그림 26 Current-Time Curve of Short-Circuit Current for Example Calculation