METRÔ – DF	ENGEVIX	CODIFICAÇÃO ENGEVIX: P00160/01-5X-RL-0010-0C

SETOR:	GERAL:
ENDEREÇO:	
PROPRIETÁRIO:	METRÔ - DF
AUTOR DO PROJETO:	VITO LABATE
RESPONSÁVEL TÉCNICO:	

METRÔ - DF

VITO LABATE CREA N°.: 260563453-1

METRÔ - DF

SISTEMA: ENERGIA			
SUB-SISTEMA: ESTUDOS			
VISTO: ELJ/ELM/ OOP	DATA: 14/08/2013	LOCAL: GERAL	
APROVADO: CAC	DATA: 27/01/2015	COMPONENTES/ TIPO DE DOCUMENTO: **RELATÓRIO TÉCNICO CONSOLIDADO - ESTUDOS DE CURTO CIRCUITO EM CORRENTE CONTINUA 750 Vcc**	ÁREA DE CONST.: -
ESCALA: **S/ESC.**	ETAPA DO PROJ.: Básico		
N MICROFILME:	FOLHA: 1/29	CODIFICAÇÃO: RT.4/EX.99/00.010	REVISÃO: **1**

1	APROVADO CONFORME PARECER Nº 0007/15-TEN	27/01/15	ViLa	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
0B	ATENDENDO O PARECER 0499/14-TEN	13/10/14	ViLa	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
0A	ATENDENDO O PARECER 035/13-TDME	04/09/13	ViLa	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
0	EMISSÃO INICIAL	14/08/13	ViLA	RGCdA/AJCN	JoWe	ELJ/ELM/ OOP	CAC
N°	MODIFICAÇÃO	DATA	FEITO	VISTO	APROVO	VERIF.	APROV
		CONTRATADA				**METRÔ - DF**	
R E V I S Õ E S							

METRÔ DF
RT.4/EX.99/00.010

SISTEMA DE ENERGIA
PROJETO BÁSICO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 5

2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO 5

3 DADOS DE ENTRADA PARA OS CÁLCULOS 9

3.1 SISTEMA. 9

3.2 GRUPOS TRANSFORMADOR-RETIFICADOR. 9

4 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO 10

4.1 SUBESTAÇÕES COM 2 RETIFICADORES DE 1750 KW. 12

4.2 SUBESTAÇÕES COM 2 RETIFICADORES DE 2000 KW. 14

4.3 SUBESTAÇÕES COM 2 RETIFICADORES DE 2750 KW. 17

5 CONCLUSÃO 20

6 ANEXO I – SHORT CIRCUIT CHARACTERISTICS OF ELETRONIC POWER CONVERTERS 21

1 INTRODUÇÃO

Este relatório tem por objetivo apresentar os cálculos para a determinação das correntes de curto circuito no sistema de tração em corrente contínua do Metrô de Brasília.

Serão determinadas as correntes máximas devidas ao curto franco nas barras das subestações retificadoras. Esses resultados servirão de subsídio para avaliação da capacidade dos equipamentos e determinação dos ajustes das proteções dos alimentadores c.c. das subestações retificadoras.

O curto franco no 3º trilho, no ponto de ligação dos alimentadores ao 3º trilho, pode ser considerado, conservativamente, como sendo igual ao curto franco nos terminais do retificador. A redução na corrente de curto é pouco significativa, visto que a indutância e resistência adicionais são apenas as dos barramentos de corrente continua e do próprio alimentador.

O método de cálculo adotado é descrito no item seguinte. Ressaltamos que, conforme consta da Introdução do “Paper”, se trata de um método de cálculo aproximado. Tem sido, contudo, largamente empregado em sistemas metroviários, inclusive no caso de retificador de 12 pulsos, quando se pretende uma avaliação aproximada dos níveis de curto em etapas de projeto básico.

2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO

O método de cálculo que será utilizado para a determinação das correntes de curto circuito no sistema de tração é um cálculo iterativo, que utiliza coeficientes obtidos de gráficos reproduzidos neste relatório. Possibilita obter resultados com aproximação suficiente para as finalidades deste estudo, considerando, também, que muitas das funções disponíveis nos dispositivos de proteção são colocadas inicialmente em modo estatístico, para avaliação futura dos resultados.

O método, que consta do Anexo I deste relatório, foi apresentado no “paper” Short Circuit Characteristics of Eletronic Power Converters, na década de 60 no IEEE e vem sendo largamente utilizado desde então para o cálculo simplificado das correntes de curto-circuito em sistemas de tração.

A curva típica corrente x tempo de curto-circuito pode ser dividida em 3 partes, A, B e C. Ela é mostrada de forma esquemática na Figura 5 do Anexo I.

A região A abrange o período inicial de subida da corrente. A sua duração depende da resistência e da indutância do circuito. No limite, ou seja, para defeitos nos terminais do conversor, sem indutância ou resistência a jusante, a sua duração é de aproximadamente 1/6 de ciclo.

A região B abrange o período em que a corrente de curto supera a corrente permanente de curto-circuito, atingindo o valor de pico da corrente de defeito. Para curtos francos a sua duração é de 5/6 de ciclo, com o pico sendo atingido1/2 ciclo após a ocorrência da falta. Para curtos mais distantes da retificadora, com o aumento da resistência e indutância do sistema c.c. essa fase poderá não existir.

A região C ocorre após a corrente de defeito atingir o seu valor permanente, caso não seja interrompida antes pelo disjuntor extra-rápido do alimentador.

A seguir são descritos os passos do procedimento de cálculo adotado para a determinação da taxa de crescimento da corrente na região A, do valor de pico na região B e do valor permanente da corrente de defeito:

Obter os valores de:

- ED (V) - Tensão nominal do lado c.c do retificador
- ID (A) - Corrente nominal do lado c.c. do retificador
- Zc e zc – Impedâncias em ohms e em p.u. do lado de corrente alternada
- Rc – Resistência em ohms do lado de corrente alternada
- Xc – Reatância em ohms do lado de corrente alternada
- LD – Indutância em Henry do sistema c.c. desde o retificador até o ponto de curto-circuito, incluído o defeito.
- RD – Resistência em ohms do sistema c.c. desde o retificador até o ponto de curto-circuito, incluído o defeito.

Converter a indutância LD para sua reatância equivalente XD, em ohms, usando a expressão:

$$XD = 2.\pi.f.LD$$

para a freqüência de 60 hz, resulta:

$$XD = 377.LD$$

Determinar as constantes K3 e K4. Para retificador de 2 caminhos:

$$K3 = \frac{XD}{2.Xc}$$

e

$$K4 = \frac{Rc + ½.RD}{Xc}$$

Obter o valor da constante K2

A constante K2 é obtida do gráfico a seguir assumindo um valor para a tensão nos terminais do retificador (eda) sob condição de falta.

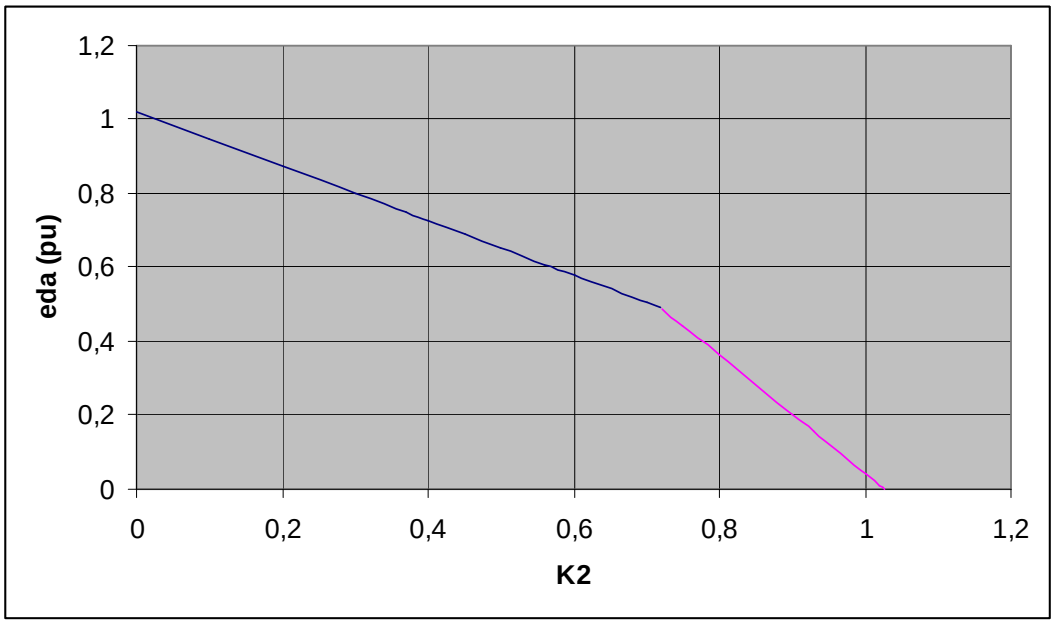


Figura 2.1

Calcular o valor da corrente (Ida) do retificador.

A corrente Ida, em amperes, é obtida usando os valores de zc (p.u) e de K2:

$$Ida = \left(\frac{K2}{zc}\right) ID$$

Calcular a resistência equivalente do retificador (RR)

A resistência equivalente do retificador em ohms é:

$$RR = \frac{ED}{Ida}$$

Calcular a indutância equivalente do retificador (LR)

Para a freqüência f = 60 Hz

$$LR = \frac{ED}{360.Ids}$$

Onde:

A corrente permanente de curto-circuito (Ids) considerando defeito franco (tensão igual a zero) nos terminais do retificador é:

$$Ids = \left(\frac{1{,}02}{zc}\right).ID$$

Calcular a corrente de curto-circuito estabelecida (Idc).

O valor médio da corrente em amperes é:

$$Idc = \frac{ED}{RR + RD}$$

Calcular a taxa de crescimento da corrente (RRdc)

A taxa de crescimento, em A/s é :

$$RRdc = \frac{ED}{LR + LD}$$

Calcular a tensão nos terminais do retificador (Edc).

A tensão em Volts é:

$$Edc = ED - Idc . RR$$

Verificar o valor de Eda assumido

Caso o valor calculado de Edc não varie mais do que 10% em relação ao valor de $Eda = eda\ x\ ED$ assumido, a solução é satisfatória.

Caso isso não aconteça, o processo deve ser repetido assumindo um novo valor para eda.

Calcular o valor de crista da corrente (Idp).

Uma vez encontrado o valor satisfatório para a corrente permanente de defeito através do processo iterativo acima descrito, é calculado o valor de crista da corrente de defeito em amperes, igual a:

$$Idp = Idc . K1$$

Onde K1 é obtido do gráfico a seguir. As curvas mostradas no gráfico correspondem, de cima para baixo, aos seguintes valores de k3 : 0 ; 0,4; 0,9 ; 1,4 e 2,5, conforme mostrado na Figura 4 do Anexo I. Valores intermediários de K3 devem ser interpolados.

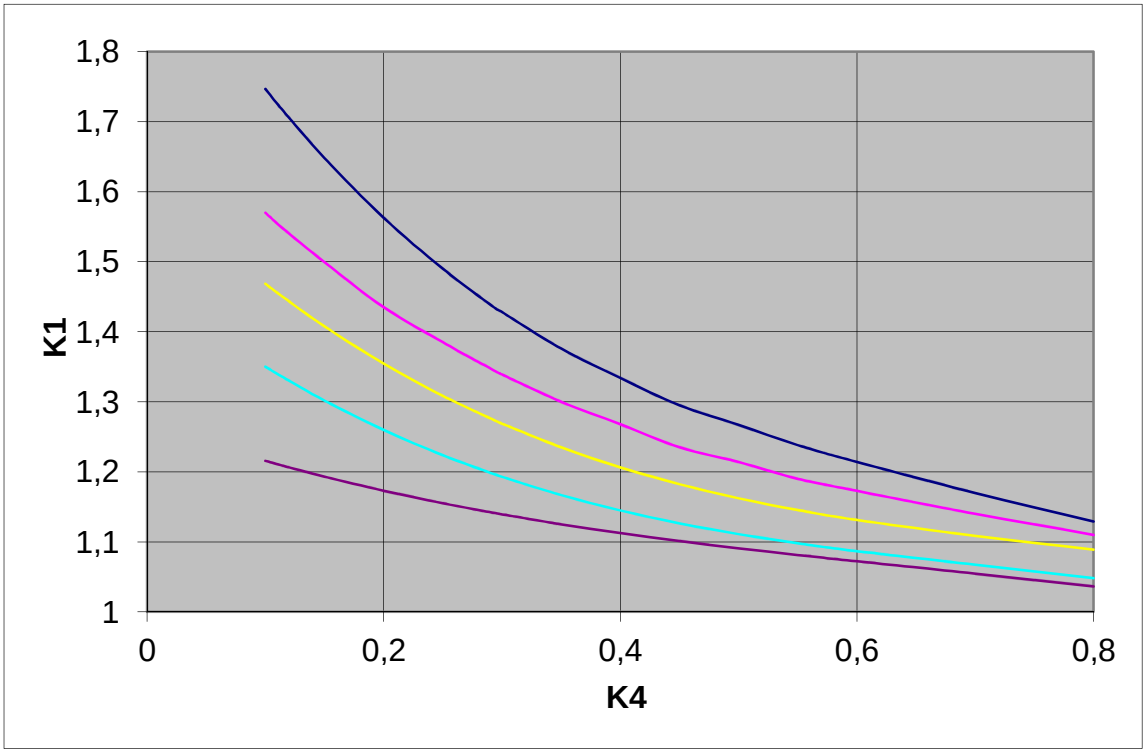


Figura 2.2

3 DADOS DE ENTRADA PARA OS CÁLCULOS

Os seguintes dados de entrada serão utilizados no presente cálculo:

3.1 Sistema.

As correntes de curto-circuito calculadas nas barras de 13,8 kV das subestações retificadoras são mostradas no documento Estudo De Nivel De Curto Circuito Em Corrente Continua e Corrente Alternada, referência RT.4/EX.99/00.009.

Para o cálculo das correntes máximas de curto nas barras de 825 V das subestações será considerada a maior corrente de curto calculada numa barra constante desse documento.

Será adotado o valor de 23.450 A/ -85º referente à barra de Brasília Centro 13,8 kV, ainda que essa não seja uma barra de subestação retificadora. Esse procedimento é conservativo, e deve também ser levado em conta que a impedância do sistema é da ordem de 10% da impedância dos trafos, não tendo , portanto, uma influência relevante no resultado.

A essa corrente corresponde uma potencia de curto de aproximadamente 560 MVA.

3.2 Grupos transformador-retificador.

As potências totais, para 2 grupos por subestação, com as potências em kVA assumidas para os trafos, são as seguintes

- 3500 kW / 4000 kVA;

- 4000 kW / 4.500 kVA;
- 5,500 kW / 6.150 kVA.

Serão adotados para os trafos:

- Impedância: 9%;
- Relação X/R: 12 %;

Para os retificadores:

- Tensão nominal (ED): 825 V:
- Correntes nominais (ID):
    - 3.500 kW: 4.242,5 A;
    - 4.000 kW: 4.848,5 A;
    - 5.500 kW: 6.666,7 A.

4 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

O significado dos símbolos adotados é o seguinte:

Pbase = Potência base adotada

Pccsist = Potência de curto CA no primário do Trafo ou Potência de cc do Sistema.

xtr = reatância do transformador

rtr = reatância do transformador

f = frequência nominal do sistema CA.

ED = Tensão nominal em CC.

ID = Corrente nominal em CC.

Zc = Impedância total em ohms (inclui o transformador-retificador e o Sistema CA)

Rc = Resistência total em ohms

Xc = Reatância total em ohms

zc = Impedância total em p.u (inclui o transformador-retificador e o Sistema CA)

rc = Resistência total em p.u.

xc = Reatância total em p.u.

LR = Indutância equivalente do retificador

RR = Resistência equivalente do retificador

RRdc = taxa de crescimento da corrente

Coeficiente K1 = fator para a obtenção da corrente de pico Idp

Coeficiente K2 = fator para a corrente de defeito em regime

Coeficiente K3 e K4 = relações usadas nos cálculos dependendo do tipo de ligação do retificador

Eda = Tensão terminal assumida

Edc = Tensão terminal calculada

Ida = Corrente assumida

Ids = Corrente calculada em regime

Observamos que ID é calculado conforme mostrado no exemplo de cálculo apresentado no “Paper”, a partir da potência nominal do grupo em kW.

Os valores em p.u a seguir, para Pbase = 4,5 MVA, são comuns para todos os casos que serão calculados:

$$xsist. = \frac{Pbase}{Pccsist}. \; = \; 0{,}0105 \; p.u.$$

Para os 2 transformadores da SR:

$$xtr \; = \; 0{,}0897 \; p.u.$$

$$rtr \; = \; 0{,}0075 \; p.u.$$

Portanto, acrescentando a reatância do sistema:

$$xc \; = \; 0{,}0105 \; + \; 0{,}0897 \; = \; 0{,}10015 \; p.u.$$

$$rc \; = \; 0{,}0075 \; p.u.$$

e:

$$zc \; = \; 0{,}10043 \; p.u.$$

4.1 Subestações com 2 retificadores de 1750 kW.

A impedância total em ohms (Zc)

Da fórmula $Zc = zc \,.\, 0{,}6 \,.\, \frac{ED}{ID}$ em ohm (para conversão da impedância em ohms) :

Considerando os 2 retificadores de 1750 kW em paralelo:

Com $ED = 825\,V$ e $ID = 4242{,}5\,A$, temos:

$$Rc = 0{,}00087\,\Omega$$

$$Xc = 0{,}01169\Omega$$

$$Zc = 0{,}01172\,\Omega$$

a) Determinação dos coeficientes K3 e K4.

Neste caso, para retificadores de duplo caminho:

$$LD = XD = 0$$

$$RD = 0$$

Os coeficientes K3 e K4 são, portanto, iguais a :

$$K3 = \frac{XD}{2.Xc} = 0$$

$$K4 = \frac{Rc + ½\,.RD}{Xc} = \frac{0{,}00087}{0{,}01169} = 0{,}0744$$

c) Cálculo da corrente Ida em amperes.

$$Ida = \frac{K2}{zc}\; x\; ID$$

Com:

$$K2 = 1{,}02$$

$$zc = 0{,}1076\,p.u.$$

$$ID = 4242{,}5$$

$$Ida \ = \left(\frac{1{,}02}{0{,}10043}\right) x \ 4242{,}5 \ = \ 43.086{,}3 \ A$$

d) Cálculo da resistência equivalente do retificador

$$RR \ = \frac{ED}{Ida} = \frac{825}{43.086{,}3} \ = \ 0{,}01191 \ \Omega$$

e) Cálculo da indutância equivalente do retificador

$$LR \ = \frac{ED}{360} x \ Ids$$

Sendo neste caso $Ids \ = \ Ida \ = \ 43.086{,}3 \ A$:

$$LR \ = \frac{825}{360} x \ 43.086{,}3 \ = \ 5{,}32 \ x \ 10 - 5 \ H$$

f) Cálculo da corrente de curto em regime e do gradiente corrente/tempo

$$Idc \ = \ 43.086{,}3 \ A$$

e

$$RRdc \ = \frac{ED}{LR \ + LD} = \frac{825}{5{,}32 \ x \ 10 - 5 \ + \ 0} = \ 15{,}51 \frac{kA}{ms}$$

g) Cálculo da tensão nos terminais do retificador

Edc =0 (curto nos terminais)

h) Comparação do valor assumido em b) com o valor obtido em g).

$$Edc \ = \ Eda \ = \ 0$$

Cálculo da corrente de pico em amperes

Para :

$$K3 \ = \ 0$$

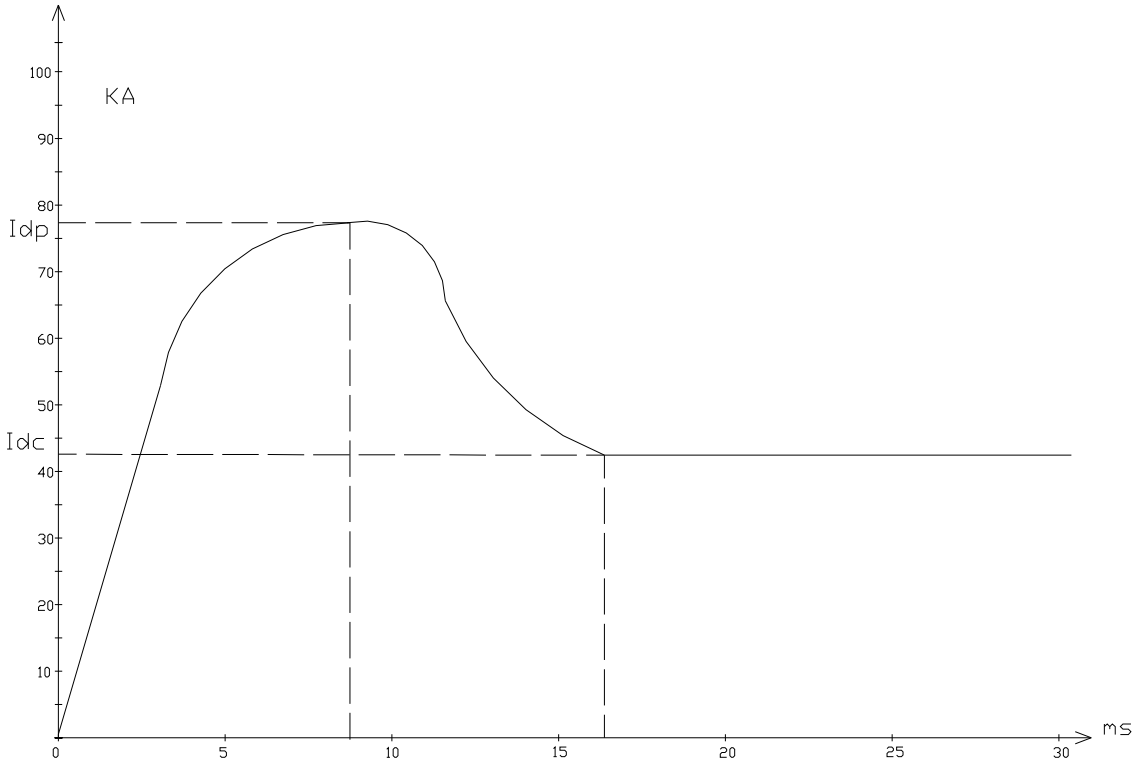
$$K4 \ = \ 0{,}0744$$

Do gráfico da Figura 2.2:

$$K1 \ = \ 1{,}8$$

$$Idp \ = \ Idc \ x \ K1 \ = \ 43.086{,}3 \ x \ 1{,}8 \ = \ 77.555 \ A$$

A seguir é mostrada, de forma esquemática, a curva corrente x tempo da corrente de curto-circuito.



4.2 Subestações com 2 retificadores de 2000 kW.

Da fórmula $Zc = zc \,.\, 0{,}6 \,.\, \frac{ED}{ID}$ em ohm (para conversão da impedância em ohms) :

Considerando os 2 retificadores de 2000 kW em paralelo:

Com ED = 825 V e ID = 4848,5 A, temos:

$$Rc = 0{,}00076\,\Omega$$

$$Xc = 0{,}01022\Omega$$

$$Zc = 0{,}01025\,\Omega$$

a) Determinação dos coeficientes K3 e K4.

Neste caso, para retificadores de duplo caminho:

:

$$LD = XD = 0$$

$$RD = 0$$

Os coeficientes K3 e K4 são, portanto, iguais a :

$$K3 = \frac{XD}{2.Xc} = 0$$

$$K4 = \frac{Rc + ½ . RD}{Xc} = \frac{0{,}00076}{0{,}01022} = 0{,}0744$$

b) Determinação do coeficiente K2.

Sendo a tensão nos terminais do retificador eda = 0 para o curto franco, temos do gráfico da Figura 2.1:

K2 = 1,02

c) Cálculo da corrente Ida em amperes.

$$Ida = \frac{K2}{zc} \; x \; ID$$

Com:

$$K2 = 1{,}02$$

$$zc = 0{,}1076 \; p.u.$$

$$ID = 4848{,}5$$

$$Ida = \left(\frac{1{,}02}{0{,}10043}\right) x \; 4848{,}5 = 49.241{,}5 \; A$$

d) Cálculo da resistência equivalente do retificador

$$RR = \frac{ED}{Ida} = \frac{825}{49.241{,}5} = 0{,}0167 \; \Omega$$

e) Cálculo da indutância equivalente do retificador

$$LR = \frac{ED}{360} x \; Ids$$

Sendo neste caso Ids = Ida = 49.241,5 A:

$$LR = \frac{825}{360} x \; 49.241{,}5 = 4{,}65 \; x \; 10 - 5 \; H$$

f) Cálculo da corrente de curto em regime e do gradiente corrente/tempo

Idc = 49.241,5 A

e

$$RRdc = \frac{ED}{LR + LD} = \frac{825}{4{,}65\ x\ 10 - 5 + 0} = 17{,}73 \frac{kA}{ms}$$

g) Cálculo da tensão nos terminais do retificador

Edc =0 (curto nos terminais)

h) Comparação do valor assumido em b) com o valor obtido em g).

$$Edc = Eda = 0$$

Cálculo da corrente de pico em amperes

Para :

$$K3 = 0$$

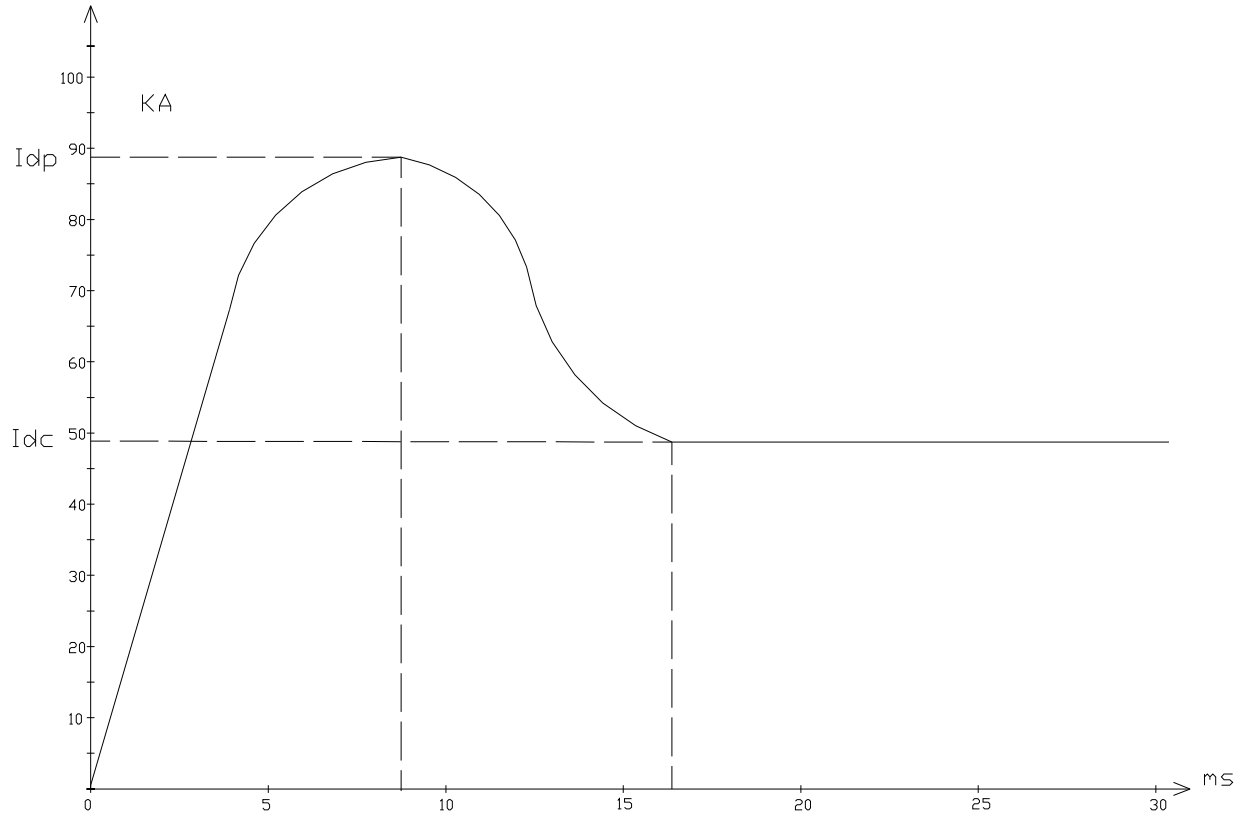
$$K4 = 0{,}0744$$

Do gráfico da Figura 2.2:

$$K1 = 1{,}8$$

$$Idp = Idc\ x\ K1 = 49.241{,}5\ x\ 1{,}8 = 88.635\ A$$

A seguir é mostrada, de forma esquemática, a curva corrente x tempo da corrente de curto-circuito.



4.3 Subestações com 2 retificadores de 2750 kW.

Da fórmula $Zc = zc \,.\, 0{,}6 \,.\, \frac{ED}{ID}$ em ohm (para conversão da impedância em ohms):

Considerando os 2 retificadores de 2750 kW em paralelo:

Com $ED = 825\,V$ *e* $ID = 6666{,}7\,A$, temos:

$$Rc = 0{,}00087\,\Omega$$

$$Xc = 0{,}01169\Omega$$

$$Zc = 0{,}01172\,\Omega$$

a) Determinação dos coeficientes K3 e K4.

Neste caso, para retificadores de duplo caminho:

:

$$LD = XD = 0$$

$$RD = 0$$

Os coeficientes K3 e K4 são, portanto, iguais a :

$$K3 = \frac{XD}{2.Xc} = 0$$

$$K4 = \frac{Rc + ½ . RD}{Xc} = \frac{0{,}000555}{0{,}00745} = 0{,}0744$$

b) Determinação do coeficiente K2.

Sendo a tensão nos terminais do retificador eda = 0 para o curto franco, temos do gráfico da Figura 2.1:

$$K2 = 1{,}02$$

c) Cálculo da corrente Ida em amperes.

$$Ida = \frac{K2}{zc} \; x \; ID$$

Com:

$$K2 = 1{,}02$$

$$zc = 0{,}1076 \; p.u.$$

$$ID = 6666{,}7$$

$$Ida = \left(\frac{1{,}02}{0{,}10043}\right) x \; 6666{,}7 = 67.707 \; A$$

d) Cálculo da resistência equivalente do retificador

$$RR = \frac{ED}{Ida} = \frac{825}{67.707} = 0{,}0122 \; \Omega$$

e) Cálculo da indutância equivalente do retificador

$$LR = \frac{ED}{360} x \; Ids$$

Sendo neste caso Ids = Ida = 67.707 A:

$$LR = \frac{825}{360} x \; 67.707 = 3{,}38 \; x \; 10 - 5 \; H$$

f) Cálculo da corrente de curto em regime e do gradiente corrente/tempo

$$Idc = 67.707 \ A$$

e

$$RRdc = \frac{ED}{LR + LD} = \frac{825}{3{,}38\ x\ 10 - 5 + 0} = 24{,}37 \frac{kA}{ms}$$

g) Cálculo da tensão nos terminais do retificador

$$Edc = 0\ (curto\ nos\ terminais)$$

h) Comparação do valor assumido em b) com o valor obtido em g).

$$Edc = Eda = 0$$

Cálculo da corrente de pico em amperes

Para :

$$K3 = 0$$

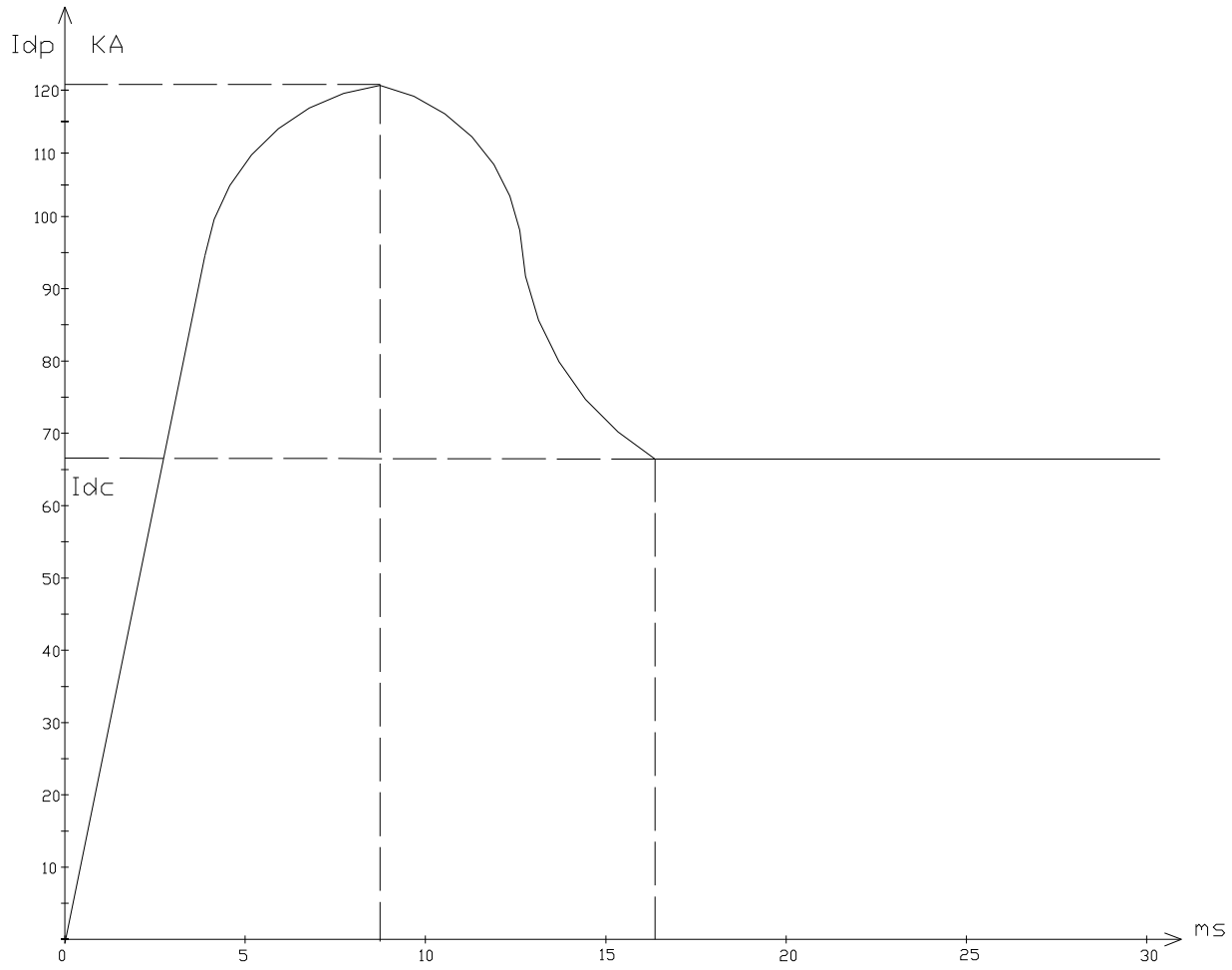
$$K4 = 0{,}0744$$

Do gráfico da Figura 2.2:

$$K1 = 1{,}8$$

$$Idp = Idc\ x\ K1 = 67.707\ x\ 1{,}8 = 121.873\ A$$

A seguir é mostrada, de forma esquemática, a curva corrente x tempo da corrente de curto-circuito.



5 CONCLUSÃO

Foram obtidos os seguintes valores da corrente de curto franco para os casos considerados:

Retificadores	Taxa de crescimento RRdc	Idc (regime)	Idp (pico)
2 x 1750	15,51 kA/ms	43.086,3 A	77.555 A
2 x 2000	17,73 kA/ms	49.241,5 A	88.635 A
2 x 2750	24,37 kA/ms	67.707 A	121.873 A

6 ANEXO I – SHORT CIRCUIT CHARACTERISTICS OF ELETRONIC POWER CONVERTERS

SÃO PAULO METRO

ELECTRIFICATION SYSTEM SHORT CIRCUIT CAPABILITY

Engineering Study 5e, Work Package 1

ATTACHMENT A

Unreferenced technical paper entitled "Short Circuit Characteristics of Electronic Power Converters"

SHORT-CIRCUIT CHARACTERISTICS OF ELECTRONIC POWER CONVERTERS

Introduction

Electronic power rectifiers are a major source of power for direct-current systems in industry. A knowledge of the short-circuit characteristics of the power rectifier is essential for those who operate, design, or supply equipment for a direct-current system incorporating a rectifier.

The information presently available on this subject is not well suited for the use of the application engineer. The material presented here permits the engineer to determine the approximate short-circuit characteristics of the power rectifier with a minimum knowledge of the power rectifier and the system.

Typical Characteristic

A typical current-time curve for a power rectifier is shown in Fig. 1. This curve is for a bolted fault at the terminals of the rectifier. The bolted fault is, in effect, a three-phase fault on the AC system, and the magnitude of the DC fault current depends primarily upon the impedance of the rectifier transformer.

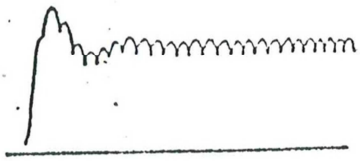


Fig. 1. Typical current-time curve for bolted fault at rectifier terminals (15EH407)

The peak at the half-cycle point in the current-time curve is caused by the same phenomenon that creates the DC offset in an AC short circuit. The magnitude of this peak current depends on the X/R ratio of the rectifier transformer and the AC system, and also on the amount of resistance and inductance through which the short-circuit current flows in the DC system. The X/R ratio of the transformer and AC system determines the maximum possible value for this current in any particular case. The addition of resistance and/or inductance in the DC system then acts to reduce the magnitude of the peak current. The current-time curve is shown in Fig. 2 for a case where the peak is eliminated.

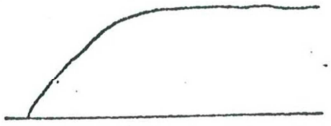


Fig. 2. Current-time curve for case where peak has been eliminated by inductance in d-c system (15EH408)

The initial rate of rise of the DC short-circuit current for a solid fault at the rectifier terminals varies directly with the magnitude of the sustained short-circuit current. The addition of inductance in the DC system acts to decrease the rate of rise of the fault current. The addition of resistance in the DC system also decreases the rate of rise of the fault current, but to a much lesser degree than inductance. The addition of resistance acts to decrease the rate of rise only through its action in reducing the magnitude of the sustained fault current.

Method of Evaluating Short-Circuit Characteristic

The determination of the rectifier short-circuit characteristic; i.e., current-time curve, for a bolted fault at the rectifier terminals is fairly simple, since the AC system (rectifier transformer included) is the controlling factor. The evaluation becomes more difficult, however, when the short circuit occurs out in the DC system and inductance and resistance are present in the DC system. The problem becomes even more complicated when other sources of short-circuit current are present in the DC system.

It is necessary to develop an equivalent source to represent the rectifier, if calculations are to be performed with any ease. This equivalent rectifier source would have an equivalent resistance and an equivalent inductance which would be used as constants for calculating the DC fault current.

The equivalent resistance is determined from a rectifier regulation curve, similar to Fig. 3, and a step-by-step procedure is given later for this purpose. The equivalent resistance will vary for different fault conditions and depends upon the rectifier terminal DC voltage. The nature of the regulation curve makes it necessary to use a trial and error procedure to determine the correct equivalent re-

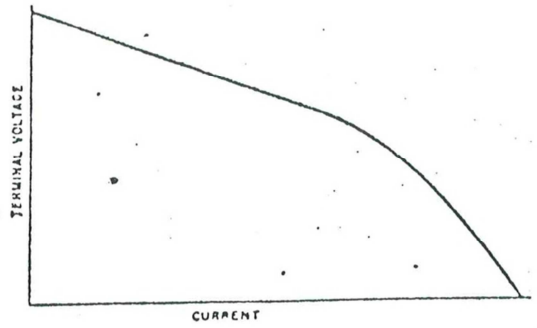


Fig. 3. Characteristic regulation curve for power rectifier (153H409)

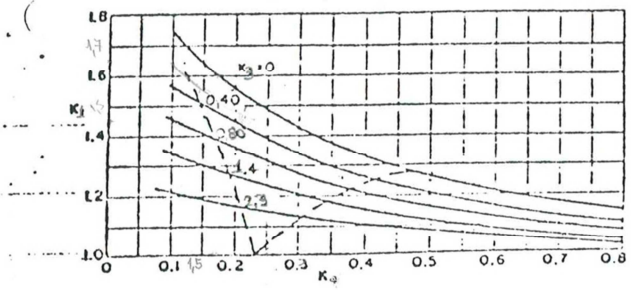


Fig. 4. Peak fault current factor as a function of system constants (1149948)

sistance. This resistance is then used to calculate the sustained value of DC short-circuit current.

The equivalent inductance is determined from a knowledge of the sustained short-circuit current for a bolted fault and the rated system voltage. An expression is given in the procedure for calculating it.

The magnitude of the peak short-circuit current is determined by the AC and DC systems impedance characteristics and the effect of both systems is covered by the one family of curves, Fig. 4.

A step-by-step procedure is given later that details the method of calculating the equivalent resistance and inductance, and of using these quantities to calculate the sustained fault current, peak fault current, and rate of rise of the fault current.

Construction of Current-Time Curve

The current-time curve will be divided into three regions, Fig. 5, to facilitate a discussion of its construction. Region A covers the period of initial rate of rise, region B covers the time during which the current is above the sustained value, and region C

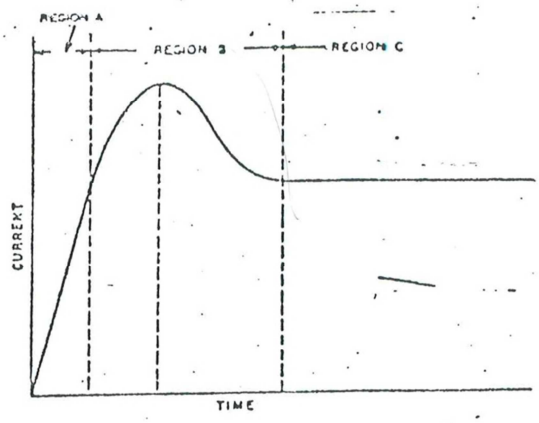


Fig. 5. Typical current-time curve for rectifier short-circuit current (158H410)

covers the time after the current has obtained its sustained value. The time duration of regions A and B depends upon the amount of inductance and resistance in the DC system through which the fault current flows. For a rectifier terminal fault (no resistance or inductance in DC system), region A covers one-sixth cycle, region B covers five-sixth cycle, and region C covers the time after one cycle until the current is interrupted. The maximum current is reached at one-half cycle after the fault occurs.

Resistance only (no appreciable inductance) in the DC system between the rectifier and the fault reduces the magnitudes of the peak current and the sustained current. The time at which the peak occurs will remain the same as for the case of a terminal fault; that is, one-half cycle after the fault occurs. The time duration of regions A and B will be the same as for a terminal fault.

Inductance in the DC system will cause the current peak to occur at a time later than one-half cycle after the fault. Thus, the time duration of region A will be increased and can be calculated by assuming that the rate of rise of the current remains constant until the current reaches a value equal to the magnitude of the sustained short-circuit current. The time duration of region B will stay at approximately one cycle. As the amount of inductance is increased, the current peak is reduced and when the peak is eliminated, region B will be nonexistent. That is, the current will transfer from region A to region C with no over-shoot.

The current-time curve developed in accordance with the procedures outlined represents the short-circuit characteristic of the rectifier. It represents the current which that particular rectifier will supply to the short circuit.

Arc-Back

Electronic power rectifiers are subject to failure of the rectifying action of a tube. This type of failure is termed "arc-back", and is associated with current flow through the failed tube in the reverse direction. It represents a fault on the rectifier transformer and on the DC bus. As a result, the current magnitude may be quite high. Rectifier substation manufacturers normally include a protective device to protect against the current during arc-back and, hence, no method of calculating this current will be included in this discussion.

Step-by-Step Procedure for Calculating Rectifier Short-Circuit Current

1. Obtain values for:

   a. Rated DC voltage (E_D)

   b. Rated DC amperes (I_D)

   c. Total AC impedance in ohms (Z_C) and in per unit (z_c), reactance in ohms (X_C) and resistance in ohms (R_C). (Include rectifier transformer and AC system).

   d. DC system inductance in henries (L_D) and resistance in ohms (R_D) from source to fault, including fault.

2. Convert DC system inductance (L_D) to an equivalent reactance in ohms (X_D) by use of the expression:

   $X_D = 2\pi f L_D$

   where f = AC system frequency

   For 60-cycle system

   $X_D = 377\ L_D$.

3. Determine the ratios K_3 and K_4:

   $K_3 = X_D / 2X_C$ and $K_4 = \dfrac{R_C + 1/2\ R_D}{X_C}$ for double-way rectifiers

   or,

   $K_3 = 2X_D/X_C$ and $K_4 = \dfrac{R_C + 2R_D}{X_C}$ for double-wye rectifiers.

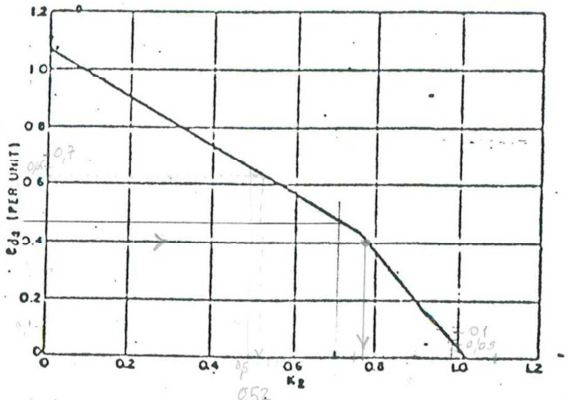


Fig. 6. Sustained fault current factor vs rectifier terminal voltage (156H411)

4. Assume a value for the rectifier terminal voltage in per unit (e_{da}) under the faulted condition. From Fig. 6, obtain a value for the sustained fault current factor (K_2).

5. Using the value of z_c from Step 1 and K_2 from Step 4, calculate the value of I_{da} in amperes.

   $I_{da} = (K_2/z_c) \times I_D$ amperes.

6. The equivalent rectifier resistance for use in the equivalent circuit is calculated as:

   $R_R = \dfrac{E_D}{I_{da}}$ ohms.

7. Calculate equivalent inductance for the rectifier by the expression:

   $L_R = \dfrac{E_D}{360 \times I_{ds}}$ henries (for $f = 60$)

   where I_{ds} = rectifier sustained short-circuit current for a terminal bolted fault, (rectifier terminal voltage of zero), or $I_{ds} = (1.02/z_c) \times I_D$. This is the value of inductance to use in the equivalent circuit to represent the rectifier.

8. Draw the equivalent circuit and calculate the sustained value of fault current and the rate of rise of the fault current. Sustained fault current = $\dfrac{E_D}{R_R + R_D} = I_{dc}$ amperes

   Rate of rise of current = $\dfrac{E_D}{L_R + L_D} = RR_{dc}$ amperes per second.

9. Calculate the rectifier terminal voltage as:

$$E_{dc} = E_D - I_{dc} \times R_R.$$

10. If the E_{da} ($E_{da} = e_{da} \times E_D$) assumed in Step 4 is within 10 percent of the value calculated for E_{dc} in Step 10, the solution is satisfactory. If the error is too great, repeat the procedure assuming a new value for e_{da}.

11. When a satisfactory solution for the sustained fault current has been obtained, calculate the peak fault current as:

Peak current (amperes) = I_{dc} (amp) x $K_1 = I_{dp}$
Where the peak fault current factor, K_1 was obtained from Fig. 4 using the ratios calculated in Step 3.

12. Using the rate of rise and sustained fault current from Step 8 and the peak current from Step 11, plot a curve of current vs time.

Examples of Use of Calculating Procedure

A. Calculate current-time curve for fault at rectifier terminals. The step numbers used below correspond to the steps in the step-by-step procedure.

1. Given: 500 kw, double-wye rectifier on 60-cycle AC system

Rated DC voltage (E_D) = 250 volts
Rated DC amperes (I_D) = 2000 amps
AC inipedance (z_c) = .076 per unit and using the formula on page 7 , for the conversion of z_c to Z_C,

$$Z_C = .076 \times 2.3 \times \frac{250}{2000} = .022 \text{ ohms}$$

AC reactance (X_C) = .0217 ohms
AC resistance (R_C) = .0036 ohms
DC resistance and inductance are zero.

2. Converting the DC system inductance to an equivalent reactance gives:

$$L_D = X_D = 0.$$

3. This is a double-wye rectifier, therefore

$$K_3 = \frac{2X_D}{X_C} = \frac{2 \times 0}{.0217} = 0$$

$$\text{and } K_4 = \frac{R_C + 2R_D}{X_C} = \frac{.0036 + 2 \times 0}{.0217} = 0.166.$$

4. For the terminal fault, the rectifier terminal voltage is zero.
From Fig. 6, $K_2 = 1.02$.

5. With $K_2 = 1.02$ and $z_c = .076$: $I_{da} = \frac{1.02}{.076} \times 2000 = 26{,}900$ amperes.

6. Rectifier equivalent resistance is then:

$$R_R = \frac{250 \text{ volts}}{26900 \text{ amps}} = .0093 \text{ ohms.}$$

7. To calculate L_R, the value of I_{ds} must first be calculated. In this case, a terminal fault, $I_{ds} = I_{da} = 26900$ amperes (from Step 5).

Then,

$$L_R = \frac{250}{360 \times 26900} = 25.8 \times 10^{-6} \text{ henries}$$

(for $f = 60$).

8. Sustained fault current (I_{dc}) = $\frac{250}{.0093 + 0}$ = 26900 amperes

Rate of rise of fault current (RR_{dc}) =

$$\frac{250}{25.8 \times 10^{-6} + 0} = 9.7 \times 10^6 \text{ amperes per second.}$$

9. The rectifier terminal voltage is now calculated as:
$E_{dc} = 250 - (26900 \times .0093) = 250 - 250 = 0.$

10. E_{dc} and E_{da} are both zero and solution is satisfactory.

11. From Fig. 4, $K_1 = 1.62$ for $K_4 = .0.166$ (Step 3) and $K_3 = 0$.
$I_{dp} = 1.62 \times 26900 = 43600$ amperes.

12. The current-time curve is as plotted in Fig. 7.

B. Calculate the current-time curve for a fault in the DC system for the same rectifier as used in Example A.

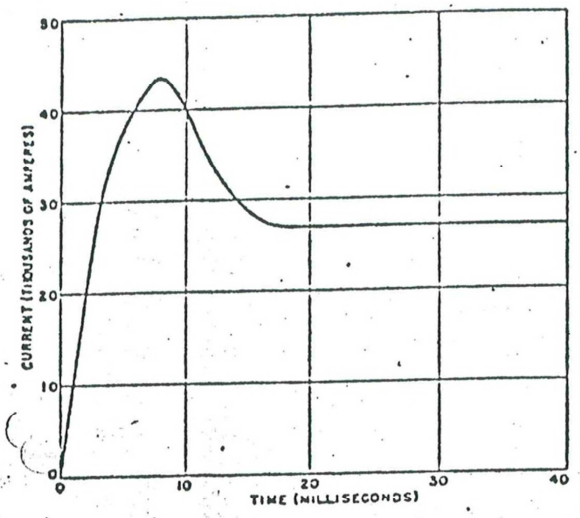


Fig. 7. Current-time curve of rectifier short-circuit current for terminal fault (Example A) (158H412)

1. Given: 500 kw, double-wye rectifier, 250 volts, 2000 amperes, on 60-cycle AC system
   $z_C = .076$
   $Z_C = .022$ ohms
   $X_C = .0217$ ohms
   $R_C = .0036$ ohms
   $L_D = 10 \times 10^{-6}$ henries
   $R_D = .001$ ohms.

2. Converting DC system inductance to an equivalent reactance:

   $$X_D = 377 \times 10 \times 10^{-6} = 0.00377 \text{ ohms.}$$

3. $$K_3 = \frac{2X_D}{X_C} = \frac{2 \times 0.00377}{.0217} = 0.35$$

   $$K_4 = \frac{R_C + 2R_D}{X_C} = \frac{.0036 + 2 \times .001}{.0217} = 0.26.$$

4. Assume that $e_{da} = .2$
   From Fig. 6, $K_2 = 0.9$

5. With $K_2 = 0.9$ and $z_c = .076$: $I_{da} = \frac{0.9}{.076} \times 2000 =$ 23650 amperes.

6. Rectifier equivalent resistance is now,

   $$R_R = \frac{250 \text{ volts}}{23650 \text{ amps}} = .01055 \text{ ohms.}$$

7. Rectifier equivalent inductance is unchanged:

   $L_R = 25.8 \times 10^{-6}$ henries (from Example A).

8. Sustained fault current = $I_{dc} = \frac{250}{.01055 + .001}$

   = 21650 amps

   Rate of rise = $RR_{dc} = \frac{250}{25.8 \times 10^{-6} + 100 \times 10^{-6}} =$ 1.99×10^6 amperes per second.

9. The rectifier terminal voltage is calculated as:

   $E_{dc} = 250 - (21650 \times .01055) = 250 - 229 =$ 21 volts.

10. In Step 4, e_{da} was assumed = .2 per unit, or $E_{da} = 50$ volts
    The difference between E_{dc} and E_{da} is too great so the procedure from Step 4 to Step 10 must be repeated as follows:

    4a. Assume that $e_{da} = .1$

    From Fig. 6, $K_2 = 0.965$

    5a. $I_{da} = \frac{0.965}{.076} \times 2000 = 25400$ amps

    6a. $R_R = \frac{250 \text{ volts}}{25400 \text{ amps}} = .00985$ ohms

    7a. $L_R = 25.8 \times 10^{-6}$ henries

    8a. Sustained fault current = $I_{dc} = \frac{250}{.00985 + .001} = 23000$ amperes

    Rate of rise = $RR_{dc} = 1.99 \times 10^6$ amperes per second.

    9a. $E_{dc} = 250 - (23000 \times .00985) = 250 -$ 227 = 23 volts

    10a. In Step 4, $e_{da} = .1$

    $E_{da} = .1 \times 250v = 25$ volts

    The difference between the assumed terminal voltage, E_{da}, and the calculated value, E_{dc}, is now so slight that any further calculation is not necessary.

11. The rectifier peak current is then determined. From Fig. 4 for $K_3 = 0.35$ and $K_1' = 0.26$,

$K_1 = 1.4$

and $I_{dp} = 23000 \times 1.4 = 32200$ amperes.

12. The current-time curve for the current from the rectifier to the fault is drawn in Fig. 8 with

$RR_{dc} = 2 \times 10^{-6}$ amperes per second

$I_{dp} = 32200$ amperes

$I_{dc} = 23000$ amperes.

Typical Constants For 250-volt or 600-volt Rectifiers

The following ranges of values for rectifier and system constants may be used in those cases where it is impossible to obtain the actual values.

Rectifier Transformer -

Reactance = .055 - .08 per unit on transformer kva base

Resistance = .018 - .01 per unit on transformer kva base

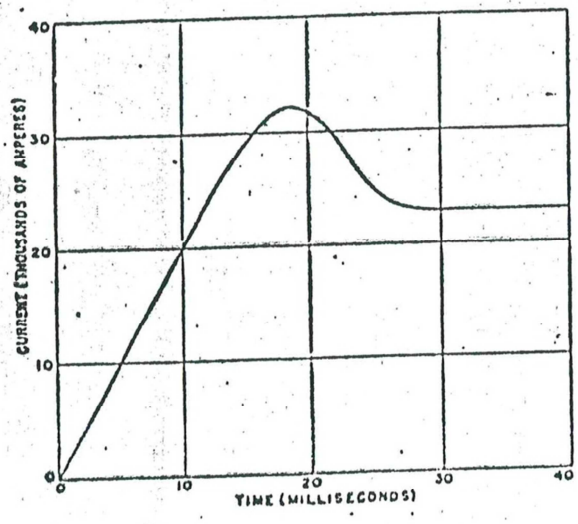


Fig. 8. Current-time curve of rectifier short-circuit current for fault in d-c system with appreciable inductance and resistance in the d-c system (Example 5) (15811-413)

System -

Reactance = .002 - .02 per unit on transformer kva base.

The lower values of transformer reactance and higher values of resistance apply to small units (approximately 500 kw) and the higher values of reactance and lower values of resistance apply to large units (approximately 5000 kw).

The system reactance is quite variable, but in general, the low values are for use with small rectifiers and the higher values for large units.

Conversion Formulas

Conversion of z_c to Z_C

$Z_C = z_c \times 2.3 \times \frac{E_D}{I_D}$ ohms (for double-wye rectifier circuits)

$Z_C = z_c \times 0.6 \times \frac{E_D}{I_D}$ ohms (for double-way rectifier circuits)

where

Z_C = ohms at rectifier transformer secondary voltage

z_c = per unit on rectifier transformer kva base

E_D = rated DC voltage

I_D = rated DC amps

These formulas can also be used to convert commutating reactance or resistance from a per unit value to an ohmic value.

Symbols

E_D = rectifier rated DC voltage (volts)

E_{dc} = rectifier DC voltage (volts) with sustained fault current flowing

I_D = rectifier rated DC current (amperes)

I_{da} = rectifier current (amperes) - preliminary value of sustained fault current calculated from an assumed rectifier terminal voltage.

I_{dc} = rectifier current (amperes) - final calculated value of sustained fault current

I_{ds} = rectifier current (amperes) for bolted fault

L_D = inductance (henries) of DC system from rectifier to fault, including the fault

R_D = resistance (ohms) of DC system from rectifier to fault, including the fault

R_C = commutating resistance (ohms) based on rectifier transformer secondary voltage, includes rectifier transformer and AC system

R_R = equivalent rectifier resistance (ohms), for use in equivalent circuit

X_C = commutating reactance (ohms) based on rectifier transformer secondary voltage, includes rectifier transformer and AC system

X_D = equivalent reactance (ohms) of DC system from rectifier to fault, including the fault

I_{dp} = peak rectifier fault current (amperes)

= peak fault current factor

K_2 = sustained fault current factor

= reactance constant for determining K_1

K_4 = resistance constant for determining K_1

Z_C = commutating impedance (ohms) based on rectifier transformer secondary voltage, includes rectifier transformer and AC system

z_c = commutating impedance in per unit on rectifier transformer kva base

E_{da} = assumed rectifier terminal voltage (volts) under fault condition

e_{da} = assumed rectifier terminal voltage in per unit of rated rectifier DC voltage

RR_{dc} = rate of rise of current I_{dc} (amperes per second)