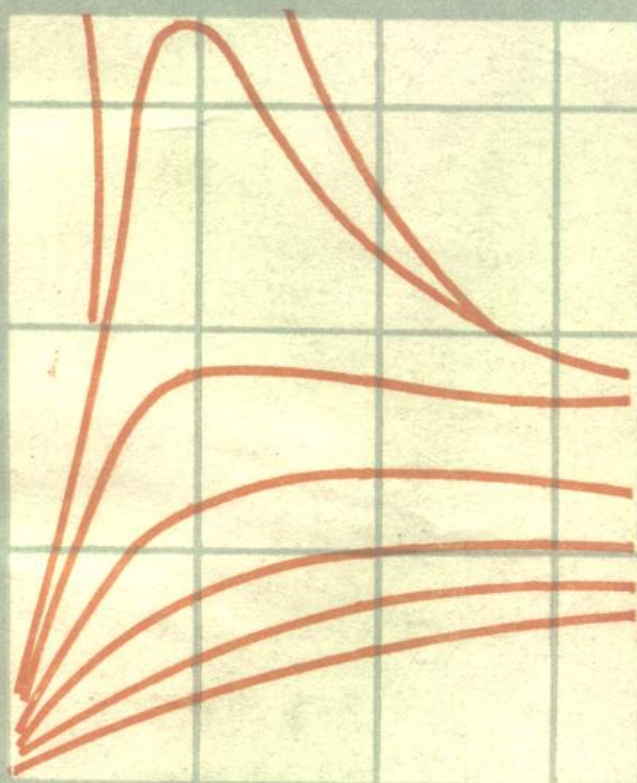


高压电网中的 开关负荷

〔民主德国〕 F. 诺亚克 著



机械工业出版社

高压电网中的开关负荷

〔民主德国〕 F.诺亚克 著

李建基 译

王其平 校



机械工业出版社

本书分析了在端子短路、近区短路、两相接地和失步等情况下断路器开断故障电流时所承受的负荷，并列举许多实际网路的例子。论述了各种开断情况的特点，重点放在阐明各种开断情况的物理过程并以简单的等值电路图给出计算方法。进而作出对试验标准和开关使用的结论。

本书可供电力部门从事电力系统规划、设计和运行的工程技术人员，高压开关制造部门从事研究、设计、试验的工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

Schalterbeanspruchungen in Hochspannungsnetzen

Friedhelm Noack

VEB VERLAG TECHNIK, BERLIN, 1980

* * *

高压电网中的开关负荷

〔民主德国〕F.诺亚克 著

李建基 译

王其平 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $8 \frac{1}{4}$ · 字数 176 千字

1985年11月北京第一版·1985年11月北京第一次印刷

印数 0,001—3,770 · 定价 2.00 元

*

统一书号：15033·6040

序 言

输电网路中的断路器不可能做成很多型式，而是为专门的使用场合研制的。因此，每个断路器必须满足很不相同的而且部分矛盾的要求。这些要求是根据不同的故障类型和不同的网路使用地点提出来的。对各种分合任务和大多数使用场合的分合能力，通过很少的几项具有代表性的试验来考核。

因此，了解网路对断路器的要求，是研制开关和制订开关试验标准的重要前提条件。另一方面，了解开关负荷和操作过电压对高压开关设备和高压网路的设计者、制造者和运行者具有重要意义。由于使用情况的增多，试验标准未能反映出断路器的各种负荷情况，而且仅仅按照开断电流和电压等级来设计断路器是不够的，输电容量的增长和电网的扩建，使现有设备中的断路器不再能满足加重的各种条件。

本书分析了在端子短路、近区短路、两相接地和电网失步情况下开断故障电流时电网对断路器的要求。将断路器的负荷与断路器试验标准的允许值作了对比。

此外，论述了开断空载变压器和关合空载线路的情况。这些分合情况对绝缘设计和网路运行至为重要。这里，也阐述了为控制和限制操作过电压而采取的措施。

对于一些重要的开断过程，如开断电容器组、开断线路和发电机断路器的开断过程，未作介绍，对于分合过程中开关和网路的相互作用亦未作介绍。

根据本书的内容和特点，不是尽量详细论述所有分合过程和各种计算方法，而重点放在以简单的等值电路阐明物理关系及计算。这种论述方法加上有关电气设备特性参数的丰富附录，使读者能够独自分析和计算简单的负荷情况。本书可供从事电气设备设计、制造和运行的工程师及高等院校电工专业学生参考。

我衷心感谢出版者G.米勒教授的鼓励和审阅稿件。我感谢在脱稿中给予帮助的诸位，特别感谢阿佩女士、技术出版社的合作。

弗里德黑尔姆 诺亚克

公式符号索引

A	振幅	u	电压瞬时值
A	面积	μ	电容比
$[A]$	链	W	能量
B	磁感应强度	X	电抗
C	电容	Y	视在电导
E	电场强度	Z	阻抗
G	电导	Z_w	波阻抗
H	频率	a	系数
H	磁场强度	a	旋转因子
I	电流有效值	b	火花放电常数
I_a	开断电流	c	常数
I_K	短路电流	d	距离
im	虚部	d	阻尼
L	电感	e	电源电压的瞬时值
P	功率	f	频率
P	概率	g	负荷度
Q	质量	i	电流瞬时值
R	电阻	j	$\sqrt{-1}$
Re	实部	k	过电压倍数
T	周期	l	长度
U	电压有效值	m	频率比 ω_{1L}/ω_N
U_m	绝缘电压	n	数量
U_{sn}	开关额定电压	p	拉普拉斯变换的象变量
U_{wp}	相恢复电压	s	滑差率
s_m	平均上升率	s	上升率
t	时间	s_0	初始上升率

u_0	瞬态恢复电压	ω	角频率
v	速度	ω	电源角频率
v	电感比 L_{1L}/L_{1N}	下	角
v	失调量	A	电源部分
w	匝数	A	开断情况
x	发电机相对电抗	B	电源部分
x	长度	B	开断情况
z	阻抗比 Z_0/Z	C	电容
α	衰减系数	D	电抗器
α	接地系数, 相系数	DE	两相接地
β	相系数	E	接地
γ	振幅系数	G	发电机
γ	传播系数	K	电缆
δ	阻尼系数	K	短路
ζ	电容比 C_1/C_0	KU	自动重合闸
Θ	磁通量	L	电感
θ	电压相量之间的辐角差	L	线路
λ	电感比 L_0/L_1	LE	相-地
μ	频率比	LL	相-相
ν	固有频率	M	中性线
σ	起始振幅系数	N	网路
τ	行波的行进时间	OS	原边电压
τ	至最大值的时间	R	电阻
τ	时间常数	R, S, T	三相交流系统的各相
Φ	磁通		线
Φ	相角	S	开关
ψ	磁通链	SS	母线
ψ	磁通链的瞬时值	St	故障
ψ	相角	T	变压器

U_S 副边电压

$0, 1, 2$ 零序、正序、负序

$1, 2$ 入端, 出端

$1, 2$ 定子, 转子

I 单相

I 两相

I 三相

a, b, c 三相交流系统的各相
线

a 初始

a 开断

a 截断

b 工作

bez 参考值

d 阻尼

d 击穿

e 固有

e 放电

e 接地

erf 要求的

g 相互

$hyst$ 磁滞

k 临界

k, l 数量

l 空载

m 平均

max 最大的

min 最小的

n 额定值

P 并联

r 串联

r 重燃

s 视在值

st 静态

tr 瞬态

$\bar{u}$ 过电压

v 减小

w 有效值

wb 涡流

wr 有效剩余

z 点火

zul 允许的

μ 磁化

v 三相交流系统的相线

σ 均方差

参量的附加表示法

$\tilde{x}$ 复数量, 向量, 正弦量的

复数表示

X 正弦量的有效值

x 时间变量的有效值

$\hat{X}$ 正弦量的振幅

$\hat{x}$ 时间变量的瞬时值

$\dot{x}$ 某一变量对时间求导

$\bar{x}$ 某一量的平均值

$\tilde{x}$ 复数瞬时值, 向量

$[x]$ 折积向量

$[X]$ 矩阵

x' 变换量

$\tilde{x}$ 拉普拉斯变换的象函数

目 录

公式符号索引

1. 电网中的分合过程	1
1.1 断路器的分合任务	1
1.2 开断大电流时开关负荷的特点	2
1.2.1 物理基础	2
1.2.2 瞬态恢复电压的确定	4
1.2.3 瞬态恢复电压的特征参数	5
1.3 分合小电流时绝缘负荷的特点	8
1.3.1 物理基础	8
1.3.2 操作过电压的确定	9
1.3.3 操作过电压的特征参数	10
1.4 分合过程中开关和电网之间的相互作用	11
2. 开断端子短路故障电流时的开关负荷	12
2.1 故障的定义	12
2.2 故障的起因	12
2.3 故障频率	13
2.4 各种开断情况下的开关负荷	14
2.4.1 特点	14
2.4.2 短路电流的计算	17
2.4.3 相恢复电压的计算	20
2.4.4 瞬态恢复电压的计算	22
2.4.4.1 单频电路中的瞬态恢复电压	22
2.4.4.2 三相交流系统中的瞬态恢复电压	23

2.4.4.3	计算瞬态恢复电压需作的假定和前提条件	24
2.4.4.4	各种开断条件下的瞬态恢复电压	25
2.4.5	各种开断情况下, 开关负荷的对比故障电流和 上升率	38
2.5	各种故障情况下的开关负荷	41
2.5.1	变电所中, 端子短路时的各种故障情况	41
2.5.2	关于开关负荷的结论	45
2.6	网路元件和开关元件对端子短路时瞬态恢复电压的 影响	47
2.6.1	串联电阻的影响	47
2.6.2	并联电阻的影响	48
2.6.3	并联电容的影响	51
2.7	高压网路中开关负荷的特点	53
2.7.1	研究的方法	53
2.7.2	关于空载网路中开关负荷的结论	53
2.7.3	关于有载网路中开关负荷的结论	57
2.7.4	不允许的开关负荷出现概率	58
2.7.5	开关并联电阻对瞬态恢复电压的影响	60
2.8	中压网路中开关负荷的特点	60
2.8.1	变压器旁开关的负荷	60
2.8.2	电抗器旁开关的负荷	63
2.8.3	变电所自用电设备中开关负荷	65
2.8.4	发电机断路器的负荷	68
3.	开断近区故障电流时的开关负荷	71
3.1	故障的定义	71
3.2	故障的起因	72
3.3	网路中近区短路时的各种故障情况	72
3.4	故障频率	72
3.5	各种开断情况下的开关负荷	75

3.5.1	特点	75
3.5.2	瞬态恢复电压的计算	76
3.5.3	波阻抗的计算	81
3.5.4	波阻抗和起始上升率的对比	85
3.5.5	临界开关负荷的计算	89
3.6	高压网路中开关负荷的特点	92
3.6.1	临界开关负荷的参数	92
3.6.2	与试验标准规定参数的对比	94
3.6.3	开关并联电阻对瞬态恢复电压的影响	94
3.6.4	开关并联电容对瞬态恢复电压的影响	96
4.	开断两相接地故障电流时的开关负荷	97
4.1	故障的定义	97
4.2	故障的起因	97
4.3	网路中两相接地时的各种故障情况	99
4.4	故障频率	102
4.5	各种开断情况下的开关负荷	103
4.5.1	故障电流的计算	103
4.5.2	相恢复电压的计算	108
4.5.3	瞬态恢复电压的计算	111
4.5.4	各种开断情况下开关负荷的对比	123
4.6	中压和高压网路中开关负荷的特点	124
4.6.1	两相接地电流和开断电流	124
4.6.2	瞬态恢复电压的幅值	126
4.6.3	瞬态恢复电压上升率	128
4.6.4	关于试验标准的结论	129
5.	开断失步网路中故障电流时的开关负荷	131
5.1	故障的定义	131
5.2	故障的起因	132
5.3	故障频率	133

5.4 网路中的各种故障情况和开断情况	133
5.5 各种开断情况下的开关负荷	134
5.5.1 电压差的计算	134
5.5.2 故障电流的计算	135
5.5.3 相恢复电压的计算	138
5.5.4 瞬态恢复电压的计算	142
5.5.5 各种开断情况下开关负荷的对比	150
5.6 高压网路中的开关负荷	153
5.6.1 相位移角	153
5.6.2 循环电流	155
5.6.3 瞬态恢复电压的振幅和起始上升率	157
5.6.4 关于试验标准的结论	157
6. 开断小的感性电流时的操作过电压	163
6.1 此种开断情况的特点	163
6.2 此种开断情况的频率	163
6.3 过电压的产生	164
6.4 断口的影响	166
6.5 开断空载变压器	168
6.5.1 磁路的影响	168
6.5.2 磁化特性曲线形状的影响	171
6.5.3 损失的产生	173
6.5.4 开断时变压器侧的影响	174
6.5.5 三相交流变压器电路和磁路的影响	174
6.5.6 限制过电压的措施	179
6.6 开断带接地线圈变压器旁的两相短路电流	183
6.7 开断异步电动机	184
6.7.1 过电压的产生	184
6.7.2 限制过电压的措施	189
7. 关合容性电路时的过电压	190
7.1 此种关合情况的特点	190

7.2 此种关合情况的频率	190
7.3 过电压的产生	190
7.3.1 稳态分量	191
7.3.2 电容耦合	195
7.3.3 瞬态分量	196
7.3.4 重合闸时的过电压	198
7.3.5 有效波阻抗	200
7.4 断口的影响	201
7.4.1 开关各相关合时间的不同期性	201
7.4.2 断口和网路间的相互影响	201
7.5 过电压的确定	202
7.5.1 网路测量和模型测量	202
7.5.2 计算方法	203
7.6 限制过电压的措施	205
7.6.1 稳态电压升高	205
7.6.2 瞬态操作过电压	205
8. 附录	210
附录 1 拉普拉斯变换——应用迭加原理计算短路后瞬态恢复 电压	210
附录 2 计算任意网路中瞬态过程的固有振荡法	213
附录 3 电气设备的等值电路图和特性参数	218
附录 4 标准摘录	236
9. 参考文献	239

1. 电网中的分合过程

1.1 断路器的分合任务

高压断路器用在电网中要完成各种极其不同的任务，此时，必须能够在很大范围内分合与电压不同相位的电流。这些分合任务是：

- 1) 分合空载变压器和空载线路；
- 2) 分合电容器组和补偿扼流圈；
- 3) 分合电热装置和电动机；
- 4) 关合故障电流；
- 5) 开断故障电流；

此时，分合过程对电网产生两种根本不同的作用。大的故障电流是在电流过零时开断的，它主要说明断路器的开断性能，过电压相当低。而小电流的开断有可能不在电流过零时进行，往往产生较高的过电压，加于电网的绝缘。

因此，要求断路器在切断小电流时不得产生危害绝缘及影响开断过程顺利完成的过电压。一种断路器对这些分合任务的适应性，在很多情况下，取决于灭弧原理而且受断路器上附加元件（电阻）的很大影响。

断路器最艰巨的任务一般是开断故障电网中的巨大故障电流。为此，灭弧室的设计，必须使它能够承受燃弧期间的电弧作用，过几个半波后在电流过零时熄灭电弧，而且断口间的介质强度必须迅速恢复，防止在瞬态恢复电压作用下发生重击穿，从而顺利地完开断过程。断路器直接承受的故

障电流和瞬态恢复电压是由电网条件决定的。不管断路器的灭弧原理如何，对此均应能胜任之。断路器的分合能力必须通过试验来考核，通过在开关上装设附加元件的办法只能在一定条件下奏效。

1.2 开断大电流时开关负荷的特点

1.2.1 物理基础

断路器的开断能力，取决于被开断电流的大小和开断后在断路器接线端上出现的瞬态恢复电压的波形及大小。被开断故障电流的大小，取决于故障种类和电网条件。其极限值是断路器的额定开断电流。如果故障地点不在发电机近旁，则由于发电机内磁通链的瞬时变化而引起的故障电流衰减，实际上不明显。开断电流等于初始交流短路电流。

故障电流开断后在断路器接线端上出现的瞬态恢复电压，是由工频恢复稳态分量和叠加的瞬态分量组成的（图1.1）。瞬态过程衰减后的相恢复电压，其大小取决于故障种类、中性点接地方式和电网元件。当三相交流网路发生故障（诸如端子短路、近区短路、二相接地短路和相位移）时，由于故障电流大于负荷电流，故电弧电流在电流过零时熄灭。于此时刻，在断路器接线端上恢复的相电压相对电流位移角

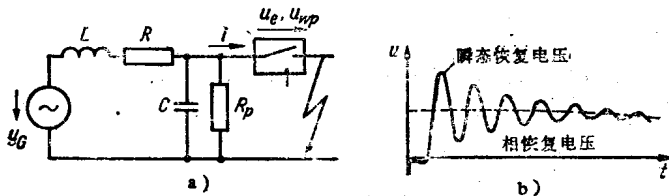


图1.1 故障电流的开断

a) 最简单的等值电路图 b) 瞬态恢复电压波形

度 ψ 。对于最简单的故障电路来说, 工作电压和短路电流之间的相位移角, 可按图 2 由下式求得

$$\psi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (1.1)$$

式中 ωL ——电抗;

R ——故障电路电阻。

当 $\omega L \leq 1/\omega C$ 时, 此角度亦对开断后的相恢复电压起决定性作用。

由于高压电网中的绝大多数电气设备, 特别是变压器呈现电感性, 故在开断故障电流时, 相位移角接近 90° 。

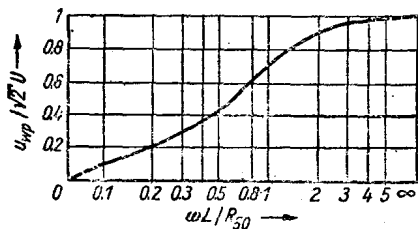


图1.2 短路电流过零时工频
恢复相电压的瞬时值

瞬态过程起源于
每次操作状态的改变

时伴随着能量状态的变化。由于电路中含有电网元件的电感、电容和电阻, 开断后能量状态发生变化, 引起电能和磁能之间相互转换, 直至振荡能量被电阻不可逆地转换成热能而耗掉。

故障电流在过零时被开断后, 未充电或仅部分充电的电容便通过电感和电阻而充电。此时, 电容上的电压首先从差值上升至稳态值。已建立的磁场在它消失时又放出电能, 使之电容上的电压相对稳态电压增大差不多相等的差值。电容放电时, 电荷反向迁移。这就使得电容反极性充电并使电容上电压相对稳态电压减小。

由于总有阻尼作用存在, 故合成瞬态恢复电压总是小于

稳态瞬时值之二倍。于是，在电流过零开断时，出现在电力系统中的瞬态电压为最低。此时，电网中对能量转换变得起作用的电能远远小于在电流过零之外开断时即“截断”电流时释放的磁能（参见1.3.1节）。

1.2.2 瞬态恢复电压的确定

瞬态振荡及瞬态恢复电压的波形在很大程度上取决于断路器接线端近旁的电网元件种类。它可以呈现单频或多频衰减振荡，也可以是非周期过程。在电气设备后面，瞬态电压为正弦形振荡，瞬态恢复电压从初始上升率为零开始。这些电气设备的电感或电容实际上可看成集中参数（扼流圈、变压器、发电机）。如果电网结构符合图 1.1 所示的最简单基本电路或在开关处是这样的基本电路，则瞬态过程为单一频率。随着电气设备数目的增加（即电网等值电路图中的电感和电容），固有振荡频率增高。

瞬态恢复电压在数学上可用线性微分方程来描述。对于简化的电网结构，在最简单的情况下，可用经典法求解，否则，要用拉普拉斯变换求解。大型微分方程组只能用数字计算机求解。电感和电容沿长度均匀分布的架空线和电缆，其瞬态振荡为锯齿形，这是由固有振荡的高次谐波引起的；瞬态恢复电压的初始上升率大于零。瞬态过程的数学表示是从线路方程出发的。这些超越方程的求解，对于一些简单的电网示例，亦可用拉普拉斯变换进行。

对于由多条线路和其它电网元件组成的大型电网来说，要按固有振荡法进行数字计算，这就需要用含集中元件的终端网络来模拟线路。此时，对于实际电网，得到极为庞大的微分方程组，其解在数字计算机上借助龙格-库塔（Runge-Kutta）近似方法进行或按状态变量法经解矩阵-微分方程进