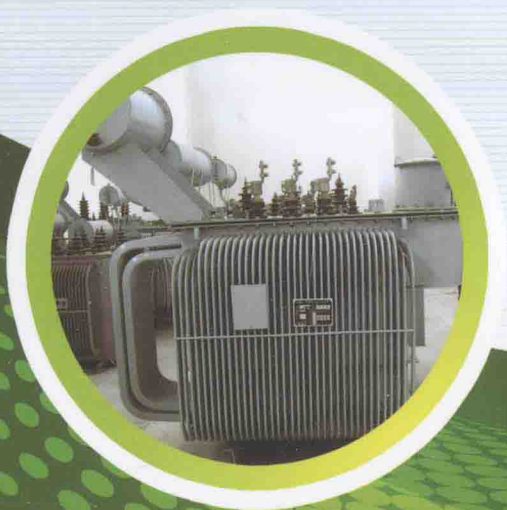


电气设备 故障分析 70 例

钱振华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气设备 故障分析 70 例

钱振华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以专业实践为基础,从总结运行经验及事故教训出发,收集、整理、分析了电气设备故障 70 例,内容涉及电力线路、母线、变压器及互感器、发电机及电动机、配电系统、直流系统、人身安全七个方面的问题。通过对本书的学习,可提高电气人员的技术水平、操作水平、运行水平,积累反事故运行经验,对提高设备安全及人身安全起到重要作用。

本书立足实践,分析深入浅出,内容丰富全面,可供发电厂、变电所、电网企业中的电气工作人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备故障分析 70 例/钱振华编著. —北京:中国电力出版社, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4196 - 8

I. ①电… II. ①钱… III. ①电气设备—故障诊断 IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 055234 号



中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.ccpp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

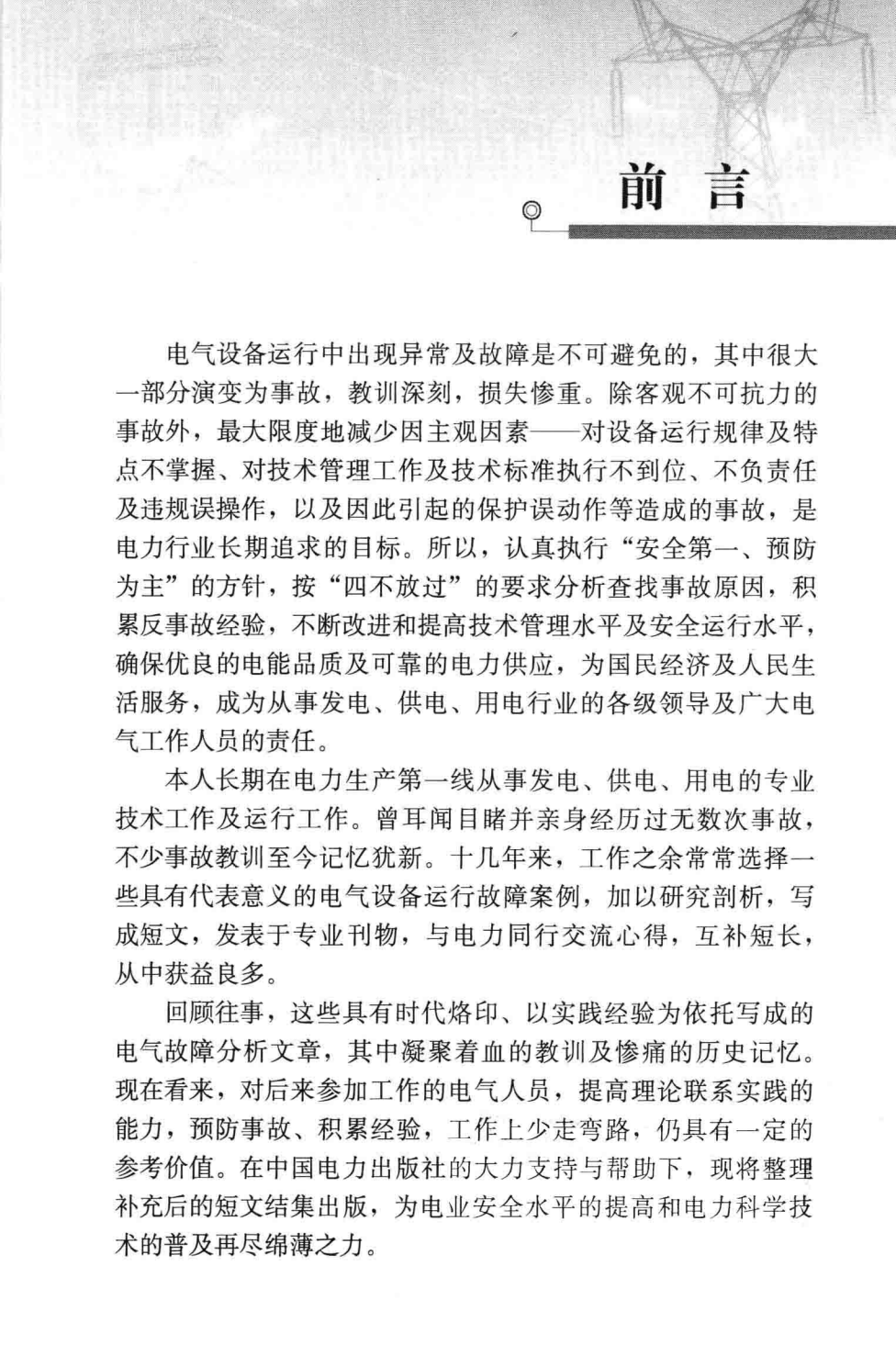
*

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 12.375 印张 328 千字
印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

电气设备运行中出现异常及故障是不可避免的，其中很大一部分演变为事故，教训深刻，损失惨重。除客观不可抗力的事故外，最大限度地减少因主观因素——对设备运行规律及特点不掌握、对技术管理工作及技术标准执行不到位、不负责任及违规误操作，以及因此引起的保护误动作等造成的事故，是电力行业长期追求的目标。所以，认真执行“安全第一、预防为主”的方针，按“四不放过”的要求分析查找事故原因，积累反事故经验，不断改进和提高技术管理水平及安全运行水平，确保优良的电能品质及可靠的电力供应，为国民经济及人民生活服务，成为从事发电、供电、用电行业的各级领导及广大电气工作人员的责任。

本人长期在电力生产第一线从事发电、供电、用电的专业技术工作及运行工作。曾耳闻目睹并亲身经历过无数次事故，不少事故教训至今记忆犹新。十几年来，工作之余常常选择一些具有代表意义的电气设备运行故障案例，加以研究剖析，写成短文，发表于专业刊物，与电力同行交流心得，互补短长，从中获益良多。

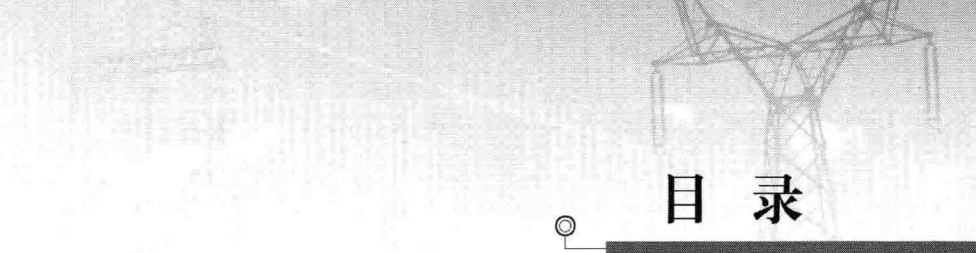
回顾往事，这些具有时代烙印、以实践经验为依托写成的电气故障分析文章，其中凝聚着血的教训及惨痛的历史记忆。现在看来，对后来参加工作的电气人员，提高理论联系实际的能力，预防事故、积累经验，工作上少走弯路，仍具有一定的参考价值。在中国电力出版社的大力支持与帮助下，现将整理补充后的短文结集出版，为电业安全水平的提高和电力科学技术的普及再尽绵薄之力。

限于个人技术水平及能力，并受当前设备、条件、时代的局限，本书尚未达到作者设想的高度，对于某些电气故障的分析可能不是很透彻，缺乏深度，某些观点或许存在欠妥之处，还望读者不吝赐教、批评指正。作者将以诚恳的态度听取，并在适当的时候加以订正。

国华北京热电厂李立成工程师对本书的出版给予了很大的帮助，在此深表感谢。

作 者

2013年1月于北京



目 录

前言

第 1 章 电力线路	1
1-1 110kV 输电线路停电操作的触电事故	1
1-2 拉合线路环路引起的短路事故	3
1-3 35kV 双回线带电合接地开关的短路事故	10
1-4 非对称换位线路电抗器引起的短路事故	13
1-5 电缆线路短路引起的母线差动保护动作	17
1-6 110kV 线路污闪引起的全厂停电停热事故	20
1-7 保护校验引起的线路低频减载装置误动	23
1-8 500kV 线路电抗器瓦斯保护误动的分析及 预防	25
1-9 10kV 电缆线路并列短路造成的母线停电事故 ..	29
1-10 10kV 线路带负荷拉隔离开关造成的短路 事故	30
第 2 章 母线	33
2-1 拉合分段电抗器环路倒母线引起的母线短路 事故	33
2-2 铁磁谐振引起的母线短路事故	36
2-3 母线电压波动引起的锅炉给粉机变频调速装置 跳闸事故	42
2-4 TV 二次电压进入母线差动保护回路引起的误动	45
2-5 预防母线差动保护误动的措施	48
2-6 厂用 3kV 母线低电压保护传动造成的停机停炉	

事故	56
2-7 误拉母线电压互感器引起的母线停电事故	58
2-8 带电挂地线引起的母线停电事故	59
2-9 单相接地引起的母线铁磁谐振事故	60
第3章 变压器及互感器	63
3-1 隔离开关拉合空载变压器引起的短路事故	63
3-2 隔离开关拉合变压器环路引起的短路事故	66
3-3 变压器并列运行异常的分析及预防	71
3-4 变压器接线组别错误引起的故障及预防	77
3-5 变压器的定相及其接线组别异常的分析	92
3-6 厂用变压器非同期并列事故的分析及预防	109
3-7 改变进出线走向引起主变压器不能并列运行的 分析	116
3-8 初始相角不相等造成变压器异常环流的分析 及预防	119
3-9 反馈电流引起的变压器差动保护误动	123
3-10 电容传递过电压引起的主变压器回路短路 事故	127
3-11 TA 负担超标引起的厂用变压器电流速断保护 拒动	129
3-12 主变压器断路器断相引起系统电流异常的分析 处理	134
3-13 强油循环变压器冷却系统的反事故措施	138
3-14 变压器拉杆磁力油位表异常的分析与处理	140
3-15 现代大型变压器瓦斯保护运行的特点及安全 措施	143
3-16 110kV 电压互感器烧毁事故的分析及预防	146
3-17 电压互感器 TV 误接线故障的实例分析	148
3-18 TV 二次压降超标对电能计量影响的分析与 处理	168

3-19	电流互感器 TA 二次开路事故的分析	174
第 4 章	发电机及电动机	182
4-1	发电机短路试验静态励磁电源方案的分析与 选择	182
4-2	发电机非同期并列事故分析及主要预防措施	188
4-3	母线隔离开关辅助触点未断开引发的非同期并列 事故	202
4-4	同期回路异常运行与防止事故的措施	204
4-5	发电机试验引起的事故	211
4-6	发生在发电机变压器组回路的铁磁谐振事故	217
4-7	发电机变压器组过流保护闭锁电压异常的分析与 处理	221
4-8	向发电机变压器组回路反送电事故的分析及 预防	224
4-9	发电机主断路器非全相运行的分析与处理	228
4-10	发电机励磁回路查找接地的分析及处理	240
4-11	发电机电能表、电力表异常的分析	246
4-12	用相量分析法确定电机定子绕组的接地点	255
4-13	倒备用励磁机投入电压的分析与确定方法	257
4-14	发电机失磁故障的分析及处理	267
4-15	误拉电压互感器引起的发电机过流保护跳闸 事故	270
4-16	6kV 电源相序错误引起电动机差动保护误 动作	272
4-17	断路器断开后的电动机烧毁事故	276
4-18	断路器合闸电动机不能自停的分析及消除 方法	278
第 5 章	配电系统	280
5-1	配电系统误操作引起的事故分析	280
5-2	一起用户电压互感器引起的反送电事故	288

5-3	真空断路器交流操作电源设计中的教训及问题分析·····	291
5-4	配电系统自投装置的运行弊端及改进措施·····	295
5-5	配电系统设备安全核查的快速估算法·····	304
5-6	柴油发电机运行条件的分析及维护要求·····	314
5-7	柴油发电机的并列方法及防止非同期并列的措施·····	324
第6章	直流系统 ·····	326
6-1	误操作引起的蓄电池短路事故·····	326
6-2	直流系统绝缘监视装置的设置及异常运行的分析·····	328
6-3	直流系统混线故障的分析与处理·····	335
6-4	直流母线电压异常的分析及处理·····	351
第7章	人身安全 ·····	360
7-1	感应电压人身触电的分析及预防·····	360
7-2	携带型短路接地线的标准、使用选型、管理中的问题及改进措施·····	372
7-3	安全用具使用不当引起的事故及预防·····	380
参考文献	·····	388

 1-1 110kV 输电线路停电操作的触电事故

1. 事故情况

某热电厂, 110kV 母线上接有送某市的双回线 111、112。该线路总长约 110km, 其中出厂数百米的一段, 两线路同杆并架后分成两条单回线路, 送达目的地。某日, 111 线路停电检修, 线路两侧的断路器及隔离开关拉开后, 在线路隔离开关 111-2 外侧做安全措施——挂地线时, 操作人手握地线大叫一声(触电), 监护人在惊恐中使劲紧拉接地线的接地部分导线, 操作人顺势从 111-2 架构(离地约 3m)上落地, 颅骨摔裂, 手脚遭严重电击, 抢救无效死亡。

2. 原因分析

(1) 感应电压是罪魁祸首。双回线出厂部分的一段为同杆并架, 相互距离较近, 加之运行线路 112 负荷电流较大, 约为 500A, 因此 112 线路对停电的 111 线路存在有较强的静电感应及电磁感应。事后模拟事故时的情况, 实测 111 线路停电后回路各处的感应电压(见图 1-1)值列于表 1-1 中。停电线路 L1 上的感应电压 U_5 高达数千伏, 超出了人们的预想。

(2) 违反操作规程是主因。因 111 线路侧的隔离开关 111-2 需要检修, 按电气工作票的要求, 在 111-2 外侧(线路上)必须挂一组地线。现场运行操作规程规定: 挂这组地线前, 应先合上接地开关 111-72, 将线路接地, 待接地线挂好后, 再将其拉开。电气操作票也是这样写的, 但实际操作时, 监护人下令

合 111-72，操作人嫌麻烦没有执行，监护人也未坚持，而最后是在线路 L1 上挂地线，受到了感应电压的伤害。

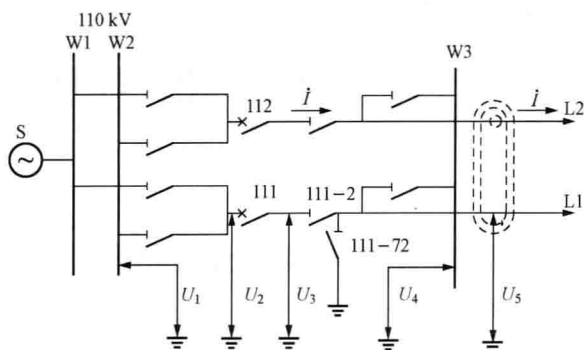


图 1-1 双回线 L1 停电后实测感应电压示意

W1—运行母线；W2—备用母线；W3—旁路母线

表 1-1 110kV 双回线 L1 停电后各处的感应电压值

对地电压	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
实测值 (V)	173	198	31.3	144	1700~3000

(3) 挂地线没有使用绝缘棒和戴高压绝缘手套，违反了 DL 408—1991《电业安全工作规程 发电厂和变电所电气部分》4.4.7 的规定。三相接地线的接地点安装好以后，操作人爬上了 111-2 架构，右手拿着接地线的相线（已接地），左手握着线路的铝绞线，于是感应电压加在操作人左右手与接地点之间，人身触电就发生了，并从架构上摔到地面，颅骨破裂而亡。

3. 预防措施

(1) 一切电气运行人员均应严格遵守操作规程和 DL 408—1991《电业安全工作规程 发电厂和变电所电气部分》。不能因为嫌麻烦或粗心大意而违反相关要求。具有操作权、监护权的工程技术人员更要作遵章守纪的模范，否则将产生严重后果。

(2) 挂地线时，操作人应戴高压绝缘手套。合格的高压绝

缘手套耐压在 8kV 以上，可以有效地防止感应电压对人身的伤害，起到一定的保护作用。另外，今后应使用带绝缘操作棒的接地线，挂地线时避免操作人员与线路导线直接接触，保证人身安全。

(3) 要重新认识感应电压的危害。停电设备上的感应电压绝不可忽视，特别是双回线上的感应电压更不可低估。通过人体的电流一般按不大于 5mA 考虑，人体表面电阻取 $1000 \sim 2000\Omega$ ，人体允许直接承受的电压约在 $5 \sim 10\text{V}$ 。某供电公司曾在不同电压等级的双回线一路停电后实测感应电压的平均值： $10 \sim 35\text{kV}$ 线路在 $200 \sim 1000\text{V}$ ； 110kV 线路为 1900V 左右； 220kV 线路在 $10 \sim 16\text{kV}$ （相应线路长为 $23.5 \sim 40\text{km}$ ）。这样高的感应电压，不采取安全措施，直接接触停电设备或进行工作，是非常危险的。故线路未挂地线时应与其保持安全距离。

(4) 新建或扩建的发电厂、变电所，特别是电压等级高、架构高的输配电设备系统，应适当多设计安装一些接地开关，以便检修设备时不必临时挂接地线，通过合接地开关来解决安全措施的问题。同时，应重视设计完善的电气防误闭锁装置，避免因误合接地开关引起人为短路事故。

1-2 拉合线路环路引起的短路事故

1. 事故情况

某电网， 66kV 系统有双回线 L1、L2，全长约 100km ，其中在 $1/3$ 处引接配电变压器 T 一台，系统接线见图 1-2。正常时，隔离开关 QS1、QS2 允许其中之一合入，但在倒闸操作切换运行方式时允许 QS1、QS2 短时同时合入：在 L1 停电前，QS1、QS2 合入，拉 QS1，配电变压器可接入 L2；在 L2 停电前，QS1、QS2 合入，拉 QS2，配电变压器可接入 L1。用 QS1、QS2 进行并解列切换配电变压器运行方式的操作从来没有出现过问题。但是，某日，在 QS1、QS2 同时合入的情况下，用 QS 拉线路 L2 环路，引起三相弧光短路，L1、L2 保护动作跳闸停

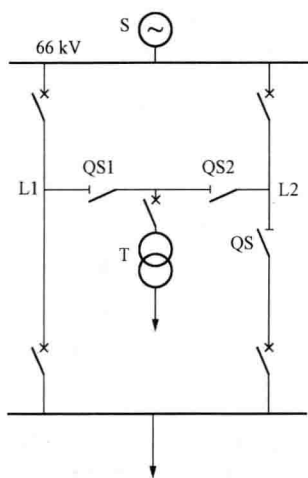


图 1-2 66kV 系统接线示意
隔离开关没有特殊的灭弧装置。

电，隔离开关 QS 烧毁。

2. 原因分析

(1) 隔离开关开断能力的分析。

1) 电路操作时，电流超过 0.5A 或切断电压高于 30V，都会产生电弧。电弧长度与电流及极间电压成正比。只要隔离开关在允许操作范围内进行操作，虽产生电弧均可自然熄灭，也不会引起短路，即隔离开关具有开断一定小电流的能力。但这种开断能力毕竟是有限的，主要是由于隔

2) 当被开断的电压及电流超过允许的范围，隔离开关触头产生的电弧就不能熄灭，电路也拉不开，并发生弧光短路，即造成所谓带负荷拉隔离开关的事故。在一定范围内，带负荷拉隔离开关，电弧伸展长度 L 与被切断的电流 I 及电压 U 的关系可用以下经验公式来估算

当 $I < 100\text{A}$ 时

$$L = 5.03UI \times 10^{-3} \quad (1-1)$$

当 $I = 100 \sim 320\text{A}$ 时

$$L = 503U \times 10^{-3} \quad (1-2)$$

拉环路时， $U = I \sum Z$ ，上述公式可改写为

当 $I < 100\text{A}$ 时

$$L = 5.03I^2 \sum Z \times 10^{-3} \quad (1-3)$$

当 $I = 100 \sim 320\text{A}$ 时

$$L = 503I \sum Z \times 10^{-3} \quad (1-4)$$

式中 L ——电弧伸展长度，mm，是指电弧两极间触头所连直线的中点至电弧伸出最远一点的距离，见图 1-3 (a)；

ΣZ ——拉环路时，环路内阻抗之和， Ω ， $\Sigma Z = Z + Z_1$ ，见图 1-3 (b)；

I ——切断电路前流过隔离开关 QS 的电流，A，见图 1-3 (b)；

U ——环路开断后，隔离开关断口上的电压，V，见图 1-3 (c)，开断三相电路时， $U = U_L / \sqrt{3} = U_P$ ；开断两相电路时， $U = U_L$ ；拉环路时， $U = \Delta U$ ，其中 U_L 为线电压， U_P 为相电压， ΔU 为环路断开后两端的电压差。

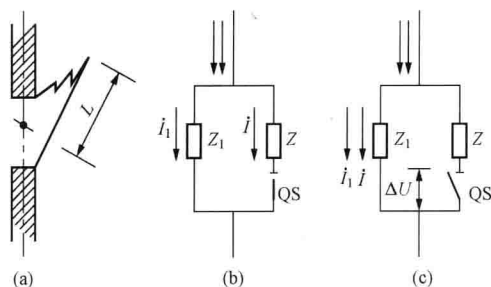


图 1-3 隔离开关切断环路示意

(a) 电弧伸展长度；(b) 通过 QS 的环路电流；(c) QS 拉环路后 ΔU

3) 据资料介绍，一般情况，开断电路时按式 (1-1)、式 (1-2) 求得的 L ，再考虑 300mm 的安全裕度，即符合下式

$$A_2 \geq L + 300$$

可以用隔离开关操作。

式中 A_2 ——隔离开关相间的距离，mm；

L ——切断电路时电弧的伸展长度，mm；

300——安全裕度，mm。

(2) 隔离开关的实际开断能力。

1) 隔离开关开断小电流的能力。隔离开关安全开断小电流的能力，与开断电路的参数，操作时的环境（风向，风力），隔离开关的型式、结构、相间距离、安装方式、操作速度等因素

有关。相关规程中规定，全电压下允许用隔离开关拉合 2A 的空载变压器励磁电流（感性电流）及 5A 无负荷线路的充电电流（容性电流）；另外，《电机工程手册 第 4 册》中允许户外隔离开关开断小电流的参考值见表 1-2。根据以上规定，隔离开关开断小电流的能力：操作感性电路，10kV 及以下系统为 2~4A（ A_2 小的隔离开关应取小值）；10kV 以上为 2A。操作容性电路，35kV 及以下系统为 2A；35kV 以上系统为 0.5~1A。

表 1-2 户外隔离开关开断小电流参考值

$U_{\max}$ (kV)	相间距离 A_2 推荐值 (mm)		电感电流 (A)	电容电流 (A)
	平开式双柱隔离开关	其他隔离开关		
7.2	800	400	4	2
12	800	600	4	2
24	1000	750	3	2
40.5	1000	900	3	2
72.5	1500	1500	3	1
126	2500	2200	3	1
252	4000	4000	2	0.5
363	5000	5000	2	0.5
550	8000	8000	—	0.5

2) 隔离开关开断环路的能力。有关规定：拉合环路，限于 10kV 及以下系统，且应在环路的均衡电流不超过 70A 的情况下进行。另外，环路操作也可按照“等弧长”原则来确定。所谓“等弧长”原则，是指：把隔离开关在全电压下允许开断的小电流值 I_G 所产生的弧长定为允许弧长 L_G ；在同一电压系统中该隔离开关拉合的环路电流为 I ，所产生的弧长为 L ，当 $L \leq L_G$ ，所求出的电压差即为允许电压差 ΔU_G 。只要环路开断后的实际电压差 $\Delta U \leq \Delta U_G$ ，环路操作不但是允许的，而且也是安全的。按照式 (1-1) 和式 (1-3) 计算可得到开断环路电流 $I < 100A$ ，

允许断口电压差为

$$\Delta U_G = \frac{I_G}{I} U \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 I_G ——隔离开关全电压下允许开断的小电流值, A;

I ——隔离开关拉合环路的电流, A;

ΔU_G ——隔离开关拉合环路电流 I 时允许的断口电压差, %;

U ——电源额定相电压, 为 $U_N/\sqrt{3}$ 。

全电压下允许开断的小电流 $I_G=2\text{A}$ 时, 按“等弧长”原则用隔离开关拉环路电流 I 允许的断口电压差 ΔU_G 列于表 1-3。

表 1-3 按“等弧长”原则隔离开关拉环路允许电压差 ΔU_G

I (A)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	2
$\Delta U_G/U$ (%)	2	2.2	2.5	2.85	3.3	4	5	6.6	10	20	40	100

开断环路电流 $I=100\sim 320\text{A}$, 允许断口压差为

$$\Delta U_G = \frac{I_G}{100} U \times 100\% \quad (1-6)$$

当 $I_G=2\text{A}$, $\Delta U_G=2\%U$ 。

3) 环路断开点电压差 ΔU 的预测。根据图 1-3 (b) 所示, 在并列运行的环路内有

$$I_1 Z_1 = IZ$$

$$\text{故} \quad I_1 = I \frac{Z}{Z_1} \quad (1-7)$$

当 QS 将环路拉开后 [见图 1-3 (c)], 断口电压差

$$\Delta U = (I + I_1) Z_1 \quad (1-8)$$

将式 (1-7) 代入式 (1-8), 断口实际电压差最后可按式 (1-9) 计算

$$\Delta U = I(Z + Z_1) \quad (1-9)$$

式中 I ——操作前通过隔离开关 QS 的环路电流;

$Z+Z_1$ ——环路阻抗之和。

4) 经过式 (1-5)、式 (1-6) 计算, 拉合环路电流 I 的允

许电压差 ΔU_G 求得后, 如果按式 (1-9) 预测环路断开点的实际电压差 $\Delta U < \Delta U_G$, 则允许隔离开关进行环路操作。否则, 必须将 ΔU 降低到允许值后才能操作。降低 ΔU 的方法有: 降低环路内通过 QS 的电流 I ; 改变运行方式, 降低环路内的阻抗。

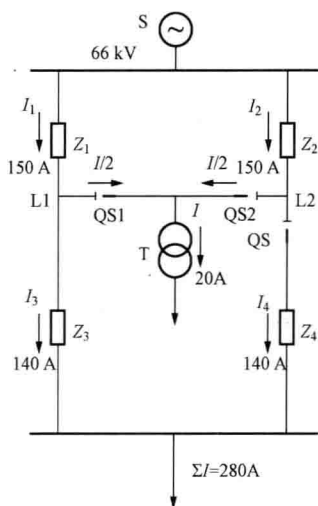


图 1-4 QS1、QS2 同时合入的
电流分布

(3) 对 QS1 及 QS 拉环路的
分析。

1) 当 QS1、QS2 同时合入的情况下, L1、L2 回路的电流分布见图 1-4。两回路通过的电流: $I_1 = I_2 = 150\text{A}$, $I_3 = I_4 = 140\text{A}$; 配电变压器 $I = 20\text{A}$ 。通过 QS1 的电流与通过 QS2 的电流相等, 均为 $I/2 = 10\text{A}$; 通过 QS 的电流为 $I_4 = 140\text{A}$ 。环路阻抗 $Z_1 = Z_2 = 16.5\Omega$, $Z_3 = Z_4 = 33\Omega$ 。隔离开关相间距离 $A_2 = 1410\text{mm}$ 。

2) 断开 QS1, 回路电流分布见图 1-5。QS1 断开后其断口

电压差 $\Delta U_1 = I/2(Z_1 + Z_2) = 10(16.5 + 16.5) = 330\text{ (V)}$, 约为额定相电压 U_P 的 0.87%, 小于表 1-3 所列允许值的 20%, 产生的电弧长度 $L = 5.03 \times 330 \times 10 \times 10^{-3} = 17\text{ (mm)}$, $A_2 > 17 + 300$, 故平时用 QS1、QS2 切换配电变压器的运行方式操作, 合、拉 Z_1 、 Z_2 环路, 没有出现什么问题, 是安全的。

3) 断开 QS, 回路电流分布见图 1-6。QS 拉开后, 其断口电压差 $\Delta U = I_4(Z_3 + Z_4) = 140(33 + 33) = 9240\text{ (V)}$, 约为额定相电压 U_P 的 24.2%, 大于允许值 2% U , 其断口的电弧长度 $L = 503 \times 9240 \times 10^{-3} = 4648\text{ (mm)}$, $A_2 \ll L + 300$, 故用 QS 拉 Z_3 、 Z_4 这个环路, 操作失败, 造成短路事故。