

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.040

## 一起 220 kV 瓷柱式断路器慢合故障及分析

赵现平<sup>1</sup>, 马宏明<sup>1</sup>, 程志万<sup>1</sup>, 白双全<sup>2</sup>, 张恭源<sup>3</sup>, 彭 晶<sup>1</sup>, 彭兆裕<sup>1</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 昆明 650217;  
3. 云南电网公司, 昆明 650217)

**摘要:** 介绍了一起 220 kV 瓷柱式断路器慢合故障, 通过现场详细检查、故障后试验和返厂解体以及对该故障的缜密分析, 发现造成该事故的主要原因为断路器本体直动导向的导向套底座、导向套及导向杆之间的公差配合较小, 且没有考虑到使用不同材质的导向套与导向杆的温度补偿系数存在差异, 导致环境温度较高时断路器本体分、合闸阻力较大, 最终导致断路器慢合故障。并根据故障具体原因, 提出相应的整改措施及相关建议。

**关键词:** 瓷柱式; 断路器; 导向套; 慢合; 慢分

### Analysis on a Slow-closing Accident of 220 kV Porcelain Column Type Circuit Breaker

ZHAO Xianping<sup>1</sup>, MA Hongming<sup>1</sup>, CHENG Zhiwan<sup>1</sup>, BAI Shuangquan<sup>2</sup>,  
ZHANG Gongyuan<sup>3</sup>, PENG Jing<sup>1</sup>, PENG Zhaoyu<sup>1</sup>

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China; 2. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650217, China; 3. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** A slow-closing accident of 220 kV porcelain column circuit breaker was analyzed by means of on-site check, test, and disassembly inspection in the manufacturer. It was found that the fit tolerances are too small among the guide sleeve base, the guide sleeve and the guide rod of the circuit breaker, and the temperature compensation coefficients of the guide sleeve and guide rod are different due to their different materials. All these factors increased the closing resistance of the circuit breaker at high environmental temperature, and eventually led to this accident. In addition, countermeasures are suggested in this paper.

**Key words:** porcelain column type; circuit breaker; guide sleeve; slow-closing; slow-opening

## 0 引言

高压瓷柱式断路器的本体由灭弧室和支柱构成, 支柱是断路器对地绝缘的支撑件, 同时也起着支撑灭弧室的作用<sup>[1]</sup>。当操作机构输出功时, 通过支柱内的导向拉杆、绝缘拉杆带动灭弧室内的活塞杆移动, 使得动触头上下运动, 完成断路器的分、合闸<sup>[2-3]</sup>。为保证分、合闸运动过程中导向拉杆、绝缘拉杆和活塞杆的同轴度, 需要装设专门的导向套(环)<sup>[4-7]</sup>。导向套的主要作用就是支撑拉杆在分、合闸运动中保持同心运动, 保证动、静触头接触可靠。导向套是瓷柱

式断路器本体中的重要元件, 要求其具有滑动性好、耐磨性好、热膨胀系数小、不易变形等性能<sup>[8-14]</sup>。一旦导向套存在缺陷, 易导致拉杆偏心、触头对中不良、开断过程中摩擦力增大等缺陷, 甚至导致分、合闸操作失败<sup>[15-18]</sup>。

文中针对一起 220 kV 瓷柱式断路器导向套缺陷引起的断路器慢合故障, 通过现场检查、故障后试验和返厂解体, 同时结合导向套工艺设计、材质、尺寸等, 找出了发生故障的主要原因, 并提出相应的整改及预防措施。

## 1 故障过程简介

某 220 kV 变电站预试定检过程中, 发现 262 断

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-06-09

路器 A 相、265 断路器 B 相有一定概率出现慢合现象(断路器合闸到行程约 3/4 左右, 凸轮到 1/2 位置左右, 停止 2 s~120 min 不等时间后, 又缓慢运动到合闸位置), 具体慢合现象见图 1。

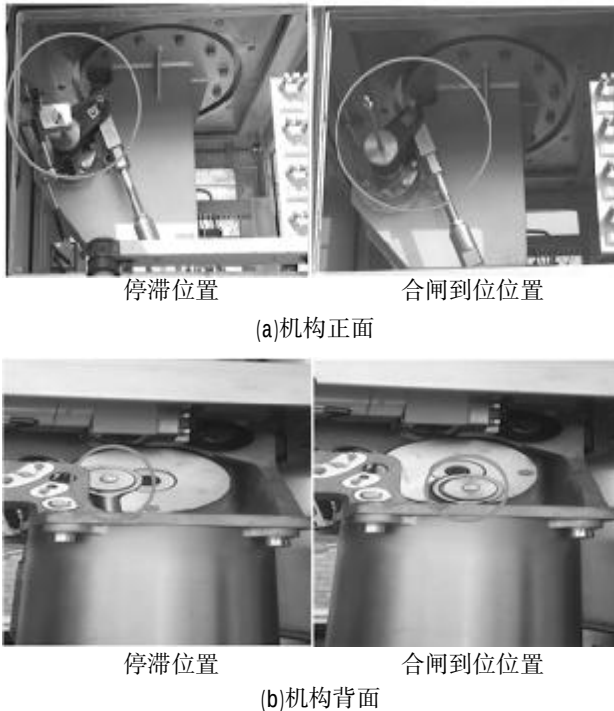


图 1 慢合现象

Fig. 1 Slow closing

## 2 现场检查情况

### 2.1 操作检查

对 262 断路器和 265 断路器进行不少于 50 次操作检查, 并结合供电局预试定检情况发现: 262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相发生慢合现象均发生在下午气温较高的时间段; 慢合现象的发生存在概率性; 未发生过慢分现象(分闸过程中卡滞)。

怀疑发生慢合现象可能与温度有一定关联性。

### 2.2 现场试验

当断路器正常开断时(未发生慢合时), 对 262 断路器和 265 断路器进行时间、速度特性测试, 262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相测试结果存在异常(其他相正常), 具体见表 1(环境温度为 15.7 °C; 规定值: 分闸时间为(30±5) ms; 分闸速度为(7±0.5) m/s; 合闸时间为(90±10) ms; 合闸速度为(3.5±0.6) m/s)。

从表 1 可以看出, 262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相在未出现慢合或慢分现象时, 其时间、速度也不合格, 分、合闸过程时可能机构输出功偏小或运动过程中阻力偏大。

### 2.3 机构检查

机构厂家利用工装(弹簧工装等)将弹簧操作机构进行全方位解体, 发现弹簧外观正常无裂纹; 拉杆

表 1 断路器动作特性测量值

Table 1 The measurement value of circuit breaker operating characteristics

| 设备编号        | 分闸    |                         | 合闸    |                         |
|-------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
|             | 时间/ms | 速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 时间/ms | 速度/(m·s <sup>-1</sup> ) |
| 262 断路器 A 相 | 32.6  | 6.48                    | 104.5 | 2.78                    |
| 265 断路器 B 相 | 34.9  | 6.02                    | 105.3 | 2.60                    |

及轴承处零部件润滑良好, 无卡涩现象; 凸轮表面光滑, 无卡涩现象及异常摩擦痕迹; 拐臂上的滚子完好, 表面光滑无摩擦痕迹; 凸轮与拐臂上的滚子之间的间隙符合要求; 分、合闸脱扣器各处间隙尺寸符合要求。即操作机构无异常。

### 2.4 本体检查

现场解开操作机构与断路器本体的机械联接, 利用撬棍使绝缘拉杆上、下运动, 初步检测本体内部的阻力情况, 具体如见图 2。



图 2 撬动检查方式

Fig. 2 By leveraging to check

通过以上初步检查方式发现: 262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相上午时(环境温度: 14.3 °C)环境温度可以轻松撬动, 下午时(环境温度: 24.6 °C)几乎不能撬动; 其他相上午、下午均能正常撬动。

因此, 初步确定慢合故障是由本体内部缺陷导致的, 且与温度存在一定的关联性。

## 3 返厂试验及解体

### 3.1 本体分、合闸力矩试验

返厂后, 制作了一套利用力矩扳手测量本体阻力的工装, 对 262 断路器和 265 断路器本体开展了不同温度下的阻力测试, 具体见图 3 和表 2。

### 3.2 本体解体检查

通过以上检查及故障现象表征, 怀疑灭弧室内

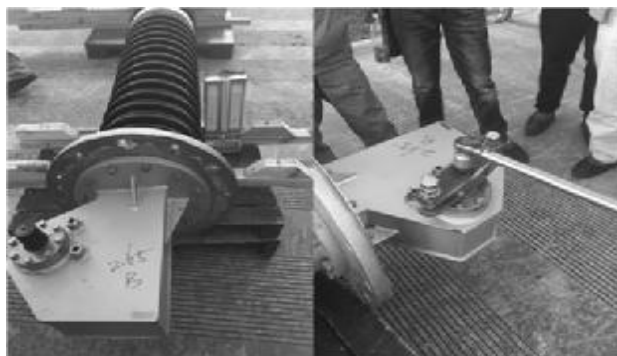


图 3 本体分、合闸阻力检测

Fig. 3 Opening and closing of the resistance test

表 2 阻力检查情况

Table 2 Results of the resistance test

| 参数                          | 环境<br>温度/℃ | 262 断路器 |     |     | 265 断路器 |      |     |
|-----------------------------|------------|---------|-----|-----|---------|------|-----|
|                             |            | A 相     | B 相 | C 相 | A 相     | B 相  | C 相 |
| 力矩/<br>(N·m <sup>-1</sup> ) | 15.5       | 135     | 135 | 95  | 120     | 140  | 110 |
|                             | 28.5       | >300    | 145 | 100 | 130     | >300 | 115 |

注:厂家的限力扳手最大力矩为 300 Nm。

部阻力过大可能与热膨胀系数相对较大的导向套密切相关,因此解体时,重点检查本体内部的 3 个导向套位置处,其中直动导向装置处有两个(直动导向套),活塞处有一个(活塞导向套)。

选取两个故障相和一个正常相(故障相:262 断路器 A 相,265 断路器 B 相;正常相:265 断路器 C 相)进行解体分析。

### 3.2.1 活塞杆、活塞导向套检查

262 断路器 A 相、265 断路器 B 相、265 断路器 C 相活塞杆与活塞导向套间均无较大摩擦力,可以正常手动拔插,活塞杆直径与活塞导向套内径也符合规定,具体见图 4 和表 3(环境温度:25.4 ℃)。

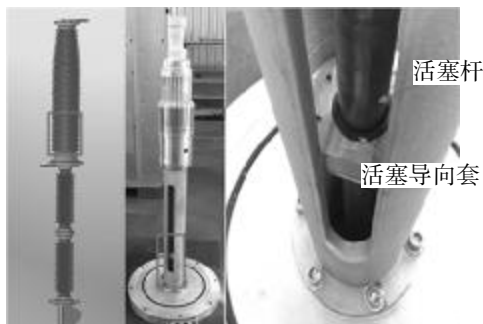


图 4 活塞杆和活塞导向套

Fig. 4 Piston rod and piston guide sleeve

### 3.2.2 导向拉杆、直动导向套检查

导向拉杆、直动导向、直动导向套的具体位置见图 5、6。

1)导向拉杆尺寸测量。262 断路器 A 相、265 断路器 B 相、265 断路器 C 相的导向拉杆实际测量直径见表 4,其直径均符合规定。

表 3 活塞杆及活塞导向套测量值

Table 3 The measurement value of piston rod and

| 被测部件          | piston guide sleeve |             |             | 标准值             |
|---------------|---------------------|-------------|-------------|-----------------|
|               | 262 断路器 A 相         | 265 断路器 B 相 | 265 断路器 C 相 |                 |
| 活塞杆<br>(直径)   | 34.88               | 34.86       | 34.88       | 34.49~<br>34.88 |
| 活塞导向<br>套(内径) | 35.06               | 35.03       | 35.10       | 35.00~<br>35.10 |

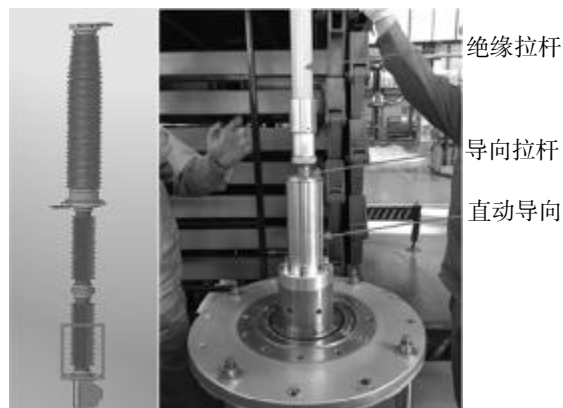


图 5 导向拉杆和直动导向

Fig. 5 Guide rod and direct guide

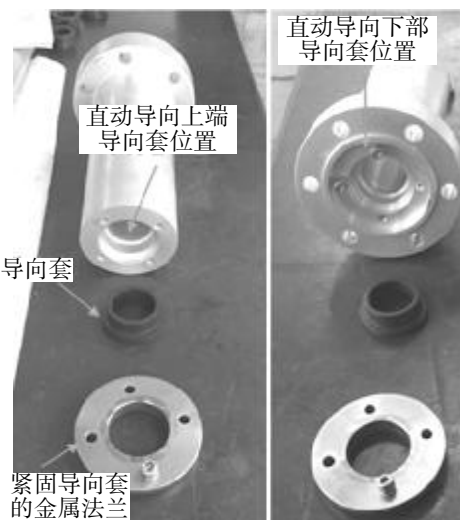


图 6 直动导向套安装位置

Fig. 6 Installation position of direct guide sleeve

表 4 导向拉杆实际测量直径

Table 4 Actual measuring diameter of guide rod mm

| 被测部件         | 262 断路器 A 相 | 265 断路器 B 相 | 265 断路器 C 相 | 标准值               |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 导向拉杆<br>(直径) | 34.93       | 34.94       | 34.92       | 34.913~<br>34.975 |

2)直动导向套尺寸测量。将 262 断路器 A 相、265 断路器 B 相、265 断路器 C 相的紧固导向套的金属法兰取出时,均发现导向套存在不同程度地高出直动导向平面的情况,具体见图 7。



图 7 导向套明显高出直动导向平面

Fig. 7 The guide sleeve is obviously higher than the direct guide plane

对 262 断路器 A 相直动导向上端的导向套进行测量, 导向套两面分别被压出 0.2、0.12 mm 的挤压痕迹, 具体见图 8。图 8 反映了导向套在直动导向底座中受到严重的挤压, 导致导向套上下两面出现印痕。

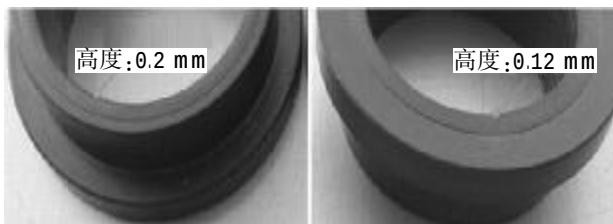


图 8 262 断路器 A 相导向套变形处尺寸

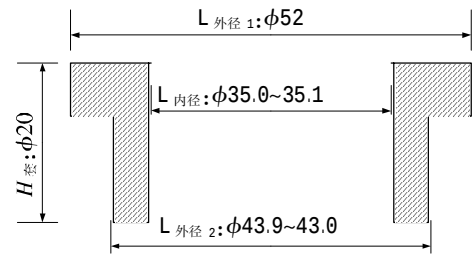
Fig. 8 The deformation size of 262 circuit breaker A phase guide sleeve

对直动导向的上、下端导向套各种工况下的尺寸进行测量, 具体规定尺寸见图 9 和表 5, 具体测量值见表 6。

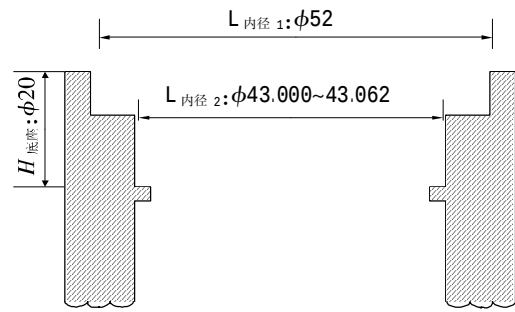
从图 9 和表 5 可以看出, 设备设计时没有充分考虑导向套材质的温度补偿情况, 导向套与导向套底座的配合公差几乎为零, 在温度较高时, 导向套膨胀会造成内径缩小, 增大导向套与导向拉杆之间的摩擦力。

从表 6 中看出, 262 断路器 A 相、265 断路器 B 相和 265 断路器 C 相的导向套尺寸均不符合设计要求, 且 262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相的导向套尺寸(高度、外径)均超过了导向套底座的尺寸(高度、外径), 导致导向套装入底座时是变形装入的, 再加上金属法兰的紧固, 导向套变形严重, 内径严重变小, 262 断路器 A 相导向套的内径已接近导向拉杆外径, 而 265 断路器 B 相导向套的内径已小于或等于导向拉杆外径, 增大了导向拉杆与导向套之间的摩擦力。

3) 加热试验将 262 断路器 A 相、265 断路器 B 相、265 断路器 C 相的直动导向 (带导向套及金属法兰)



(a) 导向套尺寸要求



(b) 导向套底座尺寸要求

图 9 导向套、导向套底座图纸要求

Fig. 9 The dimensional requirement of guide sleeve and guide sleeve base

表 5 导向套和导向套底座尺寸规定值

Table 5 The specified value of guide sleeve and

| 参数    | guide sleeve base |               |        | mm          |
|-------|-------------------|---------------|--------|-------------|
|       | L 外径 1            | L 外径 2        | H 套    |             |
| 导向套   | ≤52.00            | 42.900~43.000 | ≤20.00 | 35.00~35.10 |
| 参数    | guide sleeve base |               |        | mm          |
|       | L 内径 1            | L 内径 2        | H 底座   |             |
| 导向套底座 | 52.00             | 43.000~43.062 | 20.00  | —           |

和导向拉杆放入烤箱内, 升温至 50 ℃, 恒温 1.5 h。其测量值见表 7。导向套材质为聚四氟乙烯(加石墨), 导向拉杆材质为热轧无缝钢管。

从表 7 可以看出, 由于聚四氟乙烯与热轧无缝钢管的膨胀系数不一样, 当温度升高时, 导向套内径减小, 导向拉杆直径几乎不变, 导向拉杆与导向套之间的阻力变大, 显著消耗合闸弹簧的操作功。

### 3.3 原因分析

弹簧操作机构在合闸过程中, 合闸弹簧输出操作功  $W_{合闸}$ , 主要用于本体合闸  $W_{本体合闸}$ 、分闸弹簧储能  $W_{分闸储能}$ 、各种摩擦力  $W_{摩擦}$  (机构转动摩擦、本体运动摩擦等)。当导向套与导向拉杆的摩擦力增大时, 显著消耗合闸弹簧的操作功, 使得  $W_{合闸} < W_{本体} + W_{分闸储能} + W_{摩擦}$ , 就有可能造成断路器出现慢合故障。

弹簧操作机构在分闸过程中, 分闸弹簧输出操作功  $W_{分闸}$ , 主要用于本体分闸  $W_{本体分闸}$ 、各种摩擦力  $W_{摩擦}$  (机构转动摩擦、本体运动摩擦等), 当导向套与

表 6 导向套和导向套底座实际测量值(环境温度:25.4℃)

Table 6 The actual measurement value of guide sleeve and guide sleeve base(ambient temperature:25.4℃)

| 设备<br>编号 | 直动导<br>向端部 | 导向套/mm     |             |                |         |         |       | 导向套底座/mm |       |       | 结论                                                 |
|----------|------------|------------|-------------|----------------|---------|---------|-------|----------|-------|-------|----------------------------------------------------|
|          |            | 内径         |             |                | 外径<br>1 | 外径<br>2 | 高度    | 内径 1     | 内径 2  | 高度    |                                                    |
|          |            | 固定金<br>属法兰 | 未固定金<br>属法兰 | 从底座取出<br>在自然状态 |         |         |       |          |       |       |                                                    |
| 262      | 上端         | 34.94      | 35.06       | 35.22          | 52.20   | 43.10   | 20.08 | 52.10    | 43.06 | 19.95 | 导向套的高度、外径均大于底座的高度、内径;导向套固定后内径明显变小(略大于导向拉杆直径)。      |
| 断路器      |            |            |             |                |         |         |       |          |       |       |                                                    |
| A 相      | 下端         | 34.95      | 35.07       | 35.20          | 52.20   | 43.09   | 20.07 | 52.10    | 43.06 | 19.96 | 导向套的高度、外径均大于底座的高度、内径;导向套固定后内径明显变小(略大于导向拉杆直径)。      |
| 265      | 上端         | 34.91      | 35.08       | 35.22          | 52.20   | 43.12   | 20.06 | 52.12    | 43.06 | 19.80 | 导向套的高度、外径均大于底座的高度、内径;导向套固定后内径明显变小(小于导向拉杆直径)。       |
| 断路器      |            |            |             |                |         |         |       |          |       |       |                                                    |
| B 相      | 下端         | 34.94      | 35.14       | 35.23          | 52.20   | 43.16   | 20.06 | 52.03    | 43.02 | 20.00 | 导向套的高度、外径均大于底座的高度、内径;导向套固定后内径明显变小(等于导向拉杆直径)。       |
| 265      | 上端         | 35.15      | 35.17       | 35.19          | 52.03   | 42.90   | 20.04 | 52.14    | 43.10 | 20.00 | 导向套的高度略大于底座的高度;导向套外径小于底座内径;导向套固定后内径稍微变小(大于导向拉杆直径)。 |
| 断路器      |            |            |             |                |         |         |       |          |       |       |                                                    |
| C 相      | 下端         | 35.07      | 35.16       | 35.17          | 52.06   | 42.90   | 20.06 | 52.14    | 43.10 | 19.94 | 导向套的高度略大于底座的高度;导向套外径小于底座内径;导向套固定后内径稍微变小(大于导向拉杆直径)。 |

表 7 导向套加热试验数据

Table 7 Heating test data of guide sleeve

| 项目      |        | 20/℃        |             |             | 50/℃        |             |             |
|---------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         |        | 262 断路器 A 相 | 265 断路器 B 相 | 265 断路器 C 相 | 262 断路器 A 相 | 265 断路器 B 相 | 265 断路器 C 相 |
|         |        | 内径(上端)      | 内径(下端)      | 直径          | 内径(上端)      | 内径(下端)      | 直径          |
| 直动导     | 内径(上端) | 34.94       | 34.91       | 35.15       | 34.70       | 34.71       | 35.03       |
| 向套/mm   | 内径(下端) | 34.95       | 34.94       | 35.07       | 34.73       | 34.78       | 34.95       |
| 导向拉杆/mm | 直径     | 34.93       | 34.94       | 34.92       | 34.93       | 34.94       | 34.92       |

导向拉杆的摩擦力增大时,显著消耗分闸弹簧的操作功,即  $W_{\text{分闸}} < W_{\text{本体分闸}} + W_{\text{摩擦}}$ ,也存在造成慢分故障的风险。

262 断路器 A 相和 265 断路器 B 相发生慢合故障,主要是因为:断路器本体直动导向的导向套底座、导向套及导向杆之间的公差配合较小,且没有考虑到使用不同材质的导向套与导向杆的温度补偿系数存在差异,导致环境温度较高时断路器本体分、合闸阻力较大,造成断路器慢合故障,甚至存在慢分风险。

#### 4 结论

1)深入分析本次慢合故障的原因,主要是设备设计方案不够完善和零部件制造工艺存在问题造成的。设备设计时没有充分考虑导向套材质的温度补偿情况,导向套与导向套底座的配合公差几乎为零;同时加工的导向套尺寸也不符合设计要求。

2)对于导向套偏差引起的分、合闸阻力过大,造成慢合、慢分故障。主要可以采用两种策略进行处理:第 1 种方案是对本体进行检修,更换符合设计工艺要求的导向套,彻底消除缺陷,但本体检修存在扩大停电范围、现场不易于实施、检修环境要求苛刻、电网风险及作用风险大等不利因素;第 2 种方案是根据现场实际情况,通过核算及验证,更换弹力更大的分、合闸弹簧,克服摩擦力影响,该方案虽然较第一种方案易于实施,但是缺陷并未彻底消除,仍存在一定的电网风险。因此,对于导向套偏差引起的典型缺陷,各供电局应根据现场及运行的实际情况,综合考虑,选用一个比较合理的方案。

3)由于导向套偏差引起的分、合闸阻力过大,会造成慢合故障,甚至可能发生慢分事故。极端情况下,当开短路电流时,会造成断路器灭弧室爆炸,因此建议供电局要立即停电处理,避免造成重大电网

事故。在设备隐患尚未消除前,供电局应开展以下工作:退出该型风险断路器的重合闸;尽量避免操作该型风险断路器,如果确需操作应尽量安排在气温较低的晚上或早晨开展;加强相关线路、主变的运维,严防设备故障跳闸。

4)作为一起典型的由于导向套偏差引起的 220 kV 瓷柱式断路器慢合故障,对于其他同类型事故可以作为参考。目前国内外尚无断路器用导向套材质、尺寸、热试验、机械性能试验等判断标准,该类标准主要由厂家进行控制,缺乏第三方的管控,笔者认为进一步加快推进相关判断标准的制定和实施十分必要。

### 参考文献:

- [1] 张全元. 变电运行一次设备现场培训教材[M]. 北京:中国电力出版社,2009.  
ZHANG Quanyuan. Field training materials for substation operation equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press,2009.
- [2] 周原,李谦,彭向阳. 500 kV 砚都站断路器均压电容爆炸事故仿真分析及反措建议[J]. 南方电网技术,2014,8(4):62-66.  
ZHOU Yuan, LI Qian, PENG Xiangyang. Simulating study of an explosion accident of circuit breaker's grading capacitor in Yandu substation and its counter-measures[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4):62-66.
- [3] 王栋,谢伟,付海金,等. 一起 550 kV 瓷柱式断路器绝缘拉杆的事故及分析[J]. 高压电器,2015,51(9):177-191.  
WANG Dong, XIE Wei, FU Haijin, et al. Analysis on an accident of insulated pull rod of 550 kV porcelain column circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 177-191.
- [4] 孟建英,郭红兵,文惠君,等. 一起 500 kV SF<sub>6</sub> 断路器故障分析[J]. 中国电力,2011,44(7):77-79.  
MENG Jianying, GUO Hongbing, WEN Huijun, et al. Fault analysis of 500 kV SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Electric Power, 2011, 44(7):77-79.
- [5] 黄兴泉,徐辉,刘亚辉,等. 2010~2011 年河南电网开关设备典型缺陷及分析[J]. 河南电力,2012(2):1-10.  
HUANG Xingquan, XU Hui, LIU Yahui, et al. Analysis on defects of the switches in Henan electric grid in 2010~2011[J]. Henan Electric Power, 2012(2):1-10.
- [6] 张文兵,高文,牟京卫. LW36-126 型热膨胀式断路器设计和结构的探讨[J]. 高压电器,2001,37(1):17-19.  
ZHANG Wenbing, GAO Wen, MOU Jingwei. Design of LW36-126 type thermal-expanding circuit breaker and consideration of its construction[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1):17-19.
- [7] 蔡之桂,姜季华. 填充聚四氟乙烯整体式导向环的制造与应用[J]. 流体机械,1982(4):45-48.  
CAI Zhigui, LOU Jihua. Manufacture and application of the integral PTFE guide ring[J]. Fluid Machinery, 1982 (4):45-48.
- [8] 金李鸣,陈荣柱,柳华荣. 浙江电网 2003 年 126 kV 及以上断路器运行情况[J]. 浙江电力,2004,6(6):32-34.  
JIN Liming, CHEN Rongzhu, LIU Huarong. Operative analysis of 126 kV and above circuit breakers of Zhejiang electric power network in 2003[J]. Zhejiang Electric Power, 2004, 6(6):32-34.
- [9] 阳少军,樊灵孟,林志波. 一起 500 kV 罐式断路器事故原因分析[J]. 高电压技术,2006,32(10):126-127.  
YANG Shaojun, FAN Lingmeng, LIN Zhibo. Accident analysis of 500 kV circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10):126-127.
- [10] 郭贤珊. 高压开关设备生产运行实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.  
GUO Xianshan. Production and operation technology of high voltage switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press,2006.
- [11] 陈传志,于虹彬. HEK4 型发电机出口断路器操动机构的缺陷及改进[J]. 广东电力,2006,19(5):68-70.  
CHEN Chuanzhi, YU Hongbin. Defect analysis and modification on operating mechanism of HEK4 generator circuit breakers[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(5): 68-70.
- [12] 宋昊,崔景春,袁大陆. 1999~2003 年高压断路器运行分析[J]. 电力设备,2005,6(2):6-13.  
SONG Gao, CUI Jinchun, YUAN Dalu. Analysis of high voltage circuit breaker in 1999~2003[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(2):6-13.
- [13] 白志艳. 高压断路器故障诊断与状态监测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.  
BAI Zhiyan. Research of fault diagnosis and condition monitoring for high voltage circuit breaker[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
- [14] 姚金刚,张小平,李锋. 用于检验 SF<sub>6</sub> 断路器装配质量的匀速操作力测量[J]. 高压电器,2008,44(4):366-367.  
YAO Jingang, ZHANG Xiaoping, LI Feng. Measurement of uniform operation force of SF<sub>6</sub> circuit breaker for quality control of assembling[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4):366-367.
- [15] 李怀迁,李来宏. 敞开式 SF<sub>6</sub> 断路器弹簧操作机构的缺陷整改[J]. 冶金动力,2005(4):11-12.  
LI Huaiqian, LI Laihong. Improvement of spring operation mechanism of open-type SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Metallurgical Power, 2005(4):11-12.
- [16] 成宁. 杆、轴、套环类零件的同轴度质量改善[J]. 新技术新工艺,2012(12):85-87.

(下转第 246 页)

- [7] 程 序,关永刚,张文鹏,等.基于因子分析和支持向量机算法的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2014,29(7):209-215.  
CHENG Xu, GUAN Yonggang, ZHANG Wenpeng, et al. Diagnosis method on the mechanical failure of high voltage circuit breakers based on factor analysis and SVM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (7): 209-215
- [8] 梅 飞,梅 军,郑建勇,等.粒子群优化的 KFCM 及 SVM 诊断模型在断路器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36): 134-141.  
MEI Fei, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Application of particle swarm fused KFCM and classification model of SVM for fault diagnosis of circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 134-141.
- [9] 徐建源,张 彬,林 莘,等.能谱熵向量法及粒子群优化的 RBF 神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(6):1299-1306.  
XU Jianyuan, ZHANG Bin, LIN Xin, et al. Application of Energy spectrum entropy vector method and RBF neural network optimized by the particle swarm in high voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1299-1306.
- [10] 吴艳文,胡学钢,陈效军.基于 Relief 算法的特征学习聚类[J]. 合肥学院学报(自然科学版),2008,18(2): 45-48.  
WU Yanwen, HU Xuegang, CHEN Xiaojun. Feature learning clustering based on Relief algorithm[J]. Journal of Hefei University(Natural Sciences), 2008, 18(2): 45-48.
- [11] 李晓岚.基于 Relief 特征选择算法的研究与应用[D]. 大连:大连理工大学,2013.  
LI Xiaolan. The study and application of feature selection algorithms based on Relief[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [12] 李先锋.基于特征优化和多特征融合的杂草识别方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.  
LI Xianfeng. Research of weed recognition method based on feature optimization and multi-feature fusion[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [13] HAYKIN S.神经网络原理[M]. 叶世伟,史忠植,译. 北京:机械工业出版社,2004.  
HAYKIN S. Neural networks[M]. YE Shiwei, SHI Zhongzhi, Translation. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [14] 刘 绚,文 俊,刘天琪.基于自组织神经网络的模糊聚类同调机群识别[J]. 电网技术,2010,34(7):98-101.  
LIU Xuan, WEN Jun, LIU Tianqi. A fuzzy clustering method to recognize coherent generator groups based on self-organizing neural network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 91-101.
- [15] 薛 峰,张佑生,江巨浪,等.基于改进 SOM 的纹理合成算法[J]. 系统仿真学报,2006,18(3):581-585.  
XUE Feng, ZHANG Yousheng, JIANG Julang, et al. Synthesizing texture using variant SOM[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 581-585.
- 张 浩(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力设备状态评估。  
赵莉华(1968—),女,副教授,博硕士生导师,研究方向为电器设备监测技术、新能源发电及并网技术、电能质量。

(上接第 239 页)

- CHENG Ning. Quality improvement of concentricity of rod axle and ring[J]. New Technology & New Process, 2012 (12):85-87.
- [17] 黎 斌. SF<sub>6</sub> 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.  
LI Bin. Design of SF<sub>6</sub> high voltage electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [18] 吴 钟. 断路器的操动系统(二)[J]. 高压电器, 1974, 14 (6):23-33.  
WU Zhong. Operating system of circuit breaker(2)[J]. High Voltage Apparatus, 1974, 14(6): 23-33.
- 赵现平(1974—),男,高级工程师,研究方向为开关类设备绝缘状态检测技术研究。  
马宏明(1987—),男,工程师,硕士,研究方向为高压开关设备状态评价。  
程志万(1987—),男,工程师,本科,研究方向为高压开关设备状态评价。