

# 隔离开关瓷瓶的有限元分析与临界裂纹尺寸计算

王 敏, 李晓红, 钟永和

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

Finite Element Analysis and Critical Crack Size Calculation of Porcelain Insulator of Disconnect Switch

WANG Min, LI Xiao-hong, ZHONG Yong-he

(College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**摘要:** 利用 ANSYS 软件分析了在役隔离开关支柱瓷瓶承受的拉应力、剪应力情况, 得到上下元件瓷体部分危险区域的最大应力值; 结合工程断裂力学理论, 推导出计算 I-II 混合型裂纹的临界裂纹尺寸公式, 结合裂纹形状因子, 给出隔离开关支柱瓷瓶检测灵敏度的理论依据。

**关键词:** 瓷绝缘子; 有限元分析软件; 应力集中; 临界裂纹尺寸

中图分类号: TM216

文献标识码: A

**Abstract:** With finite element analytic software ANSYS, tensile stress and shear stress in post porcelain insulator of disconnect switch are analyzed, and maximal stress is obtained in dangerous area of insulator units. Combining theory of fracture mechanics, formulas of critical crack size of mode I-II crack fracture is deduced. Reasonable sensitivity foundation of testing post porcelain insulator is determined, according to crack shape coefficient.

**Key words:** porcelain insulator; ANSYS; stress concentration; critical crack size

## 1 前言

据统计, 隔离开关支柱瓷瓶断裂占整个支柱瓷绝缘子断裂事故的 81%<sup>[1]</sup>, 其危险性远大于管母支柱瓷瓶(支撑管母线的支柱瓷绝缘子)。若将隔离开关支柱瓷瓶类似于管母支柱瓷瓶, 简化成一悬臂梁进行受力分析<sup>[2-3]</sup>, 所求得的临界裂纹尺寸偏大, 以此确定的探伤灵敏度偏低, 对电网的安全性不利。笔者在研究隔离开关支柱瓷瓶的微量位移变形、隔离开关转动产生的剪应力、导线的静拉力以及胶装水泥和法兰对瓷体作用力的基础上, 利用 ANSYS 有限元软件进行了分析模拟, 得出隔离开关支柱瓷瓶在运行中的应力集中状况; 并结合断裂力学理论, 计算了隔离开关支柱瓷瓶发生断裂的临界裂纹尺寸。

## 2 有限元分析

隔离开关按照安装场所、使用环境、电压等级和

用途的不同, 可分为很多系列<sup>[4]</sup>, 笔者以 GW4-220 系列双柱式隔离开关的一支柱瓷瓶(型号为 ZS1.1-252/8) 为例进行分析。

### 2.1 参数的选择

隔离开关瓷件固定在上下法兰内, 瓷体与法兰用高强度胶装水泥固结, 瓷件、法兰、水泥的计算常数见表 1。有限元计算长度单位为 m, 负载单位为 N, 应力单位为 Pa。

### 2.2 物理模型的建立

建立的实体模型形状尽量与实际情况相同, 支柱瓷绝缘子由上、下两部分(元件)组成, 上、下元件在法兰处通过螺栓连接。每一元件又分为瓷体和法兰两部分, 之间通过高强度水泥胶装而成。导电开关固定在支柱绝缘子的顶部法兰上, 用来和另一相支柱绝缘子上的导电开关进行倒闸操作。模型建立时, 仅对伞群进行适当简化处理, 即伞群面由实际的流线型简化成直线型; 伞根圆弧半径仍保留原设计尺寸, 即伞根上圆弧半径  $R_1=15\text{ mm}$ , 下圆弧半径  $R_2=8\text{ mm}$ 。整个模型为轴对称形状, 隔离开关瓷绝缘子的物理模型见图 1。

表 1 瓷件、铸铁法兰、水泥的计算常数

弹性模量 E / GPa			泊松比		
瓷件	铸铁法兰	水泥	瓷件	铸铁法兰	水泥
76	170	28	0.16	0.28	0.28

### 2.3 数学模型的建立

#### 2.3.1 隔离开关支柱瓷瓶静力学分析

建立隔离开关支柱瓷瓶的数学模型, 需先对其进行受力分析。隔离开关支柱瓷瓶受力情况见图 2, 承受的力有: 导电开关作用于瓷瓶的垂直下压力  $G_{刀}$  (开关重力), 导电开关触头所受摩擦力引起的扭矩  $T$ , 导线对绝缘子的静拉力  $F_{拉}$ , 瓷绝缘子所受风力  $F_{风}$ , 及瓷绝缘子自重  $G_{绝}$ 。

收稿日期: 2005-12-02; 修回日期: 2006-03-21

作者简介: 王 敏(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为支柱瓷绝缘子的无损检测。

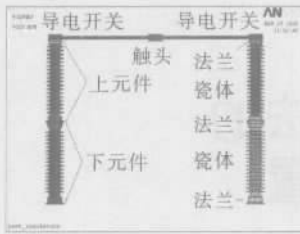


图 1 隔离开关支柱瓷瓶的物理模型

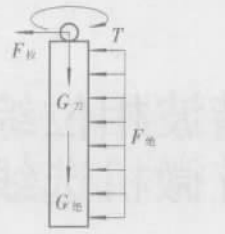


图 2 支柱瓷瓶受力示意图

参考《电气工程电气设计手册》电气一次部分<sup>[5]</sup>, 设定最恶劣的气候条件, 最大风速 30 m/s。由于风力是随机变化的, 研究中根据经验公式, 将风力看成一静力, 得到瓷绝缘子上单位投影面积内的风压为:  $P_{风} = Kv^2g16 \text{ Pa}$ , 式中:  $K$  为空气动力系数, 取 0.6;  $v$  为风速 (m/s)。

根据 GB1985- 89《交流高压隔离开关和接地开关》, GW4- 220 系列隔离开关接线端子的额定静拉力为 1 000 N, 户外隔离开关额定的最大操作力矩为 300 N·m。笔者按照额定情况加载, 导线对绝缘子的静拉力取 1 000 N; 因导电开关触头所受摩擦力不确定, 取其产生的极限扭矩  $T$  等于额定的最大操作力矩, 即  $T=300 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

### 2.3.2 数学模型的建立

假设隔离开关支柱瓷瓶的边界条件为: 底部法兰底面上点的各个方向 (自由度) 均予以固定。由 2.3.1 的受力分析可知, 施加于整个瓷绝缘子的风压为 330.75 N/m<sup>2</sup>, 自重为 1 803.2 N。

绝缘子的结构不规则, 笔者选用 ANSYS 分析软

件包中 SOLID95 单元类型, 建立并计算了以底面中心为直角坐标原点,  $y$  轴为轴向,  $x, z$  面为底面的三维模型。每个元素确定 20 个节点, 每个节点有平行于坐标轴  $x, y, z$  方向的 3 个自由度, 分别对应于圆周的切向、轴向和径向。每个结点的输出应力参数为  $s_x, s_y, s_z, s_{xy}, s_{xz}, s_{yz}$ , 分别表示坐标轴方向的应力和剪切应力。

## 3 结果分析

绝缘子断裂大多发生于瓷体部分, 故经 ANSYS 分析计算后, 隐藏水泥和法兰, 绝缘子上、下元件瓷体部分的拉应力和剪应力分布见图 3~图 6, 黑色为应力集中处。上、下元件拉应力集中部位都在下法兰口附近, 上元件瓷体所受拉应力较下元件小; 上下元件剪应力均集中分布于整个圆周表面上。图中数值显示: 上元件最大  $\sigma_1=5.57 \text{ MPa}$ , 最大  $\tau_1=1.16 \text{ MPa}$ ; 下元件最大  $\sigma_2=8.61 \text{ MPa}$ , 最大  $\tau_2=1.37 \text{ MPa}$ 。可见, 倒闸操作时, 拉应力与扭转剪应力的综合作用, 引起了隔离开关支柱瓷瓶下法兰口附近的应力集中, 这与实际隔离开关支柱瓷瓶断裂的重点部位相符。

若考虑瓷体、水泥、法兰 3 种材料的热膨胀系数差别大、瓷体导热性差所引起的内外温度不均匀、以及胶装水泥吸收水分后的体积和硬度增加等因素引起的附加内应力的影响, 法兰口附近的实际应力要比上述分析的应力数值大, 其应力集中比图 3~图 6 的更为突出。

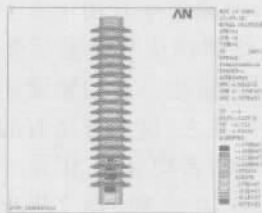


图 3 上元件瓷体部分拉应力  $\sigma$  分布

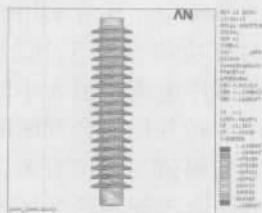


图 4 上元件瓷体部分剪应力  $\tau$  分布

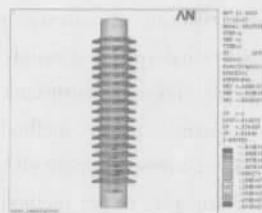


图 5 下元件瓷体部分拉应力  $\sigma$  分布

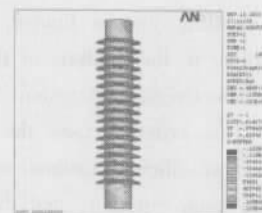


图 6 下元件瓷体部分剪应力  $\tau$  分布

## 4 临界裂纹尺寸的计算

裂纹降低了绝缘子的强度, 使得实际承受的强度远比理论的小得多。对隔离开关支柱瓷瓶进行无损探伤, 要确定检测的最小裂纹尺寸, 必需了解隔离开关支柱瓷瓶的临界裂纹尺寸。由于瓷体表面承受的载荷最大, 应力集中最为明显, 所以表面裂纹的危险性最大。按照断裂力学的理论, 对于表面裂纹, 受到拉应力与剪应力的综合作用时, 其断裂类型属于混合型裂纹, 采用近似断裂判据进行计算, 引入等效应力强度因子<sup>[6]</sup>:

$$K_I^* = \sqrt{K^2 + \frac{1}{1.2} K^2} = \sqrt{K^2 + 1.47K^2}, \text{ (泊松比 } \nu = 0.16 \text{)}.$$

比  $\nu=0.16$ )。

对于 I 型裂纹, 在拉应力作用下的应力强度因子为:  $K_I = \frac{1.1 \sqrt{a}}{\sqrt{Q}}$ 。

裂纹形状参数  $Q$  与裂纹的长深比  $c/a$  相关, 在工程实际中确定  $c/a$  与  $Q$  的关系常采用 Rowe 的经验公式<sup>[6]</sup>:  $Q=1+4.646(c/2a)^{-1.65}, (2a/c \geq 1)$ 。

对于 II 型裂纹, 在剪应力作用下的应力强度因子<sup>[7]</sup>为:  $K_{II} = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{Q}}$ 。

在临界情况下, 等效应力强度因子  $K_I^* = K_{II} = 1.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ <sup>[8]</sup>。得出临界裂纹尺寸的计算公式:

$$a = \frac{K_I^*{}^2 Q}{(1.21^2 - 1.47^2)}.$$

根据 ANSYS 分析得出的隔 (下转第 193 页)

表 1 无消弧线圈时各线路无功功率结果表

接地电 阻值 /	无功功率 /W				
	Line1	Line2	Line3	Line4	Line_f
0.1	-52 819	-37 708	-30 166	-22 616	145 061
1 000	-41 083.4	-29 306.1	-23 447.4	-17 583.7	111 422.4
10 000	-1 190.9	-850.0	-679.7	-509.9	3 230.5

表 2 有消弧线圈时各线路有功功率及 5 次谐波相位结果

接地电 阻值 /		零序有功 /W, 5 次谐波相位 / ( ° )				
		Line1	Line2	Line3	Line4	Line_f
0.1	有功	75.4	53.8	43.1	33.7	4337.9
	相位	105.21	105.21	105.22	105.22	-82.43
1 000	有功	58.1	41.5	33.2	24.9	1980
	相位	128.07	128.07	128.07	128.07	-49.73
10 000	有功	55.2	39.3	31.5	23.7	754.3
	相位	156.82	156.82	156.82	156.81	-46.21

由以上结果可以看出在 NUS 中利用零序无功功率法能够准确判断出故障线路。在 NES 中故障线路的零序有功功率远大于正常线路，但随着接地电阻值增大，正常线路的零序电流减小，故耐过渡电阻的能力还受到实际系统中装置测量准确度的影响<sup>[7]</sup>。从结果也可看出，5 次谐波相位法作为二次判据可以减少由于各线路零序有功差值较小而产生误判的几率。

作者对 Line\_f 线路不同的接地点位置 (26 km, 10 km 和 4 km) 也分别做了仿真，结果显示利用笔者所提出的判据均能准确判别出故障线路。由此可见，用文中所提出的选线方案将能以数据间较大的差别

(上接第 189 页)

离开关应力分布，上、下元件的下法兰处应力集中程度最大，将其拉应力、剪应力代入临界裂纹的计算公式，得到表 2 中不同形状因子对应的临界裂纹尺寸。

表 2 不同形状因子对应的临界裂纹尺寸

裂纹长深比 $l/(c/a)$	Q 值	临界裂纹尺寸 /mm	
		顶部下法兰	底部下法兰
10 1	1.102 9	12.8	5.5
4 1	1.466 5	17.0	7.3
2 1	2.464 0	28.6	12.2

由以上计算可知，在最大拉应力与扭转剪应力的综合作用下，隔离开关支柱瓷瓶的上元件最小临界裂纹尺寸为 12.8 mm，下元件最小临界裂纹尺寸为 5.5 mm；下元件下法兰口附近最危险，这与国家电力公司所统计的断裂事故相符<sup>[1]</sup>。裂纹长深比  $c/a$  为 10 1 的很少，多数在 4 1 附近，因此可以选择探伤灵敏度为 5 mm。若还考虑法兰处附加应力的影响，上、下元件的探伤灵敏度应该比表 2 中的尺寸更小些。

## 5 结论

(1) 利用 ANSYS 对隔离开关支柱瓷瓶分析，倒闸操作时，导线静拉力、风力、及摩擦力所引起的扭矩的综合作用造成支柱瓷瓶下法兰口附近的应力集中，与实际断裂部位相符。

来确保选线准确性。

## 5 结语

提出的选线方案综合考虑了目前普遍采用的各种选线原理，通过对各种方法利弊以及 ATP 仿真结果的分析，最终确定了以采用目前稳态法中准确度最高的零序功率法为主判据，以 5 次谐波相位法为二次判据的选线方案。该方案兼用了幅值与相位、基波与谐波，用互补的方法去解决可能存在的判断死区，从而改善选线的准确性和适应性。

## 参考文献:

- [1] 肖 白, 束洪春, 穆 钢, 等. 基于模极大值理论的配电网接地保护研究[J]. 继电器, 2004, 32(10): 36-39.
- [2] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒, 等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理[J]. 电力情报, 1994(2): 15-19.
- [3] 庞 华, 刘承洲, 任元恒, 等. 新型小电流接地系统微机消谐选线综合装置的原理及应用[J]. 电力情报, 1994(1): 62-66.
- [4] 杨汉生, 赵 斌, 姚晴林, 等. 基于零序功率的小电流选线方法[J]. 继电器, 2002, 30(11): 30-32.
- [5] 郝玉山, 高 曙, 杨以涵等. MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报, 1994(2): 7-11.
- [6] 陈玉书, 张一华. 谐振接地系统单相接地故障 DK 法选线及其应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 69-70.
- [7] 杜丁香, 徐玉琴. 消弧线圈接地电网的有功选线[J]. 继电器, 2002, 30(5): 33-36.

(2) 利用 ANSYS 有限元分析与断裂力学相结合，计算隔离开关支柱瓷瓶的临界裂纹尺寸的方法，以 ZS1.1-252/8 型号为例，计算了下元件最小临界尺寸为 5.5 mm，上元件 12.8 mm。

(3) 隔离开关支柱瓷瓶下元件下法兰口附近临界裂纹尺寸小、危险性最大。因此，在对隔离开关支柱瓷瓶进行探伤时，检测工艺更加严格，确保能有效检测出表面的小缺陷。

## 参考文献:

- [1] 国电公司输电运营部支柱瓷绝缘子事故调查组. 高压支柱瓷绝缘子事故调查分析及预防措施[Z]. 2003.
- [2] 李晓红, 刘叙笔. 支柱瓷绝缘子断裂临界裂纹尺寸的分析与计算[J]. 高电压技术, 2004: 102-103.
- [3] 闫 斌, 丁 辉. 支柱瓷绝缘子断裂失效分析[J]. 青海电力, 2003(1): 1-6.
- [4] 电力工业部西北电力设计院. 电气工程电气设备手册电气一次部分[K]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 754-833.
- [5] 弋东方. 电气工程电气设计手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 384-408.
- [6] 高 庆. 工程断裂力学[M]. 重庆大学出版社, 1986: 94-96.
- [7] 崔振源. 表面裂纹理论及其应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1987: 16-18.
- [8] Clark W G, Logsdon W A. 断裂力学方法在瓷器中的应用 [R]. [s.l.]: 美国西屋研究试验室, 1982.