户外 GIS 套管导线拉力计算

李宝宝

（厦门 ABB 高压开关有限公司，福建 厦门 361006）

摘要 户外 GIS 套管在风速增大的气候条件下，是否还能正常地运行，越来越成为业内关注的焦点。本文以套管导线允许的拉力为判断依据，并以印度实际运行的项目为例，通过分析影响套管导线拉力的几大因素，依据相关的标准和规定进行计算，为户外 GIS 套管的实际应用提供了充分的理论依据和可借鉴的实际案例。

关键词：GIS 套管；导线拉力；风速；计算；安全可靠

由于厄尔尼诺现象，全球气候变暖，风速增大的极端天气时有发生。自 2000 年以来，仅我国就有 13 个强（超强）台风登陆。风速增大将导致机械负荷的变化，从而对套管导线拉力产生直接的影响。在这样恶劣的气候条件下，原有正在运行的户外 GIS 套管能否正常的运行?能承受多大的风速?越来越成为客户关注的焦点。

ABB 在销往世界各地的 GIS 产品中，也常遇到客户的咨询和质疑。本文以印度实际运行的典型项目为例（风速高达 47m/s），对实际运行的数据进行不断的分析研究，结合以往的工程经验，综合判断影响导线拉力的几大因素：风速，气体压力，自重和悬臂试验负荷，并逐个进行分析和计算，从而对套管在实际应用中的安全可靠性做出准确的判断。

1 套管简介

1.1 套管的作用

套管是气体绝缘金属封闭开关设备（简称 GIS）不可缺少的部件，承担着高压绝缘电负荷及机械负荷（内压、弯矩、扭矩、拉伸或压缩等）的双重作用。在实际工程中，将套管安装在与管道相连的分叉模块上，每间隔三相共需三根，通过导线将套管接到高压架空线上，如图 1 所示。



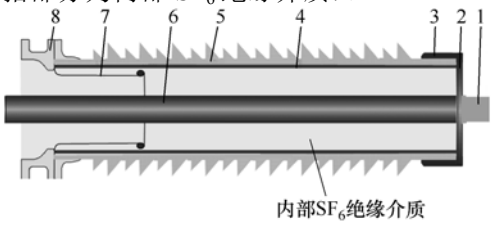
图 1 套管的实际工程运用

1.2 套管的参数

正常使用条件和参数：户外使用；额定电压 252kV；额定电流 2500A；户外风速 34m/s；额定压力 650kPa；安装倾斜角度与垂线夹角不超过 30°；导线试验拉力 2500N；导线运行拉力 1250N。

1.3 套管的结构

GIS 套管通常有两种类型：瓷套和复合绝缘套管（本文案例使用 SF_6 复合绝缘套管）。主要组成部分：导线接头，端盖，上法兰，纤维加固环氧树脂管，硅橡胶伞套，导体，屏蔽罩，下法兰（图 2 中所指部分为内部 SF_6 绝缘介质）。



1—导线接头；2—端盖；3—上法兰；4—纤维加固环氧树脂管；5—硅橡胶；6—导体；7—屏蔽罩；8—下法兰

图 2 套管的结构

2 典型案例现场工况和分析判断

1）风负荷。印度客户提供的气候条件，户外风速高达 47m/s，风压为 1520N/m^2。显而易见，风速超出正常的使用范围，套管承受的压力将随之加大，会直接影响套管顶部的导线拉力。

2）气体压力负荷。根据新版国家标准 GB/T 4109—2008 的 8.9 规定，套管悬臂负荷试验，是在套管内部施加比最高运行压力高出（0.1±0.01）MPa 的压力。但本案例的套管是在新版标准发布之前进行的试验，试验压力值仅为 500kPa。由于气体压力低，套管顶部所需的导线拉力相对也小，与现

有标准规定的数据不符，故需重新校验。

3）自重负荷。根据国家标准 GB/T 4109—2008 和 IEC 60137 表 1 的规定，套管垂直安装或安装成与垂线夹角不超过 30°的任何倾斜角度，都不会产生额外的自重负荷。但本工程案例中，仅有中间的那根套管是垂直安装，而其余两根套管安装倾斜度为 55°（见图 1）。安装倾斜度超出标准规定值，产生的套管自重也将影响套管顶部的导线拉力。

4）悬臂试验负荷。指套管导线拉力的试验值，标准值为 2500N。本案例所使用的套管，已通过相关资质的国家试验室试验，试验值为 6000N，即在正常使用条件下，套管顶部的导线拉力最大可达 6000N，大大超过标准规定值，且有很大的裕度。

通过上述对工程现状的分析，得出上述四大因素：风负荷，气体压力负荷，自重负荷和悬臂负荷，都会对套管顶部导线拉力产生影响。这些因素综合影响的结果，将导致 GIS 套管实际可承受的导线拉力值发生变化，该值是否满足相关标准规定值，是决定套管能否安全可靠运行的主要依据。下面将根据相关标准和规定对本工程案例进行计算。

3 计算

3.1 风负荷

1）套管尺寸（见表 1）

表 1 套管的基本尺寸

名称	尺寸
套管最大伞形直径 D_e/mm	433
套管密封直径 D_s/mm	324
套管外径 D_o/mm	287
套管内径 D_i/mm	270
套管长度 d_h/mm	2733
套管总重量 M/N	1960
设计压力 p/（N/m^2）	800000

2）风负荷

根据 IEC TS 61463 风负荷的理论计算，即

$$F_w = P_w \times \frac{D_e + D_o}{2} \times d_h \qquad (1)$$

式中，F_w 为 47m/s 时的风负荷，N；D_e 为套管最大伞形外径，m；D_o 为套管主体，m；d_h 为套管长度，m；P_w 为 47m/s 时的风压，N/m^2。

将参数代入式（1）计算如下：

$$F_w = 1520 \times \frac{0.433 + 0.287}{2} \times 2.733 = 1495.5 \qquad (2)$$

3.2 气体压力负荷

1）套管的型式试验报告，记录充气压力为 0.5MPa 进行悬臂负荷试验。国家标准 GB/T 4109 的 8.9 规定：试验时，套管内部应施加比最高运行压力高出（0.1±0.01）MPa 的压力，充气压力不同对套管顶部的导线拉力将会产生不同的影响，此时应该进行校核计算。

2）根据国家标准 GB/T 23752 和国际标准 IEC 62155 的附录 D，设计压力等值弯矩的计算为

$$M_b = p \times \frac{\pi}{32} \times D_s^2 \times \frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o} \qquad (3)$$

式中，p 为设计压力，N/m^2；D_s 为密封直径，m；D_0 为绝缘子外径，m；D_i 为绝缘子内经，m；M_b 为弯矩值，Nm。

（1）当充气压力为 500000Pa 时，代入式（3）计算如下：

$$M_{b1} = 500000 \times \frac{3.14}{32} \times 0.324^2 \times \frac{0.287^2 + 0.270^2}{0.287} = 2786.39 \qquad (4)$$

（2）当设计压力为 800000Pa 时，代入式（3）计算如下：

$$M_{b2} = 800000 \times \frac{3.14}{32} \times 0.324^2 \times \frac{0.287^2 + 0.270^2}{0.287} = 4458.23 \qquad (5)$$

M_{b2} 计算值是在设计压力下计算的，设计压力大于实际设备运行的最高压力。M_{b2} 与 M_{b1} 的差值为 1671.84Nm，此弯矩值会影响套管顶部导线拉力。

3）气体压力产生的导线拉力为

$$F_g = (M_{b2} - M_{b1})/d_h = (4458.23 - 2786.39)/2.733 = 611.72 \qquad (6)$$

式中，F_g 为气体压力对套管顶部导线所产生的拉力，N；d_h 为套管长度，m。

3.3 套管自重产生的导线拉力

根据 IEC 61463 的附录 D 的 D.3.1 规定：

$$F_m = \sin\alpha * M \qquad (7)$$

式中，F_m 为自重产生的悬臂试验负荷，N；M 为套管的重量，N。

将数值代入式中，求得套管自重产生的导线拉力值：

$$F_m = \sin 25 \times 1960 = 828.33 \quad (8)$$

3.4 套管顶部导线拉力

本工程使用的套管，其顶部导线拉力已通过试验验证，正常使用条件下导线具有 F_t 为 6000N 的拉力。但实际运行的套管，其导线拉力受到风速、气体压力和自重的影响，尤其当风速高达 47m/s 时，套管顶部导线允许的拉力会随着三大因素的影响而变小。根据国家标准 GB/T 4109 表 1 和 IEC 61463 的规定，计算如下：

$$F = \frac{F_t - F_w - F_g - F_m}{2} \quad (9)$$

式中，F 为导线允许拉力，N；F_t 为型式试验报告中已证实的导线拉力，N；F_w 为风速产生的导线拉力 N；F_g 为气体产生的导线拉力，N；F_m 为自重产生的导线拉力，N。

将上述式（2）、式（6）、式（8）代入式（9），计算值如下：

$$F = \frac{6000 - 1495.5 - 611.72 - 828.33}{2} = 1532.25 \quad (10)$$

该套管顶部导线允许拉力 F 为 1532.25N，工程规整值为 1500N。该值大于标准规定的顶部导线拉力 1250N，符合相关标准规定。因此，本案例中的 GIS 套管，在风速高达 47m/s 的气候条件下，仍然可以安全可靠地运行。

4 结论

户外 GIS 套管随着风速增大和风负荷的加大，将直接影响导线拉力。影响的结果 GIS 套管是否还能正常的使用，是需要根据相关的标准和依据进行严密的计算和校验，同时也要基于原设计的数据进行综合分析和谨慎验证。套管顶部导线拉力的计算结果是否大于标准规定值，可作为判断套管能否正常使用和安全可靠地运行的依据。

参考文献

[1] IEC TS 61463. 套管——抗震要求, 1996.

[2] IEC 60137. 交流电压高于 1000V 的绝缘套管, 2008.

[3] GB 7674. 额定电压为 52kV 以上气体绝缘金属封闭开关设备, 2008.

[4] GB/T 4109. 交流电压高于 1000V 的绝缘套管, 2008.

[5] GB/T 23752. 额定电压高于 1000V 的电器设备用承压和非承压空心瓷和玻璃绝缘子, 2009.

[6] 本工程套管悬臂负荷型式试验报告, 2008.

[7] 本工程客户提供的印度 Isolux 提供的风速压力, 2009.

[8] SF_6 高压电器设计, 2009(7).

作者简介

李宝宝（1963-），女，大学本科，福建福鼎人，厦门 ABB 高压开关有限公司工程师，主要从事产品技术支持。

（上接第 162 页）

将表 1 与表 2 进行比较，发现功率因数上升明显，从治理前的 0.799 上升为 0.99，此外由于低压 SVG 的谐波抑制功能，电流谐波畸变率从治理前的 21%、22%、22%下降为 1.9%、1.8%、1.9%。

低压 SVG 装置安装后，电能质量改善明显：谐波含量降低、电压、电流波形曲线平滑，补偿后无功功率下降，功率因数达到 0.98 以上；提升电压合格率，提高供电质量，延长变压器使用寿命，保证供电经济性。节能效果显著，仅考虑无功节能和谐波节能两项效益，经测算设备投资回收期约为 3.1 年左右。

4 结论

本论文研究了现有农网无功补偿技术的不足，针对不足提出了低压静止无功发生器 SVG 技术。该技术具有无功补偿、滤除谐波和治理三相不平衡等电能质量问题。通过应用于某配电变压器台区验证了其技术的有效性。该技术大大提高了供电公司供电可靠性，具有良好的经济和社会效益。

作者简介

翟季青（1974-），男，硕士，从事电力物资管理工作。