1000 kV特高压交流支柱瓷绝缘子的研制

张 勤[1], 王绍武[2], 吴光亚[1], 叶立茂[3], 张 锐[1]
(1. 国网电力科学研究院,武汉 430074;2. 国家电网公司,北京 100005;
3. 抚顺电瓷制造有限公司,抚顺 113006)

摘 要: 根据晋东南—荆门1000 kV特高压交流试验示范工程对支柱瓷绝缘子机械、电气、耐地震等性能的要求,首次采用污耐压法对支柱瓷绝缘子进行了污秽外绝缘设计、耐地震计算分析和性能评价。成功地研制了结构高度10 m、额定弯曲破坏负荷16 kN、扭转破坏负荷10 kN·m、爬电距离30250 mm的1000 kV特高压交流工程用支柱瓷绝缘子。该绝缘子由5个单元件组成,具有优良的机械、污耐压和耐地震特性,可运行于c级污秽等级。试验验证和运行经验皆表明所研制的绝缘子的电气、机械特性等满足特高压交流试验示范工程的要求。

关键词: 1000 kV; 特高压; 交流; 支柱瓷绝缘子; 机械; 电气; 污耐压
中图分类号: TM216 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-6520(2010)06-1437-05

Development of Post Porcelain Insulator for 1000 kV UHV AC

ZHANG Qin[1], WANG Shao-wu[2], WU Guang-ya[1], YE Li-mao[3], ZHANG Rui[1]
(1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100005, China;
3. Fushun Electric Porcelain Manufacturing Co., Ltd., Fushun 113006, China)

Abstract: According to the requirements proposed by 1000 kV UHV AC demonstration project from southeastern Shanxi province to Jingmen in Hubei province, including the mechanical, electrical and seismic-resistant properties of post porcelain insulator, a pollution withstand voltage method was used to design the polluted external insulation of post porcelain insulator, and the calculation analysis of earthquake-resistant and the performance evaluation of anti-seismic were also carried out. Post porcelain insulator for 1000 kV UHV AC has been developed successfully by Fushun Electric Porcelain Manufacturing Co., Ltd., whose structural height is 10 m, rated bending failing load is 16 kN, torsion failing load is 10 kN·m, and creepage distance is 30250 mm. This insulator is composed of five single elements, and has excellent mechanical, pollution withstand voltage and earthquake-resistant properties, so it can be used in the area where pollution class is c. The simulations and service experience show that the mechanical and electrical properties of post porcelain insulator can satisfy the requirements proposed by 1000 kV UHV AC demonstration project from southeastern Shanxi province to Jingmen in Hubei province.

Key words: 1000 kV; UHV; AC; post porcelain insulator; mechanical; electrical; pollution withstand voltage

0 引言

目前,德国罗森塔尔公司、日本NGK公司知多工厂、法国SEDIVER公司等先进国家仅能制造下元件长2 m、最大杆径250 mm、爬电比距20～25 mm/kV、弯矩100 kN·m的单元件,全过程合格率>90%的单柱式支柱瓷绝缘子只能运行在a级污秽等级,在700 kV电压、1 MHz频率下无线电干扰水平≤500 μV,且采用三角锥式结构的支柱瓷绝缘子来解决单柱式支柱瓷绝缘子耐地震能力达不到要求这一问题等[1,2]。截止到2004年,我国仅能制造结构高度6 m、最小公称爬电比距25 mm/kV、额定弯曲破坏负荷12.5 kN、额定扭转破坏负荷8 kN·m、单元件最大弯矩75 kN·m的单柱式支柱瓷绝缘子[3-5],其制造水平落后于日本和欧美等先进国家,且其机械强度不能满足特高压交流试验示范工程的要求。若要将2 m单元件的最大弯矩75 kN·m提高到160 kN·m,则无疑对国内电力装备支柱瓷绝缘子制造行业的制造技术提出了更高要求。为了解决这一问题并提高其耐地震能力、污耐压水平及全过程合格率,本文针对特高压交流支柱瓷绝缘子的技术要求,分析了其关键制造技术,并针对这些关键制造技术重点解决了大坯件成形工艺、修坯、烧成技术、脱伞和底部开裂、许用应力的选取、吊烧工艺、外形设计等问题,成功地研制出了最大弯矩为160 kN·m的2 m单元件及由5个元件组成的结构高度10 m、最小公称爬电比距25 mm/kV、额定弯曲破坏负荷16 kN,额定扭转破坏负荷10 kN·m的这一达到国际领先水平的单柱式支柱瓷绝缘子。试验验证和运行经验皆表明本文研制的结构高度

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

10 m、额定弯曲破坏负荷 16 kN、扭转破坏负荷 10 kN ·m、爬电距离 30250 mm 的 ZSW_1-1100/16 支柱瓷绝缘子的机械强度、耐地震能力、污耐压水平、无线电干扰水平、可见电晕特性等,完全满足晋东南—荆门 1000 kV 特高压交流试验示范工程的要求[6-10],且其污秽外绝缘设计合理。

1 1000 kV 工程对支柱绝缘子设计的主要技术要求

1.1 污耐压特性

污秽外绝缘满足 c 级污秽等级运行要求,即在 698 kV 工频试验电压下,耐受 0.08 mg/cm^2 试验盐密(SDD)和 0.5 mg/cm^2 等值灰密(NSDD)[11-13]。

1.2 机械强度等级

弯曲破坏负荷为 16 kN,扭转破坏负荷为 10 kN ·m。

1.3 绝缘水平

支柱绝缘子的绝缘水平如表 1 所示。

表 1 支柱绝缘子的绝缘水平

Tab.1 Insulation level of post insulator

参数	数值
标称电压/kV	1000
系统最高运行电压/kV	1100
雷电冲击干耐受电压(峰值)/kV	2400
操作冲击湿耐受电压(峰值)/kV	1800
额定 1 min 工频湿耐受电压(有效值)/kV	1100
在 700 kV 电压、1 MHz 频率下无线电干扰/μV	≤500

1.4 耐地震能力

地面水平加速度为 3 m/s^2,地面垂直加速度为 1.5 m/s^2(地震波为正弦波,持续时间为 3 个周波,安全系数为 1.67)。

2 污秽外绝缘设计

文[7]采用污耐压法,对结构高度 8.8 m 的 1000 kV 支柱瓷绝缘子进行人工污秽工频耐受电压试验,得出了污耐压与 SDD 的关系曲线。首次采用污耐压法对特高压交流支柱瓷绝缘子进行了污秽外绝缘设计。建议在 c 级污秽等级下运行时支柱瓷绝缘子的结构高度和爬电距离分别选为 9.3～11.4 m 和 31200～38300 mm。

3 耐地震计算分析和耐地震性能评价

文[14]对抚顺电瓷制造有限公司设计的 1000 kV 支柱瓷绝缘子进行了 8 度烈度地震区耐地震计算分析和耐地震性能评价。计算结果表明,无论使用何种地震波,在绝缘子顶部叠加了水平荷载 6400 N 后,绝缘子主要部件的应力都小于破坏应力,其主要材料的最小安全系数均 > 1.67,符合国家标准 GB/T 13540-1992 规定的刚性安装在基础上的高压开关设备安全系数为 1.67 的耐地震要求。底部用 12 个 M20 的螺栓、顶部用 8 个 M16 的螺栓连接也符合相关要求。

4 针对特高压交流工程对支柱瓷绝缘子的技术要求分析其关键制造技术难点

4.1 机械强度

1000 kV 支柱瓷绝缘子的结构高度为 10 m,额定机械弯曲负荷为 16 kN,额定机械扭转破坏负荷为 10 kN ·m。其结构高度是 500 kV 支柱瓷绝缘子(对应 4.4 m 和 4.7 m)的 2.27 倍或 2.13 倍;单柱绝缘子下元件额定弯矩为 160 kN ·m,比 500 kV(对应 70.4 kN ·m 和 75.2 kN ·m)高 2.27 倍或 2.13 倍,无疑 1000 kV 支柱瓷绝缘子的机械制造难度很大。

4.2 产品成品率

500 kV 及以下电压等级支柱瓷绝缘子的产品成品率约 90 %。1000 kV 支柱瓷绝缘子的产品成品率 < 50 %,甚至仅 15 %～20 %。1000 kV 支柱瓷绝缘子的产品成品率低的主要原因是平均直径(约 300 mm)和单元件高度(> 2 m)比 500 kV 大很多。若不提高产品成品率,则势必会降低机械、电气可靠性并提高产品成本。

5 重点解决的关键制造技术问题

5.1 整体思路

绝缘子的整体结构和伞形结构设计的基本原则是在满足电气绝缘强度和污耐压性能的条件下,尽可能降低绝缘子的结构高度,以提高绝缘子的机械性能,降低制造难度。重点研究结构布置运行方式、外形、大直径坯件成形及烧成技术。

5.2 结构布置运行方式的确定

根据我国支柱瓷绝缘子设备制造能力、制造技术水平、单柱绝缘子机械弯曲和扭转破坏负荷试验验证及 8 度烈度地震区耐地震计算,采用了单柱式结构运行方式。

5.3 外形设计

考虑了伞裙造型、结构高度、伞的外形、外形参数后对特高压支柱绝缘子进行了外形设计。试验结果证明其外形设计合理[7]。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.4　机械弯曲强度

考虑到结构高度 10 m,机械弯曲强度大,故在设计时增加了主体杆径和法兰高度,确定合理的胶装比,使其受力时应力较小,提高机械弯曲强度。

5.5　坯件成形工艺

因等静压干法成型工艺较湿法成形工艺工序简单、机械化程度高、生产周期短、尺寸和形位公差偏差小、机械强度分散性小、产品性能稳定、产品合格率高,故采用等静压干法成形工艺制造坯件。

等静压干法可生产直径为 630 mm、最大伞径为 385～420 mm、整体单元件为 2.5 m 的 1000 kV 支柱绝缘子,可挤制出 Φ800 mm ×2800 mm、质量约 1700 kg 的泥坯且水份均匀、密度好、变形度小。

5.6　大坯件修坯

采用数控修坯机对高度 > 10 m、直径为 630 mm 的 1000 kV 支柱绝缘子毛坯进行修坯,比 500 kV 支柱瓷绝缘子成形难度更大。故采取了以下措施来解决问题;

1) 针对大坯件重新设计制作陶瓷修坯刀。

2) 控制修坯水分,避免因修坯水分不合适而造成坯件收缩,导致绝缘子的结构高度、绝缘件的最大公称直径、最小公称爬电距离、安装结构和公差超过允许偏差。

5.7　大型坯件脱伞和底部开裂

1) 大型坯件在装窑时,调整坯件的平面度。

2) 装窑时主体杆径相差大的坯件不装在同一个窑次烧成。

3) 为了确保产品焙烧不炸裂,重新调整大型坯件烧成曲线。

5.8　直线度

由于单柱绝缘子质量约 1700 kg,其细长比(高度/杆径) > 20,所以根据该绝缘子的结构,重新设计制造配套窑具。采取这些措施后,保证了绝缘子的直线度。

5.9　许用应力的选取

由于 1000 kV 支柱瓷绝缘子的直径比 500 kV 大,其机械强度的利用率和许用应力比 500 kV 小,下节下部主体直径约 320 mm,所以各节元件设计应力取值下部 ≤48 MPa,上部 ≤43 MPa,实际破坏应力均 > 65 MPa。

5.10　吊烧工艺

为防止瓷件在焙烧过程中变形弯曲,采用了吊烧工艺。在吊烧过程中,由于受到自身重力的影响,瓷件上部处在张应力下焙烧,上端拉应力远大于 500 kV 产品,易产生掉头、变形不合格品。下部处在自由状态下焙烧,通常上部强度比下部低,所以每节元件上部应力取值应比下部低,故在设计时每节元件上部应力取值应 < 43 MPa。从应力取值上确保支柱的机械强度。

图 1　1000 kV 支柱绝缘子电气试验

Fig. 1　1000 kV post insulator electrical test

5.11　产品成品率低

从试制产品质量情况统计表分析,可以看出导致产品成品率低的主要原因:一是修坯成型后的坯件的直径大使坯件主体襞裂;二是由于产品弯矩达 160 kN ·m,产品直径较粗(> 500 mm),在整个烧成过程中易产生开裂、掉伞、渗吸、冷炸等;三是由于单节高度达 2.0 m 的单元件的直径较细,易在修坯、上釉及运输过程中产生断裂;四是在烧成过程中,随着绝缘子主体直径增加,易产生开裂、掉伞、渗吸、冷炸。针对以上问题采取了以下措施和方法:增加托盘的直径;调整干燥温度;根据绝缘子的结构和质量重新设计窑具,并根据窑具和干坯尺寸设计起吊高度;制订合理的装烧尺寸和烧成曲线;调整大型真空炼泥机的螺旋结构、出口套筒结构、挤制速度与密度的关系,使挤制 Φ800 mm ×2800 mm、质量约 1700 kg 的泥坯水分均匀、密度好、变形度小; 制订泥坯电阴干及光坯电干燥工艺,使其水分挥发均匀,内应力减小,使坯件不发生脱伞、开裂。

6　外观、机械、电气等特性试验验证

对抚顺电瓷制造有限公司制造的 3 柱 ZSW_1-1100/16 高压支柱瓷绝缘子外观、机械、电气等特性进行了试验验证[15]。电气试验安装见图 1。其验证结果如下。

6.1　外观检查

对 3 柱 ZSW_1-1100/16 支柱瓷绝缘子的瓷件进行了外观检查,其结果是釉面光滑、光亮、色调均匀,无裂纹、缺釉、碰损、杂质及针孔。满足 GB/T 772-2005《高压绝缘子瓷件技术条件》和 GB/T 8287.1-2008《高压支柱瓷绝缘子 第 1 部分 技术条件》标准

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的要求。

6.2 电气特性试验验证

1)干雷电冲击耐受电压试验

对1柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子施加电压2820～2880 kV,耐受15次,未闪络,满足工程设计要求耐受电压2400 kV、耐受15次、闪络次数≤2次的要求。

2)湿工频耐受电压试验

对1柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子施加1310 kV耐受电压1 min,未闪络,满足工程设计要求耐受1100 kV电压1 min、不闪络的要求。

3)湿操作冲击耐受电压试验

对1柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子施加耐受电压2020～2030 kV,耐受15次,未闪络,满足工程设计要求耐受电压1800 kV、耐受15次、闪络次数≤2次的要求。

4)人工污秽工频耐受电压试验

在盐密0.08 mg/cm^{2}和灰密0.5 mg/cm^{2}的试验工况下,对1柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子施加699 kV电压100 min,未闪络,满足工程设计要求在盐密0.08 mg/cm^{2}和灰密0.5 mg/cm^{2}的试验工况下,耐受699 kV电压100 min、不闪络的要求。

5)可见电晕及无线电干扰试验

对1柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子进行可见电晕及无线电干扰试验,其试验结果为电晕熄灭电压812.4 kV,无线电干扰值375.8 μV。满足工程设计要求电晕熄灭电压≥698.6 kV、无线电干扰值≤500 μV的要求。

6.3 机械特性试验验证

1)温度循环试验

3柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子经温差50 K(热水69.0 ℃,冷水19.0 ℃)的冷热水中各停留60 min的3次循环后,检查试品均未损坏。

以下机械特性试验验证均在温度循环试验后进行。

2)四向弯曲负荷耐受试验

对3柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子施加弯曲负荷9.7～9.8 kN,持续时间3 s,未破坏。满足工程设计要求耐受四向弯曲负荷9.6 kN、持续时间3 s、不损坏的要求。

3)弯曲破坏负荷试验

对3柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子进行弯曲破坏负荷试验,其弯曲破坏负荷值分别为22.2、22.6、23.0 kN。满足工程设计上关于弯曲破坏负荷≥16.0 kN的要求。

4)扭转负荷试验

图2 1000 kV南阳站运行支柱绝缘子

Fig. 2 1000 kV post insulator in Nanyang substation

对3柱 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子进行扭转破坏负荷试验,施加扭转破坏负荷16.0 kN·m未破坏。满足工程设计上关于扭转破坏负荷≥10.0 kN·m的要求。

以上试验验证结果说明我国自主研发制造的 ZSW_1-1100/16支柱瓷绝缘子的外观、机械、电气等特性满足工程设计要求。

7 运行验证

抚顺电瓷制造有限公司和西安双佳电瓷有限公司制造的结构高度10 m、额定弯曲破坏负荷16 kN、扭转破坏负荷10 kN·m、爬电距离30250 mm的 ZSW_1-1100/16高压支柱瓷绝缘子已应用于晋东南—荆门1000 kV特高压交流试验示范工程,自2009-01运行至今未出现任何异常现象,运行良好。现场运行见图2。试验验证和运行经验表明该支柱瓷绝缘子的电气、机械特性完全满足晋东南—荆门1000 kV特高压交流试验示范工程的要求。

8 结论

a)我国首次采用污耐压法对1000 kV特高压交流支柱绝缘子进行污秽外绝缘设计,试验验证和运行经验表明,其污秽外绝缘设计合理。

b)我国自行研制制造的 ZSW_1-1100/16高压支柱瓷绝缘子结构高度10 m,额定弯曲破坏负荷16 kN,扭转破坏负荷10 kN·m,爬电距离30250 mm,试验验证和运行经验表明该支柱瓷绝缘子的电气、机械特性完全满足晋东南—荆门1000 kV特高压交流试验示范工程的要求。

参 考 文 献

[1] 日本电气学会通信教育会.绝缘子[M].靳宝丰,译.北京:机械工业出版社,1987.

[2] Witt H. Insulation levels and corona phenomena on HVDC

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

transmission lines[R]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University, 1961.

[3] 房柯夫,吴光亚,刘志强. 1000 kV 交流变电站支柱和空心绝缘子污秽外绝缘设计的探讨[J]. 电瓷避雷器,2007(1):1-5.

[4] 吴光亚. 1000 kV 级交流输变电工程外绝缘特性研究　污秽绝缘部分　总结国内外经验进行初步研究提出可供参考的外绝缘特性[R]. 武汉:武汉高压研究所,2005.

[5] 安德生 J G. 345 kV 及以上超高压输电线路设计参考手册[M]. 北京:电力工业出版社,1981.

[6] 丘志贤,白　庆,李大楠,等. 国产盘形和棒形支柱绝缘子耐污性能的试验研究[J]. 电瓷避雷器,1996(4): 13-20.

[7] 吴光亚,徐　涛,张　锐,等. 1000 kV 交流特高压试验示范工程支柱绝缘子和套管耐污性能研究[R]. 武汉:国网武汉高压研究院,2008.

[8] Central Research Institute of Electric Power Industry. Report on basic concept and external insulation design techniques of the polluted insulator in Japan[R]. Tokyo, Japan: Central Research Institute of Electric Power Industry, 2005.

[9] Central Research Institute of Electric Power Industry. Central research institute of electric power industry, report: 182041[R]. Tokyo, Japan: Central Research Institute of Electric Power Industry, 1981.

[10] Central Research Institute of Electric Power Industry. Central research institute of electric power industry, report: 181003[R]. Tokyo, Japan: Central Research Institute of Electric Power Industry, 1981.

[11] 吴光亚,张　锐,徐　涛,等. 特高压线路沿线走廊污秽调查报告[R]. 武汉:国网武汉高压研究院,2006.

[12] 崔江流,张开贤. 一九九零年华北大面积污闪事故调查报告[R]. 北京:国家电力公司发输电部,1990.

[13] 宿志一,刘湘生. 二 000 年初辽宁、华北和河南电网大面积污闪事故调查报告[R]. 北京:国家电力公司发输电部,2001.

[14] 叶立茂、刘玉民. 1000 kV 支柱绝缘子耐地震计算分析和耐地震性能评价[R]. 抚顺:抚顺电瓷有限公司,2007.

[15] 国网武汉高压研究院. 国网武汉高压研究院试验报告:[2006]瓷字第 194 号[R]. 武汉:国网武汉高压研究院,2006.

张　勤

1958 —,男,高工

现从事高电压工程科研、质检、试验及管理工作

ZHANG Qin

Senior engineer

收稿日期　2010-01-15　**修回日期**　2010-04-26　**编辑**　李　东

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net