

重冰区输电线路绝缘子选型问题

何 钢^{1,2}, 文习山²

(1. 国网电力科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 输电线路的绝缘配合主要是选择绝缘子型式、绝缘子串片数和空气间隙。根据重冰区输变电示范工程的需求, 总结国内外研究现状和大量试验结果, 比较了多种大吨位瓷绝缘子和玻璃绝缘子的覆冰闪络特性, 利用所得结果选取了重冰区输电线路悬式绝缘子型号及串型。结果表明: XZP-300 瓷绝缘子串覆冰闪络电压比 XZP-210 高, LXZP300 玻璃绝缘子串覆冰闪络电压比 LXZP-210 高; 间插布置绝缘子串和“V”型串绝缘子串冰凌桥接的速度变慢, 饱和覆冰量大于常规悬垂串; 重冰区线路可以采用考虑大吨位瓷绝缘子和玻璃绝缘子间插式的布置和“V”型绝缘子串相结合的方式, 改善绝缘子串的防冰闪特性。

关键词: 绝缘子; 串型; 重冰区; 间插布置; 输电线路

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0097-05

Study on Selection of Transmission Line Insulators in Severe Icing Area

HE Gang^{1,2}, WEN Xi-shan²

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Selection of insulator type, number of insulator string and air space are the main basis of transmission line insulation coordination. According to the demand for transmission pilot project in severe icing area, this paper summarizes a large number of domestic and foreign research results and test data, compares icing flashover characteristics for a wide range of large-tonnage porcelain and glass insulators, and selects insulator model and string-type in severe icing area. The results show that: the icing flashover voltage of XZP-300 porcelain insulator string is higher than XZP-210 insulator string, the icing flashover voltage of LXZP300 glass insulator string is higher than LXZP-210 insulator string; the icing-bridge velocity of insulator string connected with alternately large and small diameter sheds or V-insulator string slows down, saturation of icing is higher than conventional icing hanging string. In order to improve the anti-flashover characteristics of icing insulator string, it can use the combination of V-insulator string and large-tonnage porcelain and glass insulators which are connected with alternately large and small diameter sheds in severe icing area.

Key words: insulators; string type; severe icing area; connected with alternately large and small diameter sheds; transmission line

0 引言

中国幅员辽阔, 地形地貌复杂, 地势西高东低, 以青藏高原为基点自西向东呈阶梯状, 形成了中国大陆板块的梯级大斜面。中国地形的复杂多样表现在: 山地、高原、盆地、丘陵、平原, 5 种地形齐全。纵横交织的山脉将大陆分隔成许多网格, 高原、盆地

和平原分布其中。这将势必造成, 架空输电线路特别是连接地区大电网的主干电网经过高海拔、高寒的山区, 高海拔重冰区绝缘子选型显得尤为关键。

2008 年春节前夕的持续雨雪天气造成江西、湖北、浙江、安徽、湖南、贵州、云南等 13 个省电网发生覆冰事故, 湖南和贵州大面积停电。仅此, 国家电网公司直接经济损失达到 104.5 亿元。近 30 年来, 大面积覆冰事故在全国各地时有发生, 国家电网运行

收稿日期: 2011-11-19; 修回日期: 2011-12-10

管理处的统计资料表明:仅2006年1月至2007年6月,由于覆冰引起的500 kV线路跳闸13次,占总跳闸数的8.84%,由覆冰引起的500 kV线路非计划停运4次,占总停运次数的11.11%。可见,覆冰已经成为危害线路安全运行的主要原因之一^[1-2]。

绝缘子覆冰闪络是指外加电压(通常为运行电压)作用下,沿覆冰绝缘子和大气交界面发生的复杂放电现象,在闪络通道还可发生足够强的电离以产生电弧。一般来说覆冰前绝缘子表面存在污秽才会导致绝缘子在运行电压下发生冰闪,绝缘子冰闪严重威胁电力系统的安全运行^[3-5]。

防冰技术是世界性的技术难题,国内外学者对防冰技术进行过长期研究^[6-18]。而高海拔重冰区绝缘子选型是输电线路设计的难点,目前也无相关的标准。笔者以研究覆冰程度对绝缘子冰闪特性的影响为基础,结合现有的研究成果,研究总结国内外研究现状和大量试验结果,比较了多种大吨位瓷绝缘子和玻璃绝缘子的覆冰闪络特性,为“溪洛渡—上海”±800 kV及其他高电压等级直流输电线路外绝缘的设计和建设提供理论参考。因此,该课题具有重要的理论价值和工程实际运用价值。

重冰区特高压输电线路通常采用大吨位的悬式绝缘子,虽然没有相关标准可供参考,但相关学者针对大吨位的瓷和玻璃绝缘子的覆冰闪络做了大量的试验研究^[19-24]。笔者通过总结大量试验结果,从覆冰厚度、串型和绝缘子在串中的布置方式对绝缘子冰闪电压的影响等3个方面,来比较XZP-210、LXZP-210、XZP-300、LXZP-300等4种瓷和玻璃绝缘子的覆冰闪络特性。从而,为重冰区输电线路选取合理的绝缘子、串型和绝缘子在串中的布置方式提供技术参考。结果表明:大吨位绝缘子串覆冰闪络电压比低吨位绝缘子串高;间插布置绝缘子串和“V”型串绝缘子串冰凌桥接的速度变慢,饱和覆冰量大于常规悬垂串;重冰区线路可以采用考虑大吨位瓷绝缘子和玻璃绝缘子间插式的布置和“V”型绝缘子串相结合的方式,改善绝缘子串的防冰闪特性。

1 相关绝缘子的参数

1.1 盘型瓷绝缘子和玻璃绝缘子的性能特点

盘型瓷绝缘子因其具有良好的绝缘性能、抗气候变化性能、耐热性和组装灵活等优点,被广泛用于各种电压等级的输电线路。瓷绝缘子其平均寿命周期一般为15~25年,NGK等厂商生产的品质较高的瓷绝缘子寿命周期甚至与钢化玻璃绝缘子无异。瓷绝缘子失效的表现形式为头部隐蔽“零值”或“低

值”。由于瓷绝缘子失效的原因是材料的老化,而老化程度为时间的函数,老化是隐蔽的,因此给检测带来极大的困难,导致检出率极低。含有劣化绝缘子的绝缘子串发生闪络(由于雷击或污闪等原因)时,可能会使劣化绝缘子的头部瞬间发热爆炸,造成导线落地的事故。

钢化玻璃绝缘子通常采用圆柱头结构,较之圆锥头结构的瓷绝缘子具有尺寸小、重量轻的特点。钢化玻璃绝缘子失效的表现形式是“自动破碎”和“零值自破”,无需对其进行绝缘测试,这样绝缘子故障很容易被发现。数十年的运行和试验数据证明,钢化玻璃绝缘子具有长期稳定的机电性能和较长的使用寿命,寿命周期可达40年。玻璃绝缘子泄漏比距较大(主要指钟罩型一类的玻璃绝缘子),且表面产生的凝聚物少,抵抗由污秽引起的热应力能力强。但是当用于粉尘污染较严重的地区,因这种钟罩深棱的伞型自洁能力差、清扫不便,下表面结垢严重,造成耐污能力大大降低。

1.2 绝缘子参数

盘型瓷和玻璃绝缘子的绝缘、耐污性能虽然特点鲜明,但就同吨位瓷和玻璃绝缘子覆冰后的外绝缘特性而言,对比较少且没有统一的研究结果。重冰区绝缘子的选型是当前输电线路设计的一个难点,笔者通过总结大量现有试验结果和研究成果,讨论XZP-210/300瓷绝缘子和LXZP-210/300玻璃绝缘子的覆冰闪络特性,为重冰区绝缘子的选型提出参考意见。4种绝缘子的基本技术参数见表1,其结构示意图见图1。表1中,H为结构高度,D为绝缘子盘径,L为爬电距离。

表1 绝缘子样品标记表

Tab. 1 Table of specimens

绝缘子型号	H/mm	结构形状	L/mm	D/mm
XZP-210	170	图1(a)	540	320
LXZP-210	170	图1(b)	545	320
XZP-300	195	图1(c)	635	400
LXZP-300	195	图1(d)	635	400

2 绝缘子的覆冰闪络特性及影响因素

2.1 覆冰厚度d对冰闪电压的影响

目前,相关学者一般以监测旋转圆柱体的覆冰厚度来表征绝缘子的覆冰程度^[7-8]。且研究表明,覆冰绝缘子闪络电压随覆冰厚度的增加呈幂函数下降关系, $U_f = Ad^{-b}$ ^[7-8]。

重庆大学对不同型式的大吨位瓷和玻璃绝缘做了直流覆冰闪络试验,得出的XZP-210/300瓷绝

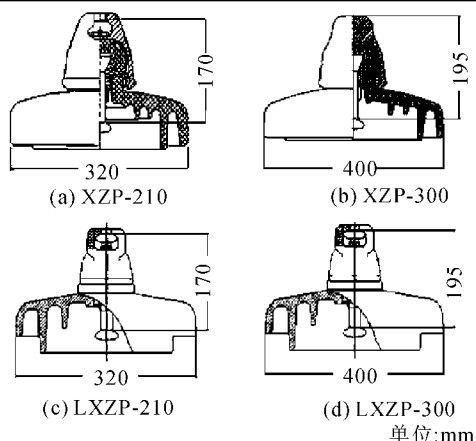


图1 绝缘子结构图

Fig. 1 Configuration of insulators

缘子和 LXZP-210/300 玻璃绝缘子 50%覆冰闪络电压 $U_{50\%}$ 与覆冰厚度的关系, 见图 2^[7](11 片/串)。试验在人工气候室内进行将试品竖直放置在人工气候室内, 然后向试品均匀喷过冷水。覆冰期间人工气候室内温度保持在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 当绝缘子覆冰达到预定重量并再干冻 15 min, 且保持试验过程中温度基本恒定^[5]。

从图 2 可以看出, 同吨位的瓷和玻璃绝缘子串, 在相同污秽度下随覆冰厚度的增加绝缘串覆冰闪络电压 $U_{50\%}$ 的变化趋势基本一致。在覆冰初期即覆冰厚度 $d=5\text{ mm}$ 和严重覆冰即覆冰厚度 $d=20\text{ mm}$ 时, 同吨位的瓷和玻璃绝缘子串覆冰闪络电压 U_{50} 基本相等。因此同吨位的瓷和玻璃绝缘子串不能明显区分出绝缘子耐冰闪能力的强弱。

比较如图 2 中的(a)和(b), (c)和(d) 可知, 无论是瓷还是玻璃绝缘子, 相同污秽度和覆冰厚度条件下大吨位绝缘子串冰闪电压都比更低吨位绝缘子串的冰闪电压高。XZP-300 瓷绝缘子串闪电压比 XZP-210 高, LXZP300 玻璃绝缘子串闪电压比 LXZP-210 高。由于, 绝缘子串冰凌桥接后, 绝缘子串发生覆冰闪络是沿串间冰凌的电弧滑闪放电, 而同为 11 片串, 210 kN 产品公称串长为 $170\text{ mm}\times 11$, 300 kN 产品公称串长 $195\text{ mm}\times 11$, 大吨位绝缘子串爬电距离也要大一些! 当覆冰绝缘子串冰凌完全桥接时大大地减小了负极性电弧的爬电距离从而导致冰闪电压大幅度降低, 此时决定绝缘子串覆冰冰闪电压的主要因素是绝缘子串爬电距离。因此, 重冰区超特高压输电线路可以考虑采用大吨位绝缘子来提高线路的防冰闪能力和机械强度。

2.2 间插布置的绝缘子串对冰闪电压的影响

大吨位绝缘子因其大高度、大盘径、大爬距的特点, 增加了有效爬电距离, 提高了绝缘子串的冰

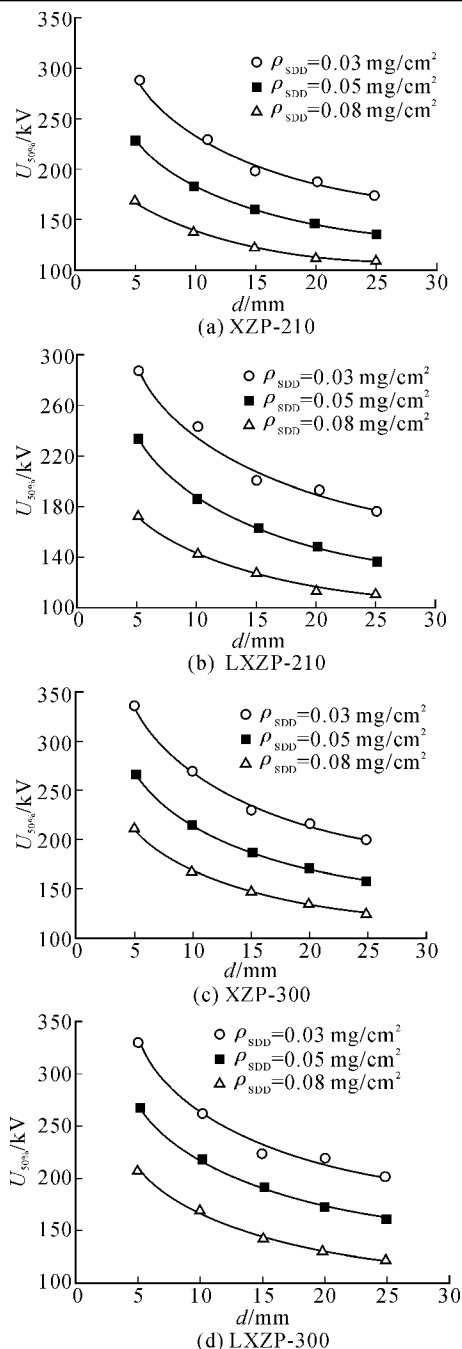


图2 绝缘子直流冰闪 50%电压与覆冰厚度 d 的关系

Fig. 2 Relation between DC flashover voltage and icing thickness

闪电压。使用大吨位绝缘固然能改善重冰区线路的外绝缘特性, 但同时增加的成本和线路安装的难度, 防冰闪的效果也不明显。因此, 相关学者提出改变绝缘子在串中的布置方式即间插式布置的绝缘子串来改善绝缘子串的覆冰闪络特性。

在文[20]中, 分别就 2 种悬式玻璃绝缘子按 3 种间插方式(“2+1”、“3+1”和“4+1”组合)做了绝缘子串的覆冰闪络试验, 结果表明, 间插式的布置较好地改善了绝缘子串的覆冰闪络特性^[7]。

具体表现为:间插布置的绝缘子串覆冰重量增加,但其冰闪电压有所提高,原因为间插布置绝缘子串冰凌桥接速度的变慢,饱和覆冰量大于常规串;间插布置绝缘子串受污秽度影响都小于常规串,且“3+1”组合受附盐密度的影响最小;在相同的污秽度、串长和覆冰状态下,3种间插方式的绝缘子串50%冰闪电压均高于常规串,其中“3+1”组合方式的50%冰闪电压最高。

因此重冰区线路可以考虑瓷绝缘子间插式的布置,玻璃绝缘子间插式的布置,以及瓷和玻璃绝缘子组合间插式的布置。同时,在重冰区线路设计中,间插式的布置组合方式可以是“3+1”组合方式也可以是其他组合方式,研究范围可以扩展。

2.3 绝缘子串型和串长对冰闪电压的影响

中国规划 ± 800 kV线路中有部分线路要穿越高海拔严重覆冰地带,因此要保障线路运行的可靠性,必须进行防冰闪设计。绝缘子串表面的覆冰状况会受到海拔高度、风速、悬挂高度以及杆塔周围微地形等因素的影响。

中国电力科学研究院就串型对绝缘子串的覆冰闪络特性做了相关试验,得出在同样的覆冰条件下,“V”型串的覆冰闪络电压要比悬垂串高20%以上。并且提出线路防冰闪设计时,应优先采用“V”型串或耐张串,对于已经建成的悬垂串,可更改为倒“V”串(即八字串)悬挂方式,或采取插花串方式即3.2提到的间插式布置,以防止冰凌完全桥接绝缘子串,提高冰闪电压^[24]。

3 结论

1)同吨位的瓷和玻璃绝缘子串不能明显区分出绝缘子耐冰闪能力的强弱,XZP-300瓷绝缘子串闪电压比XZP-210高,LXZP300玻璃绝缘子串闪电压比LXZP-210高,重冰区超特高压输电线路可以考虑采用大吨位绝缘子。

2)间插布置绝缘子串和“V”型串绝缘子串冰凌桥接速度的变慢,饱和覆冰量大于常规悬垂串。

3)绝缘子串表面的覆冰状况会受到海拔高度、风速、悬挂高度以及杆塔周围微地形等因素的影响,同样的覆冰条件下,“V”型串的覆冰闪络电压要比悬垂串高20%以上。

4)重冰区线路可以考虑瓷绝缘子间插式的布置,玻璃绝缘子间插式的布置,以及瓷和玻璃绝缘子组合间插式的布置来改善绝缘子串的防冰闪络特性。

参考文献:

- [1] 李庆峰,范 峥,吴 穹,等.全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术,2008,32(9):33-36.
LI Qing-feng, FAN Zheng, WU Qiong, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
- [2] 张文亮,于永清,宿志一,等.湖南电网2008年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术,2008,32(8):1-5.
ZHANG Wen-liang, YU Yong-qing, ZHU Zhi-yi. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-5.
- [3] 蒋兴良,易 辉.输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [4] 苑吉河,蒋兴良,孙才新,等.冰柱直流放电特性及路径[J]. 中国电机工程学报,2008,28(6):20-24.
YUAN Ji-he, JIANG Xin-liang, SUN Cai-xin, et al. DC discharge performance and path of ice column[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 20-24.
- [5] 杨 庆,司马文霞,孙才新,等.覆冰绝缘子交直流场路闪络模型的研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(6):13-19.
YANG Qing, SIMA Wen-xia, SUN Cai-xin, et al. Research on DC and AC flashover field-circuit model of ice-covered HV insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 13-19.
- [6] 蒋兴良,卢 杰,苑吉河,等.输电线路绝缘子串防冰闪措施研究[J]. 电网技术,2008,32(14):19-24.
JIANG Xing-liang, LU Jie, YUAN Ji-he, et al. Study on measures to prevent icing flashover of insulation strings[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 19-24.
- [7] 程登峰,蒋兴良,郭守贤,等.不同型式绝缘子的直流覆冰闪络特性[J]. 高电压技术,2009,35(4):965-970.
CHENG Deng-feng, JIANG Xing-liang, GUO Shou-xian, et al. DC flashover performances of different types of ice-coated insulators[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 965-970.
- [8] FARZANEH M, KIERNICKI J. Flashover performance of IEEE standard insulators under ice conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1602-1613.
- [9] 常 浩,石 岩,殷威杨,等.交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术,2008,32(5):1-6.
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Wei-yang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [10] 苑吉河,蒋兴良,易 辉,等.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2003,30(1):6-9.
YUAN Ji-he, JIANG Xing-liang, YI Hui, et al. The present

- study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 30(1): 6-9.
- [11] 黄道春, 刘云鹏, 胡 毅, 等. 超高压交流线路长串绝缘子冰闪特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 568-573.
HUANG Dao-chun, LIU Yun-peng, HU Yi, et al. Icing flashover characteristics of EHV AC transmission line insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 568-573.
- [12] 盛道伟, 蒋兴良, 苑吉河, 等. 覆冰 XP-160 型绝缘子串的操作冲击闪络特性[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 95-98.
SHENG Dao-wei, JIANG Xing-liang, YUAN Ji-he, et al. Flashover performance of ice-covered XP-160 type insulator string under switching impulse[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 95-98.
- [13] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 低气压下特高压直流污秽复合绝缘子闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 7-12.
ZHANG Zhi-jin, JIANG Xing-liang, SUN Cai-xin, et al. Icing flashover performance of UHV DC composite insulators at low atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 7-12.
- [14] 丁京玲, 党镇平, 王婷婷. 棒形悬式复合绝缘子伞形结构对覆冰闪络特性的影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 10-13.
DING Jing-ling, DANG Zhen-ping, WANG Ting-ting. The affect of rod suspension composite insulator shed profile structure on iced flashover characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(1): 10-13.
- [15] 程登峰, 蒋兴良. 不同形式绝缘子串覆冰直流闪络特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2009(4): 5-8.
CHENG Deng-feng, JIANG Xing-liang. Study on DC flashover performances of different types string insulators of ice-coated[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(4): 5-8.
- [16] 吴高林, 王 谦, 白云庆. 高压输电线路绝缘子“挂灯笼”现象分析及防范措施探讨[J]. 电瓷避雷器, 2009(4): 14-17.
WU Gao-lin, WANG Qian, BAI Yun-qing. Analysis and preventive measures against the “Lantern lighting” on high voltage transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(4): 14-17.
- [17] 胡 琴, 付 涛, 向俊杰, 等. 棒形悬式复合绝缘子覆冰操作冲击特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2008(3): 6-9.
HU Qing, FU Tao, XIANG Jun-jie, et al. Study on switching flashover performance of iced composite rod insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(3): 6-9.
- [18] 陈继东, 张 予. 华中电网覆冰监测系统典型实例分析[J]. 电瓷避雷器, 2008(5): 8-10.
CHEN Ji-dong, ZHANG Yu. Typical case analysis of icing load on-line monitoring system of central china power grid [J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(5): 8-10.
- [19] 蒋兴良, 王 波, 张志劲, 等. 串长及布置方式对高海拔覆冰绝缘子串直流冰闪电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 1-5.
JIANG Xing-liang, WANG Bo, ZHANG Zhi-jin, et al. Influence of length and arrangement of iced insulator strings on DC flashover voltage at high altitude districts [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 1-5.
- [20] 蒋兴良, 卢 杰, 杜 袁, 等. 间插布置的交流绝缘子串的交流冰闪特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 12-16.
JIANG Xing-liang, LU Jie, DU Yuan, et al. AC flashover performance of iced insulators string structured with alternately large and small diameter sheds[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 12-16.
- [21] 李 鹏, 范建斌, 宿志一, 等. 750 kV 交流输电线路覆冰区绝缘设计[J]. 电力建设, 2007, 8(3): 24-27.
LI Peng, FAN Jian-bin, SU Zhi-yi, et al. Insulation design in icing areas for 750 kV transmission lines[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 24-27.

何 钢(1982—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事高电压绝缘技术研究。

文习山(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事电力系统防雷与接地、绝缘检测、纳米新技术、电网防灾减灾等研究工作。

简 讯

水电设备和水利工程将迎来业绩爆发

“积极发展水电, 提高新能源和可再生能源比重。”国务院总理温家宝 3 月 5 日在十一届全国人大五次会议作政府工作报告时再次为今年水电装机前景定调。

能源局 1 月明确今年新开工水电规模达到 2 000 万 kW, 同比增长约 57%; 央行等七部委日前发布《关于进一步做好水利改革发展金融服务的意见》也明确, 要通过注资、补助及重组增加水电站等方式支持水利融资平台整改和融资。受益于水电投资加大, 水电设备和水利工程将迎来业绩爆发。