

电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述

许树楷, 赵杰

(南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

Review of Ice Storm Cases impacted seriously on Power Systems and De-icing Technology

XU Shu-kai, ZHAO Jie

(CSG Technology Research Center, Guangzhou, Guangdong 510623, China)

Abstract: The worldwide ice storm cases impacted seriously on power transmission systems are presented. Furthermore, with a review of literatures related to anti-icing/de-icing technology for power grids, an integrated scheme for responding ice storm is proposed with three aspects. Firstly, to build up a monitoring system for the important transmission lines that can activate for risk analysis of damage and thus can enhance the anti-icing capability of power grids. Secondly, to upgrade the design standard of transmission lines in the potential heavy ice region, and to employ various measures for different areas, such as classic anti-icing/de-icing methods reviewed in this paper, or novel technology being developed for this purpose. Finally, to set up a decision support system to help effectually make the resource in conformity to restore the grid for quick power supply when serious ice storm befalls.

Key words: ice storm; power grid; anti-icing; de-icing

摘要: 介绍了近年来世界范围主要冰灾案例。综述有关电网应对冰灾影响的文献资料, 认为开展电网冰灾综合防治体系, 主要包括以下3个层面: 一是在覆冰严重的重要线路推广使用覆冰监测预警系统, 分析电网安全风险, 提高电网防冰抗冰的灾害预防能力。二是适当提高潜在的重冰地区输电线路的设计标准, 针对不同的区域, 除应用成熟的“过

电流融冰”和“直流电流融冰法”等方法外, 开展基于新技术、新材料的抗冰防冰措施研究, 因地制宜采用抗冰融冰技术。三是建立完善的电网恢复决策支持系统, 当输电系统遭遇冰灾时, 能有效地整合资源, 修复电网, 迅速地恢复电力供应。

关键词: 冰灾; 电网; 抗冰; 融冰

冰灾对电力传输的危害在于, 电网系统覆冰严重时断线、倒杆塔, 导致大面积停电事故, 且事故发生在严冬季节, 大雪封山, 公路结冻, 难于抢修, 造成长时间停电。因此, 冰雪、冻雨是许多国家电网系统所面临的严重威胁之一。自20世纪40年代以来, 冰灾的威胁是半个多世纪来电力系统工业界与学术界一直竭力应对的一大技术难题。

为了抗击冰害对电网系统的影响, 各国除了在线路设计阶段已经针对不同地区气象条件的差异, 制定相关的设计规范和导则之外, 还投入了很大的力量研究线路在冰灾条件下的抗冰融冰技术。为了掌握已有的研究成果, 本文在全面收集有关技术文献资料的基础上, 整理了近年来世界范围电网系统主要冰灾案例, 对现有电网系统抗冰融冰技术和应用情况进行深入的讨论和分析, 展望了电网系统抗冰融冰技术的发展方向。

1 近年来世界范围主要冰灾案例

1.1 2008年中国南方电网的冰灾

2008年年初, 受北方南下强冷空气和西南暖湿

气流共同影响,南方区域的贵州、广西、广东、云南等省遭遇历史上罕见的雪凝灾害性天气,电力基础设施遭到大面积的严重破坏,据统计,截至2月27日,低温雨雪冰冻灾害造成南方电网10 kV及以上线路7 541条被迫停运,35 kV及以上变电站859座被迫停运,10 kV及以上线路倒杆倒塌及损坏126 247基。

1.2 1998年美加冰灾^[1]

从1998年1月5日0时开始,美国东北部和加拿大东南部冻雨的气象条件持续了6天,降水量惊人。从Ontario东南部和纽约北部到魁北克的西南部,冻雨量累计超过80 mm。冰灾对加拿大和美国都造成了巨大的经济损失。加拿大的Ontario东南部和魁北克南部省份的受灾情况最为严重,造成了28人死亡,超过100人紧急送院治疗。由于覆冰严重,大量输电线路铁塔、树木等倒塌,电力供应中断,交通堵塞,通讯异常。大约60万人撤离家园,10万人需要到临时收容站避寒。风暴给电网带来了严重的影响,造成了范围广阔的电力中断。

据统计,Hydro-Quebec的电力网络超过3 000 km受到冰灾影响,造成1 000座高压输电杆塔、30 000座配电杆塔倒塌,4 000台变压器需要修复。Hydro-Quebec和Ontario Hydro电网系统的维修费用为10亿(加拿大元)。美国在大范围和持续的电力中断下,20条主要输电线路、13 000座电线杆、1 000台高压设备和5 000台变压器需要更换,费用高达1 750万美元。

美加冰灾造成470万加拿大人和50万美国人遭受停电影响,其中40万户居民停电超过两个星期,电网系统的修复直到10月份才完成。据估算^[2],冰灾给美加造成的经济损失折合到2008年1月约为35亿美元。

1.3 其他主要冰灾案例^[2]

瑞典1921年10月的冰灾带来了严重的积冰现象,考虑到现时的电网规模,据专家推测当时的低温、大雨和强风天气如在现在发生,必定会给电网系统带来严重的灾害,估计冰灾将造成瑞典20%~50%的杆塔倒塌^[2]。

美国1972年1月,冰灾袭击哥伦比亚州,造成两条500 kV线路严重损毁,线路覆冰达到9 mm。

法国1999年12月,3天的风暴严重破坏了输电网络,造成38条主要输电线路停运,5 GW电力

不能送出,超过350万户居民停电。

瑞典南部2005年1月遭受严重暴风雪灾害,风速达到46 m/s。电网系统、电话通讯以及铁路公路等长时间停运。65万人得不到电力供应,电网修复时间长达7周。

德国2005年11月的冰雪灾害造成超过70条输电线路倒塌,20万人停电。

2 抗冰融冰技术

为应对越来越频繁的冰灾对电力系统基础设施的严重威胁,电力工业界与学术界发展了多种抗冰和除冰/融冰技术,并对电网系统在冰灾后的恢复重建进行了研究,可以总结为电网系统冰灾的综合防治体系,具体可分为以下3个层面。

2.1 电网系统的冰灾监测和预警

输电线路在设计阶段就已针对冰区制定了相关标准^[7],出于经济因素方面的考虑,设计标准不能无限制地提高。在极端恶劣天气条件影响下,线路和杆塔覆冰载荷可能大大超过了原来的设计标准,给输电系统带来安全风险。

文献[8]介绍了一种评估冰灾对电网系统带来风险的方法,并以此开发了标准的风险评估模型,已在加拿大British Columbia输电公司使用。模型把输电系统覆冰数据作为输入,应用故障树技术,评估系统风险,计算结果给出杆塔和线路倒塌的估计情况。模型还可以评估加强网络不同部分后,系统风险情况的变化以及投资效益。

文献[9-11]从气象条件出发研究恶劣冰灾的天气模型,实现风速、降水量等功能,以及线路覆冰模型。该方法通过选择不同的天气参数,利用Monte Carlo方法计算不同天气条件下,具体输电杆塔和线路所受影响,评估整个电网的可靠性。然而,由于气象条件复杂多变,天气模型的准确性和实用性还需要进一步的检验。

在重冰区电网上安装测量仪器对线路覆冰进行监测是简单有效的一种方法。1998年以后加拿大魁北克建立了冰灾监测系统^[12],某些地方安装了覆冰测量仪(Load cells),能够直接测量线路覆冰情况,而有些地方仅安装了冰率表(ice rate meter, IRM)。研究人员希望通过积累的大量数据,从统计方法入手,开发架空线路覆冰情况评估的数字模型,模型可以只通过收集气象数据和冰率表信号,就能计算

导线覆冰量, 以替代线路直接安装传感器的测量方法^[13,14], 节约投资。

2.2 输电线路融冰技术

当严重的冰灾持续来袭时, 输电线路覆冰在所难免。研究人员已经开发了多种融冰技术, 部分技术已进入实用阶段, 有些技术要应用到电网系统中还有一定的困难, 如电脉冲除冰法由于无法找到合适的激励源, 难以除去足够长度线路上的覆冰^[22]。

目前电网系统除冰的基本思路有三大类^[3]:

——将电能转化为热能融冰;

——将电能转化为机械能以破坏输电线上的覆冰的物理结构, 达到使覆冰脱落的目的;

——直接破坏物理结构的机械法除冰, 例如, 在线路上安装遥控除冰机^[4,5]。

通过电能转化为热能的融冰技术, 需要针对覆冰导线计算融冰电流的大小和作用时间, 在这方面已经有了成熟的覆冰导线融冰计算数学模型^[23]。

(1) 过电流融冰法。

此种方法在不停线路/母线、系统正常运行下增加覆冰线路电流, 增大线路发热, 以实现保线融冰的目的, 又可分为如下几类:

——通过调度改变潮流分布。主要依靠科学调度, 提前改变电网潮流分配, 使线路电流达到临界电流以上防止导线覆冰。1998年美加冰灾后, 魁北克水电研究中心设计了一套针对120~315 kV的融冰策略^[15], 通过开发的仿真软件模拟线路覆冰情况, 通过调整线路电流仿真融冰效果。仿真工具能够测试不同网络结构下线路的融冰情况, 挑选出最优的线路融冰顺序, 降低网络覆冰, 通过最优控制达到线路覆冰最小化的效果。

该融冰策略能够在实际操作中指导运行人员的调度安排, 可以称得上是潮流融冰的辅助决策系统, 并能够为具体实施融冰方案提供准备。但是正常运行方式下通过调度转移潮流存在诸多不便, 可能会引起系统不稳定; 潮流转移的程度也有限, 对大面积冰灾来袭时显得是杯水车薪。

值得一提的是, 随着输电网络 FACTS 设备的大量应用, 电网在潮流控制方面更加灵活有效, 通过改变潮流分布的融冰方法能够在应对冰灾方面发挥更大的作用。

——基于移相器的带负荷融冰法, 即 ONDI (on-load network de-icer)^[27-29] 法。带负荷融冰的方

法最早在1990年提出, 并在此后得到了发展。此方法利用移相变压器角度的变化改变平行双回线的潮流分布, 通过增加其中一回线的电流来增加线路发热, 达到融冰的目的, 其原理如图1所示。

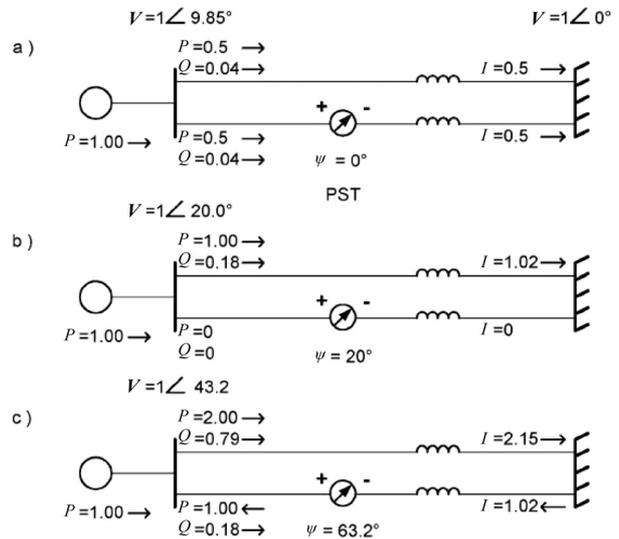


图1 移相变压器控制线路融冰电流示意图^[28]

Fig. 1 Illustration of AC De-icing with a Phase-Shifting Transformer^[28]

ONDI 融冰方法需要在线路安装移相变压器, 操作过程中增加了系统无功转移量, 会对系统安全稳定造成影响。采用带负荷融冰方式, 加拿大科学家设计了针对 Matapédia 电网的融冰方案, 总共覆盖超过 900 km 的 230 kV 和 315 kV 线路, 目前还未进入实施阶段。

对于多分裂导线, 可以通过把线路电流集中在某一分裂导线上, 增大发热量而融冰, 通过各分裂导线间的切换, 使线路覆冰完全融化^[26]。这种方法的使用要求线路分裂导线间相互绝缘, 需要对线路进行大范围改造。

——交流短路融冰法。人为的将两相或者三项导线短路, 形成短路电流(控制在导线最大允许电流范围之内)加热导线来达到融冰的目的。这种方法在国内外都达到了实用化的阶段, 1993年加拿大 Manitoba 水电局开始采用的短路电流融冰^[3], 俄罗斯巴什基尔电网也大量应用了短路融冰技术^[30]。

由于 500 kV 线路多采用大截面及多分裂导线, 需要的融冰电流很大, 4×300 型号最小融冰电流约 2 500 A, 4×400 型号约为 3 000 A。

从表1结果看出^[31], 35 kV 与 110 kV 做融冰电

源, 500 kV 线路中的短路电流不能达到最小融冰电流; 220 kV 做融冰电源, 短路电流可以达到融冰需要的电流, 但线路长度必须在一定距离之内。例如 4×400 的导线, 长度不能超过 150 km, 并且系统提供无功容量超过 1 GVA, 可能存在系统无法满足要求的问题。对于 500 kV 做融冰电源, 短路电流可以达到融冰所需要的电流, 但无功容量更大 (2 GVA 以上), 还必须考虑系统能否保持稳定运行。因此, 对于 500 kV 或更高电压等级输电线路来说, 由于难以找到满足要求的融冰电源, 采用交流短路融冰方案是不可行的。

表 1 500 kV 线路交流短路融冰估算结果

Tab 1 Calculation Result of AC Short-Circuit De-icing Method for 500kV Transmission Lines

| 融冰电源系统 | 500 kV 线路不同长度融冰时的短路电流及容量 | | | | | |
|--------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 100 km | | 150 km | | 200 km | |
| | 短路 电流/A | 容量 /MVA | 短路 电流/A | 容量 /MVA | 短路 电流/A | 容量 /MVA |
| 35 | 722 | 44 | 481 | 29 | 361 | 22 |
| 110 | 2 268 | 432 | 1 512 | 288 | 1 134 | 216 |
| 220 | 4 536 | 1 729 | 3 024 | 1 152 | 2 268 | 864 |
| 500 | 10 310 | 8 929 | 6 873 | 5 953 | 5 155 | 4 465 |

注: 计算时忽略系统内阻抗。

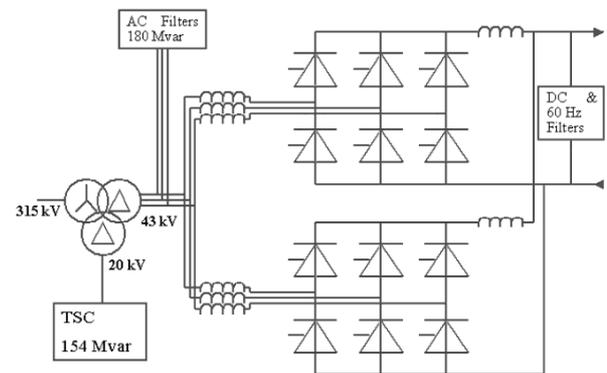
(2) 利用直流电流加热线路融冰。

1998 年的北美冰风暴灾难后, 加拿大魁北克水电公司考虑了各种线路融冰措施。通过加强网架的办法带来的投资巨大, 而交流短路融冰不能解决 200 km 范围的线路覆冰问题^[16,18]。所以, 最终选择了与 AREVA 公司合作, 投入 2 500 万欧元开发了一套高压直流融冰装置, 并于 2006 年 11 月装设于魁北克 Lévis 变电站。

如图 2 所示, 直流融冰装置的核心为换流阀, 额定容量 250 MW, 融冰时直流侧电压等级为 ± 17.4 kV, 通过在覆冰线路上流过可控的直流电流实现不同长度和不同导线的有效融冰。对于典型的 735 kV 线路 4 分裂 1354 MCM 导线, 融冰电流为 7 200 A, 在气温 -10 °C、风速 10 km/h 条件下, 通电 30 min 可以融化半径 12 mm 的线路覆冰。融冰装置覆盖 4 条 735 kV 单回线路和 1 条 315 kV 双回线路, 其中 735 kV 线路最长为 242 km。该装置在非融冰期以 SVC 方式运行, 输出无功容量从 +250 Mvar 至 -125 Mvar, 起到稳定电压的作用^[17,18]。

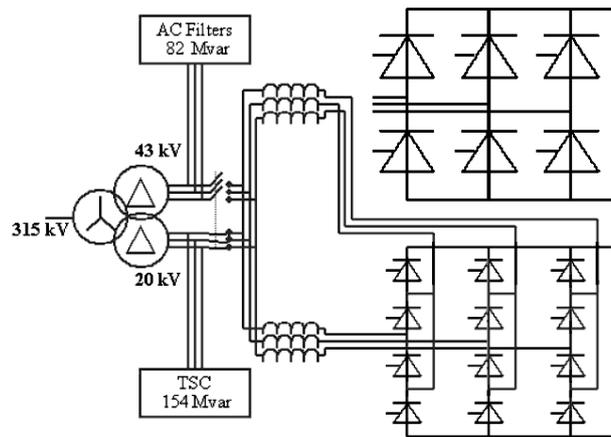
(3) 高频高压激励融冰法。

20 世纪末 Charles R Sullivan 等提出了用 8~200 kHz 高频激励融冰的方法^[19-21], 机理是高频时冰是一种有损耗电介质, 能直接引起发热, 且集肤效应导致电流只在导体表面很浅范围内流通, 造成电阻损耗发热。文章推荐较好的除冰频率范围是 20~150 kHz, 但由于有高频电磁波干扰, 在很多国家受限制。不过, 当电网发生大面积停电事故时, 融冰可能比电磁干扰重要。另外, 可以选择不在管制范围内的较低频率, 如 8 kHz, 但此时介质损耗和集肤效应很难取得平衡, 需要通过采取移动电源激励点而使驻波移动的方法来改善。



(a) 融冰装置主电路

(a) Circuit in De-icer Mode



(b) 装置 TCR 运行模式主电路

(b) Converter Used as TCR

图 2 加拿大魁北克投运的直流融冰装置结构图^[18]
Fig. 2 Configuration of DC De-icer in Hydro-Québec Canada

覆冰较薄线路的电晕放电会削弱高频波的传播,阻止功率到达和有效的融解覆冰较厚区域的冰,可以考虑通过调制电压波形或增加频率解决该问题。目前,采用该方法研制的融冰装置在实验室对1 m长线路进行的融冰试验效果显著,然而还不足以作为成熟的技术大范围推广应用。

(4) 架空线路电磁力除冰。

该方法由加拿大魁北克水电公司提出,其原理是在线路额定电压下短路,短路电流产生的电磁力使导线相互撞击,使覆冰脱落^[24,25]。这种方法的应用会给系统带来稳定性问题,线路压降也比较大。加拿大魁北克水电研究所(Hydro-Quebec's Research Institute, IREQ)高压试验室试验结果表明,315 kV输电线路可以在冰灾紧急情况下使用,而735 kV线路由于引起的稳定性问题过于严重,不推荐使用。

从国外目前技术水平来看,“过电流融冰”和“直流电流融冰法”是最为成熟可行的两种融冰手段。与“改变潮流分布融冰”和“带负荷融冰法”相比,使用“交流短路融冰法”和“直流电流融冰法”需要把线路调整到停运状态,损失了部分输电能力,但能够彻底融解线路覆冰,保证电网安全运行。

2.3 冰灾后电网系统的恢复

上述提到的融冰措施在解决输电线路覆冰问题上发挥了一定的作用,然而由于极端气象条件发生的频度加快程度加剧,冰灾不可避免会对电网系统造成破坏。所以,研究电网系统遭受破坏后的重建方案和措施是电网冰灾综合防治体系不可分割的一部分。

文献[34]中介绍了美国研究人员在紧急、短期和长期三个阶段对抢修地点和相关资源的安排策略计算模型。

瑞典研究人员采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法计算输电线路受损段落的修复时间,将在后续工作中进一步考虑极端天气条件下输电线路损坏顺序、修复程序和电网恢复时间^[33]。

ABB研究人员开发了针对电网系统的灾害停电管理系统(outage management system, OMS),该管理系统在灾害发生时,通过收集用户停电报告、线路保护动作数据、电网破坏评估报告等资料,分析抢修人员配置、费用、电网损坏、修复时间等因素之间的关系,提供给指挥人员作为决策支持,起到合理配置资源和高效完成抢修任务的作用^[32]。

3 抗冰融冰技术的发展方向

为了最大程度降低冰灾对电网的影响,有必要建立全面、系统的电网抗冰救灾应急机制和方案。

文献[35]从已有6次飓风和8次冰灾数据出发,建立美国东部电网的加速失效时间模型,预测灾害来临时可能的停电区域和持续时间,通过累计停电开始时间和持续时间,估算电网修复时间。这种方法已在美国东部的3家电力公司(Dominion、Duke和Progress)中使用,2004年该系统在应对冰灾过程中发挥了令人满意的作用。开发人员希望通过进一步收集相关数据和改进模型,使研究成果在电网灾害防治中发挥更大的作用。

从各国应对冰灾的情况看,电网系统冰灾的防治不能一概而论,对于不同的地理位置、气象条件和不同的网架结构,输电线路遭受冰灾的具体情况各有特点^[36],必需因地制宜制定综合防治体系。

4 结论

从世界范围来看,遭受冰雪灾害严重的地区在应对冰灾危害时,并不采用单一的措施,而是从监测预警、融冰和灾后重建等方面,建立全面、系统的电网冰灾综合防治体系,最大限度降低损失。开展电网冰灾综合防治体系,主要包括以下3个层面。

(1)在覆冰严重的重要线路推广使用覆冰监测预警系统,分析电网安全风险,提高电网防冰抗冰的灾害预防能力。利用监测预警系统协助指导抗冰融冰等技术手段的实施,提前做好抗冰融冰应急预案,应对冰灾发生。

(2)适当提高重冰区输电线路的设计标准,进一步深入研究输电线路抗冰融冰技术。除推广应用成熟的“过电流融冰”和“直流电流融冰法”等方法外,开展基于新技术、新材料的抗冰防冰措施研究,因地制宜采用抗冰融冰技术。

(3)建立完善的电网恢复决策支持系统,当输电系统发生断线、倒塔和停电事故时,能整合资源,高效有序地开展抢修工作,迅速恢复电力供应。

参考文献:

- [1] The 1998 ice storm: 10-year retrospective. RMS special report[R/OL]. http://www.rms.com/Publications/1998_Ice_Storm_Retrospective.pdf, 2008-01.
- [2] Ice storm modelling in transmission system reliability calculation[OL].

- http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-4409-2_fulltext.pdf, 2005-08-22.
- [3] LAFORTE J L, ALLAIRE M A, LAFLAMME J. State-of-the-art on power line de-icing. Atmospheric Research, 1998, 46:143-158.
- [4] Serge Montambault, Jacques Côté, Michel St-Louis. Preliminary results on the development of a teleoperated compact trolley for live-line working[C]// IEEE ESMO 2000 conference, 2000:21-27.
- [5] Serge Montambault, Nicloas Pouliot. The HQ lineROVer: contributing to innovation in transmission line maintenance[J]. IEEE 10th international conference on transmission and distribution construction, operation and live-line maintenance, 2003.
- [6] LIU P, PETERS J F. Risk analysis for high-voltage transmission line de-icing system[C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1999, Edmonton: Alta, Canada, 1999, 3: 1248-1252.
- [7] KRISHNASAMY S G, TABATABAI M. Probabilistic analysis of weather related loads on overhead transmission lines in Ontario, Canada[C]. Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, London: UK, July 3-5, 1991.
- [8] TOM B, GUTWIN P. Application of BCTC standardized risk estimation model to assess risk due to ice storms[C]. 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, Canada. September 12-16, 2004.
- [9] Broström E, SODER L. Ice storm impact on power system reliability[C]. IWAIS XII, Yokohama, October 2007.
- [10] BROSTROM E., SODER L. Modelling of ice storms for power transmission reliability calculations[C]. 15th Power Systems Computation Conference, PSCC2005, Liege Belgium, 22-26 August 2005.
- [11] BROSTROM E, AHLBERG J, SODER L. Modelling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C]. PowerTech, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [12] Masoud Farzaneh, Konstantin Savadjiev. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE transactions on power delivery, 2005, 20(2):1080-1087.
- [13] Magnar Ervik, Svein M. Fikke. Development of a mathematical model to estimate ice loading on transmission lines by use of general climatological data[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1982 PAS-101(6):1497-1503.
- [14] YU Chun-sheng, PENG Qing-jin, Randy Wachal, WANG Pei. An image-based 3D acquisition of ice accretions on power transmission lines[C]. IEEE CCECE/CCGEI, Ottawa, May 2006.
- [15] Maurice Huneault, Christian Langheit, Robert St-Arnaud, Jimmy Benny, Jacques Audet, Jean-Claude Richard. A dynamic programming methodology to develop de-icing strategies during ice storms by channeling load currents in transmission networks[J]. IEEE transactions on power delivery, 2005, 20(2):1604-1610.
- [16] Déry A, Gingras J P. Hydro-Québec de-icing projects. Presented at the 11th Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures[C]. Montreal, Canada, June 2005.
- [17] Granger M, Dutil A, Nantel A. Performance aspects of Levis substation de-icing project using DC technology[C]. Presented at the 11th Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Montreal, Canada, June 2005.
- [18] Horwill C, Davidson C C, Granger M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines. Transmission and Distribution Conference and Exhibition[c]. 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.
- [19] Petrenko V F., Sullivan C R. Methods and systems for removing ice from surfaces[J]. U.S. patent application PCT/US99/28330, 1999.
- [20] McCurdy J D, Sullivan C R, Petrenko V F. Using dielectric losses to de-ice power transmission lines with 100kHz high-voltage excitation[C]// IEEE industry applications society annu. Meeting, 2001:2515-2519.
- [21] Charles. Sullivan, Victor F. Petrenko, Joshua D. Mccurdy, Valeri Kozliouk. Breaking the ice[C]. IEEE 2003.
- [22] Robert I. Egbert, Robert L. Schrag, Walter D. Bernhart, et al. An investigation of power line de-icing by electro-impulse methods[J]. IEEE transactions on power delivery, 1989, 4(3): 1855-1861.
- [23] Maurice Huneault, Christian Langheit, Josée Carson. Combined models for glaze ice accretion and de-icing of current-carrying electrical conductors[C]// IEEE transactions on power delivery, 2005, 20(2):1611-1616.
- [24] Manuzio C. An investigation of the forces on bundle conductor spacers under fault conditions[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1967, 86(2): 166-184.
- [25] Michel Landry, Roger Beauchemin, André Venne. De-icing EHV overhead transmission lines using electromagnetic forces generated by moderate short-circuit currents[C]. Proceedings of IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-line Maintenance. 2000:94-100.
- [26] CORBETT F M.. EHV Line Sleet Melting[C]. IEEE CCECE, CCGEI, Montréal: May, 2003.
- [27] Kalinin L P, Soldatov V A. The application of phase-shifting transformers to the power line ice melting[C]. Presented at the Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 1990.
- [28] Brochu J, Cloutier R, Bergeron A. On-load network de-icer for HV transmission lines[C]. Presented at the Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2005.
- [29] René Cloutier, André Bergeron, Jacques Brochu. On-load network de-icer specification for a large transmission network[C]. IEEE transactions on power delivery, 2007, 22(3):1947-1955.
- [30] 亚历山德罗夫 B H, 阿莫萨夫 B A., 戈卢勃科夫 И Е, 等. 巴什基尔电网防治覆冰研究[J]. 电力安全技术, 1999, 1(1):14-16.
- [31] 南方电网融冰技术及应用研究[Z]. 贵阳: 中国南方电网有限责任公司, 2007.
- [32] David Lubkeman, Danny E. Julian. Large scale storm outage management[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, Raleigh, NC, USA, 6-10 June 2004(1):16-22.
- [33] Broström E, Söder L. On transmission restoration evaluation after ice storms using monte carlo techniques[C]. CRIS, Third International Conference on Critical infrastructures, Alexandria, VA, September 2006.
- [34] YAO Ming-jong, K. Jo Min. Repair-unit location models for power failures[J]. IEEE transactions on engineering management, 1998, 45(1):57-65.
- [35] LIU Hai-bin, Rachel A. Davidson, Tatiyana V. Apanasovich. Statistical forecasting of electric power restoration times in hurricanes and ice storms[J]. IEEE transactions on power systems, 2007, 22(4): 2270-2279.
- [36] Koval D O, SHEN Bin, Chowdhury S. Modeling severe weather related high voltage transmission line forced outages[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.

收稿日期: 2008-03-18

作者简介:

许树楷(1978-),男,工程师,博士,主要从事柔性输电技术方面的研究(E-mail: xusk@csg.cn)。

赵杰(1961-),男,教授级高工,工学博士,国际大电网组织(CIGRE)中国国家委员会副主席,主要从事电网技术研究及管理。

(本文责任编辑 张亚拉)