

DOI: 10.7667/PSPC201780

某垃圾焚烧发电项目电气系统安全性评价

王书明

(金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 为了评价垃圾焚烧发电项目电气系统安全性, 分析了变压器、配电装置、电缆、继电保护装置、直流系统等电气系统主要组成部分的危险有害因素。运用安全检查表法排查出电气系统存在6处安全隐患。运用事故树分析法分析了触电事故形成因素, 并提出阻止故障发生的有效路径。运用作业条件危险性分析法对电气系统作业安全性进行了评价。提出防止触电、保证供配电安全、防止电气误操作等三方面的安全对策措施。采取针对性安全技术措施, 垃圾焚烧发电项目电气系统是安全可靠的。

关键词: 垃圾发电; 电气系统; 安全评价; 安全检查表; 事故树

Safety evaluation of electrical system for a waste incineration power generation project

WANG Shuming

(College of Architecture Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In order to evaluate the safety of the electrical system of garbage incineration power generation project, the dangerous and harmful factors of the main components of the electrical system such as transformer, distribution device, cable, relay protection device and DC system are analyzed. There are 6 safety hidden troubles in the electric system by using the method of safety check table. By using the fault tree analysis method, the factors causing the electric shock accidents are analyzed and the effective paths of preventing fault are put forward. The operational safety of the electrical system is evaluated through the risk analysis method of the operation condition. The security measures are taken from three aspects, such as preventing electric shock, ensuring power supply and distribution safety, preventing electrical misoperation and so on. Taking the specific safety technical measures, the electric system of MSW incineration power generation project is safe and reliable.

This work is supported by Jiangsu Education Science "13th Five-Year" Project Planning (No. D/2016/01/91).

Key words: garbage power generation; electrical system; safety assessment; safety checklist; fault tree

0 引言

随着社会经济的发展和城镇人口的大幅增长, 以及城镇化进程的加快, 城镇生活垃圾的迅速增长。垃圾焚烧发电成为垃圾处理的一种重要方式^[1]。截至2016年底, 我国建成运行垃圾焚烧的发电项目有273个, 并网装机容量548.8万kW, 年发电量292.8亿kWh, 年上网电量236.2亿kWh, 年利用小时数5862h, 年处理垃圾量10456万吨, 约占年垃圾产生量的40%^[2-5]。焚烧发电这一处理方法可以使垃圾体积大幅度缩减, 减少垃圾填埋占用土地面积^[6]。

“十三五”期间, 我国将进一步建设城镇生活垃圾

焚烧发电项目。但是一些已建垃圾发电项目运行不规范, 污染物处理不过关, 生产安全事故时有发生, 这使群众产生了恐惧心理, 对拟建垃圾发电项目出现了明显的“邻避效应”。其主要原因是: 群众不了解对垃圾焚烧发电技术及相关的污染物处理技术; 地方政府没有发挥主体责任, 监管不到位; 项目公开的透明度不够; 社会稳定风险评估存在一定的问题。解决垃圾发电“邻避效应”, 除了加强舆论引导, 宣传垃圾焚烧发电的科学知识之外, 关键在于企业是否能够采用先进垃圾发电技术及污染物处理技术, 做好相关安全生产与环保工作。

电气系统是垃圾焚烧发电项目的重要组成部分。它连接贯穿垃圾储存系统、垃圾焚烧炉系统、余热锅炉系统、汽轮机系统、热控系统、公辅配套

设施等。电气系统安全性对整个项目的安全运行影响较大，有必要开展相应安全评价工作^[7]。

1 项目概况

本项目是通过焚烧收集的城镇生活垃圾，利用产生的热能进行发电。项目实施有助于实现垃圾处理的“减量化、无害化、资源化”。项目一期工程包

括：2×400 t/d 生活垃圾焚烧炉+1×12 MW 凝汽式汽轮机组及其配套的辅助装置。工艺流程包括垃圾进料系统、热力系统、烟气处理系统、污水(包括垃圾渗滤液预处理)处理系统、炉渣系统、水工系统、电气系统、热控系统及人员办公、生活设施等。项目选址于城乡结合部，厂址周围交通顺畅，便于垃圾、灰、渣的运输。项目工艺流程如图 1 所示。

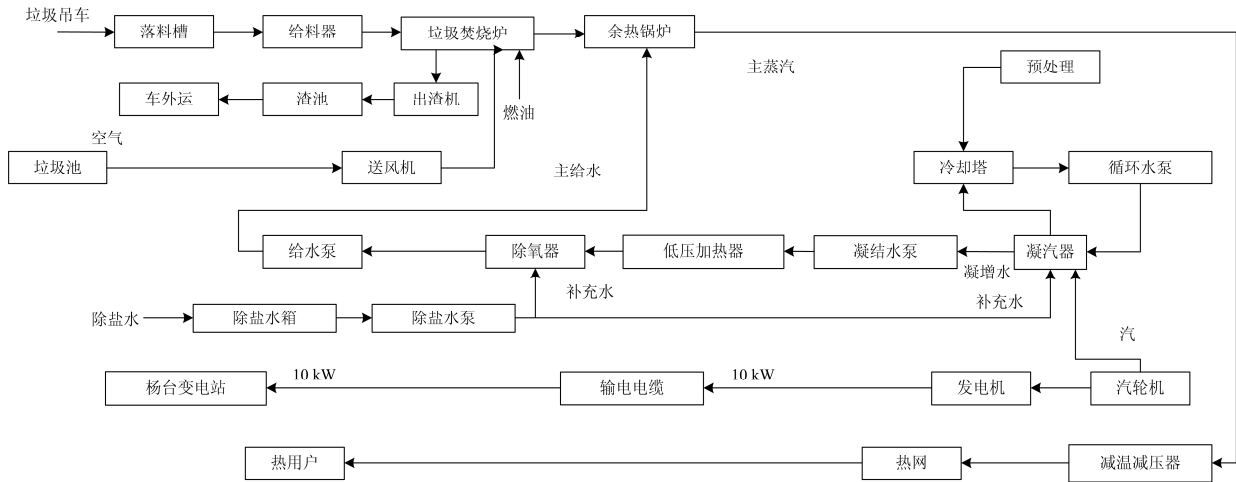


图 1 某垃圾焚烧发电项目工艺流程

Fig. 1 Process flow of a waste incineration power generation project

2 电气系统危险有害因素分析

2.1 变压器危险因素分析

变压器结构存在火灾事故的潜在隐患。主要危险因素有：1) 绕组绝缘老化或变质造成短路；2) 过电压可能击穿变压器；3) 由于制造或维护不佳造成套管闪络；4) 当变压器分接开关接触不良等形成的裸金属局部过热时，会使绝缘油分解，产生氢气(H₂)和烃类(甲烷 CH₄、乙烷 C₂H₆、乙烯 C₃H₄、丙烯 C₃H₆等)易燃气体。

2.2 配电装置危险因素分析

配电装置主要危险因素有：1) 开关柜不符合“五防”要求；2) 断路器切断容量不够或开关分断时间过长等原因不能切断电弧；3) 操作不当、操作电源故障、熔断器熔断或辅助接点接触不良，引起断路器失灵；4) 厂用电配电系统存在短路、接地等危险因素；5) 空气湿度大，绝缘子表面污垢吸潮，使表面电阻大大降低，放电电压下降，可能引起局部放电，造成污闪事故；6) 带负荷拉闸、误操作引起短路等，可能导致电弧烧伤。

2.3 电缆危险因素分析

电缆遍布电厂各处，其主要危险因素有：1) 电

缆的绝缘材料、填充物和覆盖层材料具有可燃性；2) 电缆的相间距离小，酸、碱、盐、水及其他腐蚀性气体或液体都可使其绝缘强度降低，绝缘层易被击穿产生电弧，使绝缘层和填料着火；3) 电缆工作温度较高，绝缘材料老化加快；4) 电缆被外部机械损伤引起电缆短路事故；5) 电缆发生过载、局部过热、电火花或电弧等故障时，产生过多热量会引发电缆火灾；电缆发生着火故障同时，会产生有毒气体，对在场人员造成威胁；6) 运行维护欠缺，电缆维护、检查、定期测温、定期预防性试验及消除缺陷、反事故措施不到位等。

2.4 继电保护装置及直流系统缺陷危险性分析

继电保护装置是保证电网安全稳定运行的重要设施。若继电保护装置存在设计缺陷、质量缺陷、定值不准确、调试不规范、维护不当及人为的误操作等问题均可能导致继电器失灵，将有可能导致重大设备损坏、全场停电或电网瓦解等重大事故。

直流系统为垃圾发电厂厂区控制、信号、保护、自动重合闸操作、事故照明、二次回路的仪表、自动化装置的控制等用电装置的直流供电电源。若直流系统出现混线、接地等问题不能正常运行，可能

导致场用控制、信号、保护、自动重合闸操作、事故照明、二次回路的仪表等设施不能正常工作，可能引起严重的意外事故。在直流系统、继电保护装置上的工作安全措施不落实还可能发生人身触电事故。

3 电气系统安全性评价

根据该项目电气系统主要组成部分危险有害因素分析，采用安全检查表法等评价方法对电气系统中危险有害因素进行评价。

表 1 电气系统安全检查不合格的条项

Table 1 Unqualified items for electrical system safety inspection

序号	评价项目	检查依据	检查方法	检查情况	结果
一、变配电装置					
1	闭锁装置的维修责任制是否明确，维修状况是否良好。	《防止电气误操作装置管理规定》第十九条		企业未制定防误操作装置的相关规定。	不符合
2	发电厂和变电所控制室内应备有防毒面具，防毒面具要按规定使用并定期进行试验，使其经常处于良好状态。	《电业安全工作规程(发电厂和变电所电气部分)》DL408-91 第 13.6 条		控制室内未配备防毒面具。	不符合
二、电缆及电缆用构筑物					
1	在通向控制室、继电保护室电缆夹层的竖井或墙洞及盘柜底部开孔处应采用电缆防火堵料、填料或防火包等材料封堵，其耐火极限不应小于 1h。	《火力发电厂变电所设计防火规范》GB50229-1996 第 5.7.1 条		部分电缆孔洞重新穿放电缆后未能及时恢复封堵。	不符合
2	电缆两端应悬挂标明电缆编号、信号、始点、终点的名称标志牌	《火力发电企业生产安全设施配置标准》第 5.5.1.1 条	查看资料及现场	部分电缆两端未悬挂标明电缆编号、信号、始点、终点的名称标志牌	不符合
3	电缆夹层入口应配置“必须佩戴安全帽”，“未经许可，严禁入内”指令标志牌，“防火重点部位”文字牌。夹层内应悬挂适当数量的“当心碰头”文字标志牌。	《火力发电企业生产安全设施配置标准》第 5.15.3.1 条、第 5.15.3.4 条、第 5.15.3.6 条		电缆夹层门口未按照要求设置相关警告标志牌，同时缺乏消防器材，温感信号接收装置安装不合格，内还有杂物。	不符合
三、直流系统					
1	蓄电池的通风和采暖设备是否良好，室温是否满足要求。室内的防火、防爆、防震措施是否符合规定。	《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》DL/T724-2000 第 6 条：蓄电池运行及维护		蓄电池柜内有关通风设备不符合防爆要求。	不符合

由表 1 可知，本项目的电气系统不符合项目有：1) 企业未制定防误操作装置的相关规定；2) 控制室内未配备防毒面具；3) 部分电缆孔洞重新穿放电缆后未能及时恢复封堵；4) 部分电缆两端未悬挂标明电缆编号、信号、始点、终点的名称标志牌；5) 电缆夹层门口未按照要求设置相关警告标志牌，同时缺乏消防器材，温感信号接收装置安装不合格，内有杂物；6) 蓄电池柜内有关通风设备不符合防爆要求。

3.1 安全检查表法

依据《火力发电厂劳动安全和工业卫生设计规程》(DL5053-1996)、《小型火力发电厂设计规范》(GB 50049-94)、《防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》(国电发(2000) 589 号)及《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》(DL/T724-2000)、《继电保护和自动装置技术规程》(DL400-199)等规范、技术资料的要求，采用安全检查表法^[8]对本项目电气系统单元进行检查评价，检查不合格的条项如表 1 所示。

3.2 事故树分析法

电气系统点多面广，很容易导致触电事故^[9-10]。本文运用事故树分析法对其进行定量分析。图 2 为触电事故树，事故树中各代码含义见表 2。

1) 最小割集

事故树结构函数为

$$T = A_1 \cdot A_2 = (B_1 + B_2)(X_{10} + X_{11} + X_{12}) = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9) \times (X_{10} + X_{11} + X_{12}) \quad (1)$$

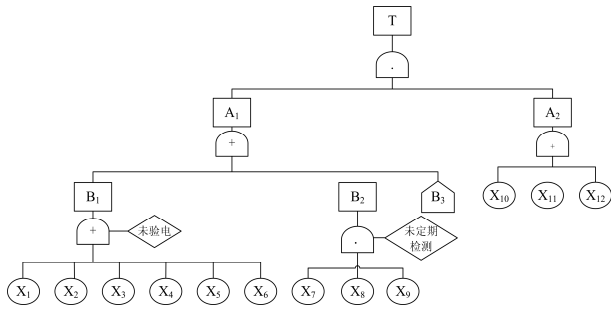


图 2 电厂人员触电事故树
Fig. 2 Power plant personnel electric shock accident tree

表 2 图 2 中代码含义
Table 2 Figure 2 code meaning

代码	含义	代码	含义
T	电厂人员触电事故	X ₄	断电后放电不充分
A ₁	人员触及带电体	X ₅	工具绝缘失效
A ₂	防护措施失效	X ₆	捡漏保护失效
B ₁	触及设备带电部分	X ₇	绝缘体受潮
B ₂	绝缘体失效	X ₈	绝缘体老化
B ₃	正常带电作业	X ₉	绝缘体损坏
X ₁	违章带电作业	X ₁₀	防护用具不符合要求
X ₂	作业中误送电	X ₁₁	接地不合格
X ₃	相地短路	X ₁₂	无防护措施

由式(1)可得 27 组最小割集。

2) 最小径集

成功树结构函数为

$$T' = A_1' + A_2' = X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' \cdot X_4' \cdot X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' + X_{10}' \cdot X_{11}' \cdot X_{12}' \quad (2)$$

可得到 4 组最小径集，如式(3)、式(4)所示。

$$P_1 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9\} \quad (3)$$

$$P_2 = \{X_{10}, X_{11}, X_{12}\} \quad (4)$$

3) 结果分析

从上述分析可知，该触电事故树有 27 组最小割集，说明发生事故的途径比较多，从而顶上事件发生的可能性比较大。

在触电事故树中，最小径集有 2 个，则控制该事故发生的根本途径有 2 条，即从隔绝设备带电和采取防范措施等两个方面防范触电事故的发生。

3.3 作业条件危险性分析法

作业条件危险性分析法是由 K.J.Graham 和 G.F.Kinney 提出来的，认为影响作业条件危险性的主要因素有：L(事故发生的可能性)、E(人员处于危险环境的频繁程度)和 C(一旦发生事故可能造成的后果)。L、E、C 的取值范围及 D(危险性)的评分标准可参考文献[11]。由熟悉此类作业条件的专家按规定标准分别给 L、E、C 打分，并计算出 D。如表 3 所示。

表 3 电气系统作业条件危险性评价结果汇总表

Table 3 Summary of risk assessment results of electrical system operating conditions

序号	作业名称	L	E	C	D=L×E×C	危险等级
1	发电机巡查、维修	1	6	7	42	比较危险
2	高压开关柜操作、检查、维修	0.5	6	15	45	比较危险
3	低压开关柜操作、检查、维修	1	6	7	42	比较危险
4	直流蓄电池巡查、维修	1	3	3	9	稍有危险
5	主变、厂变操作、检修	3	1	15	45	比较危险
6	电气设备操作、检修	1	3	15	45	比较危险
7	变压器操作、巡查、检修	1	6	7	42	比较危险

4 电气系统安全对策措施

4.1 防触电措施

为防止人体直接、间接和跨步电压触电(电击、电伤)，应采取以下措施：1) 接零、接地保护系统，本项目低压配电系统应优先采用 TN-C-S 保护系统，电气设备外壳均应可靠接地，接地点不得少于两处；2) 漏电保护，按 GB13955-1992 的要求，在电源中性点直接接地的 TN、TT 保护系统中，并在规定的设备、场所范围内，必须安装漏电保护器和实现漏电保护器的分级保护；3) 安装剩余电流保护装置^[12-13]。剩余电流保护装置在防止设备漏电事故或人身触电事故等方面起着重要作用，已广泛应用于低压电网；4) 绝缘是指根据环境条件(潮湿、高温、有导电性粉尘、腐蚀性气体，金属占有系数大的工作环境)选用加强绝缘或双重绝缘(II 类)的电动工具、设备和导线；5) 连锁保护^[14]。设置防止误操作或误入带电间隔等造成触电事故的安全连锁保护装置。

4.2 供配电安全措施

本项目配电室应避开易燃易爆环境，因此不应设在人员密集场所。配电室的耐火等级不应低于二级，配电室应设防火门，并向外开启。配电室的窗或与室外相通的洞、孔应设置防止老鼠、蛇等小动物进入的网罩。电气线路应铺设在爆炸危险性小的环境。低压配电不准明敷绝缘线，必须采用钢管配线工程。安装过载、短路等电气保护装置和漏电保护器。

4.3 防电气误操作措施

误操作是导致事故发生的常见因素^[15-17]。考虑

本项目工艺特点,应采取以下措施:1)严格执行操作票、工作票制度,并使两票制度标准化,不允许随意修改操作票,不允许解除闭锁装置;2)结合实际制定防误闭锁装置的运行规程及检修规程,加强防误闭锁装置的运行、维护管理,确保已装设的防误闭锁装置正常运行;3)防误装置所用的电源应与继电保护控制回路所用的电源分开。防误装置应防锈蚀、不卡涩、防干扰、防异物开启,户外的防误装置还应防水、耐低温;4)断路器或隔离开关闭锁回路严禁使用重动继电器^[18],应直接用断路器或隔离开关的辅助触点;操作断路器或隔离开关时,应以现场状态为准;5)规范封装临时地线的地点,不得随意变更地点封装临时地线,户内携带型接地线的封装应将接地线的接地端子设置在明显处。

5 结论

在对垃圾焚烧发电项目电气系统危险有害因素分析基础上,运用安全评价方法进行了定性与定量评价,主要结论有:1)变配电装置、电缆及电缆用构筑物以及直流系统存在不符合相应规范、标准项目;2)运用事故树分析了触电事故,找出了主要诱因,并提出了针对措施;3)运用作业条件危险性评价了电气系统构成部分,除了直流蓄电池稍有危险,其余都比较危险。总体上评价,本项目电气系统安全可靠。

参考文献

- [1] 田爱军,李冰,韩敏,等.生活垃圾焚烧发电项目环评关注的重点[J].中国资源综合利用,2012,30(2):46-49.
TIAN Aijun, LI Bing, HAN Min, et al. The key point of EIA of domestic waste incineration power plant project[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2012, 30(2): 46-49.
- [2] 李家坤,何保定.垃圾焚烧发电存在的问题及应对措施[J].水电与新能源,2010(3):76-78.
LI Jiakun, HE Baoding. Problems and countermeasures in garbage power[J]. Hydropower and New Energy, 2010(3): 76-78.
- [3] 谭爽,胡象明.邻避运动与环境公民的培育——基于A垃圾焚烧厂反建事件的个案研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2016,16(5):52-63.
TAN Shuang, HU Xiangming. The neighboring movement and the cultivation of environmental citizens: case study on the anti-construction events of a waste incineration plant[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2016, 16(5): 52-63.
- [4] 胡秀莲,姜克隽,崔成.城市生活垃圾焚烧发电 CDM 项目案例分析[J].能源与环境,2002(7):22-27.
HU Xiulian, JIANG Kejun, CUI Cheng. Urban domestic waste incineration for electricity generation-a CDM case study[J]. Energy and Environment, 2002(7): 22-27.
- [5] 宋金波,宋丹荣,姜珊.垃圾焚烧发电 BOT 项目的风险分担研究[J].中国软科学,2010(7):71-79.
SONG Jinbo, JIANG Danrong, JIANG Shan. Study on risk allocation in BOT projects of refuse incineration power generation[J]. China Soft Science, 2010(7): 71-79.
- [6] 王亦楠.我国大城市生活垃圾焚烧发电现状及发展研究[J].宏观经济研究,2010(11):12-23.
WANG Yinan. Current situation and development of domestic waste incineration power generation in big cities of China[J]. Macroeconomic Research, 2010(11): 12-23.
- [7] 王悦,宋文华,宋相杰,等.爆炸危险环境电气系统安全评价方法研究[J].南开大学学报(自然科学版),2016,49(5):79-83.
WANG Yue, SONG Wenhua, SONG Xiangjie, et al. Study on safety evaluation method of electrical system in explosive dangerous environment[J]. Journal of Nankai University (Natural Science Edition), 2016, 49(5): 79-83.
- [8] 隋鹏程,陈宝智,隋旭.安全原理[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [9] 熊晓伟,肖先勇,左金威.触电事故特征改进近似熵检测方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):27-33.
XIONG Xiaohui, XIAO Xianyong, ZUO Jinwei. Electrical shock feature detection method based on improved approximate entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 27-33.
- [10] 金波,肖先勇,陈晶.考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J].电力系统保护与控制,2016,44(8):2-7.
JIN Bo, XIAO Xianyong, CHEN Jing. A method of risk assessment considering protection failures and dynamic equilibrium of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 2-7.
- [11] 柴建设,别凤喜,刘志敏.安全评价—技术·方法·实例[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [12] 刘永梅,盛万兴,杜松怀.一种面向剩余电流保护装置的电阻抗建模方法[J].河北工业大学学报,2017,46(8):16-23.
LIU Yongmei, SHENG Wanxing, DU Songhuai. An electric shock impedance modeling method of living organisms in low-voltage distribution network[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2017, 46(8): 16-23.
- [13] 李春兰,夏兰兰,王成斌,等.基于椭圆域分割的触电

- 电流混沌检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 70-76.
- LI Chunlan, XIA Lanlan, WANG Chengbin, et al. Study on chaos detection method of electric shock current based on elliptic domain segmentation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 70-76.
- [14] 曹志斌, 汪威, 程明锋, 等. 矿用防爆变频器多重化安全连锁保护系统设计[J]. 矿山机械, 2017, 45(6): 63-67.
- CAO Zhibin, WANG Wei, CHENG Mingfeng, et al. Design on multiple security interlock protection system for mine-used explosion-proof frequency inverter[J]. Mining Machinery, 2017, 45(6): 63-67.
- [15] 高继洋, 陈琛. 一起电气误操作事故分析及整改措施[J]. 电力安全技术, 2016, 18(4): 21-23.
- GAO Jiyang, CHEN Chen. Analysis of an accident of electrical misoperation and corrective action[J]. Power Security Technology, 2016, 18(4): 21-23.
- [16] 刘超, 黄娅, 吴娇. 南约洛坦天然气处理厂硫磺回收主风机运行故障原因分析及处理措施[J]. 化学工程与装备, 2015(4): 107-108.
- LIU Chao, HUANG Ya, WU Jiao. The cause analysis and treatment measure of operation malfunction of sulfur recovery main blower in Luotan gas treatment plant[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(4): 107-108.
- [17] 范增光, 唐学东, 胡可新. 变电运行电气误操作事故原因及防范措施[J]. 冶金丛刊, 2017(4): 226-227.
- FAN Zengguang, TANG Xuedong, HU Kexin. The cause and preventive measures of electric misoperation accident in transformer operation[J]. Engineering and Technological Research, 2017(4): 226-227.
- [18] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
- QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.

收稿日期: 2017-06-11; 修回日期: 2017-09-30

作者简介:

王书明(1968—), 男, 博士, 研究方向为安全工程与安全评价. E-mail: 1146600610@qq.com

(编辑 姜新丽)