

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.025

基于故障树理论的GIS故障分析

崔杨柳¹, 马宏忠¹, 王涛云¹, 姜宁², 李凯², 陈冰冰²,
王春宁², 许洪华²

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 江苏省电力公司南京供电公司, 南京 210008)

摘要: 目前对气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)的故障研究大多集中在故障诊断与故障识别的层面上, 缺乏对故障的系统研究。文中在分析研究大量GIS故障案例的基础上, 从机械故障与绝缘故障两方面入手建立GIS故障树, 并对GIS故障树进行定性与定量分析。通过对GIS故障树的定性分析发现制造与安装不当是引起GIS故障的主要原因, 并且绝大多数故障是可控的。而对GIS故障树的定量分析主要针对常见绝缘缺陷的重要度研究。通过对GIS故障树的分析研究, 为提高GIS可靠性, 需要提高GIS的制造与安装质量, 防止在制造与安装过程中留下故障隐患, 同时需要对GIS的运行进行科学管理。

关键词: 气体绝缘开关设备; 故障树; 定量分析; 定性分析

Fault Analysis of GIS Based on Fault Tree Theory

CUI Yangliu¹, MA Hongzhong¹, WANG Taoyun¹, JIANG Ning², LI Kai², CHEN Bingbing²,
WANG Chunling², XU Honghua²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 210008, China)

Abstract: The existing researches on the faults of gas insulated switchgear (GIS) focus mostly on fault diagnosis and identification, however, systematic researches are insufficient. In this paper, a GIS fault tree is established from two aspects of mechanical faults and insulation faults based on a lot of GIS fault cases, and the GIS fault tree is analyzed qualitatively and quantitatively. The qualitative analysis indicates that improper manufacture and installation are the main reasons of GIS faults, and most faults are controllable. The quantitative analysis focuses on the importance of insulation defects. It is concluded that to enhance the reliability of GIS, the manufacture and installation quality must be improved, and scientific management is necessary to be applied to GIS operation.

Key words: gas insulated switchgear; fault tree; qualitative analysis; quantitative analysis

0 引言

GIS具有系统性强、集成度高、占地面积小、可靠性好等特点,是电力设备制造技术进步的重要体现^[1-2]。近年来,各个电压等级的GIS在电网中的装用量快速上升,在国家电网公司系统中,2006—2009年550 kV GIS和组合电器的装用量年增长率连续3 a超过50%,特别是在750 kV电压等级以及1 000 kV特高压工程中,由于外绝缘设计、可靠性和占地等原

因,气体绝缘组合电器更是成为不二选择^[3-5]。尽管GIS拥有较高的可靠性,但随着GIS越来越广泛的应用,GIS故障也成为一个问题。根据全国电力可靠性统计,2009年GIS的可用系数为99.979%,强迫停运率低至0.057,而到2013年GIS的可用系数为99.989%,强迫停运率为0.209。从2009—2013年,GIS的可用系数不断上升,但同时GIS强迫停运率也显著上升,这就意味着GIS的故障近些年来有所增加。相比其他电气设备,GIS故障类型复杂,并且一旦GIS发生故障,其影响范围较大^[6-8]。目前,国内外对GIS的故障研究大多停留在故障现

收稿日期:2013-01-10; 修回日期:2015-02-11

基金项目:江苏省电力公司重点科技项目(J2015054)。

Project Supported by the Key Science and Technology Project of Jiangsu Province Electric Power Company(J2015054).

象层面,并未对 GIS 故障做全面细致的分析与研究,缺乏对 GIS 故障系统的认识^[9-13]。因此,为全面详细地认识 GIS 的故障情况,有必要对其故障属性及深层原因进行分析研究。文中在统计大量 GIS 故障案例的基础上,针对 GIS 的故障特点,建立较为全面的 GIS 故障树,并对故障树进行定性与定量分析,为 GIS 的设计制造及 GIS 故障诊断提供理论支撑。

1 GIS 故障概述

GIS 由断路器、隔离开关、接地开关、母线、电流互感器、电压互感器、避雷器、套管等诸多电气设备组合而成^[9],但其故障率要远低于各独立电气设备的故障率。GIS 的故障来源主要体现以下两个方面:首先,GIS 对运行环境要求较为苛刻,制造安装或是运行中的不当操作可能会导致严重的故障;其次,长期的高压环境导致材料容易劣化,这也成为许多 GIS 故障的诱因。根据国家电网《高压开关设备典型故障案例汇编》中的案例介绍,大约有 80% 的故障在制造及安装环节引入^[6-11]。从各项统计资料来看,GIS 故障大致可分为机械故障、绝缘故障、二次回路故障、本体渗漏故障、其他故障等,各故障所占比例见图 1。

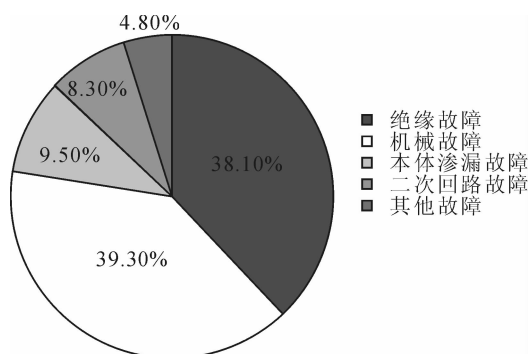


图 1 GIS 故障统计

Fig. 1 Fault statistics of GIS

从图 1 中可看出,GIS 故障以机械故障及绝缘故障为主,而绝大部分气体泄漏都由于机械故障产生,因此可将气体泄漏归类于机械故障。需要指出的是,GIS 的机械故障与绝缘故障并不存在严格界限,部分机械故障最终会诱发局部放电,如由于松动引起的接触不良可能会引起悬浮电位导致局部放电,同时部分绝缘故障也会导致机械故障,比如局部放电引起的振动会引起连接部件的松动,放电产生的高温会导致器件变形等。而目前的 GIS 故障的归类方式以故障最终的表现形式为依据。文中在只考虑 GIS 本体故障的前提下,将 GIS 故障分成机械故障与绝缘故障两大类。机械故障多发生在操动机构,非操动机构的机械故障相对较少。而绝缘故障一般由

两类原因引起:一方面,各种过电压会导致局部场强超过临界场强,从而导致局部放电的产生;另一方面,绝缘缺陷引起 GIS 内部电气强度减弱,也会诱发局部放电。GIS 的各类绝缘缺陷可归类于如下 5 类缺陷:毛刺、悬浮电位、自由微粒、附着物、固体绝缘劣化^[12-13]。根据以上分析可知从机械故障与绝缘故障两个方面建立 GIS 故障树是合理可行的。

2 建立 GIS 故障树

正确构建故障树是故障树分析法的关键,故障树的完善与否将直接影响到故障树定性分析和定量分析结果的准确性。而故障树构建过程的实质是找出所研究的系统故障和导致系统故障的诸因素之间的逻辑关系,并将这种关系用故障树的图形符号表示,形成以顶事件为根,若干个二次事件和基本事件为干枝和分枝的倒树图形^[14]。目前还没有一种有效的统一建树方法,但通常采用的是演绎法建树。该方法是先选定系统中最不希望发生的故障事件为顶端事件,其后是找出直接导致顶端事件发生的各种可能因素,再找出第一步中各因素的直接原因。循此方法逐级向下演绎,一直追溯到引起系统发生故障的全部原因。然后,把各级事件用相应的符号和适合于它们之间逻辑关系的逻辑门与顶端事件相连接,就建成了一棵以顶事件为根,中间事件为节,底事件为叶的具有若干级的倒置故障树^[14-16]。

GIS 建树流程见图 2。



图 2 GIS 故障树建树流程

Fig. 2 Building process of GIS fault tree

GIS 的故障情况与各独立电气设备的故障有相似之处但又有别于各独立电气设备,因此对各独立电气设备故障树的简单组合难以呈现 GIS 的故障特点,文中尝试从 GIS 各部件故障入手,建立部件故障子树,但由于 GIS 结构复杂,电气设备繁多,如此构建的故障树结构庞大,会形成大规模的最小割集,并存在相当数量的冗余信息,不利于 GIS 的故障分析,因此考虑到 GIS 各气室故障的共性与差异,笔者最终从故障发生的表象入手,建立 GIS 故障类型子树,层层深入,以挖掘出形成 GIS 故障的根本原因,通过文中的研究表明,如此分析可以简化 GIS 故障树,有利于分析故障原因。为便于统计本体故障,对操动机构的二次回路故障没有深入分析。而为了明晰引起故障的原因以及诱发故障的环节,文章将故障原因大致归类于生产制造、安装调试以及运行管理等方面。

根据上述建树原则及 GIS 的故障分析, 建立 GIS 故障树见图 3、4。

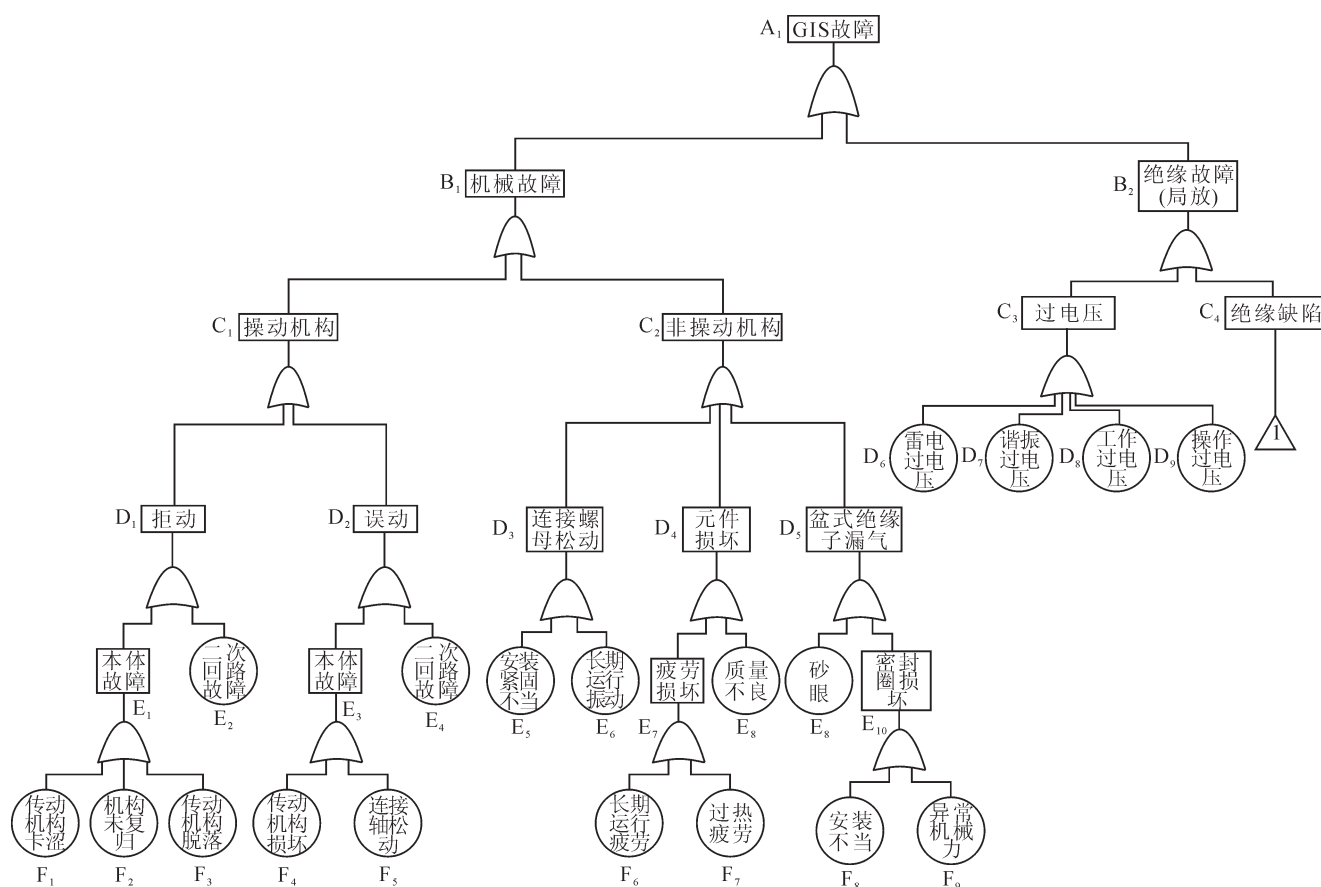


图 3 GIS 故障树

Fig. 3 Fault tree of GIS

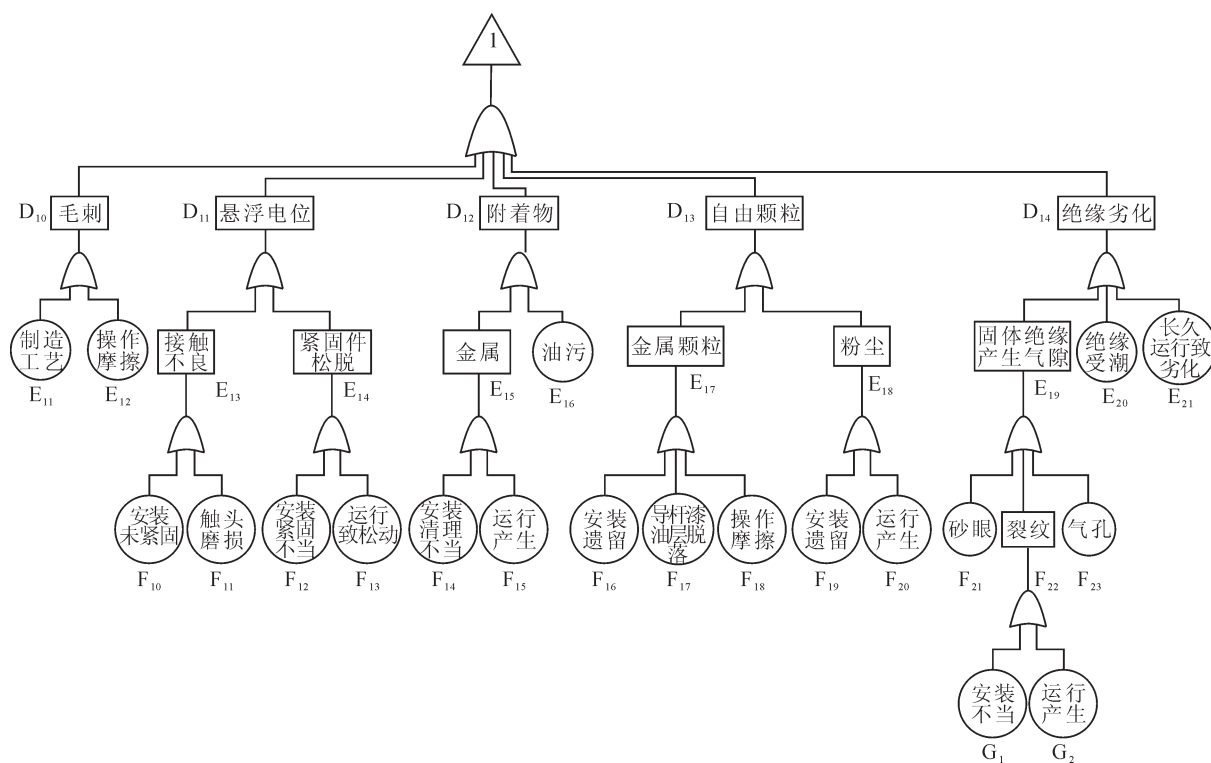


图 4 绝缘缺陷子树

Fig. 4 Sub-fault tree of insulation

3 基于故障树的定性分析

对故障树进行定性分析的主要目的是为了找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式,即弄清系统(或设备)出现某种最不希望发生的事件(故障)有多少种可能性^[17-20]。常用的定性分析方法包括割集与路集分析,结构函数分析等。其中最小割集的意义在于它描绘了处于故障状态的系统所必须要修理的基本故障,表征了系统失效的充要条件,因为只要有任何一个最小割集发生,顶事件就会发生^[21]。常见的求解最小割集的算法包括 Semanderes 算法、Fussell-Vesely 算法及 BICS 等。如果故障树有 k 个最小割集 $K=(K_1, K_2, \dots, K_k)$, 只要任一个最小割集 $K_j=(1, 2, 3, \dots, k)$ 中的全部底事件 x_i 发生时,则故障树的顶事件必然发生,故障树的结构函数可以表示为式(1)、(2)。

$$\phi(x)=\bigcup_{j=1}^k K_j(x)=\bigcup_{j=1}^k \bigcap_{i \in K_j} x_i; \quad (1)$$

$$\phi(x)=\begin{cases} 1 & \text{故障} \\ 0 & \text{正常} \end{cases} \quad (2)$$

GIS 故障树由或门构成,每一个底事件即成为一个最小割集,从而 GIS 的结构函数可表示为式(3)。

$$\phi=\max \left(\begin{array}{l} D_6, D_7, D_8, D_9, \\ E_2, E_4, E_5, E_6, \\ E_8, E_9, E_{11}, E_{12}, \\ E_{16}, E_{20}, E_{21}, \\ F_1, F_2, \dots, F_{21}, F_{23} \\ G_1, G_2 \end{array} \right) \quad (3)$$

GIS 故障树共 39 个最小割集,可以看出从故障类型出发建立 GIS 故障树能够优化最小割集的数量,有利于对故障原因的宏观把握,加快故障分析速度。

而仅仅分析 GIS 故障的最小割集缺乏对故障的直观认识,为分析统计 GIS 故障类型,对 GIS 的最小割集进行归类处理,其中由于制造、安装及运行管理原因出现的故障被认为是可控的,此类故障可以通过改进制造工艺及管理方法来降低故障率,而对环境影响及设备长久运行疲劳所致故障认为是不可控的,统计结果见表 1。

表1 最小割集分类

Table 1 Classification of minimum cut-sets

分类	最小割集数
可控故障	制造 5
	安装 9
	运行管理 5
非可控故障	20

从表 1 中可以看出,可控故障大约占到所有故障类型的 50%,在可控故障类型的根节点中以安装问题最多,而实际情况下也是在安装环节中最容易带入故障隐患。因此,需要严格管控 GIS 的安装流程,提高 GIS 的安装质量,同时需要改进 GIS 的制造工艺,提高产品质量。

4 基于故障树的定量分析

对给定的故障树,若已知其结构函数和底事件,从原则上来说,应用容斥原理中对事件和与事件积的概率计算公式,可以定量地评定故障树顶事件出现的概率。故障树的定量分析主要包括求顶事件的发生概率,概率重要度分析、结构重要度分析、关键性重要度等^[14, 21-22]。

考虑到 GIS 故障树中各底事件相互独立,从而结构重要度相等,文中应用概率重要度来衡量底事件的重要性,概率重要度是指底事件发生概率变化引起顶事件发生概率的变化程度,数学定义为 $I_g(i)=\partial g(q)/\partial q_i$, q_i 是底事件发生的概率。 $q_i=P\{x_i=1\}=E\{x_i\}$, g 是顶事件发生的概率, $g=g(q)$, $q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$, 在或门故障树的情况下,顶事件发生概率及概率重要度的计算公式见式(4)、(5)。

$$g=P_r\left(\bigcup_{i=1}^n x_i=1\right)=\sum_{i=1}^n q_i=1-\prod_{i=1}^n (1-q_i); \quad (4)$$

$$I_g(i)=\frac{\partial g(q)}{\partial q_i}=g[1_i, q]-g[0_i, q] \quad (5)$$

由于 GIS 故障中绝缘故障占有相当比例,且绝大多数是由绝缘缺陷引起的局部放电,因此文中着重分析绝缘缺陷的概率重要度。根据文[1]与文[3]提供的故障数据,由式(5)计算各绝缘缺陷的概率重要度如下: $I_g(1)=0.8850$; $I_g(2)=0.8920$; $I_g(3)=0.8997$; $I_g(4)=0.9157$; $I_g(5)=0.9100$ 。排序如下: $I_g(4)>I_g(5)>I_g(3)>I_g(2)>I_g(1)$, 绝缘缺陷按概率重要度排序依次为自由微粒、绝缘劣化、附着物、悬浮电位、毛刺。其中自由微粒与绝缘劣化最为严重,应对其进行重点防范。

5 结论

1)通过建立 GIS 故障树,明确 GIS 故障之间的逻辑关系,能够对 GIS 的故障原因做较为深入的分析研究。

2)通过对 GIS 故障树的定性分析可知, GIS 的绝大多数故障是可以控制的,其中制造质量不过关以及安装环节控制不严格是导致 GIS 故障的主要原因,因此为控制 GIS 的故障率,进一步提高 GIS 的可靠性,需要对 GIS 的制造与安装环节加以更加严格

的管控。

3)通过对 GIS 故障树的定量分析,发现在 GIS 的绝缘缺陷中以自由微粒的影响最大,绝缘劣化次之,因此为减少绝缘缺陷,需要注意 GIS 内部的自由微粒累积情况,并及时观察 GIS 的运行状态,及早发现故障隐患并处理。

参考文献:

- [1] 刘泽洪. 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)质量管理与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
LIU Zehong. Quality management and control of gas insulated switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [2] 郭贤珊. 高压开关设备生产运行实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
GUO Xianshan. Practical technology of the production run of the high-voltage switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] 国家电网公司. Q/GDW168—2008 输变电设备状态检修试验规程[S].2008.
State Grid Corporation. Q/GDW168—2008 State of the transmission and distribution equipment maintenance testing procedures[S].2008.
- [4] 左亚芳. GIS 设备运行维护及故障处理[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
ZUO Yafang. Operation maintenance and troubleshooting of GIS[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [5] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [6] 邓永辉. 高压开关设备典型故障案例汇编(2006-2010 年)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
DENG Yonghui. Compilation of typical high-voltage switchgear failure(2006-2010)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [7] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [8] DL/T 617—2010 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件[S]. 2010.
DL/T 617—2010 Specification for gas-insulated metal-enclosed switchgear[S]. 2010.
- [9] 李国伟,章涛,王俊波,等. 基于超高频法的 GIS 局部放电类型判断方法[J]. 高压电器, 2013, 49(1):63-68.
LI Guowei, ZHANG Tao, WANG Junbo, et al. Judgment of partial discharge types in GIS based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1):63-68.
- [10] 谭向宇,杨卓,赵现平,等. 基于飞行图模式的 GIS 内金属性缺陷超声信号特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(5):90-94.
TAN Xiangyu, YANG Zhuo, ZHAO Xianping, et al. Ultra-sonic signal characteristics research of metallic defects in GIS based on the flight graph mode[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5):90-94.
- [11] 唐铭华. GIS 组合电器典型故障分析及改进[D]. 广州:华南理工大学,2013.
TANG Minghua. Fault analysis and improvement of gas insulated substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [12] 李娟,李明,金子惠. GIS 设备局部放电缺陷诊断分析[J]. 高压电器, 2014, 50(10):85-90.
LI Juan, LI Ming, JIN Zihui. Some methods for diagnosis of GIS partial discharge defects[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):85-90.
- [13] 方庆,刘卫东,邓维,等. GIS 设备内部缺陷的新型超声诊断技术[J]. 高压电器, 2008, 44(6):589-591.
FANG Qing, LIU Weidong, DENG Wei, et al. A new ultra-sonic diagnosis technology for internal default of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6):589-591.
- [14] 朱继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.
ZHU Jizhou. Theory and application of fault tree[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989.
- [15] 刘世欣. 基于故障树的变电设备故障诊断专家系统[J]. 北京:华北电力大学,2006.
LIU Shixin. Fault diagnose expert system based on fault tree for transformation equipment[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [16] 周宗发,艾欣,邓慧琼,等. 基于故障树和模糊推理的电网连锁故障分析方法[J]. 电网技术, 2006, 30(8):86-91.
ZHOU Zongfa, AI Xin, DENG Huiqiong, et al. A method to analyze power system cascading failure based on fault tree and fuzzy reasoning[J]. Power System Technology, 2006, 30(8):86-91.
- [17] 杨国旺,王均华,杨淑英. 故障树分析法在大型电力变压器故障研究中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(增):367-371.
YANG Guowang, WANG Junhua, YANG Shuying. Application of fault tree analysis to large-scale power transformer faults study[J]. Power System Technology, 2006, 30(supplement):367-371.
- [18] 刘娜,高文胜,谈克雄,等. 大型电力变压器故障树的构建及分析[J]. 中国电力, 2003, 36(11):33-36.
LIU Na, GAO Wensheng, TAN Kexiong, et al. Construction and analysis of fault tree for large-scale power transformer[J]. Electric Power, 2003, 36(11):33-36.

(下转第 135 页)

- [7] 赵剑峰, 蒋平, 唐国庆, 等. 基于电压型逆变器的串联型电能质量补偿器与电力系统相互作用的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 75-79.
ZHAO Jianfeng, JIANG Ping, TANG Guoqing. Study of interaction between power system and VSI based series power quality compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 75-79.
- [8] 朱俊星, 王同勋. 一种基于飞轮储能系统的新型动态电压恢复器[J]. 机电工程, 2010, 27(2): 93-96.
ZHU Junxing, WANG Tongxun. A novel dynamic voltage restorer with flywheel energy storage system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(2): 93-96.
- [9] 张秀娟. 动态电压调节器(DVR)的设计与性能测试[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 21-23.
ZHANG Xiujuan. Main circuit design and performance tests of dynamic voltage regulator[J]. Power Electronics, 2004, 38(2): 21-23.
- [10] 张迪, 姜齐蓉, 张秀娟. 动态电压恢复器的能量稳定控制[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 14-18.
ZHANG Di, JIANG Jirong, ZHANG Xiujuan. Energy steady control for dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 14-18.
- [11] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 68-72.
FENG Xiaoming, YANG Rengang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer (DVR)[J]. Automation of Electric Systems, 2004, 28(6): 68-72.
- [12] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 级联动态电压恢复器的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.
ZHOU Xuesong, ZHANG Zhiyong, MA Youjie. Study on interline dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 78-81.
- [13] 申科. 级联型多电平动态电压恢复器直流侧电压控制方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 83-86.
SHEN Ke. DC voltage control of cascaded inverter-based dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 83-86.
- [14] 黄瀚. 配电网动态电压调节器控制策略的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 1-4.
HUANG Han. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 1-4.

刘大鹏(1982—), 男, 工程师, 研究方向为高压直流输电和柔性直流输电系统研究、电力电子电能质量控制。

苟锐锋(1959—), 男, 正高级工程师, 从事电力系统过电压与绝缘配合研究、高压直流输电研究及柔性直流输电研究等。

(上接第 129 页)

- [19] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.
ZHOU Ning, MA Jianwei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.
- [20] 谷凯凯, 郭江. 紧致融合模糊集和故障树的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1507-1513.
GU Kaikai, GUO Jiang. Transformer fault diagnosis method based on compact fusion of fuzzy set and fault tree[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1507-1513.
- [21] 江荣汉. 高压电压互感器的故障树及其分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 1990, 2(1): 102-109.
JIANG Ronghan. High voltage transformer fault tree and its analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1990, 2(1): 102-109.
- [22] 江荣汉, 陈宗穆, 屈梁材, 等. 高压电流互感器的故障树及其分析[J]. 电工技术学报, 1989(11): 45-49.
JIANG Ronghan, CHEN Zongmu, QU Liangcai, et al. High voltage current transformer fault tree and its analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1989(11): 45-49.

崔杨柳(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等。