

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.004

# 不同接地型式低压直流供电系统的 电击防护性能理论分析

雍 静, 李露露, 王晓静, 曾礼强, 徐 欣

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**节能环保的新型低压直流供电系统在民用建筑等常规领域具有巨大的应用潜能与优势,但目前尚未有完善的规范指导其在实际中的应用以保证电气安全。电击防护性能是低压供电系统电气安全的重要衡量指标,但直流电的电击效应与交流电有着本质的差异。结合国际标准 IEC60479-1,并参考已有交流系统的分析方法,基于理想直流源模型,对低压直流供电系统 TT、IT、TN 接地型式的电击防护性能进行了详细的理论分析;对比了直流 750、400、300、220 V 与交流 220 V 电压等级下,不同接地型式的电击防护性能,论证了负极接地的 TT、TN 直流供电系统的电击防护性能相较传统交流系统具有明显优势,并给出了相应的能满足安全条件的电压等级,为低压直流供电系统在民用建筑领域的推广及相关规范的制订提供了参考依据。

**关键词:** 低压直流供电系统;接地故障;室颤电流;电击防护

中图分类号: TM08

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)11-021-06

## Theoretical analysis on the protection properties against electric shock of low voltage DC distribution system with different grounding types

YONG Jing, LI Lulu, WANG Xiaojing, ZENG Liqiang, XU Xin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The low voltage direct current(LVDC)distribution system has great potential and advantage to be applied to conventional areas, such as residential house, due to its characteristics of energy conservation and being eco-friendly, but there is no existing standard specifications to guide its application in practice to ensure the electrical safety of this system. The protection against electric shock is a key indicator of electric safety, but the effect of electric shocks on AC and DC are different. Refer to the international standard IEC60479-1 and analytical method in AC system, the protection against electric shock between DC 750, 400, 300, 220 V and AC 220 V systems are compared and analyzed based on ideal DC source model. It demonstrates that the negative grounded TT & TN DC distribution system has significant advantages over the traditional AC system, and the safety voltages are given, which could be a reference to develop the normative guidance for the application of LVDC in practical application.

**Key words:** low voltage direct current distribution system; grounding faults; ventricular fibrillation current; protection against electric shock

收稿日期: 2013-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207174)

作者简介: 雍静(1964-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气安全研究,(E-mail)yongjingcq@yahoo.com.cn。

自 19 世纪末特拉斯发明交流电以来,交流电就以适于长距离传输、方便转换等优势长存至今<sup>[1]</sup>。如今,随着电力电子技术的不断成熟,直流供电技术与直流电气产品克服了原先的缺点,在许多领域重新取得优势<sup>[2-4]</sup>。据相关报道,直流供电技术在变配电所的继电保护系统、通信配电系统、直流牵引系统及船舶配电系统等专业领域的应用已然成熟<sup>[5-8]</sup>,这为直流供电技术在民用建筑等常规领域的推广提供了良好的契机。

近年来,为将低压直流供电技术向民用建筑领域推广,学者们对低压直流系统的结构、负荷兼容性、电能质量、保护控制及节能评估等一系列问题展开了探索和研究<sup>[9-12]</sup>。其中,比较突出的保护问题是保障直流供电系统安全、可靠运行的前提。随着现代社会大功率电器的大量使用以及住宅用电负荷的大幅度增长,用电安全的问题愈来愈突出<sup>[13]</sup>。当前,技术先进的国家每使用大约 30 亿度电死亡 1 人,而中国每使用大约 1 亿度电死亡 1 人,与发达国家相比,全民电气安全意识和电气安全水平亟待提高。因此,直流供电系统作为一种新型的供电方式,尤其是对于民用建筑领域,其电气安全及相应的保护问题更应引起高度重视。

由系统电压等级与接地型式决定的电击防护性能是衡量系统电气安全的重要指标。目前,民用 LVDC 尚处于研究阶段,系统结构、电压等级及接地型式均未统一<sup>[14]</sup>,IEC 对直流系统标准的制订与完善也正在开展之中<sup>[15]</sup>。虽然在某些专业领域已有一些可借鉴的设计经验,但其作业场所的操作人员均通过特殊训练,并不适用于一般的民用建筑场所。同时,上述直流系统的电压等级不尽相同、接地型式也大多采用浮地制<sup>[16]</sup>,其是否适于民用供电尚需做进一步的研究。因此,笔者结合国际标准 IEC60479-1,针对目前常见的 750、400、300、220 V 的电压等级,在理想直流源模型下,分析探讨了各接地形式下的电击防护性能,并与传统的交流 220V 供电系统相对比,给出了适宜的直流电压等级及接地型式选择的建议。

## 1 电击防护与直流电的电击效应

电击防护性能是衡量低压供电系统电气安全的重要指标。电击发生时流过人体的电流,除雷电或静电等少数情况外,绝大部分情况来自于供电系统。供电系统的电击防护性能,即为 TT、TN、IT 系统在没有附加其他专门电击防护措施的情况下,对电击事故的防护能力<sup>[17]</sup>。这主要通过电击事故时,流过

人体的电流大小来衡量(即接触电流)。

当发生直流电击与交流电击时,人体产生相同生理反应的电流阈值存在着较大差异。IEC60479-1<sup>[18]</sup>给出了直流电、交流电作用于人体时产生的电击效应曲线,如图 1(图中各曲线直流用于电流通路为“纵向向上”,以下简称参考通路;交流用于电流通路为“从左手到双脚”)。各区域所代表的电击效应如表 1。

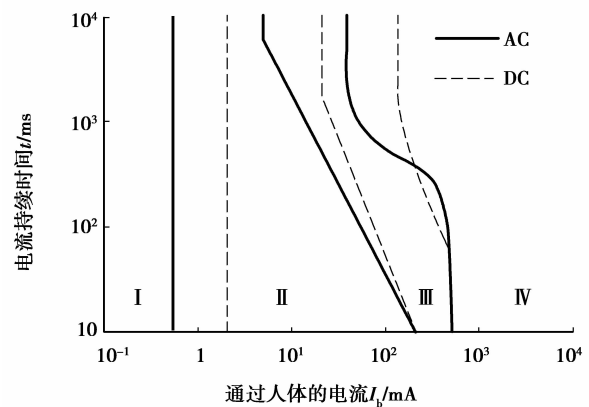


图 1 不同电流形式的时间/电流效应

表 1 各区域的生理效应

区域代号	生理效应
I	通常无反应
II	通常无有害的生理效应,但会产生轻微疼痛
III	可能发生可逆性心脏功能障碍,不自主的肌肉收缩、呼吸困难等。但不发生心室纤维性颤动。
IV	可能发生致命性损害,如心室纤维性颤动、心跳停止、严重烧伤等。心室纤维性颤动概率随电流的幅度和时间增加。

## 2 发生直流电击时的室颤电流

室颤电流是通过人体心脏可能引发心室纤维性颤动的电流。通过室颤电流与接触电流的对比即可判别系统的电击防护性能是否满足要求。与交流电不同,当发生直流电击时,室颤电流不仅与电流大小、持续时间、流通过程有关,还与电流流通的方向有关<sup>[18]</sup>。IEC 60479-1<sup>[18]</sup>中指出,直流向下流动的室颤阈约为向上流动时的两倍。综上所述,人体某一通路通过直流电时的室颤电流可用公式(1)表述,通过该公式计算的室颤电流  $I_h$  与流过参考通路的室颤电流  $I_{ref}$  具有相同的危险性,即

$$I_{\text{ref}} = F \times \frac{I_{\text{h}}}{m}, \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{h}}$  为通过人体某一通路的室颤电流;  $I_{\text{ref}}$  为通过参考通路的室颤电流;  $F$  为与  $I_{\text{h}}$  相对应通路的心脏电流系数, 见表 2;  $m$  为电流方向因子, 向下流动时为 2, 向上流动时为 1。

表 2 不同电流通路的心脏电流系数

电流通路	心脏电流系数 $F$
左手到左脚、右脚或双脚	1.00
右手到左脚、右脚或双脚	0.80
左手到右手	0.40
左脚到右脚	0.04
后背到右手	0.30
后背到左手	0.70
胸部到右手	1.30
胸部到左手	1.50

为简化分析, 仅讨论电流通路为“左手到左脚、右脚或双脚”的情况。为整定保护设备的动作时间, 笔者在文献[19]中对直流电的安全阈值曲线及安全电压进行了分析, 得出了直流电的安全阈值曲线(适用于参考通路), 如图 2 所示。同时, 考虑到在实际工程中, 接触电压更易测量, 文献将直流的安全阈值曲线与接触电阻相结合, 给出了纵向向上直流电安全电压为 120 V, 纵向向下直流电安全电压为 220 V 的限值。

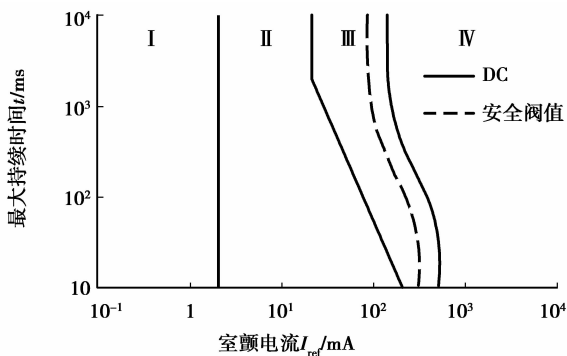


图 2 人体通过直流电时的安全阈值

### 3 各接地型式的电击防护性能理论分析

目前, 低压直流供电系统在民用建筑中的应用还处于开发研究阶段, 而各专业领域所采用的电压等级也不尽相同, 对常见的 750、400、300 及 220 V

的单级直流系统以及在民用建筑中广泛使用的单相交流 220 V 系统的电击防护性能进行对比。按照 IEC60364-1<sup>[20]</sup>, 低压直流供电系统与交流供电系统的接地型式相似, 也可分为如下 3 种: TT 系统、IT 系统、TN 系统。实际工程中, 直流源一般由电力电子装置变换而来, 但因器件自身的控制、保护系统, 故障时的输出电压不能维持, 一般均低于设定的输出电压<sup>[21]</sup>。这里假设低压直流供电系统的电源为理想直流源, 仅对其电击防护性能做最保守的定性分析。

#### 3.1 TT 系统

TT 系统即系统电源和用电设备外露导电部分各自独立接地的低压供电系统。但因直流系统的结构差异, 直流系统的电源接地点不再为系统的中性点, 而为电源的正极或负极, 如图 3、4 所示, 不同的接地极将直接影响故障发生时流过人体的电流方向, 由上节分析可知, 直流 TT 系统的正极接地、负极接地系统因碰壳接地故障而发生电击事故时, 对人体的影响应分别考虑。同时, 通过分析可知, 当发生电极碰壳接地故障时, 交流、直流系统的等效电路均为如图 5 所示(交流系统的等效电路分析参见文献[17])。

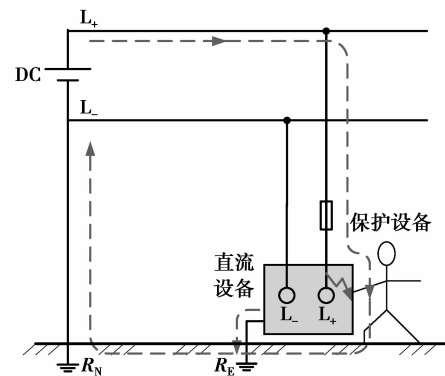


图 3 接地故障时的电流通路  
(直流 TT 负极接地系统)

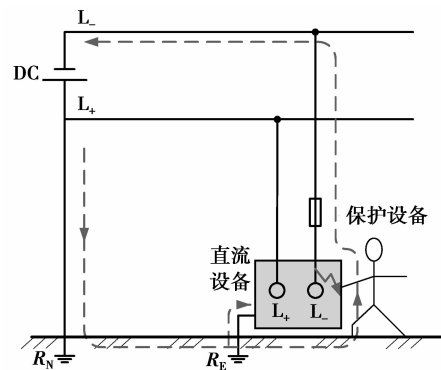


图 4 接地故障时的电流通路  
(直流 TT 正极接地系统)

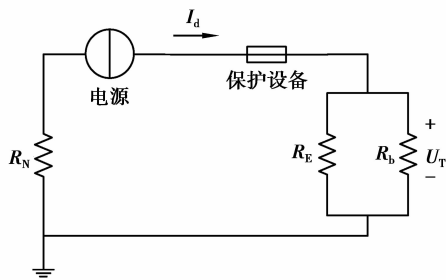


图 5 TT 系统接地故障的等效电路

由等效电路图,各系统发生接地故障时,人体的预期接触电压、接地电流可以表示为

$$U_T = \frac{R_E // R_b}{R_N + R_E // R_b} \times U_s \approx \frac{1}{1 + \frac{R_N}{R_E}} \times U_s, \quad (2)$$

$$I_d = \frac{U_s}{R_N + R_E // R_b} \approx \frac{U_s}{R_N + R_E}. \quad (3)$$

由式(2)可知,人体预期接触电压只与系统接地电阻和设备接地电阻的比值  $K$ 、系统电压有关。接地电阻一般为数欧,设接地电阻的取值范围为  $1 \sim 10 \Omega$ ,则在各电压等级下,人体预期接触电压随接地电阻比值的减小,接触电压逐渐升高。以安全电压为保证系统电击防护要求的标准,各系统接地电阻比值  $K$  的要求范围如表 3。

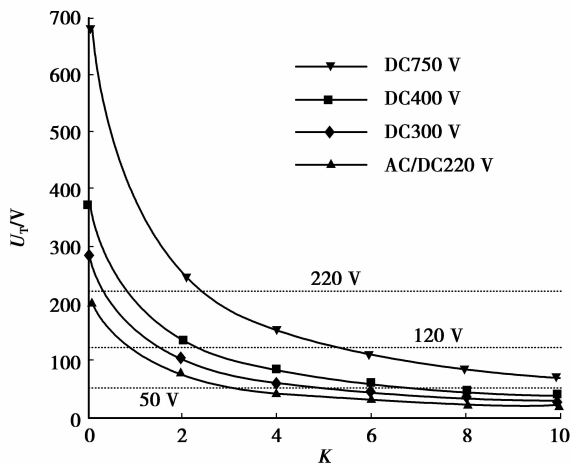


图 6 接触电压与接地电阻比值的关系

表 3 TT 系统接地电阻比值  $K$  的取值要求

电压等级	接地电阻比值 $K$	
	正极接地	负极接地
DC 750 V	$>5.25$	$>2.41$
DC 400 V	$>2.33$	$>0.82$
DC 300 V	$>1.50$	$>0.36$
DC 220 V	$>0.83$	无限制
AC 220 V	$>4.40$	

由此可见,负极接地系统的接地电阻取值范围均比正极接地系统宽裕,而传统交流 220 V 系统的接地电阻取值范围比多数电压高于 220 V 的直流系统更为苛刻,直流系统的接地电阻设计更容易满足安全电压的要求。但注意到在实际工程中,系统接地技术一般比设备接地技术更易实现,故多数情况下,接地电阻的比值  $K$  小于 1,因此,DC220 V 的正极接地系统,及 DC220、300、400 V 的负极接地系统是更适宜的选择。同时,通过式(3),可得出各系统的接地电流均在几十安至几百安范围内变化,可通过剩余电流保护装置来完成故障电路的断开,其保护设备的灵敏度、快速性要求与交流系统相同。但若直流系统采用可满足安全条件的电压等级,则该直流系统保护设备的灵敏度、快速性要求将更容易实现。

### 3.2 IT 系统

IT 系统,即电源侧不直接接地或经高阻抗接地,用电设备外壳直接接地的系统,如图 7 所示。这里以电源侧经高阻抗接地系统为例,高阻抗值一般取  $20 \sim 40 \text{ k}\Omega$ <sup>[22]</sup>。该系统发生碰壳接地故障时,电流流经高阻抗  $R$  再流过人体,此时等效电路如图 8,人体的预期接触电压、接地电流表达式如式(4)、(5)。

$$U_T = \frac{R_E // R_b}{R + R_E // R_b} \times U_s \approx \frac{1}{1 + \frac{R}{R_E}} \times U_s, \quad (4)$$

$$I_d = \frac{U_s}{R + R_E // R_b} \approx \frac{U_s}{R + R_E}. \quad (5)$$

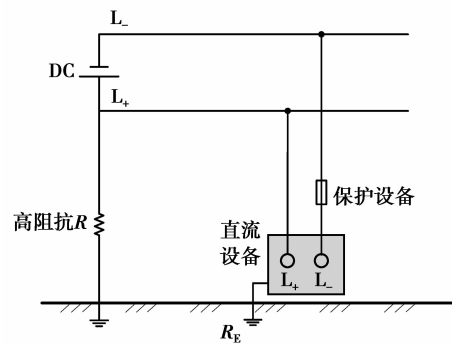


图 7 直流 IT 系统

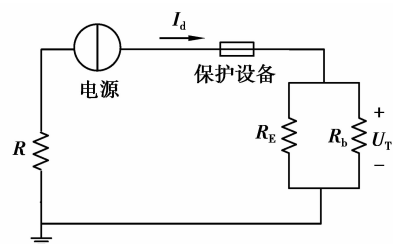


图 8 IT 系统接地故障时的等效电路

由式(4)、(5)可知,与交流系统一样,直流各电压等级的 IT 系统同样具有很高的电气安全性能(最大预期接触电压为 0.01 V),但同时也存在绝缘监测困难的问题(最大接地电流为 0.01 A)。尤其是对于电源不接地的 IT 系统,在交流系统中,漏电流可通过电缆对地分布电容回到电源侧,而直流系统的对地电容将无法通过漏电流,因此直流电源不接地的 IT 系统的绝缘监测更加困难,进一步的创新和研究还有待于继续。

### 3.3 TN 系统

TN 系统是电源侧直接接地,用电设备外壳经由电源接地线引出的保护线接地的系统,如图 9。当直流系统发生负极碰壳漏电故障时,该系统能将接地故障转化为短路故障,故障时的等效电路如图 10。

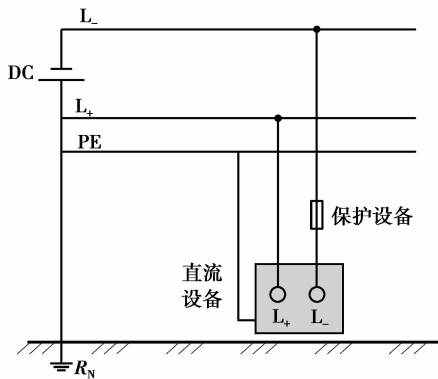


图 9 直流 TN 系统

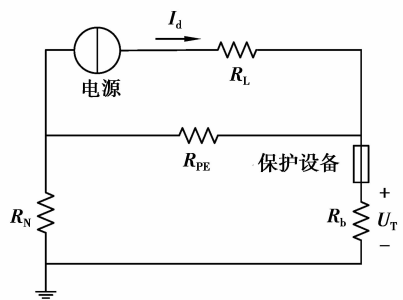


图 10 TN 系统接地故障时的等效电路

人体预期接触电压、接地电流为

$$U_T = \frac{R_{PE} // (R_N + R_b)}{R_L + R_{PE} // (R_N + R_b)} \times U_s \approx \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_{PE}}} \times U_s, \quad (6)$$

$$I_d = \frac{U_s}{R_L + R_{PE} // (R_N + R_b)} \approx \frac{U_s}{R_L + R_{PE}}. \quad (7)$$

此时,接触电压将取决于系统电压、正极(负极)、保护线的电阻比值。与交流系统一样,直流系统的保护线不起传输电能的作用,其截面一般不会

大于电极导线截面,但工程规定中也不会小于其截面的一半,按最不利情况,即保护线截面为电极导线截面的一半,电阻约为电极导线的 2 倍,则各系统对应的最大预期接触电压及电击防护性能如表 4。

表 4 TN 系统的电击防护性能

电压等级	最大接触电压	能否满足要求	
		正极接地	负极接地
DC 750 V	DC 500 V	不能	不能
DC 400 V	DC 267 V	不能	不能
DC 300 V	DC 200 V	不能	能
DC 220 V	DC 147 V	不能	能
AC 220 V	AC 147 V	不能	

可知,交流 220 V 系统不能满足安全电压的限值要求,需要立即断开电路。而直流负极接地的 220、300 V 系统均能满足安全电压的要求,比交流系统具有更高的电气安全性能。同时,因接地故障已转化为短路故障,交、直流系统故障电路的开断均可由断路器或熔断器等过流保护设备实现,而对于能保证安全电压的直流系统而言,对故障电路的开断时间要求更为宽裕。

## 4 结 论

笔者结合国际标准 IEC60479-1,对比了直流电与交流电的电击效应差异,给出了直流电室颤电流的计算公式,基于理想直流电源的假设,对各接地型式下直流 750、400、300 及 220 V 系统的电击防护性能进行了理论分析,并与传统交流 220 V 系统相对比,对比表明:相同电压等级的直流供电系统比交流供电系统更为安全,负极接地的直流 TT、TN 系统的电击防护性能相较传统交流系统优势明显。其中,对于直流 TT 系统,DC220 V 的正极接地系统,及 DC220、300、400 V 的负极接地系统更容易满足安全电压要求,是更佳的选择;对于直流 TN 系统,DC220、300 V 的负极接地系统比传统交流系统具有更高的电击防护性能。

### 参考文献:

- [1] SULZBERGE C L. Triumph of AC—from Pearl Street to Niagara[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2003, 99(3):64-67.
- [2] SALAMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage dc distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads [J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2007, 22(3):1620-1627.
- [3] 广东华南家电研究院. 直流家电技术与发展前景[J]. 家电科技, 2009(22):48-49.  
Guangdong South China Household Electric Appliances Research Institute. DC household electric appliances technology and development prospect [J]. China Appliance Technology, 2009(22):48-49.
- [4] 李永明, 黄宏佩, 张淮清, 等. 基于径向基函数法的特高压直流输电线路地面标称电场计算[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1):75-80.  
LI Yongming, HUANG Hongpei, ZHANG Huaqing, et al. Calculation of UHVDC bipolar split transmission line corona loss [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(1):75-80.
- [5] 唐治德, 张正茂, 杨红, 等. 全桥 LLC 串联谐振 X 光机高压直流电源[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3):85-91.  
TANG Zhide, ZHANG Zhengmao, YANG Hong, et al. Full bridge LLC series resonant converter for X-Ray high voltage DC power supply[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(3):85-91.
- [6] CIEZKI J G, ASHTON R W. Selection and stability issues associated with a navy shipboard dc zonal electric distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2):665-669.
- [7] 桑艳艳. 北京地铁直流牵引供电系统主接线及运行方式分析[J]. 数字技术与应用, 2010, 8:180-181.  
SANG Yanyan. Analysis on the main connection and operation of dc traction power supply system of Beijing subway[J]. Digital Technology & Application, 2010, 8:180-181.
- [8] YOKOMIZU Y, YEHIA D M, IIOKA D, et al. Formulated representation for upper limitation of deliverable power in low-voltage dc distribution system[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2011, 131(4):362-368.
- [9] KAKIGANO H, NISHINO A, MIURA Y. Distribution voltage control for dc microgrid by converters of energy storages considering the stored energy [C] // Proceedings of 2011 Energy Conversion Congress and Exposition, September 12-16, 2010, Atlanta, GA. Piscataway:IEEE Press, 2011:2851-2856.
- [10] SALAMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage dc microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1045-1053.
- [11] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12):3066-3075.
- [12] YASUNOBU Y, DOAA M Y, DAISUKE I, et al. Power consumption pattern analysis of home appliances for dc-based green smart home [J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 131(4):362-368.
- [13] 孙建军. 浅析建筑工程中电气安全技术的控制措施[J]. 电气工程与自动化, 2011(27):47-49.  
SUN Jianjun. On the control measures of electrical safety technology under construction [J]. Mechanical and Electrical Information, 2011(27):47-49.
- [14] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1):98-106.  
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for dc micro-grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1):98-106.
- [15] HOSHI H, TANAKA T, NORITAKE M, et al. Consideration of inrush current on dc distribution system [C] // Proceedings of the 34th IEEE International Telecommunications Energy Conference, September 30- October 4, 2012, Scottsdale, AZ. Piscataway:IEEE Press, 2012:1-4.
- [16] HIROSE K, TANAKA T, BABASAKI T. Grounding concept considerations and recommendations for 400vdc distribution system [C] // Proceedings of the 33rd IEEE International Telecommunications Energy Conference, October 9-13, 2011, Amsterdam, Netherlands. Piscataway:IEEE Press, 2011:1-8.
- [17] 杨岳. 电气安全[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [18] International Electrotechnical Commission. IEC 60479-1 Effects of current on human beings and livestock-Part 1:general aspects[S]. Geneva :IEC, 2005.
- [19] 李露露, 雍静. 新型低压直流供电系统的电气安全性能探讨[J]. 现代建筑电气, 2013(Sup1):75-79.  
LI Lulu, YONG Jing. On the electrical safety of a new low-voltage DC power supply system [J]. Modern Architecture Electric, 2013(Sup1):75-79.
- [20] International Electrotechnical Commission. IEC 60364-1 Low-voltage electrical installations-part 1: fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions[S]. Geneva :IEC, 2005.
- [21] YANG J, JOHN E F, JOHE O R. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3827-3837.
- [22] NORITAKE M, IINO T, FUKUI A, et al. A study of the safety of the dc 400v distribution system [C] // Proceedings of the 31st International Telecommunications Energy Conference, October 18-22, 2009, Incheon, South Korea. Piscataway:IEEE Press, 2009:1-6.