

# 特高压直流输电线路不停用再启动功能 情况下的带电作业安全性分析

彭勇<sup>1</sup>, 雷兴列<sup>1</sup>, 方玉群<sup>2</sup>, 苏梓铭<sup>1</sup>, 肖宾<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>  
(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;  
2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 在开展特高压直流线路带电作业时, 一般要求停用直流线路再启动功能, 然而过多的停用该功能会降低系统安全运行水平, 因此有必要分析在不停用直流线路再启动功能情况下开展特高压带电作业的安全性。首先分析了停用直流线路再启动功能的作用; 然后考虑在不停用该功能的情况下, 结合特高压直流输电线路最大操作过电压水平, 校核分析了带电作业安全距离; 最后结合典型直流线路带电作业项目, 分析了不停用直流线路再启动功能时进行带电作业的可行性。分析结果表明, 特高压直流线路塔头空气间隙尺寸一般均满足带电作业最小安全距离的要求。在各类带电作业操作项目中, 若极地或极间采用绝缘承力工具, 应停用直流线路再启动保护功能, 其他情况可不停用。

**关键词:** 特高压直流线路; 带电作业; 再启动功能; 安全性分析

中图分类号: TM755 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0085-5

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.016

## Safety Analysis of Live Working on UHVDC Transmission Lines with Restart Function

Peng Yong<sup>1</sup>, Lei Xinglie<sup>1</sup>, Fang Yuqun<sup>2</sup>, Su Zhiming<sup>1</sup>, Xiao Bin<sup>1</sup>, Liu Kai<sup>1</sup>

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

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

**Abstract:** Restart function is generally required to be withdrawn during live working on UHVDC transmission lines, but extra withdrawal may reduce the safety operation level of power system. Thus, safety analysis about live working on UHVDC transmission lines with restart function is necessary. Firstly, the effects of withdrawing restart function is analyzed. And then, in consideration of using restart function and according to the maximum switching overvoltage level of UHVDC transmission lines, the safety distance for live working is calculated. Finally, combined with the typical live working projects on DC transmission lines, the feasibility of live working with restart function is analyzed. The results show that tower head air gaps of UHVDC transmission lines can meet the requirement of minimum safety distance for live working. In all kinds of live working projects, restart function should be withdrawn once phase-ground or phase-phase insulated bearing tools are used, and otherwise it can be used.

**Key words:** UHVDC transmission line; live working; restart function; safety analysis

## 0 引言

根据国家电网公司电力安全工作规程(线路部分)(以下简称“安规”)及相关带电作业技术标准的要求,为确保线路带电作业工作的安全,一般要求“停用重合闸或直流线路再启动功能”<sup>[1]</sup>,其作为保

科技项目: 国家电网公司科技项目(SGZJ0000KXJS1700312)

障带电作业安全的一项重要措施,已广泛应用到实际工作中。随着中国特高压输电工程广泛投运,鉴于其重要性,带电作业作为保障线路安全可靠运行重要技术手段的地位显得更为突出<sup>[2-3]</sup>,同时更高电压等级的带电检修工作给作业人员带来新的挑战 and 更大的心理压力。开展带电作业时“停用重合闸或直流线路再启动功能”这一保障措施成为很多线路运检单位开展特高压线路带电作业的必选项。然

而,由于特高压输电线路较高压及超高压线路更长,且是重要的跨区输电通道,在带电作业工作中,若经常要求停用线路重合闸或直流线路再启动功能,则很难被电力调度部门许可。因为从输电系统安全运行的角度考虑,过多的停用重合闸或直流线路再启动功能将可能提高线路瞬时故障的跳闸率,降低输电系统的安全运行水平<sup>[4]</sup>,尤其是特高压直流输电工程还经常存在因直流控制系统原因而无法操作停用线路再启动功能的情况。因此,很多线路运检单位经常面临着由于直流线路再启动功能不能停用导致带电作业无法顺利开展的难题。

下面针对不停用直流线路再启动功能的情况,开展了特高压带电作业安全性技术分析,解读分析了开展带电作业时停用直流线路再启动功能的作用,结合特高压直流输电线路最大操作过电压水平,对带电作业安全距离进行了校核分析;并结合典型带电作业项目,从带电作业方式和使用工器具的角度具体分析了带电作业的安全性,明确了在不停用直流线路再启动功能情况下能否安全开展带电作业的具体作业项目,为特高压直流线路带电作业的安全开展提供了参考。

## 1 相关条款说明及解读

安规中带电作业部分相应条款说明如下<sup>[1]</sup>:“带电作业有下列情况之一者,应停用重合闸或直流线路再启动功能,并不准强送电,禁止约时停用或恢复重合闸及直流线路再启动功能。1) 中性点有效接地的系统中有可能引起单相接地的作业;2) 中性点非有效接地的系统中有可能引起相间短路的作业;3) 直流线路中有可能引起单极接地或极间短路的作业;4) 工作票签发人或工作负责人认为需要停用重合闸或直流线路再启动功能的作业。”许多带电作业技术标准如 DL/T 966《送电线路带电作业技术导则》、DL/T 1242《±800 kV 直流输电线路带电作业技术规范》、DL/T 881《±500 kV 直流输电线路带电作业技术导则》、DL/T 392《1000 kV 交流输电线路带电作业技术导则》中均有相关要求。

### 1.1 条文解读

带电作业时停用重合闸或直流线路再启动功能一是可减少系统产生过电压的概率,从而减小了带电作业的危险性;二是若在带电作业过程中,作业人

员发生了意外事故,该措施可防止其遭受二次伤害,以避免万一发生事故时不致扩大。实际上,该措施仅起到保障带电作业工作安全的后备作用,其起到的关键作用主要体现在当带电作业工作点发生安全事故的时候,例如作业过程中因最小安全距离不足而造成了相地之间发生放电,此时若不停用重合闸或直流线路再启动功能,则线路再次复电后,将加剧对作业人员的伤害或者造成其他后果<sup>[4]</sup>。

大量实践工作证明,该措施并不是防止带电作业事故扩大的万全措施,且过多地停用重合闸或直流线路再启动功能会降低安全运行水平,对系统安全运行不利,特别是对输送容量大、供电范围广的超特高压电力系统。因此,对待这一措施必须谨慎,应具体问题具体分析<sup>[5]</sup>。

### 1.2 停用直流线路再启动功能的作用分析

开展特高压直流输电线路带电作业时,在遇到“直流线路中可能引起单极接地或极间短路的作业”项目时,停用直流线路再启动功能主要是避免若出现带电作业事故而引起扩大性后果。下面从发生带电作业事故的角度深入分析该措施的作用。

由于带电作业过程中极地或极间起到绝缘作用的介质为空气间隙和绝缘工器具,因此有两种原因会造成带电作业事故,一是带电作业空气间隙被击穿,二是带电作业绝缘工器具发生闪络。

#### 1) 带电作业空气间隙被击穿

带电作业空气间隙被击穿通常是在线路产生操作过电压的情况下发生的,有两种原因:带电作业安全距离不足和小概率事件(即遇到了比带电作业危险率 $10^{-5}$ 还小的事件)。特高压直流线路的外绝缘水平受污秽控制,杆塔塔头间隙较大,带电作业安全距离不足的情况一般不会发生。但由于前期研究获取的带电作业最小安全距离等关键技术参数是依托特高压直流示范工程开展的,其与线路操作过电压水平直接相关。因此有必要结合不同线路的过电压水平(包括考虑不停用直流线路再启动功能时产生的操作过电压)进行校核分析<sup>[7]</sup>,进一步明确带电作业安全距离参数。而对于小概率事件,应不予考虑,因为带电作业允许小概率事件发生。

此种情况下,停用直流线路再启动功能的主要作用是避免再启动时产生的操作过电压对作业位置处带电作业空气间隙绝缘的影响,若其产生的操作过电压比引起事故的间隙击穿电压低或空气绝缘能

够耐受,则没有必要停用直流线路再启动功能。

### 2) 带电作业绝缘工器具发生闪络

若带电作业绝缘工器具在极地或极间作为主绝缘介质时发生了闪络,有两种原因:工具的有效绝缘长度不足和工具本身的绝缘性能不足。特高压带电作业绝缘工具有效绝缘长度不足的情况一般不会发生,而绝缘工器具本身的绝缘性能不足又有两种情况,即工器具本身质量问题和作业过程中气象条件变化引起的绝缘性能降低。工器具本身的质量问题可通过预防性试验予以保障,而作业过程中气象条件等变化引起的绝缘性能下降则难以规避。

此种情况下,若直流线路再启动功能未停用,由于绝缘工器具不能及时安全退出且其绝缘性能降低不可能短时恢复,甚至会进一步下降,再启动后产生的过电压乃至正常运行电压都极有可能再次造成工器具闪络,反复闪络将大大降低工器具的机械性能,进而造成事故扩大,则该情况下应停用直流线路再启动功能。

综上所述,若要进一步明确不停用直流线路再启动功能情况下开展带电作业的安全性:一是需要根据不同线路的过电压水平进一步校核带电作业安全距离,评估最小安全距离是否满足要求;二是从带电作业工器具使用的角度,需要结合具体的作业项目、工艺和使用工具的种类来分析带电作业的安全性。

## 2 不停用直流线路再启动功能下带电作业安全距离校核

### 2.1 校核依据

研究确定超/特高压输电线路带电作业安全距离的方法是:首先分析确定线路带电作业过电压水平;然后进行真型塔典型作业工况带电作业间隙放电试验,得出放电特性曲线;最后根据带电作业绝缘配合方法,结合试验结果和线路过电压水平,计算确定带电作业最小安全距离值。

#### 1) 带电作业间隙操作冲击放电特性

IEC 60071-2《Insulation Coordination Part 2 Application Guide》推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性经验式为

$$U_{50} = KU_{50RP} \quad (1)$$

$$U_{50RP} = 500d^{0.6} \quad (2)$$

式中: $U_{50}$ 为间隙的操作冲击50%放电电压; $d$ 为空气间隙距离; $K$ 为间隙系数; $U_{50RP}$ 为相应电压波形及

间隙距离下棒-板间隙操作冲击50%放电电压。研究中,可根据各带电作业间隙结构的操作冲击放电试验数据,计算求取其间隙系数 $K$ ,得出该带电作业间隙结构的操作冲击放电电压计算式及拟合曲线<sup>[8]</sup>。

#### 2) 直流线路带电作业绝缘配合

在中国现在普遍采用比试验得到的 $U_{50}$ 低 $3\sigma$ 的电压值作为带电作业间隙的耐受电压,以 $U_w$ 表示。

$$U_w = U_{50}(1 - 3\sigma) \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为带电作业间隙50%放电电压的标准偏差,一般偏严考虑取 $6\%$ <sup>[9]</sup>。

因此,当作业间隙的耐受电压不小于直流线路的最大操作过电压,即可保证带电作业间隙不会发生击穿,保证作业人员的安全。即:

$$U_w \geq A U_{max} \quad (4)$$

式中: $U_w$ 为带电作业间隙的耐受电压; $A$ 为安全系数,不小于1; $U_{max}$ 为直流线路最大操作过电压。

实际上,当线路输送容量、线路长度和设备参数不同时,线路的操作过电压水平会有较大差别<sup>[10]</sup>,因此在试验获取典型工况下带电作业间隙的放电特性的前提下,在最终确定带电作业最小安全距离时,应根据该线路的实际过电压倍数或幅值来计算分析。

### 2.2 校核分析

带电作业过程中若不停用直流线路再启动功能,则在评估带电作业安全性时,需考虑由直流输电保护系统在故障或操作发生后动作所产生的操作过电压,由于其产生的操作过电压低于单极接地故障在健全极线路上产生的操作过电压水平。因此,从严考虑,校核计算带电作业安全距离应考虑单极接地故障产生的最大操作过电压。

研究表明,当直流线路最大过电压为一极线路中点发生接地故障时,最大过电压水平出现在健全极线路中点附近<sup>[8-9]</sup>,而特高压直流线路最大操作过电压水平一般在 $1.75 \text{ p.u.}$  ( $1 \text{ p.u.} = 816 \text{ kV}$ )以下,安全系数 $A$ 按照 $1.05$ 考虑,校核计算 $\pm 800 \text{ kV}$ 特高压直流输电线路操作过电压倍数在 $1.60 \sim 1.75 \text{ p.u.}$ 之间时,带电作业最小安全距离值的范围为 $5.9 \sim 6.8 \text{ m}$ 。可见,带电作业最小安全距离等关键技术参数值与线路操作过电压倍数成正比。

安规中明确在海拔高度为 $1000 \text{ m}$ 及以下地区, $\pm 800 \text{ kV}$ 特高压直流输电线路带电作业时人身与带电体的安全距离为 $6.8 \text{ m}$ ,绝缘承力工具、绝缘绳



表1 带电作业典型项目分析

项目类型	作业项目	作业方式	关键作业工具	是否使用绝缘承力工具	可否不停用直流线路再启动功能
绝缘子类	更换直线塔 I 型、双 I 型复合绝缘子	等电位	吊篮、绝缘吊杆、导线提线器、紧线器	是	否
	更换直线杆塔单 V 型、双 V 型复合绝缘	等电位	吊篮、绝缘吊杆、导线提线器、紧线器	是	否
	更换直线杆塔双 V 型、双 L 型复合绝缘子	等电位	吊篮、横担卡、绝缘吊杆、大刀卡、紧线器	是	否
	更换耐张横担侧第 1-3 片盘形绝缘子	地电位	耐张端部卡、紧线器、闭式卡	否	可
	更换耐张导线侧第 1-3 片盘形绝缘子	等电位	导线端部卡、紧线器、闭式卡	否	可
	更换耐张绝缘子串任意单片盘形绝缘子	等电位	闭式卡、紧线器	否	可
导、地线类	修补导线	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	处理导线异物	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	修补地线	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
	处理地线异物	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
金具类	检修导线间隔棒	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	检修地线防振锤	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
	消除金具缺陷	等电位/地电位	吊篮、绝缘绳索/绝缘工具	否	可
附属设施类	安装或检修在线监测装置	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	安装或检修防鸟装置	地电位	静电防护服	否	可

表明: 在各类典型项目中, 若极地之间使用有绝缘承力工具, 如带电更换整串绝缘子项目, 因存在绝缘性能失效的可能性, 从而可能导致极地之间反复击穿闪络, 以至事故扩大。因此开展该类带电作业项目应停用直流线路再启动保护功能,

3) 其他未在极地之间使用有绝缘承力工具的作业项目, 如导地线类、金具类和附属设施类典型作业项目, 可以不停用直流线路再启动保护功能。

参考文献

[1] 电力安全工作规程(线路部分): Q/GDW 1799. 2 - 2013[S]. 2013.  
 [2] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1809-1820.  
 [3] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 带电作业技术研究与标准制定[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3015-3024.  
 [4] 带电作业基本概念[EB/OL]. http://wenku.baidu.com.  
 [5] 李如虎. 对新《安规》关于停用重合闸条款的学习与探讨[J]. 广西电力, 2014, 37(2): 56-61.  
 [6] 高压带电作业基本知识[EB/OL]. http://wenku.baidu.com.  
 [7] 刘洪正, 刘凯, 孟海磊, 等. ±660 kV 直流输电带电作业安全距离的试验研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11):

183-189.  
 [8] 王力农, 胡毅, 邵瑰玮, 等. 1000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 78-84.  
 [9] 刘洪正. ±660 kV 直流输电线路带电作业方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.  
 [10] 胡毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 1-10.  
 [11] 肖勇, 樊灵孟. 云广±800 kV 特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.  
 [12] 周沛洪, 吕金壮, 戴敏, 等. ±800 kV 特高压直流线路缓波前过电压和绝缘配合[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1509-1517.  
 [13] 周沛洪, 修木洪, 谷定燮, 等. ±800 kV 直流系统过电压保护和绝缘配合[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 125-132.  
 [14] 朱艺颖, 蒋卫平, 吴雅妮. 特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 6-9.  
 [15] 吴雅妮, 蒋卫平, 朱艺颖, 等. 特高压直流输电线路故障过电压的研究[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 6-10.

作者简介:

彭勇(1984), 硕士, 高级工程师, 主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。

(收稿日期: 2019-05-06)