

基于带电作业的配电装置安全净距优化研究

李海峰

(江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘 要: 结合带电作业技术特点, 对于由 DL 5352-2006《高压配电装置设计技术规程》所规定的配电装置安全净距进行分析, 在满足带电作业要求的基础上进行合理优化, 更好地适应变电站“资源节约”的建设要求。

关键词: 带电作业; 安全净距; 配电装置

1 变电站配电装置安全净距的设计现状

近年来, 我国正致力于建设“两型”社会, 与之对应, 国家电网公司也在工程建设中贯彻了“两型一化”的理念, 并取得了显著的经济效益和社会效益。

变电工程建设中“两型一化”实施内容很多, 涉及电气接线、总平面布置、设备选型、建筑物型式及站内主要工艺布置等方面。以总平面布置而言, 近年来国家电网公司颁布的通用设计、开展的设计竞赛中, 本着“资源节约”的出发点, 在平面优化及节省材料方面有着诸多创新亮点, 但纵观整体, 在配电装置的优化设计上尤其是配电装置的安全净距优化方面, 并没有实质性突破。

DL/T 5352-2006《高压配电装置设计技术规程》(以下简称《配电装置规程》), 目前变电站内配电装置的最小安全净距一般以金属氧化物避雷器的保护水平为基础确定, 即参照 DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(以下简称《绝缘配合》)所规定的特定概率间隙过电压放电水平下的空气距离要求确定。以户外配电装置为例, 具体如表 1 所示(以 110~500kV 为例, 基于海拔 1000m)。

表 1 屋外配电装置的最小安全净距 mm

| 符号 | 适用范围 | 系统标称电压/kV | | | |
|----|--|-----------|------|------|------|
| | | 110J | 220J | 330J | 500J |
| A1 | 1、带电部分至接地部分之间 | 900 | 1800 | 2500 | 3800 |
| | 2、网状遮栏向上延伸线距地 2.5m 处与遮栏上方带电部分之间 | | | | |
| A2 | 1、不同相的带电部分之间 2、断路器和隔离开关断口两侧引线带电部分之间 | 1000 | 2000 | 2800 | 4300 |
| B1 | 1、设备运输时, 其设备外廓至无遮栏带电部分之间 | 1650 | 2550 | 3250 | 4550 |
| | 2、交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 | | | | |
| | 3、栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 | | | | |
| | 4、带电作业时带电部分至接地部分之间 | | | | |
| B2 | 网状遮栏至带电部分之间 | 1000 | 1900 | 2600 | 3900 |
| C | 1、无遮栏裸导体至地面之间 | 3400 | 4300 | 5000 | 7500 |
| | 2、无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间 | | | | |
| D | 1、平行的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 | 2900 | 3800 | 4500 | 5800 |
| | 2、带电部分与建筑物、构筑物的边部分之间 | | | | |

一般说来, 配电装置的主要电气设计尺寸主要取决于表 1 的各安全净距要求, 对各主要电气尺寸的分析归纳如表 2。

表 2 屋外配电装置的各安全净距分析表

| 符号 | 适用范围 | 分析结果 |
|----|--|---|
| A1 | 1、带电部分至接地部分之间 | 属于基本带电距离。 220kV 及以下采用惯用法确定, 330kV 及以上采用统计法或简化统计法确定。 |
| | 2、网状遮栏向上延伸线距地 2.5m 处与遮栏上方带电部分之间 | |
| A2 | 1、不同相的带电部分之间 2、断路器和隔离开关断口两侧引线带电部分之间 | 变电站长期运行耐受电压的安全净距要求, 是其它安全净距计算的基础。 |
| B1 | 1、设备运输时, 其设备外廓至无遮栏带电部分之间 | 设备运输或摆动幅度在 750mm 以内。 |
| | 2、交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 | 为本规程改版时更新的内容, 考虑检修人员在导体上下活动范围, 暂定不大于 (A1+750) mm。 |
| | 3、栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 | 运行人员手臂误入栅栏时手臂长不大于 750mm。 |
| | 4、带电作业时带电部分至接地部分之间 | 适应目前电网开展带电作业活动, 考虑人体活动范围, 暂定 (A1+750) mm。 |
| B2 | 网状遮栏至带电部分之间 | 考虑运行人员手指误入网状遮栏时手指长及施工误差共计 (A2+70+30) mm。 |
| C | 1、无遮栏裸导体至地面之间 2、无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间 | 运行人员举手后总高度及施工误差 不超过 (A1+2300+200) mm。 |
| D | 1、平行的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 | 配电装置检修及建构筑物上人时, 检修人员和工具活动范围不超过 1800mm, 屋外条件较差, 另增加 200mm 裕度, 取值 (A1+1800+200) mm。 |
| | 2、带电部分与建筑物、构筑物的边部分之间 | |

由上表可看出, 除去变电站长期运行所需的安全净距要求外, B1 的第 2、4 条和 D 的第 1 条主要针对带电检修或带电区域周围检修的情况, 比如配电装置构架上人、测试清扫或更换耐张或悬垂绝缘子串及导线修补等工作, 一般具有短时工况的特点(连续作业时间不超过 2~3h)。按照 GB 2900.55-2002《电工术语 带电作业》, 可将该作业情况归于

带电作业范畴。因此可结合现有的带电作业技术标准中的规定来对B1及D值进行分析及必要的优化。

2 我国带电作业技术发展现状

带电作业是一门工作人员接触带电的电气设备或用操作工具、设备、装置对带电的电气设备进行作业的工程技术，涉及高电压技术和人体生理学等诸多学科，是保证电网持续供电和安全运行的重要手段。

自从1954年3.3、6.6kV的带电作业方法和专用工具试验成功以来，带电作业技术在我国已有50余年的发展，在全国已广泛应用。目前，国家电网公司已经能够在10~750kV电压等级的输、变、配电设备上开展带电作业，确保了电力系统的供电可靠性。

随着带电作业技术的不断发展，技术管理工作也相应得到完善和加强，当前我国带电作业技术标准体系已经形成，其中基础性标准包括带电作业技术领域通用内容，如带电作业技术领域中的术语、绝缘配合原则、计算方法、工具的基本技术要求、工具的设计方法以及带电作业各领域的技术导则等。另外，全国带电作业标准化技术委员会及国家电网公司等企业和部门，也通过颁布《带电作业技术标准体系及标准解读》、《国家电网公司电力安全工作规程》及《国家电网公司带电作业操作方法》等技术管理指导文件，极大加强和促进了带电作业技术的发展。

3 国内外规程规范对带电作业安全净距的要求

我国电力系统内的绝缘配合主要依据《绝缘配合》进行开展，具有相当成熟的经验，将这种绝缘配合方法推广到带电作业上属于水到渠成，需要规范的只是进行操作冲击试验时的标准偏差取值，以及带电作业危险率的阈值。这些技术内容在行业内已经得到统一和认可，具体详见DL/T 876-2004《带电作业绝缘配合导则》。其中对最小电气距离所涉及的诸如90%统计耐受电压、统计过电压 $U_{2\%}$ 以及带电作业危险率等标准参量的定义及使用均有详细论述，本文不再赘述。

对于带电作业所要求的安全距离，由最小电气安全距离与人体活动范围组成。基于各自的管理要

求和运行经验，国内外规程规范对于该安全距离都进行了规定，详见表3~表6（基于海拔1000m）。

表3 按IEEE和IEC方法安全距离计算值
(人体活动范围取0.1~0.31m)

| 额定电压 /kV | 操作过电压倍数 | | 最小安全距离/m | |
|-------------|---------|--------|----------|------|
| | 最大倍数 | 2%统计倍数 | IEEE | IEC |
| 110 | 3.0 | 2.705 | 0.99 | 0.94 |
| 220 | 3.0 | 2.705 | 1.66 | 1.71 |
| 330 | 2.44 | 2.2 | 1.98 | 2.03 |
| 500 | 2.22 | 2.0 | 3.06 | 2.99 |

表4 GB/T 19185-2008《交流线路带电作业安全距离计算方法》规定的安全距离要求
(人体活动范围取0.5m，最大不超过1m)

| 额定电压 /kV | $U_{2\%}$ 统计过电压倍数 (最大) | 最小电气安全距离 /m | 最小安全距离 /m |
|-------------|---------------------------|----------------|--------------|
| 110 | 3.5 | 1.0 | 1.5 |
| 220 | 3.0 | 1.8 | 2.3 |
| 330 | 2.7 | 2.6 | 3.1 |
| 500 | 2.0 | 3.2 | 3.7 |

表5 DL/T 5092-1999《110~500kV架空送电线路设计技术规程》规定的带电作业安全距离要求
(人体活动范围取0.3~0.5m)

| 额定电压/kV | 最小电气安全距离/m | 最小安全距离/m |
|---------|------------|----------|
| 110 | 1.0 | 1.3~1.5 |
| 220 | 1.8 | 2.1~2.3 |
| 330 | 2.2 | 2.5~2.8 |
| 500 | 3.2 | 3.5~3.7 |

表6 《国家电网公司电力安全工作规程（变电部分）》规定的等（地）电位作业人体对接地体（带电体）的安全距离

| 额定电压/kV | 110 | 220 | 330 | 500 |
|---------|-----|-----|-----|-----------|
| 距离/m | 1.0 | 1.8 | 2.2 | 3.4 (3.2) |

注：海拔500m以下时，500kV取3.2m；海拔500~1000m时，500kV取3.4m。

4 带电作业下配电装置安全净距的优化

综合表3~表6可看出，与《配电装置规程》相比，带电作业下最小安全距离（考虑人体活动范围）较小，差异随着电压等级的提高而增大。主要原因在于：

(1) 带电作业具有间歇性的作业性质、较为宽松的作业环境（作业天气良好、线路重合闸停用），使得内外过电压的出现概率显著下降，而《配电装置规程》主要适用于长期运行的要求，因此两种情况对于空气间隙放电电压概率的取值标准不同。

(2)《配电装置规程》规定人体活动范围不超过 750mm (B1 的 2、4 条情况) 或 1800mm (D 值的 1 情况), 而带电作业规定人体活动范围限制在不大于 500mm。

综上分析, 可结合带电作业的要求, 表 7 对表 1 的 B1 和 D 的适用条件进行调整, 补充 B1' 和 D' 项, 可作为今后配电装置设计优化的参考。

表 7 屋外配电装置的最小安全净距 mm

| 符号 | 适用范围 | 系统标称电压/kV | | | |
|-----|--|-----------|------|------|----------------|
| | | 110J | 220J | 330J | 500J |
| A1 | 1、带电部分至接地部分之间 2、网状遮拦向上延伸线距地 2.5m 处与遮拦上方带电部分之间 | 900 | 1800 | 2500 | 3800 |
| A2 | 1、不同相的带电部分之间 2、断路器和隔离开关断口两侧引线带电部分之间 | 1000 | 2000 | 2800 | 4300 |
| B1 | 1、设备运输时, 其设备外廓至无遮拦带电部分之间 2、栅状遮拦至绝缘体和带电部分之间 | 1650 | 2550 | 3250 | 4550 |
| B1' | 1、交叉的不同时停电检修的无遮拦带电部分之间 2、带电作业时带电部分至接地部分之间 | 1500 | 2300 | 2700 | 3900 (3700) |
| B2 | 网状遮拦至带电部分之间 | 1000 | 1900 | 2600 | 3900 |
| C | 1、无遮拦裸导体至地面之间 2、无遮拦裸导体至建筑物、构筑物顶部之间 | 3400 | 4300 | 5000 | 7500 |
| D | 带电部分与建筑物、构筑物的边部分之间 | 2900 | 3800 | 4500 | 5800 |
| D' | 平行的不同时停电检修的无遮拦带电部分之间 | 1500 | 2300 | 2700 | 3900 (3700) |

注: 500kV 的 B1' 及 D 值在海拔 500m 以下时, 取 3.7m; 海拔 500~1000m 时, 取 3.9m。

5 优化成果的应用分析及建议

(1) 表 7 中, 将一般运行人员和带电作业人员的最大活动范围加以区分, 分别为 B1 下的 750mm 和 B1' 的 500mm, 差异主要源自带电作业人员的严格管理要求, 本处仅引用 IEC 61472-2004 所定义的带电作业时人体活动距离 (ergonomic distance) 对作业人员的基本要求:

良好的训练、专业素养和技术水平;
可靠的电气保护屏障;
可控的出错率;
成熟的作业流程;
良好的生理、心理状态;

良好的作业环境;

有效的监控。

(2) 在使用表 7 时, B 及 B1' 并没有说明带电作业中人体本身的尺寸, 在带电作业技术体系中也并没有专门规定, 如需考虑, 参照《电力工程电气设计手册》人体宽度取 413mm, 建议取 500mm。

(3) 对于 D' 的规定, 应基于设备检修状态的分类考虑。

1) 设备的常规维护检修和试验。施工要求简单, 无论是否需要停电, 可全部或局部采用带电作业的管理要求, 以满足对相邻带电 (接地) 体的最小安全距离;

2) 设备的大修。一般牵涉到设备本体需解体或更换等项目, 施工复杂且时间较长, 设备停电区域要求较大 (《配电装置规程》早期规定了 1800mm 空间范围)。但考虑到大修是变电站小概率事件, 因此结合所在系统合理调整变电站调度运行方式, 可将相邻设备停电以配合大修; 如果周围确实需要带电运行, 则可按照带电作业要求结合特殊施工工具来组织施工。综上分析, D' 取值建议同 B'。

6 结束语

目前我国带电作业范围主要以线路为主, 考虑到电气设备种类繁多、检修工艺相对复杂等因素, 并没有在变电站内广泛开展, 因此带电作业技术标准与国内变电站内实际的检修及维护作业标准有部分出入, 即存在管理的不完全统一, 但随着时间推移, 必然会达到统一规范。本文以此为基础进行了探索性研究, 希望能给未来与带电作业技术标准相适应的配电装置设计标准提供一些参考。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程 (变电部分) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 易辉. 带电作业技术标准体系及标准解读 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] GB 2900.55-2002, 电工术语 带电作业 [S].
- [4] GB/T 19185-2008, 交流线路带电作业安全距离计算方法 [S].
- [5] DL/T 620-1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [6] DL/T 876-2004, 带电作业绝缘配合导则 [S].

- [7] DL/T 5352-2006, 高压配电装置设计技术规程 [S] .
- [8] IEC.BS EN 61472-2005.Live working - Minimum approach distances for a.c.systems in the voltage range 72, 5 kV to 800 kV – A method of calculation [S] .

作者简介:

李海烽 (1975-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事变电站电气设计工作, E-mail: lihaifeng@jspdi.com.cn。