

Key Technologies of Gas Active Arc Extinguishing and Lightning Protection for Transmission Lines

Jufeng Wang^{1*}, Kaihua Chen², Zongru Yang¹

¹Guangxi University, Nanning Guangxi

²China Southern Power Grid EHV Transmission Company, Guangzhou Guangdong

Email: ckh0789@163.com

Received: Jan. 2nd, 2019; accepted: Jan. 22nd, 2019; published: Jan. 29th, 2019

Abstract

On the power supply side, the disturbance caused by lightning tripping and wire breakage increases with the expansion of power system. Moreover, the increase of capacity leads to the increase of short-circuit current, the difficulty of arc-extinguishing of circuit breaker, and the distortion of transformer winding caused by large electric force. On the power demand side, the important loads such as petrochemical industry, high-speed railway, aerospace, smelting, high-precision machining and so on have increased. A large number of loads, such as computers, electronic control systems and motor groups, have replaced the simple loads of lighting, etc. The requirements of system security for lightning protection technology reach the high standard that lightning strike tripping and wire breakage are not allowed. Both the power supply side and the demand side have very high requirements for lightning protection of transmission lines, but the lightning accident rate remains high. This situation poses a great threat to the reliability and safety of the power network, so it is urgent to solve this problem. In this objective reality, the gas active interrupter principle is put forward. From two latitudes of lightning overvoltage and power frequency overcurrent, the effective control of lightning accident rate caused by large probability and multiple lightning strike is realized.

Keywords

Gas Active Interrupter, Transmission Line Lightning Protection, Solid Interrupter, Compression Interrupter

输电线路气体主动灭弧防雷关键技术

王巨丰^{1*}, 陈凯华², 杨宗儒¹

¹广西大学, 广西 南宁

*第一作者。

²中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州
Email: ckh0789@163.com

收稿日期: 2019年1月2日; 录用日期: 2019年1月22日; 发布日期: 2019年1月29日

摘要

在电力供给侧, 雷击跳闸、断线等事故带来的扰动随电网系统的扩大而增大。而且容量增大导致短路电流增大, 造成断路器灭弧难度增大、大电力造成变压器绕组变形等后果。在电力需求侧, 石油化工、高速铁路、航天航空、冶炼、高精密加工等重要负荷增多, 大量计算机、电子控制系统、电机群等负荷取代了照明等的简单负荷, 系统安全性对防雷技术的要求达到了不允许雷击跳闸、断线等的高标准程度。电力供给侧和需求侧都对输电线路防雷有极高的要求, 而雷击事故率居高不下, 这种局面对电网的可靠性安全性造成极大威胁, 解决这一问题迫在眉睫。在这种客观现实下, 气体主动灭弧原理被提出, 从雷击过电压和工频过电流两个纬度, 实现对由大概率多重雷击等原因造成的雷击事故率的有效管控。

关键词

气体主动灭弧, 输电线路雷击防护, 固相灭弧, 压缩灭弧

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 国内外防雷现状

根据国际大电网委员会“CIGRE”于2013年的最新研究表明, 80%的地面落雷过程有多重性, 对地闪络通常是由3~5次回击组成的, 平均间隔时间为60 ms。在多重雷击条件下, 传统“阻塞型”“疏导型”防雷措施将失去有效性, 以及引发如避雷器热击穿硬性短路等防雷设备自身安全性问题[1][2][3]。

据CIGRE公布的美、日等12国故障情况, 雷击事故占40%~60%。国家电网统计的2010~2015年数据显示, 330 kV以上交流输电线路中, 雷击跳闸占跳闸事故总数的39.4%~50.8%, 对于±500 kV及以上直流输电线路, 则为43.5%~64.3%。这些统计数据说明, 雷击仍是输电线路跳闸的主要原因。而且跳闸率长期没有明显改善, 一直稳定在这些数值, 说明现在的防雷措施对雷电的防护有效性并没有实质性的改变和进步, 这与多重雷击防护的缺失有很大关联[4][5][6]。

现代防雷器的任务可以总结为两点: 疏导冲击过电压, 阻断工频过电流。因此防雷器既是雷电释放的通道, 又是切断工频续流的开关。对于如今的雷害态势, 这不仅对防雷器的性能指标有要求, 更对防雷器本身的安全性、耐用性提出挑战[7]。但各类措施在原理和技术上存在缺陷, 使得当前输电网防雷现状不容乐观, 在有效性、安全性方面存在瓶颈、缺陷, 主要表现为以下几个方面:

1.1. 输电线路防雷无法解决的几个瓶颈

1.1.1. 多重雷击引发跳闸无法管控

目前关于多重雷击, 国内外仍没有明确的定义。张义军等用高速摄像观测自然闪电的资料, 结合地面电场变化观测, 分析了27次自然负地闪先导-回击发展过程的特征。结果表明: 约30%(8/27)的地闪具

有多个接地点；约 44% (12/27) 的地闪具有多次回击，其中回击次数最大值为 13，回击次数大于 10 的地闪有 4 次(如下图 1 所示)。

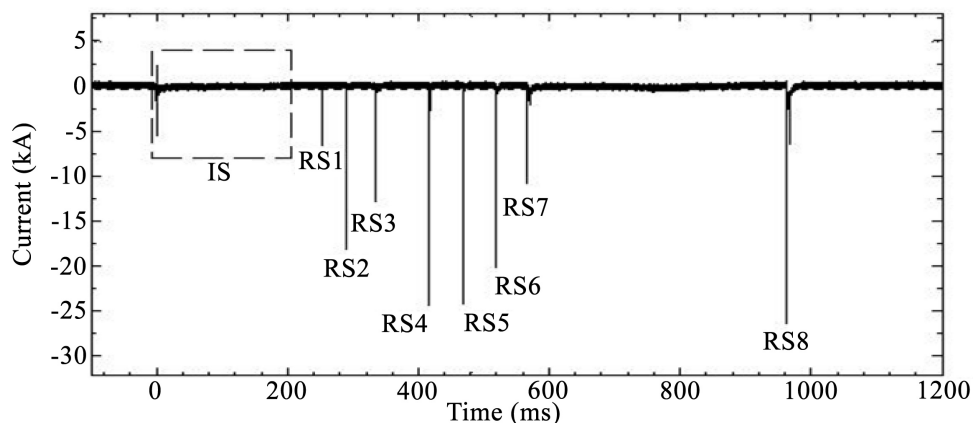


Figure 1. Multi-lightning measured waveform

图 1. 多重雷击实测波形

国标《GB/T 21714.1-2008 雷电防护》中(如图 2 所示)，也有说明一次雷闪放电过程是由首次和后续多次雷击组成。

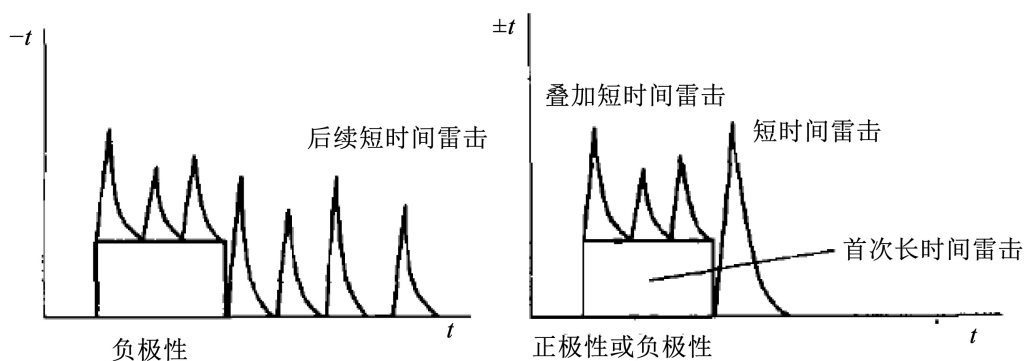


Figure 2. The waveform of multiple lightning strikes given in GB/T 21714.1-2008 Lightning Protection

图 2. 《GB/T 21714.1-2008 雷电防护》给出的多重雷击的波形

根据国内外对雷击的客观观察记录表明，多重雷击可分为：重复雷击和多次回击。重复雷击是指同一对地闪络包含多个离散的脉冲放电过程，脉冲间隔一般在 30 ms 以上，其连续脉冲次数在 2~20 次以上。多次回击是指在同一放电过程中，一次雷电脉冲中包含了多个连续脉冲的叠加，各个脉冲之间时间间隔在 50~1000 μs 左右[8] [9] [10]。

大量实验数据证明，多重雷击不仅仅是单次雷击在次数和能量上的简单叠加，还会对输配网雷击防护产生其他影响。在国外，早在上个世纪 90 年代，有专家对金属氧化物避雷器(MOA)在多重雷击下的特性进行研究。1992 年，Sargent 第一次进行 MOA 耐受叠加电流冲击的试验，并对其中现象进行初步分析[8]。随后，Darveniza 又先后进行了 2 次相关实验[9] [10]，记录下实验情况，并在文献[11]中提出，MOA 在多重雷击条件下有可能失效，主要表现为阀片侧轴与主体之间发生闪络放电。2017 年德国的 Maik Koch 发现，多重雷击脉冲下避雷器可承受最大电流峰值较单次脉冲下降 60%以上[12] [13]。

而国内，国标《GB 11032-2010 交流无间隙金属氧化物避雷器》中虽有涉及多重雷击的防护，但其

中规定的避雷器冲击电流时间间隔为 50~60 s/次, 而实际雷击情况为此值的千分之几, 导致跳闸成为大概率事件, 这也是造成目前雷击防护效果不明显的重要因素之一。多重雷击在输配网雷击防护中可能造成的影响具体有:

1) 重复建弧加大了断路器熄弧的难度和电弧重燃的可能性。

多重雷击使断路器动作断开短路电流, 触头分离的过程中, 若由于多次回击脉冲或再次遭受雷击, 间隙可能再次建弧。如文献[5]中描述的一次 500 kV 线路重合闸失败事故, 因为在断路器断开到重合闸动作的 811 ms 过程中, 发生多达 8 次的雷电回击, 造成断路器间隙多次击穿重复建弧, 电弧无法熄灭, 导致线路中存在潜供电流(工频故障电流), 重合闸失败。文献[6]中的一次 220 kV 断路器损坏事故中, 线路在 156 ms 内遭受 2 次雷击, 导致绝缘击穿, 断路器内部损坏。根据行波理论分析, 在断路器处于分闸或者正在分闸的状态时, 若线路再次遭受雷击, 在断口处雷电波发生负反射叠加, 此时过电压理论上可达原来的 2 倍, 导致过电压水平超出介质绝缘强度, 断口间隙再次被击穿电弧无法熄灭或重燃。

2) 金属氧化物避雷器(MOA)阀片的时滞效应在多重雷作用下导致残压严重超标, 其散热问题在多重雷击面前愈发明显。

金属氧化物避雷器利用 ZnO 等金属氧化物的非线性特性, 实现对雷电的疏导和工频绝缘, 但非线性电阻特性无法完全描述 MOA 的特性。文献[14]对金属氧化物在快速暂态过程中的特性研究中发现, 杂散电容对 MOA 动态特性会产生影响。对于冲击电流陡度很大, 波前时间很小的情况, 残压峰值发生在放电电流峰值之后, 造成了避雷器的响应延迟, 即时滞效应。

多重雷击的后续雷击电流的幅值虽比首次雷击电流小, 但电流上升的最大陡度却比首次雷击电流大得多, 且时间短密度高。时滞效应将导致在多重雷击条件下, MOA 无法及时随雷电流的快速上升及时降低电阻导通, 残压叠加性升高, 导致阀片击穿等, 影响 MOA 性能。

另外, 国标《GB 11032-2010 交流无间隙金属氧化物避雷器》中, 虽有涉及多重雷击的防护, 规定 MOA 的耐受冲击电流密度为 50~60 s/次, 而实际雷击情况可能为此值的千分之几, MOA 散热性受到极大考验, 导致避雷器发生爆炸、热击穿性硬短路等。这也是造成目前雷击防护效果不佳, 雷击跳闸率居高不下的重要因素之一。

3) 以单次雷电流幅值整定的耐雷水平理论值完全失效, 小于耐雷水平的雷电波在多次回击仍然会造成绝缘子闪络建弧, 耐雷水平与回击次数 n 成反比关系, 导致多重雷击条件下耐雷水平严重不足。

4) 由于电弧等离子体具有电容记忆效应, 绝缘子两端的电晕放电现象可能在多重雷击下使间隙完全击穿。

5) 雷击避雷线档距中央时, 计及长线路波阻抗, 多重雷击增大了雷击点电压峰值, 加大了档距中央气隙直接击穿、就地闪络的可能性。

1.1.2. 高土壤电阻率地区反击跳闸

根据文献[15]分析, 耐雷水平受接地电阻的影响最大(如表 1), 降低接地电阻是提高耐雷水平, 降低反击跳闸率的最有效的方法。

但接地电阻值受土壤电阻率、地网结构、接地材料形状等因素影响。目前存在的主要降阻方式有改造地网结构, 扩大地网面积, 利用降阻剂降低土壤电阻率, 局部换土等方法。然而土壤电阻率受地质地貌等自然因素的影响, 其值完全不可控, 在沿海、山区等高电阻率地区, 接地电阻最低极限值较高, 降阻措施通常远不能使接地电阻达到设计标准, 导致耐雷水平不达标。

另一方面, 在大概率的多重雷击条件下, 在绝缘子局部放电记忆和电压级联效应作用下, 线路耐雷水平与叠加雷击次数 n 成反比关系。因此, 在高土壤电阻率地区, 反击跳闸事故经常发生。

Table 1. Proportion of lightning resistance level of different voltage levels under different soil resistivity
表 1. 不同电压等级在不同土壤电阻率下耐雷水平占比

土壤电阻率 ρ ($\Omega \cdot m$)	≤ 100	100~500	500~1000	1000~2000	≥ 2000
接地电阻规程值(Ω)	10	15	20	25	30
110 kV 耐雷水平(kA)	70	46	35	28	23.3
(与设计值 70 kA 比值)	100%	65.70%	50%	40%	33.30%
220 kV 耐雷水平(kA)	120	80	60	48	40
(与设计值 90 kA 比值)	133%	88.90%	66.70%	53.30%	44.40%
500 kV 耐雷水平(kA)	220	146.7	110	88	73.3
(与设计值 150 kA 比值)	146.70%	97.80%	73.30%	58.70%	48.90%

1.1.3. 峡谷档距中央绕击跳闸高发

110 kV 以上等高电压等级的输电系统中，常常需要跨越大峡谷、盆地地区。根据输电线路跳闸的运行情况分析表明：相同地区，相同技术条件下，山区大峡谷地区线路跳闸率比平原地区线路高五倍左右，个别地区甚至达到十几倍，并且，绕击是造成跳闸的最主要的方式。有资料表明，我国 110~220 kV 输电线路雷击事件中，绕击 50% 以上。俄、美、加等 735~765 kV 线路运行数据表明，超高压线路绕击跳闸是主要原因[16] [17]。

根据分析绕击的电气几何模型(Electric Geometry Model, EGM)中的等击距原则可知[18] [19]，在峡谷条件下，地面下陷导致绕击面积、绕击弧大范围增加，绕击概率也成倍增加。如图所示，红色区域为考虑地面下陷，绕击可能发生的部分，相较于未考虑的情况来说，发生绕击的可能性大，这与实际运行数据吻合。通常在大峡谷线路档距中央部分为地面最低点，因此最有可能发生绕击。而理论上计算导线及避雷线对地的高度仅仅考虑了杆塔自身的高度，而忽略了峡谷的深度，使得规程法计算出的跳闸率偏低，与实际情况有较大差距[20] [21]。

并且，当雷击档距中央时，雷电波经接地端反射回来的负反射波的时间小于雷电波波峰时间时，间隙两端电压值最大。然而传统的分析方法中雷电波对地仅考虑全反射的现象，而忽略了波阻抗，因此反射系数必然大于-1，导致负反射波小于原波，间隙最大电压大于理论分析值。且对于多重雷击的情况，该峰值大大提高，间隙击穿造成跳闸成为概率大大增加(如图 3 所示)。

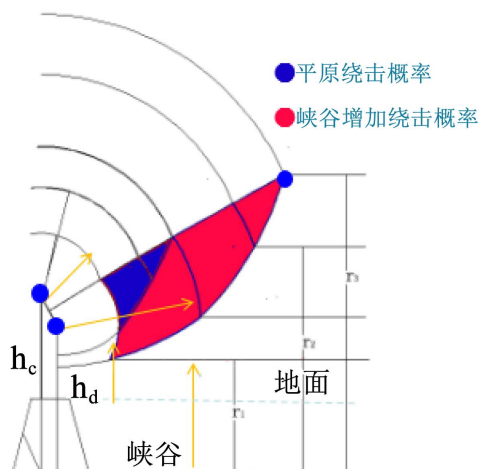


Figure 3. Probabilistic intention of central surround strike of grand canyon spacing
图 3. 大峡谷档距中央绕击示概率意图

1.2. 雷击跳闸破坏力和危险性巨大

1.2.1. 短路电流电动力引发变压器绕组松动

变压器绕组所受电动力，是绕组中的短路冲击电流与漏磁相互作用的结果。有文献对 110 kV 及以上变压器事故进行了统计分析，指出在所有变压器事故中，绕组是最主要的损坏部分，占 55.6%，且抗短路强度不足是最主要的损坏原因，占 38.5% [22]。究其原因因为短路电流电动力引发变压器绕组松动。

考虑到成本控制，变压器制造时在绕组抗短路能力上，使用最大允许过电流值来整定。根据 IEC60076-5:2006 和 GB 1094.5-2008，该最大允许过电流值通常取为额定运行电流的 K 倍，根据总电抗与电阻值的不同，冲击系数 K 取值为 1.15~2.69。

但在实际运行中，随着系统容量的不断扩大，电力变压器在突发短路情况下，流过变压器绕组内部的短路电流最大值可以近似达到其额定运行时电流的 10~20 倍，超过 40 kA。根据安培力定律，绕组电动力大小与电流的平方成正比。在冲击电流和磁场的共同作用下，绕组上将承受几十甚至几百倍的轴向幅向电动力，可能使绕组线圈出现弯曲变形、曲翘、倾斜倒塌、升起撑开等现象[23]。并且在交变磁场的作用下，松动的绕组产生震动，接近谐振频率时剧烈的震动将严重破坏变压器机械强度，破坏绝缘，严重时可能造成变压器爆炸[24] [25] [26] [27]。

而且电网自动重合闸成功即代表输电成功，未考虑跳闸对变电站的影响，变压器积累性安全隐患被忽略。而目前的变压器故障检测方法，尚无法准确及时的辨识出变压器内部绕组变形的实际情况，导致变压器处于“带病运行”状态，给变压器和电网安全运行留下隐患(如图 4 和图 5 所示)。

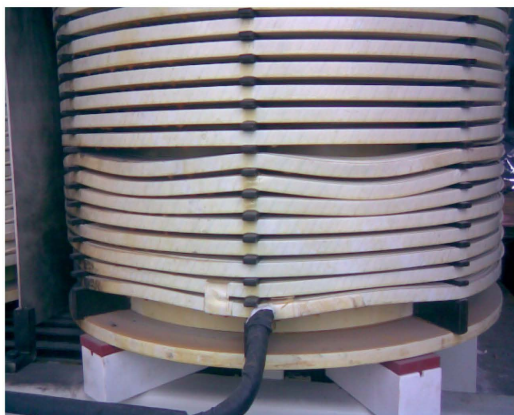


Figure 4. Transformer winding deformation

图 4. 变压器绕组变形

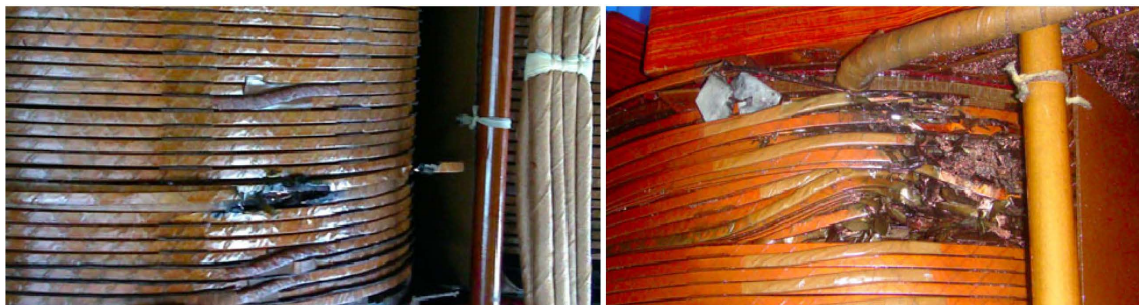


Figure 5. Transformer winding deformation leads to insulation breakdown and burnout

图 5. 变压器绕组变形导致绝缘击穿烧毁

1.2.2. 切断工频电弧断路器烧蚀严重

高压断路器在系统中扮演着控制和保护的双重角色。当线路遭受雷击，出现故障短路电流时，线路跳闸断路器动作，触头开断，切断短路电流。重合闸时，触头闭合使系统继续运行。断路器在切断或者重合闸过程中会产生电弧，在触头上产生焦耳热。此时电弧温度可达到 20,000~30,000 K，与弧根接触的弧触头表面温度一般为 5000~6000 K。然而断路器主要材料为铜和钨，触头铜金属的熔点和沸点分别 1358 K 与 2840 K，而钨金属的熔点与沸点分别为 3680 K 与 5928 K [28]。因此若工频电弧无法及时熄灭，触头在电弧焦耳热作用下液化汽化，并以金属熔液或者蒸汽形式逸出，可能断路器触头出现毛刺凸起、裂纹等(如图 6)，加剧隙中电场的不均匀度，使得触头更容易起弧放电。多次的分合闸过程或者长时间的电弧持续燃烧，宏观上对断路器的影响表现为使触头缩短(如图 7)，继而引发无法切断电流或者电弧重燃，断路器拒动，重合闸不成功[29] [30] [31] [32]。

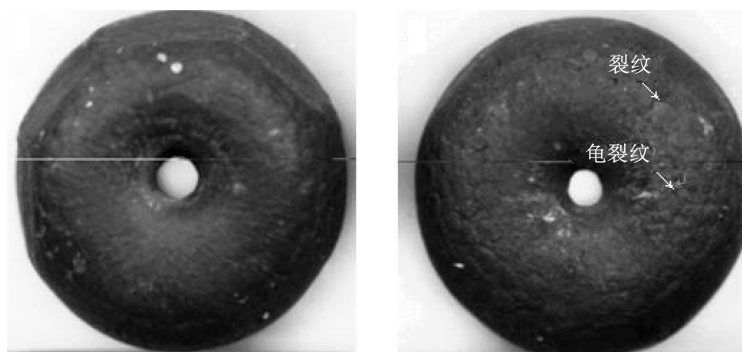


Figure 6. There are burrs and cracks on the contact surface of circuit breaker
图 6. 断路器触头表面出现毛刺、裂纹



Figure 7. The contact is severely ablated
图 7. 触头严重烧蚀

另外，在多重雷击电压的条件下，一方面，介质强度恢复速度慢于电压升高的速度，另一方面级联电压升高效应导致过电压水平远远高于介质绝缘强度[5]，从而导致断路器中电弧无法熄灭、重燃、或断路器拒动。

1.2.3. 操作过电压对系统绝缘破坏严重

电力系统可以看作是一个由许多电感、电容等性质的元件所组成的复杂电路。断路器操作会使电力系统从一种电磁状态过渡为另一种电磁状态。在这种过渡过程中会出现电磁振荡，电磁能与静电能在电感性元件中以电路固有频率交替转化，以致使电工设备上出现过电压。

当系统遭受雷击跳闸，断路器需要进行重合闸或者切除空载线路等操作，就会产生操作过电压，理

论上可达线路电压峰值的 3~5 倍。交流电弧的电流每次经过零点都有熄灭和重燃的过程。通过断路器操作切断电流, 在电流最终切断之前有时还可能多次电弧熄灭与重燃, 加剧了电磁振荡过程, 使过电压更为严重。

1.2.4. 电力需求侧对雷击跳闸十分敏感

中国电力科学研究院在 2011 年发表的《配电网重要电力用户停电损失及应急策略》[33]中对多个重要电力用户的停电损失进行了调查(如下表 2):

Table 2. Power loss questionnaire for important power users

表 2. 重要电力用户停电损失调查表

序号	企业	断电造成的经济损失				
		生产线恢复损失		设备损失 /万元	重启的额外费用 /万元	劳务损失 /(万元/h)
		生产线重启时间/h	生产线产品产值/(万元/h)			
1	钢管企业	3.000	328.116	1000.0	10	1.25
2	钢铁企业	3.000	228.311	5000.0	10	1.30
3	盐化企业	8.000	7.284	400.0	10	1.30
4	石化企业 1	10.000	456.621	5000.0	100	1.30
5	石化企业 2	5.000	15.000	600.0	10	0.30
6	石化企业 3	8.000	79.909	1000.0	25	0.56
7	制药企业	5.000	2.000	20.0	2	0.12
8	航空动力企业	3.000	22.831	6000.0	50	1.20
9	计算机企业	8.000	1141.553	500.0	10	2.50
10	电子企业 1	4.000	10.866	0	0	2.50
11	电子企业 2	50.000	22.928	3.5	5	0.40

如上表 2 所示, 这些重要用户停电生产线重启时间都在 3 小时以上, 最大重启时间甚至高达 50 小时。这些用户中, 负荷多为生产所需的精密控制系统和动力系统, 需要计算机群、电机群等加以控制。一旦跳闸停电, 即便自动重合闸使系统在 0.5 ms 内恢复供电, 计算机重启, 电机群顺序重启也需要很长时间, 失去重合闸成功的意义。

而且由停电造成的损失是巨大的, 不仅是直接的生产停滞造成的巨大经济损失, 还可能导致设备损坏, 甚至引发安全事故威胁人身安全等。由此可见在电力需求侧, 某些重要负荷对防雷技术的要求已经达到了不允许跳闸的高标准。

1.2.5. 多重雷击条件下避雷器热击穿十分严重

如前文所述, 由于时滞效应, 多重雷条件下残压叠加性升高, 导致 MOA 阀片表面闪络, 继而造成阀片击穿、开裂、老化、裂化等, 造成避雷器性能下降、电弧无法熄灭或重燃。

考虑到 MOA 对散热性的要求, 在《GB 11032-2010 交流无间隙金属氧化物避雷器》规定到, 避雷器的冲击电流密度极限为 50~60 s/次, 而实际雷击情况可达此值的千分之几。其次, 有文献指出, 避雷器内部受潮是最主要的故障类型[30]。避雷器采用封闭式结构, 工艺不佳、长时间的户外放置、维护不当, 容易导致结构内部受潮。因此, 在多重雷条件下, 电弧引发结构内部热积累效应, 热量短时间内叠加超标, 水汽短时间内膨胀导致避雷器封闭结构爆炸, 也有可能形成永久性短路故障源, 导致系统跳闸断电, 自动重合闸不成功。

2. 气体主动灭弧防雷方法

气体主动灭弧防雷方法，在普通并联间隙的基础上加入灭弧功能，达到同时疏导雷电过电压和消除工频过电流的目的，是一种基于“冲击疏导-有效灭弧-工频阻塞”理念的新型灭弧防雷方法，将防雷重点放在疏导雷电流后的灭弧过程，通过主动控制间隙空气介质绝缘强度，实现有效灭弧，限制工频过电流。

“冲击疏导”通过绝缘配合和电弧并联旁路作用绝缘子实现雷电能量导入大地，消除冲击过电压保护绝缘子。基于普通并联间隙，利用基于普通并联间隙与绝缘伏秒特性的绝缘配合，将雷电流以并联间隙电弧的方式导入大地。此时绝缘两端的电压为电弧电压，而电弧通道一旦建立，其电压远低于绝缘水平，从而限制雷电过电压。

在“有效灭弧”模式下，雷电成为灭弧气体能量的激励源，几乎在电弧建立的同时，工频电弧建立的初期，主动引发灭弧能量快速作用于电弧，通过建弧与灭弧的起点同步性、灭弧速度和强度的不对称性，使灭弧能量具有又早、又快、又强的优势，实现在建弧过程的起点附近全概率中断建弧过程，利用灭弧过程消除工频过电流。

“工频阻塞”在雷电诱导快速灭弧机制从时间上早期干预建弧过程的基础上，利用线路电容存在交流充电时间，电压上升速度较慢的特性，形成灭弧能量从速度、持续时间和强度上压制工频电弧维持能量的趋势，使介质强度恢复到工频绝缘的程度，达到阻断工频电弧和抑制重燃的目的(如图8)。

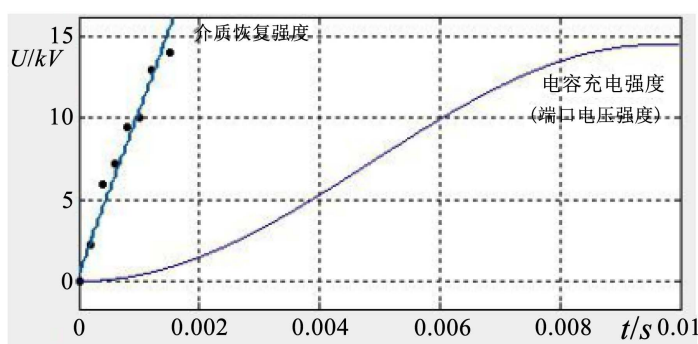


Figure 8. Schematic diagram of comparison between medium recovery speed and capacitor charging speed
图 8. 介质恢复速度与电容充电速度对比示意图

根据灭弧能量形式的不同，气体主动灭弧防雷方法衍生为两种具体形式：外能式固相气体灭弧防雷间隙和内能式压缩气体灭弧防雷间隙。

2.1. 固相气体主动灭弧防雷间隙

固相气体主动灭弧防雷间隙是一种外能式的灭弧防雷装置，通过雷电诱导固相灭弧能量团爆炸产生气体灭弧能量。适用于 110 kV 以上电压等级的输电线路，安装示意如图 9 所示。

如下图 10 所示，设备主体与下石墨电极构成基础并联间隙，当雷电脉冲传递至绝缘子两侧时，空气主间隙优先击穿建弧，疏导雷电能量，限制绝缘子两端过电压。设备内部通过电磁感应，几乎在雷电脉冲到达的同时(约 5 μ s)，同步触发灭弧能量团爆炸，产生高速高压气流作用于电弧(灭弧能量峰值时间约为 90 μ s)，快速置换空气介质，恢复间隙绝缘强度，促使电弧迅速地拉长、扩散、变形、冷却、截断、熄灭。电弧熄灭时间(约为 0.3~0.4 ms)远小于继电保护动作时间(一般大于 10 ms)，因此能在继电保护动作之前熄灭，消除工频过电流[34] [35] [36] [37]。

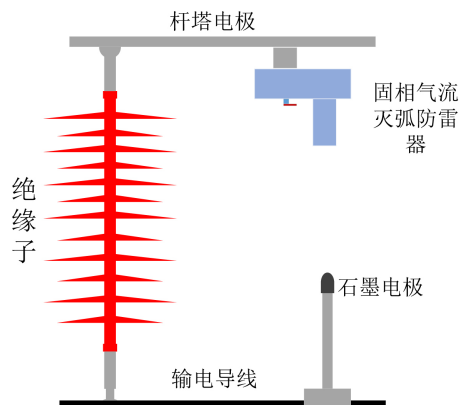


Figure 9. Basic structure of solid phase gas arc extinguishing and lightning protection gap device
图 9. 固相气体灭弧防雷间隙装置基本结构

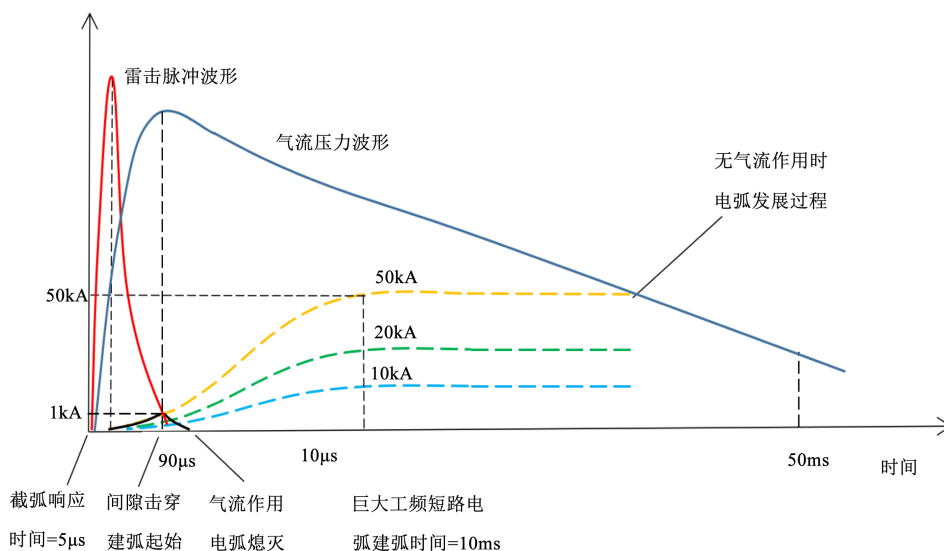


Figure 10. Schematic diagram of principle of active arc extinguishing and lightning protection gap for solid gas
图 10. 固相气体主动灭弧防雷间隙原理示意图

在多重雷击条件下，冲击电压能再次击穿间隙疏导雷电能量。灭弧能量在多次重复冲击建弧过程中可多次被触发，保证间隙介质强度持续在工频绝缘的程度(如图 11)。固相气体灭弧防雷间隙设有延时模块，保证在时间间隔较短的冲击过程中，灭弧能量不被多次触发，利用单次产气过程的持续强度可有效作用于多个建弧过程(工频电弧峰值时间约为 10 ms，气体灭弧能量有效持续时间约 50 ms)，避免灭弧能量浪费。

2.2. 压缩气体主动灭弧防雷间隙

压缩气体灭弧防雷间隙是一种自能式的灭弧防雷间隙，通过电弧自身能量及特殊结构，改变电弧通道上气体介质绝缘强度，形成电弧能量断点，熄灭电弧。适用于 35 kV 以下电压等级的配网及高铁接触网，其安装示意图如图 12 所示。

设备主体内部含有多个特殊材料组成的灭弧细道，细管按照特殊空间排列方式串接形成灭弧通道结构，优先吸引、控制和改变雷电冲击电弧的发展轨迹。当空气主间隙击穿后，电弧沿灭弧路径泄放雷电流，冲击电弧在单元细管内沿轴向被强烈压缩，形成压力梯度，空气被吸入单元细管内。温度极高的电

弧与外界常温空气介质存在温升梯度，压缩段与非压缩段的压力梯度和温度梯度使得电弧瞬间产生了温升爆炸，电弧沿细管端口处喷射，相邻细管端口处的电弧对喷，使得电弧弯折加剧了电弧能量的散失，如图 13、图 14 所示。通过多个单元灭弧细管结构上的配合，形成多个电弧能量断点，使得电弧注入能量不足以维持电弧的发展，完全粉碎建弧通道，熄灭电弧，间隙介质恢复工频绝缘强度[38] [39] [40] [41] [42]。

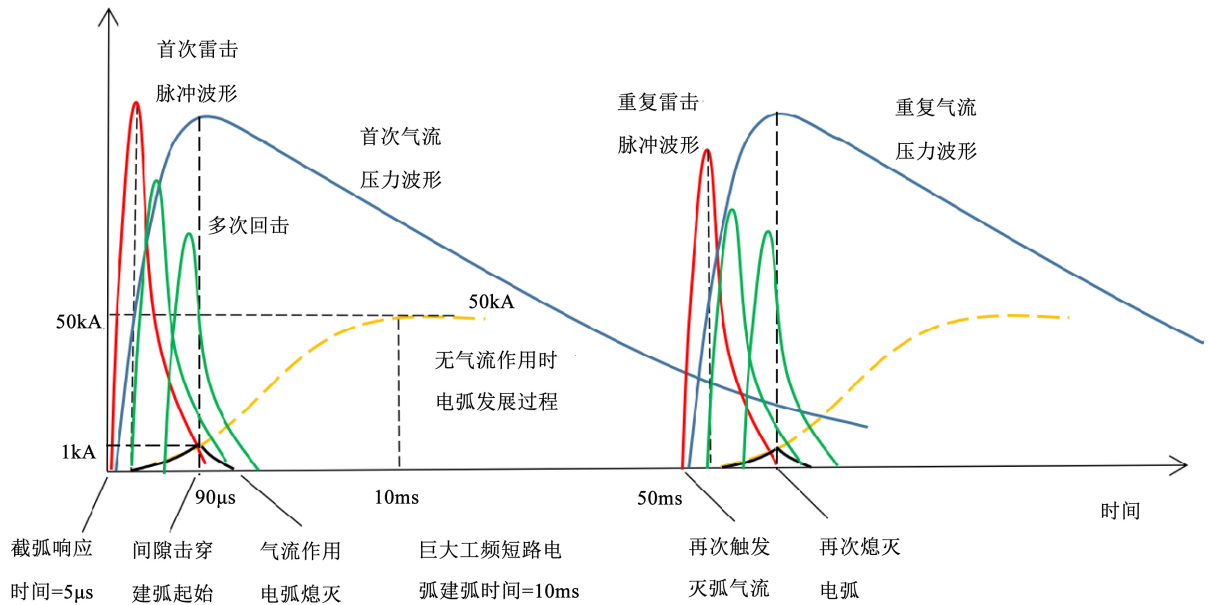


Figure 11. Schematic diagram of multiple lightning strike protection
图 11. 多重雷击防护示意图

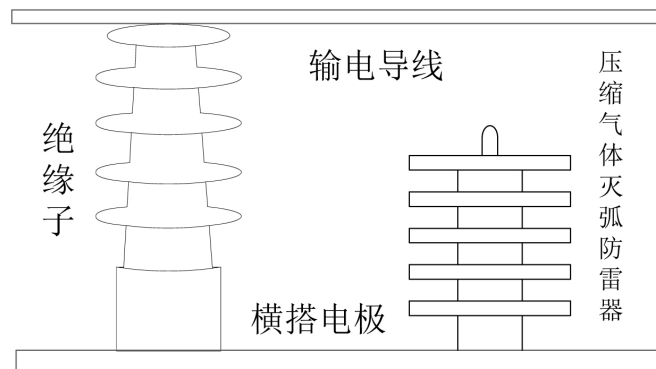


Figure 12. Schematic diagram of installation of compressed air arc extinguishing lightning protector
图 12. 压缩气流灭弧防雷器安装示意图

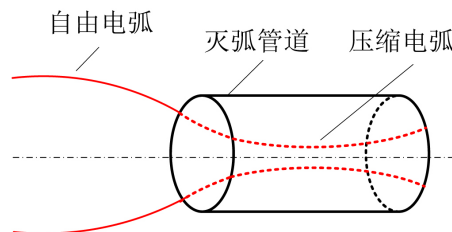


Figure 13. The arc in that unit arc extinguish tubule is compressed
图 13. 单元灭弧细管内电弧被压缩

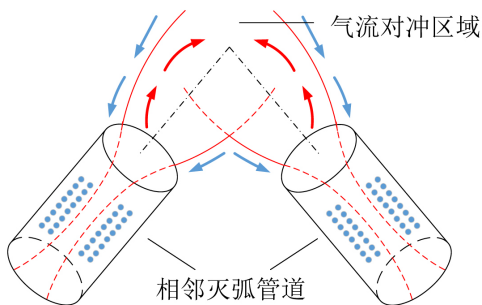


Figure 14. The arc is bent by the air flow opposition of adjacent pipes
图 14. 相邻管道气流对冲使电弧弯折

3. 试验及应用效果

3.1. 灭弧试验

3.1.1. 固相气体主动灭弧防雷间隙灭弧实验

图 15 为固相气体主动灭弧防雷间隙动作波形图。可看出击穿电压为 849.71 kV，固相气体灭弧防雷装置迅速动作，波前时间为 1.21 μs，半峰时间为 5.67 μs，电压很快恢复为 0，且无重燃现象。

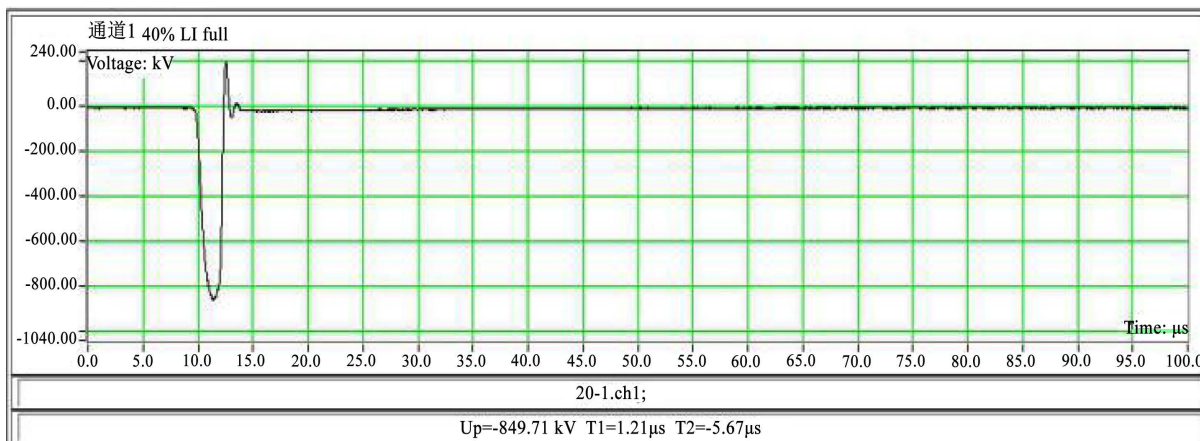


Figure 15. Voltage waveform recorded by oscilloscope
图 15. 示波器记录的电压波形

使用摄像机拍摄固相气体主动灭弧防雷间隙对电弧截断并熄灭的过程如图 16。

从图 16(b)可看出接通电流瞬间，引起装置迅速动作。图 16(c)中装置产生固相爆炸气流作用于电弧，图 16(d)电弧在固相爆炸气流作用下产生截断断面，由于受到辐射对流传导等导致能量补给缺失，电弧不再持续扩大，此时的气流充满整个灭弧通道，电弧截断断面将继续受到气流作用，形成图 16(e)中的可直观显著大断面，此时电弧等离子体完全失去能量补给，图 16(f)中电弧开始熄灭，至图 16(g)中电弧弱化，最终图 16(h)中完全熄灭，没有产生电弧重燃。

3.1.2. 压缩气体主动灭弧防雷间隙灭弧实验

图 17 为高速摄像机拍摄的压缩气体主动灭弧防雷间隙的整个灭弧过程，实验中采用 2 kA 的工频电流。根据摄像机显示，其建弧和灭弧过程几乎同步形成，电弧耦合产物迅速向灭弧管道断面喷射，逐步弱化，最终实现灭弧，并且在工频电压下并未发生电弧重燃。

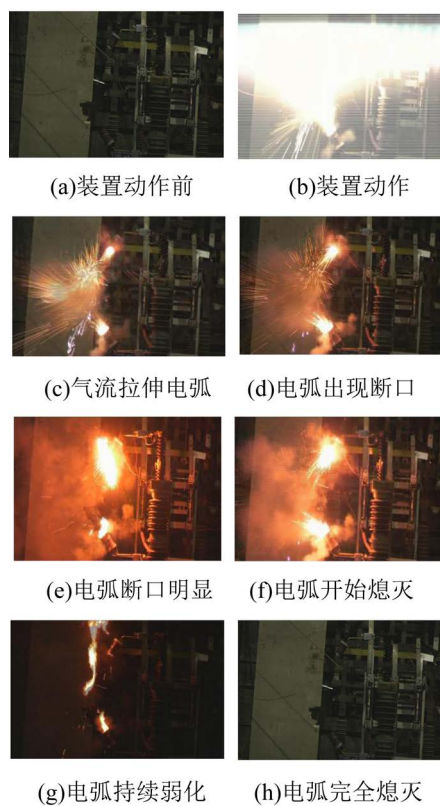


Figure 16. Ordinary camera shooting arc extinguishing the whole process
 图 16. 普通摄像机拍摄电弧熄灭全过程

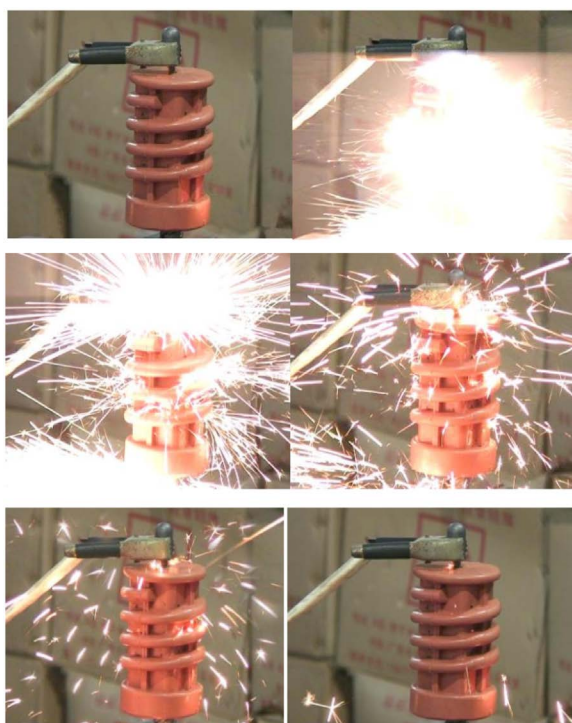


Figure 17. Schematic diagram of arc extinguishing of compressed air current arc extinguishing lightning protector
 图 17. 压缩气流灭弧防雷器灭弧示意图

3.2. 运行情况

目前, 灭弧防雷系列产品已应用于国网、南网、中石化炼油厂的雷击高发线路, 在云南等地已有应用于风电场的成功案例, 防雷效果明显, 大幅度降低雷击事故率, 保障电力系统及用户用电安全。用户报告显示, 雷击跳闸率、事故率、断线率趋近于零, 成功防护多重雷击, 防雷效果不受雷击强度、方式、类型的影响。以下为几条典型的雷击多发线路灭弧防雷间隙的应用情况:

3.2.1. 巨大雷击防护效果

某 110 kV 线路位于滨海, 属台风登陆高发地带, 是多雷、强雷地区, 年雷暴日平均达 124 日, 雷害引起的跳闸事故时有发生, 该线路在改造前 2013 年前年均雷击跳闸总数 1 次。

2013 年 12 月对该线路进行防雷改造, 安装了固相气体主动灭弧防雷间隙装置。雷电监测定位系统的数据显示(如表 3): 自 2016 年 4 月初到 8 月底, 该线路附近供落雷 1200 余次, 其中超过耐雷水平 128 次。其中 2016 年 6 月 11 日 01:52:56.3172 时, 于 64#~65#杆塔成功防护了雷电流幅值为-363.0 kA 的 1 次回击, 同日 02:35:00.1840 时, 于 19#~20#杆塔成功防护了雷电流幅值为-215.7 kA 的 8 次回击, 线路均未跳闸。

Table 3. Lightning detection information

表 3. 雷电检测信息

序号	时间	经度	纬度	电流(kA)	回击
1	2016-06-11 01:27:21.6754	109.4389	21.4920	-235.1	1
2	2016-06-11 01:34:25.3498	109.4783	21.5523	-211.9	2
3	2016-06-11 01:47:45.4428	109.4873	21.5673	-210.9	0
4	2016-06-11 01:48:54.6026	109.5293	21.5148	-235.6	7
5	2016-06-11 01:52:56.3172	109.5390	21.5150	-363.0	1
6	2016-06-11 01:54:11.7047	109.4956	21.5603	-267.4	2
7	2016-06-11 01:55:31.0129	109.4256	21.5394	-212.1	3
8	2016-06-11 01:58:20.1942	109.4238	21.5430	-222.8	3
9	2016-06-11 02:35:00.1840	109.4660	21.5323	-215.7	8

3.2.2. 多重雷击防护效果

2016 年对某 220 kV 进行防雷改造, 安装固相气体主动灭弧防雷设备。2016 年 9 月 1 日至 2017 年 10 月 19 日, 在线路走廊半径 1 km 范围内共计 438 个落雷, 其中 100 kA 及以上落雷共计 87 个, 200 kA 及以上落雷共计 10 个, 幅值最大达 267.6 kA, 其中也包括雷电流幅值为-171.4 kA 回击次数高达 12 次的多重雷击(如表 4)。而线路在灭弧防雷间隙运行期间未发生跳闸事故。

3.3. 高土壤电阻率地区

某 110 kV 线架设在山区, 易遭绕击, 另一方面山区土壤电阻率很高, 雷电流流经杆塔入地时所造成杆塔顶端电位升高引起反击, 导致绝缘闪络引起跳闸。从 1970 年到 2008 年的平均统计数据得出: 该地年平均雷暴日达到 83 天, 并从近年起逐年增加。由于接地电阻远超过设计要求, 导致线路的防雷水平大幅度降低, 只有 14 kA 左右, 不到设计耐雷水平的三分之一。在进行防雷改造前线路雷击跳闸事故频发, 给电网的安全运行和用户的生产生活带来严重威胁。

2014 年 3 月对该线进行防雷改造, 安装了固相气体主动灭弧防雷间隙。经查询雷电定位数据得知, 在 4 月 1 日至 8 月 30 日时间范围内, 线路附近共落雷 500 余次, 其中超过耐雷水平 203 次, 多重雷击

74 次(雷电流幅值超过 100 kA 的雷击共有 4 次, 其中最大雷电流幅值为-199.3 kA)。灭弧防雷间隙安装后至今, 没有发生跳闸情况。

Table 4. Detailed table of multiple lightning strikes with five or more high intensity return strikes
表 4. 高强度回击 5 次及以上多重雷详表

序号	时间	强度(kA)	回击次数
1	2017-07-03 22:46:18.4895	-115.3	8
2	2017-07-04 00:32:58.9358	-124.4	10
3	2017-07-22 22:19:38.8616	-171.4	12
4	2017-08-02 05:01:04.2958	-108.1	5
5	2017-08-03 21:26:53.4037	-103.9	5
6	2017-08-03 21:47:15.7864	-154.9	5
7	2017-08-03 22:16:11.9216	-123.2	5
8	2017-08-03 23:00:59.5436	-128.1	5
9	2017-08-24 03:58:27.6635	-178.3	6
10	2017-09-07 14:56:17.9477	-137.0	5
11	2017-09-09 12:20:38.8939	-127.1	5
12	2017-09-09 12:24:00.8023	-134.3	5

2014 年 8 月 11 日超过实际耐雷水平的雷击有 13 次, 雷电流幅值超过 100 kA 的就有 2 次, 最大雷电流幅值为-199.3 kA, 在灭弧防雷间隙保护下, 未发生跳闸事件。

4. 气体主动灭弧防雷优势

气体主动灭弧防雷间隙, 利用创新的科学原理和成熟的技术措施, 有效的解决了目前防雷现状中存在的有效性、可靠性、安全性等问题:

- 1) 有效性: 填补了多重雷击、高土壤电阻率地区雷击、档距中央绕击等方面存在的空白;
- 2) 可靠性: 弥补了传统防雷模式的防雷效果受到雷击强度、类型、部位、方式、接地电阻等因素限制的能力缺陷;
- 3) 安全性: 解决了由于防雷技术能力的缺陷与不足造成的防雷器自身及输变用电设备的诸多安全性问题。

4.1. 有效性优势

4.1.1. 多重雷击防护达到根治水平

“冲击疏导 - 雷电诱导快速灭弧 - 工频阻塞”模式, 实现多重雷击的有效防护, 达到无过雷击电压和无工频过电流的“双无”目的, 以及对雷击跳闸的有效管控:

1) 无过电压: 疏导防雷模式下间隙与绝缘并联结构, 用冲击电弧全概率消除雷击过电压, 确保防止绝缘闪络完全有效并规避雷击强度、地网阻抗、雷击方式(绕击或反击)和雷击类型(单次和多重雷击)等因素对过电压抑制效果的影响, 确保绝缘在任何雷击工况下不会闪络。

2) 无过电流: 气体灭弧特有的雷电流诱导能力、几十兆帕气压气体维持几百毫秒能力和优化的灭弧气体激活周期可实现一次释放的灭弧气体可以抑制 5 次以上多重雷击建弧过程并对更高次雷击建弧过程实现无缝抑制。确保对任意次多重雷击条件下不跳闸。

3) 对雷击跳闸的有效管控: 为了防止工频能量通过电弧, 产生工频故障过电流。气体主动灭弧防雷

间隙通过快速同步灭弧机制，几乎在电弧建立的同时，通过灭弧通道雷电网络信号的导数激活灭弧气体能量的释放机制，形成时间上早期干预建弧过程和能量上压制电弧发展的态势，达到限制消除工频过电流的目的。固相气体灭弧防雷与避雷器阀片灭弧的优劣对比如表 5 所示。

Table 5. Comparison of arc extinguishing of solid-phase gas flow and lightning arrester valve plate

表 5. 固相气流灭弧和避雷器阀片灭弧对比

	固相气体灭弧机制	避雷器阀片机制
工作机理	雷电诱导产生固相气流，主动作用于工频电弧的起始脆弱期，快速有效熄灭电弧，限制雷击过电压阻塞后续工频过电流	利用阀片非线性电阻特性，正常工频电压下保持高阻特性阻断工频能量，雷击过电压使电阻阀片开通，限制雷击过电压
防雷特性	利用电弧负阻性残压特性，雷击越强残压越小 巨型雷、多重雷击等各种雷击强度、方式、类型和部位的所有雷击工况有效防护全覆盖	多重雷击下存在残压严重超标的问题 只对单次弱雷击有效(占所有雷击 25%以下)
自身安全	全空气开放式结构，介质可恢复，电弧通道无吸能环节不存在自身安全问题	防潮层受潮影响散热集肤效应、时滞效应引发残压超标引发的阀片击穿热击穿避雷器永久性短路故障问题

4.1.2. 高土壤电阻率地区防雷达到根治水平

气体主动灭弧防雷间隙避开与过电压硬碰硬的做法，利用绝缘配合，将雷电流以并联间隙电弧的方式导入大地，此时绝缘两端的电压为电弧电压。而电弧通道一旦建立，其电压远低于绝缘水平，从而限制了过电压，对接地电阻值无要求(如表 6)。

Table 6. Comparison between compressed air arc extinguishing and tubular arrester

表 6. 压缩气流灭弧和管式避雷器对比

	压缩气体灭弧	管式避雷器
工作机理	控制雷电冲击电弧通过多个灭弧管道形成电弧能量断点，粉碎建弧通道	利用电弧烘烤产气材料，在灭弧通道内形成高压气体熄灭电弧
防雷特性	利用冲击电弧能量形成灭弧能量，保持建弧与灭弧同步性；无产气环节，无损耗材料，可熄灭千次级别的雷击；	利用工频电弧，不利于跳闸率的管控；存在产气材料损耗问题，长期使用可能失去有效灭弧力；

4.2. 安全性优势

4.2.1. 杜绝硬短路可能

1) 与并联间隙相似的主体结构，使电弧通道的介质具有可恢复性。开放式结构全空气介质的特点，使得设备主体若发生故障，其余部分等同于普通并联间隙，介质可重复恢复性仍保持对电网工频能量的阻塞作用；

2) 与大气环境完全开放结构和电弧通道无吸能环节，既大幅度降低热源又确保完全散热顺畅，消除残压超标和通流容量受限根源，符合防雷安全需要。

4.2.2. 消除一次设备短路电弧和电力冲击

灭弧环节，使得短路电流被快速及时有效的切断，快速消除短路电流产生的电动力对变压器等设备的破坏。

4.2.3. 故障辨识度达到 100%

完全“透明”化设计使故障辨识极其简单：

- 1) 动作次数计数功能和异常状态指示功能使常规检查通过望远镜即可实现；
- 2) 灭弧功能缺失任然具有并联间隙疏导防雷作用，并确保自动重合闸成功。

简洁的结构使得设备故障容易被发现并及时处理修复，并且不需要全线拆除。

4.2.4. 耐用性和免维护性高

设备无易损件，开放式结构对密封性、散热性、防水性等要求不高，无热击穿等困扰，结构稳固，无需经常性维护。设备发生故障时辨识度高定位准确，无需全线拆除。

4.3. 经济性优势

1) 摆脱地网、拦截、绝缘水平对防雷效果的影响。通过气体灭弧单一技术环节实现完全消除雷击过电压和工频过电流的目标，节省地网降阻、避雷线、加强绝缘等相关技术环节需求和投资。且维护便利，故障识别度高，故障设备可定点更换无需全线拆除，大幅度节省维护成本。

2) 消除社会因素对防雷的各种干扰。

参考文献

- [1] 沈其工. 高电压绝缘基础[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [5] 叶海峰, 谈发力, 吴昊, 等. 多重雷击导致变电站重合闸失败原因分析[J]. 水电能源科学, 2017(9): 173-176.
- [6] 刘胜军, 李遵守, 周开峰. 多重雷击引起 220kV 断路器损坏的事故分析[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2012, 48(9): 115-116.
- [7] 汤霖, 王瑞发, 赵冬一. 架空配电线路雷电过电压特性与 MOA 试验技术的研究进展[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 118-127.
- [8] Eloch, M. (2017) Performance of Surge Arrestors under Single and Multiple Lightning Impulses. *International Symposium on Lightning Protection*, 176-182.
- [9] Sargent, R.A., Dunlop, G.L. and Darveniza, M. (1992) Effects of Multiple Impulse Currents on the Microstructure and Electrical Properties of Metal-Oxide Varistors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **27**, 586-592. <https://doi.org/10.1109/14.142723>
- [10] Darveniza, M., Roby, D. and Tumma, L.R. (1994) Laboratory and Analytical Studies of the Effects of Multipulse Lightning Current on Metal Oxide Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 764-771. <https://doi.org/10.1109/61.296255>
- [11] Darveniza, M., Tumma, L.R., Richter, B., et al. (2002) Multipulse Lightning Currents and Metal-Oxide Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 1168-1175. <https://doi.org/10.1109/61.636934>
- [12] Darveniza, M. and Saha, T.K. (1998) Surface Flashovers on Metal-Oxide Varistor Blocks.
- [13] 秦家远, 阮江军, 黄道春. 110 kV 变压器中性点雷击过电压分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 99-101.
- [14] 曲振旭, 王巨丰, 苏浩益, 等. 特快速暂态过电压下避雷器模型的研究与应用[J]. 电瓷避雷器, 2012(2): 51-56.
- [15] 张志劲. 500kV 同杆双回输电线路耐雷性能研究[D]. [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [16] 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 76-79.
- [17] J. G. 安德森. 345 千伏及以上超高压输电线路[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [18] Armstrong, H.R. and Whitehead, E.R. (1968) Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, **PAS-87**, 270-281. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1968.291999>
- [19] Golde, R.H. (1945) The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines. *Electrical Engineering*, **64**, 902-910. <https://doi.org/10.1109/EE.1945.6441405>
- [20] 李晓岚, 尹小根, 余仁山, 等. 基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 42-44.
- [21] 王巨丰, 刘赞, 黎彬, 等. 基于向量电气几何模型的输电线路绕击耐雷性能研究[J]. 电网技术, 2008, 32(s2): 240-244.
- [22] 王梦云. 110 kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 供用电, 2007, 24(1): 1-5.

- [23] 陈闰琪. 变压器线圈短路强度计算综述[J]. 变压器, 1974(5): 3-21.
- [24] 王东林. 大型变压器绕组短路电力的计算与分析[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [25] 曾庆汇, 朱丽, 熊华强. 同杆并架双回终端线路零序保护误动分析及解决方案[J]. 江西电力, 2017, 41(4): 27-29.
- [26] 胡海宁, 周力行, 李季高, 等. 近区短路对变压器的影响及诊断方法[J]. 变压器, 2013, 50(11): 73-76.
- [27] 梁建中. 从变压器的损坏看短路电流对变压器的影响[J]. 电气时代, 1998(11): 16-17.
- [28] 蓝磊, 陈功, 文习山, 等. 基于动态电阻测量的 SF₆ 断路器触头烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2016(6): 1731-1738.
- [29] 胡习凯. 基于集肤效应的氧化锌避雷器故障分析[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [30] 王彤, 曾彦珺, 李怡, 等. 金属氧化物避雷器故障类型比较研究及事故分析[J]. 绝缘材料, 2015, 48(9): 47-52.
- [31] 彭向阳, 钟定珠, 李凯曼. 220 kV 线路多重雷击导致两侧开关断口绝缘击穿分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 146-148.
- [32] 钱海, 邱慧敏, 别睿, 等. 500 kV 断路器多重雷击事故分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 20-23.
- [33] 李蕊, 李跃, 苏剑, 等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 170-176.
- [34] Wang, J.F., Qi, C., Liang, X.B., *et al.* (2007) Use of Magnetic Links to Measure the Maximum Rate-of-Rise of Lightning Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**, 2445-2449. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905348>
- [35] Wang, J., Liu, J., Wu, G., *et al.* (2015) Research and Application of Jet Stream Arc-Quenching Lightning Protection Gap (JSALPG) for Transmission Lines. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, **22**, 782-788. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.7076776>
- [36] 王巨丰, 郭伟, 梁雪, 等. 爆炸气流灭弧试验与灭弧温度仿真分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1505-1511.
- [37] 王巨丰, 刘津濂, 吴国强, 等. 喷射气流灭弧条件下输电线路雷击跳闸率计算方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 840-847.
- [38] 王巨丰, 梁雪, 郭伟, 等. 基于 Navier-Stokes 方程的新型喷射气流灭弧防雷间隙有效性论证[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 28-34.
- [39] 王巨丰, 李世民, 闫仁宝, 等. 可主动快速熄灭工频续流电弧的灭弧防雷间隙装置设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 40-45.
- [40] 王巨丰, 吴东, 李国栋, 等. 爆炸气流作用下暂态电弧自熄灭时间计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4089-4096.
- [41] 王巨丰, 李国栋, 吴东, 等. 爆炸冲击波作用下灭弧防雷间隙熄灭工频电弧的机理及应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3036-3041.
- [42] 王巨丰, 郭伟, 郭峰, 等. 喷射气体灭弧防雷间隙的灭弧效果[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 751-758.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-1565, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: tdet@hanspub.org