

云南电网输电线路杆塔降阻措施的评价研究

许丹莉¹, 陈宇民², 马 仪², 蔡葆锐³, 刘 东¹, 王毅楠¹

(1. 华北电力大学云南电网公司研究生工作站, 昆明 650217;

2. 云南电力研究院, 昆明 650217; 3. 云南电网调度中心, 昆明 650011)

摘要: 笔者对云南电网采用的线路杆塔接地电阻的降阻措施进行全面总结, 并着重对降阻措施进行评价。通过首次采用杆塔接地电阻分级, 开创性地提出了“单位降级投入成本”指标, 将杆塔降阻改造投入成本与产生效果进行综合考虑, 提出了实用的杆塔降阻效果评估的新方法。同时, 采用“成本(C)/效用(B)”评价方法进行经济性分析, 对杆塔降阻效果量化评估。笔者分别对常用的4种杆塔降阻措施进行综合分析, 总结了各降阻措施的优缺点。分析结果表明, 在综合考虑接地电阻、改造经济性分析、腐蚀情况等条件下, 根据杆塔接地电阻的超标情况选择不同的降阻措施, 进一步提出各种降阻措施的改造建议。

关键词: 雷电; 防雷措施; 杆塔降阻; 效果评价

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0075-06

Evaluation of Earth Resistance Reduction Methods for Transmission Line Tower in Yunnan Power Grid

XU Dan-li¹, CHEN Yu-min², MA Yi², CAI Bao-rui³, LIU Dong¹, WANG Yi-nan¹

(1. Graduate Workstation of North China Electric Power University & Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650217,

China; 2. Yunnan Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China;

3. Yunnan Electric Power Dispatching Center, Kunming 650011, China)

Abstract: Earth resistance reduction methods for the transmission line towers in Yunnan Power Grid are summarized and evaluated. By grading the tower earth resistance, an index of “unit degrading input cost” is introduced to synthetically consider the input cost and the profit, thus a new evaluation approach of tower earth resistance reduction methods is proposed. In addition, the “cost (C)/utility (B)” evaluation method is employed for economic analysis and quantitative evaluation of tower earth resistance reduction. Four commonly used tower earth resistance reduction methods are analyzed, and their advantages and disadvantages are evaluated with the proposed approach. The results show that, in comprehensive consideration of the earth resistance, the economic analysis of expansion and the corrosion condition, appropriate tower earth resistance reduction method should be selected according to the over-standard extent of the earth resistance. Moreover, some suggestions are offered for improvement of the conventional earth resistance reduction methods.

Key words: lightning; anti-lightning method; earth resistance reduction; evaluation

0 引言

云南电网高压架空输电线路所经的地区地形复杂, 具有雷暴活动频繁、高海拔、山区、高土壤电阻率等特点, 因雷害造成的线路跳闸占线路总跳闸次数

的50%以上, 雷击跳闸一直是影响线路安全稳定运行的最主要因素^[1-3]。

任一种防雷措施, 雷击杆顶时, 雷击到线路上的雷电流最终必须通过杆塔接地装置在大地中散流。若杆塔接地电阻偏大, 雷电流不能快速泄入大地, 杆塔电位升高, 就容易对输电线路产生反击, 导致绝缘

收稿日期: 2010-10-16; 修回日期: 2010-11-07

子被击穿,输电线路杆塔的接地电阻越大,反击的危害就越大^[4-6]。降低杆塔接地电阻相当于疏通雷电流入地的通道,可有效提高输电线路反击耐雷水平,降低反击跳闸率,是评价线路是否合格的重要标志^[7-11]。但各种杆塔降阻措施如何根据现场实际情况正确合理地使用则不是一件容易的事,降阻措施与现场实际不符将会造成投资大收益小的事件^[12],对输电线路杆塔降阻措施进行评估,提出合理的防雷措施实施建议就显得尤为重要。立足于云南电网多年来所实施的杆塔降阻改造长期积累的数据,阐述云南电网降阻措施的评价方法、评价范围、措施的综合效果,以及效果经济性分析,首次提出单位成本效用比的公式,对降阻措施进行量化分析比较,进一步总结各降阻措施的优缺点并提出相应建议。

1 云南电网降阻措施的评价对象及评价方法

1.1 评价范围

笔者针对云南电网近年来进行过降阻改造的 2 866 基杆塔样本数据进行分析。其中:500 kV 杆塔降阻改造 337 基,占降阻改造杆塔总数的 11.76%;220 kV 杆塔降阻改造 900 基,占降阻改造杆塔总数的 31.40%;110 kV 杆塔降阻改造 1 629 基,占降阻改造杆塔总数的 56.84%。

1.2 评价办法

1.2.1 改造措施分类

文[13-16]介绍了降低杆塔接地电阻的主要措施,文中主要对 4 种降阻措施进行评价分析,为了便于评价分析,将其分为 3 大类:①增设接地扁铁类改造,指为扩大地网面积而增设水平接地体、垂直接地体、复合接地体的改造;②增设降阻设施类改造,指为降低接地电阻而在地网上增设接地模块、空腹注水等设施的改造;③添加降阻剂类改造,指为降低土壤电阻率而在地网区域内添加降阻剂的改造。

1.2.2 接地电阻分级

鉴于以下原因文中首次提出采取接地电阻分级,见表 1。

表 1 杆塔接地电阻分级

Tab. 1 Grade of tower grounding resistance

级别	描述
1 级	接地电阻 $<10\ \Omega$
2 级	$10\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<20\ \Omega$
3 级	$20\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<30\ \Omega$
4 级	$30\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<50\ \Omega$
5 级	$50\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<100\ \Omega$
6 级	$100\ \Omega \leq$ 接地电阻

1)不同大小的接地电阻,其改造难易程度不同,投入不同,即降阻改造投入的非线性;

2)不同大小的接地电阻对线路防雷效果贡献率不同,即降阻改造效果的非线性。

若简单采用降阻变化率这一线性关系来衡量改造效果不科学,因此采用接地电阻分级(级差非线性),通过“单位降级投入成本”来衡量改造效果。

1.2.3 降阻改造控制值确定

雷击杆塔时,雷电流流过杆塔,通过杆塔的接地装置流散到大地,在雷电流作用下,杆塔接地装置的接地电阻呈现出暂态电阻特性,适合用冲击接地电阻来表征,而输电线路的耐雷水平在很大程度上取决于杆塔的冲击接地电阻^[17-23]。通过改变杆塔冲击接地电阻,计算反击跳闸率,以 500 kV 酒杯杆塔为例,二者的关系曲线见图 1。

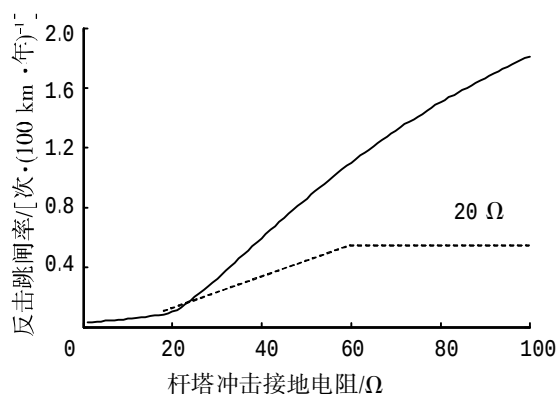


图 1 500 kV 酒杯杆塔反击跳闸率与接地电阻的关系

Fig. 1 Relationship of 500 kV glass type tower counterattack tripped rate and grounding resistance

冲击接地电阻阻值对杆塔反击跳闸率影响很大,反击跳闸率随杆塔冲击接地电阻增大很快,并且反击跳闸率都是先有一段增长较为缓慢,过了某一拐点后增长速度加快,再降低冲击接地电阻值对提高反击耐雷水平、降低反击跳闸率作用已经不是很明显,将杆塔接地电阻控制在曲线的拐点处,可以得到较好的投入产出比,故对于已符合标准的杆塔没有必要再花高昂的代价去获取更低的接地电阻。

根据理论计算数据,考虑到不同塔型其拐点会有差异,并结合不同电压等级线路的雷击跳闸率指标,将杆塔接地电阻控制在 20 Ω 以内,能够得到较好的效果。因此,文中取拐点 20 Ω 作为杆塔接地电阻的统一控制值。对改造前杆塔接地电阻就小于 20 Ω 的杆塔,不纳入分析;改造后杆塔接地电阻小于等于 20 Ω 的视为改造合格。

2 云南电网降阻措施效果评价

2.1 第 1 类改造效果评价

通过对云南电网近年来实施过杆塔第 1 类降阻改造的 2 455 基杆塔的样本数据进行分析,改造前接地电阻小于 20 Ω 的有 690 基, 占改造总数的 28.10%,其改造结果详见表 2。

表 2 第 1 类改造数值分析

Tab. 2 Numerical analysis of the first transformation

级别	描述	改造前数量/基	所占比例/%	改造后数量/基	所占比例/%
1 级	接地电阻 <10 Ω	387	15.76	1 304	53.12
2 级	10 Ω≤接地电阻<20 Ω	303	12.34	741	30.18
3 级	20 Ω≤接地电阻<30 Ω	191	7.78	372	15.15
4 级	30 Ω≤接地电阻<50 Ω	515	20.98	19	0.77
5 级	50 Ω≤接地电阻<100 Ω	428	17.43	15	0.61
6 级	100 Ω≤接地电阻	437	17.80	4	0.16
未明确	上报数据中无该项内容	194	7.90	0	0.00

改造后接地电阻小于 20 Ω 的占 74.35%，总体改造效果较好。且改造前接地电阻越小，其改造合格率越高。对于接地电阻超标，但超标不明显的杆塔,可优选采用第 1 类改造方式进行改造,并可以取得很好的效果,见图 2。

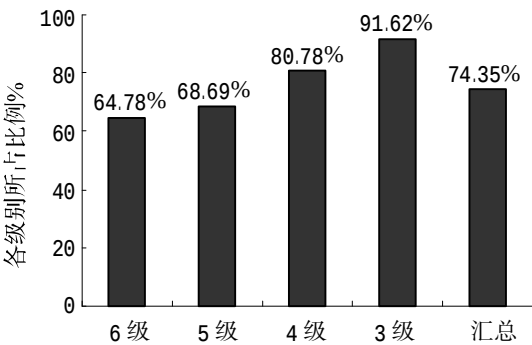


图 2 超标杆塔第 1 类改造合格率对比

Fig. 2 The first transformation pass rate comparison on overweight tower

2.2 第 2 类改造效果评价

近年来, 云南电网共实施过杆塔第 2 类降阻改

造 353 基,对其样本数据进行分析,其中,增设接地模块改造 99 基、增设空腹注水式接地装置改造 254 基。改造前接地电阻小于 20 Ω 的有 31 基,占改造总数的 8.78%, 其改造针对性明显强于第 1 类改造方式。第 2 类降阻改造结果详见表 3。

表 3 第 2 类改造数值分布

Tab. 3 Numerical analysis of the second transformation

级别	描述	改造前数量/基	所占比例/%	改造后数量/基	所占比例/%
1 级	接地电阻 <10 Ω	13	3.68	215	60.91
2 级	10 Ω≤接地电阻<20 Ω	18	5.10	75	21.25
3 级	20 Ω≤接地电阻<30 Ω	52	14.73	33	9.35
4 级	30 Ω≤接地电阻<50 Ω	101	28.61	19	5.38
5 级	50 Ω≤接地电阻<100 Ω	92	26.06	6	1.70
6 级	100 Ω≤接地电阻	77	21.81	5	1.42
未明确	上报数据中无该项内容	0	0.00	0	0.00

增设空腹注水式接地装置改造,对接地电阻大的杆塔(6 级、5 级)降阻效果明显,而对接地电阻小的杆塔(4 级、3 级)降阻效果较差。该法适用于杆塔接地电阻很大,且降阻困难的杆塔。对接地电阻超标,但超标不严重的杆塔不宜采用该方法。该方法与第 1 种改造方法形成互补,可配合使用。采用接地模块降阻,对 3~5 级杆塔降阻效果较好,但对于接地电阻过大的杆塔(>100 Ω)效果较差,详见图 3、4。

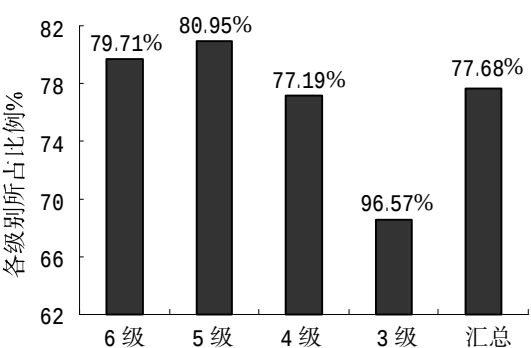


图 3 超标杆塔增设空腹注水式接地装置改造合格率对比

Fig. 3 Transformation pass rate comparison of add fasting affusion type earthing device on overweight tower

2.3 第 3 类改造效果评价

近年来,云南电网共实施过杆塔第 3 类降阻改

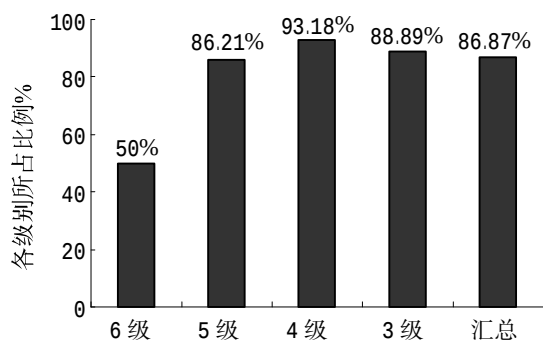


图 4 超标杆塔增设接地模块改造合格率对比

Fig. 4 Transformation pass rate comparison of add earthing module on overweight tower

造 47 基, 对其样本数据进行分析, 改造前接地电阻 $<20\ \Omega$ 的有 4 基, 占改造总数的 8.51%, 其改造针对性与第 2 类改造相似。第 3 类降阻改造结果详见表 4。

表 4 第 3 类改造数值分布

Tab. 4 Numerical analysis of the third transformation

级别	描述	改造前 数量/基	所占比 例/%	改造后 数量/基	所占比 例/%
1 级	接地电阻 $<10\ \Omega$	0	0.00	18	38.3
2 级	$10\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<20\ \Omega$	4	8.51	21	44.68
3 级	$20\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<30\ \Omega$	9	19.15	6	12.77
4 级	$30\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<50\ \Omega$	9	19.15	0	0.00
5 级	$50\ \Omega \leq$ 接地电阻 $<100\ \Omega$	7	14.89	0	0.00
6 级	$100\ \Omega \leq$ 接地电阻	18	38.30	2	4.25

表 5 3 类杆塔降阻改造方式的成本-效用对比表

Tab. 5 Cost-utility contrast table of three measures on tower dray reduction

改造类别	改造前杆塔电阻 级数之和/级	改造后杆塔电阻 级数之和/级	效用 B: 接地电 阻下降级数/级	成本 C: 改造 费用/万元	成本效用比 C/B/(元·级 ⁻¹)	排名
第 1 类	7 395	3 039	4 356	553.506 7	1 270.68	1
第 2 类	空腹注水措施	1 062	428	175.950 2	2 775.24	3
	增设接地模块	423	156	134.600 0	5 041.20	4
第 3 类	206	82	124	25.800 0	2 080.65	2

第 1 类改造方式的成本效用比最低, 即取得相同的降阻效果的前提下, 工程费用最少; 第 3 类改造方式的成本效用比次之; 第 2 类改造方式的成本效用比最高, 而且增设接地模块的成本效用比要高于空腹注水的成本效用比。

改造后接地电阻小于 $20\ \Omega$ 的占 81.4%, 总体改造效果较好, 见图 5。其改造效果与改造前杆塔的接地电阻大小关系不大, 改造效果主要受降阻剂型号及施工工艺影响。第 3 类改造虽短期效果明显, 但根据现场开展的检查发现, 与第 1、2 类改造相比, 第 3 类改造有明显加速地网腐蚀现象。

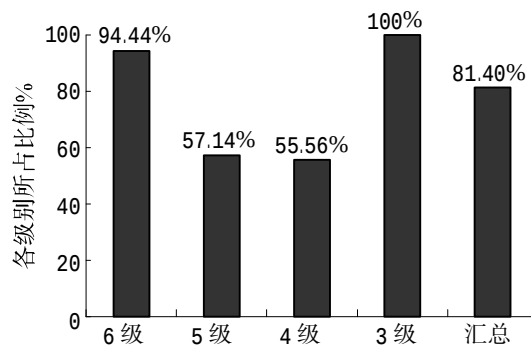


图 5 超标杆塔第 3 类改造合格率对比

Fig. 5 The third transformation pass rate comparison on overweight tower

3 降阻措施经济性分析

对降阻措施的经济性分析采用“成本 (C)/效用 (B)”评价方法:

$$A = \frac{C}{B} \quad (1)$$

式(1)中: A 为各类降阻措施每下降 1 级接地电阻所需的费用, 元/级; C 为成本, 用货币计量, 万元; B 为效用, 采用非货币单位“接地电阻下降级数”来计量, 级。

如式(1), 通过计算各类改造的成本效用比(C/B), 得到各类措施的单位降级费用, 以此评价各类降阻措施的经济性, 详见表 5(注: 表中费用为静态投资费用, 即直接分类计算多年改造费用, 未考虑多年来价格变动因素)。

4 降阻措施综合分析及建议

4.1 增设接地扁铁

优点: 效果稳定、对施工工艺要求不高, 不存在加速腐蚀现象, 改造成本最低。对原接地电阻小于

50 Ω 杆塔降阻效果较好, 改造合格率在 80% 以上, 接地电阻越小改造合格率越高。

缺点: 对原接地电阻大于 50 Ω 杆塔, 采用该类方式改造效果较差, 接地电阻越大, 改造合格率越低。若高接地电阻杆塔采用该方式改造存在以下不利因素: ①改造成本增加; ②改造合格率低; ③改造合格的是工频接地电阻, 但由于接地扁铁增长, 电感增加, 其冲击接地电阻下降效果不会很明显。

建议: 对于杆塔接地电阻虽超标但不明显的杆塔(接地电阻小于 50 Ω 的杆塔)宜首选该改造方式。施工中应注意: ①加强焊接工艺控制, 保证焊接质量; ②保证新增扁铁有足够埋深; ③回填土应夯实, 以防止加速扁铁腐蚀。

4.2 增设空腹注水装置

优点: 基本不存在加速腐蚀现象。对高接地电阻杆塔改造效果较好, 对改造前接地电阻大于 50 Ω 的杆塔改造合格率在 80% 以上, 与第 1 类改造方式具有较好的互补性。

缺点: 改造费用较高, 其费用是第 1 类改造的 2 倍。受厂家及施工工艺影响, 其改造效果存在很大差异。

建议: 对接地电阻超标严重的杆塔(接地电阻大于 100 Ω), 可考虑采用该方式改造, 但须关注生产厂家的选择并确保施工工艺。合理选择生产厂家、提高施工工艺是保证降阻改造效果的关键。

4.3 增设接地模块

优点: 基本不存在加速腐蚀现象, 改造效果稳定。对接地电阻在 100 Ω 以内的杆塔改造效果较好, 改造合格率在 80% 以上。其效果优于第 1 类改造方式, 且适用范围比第 1 类改造宽。

缺点: 改造费用很高, 是所有改造中费用最高的, 其费用是第 1 类改造的 4 倍。

建议: 该方式改造效果稳定, 但费用很高。若杆塔接地电阻为 50~100 Ω 范围内, 且通过增设接地扁铁很难降低接地电阻的, 可考虑采用该方式改造。

4.4 降阻剂

优点: 降阻效果明显, 无论改造前杆塔接地电阻大小, 均有明显的降阻效果, 适用范围广^[25-28]。虽单基改造费用较高, 但因降阻效果明显, 折算至每下降 1 级接地电阻所需的费用并不高, 在 4 种降阻措施中排名第二, 介于增设接地扁铁和空腹注水之间。

缺点: 对地网腐蚀严重; 降阻效果与降阻剂生产厂家及施工工艺关系较大, 改造效果存在较大分散性。

建议: 虽然改造效果明显, 但对地网的加速腐蚀

情况严重, 还需对不同厂家生产的降阻剂腐蚀性进行深入研究。在无研究成果前, 可试验性的小范围开展, 但不宜全面铺开。

5 结语

常用杆塔降阻措施可分为增设接地扁铁、增设空腹注水装置、增设接地模块和降阻剂降阻 4 种。它们各有优缺点, 且适用范围不同, 为了得到较好的效果及投入产出比, 应根据改造前杆塔的接地电阻、地质条件等合理选择。若改造前杆塔接地电阻在 50 Ω 以内应采用增设接地扁铁的方式进行改造。若接地电阻大于 50 Ω 且降阻困难可采用增设空腹注水装置或增设接地模块的方式加以改造。降阻剂虽有很好的降阻效果, 但从开挖检查情况看存在地网加速腐蚀情况, 仍需对降阻剂中长期效果进行分析与评估, 进一步积累运行经验, 开展深入的研究与分析。

参考文献:

- [1] 易 辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44-45.
YI Hui, CUI Jiang-liu. The present state and lightning protection of transmission line in China[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 44-45.
- [2] 马 仪, 李 明. 云南电网雷电定位监测系统的试运行分析[J]. 云南电力技术, 2006, 34(6): 5-7.
MA Yi, LI Ming. Commissioning analysis of lightning location monitoring system in Yunnan power grid [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2006, 34(6): 5-7.
- [3] 张 鹏, 陈宇民. 110 kV 输电线路防雷分析[J]. 云南电力技术, 2008, 36(5): 17-19.
ZHANG Peng, CHEN Yu-min. Analysis of 110 kV transmission lines lightning protection[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2008, 36(5): 17-19.
- [4] 何金良, 曾 嵘, 陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(三): 防护措施[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2917-2922.
HE Jin-liang, ZENG Rong, CHEN Shui-ming. Lightning protection study of transmission line, Part III: protection measures[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2917-2922.
- [5] 吴娅妮, 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.
WU Ya-ni, JIANG Wei-ping, ZHU Yi-ying, et al. Research on inner overvoltage in UHVDC transmission line caused by flashover to ground fault [J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 6-10.
- [6] 高 翔, 马 仪. 220 kV 同杆双回输电线路雷击跳闸分析[J]. 云南电力技术, 2008, 36(6): 21-22.

- GAO Xiang, MA Yi. The double transmission lines with rod of 220 kV lightning tripped analysis [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2008, 36(6):21-22.
- [7] 陈家宏, 吕军, 钱之银, 等. 输电线路差异化防雷技术与策略[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2891-2901.
- CHEN Jia-hong, LÜ Jun, QIAN Zhi-yin, et al. Differentiation technology and strategy of lightning protection for transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):2891-2901.
- [8] 覃保敏. 送电线路杆塔接地电阻不满足要求的原因分析[J]. 广西电力, 2010, 33(6): 46-47.
- QIN Bao-min. Reason analysis of unqualified grounding resistor of power deliver line tower [J]. Guangxi Electric Power, 2010, 33(6):46-47.
- [9] 陈宇民, 施勇, 张鹏. 杆塔工频接地电阻测试与误差分析[J]. 云南电力技术, 2008, 36(4):19-23.
- CHEN Yu-min, SHI Yong, ZHENG Peng. Tower power frequency with grounding resistance test error analysis [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2008, 36(4):19-23.
- [10] 罗真海, 陈雄一, 肖定辉. 杆塔接地系统中的薄弱环节及处理办法[J]. 高电压技术, 1997, 23(4):87-88.
- LUO Zhen-hai, CHEN Xiong-yi, XIAO Ding-hui. The vulnerable spot of the grounding system of poles & towers [J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(4):87-88.
- [11] 杨泽民, 肖勇, 樊灵孟, 等. 南方电网 500 kV 交流输电线路防雷策略及外绝缘合理配置方案研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(6):69-72.
- YANG Ze-min, XIAO Yong, FAN Ling-meng, et al. Research on anti-lightning strategy and external optimization configuration principle of 500 kV AC transmission line in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology Research, 2009, 3(6):69-72.
- [12] 苏庆福, 李景禄. 接地降阻措施的应用分析[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(2):84-88.
- SU Qing-fu, LI Jing-lu. Application analysis of grounding resistance reduction measures [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(2):84-88.
- [13] 马美君, 龙新刚. 高土壤电阻率变电站接地问题探讨[J]. 湖南水利水电, 2006(4): 75-76.
- MA Mei-jun, LONG Xin-gang. Discuss of high resistivity substation grounding problem [J]. Hunan Hydro & Power, 2006(4):75-76.
- [14] DL/T 621—1997. 交流电气装置的接地[S].
- DL/T 621—1997. Grounding for AC electrical installations[S].
- [15] 胡毅. 输电线路运行故障的分析和防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3):1-8.
- HU Yi. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3):1-8.
- [16] 袁虹娣. 输电线路雷害分析及防雷措施[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(5):380-383.
- YUAN Hong-di. Lightning disturbance analysis and lightning protection measures of transmission line [J]. Heilongjiang Electric Power, 2010, 32(5):380-383.
- [17] DL/T 620—1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- DL/T 620—1997. Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installation[S].
- [18] 吴伯华, 陈继东. 500 kV 线路避雷器的雷击过电压保护性能研究[J]. 电磁避雷器, 2002(3):27-32.
- WU Bo-hua, CHEN Ji-dong. Study on lightning overvoltage protection properties of 500 kV transmission line CMOA [J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(3):27-32.
- [19] 肖国斌. 应用线路避雷器提高交流输电线路耐雷水平研究[J]. 电磁避雷器, 2003(5):34-36.
- XIAO Guo-bin. Study on application circuit lightning arrester improve AC power lines of lightning resisting level [J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(5):34-36.
- [20] 赵淳, 阮江军, 李晓岚, 等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术, 2011, 27(2):290-296.
- ZHAO Chun, RUAN Jiang-jun, LI Xiao-lan, et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures [J]. High Voltage Engineering, 2011, 27(2):290-296.
- [21] 郭云峰. 接地降阻剂的发展与应用[J]. 东北电力技术, 2004(11):37-38.
- GUO Yun-feng. The development and application of electrolyte for decreasing soil resistance [J]. Northeast Electric Power Technology, 2004(11):37-38.
- [22] 植芝豹. 降阻剂的降阻作用分析[J]. 高电压技术, 1993, 19(1):79-82.
- ZHI Zhi-bao. The effect of resistance-reducing agent [J]. High Voltage Engineering, 1993, 19(1):79-82.
- [23] 胡毅, 王力农, 郑传广. 送电线路接地装置采用降阻剂的防腐问题分析[J]. 高电压技术, 1993, 19(1):79-82.
- HU Yi, WANG Li-nong, ZHENG Chuan-guang. Analysis of corrosion to proof problem in grounding equipment of transmission line using resistance reducing agent [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7):17-36.
- 许丹莉(1987—), 女, 硕士, 研究方向为调度自动发电控制。