

220 kV 升压站母线加装串抗后的雷电及操作过电压计算

丁喆¹, 吴嘉磊¹, 张宇¹, 胡进¹, 董宁¹, 贺诗涵²

(1. 上海外高桥发电有限责任公司, 上海 200120; 2. 西安科技大学, 西安 710600)

摘要: 升压站母线接入串联电抗器后使系统参数发生改变, 从而对过电压的传播过程和分布规律带来影响。为了某电厂扩容量工程的实施, 需要对 220 kV 母线串联电抗器的过电压进行计算分析。基于 ATP/EMTP 建立了包括发电机、变压器、串联电抗器、避雷器及输电线路等元件的电磁暂态模型, 计算了电抗器及站内关键设备安装处的雷电过电压及操作过电压, 并对绝缘配合安全性进行了分析, 结果表明现有避雷器配置可以有效保障设备绝缘安全。

关键词: 串联电抗器; 雷电入侵波; 操作过电压; 避雷器; 断路器

Lightning and Switching Overvoltages for 220 kV Booster Substation Busbar After Installation of Series Reactors

DING Zhe¹, WU Jialei¹, ZHANG Yu¹, HU Jin¹, DONG Ning¹, HE Shihan

(1. Shanghai Waigaoqiao Power Generation Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China)

Abstract: After connection of the busbar of the step-up substation to the series reactor, the system parameters remain unchanged, which in turn affects the propagation process and distribution of overvoltages. For the implementation of capacity expansion project of a power plant, it is necessary to calculate and analyze the overvoltages of 220 kV busbar series reactor. An electromagnetic transient model, including such components as generators, transformers, series reactors, arresters, and transmission lines, is set up by using ATP/EMTP. The lightning overvoltages and switching overvoltages at the reactor and the installation locations of key equipment in the station are calculated and the safety of insulation coordination is analyzed. The results show that the existing arrester configuration can effectively assure the insulation safety of the equipment.

Keywords: series reactor; lightning incoming wave; switching overvoltage; surge arrester; circuit breaker

0 引言

随着电网互联加深, 短路电流水平持续升高, 部分场景已逼近甚至超出断路器开断容量, 短路电流偏大已经成为电网安全运行的关键制约因素^[1-3]。目前电网常用的短路电流限制措施包括分层分区运行、主变分列运行、采用高阻抗设备、变压器低压侧串联电抗器等^[4-8]。其中, 串抗的应用最常见, 但是串抗的引入在改善系统稳定性的同时, 会改变站内过电压的分布与传播特性, 使雷电、操作过电压的能量振荡更复杂, 给电网带来新挑战^[9-10]。

雷害事故是电力系统事故中最为主要的诱因,

而雷击输电线路产生的侵入波, 是导致厂站电气设备雷击损坏的主要原因, 影响发电厂、变电站雷电侵入波过电压的因素很多^[11-12]。文献[13]指出设备雷电过电压幅值 U_c 与侵入波陡度、避雷器的残压、工作电压有关; 文献[14-15]研究表明, 进线段杆塔冲击接地电阻、输电线路绝缘水平、杆塔塔型、雷电流幅值、雷击位置及站内设备布置方式等参数的改变, 均会对雷电侵入波过电压水平产生影响。操作过电压同样也是电网暂态稳定研究的重要内容, 相比于低压配电网, 操作冲击在高压及超高压电网中造成事故的影响范围更大^[16]。对于长距离电缆线

收稿日期: 2025-12-04; 修回日期: 2025-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009800)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2023YFC3009800)。

路,合闸空载线路操作过电压对电缆的安全可靠运行不可忽视^[7],电抗器的参数、系统运行条件、开关特性以及网络结构等都会影响到操作过电压的幅值和波形^[10]。文献[18]表明串联电抗器的投切操作会在系统中产生复杂的电磁暂态过程,进而引发过电压,对设备绝缘和系统安全构成潜在威胁。由于升压站站内情况复杂,串抗的引入在控制短路电流的同时,会改变系统的参数,对站内设备和输电线路的操作和雷电产生严重影响。因此,有必要对投入串抗后升压站内的雷电和操作过电压进行研究计算,确定系统的雷电过电压及操作过电压水平。

本文以某电厂升压站 220 kV 母线串抗为例,使用 ATP/EMTP 电磁暂态仿真计算软件,对不同情况下 2 台百万千瓦机组投产后的升压站内各设备的雷电侵入波过电压和串联电抗器的操作过电压进行计算。

1 原始参数

随着区域电网的发展,个别分区供电能力不足,局部 220 kV 电网存在潮流输送瓶颈。某电厂扩容工程计划新增 2×100 万千瓦机组,综合考虑静态电

压安全、暂态功角、暂态电压和电压波动等方面的要求,机组接入 220 kV 电网,并将现有 4×32 万千瓦机组转为战略备用,本工程投运后可增强上海电网调峰能力。针对机组接入后 220 kV 母线短路电流超标问题,结合短路电流控制、工程可实施性、远期适应性等多方面因素,推荐在 220 kV 母线加 14 Ω 串抗,2 台机组并列运行,串抗可选择退出或投入运行,串联电抗器两端跨接 0.02 μF 的耦合电容器。

两台机组以发电机-变压器组形式接入新建 220 kV 升压站,采用双母双分段接线,本期共 8 回出线,分别送往 4 个变电站,推荐方案主接线如图 1 所示。方案中发电机采用两台机组并列运行,每台机组功率为 1 000 MW,功率因数为 0.9。主变容量 1170 MVA,短路阻抗百分数 20%,高压侧额定电压 236±2×2.5% kV。机组 1 与机组 2 进线通过 YJLW02-2 000 mm² 的电缆与电厂的 GIL 连接,机组 1 路径电缆长度为 550 m,机组 2 路径电缆长度为 420 m。8 回出线采用同塔双回架空线路,导线采用鼓型、逆相序排列形式,地线型号为 OPGW 光缆,72 芯,铝包钢。铁塔呼高取均值 24 m,平均档距取 400 m。

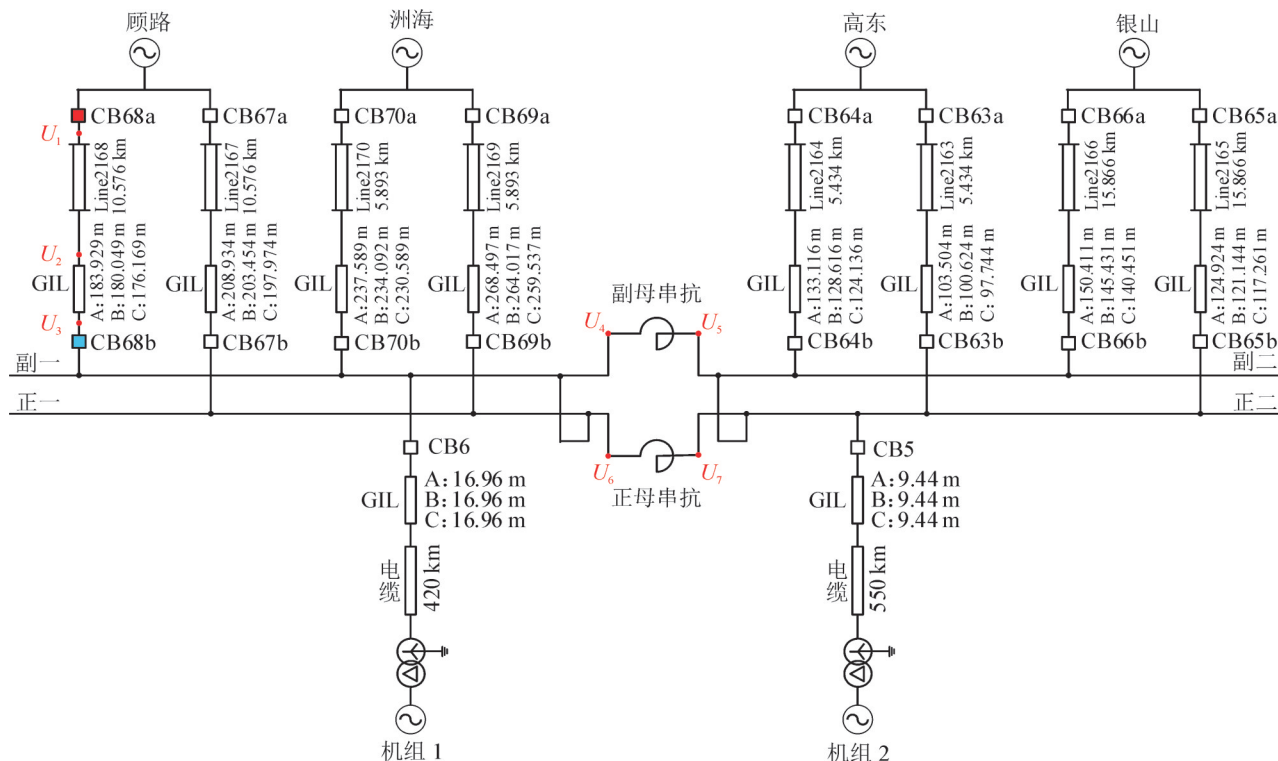


图1 电气主接线
Fig. 1 Electrical primary wiring diagram

2 计算模型

2.1 系统电源模型

将发电机-变压器支路等效成电源支路,其中电源电压根据潮流计算结果确定,发电机电抗计算

过程如式(1)-式(4)所示。

$$x_{d*}'' = 18.2\% \quad (1)$$

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{(27 \times 10^3)^2}{\frac{1000}{0.9} \times 10^6} = 0.656 \, \Omega \quad (2)$$

$$x''_d = x''_{d*} \times Z_N = 0.182 \times 0.656 = 0.119 \, \Omega \quad (3)$$

式中： x''_{d*} 为发电机直轴次瞬态电抗的标么值； U_N 为发电机额定电压； S_N 为发电机额定容量； x''_d 为发电机直轴次瞬态电抗的有名值； Z_N 为发电机的基准阻抗。

变压器电抗计算公式为

$$x_T = \frac{U_s \%}{100} \times \frac{U_N'^2}{S_N'} \times 10^3 = 0.2 \times \frac{236^2}{1\,170 \times 10^3} = 9.52 \, \Omega \quad (4)$$

式中： $U_s \%$ 为变压器的短路电压百分比； S_N' 为变

器额定容量； U_N' 为变压器额定电压。

将发电机电抗按变比折算到高压侧，之后与变压器电抗串联可得系统电源等值阻抗为 $18.612 \, \Omega$ 。

2.2 架空线路及杆塔模型

研究雷电侵入波及操作过电压时，输电线路采用 ATP/EMTP 中的 J.Marti 模型^[19-20]，该模型可以反映雷电流传播过程中随频率变化的特征阻抗和传播速度，也能分析地线和架空输电线路间的耦合效果。根据杆塔结构和导线截面尺寸，可得架空线路的建模参数如表 1 所示。

表 1 架空线路参数
Table 1 Parameters of overhead transmission lines

相序	内径/cm	外径/cm	$R_{DC}/\Omega/\text{km}$	水平距离/m	悬挂高度/m	最低高度/m	分裂数
1	0.42	1.68	0.046	-5.80	34.27	24.27	2
2	0.42	1.68	0.046	-7.27	27.47	17.47	2
3	0.42	1.68	0.046	-8.31	24.16	14.16	2
4	0.42	1.68	0.046	8.31	24.16	14.16	2
5	0.42	1.68	0.046	7.27	27.47	17.47	2
6	0.42	1.68	0.046	5.80	34.27	24.27	2
0	0	0.80	0.322	-6.30	41.71	32.46	0
0	0	0.80	0.322	6.30	41.71	32.46	0

在计算雷电反击、绕击线路时雷电波等值频率高达几百千赫兹，雷电流通过塔身时会呈现明显的波过程，在雷电冲击电流作用下距塔顶不同位置会呈现不同的电位。因此分析雷电暂态过程时，杆塔需要采用多波阻抗模型更能反映实际杆塔的多波阻抗分布参数模拟^[21]。杆塔的等效模型如图 2 所示，根据杆塔的实际尺寸，可分别求出支柱波阻抗 Z_{Tk} 、支架波阻抗 Z_{Lk} 及横担波阻抗 Z_{Ak} ，实际尺寸及计算结果如表 2-3 所示。

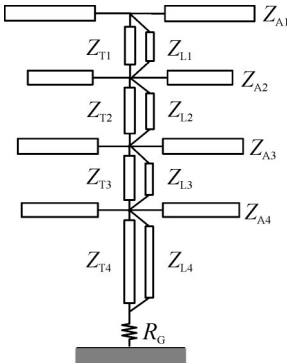


图 2 220 kV 杆塔的等效模型图
Fig. 2 Equivalent model diagram of 220 kV transmission tower

表 2 220 kV 线路 1 号杆塔长度及波阻抗
Table 2 Length and wave impedance of No.1 transmission tower on 220 kV line

主干及支架的长度及波阻抗值	横担的长度及波阻抗值
$L_1=41.71 \text{ m}$, $Z_{T1}=118 \, \Omega$, $Z_{L1}=1\,063 \, \Omega$	$L_{Z_{A1}}=6.3 \text{ m}$, $Z_{A1}=238 \, \Omega$
$L_2=37.21 \text{ m}$, $Z_{T2}=110 \, \Omega$, $Z_{L2}=994 \, \Omega$	$L_{Z_{A2}}=5.8 \text{ m}$, $Z_{A2}=236 \, \Omega$
$L_3=30.41 \text{ m}$, $Z_{T3}=95 \, \Omega$, $Z_{L3}=856 \, \Omega$	$L_{Z_{A3}}=7.27 \text{ m}$, $Z_{A3}=211 \, \Omega$
$L_4=24.16 \text{ m}$, $Z_{T4}=81 \, \Omega$, $Z_{L4}=726 \, \Omega$	$L_{Z_{A4}}=8.31 \text{ m}$, $Z_{A4}=189 \, \Omega$

表 3 220 kV 线路其余杆塔长度及波阻抗
Table 3 Lengths and wave impedance values of the remaining transmission towers on 220 kV line

主干及支架的长度及波阻抗值	横担的长度及波阻抗值
$L_1=51.7 \text{ m}$, $Z_{T1}=158 \, \Omega$, $Z_{L1}=1\,422 \, \Omega$	$L_{Z_{A1}}=6 \text{ m}$, $Z_{A1}=357 \, \Omega$
$L_2=45.3 \text{ m}$, $Z_{T2}=155 \, \Omega$, $Z_{L2}=1\,395 \, \Omega$	$L_{Z_{A2}}=5.3 \text{ m}$, $Z_{A2}=320 \, \Omega$
$L_3=38.2 \text{ m}$, $Z_{T3}=136 \, \Omega$, $Z_{L3}=1\,224 \, \Omega$	$L_{Z_{A3}}=5.6 \text{ m}$, $Z_{A3}=309 \, \Omega$
$L_4=31.1 \text{ m}$, $Z_{T4}=117 \, \Omega$, $Z_{L4}=1\,053 \, \Omega$	$L_{Z_{A4}}=5.9 \text{ m}$, $Z_{A4}=290 \, \Omega$

2.3 绝缘子闪络模型

本文采用规程法,即 50% 闪络电压作为判断绝缘子是否闪络的依据,使用 ATP/EMTP 中的压控开关模拟绝缘子的闪络。压控开关在稳态时始终为打开状态,当开关两端电压的绝对值超过 50% 闪络电压时,开关元件闭合,即代表绝缘子串发生闪络。绝缘子闪络电压 $U_{50\%}$ 计算公式为

$$U_{50\%}=533L_x+132 \tag{5}$$

式中, L_x 为绝缘子串长度。本文中绝缘子串长度为 2.94 m,根据式(5),可计算出绝缘子的闪络电压为 $U_{50\%}=1\,700\text{ kV}$ 。

2.4 电缆、GIS 及 GIL 母线模型

电缆单位长度电容和电感分别为 $0.214\text{ }\mu\text{F/km}$ 和 0.449 mH/km ,由单位长度电容和电感可计算得到元件参数波阻抗为 $45.8\text{ }\Omega$,波速为 $1.02\times 10^8\text{ m/s}$ 。GIS 母线模型以及 GIL 线路模型选用 ATP/EMTP 软件中的 LINEZT 模块进行搭建,GIL 模块的波阻抗为 $69.7\text{ }\Omega$,波速为 $2.99\times 10^8\text{ m/s}$ 。

2.5 雷电流模型

根据相关规程^[22],雷电流模型采用 Cigre 推荐的 2.6/50 μs 双指数标准雷电流源进行模拟,雷电流极性为负极性,其函数 $i(t)$ 公式为

$$i(t)=A(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \tag{6}$$

式中: A 为雷电波幅值,kA; α 、 β 为与雷电波的波头时间和波尾时间有关的常数。

计算设备的反击雷电过电压时,采用负极性雷电流幅值为 250 kA 作为雷击杆塔塔顶的反击雷电流幅值,利用式(7)可计算上海负极性雷电流幅值的概率,其对应的超过雷电流幅值概率为 0.52%。

$$P_1=\left[1+(I/26.669)^{2.344}\right]^{-1} \tag{7}$$

线路的绕击耐雷水平取决于线路、避雷线在杆塔上的布置结构及采取的雷电防护措施^[23-27],综合考虑绝缘子闪络特性,本文采用 10 kA 的绕击雷电流计算设备的绕击雷电过电压。依据规程^[28],当雷

电流为 250 kA 时,雷电通道波阻抗 Z_0 约为 $300\text{ }\Omega$;当雷电流为 10 kA 时, Z_0 约为 $2\,000\text{ }\Omega$ 。

2.6 避雷器模型

升压站内避雷器配置如下:主变路径上变压器二次侧、GIL 进线端、GIS 母线上以及串抗两侧装设避雷器,8 回出线侧网电源端装设避雷器。前者额定电压为 192 kV,雷电冲击残压为 496 kV;后者额定电压为 204 kV,雷电冲击残压为 532 kV。避雷器建模时采用 ATP/EMTP 中的非线性电阻,其伏安特性见表 4。

表4 避雷器 V-A 特性
Table 4 V-A characteristics of surge arresters

电流/A	额定电压/kV	
	192	204
0.001	288	296
0.010	298	319
100.000	363	426
1 000.000	399	460
2 000.000	421	473
10 000.000	496	532

3 雷电过电压的计算结果及分析

由于输电线路存在一定的电晕损耗,雷电波在沿线路传播时将会逐渐地衰减,距离变电站越远,则雷电侵入波的衰减程度越大^[29-30]。考虑最严重的工况,本文分别计算反击、绕击两种雷击类型下的过电压,选取顾路侧(方式 1)、洲海侧(方式 2)、高东侧(方式 3)、银山侧(方式 4)的 1 号杆塔为雷击点,计算变电站辅助设备各节点的最大雷电过电压水平。

计算中雷电流波形为 2.6/50 μs ,反击时取幅值 250 kA,绕击时取幅值 10 kA。变电站内各设备及串联电抗器的雷电过电压水平如表 5 所示。其中,方式 1 断路器、电抗器端子对地及电抗器两端的过电压波形如图 3-5 所示。

表5 各设备的最大雷电过电压
Table 5 Maximum lightning overvoltage on various equipment

设备节点	kV							
	方式1		方式2		方式3		方式4	
	反击	绕击	反击	绕击	反击	绕击	反击	绕击
出线套管	518.24	463.78	515.96	487.09	516.91	461.53	519.43	461.61
隔离开关	462.92	431.86	453.69	432.19	430.86	429.78	425.70	440.31
断路器	465.81	431.78	447.38	432.08	427.37	429.59	424.88	439.50
电抗器端子	467.16	430.43	442.81	431.60	503.42	430.04	505.30	430.36
电抗器两端	596.32	551.35	608.36	550.88	592.52	553.39	598.38	549.02
变压器	467.15	446.06	469.35	446.29	470.03	440.09	469.89	439.99

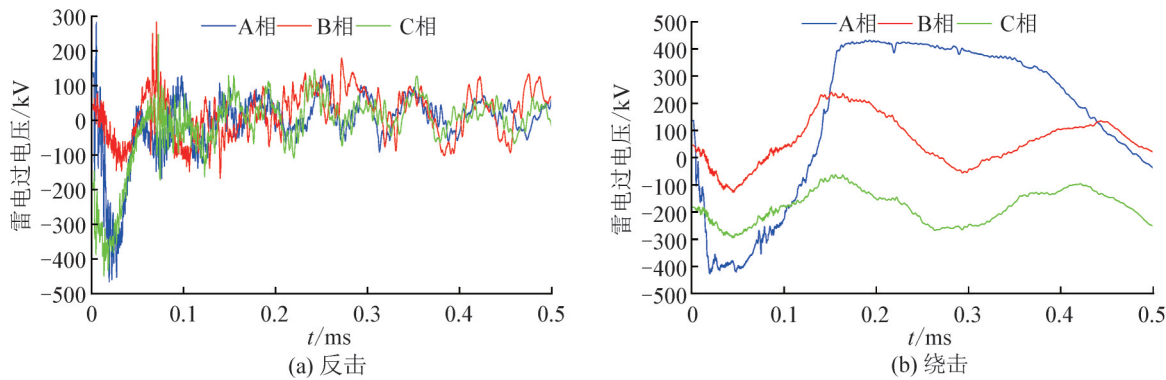


图3 方式1顾路2167断路器的雷电过电压
Fig. 3 Lightning overvoltage of Gulu 2167 circuit breaker under mode 1

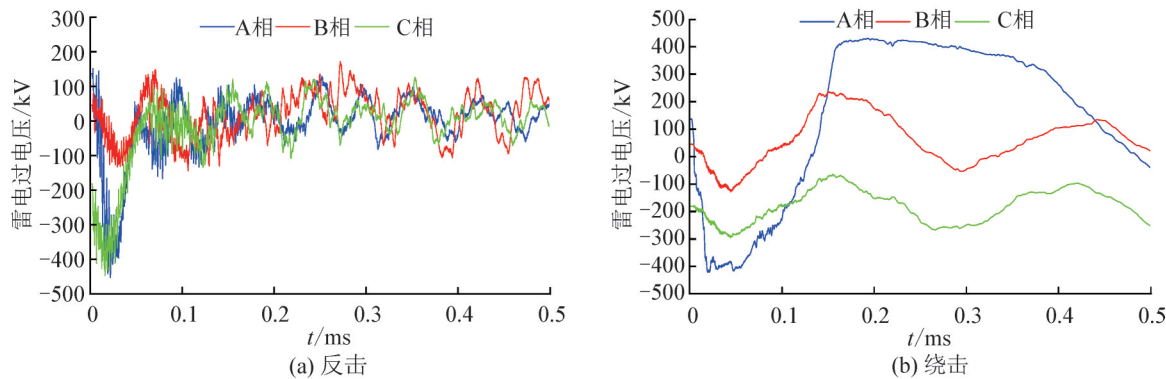


图4 方式1电抗器端子的雷电过电压
Fig. 4 Lightning overvoltage of the reactor terminals under mode 1

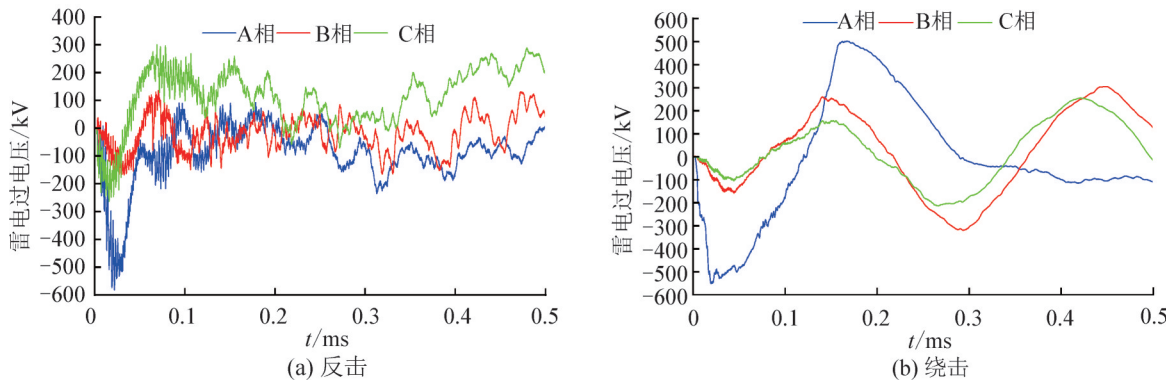


图5 方式1电抗器两端的雷电过电压
Fig. 5 Lightning overvoltage across both ends of the reactor under mode 1

将上述结果中各设备的最大雷电过电压水平进行统计,并与其绝缘水平对比,对比结果如表6所示,可见各设备最大过电压水平均未超出其冲击耐受水平,且安全裕度均大于40%。

表6 设备的最大雷电过电压及安全裕度
Table 6 Maximum lightning overvoltage and safety margin of equipment

设备	设备绝缘水平/kV	反击过电压最大值/kV	反击安全裕度/%	绕击过电压最大值/kV	绕击安全裕度/%
出线套管	950	519.43	45	487.09	48.73
隔离开关	950	462.92	51	440.31	53.65
断路器	950	465.81	51	439.50	53.74
电抗器对地	1050	505.30	52	431.60	58.90
电抗器两端	1050	598.38	43	553.39	47.30
变压器	950	470.03	51	446.29	53.02

4 操作过电压的计算结果及分析

在计算操作过电压时,为了充分考虑合闸相角变化对过电压的影响,采用统计开关,在一个工频周期内每 3° 计算一次,随机生成 120 组合闸时间,之后对计算结果进行统计分析得到 2% 过电压。在进行三相合闸和单相重合闸时各出线的断路器的操作过电压结果如表 7 所示,投入电抗器时电抗器端子及端子对地的过电压幅值如表 8 所示。

各出线在三相合闸空载线路、单相重合闸以及串联电抗器投切操作过程中的过电压水平仿真结果表明,某电厂 2×1 000 MW 机组接入工程中各

220 kV 出线的操作过电压水平完全满足规范要求。根据 GB/T 50064—2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范,220 kV 系统操作过电压不宜大于 3.0 p.u.(相对地),串联电抗器的操作冲击绝缘水平 550 kV(峰值),三相合闸空载线路和单相重合闸的最大过电压分别为 2.401 p.u.和 2.53 5 p.u.,均低于国家标准 3.0 p.u. 限值。串联电抗器在各类工况下的绝缘性能良好,其端子间和对地操作冲击电压最大值分别为 127.276 kV 和 301.448 kV,电抗器投切时对地最大冲击电压为 209.147 kV,均远低于 550 kV 的额定绝缘水平,验证了工程设计的合理性和设备选型的可靠性。

表 7 各出线断路器操作时的操作过电压
Table 7 Switching overvoltage during operation of each outgoing circuit breaker

设备节点	顾路出线操作		洲海出线操作		高东出线操作		银山出线操作	
	三相合闸	单相重合	三相合闸	单相重合	三相合闸	单相重合	三相合闸	单相重合
线路出口	2.401	2.498	2.359	2.458	2.353	2.462	2.248	2.317
GIL出口	1.456	1.413	1.347	1.358	1.325	1.332	1.452	1.386
断路器	1.329	1.294	1.250	1.244	1.188	1.204	1.429	1.371

表 8 各种情况下电抗器的操作过电压汇总
Table 8 Summary of switching overvoltage of reactors under various conditions

操作方式		端子间	端子对地
顾路出线操作	三相合闸	111.849	277.421
	单相重合	94.121	270.040
洲海出线操作	三相合闸	81.462	258.221
	单相重合	86.697	257.368
高东出线操作	三相合闸	58.715	245.324
	单相重合	64.409	248.717
银山出线操作	三相合闸	127.276	301.448
	单相重合	113.241	288.012
正二母线侧串抗	三相合闸	0.287	207.218
副一母线侧串抗	三相合闸	0.290	209.147

5 结语

本文针对某电厂扩容量替代项目,计算了 220 kV 升压站各主要设备的雷电及操作过电压,主要结论如下:

1)各类雷电侵入波工况下,站内出线套管、断路器等关键设备的最大过电压峰值均低于其额定雷电冲击耐受水平,最小安全裕度 43%,满足绝缘配合要求,现有避雷器配置可满足设备雷电过电压保护需求。

2)升压站各出线在三相合闸和单相重合闸情况下的最大过电压分别为 2.401 p.u.和 2.535 p.u.,

过电压水平均满足规范要求。串联电抗器的操作过电压低于其雷电冲击绝缘水平,验证了工程设计和设备选型的可靠性。

参考文献

[1] 李峰,谢国栋,刘成国,等. 500 kV 线路串联电抗器研究与应用[J]. 农村电气化,2023(12):81-83.

LI Feng, XIE Guodong, LIU Chengguo, et al. Research and application of series reactors in 500 kV Transmission Lines[J]. Rural Electrification, 2023 (12):81-83.

[2] 余磊,杨春连,鲜万良. 500 kV 线路加装串联电抗器对线路保护的影响[J]. 科技风,2020(35):191-192.

YU Lei, YANG Chunlian, XIAN Wanliang. Influence of series reactor installation on 500 kV transmission line pro-

- tection[J]. Technology Wind, 2020(35):191-192.
- [3] 马飞越,陈磊,相中华,等.考虑燃弧区间的断路器非对称开断能力校核方法研究[J].高压电器,2023,59(10):21-29.
MA Feiyue, CHEN Lei, XIANG Zhonghua, et al. Research on verification method for asymmetric interrupting capacity of circuit breakers considering arc duration[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10):21-29.
- [4] 谢大为,刘玉娟,雷霆.电网短路电流限制措施的研究与应用[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2017,9(6):675-679.
XIE Dawei, LIU Yujuan, LEI Ting. Research and application of short-circuit current limiting measures in power grids[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(6):675-679.
- [5] 樊扬,吴丹莉,张步涵,等.广东500 kV电网短路电流来源及影响因素分析[J].南方电网技术,2015,9(8):83-87.
FAN Yang, WU Danli, ZHANG Buhuan, et al. Analysis of short-circuit current sources and influencing factors in Guangdong 500 kV power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8):83-87.
- [6] 郑涛,汤哲,张滋行,等.基于限流电抗器的统一潮流控制器故障穿越策略及其与保护的配合[J].电力自动化设备,2020,40(2):8-18.
ZHENG Tao, TANG Zhe, ZHANG Zixing, et al. Fault ride-through strategy of unified power flow controller based on current-limiting reactor and its coordination with protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2):8-18.
- [7] 王开白,付俊波,王震宇,等.应用于500 kV故障限流器的罐式快速开关研制[J].高压电器,2025,61(8):54-60.
WANG Kaibai, FU Junbo, WANG Zhenyu, et al. Development of tank type fast switch for 500 kV fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(8):54-60.
- [8] 周华,谢栋,宋美雅,等.基于统一潮流控制器的短路电流限制技术在浙江电网的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(5):168-172.
ZHOU Hua, XIE Dong, SONG Meiya, et al. Research on application of short-circuit current limiting technology based on unified power flow controller in Zhejiang power grid[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2021, 42(5):168-172.
- [9] 王一,单金华,张淦锋,等.HGIS限流串联电抗器对线路过电压的影响分析[J].浙江电力,2020,39(7):13-17.
WANG Yi, SHAN Jinhua, ZHANG Ganfeng, et al. Analysis of the impact of HGIS current-limiting series reactor on line overvoltage[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(7):13-17.
- [10] 曹京荣,陈杰,谭笑,等.10 kV一母多馈电缆线路过电压传递影响因素分析[J].电瓷避雷器,2024(1):131-140.
CAO Jingying, CHEN Jie, TAN Xiao, et al. Influence factors of overvoltage transfer in 10 kV bus with multiple feeders of cable line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1):131-140.
- [11] 周玉娟.500 kV气体绝缘输电线路雷电侵入波暂态特性分析[J].电瓷避雷器,2017(3):113-116.
ZHOU Yujuan. Analysis on transient characteristics of lightning invaded wave for 500 kV GIL[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3):113-116.
- [12] 徐剑伟,徐翔琳,徐细波,等.230/400 kV混压水电站出线同绝缘配置下雷电侵入波仿真计算[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(2):157-162.
XU Jianwei, XU Xianglin, XU Xibo, et al. Simulation calculation of lightning incoming waves under the same insulation configuration for outgoing lines of 230/400 kV mixed-voltage hydropower station[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2019, 52(2):157-162.
- [13] 罗喻扬,李化,江宇栋,等.基于网格法的工作电压下雷电侵入过电压研究[J].高电压技术,2023,49(6):2607-2614.
LUO Yuyang, LI Hua, JIANG Yudong, et al. Research on lightning incoming overvoltage under operating voltage based on grid method[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2607-2614.
- [14] 林安妮,黄永章,林伟芳,等.不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):116-122.
LIN Anni, HUANG Yongzhang, LIN Weifang, et al. Comparison of suppression effect of different dynamic reactive power compensation devices for transient overvoltage caused by HVDC system faults[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):116-122.
- [15] 田金虎,刘渝根,赵俊光. GIS升压站雷电侵入波过电压计算及其影响因素分析[J].高压电器,2021,57(12):74-82.
TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang. Calculation and influence factors analysis of lightning intruding overvoltage in GIS step-up station[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):74-82.
- [16] 李嘉明,于沛鑫,邓军波,等.基于EMTP仿真平台的超高压电缆操作过电压特性及其影响研究[J].智慧电力,2021,49(10):83-89.
LI Jiaming, YU Peixin, DENG Junbo, et al. Characteristics and influence of switching overvoltage in extra high voltage cables based on EMTP[J]. Smart Power, 2021, 49(10):83-89.

- [17]李超群,张嘉旻,谢伟,等. 500 kV 城市电缆线路过电压研究[J]. 华东电力,2012,40(5):869-872.
LI Chaoqun, ZHANG Jiamin, XIE Wei, et al. Overvoltage of 500 kV city cable line[J]. East China Electric Power, 2012, 40(5):869-872.
- [18]叶倩,李博江. 1 000 kV 特高压南昌站投切低压电抗器、电容器组过电压和过电流仿真计算[J]. 江西电力,2022,46(8):20-24.
YE Qian, LI Bojiang. Simulation calculation of overvoltage and overcurrent in switching low-voltage reactors and capacitor banks at 1 000 kV UHV Nanchang substation[J]. Jiangxi Electric Power, 2022, 46(8):20-24.
- [19]LIN Y, GUANGNING W, XIAOBIN C. An optimized transmission line model of grounding electrodes under lightning currents[J]. Science China(Technological Sciences), 2013, 56(2):335-341.
- [20]DE CONTI A, LEAL O E S, SILVA A C. Lightning-induced voltage analysis on a three phase compact distribution line considering different line models[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187:106429.
- [21]杨杰,韩永霞,张垭琦,等. 高海拔酒杯塔中复合绝缘子短尾波冲击闪络特性[J]. 高电压技术,2019,45(3):768-773.
YANG Jie, HAN Yongxia, ZHANG Yaqi, et al. Flashover performance of the composite insulators in cup-tower under the impact of short-wave in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3):768-773.
- [22]全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 绝缘配合 第二部分:使用导则:GB/T311. 2—2013[S]. 2013.
National technical committee for standardization of high voltage test techniques and insulation coordination. insulation coordination —Part 2: Application guide: GB/T 311. 2—2013[S]. 2013
- [23]小布穷,尼玛,岳嵩,等. 高海拔景观塔耐雷性能分析及提升措施研究[J]. 电测与仪表,2020,57(23):9-16.
XIAOBU Qiong, NI Ma, YUE Song, et al. Lightning withstand performance analysis and enhancement method of high-altitude landscape tower[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23):9-16.
- [24]周秀,逯梓来,白金,等. 35 kV 风电场架空集电线路不同防雷方式等同性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 212-220.
ZHOU Xiu, LU Zilai, BAI Jin, et al. Study on equivalence of different lightning protection methods for overhead power collection lines in 35 kV wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11):212-220.
- [25]占金涛,杨天翼,郭俊. 基于雷电分形模型的架空线路绕击特性分析试验[J]. 电力工程技术,2025,44(1):126-135.
ZHAN Jintao, YANG Tianyi, GUO Jun. Experimental analysis of flashover characteristics for overhead power lines based on the lightning fractal model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1):126-135.
- [26]张宗扬,康超,王致远,等. 接地故障下特高压直流换流站过电压特性及影响因素研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3):144-151.
ZHANG Zongyang, KANG Chao, WANG Zhiyuan, et al. Study on overvoltage characteristics and influencing factors of UHVDC converter station in grounding fault condition [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3):144-151.
- [27]岳嵩,王晓峰,朱真兵,等. 高海拔地区绝缘子并联间隙雷电冲击试验研究[J]. 电测与仪表,2024,61(2):89-94.
YUE Song, WANG Xiaofeng, ZHU Zhenbing, et al. Research on lightning impulse experiment of insulator strings with parallel gap at high altitude area[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2):89-94.
- [28]交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064—2014 [S]. 2014.
Code for design of overvoltage protection and insulation coordination of AC electrical installations: GB/T 50064—2014 [S]. 2014.
- [29]王科,胡逸,徐肖伟,等. 分层土壤下架空地线架设方案对感应雷过电压的影响[J]. 电瓷避雷器,2025(1):80-86.
WANG Ke, HU Yi, XU Xiaowei, et al. Influence of overhead ground wire erection scheme on induced lightning overvoltage under layered soil[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1):80-86.
- [30]唐滔,陈小月,王羽,等. 高海拔地区500 kV 线路降压运行工况下雷电侵入波过电压及避雷器优化配置[J]. 电力勘测设计,2023(7):1-6.
TANG Tao, CHEN Xiaoyue, WANG Yu, et al. Lightning intrusive wave overvoltage and optimal lightning arrester arrangement of 500 kV lines in step-down operation at high altitude[J]. Electric Power Survey & Design, 2023 (7):1-6.

作者简介:

丁喆(1989—),男,高级工程师,主要从事电力行业检修及技术管理工作。E-mail:dingcathaby@qq.com。