

# ±1100 kV 分层接入换流站短路电流计算 及地网设计研究

曾维雯, 韩毅博, 陈晨, 李浩原, 周思远, 谢龙

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 短路电流计算及接地设计是工程设计的重要内容, 对换流站的安全稳定运行具有重要意义。基于 ±1100 kV 分层接入的特高压古泉换流站, 对各种短路电流进行了计算, 并在考虑了避雷线、变压器中性点等对短路电流的分流作用后, 计算了换流站的入地短路电流。根据入地短路电流计算结果, 给出了换流站接地网设计方案及其安全性评价。对于分层接入的换流站, 应对不同的交流母线, 基于换流站各类运行工况计算不对称短路电流, 并取最大值校验地网设计指标。

**关键词:** 特高压直流换流站; 短路电流; 接地网; 设计方法

**中图分类号:** TM721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)03-0050-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210310

## Calculation of Short-circuit Current and Research on Design of Grounding Grid in ±1100 kV Converter Station with Hierarchical Connection

Zeng Weiwen, Han Yibo, Chen Chen, Li Haoyuan, Zhou Siyuan, Xie Long

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering  
Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** Short-circuit current calculation and grounding design both are the important parts of engineering design, which is of great significance to the safe and stable operation of converter station. Based on Guquan ±1100 kV UHVDC converter station with hierarchical connection, different levels of short-circuit current are calculated. After considering the shunting effect of short-circuit current via lightning shield wires and transformer neutral point, the grounding fault current of converter station is calculated. According to the grounding fault current, design scheme of grounding grid for UHVDC converter station and its safety evaluation are proposed. For converter stations with hierarchical connection, the asymmetric short-circuit current should be calculated for different AC buses based on variant operating situations, and the maximum value of short-circuit current should be used to verify the ground grid design indicators.

**Key words:** UHVDC converter station; short-circuit current; grounding grid; design method

## 0 引言

昌吉—古泉 ±1100 kV 特高压直流输电工程是目前世界上具备最高电压等级、最大输送容量、最远输送距离、最先进技术的特高压直流输电工程。昌吉—古泉特高压工程的建设, 极大缓解了华东地区“十三五”期间电力供需矛盾, 满足了受端地区经济

及负荷快速增长需要, 保障了华东地区社会经济持续快速发展<sup>[1]</sup>。吉泉直流工程的勘测设计、设备制造、施工调试经验, 为今后国内外直流工程建设提供了有价值的技术资料。±1100 kV 古泉换流站是吉泉直流受端换流站, 换流站网侧采用分层接入<sup>[2]</sup>方式, 分别接入 1000 kV 和 500 kV 交流系统。短路电流计算及接地设计是工程设计的重要内容, 随着电网规模逐步扩大, 系统接地短路电流也呈现上升趋势

势,对人身安全、弱电设备抗干扰性能等方面也提出了更高的要求,因此,接地网的可靠设计对换流站的安全稳定运行具有重要意义。对于古泉这种具有分层接入方式的特殊换流站,需要对不同的接入点,基于换流站各种运行方式来计算短路电流,并用于指导设备选型和接地网设计。

## 1 换流站分层接入特点

特高压换流站交流常规接入方式和分层接入方式如图1所示。常规接入方式为单层接入500 kV或750 kV系统,全部直流功率接入单个交流落点,不利于电网潮流疏散;分层接入方式将换流变压器网侧分别接入500 kV和1000 kV系统,改善了直流功率在不同电压层级电网的分布情况,并降低了交流电网电压失稳风险<sup>[3]</sup>,增强了电网运行的可靠性和稳定性。

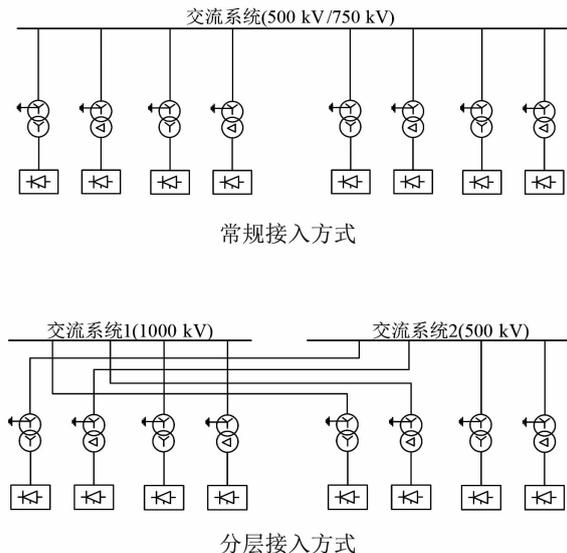


图1 换流站接入方式

## 2 系统短路电流计算

### 2.1 系统参数

换流站系统接线如图2所示。基准容量  $S_j = 100$  MVA,基准电压  $U_{j1-1000} = 1050$  kV,  $U_{j1-500} = 525$  kV,  $U_{j2} = 10.5$  kV。

#### 1) 系统阻抗

根据系统资料,1000 kV 系统等值正、负序阻抗  $X_{11-1000} = X_{21-1000} = 0.002 025$ , 系统零序等值阻抗  $X_{01-1000} = 0.002 398$ ; 500 kV 系统等值正、负序阻抗

$X_{11-500} = X_{21-500} = 0.002 398$ , 系统零序等值阻抗  $X_{01-1000} = 0.002 69$ ; 1000 kV 与 500 kV 等值正、负序阻抗  $X_{11-1000-500} = X_{21-1000-500} = 0.040 2$ , 系统零序等值阻抗  $X_{01-1000-500} = 0.628 5$ 。

#### 2) 换流变压器参数

8 组容量为  $S_{e1} = 3 \times 587.1$  MVA 换流变压器, 低端 4 组连接 1000 kV 母线, 高端 4 组连接 500 kV 母线, 其中 YN/y 和 YN/d 连接各 4 组, 每组由 3 台单相双绕组变压器组成, 阻抗压降  $U_{d1} = 22\%$ 。可计算得单组换流变压器正、负、零序等值阻抗为  $X_{12} = X_{22} = X_{02} = 0.012 49$ 。

#### 3) 高压站用变压器参数

2 台容量为  $S_{e2} = 40$  MVA 的 500 kV/10 kV 三相变压器, 阻抗压降  $U_{d2} = 12\%$ 。可计算得单台高压站用变压器正、负、零序等值阻抗为  $X_{13} = X_{23} = X_{03} = 0.3$ 。

### 2.2 三相对称短路电流计算

换流站系统正、负序等值阻抗如图3所示。

图3中  $X_{11-1000}$ 、 $X_{11-500}$ 、 $X_{11-1000-500}$  为系统正序等值阻抗,  $X_{13}$  为单台 500 kV/10 kV 高压站用变压器正序等值阻抗。三相对称短路电流计算如式(1)所示<sup>[4]</sup>。

$$I_d^{(3)} = I_j \cdot \frac{1}{X_{1\Sigma d}} \quad (1)$$

式中:  $I_d^{(3)}$  为三相对称短路电流, kA;  $I_j$  为基准电流, kA;  $X_{1\Sigma d}$  为正序组合阻抗(标么值)。

三相对称短路电流计算结果如表1所示。

表1 三相对称短路电流计算结果

序号	位置	短路电流 $I_d^{(3)}$ /kA
1	$d_{1-1000}$ 点	28.45
2	$d_{1-500}$ 点	48.47
3	$d_2$ 点	18.20

### 2.3 两相短路电流计算

两相对称短路电流计算如式(2)所示<sup>[4]</sup>。

$$I_d^{(2)} = I_j \times \sqrt{3} \times \frac{1}{X_{1\Sigma d} + X_{2\Sigma d}} \quad (2)$$

式中:  $I_d^{(2)}$  为两相对称短路电流, kA;  $X_{2\Sigma d}$  为负序组合阻抗(标么值)。

两相短路电流计算结果如表2所示。

表2 两相短路电流计算结果

序号	位置	短路电流 $I_d^{(2)}$ /kA
1	$d_{1-1000}$ 点	24.64
2	$d_{1-500}$ 点	41.98
3	$d_2$ 点	15.76

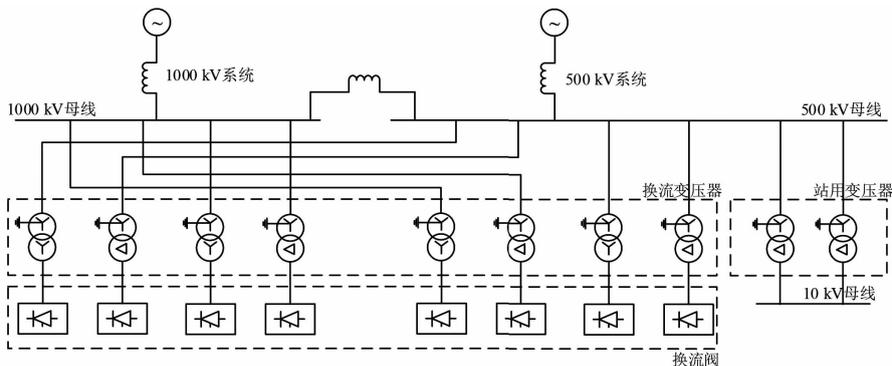


图 2 换流站系统接线

## 2.4 两相接地及单相短路电流计算

两相接地及单相短路需考虑零序网络的影响,其中 YY 变压器零序阻抗为无穷大, YΔ 变压器零序阻抗与正序阻抗相同<sup>[4]</sup>。换流站系统零序等值阻抗如图 4 所示,图中  $X_{01-1000}$ 、 $X_{01-500}$ 、 $X_{01-1000-500}$  为系统零序等值阻抗,  $X_{02}$  为换流变压器零序阻抗,  $X_{03}$  为高压站用变压器零序阻抗。

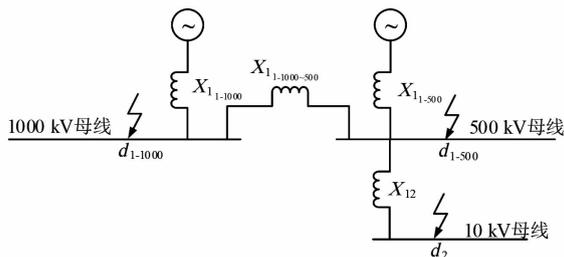


图 3 系统正、负序等值阻抗

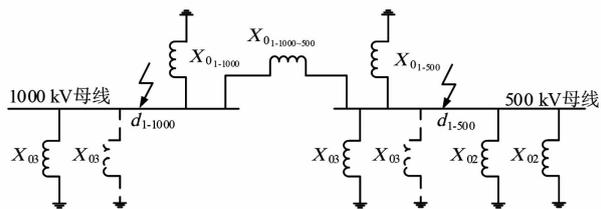


图 4 系统零序等值阻抗

单相接地短路电流计算如式(3)所示<sup>[4]</sup>。

$$I_d^{(1)} = \frac{3}{X_{1\Sigma d} + X_{2\Sigma d} + X_{0\Sigma d}} \times I_j \quad (3)$$

式中:  $I_d^{(1)}$  为单相接地短路电流, kA;  $X_{0\Sigma d}$  为零序组合阻抗(标么值)。

两相接地短路电流计算如式(4)所示<sup>[4]</sup>。

$$I_d^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \times \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma d} \cdot X_{0\Sigma d}}{(X_{2\Sigma d} + X_{0\Sigma d})^2}}}{X_{1\Sigma d} + \frac{X_{2\Sigma d} \cdot X_{0\Sigma d}}{X_{2\Sigma d} + X_{0\Sigma d}}} \times I_j \quad (4)$$

式中:  $I_d^{(2)}$  为两相接地短路电流, kA。

计入零序阻抗后,需考虑换流站不同的运行方式。换流站两相接地及单相短路电流计算结果如表 3 所示。

## 3 入地短路电流计算

### 3.1 交流入地短路电流

根据换流站交流侧接线方式,在站内 1000 kV 母线短路时,站内侧的短路电流通过 1000 kV 换流变压器阻抗、500 kV 换流变压器阻抗(由 1000 kV ~ 500 kV 系统互阻抗连接到 1000 kV 母线)经“本站变压器高压侧—本站母线—本站接地网金属导体(未经过大地土壤)—本站变压器中性点”流通,系统侧的短路电流通过 1000 kV 系统阻抗、500 kV 系统阻抗(由 1000 kV ~ 500 kV 系统互阻抗连接到 1000 kV 母线)经“系统内其他变压器高压侧—其他站母线—输电线路—本站母线—本站接地网—大地土壤—其他站接地网—其他站变压器中性点”流通。500 kV 母线短路时情况类似,站外短路则反之。因此,站内短路时,用于接地网设计的入地短路电流取系统侧短路电流分量;站外短路时取站内侧短路电流分量<sup>[5]</sup>。

站内点短路时的入地电流为

$$I_{g,in} = I_{\max(1,2)} \times X_{0\Sigma 23} / (X_{0\Sigma 23} + X_{01}) \quad (5)$$

站外点短路时的入地电流为

$$I_{g,out} = I_{\max(1,2)} \times X_{01} / (X_{0\Sigma 23} + X_{01}) \quad (6)$$

式中:  $I_{\max(1,2)}$  为单相接地短路电流和两相接地短路电流中的较大值, kA;  $X_{0\Sigma 23}$  为站内合成零序阻抗(标么值);  $X_{01}$  为系统零序合成阻抗(标么值)。

在计算合成阻抗时,同样需要考虑换流站不同运行方式的影响。换流站交流侧入地短路电流计算结果如表 4 所示。

表3 两相接地及单相短路电流计算结果

序号	运行方式	两相接地短路		单相短路	
		$I_d^{(2)}/\text{kA}$		$I_d^{(1)}/\text{kA}$	
		$d_{1-1000}$ 点	$d_{1-500}$ 点	$d_{1-1000}$ 点	$d_{1-500}$ 点
1	双极全压运行方式(4组换流变压器)	29.01	50.25	29.49	51.64
2	双极一极全压,一极半压运行方式(3组换流变压器:1000 kV 1组,500 kV 2组)	28.28	50.25	28.10	51.64
3	双极一极全压,一极半压运行方式(3组换流变压器:1000 kV 2组,500 kV 1组)	29.01	48.82	29.49	49.16
4	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:1000 kV 2组)	29.01	47.35	29.49	46.02
5	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:1000 kV 1组,500 kV 1组)	28.28	48.82	28.10	49.16
6	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:500 kV 2组)	27.53	50.25	26.38	51.64
7	单极半压运行方式(1组换流变压器:1000 kV 1组)	28.28	47.35	28.10	46.02
8	单极半压运行方式(1组换流变压器:500 kV 1组)	27.53	48.82	26.38	49.16

表4 交流侧入地短路电流计算结果

序号	运行方式	$d_{1-1000}$ 点 电流/kA		$d_{1-500}$ 点 电流/kA	
		$I_{g,in}$	$I_{g,out}$	$I_{g,in}$	$I_{g,out}$
		1	双极全压运行方式(4组换流变压器)	22.11	8.50
2	双极一极全压,一极半压运行方式(3组换流变压器:1000 kV 1组,500 kV 2组)	23.56	4.54	38.16	17.09
3	双极一极全压,一极半压运行方式(3组换流变压器:1000 kV 2组,500 kV 1组)	22.13	8.48	40.42	9.45
4	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:1000 kV 2组)	22.13	8.48	45.16	0.86
5	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:1000 kV 1组,500 kV 1组)	23.56	4.54	40.44	9.43
6	单极全压或双极半压运行方式(2组换流变压器:500 kV 2组)	26.35	0.03	38.19	17.06
7	单极半压运行方式(1组换流变压器:1000 kV 1组)	23.59	4.51	45.18	0.84
8	单极半压运行方式(1组换流变压器:500 kV 1组)	26.36	0.02	40.47	9.40

根据表4计算结果可知,未考虑避雷线分流系数时,1000 kV 站内短路时的最大入地短路电流为26.36 kA,站外短路时的最大入地短路电流为8.5 kA;500 kV 站内短路时的最大入地短路电流为45.18 kA,站外短路时的最大入地短路电流为17.11 kA。

### 3.2 直流入地短路电流

换流站直流侧最大入地短路电流可按式(7)计算<sup>[6]</sup>。

$$I_{\text{crest}} = I_d + \frac{I_{dN}}{\sqrt{3}d_x} \times \frac{U_{\text{dioabs max}}}{U_{\text{dioN}}} \quad (7)$$

式中: $I_{\text{crest}}$ 为晶闸管阀桥与平波电抗器之间直流极线对地短路时的短路电流,kA; $I_d$ 为长时间过负荷直流电流,kA; $I_{dN}$ 为额定直流电流,kA; $d_x$ 为直流侧感性压降(标么值); $U_{\text{dioabs max}}$ 为绝对最大空载电压,kV; $U_{\text{dioN}}$ 为标称理想空载电压,kV。

计算求得 $I_{\text{crest}} = 35.53$  kA。考虑到直流侧短路时将立即触发单极闭锁,瞬时短路电流持续时间短,因此,一般以交流侧的短路电流来考核接地网的接地电阻。

### 3.3 避雷线的分流

根据文献[7]给出的计算方法,当考虑线路避雷线的分流效应后,接地网入地短路电流如表5所示。

表5 入地短路电流(考虑分流系数后)

序号	位置	入地短路电流/kA	
		$I_{g,in}$	$I_{g,out}$
1	1000 kV	14.61	4.71
2	500 kV	22.19	8.40

根据文献[8]表B.0.3,取系统参数 $X/R = 20$ ,故障时延 $t_f = 0.35$  s,则故障衰减系数 $D_f = 1.1$ 。

因此,换流站最大接地故障不对称电流有效值为

$$I_G = \max(I_{g,in}, I_{g,out}) \times D_f = 24.41 \text{ kA} \quad (8)$$

## 4 接地网设计参数计算

### 4.1 接地体截面选择

接地引下线热稳定截面按式(9)选取<sup>[8]</sup>。

$$S_g \geq \frac{I_d^{(1)}}{c} \sqrt{t_e} \quad (9)$$

式中: $t_e$ 为短路的等效持续时间,取 0.35 s; $c$ 为接地线材料的热稳定系数,铜材取  $c = 249$ ;  $I_d$ 为短路电流, kA,考虑远期电网发展,取系统最大短路电流水平 63 kA。

代入计算得接地引下线最小热稳定截面为  $S_g$  为  $149.7 \text{ mm}^2$ 。水平接地网热稳定截面按  $0.75S_g$ , 取  $112.3 \text{ mm}^2$ 。考虑到铜材料的腐蚀,换流站水平接地网选择  $150 \text{ mm}^2$  镀锡铜绞线,引下线选择  $-50 \times 4 \text{ mm}$  的镀锡铜排,垂直接地体采用直径 17.2 mm、长 2.5 m 的镀铜钢棒。

### 4.2 接地电阻计算

接地电阻计算<sup>[8]</sup>如式(10)。

$$R = 0.5 \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} \quad (10)$$

式中: $\rho$ 为土壤电阻率,取  $186.42 \Omega \cdot \text{m}$ ;  $S$ 为站址面积,取  $275\,000 \text{ m}^2$ 。

计算得接地电阻值为  $0.178 \Omega$ 。

在采取一系列措施后<sup>[8]</sup>,接地电阻限制值按式(11)计算。

$$R_{\text{lim}} = \frac{5000}{I_G} \quad (11)$$

代入得  $R_{\text{lim}} = 0.204 \Omega$ 。因此该项目接地电阻满足要求。

### 4.3 安全电位校验

#### 1) 地电位升

由最大接地故障不对称电流和接地电阻计算值相乘可得最大地电位升  $U_{\text{gpr}}$  为 4.35 kV。

#### 2) 接触电位差

根据文献[8],计算接触电位差限制值  $U_t$  为 536 V,最大接触电位差  $U_{\text{tm}}$  为 771 V,考虑人站在绝缘地坪上,地表土壤电阻率取  $\rho_s = 5000 \Omega \cdot \text{m}$ ,则可提升接触电位差限制值  $U_t$  到 1511 V。

因此,当人站在土壤地表时,本站最大接触

电位差不满足要求;当人站在绝缘地坪上时满足要求。故要求在运行人员需要日常操作的区域设置绝缘地坪。

#### 3) 跨步电位差

根据文献[8],计算跨步电位差限制值为  $U_s$  为 1291 V,最大跨步电位差  $U_{\text{sm}}$  为 317 V。因此,本站最大跨步电位差满足要求。

#### 4) 软件仿真

采用 CYMGrd 软件对接地网进行仿真计算,安全电位仿真值分别如图 5 和图 6 所示。可看出软件仿真的接触电位差和跨步电位差与计算结果基本一致。

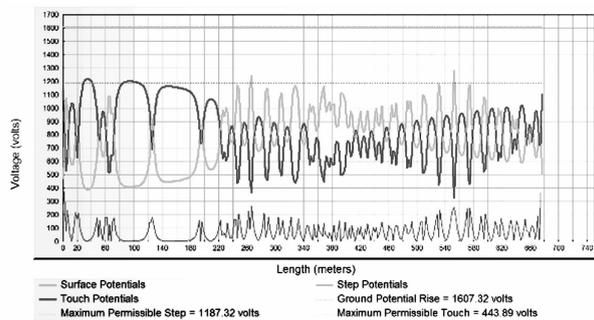


图 5 安全电位仿真值(未采用绝缘地坪)

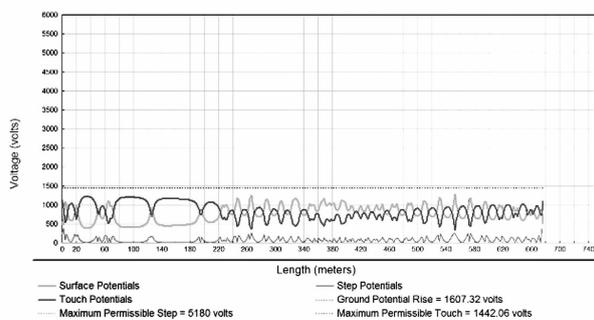


图 6 安全电位仿真值(采用绝缘地坪)

## 5 结 语

上面研究了  $\pm 1100 \text{ kV}$  分层接入交流系统的特高压换流站短路电流计算方法及接地网设计参数,得到的主要结论如下:

1) 换流站短路电流计算应选取三相短路、两相短路、两相接地、单相短路分别计算,其中三相短路、两相短路属于对称短路,用于校验设备选型;两相接地、单相短路属于不对称短路,用于校验接地网设计。

2)对于交流分层接入电网的换流站,要考虑不同的交流母线短路点,分别计算站内、站外短路的情况,并在考虑避雷线分流系数和故障衰减系数后,取最大值作为最大接地故障不对称电流。

3)接地网设计应校验接地体热稳定、安全电位、接地电阻控制指标,其中安全电位包括地电位升、跨步电位差、接触电位差。最大接地故障不对称电流下的地电位升不超过 5000 V,这一数值决定了全站接地电阻的控制值。

参考文献

[1] 佚名. 昌吉—古泉 ±1100 kV 特高压直流输电工程启动送电[J]. 电世界,2019,60(6):56.

[2] 王雅婷,张一驰,郭小江,等. ±1100 kV 特高压直流送受端接入系统方案研究[J]. 电网技术,2016,40(7):1927-1933.

[3] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.

[4] 程海花,寇宇,周琳,等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):61-70.

[5] 苗树敏,罗彬,刘本希,等. 考虑经济性与可靠性的大小水电短期协调消纳模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):101-109.

[6] 李晓婷. 电力市场环境风光互补分析[J]. 云南电力技术,2020,48(2):26-30.

[7] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 一定弃风光率下的水风光互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学,2018,36(7):215-218.

[8] 李健华,刘继春,陈雪,等. 含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J]. 电网技术,2019,43(12):4387-4398.

[9] 康本贤. 龙羊峡水光互补协调运行研究综述[J]. 西北水电,2020(1):23-26.

[10] 叶林,屈晓旭,么艳香,等. 风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):158-164.

[11] 苗树敏,滕子非,罗彬,等. 计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J]. 四川电力技术,2020,

[3] 徐式蕴,贺静波,樊明鉴,等. ±1100 kV 特高压直流分层接入后受端电网稳定特性及控制措施[J]. 电网技术,2019,43(5):1683-1689.

[4] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册电气一次部分[M]. 北京:中国电力出版社,1989.

[5] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding:IEEE 80—2013[S],2015.

[6] 高压直流换流站设计技术规定:DL/T 5223—2005[S],2005.

[7] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[8] 交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2011.

作者简介:

曾维雯(1990),女,硕士,工程师,从事变电一次设计工作。

(收稿日期:2020-12-21)

(上接第 6 页)

[3] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.

[4] 程海花,寇宇,周琳,等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):61-70.

[5] 苗树敏,罗彬,刘本希,等. 考虑经济性与可靠性的大小水电短期协调消纳模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):101-109.

[6] 李晓婷. 电力市场环境风光互补分析[J]. 云南电力技术,2020,48(2):26-30.

[7] 朱燕梅,陈仕军,黄炜斌,等. 一定弃风光率下的水风光互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学,2018,36(7):215-218.

[8] 李健华,刘继春,陈雪,等. 含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J]. 电网技术,2019,43(12):4387-4398.

[9] 康本贤. 龙羊峡水光互补协调运行研究综述[J]. 西北水电,2020(1):23-26.

[10] 叶林,屈晓旭,么艳香,等. 风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):158-164.

[11] 苗树敏,滕子非,罗彬,等. 计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J]. 四川电力技术,2020,

43(2):1-6.

[12] 丁航. 基于模拟退火粒子群算法的水光互补短期优化调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.

[13] Wu Hao, Zhou Yongzhi, Dong Shufeng, et al. Probabilistic Load Flow Based on Generalized Polynomial Chaos[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 820-821.

[14] Hockenberry, James R., Bernard C. Lesieutre. Evaluation of Uncertainty in Dynamic Simulations of Power System Models: The Probabilistic Collocation Method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1483-1491.

[15] Xiu Dongbin. Numerical Methods for Stochastic Computations: A Spectral Method Approach[M]. Princeton: Princeton University Press, 2010.

[16] 罗彬,李刚,苗树敏,等. 大规模电力系统潮流转移比多核并行批处理方法[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(21):5446-5454.

[17] 罗彬,李刚,程春田,等. 基于 PSD-BPA 的省地一体化电力系统设备参数管理策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):114-120.

作者简介:

罗彬(1987),男,博士,助理研究员,主要从事大规模水电系统优化理论与电网安全校核研究。

(收稿日期:2021-01-06)