

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.011

# 高土壤电阻率地区多回路变电站接地设计研究

蒋伟, 李根富, 王正华, 叶德意

(中国电力建设集团有限公司四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041)

**摘要:** 高土壤电阻率地区变电站降阻成本高, 在安全的前提下提高最大允许接地电阻可有效提高工程的经济性。研究了变电站出线数量对系统短路电流、故障分流系数和故障入地电流的影响, 以及对最大允许接地电阻的影响。其中, 针对简易分流系数计算公式的局限和误差, 建议在多回路变电站接地设计中采用计算机建模。基于国内西南地区某 220 kV 变电站, 采用 CDEGS 软件对其进行了接地分析计算。计算表明: 考虑变电站出线数量变化能减小最大故障入地电流设计值, 有效提高最大允许接地电阻, 从而提高工程的经济性。

**关键词:** 接地设计; 高土壤电阻率; 多回路; 故障入地电流; 分流系数

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0054-06

## Research on the Earth Grid Design of the Substation with Multi Circuit Transmission Line in High Soil Resistivity Area

JIANG Wei, LI Genfu, WANG Zhenghua, YE Deyi

(Power Construction Corporation of China Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041)

**Abstract:** By increasing the maximum allowed earth resistance on safety premise, the high cost of reducing the earth resistance of substations in high soil resistivity area can be effectively controlled. Therefore, this paper analysis the influence of circuit number to the system fault current, split factor and ground fault current, further the maximum allowed earth resistance. It is suggested to use computer simulation instead of simple formula to calculate the split factor, so as to overcome the problem of limitation and deviation of the formula. CDEGS is employed to analysis a 220 kV substation in the southwest of China. The results show that a smaller design value of ground fault current can be obtained when the circuit changes is considered. That is effective to increase the maximum allowed earth resistance and enhance economics.

**Key words:** earth design; high soil resistivity; multi circuits; ground fault current; split factor

接地电阻值是衡量变电站接地安全的重要指标, 根据我国变电站接地设计规程<sup>[1]</sup>规定, 大电流接地系统最大接地电阻应满足  $R \leq 2000/I_g$ ,  $I_g$  为最大故障入地电流。随着我国电网的发展, 系统短路容量迅速扩大, 一般情况下系统接地故障入地电流已经超过 10 kA, 因此该要求在实际工程中很难

满足。根据 IEEE Std. 80—2000<sup>[2]</sup> 对人体电击安全的要求, 采用人体允许接触电势差限值  $U_t$  和跨步电势差限值  $U_s$  作为最大允许接地电阻  $R_g$  的重要设计参数。目前国内通常在变电站内敷设碎石或高阻层以提高人体耐受电势差, 从而提高最大允许接地电阻。

我国西南地区变电站通常地处高土壤电阻率 ( $\rho \geq 500 \Omega \cdot m$ ) 地区, 需要结合地表敷设高阻层和降阻两种方案才能满足接地安全设计要求。然而, 对于部分位于超高土壤电阻率 ( $\rho \geq 2500 \Omega \cdot m$ ) 地区, 且占地面积小、短路电流大的变电站, 即使按上述工艺实施也难以满足接地系统安全要求, 必须采用特殊降阻措施<sup>[3]</sup>, 不仅增加了施工难度, 还提

收稿日期: 2016-04-02

基金项目: 中国电力建设集团有限公司四川电力设计咨询有限责任公司科技项目(KJ2013-B-7)

作者简介: 蒋伟(1986), 男, 四川德阳人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站工程设计和相关理论技术应用研究工作(e-mail) headla@163.com。

高了工程造价, 降低了工程的经济性。

在目前国内变电站接地系统设计中, 对于  $I_g$  的选取通常依据保守经验值按最大短路电流的 50% 选取<sup>[4]</sup>, 或依据规范<sup>[1]</sup>提供的故障电流分流系数简易计算公式进一步计算得到。随着接地理论发展和规范更新, 前者误差较大目前已不再使用, 后者是传统的避雷线分流计算方法, 未考虑杆塔接地电阻影响, 同样存在一定误差, 并且不适用于多回路出线变电站。国内部分科研单位研究与现场测量结果<sup>[5-6]</sup>显示, 目前常用的简易计算方法容易造成  $I_g$  选取过大, 与工程实际情况不符, 对接地电阻要求过高, 从而造成过度设计。

本文从对故障入地电流影响较大的出线数量角度出发, 以国内西南高土壤电阻率地区某 220 kV 变电站为例, 利用 CDEGS 接地计算软件, 研究得到出线数量对系统短路电流、故障分流系数和故障入地电流的影响规律, 以及对最大允许接地电阻的影响, 为高土壤电阻率地区变电站接地系统的经济性设计提供了依据。

### 1 入地电流影响因素

变电站内发生接地故障时, 故障入地电流  $I_g$  可按公式(1)计算:

$$I_g = (I_{max} - I_n)S_f \quad (1)$$

式中:  $S_f$  为站内故障时的分流系数, 定义为故障入地电流  $I_g$  占系统故障电流  $I_{max}$  的比值;  $I_n$  为经接地网直接流回变压器接地中性点的故障电流分量, 其余故障电流经架空地线或电缆外护套分流。

通常情况下, 发生站内故障时的  $I_g$  远大于站外

故障情况, 因此本文主要研究站内故障情况。

#### 1.1 分流系数

简易的故障分流系数计算公式<sup>[1,7]</sup>基于传统的避雷线分流计算, 采用考虑导地线耦合的理想序分量模型, 单回路出线  $S_f$  计算公式如式(2)所示。

$$S_f = 1 - \left[ e^{-\beta} \cdot \left( 1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \quad (2)$$

式中:  $Z_m$  为单位长度的相线与地线之间的互阻抗;  $Z_s$  为单位长度地线阻抗;  $e^{-\beta}$  为与档距平均长度、变电站接地电阻以及  $Z_s$  有关的系数。

公式适用于 10 个以上杆塔数量, 容易手动计算, 但是没有考虑杆塔接地电阻的影响, 因此存在一定的计算误差。此外, 由于只能计算单回路出线情况, 与实际工程运行情况不符, 因此具有一定的局限性。

为计算多回路出线情况下的故障分流, 应考虑系统故障电流在复杂电力系统各种分流路径。以架空出线为例, 故障电流分流情况如图 1 所示。

为准确计算  $S_f$ , 需要得到每条出线的故障电流  $I_f$ , 并逐线逐档距计算地线分流电流  $I_d$  和铁塔入地电流  $I_t$ , 以及网络中各变电站接地网入地电流  $I_g$ 。建模及计算工作量巨大, 远非人力所能求解, 通常采用专业软件建模计算。

利用计算机数值求解电流分布的经典计算方法<sup>[8-9]</sup>最早由加拿大 Dawalibi F 提出。该方法基于相分量模型, 考虑导地线互阻抗、变电站及杆塔接地电阻, 依据基尔霍夫电压定律和网孔电流列出回路方程, 并采用单侧消去法或双侧消去法求解。该方法符合工程实际, 准确度较高, 在此基础上加拿

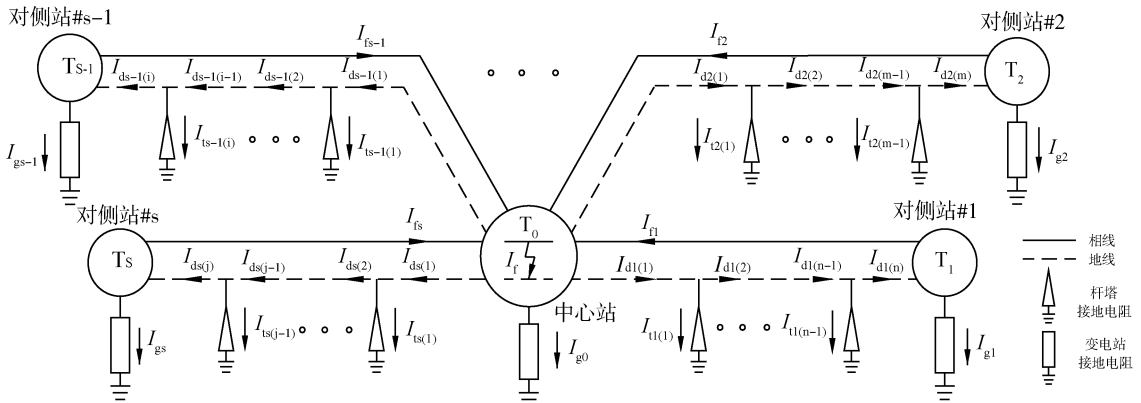


图 1 电力系统故障电流分流示意图

Fig. 1 Schematic of fault current split flow in power system

大 SES 公司开发了 CDEGS 商业软件, 并为我国规范所引用。

与传统方法结合, 引入变压器相分量模型<sup>[10-11]</sup>, 考虑线路合并分叉等结构变化<sup>[12]</sup>, 以及 OPGW 和普通地线构成的双地线模型<sup>[13]</sup>等可进一步提高计算准确度。此外, 采用 PSCAD<sup>[5]</sup> 和 ATP/EMTP<sup>[14]</sup> 等仿真软件对输变电系统进行建模计算具有较好的可视化操作性。根据目前研究结论<sup>[15]</sup>, 变电站接地电阻显著影响接地网和地线的分流; 线路参数, 包括杆塔档距和档数、杆塔接地电阻、地线材质和出线数量等对分流系数均有影响, 其中地线材质和出线数量对分流系数影响显著, 塔形紧凑和线路同塔多回等情况对地线分流影响不大; 变压器铭牌参数和中性点接地情况几乎不改变接地网和地线的相对分流能力。各因素对分流系数的影响变化规律可总结为:

- 1) 出线回路越多, 分流系数越小。
- 2) 变电站接地电阻越大, 分流系数越小。
- 3) 地线导电性越好, 分流系数越小。
- 4) 杆塔接地电阻越小, 分流系数越小。
- 5) 杆塔档距越小, 分流系数越小。

计算时可根据上述结论考虑主要因素影响, 对变压器和塔形做简化处理, 从而降低计算复杂度, 提高可操作性。

## 1.2 系统故障电流

系统短路电流受电力系统网络参数影响, 并且与短路点位置和短路类型有关, 而与故障电流分流路径关系不大。在设计过程中, 从安全角度考虑,  $I_{\max}$  通常选取设备最大允许短路电流或者系统最大运行方式下的短路电流。

该方法提高了  $I_g$  的选取基准, 对于高土壤电阻率地区过于保守。目前采用电力系统分析软件, 如 PSD-BPA, PSASP 和 PSS/E 进行电力系统短路建模仿真, 能够计算变电站各出线回路的短路电流值, 从而为获得不同出线数量情况下的  $I_{\max}$  提供了可靠依据。

## 2 工程实例分析

以下以国内西南高土壤电阻率地区某 220 kV 变电站为实例进行接地计算, 对常规设计方法和考虑出线数量的优化方法得出的计算结果进行对比研究。

## 2.1 地质情况

变电站位于高土壤电阻率地区, 根据地质勘测结果, 站内表层为红粘土 ( $\rho \geq 500 \Omega \cdot m$ ), 底层为风化灰岩 ( $\rho \geq 2500 \Omega \cdot m$ )。线路沿线地质情况与站内类似, 部分走廊位于基岩出露区域。

## 2.2 系统规模

变电站建设规划 220 kV 出线 14 回, 110 kV 出线 16 回。其中 110 kV 出线均为终端用户变电站。220 kV 出线中, 2 回至 500 kV 变电站, 3 回至 220 kV 变电站, 2 回至发电厂, 其余至终端用户变电站。

其中 110 kV 已建 10 回, 均为同塔双回出线, 地线采用双 OPGW-100; 220 kV 已建 6 回, 均为同塔双回出线, 地线采用双 OPGW-140。其余未建回路规划为同塔双回或单回路塔, 同塔双回均按双 OPGW 地线规划, 单回路塔按单 OPGW 和普通地线规划。为保守计算, 普通地线按绝缘分段考虑, 不纳入地线分流路径。

## 3 短路电流

利用 PSD-BPA 对电力系统建模计算得到变电站 2025 年最大运行方式下 220 kV 母线发生单相接地故障后短路电流的分布, 如表 1 所示:

表 1 短路电流值列表

Tab. 1 List of the fault current

对侧变电站	出线回路数	短路电流/(kA·回 <sup>-1</sup> )
220 kV 变	3	4.889
500 kV 变	2	6.991
220 kV 终端变	7	0.673
220 kV 升压站	2	6.107
110 kV 终端变	8	0.166
110 kV 终端变	8	0.137
合计	30	47.998

### 3.1 常规接地设计

根据简易公式估算, 当 1 回 110 kV 采用单回路塔出线时  $S_f$  为最大值,  $S_f = 19.35\%$ , 按 20% 考虑。  $I_{\max} = 47.998 \text{ kA}$ ,  $I_n = 0.7 \text{ kA}$ , 得到  $I_g = 9.457 \text{ kA}$ 。采用  $U_1$  和  $U_g$  作为接地安全阈值, 采取变电站表层敷设 150 mm 碎石层, 接地引下线周围敷设绝缘地坪措施后, 要求变电站接地电阻不得大于 3.09  $\Omega$ 。变电站接地工程完工后实测接地电阻为 3.97  $\Omega$ , 不满足安全要求, 见表 2 所示。

表2 最大安全电势差与允许接地电阻

Tab. 2 Maximum safety potential difference and allowed earth resistance

地层	$U_t/V$	$R_g/\Omega$	$U_g/V$	$R_g/\Omega$
敷设碎石层	1 870	1.16	6 708	11.96
敷设绝缘层	4 973	3.09	—	—

因此,在变电站四个角落钻孔安装4套9 m长离子接地极用于降阻,顶部埋深1.8 m,与主接地网可靠连接。实施降阻后,变电站接地电阻实测值为2.88  $\Omega$ ,满足安全要求。

### 3.2 优化接地设计

CDEGS软件提供SPLITS和FCDIST两个模块用于计算分流系数,其中的SPLITS支持逐线逐档建模,计算结果比较准确。FCDIST根据出线规模和简化的线路参数建模,适用于工程估算。本文从设计需求角度出发,采用FCDIST对变电站故障分流情况进行计算。

#### 3.2.1 输变电参数简化

根据变电站及相关线路工程勘测资料与设计方

表3 接地计算主要输入参数

Tab. 3 Main input data for grounding calculation

输入参数	取值
线路平均土壤电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	1 200
杆塔平均接地电阻/ $\Omega$	25
档距/m	300~400
档数/个	实际方案
变电站接地电阻/ $\Omega$	3.97
对侧110 kV变接地电阻/ $\Omega$	4
对侧220 kV变接地电阻/ $\Omega$	2.5

根据FCDIST输入要求,对同塔双回双OPGW输电线路做了进一步简化处理,将其拆分为两个单回路单OPGW回路,经过对比SPLITS对同塔双回双OPGW的计算结果,二者计算结果基本吻合,完全满足设计精度要求。

此外,根据短路电流计算,分别在110 kV和220 kV母线短路情况下,主变中性点环流 $I_n$ 约占110 kV侧短路电流的30%,为简化计算, $I_n$ 按此考虑。

#### 3.2.2 运行情况模拟

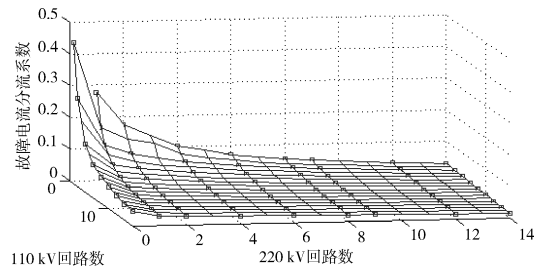
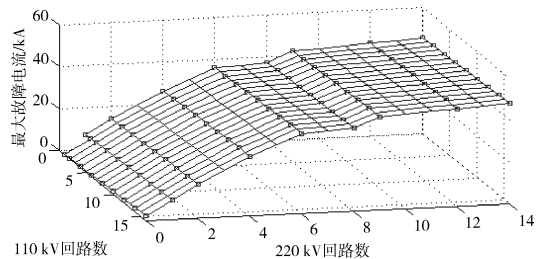
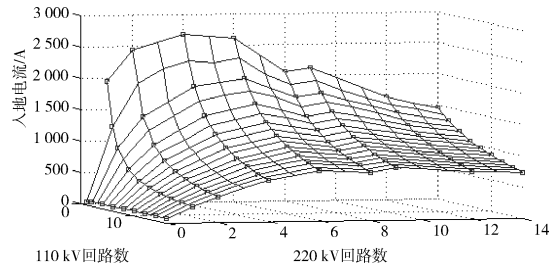
变电站在改扩建及停电检修运行过程中,接入

系统回路组合很多,难以一一列举,因此本文筛选了较为典型的82种运行工况。

基本思路如下:在最大运行工况下,逐站切除110 kV和220 kV出线,优先切除短路电流较小的回路,从而保证在其他同等出线规模工况下,系统短路电流最大,确保计算的保守和安全性。

#### 3.2.3 分流计算结果

图2~图4所示为 $S_f$ 、 $I_{max}$ 和 $I_g$ 与出线回路数的关系图,表4统计了部分工况的计算结果,表中 $U_g$ 为地电位升。

图2 分流系数 $S_f$ 计算结果Fig. 2 Results of split factor  $S_f$ 图3 系统故障电流 $I_{max}$ 计算结果Fig. 3 Results of fault current  $I_{max}$ 图4 入地电流 $I_g$ 计算结果Fig. 4 Results of grounding fault current  $I_g$ 

根据广东电网公司电力科学研究院基于变电站实测和PSCAD仿真对比得到的研究成果<sup>[5]</sup>,当110 kV和220 kV出线各1回时,在变电站接地电阻4  $\Omega$ 的情况下, $S_f \approx 15\%$ 。表4中本文计算得到 $S_f = 17.49\%$ ,考虑到计算模型与线路参数差异,

二者结论吻合。

表4 接地计算结果表(部分)

Tab. 4 Results of grounding calculation (part of results)

220 kV 出线数	110 kV 出线数	$I_{\max}/$ kA	$S_f/$ %	$I_g/$ kA	$U_g/$ kV
0	1	0.166	44.40	0.051	0.204
0	2	0.332	27.85	0.064	0.256
0	4	0.664	15.18	0.071	0.280
0	6	0.938	10.46	0.069	0.273
1	0	6.991	27.80	1.944	7.717
2	0	13.982	17.47	2.443	9.700
4	0	26.196	10.23	2.680	10.642
1	1	7.107	17.49	1.243	4.936
1	2	7.323	12.81	0.925	3.673
2	2	14.314	10.00	1.421	5.640
4	4	26.860	5.50	1.462	5.806
8	8	38.590	2.90	1.100	4.360
9	14	44.359	2.10	0.895	3.553
14	16	47.998	1.56	0.733	2.909

另外,根据广东电网公司电力科学研究院基于CDEGS计算研究成果<sup>[6]</sup>,当变电站接地电阻接近1Ω,10回220kV架空出线和15回20kV电缆出线时, $S_f \approx 10\%$ 。本文变电站接地电阻接近4Ω,9回220kV和14回110kV架空出线情况下, $S_f \approx 2\%$ 。由于变电站接地电阻和地线导电性能是影响 $S_f$ 的重要因素,本文变电站接地电阻更大,且OPGW地线导电性能优于电缆外护套,因此 $S_f$ 更小,二者差异符合前文研究结论。

综合上述计算结果可以看出:

1)  $I_{\max}$ 和 $S_f$ 受出线数影响呈单调线性变化,二者最大值分别出现在变电站全部出线和单回出线数情况, $I_g$ 最大值出现在220kV出线4回情况,并且4回出线均接入电源。计算能得到 $S_f = 10.23\%$ , $I_{\max} = 26.169$  kA, $I_g = 2.68$  kA, $I_g$ 远小于手动计算值9.457 kA。

2) 110kV单回路出线时,最大 $S_f = 44.4\%$ ,接近传统设计定值50%,因此在缺乏估算条件的情况下,单回路出线变电站可沿用原定值。

3) 110kV单回路出线时, $S_f$ 计算值与简化公式估算值偏差较大。经过分析,简化公式的计算模型过于简单,与工程实际偏差较大,准确性难以保证。而数值计算模型符合工程实际情况,计算结果更为准确。

### 3.2.4 最大允许接地电阻

根据人体最大允许安全电势差,最大允许接地电阻要求如表5所示。

表5 最大安全电势差与允许接地电阻

Tab. 5 Maximum safety potential difference and allowed earth resistance

地层	$U_t/V$	$R_g/\Omega$	$U_s/V$	$R_g/\Omega$
敷设碎石层	1 870	4.1	6 708	42.2
敷设绝缘层	4 973	10.9	—	—

全场敷设碎石层后,变电站接地电阻满足 $R < 4.1 \Omega$ 即可,因此变电站无需采取降阻措施即可满足人体安全要求。

### 3.2.5 地电位升影响

根据计算结果,最大地电位升 $U_g = 10.642$  kV,超过5 kV,除要求采取防止引入站外低电位的措施外,还需要校验低压避雷器对地电位升的反击耐受能力。

本文变电站低压侧采用10 kV避雷器,关于10 kV避雷器对地电位升的反击耐受能力的论证,在国家电网公司关于福州1 000 kV交流特高压变电站接地系统设计专题<sup>[16]</sup>进行过相关研究。福州1 000 kV交流特高压变电站站用变压器高压侧和外引电源均为10 kV,配10 kV金属氧化物避雷器。设计专题采用避雷器仿真模型,模拟地电位升对避雷器的反击过程,根据避雷器的电流电压波形计算得到系统短路期间避雷器的吸收能量。通过对比避雷器的吸收能量和允许的通流能力发现,单个10 kV氧化物避雷器所能承受的最大地电位升为46.3 kV。据此,本文变电站最大地电位升对于10 kV避雷器是安全的。

### 3.3 计算结果对比

优化设计方案前后变电站接地系统的设计参数对比结果如表6所示。

表6 计算结果对比表

Tab. 6 Comparison table of calculations

参数	常规设计	优化设计	对比结果
$I_{\max}/kA$	47.998	26.296	↓45.21%
$S_f/\%$	20	10.23	↓48.85%
$I_g/kA$	9.457	2.680	↓71.66%
$R_g/\Omega$	3.09	4.1	↑32.69%
$U_g/kV$	29.222	10.642	↓63.58%
降阻措施	是	否	—

根据前文分析可知,对于本文变电站,当出线规模和  $I_{\max}$  最大时,  $S_f$  最小;当出线规模和  $I_{\max}$  最小时,  $S_f$  最大。常规设计方法由于不考虑变电站运行工况,选取最大  $I_{\max}$  和最大  $I_g$  根据式(1)计算所谓的最大  $I_g$ ,不仅与实际工况不符,而且人为提高了接地指标要求,使设计方案往往过于保守。对于本文变电站,需要采取特殊降阻措施,提高了接地工程的成本和工程施工难度。

采用优化设计方法,首先利用电力系统建模计算各出线回路的系统短路电流,然后基于 CDEGS 软件对变电站不同运行工况下的  $I_g$  进行计算,从而能够筛选出实际工况下的最大  $I_g$ 。从计算结果对比可见,采用优化设计方法后,最大  $I_g$  降低了 72%,  $R_g$  提高了 33%,通过全场敷设碎石层,无需采取降阻措施即可满足人身和设备安全,节省了特殊降阻费用,提高了工程的经济性,优化效果显著。

## 4 结论

本文利用 CDEGS 软件,通过国内西南高土壤电阻率地区变电站工程实例计算,研究了变电站出线数量对系统故障电流、故障分流系数和故障入地电流的影响规律。通过与目前研究结论核对,验证了计算结果的合理性。

计算结果表明,故障入地电流受出线数影响显著,通常当变电站出线回路较少,同时系统故障电流较大时,故障入地电流最大,该结果为接地工程设计参数的合理选择提供了依据。与常用计算方法相比,本文提出的方法不仅符合工程实际情况,还能有效减小故障入地电流计算值,在满足设备人身安全的前提下,降低变电站接地电阻要求,达到优化设计的目的,对于提高工程经济性有着重要意义。

### 参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的接地设计规范: GB 50065—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] Zambin Bureau of standard IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding: IEEE Standard 80—2000[S]. U. S. A: Zambin, 2000.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册 1: 电气一次部分 [M]. 中国电力出版社, 2012.
- [5] 李谦, 蒋愉宽, 肖磊石. 变电站内短路电流分流系数实测和分析 [J]. 电网技术, 2013, 37(3): 2060-2065.
- [6] LI Q, JIANG Y K, XIAO L S. Measurement and analysis on short-circuit current shunt coefficient inside substation [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 2060-2065.
- [7] 李谦, 居一峰, 朱正国. 城区变电站地线分流特性对接地网设计影响的分析 [J]. 电瓷避雷器, 2014(4): 103-109.
- [8] LI Q, JU Y F, ZHU Z G. Influence of fault current division characteristics of urban substation on its grounding grid design [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4): 103-109.
- [9] 谢广润. 电力系统接地技术 [M]. 武汉: 中国电力出版社, 1996.
- [10] DAWALIBI F. Ground fault current distribution between soil and neutral conductors [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2): 452-461.
- [11] DAWALIBI F, GEORGE B N. Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(3): 553-560.
- [12] 文习山, 胡建平, 唐炬. 复杂电力网络短路电流分布及地网分流系数 [J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2233-2240.
- [13] WEN X S, HU J P, TANG J. Fault current distribution and current division factor of grounding grid in complex power system network [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2233-2240.
- [14] 吴锦鹏, 张波, 蒋愉宽, 等. 基于相分量模型的变电站短路电流分流系数计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 122-130.
- [15] WU J P, ZHANG B, JIANG Y K, et al. A Calculation method of fault current distribution and shunt coefficient in substation based on phase-coordinate model [J]. Proceedings of CSEE, 2012, 32(1): 122-130.
- [16] 邹军, 袁建生, 周宇坤, 等. 统一广义双侧消去法与架空线路-地下电缆混合输电系统故障电流分布的计算 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 112-115.
- [17] ZOU J, YUAN J S, ZHOU Y K, et al. Uniform generalized double-sided elimination method and the calculation of the fault current distribution for hybrid overhead-underground power lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 112-115.
- [18] 许高雄, 赵大平, 威力彦, 等. OPGW 与普通地线构成的双地线系统中单相短路电流分流的计算 [J]. 电网技术, 2011, 35(1): 229-232.
- [19] 王婧倩, 沈保国. 基于电磁暂态程序的架空地线分流系数的计算 [J]. 广东电力, 2012, 25(5): 98-102.
- [20] 张波, 吴锦鹏, 肖红, 等. 变电站内短路电流分流系数影响因素分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 720-728.
- [21] 西南电力设计院. 福州站接地系统设计专题 [R]. 成都: 西南电力设计院, 2013.