

恶劣地质环境下接地工程分流系数的评估方法研究

楼秉吾¹, 文习山²

¹国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州

²武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉

Email: 43634380@qq.com

收稿日期: 2021年1月29日; 录用日期: 2021年3月19日; 发布日期: 2021年3月26日

摘要

恶劣地质环境下接地工程存在接地电阻偏高的问题, 在故障情况下容易导致过高的地电位升高, 危及系统的安全运行和人身安全。目前电力系统接地短路时故障电流分布和分流系数的计算往往只局限于单回架空线路或地下电缆的简单情况, 且大多数情况下没有考虑非故障相的耦合作用, 所建模型也没有考虑变压器的影响。针对这一问题, 首先从理论上推导了入地短路电流理论模型, 并根据故障位置的不同区分不同情况。其次, 基于EMTP电磁暂态程序提出了入地电流简化计算方案, 并运用在某恶劣地质环境水电站的案例实现了论文方法的应用。结果表明, 入地短路电流是指构成接地网-大地回路进而引起接地网地电位升高的那部分短路电流, 计算需要考虑站内短路和站外短路, 以及单相接地短路故障和两相接地短路故障共四种情况下可能出现的最大入地短路故障电流。论文方法有助于快速准确进行入地短路电流计算, 为准确的接地参数计算提供了有效的参考。

关键词

分流系数, 恶劣地质环境, 接地, 电磁暂态

Study on the Evaluation Method of Division Factor of Grounding Engineering in Adverse Geological Environment

Bingwu Lou¹, Xishan Wen²

¹Economic and Technological Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 43634380@qq.com

Received: Jan. 29th, 2021; accepted: Mar. 19th, 2021; published: Mar. 26th, 2021

Abstract

There is a problem of high grounding resistance in the grounding engineering under the harsh geological environment, which is easy to lead to high ground potential in the case of fault, endangering the safe operation of the system and personal safety. At present, the calculation of fault current distribution and shunt coefficient is usually limited to the simple case of single circuit overhead line or underground cable, and the coupling effect of non fault phase is not considered in most cases, and the influence of transformer is not considered in the model. To solve this problem, the theoretical model of short-circuit current to ground is deduced theoretically, and different situations are distinguished according to different fault locations. Secondly, based on EMTP electromagnetic transient program, a simplified calculation scheme of ground current is proposed, and the method is applied to a hydropower station with adverse geological environment. The results show that the grounding short-circuit current refers to the part of the short-circuit current which constitutes the grounding grid earth circuit and then causes the grounding grid ground potential to rise. The calculation needs to consider the maximum grounding short-circuit fault current that may occur in four cases, namely, the short-circuit inside the station, the short-circuit outside the station, the single-phase grounding short-circuit fault and the two-phase grounding short-circuit fault. This method is helpful to calculate the short-circuit current quickly and accurately, and provides an effective reference for accurate calculation of grounding parameters.

Keywords

Division Factor, Adverse Geological Environment, Grounding, Electromagnetic Transient

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

当电站发生接地短路故障时, 接地系统必须为故障电流提供可靠的回路路径。尤其是在恶劣地质环境下, 电站的接地电阻会较高。故障电流流过较高的接地电阻会产生较大的地电位升高, 从而危及电力系统和人身的安全。在这种情况下, 电站接地系统的研究设计和分析就显得十分重要, 而接地参数计算分析模型的与入地电流计算密切相关[1]。

国内外对电力系统接地短路的研究起步较早, 尤其是在地网入地短路电流的研究上做了很多理论计算和实测工作, 诞生了一些算法和模型[2] [3]。考虑到工程的实用性, 评估分流系数有很多近似公式和数值求解方法。在国内, 对于短路电流和避雷线分流系数的计算大都用规程和手册中的简化公式进行计算[4] [5] [6], 对分流系数的计算还可采用直接公式法。根据直接公式法, 在工程中可由与接地网相连的架空线路避雷线回数并参照以下经验选择分流系数的数值, 站内短路[7] [8]: 1 回出线时取 0.15, 2 回时取 0.28, 3 回时取 0.38, 4 回以上时取 0.47~0.58; 站外短路: 避雷线向两侧的分流系数取 0.18。取值时, 需考虑 10 年以上的发展规划, 因此要乘以 1.2~1.5 的校正规划系数, 在短路电流散流困难的地方, 还应乘以散流系数(取 1.25) [9] [10] [11] [12]。国内的简易计算法和直接公式法使用起来很方便, 但他们建立在诸多假设条件下(如电站的接地电阻与杆塔的接地电阻相等、多条进出输电线路的参数要基本相同), 这对于变电站连接有不同电压等级的多回线路的情况, 往往会导致较大的误差, 因此其使用范围受到极大限

制, 往往只局限于特定工程中的单回线路和站内短路的情况, 因此计算结果和所得结论不具有推广性[13] [14] [15] [16] [17]。

而国外的数值计算方法虽然采用了递推和迭代的方法, 但还是不能对大型代数方程组进行求解, 因此无法对变电站连接有多回不同电压等级架空线和地下电缆的复杂网络发生接地短路时的故障电流分布进行计算。国外对电力系统接地故障电流分布的分析以采用计算机仿真为主: 先建立基于变电站接地系统、架空避雷线及杆塔、中性线和导线的零序等值电路, 然后编程或借用已有的电磁暂态程序进行计算。加拿大 SES 公司创始人 Dawalibi 博士在上个世纪八十年代提出的“双侧消去法”较具有代表性[18] [19] [20]。美国 H. B. Gooi 和 S. A. Sebo 在双侧消去法基础上提出了“驱动点阻抗矩阵法”, 该方法建立了接地短路时每档避雷线故障电流与短路点电流的递推式[21]。美国工程师 D. L. Garrent 等用已有的“变电站最大接地短路电流计算”程序 SMECC 分析并计算了地网接地电阻、杆塔接地电阻、导线空间排列位置、避雷线参数、档距和土壤电阻率等因素对地网分流系数的影响, 绘制了地网分流系数与上述因素的关系曲线, 根据这些曲线可以方便的求取变电站地网最大入地短路电流值[22]。虽然图解法确定最大地网入地电流的精度可能不及 SMECC 程序, 但它具有推广性, 已经写入 IEEE 交流变电站安全设计导则[23]。

本文首先介绍了故障电流分布的两种算法, 即简易计算法和直接公式法, 并分析了其中的弊端, 针对目前研究的不足, 利用了 EMTP 电磁暂态程序接地短路电流计算方法, 并实现了恶劣地质情况下电站入地电流的快速高效计算, 避免过多的假设而造成的计算误差。论文方法在某水电站接地系统的入地短路电流实现了应用, 并分别对站内、站外发生单相接地短路时两种情况下的分流系数进行计算, 验证了论文方法的有效性。

2. 入地短路电流计算方法

入地短路电流是指构成接地网 - 大地回路的那部分短路电流, 入地短路电流引起了接地网的地电位升高。在高压电网中, 一般以单相短路故障为计算条件。在中性点直接接地的系统中, 正常运行时, 流经发电厂、变电站接地网的电流很小。一旦发生接地短路故障, 就会有有很大的电流经地网向地中流散, 在有架空地线的情况下, 一部分短路电流可以由与地网连接的架空地线为回路流通, 因此流经发电厂和变电站接地网的入地短路电流, 并不等于接地短路点的全部短路电流。在计算接地电阻或接地网的电位时, 按故障位置的不同, 应当区分接地短路发生在接地网内和接地网外两种情况, 先分别计算出流经接地网的入地短路电流值, 然后取这两种情况中较大者。

2.1. 分流系数的简易算法

分流系数的简易算法认为一条线路各个档距和每基杆塔的接地电阻(记为 R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_n)相等, 同时假设对侧变电站(终端站)的距离很远, 避雷线阻抗的增加已经抵消了很小的终端站接地电阻, 所以其分流作用忽略不计, 因此可以画出该线路分流计算等效网络, 如图 1 所示。

对图 1 中的线路, 设有 n 个档距, $n-1$ 个网孔, 每个网孔都由 Z_1 和 R_2 构成。令节点 B 右边的全部网孔等效阻抗为 Z , 当 n 足够大时, 减去一个网孔的等效阻抗仍然是 Z , 则有:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{Z_1 + Z} \quad (1)$$

整理后根据求根公式并将 $Z_1 = a_1 + jb_1$ (避雷线的直流电阻、自感抗和互感抗)代入, 可得(小于零的根舍去):

$$Z = -\frac{a_1 + jb_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(a_1^2 - b_1^2 + 4a_1R_1) + j(2a_1b_1 + 4b_1R_2)} \quad (2)$$

经过复数的三角变换, 整理得其基本形式为:

$$Z = a + jb \tag{3}$$

在图 1 中节点 A 右边部分, 变电站接地电阻 R_1 与架空线路“避雷线-杆塔”网络(第一段的 Z_1 与 Z 串联)并联, 设其等效阻抗为 Z_0 , 有:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_1 + Z} \tag{4}$$

将 $Z_1 = a_1 + jb_1$ 和 $Z = a + jb$ 带入(4)式, 整理后有:

$$Z_0 = \frac{R_1(a_1 + a) + jR_1(b_1 + b)}{(R_1 + a_1 + a) + j(b_1 + b)} = a_0 + jb_0 \tag{5}$$

从而分流系数为: $K_f = Z_0 / (Z_1 + Z)$, 变电站地网入地电流为 $I_1 = (1 - K_f)I_0$ 。得到 I_1 后, 就可以根据图 1 虚线右边链形网络求得流过各档避雷线和杆塔的短路电流。

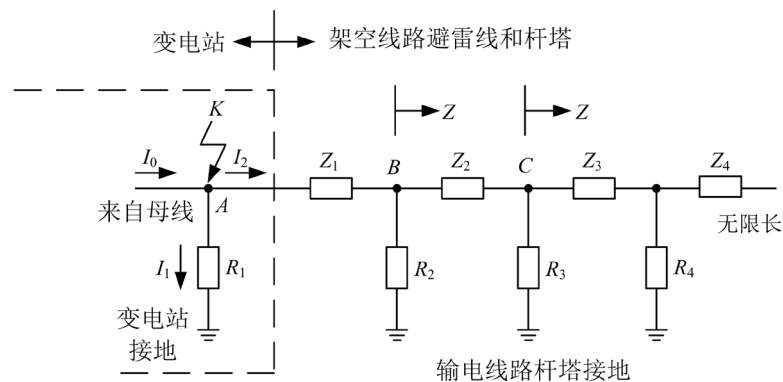


Figure 1. The equivalent network diagram of the shunting of the “lightning wire-tower” grounding system
图 1. “避雷线-杆塔”接地系统分流等效网络图

2.2. 分流系数的直接公式法

分流系数的直接公式法即用相导线和避雷线的零序互感抗 Z_{M0} 与避雷线零序自感抗 Z_{L0} 的比值来近似的方法, Z_{M0} 和 Z_{L0} 的计算式可根据规程查得。基于 GB/T 50065-2011《交流电气装置的接地设计规范》[2], 站内短路最大入地电流 I_{g1} 为

$$I_{g1} = (I_{max} - I_n)K_{f1} \tag{6}$$

式中, I_{max} 为发电厂和变电站内发生接地故障时的最大接地故障对称电流有效值, I_n 为发电厂和变电站内发生接地故障时流经其设备中性点的电流, K_{f1} 为厂站内发生接地故障时的分流系数。

分流系数 K_{f1} 为

$$K_{f1} = 1 - \left[\frac{e^{\beta s} - e^{-\beta s}}{e^{\beta(s+1)} - e^{-\beta(s+1)}} \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) + \frac{Z_m}{Z_s} \right] \tag{7}$$

$$e^{\beta} = \frac{1 - \sqrt{\frac{Z_s D}{12R_{st} + Z_s D}}}{1 + \sqrt{\frac{Z_s D}{12R_{st} + Z_s D}}} \tag{8}$$

$$Z_s = \frac{3r_s}{k} + 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{\sqrt[k]{\alpha_s D_s^{k-1}}} \quad (9)$$

$$Z_m = 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{D_m} \quad (10)$$

式中, Z_s 为单位长度的地线阻抗(Ω/km); Z_m 为单位长度的相线与地线之间的互阻抗(Ω/km); D 为档距的平均长度(km); R_{st} 为杆塔接地电阻(Ω); α_s 为地线的将电流化为表面分布后的等值半径(m), 钢芯铝绞线有 $\alpha_s = 0.95\alpha_0$; D_s 为地线之间的距离(m); D_m 为避雷线之间的几何均距(m); D_g 为地线对地的等价镜像距离(m); k 为地线的根数。

单地线时, 避雷线之间的几何均距为

$$D_m = \sqrt[3]{D_{1A}D_{1B}D_{1C}} \quad (11)$$

双地线时, 避雷线之间的几何均距为

$$D_m = \sqrt[6]{D_{1A}D_{1B}D_{1C}D_{2A}D_{2B}D_{2C}} \quad (12)$$

地线对地的等价镜像距离为

$$D_g = 80\sqrt{\rho} \quad (13)$$

式中, ρ 为大地等值电阻率。

当 $s > 10$ 且有 n 回出线的情况下, S_{f1} 可简化为

$$K_{f1} = 1 - e^{-\beta} \left(1 - \frac{Z_m}{Z_s} \right) - \frac{Z_m}{Z_s} \quad (14)$$

从公式(7)~(14)可以看出, 规程中针对的是单出线的情况。

2.3. 站内短路

图 2 为短路发生在接地网内的情况, 图中 R 为线路杆塔接地电阻, R_z 为发电厂、变电站的地网接地电阻。当接地短路发生在接地网内时, 在流经接地点的短路电流 R_z 中, 一部分由系统提供的短路电流经与接地网连接的架空线路的“地线 - 杆塔”接地系统返回系统, 不会在电站的接地电阻上形成压降; 另一部分短路电流, 经由接地网(不经过大地)直接流回发电厂或变电站变压器接地的中性点, 也不会在地网的接地电阻上形成压降; 剩下的一部分短路电流, 才经过接地网流入地中, 经大地流回系统变压器接地的中性点。

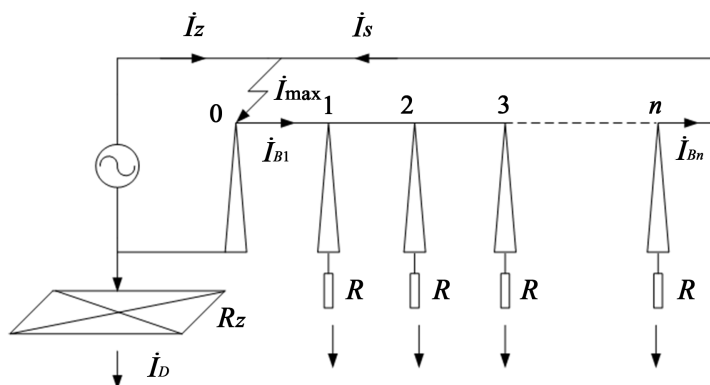


Figure 2. The situation where a short circuit occurs in the grounding grid
图 2. 短路发生在接地网内的情况

若“地线-杆塔”接地系统的分流系数为 K_{f1} , 则接地系统分走的电流 I_{B1} 为:

$$I_{B1} = (I_{\max} - I_Z)K_{f1} = I_S K_{f1} \quad (15)$$

最后的这部分电流, 为计算用的流经接地网的入地短路电流 I_D , 可用下式计算:

$$I_D = (I_{\max} - I_Z)(1 - K_{f1}) \quad (16)$$

则“地线-杆塔”接地系统的分流系数 K_{f1} 为:

$$K_{f1} = \frac{I_{B1}}{I_S} = \frac{I_{B1}}{I_{B1} + I_D} = \frac{I_{\max} - I_Z - I_D}{I_{\max} - I_Z} \quad (17)$$

2.4. 站外短路

图3为短路发生在接地网外的情况, 图中 R 为线路杆塔接地电阻, R_Z 为发电厂、变电站的地网接地电阻。当接地短路发生在接地网外, 即发生在线路上时, 流经大地自地网返回的短路电流 I_D 将由电站本身提供。同样由于避雷线的存在, 流回发电厂或变电站变压器接地中性点的短路电流 I_Z 中, 有一部分短路电流 I_{BS} 经由与接地网连接的避雷线直接流回电源的中性点。

若此时避雷线的分流系数为 K_{f2} , 则计算用的流经接地网的入地短路电流可用下式计算

$$I_D = I_Z (1 - K_{f2}) \quad (18)$$

则避雷线的分流系数 K_{f2} 为:

$$K_{f2} = \frac{I_{BS}}{I_Z} = \frac{I_{BS}}{I_{BS} + I_D} = \frac{I_Z - I_D}{I_Z} \quad (19)$$

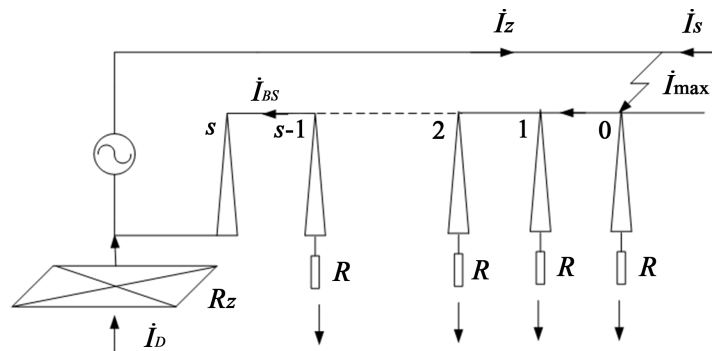


Figure 3. The situation where a short circuit occurs outside the grounding grid
图3. 短路发生在接地网外的情况

3. EMTP-ATP 计算方法

综上所述可以看出, 传统简化计算方法忽略了很多因素, 只需线路的基本参数即可手算得到, 但它是建立在许多假设基础上的, 认为杆塔的档距、接地电阻都相等, 不能评估电站接地阻抗对分流的影响, 对线路模型也进行了简化, 其计算结构有一定的局限性, 因而计算结果比较粗糙, 入地短路电流偏大, 使得接地系统的设计偏于保守[24] [25] [26]。

EMTP 电磁暂态程序具有计算暂态和稳态的功能, 且计算速度快、精度高, 利用 EMTP 程序可以避免过多的假设而造成的计算误差。根据零序等值网络和线路结构、参数, 可利用 EMTP 程序分别对站内、

站外发生单相接地短路时两种情况下的分流系数进行计算, 研究短路电流和分流系数随变电站接地网接地电阻、杆塔接地电阻、避雷线型号、站外短路点位置等变化的规律, 所以本文介绍采用 ATP-EMTP 对电站入地短路电流进行计算的方法。

3.1. EMTP-ATP 基本算法

EMTP (Electromagnetic Transients Program)是道梅尔 - 白日朗于 20 世纪 50 年代末在美国 BPA 电力公司工作时编制的程序, ATP (Alternative Transient Program)是其 Windows 版本, 是 EMTP 的继续和发展, 它保存了 EMTP 的全部功能, 还添加了一些新的功能, 采用了与用户友好的人机界面, 且 ATP 程序中的模型满足我们计算所需的各种电气设备的模型, 并且很容易建立一些特殊的元件, 计算精度也合适。其基本算法为: 根据元件的不同特性, 建立相应的代数方程, 常微分方程和偏微分方程, 利用梯形积分法将电感、电容、电源等集中参数元件化成电阻性网络, 对于传输线等分布性参数利用其上的波过程的特征线方程, 经过一定的转换, 把分布参数的线段也等效为电阻性网络, 则其相应的方程也变为代数方程, 进一步形成节点导纳矩阵; 然后采用优化结点编号技术和稀疏矩阵算法, 以节点电压为未知量, 利用矩阵三角分解求解, 最后求得各支路的电流, 电压和所有消耗的功率, 能量。在稳态计算中应将非线性元件线性化, 包括利用简单的迭代进行潮流计算。在暂态计算中非线性特性可以用分段线性化来处理, 也可进行迭代求解(即补偿法, 就是将线性网络部分和非线性网络部分分开处理, 使求解非线性电路的迭代计算限制在小部分网络中)。

ATPDraw 目前支持大约 70 个标准组件和 28 个 TACS 对象。ATPDraw 程序有标准的视窗平台, 用户可以任意选择已经定义好的组件的模型(图形)来构造需要的电路, 也可以自己定义不同的组件。然后由处理器自动生成相应的正确的 ATP 输入文件。支路的节点名可以由程序给定, 也可以自定义。因此, 基于图形化界面的 ATPDRAW 在使用中是极其方便和准确的。

ATP 程序和 ATPDraw 程序的综合运用, 使得计算电磁暂态现象方面的问题更加方便、准确。其权威性和通用性强, 求解速度快; 精度能满足工程计算的要求; Windows 人机对话界面, 计算模型图形化输入, 操作方便, 计算结果得到业界普遍认可。

3.2. EMTP-ATP 计算模型建立

在电力系统网络中, 通常包括有各种集中参数元件和分布参数元件, 这些元件可以是线性的, 也可以是非线性的。集中参数元件包括电阻、电感和电容元件。典型的分布参数元件是输电线路, 包括架空线和电缆线路, 在电力系统中输电线路往往是多导线线路, 导线之间存在电磁耦合。在暂态计算中, 首先需要建立起所有这些不同元件的计算模型。计算的精度取决于电力系统中各个单元所采用的模型。计算入地短路电流时需要用到的主要元件模型为:

1) 电压源模型

系统电压源采用三相交流电压源模拟, 并需考虑系统的接地电阻。

在大型电力系统中, 同步发电机是其最重要的元件, 而同步发电机在发生突然短路的暂态过程中, 定子、转子绕组间电磁能量互相影响使暂态过程变得相当复杂。在此处 ATP 仿真中, 考虑到远距离故障点对电源影响不大, 即发电机端电压变化很小, 短路电流中的周期分量不衰减, 电站发电机电压源也采用三相交流电压源模拟, 结合实际运行需要, 大型同步发电机的中性点往往通过接地电阻或电抗线圈接地, 计算中此电压源中性点采用经大电阻接地。

2) 变压器模型

ATP 中变压器模型有单相或三相理想变压器模型、单相或三相饱和变压器模型、三相铁心式高对称阻抗饱和变压器模型和 BCTRAN 支持子程序。根据实际给出的变压器铭牌参数情况, 计算中采用

BCTRAN 支持子程序, 可以模拟各种绕组连接方式的变压器。

BCTRAN 支持子程序可根据变压器在额定频率下空载和短路试验的数据, 得到单相或三相, 双绕组、三绕组或多绕组变压器的线性 L^{-1} 、 R 或 R 、 ωL 矩阵表达式, 表示变压器一次、二次各相之间的耦合。短路电阻矩阵为对角矩阵, 对角元素分别和各绕组的电阻对应, 铁耗等效电阻和各线圈并联。该模型需要空载励磁和短路试验数据作为输入参数。

值得注意的一点是, 变压器的 Δ 绕组侧端点对地的问题。程序中 Δ 绕组侧端点均是浮动的, 数学上这些端点电压只能被定义为任意的常数。一般来说, 以三绕组变压器的对地绝缘且 Δ 连接的第三绕组为例: 将 Δ 绕组的三个端点均通过三个相同的电容接地。此时为了避免矩阵异常, 需要使用电容的实际值, 这样可以保持 Δ 绕组侧的内部平衡的情况。

3) 输电线路模型

输电线路的模型有连续换位(Clarke)和不换位线路(KCLee)模型、Bergeron (贝杰龙)、PI、RLPI 型、RL 耦合型、RL 对称型等等的等值电路模型, 输入数据产生的频率特性线路模型有: JMarti (马蒂)、Semlyen (塞姆林)和 Noda 等等, 应该根据计算精度的需要选择不同的输电线路模型。

对站外输电线路本文中采用 JMarti 频率特性架空线模型, 这种频率相关的线路模型在有显著的零序电压和电流的暂态类型中很重要的, 暂态类型中的一种就是接地故障。

4) 短路模型

现行的短路电流计算方法不考虑短路时电弧电阻的影响, 或只考虑 $15 \text{ m}\Omega$ 的固定电弧电阻值进行计算, 这实质上是按金属性短路或近似金属性短路进行工程计算。而电力系统中接地短路一般都不是金属性的, 往往在短路点存在过渡电阻, 它是指短路电流从相导线流入大地所通过的物质电阻, 包括电弧、中间物质电阻、相导线与地间、电器接触处的接触电阻等, 其在整个短路过程中其阻值是变化的。在发生短路的初瞬, 电弧电流最大, 弧长最短, 电弧电阻最小, 约为几个欧姆。随着短路持续时间的延长, 在风吹、空气对流和电动力作用下电弧逐渐伸长, 电弧电阻增大。1948 年, 前苏联中央科学院电工研究所对 35 kV 和 110 kV 网络进行一系列实验, 短路电流 $200\sim 1800 \text{ A}$, 电弧上电位梯度为 1500 V/m 。当电弧电阻的电流为 $250\sim 300 \text{ A}$ 时, 短路瞬间的电弧电阻近似为:

$$R_h = 1050(l_k/I_h)(\Omega) \quad (20)$$

式中, l_k 为电弧长度, 单位 m ; I_h 为电弧电流, 即短路点的总电流, 单位 A 。当两相短路时, l_k 为导线间距离, 其它类型短路情况可根据具体情况分析确定。

但目前对较大短路电流情况下电弧电阻的动态阻值尚待进一步研究, 在计算中, 短路点处的电弧电阻只取静态电阻 2Ω 。

对于短路这一动态过程, 采用 ATP 中的时控开关进行模拟, 设置为某一时刻开关闭合, 以表示发生短路。

4. 计算案例

文章以某水电站的短路故障入地电流计算为例, 对电站故障时的入地电流计算方法进行详细介绍。采用国际通用的先进的图形化的电磁暂态计算程序 ATP-EMTP 进行计算分析。

4.1. 计算条件

对于站内短路情况, 水电站的短路电流计算接线示意图见图 4 所示, 其中 $d1$ 为 550 V 级母线上的短路点, $T1\sim T4$ 为主变压器, $G1\sim G4$ 为水轮发电机。

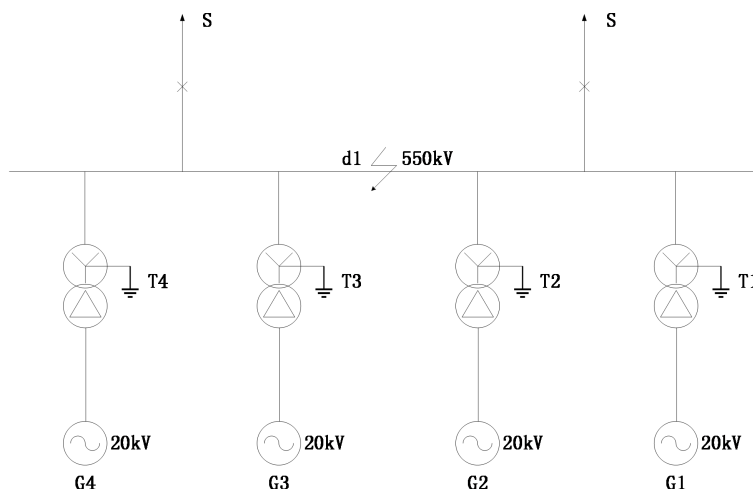


Figure 4. Schematic diagram of the location of voltage and current lines
图 4. 电压、电流线路的位置示意图

4.2. 参数选择

1) 等值电压源

根据《电站接入系统设计复核一次部分》，该水电站 500 kV 母线侧远期三相短路电流为 21.4 kA，单相短路电流为 21.7 kA，计算可得到：

系统等值正序阻抗：

$$X_{s1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n I_k} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 525 \times 21.4} = 0.0051$$

系统等值零序阻抗：

$$X_{s0} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n I_k} \times 3 - 2 \times X_{s1} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 525 \times 21.7} \times 3 - 2 \times 0.0051 = 0.0049$$

2) 发电机

发电机 G₁~G₄ 的额定电压为 20 kV，考虑留有裕度，取 1.13 系数，即 22.6 kV，额定功率 375 MW，次暂态电抗 $X_d'' = 0.214$ ，功率因数为 0.9。

3) 变压器

变压器 T₁~T₄ 额定容量为 417 MVA，高压侧额定电压 550 kV，低压侧额定电压 20 kV，YN/d11 联接，空载损耗 70 kW，负载损耗 277 kW，阻抗电压 16%，空载电流百分数 0.15%，中性点直接接地。

4) 出线段线路

出线段采取同塔双回路架，架空线路采用 LGJ-500 × 4，20℃ 直流电阻为 0.05912 Ω/km，外径为 30 mm，平均档距约为 600 m。

出线段地线两根型号分别为 OPGW-110-1 和 JLB40-120，20℃ 直流电阻分别为 0.83 Ω/km 和 0.3606 Ω/km，外径分别为 14 mm 和 15.75 mm。

杆塔接地阻抗取 10 Ω。线路直线塔代表塔型号为 5A2-ZBK C。

4.3. 输入参数

前面的计算都是在标幺值下进行计算的，而 ATP 的输入参数为有铭值，因而需要进行转换。

1) 基准电压

各个电压等级分别以其平均额定电压作为基准电压, 计算中分别为 525 kV、20 kV。

2) 等值电压源模型

水电站的系统接线如图 5 所示, 在水平计算年 2030 年时, 水电站有两回出线, 水电站系统侧的等值电压源(包括线路阻抗)为:

$$X_{s1} = 0.0051 \times \frac{525^2}{100} = 14.0569(\Omega) \quad (\text{正序})$$

$$X_{s0} = 0.0049 \times \frac{525^2}{100} = 13.5056(\Omega) \quad (\text{零序})$$

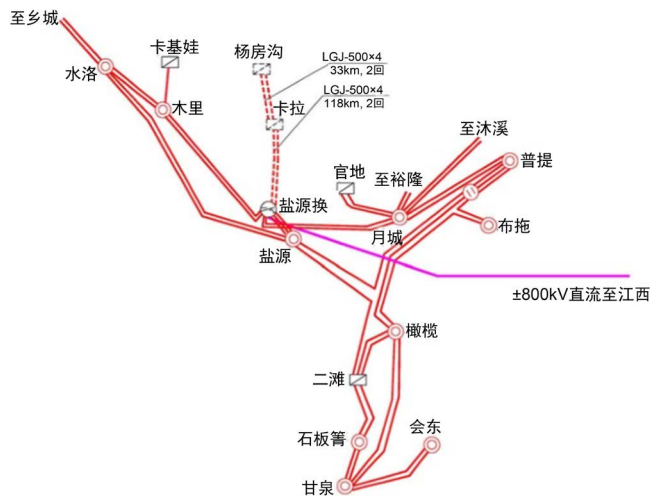


Figure 5. Schematic diagram of hydropower station system wiring
图 5. 水电站系统接线示意图

而由出线段线路参数, 在模型中进行设置后可以得到线路阻抗为:

$$X_{L1} = 1.647(\Omega) \quad (\text{正序})$$

$$X_{L0} = 7.945(\Omega) \quad (\text{零序})$$

所以水电站系统侧的等值电压源(不包括线路阻抗)为:

$$X_{s1} = 14.0569 - 1.647 = 12.4099(\Omega) \quad (\text{正序})$$

$$X_{s0} = 13.5056 - 7.945 = 5.5606(\Omega) \quad (\text{零序})$$

3) 发电机模型

发电机中性点经高阻接地。发电机 $G_1 \sim G_4$:

$$X_G = X_d'' \times \frac{U_b^2}{S_G} = 0.214 \times \frac{22.6^2}{375} \times 0.9 = 0.26233(\Omega)$$

4) 变压器模型

主变压器 $T_1 \sim T_4$ 均采用 ATP 中的变压器 BCTRAN 模型模拟。

5) 高压并联电抗器

母线并联电抗器:

$$X_L = \frac{U_n^2}{Q_L} = \frac{525^2}{180} = 1531(\Omega)$$

6) 其它模型

电弧接地阻抗为 2Ω , 电站地网等效电阻为 0.548Ω 。

4.4. 计算结果

最大运行方式下, 对站内和站外分别发生单相接地故障和两相接地故障进行了计算, 计算求取了总短路电流、电站提供的短路电流、避雷线分流和入地短路电流。以下各表中各电流计算结果均为稳态有效值。

1) 站内短路

电站全部设备均投入运行时站内短路时的短路电流计算结果见所示, 表中数据均为稳态有效值。计算中电站接地阻抗取 0.548Ω , 杆塔接地阻抗取 10Ω , 分单相接地短路和两相接地短路两种故障类型。其中 I_{\max} 为短路点处的总短路电流, I_Z 为电站提供的短路电流, I_S 为系统提供的短路电流, I_{B1} 为“地线-杆塔”接地系统分走的电流, I_D 为入地短路电流。 $K_{f1} = \frac{I_{B1}}{I_S} = \frac{I_{B1}}{I_{B1} + I_D}$ 为避雷线的分流系数。

由表 1 中数据知, 站内单相短路时的入地短路电流比两相接地短路时略小。当电站接地阻抗取 0.548Ω 、杆塔接地阻抗取 10Ω 时, 水电站发生站内两相接地短路故障时, 最大入地短路电流有效值为 9.392 kA 。

Table 1. Calculation results of short-circuit current when short-circuit in the station (kA) (power station grounding impedance 0.548Ω)

表 1. 站内短路时短路电流计算结果(kA) (电站接地阻抗 0.548Ω)

故障类型	I_{\max}	I_Z	I_S	I_{BS}	I_D	K_{f2}
单相接地短路	26.54	7.624	19.11	11.20	8.139	0.579
两相接地短路	30.12	8.504	21.99	13.44	9.392	0.589

2) 站外短路

站外短路可能发生在线路上任何一处, 取短路点为站外第 15 基杆塔处, 分别计算单相接地短路和两相接地短路两种故障类型, 结果见表 2。其中 I_{\max} 为短路点处的总短路电流, I_Z 为电站提供的短路电流, I_S 为系统提供的短路电流, I_{BS} 为线路-杆塔接地系统分走的电流, I_D 为入地短路电流, $K_{f2} = \frac{I_{BS}}{I_Z} = \frac{I_{BS}}{I_{BS} + I_D}$ 为分流系数。

Table 2. Calculation results of short-circuit current when short-circuit outside the station (kA) (station grounding impedance 0.548Ω)

表 2. 站外短路时短路电流计算结果(kA) (电站接地阻抗 0.548Ω)

故障类型	I_{\max}	I_Z	I_S	I_{BS}	I_D	K_{f2}
单相接地短路	25.97	5.118	19.83	2.660	3.101	0.462
两相接地短路	29.20	5.953	23.25	3.138	3.569	0.468

由表 2 中数据知, 站外两相短路时的入地短路电流比单相接地短路时略大。

改变站外短路点的位置, 观察其对入地短路电流和分流系数的影响, 结果见表 3 所示。计算中取电站接地阻抗为 0.548Ω , 杆塔接地阻抗为 10Ω , 短路类型为两相接地短路。

Table 3. The relationship between the ground short-circuit current and the position of the short-circuit point (two-phase short-circuit)**表 3.** 入地短路电流与短路点位置的关系(两相短路)

故障位置	I_{\max}	I_Z	I_S	I_{BS}	I_D	K_{J2}
N10	27.14	6.236	20.91	4.685	3.207	0.594
N11	27.45	6.191	21.27	4.279	3.347	0.561
N12	27.81	6.140	21.67	3.927	3.450	0.532
N13	28.21	6.083	22.13	3.622	3.518	0.507
N14	28.67	6.019	22.65	3.360	3.556	0.486
N15	29.20	5.953	23.25	3.138	3.569	0.468
N16	29.82	5.888	23.94	2.951	3.562	0.453
N17	30.56	5.832	24.73	2.800	3.546	0.441
N18	31.48	5.798	25.68	2.686	3.531	0.432
N19	32.45	5.772	26.68	2.612	3.520	0.426
N20	33.70	5.757	27.95	2.589	3.511	0.424

由表 3 可以看出, 随着短路点离电站距离的增大, 站内提供的短路电流逐渐减小, 但系统侧提供的短路电流不断增大, 入地短路电流呈现先增大后减小的趋势。直至短路发生在站外第 15 基杆塔时入地短路电流达到最大, 最大入地短路电流的稳态有效值为 3.569 kA。

3) 最大入地电流

由前文可知, 水电站站内电源弱于系统电源, 所以站内短路时入地短路电流较大, 且站内两相短路时的入地短路电流比单相接地短路时略大。由表 2 中数据知, 当电站接地阻抗取 0.548Ω 、杆塔接地阻抗取 10Ω 时, 水电站最大入地短路电流有效值为 9.392 kA, 取直流分量的衰减系数为 1.08, 则考虑暂态效应后入地短路电流 10.14 kA。

此外, 对电站接地阻抗取 1.849Ω 情况下, 站内两相短路时的短路电流进行计算, 结果见表 4。

Table 4. Calculation results of short-circuit current when two-phase short-circuit in the station (kA) (power station grounding impedance 1.849Ω)**表 4.** 站内两相短路时短路电流计算结果(kA) (电站接地阻抗 1.849Ω)

故障类型	I_{\max}	I_Z	I_S	I_{BS}	I_D	K_{J2}
两相接地短路	30.08	8.502	22.04	15.95	6.223	0.589

由表 4 中数据知, 当电站接地阻抗取 1.849Ω 时, 水电站发生站内两相接地短路故障时, 最大入地短路电流有效值为 6.223 kA。取直流分量衰减系数为 1.08, 可得最大入地短路电流为 6.721 kA, 此时对应的 GPR 为 12.43 kV。

可以看到利用 EMTP-ATP 软件计算的分流系数的计算结果与传统公式法中的经验值相近。

5. 结论

论文研究了恶劣地质环境下电站的接地分流系数计算方法, 所得结论如下:

1) 恶劣地质环境下电站的接地分流系数评估需要考虑站内故障和站外故障两种情况。无论是何种形式的故障均要考虑非故障相的耦合作用。由于不能考虑电站接地电阻的变化以及多条线路之间故障相与

非故障相之间的耦合, 传统的简化公式法不适用于恶劣地质环境下电站的接地分流系数评估。而使用电磁暂态仿真程序建立相应的分流系数评估模型可以弥补简化公式法的缺陷。

2) 运用某恶劣地质环境地区电站的案例验证了方法的有效性, 并分析了不同情况下的短路电流分布。结果表明入地短路电流的计算需要考虑站内短路和站外短路, 以及单相接地短路故障和两相接地短路故障共四种情况下可能出现的最大入地短路故障电流。针对站外故障的情况, 随着短路点离电站距离的增大, 站内提供的短路电流逐渐减小, 但系统侧提供的短路电流不断增大, 入地短路电流呈现先增大后减小的趋势。所以在在外故障分析的过程当中要选取多个故障点的位置以确认电站入地电流的最大值。

参考文献

- [1] Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society (2000) IEEE Guide for Safety of AC Substation Groundings. IEEE, New York.
- [2] 中国电力企业联合会. GB 50065-2011 交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A. and Castanheira, A. (1981) The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-100**, 3686-3693. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.317011>
- [5] 多梅尔, 著. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 等, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [6] Sunde, E.D. (1968) *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. Dover Publications, Inc., Mineola.
- [7] 李谦编著. 电力系统接地网特性参数测量与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [8] 国家能源局. DL/T 475-2017 接地装置特性参数测量导则[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [9] 舒廉甫. 三峡左岸电站发电前枢纽接地装置接地电阻测量[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会高电压专业委员会学术会议: 第一卷, 2004: 465-469.
- [10] 方瑜. 四极法测量地网接地电阻的分析[J]. 高电压技术, 1989, 11(4): 41-44.
- [11] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1991.
- [12] 李汝彪, 邱毓昌. 用附加串联电阻法消除接地电阻测量中的互感影响[J]. 中国电力, 1994(4): 64-66.
- [13] 端木林楠, 赵习静, 蔡巍, 等. 变电站地网接地阻抗测量中互感消除方法研究[J]. 高压电器, 2014, 51(11): 140-145.
- [14] 黄新波, 姬林垚, 朱永灿, 等. 电流极与电压极的引线夹角对接地电阻测量精度的影响研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 14-21.
- [15] 马御棠, 张博成, 周仿荣, 等. 消除引线互感影响的地网接地阻抗测量方法[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 73-77.
- [16] 袁培, 何智强, 胡晓晖, 等. 考虑大地影响的直线法测量大型地网的接地阻抗[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 36-42.
- [17] 侯苏洋, 郝婷婷, 于洋, 等. 引线间互感对接地阻抗测量结果的影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2019, 289(3): 52-56, 62.
- [18] Dawalibi, F. and Niles, G.B. (1984) Measurements and Computations of Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-103**, 553-560. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318744>
- [19] Dawalibi, F. (1980) Ground Fault Current Distribution between Soil and Neutral Conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-99**, 452-461. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319679>
- [20] Dawalibi, F., Bensted, D. and Mukhedkar, D. (1981) Soil Effects on Ground Fault Currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-100**, 3442-3450. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316687>
- [21] Gooi, H.B. and Sebo, S.A. (1985) Distribution of Ground Fault Currents along Transmission Lines—An Improved Algorithm. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **104**, 663-670. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319002>
- [22] Garrent, D.L., Myers, J.G. and Patel, S.G. (1987) Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **2**, 725-732. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308170>
- [23] IEEE Std.80-2000 (2000) Guide for Safety in AC Substation Grounding. Substations Committee of the IEEE Power

Engineering Society, New York.

- [24] Sarkar, T.K. and Pereira, O. (1995) Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **37**, 48-55. <https://doi.org/10.1109/74.370583>
- [25] Sheshyekani, K., Karami, H.R., Dehkhoda, P., Paolone, M. and Rachidi, F. (2012) Application of the Matrix Pencil Method to Rational Fitting of Frequency-Domain Responses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **27**, 2399-2408. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2208986>
- [26] Heppe, A.J. (1979) Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Nonuniform Current Distribution. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, **PAS-98**, 665-670. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319377>