

# 基于 EMTP 的 OPGW 短路电流计算

王卉<sup>1</sup>, 胡志坚<sup>1</sup>, 彭晓莺<sup>2</sup>, 张承学<sup>1</sup>, 陈楷<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省电力试验研究所, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 光纤架空复合地线(OPGW)中故障电流的计算是其设计选型中的一项重要工作,针对 OPGW 工程计算中常遇见的两个问题所带来的计算误差:忽略经变压器中性点通过变压器线圈流向导线的电流及忽略导线系统与地线系统的互阻抗,提出一种基于 EMTP 软件的电磁暂态计算方法。该方法可以有效地解决上述问题,准确度较高。

**关键词:** 光纤架空复合地线; 短路电流; 电磁暂态仿真程序; 电磁暂态计算

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0013-04

## 0 引言

光纤架空复合地线(Composite fiber Optic overhead Ground Wire, OPGW),是一种集光纤和电力地线于一体的新型架空地线。它与输电线路同杆塔架设,既是地线,又是通讯线路,具有不易受外力的破坏,通信容量大,安全系数高,不需架设空间走廊,经济合理、安全可靠等优点,近年来在我国电力系统中受到越来越广泛的应用。由于 OPGW 的阻抗远小于普通地线和杆塔的接地电阻,当电力系统中发生接地短路时,OPGW 中会流过很大的短路电流,引起温度的急剧上升,造成 OPGW 发热,影响其作用和性能,因此 OPGW 设计选型中的一项重要工作是计算线路在发生单相短路故障时流经的最大电流。在目前 OPGW 短路电流的工程计算中,通常会对模型做一些假设和简化,有时会使计算结果产生相当大的误差。

本文提出一种基于 EMTP(电磁暂态仿真程序)的计算方法,该计算方法可解决通常的 OPGW 短路电流计算中难以解决的问题,减小计算误差。

## 1 OPGW 短路电流的工程计算方法

对于图 1 所示的线路<sup>[1]</sup>,假设发生 A 相对地短路故障,设短路点处的电流为  $I_K$ 。在已知短路电流  $I_K$  的情况下,要计算流经 OPGW 的电流,一般的工程计算方法是分两步进行:先计算出通过双地线返回的总电流  $I_{W1}$ ,再计算出 OPGW 与另一根地线的分流系数。

文献[2]给出了一种计算双地线返回电流的简单算法。它是将从短路点向右(或线路)端看过去的电路等效为一个无限长的链形阻抗网络,由此可直接计算出入端等效阻抗  $Z$ ,然后计算  $Z$  与变电站接

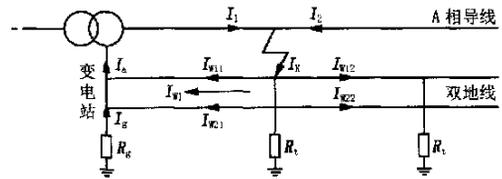


图 1 双地线系统示意图

Fig. 1 Diagram of double ground-wire system

地网的接地电阻  $R_g$  的分流系数,认为  $R_g$  所分得的电流即为  $I_{W1}$ 。这种简化计算方法存在较大误差,原因有二:一是将线路视为无限长,则绝大部分短路电流通过地线返回,使计算出的地线电流大于实际值,当线路长度不同时流经地线的电流相差非常大(尽管总短路电流相差很小);二是  $I_{W1}$  并非仅流过  $R_g$  的电流,即  $I_{W1}$  并非全部入地,它还包括经变压器中性点通过变压器线圈流向导线的电流  $I_a$ ,在忽略  $I_a$  情况下计算出的  $I_{W1}$  比实际值要小。总之,对于较短的线路(几十公里),该方法的计算误差较大。

文献[3]给出了一种考虑  $I_a$  时计算  $I_{W1}$  的较准确的方法。该文利用电路变换方法得到了一种需要计算机求解的方程组。在此基础上,经过进一步推导得到了一个可以进行手算的递推公式。但是,在该公式中也是将线路视为无限长,其计算结果仍存在一定的误差。

文献[4]给出了考虑  $I_a$  时计算  $I_{W1}$  的另一种方法,该文主要讨论了如何建立一个等效电路模型,使之能够描述  $I_a$  分量和通过  $R_g$  的电流分量,其目的是将地线阻抗系统与导线系统脱离,使得到的电路模型可以利用通信保护中计算地线电流分布的传统计算方法和相应的计算软件进行求解。在这种等效电路模型建立过程中仍做了一些近似处理。

在已知  $I_{W1}$  的条件下,要计算双地线的分流系统,在工程计算中一般不考虑导线与地线间的互

感<sup>[2,4]</sup>, 而该互感会对两地线中的电流分配造成一定的影响, 若短路相到线正好距 OPGW 线较近, 且距另一根地线较远时, 即使 OPGW 与另一根地线的阻抗相同, 流经二者的电流也会不同。因此, 不考虑导线与地线间的互感对两地线的分流计算也会带来一定的误差。

## 2 基于 EMTP 的短路电流计算

本文不采用工程计算中常用的算法, 而采用电磁暂态计算的方法, 在建模时即把地线和相线看作整体, 计及它们之间的互阻抗和互电容, 通过波过程求解, 在时域中进行计算, 即可在兼顾上述问题的基础上得出较为精确的计算结果。

### 2.1 对于电源侧的处理

在 EMTP 的计算建模时, 对于电源侧通常运用三相戴维南等值电路<sup>[5]</sup>, 即用三个 14 型电压源与相应的阻抗串联来等值。由于 14 型电源必须有一端接地, 在 OPGW 短路电流的计算中, 无法解决中性点所连接的变电站地网接地电阻的问题。

本文直接用一个变比设为 1:1 饱和变压器元件作为隔离变压器对电源侧等值。以简单的单回线双地线系统为例, 如图 2 所示。

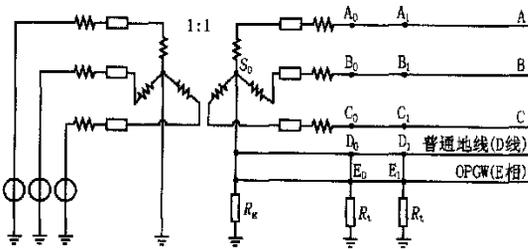


图 2 EMTP 仿真模型

Fig. 2 EMTP simulation model

建模时直接引出变压器中性点并与变电站接地电阻  $R_g$  相连, 地线与 OPGW 终端与变压器中性点相连, 仿真计算时经变压器中性点通过变压器线圈流向导线的电流  $I_a$  与实际情况相符。

### 2.2 地线与相线之间互感的处理

对于线路侧, 建模时将 OPGW 和普通地线视为 D 相和 E 相, 把地线和相线看作五相线路。在每根杆塔处设一个节点, 因将导线系统与地线系统看作整体, 导线与地线的互阻抗在列写网络方程时自然也计入在内。

我们取图 2 中 0 - 1 杆塔间的五相线路为例进行分析。不考虑线路损耗时, 可列出波动方程

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial x} = -L \frac{\partial I}{\partial t} \\ \frac{\partial I}{\partial x} = -C \frac{\partial U}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U$  和  $I$  是 5 根导线对地电压和导线中电流的列向量, 都是沿线距离  $x$  和时间  $t$  的函数;  $L$  和  $C$  是线路相域中单位长度的电感和电容参数矩阵。

由上式可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = CL \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \end{cases} \quad (2)$$

因计及五相导线之间的互阻抗,  $L$  和  $C$  都不是对角阵。为了计算方便, 可用数学方法, 即相模变换把  $LC$  和  $CL$  从相域中的非对角阵转换为模域中的对角阵<sup>[5]</sup>, 相当于对方程 (2) 去耦。转化到模域中的波动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_m}{\partial x^2} = S^{-1} L C S \frac{\partial^2 U_m}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 I_m}{\partial x^2} = Q^{-1} C L Q \frac{\partial^2 I_m}{\partial t^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $U_m$ 、 $I_m$  分别为模域中的电压、电流向量;  $S$ 、 $Q$  为相应的模变换矩阵。

$$S^{-1} L C S = u$$

$$Q^{-1} C L Q = i$$

式中:  $u$ 、 $i$  为对角阵。式 (3) 可看成 5 个相互独立的模量上的波动方程, 即 5 个模域中单导线的波动方程。因 5 根导线在模域中无耦合关系, 可取 0、1 节点间的一根模域中的线路为例进行分析如图 3(a)。

不考虑损耗时, 单导线线路上的波动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i_m}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i_m}{\partial t^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,  $L$  和  $C$  分别是线路模域中单位长度的电感和电容参数矩阵。

此方程通解为:

$$\begin{cases} i_m(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \\ u_m(x, t) = Z f_1(x - vt) - Z f_2(x + vt) \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $f_1(x - vt)$  是速度为  $v$  的前行波;  $f_2(x + vt)$  是速度为  $v$  的反行波;  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$  是波阻抗。

采用求解单导线波过程的贝杰龙 (Bergeron)



## 4 结论

1) 对于线路参数的计算,本文算法只需知道线路的型号和几何分布,即可利用 EMTP 的线路支持子程序算出所需的各种参数矩阵。

2) 本文采用变压器元件对电源侧进行模拟,有效地解决了工程计算中忽略经变压器中性点通过变压器线圈流向导线的电流时所带来的原理性误差问题。

3) 运用电磁暂态计算方法代替了工程计算中常用的“分两步”的算法,把地线系统和相线系统作为整体同时建模和计算,计及了在工程计算中一般会忽略的地线和相线间的互感问题,得到较为精确的计算结果。

4) 本算法可推广至双回线路,亦可推广至各种故障类型的计算。

### 参考文献:

- [1] 云南电力设计院(Yunnan Electric Power Design Institution). 电力系统光纤通信线路设计(Design of Fiber Optic Communications for Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2003.
- [2] 方森华(FANG Sen-hua). OPGW 复合光缆的最大允许电流分析计算(Calculation on the Maximum Short-circuit Current of OPGW) [J]. 中国电力(Electric Power), 1995, 28(11): 56-58.
- [3] 杨陆翔(YANG Lu-xiang). 复合架空地线(OPGW)的有关电气计算方法(Electrical Calculation Methods Rele-

vant to OPGW) [J]. 山西电力技术(Shanxi Electric Power), 1995, 15(4): 41-43.

- [4] 程慕尧(CHENG Mur-yao). 论架空避雷线及 OPGW 的热稳定计算(Thermal Stability Calculation of Overhead Ground Wire and OPGW) [J]. 电力建设(Electric Power Construction), 1994, 15(13): 38-41.
- [5] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论(EMTP Theory Book) [M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译(LI Yong-zhuang, LIN Ji-ming, ZENG Shao-hua, Trans). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1991.
- [6] 吴维韩, 张芳榴, 等(WU Wei-han, ZHANG Fang-liu, et al). 电力系统过电压数值计算(Numerical Calculation of Overvoltage in Power System) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1989.
- [7] 袁建生, 马信山, 邹军, 等(YUAN Jian-sheng, MA Xin-shan, ZOU Jun, et al). 关于 OPGW 设计选型中的最大短路电流计算(Calculation on the Maximum Short-circuit Current in Design and Model Selection of OPGW) [J]. 电力建设(Electric Power Construction), 2001, 22(10): 51-54.

收稿日期: 2004-01-15; 修回日期: 2004-02-07

### 作者简介:

王 卉(1978 - ), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真; E-mail: kfgirl@263.net

胡志坚(1969 - ), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化方面的研究;

彭晓莺(1951 - ), 女, 教授级高工, 从事过电压专业工作。

## Calculation of OPGW short circuit current based on EMTP

WANG Hui<sup>1</sup>, HU Zhi-jian<sup>1</sup>, PENG Xiao-ying<sup>2</sup>, ZHANG Cheng-xue<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** One of the major jobs in designing and model selecting of the compound optical ground wire (OPGW) is to calculate the fault current passing through OPGW as the short circuit occurs. To avoid errors resulted by the two following problems, one is neglecting the current flowing from neutral point of transformer to the conductor, and the other is neglecting the mutual impedance between ground wire system and conductor system, this paper proposes an electromagnetic transient calculation method based on EMTP, which can solves these problems efficiently and has a high accuracy.

**Key words:** OPGW; short circuit current; EMTP; transient electromagnetic calculation