

10kV 小电阻接地系统特殊问题的研究

袁勇¹, 李晓明², 潘艳², 谢江辉³, 李彬³, 孙红³

(1. 三峡大学电气及信息工程学院电气自动化系, 湖北 宜昌 443002;

2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉供电局, 湖北 武汉 430011)

摘要: 提出了 10 kV 小电阻接地系统的系统模型和节点电压方程, 根据该模型分析了该系统线路对地电容参数不对称所引起的流过接地变压器中性点的零序电流的变化规律。分析了高压侧出现单相接地故障对低压侧的影响情况, 分析了变电所接地网接地不良所产生的接地变压器中性点零序电压升高的情况, 并通过仿真算例证实了参数不对称和接地不良可能导致接地变压器零序电流保护误动的结论。

关键词: 小电阻接地; 接地网; 参数不对称; 零序电流保护; 节点电位法

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0016-04

1 引言

近年来, 随着城市建设和供电业务的迅速发展, 一些大城市新发展的 10 kV 配电网主要采用地下电缆, 使对地电容电流大大增加。如果采用消弧线圈接地, 则需要较大的补偿容量, 而且要配置多台。10 kV 配电网线路在运行中操作较多, 消弧线圈的分接头及时调整有困难, 容易出现谐振过电压现象。因此我国许多大城市 10 kV 配电网采用了中性点经小电阻接地方式来解决这一问题。10 kV 中性点小电阻接地方式在我国投入运行时间不长, 许多问题尚未进行深入研究。本文就小电阻接地系统运行中可能出现的电缆对地电容参数不对称及变电所接地网不良所带来的问题进行了研究。

2 10 kV 小电阻接地系统线路参数不对称产生的问题

2.1 系统模型

目前, 由于 10 kV 中性点小电阻接地系统主变压器 10 kV 侧一般采用三角形接线, 中性点须采用一台接地变压器来实现, 故建立 10 kV 小电阻接地系统电网模型如图 1 所示。

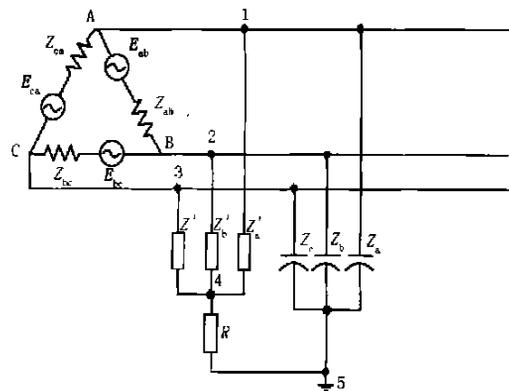


图 1 10 kV 小电阻接地系统模型图

Fig. 1 The model of low resistance grounded 10kV system

其中, Z_a 、 Z_b 、 Z_c 为 10 kV 出线对地等效三相电容阻抗值, Z_a 、 Z_b 、 Z_c 为 Z 型接地变压器三相等值阻抗; E_{ab} 、 E_{bc} 、 E_{ca} 为系统等值三相电势源, Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 分别为其三相电源等效内阻, R 为接地电阻。

2.2 节点电压方程

对以上建立的 10kV 小电阻接地系统的网络模型, 采用节点电位法进行分析, 选择节点 5 作为参考节点, 节点方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{E_{ab}}{Z_{ab}} - \frac{E_{ca}}{Z_{ca}} \\ \frac{E_{bc}}{Z_{bc}} - \frac{E_{ab}}{Z_{ab}} \\ \frac{E_{ca}}{Z_{ca}} - \frac{E_{bc}}{Z_{bc}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_{ab}} & -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_a} \\ -\frac{1}{Z_{ab}} & \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_{bc}} & -\frac{1}{Z_b} \\ -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_{bc}} & \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_c} & -\frac{1}{Z_c} \\ -\frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_b} & \frac{1}{Z_c} & \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

即 $I = Y \cdot U$ (2)

$$\text{其中: } I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{ab}}{Z_{ab}} - \frac{E_{ca}}{Z_{ca}} \\ \frac{E_{bc}}{Z_{bc}} - \frac{E_{ab}}{Z_{ab}} \\ \frac{E_{ca}}{Z_{ca}} - \frac{E_{bc}}{Z_{bc}} \\ 0 \end{bmatrix}, \text{为节点注入电流向量, } U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}, \text{为节点电压向量,}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_{ab}} & -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_a} \\ -\frac{1}{Z_{ab}} & \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_{bc}} & -\frac{1}{Z_b} \\ -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_{bc}} & \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_c} & -\frac{1}{Z_c} \\ -\frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_b} & \frac{1}{Z_c} & \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{R} \end{bmatrix}$$

Y为节点导纳矩阵,由式(2)可以求解出节点电压:

$$IU = Y^{-1} \quad (3)$$

$$\text{其中 } Y^{-1} \text{为 } Y \text{的逆矩阵,且 } Y^{-1} = \frac{Y^*}{|Y|}, \quad Y^* = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21} & Y_{31} & Y_{41} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{32} & Y_{42} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & Y_{43} \\ Y_{14} & Y_{24} & Y_{34} & Y_{44} \end{bmatrix}, \text{为矩阵 } Y \text{的伴随矩阵,其中 } Y_{ij}$$

是|Y|去掉第*i*行第*j*列的余子式。因此可得:

$$\begin{aligned} U_4 &= (-1)^{(1+4)} \frac{Y_{14}}{|Y|} I_1 + (-1)^{(2+4)} \frac{Y_{24}}{|Y|} I_2 + (-1)^{(3+4)} \frac{Y_{34}}{|Y|} I_3 = \\ & (-1)^{(1+4)} \frac{\begin{vmatrix} -\frac{1}{Z_{ab}} & \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_{bc}} \\ -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_{bc}} & \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_c} \\ -\frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_c} \end{vmatrix}}{|Y|} \cdot \left[\frac{E_{ab}}{Z_{ab}} - \frac{E_{ca}}{Z_{ca}} \right] + \\ & (-1)^{(2+4)} \frac{\begin{vmatrix} \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_{ab}} & -\frac{1}{Z_{ca}} \\ -\frac{1}{Z_{ca}} & -\frac{1}{Z_{bc}} & \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_c} \\ -\frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_c} \end{vmatrix}}{|Y|} \cdot \left[\frac{E_{bc}}{Z_{bc}} - \frac{E_{ab}}{Z_{ab}} \right] + \\ & (-1)^{(3+4)} \frac{\begin{vmatrix} \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_{ca}} + \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_{ab}} & -\frac{1}{Z_{ca}} \\ -\frac{1}{Z_{ac}} & \frac{1}{Z_{bc}} + \frac{1}{Z_{ab}} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_{bc}} \\ -\frac{1}{Z_a} & -\frac{1}{Z_b} & -\frac{1}{Z_c} \end{vmatrix}}{|Y|} \cdot \left[\frac{E_{ca}}{Z_{ca}} - \frac{E_{bc}}{Z_{bc}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

根据 U_4 的表达式,对各种不对称情况作如下分析。

(1) 当 $Z_a = Z_b = Z_c$, 且 $Z_a = Z_b = Z_c, Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, 即 Z 型变压器三相阻抗对称, 且 10 kV 出线三相等效对地电容对称, 等效电源内阻相等。

此时有: $Y_{14} = Y_{34} = -Y_{24}$, 因此可得: $U_R = U_4 = 0$, 即无论三角形接法的电源侧出现何种不对称情况, 均不会导致小电阻流过零序电流。

(2) 当 Z 型变压器三相阻抗、10 kV 出线三相等效对地电容、等效电源内阻中有一个参数不对称时, $U_4 \neq 0$, 小电阻上将产生零序电流。因电缆线路某相绝缘发生老化(但未击穿), 与其他两相产生不对称, 或在施工过程中, 由于施工人员没有严格按照规程操作, 将杂质混入电缆接头处, 这同样也会给电缆参数不对称造成隐患, 故线路参数不对称的可能性最大, 下面以线路参数不对称为例进行分析。

设 A 相对地电容参数不对称, 不对称系数为 K , 定义 K 为:

$$K = (Z_a - Z_a) / Z_a \quad (5)$$

其中 Z_a 为对称时 A 相的标准参数; Z_a 为不对称时 A 相的实际参数。很显然, K 的取值越大, 不对称程度越厉害。

假设: $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}, Z_a = Z_b = Z_c$, 并令 $Z_b = Z_c, Z_a = (1 - K) Z_c, K = 0 \sim 1$ 。参数对称时 $K = 0$, 极端不对称时(金属性短路时) $K = 1$ 。

将它们代入式(4), 则可以推导出接地变压器中性点零序电压:

$$U_4 = K (E_{ca} - E_{ab}) = K E \quad (6)$$

$$\text{所以有: } I_R = \frac{U_4}{R} = \frac{K}{R} (E_{ca} - E_{ab}) \quad (7)$$

其中: I_R 为流过接地变压器中性点的零序电流, K 为系统阻抗参数及不对称系数 K 的函数。

由式(4)、(6)和(7)可以推出下列结论:

1) $|K|$ 为 K 的单调递增函数, 随着 K 的增大而增大。当 $K = 1$ 时, 即发生单相接地故障时, $|K|$ 达到最大值; 当 $K = 0$ 时即三相对称时 $|K|$ 为零。也就是说不对称度越大, $|K|$ 值越大。因而由上述 I_R 的表达式可知, 不对称度越大, 小电阻上零序电流越大。

2) 线路对地电容参数不对称时, 将导致接地变压器中性点出现零序电压。不对称越严重, 零序电压越高。

3) 当高压侧正常对称运行时: $|E| = |E_{ab} - E_{ca}| = \sqrt{3} E_{ph}$, 高压侧出现单相接地故障时: $|E| =$

$(\sqrt{3}/2 \sim \sqrt{3}) E_{ph}$ (取决于高压侧哪一相故障)^[1]。即: $|E| = |E|$, 所以, 线路参数不对称情况下高压侧接地故障不会导致低压侧零序电流的进一步增加。

4) 对于其他各种参数不对称的情况, 均可得到与以上分析相类似的结论。

2.3 参数不对称产生的问题

由于参数不对称会使小电阻上产生零序电流, 且零序电流随着不对称度的增大而增大, 所以当不对称度增大到一定程度时, 达到接地变压器零序电流保护的整定值, 将导致接地变压器零序电流保护误动。

3 接地网接地不良产生的问题

10 kV 小电阻接地系统变压器高压侧中性点一般直接接地, 当接地网接地不良时, 高压侧任何形式的接地短路故障都会引起地电网电位的升高, 从而影响 10 kV 侧的正常电压。特别是 10 kV 小电阻接地系统线路参数不对称时, 由于相电压的升高, 将进一步增大小电阻上的零序电流。下面结合实例来分析。

如图 2 所示, 主变压器高压侧 110 kV 中性点直接接地, 低压侧 10 kV 中性点经电阻接地, 它们都与变电站的地网相连。接地网接地电阻为 R_j 。

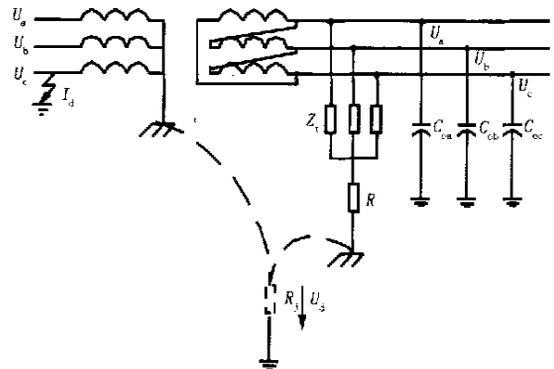


图 2 高压侧 C 相短路时传递电压示意图

Fig. 2 The sketch for grounding resistance delivers voltage during short-circuit of phase C on HV side

当 110kV 侧单相接地时, 通过接地网的短路电流 I_d 使地网电位升高至 U_j :

$$U_j \cong I_d R_j,$$

U_j 作用于 10 kV 侧回路, 使 10 kV 侧电网相对理想地的电压升高, 即加在对地电容上的电压升高。此时如果线路参数不对称, 小电阻上将有零序电流产生, 相电压的升高进一步增大小电阻上的零序电流。如 2.3 所述, 此时接地变压器零序电流保护误动的

几率将会加大。

4 现场数据仿真

某变电站 110 kV 中性点直接接地,10 kV 侧经接地变压器中性点串小电阻接地,接地电阻为 16 Ω ,接地变压器零序阻抗为 4.4 Ω ,10 kV 侧线路对地电容阻抗为 101 Ω ,接地变压器零序电流保护整定值为 55 A。

根据实际参数,取不同的不对称系数 K 的值,得出线路参数不对称时产生的流经中性点的电流 I_R 随自变量 K 变化的曲线,如图 3 所示。考虑接地网接地不良时,接地网电阻取为 0.5 Ω ,根据不同的高压侧短路电流及 K 值得到一组流经中性点的电流 I_R 的曲线,如图 4 所示。图中均为接地变压器零序电流保护整定值。

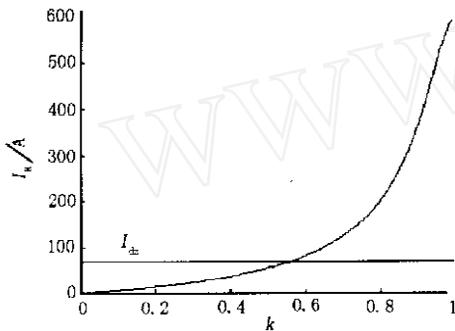


图 3 I_R 随不对称系数 K 变化曲线

Fig. 3 The curve for I_R changing with asymmetry coefficient K

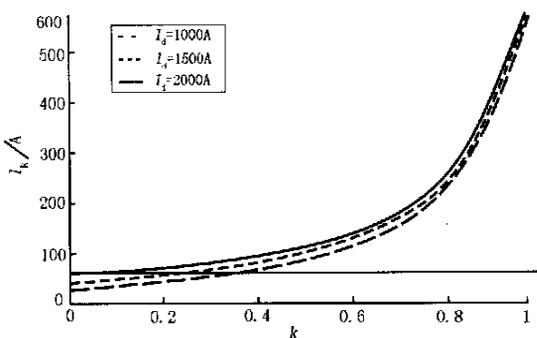


图 4 计及高压侧短路电流影响时 I_R 随 K 变化曲线

Fig. 4 The curve for I_R changing with K when short-circuit current on HV side is included

从以上仿真曲线可以看出,随着不对称系数的增加,接地变压器中性点电流增加。仅仅线路对地电容阻抗不对称时,当不对称系数 K 达到 0.55 左右时,接地变压器零序电流达到保护整定值,接地变压器零序电流保护将误动。如果变电所接地网不好,线路对地电容阻抗又不对称,接地变压器零序电流达到保护整定值时的不对称系数 K 明显减小,且高压侧短路电流越大, K 值越小。仿真结果很好地验证了前面的分析。

5 结语

10 kV 中性点小电阻接地方式在我国投入运行时间不长,许多问题尚未进行深入研究。线路参数不对称会产生流过接地变压器中性点的零序电流,变电所接地网接地不良会导致接地变压器中性点零序电压加大。线路参数不对称达到一定的程度或两个因素的同时存在将引起接地变压器零序电流保护误动。因此对电缆线路参数的对称性及变电所接地网接地的完好性进行监测是保证小电阻接地系统安全运行的重要措施。

参考文献:

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京:水利电力出版社,1986.
- [2] 张隆兴,周裕厚. 10 kV 及以下电力电缆实用技术[M]. 北京:中国物资出版社,1998.
- [3] Paul Dev, Venugopalan S I. Low-resistance grounding method for medium voltage power systems. 1991 IEEE Industry Application Society Annual Meeting 1991, Sponsored by IEEE Industry Application Soc. 1571-1578.
- [4] Yu, Luke; Henriks, Rolf L. Selection of system neutral grounding resistor and ground fault protection for industrial power systems. 38th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference 1991, Sponsored by IEEE Industry Applications Soc. 147-153.

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2003-01-27

作者简介:

袁勇(1970-),男,讲师,从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作;

李晓明(1955-),男,教授,从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作。

Study on special problems of low resistance grounded 10 kV system

YUAN Yong¹, LI Xiao-ming², PAN Yan², XIE Jiang-hui³, LI Bin³, SUN Hong³

(1. Three-Gorge University, Yichang 443002, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Wuhan Power Supply Bureau, Wuhan 430011, China)

基于小波神经网络的变压器励磁涌流和内部故障电流识别

王莉丽, 荣雅君

(燕山大学电气工程学院电力工程系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 小波神经网络(Wavelet Neural Network)结合了小波变换及神经网络的优点,即具有良好的时频局部性质,又有较好的自学习能力和容错能力。针对变压器励磁涌流与内部故障电流的识别问题,提出了一种基于小波神经网络的解决方案,阐述了基本的思想方法和具体的算法过程,EMTP 仿真实验表明了该方案的有效性与可行性。

关键词: 小波神经网络; 励磁涌流; 变压器保护

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0020-03

1 引言

变压器差动保护的核心问题是如何正确识别变压器励磁涌流和内部故障电流。因为变压器在空载合闸或外部故障切除电压恢复时,会产生较大的励磁涌流,如不加以识别,会导致差动保护的误动作。因此这个问题无论在理论研究上还是实际工程中,一直备受人们关注。

纵观大量相关文献,人们已经提出了很多解决该问题的算法。例如二次谐波制动法、间断角法、电压制动法、磁通特性原理法、等值电路法等等。二次谐波制动法原理简单,微机实现容易,但电网电压等级的提高和规模的扩大、变压器容量的增大和制造技术的提高使其面临一些问题^[1];间断角法保护硬件的成本很高;电压制动原理要求对系统阻抗有比较精确的了解;等值电路法由于需要知道变压器两侧的漏抗而无法物理实现;磁通特性原理法需要对变压器的某些参数作假设等。

此外,人们提出了很多新的变压器保护方案。文[2]利用变压器两端的电流采样值,训练一个三层前向神经网络模型,使之对变压器的励磁涌流状态和各种故障状态能够给出正确的识别,但它对于电流中的暂态高频分量无能为力;文[3]利用小波变换的局部极大值特性提取励磁涌流的间断角特征,在此基础上定性区分励磁涌流和故障电流。但根据小波变换后的结果作出是否故障的判断,对于干扰较

重的现场,可靠性较低。

近年来,小波神经网络成为人们研究的热点。它不但具有学习性、快速计算和容错能力强的优点,而且具有很好的时频分析特点。本文提出了用小波神经网络解决变压器差动保护中励磁涌流和内部故障电流的识别问题,通过仿真表明了该方法具有显著的优越性。

2 问题描述

当变压器空载或外部故障切除后电压恢复时在变压器一侧可能产生峰值很大、波形严重畸变的电流。因为在稳态工作情况下,铁心中的磁通应滞后于外加电压 90° 。如果空载合闸时,正好在电压瞬时值 $u=0$ 时接通电路,则铁心中应该具有磁通 $-\phi_m$ 。但是由于铁心中的磁通不能突变,因此,将出现一个非周期分量的磁通,其幅值为 $+\phi_m$ 。这样在经过半个周期以后,铁心中的磁通就达到 $2\phi_m$ 。如果铁心中还有剩余磁通 ϕ_s ,则总磁通将为 $2\phi_m + \phi_s$ 。此时变压器的铁心严重饱和,励磁电流剧烈增大,此电流就称为变压器的励磁涌流,波形如图1所示。它的大小和衰减时间,与外加电压的相位、铁心中剩磁的大小和方向、电源容量的大小、回路的阻抗以及变压器容量的大小和铁心性质等都有关系。表1^[4]所示的数据,是对几次励磁涌流试验数据的分析。由此可见,励磁涌流具有如下特征:

Abstract: Numerical busbar protective relay based on current differential principle with ratio restraining characteristic is used widely in the electric power system. Its setting method can't keep to the old principle indiscriminately. This paper introduces the setting principle of WMH800. Especially it analyzes the theory that how to calculate the differential setting value and the voltage interlock setting value and etc. Some reference principles for the setting calculation of numerical busbar protection is provided.

Key words: setting principle; reliability coefficient; sensitivity; busbar protection