

小电流接地电网改进能量法接地选线原理

朱丹, 蔡旭

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

摘要: 根据小电流接地电网单相接地故障时电压电流的变化特点, 利用中性点电压、故障相电压和零序电流构造的能量曲线的斜率来进行故障选线。该方法不受电网平衡情况和接地电阻大小的影响, 对复杂的间歇性电弧接地故障同样有效。MATLAB 仿真证明了本文的结论是正确的。

关键词: 小电流接地电网; 间歇性电弧接地故障; 零序能量

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)10-0044-05

0 引言

我国中低压电网中, 中性点一般采取不接地、经高电阻接地、或经消弧线圈接地等接地方式。这类电网在发生单相接地故障时, 短路电流只能通过对地电容或阻抗形成小电流回路, 所以又被称为小电流接地电网^[1]。小电流接地电网发生单相接地故障后的选线困难, 特别是中性点经消弧线圈接地的电网。目前小电流接地系统故障选线方法按所用电气量可以分为: 利用注入信号和故障信号。其中利用故障信号的方法又可分为利用故障信号的稳态量和暂态量两种^[1]。注入法需要附加信号源且注入信号给电网带来一定的影响; 利用故障信号稳态量的方法存在检测信号偏小的问题, 且不能判断瞬态接地和间歇性接地故障; 故障信号暂态量较大, 完整地反映了故障发生的过程和特点, 不仅能判断稳定接地, 而且能够判断瞬态接地和间歇性接地故障。本文研究了小电流接地电网单相接地故障发生后的电压和电流的特点, 提出了利用能量变化方向的原理选择接地线路的方法。

1 电网数学模型的建立

1.1 电网数学模型

为了研究电网单相接地故障, 仅仅利用实际测量的故障波形和数值是不够的。不但实际测量波形和数据较少, 而且由于测量不准确或者其它的干扰影响了对电网单相接地时电压电流等物理量特征的归纳研究。所以要建立一个既便于分析又能够反映实际电网特征的模型。

在中低压电网中, 线路的长度较短, 在与电压电流波的波长相比相差几个数量级的情况下, 电路网络可以用集中参数模型。单相接地故障中, 要研究

暂态接地到稳定接地的过渡过程中各个物理量的变化规律, 就不能忽略线路的电感、相间电容、线路电阻和线路对地导纳, 对地电容可以是不平衡的。本文中所建立的电网模型如图 1。模型中忽略了线路并联电导和线路互感。忽略线路并联电导是因为在三相线路中用并联电导来表示线路电压引起的有功功率损耗, 而电压为 110 kV 以下的架空线路, 与电压有关的有功功率损耗主要是由绝缘子表面泄露电流所引起的, 一般可以忽略不计。忽略线路间互感是因为相对于相间电容来讲, 线路相间互感很小, 可以忽略不计。模型的建立也是希望用软件模拟实际电网正常运行或者故障状态的情况, 忽略了影响小的过份细节的因素, 抓住问题的主要部分。

以暂态量作为研究对象, 所以此时定义的零序电流不再是传统意义上的三序电流中的零序分量, 而是三相电流瞬时值之和的 1/3。同样零序电压也为三相电压之和的 1/3, 如式(1)、(2)所示。

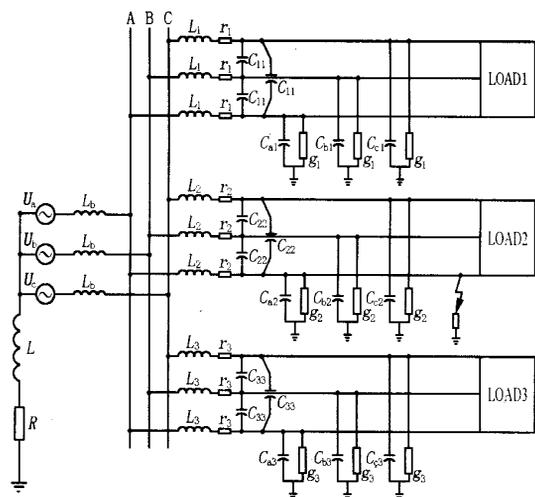


图 1 仿真电网模型

Fig. 1 Model of simulated power network

$$i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3 \quad (1)$$

$$u_0 = (u_a + u_b + u_c)/3 \quad (2)$$

根据图 1 电网数学模型列出电压、电流状态方程,接地采用开关串联电阻的模型进行数值计算。

1.2 模型验证

为检验所建模型是否正确,作者查阅大量资料。由于间歇性电弧接地是单相接地中过程最为复杂的,若在模型上做的间歇性电弧接地仿真符合实际测得的各个物理量的波形特征,那么可验证所建立的模型是正确的。

文献[2]根据对 20 kV 电网测量的将近 500 次的单相接地故障的实际数据发现,小电流接地电网中单相间歇性电弧接地的接地电阻主要在 200400 和 20004000 这两个区间。所以我们就接地故障电阻在上述两个区间的间歇性电弧接地故障运用 MATLAB 仿真软件做了大量的仿真计算。图 2 为文献[2]中芬兰工程师在 20 kV 电网采样率为 3500 Hz 时录入的故障线路零序电流和中性点电压波形。图 3 为作者在仿真 20 kV 电网采样率为 3500 Hz 时发生间歇性电弧接地故障(电弧重燃五次)计算得到故障线路零序电流和中性点电压波形。从仿真波形图 3 和实测波形图 2 看,两者特征十分相近,说明所建立的仿真模型能够反映实际电网情况。在此电网模型上做的仿真研究得到的规律和结果是正确的。

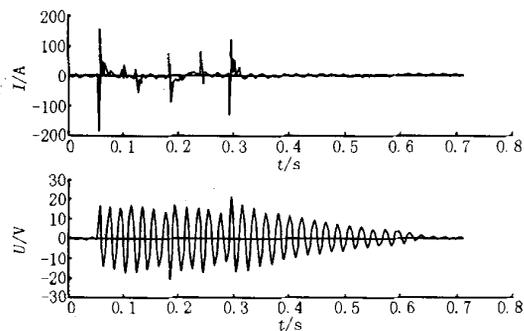


图 2 20 kV 电网间歇性电弧接地时,实测故障线路零序电流和中性点电压波形^[2]

Fig. 2 Waveforms of real zero-sequence current in fault line and neutral voltage arc-earth fault in 20 kV network

2 对接地现象的分析研究

电网线路与大地之间存在对地电容,三相存在相间电容。一般情况下,各相对地电容 C_A C_B C_C 。所以电网正常运行时中性点呈现一定数值的对地电位差,即“不对称电压”,此时的电网为不对称电网或不平衡电网^[3]。如果线路经过良好的换位,

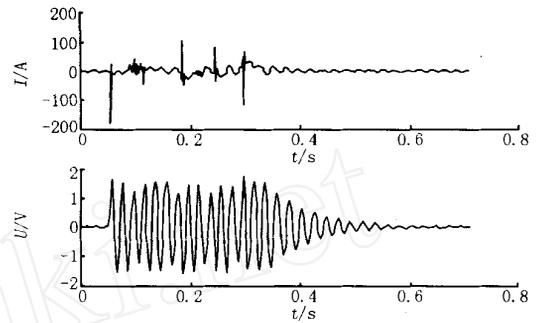


图 3 20 kV 电网间歇性电弧接地时,故障线路零序电流和中性点电压仿真波形

Fig. 3 Simulated waveforms of zero-sequence current in fault line and neutral voltage of arc-earth fault in 20 kV network

使得三相对地电容与相间电容分别相等,中性点电压在电网正常运行时应该为零,此时的电网为对称电网或平衡电网^[4]。不管平衡电网还是不平衡电网,发生单相接地故障后,都表现为中性点电压和相电压以及各条线路零序电流发生变化。而且能够直接测量的物理量也只有这些,如何利用这些量来进行故障选线值得深入研究。

电网发生单相接地故障后,故障相电压降低,非故障相电压和中性点电压升高,零序电流增大。故障相电压,中性点电压和各线路的零序电流这三个物理量完全可以反映故障情况。对于小电流接地电网,各条线路的零序电流值都比较小,以往单单以零序电流的特点作为选线判据势必分辨率低。而以零序电流乘以中性点电压所得的零序功率以及零序功率积分得到的零序能量^[5,6]没有反映出故障相电压的变化情况。当发生金属性接地故障时,故障相电压降到零,中性点电压上升到相电压,此时零序能量有较高的分辨率;但当接地电阻很大时,故障相电压下降不多,中性点电压幅值较小,线路零序电流也很小,此时零序能量法不能很好地判别故障线路。所以拟定以中性点电压与故障相电压的差作为电压量,再与零序电流做积分求得的能量来研究接地故障。即:

$$w = \int_0^{nT} (u_0 - u_a) i_0 dt \quad (3)$$

式中采用 $(u_0 - u_a)$ 代替零序能量中的 u_0 , 保证在高阻接地故障时能量的数值较大,可以提高分辨率。根据电网模型列写电压和电流状态方程,接地采用开关串联电阻的模型进行数值计算,求得中性点电压、各相电压和各条线路的零序电流。电网模型参数的不同,计算出不同情况下各条线路的能量,并绘

制能量曲线来研究该能量的特点。

图4为平衡电网在不同接地电阻和不同的故障发生时刻下各条线路的能量,其中(a)为故障发生在故障相电压较大时刻且接地电阻较大的情况,(b)为故障发生在故障相电压接近过零点时刻且接地电阻较小的情况。从图4中可以看出当发生小电阻接地故障时故障线路的能量瞬间变化很快,接地电阻大时变化相对较慢。而对于所有线路,不同的接地电阻和不同的接地时刻影响能量幅值,能量曲线的形状基本不变:未发生故障时能量为零,发生故障后,故障线路能量为负而非故障线路能量为正;且从能量大小上,故障线路能量大而非故障线路能量小。这与文献[5]中的方法具有相同的规律。

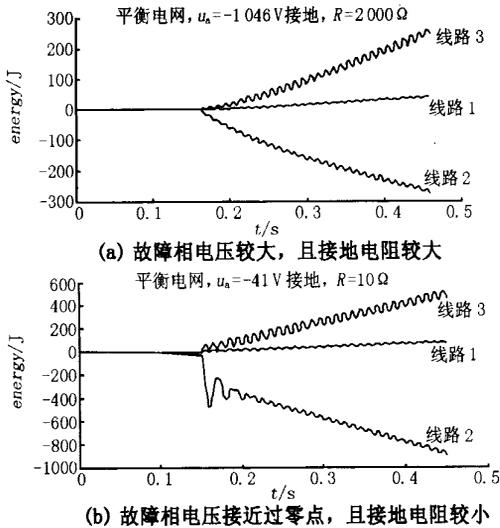


图4 平衡电网在不同接地电阻和不同的故障发生时刻下各条线路的能量

Fig. 4 Zero-sequence energy of all lines in balanced network

图5为不平衡电网在不同接地电阻和不同的故障时刻下各条线路的能量。(a)中B相对地电容最小,A相和C相对地电容相同,故障发生时故障相电压大,接地电阻小;(b)中A相对地电容最小,B相和C相对地电容相同,故障发生时故障相电压小,接地电阻大。从图中可以看出,不平衡电网在正常运行时中性点有一定的对地电位,零序电流不为零,所以未发生故障时各条线路的能量不为零。虽然三相对地电容不相同的情况不同,使得正常情况下的能量方向不同,但只要是没有故障发生,各条线路的能量符号是相同的(都是正的或者都是负的)。发生故障后线路能量的正负不能确定:(a)中线路3和线路1能量由负变正,线路2保持负值;(b)中线路3和线

路1能量保持正值,而线路2由正变负。所以此时不能以能量的方向来判断故障线路。同时线路2的能量大小也不再是最大的,所以能量的大小也不能作为选线依据。

经过大量的计算,发现不管是平衡电网还是不平衡电网,不管故障发生在何时,故障后故障线路的能量曲线的斜率为负数而非故障线路能量曲线的斜率为正数。所以得出结论:对于小电流接地系统,在线路上发生单相接地故障时,以能量曲线的斜率来判断故障线路。如果各条线路的能量曲线斜率符号相同则无故障发生,或者发生母线接地故障,此时需要中性点电压幅值的进一步判断(如果中性点电压超过相电压的15%则发生故障);如果有线路能量曲线斜率与其他线路的能量曲线斜率符号不同,那么该线路即为故障线路。

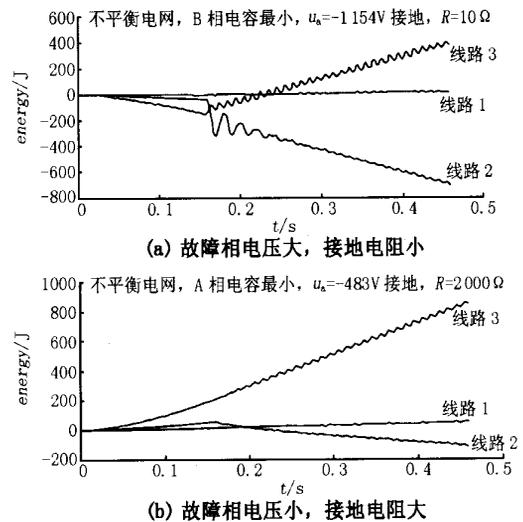


图5 不平衡电网在不同接地电阻和不同的故障发生时刻下各条线路的能量

Fig. 5 Zero-sequence energy of all lines in unbalanced network

3 能量变化方向选线原理

3.1 能量变化的定义

将能量曲线斜率定义为能量变化。根据上面的分析总结,能量变化方向选线原理阐述为:故障线路的能量变化与非故障线路的能量变化方向是不相同的,以此判断出故障线路。

线路 j 的能量变化算式为:

$$w_j = [w_j(t_2) - w_j(t_1)] / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

即:

$$w_j = \int_0^{t_2} (u_0 - u_a) i_{0j} dt - \int_0^{t_1} (u_0 - u_a) i_{0j} dt / (t_2 - t_1) \quad (5)$$

3.2 仿真实验

用 MATLAB 软件仿真了各种电网条件下的情况,证明上述选线原理均正确。以下是电网不平衡度较大时,比较极端条件下的仿真结果。

仿真条件:线路 1 的对地电容为 $1 \mu\text{F}$,线路 2 的对地电容为 $4 \mu\text{F}$,线路 3 的对地电容为 $15 \mu\text{F}$,A 相对地电容最小,B 相和 C 相对地电容相等。电网的电压等级为 6 kV,正常运行时中性点电压为相电压的 13%,阻尼率为 5%,脱谐度为 0。在 $t=0.155 \text{ s}$ 时线路 2 发生第一次燃弧接地,熄弧后又重燃 5 次,弧道电阻为 5。

图 6(a) 为不平衡电网发生间歇性电弧接地故障时各条线路的能量曲线。从图上可以看出,未发生故障时 3 条线路的能量曲线斜率符号相同,而发生故障后非故障线路的能量曲线斜率是正的,故障线路的能量曲线斜率是负的,即故障发生后依据线路能量变化方向是可以判断出故障线路的。图 6(b) 为不平衡电网发生间歇性电弧接地故障时各条线路在工频周期内的能量变化曲线。从该图中更容易看出故障线路与非故障线路能量变化方向相反的特点,因为不断地燃弧和熄弧,所以曲线呈现锯齿状。特别值得注意的是,在图 6(a) 中每次燃弧时能量曲线都有一个突变:非故障线路能量曲线突然快速上升,故障线路能量曲线突然快速下降。这样甚至可以判断燃弧次数和时刻。可见,能量变化方向是在比较复杂的故障情况下有效地判断出故障线路的。传统的能量原理认为发生故障线路能量小于零,而图 5 显示故障线路与非故障线路能量的符号是不定的。其他大量的仿真分析也证明了传统的能量原理在电网不平衡度较大时存在死区。能量变化方向选线原理无死区,且比能量原理的分辨率高(图 6 中能量变化方向十分明显)。

3.3 可行性分析

在实际应用中,由于受到硬件条件和制造成本的限制,为了降低采样率,中性点电压、故障相电压和各条线路的零序电流须经过低通滤波器滤波调理后再采样,用滤波后的电气量计算是否还满足上述原理。图 6(b) 是对仿真得到的电气量经过 2 阶截止频率为 100 Hz 采样率为 1000 Hz 低通滤波器后的能量曲线图,从图上可以看出滤波后能量变化方向原理仍然可以准确判断故障线路。这意味着采用

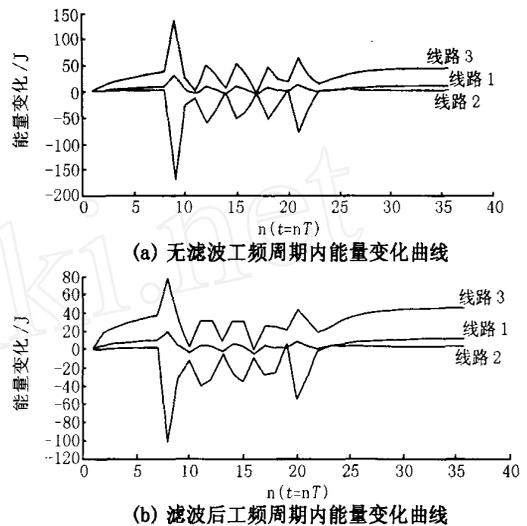


图 6 不平衡电网间歇性电弧接地故障各条线路无滤波和滤波后工频周期内能量变化

Fig. 6 Energy variety of lines with or without filter in unbalanced network when arc-earth fault occurs

低成本的单片机系统有可能实现上述选线原理。

4 结论

利用中性点电压,故障相电压和零序电流求得的能量在故障前后变化的特点可以准确区别故障线路。该方法在电网不平衡度较大情况和暂态接地故障情况都有效。在实际应用中对硬件条件要求不高,选线分辨效果明显。

参考文献:

- [1] 马珂,张保会(MA Ke, ZHANG Bao hui). 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望(Development and Expectation of Detecting Fault Line in a Neutral Point Indirectly Grounded Power System) [J]. 继电器(Relay), 2003, 31(5):65-69.
- [2] Seppo H-ninen, Matti Lehtonen. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44.
- [3] 李福寿(LI Fu shou). 中性点非有效接地电网的运行(Performance of Electrical Network with Neutral Point Unre-ficient Grounding) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1993.
- [4] 要焕年,曹梅月(YAO Huannian, CAO Mei-yue). 电力系统谐振接地(Power System Harmonic Oscillation Grounding) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 2000.

- [5] 何奔腾,胡为进(HE Ben-teng, HU Wei-jin). 能量法小电流接地选线原理(A New Principle to Detect the Grounded Line in a Neutral Point Indirectly Grounded Power System Based on the Energy Function)[J]. 浙江大学学报(自然科学版)(Journal of Zhejiang University, Natural Science), 1998, 32(4):451-457.
- [6] Griffel D, Harmand Y, Leitloff V, et al. New Deal for Safety and Quality on MV Networks[J]. IEEE Trans on Power Deliv

ery, 1997, 12(4).

收稿日期: 2003-09-09; 修回日期: 2003-11-14

作者简介:

朱丹(1979-),女,硕士研究生,研究方向为小电流接地系统单相接地故障选线原理与仿真;

蔡旭(1965-),男,副教授,研究方向为大功率电力电子设备。

Improved energy function to detect the grounded line in neutral point indirectly grounded network

ZHU Dan, CAI Xu

(School of Electrical and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, a new method of energy function to detect single phase earth fault in neutral point indirectly grounded network is presented. This method is based on the slope of energy curve constructed by neutral voltage, fault phase voltage, and zero sequence current to detect the fault line. It is immune from the unbalanced status of network and the values of earthed resistance. To the complicated intermittent arc-earth fault, the proposed method also works well. MATLAB simulation verifies the points of the paper.

Key words: neutral point indirectly grounded network; intermittent arc-earth fault; zero-sequence energy

关于召开第六届全国电机保护控制与电工节能技术学术研讨会的征文通知

第六届全国电机保护控制与电工节能技术学术研讨会由中国电工技术学会电机保护控制专业委员会、国电自动化研究院和清华大学电机工程与应用电子技术系联合举办,于10月中旬在温州召开,届时将邀请国家有关部委领导、院士和国内外电机保护控制领域的著名专家、学者、企业家、工程技术和相关工作人员等参会,就有关面向21世纪的电机保护控制与电工节能技术领域的发展动态、最新成果和对策建议等方面问题作专题报告,进行技术交流和新技术新成果展示。现面向全国各地征集论文,希望广大从事电机保护与控制及电工节能产品开发的专家、学者、工程技术人员踊跃投稿,同时也欢迎国内外相关企业来稿或参加学术交流或展示新技术新成果。有关参会事宜请与任一举办单位联系。

一、征文范围

- 1、电机保护的新原理、新技术,以及发展趋势。
- 2、电机智能微机监控和保护系统。
- 3、现场总线技术在电机保护中的应用。
- 4、电动机、发电机、变压器、电焊机新技术、新产品及其保护控制装置。
- 5、变频调速、启动器等控制装置。
- 6、电机保护控制装置的测试技术和标准。
- 7、配电设备及供电网络自动化。
- 8、电工节能新产品、测试技术、可靠性、运行、维护、管理等方面的经验与体会等。

二、征文要求

- 1、应征论文应反映本领域的先进水平或具有实用性和参考价值,不超过6000字,论述观点明确,文章脉络清晰。
- 2、在论文题目下,署作者姓名、单位、邮编。正文前有摘要和关键词,正文图片应清晰;正文末附参考文献与作者简介及通讯地址、联系电话等。
- 3、论文需用A4纸打印。题目为黑体三号加粗,署名为宋体四号,单位及邮编为宋体五号。正文小四号,参考文献五号,版芯22cm×14.8cm,并附存有论文的3寸软盘一张,以TXT纯文本文件格式存入。如打印有困难,也可交手写工整稿。

三、论文截止日期

2004年8月10日前将论文(校稿用)及软盘寄至(邮编:461000)河南许昌09信箱中国电工技术学会电机保护控制专业委员会或传至电子信箱 cnpcc@vip.163.com,电话/传真:0374-2624889 转 0/4 或寄至清华大学电机工程与应用电子技术系黄益庄教授收或国电自动化研究院动力控制研究所陈建玉先生收。

四、稿件录用与否一律不退,请作者自留底稿。邀请部分作者到会宣读论文。会前出版《论文集》,可优先在《电气保护与控制》等刊物上发表,并评审出优秀学术成果奖和优秀论文奖及颁发奖励证书。