

基于零序直流原理的电缆测距研究

徐铮, 袁振海, 饶日嵩, 房东贤

(南京工业大学自动化学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 研究了零序直流保护原理在小电流接地系统单相接地故障测距中的应用。利用直流信号不受电网电容影响的特性, 建立检测源与接地网电路模型。将分时段的电路模型等效为全周期的有效值电路模型, 并根据其模型抽象出数学模型。同时, 根据电缆规范要求选取实验电路参数, 建立仿真电路模型。根据实验数据, 对该模型进行分析, 结果表明网络模型能够准确、可靠地实现故障测距。同时, 为传统选线的零序直流原理开拓了一个新的应用。

关键词: 零序直流; 有效值电路; 故障测距; 仿真

Study on fault location based on zero sequence DC

XU Zheng, YUAN Zhen-hai, RAO Ri-song, FANG Dong-xian

(Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: This paper studies on principle of zero sequence DC in fault location of single-phase grounded fault of non-effectively earthed system. Moreover, a model of DC single and grounding grid is established with the morse theory and the characteristic of DC signal. According to the model, the model of the fault location system is established. According to the criterion of cable, the model of experiment is established based on MATLAB. Comparing the model of math through the data of whole experiment, it is demonstrated that this principle of mathematic model could select the fault line accurately and reliably. At the same time, the traditional zero sequence DC line selection theory is pushed to a virginal field—fault location.

Key words: zero sequence DC; effective value; fault location; simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0045-06

0 引言

伴随着我国城市化建设的发展, 城市的规划越来越向美观性、实用性发展, 再加上城市用地的日益紧张以及架空线的安全性问题, 这些都促成了电力电缆在城市供电网系统中应用日益广泛。同架空线相比, 电力电缆具有供电可靠性高, 不受地面和空间建筑物的影响, 安全、隐蔽、耐用等优点。另外电缆还具有不受恶劣气候和鸟类侵害, 维护工作量小, 防潮, 防腐和防损伤等特性。虽然电力电缆有着诸多的优点, 但由于其大多铺设在电缆沟内或埋入地下, 一旦发生故障后一般不能通过直观法直接发现故障点。电力部门为了尽快找出故障点, 需要组织大量的人力和物力, 既费时又费力, 给电力系统带来了巨大的经济损失和不良的社会影响。因此, 对电力系统输电线路进行快速准确的故障定位是保证电力系统安全稳定运行的有效途径之一。

目前国内外主要的测距算法大都由其原有的架空线的测距理论而来, 分为离线理论和在线理论。

离线理论包括电桥法、低压脉冲发射法、脉冲电压法、脉冲电流法、二次脉冲法、现代行波法; 在线理论包括高速光电传感技术、GPS/GIS 技术、小波分析理论法。本文将原有的用于选线的零序直流保护原理对电桥测距法进行改进, 并进行模拟实验, 证明传统算法在新型数学理论的支持下的可行性和对实际工程的指导意义。

1 零序直流选择性保护原理

图 1 表示电网电缆漏电保护系统图, 图中直流检测源电路由 3 只二极管分别串接一个限流电阻 R_1 组成半波整流桥和采样电阻 R_2 构成, R_3 、 R_4 为高阻态电阻, 其中电阻 R_3 是二极管的限压保护电阻, 可以防止二极管反向击穿; 电阻 R_4 保证直流检测源电路对地保持高阻状态, 减少了人身触电的危险, 加强了装置的安全性。由于 R_3 和 R_4 阻值远高于二极管限流电 R_3 和采样电阻 R_2 , 因此对检测源电流影响可以忽略。电阻 R_3 、 R_4 的选取应考虑到系统对地的绝缘水平。电阻 r_{ai} , r_{bi} 和 r_{ci} 表示电网对地绝缘电

阻($i=1,2,\dots,n$); 电容 C_i 表示电网对地分布电容($i=1,2,\dots,n$)。相交流电源信号经整流以后形成脉动直流信号, 在电网三相端线与地之间构成直流检测源, 由于电容具有隔直通交的特性, 直流检测信号不能通过分布电容形成回路, 只能经过电网的三相绝缘电阻 r_{ai} 、 r_{bi} 、 r_{ci} 返回变压器中性点, 从而对电网的绝缘状况进行监视。

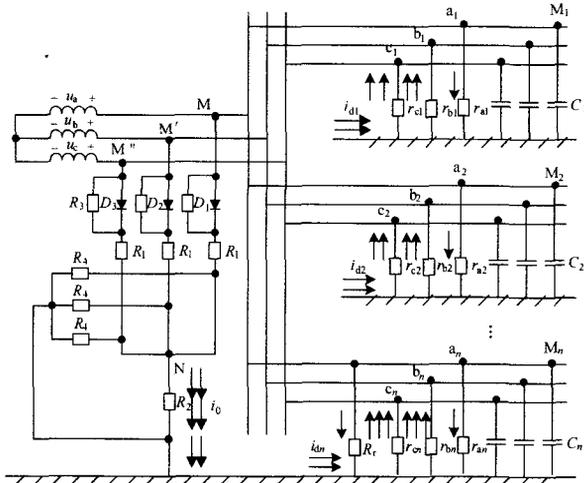


图1 中性点不接地系统的零序直流保护电路
Fig.1 DC protection circuit of NUS

设电网电源为三相对称的正弦波, 计时起点选在 $+u_a = +u_b$, $u_b = -u_{bm}$ 点, 三相电源电压瞬时表达式为:

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U\varphi\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ u_B = \sqrt{2}U\varphi\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ u_C = \sqrt{2}U\varphi\sin(\omega t + \frac{5\pi}{6}) \end{cases} \quad (1)$$

1.1 全周期零序直流规律分析

当 $\omega t = 0 \sim \frac{2\pi}{3}$ 时, 该时段 A 相电压比 B、C 相都高, 即 U_A 最高, 二极管 D_1 承受正向电压而导通。 D_1 导通后, M 点和 N 点的电位极性相同致使二极管 D_2 、 D_3 承受反向电压而截止。又 M 点和 A 点电位相等, 整流后的电流不可能由 A 相经检测源回路, 再经过 R 与 r_a 的并联回路回到电网。

在 $\omega t = 0 \sim \frac{\pi}{3}$ 内, 即 $U_{AB} > U_{AC}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (1) 形成回路; 在 $\omega t = \frac{\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$ 内, 即 $U_{AC} > U_{AB}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (2) 形成回路。此时电网的检测

回路构成为: (1) 电流经 $U_A \rightarrow R_1 \rightarrow \begin{cases} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{cases} \rightarrow r_b \rightarrow B \rightarrow U_B$ 形成回路。

(2) 电流经 $U_A \rightarrow R_1 \rightarrow \begin{cases} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{cases} \rightarrow r_c \rightarrow C \rightarrow U_C$ 形成回路。

此时段, AB 和 AC 两相之间的平均电压, 如式(2)。

$$\bar{U}_d = \bar{U}_{AB} = \bar{U}_{AC} = 1.76U_0 \quad (2)$$

得到第一时段的直流检测源的等效电路, 如图2所示。

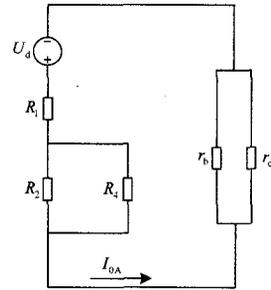


图2 第一时段直流检测电路等效模型
Fig.2 Equivalent circuit of the first period

根据直流检测等效电路图得到零序直流 I_{0A} 的表达式:

$$I_{0A} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{r_b r_c}{r_b + r_c}} \quad (3)$$

当 $\omega t = \frac{2\pi}{3} \sim \frac{4\pi}{3}$ 时, 该时段 B 相电压比 A、C 相都高, 即 U_B 最高, 二极管 D_2 承受正向电压而导通。二极管 D_1 、 D_3 承受反向电压而截止。又 M' 点和 B 点电位相等, 整流后的电流不可能由 B 相经检测源回路, 再经过 r_b 返回电网。

在 $\omega t = \frac{2\pi}{3} \sim \pi$ 内, 即 $U_{BC} > U_{BA}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (3) 形成回路; 在 $\omega t = \pi \sim \frac{4\pi}{3}$ 内, 即 $U_{BA} > U_{BC}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (4) 形成回路。此时电网的检测

回路构成为: (3) 电流经 $U_B \rightarrow R_1 \rightarrow \begin{cases} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{cases} \rightarrow r_c \rightarrow C \rightarrow U_C$ 形成回路。

(4) 电流经 $U_B \rightarrow R_1 \rightarrow \begin{cases} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{cases} \rightarrow r_b \rightarrow B \rightarrow U_B$ 形成回路。

$\left\{ \begin{array}{l} r_a \\ R \end{array} \right\} \rightarrow A \rightarrow U_A$ 形成回路。

得到第二时段的直流检测源的等效电路图, 如图 3 所示。

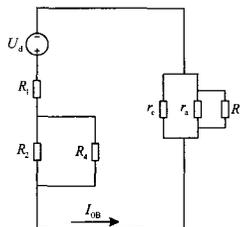


图 3 第二时段直流检测电路等效模型

Fig.3 Equivalent circuit of the second period

根据等效电路图得到零序直流 I_{0B} 的表达式:

$$I_{0B} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{\frac{r_a r_c}{r_a + r_c} R}{\frac{r_a r_c}{r_a + r_c} + R}} \quad (4)$$

当 $\omega t = \frac{4\pi}{3} \sim 2\pi$ 时, 该时段 C 相电压比 A、B 相都高, 即 U_C 最高, 二极管 D_3 承受正向电压而导通。二极管 D_1 、 D_2 承受反向电压而截止。又 M'' 点和 C 点电位相等, 整流后的电流不可能由 C 相经检测源回路, 再经过 r_c 返回电网。

在 $\omega t = \frac{4\pi}{3} \sim \frac{5\pi}{3}$ 内, 即 $U_{CA} > U_{CB}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (5) 形成回路; 在 $\omega t = \pi \sim \frac{4\pi}{3}$ 内, 即 $U_{CB} > U_{CA}$, 总检测电流主要经下述检测电流通路 (6) 形成回路。此时电网的检测回路构成为: (5) 电流经

$U_C \rightarrow R_1 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} r_a \\ R \end{array} \right\} \rightarrow A \rightarrow U_A$ 形成回路。

(6) 电流经 $U_C \rightarrow R_1 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow R_2 \\ \rightarrow R_4 \end{array} \right\} \rightarrow r_b \rightarrow B \rightarrow U_B$

形成回路。

此时段与第二时段等效电路类似, 得到该时段的零序直流 I_{0C} 的表达式:

$$I_{0C} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{\frac{r_a r_b}{r_a + r_b} R}{\frac{r_a r_b}{r_a + r_b} + R}} \quad (5)$$

1.2 有效值电路模型分析

设电网的三相对地绝缘电阻对称相等, 则 $r_a = r_b = r_c = r$, 则在将上式三个时段中的零序直流的表达式进一步改写得,

$$I_{0A} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{r}{2}} \quad (6)$$

$$I_{0B} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{rR}{r+2R}} \quad (7)$$

$$I_{0C} = \frac{U_d}{R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} + \frac{rR}{r+2R}} \quad (8)$$

由上式可知, 在一个全时段周期内 ($\omega t = 0 \sim 2\pi$), 零序电流的瞬时变化规律为 $I_0 = I_{0A} \rightarrow I_{0B} \rightarrow I_{0C}$, 其一个工频周期内的零序直流有效值的表达式为:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{0A}^2 + I_{0B}^2 + I_{0C}^2}{3}} \quad (9)$$

因为 R_1, R_2, R_3 为定值, 设 $X = R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$,

进一步简化零序直流的表达式得:

$$I_{0A} = \frac{U_d}{X + \frac{r}{2}}, \quad I_{0B} = \frac{U_d}{X + \frac{rR}{r+2R}}, \quad I_{0C} = \frac{U_d}{X + \frac{rR}{r+2R}}$$

式中: R 为电网单相接地漏阻, r 为电网对地绝缘电阻值。

在分析完等效电流的情况后, 分别将 I_{0B} 、 I_{0C} 的表达式带入到式 (9) 中, 可改写零序直流有效值表达式为:

$$I_0 = \sqrt{\frac{\left(\frac{U_d}{X + \frac{r}{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_d}{X + \frac{rR}{r+2R}}\right)^2}{3}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(\frac{U_d}{X + \frac{rR}{r+2R}}\right) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_d}{X + \frac{rR}{r+2R}} \quad (10)$$

由式 (10) 零序电流有效值表达式可知, 其值可以通过一个等效电源与负载的关系求得, 将零序检测电路分时段讨论的结论利用一个等效电路的模型来表达。其等效图如图 4。

图中 $U_0 = \frac{\sqrt{6}}{3} U_d = \frac{1.76\sqrt{6}}{3} U_\phi$, $X = R_1 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$ 为检测源的阻值。关于检测回路的电流表达式改写为式 (11)。式中 U_ϕ 为电网相电压, U 为电网线电压。

$$I_0 = \frac{\frac{1.76\sqrt{6} U_\phi}{3}}{X + \frac{rR}{r+2R}} = \frac{1.76\sqrt{2} U}{3} \frac{rR}{X + \frac{rR}{r+2R}} \quad (11)$$

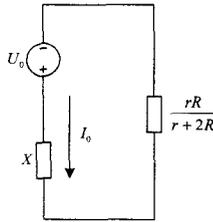


图4 检测电路等效电路模型

Fig.4 Equivalent model of DC detection circuit

1.3 算式电流与实验电流误差分析

为了验证等效直流源电路的正确性，在实验室MNDW-II模拟电网平台上建立电网实验模型，特性参数取值如下：电压等级：380 V，线路M₁：r₁=30 kΩ；C₁=5 μF；线路M₂：r₂=15 kΩ；C₂=10 μF。

分别改变检测源的检测电阻和利用自耦变压器进行调压，测量检测回路总检测电流值，并和算式电流进行比较分析，如表1和表2。

表1 实验电流与计算电流分析

Tab.1 Analysis between experiment current and arithmetic current

U	故障支路	故障类型	检测电阻	检测电流	算式电流/mA	误差分析
110	M ₁	金属	1.51	27.7	28.6	3.2%
	M ₂	金属	1.51	27.8	28.6	2.8%
	M ₁	1 kΩ	1.51	22.7	23.6	3.9%
	M ₂	1 kΩ	1.51	22.7	23.6	3.9%
	M ₁	10 kΩ	1.51	9.45	10.2	7.9%
	M ₂	10 kΩ	1.51	9.45	10.2	7.9%

表2 实验电流与计算电流分析

Tab.2 Analysis between experiment current and arithmetic current

U	故障分支	故障类型	检测电阻	检测电流	算式电流/mA	误差分析
220	M ₁	金属	0.51	71.76	71.81	0.07%
	M ₂	金属	0.51	71.57	71.81	0.33%
	M ₁	1 kΩ	0.51	56.6	58.41	3.1%
	M ₂	1 kΩ	0.51	56.8	58.41	2.8%
	M ₁	4.4 kΩ	0.51	34.6	35.9	3.7%
	M ₂	4.4 kΩ	0.51	34.5	35.9	3.9%
	M ₁	10 kΩ	0.51	21.0	21.97	4%
	M ₂	10 kΩ	0.51	21.2	21.97	3.6%

根据表中数据，作出实验电流与算式电流的图形，如图5。

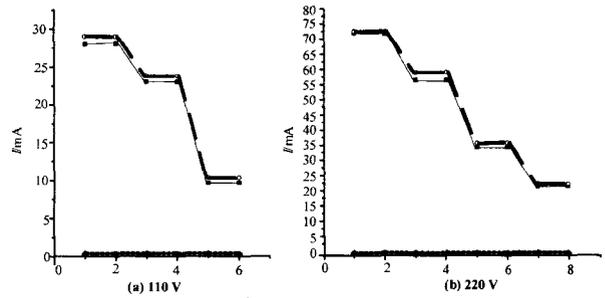


图5 检测源电流与算式电流误差分析

Fig.5 Analysis between measured current and arithmetic current

图5(a)表示电压等级为110 V的检测电流变化，图5(b)表示电压等级为220 V的检测电流变化。图中，黑色方格趋势线表示实验检测电流的变化，黑色圆圈趋势线表示算式检测电流的变化，黑色三角形趋势线表示实验电流和算式电流的误差变化。由表1、2和图5可知，当电网的对地电容发生改变时，其零序直流的大小基本不发生变化，同时，不论是实验的检测电流还是算式得出的检测电流，两者都是随着电压等级的降低而降低，并且随着接地漏阻的阻值增大而降低的。两者的比较的误差大约为1 mA左右，而随着检测电流的降低相对误差逐渐变大，但是一般的误差为4%。

2 电缆测距模型建立

2.1 单分支故障测距模型

现有的测距故障大多为行波注入法，利用故障点的电流、电压信号在线路始末端的反射，通过时间来确定故障距离。这种方法没有考虑到信号在电路中的衰减和其他谐波的干扰。考虑到直流信号在电网电缆中受非线性元器件的影响较小，传输稳定的特点，故将原来用于选线的直流源设备，结合接地网模型，应用于故障测距中。

目前，国内外对二次电缆屏蔽层应一端接地还是两端接地还有争议。IEEE标准提出屏蔽层应一端接地，但许多文献提出了不同意见。最新的IEC标准推荐屏蔽层采用两端接地。物理上考虑到电荷的相互影响，一般设定15 m为界限距离，超过这个距离则认为两电荷间的影响作用忽略，电缆长度一般为几百到几千米，故电缆两端的接地极在物理上相当于无穷远处，则为等电位。利用这一特性，建立直流检测源和接地网的电路模型，如图3。

通过图6的电路，得到此时的电流关系，如下式。

$$I_2 = \frac{R'_1 + R_{jd1}}{R'_2 + R_{jd2}} I_1; \quad I_1 + I_2 = I_0$$

计算上式, 求得关于距离 x 的表达式, 如式 (12)。

$$x = \frac{(l\rho + R_{jd2}) - (l\rho + R_{jd1} + R_{jd2})I_1}{\rho I_0} \quad (12)$$

式中: ρ 为电缆分布电阻, R_{jd1} 、 R_{jd2} 为电缆两端的接地电阻, I_0 和 I_1 分别表示检测电路中的零序直流和始端接地电阻的零序直流。

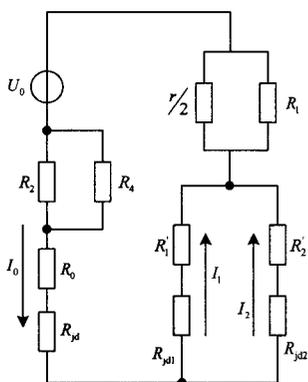


图 6 单分支电缆模型

Fig.6 Single cable model

2.2 多分支故障测距模型

将电缆电路模型推广到一般的情况, 同理建立多分支的电路模型, 如图7。

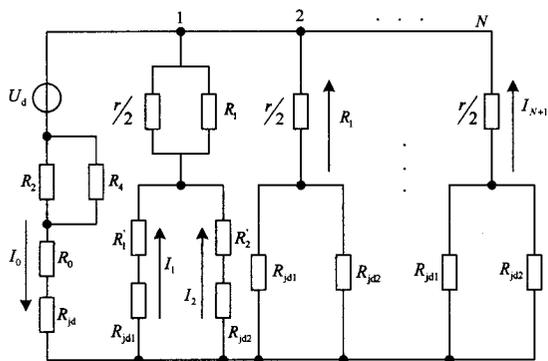


图 7 多分支电缆模型

Fig.7 Multi-cables model

图7为多分支电路的零序直流与接地网电路模型, 图中 U_d 为等效直流电压源, R_2 、 R_4 和 R_0 为检测源的等效电阻, R'_1 和 R'_2 为电缆的电阻, R_{jd1} 和 R_{jd2} 为电缆两端的接地电阻, R_3 和 r 为电网对地的等效电阻, R_1 为故障点的过渡电阻。由图3可列出以下关系式。

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_0$$

$$I_1(R'_1 + R_{jd1}) = I_2(R'_2 + R_{jd2})$$

设 $R'_1 = x\rho$, $R'_2 = (l-x)\rho$, 其中 x 为始端到故障点的距离, ρ 为电缆的单位电阻。将其参数代入, 求得 x 。

$$x = A - \sqrt{B} \quad (13)$$

$$\text{式中: } A = \frac{I_0 R'_s \rho + l\rho^2 - \rho R_{jd1} + \rho R_{jd2}}{2\rho^2},$$

$$B = A^2 + \frac{[l\rho R_{jd1} + R_{jd1} R_{jd2} + R_1(l\rho + R_{jd1} + R_{jd2}) - \frac{I_0 R'_s}{I_1}(l\rho + R_{jd2})]}{\rho^2}$$

$$R_1 // \frac{r}{2} + R'_s = R_7, \quad R'_s = \frac{r}{2n}$$

对于式 (13), 只要给定每个参数的数值就可以计算出电缆的故障距离。

基于零序直流检测原理的电缆模型, 所需的参数量较少, 总检测电流的取值是通过电流互感器得到, 与传统的选线算法中的取值要求是一致的。同时只需要测量始端接地电阻的电流值, 即可计算出故障距离。与传统的电桥法相比, 省去了现场搭建桥式电路的麻烦, 同时也解决了双端电气量算法中的远程数据通信问题, 使得该模型更加实用。

3 仿真与算法比较

3.1 仿真电路模型

为了验证理论设计的正确性和可行性, 模拟电网电缆运行情况, 在 Matlab 中建立仿真电路图。实验中电压等级为 220 V, 支路数为 3 条, 长度为 5 km, 设定接地漏阻从 0 到 5 k Ω 范围做变化。其实验示意图如图 8。根据规范要求, 1 kV 以下低压电气设备接地电阻值小于等于 4 Ω 。设定接地电阻为 4 Ω , 电缆单位电阻取 0.7 Ω /km, 电缆的对地绝缘电阻取 10 m Ω 。

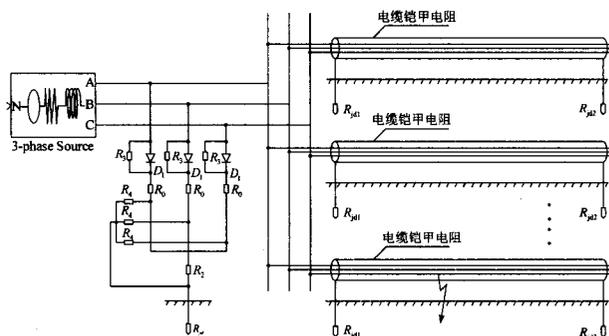


图 8 仿真实验系统示意图

Fig.8 Sketch map of simulation

总检测电流与始端接地电流是一个重要的变量,在仿真电路模型中,其基本做法是在检测源电路的出线端和每条电缆支路的始端接地电阻上加入电流表作为测量仪器。同时,通过上述分析易知其检测信号是周期性的非正弦函数^[1],而上述等效电路中的电流都为恒定的直流分量。根据傅里叶级数的概念,可以将采集的信号分解为恒定的直流分量和各次谐波分量。利用 Matlab (数学) 工具箱对各条电缆支路的始端接地电流进行傅立叶变换,得到频率为零的采样信号值,即等效电路中的算式电流直流值,同时可滤掉一些高频干扰,将数学滤波后的信号值作为等效电流值代入到数学模型中进行计算。

3.2 仿真与算法结果

根据上节的数学模型,编写计算程序。通过仿真电路的参数,和数学滤波后,得到总检测电流与始端电流数据。并将其代入数学模型计算故障距离,其数据如表 3。

表 3 数学模型计算结果

Tab.3 Result of mathematical model

故障距离 /km	故障 类型	计算 距离	故障 类型	计算 距离	故障 类型	计算 距离
始端	金属	0.016	3 kΩ	0.006	5 kΩ	0.003
1	金属	1.002	3 kΩ	1.014	5 kΩ	1.021
1.7	金属	1.694	3 kΩ	1.715	5 kΩ	1.725
3.3	金属	3.296	3 kΩ	3.326	5 kΩ	3.297
4.6	金属	4.621	3 kΩ	4.613	5 kΩ	4.609

通过表 3,我们发现该数学模型能够很好地应用到故障测距中,并且计算精度比较高,表明根据理论分析和实际实验得到的模型比较正确,有一定的应用价值。

4 结论

本文将用于选线的零序直流保护原理应用到小电流接地系统单相接地故障的测距中。通过分时段讨论零序直流的变化规律,建立全周期的有效值等效电路。同时根据莫斯定理,利用零序直流与接地网构建电路模型,建立其数学模型和物理模型,在大量的仿真实验的基础上,充分验证了结果具有高度准确性和可靠性。该方法可以有效地应用于小电流接地系统的接地保护技术中。

为了研究方便,本文采用电流表串接的方式获得电流信号,而在实际中可以通过在电缆始端的金属护套与电阻的接地线上套装高精度的霍尔传感器获得。另外考虑实际中干扰对毫安级信号给算法带来误差(采样值越小对精度要求越高),也可以通过

减小检测源的电阻值,适当增大总检测电流的方法,保证计算精度要求。

参考文献

- [1] 郝金陵,袁振海,等. B3 II-1A 型检漏继电器零序直流选择特性研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 63-67.
HAO Jin-ling, YUAN Zhen-hai, et al. Zero Sequence DC Selective Characteristic of B3 II -1A Leak-hunting Relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(4): 63-67.
- [2] 赖晓峰. 电力电缆故障测距方法的研究[J]. 广东电力, 2007, 20(6): 11-15.
LAI Xiao-feng. Research on Power Cable Fault Location Methods[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(6):11-15.
- [3] 张玉春,杨成峰,等. 基于 GPS 的输电线路故障测距方法研究[J]. 广东电力, 2007, 20(10): 10-16.
ZHANG Yu-chun, YANG Cheng-feng, et al. Study on Fault Location of Transmission Lines Based on GPS[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(10): 10-16.
- [4] 张帆,潘贞存,等. 基于小波和神经网络的配电网故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 83-87.
ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, et al. Fault Location Algorithm Based on Wavelet Transform and Neural Network in Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems. 2007, 31(22):83-87.
- [5] 黄正炫,唐昆明. 基于神经网络模型的电缆故障测距方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
HUANG Zheng-xuan, TANG Kun-ming. Research on Cable Fault Location Based on the ANN Model[D]. Chongqing :Chongqing University, 2007.
- [6] 季涛,孙同景,等. 配电混合线路双端行波故障测距技术 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 89-94.
JI Tao, SUN Tong-jing, et al. Study on Fault Location of Distribution Mixed Feeders Based on Double Terminal Method of Traveling Waves [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(12): 89-94.
- [7] 郭俊宏,杨以涵,等. 中压配电网的故障测距实用化方法[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 76-80.
GUO Jun-hong, YANG Yi-han, et al. Method for Medium Voltage Distribution Network[J]. Power System Technology, 2006, 30(8):76-80.
- [8] 朱云华,艾芊,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 继电器, 2006, 34(14): 81-88.
ZHU Yun-hua, AI Qian, et al. Survey of Power Cable Fault Location[J]. Relay, 2006, 34(14):81-88.
- [9] 陈玥云,覃剑,等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.

(下转第 83 页 continued on page 83)

5.3 电压质量分析

分析各个时段无功优化对系统电压的影响。图4给出了该电网 330 kV 主网架 24 小时无功优化前后的平均电压。

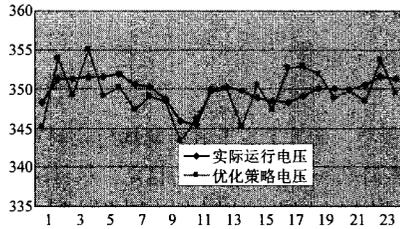


图4 330 kV 主网各时段无功优化前后的电压

Fig.4 Voltage before and after reactive power optimization on 330kV grid

从图4可看出:

- 1) 优化策略电压为实际运行提供了电压调整趋势;
- 2) 夜间轻负荷时段, 电压运行水平偏高, 此时系统呈现容性状态, 适当补偿感性无功, 降低电压, 能够提高系统效益;
- 3) 晚间重负荷时段, 系统呈现感性状态, 适当补偿容性无功, 提高系统电压, 能够提高系统效益。

6 结语

根据无功调节对系统的影响和无功补偿设备的调节特性, 结合实时无功优化的应用特点及其影响因素, 按 EMS 的在线应用要求设计了实时无功优化软件的体系结构, 并采用了一种具有分解-协调效能的协同进化算法。实际电网的仿真分析表明实时无功优化的在线应用能为电网的在线决策提供支持。

参考文献

- [1] Urdanta A J, Gomez J F, Sorrentino E, et al. A Hybrid Genetic Algorithm for Optimal Reactive Power Planning based upon Successive Linear Programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1292-1298.
- [10] YUAN Zhen-hai. A Study on Zero Sequence DC Selective Electric Leakage Failure Diagnosis & Protection Principle [A]. in:2004 IEEE Montreal

- [2] 刘玉田, 马莉. 基于 Tabu 搜索方法的电路系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 61-64.
- [3] Sharif S S, Taylor J H, Hill E F, et al. Real-time Implementation of Optimal Reactive Power Flow[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(8):47-51.
- [4] 丁晓群, 邓勇, 黄伟, 等. 基于遗传算法的无功优化在福建电网的实用化改进[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 44-47.
- DING Xiao-qun, DENG Yong, HUANG Wei, et al. Practical Improvement of Reactive Power Optimization based on Genetic Algorithm in Fujian Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 44-47.
- [5] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13):1-6.
- ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, WU Wen-chuan. New Generation of EMS with 3-Dimensional Coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13):1-6.
- [6] Potter M A, De Jong K A. Cooperative Coevolution: an Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents[J]. Evolutionary Computation, 2000,8(1): 1-29.
- [7] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 125-129.
- WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, CHEN Hao-yong, et al. Reactive Power of Optimization based on Cooperative Coevolutionary Approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 125-129.

收稿日期: 2008-03-18; 修回日期: 2008-05-25

作者简介:

赵美莲 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统分析, 高电压技术的教学与科研工作; E-mail: zhaomeilian@126.com

赖业宁 (1975-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统分析, 电压稳定及优化潮流方面的研究开发和工程化工作。

(上接第 50 页 continued from page 50)

CHEN Yue-yun, QIN Jian, et al. A Survey on Fault Location for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2006,30(18):89-93.

- [10] YUAN Zhen-hai. A Study on Zero Sequence DC Selective Electric Leakage Failure Diagnosis & Protection Principle [A]. in:2004 IEEE Montreal

Section Conference on Dynamics Instrumentation and Control[C].Nanjing(China):2004.

收稿日期: 2008-12-08; 修回日期: 2009-02-11

作者简介:

徐铮 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统保护。E-mail: xuzheng0206@163.com