

# 10 kV 电力电缆绝缘在线监测的一种新方法

孙 鸣<sup>1</sup>, 谢芝东<sup>1</sup>, 张 航<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2 许继电气保护及自动化事业部, 河南 许昌 461000)

摘要: 在简述现有的电力电缆绝缘监测方法的基础上, 提出了一种基于模型参数识别的电力电缆绝缘在线监测的新方法, 对 10 kV 电力电缆每条线路的每一相分别建立数学模型, 基于模型参数识别方法建立以线路参数为未知量的微分方程, 利用实时采集到的电压、电流求解最小二乘意义下的模型参数估计值, 依据得到的电缆线路对地绝缘电阻值, 从而判断电缆的绝缘水平。经 EMTP 仿真结果验证, 该方法正确、可靠, 并且可以和馈线保护合为一体, 满足自动化的要求。

关键词: 绝缘; 在线监测; 模型参数识别; 最小二乘估计; EMPT 仿真

中图分类号: TM726 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897 (2006) 22-0032-04

## 0 引言

随着经济的发展、城市规划的要求以及对更高供电可靠性的要求, 电力电缆在电力系统中的使用越来越多, 实时监测电力电缆的绝缘状态, 确保电缆安全运行的任务越来越重<sup>[1]</sup>。因此, 电力电缆绝缘在线监测技术日益受到人们的关注, 国内外也进行了大量的研究, 提出了许多在线监测的方法, 并且在实际中也有了相应的应用, 但是这些方法都或多或少地存在着不完善之处。

传统的一些方法, 如直流分量法<sup>[2]</sup>, 由于劣化电缆在交流电压的作用下, 老化区正负半周放电不对称, 在电缆中有剩余电荷, 此电荷通过电缆绝缘流入电缆外皮入地形成直流电流分量, 通过检测直流电流分量大小或电流变化曲线进行绝缘监测。但该直流分量很微弱, 当电缆外皮绝缘电阻值低时, 易受地中杂散电流的影响。直流电压叠加法<sup>[3]</sup>的原理是当对运行中绝缘逐渐劣化的电缆施加低直流电压时, 将产生与劣化程度相应的直流电流。但由于地中杂散电流变化大, 测量误差大; 同时直流电流长时间通过电压互感器 PT 时, 将引起互感器磁路饱和和产生零序电压, 造成变电所继电器误动可能。低频叠加法是在电缆的芯线与金属护层之间施加低频电压, 检测出电流中损耗电流分量, 然后算出绝缘电阻, 对电缆劣化程度进行判断。测  $\tan$  方法复杂, 同时  $\tan$  值很小, 难以测准。局部放电法也是一个在线监测电力电缆绝缘的常用方法, 但由于现场背景干扰相当大, 在线监测局部放电也比较困难<sup>[4]</sup>。总结现有的电力电缆绝缘监测的各种方法, 无论是

在线监测还是离线监测, 都存在着一定的不足之处, 所以这个问题仍有研究的必要。

对于 10 kV 电压等级以下的电缆绝缘监测, 目前大多数仍采用停电后对电缆施加直流高压进行预防性试验, 这不但会造成停电损失, 而且所施加的直流高压还会进一步损伤电缆, 加速电缆绝缘老化<sup>[5]</sup>。本文提出了一种基于电缆线路模型参数识别的方法, 对每条线路的每一相分别建立数学模型, 利用同时采集的电压电流数据, 求解最小二乘意义下的模型方程的解, 依据得到的电缆对地绝缘电阻值来判断电缆线路的绝缘水平, 实现对电力电缆绝缘的在线监测。

## 1 模型的建立

对于电缆线路, 一般不会太长, 可以将其等效成 T 型集中参数的等值电路, 对每一条电缆线路的每一相分别建立集中参数的 T 型等值电路如图 1。

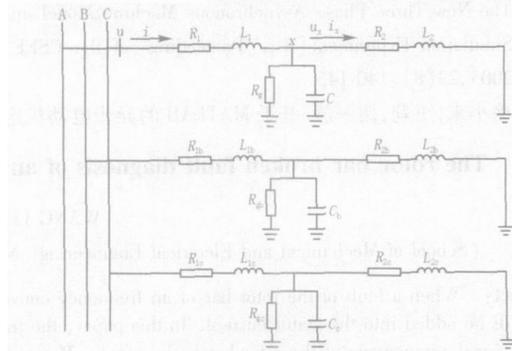


图 1 电缆线路 T 型等值电路图

Fig 1 The T model equivalent circuit of cables

图中  $x$  表示电缆线路上的任意位置,  $R_1$ 、 $L_1$  表示电缆从母线到监测点  $x$  处的电阻和电感,  $R_2$ 、 $L_2$  表示电缆从监测点  $x$  处到末端的电阻和电感, 为了下面的方程描述得简洁, 这里的  $R_2$ 、 $L_2$  包含了末端负荷的等效电阻和电感,  $R_g$ 、 $C$  表示监测点  $x$  处的对地电阻和对地电容, 其中通过监测  $R_g$  的值就可以反应电缆  $x$  点处的对地绝缘状况。

对图 1 中的任意一相 (以 a 相为例), 根据此时线路的电流电压关系, 可以得到如下方程:

$$\begin{cases} u_x = u - R_1 i - L_1 \frac{di}{dt} \\ i_x = i - \frac{u_x}{R_g} - C \frac{du_x}{dt} \\ u = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + R_2 i_x + L_2 \frac{di_x}{dt} \end{cases}$$

整理后可得到:

$$u = \left[ R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_g} \right] i + \left\{ \begin{aligned} & \left[ L_1 + L_2 + CR_1 R_2 + \frac{L_1 R_2 + L_2 R_1}{R_g} \right] \frac{di}{dt} - \left[ CR_2 + \frac{L_2}{R_g} \right] \frac{du}{dt} + \\ & \left[ CR_1 L_2 + CR_2 L_1 + \frac{L_1 L_2}{R_g} \right] \frac{d^2 i}{dt^2} - CL_2 \frac{d^2 u}{dt^2} + CL_1 L_2 \frac{d^3 i}{dt^3} - \end{aligned} \right. \frac{R_2}{R_g} u \quad (1)$$

式中:  $u$ 、 $i$  分别表示保护安装处实时测得的母线电压和流过线路的电流值。

这是一个时域微分方程, 将微分分别用数值微分公式代替, 即令:

$$\begin{cases} u = u(k) \\ i = i(k) \\ \frac{du}{dt} = \frac{u(k+1) - u(k-1)}{2T} \\ \frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2T} \\ \frac{d^2 i}{dt^2} = \frac{i(k+1) - 2i(k) + i(k-1)}{T^2} \\ \frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{u(k+1) - 2u(k) + u(k-1)}{T^2} \\ \frac{d^3 i}{dt^3} = \frac{i(k+2) - 3i(k+1) + 3i(k) - i(k-1)}{T^3} \end{cases} \quad (2)$$

得到:

$$u(k) = \left[ R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_g} \right] i(k) +$$

$$\begin{aligned} & \left[ L_1 + L_2 + CR_1 R_2 + \frac{L_1 R_2 + L_2 R_1}{R_g} \right] \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2T} \\ & - \left[ CR_2 + \frac{L_2}{R_g} \right] \frac{u(k+1) - u(k-1)}{2T} + \\ & \left[ CR_1 L_2 + CR_2 L_1 + \frac{L_1 L_2}{R_g} \right] \frac{i(k+1) - 2i(k) + i(k-1)}{T^2} - \\ & CL_2 \frac{u(k+1) - 2u(k) + u(k-1)}{T^2} + CL_1 L_2 \cdot \\ & \frac{i(k+2) - 3i(k+1) + 3i(k) - i(k-1)}{T^3} - \frac{u(k)}{R_g} \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $u(k)$ 、 $i(k)$  分别为线路实时采样的第  $k$  个采样点的电压和电流;  $T$  表示采样间隔。同理, 对每条线路的每一相都按此方法建立模型。

## 2 模型参数识别

显然, 模型中各电压电流  $u(k)$ 、 $i(k)$  均为已知, 实际的未知量为  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $R_2$ 、 $L_2$ 、 $R_g$ 、 $C$  六个线路参数。可以表示为形如  $f(R_1, L_1, R_2, L_2, R_g, C) = 0$  的方程, 连续取 9 个采样数据值, 联立就可以得到一个非线性方程组, 求解这个非线性方程组, 即可得到该电缆线路的待求的对地绝缘电阻  $R_g$ 。为了得到更为精确稳定的解, 这里采用最小二乘意义下的参数估计值。

### 2.1 最小二乘参数估计

$$\text{若令: } a_1 = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_g},$$

$$a_2 = L_1 + L_2 + CR_1 R_2 + \frac{L_1 R_2 + L_2 R_1}{R_g},$$

$$a_3 = CR_2 + \frac{L_2}{R_g}$$

$$a_4 = CR_1 L_2 + CR_2 L_1 + \frac{L_1 L_2}{R_g}$$

$$a_5 = CL_2, \quad a_6 = CL_1 L_2$$

$$y(k) = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_g} \right] u(k), \quad g_1(k) = i(k)$$

$$g_2(k) = \frac{i(k+1) - i(k-1)}{2T}$$

$$g_3(k) = \frac{u(k+1) - u(k-1)}{2T}$$

$$g_4(k) = \frac{i(k+1) - 2i(k) + i(k-1)}{T^2}$$

$$g_5(k) = -\frac{u(k+1) - 2u(k) + u(k-1)}{T^2}$$

$$g_6(k) = \frac{i(k+2) - 3i(k+1) + 3i(k) - i(k-1)}{T^3}$$

将以上各式代入式 (2), 得到:

$$g_1(k) a_1 + g_2(k) a_2 + g_3(k) a_3 + g_4(k) a_4 + g_5(k) a_5 + g_6(k) a_6 = \sum_{l=1}^6 g_l(k) a_l = y(k) \quad (3)$$

式中:  $a_l, l = 1, 2, \dots, 6$ ; 即为所求解电缆线路的参数, 根据最小二乘原理, 要寻求合适的  $a_l$  使

$$\min E^2 = \min \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{l=1}^6 g_l(k) a_l - y(k) \right]^2 \quad (4)$$

式中:  $m$  为参数估计所使用的数据点的个数。

式 (4) 中为  $a_l$  的二次函数, 该式成立的条件是:

$$\frac{\partial E^2}{\partial a_l} = \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{l=1}^6 g_l(k) a_l - y(k) \right] g_l(k) = 0 \quad (5)$$

用矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{61} & a_{62} & \dots & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中:  $b_l = \sum_{k=1}^m y(k) g_l(k) \quad l = 1, 2, \dots, 6$ ;

$$b_{lj} = \sum_{k=1}^m g_j(k) g_l(k) \quad l, j = 1, 2, \dots, 6$$

取连续采样点, 求解以上方程组, 即可得到最小二乘意义下参数  $R_g$  的估计值。

### 2.2 模型适用频带

由于在建立模型时, 把电缆线路等效为 T 型模型, 这是对实际线路精确分布参数模型的一种近似, 两者的幅频特性并不完全相同, 对于一定频率以上的高次谐波, 使用 T 型模型会有一定的误差, 造成模型精确度的下降, 会对绝缘监测的准确性产生一定的影响, 所以需要滤除采集量中的一些高频分量<sup>[6]</sup>。

### 3 绝缘监测判据设计

得到电缆线路的对地绝缘电阻  $R_g$  的参数估计值后, 就可以进行线路绝缘水平的判断。理论上来说, 如果实际线路绝缘良好且不接地的话  $R_g$ , 且不随时间的变化而变化; 当绝缘击穿相当于单相接地时  $R_g = 0$ 。根据求解模型参数得到的计算电阻  $R_g$  的序列, 取其加权平均值, 即  $\bar{R}_g = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_g(k)$  与相应电压等级下绝缘电阻的门槛值  $R_{op}$  作比较, 判断其绝缘水平。

由于不同电压等级的电缆绝缘电阻门槛值不

同, 这里给出 10 kV 电缆判断标准<sup>[7]</sup>, 见表 1。

表 1 10 kV 电缆绝缘等级判断标准

Tab 1 Criteria of insulation grade for 10 kV cables

$R_g$ 在线测量值	判断	处理意见	判断依据
< 40 M	不良	2~3月内更换	绝缘击穿电压可能低于单相接地时健全相对地电压。
40 M ~ 100 M	注意	继续监视	单相接地时绝缘击穿可能性小, 但可能低于设备基准电压, 发生击穿。
> 100 M	良好	继续使用	在设备基准耐压值之上, 绝缘击穿可能性小。

这里的  $R_{op}$  值由于受电缆线路所经的环境、地质状况、架设方式等因素的影响而有所不同, 可根据实际运行环境, 作出具体的整定。

### 4 EMTP 仿真验证

为了验证该方法的正确性, 利用电磁暂态仿真软件 EMTP (Electromagnetic Transients Program), 对在电缆线路的不同位置、经不同数值过渡电阻接地的多种情况进行了详细的仿真验证。

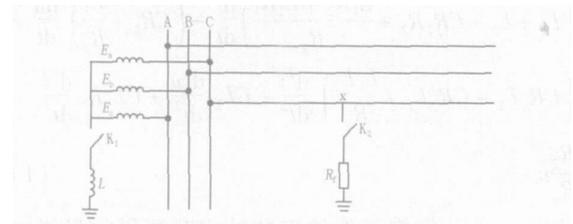


图 2 仿真系统示意图

Fig 2 Schematic diagram of simulation system

仿真系统模型如图 2 所示, 开关  $K_1$  断开为中性点不接地系统, 开关  $K_1$  闭合为中性点经消弧线圈接地系统。在电缆出线距母线侧  $x$  处设置接地电阻  $R_f$  (可以调节), 通过开关  $K_2$  闭合接入线路。母线电压设置为 10 kV, 采样周期取  $T = 0.1 \text{ ms}$ 。线路参数如下: 单位长度电阻  $r = 0.1 \text{ } \Omega/\text{km}$ , 单位长度电感  $l = 0.04 \text{ mH}/\text{km}$ , 电缆线路长度取  $L = 40 \text{ km}$ 。限于篇幅, 仅列出部分仿真结果, 见表 2。

表 2 EMTP 仿真结果

Tab 2 Result of simulation by EMTP

中性点不接地系统			中性点经消弧线圈接地系统		
$x/\text{km}$	$R_f/\text{M}$	$\bar{R}_g/\text{M}$	$x/\text{km}$	$R_f/\text{M}$	$\bar{R}_g/\text{M}$
15	10	9.95	15	10	9.63
	200	199.52		200	197.52
25	10	11.24	25	10	10.17
	200	205.18		200	201.58

通过对以上的仿真结果分析, 可知该方法测量

得到的线路绝缘电阻与所设置的过渡电阻基本一致,由此可以验证该方法是正确可行的。

## 5 结束语

本文提出了一种基于模型参数识别的电力电缆绝缘在线监测的新方法,讨论了模型的建立和求解过程,以及在线监测判据的设计方法,利用电磁暂态仿真软件 EMTP 验证了该方法的正确性。这种新的在线监测方法具有以下特点: a 可以在不停电的情况下,对电缆绝缘进行在线监测,实现不停电的无损监测; b 不需要增加额外的辅助设备,只是利用实时采集的电压电流量,通过软件来实现具体的算法,实现对线路模型参数的识别,方法简单、方便; c 这种在线监测方法可以和线路的馈线保护装置合为一体,满足了自动化的要求。

## 参考文献:

- [1] 陈天翔,段建东,陈天韬,等. 电力电缆绝缘在线监测测量方法及判据设计 [J]. 高压电器, 2004, 40(3): 183-185.  
CHEN Tian-xiang, DUAN Jian-dong, CHEN Tian-tao, et al. A New Approach to On-line Insulation Monitoring of Electric Power Cables Based on Capacitive-current Measurement and Its Criteria [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 183-185.
- [2] Oonsishi H, Urano F, Mochizuke T, et al. Development of New Diagnostic for Hot-line XPLE Cables with Water Trees [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(1): 1-7.
- [3] Nakajma A. Development of Hot-line Diagnostic Method for XPLE Cables and the Measurement Results [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 4(2): 857-862.

- [4] 严璋. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.  
YAN Zhang. On-line Monitoring Technology of Electric Insulation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [5] 董小兵,蔡军,江秀臣,等. 10kV-35kV XPLE 在线监测技术 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 20-24.  
DONG Xiao-bing, CA IJun, JIANG Xiu-chen, et al. On-line Monitoring Techniques of 10kV-35kV XPLE Cable [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 20-24.
- [6] 索南加乐,张超,王树刚. 基于模型识别法的小电流接地故障选线研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.  
SUONAN Jia-le, ZHANG Chao, WANG Shu-gang. Fault line Selection in the Non-solid Earthed Network Based on the Model Identification Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.
- [7] 西南电业管理局试验研究所. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京:水利电力出版社, 1984.  
Experiment Institute of South-west Electric Management Bureau. High Voltage Apparatus Experiment Method [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.

收稿日期: 2006-09-01

作者简介:

孙鸣(1957-),男,教授,主要从事电力系统继电保护及调度自动化等方面的研究;

谢芝东(1975-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护及调度自动化; Email: xzd0807@163.com

张航(1979-),男,助理工程师,主要从事变电站自动化系统技术支持工作。

## A new approach to on-line insulation monitoring of 10kV electric power cables

SUN Ming, XIE Zhi-dong, ZHANG Hang

(1. School of Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. XJ Electric Protection and Automation Business Department, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Based on the existing electric cable on-line insulation monitoring method of 10kV electric power cables, this paper proposes a new approach to on-line insulation monitoring for electric power cables based on the model parameter identification method, and establishes mathematical model to every phase of each cable line. It establishes corresponding differential equation on unknown variable of cables line parameters as well. The model parameter estimation of least square can be solved by the voltage and the current of real-time gathered. According to the line insulation resistance value to the ground, the electric power cables' insulation level can be judged. This principle has been verified via an EMTP simulator, and it is correct and reliable. In particular, it can be combined with the feeder protection to meet the requirement for automation.

**Key words:** insulation; on-line monitoring; model parameter identification; least square estimation; EMTP simulator