

# 基于多元线性回归理论的高压电缆接地电流采集方法

现有的高压电缆接地电流监测方法是固定频率监测，无法实现电缆线路异常工况下的有效监测，且设备占有率高，数据不完整。通过理论分析了高压电缆线路接地电流监测模型，综合多元线性回归理论提出了基于多元线性回归的接地电流采集策略，实现了接地电流监测的自适应监测。研究及实际应用结果表明：所提出的自适应算法能够根据负荷电流状态实时调整监测数据采样频率，有效实现对电缆线路异常运行状态下的监测，从而实现对正常运行状态和异常运行状态全面的低功耗、高可靠性监测，提升了接地电流监测设备的有效性。

余涛<sup>1</sup> 汪浩<sup>2</sup> 罗传仙<sup>2</sup> 朱辉<sup>1</sup> 杜键<sup>1</sup> / 1. 江苏省电力公司常州供电公司 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司

## 0 引言

电力电缆已经成为国内主要城市输配电网络的主体，其运行可靠性是城市供电可靠性的重要因素<sup>[1-2]</sup>。通过对各地调研收集的100例电缆故障案例进行分析，由电缆接地系统异常引发的电缆故障超过20%。如电缆外护套受到外力损伤、化学腐蚀、雷电过电压或系统过电压的影响，导致护套绝缘破损甚至一点或多点接地，因此会破坏高压电缆金属护套的接地系统<sup>[3-4]</sup>。对电缆外护套实行有效的绝缘状态监测，是提高电缆线路运行可靠性的重要手段。电力电缆接地电流在线监测是一种有效的监测电缆外护套绝缘状态的方式，但是到目前为止，国内的监测技术因缺乏对接地电流数据构成的详细分解，不能预测线路负荷变化引起的接地电流扰动，所以不具备对环境及线路变化的自适应监测特性，无法在不同的监测需求下动态调整

监测频率及设备增益，监测效率低下，不能满足智能差异化监测的发展趋势，难以真实反映电缆外护套绝缘状态。

本文针对现有技术的不足之处，以多元线性回归理论和电缆接地电流理论为基础构建高压电缆接地电流监测方法，改变传统的采样模式，实现对线路状态的动态监测。利用多元线性回归理论预测电缆负荷变化，结合电缆接地电流数据构成线路接地电流预测数据，对比实时监测数据进行智能分析，确定监测效率，动态调节设备增益，既避免了正常状态下对服务资源的过度占用，又弥补了异常状态下对数据监测不完全的缺憾，为监测电缆外护套绝缘状态提供全面稳定的测量数据。

## 1 电缆接地系统理论

XLPE单芯电缆金属护层接地电流主要由感应电流、电容电流和泄漏电流等组成<sup>[5]</sup>。电缆包含导体线芯、导体屏蔽层、绝缘、绝缘屏蔽、金属护套和外护层等部分。当线芯流过交变电流时，交变电流的周围产生交变磁场，形成于电缆回路相交链的磁通，其必然与电缆的金属护套相交链，从而在金属护套上产生感应电动势。感应电动势作用于金属层中的自阻抗、接地点间的导通电阻以及接地线的电阻等阻抗上，形成感应电流<sup>[6-7]</sup>。电缆工作时，电压作用在导体与金属护层间电容上，产生电容电流，其值与电缆长度、电缆截面积和工作电压等级相关。同时，工作电压作用于电缆



余涛/高级工程师

### 关键词/Keywords

接地电流 ·  
线性回归 ·  
自适应 ·

主绝缘层的绝缘电阻上,产生泄漏电流<sup>[8]</sup>。

### 1.1 感应电流计算

根据电缆感应电动势计算理论计算电缆常规敷设方式下的A、B、C三相感应电动势 $E_A$ 、 $E_B$ 和 $E_C$ ,假设电缆金属层直径为 $D$ ,电缆中心间距为 $S$ ,电缆长 $L$ ,工作电流为 $I$ ,角频率为 $\omega$ ,以某市郑城线为模型建设分析线路,即

$$E_B = LI2\omega \left( \ln \frac{2S}{D} \right) \times 10^{-7} \quad (1)$$

$$E_A = E_C = LI \sqrt{\left[ 2\omega \left( \ln \frac{2S}{D} \right) \times 10^{-7} \right]^2 + 2\omega \left( \ln \frac{2S}{D} \right) \times 10^{-7} \times 2\omega (\ln 2) \times 10^{-7} + [2\omega (\ln 2) \times 10^{-7}]^2} \quad (2)$$

由以上公式可知,电缆金属护层感应电动势与电缆长度、电缆导体工作电流和频率成正比,同时还与电缆金属护层的半径、电缆中心间距和敷设排列方式等因素相关<sup>[9]</sup>。

根据感应电动势与感应电流的对应关系

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R+R_1)^2 + X^2}} \quad (3)$$

式中, $E$ 为感应电动势; $R$ 为金属层电阻; $R_1$ 为大地漏电阻; $X$ 为金属护层自感抗,由此得到感应电流与电缆长度、电缆导体工作电流和频率成正比。

### 1.2 电容电流计算

由于XLPE绝缘层的绝缘电阻巨大,在计算电容电流时不考虑泄漏电流带来的影响,得到A、B和C三相金属护套上单位长度电容电流为

$$\begin{cases} I_A = j\omega CU_A \\ I_B = j\omega CU_B \\ I_C = j\omega CU_C \end{cases} \quad (4)$$

式中, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 为三相电缆运行电压; $C$ 为单位长度电容; $\omega$ 为角频率<sup>[10]</sup>。

## 2 多元线性回归(MLR)理论

多元线性回归是研究一个因变量与两个或两个以上自变量的回归算法,它反映一种现象或事物的数量依多种现象或事物数量的变动而相应变

动的规律<sup>[11]</sup>。在处理测量数据时,经常要研究变量之间的关系。变量之间的关系一般分为两种:一种是完全确定的关系,即函数关系;一种是相关的关系,即变量之间既存在着密切联系,又不能由一个或多个变量的值求出另一个变量的值。对于彼此联系比较紧密的变量,回归分析就是用数学表达式来描述相关变量之间的关系。多元线性回归的基本原理和基本计算过程与一元线性回归相同,且分析预测方法具有模型简单、预测结果准确和模型解释能力强的特点<sup>[12-14]</sup>。

根据电缆接地电流理论,接地电流中感应电流的大小与线路运行负荷息息相关,为了准确进行线路负荷预测,本例采用多元线性回归理论建立线路负荷预测模型。

### 2.1 多元线性回归(MLR)原理

多元线性回归模型为

$$y = a_0 + a_1x_1 + \cdots + a_mx_m + \varepsilon \quad (5)$$

式中, $a_0, a_1, \cdots, a_m$ 为回归系数; $\varepsilon$ 为随机误差。

在负荷预测过程中,将历史数据代入模型可得

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1x_{11} + \cdots + a_mx_{m1} + \varepsilon_1 \\ y_2 = a_0 + a_1x_{21} + \cdots + a_mx_{m2} + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ y_n = a_0 + a_1x_{n1} + \cdots + a_mx_{mn} + \varepsilon_n \end{cases} \quad (6)$$

用最小二乘法求未知参数 $a_0, a_1, \cdots, a_m$ 的估计量,代入模型得回归方程

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \cdots + \hat{a}_mx_m \quad (7)$$

多元回归模型的相关系数计算公式为

$$R^2 = Q_E / Q_T \quad (8)$$

其中

$$Q_E = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

式中, $Q_E$ 为回归离差二次方和; $Q_T$ 为总变差二次方和; $R$ 为 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 的多元相关系数,若 $R^2$ 较大,则多元回归模型的线性近似度较高,若 $R^2$ 较小,则多元回归模型的线性近似度较低<sup>[15]</sup>。

### 2.2 MLR估算用电负荷

本文以郑城线110 kV电缆线路负荷作为预测目标,该线路连接城北变电站与北环变电站两

个110 kV变电站,负责该区域的商业、医院、学校、政府机构、铁路建设单位和居民的用电负荷,选择服务人口总数( $x_1$ )、该区域商业营业额( $x_2$ )和公共服务机构运作时间( $x_3$ )这三个典型社会经济因素作为自变量建立模型。

根据2015年郑城线负荷变化建立数据样本,如表1所示。

表1 郑城线辐射范围样本数据

| 时间 | 用户人数<br>/万人 | 营业额<br>/万元 | 公共服务时间<br>/h | 电缆平均负荷电流<br>/A |
|----|-------------|------------|--------------|----------------|
| 1月 | 12.65       | 8 567      | 248          | 134            |
| 2月 | 12.67       | 2 210      | 188          | 92             |
| 3月 | 13.41       | 4 152      | 256          | 113            |
| 4月 | 13.44       | 5 232      | 248          | 91             |
| 5月 | 13.35       | 6 723      | 256          | 85             |
| 6月 | 13.65       | 4 592      | 248          | 12             |
| 7月 | 13.15       | 5 691      | 188          | 87             |

其中6月份受线路整改影响,郑城线该月平均负荷偏小,不纳入多元线性回归样本。应用SPSS软件得出数据如表2所示。

表2 模拟运算结果

| $R$   | $R^2$ | $\varepsilon$ | 修正 $R^2$ | $F$    | Sig   |
|-------|-------|---------------|----------|--------|-------|
| 0.953 | 0.908 | 29.43         | 0.908    | 898.55 | 0.000 |

由表2可知,模型中的三个自变量与因变量的复相关系数 $R=0.953$ ,相应的显著性概率值为 $\text{Sig}=0.000$ ,表示结果在0.01的水平上是显著的。经调整得 $R^2=0.908$ ,说明有90.8%的影响因素可以由此模型来加以解释,表明所建立的回归模型比较好。

以该模型为基础,对三个自变量进行单独调整,在对用户人数和公共服务时间进行自变量修订时,统计负荷变化明显,当对营业额进行调整时,统计负荷变化未能与模型很好拟合。经分析,该区域地属主城区,并以商业构成主要的营业额要素,营业额的变化与商业用电的关系没有线性联系,而是维持一个较均衡的水平。

最后选择服务人口数和公共服务时间作为多元线性回归的自变量,重新建立回归模型,数据如表3所示。

表3 修订后运算结果

| $R$   | $R^2$ | $\varepsilon$ | 修正 $R^2$ | $F$     | Sig   |
|-------|-------|---------------|----------|---------|-------|
| 0.985 | 0.970 | 35.17         | 0.970    | 1 398.4 | 0.000 |

采用修订后的负荷预测模型对8月份的电缆运行负荷进行预测。经比较,预测结果与实际负荷的偏差小于5%,验证了模型预测数据的可靠性和有效性,可使用该数据作为划分负荷区段采样策略的基准量级。

### 3 基于多元线性回归的接地电流采集策略

采用多元线性回归算法对高压电缆线路的运行负荷进行预测,划分不同负荷区段的采样监测频率调整数据量级,建立一套能根据负荷变化动态调整的接地电流采集策略。

#### 3.1 采样数据量级分析

在接地电流监测过程中,受负荷波动等相关因素的影响,需对监测频率的调整基数做数据量级划分,以决策监测数据在分析评判过程中的权重。采用多元线性回归模型预测电缆线路运行负荷数据,根据预测负荷和电缆运行时长建立影响因素模型。

影响因素集表示为

$$\theta = \{u_{11}, u_{12}\} \quad (10)$$

式中, $u_{11}$ 为预测负荷均值; $u_{12}$ 为置信因素。

根据影响程度不同分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ五个等级,表示影响因子逐步增大。其中 $u_{11}$ 等级的划分受用电负荷影响,用电负荷越大,影响因子越大,其中以Ⅲ为日均负荷大小,取影响因子为1.0,根据负荷降低和升高取0.8~1.2为影响因子。 $u_{12}$ 等级划分受线路运行时间长短影响,运行时间越久,影响因子越大,最大系数为1.0,影响因子分级如表4所示。

表4 影响因子分级

| 一级指标     | 二级指标     | Ⅰ    | Ⅱ    | Ⅲ    | Ⅳ    | Ⅴ   |
|----------|----------|------|------|------|------|-----|
| $\theta$ | $u_{11}$ | 0.8  | 0.9  | 1.0  | 1.1  | 1.2 |
|          | $u_{12}$ | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 1.0 |

本量级划分方法在结合当地用电负荷的基础上进行了监测数据量级划分的影响因子设定,

可根据各地实际情况动态调整,以更适合应用场合,提高采样数据的有效性,可有效降低权值确定过程中的客观干扰。

### 3.2 确定自适应算法

在电缆线路的监测过程中,如何避免尖冲信号、杂波信号带来的数据干扰,对电缆运行状态评价结果至关重要。结合接地电流数据滞后的特性,调节滤波器边缘曲线过渡区域,滤除尖冲信号以及电气测量过程中的干扰,避免影响正常增长的测量值,对监测得到的数据作初步评价。

滤波器函数模型如下

$$|H(i)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{i}{i_c}\right)^{2n}} = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{i}{i_p}\right)^{2n}} \quad (11)$$

式中,  $n$  为滤波器的阶数;  $i_c$  为截止接地电流值;  $i_p$  为带通边缘接地电流值; 根据接地电流变化特点,调节边缘曲线过渡区域。

结合采样基准、量级划分方法和数字滤波算法,确定自适应监测接地电流的逻辑分析方法为

$$i_c = i_d + \theta \Delta I - r \quad (12)$$

式中,  $\Delta I$  为当前测量值与  $i_d$  之间的差值;  $\theta$  为影响集因子,通过自适应算法,可有效过滤信息量较低、置信度较差的采样数据。

### 3.3 试验研究

采用C语言实现接地电流采集策略代码,作用于程序模块的采样流程之后,程序根据时钟信号输出预测负荷和采样值权重,分析AD采样芯片输出的测量数据对比采样基准,进行采样策略调整。该方法有效提高了采样数据的信息量,并改善了采样及通信层的工作频率和负荷需求。图1a为分析采集板卡,图1b为电缆线路现场挂装设备。



(a) 分析采集板卡 (b) 电缆线路现场挂装设备

图1 线路挂网试验

在110 kV郑城线高压电缆挂装监测模块进行试验。经过一个月的挂网运行,观察电缆负荷变化对通信输出接口数据的影响,采样频率变化情况如图2所示。

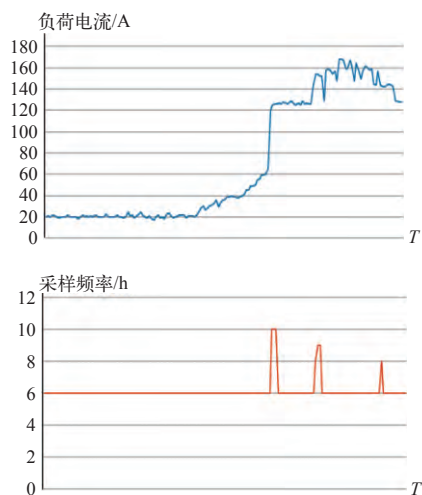


图2 采样频率变化波形

当电流趋于平稳时,标准采样频率为5 min/次;当出现突变值时,采样频率会根据后续监测数据情况进行自动调整;当突变数据为短时波动或随预测负荷变化时,采样频率维持不变;当电流数据在上升区段持续时,采样频率会自动增大,在趋于平稳后自动降低为标准频率。

## 4 结束语

由于测试时间的影响,对时间影响因子的判别尚不完善,但负荷影响因子作用明显,有效改进了现有的接地电流监测模式,结合作用理论和实际效果,该方法实现了对电流变化的自适应采样。

由接地电流的监测分析发现,固定监测频率不仅不能集中监测关键状态变化,实现智能差异化监测,而且还会造成大量无用数据上传,占用网络及服务器资源,通过采集频率自适应方法,可以根据监测到的数据自动调整采集频率,集中监测接地系统异常状态,节省了数据资源,大大提高了监测效率,为异常诊断提供更有效的监测手段。

# 参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 168—2008 输变电设备状态检修试验规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 史传卿. 电力电缆安装运行技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 罗进圣. 一起110 kV电缆安装缺陷的分析和处理 [J]. 浙江电力, 2002 (4): 37-39.
- [4] 郑肇骥, 王琨明. 高压电缆线路 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [5] 王伟. 交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础 [M]. 3版. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [6] 黄鹤鸣. 高压单芯电力电缆接地电流分析与监测系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [7] 徐欣, 陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套接地电流的研究之一——接地电流的计算和预控 [J]. 电线电缆, 2010 (5): 43-46.
- [8] 牛海清, 王晓兵, 蚁泽沛, 等. 110 kV单芯电缆金属护套环流计算与试验研究 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (8): 15-17.

- [9] 张全胜, 王和亮, 周作春, 等. 110 kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (11): 71-73.
- [10] 孙学锋, 赵延华, 路新波. 高压单芯电缆护套接地电流的数模与应用 [C]. 山东: 山东电机工程学会第四届供电专业学术交流会论文集, 2007: 260-268.
- [11] 高惠璇. 统计计算 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [12] Roger A H, Charles R J. i matrix analysis [M]. Translated by Yang Q. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [13] 王惠文, 孟洁. 多元线性回归的预测建模方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (4): 501-504.
- [14] 牛东晓, 曹树华, 赵磊. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] Tian Jiawei, Kamber M. Data mining: concepts and techniques [M]. America: Morgan Kaufman Publishers, 2000.

(收稿日期: 2015-08-28) **EA**

(上接第37页)

- [3] 何善庆. 大朝山500 kV XLPE电缆工程的设计安装和试验 [J]. 云南电力技术, 2003, 31 (4): 33-37.
- [4] 徐霞, 王斌. 电力隧道内长距离500 kV电缆敷设设计 [J]. 华东电力, 2010, 38 (4): 29-32.
- [5] 赵志栋. 海澄500 kV电缆工程的技术研究与应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [6] DL/T 5221—2005 城市电力电缆线路设计技术规定 [S].
- [7] 罗俊华, 张丽, 刘毅刚, 等. 超高压大截面电力电缆线路热膨胀计算分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (5): 1281-1286.

- [8] 方浩. 500 kV电缆在上海电网的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [9] 楚济祥. 500 kV超高压电力电缆工程设计及施工关键技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [10] 张学晋, 吴安官, 成健, 等. 解读高电压交联电缆蛇形敷设设计有关规定 [J]. 供用电, 2009, 26 (6): 1-5.
- [11] 徐伟, 郑志源. 隧道内电缆蛇形敷设特性 [J]. 广东电力, 2014, 27 (12): 118-122.
- [12] 赵志栋, 张竟成, 宋书辉, 等. 500 kV电缆蛇形敷设应用研究 [J]. 中国电机: 技术版, 2014 (9): 48-50.

(收稿日期: 2016-01-13) **EA**