

# 基于逻辑回归的双Y型外熔丝电容器故障诊断技术研究

滕予非<sup>1</sup>, 唐嘉忆<sup>2</sup>, 段翔兮<sup>1</sup>, 宋梁<sup>3</sup>, 李世龙<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;

3. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为提高双Y型外熔丝电容器故障诊断精度, 克服传统的中性线不平衡电流受初始不平衡量影响灵敏度较低的问题, 提出了将母线电压值、三相电流有效值与中性线电流有效值信息融合, 利用逻辑回归进行故障诊断的方法。该方法首先利用随机样本生成学习样本, 利用仿真计算方法得到母线电压值、三相电流有效值与中性线电流的计算结果, 并计算得到规则化特征指标; 其次, 基于上述学习样本利用逻辑回归学习得到决策函数; 最后将现场实测数据代入决策函数, 最终实现故障诊断判别。仿真结果表明, 与传统的单纯依赖中性线电流进行故障判断相比, 该方法有效提升了故障诊断灵敏度。同时该方法简单易实现, 在工程上具有较强的推广性。

**关键词:** 逻辑回归; 双Y型外熔丝电容; 故障诊断; 机器学习

中图分类号: TM53 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0041-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.008

## Logical Regression Based Fault Diagnosis for External – fusing Double – Star Power Capacitor

Teng Yufei<sup>1</sup>, Tang Jiayi<sup>2</sup>, Duan Xiangxi<sup>1</sup>, Song Liang<sup>3</sup>, Li Shilong<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to increase the accuracy of fault diagnosis of external – fusing double – star power capacitor, a logical regression based fault diagnosis method is proposed. The RMS of voltage on the bus, the RMS of three – phase current and the RMS of current in the neutral line are all utilized in this method to overcome the problem that the initial unbalance rate may reduce the sensitivity of the diagnosis method only based on neutral line current. At first, the study set is generated by random sample method, and then the characteristic indexes could be calculated. Then according to the study set, determine function can be obtained by logical regression. Finally, based on the measure value of voltage and current, the fault probability of the capacitors can be obtained by the determine function. Simulation results show that the sensibility of the proposed method is much higher than the conventional one, which only uses natural line current.

**Key words:** logical regression; external – fusing double – star power capacitor; fault diagnosis; machine learning

## 0 引言

低压电容器是电力系统中重要的无功补偿设备, 起着补偿系统感性无功、支撑系统电压和降低电网损耗等作用<sup>[1-3]</sup>。因此, 电容器的运行状况对于保障电网安全稳定运行起着重要的作用。

双Y型外熔丝电容器组是电力系统中常见的一种电容器结构, 它采用两组三相Y型连接的电容器并联的方式布置, 其中性线电流与两组电容器组电容量的变化有着较强的灵敏度。同时, 采用外熔丝与其中小电容串联的方式, 当小电容出现击穿故障后, 与之串联的外熔丝可以快速熔断, 保障其余电容器组继续正常运行<sup>[4-5]</sup>。

电力系统双Y型电容器组大多采用中性线不平衡保护的方式实现电容器组的故障诊断<sup>[6]</sup>。然而,由于电容器组初始状态的不平衡,各相间电容量也有2%左右的差异,中性线电流在正常运行时也难以在0附近,导致故障判断灵敏度较低<sup>[7-8]</sup>。同时,由于电容器组中各个小电容的电容量均随着气温变化而变化<sup>[9]</sup>,中性线电流也是时间变量,这进一步加大了整定的难度。

为了防止中性线电流不平衡保护出现误动,在整定时需确保躲过所有正常运行工况。这就导致不平衡保护需在多个熔丝熔断的情况下方能发出告警,而对于单一熔丝熔断的工况难以精确反应。

此外,目前有大量学者利用支持向量机<sup>[10]</sup>、神经网络<sup>[11]</sup>的方法对电容器故障进行诊断,上述方法大多采用现场数据进行学习,样本数量较少,对于电容器不平衡程度的学习不够充分,在实际使用时可能出现精度降低的情况。

为了解决电容器组不平衡程度随温度等外部因素变化导致故障诊断精度较低的问题,提出了一种基于逻辑回归的电容器组故障诊断方法。该方法综合利用母线电压值、三相电流有效值与中性线电流有效值等信息,有效提升故障诊断的准确性。其次,该方法基于大量仿真数据作为学习样本,保障了学习效果 and 精度。该方法只需采用变电站现有的可采集的物理量作为诊断特征,简单易实现,在工程上具有较强的推广性。

## 1 双Y型外熔丝电容器结构

典型的双Y型外熔丝电容器结构如图1所示。

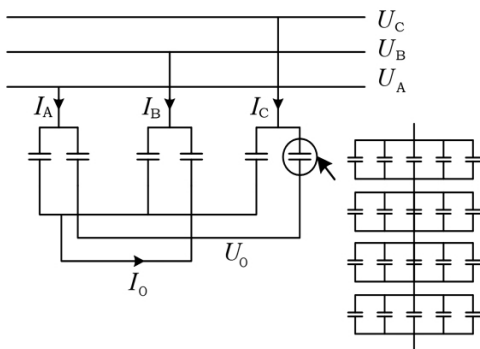


图1 双Y型外熔丝电容器结构

由图1可知,双Y型电容器将每相电容器组分为两个桥臂,在两个桥臂中性点的连线上装设有电

流互感器进行电流测量。

同时,电容器每个桥臂其实是多个电容器组先并联后串联组合而成。其中一个典型的结构中,每个桥臂包含有20个小电容,通过5并4串的方式连接而成。每个小电容外部串联了一个熔丝,当该小电容出现短路时,与之串联的熔丝会在并联电容放电电流的作用下熔断,实现故障隔离,保障整体电容器安全稳定工作。

## 2 电容器故障诊断特征选取

### 2.1 特征量选取基本思想

由于双Y型外熔丝电容器中某一个小电容出现短路故障导致外熔丝熔断后,三相电容器之间以及两个桥臂之间的电容器平衡关系发生变化,电容器中性点电压 $U_0$ 以及流经两个桥臂中性点连线的电流 $I_0$ 发生变化。同时,由于中性线电压以及故障相电容发生变化,三相电流 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 也会较正常时有所区别。

由此,以电容器双桥臂中性点连线电流 $I_0$ 以及三相电流 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 为基础构建故障诊断特征。

### 2.2 电流计算方法及特征量构建

对于双Y型外熔丝电容器,利用双桥臂中性点基尔霍夫定律可得

$$(U_A - U_0)C_A + (U_B - U_0)C_B + (U_C - U_0)C_C = 0 \quad (1)$$

式中: $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 分别是母线三相电压相量; $U_0$ 是电容器中性点电压; $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$ 分别是电容器的三相电容量。

由此,可以得到

$$U_0 = \frac{U_A C_A + U_B C_B + U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (2)$$

因此,三相电流 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 分别为

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U_A C_B + U_A C_C - U_B C_B - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_A \\ I_B &= \frac{U_B C_A + U_B C_C - U_A C_A - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_B \\ I_C &= \frac{U_C C_A + U_C C_B - U_A C_A - U_B C_B}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_C \end{aligned} \quad (3)$$

此时,中性线电流 $I_0$ 为

$$I_0 = \frac{U_A C_B + U_A C_C - U_B C_B - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{A1} +$$

$$\frac{U_B C_A + U_B C_C - U_A C_A - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{B1} + \frac{U_C C_A + U_C C_B - U_A C_A - U_B C_B}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{C1} \quad (4)$$

式中:  $C_{A1}$ 、 $C_{B1}$ 、 $C_{C1}$  分别是电容器左桥臂的三相电容值。

假设母线三相电压平衡,即不存在负序分量,此时

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 \\ U_B &= \alpha^2 U_1 \\ U_C &= \alpha U_1 \end{aligned} \quad (5)$$

在此工况下,三相电流以及中性线电流分别为

$$\begin{aligned} I_A &= j\omega U_1 C_A \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \\ I_B &= j\omega U_1 C_B \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \\ I_C &= j\omega U_1 C_C \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} \\ I_0 &= jU_1 \omega \left( \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{A1} + \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{B1} + \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} C_{C1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

由此可见,电容器组三相电流以及中性线电流不仅与电容器不平衡度有关,同时也与正序电压有关。当正序电压发生变化时,上述电流值也会随之成正比变化。

为了避免电压变化对电流产生影响,进而影响电容器故障诊断精度,选取如下变量作为特征量参与故障诊断:

$$\begin{aligned} G_A &= \left| \frac{I_A}{\omega U_1} \right| = \left| C_A \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_B &= \left| \frac{I_B}{\omega U_1} \right| = \left| C_B \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_C &= \left| \frac{I_C}{\omega U_1} \right| = \left| C_C \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_0 &= \left| \frac{I_0}{\omega U_1} \right| = \left| \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{A1} + \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{B1} + \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} C_{C1} \right| \end{aligned} \quad (7)$$

上述变量与系统正序电压无关,仅反映电容的不平衡程度,对故障诊断有较好的灵敏度。

### 3 逻辑回归算法

设定电容器运行状态  $y$  满足泊松分布,即其概率分布函数  $p(y)$  满足:

$$p(y) = \phi^y (1 - \phi)^{1-y} \quad (8)$$

式中:当电容器正常运行时  $y=1$ ,电容器故障时  $y=0$ ;  $\phi$  是电容器正常时的概率。

根据指数分布族标准表达式:

$$p(y; \phi) = \exp \left[ \left( \lg \frac{\phi}{1 - \phi} \right) y + \lg(1 - \phi) \right] \quad (9)$$

根据广义线性模型假设,易得

$$\lg \left( \frac{\phi}{1 - \phi} \right) = \omega^T x + b \quad (10)$$

因此,可以得到逻辑回归的决策函数为

$$h_\phi = \phi = \frac{1}{1 + e^{-\omega^T x + b}} \quad (11)$$

由此可见,逻辑回归算法的意义在于根据学习样本求取参数  $\omega$  和  $b$ ,得到决策函数。并根据实际得到的  $x$  值,带入求得电容器运行状态的概率,根据以下判据进行状态诊断:

$$y = \begin{cases} 1, & p(y) \geq 0.5 \\ 0, & p(y) < 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

### 4 双 Y 型外熔丝故障诊断技术

基于逻辑回归的双 Y 型外熔丝故障诊断可通过以下步骤实施。

#### 1) 学习阶段

##### ① 仿真数据收集

以特定双 Y 型外熔丝电容器为基础,通过拉丁超立方抽样的方式,获取母线电压幅值以及电容器组中各电容器的电容值,从而获得 10 万个正常工况以及 10 万个故障工况。在正常工况下,电容器组中每相电容与额定值的频差不超过 5%,各相之间电容量差异不超过 2%。在故障工况下,电容器组中有某个小电容处于断路状态。

通过计算得出以上 20 万个工况下电容器故障诊断特征量。

##### ② 数据预处理

对仿真数据收集得到的故障特征量采用 Z-score 方法进行数据标准化,即:

$$\begin{aligned} G'_A &= \frac{G_A - \mu_A}{\sigma_A} \\ G'_B &= \frac{G_B - \mu_B}{\sigma_B} \\ G'_C &= \frac{G_C - \mu_C}{\sigma_C} \\ G'_0 &= \frac{G_0 - \mu_0}{\sigma_0} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $G'_A$ 、 $G'_B$ 、 $G'_C$ 、 $G'_0$  分别为标准化后的特征量;  $\mu_A$ 、 $\mu_B$ 、 $\mu_C$ 、 $\mu_0$  分别为样本中特征量  $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$ 、 $G_0$  的均值;  $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_C$ 、 $\sigma_0$  分别为样本中特征量  $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$ 、 $G_0$  的标准差。

### ③逻辑回归学习

利用上述  $G'_A$ 、 $G'_B$ 、 $G'_C$ 、 $G'_0$  得到的数据集,通过极大似然法,估计参数  $\omega$  和  $b$ 。其等效于求解如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min L(\beta) \\ \text{s. t.} \end{aligned} \quad (14)$$

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^m [-y_i \beta^T \hat{x}_i + \ln(1 + e^{\beta^T \hat{x}_i})]$$

式中:  $\beta = (\omega; b)$ ;  $\hat{x} = (x; 1)$ 。

通过估计得到参数  $\omega$  和  $b$ ,得到决策函数:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\omega_1 G'_A - \omega_2 G'_B - \omega_3 G'_C - \omega_4 G'_0 - b}} \quad (15)$$

## 2) 在线故障诊断

### ①物理量测量及特征量计算

在线通过变电站母线 PT、电容器三相 CT 以及双 Y 型中性线 CT,实时测量电容器所在母线正序电压、电容器三相电流以及电容器中性线电流。通过计算得出故障诊断特征量。

### ②故障诊断

将物理量测量及特征量计算得到的故障诊断特征量带入仿真数据收集进行标准化,并带入逻辑回归的函数表达式中求取  $y$ ,同时依赖判据进行故障诊断。

## 5 算例验证

### 5.1 算例介绍

以西南某 500 kV 变电站实际低压电容器组为

例,对算法有效性进行分析。

该电容器组额定电压为 35 kV,额定容量为 30 MVar,采用双 Y 型外熔丝结构,每相共计两支桥臂,每支桥臂均通过 20 个电容器 5 并 4 串而成。

由于该电容器组安装位置处于室外,每个电容的电容值均会随环境温度而变化,同时经过试验表明,由于每个电容的电容值随温度变化形态各不相同,导致整个电容器组的容量和不平衡度也随之发生变化。

通过拉丁超立方抽样,得到 10 万组正常工况以及 10 万组故障工况。

### 5.2 传统故障诊断方法灵敏度分析

传统电容器故障检测大多依据中性线电流的有效值开展,其整定方法往往是确保整定值大于电容器组正常运行时可能出现的最大中性线电流,并乘以可靠性系数。

将上述 20 万个学习样本中性线电流与电容器运行状态关系描述如图 2 所示。其中纵轴为 1 的点代表运行状态正常,而纵轴为 0 的点代表故障工况。

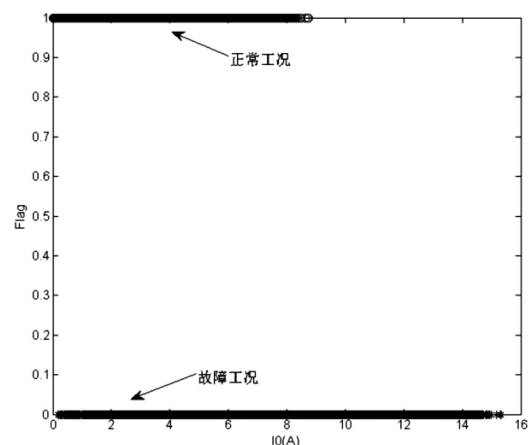


图2 中性线电流与电容器运行状态关系

由图 2 可知,由于电容器组存在初始不平衡情况,因此即使在电容正常运行的情况下,中性线电流最大依然可以达到 8.746 8 A。而故障情况下,由于某个电容器短路对电容值影响不大,在某些情况下却可能导致三相平衡程度提升,因此故障工况下中性线电流的范围为 0.171 1 ~ 15.335 2 A。

因此,按照躲过正常情况下最大中性线电流的方式对故障诊断进行整定,10 万个故障学习工况中,能够准确辨识的仅有 32 032 个,正确率仅有 32.03%,而 67.97% 的概率可能出现拒动。

由此可以得到传统方法中分类结果混淆矩阵,

如表1所示<sup>[12]</sup>。

表1 传统方法分类结果混淆矩阵

真实情况	预测情况与真实情况比例/%	
	正常	故障
正常	100	0
故障	67.97	32.03

根据查全率  $P$ 、查准率  $R$  以及度量指标  $F_1$  的定义,可以计算得到传统方法的相关指标为:  $P = 0.5953$   $R = 1$   $F_1 = 0.7463$ 。

由此可见,虽然传统方法通过整定方法保证了分类结果查准率为1,但是由于中性线电流在故障诊断过程中提供的信息过少,导致查全率仅有0.5953。该方法  $F_1$  度量值仅有0.7463。

### 5.3 所提方法性能分析

基于所提出的方法,将20万个数据划分为训练集和测试集,其中测试集占全体样本的10%。利用训练集进行逻辑回归训练,得到相应决策函数为

$$y = \frac{1}{1 + e^{-9.40G'_A - 9.66G'_B - 9.44G'_C + 20.18\omega_4 G'_0 + 10.04}} \quad (16)$$

可以看出,  $G'_A$ 、 $G'_B$ 、 $G'_C$  的物理意义相对对称,因此其系数也基本相等,而  $G'_0$  对故障最为灵敏,其系数也相应最大。

利用测试集对上述决策函数性能进行检测,得到分类结果混淆矩阵如表2所示。

表2 所提方法分类结果混淆矩阵

真实情况	预测情况与真实情况比例/%	
	正常	故障
正常	94.56	5.44
故障	5.58	94.42

同样,根据查全率  $P$ 、查准率  $R$  以及度量指标  $F_1$  的定义,可以计算得到所提方法的相关指标为:  $P = 0.9422$   $R = 0.9460$   $F_1 = 0.9440$ 。

由此可见,由于所提出的方法引入了三相电流作为辅助信息,在判别性能上较传统方法有了明显提升,  $F_1$  度量指标较传统方法提高了26.5%。特别地,对于故障情况下的诊断,正确率提升了194.7%。

需要说明的是,利用所提出的方法存在电容器组正常运行工况下故障诊断装置误报的可能。因此,在实际使用时,可以通过增加监测时间,综合告警信号的频率和持续时间加以判断的方法来提高性能。

## 6 结 语

前面提出了一种基于逻辑回归进行双Y型外

熔丝电容器组故障诊断的方法。该方法综合母线电压有效值、三相电流有效值以及中性线电流有效值等信息,构建了故障诊断4个特征指标,并通过逻辑回归的方式进行故障诊断。

与传统的单纯依赖中性线电流有效值进行故障诊断的方法相比,所提出的方法性能有着明显提升,  $F_1$  度量指标较传统方法提高了26.5%。特别地,对于故障情况下的诊断,正确率提升了194.7%。

所提出的方法判据简单,易于实现,在工程上具有较强的应用前景。

### 参考文献

- [1] 周晓炯,颜湘莲,刘北阳,等. 基于快速机械开关的10 kV 电容器组选相关合方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 533-540.
- [2] 杨庆,张照辉,席世友,等. 相控断路器投切10 kV 并联电容器的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1739-1745.
- [3] 廖天明,傅晓飞,纪坤华. 基于混合补偿方式的低压配台区无功补偿实用策略研究[J]. 电气应用, 2018, 37(23): 58-62.
- [4] 杨昌兴,王敏. 外熔丝保护性能与电容器组接线方式[J]. 浙江电力, 2006(6): 5-8.
- [5] 杨昌兴,王明毫. 并联电容器装置设计及应用的若干议题[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 1-9.
- [6] 赵启承,王敏,丁岷. 500 kV 变电站35 kV 并联电容器组常用保护方式及其定值的计算研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(6): 5-9.
- [7] 盛国钊,林浩,严飞,等. 不对称接线内熔丝高压并联电容器组的不平衡保护计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 60-66.
- [8] 黎林. 并联电容器组不平衡保护整定值的确定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(6): 4-7.
- [9] 张建军,孙红华,肖寒,等. 环境温度对运行中高压并联电容器影响的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(1): 6-10.
- [10] 谢天宝,鲁云鹏,张颖茵. 基于改进的杜鹃搜索算法优化支持向量机的10 kV 并联电容器组故障诊断和预警研究[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(4): 24-28.
- [11] 黄予春,曹成涛,顾海. 基于云计算和深度学习的电力电容器故障诊断和识别[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 71-75.
- [12] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

作者简介:

滕予非(1984),博士,高级工程师,研究方向为电力系统数据科学和交直流电网安全稳定分析;

唐嘉忆(1994),硕士,助理工程师,主要从事配电网规划工作。

(收稿日期:2019-08-27)