

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181477

# 基于 Adaboost 的高压直流线路连续换相失败预警方法

张国辉<sup>1</sup>, 李志中<sup>2</sup>, 王宾<sup>2</sup>, 刘萌<sup>1</sup>, 董新洲<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250000;  
2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

**摘要:** 为解决连续换相失败机理解析表达缺失导致的 LCC-HVDC 连续换相失败预警困难的问题, 运用统计学习建模的思想, 基于 Adaboost 分类器构建了一种连续换相失败预警器。预警系统特征向量的设计考虑了单次换相失败的解析表达, 充分利用仿真或现场历史积累的换相失败的实测数据进行统计学习, 得出连续换相失败问题的非线性决策平面。PSCAD 的 CIGRE 标准模型的多场景故障仿真数据验证表明, 预警器可基于较小的故障数据集获得较高精度的预警信息, 且所需现场实测数据少, 具有工程实践的有效性与实用性。

**关键词:** 连续换相失败; 故障预警; 统计学习; Adaboost

## Early warning method of HVDC line continuous commutation failure based on Adaboost algorithm

ZHANG Guohui<sup>1</sup>, LI Zhizhong<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, LIU Meng<sup>1</sup>, DONG Xinzhou<sup>2</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250000, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to overcome the difficulty in Continuous Commutation Failure (CCF) early warning caused by the lack of CCF analytical mechanism, a CCF warning system is proposed based on Adaboost algorithm in statistical learning modeling. The eigenvector of the classifier considers the analytical expression of single commutation failure, and makes full use of the measured data during commutation failure from simulation or actual data from industrial field to obtain the nonlinear decision plane that corresponds to CCF early warning problem. The model verification is evaluated based on multi-scene fault simulation with CIGRE standard model in PSCAD, where the proposed warning system is able to send out warning signal with high precision based on the considerably small data set as well as sufficiently small measured data required, proving the validity and practicability of the proposed method in engineering practice.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477084) and Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Application and Engineering Demonstration of Global Energy Interconnection based 'Source-Grid-Load' Coordinated Control Technology in Large-scale Safe and Stable Running" (No. 2017A-58).

**Key words:** continuous commutation failures; failure early warning; statistical learning; Adaboost

## 0 引言

高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)系统具有输送距离远、输送容量大、输送损

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477084); 国网山东省电力公司科技项目“基于全球能源互联网的‘源-网-荷’协调控制技术在电网安全稳定运行中的应用及工程示范”(2017A-58)

耗低、功率调节灵活、不受同步稳定限制等优良特性<sup>[1]</sup>。我国已形成世界上规模最大、电压等级最高的交直流混合输电系统。目前高压直流输电工程主要采用相控换流式直流输电系统(LCC-HVDC); LCC-HVDC的开关管为晶闸管, 其不具有自关断能力, 开关的导通和关断都需要外部电网的电压支持。一旦受端系统受到扰动, 难以维持晶闸管换相所需的换相电压, 就容易发生换相失败等现象<sup>[2]</sup>。

根据交流系统的故障扰动程度的不同, 逆变侧

发生换相失败的次数也不尽相同，若受端系统发生维持时间较长的或者程度较为严重的大扰动，从而导致电网发生电压大幅跌落、畸变及相移严重的现象，可能导致逆变侧后继发生持续时间上百毫秒的相继连续换相失败事件<sup>[3]</sup>。连续换相失败的发生会使得直流输电系统闭锁逻辑触发以保护换流阀，导致直流系统运行的暂时中断，从而导致瞬时性的直流传输功率中断，可能会恶化关键断面的潮流，对交直流混联电网的暂态稳定产生巨大的威胁<sup>[4-8]</sup>。

目前针对 HVDC 单次换相失败的机理研究比较充分<sup>[9-11]</sup>，单次换相过程的相关特征角在准稳态模型假设下存在严格的解析解，如文献<sup>[12]</sup>详细论述了换相失败机理以及影响换相失败的因素。但是连续换相失败是一个维持时间较长的相继换相失败过程，其特征不再符合稳态运行的强假设。暂态下交直流系统存在强耦合，直流控制系统具有时变性及非线性，连续换相失败的时序物理机理研究举步维艰。目前大多数研究都局限于仿真复现而非解析分析<sup>[3,13]</sup>，阻碍了连续换相失败的响应处理机制发展。

本文针对交直流连续换相失败，基于数据建模的思想，提出一种连续换相失败的预警算法，该算法能够在第一次换相失败发生之后短时间之内给出是否发生连续换相失败的预警信号，为交直流并联电网直流功率紧急控制提供可靠故障预警依据，从而提高交直流混联大电网的暂态稳定性。

### 1 连续换相失败机理分析

换相失败是指晶闸管在换相电压反向之前未能成功换相的故障<sup>[2]</sup>。晶闸管从熄弧到完全恢复其正向阻断能力需要一定的时间，该时间以电角度的形式描述又称为熄弧角  $\gamma$ 。若晶闸管的熄弧角小于晶闸管自身固有的极限熄弧角  $\gamma_{\min}$ ，将使应该导通的阀关断，而应该关断的阀却继续导通，从而发生称为换相失败的现象。

换相失败多发生于逆变侧，其根本原因是晶闸管自承受反向电压到完全关断需要一定的时间，若换相电压为正的时间区间未留有足够的去游离裕度，晶闸管会发生换相失败。本文所定义的连续换相失败，指的是直流发生初次换相失败之后，在 200 ms 之后相继发生一次或一次以上的换相失败的故障<sup>[14]</sup>。

#### 1.1 单次换相失败机理

下面以一典型的 6 脉波逆变器为例阐述单次换相失败的机理，实际电路拓扑如图 1 所示。

假设换相过程是管 VT<sub>1</sub> 向管 VT<sub>3</sub> 换相，涉及的

换相电压为  $v_{ab} = \sqrt{2}U_{ab} \sin(\omega t)$ 。  $\omega t = \alpha$  时刻，VT<sub>3</sub> 被施加触发脉冲并且导通，ab 相发生相间短路，换相过程开始，换相过程持续至  $\omega t = \alpha + \mu$  时刻结束，其中， $\alpha$  为延迟触发角， $\mu$  角为换相重叠角。换相过程对应的等效电路图如图 2 所示。

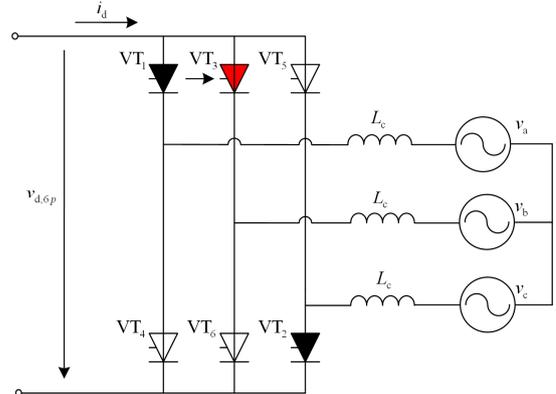


图 1 6 脉波逆变桥换相过程图例

Fig. 1 Commutation process in a 6-pulse converter

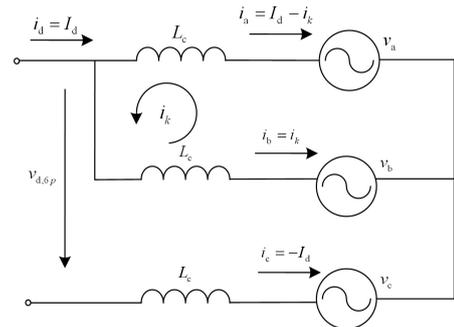


图 2 换相过程的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of commutation process

图 3 所示为以换相电压为标定的特征角示意图，其中， $\alpha$  为延迟触发角， $\beta$  为提前触发角， $\mu$  为换相重叠角， $\gamma$  为关断角，各角度之间满足  $\alpha = \pi - \beta$ ， $\alpha + \mu + \gamma = \pi$ 。

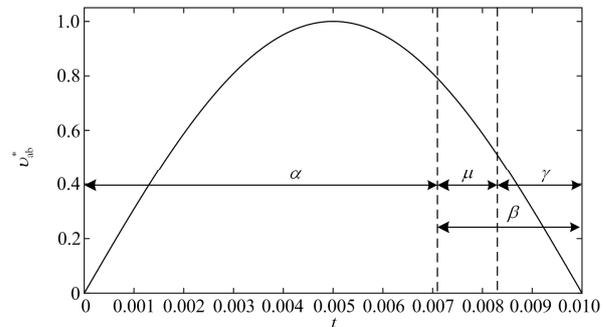


图 3 换相过程线压图例

Fig. 3 Line voltage during commutation

为了叙述方便, 假设一换相环流  $i_k$ , 其在换相全程不断增大, 其对应的换流方向为如图所示的逆时针方向, 即管  $VT_1$  向管  $VT_3$  换流的方向。

当考虑直流电流谐波和交流电压谐波时, 换相重叠角  $\mu$  及熄弧角  $\gamma$  的求解涉及非线性方程组, 无法得出解析形式的解<sup>[15]</sup>, 但在忽略直流电流纹波的情况下, 即假设换相全程  $i_d = I_d$ , 单次换相过程有严格解析解, 可由列写 ab 相回路的 KVL 方程得出, 具体如式(1)所示。

$$L_c \frac{di_b}{dt} - L_c \frac{di_a}{dt} = \sqrt{2}U_{ab} \sin(\omega t) \quad (1)$$

代入先前所假设的换相环流  $i_k$  及关系式  $i_a = I_d - i_k$ ,  $i_b = i_k$ , 式(1)可化简为

$$2\omega L_c di_k = \sqrt{2}U_{ab} \sin(\omega t) d\omega t \quad (2)$$

进行定积分可得:

$$\int_0^{I_d} X_c di_k = \frac{U_{ab}}{\sqrt{2}} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \sin(\omega t) d\omega t \quad (3)$$

进一步化简得:

$$X_c I_d = \frac{U_{ab}}{\sqrt{2}} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)) \quad (4)$$

由此可以计算得到换相重叠角的解析解:

$$\mu = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}X_c I_d}{U_{ab}} - \cos \alpha\right) - \alpha \quad (5)$$

同时亦可以得出熄弧角的解析解:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}X_c I_d}{U_{ab}} + \cos(\pi - \alpha)\right) \quad (6)$$

当所求熄弧角  $\gamma$  小于最小熄弧角  $\gamma_{\min}$  时, 换相电压  $v_{ab}$  留给管  $VT_1$  的去游离裕度不足, 该次换相会发生换相失败。单次换相失败的关断角判据具体如式(7)所述。

$$\gamma_0 < \gamma_{\min} \quad (7)$$

式中:  $\gamma_0$  是六脉动整流桥所有换流阀中  $\gamma$  角的周期最小值;  $\gamma_{\min}$  为极限熄弧角, 实测熄弧角小于此角度换流阀将无法完成成功换相, 将会发生换相失败<sup>[16]</sup>。

由式(6)也容易看出, 单次换相失败的发生与否, 与直流电流  $I_d$ 、换相电压、换流电抗  $X_c$  和延迟触发电角  $\alpha$  直接相关。

## 1.2 基于统计学习方法实施预警的基本思路

就物理机理而言, 连续换相失败只是单次换相失败依时序重复发生, 所涉及的换相机理本质上与单次换相失败并无区别。但是在危害性上, 单次换相失败与连续换相失败差别甚大, 一般而言, 单次换相失败将使逆变器出现一次历时约 1/3 基波周期的直流短路, 直流系统一般在换相失败之后若干个

周波之内就能够恢复稳态运行, 并不会对交直流混联系统造成很大的冲击; 而连续换相是一个持续时间可达几百毫秒的相继换相失败过程<sup>[14,17-18]</sup>, 将延长直流短路的时间, 或导致直流系统的传输功率产生巨大波动, 严重时可使得直流输电系统闭锁<sup>[19]</sup>。

单次换相失败一定程度上是可预测并且可预警的, 其鉴别依赖的关断角判别阈值可在直流系统稳态运行的强假设之下理论推导得出, 该判据以模式识别的视角看是一个线性决策平面, 所以, 单次换相失败的在线甄别只是一个线性分类的问题。

但是, 连续换相失败故障的最长持续时间可达数秒, 且故障全程交直流系统因强耦合而相互扰动、控制系统因输出环节的非线性而发生控制模式的快速跳变<sup>[20-21]</sup>, 其涉及的换相机理不像单次换相过程那样明晰。就物理机理层面而言, 连续换相故障全程的电气量不具有简单明晰的解析式描述, 难以人工预设规则以实现预警。

为得出解决连续换相失败预警的基本思路, 针对该问题, 本文将该问题定义为一个根据局部已知测量量的连续换相失败模式识别问题: 即以故障早期的部分测量信号作为模式识别的特征量, 依据特征做出故障动态全程连续换相失败是否会发生的推断, 以达到提前预知及预警的目的。

连续换相失败一般在逆变侧交流系统发生大扰动的时候发生, 而全程的扰动模式由直流控制系统及交流系统的动态参数所决定, 即使这些决定扰动模式的信息可以提前观测, 但是连续换相失败的故障模式难以通过这些局部观测提前确定。然而, 连续换相失败的故障深度与交流系统的扰动程度总体仍呈正相关关系, 即故障的严重程度能由第一次换相失败发生前后的相关电气量体现出来。总而言之, 就模式识别角度而言, 单次换相失败是线性可分的, 而连续换相失败往往是非线性可分的。故单次换相失败可做物理解析推断, 而连续换相失败只能求诸于统计模型上的相关性推断。如果能根据第一次换相失败的电气测量信息挖掘出是否会发生连续换相失败的预警信息, 则可以根据该预警信号为连续换相失败的系统级紧急响应争取数十毫秒至数百毫秒的时间, 从而减少交直流混联的系统风险, 提高电网的安全层级。

基于数据的统计学习算法能够很好地从数据中提取难以人工挖掘的关键特征, 只要数据能够全面地刻画复杂的物理现象, 再加上采用设计合理的统计学习系统, 往往能将复杂难解的关键特征合理利用, 从而达到解决问题的目的。故本论文采用数据建模的思想, 基于足够的换相失败故障仿真数据,

以求数据涵盖丰富的故障特征，从而得到对连续换相失败故障问题的全面刻画。

## 2 预警用统计算法选择

统计学习的目的，是基于数据层面得到一个最优的具有强拟合能力的参数化映射函数，从而挖掘数据的特征与其对应的标记之间的关联性映射关系，这种关联性关系理论上可以是非线性的，甚至是任意复杂的。在本文涉及的连续换相失败预警算法框架中，特征对应于故障早期的部分测量信号，标记则对应于基于该特征直流系统后续是否会发生连续换相失败的指示值，连续换相失败的特征与标记的最优参数化映射函数是通过现场运行故障数据或者离线仿真的数据训练得到的。

基于统计学习算法以解决关联性的统计映射，可以从连续换相失败的机理分析中解放出来，不再需要针对物理过程进行解析分析以人工给出判断阈值，而是着眼于如何得到充分的描述信息，通过合理地建立学习器模型，从而得到一个令人满意的预警算法并运用于工程实践。

### 2.1 Adaboost 算法

统计学习方法中，集成学习方法一般比单一的方法泛化能力更强，且擅长于解决小数据学习以及样本不平衡之下的学习难题。因此，集成学习被广泛运用于计算机视觉和图像处理、生物、医疗和工程等多个领域<sup>[22-24]</sup>。

具体而言，集成学习方法指的是通过某种规则，构建并且结合多个弱学习器的输出以完成学习任务，从而显著提升弱学习器的学习性能的学习方法<sup>[25]</sup>。集成学习中的弱学习器可以是目前所流行的任意一种学习算法，比如“神经网络”、“决策树”和“支持向量机”等等。

本文涉及的连续故障预警问题，为一个模式识别的二分类问题，即预警系统根据早期的测量特征输出一个“0-1”预警信号，分别代表着“会发生连续换相失败”或“不会发生连续换相失败”。集成学习方法中，传统的 Boosting 方法最擅长于解决拥有者分线性决策平面的二分类问题，而 Boosting 算法族中，Adaboost 最为著名，其可以使用“加性模型”进行推导，即 Adaboost 学习器的输出是若干个弱学习器输出的线性组合<sup>[26]</sup>。

Boosting 算法本质上是通过迭代训练多个弱学习器以进行最终的投票输出，迭代过程持续直至学习器的个数达到预设上限  $T$ 。在迭代过程中，Boosting 通过改变被当前迭代过程中被错误分类的样本的权值以实现对于训练样本分布的重塑，从而增

加下一轮迭代中该错误分类样本的“关注程度”；同时，每一轮迭代训练的弱学习器根据其自身对于重塑后训练样本的残差而赋予不同的权值，以达到弱分类器中精确度高的分类器在最后的组合输出时拥有更高的“投票权”。

从偏差-方差(bias-variance)分解的角度看，Boosting 方法主要关注降低偏差，因此 Boosting 能够基于泛化性能相当弱的学习器构造出很强的集成<sup>[22]</sup>。本文的预警系统采用的基算法是泛化能力极弱、但运行速度极快的单层决策树(decision-tree stump)，但是依然能够通过使用的 Adaboost 算法训练出一个工程上可用的预警系统。

### 2.2 Adaboost 算法伪码及其计算方法

下面对迭代过程进行更为详细地阐述。假设初始训练样本为  $m$  个样本序列  $\mathcal{D} = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_m, y_m)\}$ ，其中， $y_i \in \{-1, +1\}$ ， $\mathcal{L}$  为弱学习器对应的基学习算法， $f(\cdot)$  为假设存在的真实函数， $h_i(\cdot)$  为第  $i$  轮迭代生成的弱学习器对应的判别函数。

(1) 每个训练样本赋予初始权值，其中  $\mathcal{D}_{ij}$  表示第  $j$  个样本在第  $i$  轮训练中的样本权值，计算方法如式(8)所示。

$$\mathcal{D}_{il} = \frac{1}{m}, l=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

(2) for  $i=1, \dots, T$ ，循环执行步骤(3)–(6)。

(3) 针对训练集  $\mathcal{D}$  与训练集权值  $\mathcal{D}_i$  训练得到第  $i$  次迭代的弱学习器判别函数

$$h_i(\cdot) = \mathcal{L}(\mathcal{D}, \mathcal{D}_i) \quad (9)$$

(4) 根据式(10)计算该弱学习器的残差

$$\epsilon_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I(h_i(\mathbf{x}) \neq y_j) \mathcal{D}_{ij} \quad (10)$$

(5) 如果残差大于 0.5，算法中止，否则对于第  $i$  轮训练所得的弱分类器赋予分类器权值  $\alpha_i$ ，计算方法如式(11)所示。

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i}\right) \quad (11)$$

(6) 依照式(12)重新分配训练样本权值

$$\mathcal{D}_{i+1}(\mathbf{x}) = \mathcal{D}_i(\mathbf{x}) e^{-\alpha_i f(\mathbf{x}) h_i(\mathbf{x})} \quad (12)$$

经过  $T$  轮的训练后，Adaboost 根据准确度投票加权输出组合  $T$  个基学习器的输出并通过一个符号函数作为最后的输出，计算方法如式(13)所示。

$$H(\mathbf{x}) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^T \alpha_i h_i(\mathbf{x})\right) \quad (13)$$

式(13)表明，每个基学习器对于给定特征向量

独立做出线性阈值判断, 而 Adaboost 集成学习方法通过系数  $\alpha_i$  将  $T$  个基学习器的判据结果加权, 最后以加权结果的符号正负性作为二分类结果。与线性分类器不同的是, 每个基学习器对于特征向量的每一分量都有明确的判据, 但是经过集成学习的加权之后, 全体学习器的判据综合结果往往不再是一个线性阈值, 而可以是一个任意复杂的非线性判据。

### 3 连续换相失败预警算法设计

根据先前所述的换相机理, 换相失败发生与否与换相过程中的交流换线电压及直流电流有直接的关系。连续换相失败本质上为多次单次换相失败的序贯发生, 故影响单次换相失败的因素同样会影响连续换相失败。故本论文以交流电压、直流电压、直流电流构造特征量, 包括交流电压  $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ , 逆变侧直流电流  $I_{di}$ , 逆变侧直流电压  $v_{di}$ , 组成 Adaboost 学习器的特征向量。

为了实现快速的连续换相失败故障预警, 用于预警的特征向量数据长度不宜过长, 否则用于故障预警的信息冗余, 加大预警算法的计算量与学习器的训练难度。因此, 需要对特征向量内的每个特征量进行加窗操作; 同时, 为了可靠预警, 特征量的数据窗不能过小, 否则可能导致用于预警的信息不足, 从而增大误判的概率; 最后, 为了简化模型以减少分类器训练难度, 对所有测量量采用标幺值记值。

为了与单层决策树的数据结构相对应, 将这几个加窗且标幺化记值的特征量首位相接为一个列向量, 具体如下:

$$\mathbf{x}^* = [\dot{U}_a^{*T}, \dot{U}_b^{*T}, \dot{U}_c^{*T}, I_{di}^{*T}, v_{di}^{*T}]^T \quad (14)$$

为了与现场实际相结合并且使特征数据加窗的问题具体化, 作出如下假设:

(1) 直流预警系统有能力在可忽略的时间代价内判断出第一次换相失败的发生并标定其发生时刻。

(2) 预警系统对测量数据有一定的记录能力。

根据以上假设, 给出基于训练好的 Adaboost 学习器的数据加窗操作及后续预警流程, 结合图 4 所示, 具体流程如下:

(1) 逆变侧交流系统大扰动, 预警系统瞬间判断出第一次换相失败发生, 并且标定第一次换相失败的发生时刻, 启动故障预警系统。

(2) 预警系统从先前的测量数据记录中, 读取第一次换相失败的发生时刻之前半个周波的交流电压

$\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ , 逆变侧直流电流  $I_{di}$ , 逆变侧直流电压  $v_{di}$  的录波数据, 并且继续对特征变量进行维持半个周波的测量录波, 完成测量数据的加窗操作。

(3) 根据式(14)所述的特征向量设计, 构建标幺化的特征向量, 输入至预先训练好的 Adaboost 学习器中进行式(13)的映射计算, 并根据 Adaboost 学习器的输出做出第一次换相失败之后是否会发生连续换相失败的预警。

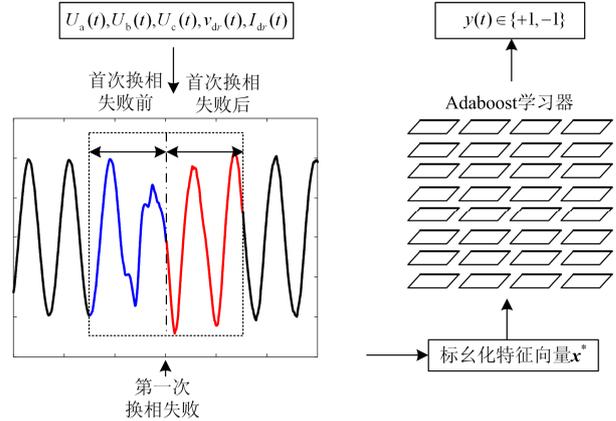


图 4 预警系统数据加窗方法及预警流程

Fig. 4 Data window configuration of CF warning system

前面所述的应用场景是在假想存在一个已经训练完成的 Adaboost 学习器的情况下给出的, 而在训练过程中, 为了保证训练过程与现场工程应用的统一性, 分类器训练过程中使用的训练样本与测试样本的数据加窗方法及标记方法与上述现场运行假设所提及的方法保持一致。样本进行标记时, 采用式(7)的熄弧角判据以标定原始数据中每次换相失败发生的时刻。

### 4 案例仿真验证

直流输电系统是否发生换相失败甚至连续换相失败, 与交流系统发生故障的故障时刻、故障类型和故障严重程度皆有密切关系<sup>[27-28]</sup>。为获得交流大扰动之下的原始电气量数据, 且考虑到运行现场故障数据难以获得, 本文在 PSCAD 软件上, 采用 CIGRE 标准测试系统(CIGRE Benchmark System), 进行了多组故障情境的仿真工作。图 5 所示的是 CIGRE 标准测试系统的拓扑图。

为了尽可能地得到多组描述换相失败以及连续换相失败的数据, 同时考虑到换相失败故障一般仅发生于直流输电系统的逆变侧, 本文仅在逆变器换流母线处设置多组类型不同的接地故障, 以获取原始的故障数据。逆变侧所设的多组接地故障的详细参数如表 1 所示。

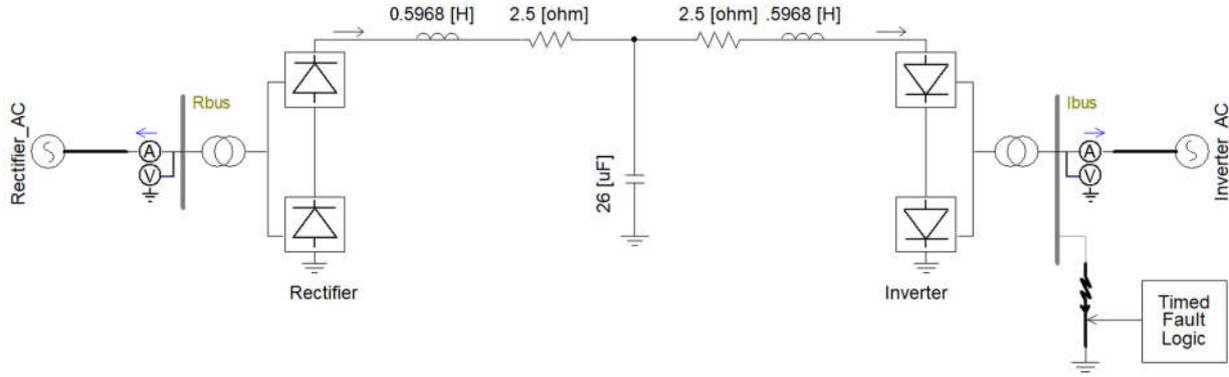


图 5 CIGRE 标准测试系统拓扑

Fig. 5 Topology of CIGRE benchmark system

表 1 PSCAD 仿真故障设置参数表

Table 1 PSCAD simulation fault setting parameters

故障类型	a-g, b-g, c-g, ab, bc, ac, ab-g, bc-g, ac-g, abc
过渡电阻 $R/\Omega$	0.1, 5, 30, 80
故障起始初相角 (以 a 相电压为准)	0.05 $\pi$ , 0.1 $\pi$ , 0.15 $\pi$ , 0.2 $\pi$ , 0.25 $\pi$ , 0.3 $\pi$ , 0.35 $\pi$ , 0.4 $\pi$

假设运行现场的测量数据采样频率为 10 kHz，故所有故障仿真的仿真步长设置为 100100  $\mu\text{s}$ 。依照表 1 所示参数进行多组故障仿真之后，一共能够获得  $10 \times 4 \times 8 = 320$  组仿真数据，除掉其中 11 组没有发生初次换相失败的数据，以剩下的 309 组数据做进一步的训练与测试工作。

根据式(7)的关断角判据对所有场景之下的换相失败时刻做出标定之后，根据前面所述的特征量定义，对数据加窗得到标么化特征向量  $\mathbf{x}^*$ ；同时以第一次换相失败发生之后是否相继发生了连续换相失败，为对应的数据集打上指示值标记  $y \in \{+1, -1\}$ ，至此，数据集  $\{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_m, y_m)\}$  构建完成。

为展示集成学习能够基于数据学习特征向量隐含的连续换相失败的非线性判据，本文首先对分类结果与特征向量中的交流电压  $\dot{U}_a$ ，直流电压  $v_{di}$ ，直流电流  $I_{di}$  的关系进行可视化工作，结果如图 6 所示。

由图 6 可见，不同分类的各特征量的标么值的分布都高度重叠，不存在一个单一的线性阈值能够将它们区分开。

考虑到预警算法应用现场所需的运行速度要求，本文采用的 Adaboost 模型的基学习器为单层决策树。学习器的训练方法设置为 SAMME，迭代学习率设置为 0.95，基学习器个数上限设置为  $T = 500$ 。

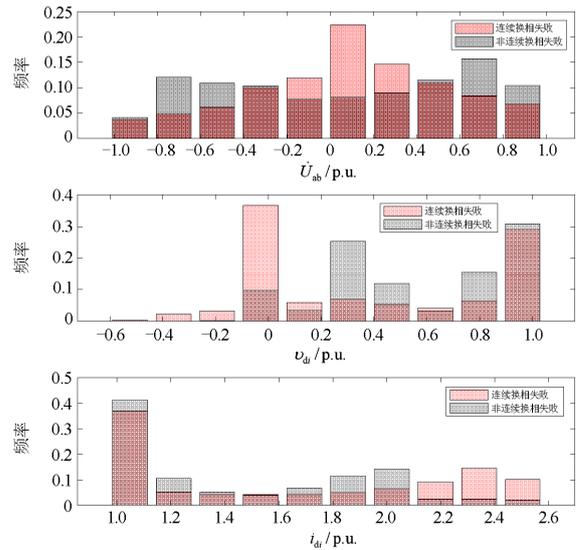


图 6 不同分类的特征量频数分布图

Fig. 6 Frequency distributions of features in different classes

为了展示预警器输出残差在训练过程中的典型变化趋势，首先进行一次单次训练：对样本进行随机打乱，取 200 组仿真数据作为训练集，另外 109 组作为测试集进行训练和测试工作。

图 7 给出该次训练和测试下的训练集残差及测试集残差的变化趋势，随着迭代进行，训练集对应的残差快速降至 0，测试集残差最终收敛至 0.039 8。由此可见，在该种数据集的划分方式之下，

本文设计的 Adaboost 预警器能在第一次发生换相失败的 10 ms 之后给出准确率为 96.02% 的故障预警信号。

为了展示多组训练集与测试集不同划分之下的 Adaboost 学习器的预警准确率, 对数据集进行了多次随机打乱并对之进行一致的训练以及测试工作, 以展示多组交叉验证试验之下预警器精确度的均值及方差。图 8 展示的是 100 组随机交叉验证的平均正确率箱盒图。

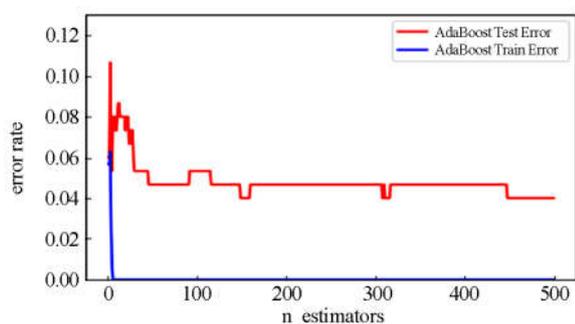


图 7 集成预警器残差变化图

Fig. 7 Errors plots of CF warning classifiers

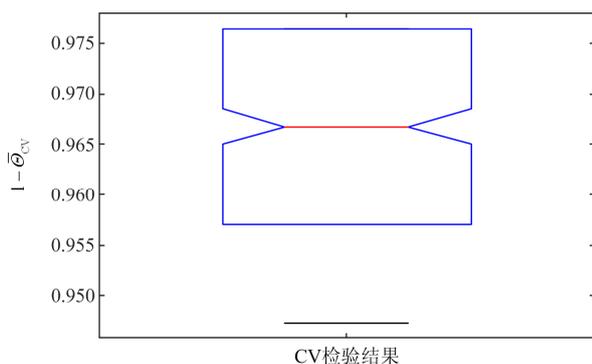


图 8 交叉验证正确率箱盒图

Fig. 8 Box plot of cross-validation results

由图 8 可见, 绝大多数数据集划分的情况下, 本论文设计的 Adaboost 故障预警器能够给出 95.70% 以上正确率的结果, 精确率的最小值为 94.68%, 中位数为 96.66%, 符合预警器的精确度要求。随机划分之下的多组交叉验证试验证明本文预警算法的精准性和鲁棒性。

训练所得的 Adaboost 的加权系数  $\alpha_i$  的频数分布如图 9 所示。

由图 9 可知, 大部分系数  $\alpha_i$  非零, 证明了 Adaboost 集成分类器未退化为一个线性阈值分类器, 模型会综合加权大部分的线性分类器的输出, 并通过符号函数这一非线性环节得到连续换相失败的非线性阈值。

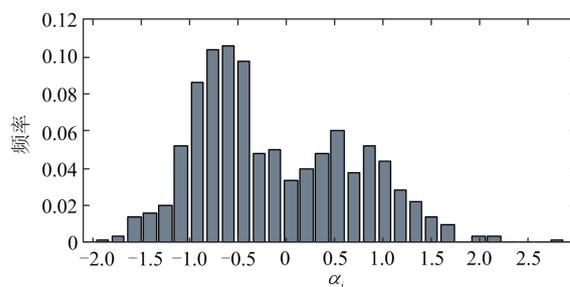


图 9  $\alpha_i$  的频数分布图

Fig. 9 Frequency distributions of  $\alpha_i$

## 5 结论

本文基于统计学习方法提出预警模型, 使得预警规则的设计从分析连续换相全程的复杂物理机理过程抽离, 直接着眼于构建测量数据与连续换相失败事件之间的映射关系。在算法框架确定的情况下, 模型本身的效果更多依赖于特征的设计以及数据本身是否能够详尽表征物理现象, 据此, 为提升模型的可靠性, 本文的特征量设计参考了单次换相失败的物理机理, 同时多组故障设置保证了数据集的详尽程度。

集成学习模型本身泛化能力较强, 且善于应对不对称数据集与小数据集学习, 适合运行现场故障数据稀有的场景。同时, 本文预警算法本身基于决策树, 预警速度快, 且易实现并行计算等加速运算, 可满足连续换相失败快速预警的需求。

## 参考文献

- [1] 王超. 考虑换相失败的换流站开关函数模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
WANG Chao. Modeling of switch function considering commutation failure effects for converter[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] YU H, WU Z, LI G, et al. Simulation of the commutation failure when faults occur in AC side of the HVDC system[C] // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), December 15-17, 2017, Chengdu, China: 1576-1580.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control

- of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [6] 李兆伟, 任先成, 刘福锁, 等. 交直流并联电网中直流功率紧急控制影响及优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 104-109.  
LI Zhaowei, REN Xiancheng, LIU Fusuo, et al. Research on effects and optimization of emergency DC power control in AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 104-109.
- [7] 杨光亮, 郇能灵, 郑晓冬, 等. 多馈入高压直流输电系统中功率倒向问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 22-27.  
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Power converse in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 22-27.
- [8] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.  
CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [9] 申洪明. 直流换相失败对交流侧保护的影响分析与对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
SHEN Hongming. Study effect of commutation failure on AC protection and the countermeasure[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [10] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [11] 曹磊. 针对换相失败的HVDC换流阀故障预警与优化设计[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
CAO Lei. Failure warning and optimized design of HVDC converter valve for commutation failure[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [12] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.  
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [13] 赵利刚, 赵勇, 洪潮, 等. 基于实际录波的南方电网多回直流换相失败分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 42-46.  
ZHAO Ligang, ZHAO Yong, HONG Chao, et al. Analysis on commutation failure of the CSG'S HVDC systems based on actual waves[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 42-46.
- [14] 张玉红, 姜懿郎, 秦晓辉, 等. 改善直流因连续换相失败导致闭锁的功率指令速降措施研究[J/OL]. 电网技术 :1-8[2019-07-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20180726.1156.009.html>.  
ZHANG Yuhong, JIANG Yilang, QIN Xiaohui, et al. The research on the countermeasure via fast decrease of DC power reference to alleviate DC block down risk due to successive commutation failure[J/OL]. 电网技术 :1-8[2019-07-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20180726.1156.009.html>.
- [15] 曾淑云, 江全元, 陆韶琦, 等. 适用于不对称情况的线换相换流器动态相量模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 129-135.  
ZENG Shuyun, JIANG Quanyuan, LU Shaoqi, et al. Dynamic phasors model of line commutated converter under unbalanced condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 129-135.
- [16] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [17] 徐松林, 黄少先. 基于小波能量谱和灰色综合关联度的HVDC换相失败故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 85-89.  
XU Songlin, HUANG Shaoxian. Fault diagnosis of commutation failures in the HVDC system based on the wavelet energy spectrum and grey comprehensive relationship degree[J]. Power System Protection and

- Control, 2012, 40(3): 85-89.
- [18] 陈仕龙, 荣俊香, 毕贵红, 等. 基于多尺度形态学的特高压直流输电系统换相失败故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(7): 118-124.  
CHEN Shilong, RONG Junxiang, BI Guihong, et al. Fault diagnosis based on multi-scale morphology for commutation failure in UHVDC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(7): 118-124.
- [19] LI F, CHEN Q, LIN X, et al. Simulation on power characteristic of UHVDC during commutation failure and DC block[C] // IEEE Electrical Power and Energy Conference, October 22-25, 2017, Askatoon, Canada: 446-451.
- [20] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.  
LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [21] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.  
YANG Fenyan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [22] 包涛, 程乐峰, 陈柏熹, 等. 基于人工智能算法的无功优化分析软件设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 89-96.  
BAO Tao, CHENG Lefeng, CHEN Boxi, et al. Software design of reactive power optimization analysis based on artificial intelligence algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 89-96.
- [23] 张春霞, 张讲社. 选择性集成学习算法综述[J]. 计算机学报, 2011, 34(8): 1399-1410.  
ZHANG Chunxia, ZHANG Jiangshe. A survey of selective ensemble learning algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(8): 1399-1410.
- [24] ASADI MAJD A, SAMET H, GHANBARI T. k-NN based fault detection and classification methods for power transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 359-369. DOI: 10.1186/s41601-017-0063-z.
- [25] 杨新武, 马壮, 袁顺. 基于弱分类器调整的多分类 Adaboost 算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 373-380.  
YANG Xinwu, MA Zhuang, YAUN Shun. Multi-class Adaboost algorithm based on the adjusted weak classifier[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(2): 373-380.
- [26] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [27] MIRSAEIDI S, DONG X, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [28] RAHIMI E, FILIZADEH S, GOLE A M. Commutation failure analysis in HVDC systems using advanced multiple-run methods[C] // Proceedings of International Conference Power System Transients, June 19-23, 2005, Montreal, Canada: 5 pp.
- 
- 收稿日期: 2018-11-24; 修回日期: 2019-04-16  
作者简介:  
张国辉(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护; E-mail: dky68612707@163.com  
李志中(1994—), 男, 硕士, 通信作者, 主要从事电力系统继电保护技术研究工作; E-mail: lizz17@mails.tsinghua.edu.cn  
王 宾(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护, 智能变电站站域信息共享技术, 暂态电能质量分析等. E-mail: binw\_ee@mail.tsinghua.edu.cn  
(编辑 张爱琴)