

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.015

电力设备故障识别、预测与保护技术

基于频域特征分析的电容器塔抗鸟害保护策略改进研究

邹洪森¹, 樊润奇², 郝治国², 刘若鹏¹, 杨晨¹, 湛卓², 王挺²

(1. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 银川 750001; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 针对高压直流输电系统中换流站滤波电容器塔不平衡保护易受鸟害影响, 以及传统物理驱鸟手段长期有效性不足的问题, 开展鸟害故障机理与识别方法研究, 以提升保护系统在复杂环境下的运行可靠性。分析了电容器塔内部故障与鸟害瞬时故障的产生机理差异, 并基于故障波形特征进行频域分析, 提取了能够有效区分两类故障的关键频域指标。构建了与实际运行工况相符的电容器电磁仿真模型, 揭示了故障过程中电容器单元的过载特性与耐受边界。在此基础上, 提出了一种针对性的不平衡保护改进策略, 通过改进故障判别算法与跳闸延时逻辑, 弥补了现有保护在躲避鸟害瞬时过程方面的不足。仿真与测试结果表明, 该策略在保持对内部故障快速响应的同时, 能够显著抑制由鸟类活动引起的保护误动作。该研究为换流站电容器塔不平衡保护在复杂环境下的可靠运行提供了改进思路与方法基础。

关键词: 滤波电容器塔; 不平衡保护; 鸟害故障; 频域特征; 优化策略

Research on Improvement of Anti-bird Damage Protection Strategies for Capacitor Towers Based on Frequency-domain Feature Analysis

ZOU Hongsen¹, FAN Runqi², HAO Zhiguo², LIU Ruopeng¹, YANG Chen¹, CHEN Zhuo², WANG Ting²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Company, Yinchuan 750001, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the issues that the unbalanced protection of filter capacitor towers in converter stations of high-voltage direct current (HVDC) transmission systems is susceptible to bird-related disturbance, and that traditional physical bird-deterrent measures lack long-term effectiveness, in this paper the fault mechanism and identification methods of bird-related disturbance are investigated so as to enhance the operational reliability of protection system under complex environmental conditions. The differences in the generation mechanism between internal faults within the capacitor towers and transient bird-related faults are analyzed. Based on frequency-domain analysis of fault waveform characteristics, key frequency-domain indicators that can effectively distinguish between the two types of faults are extracted. An electromagnetic simulation model of the capacitor tower that is consistent with actual operating conditions is established, revealing the overload characteristics and withstand limits of capacitor units during fault process. On this basis, a targeted improvement strategy for unbalanced protection is proposed. The deficiency of the existing protection in riding through transient bird-related disturbance process is addressed by refining the fault discrimination algorithm and the trip delay logic. Both simulation and test results demonstrate that the proposed strategy can significantly suppress protection maloperations caused by bird activities while maintaining a rapid response to internal faults. This research offers both conceptual guidance and a technical basis for enhancing the reliable performance of unbalanced protection for converter station capacitor towers in complex operating environments.

Key words: filter capacitor towers; unbalanced protection; bird-related faults; frequency-domain characteristics; optimization strategy

收稿日期: 2026-04-21; 修回日期: 2026-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3015100); 国网宁夏电力有限公司超高压公司科技项目(5229CG240008)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2024YFC3015100), Science and Technology Project of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Ultra High Voltage Company(5229CG240008).

0 引言

为助力“双碳”目标与能源结构转型,中国新能源装机容量与发电量近年来显著提升^[1]。由于能源资源与负荷中心呈现“西多东少”的地理格局,“西电东送”战略应运而生,旨在将西南水电、西北风光电力输送至东部负荷密集区,从而提升清洁能源利用率,减少弃风弃光。在此背景下,高压直流输电技术凭借其大容量、远距离、低损耗及高稳定性的优势,得到广泛应用^[2]。

换流站作为高压直流输电的关键环节,承担交直流转换功能。随着站内高比例电力电子设备的投入,交、直流两侧均会产生明显的谐波干扰。过大的谐波分量不仅影响电能质量,还可能威胁系统安全稳定运行。交流滤波电容器装置是抑制换流器特征谐波、并提供无功支撑的重要手段^[3-4],因此对其可靠保护是保障换流站安全运行的重要措施。

在中国西北地区,换流站多选址于偏远开阔地带,周围缺乏高大树木,鸟类常将电容器塔视为栖息与筑巢场所^[5-6]。鸟类在塔层间飞行或停留时,易导致上下层电容器单元出线套管间短路,引发滤波电容器塔不平衡保护误动作,严重威胁设备安全稳定运行。目前针对鸟害的防护措施以物理驱鸟为主,如防鸟刺、防鸟网及其他驱鸟装置^[7]。这类方法虽有一定效果,但无法从根本上解决保护误动问题,且鸟类易产生适应性,长期效果逐步减弱。

对于鸟害这类瞬时性故障,通常可考虑采用重合闸排除,然而电容器塔因自身充放电特性无法适用该策略^[8]。同时,现有不平衡保护跳闸延时较短(通常约20 ms),不足以躲过鸟害故障的瞬时过程,导致保护频繁误动。据国家电网公司统计,截至2019年换流站滤波器共发生113起故障,其中35起由鸟害引发,约占总故障次数的32%,严重影响运行可靠性^[9-10]。

为此,文中首先梳理电容器塔不平衡电流保护原理,总结鸟害短路故障特征,揭示其引发保护误动的机理;其次,建立仿真模型,分析不同故障类型下电容器塔各单元的过载情况;最终,结合现行国家标准与仿真结果,对现有不平衡保护跳闸延时提出优化策略。

1 故障机理与特征分析

1.1 内部故障机理与录波数据

内部故障主要由电容器单元内部元件的电老

化与热老化引起,可能导致元件击穿。此外,电容器塔的投切操作所产生的暂态过电压也会进一步加剧元件老化。电容器塔的串并联结构及各单元内部电容元件的连接方式见图1。

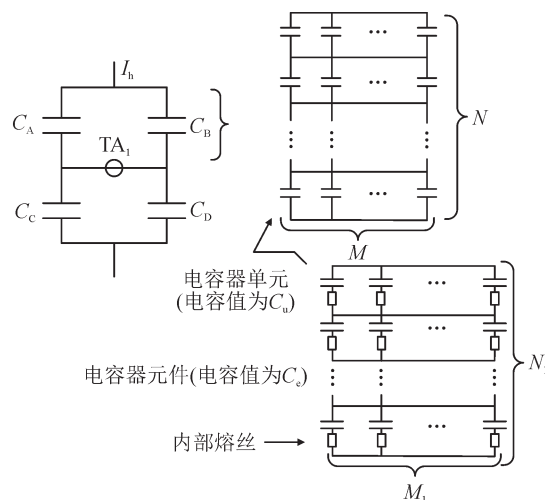
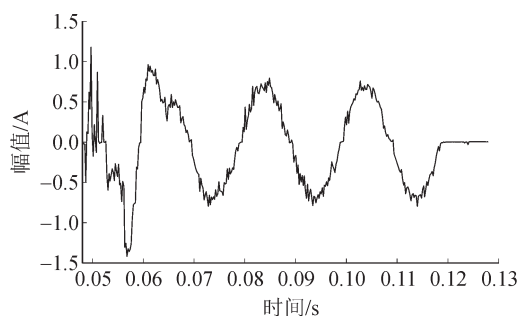


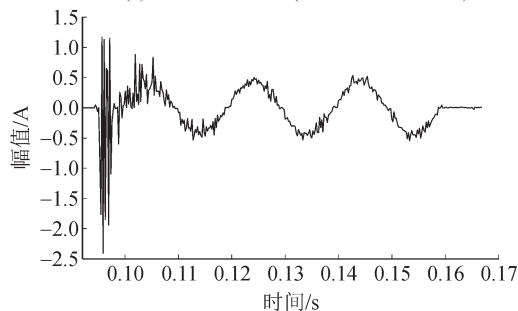
图1 交流滤波器塔及电容器单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC filter tower and capacitor unit structure

电容器塔的每个桥臂由电容器单元串并联组成,单元内部则为带串联熔丝的电容器元件串并联结构。内部故障始于元件击穿,导致并联元件被短路,电流集中使熔丝熔断以隔离故障^[11]。此过程伴随两次阻抗突变,但因故障仅限于单个单元,其阻抗变化相对整体很小,故产生的不平衡电流较小。内部故障不平衡电流的典型波形见图2。



(a) 完整故障1波形(采样率: 4 801 Hz)



(b) 完整故障2波形(采样率: 4 801 Hz)

图2 内部故障不平衡电流波形

Fig. 2 Internal fault unbalanced current waveform

以图2(a)为例说明,2018年8月27日,西北某换

流站 7643 交流滤波器在充电过程中, 因高端电容器 C_1 内部产生击穿故障导致电容量异常升高, 引起桥臂不平衡电流达到 0.2 A 左右, 超过不平衡 III 段保护定值。两套保护装置在持续约 20 ms 后正确动作, 跳开 7643 开关并锁定。现场检查确认电容器塔外观无异常, 后续通过更换故障电容使不平衡度恢复至投运要求。

1.2 鸟害故障机理与录波数据

前期研究通过实验分析了鸟类排泄物与羽毛的电阻特性, 并结合现场故障录波数据, 明确了鸟害故障的阻抗特征: 其阻值约为 250~500 Ω , 且主要表现为纯阻性^[12]。

为改善电场分布并防止电晕或绝缘击穿, 电容器塔装有均压环, 各层均压环通常与本层左右桥臂的某一电容器单元连接, 形成等电位(具体连接方式见图 3^[13])。实际鸟害故障常表现为鸟类进入层间导致均压环向下层电容器单元放电, 据此可分为同侧与对侧故障。

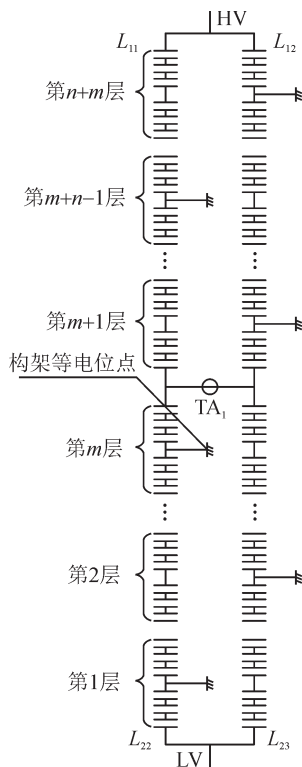
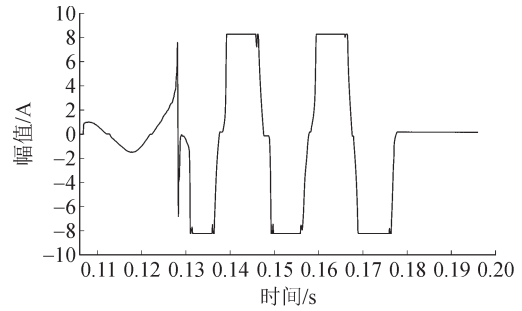


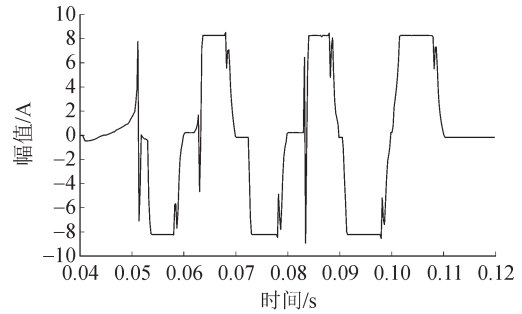
图3 均压环等电位点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equipotential points of voltage equalization ring

从机理上看, 鸟害故障经鸟体形成高阻短路(约 250~500 Ω), 涉及多个单元, 不平衡电流幅值较大, 且可能伴随空气电弧的熄灭与重燃; 内部故障则为介质击穿导致的低阻短路($< 10 \Omega$), 通常限于单个单元内部。鸟害故障不平衡电流的典型波形见图 4。



(a) 完整故障波形(采样率: 10 000 Hz)



(b) 完整故障波形(采样率: 4 801 Hz)

图4 鸟害故障不平衡电流波

Fig. 4 Bird-damage fault unbalanced current waveform

以图 4(a) 为例说明, 2021 年 7 月 2 日, 西北某换流站 5613 交流滤波器在正常运行过程中, 因一只雀鹰落在电容器塔 C_1 顶部框架与 A 相电位端之间导致单相接地短路。瞬时强电流引起不平衡保护 III 段动作, 5613 断路器于 11 时 45 分跳闸。现场检查发现雀鹰死于电容器塔顶, 并伴有放电痕迹。此次故障属于偶发的鸟害性质, 经清理并确认设备无损后, 该滤波器于当日 18 时 31 分恢复送电。

1.3 不平衡电流频谱特征分析

鸟害与单元内部故障频域特征对比分析。为定量对比不同信号分析方法的分辨性能, 文中选取故障发生后一个工频周波内的电容器塔不平衡电流作为分析对象, 对比快速傅里叶变换(FFT)、离散小波变换(DWT)、平稳小波变换(SWT)、小波包变换(WPD)4 种时频域分析工具的频谱表征效果, 典型分析结果见图 5(内部故障)、图 6(鸟害故障)。

由频域分析结果可得如下规律: ① 鸟害场景下, 4 种分析方法得到的电流能量分布具备一致特征, 故障能量高度集中于低频区间, 低频能量与高频能量存在显著数量级差异。其中 FFT 可精确定位 50 Hz 基波为能量主导分量; 相较之下, 3 类小波类方法仅能输出连续频段范围, 无法精确识别单一频率分量。② 电容器单元内部故障场景下, FFT 与 DWT 结果表明故障能量在基波至 50 次谐波区间弥散分布, 不存在占据绝对优势的特征频段; SWT、WPT 虽显示低频能量相对偏高, 但低频、高频能量不存在明显数量级落差。

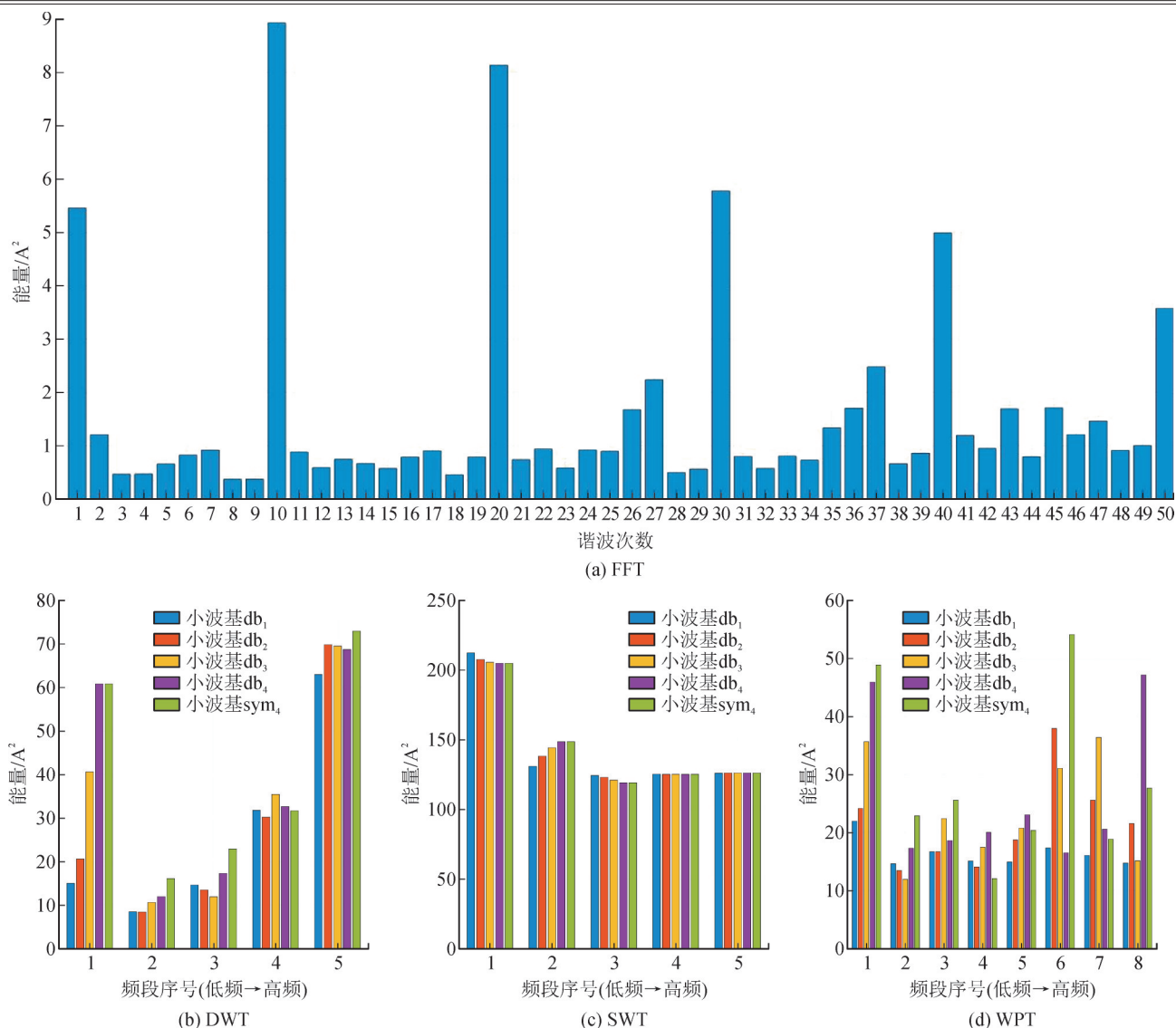


图5 内部故障频域分析结果

Fig. 5 Frequency-domain analysis results of internal faults

综上可以明确:鸟害故障不平衡电流具备低频(基波)能量占比极高的显著特征;而内部故障不存在稳定、突出的主导频率分量,二者频域分布特性存在本质差异。综合4种算法对比结果,文中最终选取FFT作为信号分析手段,理由如下:

小波类变换仅能输出与采样频率耦合的连续频段信息,难以定位独立频率分量;同时工程应用中需要选取母小波、设定分解层数,参数整定复杂,不利于现场标准化部署。反观FFT能够最大化凸显两类故障不平衡电流的频域差异,直接输出各单一频率对应的能量数值,频率分辨率更优;并且算法结构固定、参数配置简单,工程落地难度显著低于小波类算法。

1.4 故障类型识别判据

由前述频域分析结果可知,鸟害故障与内部故障在频谱能量分布上存在明显差异。鸟害故障发

生时,鸟体同时桥接多个电容器单元,使电容器塔桥臂阻抗发生较大变化,其不平衡电流主要表现为工频稳态分量显著增加。因此,鸟害故障的频谱能量高度集中于50 Hz基波附近,基波能量占比较高,而其余各次谐波能量相对较小。相较之下,电容器单元内部故障通常伴随电容元件击穿、熔丝熔断及局部参数变化,不平衡电流中的能量分布较为分散,多个谐波分量之间的差异相对较小。

为定量描述频谱能量的集中与离散程度,文中采用归一化频谱熵表征谐波的分布特性,频谱熵基于香农熵,将各次谐波的归一化能量占比视为概率分布,用以衡量频谱能量在不同频率分量间的集中与离散程度^[14]。能量主要集中于少数谐波时(如鸟害故障),频谱熵较小;能量分散于多个谐波时(如内部故障),频谱熵较大。采用 $\ln N$ 归一化后,可减小谐波数量对熵值尺度的影响,便于不同故障样

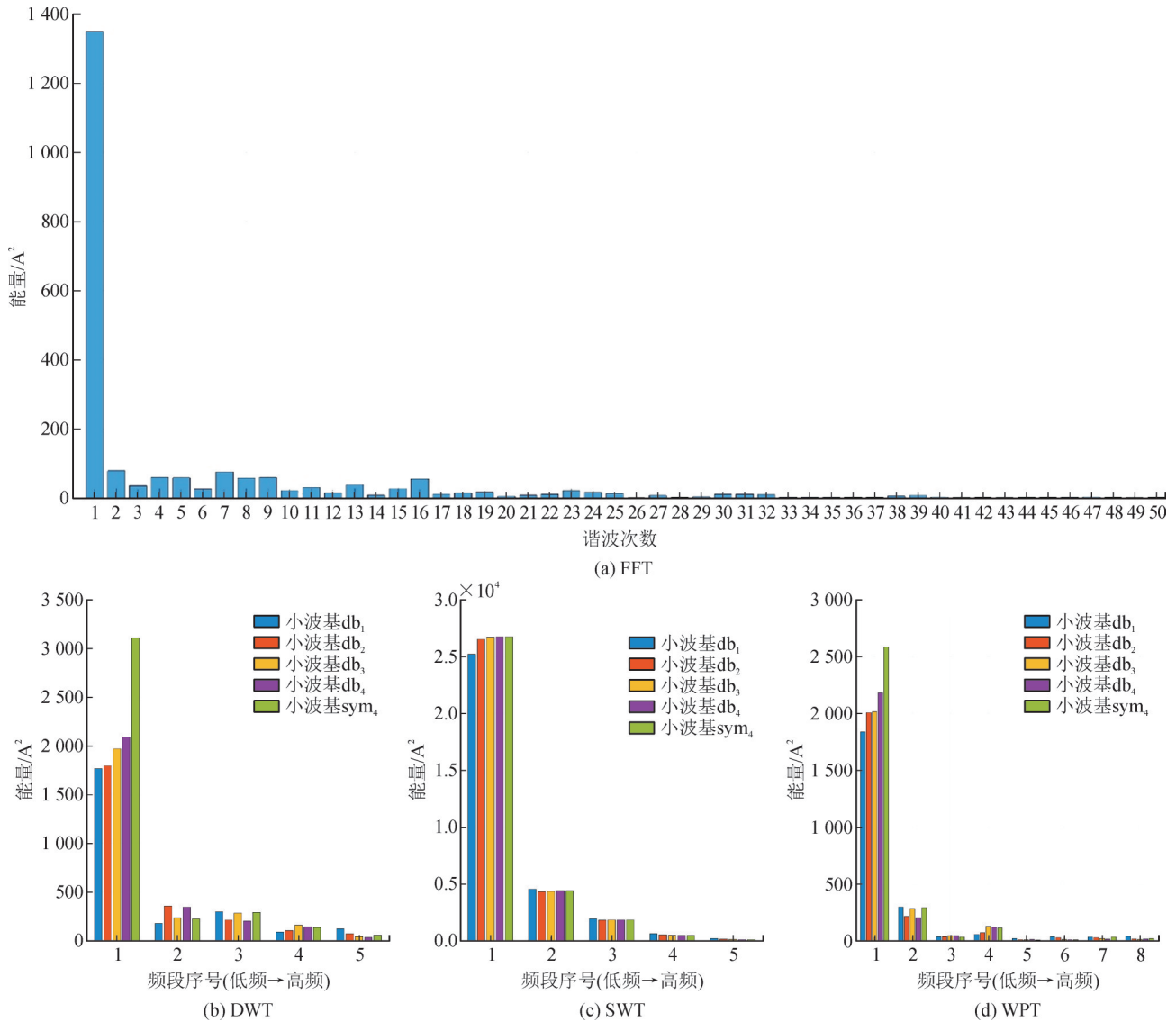


图6 鸟害故障频域分析结果

Fig. 6 Frequency-domain analysis results of bird-damage faults

本间比较。因此文中采用归一化频谱熵表征两类故障的差异化频谱特征,其公式为

$$H_{\text{norm}} = -\frac{\sum_{n=1}^N p_n \ln p_n}{\ln N} \quad (1)$$

式(1)中: H_{norm} 为归一化的频谱熵; N 为分析采用的最高次谐波次数,文中 N 取50; p_n 为 n 次谐波能量的占比,其计算公式为

$$p_n = \frac{E_n}{E_{\Sigma}} \quad (2)$$

式(2)中: E_n 为FFT计算后 n 次谐波的能量; E_{Σ} 为前 N 次谐波的能量总和。

归一化后的频谱熵取值范围在0到1之间,当频谱能量主要集中于少数谐波分量时,各 p_n 之间的差异较大,归一化频谱熵较小;当能量均匀地分布于多个谐波分量时,各 p_n 的差异减小,归一化频谱熵

增大。对于鸟害故障,其基波能量远高于其余各次谐波,频谱分布具有明显的单一主导特征。因此,其基波能量占比较大,而归一化频谱熵较小。内部故障则刚好相反,其能量分散于多个谐波分量,基波能量占比相对较低,频谱分布的离散程度较高,因此归一化频谱熵较大。

为同时表征频谱的离散程度和基波能量高低,文中构造故障识别判据为

$$K = \frac{H_{\text{norm}}}{E_1} \quad (3)$$

式(3)中: E_1 为FFT计算后50 Hz基波的能量; K 为最终的保护判据量。对于鸟害故障,其频谱能量集中于基波,表现为较小的归一化频谱熵和较大的基波能量,因此 K 值较小;对于电容器单元内部故障,其频谱能量分布较为分散,表现为较大的归一化频谱熵和较小的基波能量,因此 K 值较大。该指

标利用分子、分母的反向变化进一步扩大了两类故障之间的差异,有利于提高故障识别的分度。

据此,故障类型判据可表示为

$$\begin{cases} K < K_{op} & \text{判定为鸟害故障} \\ K \geq K_{op} & \text{判定为内部故障} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, K_{op} 为故障类型识别阈值。该阈值可依托历史故障样本整定,整定原则为保证内部故障不会被误判为鸟害故障,实现两类故障的有效辨识。

2 故障过程中电容器单元的过载情况分析

现有不平衡保护跳闸延时约 20 ms,虽能防止内部故障扩展,却无法躲过瞬时性鸟害故障^[15-17]。鸟害引发的层间短路产生更显著的不平衡电流,易触发保护定值,导致频繁误动,威胁电容器塔稳定运行^[18]。现有研究对电容器耐受鸟害过载的能力及时长缺乏深入分析。为此,本章旨在:阐明鸟害引保护误动的机理;仿真分析不同故障下单元的过载水平;结合国标与仿真结果,评估现有跳闸延时的合理性。

2.1 鸟害发展过程分析

电容器塔鸟害的发展过程可以分为起弧瞬态和持续燃弧准稳态两个阶段。

首先是电弧起弧瞬时阶段:鸟害形成的电弧会直接旁路被跨接区域的电容器单元,因此被跨接的电容器单元上不会出现过电流或过电压;同时,根据电容电压不能突变的基本电路特性,其余健全电容器单元端电压不会发生瞬时突变。因此在电弧形成的极短暂态瞬间,难以产生足以损害电容器绝缘的过电压,该瞬时过程一般不会对设备造成实质性威胁。

其次是电弧持续导通的准稳态阶段:若电弧无法自行熄弧而持续燃弧,鸟害通道等效为稳定导电支路,电容器塔内部各层电容器单元间将发生电压重新分配,引发持续性电压偏移,部分健全电容器单元将承受过电压。此时故障已经脱离纯粹瞬时闪络,演变为不平衡准稳态工况。

因此,本章主要围绕电弧持续导通的电容器塔鸟害准稳态阶段开展建模和研究。

2.2 电磁仿真建模

为研究不平衡保护通过延时躲过鸟害故障的可行性,文中基于西北某换流站 BP11 滤波器的实际参数,建立了其等效仿真模型见图 7^[19-21]。模型为三相结构,每相包含 184 个电容器单元,按 92 串 2 并方式组成 H 桥。每个单元由电容器元件以 18 并 3 串连接,额定参数为:电容 36.34 μF ,电压 6.357 kV,电

流 116.8 A。单相结构见图 8。

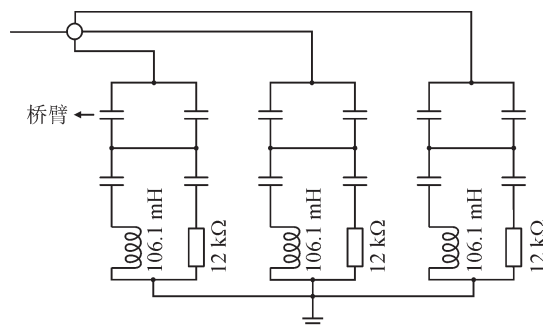


图7 滤波电容器塔模型结构图

Fig. 7 Structural diagram of filter capacitor tower model

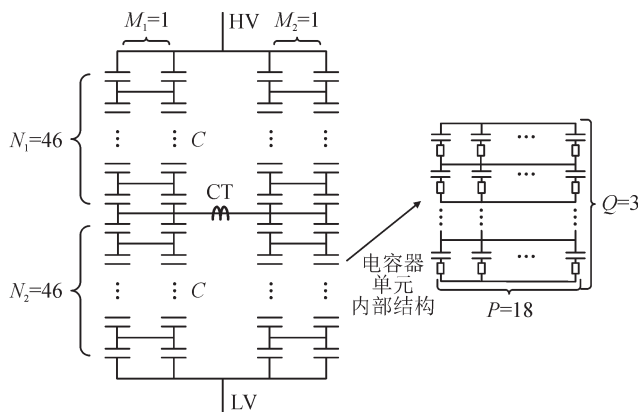


图8 BP11塔单相结构图

Fig. 8 BP11 tower single-phase structure diagram

2.3 内部故障时电容器单元的过载情况

为评估故障下电容器单元的过载特性,首先对内部故障时的过电压与过电流进行仿真。故障模拟考虑内部熔丝保护,分为两个阶段:电容元件击穿形成短路,随后熔丝熔断隔离故障元件。仿真在单元内3个串段中依次对单个元件进行短路,结果见表1。

由于故障仅发生于单个单元,相对于电容器塔整体(92串2并)结构影响轻微,非故障单元电压波动较小。故障单元电压与故障阶段密切相关:击穿短路时电压降低,熔丝熔断后因阻抗增大而电压升高。故障过程中电流变化微弱,所有单元串联运行,未出现超过额定电流的情况。

2.4 鸟害故障时电容器单元的过载情况

文中以A相为例,在仿真中于0.2 s施加鸟害故障,通过短接均压环等电位点与下层电容器单元模拟。故障分为两类:等电位点与单元在同一桥臂(同侧)及在不同桥臂(对侧)。结合早期研究及实际阻值波动,故障电阻设定为100~1 000 Ω 。根据BP11实际结构(每层同侧最多6个单元,等电位点位于第3与第4单元间),故障涉及3~9个单元。基于此设置,仿真分析了同侧与对侧故障下电容器单元的过载情况,见图9、10。

表 1 内部故障时单元的过载情况

Table 1 Overload situation of the unit during internal faults

故障程度	内部故障阶段	非故障单元电压/kV	非故障单元过电压倍数	故障单元电压/kV	故障单元过电压倍数	故障电流/A	过电流倍数
1个串段	击穿	4.928 8	0.775	3.288 5	0.517	60.112 1	0.515
	熔丝熔断	4.900 7	0.771	5.117 3	0.805	59.997 2	0.514
2个串段	击穿	4.956 0	0.780	1.652 1	0.260	60.427 3	0.517
	熔丝熔断	4.899 2	0.771	5.555 4	0.874	59.982 1	0.514
3个串段	击穿	4.983 3	0.784	0.019 1	0.003	60.613 9	0.519
	熔丝熔断	4.897 8	0.770	6.175 6	0.971	59.967 0	0.513

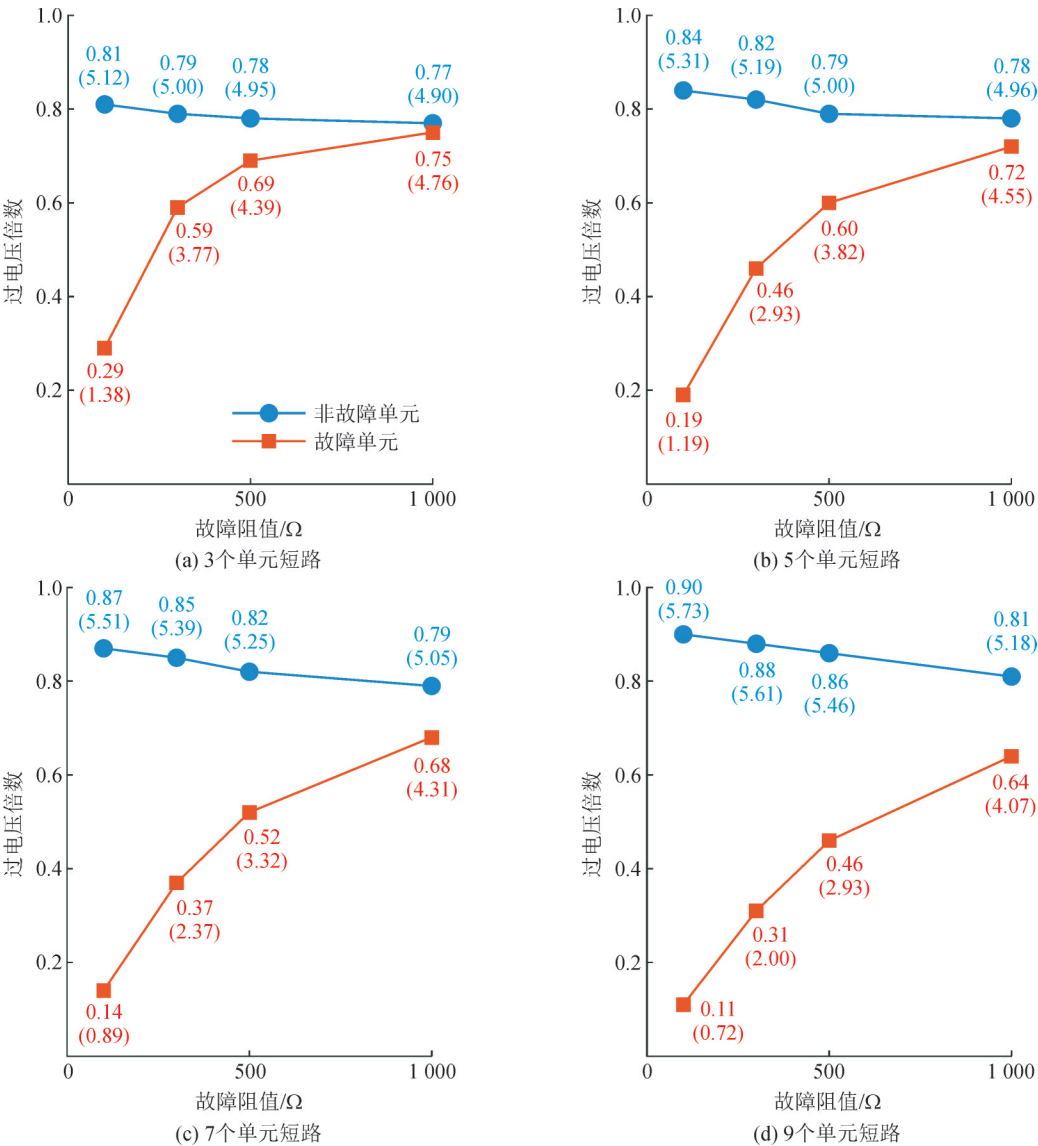


图 9 同侧鸟害故障下电容器单元过载倍数分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of overvoltage factors for capacitor units under same-side bird-damage faults

图 10 中,下标 1、2、3、4 分别对应等电位点同侧上方、同侧下方、对侧故障点上方及对侧故障点下方的电容器单元。“故障单元个数”指对侧与短路电阻相连的、从相同位置起向下计数的单元数量。

由图 9、10 可知,换流站鸟害故障下电容器单元的过电压程度受故障位置、短路单元数及故障阻

值共同影响。同侧故障时,正常单元电压随短路数增加呈线性上升;对侧故障时,等电位点上方单元过载最剧烈,峰值达 1.17 倍。此外,低阻短路会导致不平衡电流激增,使电压分布极不均匀,过载风险显著增加;随阻值增大,各单元过电压倍数趋于平缓。

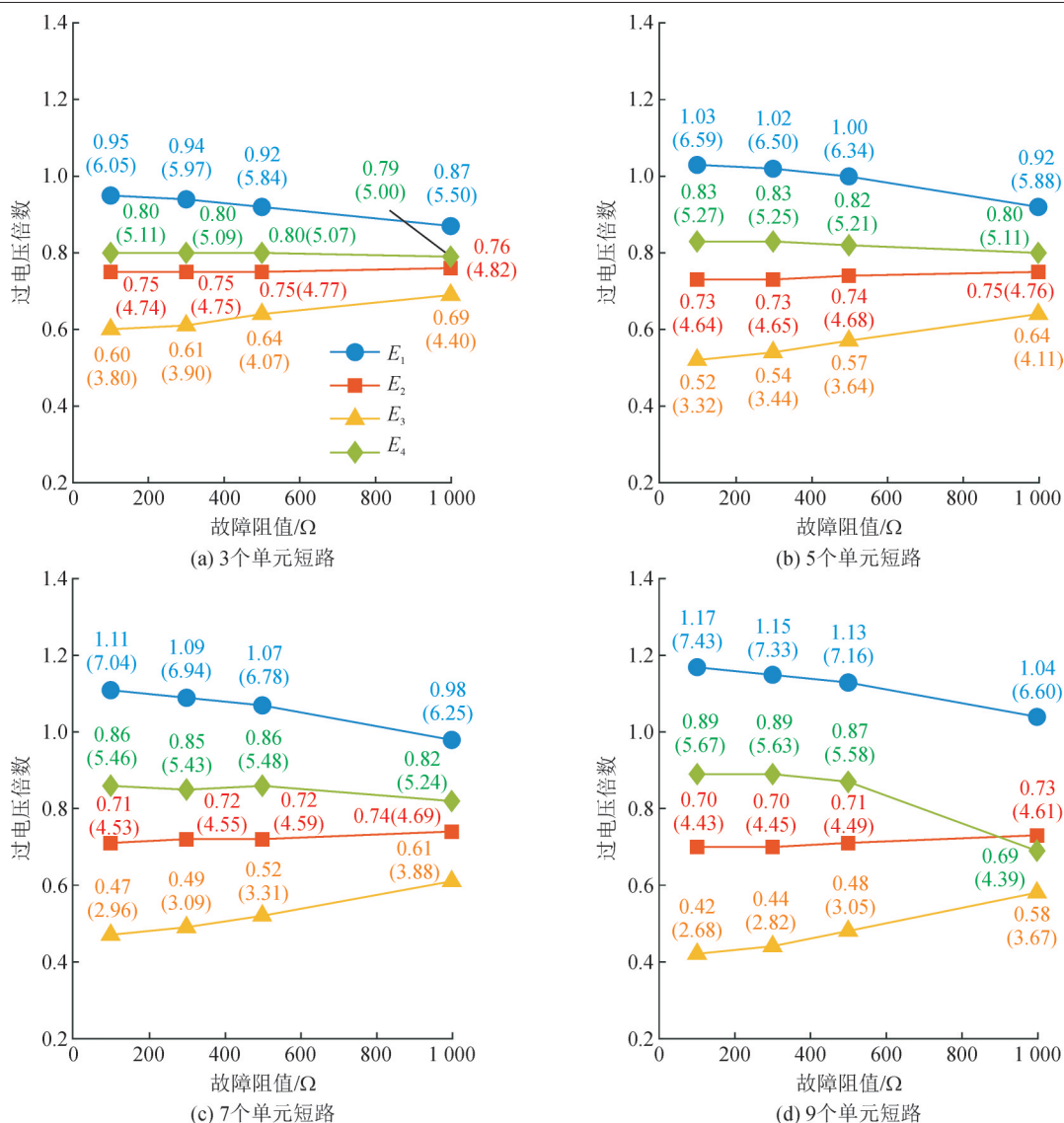


图10 对侧鸟害故障下电容器单元过载倍数分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of overvoltage factors for capacitor units under opposite-side bird-damage faults

2.5 分析讨论

仿真结果表明,两类故障的过载特性存在显著差异,与其各自的故障机理一致。内部故障在击穿短路阶段因串段内并联电容被短路,导致单元总阻抗降低,电压下降;故障串段越多,电压越低。熔丝熔断后,故障元件被隔离,串段容值减小使阻抗升高,单元电压随之回升。鸟害故障则等效于多个电容器单元经电阻短路,被短路单元较多时(尤其对侧故障)可能出现一定过载。

尽管故障中单元电压与电流有所升高,但因正常运行电压不足额定值的80%,即使在对侧鸟害最严重工况下,最大过电压倍数也仅为1.17,多数情况下并未出现明显过载。另外仿真结果显示鸟害故障过程中电流均处于额定范围之内,未出现过载现象。

3 针对鸟害的不平衡保护优化设计

3.1 故障类型判别优化

现有不平衡保护因无法识别故障类型,易导致鸟害误动。当前保护采用三级策略:前两级用于告警或长延时(120 min),第三级快速跳闸。鸟害故障通常触发第二或第三级,但因其瞬时性,未超第三级阈值时不引发跳闸。

文中提出的优化方案是通过提取第一个周波故障波形的归一化频谱熵和基波能量,可构建故障类型识别判据。将该故障类型识别方法与现有不平衡保护相结合:前两级维持原策略。当触发第三级时,先进行故障类型判别:若为鸟害,则延长跳

闸延时以躲过瞬时故障,延时结束后如故障仍未消失则加速跳闸;若为内部故障,则保持原有快速跳闸逻辑。该方法可在保证内部故障快速切除的同时,有效避免鸟害误动。

3.2 跳闸延时优化

依据GB/T 11024.1—2019标准,电容器单元在寿命周期内允许超过1.15倍额定电压的次数应少于200次;考虑谐波时,其应能在方均根电流为额定电流1.3倍的条件下持续运行^[22]。具体过载延时时长见表2。

表2 运行允许的电压水平

Table 2 Allowable voltage level for operation

形式	电压因数	最大持续时间	说明
工频	1.00	连续	电容器通电任何时间段内的最高平均值
工频	1.10	每24 h中12 h	系统电压调整和波动
工频	1.15	每24 h中30 min	系统电压调整和波动
工频	1.20	5 min	轻负荷下电压升高
工频	1.30	1 min	—

仿真结果表明,鸟害故障引发的最大过电压倍数仅为1.17,低于上述标准限值,且最大过电流倍数

为0.74,远低于1.3倍的允许值。而现有不平衡保护Ⅲ段的动作延时设置过于保守,无法有效规避瞬时性鸟害故障导致的误跳闸。

在现场鸟害故障分析报告中,电容器单元一般没有损伤,恢复供电后即可继续运行。这与文中仿真得到的结果相符。综上所述,鸟害故障并未造成电容器单元的严重过载或损伤,表明其可耐受更长的保护延时。具体的延时时间应满足躲过瞬时性鸟害和不损伤设备这两个条件。在实际防鸟害延时设置时,需要根据电容器塔的型号、电容器单元的耐受能力以及鸟害发生后的真实过载水平结合相关国家标准进行整定。

3.3 改进不平衡保护策略

为避免鸟害故障引起不平衡保护误动,在原有不平衡电流分段保护的基础上,引入故障频域识别环节,形成如图11所示的不平衡保护新策略。该策略保留原不平衡保护的基本功能,仅在保护启动后增加频域特征计算,并在不平衡电流达到Ⅲ段定值时,根据故障识别结果采用不同的动作时序。

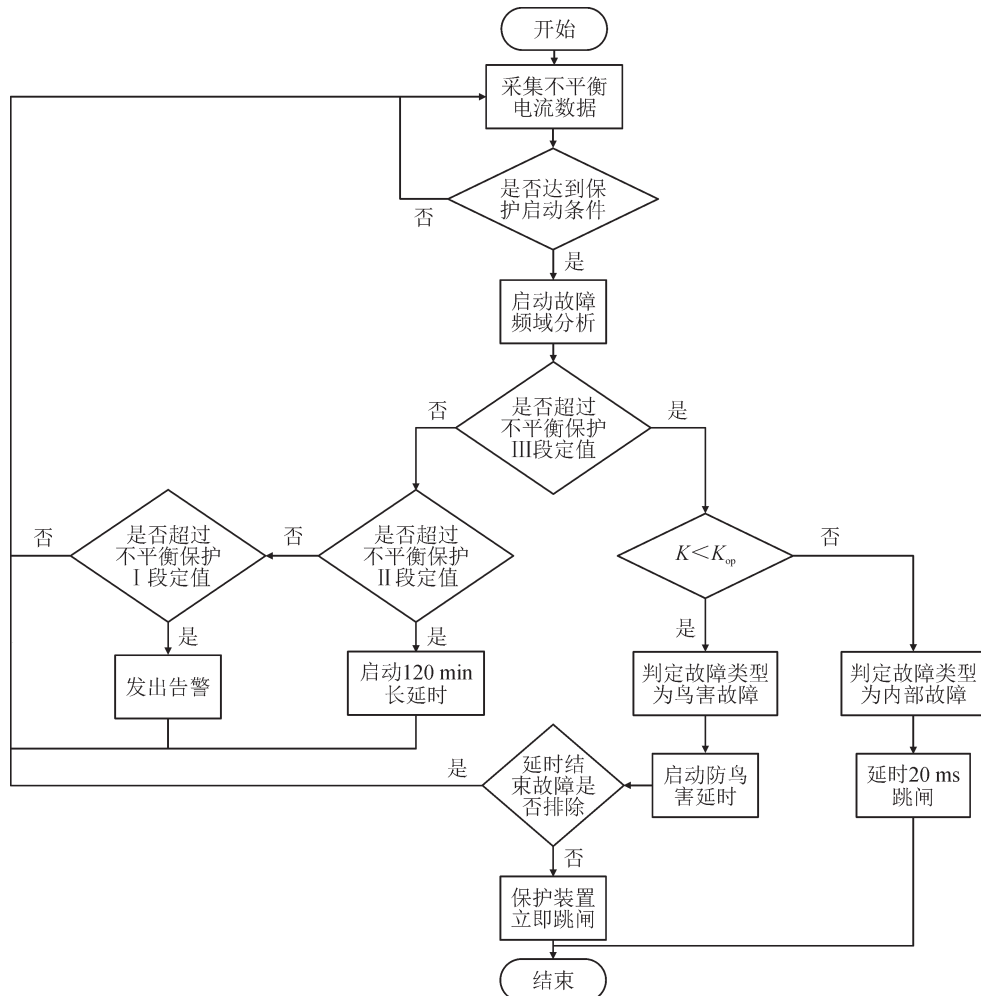


图11 新型保护策略流程图

Fig. 11 New protection strategy flowchart

保护装置持续采集电容器塔不平衡电流。当不平衡电流达到启动阈值后,立即缓存故障波形并启动频域分析,同时继续判断其是否达到各段保护定值;若未达到启动阈值,则保持正常监测。保护启动后,若不平衡电流未达到Ⅲ段定值,则按原有分段保护逻辑处理:达到Ⅰ段定值时发出告警,达到Ⅱ段定值时启动120 min延时;若不平衡电流恢复至启动阈值以下,则相关判据和计时复位,并返回正常监测状态。

当不平衡电流达到Ⅲ段定值时,根据频域判据量 K 进行故障类型识别。若 $K \geq K_{op}$ 时,则判定为内部故障,按原Ⅲ段保护逻辑延时20 ms后跳闸;若 $K < K_{op}$ 时,则判定为鸟害故障,并启动防鸟害延时。防鸟害延时期间,装置持续采集不平衡电流并更新故障识别结果。若不平衡电流降至启动阈值以下,则保护复位;若故障特征转变并满足内部故障判据,则转入内部故障处理流程,延时20 ms后跳闸;若防鸟害延时结束后故障仍未消失,则立即执行跳闸。

3.4 测试结果

为验证所提方法的有效性,基于换流站现场录波数据对10例内部故障和7例鸟害故障进行了测试。测试结果全部汇总于表3。

表3 改进不平衡保护判据测试结果

Table 3 Test results of the proposed unbalance protection strategy

故障编号	故障类型	K 计算值	判断结果
1	内部故障	0.123 922 011	内部故障
2		16.828 193 140	内部故障
3		0.334 833 463	内部故障
4		71.474 989 270	内部故障
5		0.021 030 941	内部故障
6		0.071 401 996	内部故障
7		0.058 040 985	内部故障
8		0.117 424 688	内部故障
9		22.873 362 730	内部故障
10		11.128 635 940	内部故障
11	鸟害故障	$5.212\ 870\ 000 \times 10^{-5}$	鸟害故障
12		0.001 029 614	鸟害故障
13		0.020 083 669	鸟害故障
14		0.001 214 244	鸟害故障
15		0.000 431 361	鸟害故障
16		$4.230\ 200\ 000 \times 10^{-5}$	鸟害故障
17		0.001 368 805	鸟害故障

表3测试结果表明,文中所构建的故障识别指标能够有效区分内部故障与鸟害故障。10例内部故障样本的保护判据量均高于鸟害故障样本,全部被正确判定为内部故障;7例鸟害故障样本也均被

正确识别,未出现内部故障漏判或鸟害故障误判。由此,文中方法在现有17组故障样本上的总体识别正确率达到100%。

4 结语

针对换流站滤波电容器塔鸟害故障易造成不平衡保护误动问题,文中结合故障录波、机理分析与策略验证,研究鸟害及电容器内部故障的不平衡电流特征,提出融合故障类型识别的不平衡保护优化策略。通过建立等效故障模型,得到两类故障不平衡电流的解析关系,二者在电流幅值、频谱特性上存在明显区别,鸟害故障下设备最大过电压约1.17倍,具备短时处置窗口。对比多种频域分析手段后选取FFT提取故障特征,利用归一化频谱熵与基波能量构建识别判据,10例内部故障、7例鸟害故障样本判别无误。将该频域识别环节嵌入传统三段式不平衡保护,实现两类故障差异化处理,在保证内部故障快速切除的同时避免鸟害故障引发误动,兼顾保护速动性、选择性与可靠性。该方法复用现有测量量,仅需在保护装置内增加计算判别逻辑,无需新增一二次回路,工程实用性较好。受现场录波条件限制,现有验证样本有限,后续需扩充多工况故障数据,进一步考核方法判别性能。

参考文献:

- [1] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
Zhang Shenxi, Wang Danyang, Cheng Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [2] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.
Liang Xuming, Zhang Ping, Chang Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 第2版. 北京:中国电力出版社,2011.
Zhao Wanjuan. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [4] 许然然,杜伯学,肖溢. 高压直流电容器电介质研究现状[J]. 电气工程学报,2018,13(11):1-10.
Xu Ranran, Du Boxue, Xiao Mi. Research status on solid dielectric material in HVDC capacitor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(11): 1-10.
- [5] 常东旭,刘华臣,符李鹏,等. 换流站高压交流电容器塔防鸟害措施研究与应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(6):12-16.
Chang Dongxu, Liu Huachen, Fu Lipeng, et al. Study and

- application of AC capacitor tower's anti-bird damage measures at UHVDC converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 12-16.
- [6] 崔健, 童甍. 输电线路鸟害故障机理分析与防治措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(17): 110-111.
- Cui Jian, Tong Meng. Analysis of bird damage fault mechanism of transmission line and prevention measures[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2018, 8(17): 110-111.
- [7] 李孟春. 浅析换流站交流滤波器防鸟害措施[J]. 机电信息, 2020(29): 60-61.
- Li Mengchun. Analysis of bird damage prevention measures for AC filters in converter stations[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(29): 60-61.
- [8] 欧书成, 王雨涵, 杨威. 内蒙古电网鸟害故障分析及防范措施[J]. 内蒙古电力技术, 2007, 25(5): 1-3.
- Ou Shucheng, Wang Yuhua, Yang Wei. Failure analysis and its precaution measure on bird damage to Inner Mongolia power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2007, 25(5): 1-3.
- [9] 柴斌, 雷战斐. 换流站交流滤波器场鸟害故障原因分析和解决措施[J]. 宁夏电力, 2019(6): 22-25.
- Chai Bin, Lei Zhanfei. Analysis and solutions of typical bird damage fault in AC filter field of converter station[J]. Ningxia Electric Power, 2019(6): 22-25.
- [10] 荀华, 张翔宇, 李国浩, 等. 内蒙古电网并联电容器装置缺陷统计分析[J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(2): 10-14.
- Xun Hua, Zhang Xiangyu, Li Guohao, et al. Defect analysis of parallel capacitors in Inner Mongolia power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(2): 10-14.
- [11] 王振河, 陈天, 咸日常, 等. 电力电容器常见故障分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 42-46.
- Wang Zhenhe, Chen Tian, Xian Richang, et al. Analysis of common faults and preventive measures for power capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 42-46.
- [12] IEC/TS 60479—1: 2005 Effects of current on human beings and livestock—Part 1: general aspects[S].
- [13] 周春红, 季一鸣, 朱明轩, 等. 交流滤波器高压C₁电容器组层间鸟害时电容器过电压与过电流分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 7-15.
- Zhou Chunhong, Ji Yiming, Zhu Mingxuan, et al. Overvoltage and overcurrent analysis of capacitor of high-voltage C₁ capacitor bank layer of AC filter as bird damage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 7-15.
- [14] Inouye T, Shinosaki K, Sakamoto H, et al. Quantification of EEG irregularity by use of the entropy of the power spectrum[J]. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1991, 79(3): 204-210.
- [15] 洗冀, 程汉湘. 并联电容器开口三角电压保护初始不平衡的影响研究[J]. 电气技术, 2014(10): 32-35.
- Xian Ji, Cheng Hanxiang. Research on the influence of initial unbalance of shunt capacitors open-delta voltage protection[J]. Electrical Engineering, 2014(10): 32-35.
- [16] 吴妮妮, 吕鹏飞, 王德林, 等. 交流滤波器高压电容器不平衡保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 56-59.
- Wu Yani, Lyu Pengfei, Wang Delin, et al. New principle of unbalance current protection for capacitor of AC filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 56-59.
- [17] 田庆, 原敏宏, 王志平. 交流特高压试验示范工程电容器保护配置、整定及应用原则探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 68-71.
- Tian Qing, Yuan Minhong, Wang Zhiping. Configuration, setting and application of capacitor protection in UHV pilot project[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 68-71.
- [18] 邹洪森, 樊润奇, 郝治国, 等. 计及鸟害影响的滤波电容器塔不平衡保护改进策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(12): 56-64.
- Zou Hongsen, Fan Runqi, Hao Zhiguo, et al. Improvement strategy for the filter capacitor tower unbalance protection considering the effect of bird damages[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(12): 56-64.
- [19] 张羽睿, 樊荣, 翁汉琰, 等. 换流站交流滤波器过负荷保护误动作机理及防误动策略[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 239-248.
- Zhang Yurui, Fan Rong, Weng Hanli, et al. Mal-operation mechanism and anti-mal-operation strategy of AC filter overload protection in converter station[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 239-248.
- [20] 司马文霞, 姜雄伟, 彭庆军, 等. 35 kV 并联补偿电容器组继电保护动作时过电压的分析及防护[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 1-8.
- Sima Wenxia, Jiang Xiongwei, Peng Qingjun, et al. Analysis and protection of overvoltage of 35 kV shunt compensation capacitor bank when relay protection take action[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 1-8.
- [21] Mohanty R, Pradhan A K. Time-domain protection and fault location of wye-connected shunt capacitor banks using superimposed current and differential voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3486-3495.
- [22] GB/T 11024.1—2019 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器 第1部分: 总则[S].
- GB/T 11024.1—2019 Shunt capacitors for A.C. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: general[S].
- 邹洪森(1982—), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为输变电设备运维。
- 樊润奇(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为主设备保护。
- 郝治国(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新型电力系统保护与控制(通信作者)(E-mail: zhghao@xjtu.edu.cn)。
- 刘若鹏(1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输变电设备运维。
- 杨晨(1991—), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向为输变电设备运维。
- 湛卓(2003—), 男, 硕士研究生, 研究方向为主设备保护。
- 王挺(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为直流配电网的保护与控制。