

《四川电力技术》
编辑委员会

主任委员 胡海舰
副主任委员 刘俊勇
委员 (按姓氏笔画笔形为序)
马芳平 王卓 王渝红
司马文霞 年珩 朱康
何正友 余熙 吴广宁
张安安 李旻 李富祥
李镇义 杨迎春 汪康康
肖欣 肖先勇 苏少春
邹见效 陈峰 胡朝华
唐万斌 梅生伟 黄琦
董秀成 蒋兴良 韩晓言
廖学静
秘书 李世平
程文婷

目次

· 极端自然环境下电网灾害防控 ·
大档距/高差线路非均匀覆冰下的脱冰跳跃特性研究
..... 闫向龙,郭裕钧,黄桂灶,张血琴,吴广宁(1)
特高压换流变压器套管电连接结构地震累积效应评估方法研究
..... 庄一豪,毛宝俊,谢强(7)
±800 kV 干式平波电抗器抗震性能分析 朱旺,任阿阳,薛志航,谢强(16)
电网舞动灾害应对技术体系研究综述 赵彬,刘彬,朱宽军(22)
台风对电网的影响分析及应对措施 徐湘忆,毛玮韵,高凯,任辰(31)
· 电能质量 ·
大功率电驱离心式压缩机组电压暂降问题分析与治理
..... 杨丽茹,张啟超,邹涛,马晴,徐方维,郭凯(35)
电气化铁路接入末端电网的三相不平衡影响因素分析
..... 段玉,侯冰,张媛,南东亮,董雪涛,宋朋飞,刘震,段青熙,王小云(44)
基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊 张晓斌(52)
· 高电压技术 ·
变压器套管的发展历程与挑战
..... 王永琪,吴广宁,刘凯,林牧,丁镇,汤浩(59)
雷电拦截新技术在高压输电线路的应用研究
..... 宋海东,杨晖,钟驰宇,李默林,周茹萍,黄昱,张榆,李建明(68)
· 电力检修技术 ·
基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法
..... 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均(73)
直升机带电修补雷击受损光缆技术及应用研究
..... 杨暘,卢金奎,邱中华,王爽(80)
励磁整流柜可控硅故障模拟及分析 杨玲,许其品,朱宏超,林元飞,谢燕军(85)
2022 年全年总目录 (92)
封面图片由谢畅提供

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003-6954

CN 51-1315/TM

2022 年第 45 卷第 6 期(总 282 期)(卷终)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:李富祥

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028) 69995169/5168/5165

邮箱:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得实业集团有限公司

文化传播分公司

封面设计:四川科锐得实业集团有限公司

文化传播分公司

国内定价:每册 12.00 元

[期刊基本参数] CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 13

* 2022-12

CONTENTS

· Power Grid Disaster Prevention and Control under Extreme Natural Environment ·

- Research of Ice Shedding Jump Characteristics of Transmission Lines with Lager Span and High Elevation under Non-uniform Accreted Ice
 YAN Xianglong, GUO Yujun, HUANG Guizao, ZHANG Xueqin, WU Guangning(1)
- Research on Evaluation Method of Seismic Cumulative Effect of Electrical Connection Structure of Valve-side Bushing in Converter Transformer
 ZHUANG Yihao, MAO Baojun, XIE Qiang(7)
- Seismic Performance Analysis of ± 800 kV Dry-type Smoothing Reactor ZHU Wang, REN Ayang, XUE Zhihang, XIE Qiang(16)
- A Research Review on Technical Response System to Galloping of Power Grid ZHAO Bin, LIU Bin, ZHU Kuanjun(22)
- Impact Analysis of Typhoon on Power Grid and Its Countermeasures XU Xiangyi, MAO Weiyun, GAO Kai, REN Chen(31)

· Power Quality ·

- Analysis and Mitigation of Voltage Sag on High-power Motor-driven Centrifugal Compressor Units
 YANG Liru, ZHANG Qichao, ZOU Tao, MA Qing, XU Fangwei, GUO Kai(35)
- Analysis of Influencing Factors of Three-phase Unbalance for Electrified Railway Connected to Terminal Power Grid
 DUAN Yu, HOU Bing, ZHANG Yuan, NAN Dongliang, DONG Xuetao, SONG Pengfei, LIU Zhen, DUAN Qinxi, WANG Xiaoyun(44)
- Responsibility Allocation of Multiple Negative Sequence Sources Based on Theoretical Analysis of Actual Circuits ZHANG Xiaobin(52)

· High Voltage Technology ·

- Development History and Challenges of Transformer Bushing WANG Yongqi², WU Guangning, LIU Kai, LIN Mu, DING Zhen, TANG Hao(59)
- Application Analysis of New Lightning Interception Technology in High-voltage Transmission Line
 SONG Haidong, YANG Hui, ZHONG Chiyu, LI Molin, ZHOU Ruping, HUANG Yu, ZHANG Yu, LI Jianming(68)

· Maintenance Technology ·

- Short-circuit Fault Location Method of Distribution Network Based on Fuzzy Matching
 GAO Yiwen, LONG Cheng, SU Xueneng, SHI Cheng, GAO Hongjun(73)
- Research on Helicopter Live Repairing Technology for Optical Cable Damaged by Lightning and Its Application
 YANG Yang, LU Jinkui, QIU Zhonghua, WANG Shuang(80)
- Simulation and Analysis of Thyristor Fault in Excitation Rectifier Cabinet YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, LIN Yuanfei, XIE Yanjun(85)

SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

2022 Vol.45 No.6

(Ser.No.282)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan,
 China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: LI Fuxiang

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

大档距/高差线路非均匀覆冰下的 脱冰跳跃特性研究

闫向龙, 郭裕钧, 黄桂灶, 张血琴, 吴广宁

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:冰区输电导线上的覆冰脱落会减小绝缘间隙,可能引发闪络跳闸,威胁线路安全运行。针对目前基于有限元法的非均匀覆冰下导线脱冰跳跃特性研究的不足,采用有限元方法建立3档四分裂导线计算模型,研究非均匀覆冰和均匀覆冰对导线脱冰跳跃特性的影响,分析非均匀覆冰导线在档距、高差、覆冰厚度等参数下对最大脱冰跳跃高度的影响规律,并对现有经验公式进行改进。结果表明,最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,非均匀覆冰下导线的脱冰跳跃高度可能大于均匀覆冰下的脱冰跳跃高度,且最大脱冰跳跃高度所在位置可能不在档距中点,更容易引发闪络跳闸事故。因此,所提非均匀覆冰下导线的脱冰跳跃特性对重冰区线路绝缘设计具有重要工程价值。

关键词:输电线路; 非均匀覆冰; 脱冰跳跃; 脱冰跳跃高度

中图分类号: TM 753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0001-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220601

Research of Ice Shedding Jump Characteristics of Transmission Lines with Lager Span and High Elevation under Non-uniform Accreted Ice

YAN Xianglong, GUO Yujun, HUANG Guizao, ZHANG Xueqin, WU Guangning

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Ice shedding on transmission conductors in ice areas can reduce the insulation gap, which may trigger a flashover trip and threaten the safe operation of lines. At present, the research on ice shedding jump characteristics of conductor under non-uniform accreted ice based on finite element method is insufficient, so the calculation model of continuous three-span transmission line with quad bundle conductor is established by the finite element method. The effects of non-uniform accreted ice and uniform accreted ice on ice shedding jump characteristics of the conductor are studied, and the dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice shedding under different parameters such as the span length, elevation difference and ice thickness are analyzed, and the existing empirical formula is improved. The results show that the maximum ice shedding jump height is closely related to non-uniform accreted ice, the ice shedding jump height of the conductor under non-uniform accreted ice may be larger than that under uniform accreted ice, and the position of the maximum jump height of transmission line conductors after ice shedding may not be at the mid-point of the span, more likely to cause flashover and trip accident. Therefore, the proposed ice shedding characteristics of conductor under non-uniform accreted ice have important engineering value for the insulation design of transmission line in heavy ice areas.

Key words: transmission line; non-uniform accreted ice; ice shedding; jump height

0 引言

输电线路覆冰事故一直是电力系统严重的自然灾害之一^[1-3]。远距离输电线路难免会跨越高山、峡谷/大河区。对于大高差爬山线路,由于海拔的影

响,线路档内的覆冰往往呈现覆冰厚度随海拔递增的趋势。对于跨越峡谷/大河的大档距线路,由于环境中风速、湿度和空气中液态水含量等环境因子分布不均匀,导致导线在覆冰时可能出现覆冰厚度沿档距分布不均的现象。据统计^[4-5],线路90%以上的断线和倒塔是由于微地形、微气象下引起非均匀

覆冰以及档距、高差过大等因素引起的纵向不平衡张力造成的。由于微地形、微气象因素的影响引起线路不均匀覆冰,2011年1月,国网四川省电力公司500 kV布城线4回线路全部跳闸停运。因此为保障重冰区输电线路的安全运行,亟需开展输电线路脱冰跳跃动力特性的研究。

国内外学者对覆冰导线脱冰跳跃特性已开展了广泛的研究^[6-8]。文献[9]最先将覆冰和冰脱落等效为集中载荷来模拟实现。文献[10]在国内最早利用均匀分布在导线上若干点处的集中载荷来模拟覆冰。文献[11]基于相似性理论,提出用于模拟导线脱冰跳跃的缩比模型试验方法,并与真型线路脱冰试验对比验证了方法的正确性,为输电线路的脱冰跳跃研究提供了新思路。文献[12]研究发现不均匀脱冰对绝缘子串张力影响显著,其瞬态值达导线初始张力2倍多。文献[13]建立了三自由度多档导线运动模型,结果表明随机非均匀脱冰跳跃幅值最大点并不一定在脱冰档中点。文献[14]利用有限元方法对均匀覆冰线路脱冰后的动力响应进行了参数研究,并提出了计算最大脱冰跳跃高度的简单公式。以上研究均只考虑均匀覆冰,即均假设冰载荷在一档内均匀分布,现有设计规范^[15]也只考虑均匀覆冰。下面采用有限元法建立线路脱冰跳跃模型,针对大档距和大高差线路两种典型的非均匀覆冰形式,研究档距、高差、覆冰厚度等因素对脱冰跳跃特性的影响。基于非均匀覆冰导线脱冰计算分析结果,对现有脱冰跳跃经验公式进行改进。

1 分裂导线有限元模型

1.1 有限元模型

采用3跨连续档四分裂导线作为研究对象,导线型号为LGJ-400/35,其参数如表1所示。由于输电线路杆塔的变形对导线脱冰跳跃的影响很小^[16],所建立的有限元模型忽略输电杆塔刚度的影响,有限元模型包含导线、绝缘子串、间隔棒和线夹等典型部件,如图1所示。其中:导线采用只能承受拉伸不能承受压缩的索单元模拟,在Abaqus软件中可以通过设置空间杆单元的材料性质来模拟索,导线单元长取0.5 m可以满足单元收敛性要求^[17];间隔棒和

线夹简化为框架,其密度根据实际间隔棒重量来计算确定,采用梁单元进行模拟;悬垂绝缘子串简化为直杆,与杆塔连接处释放转动自由度,仅约束3个平动自由度,以模拟脱冰跳跃过程中能量在不同档间的相互传递。

表1 LGJ-400/35 导线物理参数

导线有效截面积 S/mm^2	导线直径 D/mm	弹性模量 E/GPa
425.24	26.82	65
线密度 $\rho_{\text{str}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	初始张力 F_0/kN	泊松比 μ
1.349	26.673	0.3

阻尼是动力学特性的一个重要参数,但输电导线阻尼的精准确定十分困难。针对脱冰跳跃问题,已有研究表明阻尼会影响导线脱冰跳跃动力特性,但其对导线脱冰后第一个峰值(脱冰跳跃高度)影响很小^[14]。参照文献[18],采用瑞利阻尼模型,阻尼比取值2%。

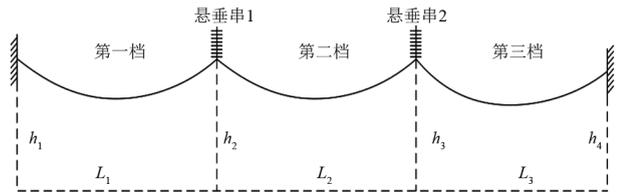


图1 计算模型

1.2 覆冰载荷的模拟

当导线上承受覆冰载荷作用时,导线上的载荷包括自重载荷和覆冰载荷。为了简化覆冰过程,提高计算效率,采用改变导线的重力加速度来模拟覆冰过程^[11]。导线覆冰后的等效密度可以通过式(1)计算。

$$\rho' = \frac{w_1 + w_2}{Ag} = \rho_1 + \rho_2 \quad (1)$$

式中: ρ_1 为导线单位长度密度, kg/m^3 ; w_1 为导线单位长度重量, N/m ; ρ_2 为导线单位长度覆冰密度, kg/m^3 ; w_2 为导线单位长度覆冰重量, N/m ; A 为导线截面积, m^2 ; g 为重力加速度。

为了模拟导线非均匀覆冰,将导线均匀分割成200小段,通过设置每段的覆冰载荷模拟非均匀覆冰形式。均匀覆冰如图2(a)所示,即档内覆冰厚度相同。针对线路大档距和连续爬坡线路区段设置了两种典型的非均匀覆冰方式,如图2(b)和图2(c)所示,其中小黑原点越大表示覆冰越厚。设非均匀覆冰档导线的长度为 L ,直径为 D ,则导线在非均匀覆冰时每段的覆冰质量 m_i 和总质量 M 可表示为:

$$m_i = \rho_{ice} \pi b_{ni} (b_{ni} + D) l_i \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3)$$

式中: m_i 为第*i*段导线的覆冰质量,kg; b_{ni} 为第*i*段导线的覆冰厚度,mm; l_i 为第*i*段导线的长度,m; ρ_{ice} 为覆冰密度,kg/m³; D 为导线直径,m; M 为导线覆冰总质量,kg; N 为导线分段数。

为了对比均匀覆冰和非均匀覆冰下脱冰动力特性的差异,采用控制单一变量的方法。无论是均匀覆冰还是非均匀覆冰,假设控制档内的覆冰总重量相同。先计算非均匀覆冰形式下档内的覆冰总重量,然后可通过式(4)计算均匀覆冰形式的覆冰厚度 b_u 。

$$b_u = \frac{\sqrt{D^2 + \frac{4M}{\rho_{ice} \pi L}} - D}{2} \quad (4)$$

式中: b_u 为均匀覆冰时的覆冰厚度,mm; L 为导线长度,m。

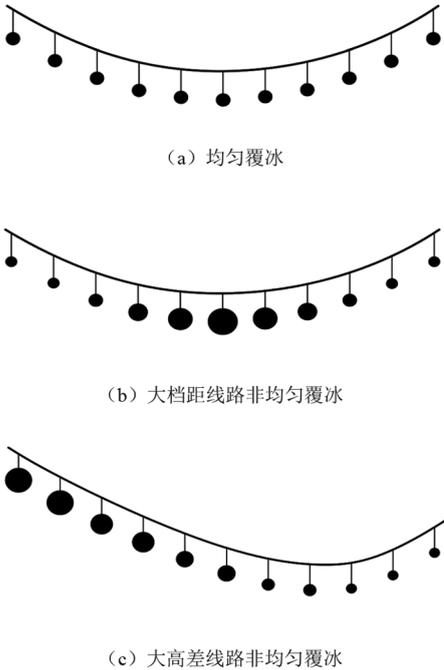


图2 导线覆冰

1.3 脱冰载荷的模拟

导线的密度保持不变,通过改变惯性加速度来实现脱冰过程的有限元模拟。此时脱冰档导线的惯性加速度可表示为

$$g_e = \frac{w_1 + w_2}{w_1 + w_2(1 - \mu)} g \quad (5)$$

式中: g_e 为脱冰档导线脱冰前的等效惯性加速度;

μ 为导线的脱冰率。当导线脱冰时,更改惯性加速度 g_e 即可实现导线部分覆冰的脱落。

1.4 数值模拟验证

为了验证所提数值模型的正确性,利用真型五档线路^[19]的结果进行验证,真型线路的档距为283 m、387 m、247 m、213 m和309 m,其高差分别为5 m、16 m、28 m、16 m和8 m。导线直径为19.6 mm,单位长度质量为0.85 kg/m,截面积为227.6 mm²,杨氏模量为91 800 MPa。分别开展真型线路在1.49 kg/m、2.98 kg/m、4.47 kg/m、5.96 kg/m不同覆冰载荷下的脱冰试验,并得到其最大脱冰跳跃高度。此外文献[20]也用有限元方法模拟了相应的脱冰过程,并得到其最大脱冰跳跃高度。将数值模拟结果与真型线路试验结果以及文献[20]的数据进行对比,结果如图3所示。可以看出,最大脱冰跳跃高度随着脱冰冰量的增加而增加,数值模拟结果与真型试验结果最大误差为7%。这可能是因为有限元模型中导线的阻尼比与实际导线的阻尼比存在一定的差异导致的。

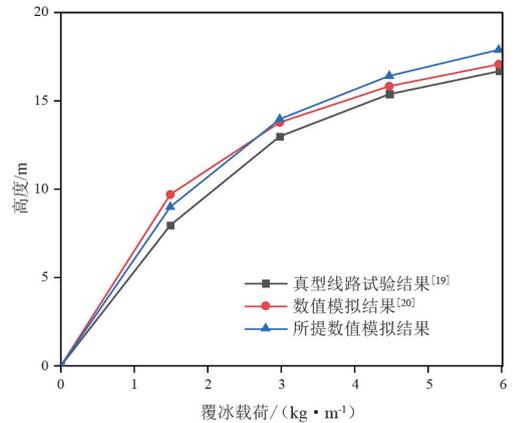


图3 真型试验线路和数值模型得到的最大脱冰跳跃高度

2 非均匀覆冰导线的脱冰跳跃计算

2.1 导线脱冰跳跃高度的精确定义

现有研究^[12-14]只考虑导线均匀覆冰,脱冰跳跃后档距中点反弹的脱冰跳跃高度最大,定义其为最大脱冰跳跃高度。当考虑非均匀覆冰时,覆冰厚度在档内存在差异,此时,导线脱冰跳跃最大高度不一定在档距中点。此外,由于导线和地线的弧垂存在差异,当研究脱冰跳跃导致的导线与地线的绝缘间隙裕度问题时,导线的最大脱冰跳跃高度及其在档

内所处的位置同等重要。

对此,分别提取脱冰档导线沿档各点的最大脱冰跳跃高度,构成脱冰跳跃高度曲线,如图 4 所示。该图可以直观反映脱冰档不同位置的最大脱冰跳跃高度的变化情况。其中,导线脱冰跳跃高度最大值所在档内的位置定义为 P_{\max} ,其表示为脱冰跳跃高度最大值的位置(到端部的距离)与档距的比值。

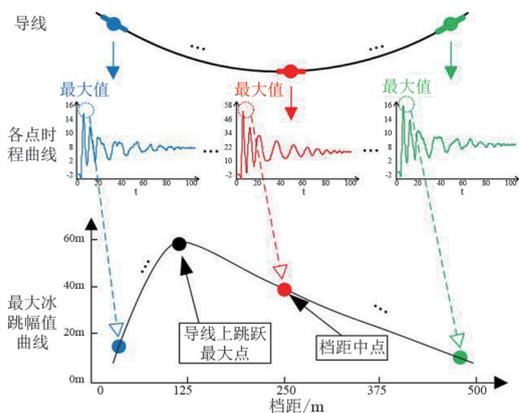


图 4 脱冰跳跃高度的定义示意

2.2 导线脱冰跳跃高度

基于上述有限元模型及覆冰和脱冰模拟方法,对输电线路脱冰跳跃高度进行分析。对于大高差、大档距线路,根据应力弧垂表确定导线初始张力。研究对象为 3 档四分裂导线,脱冰档位于第二档,如图 1 所示。这里主要针对导线非均匀覆冰与均匀覆冰下,数值模拟得到导线最大脱冰跳跃高度与各种参数之间的关系,参数有档距、高差、覆冰厚度、导线的初始张力等。

1) 档距的影响

采用单因素控制变量法,研究脱冰档的档距分别为 400 m、600 m、800 m、1000 m 时导线最大脱冰跳跃高度的变化规律。第一档和第二档的档距均为 100 m,无高差,脱冰率为 100%,则不同档距下的最大脱冰跳跃高度如图 5 所示。其中,不同档距下导线初始张力分别为 30.42 kN、29.89 kN、29.70 kN、29.62 kN。

由图 5(a)可见,随着档距的增加,最大脱冰跳跃高度呈现逐渐减小的趋势。最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,随着档距的增加,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响越强烈。由图 5(b)可见,最大脱冰跳跃高度随着档距的增加先增大后减小,在档距为 600 m 时最大脱冰跳跃高度达到最大值,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响相对较

小,但对发生最大脱冰跳跃高度的位置影响较大;随着档距的增大,发生最大脱冰跳跃高度的位置逐渐向档距端部靠近,档距为 1000 m 时,发生最大脱冰跳跃高度位置 P_{\max} 为 0.26。

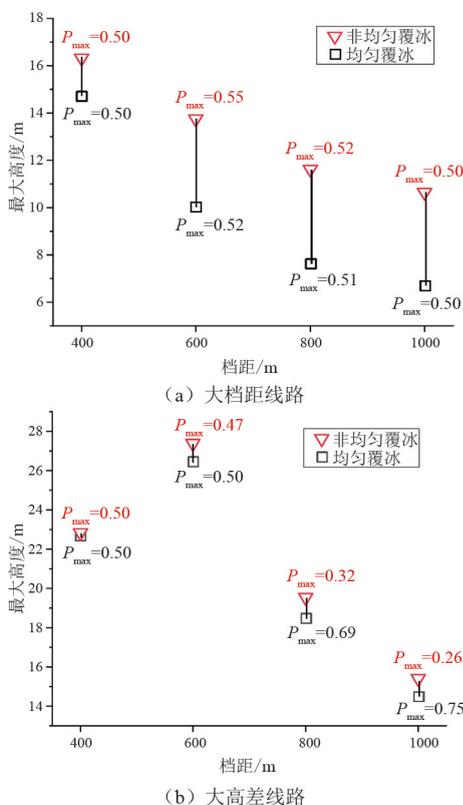


图 5 档距对最大脱冰跳跃高度的影响

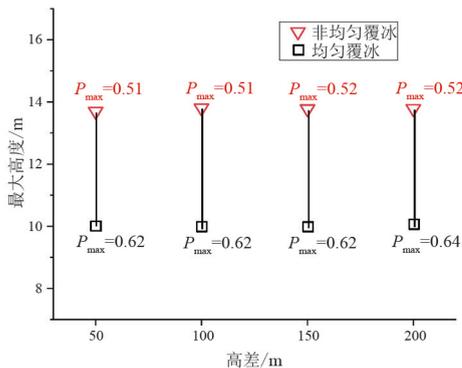
2) 高差的影响

基于 3 档四分裂线路模型(档距为 100 m—600 m—100 m),采用单因素控制变量法,研究脱冰档高差分别为 50 m、100 m、150 m、200 m 下导线的最大脱冰跳跃高度的变化规律。不同高差下导线最大脱冰跳跃高度如图 6 所示,其中导线的初始水平张力为 29.89 kN。

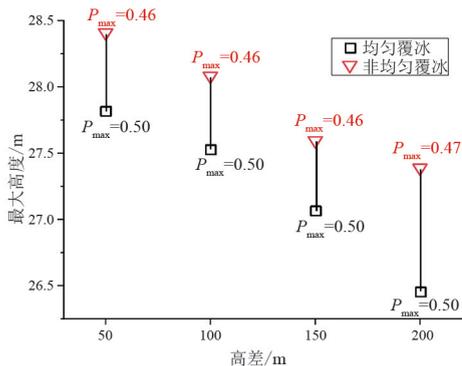
由图 6(a)可得,对于大档距线路,高差对最大脱冰跳跃高度的影响相对较小,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度与均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度相差基本保持在 38%左右。由图 6(b)可得,最大脱冰跳跃高度随着高差的增大而减小,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响较大。

3) 覆冰厚度的影响

为了进一步研究覆冰厚度对最大脱冰跳跃高度的影响,根据 3 档四分裂线路模型(档距为 100 m—600 m—100 m),大档距线路无高差,大高差线路的高差为 200 m,采用单因素控制变量法,分析覆冰厚

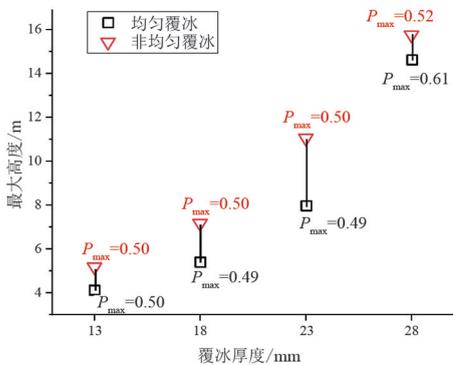


(a) 大档距线路

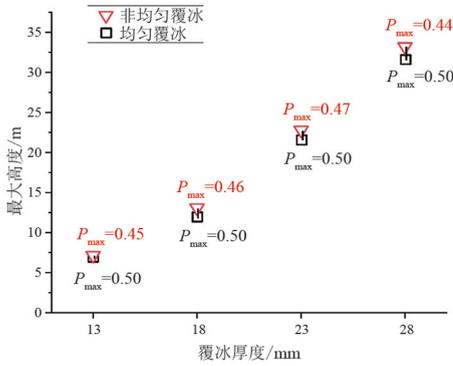


(b) 大高差线路

图 6 高差对最大脱冰跳跃高度的影响



(a) 大档距线路



(b) 大高差线路

图 7 覆冰厚度对最大脱冰跳跃高度的影响

度为 13 mm、18 mm、23 mm、28 mm 时导线的最大脱冰跳跃高度变化情况。不同覆冰厚度下导线最大脱冰跳跃高度如图 7 所示,其中不同冰区下导线的初始

张力分别为 56.72 kN、42.70 kN、32.74 kN、26.84 kN。

由图 7 可得,随着覆冰厚度的增加,最大脱冰跳跃高度也在逐渐增大,且非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度始终大于均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度。对于非均匀覆冰下的大高差线路,最大脱冰跳跃高度发生的位置并不在档距中点。综上,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度更容易引发闪络事故,因此实际工程中进行线路校验时,应考虑导线非均匀覆冰的状况。

3 经验公式改进

进行有效预测导线脱冰跳跃高度可对线路设计提供可靠的依据。研究者们根据实验和数值模拟结果进行了总结并得出了计算脱冰跳跃高度的经验公式。下面以非均匀覆冰的模拟结果作为依据,对常见的经验公式进行误差分析并加以改进。

3.1 经验公式误差分析

目前常用的经验公式为中国输电线路设计规程^[15]利用前苏联的计算公式。

$$H = (2 - l/1000) \Delta f \quad (6)$$

式中: H 为导线最大脱冰跳跃高度, m; l 为档距, m; Δf 为导线脱冰前后静止状态的弧垂之差, m。

文献[14]对式(6)进行了简化,为

$$H = 1.82 \Delta f \quad (7)$$

以上各经验公式均能预测导线脱冰跳跃高度,但没有考虑非均匀覆冰对脱冰跳跃高度的影响,因此提出以非均匀覆冰导线脱冰跳跃的有限元结果作为依据,对以上经验公式进行误差分析,其分析结果如图 8 所示。

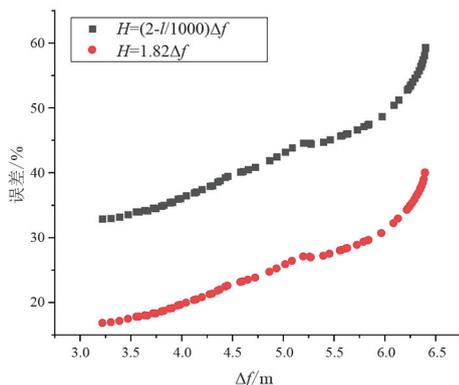


图 8 式(6)、式(7)与仿真结果相对误差

由图 8 可得,中国输电线路设计规程所用公式

的误差可达 55% 以上。文献[14]提出的经验公式误差在 35% 以下,比中国输电线路设计规程所用的公式略有提高。

3.2 经验公式改进

由于上述公式都没有考虑非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响,为进一步提高经验公式的泛化能力,引入非均匀覆冰影响系数对其进行适当改进。

由第 2.2 节分析可得,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度比均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度更大。因此,可以通过在式(6)中引入非均匀覆冰影响系数 μ 来提高其准确性,如式(8)所示。然后,基于非均匀覆冰下的脱冰跳跃结果采用最小二乘法进行拟合,得到改进后的公式如式(9)所示。

$$H = \mu(2 - l/1000)\Delta f \quad (8)$$

$$H = 1.6(2 - l/1000)\Delta f \quad (9)$$

针对档距 600 m,覆冰厚度最大值分别为 13 mm、18 mm、23 mm、28 mm 的最大脱冰跳跃高度计算结果进行改进后的公式误差分析,如图 9 所示,可见最大相对误差在 9% 以内。非均匀覆冰更加严重时,式(9)具有更精确的预测效果。因此,大档距、大高差输电线路发生非均匀覆冰时,所提改进公式具有较好的预测能力,为输电线路设计提供参考。

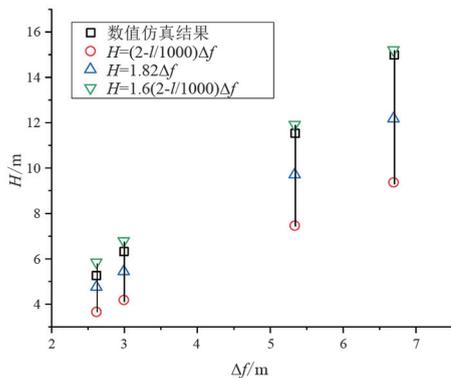


图 9 公式得到的脱冰跳跃高度

4 结论

上面采用有限元方法探讨了非均匀覆冰导线的脱冰跳跃特性,分析了档距、高差、覆冰厚度等参数对最大脱冰跳跃高度的影响规律,基于数值模拟结果,考虑非均匀覆冰影响系数,对经验公式进行改进。其结论如下:

1) 对比均匀覆冰,非均匀覆冰下发生脱冰跳跃后导线的最大脱冰跳跃高度更大。且最大脱冰跳跃

高度所在位置可能不在档距中点,更容易引发闪络事故。工程设计应考虑非均匀覆冰对脱冰跳跃的影响。

2) 大档距线路发生非均匀覆冰时,最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,随着档距的增加,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响越强烈。大高差线路发生非均匀覆冰时,随着档距的增大,发生最大脱冰跳跃高度的位置逐渐向档距端部移动。

3) 通过在脱冰跳跃高度经验公式中引入非均匀覆冰影响系数对公式进行改进,提高了经验公式的预测准确性,且其使用范围也更加广泛。

参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉.输电线路覆冰及防护[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 王少华,蒋兴良,孙才新.输电线路导线舞动的国内外研究现状[J].高电压技术,2005,31(10):14-17.
- [3] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J].高电压技术,2004,30(1):6-9.
- [4] 钱之银,耿翠英,李颖.超高压输电线路覆冰倒塔机理分析[J].高电压技术,2008,34(11):2495-2497.
- [5] 蒋兴良,马俊,王少华,等.输电线路冰害事故及原因分析[J].中国电力,2005,38(11):27-30.
- [6] MCCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003, 81(8): 825-834.
- [7] 楼文娟,张跃龙,徐海巍.考虑冰风耦合作用的输电导线脱冰动张力及参数影响分析[J].高电压技术,2022, 48(3): 1052-1059.
- [8] HUANG Guizao, YAN Bo, GUO Yujun, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of isolated-span transmission lines after ice-shedding [J]. High Voltage, 2022: 1-14.
- [9] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead line conductors after the sudden release of ice loads [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 2010, 111(10): 1736-1746.
- [10] 陈勇,胡伟,王黎明,等.覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J].中国电机工程学报,2009,29(28):115-121.
- [11] HUANG Guizao, YAN Bo, WEN Nan, et al. Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced-scale modeling test [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019: 165.

特高压换流变压器套管电连接结构 地震累积效应评估方法研究

庄一豪,毛宝俊,谢强

(同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:地震作用下换流变压器套管会产生位移响应,响应剧烈时其尾端电连接结构可能产生损伤。为了研究地震作用下换流变压器阀侧套管电连接结构的损伤累积效应,文中以换流变压器套管表带触指型电连接结构作为研究对象,建立了精细化的有限元模型。通过有限元计算,可以得到重力和地震作用下表带页片和连接母头内壁的接触压强和位移响应。基于 Archard 磨损模型,提出了一种在地震作用下表带触指磨损深度的计算方法。以磨损深度作为地震损伤累积的指标,对不同地震强度下表带触指页片磨损的程度进行了对比分析,计算了多次地震作用下的累积磨损深度。发现随着地震强度提高,表带触指的接触压强变化不大,但摩擦行程有较程度的增大,使得磨损深度也会进一步加深。在不同强度的地震作用下,磨损的分布呈现不均匀但规律的特点,磨损深度的最大值总是出现在最远离连接公头根部的表带的上方页片。重力作用对电连接结构不同部件的磨损差异影响很大。尽管单次地震作用下磨损深度总体较小,仍旧存在局部磨损破坏的可能,应当重视地震作用下的损伤累积效应。

关键词:表带触指;套管电连接结构;有限元;磨损;地震响应

中图分类号:TM 41 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0007-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220602

Research on Evaluation Method of Seismic Cumulative Effect of Electrical Connection Structure of Valve-side Bushing in Converter Transformer

ZHUANG Yihao, MAO Baojun, XIE Qiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The electrical connection structure of converter transformer bushing produces strong stress-displacement response under seismic action, which leads to damage inside it. In order to investigate the cumulative damage of electrical connection structure of valve-side bushing in converter transformer under different seismic effects, the corresponding finite element model is established by taking the electrical connection structure with strap contact of converter transformer bushing as the research object. The contact pressure and displacement response of inner wall of strap page and strap female head under gravity and seismic action are obtained by finite element calculation. Based on Archard wear model, a calculation method is introduced for the wear depth of strap contact under seismic action. Taking the wear depth as an index of cumulative seismic damage, the degrees of wear of different components under different earthquake intensities are compared and analyzed, and finally the cumulative wear depth under several seismic actions is calculated. It is found that as the earthquake intensity increases, the contact pressure of strap contact does not change much, but there is a great increase in friction stroke, which makes the friction depth deepen further. Under the seismic action of different intensities, the distribution of wear shows uneven but regular characteristics, and the maximum value of wear depth always appears in the upper page of strap furthest from the root of male head. Therefore, it is concluded that gravity has a great influence on the wear difference of different parts of electrical connection structure. At the same time, although the overall wear depth under a seismic action does not seem to be large, there is still the possibility of local wear damage under multiple earthquakes, so it should pay attention to the cumulative damage under seismic action.

Key words: strap contact; electrical connection structure; finite element; wear; seismic response

0 引言

中国是地震多发国家。地震灾难发生时,生命线系统是人民群众的安全以及抢险救灾过程顺利及时的重要保证。众多地震事故表明,作为生命线系统的重要组成部分,电力系统在地震中的损坏将波及整个基础设施系统^[1]。当前中国大量采用直流输电方案。作为直流输电的关键设备,大型变压器系统由于其大质量、高重心、低材料强度的特点,尤其容易受到破坏^[2-3]。因此,需要保证换流变压器在不利工况下依旧保持稳定运行。

变压器套管是换流变压器上最有可能发生故障的一次部件^[4]。套管内部的电连接结构更是变压器载流的重要构件,位置如图 1 所示。近两年,国内发生了多起套管电连接结构故障导致的特高压换流变压器事故^[5-8],一旦套管电连接结构出现故障,可能影响整个套管结构的安全运行。



图 1 变压器套管电连接结构

电连接结构种类繁多,样式丰富,包括拉杆型、螺栓型、螺纹型、表带触指型以及弹簧触指型等类型。众多研究表明,表带触指型电连接结构有着优越的电连接性能,能更好地满足工程的需要^[7,9-10]。然而,表带触指型电连接结构载流性能易因结构内部的损伤而劣化^[10-12]。

地震发生时,变压器将受到剧烈的震动,电连接结构的内部容易因此而产生磨损,为表带触指结构的继续运行埋下隐患,在后续运行中使整个表带触指电连接结构性能劣化,影响整个套管结构的正常运行。目前,国内对套管的抗震性能研究主要聚焦于地震作用下的结构破坏^[13-16],而对地震下的损伤累积效应缺乏关注。因此,有必要深入研究套管电连接结构在不同工况作用下的累积磨损效应。

下面将以表带触指型电连接结构的套管有限元

模型作为实验对象,研究其内部电连接结构在重力作用后和地震作用下的响应。并根据 Archard 提出的磨损模型,计算电连接结构内部在经历连续多次地震后的损伤情况,以此探究地震条件下套管电连接结构的损伤累积效应。

1 换流变压器套管电连接结构有限元模型

1.1 建模

根据厂家提供的设备图纸和详细规格参数,利用 Abaqus 软件进行阀侧套管及其尾部电连接结构的建模,如图 2 所示。

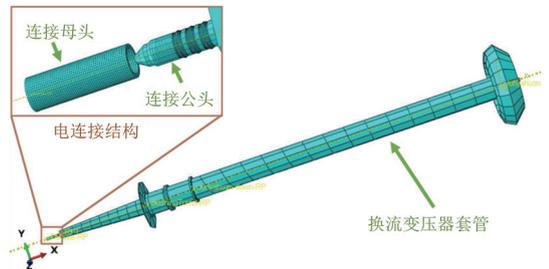


图 2 带有表带触指型电连接结构的阀侧套管有限元模型

根据 HSP 公司生产的 GSETF 型阀侧套管参数进行建模,总长 16.10 m。该套管与竖直方向呈 53° 夹角。均压环部分为 S4R 壳单元,套管其余部分为 C3D8R 实体单元。套管电容芯体刚度较大,与法兰固接,按照电气行业相关规定,设定其弹性模量为 24 GPa ^[17]。

电连接结构位于阀侧套管尾端,由连接母头、连接公头以及公头上的表带触指组成,其有限元模型如图 3 所示。每圈表带触指由 47 片表带组成。表带触指和连接母头的相互作用类型为面-面接触,其中接触压力与穿透的关系以线性公式定义,接触刚度为 8.0×10^8 。摩擦关系设置为罚函数,摩擦系数取 0.1 ^[18]。有限元模型阻尼取 2% ^[19-20]。具体参数如表 1 所示。

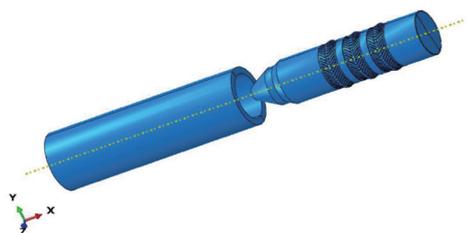


图 3 表带触指型电连接结构模型有限元模型

表 1 电连接结构各部件材料属性和尺寸

部件	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	尺寸/mm	其他数据
表带 触指	铜基 镀银	8900	119.0	12×25 (每片表带)	触指页片 顶端呈 15°夹角
连接 母头	紫铜	8900	119.0	90	壁厚 15.5 mm
连接 公头	紫铜	8900	119.0	64	—

1.2 表带命名及页片编号

该型号电连接结构每圈表带由 47 片触指页片组成,三圈表带共有 141 片触指页片。对于表带,按照离套管尾部的距离由近及远分别命名为 A、B、C,如图 4 所示。对于单圈表带上的触指,以从连接母头向连接公头的视角方向进行编号,以最上端页片为 1 号页片开始顺时针方向进行命名,并定义 12 点、3 点、6 点、9 点 4 个代表性方位,如图 5 所示。

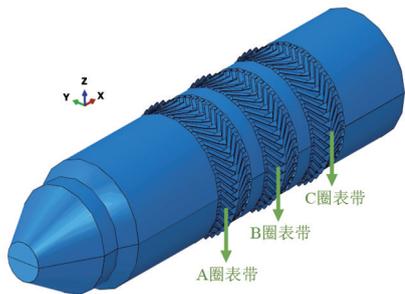


图 4 A 圈表带、B 圈表带和 C 圈表带的位置

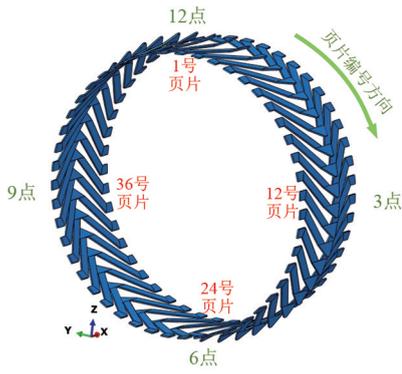


图 5 表带页片编号规律

1.3 模态分析

采用 Lanczos 方法对该套管的动力特征进行分析,得到其前 10 阶振型,如表 2 所示。由于模型关于 X 轴旋转对称,因此 Z、Y 轴的响应一致,奇数和偶数阶的频率彼此相似。

所选取变电站地区为 II 类场地类别、第 III 组设计地震分组,场地特征周期取 0.5 s。GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[19] 规定的地震反应谱

中,平台段的覆盖频率为 2~10 Hz。对于所研究的阀侧套管,其 1 到 8 阶振型的频率与场地卓越周期接近,易发生共振效应,破坏风险大。

表 2 套管-电连接结构前 10 阶主要振型与频率

阶数	频率/Hz	振型
1	1.933	电容芯体 Y 向一阶弯曲、套管 Y 向一阶弯曲
2	1.944	电容芯体 Z 向一阶弯曲、套管 Z 向一阶弯曲
3	2.257	电容芯体 Z 向一阶弯曲、套管 Z 向一阶弯曲、导电杆 Z 向一阶弯曲
4	2.261	电容芯体 Y 向一阶弯曲、套管 Y 向一阶弯曲、导电杆 Y 向一阶弯曲
5	4.785	导电杆 Z 向二阶弯曲
6	4.797	导电杆 Y 向二阶弯曲
7	11.709	电容芯体 Y 向二阶弯曲、套管 Y 向二阶弯曲、导电杆 Y 向三阶弯曲
8	11.748	电容芯体 Z 向二阶弯曲、套管 Z 向二阶弯曲、导电杆 Z 向三阶弯曲
9	13.020	电容芯体 Y 向二阶弯曲、导电杆 Y 向高阶弯曲
10	13.023	电容芯体 Z 向二阶弯曲、导电杆 Z 向高阶弯曲

2 电连接结构正常工作状况下受力情况

电连接结构装配之后,连接公头上的触指与连接母头内壁接触,并产生压强。重力会改变该压强大小。在有限元计算中,重力沿 Z-X 平面施加。

正常工作状况下套管仅受到重力。对比重力荷载施加前后的接触压强,结果如图 6 所示。可以发现,在重力作用下,12 点方位页片的接触压强明显上升,6 点方位页片的接触压强明显下降。

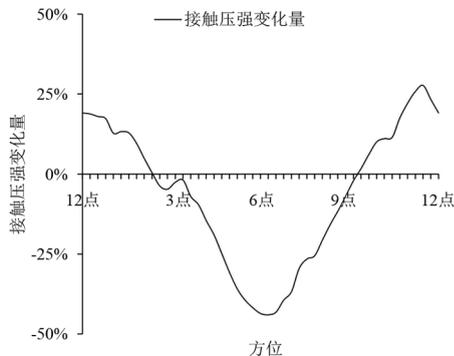


图 6 表带在重力影响下的接触压强变化 (以 A 圈表带为例)

该现象可以从结构特点解释,套管由升高座顶板固定。在重力作用下,套管呈现杠杆效应,连接公头出现上翘的趋势。这使得表带 12 点方位压力增大,6 点方位的压力降低。

图 7 展示了不同表带页片的接触压强。C 圈表

带的 46 号页片出现了数据的突变,应是计算错误导致,对分析影响不大,因此忽略该数据。三圈表带的接触压强在 3 点和 9 点两个水平方位类似,而在 6 点和 12 点两个垂直方位却出现差异。结合前面提到的“杠杆”效应,可以认为,连接公头抬起的作用力随着表带与升高座支撑处的距离远近而变化,A 圈表带距离最远,受到抬起作用最大,因此 12 点方位 A 圈表带的压强最大。

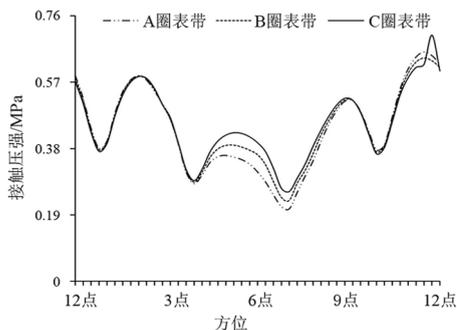


图 7 表带在重力影响下的接触压强情况

3 变压器套管电连接结构地震响应

3.1 输入地震动选择

所选取的换流变压器所在变电站地区抗震设防烈度为 7 度。根据 T/CSEE 0010—2016《1000 kV 变电站抗震设计规范》^[20]与 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[19],重要电气设施应提高一度设防,取 $0.2g$ 为设计基本峰值地面加速度。本次研究采用 Landers 波进行地震时程分析,图 8 为 $0.2g$ Landers 波绘制而成的三向加速度反应谱和场地需求谱,所取地震反应谱能较好包络住场地需求反应谱。这里采用地面峰值加速度表征地震强度。为了探究地震强度对套管电连接结构损伤累积的影响,还计算了 $0.4g$ 、 $0.6g$ 、 $0.8g$ Landers 波作用下的响应。

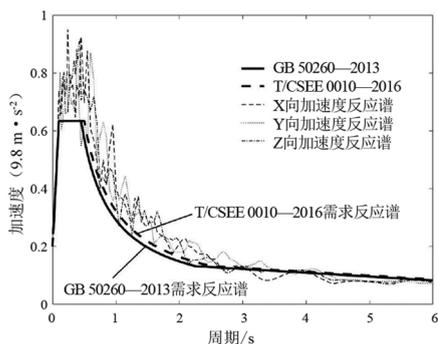
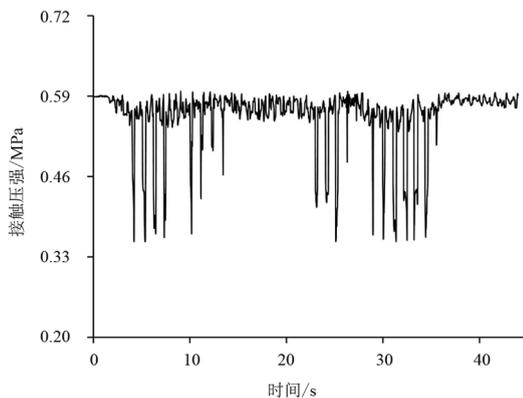


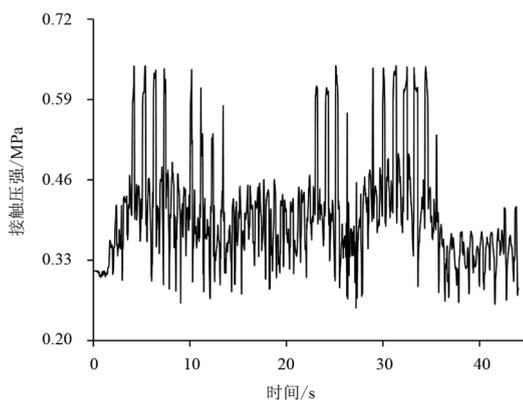
图 8 三向加速度反应谱与场地需求谱 (以 $0.2g$ Landers 波为例)

3.2 电连接结构地震作用下接触压强响应分析

地震会导致表带触指与连接母头内壁间接触压强变化。由于触指页片众多,仅对 1 号、24 号两处代表性的表带页片进行分析。由于不同地震强度下不同表带接触压强时程相似,仅绘制 A 圈表带在 $0.2g$ Landers 波作用下的接触压强时程曲线,如图 9 所示。



(a) A圈表带1号触指(12点方位)



(b) A圈表带24号触指(6点方位)

图 9 $0.2g$ Landers 波作用下触指页片接触压强时程曲线(12点、6点方位)

如图 9 所示,12 点方位表带的接触压强水平大多数时候均更高。此外,两个方位的接触压强存在明显的突变对应关系。计算表明,3 点和 9 点方位的页片同样呈现突变对应的特点,这与表带触指电连接结构的插接特征吻合。表带接触压强计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知,页片接触压强的大小随着地震强度的提高而增大,但幅度不明显。从图 10 所示触指结构解释,触指页片的根部处于连接公头的凹槽内,当某页片受到较大压力时,其会被压入凹槽内部,这限制了其接触压强的进一步增大。因此,表带触指页片在不同强度地震作用下的接触压强不应当是影响累积磨损损伤深度的主要因素。

表3 不同强度地震作用下表带接触压强

地震峰值 加速度	表带 圈号	地震作用下表带平均接触压强/MPa				
		12点	3点	6点	9点	所有页片
0.2g	A	0.559	0.503	0.401	0.504	0.447
	B	0.548	0.508	0.438	0.508	
	C	0.534	0.516	0.472	0.510	
0.4g	A	0.549	0.507	0.430	0.502	0.450
	B	0.538	0.514	0.464	0.507	
	C	0.523	0.523	0.494	0.509	
0.6g	A	0.539	0.506	0.454	0.510	0.452
	B	0.529	0.513	0.484	0.515	
	C	0.515	0.521	0.507	0.514	
0.8g	A	0.535	0.506	0.463	0.515	0.453
	B	0.527	0.514	0.489	0.518	
	C	0.513	0.521	0.506	0.515	

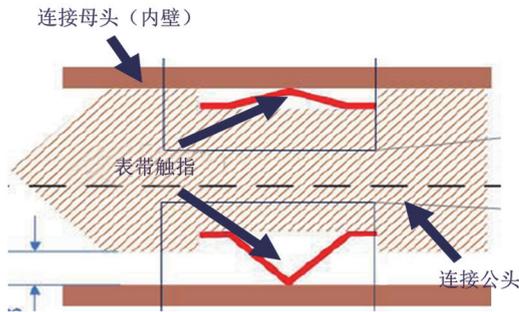


图10 表带触指结构

3.3 电连接结构地震作用下位移响应分析

根据研究,机械磨损和氟化硫气体腐蚀是表带触指劣化的主要因素^[12]。地震作用下,不仅仅电连接结构内部的接触压强会变化。连接公头和连接母头也将发生位移,导致磨损。因此,有必要分析电连接结构地震作用下位移响应以分析磨损情况。

以0.2g Landers波为例,将连接公头和连接母头的轴向位移相减,可得地震作用下两者的相对位移,如图11所示。由图11可见连接公头和连接母头的相对位移幅值不大但位移频繁。

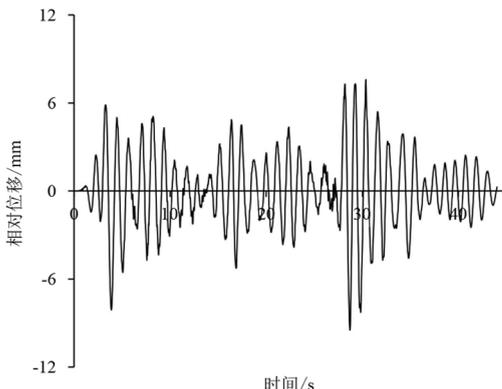


图11 0.2g Landers波作用下连接公头、连接母头相对位移时程曲线

将相对位移按时间进行累加,可得到相对行程。该行程伴随着始终的摩擦作用,称其为摩擦行程。摩擦行程的累积如图12所示,可见摩擦行程始终呈现稳定增长的趋势。

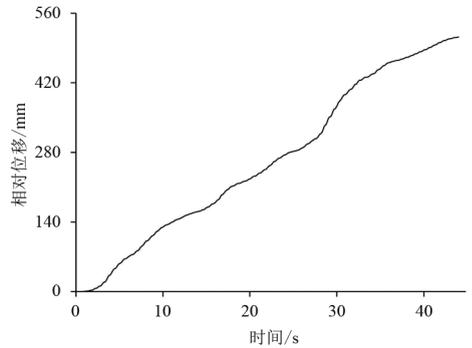


图12 0.2g Landers波作用下连接公头母头摩擦行程累积

不同地震作用下的相对位移响应如表4所示。以0.2g Landers波作用为例,地震结束时,摩擦行程高达512.06 mm。相对位移幅值可由最大相对正负位移相减得到。可以发现摩擦行程远大于相对位移幅值。可见,在地震作用下,连接公头与连接母头内壁一直处于小幅高频的相互摩擦。此外,相对位移与地震强度呈现强正相关关系。因此地震强度对于磨损损伤深度应当至关重要。由于连接公头的触指页片为银镀层和铜基的多层结构,磨损容易带来性能下降,后面将对不同强度地震作用下,触指页片的磨损损伤进行研究。

表4 不同地震作用下的相对位移响应

地震峰值 加速度	最大相对 正位移/mm	最大相对 负位移/mm	相对位移 幅值/mm	最大累积 摩擦行程/mm
0.2g	6.97	-10.10	17.06	512.06
0.4g	12.58	-15.32	27.89	1 017.75
0.6g	19.15	-22.71	41.86	1 525.89
0.8g	25.77	-30.04	55.80	2 033.83

4 变压器套管电连接结构地震累积效应

4.1 磨损损伤模型

4.1.1 Archard 磨损损伤计算模型

当物体表面相互接触,在外部荷载下,接触面表面的许多微凸起顶端会相互挤压变形,形成多个小接触区域。基于此思路,Archard^[21]提出了黏着磨损的代表性模型,如式(1)所示。

$$W = K_1 N / 3a \quad (1)$$

式中: W 为单位摩擦行程下的磨损量; N 为接触面压力; a 为圆形磨损区域的半径; K_1 为表征磨损效率的比例常数, 取决于参与摩擦的材料类别、接触面的润滑等级以及其他相关因素。

对式(1)进行重新的梳理和简化, 可得到目前工程界常用的 Archard 磨损模型^[22], 如式(2)所示。

$$V = K \frac{LN}{N} \quad (2)$$

式中: V 为本次摩擦磨损量的总体积; N 为接触面压力; H 为摩擦中较弱材料的布氏硬度; L 为滑动磨损持续的行程; K 含义同 K_1 , 也是表征磨损效率的比例常数, 称作磨损系数, 其值等于 $K_1/3$ 。

工程上更重视磨损的深度, 因此将式(2)左右同时除以实际接触面积 A , 可得:

$$\frac{V}{A} = K \frac{L}{H} \times \frac{N}{A} \quad (3)$$

$$h = K \frac{Lp}{H} \quad (4)$$

式中: h 为磨损深度; p 为磨损点的接触压强。

4.1.2 参数选择

磨损系数 K 与两个摩擦接触面的材质、粗糙度以及润滑情况等多种因素密切相关。一般采用实际实验的方法进行总结和确定。

1980年, Rabinowic 以其 1958 年的实验为基础, 摸索出了一套较全面的摩擦磨损系数实验值^[22]。所研究的表带触指上的银镀层与紫铜制连接母头内壁产生频繁的摩擦, 可以认为铜和银的金属性质较为相近, 为相似金属摩擦。鉴于实际运行中润滑效果不佳, 认为该接触面的润滑状况为“洁净表面”。综上所述, 磨损系数 K 取 1.7×10^{-3} , 且在摩擦过程中为常数。

材料硬度 H 应采用布氏硬度。表带触指上银镀层的硬度小于母头内壁紫铜的硬度, 因此取金属银的硬度参与计算。这里, 材料硬度 H 取 200 MPa, 并认为在银镀层被磨穿前, 材料硬度并不会随着摩擦的进行而改变。

4.2 变压器套管电连接结构累积磨损分析

电连接结构表带触指上镀有银镀层, 能够有效抵抗结构的机械和化学劣化, 提高使用寿命。因此, 有必要研究地震作用下, 表带触指结构连接公头页片银镀层的磨损程度。取银镀层厚度为 $15 \mu\text{m}$ ^[23]。

这里以地震作用后磨损深度为地震累积效应指标, 以是否磨穿银镀层(磨损深度达到 $15 \mu\text{m}$) 为破坏指标。

4.2.1 不同触指页片的磨损累积

根据上述分析, 利用式(4), 可以得到不同强度地震下表带触指页片的磨损深度。

数据表明, 不同地震强度下磨损情况的分布具有相同的规律。以 $0.2g$ Landers 波作用下磨损为例, 将不同页片的磨损情况绘制成图, 可形象地表现三圈表带的磨损差异, 如图 13 所示。

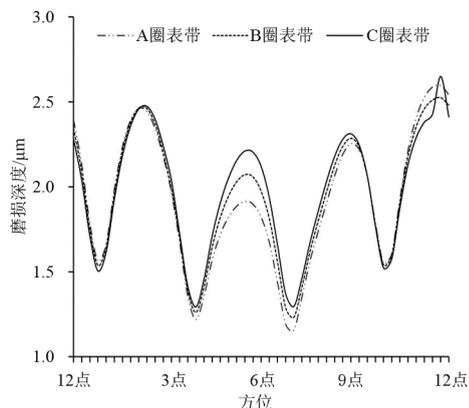


图 13 $0.2g$ Landers 波作用下连接公头触指页片银镀层磨损深度分布情况

由图 13 可知, 在 6 点方位磨损深度呈现 $A < B < C$ 的情况, 而在 12 点方位情况则相反。与此同时, 3 点和 9 点方位三圈表带的磨损情况差异不大。此外, 该分布曲线与前文图 7 所示的重力作用后的接触压强分布曲线类似, 可以判断套管自重产生的接触压强对于表带触指页片的磨损深度分布有着极大的影响。

表 5 为三圈表带在地震作用下的银镀层磨损数据。C 圈表带第 46 号页片的数据出现异常突变, 由于不影响对整体的分析而忽略。

表 5 连接公头触指页片银镀层磨损情况
(C 圈表带的 46 号页片数据被舍去)

地震峰值 加速度	最大磨损 深度/ μm			最小磨损 深度/ μm			表带磨损 平均值/ μm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
$0.2g$	2.60	2.53	2.47	1.16	1.23	1.29	1.92	1.95	1.96
$0.4g$	5.04	4.92	4.94	2.44	2.55	2.62	3.86	3.91	3.92
$0.6g$	7.44	7.36	7.37	3.76	3.87	3.91	5.83	5.90	5.88
$0.8g$	9.86	9.83	9.82	5.04	5.16	5.17	7.80	7.88	7.81

由表 5 可以发现, 在不同强度的地震作用下, 磨损深度最深和最浅的触指页片均在 A 圈表带上, 表

明 A 圈表带的磨损分布最不均匀。在地震作用下, A 圈表带的银镀层最有可能被磨穿。

此外,总体来讲, B 圈表带的平均磨损深度是最大的,这表明其整体受到的磨损较严重。对于单一表带,如果其上有多个页片的银镀层磨损过大,可能会导致该圈表带载流性能加速劣化。因此,工程上也应当关注 B 圈表带的磨损情况。

从图 13 还可以发现,触指页片磨损的极大值和极小值普遍出现在八分之一方位,每个极值间隔 45° 。因此,触指页片磨损分布还与其所在方位有关。由于在 4 个不同强度地震波作用下的磨损随着方位的分布情况较为相似,此处仅对 $0.2g$ Landers 波的银镀层磨损程度进行分析,以研究沿圆周银镀层磨损程度分布。

图 14 为 $0.2g$ Landers 波作用下 A 圈表带的银镀层磨损程度绕圆周的分布情况。可以发现磨损曲线呈现不均匀圆形, 2 点、5 点、8 点和 11 点方位的磨损程度相对较大。

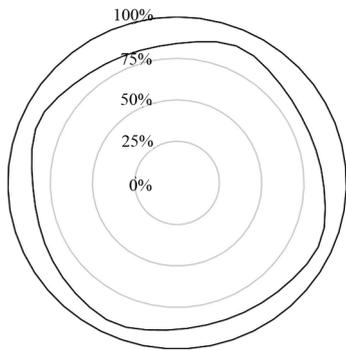


图 14 $0.2g$ Landers 波作用下 A 圈表带银镀层磨损程度(页片方位同图 5)

4.2.2 不同强度地震作用下累积磨损

将不同强度地震作用下的磨损情况进行数据整理,如表 6 所示。

表 6 不同强度地震下连接公头页片磨损情况
(C 圈表带的 46 号页片数据被舍去)

地震峰值 加速度	最大磨损 深度/mm	最小磨损 深度/mm	磨损深度平均 值/mm
$0.2g$	2.60	1.16	1.94
$0.4g$	5.04	2.44	3.90
$0.6g$	7.44	3.76	5.87
$0.8g$	9.86	5.04	7.83

从表 6 可知,单次地震导致的磨损量均未达到 $15 \mu\text{m}$,未达到破坏指标。但磨损的各项统计值均随着地震强度的加强而增大。磨损平均值和地震峰

值加速度的相关性如图 15 所示。

从图 15 可见,页片磨损平均磨损程度和地面峰值加速度呈现明显的线性关系。由式(4)可知,当磨损系数 K 以及材料硬度 H 不变时,磨损程度仅由摩擦点的接触压强以及摩擦行程决定。由前述可知,触指页片与连接母头内壁的接触压强和摩擦行程均会随着地震峰值加速度的增大而增大,其中接触压强的增大幅度很小。由于加速度和行程两个物理量本就为线性关系,地面峰值加速度的增大必然导致摩擦行程的线性增大。摩擦行程的增大幅度远大于接触压强的增长幅度。因此,当地震强度提高时,表带触指页片磨损应当随着摩擦行程的线性增加而同样以近似线性的关系增加。

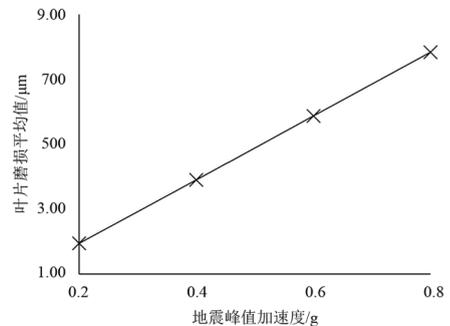


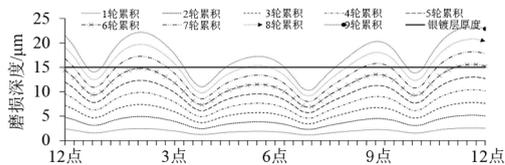
图 15 不同地震峰值加速度下的页片磨损平均值

4.3 多次地震的磨损累积

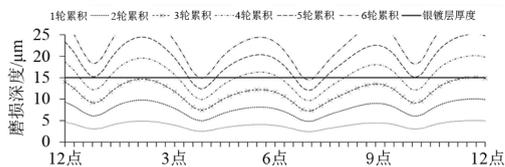
为了探究多轮地震作用下的累积效应,假设该结构经历多轮地震,出于计算的简便性考虑,假设该变压器连续受到多次相同强度的 Landers 波地震作用。为了凸显累积效应,将每次地震后的累积磨损深度均绘制成曲线,并在 $15 \mu\text{m}$ 处绘制粗直线代表银镀层厚度,同时用叉号表明该轮地震中银镀层损坏,如图 16 所示。鉴于磨损最严重的触指页片总是出现在 A 圈表带,此处以 A 圈表带为例进行模拟。

从图 16 可见,在峰值加速度为 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$ 和 $0.8g$ 的地震作用下,套管电连接结构损坏轮次分别为第 6、3、3、2 轮。整体来看磨损极其不均匀,磨损集中于前面所述 12 点、3 点、6 点和 9 点方位。当上述位置镀层完全磨损时,其余位置磨损程度仍然较轻。磨损区域的不均匀和高磨损区域的集中容易使得磨损快速积累,个别页片过早破坏,不利于充分发挥银镀层的抗劣化性能,造成套管电连接结构过早因为局部的失效影响整体的性能甚至提前引发电连接失效,降低了使用寿命。

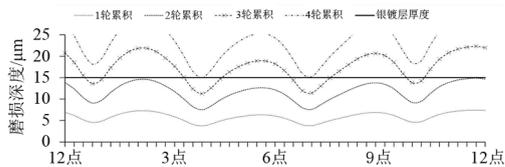
因此,可考虑采用合适的方法定期将表带结构沿



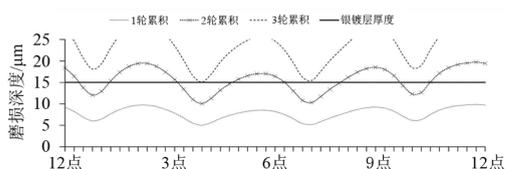
(a) 0.2g Landers波



(b) 0.4g Landers波



(c) 0.6g Landers波



(d) 0.8g Landers波

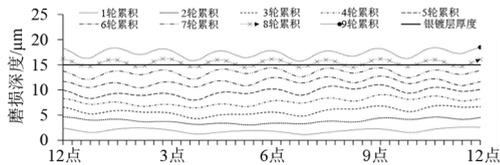
图 16 变压器套管电连接结构多次地震累积磨损

轴进行一定角度的旋转,以错开磨损峰顶,防止峰值叠加。假设每次地震后对套管沿着其中心轴逆时针旋转 45° ,将该变压器经历多次 Landers 波作用后的累积磨损以同样的绘图规则进行绘制,如图 17 所示。

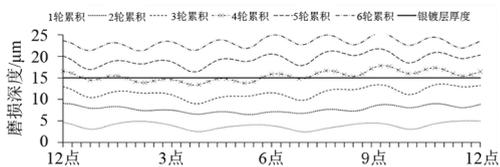
图 17 展示了旋转方案对于磨损累积效应的影响。可以发现,采用旋转表带的办法时,在峰值加速度分别为 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$ 和 $0.8g$ 的地震作用下,套管电连接结构银镀层分别在第 8 轮、第 4 轮、第 3 轮、第 2 轮损伤累积后被破坏,且整体磨穿程度不大,整体上看磨损均匀。可以发现与正常叠加的累积磨损进行对比,旋转方案在变压器套管电连接结构抗磨能力上有显著提升,对提高表带触指型电连接结构使用寿命有明显作用。

5 结论

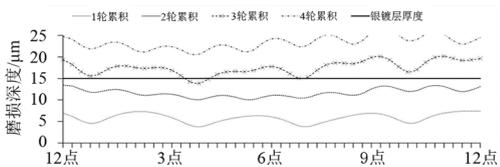
上面以表带触指型电连接结构作为研究对象,利用 Abaqus 有限元计算软件,建立了含有表带触指型电连接结构的套管有限元模型,并施加重力荷载



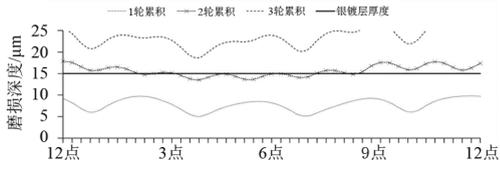
(a) 0.2g Landers波



(b) 0.4g Landers波



(c) 0.6g Landers波



(d) 0.8g Landers波

图 17 变压器套管电连接结构
多次地震累积磨损(45° 旋转)

和符合要求的地震波,计算得到响应的接触压强和位移数据,并利用 Archard 模型进行连接车头表带触指页片磨损深度分析,得到如下结论:

1) 重力影响会使得表带上方页片的接触压强增加,下方页片的接触压强减少。该效应对靠近套管尾部的表带影响最大,并对磨损分布有极大的影响。

2) 利用 Archard 的磨损模型,提出了一种计算地震作用下变压器套管电连接结构磨损深度的方法。可以以此估计一次或多次地震作用下该设备的累积磨损深度,并作为损伤累积的评估指标。

3) 页片平均磨损程度和地震峰值加速度呈现明显的线性关系,其原因与磨损计算模型有关。接触压强的变化仅为影响不同强度地震作用下累积磨损损伤差异的次要因素。摩擦行程会随着地震强度的提高而明显增大,是累积磨损损伤差异的主要因素。地震作用下的磨损并不足以银镀层发生破坏。靠近套管尾部的表带的磨损分布最不均匀,且最有可能先出现银镀层磨穿的情况。位于中间的表带的

整体磨损程度最高,工程上应当重视靠近套管尾部的表带和位于中间的表带的磨损情况。

4)表带触指磨损分布呈现明显的集中规律。分析表明,采用定期沿轴旋转套管的方案,表带触指整体的磨损分布会更加均匀,不会出现某方位页片银镀层过早破坏的情况。

参考文献

[1] 谢强.电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J].电力建设,2008(8):1-6.

[2] XIE Q,ZHU R.Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China [J].IEEE Power and Energy Magazine,2011,9(2):28-36.

[3] 刘如山,刘金龙,颜冬启,等.芦山7.0级地震电力设施震害调查分析[J].自然灾害学报,2013,22(5):83-90.

[4] 王生杰,包正红,林万德,等.高海拔条件下换流变压器阀侧套管温升仿真研究[J].变压器,2021,58(2):47-51.

[5] 乔小冬,贾鸿益.伊敏换流站换流变阀侧套管故障分析及处理[J].电工技术,2014(10):64-65.

[6] 周安春,高理迎,冀肖彤,等.干式SF₆气体绝缘换流变压器阀侧套管电流致热型放电故障分析及现场修复[J].电网技术,2018,42(5):1401-1409.

[7] 王典浪,曹鸿,李国良,等.换流变阀侧干式套管内部插接结构过热隐患分析及整治[J].电瓷避雷器,2021(2):100-106.

[8] 邓集瀚,邓军,张晋寅,等.RIP充气套管电接触劣化分析及处理[J].变压器,2021,58(12):68-71.

[9] 陈云龙.地震作用下变压器套管的电连接结构失效机理分析及试验研究[D].上海:同济大学,2022.

[10] 靳守锋,田汇冬,王浩然,等.特高压GIL电接触结构选型及磨损特性研究[J/OL].电网技术:1-9.[2022-08-11]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2012.

[11] 刘鹏,任汀,谢韬,等.换流变阀侧套管表带触指接触电阻数值计算[J/OL].高电压技术:1-10.[2022-08-11]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20211981.

[12] 田汇冬,靳守锋,龚傲,等.换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1146-1156.

[13] 陈云龙,谢强,李晓璇.换流变网侧套管电连接结构的地震响应分析[J].高电压技术,2022,48(6):2283-2291.

[14] YANG Z, HE C, XIE Q.Seismic performance and stiffening strategy of transformer bushings on sidewall cover plates[J].Journal of Constructional Steel Research,2020,174:106268.

[15] KOLIOU M, FILIATRAULT A, REINHORN A M. Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems Incorporating flexural stiffeners I: numerical study[J].Earthquake Spectra,2013,29(4):1335-1352.

[16] KOLIOU M, FILIATRAULT A, REINHORN A M. Seismic response of high-voltage transformer-bushing systems Incorporating flexural stiffeners II: experimental study[J].Earthquake Spectra,2013,29(4):1353-1367.

[17] 全国绝缘材料标准化技术委员会.电气用热固性树脂工业硬质层压板 第4部分:环氧树脂硬质层压板:GB/T 1303.4—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.

[18] 陈俊寰,夏延秋,曹正锋.铜基银镀层的导电性及摩擦磨损性能[J].材料保护,2016,49(10):1-4.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[20] 中国电机工程学会.1000 kV变电站抗震设计规范:T/CSEE 0010—2016[S].北京:中国电力出版社,2017.

[21] ARCHARD J F.Contact and Rubbing of Flat Surfaces [J].Journal of Applied Physics,1953,24:981-988.

[22] 桂长林.Archard的磨损设计计算模型及其应用方法[J].润滑与密封,1990(1):12-21.

[23] 信息产业部电子第四研究所.电子设备的金属镀覆与化学处理:SJ 20818—2002[S].北京:中国电子技术标准化研究所,2002.

作者简介:

庄一豪(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力设备抗震;

毛宝俊(1998),男,博士研究生,研究方向为电力设备抗震;

谢强(1971),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电网基础设施防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-27)

±800 kV 干式平波电抗器抗震性能分析

朱旺¹,任阿阳²,薛志航³,谢强¹

(1.同济大学土木工程学院,上海 200092;2.国网四川省电力公司特高压直流中心,四川 成都 610041;

3.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:为了研究平波电抗器在地震下的动力响应以及设备耦联对地震响应的影响,文中采用 Abaqus 有限元软件对一典型±800 kV 干式平波电抗器进行仿真模拟和模态分析,选取符合场地需求谱的三组地震波进行了地震响应计算,分析电抗器本体顶部加速度峰值、顶部相对位移峰值以及下部支撑绝缘子的根部应力峰值。重新建立双电抗器“T”型耦联模型,采用同样的地震波输入并提取地震响应峰值与单体响应结果对比,研究了耦联对电抗器地震响应的影响。研究发现在 0.2g 地震波下,电抗器本体顶部加速度峰值均值达到 2.34 m/s²,顶部相对地面的位移最大达到 152.97 mm,根部应力峰值均值为 22.88 MPa。耦联后电抗器本体顶部两个水平方向加速度峰值均有所降低,在耦联方向上顶部相对地面位移有所降低,而垂直于耦联方向的水平方向上的相对地面位移反而有所提高,耦联对电抗器支撑绝缘子根部应力峰值影响不大。工程中可采用各类减震隔震措施对电抗器特定方向的动力响应进行控制,以保证电抗器在地震下的结构安全。

关键词:干式平波电抗器;模态分析;抗震性能;耦联

中图分类号:TM 478 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0016-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220603

Seismic Performance Analysis of ±800 kV Dry-type Smoothing Reactor

ZHU Wang¹, REN Ayang², XUE Zhihang³, XIE Qiang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Grid

Sichuan UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan

Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the dynamic responses of smoothing reactor under earthquakes and the influence of equipment coupling on seismic response, the simulation and modal analysis of a typical ±800 kV dry-type smoothing reactor are carried out by Abaqus finite element software. The three groups of seismic waves which meet the demand of the required spectrum are calculated for the seismic responses, and the peak top acceleration, the peak top relative displacement of the reactor body and the peak stress of the root of support insulator are analyzed. The double reactor "T" coupling model is reestablished, and the same seismic wave inputs are used to extract the seismic response peaks and compare them with the responses of single model. The influence of coupling on seismic responses of reactor is studied. The study indicates that under the 0.2g seismic wave, the average peak acceleration of the top of reactor body reaches 2.34 m/s², the maximum displacement of the top relative to the ground is 152.97 mm, and the average peak stress of the root is 22.88 MPa. After coupling, the two horizontal acceleration peaks at the top of reactor body decreases, and the relative ground displacement of the top in the coupling direction decreases, while the relative ground displacement in the horizontal direction perpendicular to the coupling direction is increased. So coupling has little effect on the peak root stress of support insulator. In the project, various seismic isolation measures can be used to control the dynamic response of reactor in a specific direction to ensure the structural safety of reactor under earthquakes.

Key words: dry-type smoothing reactor; modal analysis; seismic performance; coupling

0 引言

变电站是电网系统的重要节点,承载着电能控制和转换的作用。作为电力系统的重要组成部分,变电站抗震性能影响着电网在地震时和地震后的安全运行状态^[1]。在历次大地震,如2008年汶川地震^[2-3]、2010年海地地震^[4]、2011年日本3·11地震^[5]、2013年芦山地震^[6]等地震中,变电站设备都受到了不同形式的损坏,体现了变电站设备在地震下存在较高易损性^[7]。变电站设备的损坏不仅影响着电能的传输和直接经济损失,更关系着人民的生产生活和社会的稳定^[8-10]。

为了提高变电站电气设备的抗震能力,已有众多学者对各类电气设备进行了抗震研究,研究手段各异,包括数值模拟、理论分析和振动台试验^[11-15]。干式平波电抗器是变电站直流输电工程的重要塔式设备,其质量大、尺寸大、重心高,因此其在地震下的响应需要重点关注。其上部电抗器本体刚度较大,自身不易发生变形,在以往地震中并未发生过破坏;然而,其下部用于支撑本体的支柱绝缘子属于脆性材料,结构细长,此类结构在以往地震中常常表现出瓷柱破坏或法兰破坏^[16],破坏严重时可能间接导致上部本体倾斜或掉落。对于细长类绝缘子构件以及支柱类电力设备,当下许多学者进行了抗震性能研究^[17-18],这些研究主要集中于地震中结构力学性能评估,包括评价顶部位移和根部应力等。然而,对于平波电抗器的研究,目前主要聚焦于本体构造和非结构性能方面,如噪声研究等。文献^[19]通过平波电抗器的电磁场特性提出了无磁金属的噪声罩的应用方案,相关噪声和温升试验测试发现无磁金属使噪声水平降低,同时不引起过多热损耗,进一步地,又在文献^[20]提出了新的隔声罩设计方法,并采用仿真方法证明了所提出方案的有效性。文献^[21]结合现场测量和仿真技术分析了电抗器的声场分布特性,并在国家标准基础上提出了较为准确的测量方法。

对于平波电抗器在地震下的力学性能分析,有部分文献也进行了深入研究。文献^[22]通过振动台试验对一复合绝缘子倾斜支撑干式空心电抗器进行了研究,确定了平波电抗器加速度放大系数最大的位置以及整个电抗器的抗震薄弱环节。文献^[23]提

出了一种带有4节绝缘子单元的新型平波电抗器,通过仿真模型验证了绝缘子的抗震强度安全系数符合要求。文献^[24]研究了某特高压直流平波电抗器的复合支柱绝缘子的抗震性能,通过理论分析计算了绝缘子芯棒的各项参数,并采用ANSYS模型验证了支柱绝缘子的安全性。然而,在一些变电站或换流站中,平波电抗器以双耦联形式设计,现有抗震研究仅针对于单体设备,没有考虑耦联对电抗器响应的影响。

下面,采用Abaqus有限元软件对某换流站的±800 kV干式平波电抗器进行了仿真模拟,并对该电抗器进行了模态分析;随后,输入典型地震动进行地震响应分析,其中包括电抗器本体顶部加速度、顶部位移以及支撑绝缘子根部应力。在此基础上进一步建立电抗器耦联模型,与单体模型进行基频、振型和动力响应比较,确定耦联效应对电抗器地震响应的影响。

1 ±800 kV 干式平波电抗器模型

所研究的±800 kV干式平波电抗器结构如图1所示。该电抗器单体由电抗器本体、复合支柱绝缘子支撑(以下称支撑绝缘子)以及其他构造构件如罩伞、支撑平台、绝缘子上下支架等组成,其中支撑绝缘子采用倾斜形式布置。

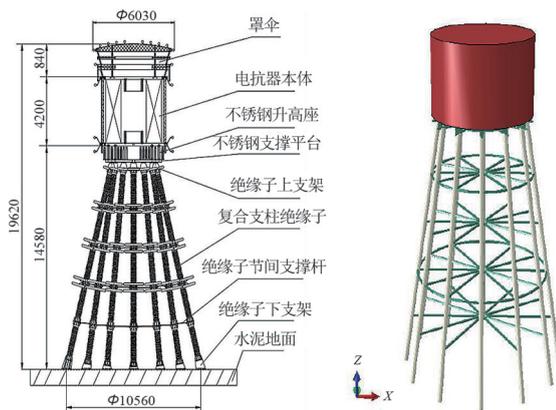


图1 干式平波电抗器单体(单位:mm)

如图1所示,电抗器单体结构整体高度为19.62 m,支撑绝缘子共12根,在本体下部均匀分布,支撑绝缘子单根总长为14.4 m,倾斜角度为10°。上部电抗器本体与下部升高座固定连接,由于其质量和刚度较大,因此可视为刚体。电抗器上的防噪声罩等非结构构件对结构刚度影响较小,仅将其质量转化

到了电抗器本体上。采用 Abaqus 软件对该电抗器进行仿真,电抗器本体采用实体单元,下部支撑绝缘子等采用梁单元模拟,电抗器本体与支撑绝缘子通过不锈钢平台固定连接,其中:电抗器本体截面直径为 4.734 m,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3;下部支撑绝缘子直径为 280 mm,单根质量为 1772 kg,弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.24;不锈钢支撑为十字形截面,弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.31。支撑绝缘子底部为六自由度约束,模拟刚性地面。电抗器垂直方向设定为 Z 轴,水平两方向分别为 X、Y 轴。

2 模态分析

对干式平波电抗器模型进行模态分析,可以得到该电抗器各阶自振频率及模态。该模型的前 10 阶频率和对应的模态振型如表 1 所示。根据 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》^[25] 推荐的场地需求谱,其平台段为 2.22~10 Hz,可见电抗器第 3~10 阶频率分布在平台段,与地震动的卓越频率接近,地震下易产生类共振现象。同时,第 3~10 阶振型均是由支撑部分引起,说明下部支撑相对于上部的本体更易受到地震影响。该电抗器的前 4 阶振型如图 2 所示,其中:1 阶、2 阶均为电抗器整体的弯曲模态,两向相同;3 阶、4 阶分别为整体和下部支撑绝缘子的扭转振型。

表 1 平波电抗器单体前 10 阶模态频率和振型

模态	频率/Hz	振型
1	0.569	整体 Y 向弯曲振型
2	0.570	整体 X 向弯曲振型
3	0.661	本体沿 Z 轴扭转振型
4	2.986	支撑绝缘子沿 Z 轴扭转振型
5	3.258	支撑绝缘子 Y 向弯曲振型
6	3.259	支撑绝缘子 X 向弯曲振型
7	5.029	底层水平支撑弯曲振型
8	6.278	第 3 层水平支撑弯曲振型
9	8.064	第 2 层水平支撑弯曲振型
10	8.155	支撑绝缘子 2 阶弯曲振型

3 抗震性能分析

3.1 地震波选取

所研究分析的平波电抗器位于 8 度设防地区。

根据 GB 50260—2013^[25],设计基本地震加速度为 0.2g,场地类别为 II 类,场地特征周期 0.45 s。选取 El Centro 波、Landers 波和新松波在模型基底进行输入,其中 El Centro 波和 Landers 波均为天然波,新松波为人工波。Landers 波归一化三向加速度时程如图 3 所示,3 条地震波的加速度反应谱与规范给定

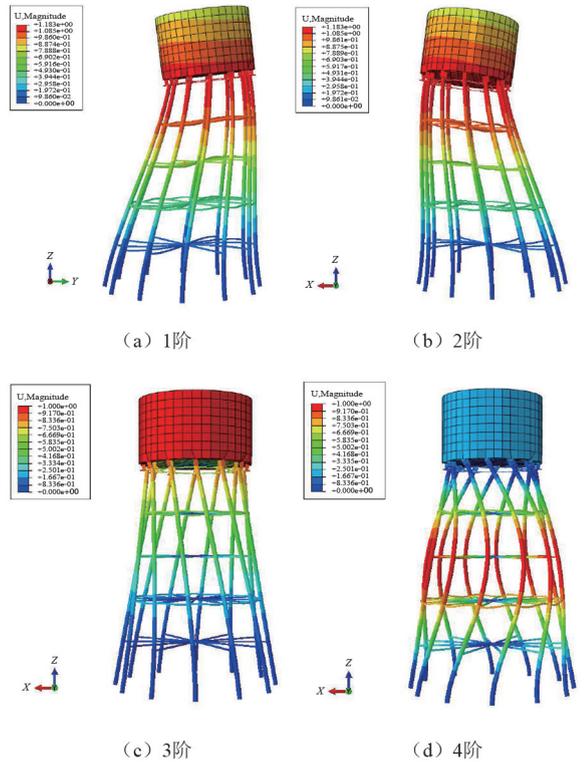


图 2 平波电抗器单体振动模态

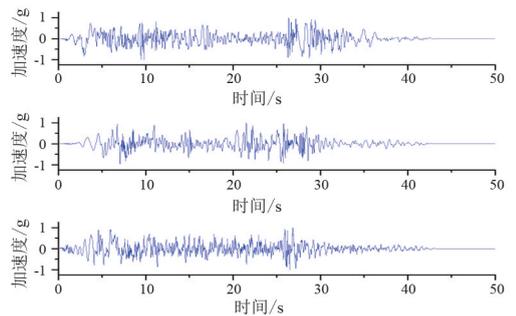


图 3 Landers 波归一化加速度时程 (Y, X, Z)

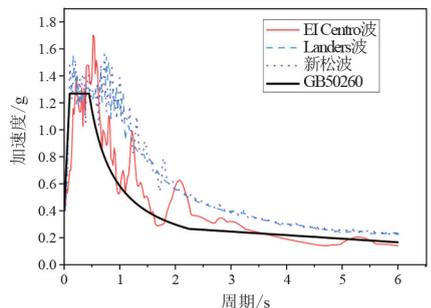


图 4 所选地震波的反应谱与需求谱

的场地需求谱如图4所示,3条地震波均能很好地覆盖住需求谱,满足规范要求。输入3组地震波时,三向加速度比值为1:0.85:0.65^[26],这里以Y向为主震方向,加速度峰值为0.2g。

3.2 加速度响应分析

平波电抗器放置于支撑绝缘子上部,支撑绝缘子相对于本体具有较低的刚度,在地震下表现出一定的柔度,因此绝缘子会将地震加速度进行一定放大。为了更好地了解电抗器抗震性能,统计了3组地震动下电抗器顶部的加速度峰值,并对3组地震动结果取平均,同时并计算加速度放大系数如表2所示。

表2 单体模型加速度峰值及放大系数均值

地震波	加速度峰值/(m·s ⁻²)			加速度放大系数		
	X	Y	Z	X	Y	Z
El Centro	1.24	1.60	1.27	0.75	0.82	1.00
Landers	2.60	3.03	1.27	1.56	1.55	1.00
新松波	1.94	2.40	1.28	1.17	1.22	1.00
平均值	1.93	2.34	1.27	1.16	1.20	1.00

由于电抗器各个方向输入的地震动加速度峰值不同,表2中加速度放大系数取各个方向加速度峰值与该方向地震动加速度峰值之比。由表2可知,电抗器顶部加速度主震方向最大值为3.03 m/s²,出现在Landers波作用下,对应加速度放大系数1.55,同时在Landers地震波下X向最大加速度为2.6 m/s²,对应放大系数1.56。而顶部加速度在Z向放大系数均为1,说明Z向几乎不存在放大效果。从平均值来看,水平两向加速度均有所提高,而竖直方向没有明显放大效应。另外,主震方向(Y向)的放大效果整体上强于X向,然而模型的水平两向原则为对称两向,说明放大系数的大小与地震动时程有关,证明了所提采用3条地震动进行研究的必要性。

3.3 相对位移响应分析

位移响应可以反映结构在地震下的变形情况,且电抗器上部一般存在导线耦联,若相对位移过大引起母线拉扯,容易引起设备的牵拉破坏,因此电抗器的位移响应也较为重要。与加速度响应分析类似,取电抗器本体顶部对于地面的相对位移进行分析,所得相对位移数据如表3所示。

由表3可知,在峰值地面加速度为0.2g的地震下,顶部相对位移峰值最大达到210.44 mm,相对电抗器本体高度19.62 m具有相对转角1.07%。其中,主震方向(Y向)最大相对位移出现在Landers地震波

下,X向最大值也出现在此地震波下,为192.02 mm。从3组地震波结果及其均值看,水平两向中,Y向相对位移明显高于X向,仍然说明地震波对于地震响应峰值有明显影响。另外,竖向相对位移仅为0.01 mm,究其原理,电抗器整体在竖直方向上的刚度由各个支撑绝缘子的轴向刚度提供,因此具有较大的刚度抑制了竖向相对位移。

表3 单体模型相对峰值及均值

地震波	相对位移峰值/mm		
	X	Y	Z
El Centro	77.31	97.79	0.01
Landers	192.02	210.44	0.02
新松波	133.38	150.67	0.01
平均值	134.24	152.97	0.01

3.4 根部应力响应分析

提取3组地震动下支撑绝缘子的根部的应力峰值,其中,El Centro波、Landers波和新松波下的应力峰值分别为16.08 MPa、30.47 MPa和22.09 MPa,均值为22.88 MPa。复合绝缘子材料的破坏应力由厂商提供,为75 MPa,支撑绝缘子的安全系数根据规范取1.67^[25],因此临界应力为75 MPa/1.67=44.9 MPa。此时3组地震波下材料并未达到破坏强度,不会发生绝缘子的强度破坏。

4 耦联效应对抗震性能的影响分析

4.1 平波电抗器耦联模型

在一些典型换流站中,平波电抗器以耦联形式设计,一般为双电抗器“T”型连接,如图5所示。在Abaqus模型中,“T”型结构采用线性梁单元建立,水平管母长度为11.6 m,外径为300 mm,壁厚为25 mm,竖向支柱长为15.58 m,连接处均压环采用Tie形式模

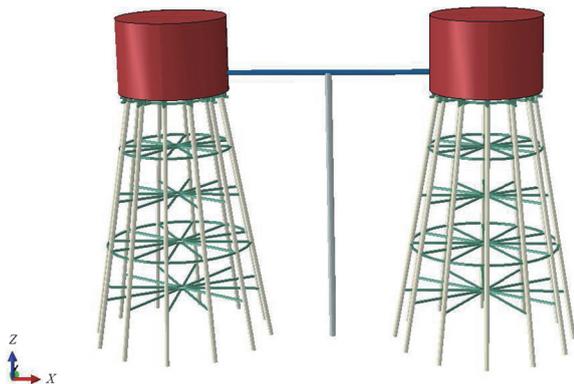


图5 平波电抗器耦联模型

拟,管母和电抗器本体连接处软母线采用 Axial 模型模拟,该连接处距离电抗器底面 0.2 m。其中,两个电抗器沿着 X 向排列,地震输入时 Y、X、Z 三向加速度峰值按照 1:0.85:0.65 的比例进行输入,Y 向仍为主震方向。

4.2 模态对比

耦联后的平波电抗器体系前三阶模态如图 6 所示,前两阶模态振型分别为两电抗器水平方向同向弯曲,第 3 阶模态为两电抗器水平方向异向弯曲。本质上,耦联带来的影响仅为两个电抗器在不同方向上的振型模态,前两阶弯曲振型与单体振型基本相同。从频率角度分析,首先提取了耦联体系的前 10 阶频率,分别为 0.569 0~3.260 9 Hz。1 阶模态频率为 0.569 0 Hz,与单体相同,说明耦联后对基频影响不大;而前 10 阶模态的范围明显小于单体情

况,说明在前 10 阶模态中,由于耦联因素出现了一些低频振型,其中包括了两个电抗器的同向和异向模态以及 T 型连接结构的局部振动模态。

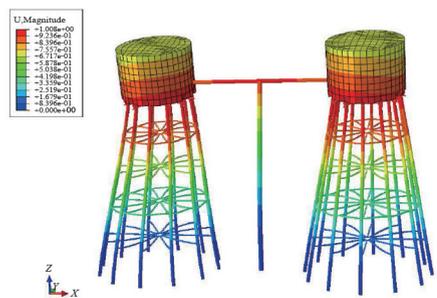
4.3 加速度响应对比

同样,对耦联模型进行地震响应分析,提取电抗器顶部的加速度并计算放大系数,如表 4 所示。

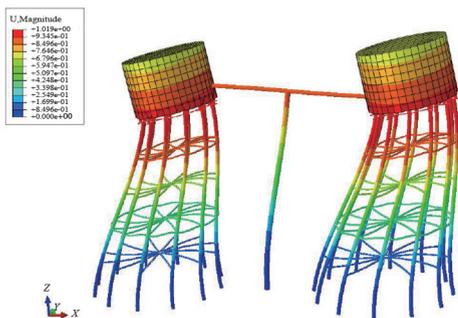
表 4 耦联模型加速度峰值及放大系数均值

地震波	加速度峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			加速度放大系数		
	X	Y	Z	X	Y	Z
El Centro	1.12	1.55	1.27	0.67	0.79	1.00
Landers	2.40	2.90	1.27	1.44	1.48	1.00
新松波	2.00	2.37	1.28	1.20	1.21	1.00
平均值	1.84	2.27	1.27	1.10	1.16	1.00

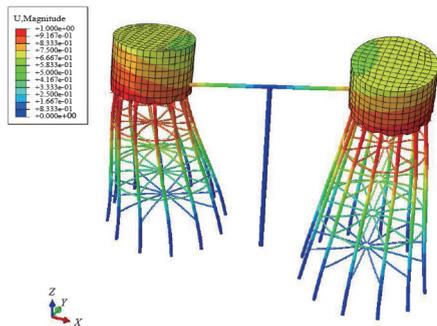
根据表 4 和表 2,绘制单体和耦联模型中电抗器顶部加速度峰值均值比较图形,如图 7 所示。表 4 中,顶部最大加速度峰值为 2.90 m/s^2 ,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大加速度峰值 3.03 m/s^2 有所减小,降低比例为 4.3%。同时在 X 向加速度峰值也有所减小,由 2.6 m/s^2 降为 2.4 m/s^2 ,降低比例为 7.7%,说明电抗器的耦联可以降低地震下电抗器顶部的加速度峰值,同时其放大系数也有所降低。图 7 中由加速度峰值均值情况可以看出,电抗器水平方向加速度峰值在设备耦联后均有所降低,竖直方向上没有变化。



(a) 1阶



(b) 2阶



(c) 3阶

图 6 平波电抗器耦联模型振动模态

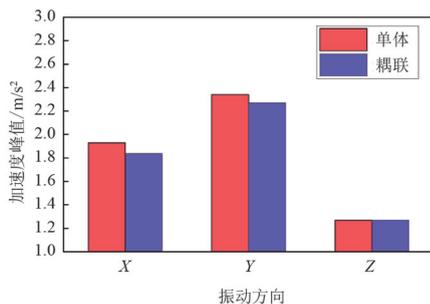


图 7 单体和耦联加速度峰值对比

4.4 相对位移响应对比

提取电抗器顶部的相对地面位移峰值,如表 5 所示,同样根据表 5 和表 3,绘制单体和耦联情况的对比图形,如图 8 所示。

表 5 中,顶部最大相对位移峰值为 210.64 mm,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大相对位移峰值 210.44 mm 几乎无变化。在 X 向相对位移峰值有所减小,由 192.02 mm 降为 184.13 mm,说明电抗器的耦联对地震下电抗器顶部的相对位移峰值具有一定抑制作用。图 8 中由相对位移峰值均

值情况可以看出,电抗器水平 X 向相对位移峰值在设备耦联后有所降低,Y 向略有增加,竖直方向上相对位移极小,没有变化。其中,X 向为设备耦联方向,说明耦联对于两个电抗器在排列方向上的相对位移有所抑制,而在垂直于耦联方向上对相对位移有提高作用。

表 5 耦联模型相对峰值及均值

地震波	相对位移峰值/mm		
	X	Y	Z
El Centro	77.28	97.94	0.01
Landers	184.13	210.64	0.01
新松波	133.12	150.88	0
平均值	131.51	153.15	0.01

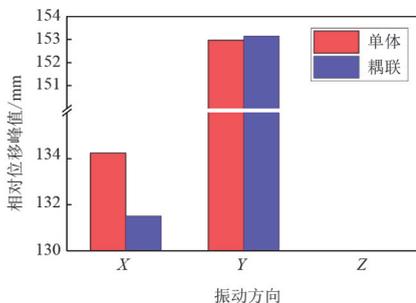


图 8 单体和耦联相对位移峰值对比

4.5 根部应力响应对比

提取电抗器支撑绝缘子的根部应力峰值,如表 6 所示,同样根据表 6 与前述单体结果,绘制单体和耦联情况的对比图形,如图 9 所示。

表 6 耦联模型支撑绝缘子根部应力峰值

地震波	应力峰值/MPa	峰值均值/MPa
El Centro 波	16.16	
Landers 波	30.49	22.91
新松波	22.09	

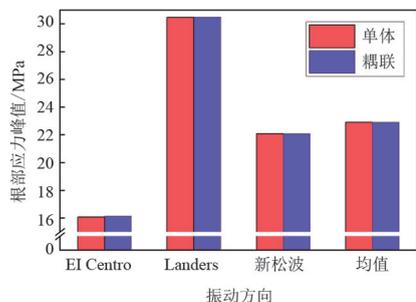


图 9 单体和耦联根部应力峰值对比

表 6 中,根部应力峰值最大为 30.49 MPa,出现在 Landers 地震波下,相对于单体情况的最大根部应力峰值 30.47 MPa 略有提高。由图 9 中根部应力峰值对比情况可以看出,3 组地震波和均值情况下

单体和耦联差别极小,几乎没有变化,说明在 0.2g 地震下,所研究的平波电抗器进行耦联对于支撑绝缘子根部应力几乎没有影响。

5 结论

上面针对某典型±800 kV 干式平波电抗器进行了仿真模拟和模态分析,并通过迭代计算分析了设备在 0.2g 地震作用下的本体顶部加速度、位移和支撑绝缘子根部应力,进而通过电抗器耦联模型研究了耦联对各类地震响应的影响。研究发现耦联对于 0.2g 地震作用下的本体顶部加速度峰值有所降低,对耦联方向上的顶部相对地面位移峰值有所抑制,对于支撑绝缘子根部应力峰值则影响不大。工程中可采用各类减震隔震措施对电抗器特定方向的动力响应进行控制,以保证电抗器在地震下的结构安全。

参考文献

- [1] 谢强,何畅,杨振宇,等.1100 kV 特高压变压器瓷套管地震作用破坏试验与分析[J].高电压技术,2017,43(10):3154-3162.
- [2] 于水清,李光范,李鹏,等.四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J].电网技术,2008,32(11):1-6.
- [3] XIE Q, ZHU R Y. Damage to electric power grid infrastructure caused by natural disasters in China - earthquake, wind and ice[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2011,9(2):28-36.
- [4] GOODNO B J, GOULD N C, CALDWELL P, et al. Effects of the January 2010 Haitian earthquake on selected electrical equipment[J]. Earthquake Spectra,2011,27(S1):251-276.
- [5] EIDINGER J, DAVIS C, TANG A, et al. M 9.0 Tohoku earthquake March 11 2011 performance of water and power systems[R]. Oakland, USA: G&E Engineering System Incorporated,2012.
- [6] 尤红兵,赵凤新.芦山 7.0 级地震及电力设施破坏原因分析[J].电力建设,2013,34(8):100-104.
- [7] 孙宇晗,程永锋,卢智成,等.1100 kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J].高电压技术,2017,43(10):3224-3230.
- [8] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1100 kV ultra high voltage transformer bushing[J]. Earthquake Spectra, 2019,35(1):447-469.

电网舞动灾害应对技术体系研究综述

赵彬, 刘彬, 朱宽军

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055)

摘要: 中国电网结构复杂, 线路分布广泛, 近年来受气候异常变化影响, 大范围、长时间舞动导致的机械、电气故障频发。尤其是2007年以来, 对线路运行影响较大的舞动灾害天气过程呈多发态势。统计数据显示, 覆冰舞动已经成为导致线路故障停运的首要原因。传统舞动防治技术手段大都以舞动诱发过程为主要防治对象, 基于“避、抗、防、测”基本原则, 构建了电网舞动灾害应对技术体系, 主要防治手段包括绘制舞动分布图, 制定防舞设计标准, 提出装置设计、检测、应用和评价方案等。经过多年的完善, 现有技术体系体现出了较好的防范和治理效果, 但在舞动发生期间却不具备任何实用性和可操作性。文中针对现有电网舞动灾害应对技术体系的优势、不足和针对性的完善措施, 以及近期非线性动力减振、舞动机理、人工智能等相关领域研究成果进行总结介绍和综述, 并指出今后可能实现更好舞动应对效果的技术领域和研究方向, 力图为电网防灾减灾和线路运维工作提供借鉴和参考。

关键词: 电网运维; 输电线路; 覆冰舞动; 防振金具设计; 防舞方案; 非线性动力减振

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0022-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220604

A Research Review on Technical Response System to Galloping of Power Grid

ZHAO Bin, LIU Bin, ZHU Kuanjun

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: The structure of power grid in China is complex with the lines widely distributed, while the abnormal climate changes in recent years have also been causing extensive and long-running galloping, which leads to frequent mechanical and electrical faults. Especially since 2007, weather conditions and processes that may induce galloping and thus have a great impact on the operation of transmission lines have been occurring frequently, and the statistics show that the galloping of iced transmission lines has been the primary cause of line failure and outage. For most traditional anti-galloping techniques, the induction process of galloping is seen as the main target for prevention. So based on the basic principles of "galloping avoidance, galloping resistance, anti-galloping, and galloping measurement", the technical response system is constructed for galloping-induced failures in power grid, in which the prevention and control measures mainly includes the drawing of galloping distribution maps, the formulation of standards for anti-galloping design, and the proposal of various schemes for device design, detection, application and evaluation, etc. With years of improvement, the current technical system has demonstrated good prevention and management effects but lacks practicability and operability during galloping. It is an attempt to review and summarize the advantages, weakness and targeted improvement measures in the existing technical response system to power grid galloping, as well as the recent research results in various related fields, such as nonlinear dynamic oscillation mitigation, galloping mechanism, artificial intelligence. Furthermore, the technical areas and research directions are put forward where better effects of galloping response may be achieved in the future, aiming to provide references for the prevention and mitigation of power grid failures and the operation and maintenance of lines.

Key words: operation and maintenance of power grid; transmission line; galloping of iced transmission lines; design of anti-oscillation hardware fittings; anti-galloping scheme; nonlinear dynamic oscillation mitigation

0 引言

中国电网结构复杂,线路分布广泛,截至2020年,在运在建特高压线路已超过35 000 km,成为能源电力可持续发展的关键环节,在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用。

然而近年来受气候异常变化影响,大范围、长时间舞动导致的机械、电气故障频发。2007年冬季至今,国家电网有限公司500 kV及以上输电线路多次故障停运,其中舞动是诱发线路故障停运的首要原因。进一步对近年来雨雪冰冻灾害分析显示,对电网运行影响较大的雨雪冰冻灾害天气过程呈多发、频发态势,每年冬季都会遭遇1~2次,而且波及范围向非传统重覆冰和舞动易发区演进,其中典型案例是:2020年2月环渤海冰灾中,位于0级舞动区的天津某液体天然气供气电源线路发生舞动,造成长时间停电且无法恢复;同年11月吉林冰灾中,0级舞动区内某66 kV供水电源线发生舞动,造成供水泵站停电,由于供暖也需要水源,造成部分地区长时间无法供暖、供气。上述案例中,面对偶发性的长时间舞动,没有任何可采取的措施和方法来有效阻止舞动造成的长时间故障停运。

下面,首先详细介绍现阶段基于“避、抗、防、测”4个方面的舞动应对方法、技术特点、主要问题和完善措施,从舞动机理、设计方法、监测预警和防治技术领域成果进行总结,并引入非线性动力防舞、人工智能、智能监测等前沿技术的应用和探索,为全球气候变暖形势下电网防灾减灾工作提供借鉴和参考。

1 诱发机理研究

舞动诱发机理研究是目前应对技术体系内所有方法、装置和标准等元素的关键核心。目前解释覆冰舞动的机理多为激发、失稳机理,如Den Hartog机理、Nigol机理、惯性耦合机理、稳定性机理以及非线性内共振失稳机理等,可分别从不同角度来解释舞动发生、发展的影响机制。在这些机理基础上建立的舞动灾害应对技术体系,主要以“避、抗、防、测”为基本理念和指导原则。因此,在输电线路运行阶段发生的舞动,只能等线路停运后进行技改来提升

线路抵御舞动灾害的能力。

然而,从近年来的发展成果来看,舞动诱发机理研究已经从以往的线性本质向非线性本质转变。目前,针对覆冰多分裂导线-间隔棒-防舞器等耦合结构要素的关系,还仅限于连续分布质量、非线性刚度、线性模态、内共振、静态分岔和hopf分岔等基本非线性特征关系,对奇异性、多模态耦合、非线性模态以及非线性阻尼等特征的研究还较为匮乏。而且,最为关键的问题是,近年来实用性的装置更新迭代越来越慢。究其原因,是解析和数值等方法分析的结果对完善舞动应对技术体系的指导意义越来越小,而舞动风洞或真型线路现场模拟试验对气象条件、线路结构、特征测试技术以及结果分析的要求非常高,其经济成本也较高,导致理论和试验分析在一定程度上脱节,无法推动新装置的应用和推广。针对这一难题,在研发和推广小型化监测装置的基础上,有不少研究者提出较为恰当的舞动特征监测解决方案。

2 现有技术体系

2.1 避舞

“避”主要是在线路规划阶段合理规划线路走向和路径,在综合生态、环境条件、线路造价等分析的基础上,尽可能避开易舞区和微气象、微地形区。该领域主要的研究工作集中在如何找出舞动高风险区域,即绘制舞动风险分布图。传统舞动风险分布图绘制方法有频率法和舞动系数法。舞动系数法因实际操作困难,未得到推广应用。频率法体现的结果虽然能够在一定程度上反映舞动发生的地区分布,但“守株待兔”式方法难以准确预测无舞动历史区域内线路的舞动风险。

文献[1]在频率法、舞动系数法基础上,提出了基于气象地理法的输电线路舞动分布图绘制方法:在统计和分析该区域输电线路历年来发生导线覆冰舞动情况的基础上,通过总结气象、地形特征规律,建立覆冰舞动的气象模型和地理模型;结合运行经验提出舞动区域的分区、分级标准,建立舞动分布图绘制方法标准技术体系;以湖北省为例采用气象地理法绘制了舞动分布图,并检验其与实际舞动情况的吻合程度,验证了该方法的合理性和正确性。

避舞方法在过去几年中开展了大量的应用,部

分重要线路通过规避易舞区等方法,取得了一定的避舞效果。多年应用经验表明,该方法的有效性得到进一步提升的前提,是通过历史案例准确总结、归纳并掌握各区域舞动风险出现和演变的规律。然而,随着电网建设规模的扩大,全球气候的异常变化,0级、1级舞动区内出现的偶发性舞动越来越多见,防舞能力提升的基础和前提已经基本无法实现。除了缩短舞动分布图的修订周期(目前是2~3年),目前这一方向发展的前沿趋势,是参考覆冰、风区分布图,考虑30年、50年和100年重现期,进行架空线路路径调整和优化,从而进一步提升输电线路设计防舞能力,并为后续其他防舞设计提供更为精准和差异化的依据。

2.2 抗舞

覆冰导线舞动会使导线产生动态交变应力,降低导线的疲劳寿命,造成导线损伤甚至断线;同时,舞动会在绝缘子串、横担及输电铁塔上施加较大的动力荷载,造成绝缘子串摆动、横担扭曲变形、杆塔塔身摇晃甚至倒塌。“抗”就是在设计、运维、改造阶段,对经过易舞区的线路采取提高线路机械强度、电气安全裕度的方法,来提升导线、杆塔、金具、绝缘子等结构抵抗舞动破坏能量的能力。一般情况下,舞动的破坏首先是闪络跳闸,其次是低频、大幅值振动导致的结构强度不足或疲劳损坏。对于经过易舞区的线路,如果适当提高线路的机械强度或电气强度,使得即使发生中等强度的舞动,也不至于发生因线路电气强度不足而闪络跳闸,或发生因机械强度不足而损坏,避免对线路的运行造成严重影响。

抗舞的关键,在于充分认识杆塔-导线-绝缘子-金具耦连体系中一个或多个结构的舞动特征和失稳演变过程。对此,文献[1]采用梁单元对覆冰导线的舞动进行了非线性数值模拟,但导线的抗弯刚度小不适合采用梁单元进行模拟,且该文献没有考虑覆冰后由于偏心而产生的惯性作用。

除此之外,近年来的运行经验表明,舞动交变载荷是杆塔螺栓松脱的重要原因。文献[2]通过大量螺栓松动试验,开发了螺栓连接在受横向激励时的自松动现象完整模型,从静态和动态模型分析结果中发现螺栓自松动的主要原因是质量块和螺栓之间的相互影响,并预测了螺栓自松动过程。文献[3]通过试验和有限元模拟揭示了螺栓受横向循环载荷作用的自松动机理,认为螺栓连接的自松动过程分

别由材料循环塑性变形和螺母回旋导致,自松动现象的初始过程取决于材料的循环塑性变形。文献[4-5]结合导线舞动时输电铁塔横担损坏情况,分析了螺栓松脱、断裂后横担承载力的变化规律,提出了采用双帽螺栓等防松脱技术措施,经过多年的共同努力,螺栓防松脱已成为每年入冬前各地设备管理部分防冰抗舞工作的重点环节。

由于抗舞能力的提升意味着线路造价会成倍增加,同时受其他多种因素的制约,抗舞措施客观推广实施难度较大,且大都都需要依赖主观经验,工程中发挥的实际效果相对较差。因此,应重视螺栓防松对防舞能力的提升效果,尤其是利用双螺母来提升杆塔防松能力。特别是针对重点防护线路区段,应优先选用双螺母设计形式,从而提升低频载荷下的防松能力。在档距控制方面,张力和档距因素对舞动特性影响较大,缩小档距可起到一定的防舞效果。此外,还可利用真型塔试验校验杆塔抗舞能力。

2.3 防舞

“防”就是在线路设计或运行阶段对存在发生舞动可能性的线路区段加装防舞器,防患于未然。经过数十年的研究和探索,已有多种防舞技术应用与输电线路,中国在舞动治理和防舞技术方面也积累了丰富的经验,取得了良好的效果。相对于“避”和“抗”,“防”的造价是最低的,也容易实现。防舞技术可以在线路规划设计阶段实施,也可以在线路建成后运行阶段实施。后者一般都是在预判线路可能发生舞动,或在线路已发生舞动后开展的工作,是操作简单、效果良好的舞动防治技术。“防”舞技术主要是加装防舞装置。

目前,国内外常用的防舞装置有很多,按照其原理大都可以分为:以改变导线自身动力学特性为目的,如阻尼间隔棒、失谐摆防舞器、压重防舞器、线夹回转式间隔棒、终端阻尼器、整体式偏心重锤、双摆防舞器和拉线防舞器(或称相地间隔棒);以改变导线所受到的气动载荷为目的,包括空气动力阻尼器、扰流防舞器、气动阻尼片。

1)在改变导线自身动力学特性的装置方面,“线夹回转式间隔棒+双摆防舞器”组合方案是目前在中国应用最多、范围最广、电压覆盖最全的经典防舞方案。文献[6]对特高压等级线路的防舞机理进行了细致分析,提出了以稳定性机理为基本理论的特高压线路防舞设计理念;并在该机理基础上,设计

开发了两种新型防舞装置,包括可以提高该类型线路在受到冰风激励下稳定性的线夹回转式间隔棒双摆防舞器 RCSDPAD,以及具有改变覆冰截面形状、减轻激励力的作用线夹回转式间隔棒 RCS。2016年1月和2018年2月,湖北地区先后分别遭受了大范围雨雪冰冻灾害的影响,灾后统计数据(见图1)表明,135条110 kV及以上舞动线路中,安装双摆防舞器的线路仅有6条,且均未出现本体受损^[7]。

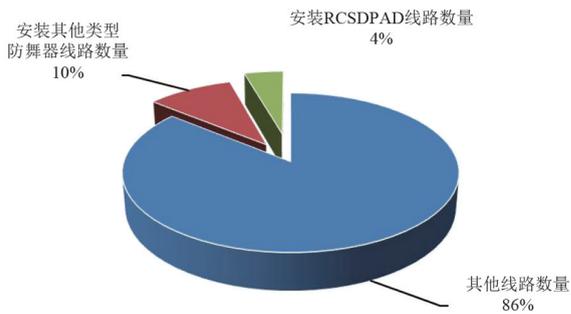


图1 按照防舞装置类型对湖北舞动线路统计(条数比例)

同时,相间间隔棒在中国线路中的应用也相对较多。相间间隔棒具有保持导线间距,防止相对运动的效果。根据德国、加拿大以及中国加装相间间隔棒的若干条输电线路运行状态来看,其在防止舞动引起的金具破坏,甚至断线倒塔等事故方面有着很好的效果^[8]。加装于单相分裂导线上的间隔棒,也有明显的防舞减振效果。但是实际的运行经验表明,相间间隔棒也存在一定缺陷:首先,由于扭转与其他方向剧烈振动相耦合,产生的直接后果是要么导线被严重磨损,要么棒体因反复弯折被折断;其次,相间间隔棒会在两端导线同步舞动时失去防舞效果;最后,舞动期间覆冰棒体弯折对两相导线电气安全距离的影响机理尚不明确。

文献[9]在充分调研国内相关技术研究现状的基础上,通过开展拉线防舞装置限位调节范围研究、自动式限位式装置研制、半自动式和被动式限位装置研制、限位式防治技术总体设计方案等工作,得出了限位式防舞装置中调节装置的调节范围,研制出了自动式、半自动式、被动式等3种限位装置,提出了限位式防治技术总体设计方案。所研制的自动式、半自动式、被动式等3种限位装置及配套金具无论是机械强度还是电气性能指标均满足现行国家标准、行业标准及规范的要求,也满足输变电工程的使用要求,为工程设计和建设提供技术支撑。

动力减振器技术也获得了一定发展,文献[10]在针对覆冰四分裂导线舞动特征开展详细仿真基础上,提出一种基于线性共振原理的分裂导线防舞器,并给出其参数优化设计准则,该防舞器具有重量轻、制造简单、成本低、防风雪等优点。基于非线性能量槽(nonlinear energy sink, NES)和颗粒阻尼技术的零频防舞器设计理念也于近期被提出^[11],并开展了优化设计、试制加工和相关测试,试验室测试结果表明,零频防舞器在阻尼特性和共振频域宽度等方面,表现出了一定优越性。

此外,从 Den Hartog 和 Nigol 两种舞动机理来看,输电导线的阻尼特性是影响导线舞动的重要因素,也是对多种防舞装置进行设计和改进的重要参数。文献[12]通过对导线单自由度和多自由度耦合振动的分析研究后得出,导线的阻尼越大,导线起舞临界风速就越大,越有利于防舞。终端阻尼器的设计就是基于此原理。此外,带有阻尼特性的相间间隔棒^[13-14]和线夹回转式间隔棒^[15-16],都是以增加线路阻尼特性进行的针对性改进产品。

2)在考虑空气动力学特性的防舞装置方面,扰流防舞器就是基于此原理进行设计的产品之一,通过将其缠绕于输电导线上使导线截面部分被改变,相邻导线截面的不同会造成其所受气动力相互干扰和抵消,从而达到抑制舞动的目的。该装置已在湖北地区部分线路上有所应用。

气动阻尼片是一种空气动力学稳定装置,目前该装置的实际防舞效果在低电压等级线路上得到了良好的体现,文献[17]用计算流体动力学方法评估了扰流防舞器等防舞装置对导线气动力系数的影响,通过数值仿真评估发现,该类型防舞器对防止导线舞动有明显效果。悬挂式阻尼片可以有效抑制导线的 Den Hartog 舞动,相比固定式其更为有效。

3)另外,当受客观因素限制,重要线路无法实现有效避舞、抗舞、防舞时,差异化设计方法就成为了目前最实用、有效的舞动应对方法,同时差异化设计技术也是目前防灾减灾领域较为热门的研究方向,属于传统避舞、抗舞、防舞技术的组合优化或提升应用,难度主要侧重于如何才能充分发挥二者的最大防舞效果。此外,针对防舞装置的粘滞阻尼元素开展研究,进一步促进导线舞动能量向内能形式转化,降低舞动诱发时的气动负阻尼,从而有效提升防舞效果。

2.4 测 舞

“测”主要分为舞动特征监测和风险预测。前者是对导线舞动时间、幅值、频率、模态等特征的记录;后者是基于历史案例、舞动机理和气象预报,对未来一段时间内线路舞动风险进行分析、评估和判断。二者虽时间属性不同,技术手段上也存在显著差异,但二者存在相辅相成关系,同样不可或缺。

2.4.1 舞动特征监测

目前,舞动特征监测主要有视频监拍技术和传感器技术。

1) 基于视频监拍技术研发的舞动监测装置,一般由视频监测单元、网络传输单元以及后台存储展示单元组成^[18]。该技术的优势在于适用范围广,除了监测舞动还可对外力破坏、异物、鸟害和山火等灾害进行监测,适用性、经济性较好。所存在的弊端主要是对电池、网络传输要求高,采集信息量有限,容易受到积雪、冻雨、大雾等恶劣气候条件影响。为了克服这些不足,文献[19]基于 5G、自组网、人工智能以及边缘计算等前沿技术,将测试设备小型化并可靠封装,有效提升恶劣天气的适应能力;同时引入边缘计算技术,优化硬件逻辑构建、特征识别算法和数据传输结构,充分降低电源和通信网络要求。

2) 传感器技术可分为基于惯性加速度和空间定位两个技术方向。前者的研究中,文献[20]设计了利用加速度传感器测量输电导线摆动振幅和摆动角度的方法来监测输电导线单点舞动的方案,可实现在载体摆动位移超过警戒值时系统发出预警。文献[21]采用传感器与间隔棒一体化封装方法,但未考虑导线扭转情况以及安装位置对测量精度的影响。基于 MEMS 基础芯片以及边缘计算技术,文献[22]研发了低功耗、集成式舞动监测传感器,并在安徽、河南、湖北、内蒙古等导线易舞省份开展了大量应用,初步构建了国家电网有限公司重点线路舞动监测系统,是目前专业测量舞动振幅、频率等特征领域内较为主流的测试技术。文献[23]针对线路舞动模态构型,考虑实际传感器布置数量有限的特征,提出了一种基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法。

基于空间定位技术监测线路舞动技术研究和装置研发方面,是近年来的研究热点。文献[24-27]先后基于北斗地基增强系统、电力北斗精准服务网、

北斗差分技术进行输电线路舞动监测的装置,可实现舞动轨迹和频率的监测。包括 RFID 等技术^[28-29]也被探索应用,但受体积、功耗、外观和电晕等客观因素限制,上述装置依然存在成本较高、多个监测单元同步采集与传输以及取能装置可靠性不足等问题。此外,文献[30-33]分别研究了光纤信号解调方法,并应用于导、地线和 OPGW 光缆舞动状态监测,但在现场应用上难度较大。

客观准确的舞动特征监测,不仅可以验证舞动评估手段是否合理,也可以验证防舞装置的实际效果如何。因此,有必要针对现有舞动监测装置的不足,结合当前智能芯片、边缘计算、自组网、宽带卫星等技术的发展,深入开展可靠的舞动智能监测技术和装置研发。

此外,目前国内外的现场舞动观测所存在的缺陷包括:只能在数公里范围的有限形式的线路档进行试验,无法对所有档距、电压等级、耐张段进行充分模拟;同时受到当地局部气候严格限制,无法对风速、风向等现场条件进行调整。但是安装了小型化舞动监测装置的线路段即可成为“试验线路”的一部分,安装越多,观测数据就越多,舞动特征分析和评估也就更全面,可规避舞动风洞和现场试验的缺陷和不足,降低试验成本,使实际运行的线路状态数据更具研究价值。

2.4.2 舞动特征预测

严格来说,舞动风险预测是从避舞技术中的舞动分布图绘制发展出的一个新方向。由于充分考虑了气象预测数据,时间尺度更灵活,参考案例更丰富,尤其适用于已建成的庞大、复杂输电网络。从舞动诱发所需的外在条件来说,风场环境和偏心覆冰预测是预测舞动风险的关键要素。前者包含风力、风向两个气象基本要素,可以从预报材料中直接得到;但后者的形成机理相对复杂,甚至舞动预测所关注的并非覆冰的重量(目前大多数覆冰监测、预测擅长的方向),而是更为复杂的气动外形(如新月型、D型和扇形等)。目前覆冰预测方法和技术的准确度还有待提升。所以,天气系统本身的混沌特征,再迭加覆冰导线舞动诱发过程本身具有强非线性特征,输电线路舞动风险预测的难度和挑战非常大。

按照预测精度和对象分类,目前常用的舞动预测方法主要分两种:

1)仅考虑气象地理条件,把具有大风和覆冰条件的区域筛选出来,先进行覆冰预测^[34-39](目前主要关注覆冰厚度特征预测,而非气动外形、偏心特征,然而后者才是诱发舞动的关键性条件);再按照以往舞动案例记录的条件数据交叉匹配,确定各地风险等级的大小^[40]。

2)利用大数据、人工智能等技术,对以往舞动案例数据特征进行全面分析和学习,建立舞动风险预警模型^[41-44],将未来某线路所在地区天气预报参数输入该模型,就可以得出未来时间段该线路舞动风险大小。其中,文献[45]利用支持向量机方法建立了16类舞动影响因素变量与4类舞动特征(是否舞动、舞动时长、破坏程度、是否跳闸)的关联模型,给出了各特征变量与舞动的相关系数排序,提出了一种引入小样本分析的基于机器算法的舞动预测方法;提出了基于输电线路舞动的多分类器集成学习决策机制,针对舞动时长和舞动概率的连续值输出问题采用加权平均决策集成学习,针对破坏程度和是否跳闸的离散值输出问题采用加权投票决策方法集成学习。

由此可见,两种预测方法都离不开气象预报,但第一种预测精度无法具体到杆塔段,单独使用第二种方法则会出现“气象数据精度越高,计算量越大”的问题,无法做到实时快速研判。所以,目前主流方法是将二者结合使用,先确定风险区域,再从高风险区域集合中确定线路段风险等级。同时,得益于监测技术的发展和设备的推广,目前驰振案例数据越来越多,样本特征也越来越丰富,且表现出正反面数据量严重不均衡等特征。基于支持向量机、神经网络、随机梯度森林等人工智能方法预测和判断舞动风险的技术,表现出过拟合等缺陷,基于人工智能技术的舞动风险预测方法具有更深的研究潜力。

3 应急舞动抑制

由前述可知,目前电网舞动应对技术体系的短板在于,舞动发生期间可以采取哪些应急保护措施,哪些主动干预手段可以缩短舞动持续时间。现阶段“可供选择和参考的”主动抑舞方法包括采取拉线(可改变线路结构参数)和针对覆冰舞动导线开展融冰、除冰(可消除偏心覆冰、降低气动载荷波动)。

3.1 融冰抑舞

现阶段的融除冰技术,按照原理可分为热融冰、化学融冰、机械除冰、激光除冰等^[46-47]。目前适用于电网的机械除冰、激光除冰以及其他融除冰技术尚处于探索阶段,一般适用于重覆冰时的融除冰,无法对舞动中的覆冰导线开展作业。针对融冰抑舞,可供参考的是热融冰和化学融冰方法。

3.1.1 热融冰方法

热熔冰方法包括过电流融冰法、交流短路融冰法和直流融冰法^[48-50]。其中,过电流融冰法通过提升线路电流的方式,升高线路温度实现融冰。该方法可以在不影响线路正常运行的情况下使用,然而交流潮流难以控制导致该方案落地具有较大困难。交流短路融冰法需短接两相或三相导体,利用产生的短路电流产生热量来提高导线温度,融化线路覆冰。该方法在国内外均已得到普遍使用,然而无法用于多分裂导线场景的缺陷阻碍了其进一步推广。

直流融冰技术借助整流电路将交流电源转变为可控的直流电流,进而控制电流进行精准融冰^[51-52]。该方法对于线路导体材质、覆冰尺寸等因素具有较高的适应性和可控性。而且研究表明:交流短路融冰法^[50]在应用于500 kV及以上交直流输电线路覆冰的场景时面临一系列难以克服的困难;而直流融冰装置具有可变的电源容量,与交流短路融冰相比直流融冰更加具有优势。

多个省份针对长时间覆冰舞动的主动抑制问题,曾开展少量应急直流融冰作业的尝试和探索。但实践表明,由于舞动灾害与重覆冰灾害有着本质区别,利用热融冰技术来实施主动抑舞,其可行性、经济性和安全性均无法满足实际运维需求。主要原因在于其存在以下难以克服的难题。

1)可行性方面:由于覆冰舞动所需的覆冰量较小,短时间内即可满足失稳条件,并使舞动垂向和扭转达到较大幅值。但热融冰作业不仅需要提前在站内部署融冰装置或移动融冰车,同时也需要设备管理、调度等部门协同配合,技术难度较大,无法做到及时高效的主动抑舞。

2)经济性方面:导线电阻低,想要达到融冰温度,短路发热需消耗的电量非常大。由于覆冰舞动发生时正值冬季寒潮甚至雨雪冰冻灾害期间,电能供应较为紧张,线路自身消耗电能过多会导致电网

运行经济性降低。

3) 安全性方面: 传统的热融冰技术涉及电网设备多, 期间大电流对各个环节的影响不容忽视, 且舞动导线受热后融冰情况存在随机性。系统能量的平衡状态被破坏后发展、演变机理不明确, 容易对金具、绝缘子甚至横担造成较大冲击载荷, 存在隐性损伤风险, 影响后续电网安全运行。

3.1.2 化学融冰方法

化学融冰是一种借助化学融冰试剂, 降低冰融点的方法^[53]。该方法目前一般用于道路融冰、场地融冰或大型建筑结构融冰, 具有简单实用、融冰比例可控性强等优点, 但目前在电网设备融冰中使用较少。主要原因是融冰试剂会对环境造成一定程度的污染, 甚至腐蚀导线、金具等结构。目前, 该技术在舞动抑制方面尚不具备可行性, 除非有新型可靠、快速的融冰方法研发并通过试验测试。

3.2 拉线抑舞

现阶段的拉线抑舞可参考“防”舞方法中的拉线防舞^[54-56], 通过在单相导线档内安装拉线, 并将另一端固定于地面连接装置, 可实现较好的防舞效果。然而在导线发生覆冰舞动后, 想要通过拉线防舞器实现主动抑舞, 则存在以下问题:

1) 拉线安装过程中, 对导线、绝缘子、杆塔的瞬态冲击影响过程尚不明确。防舞过程中, 导线一直被拉线固定, 自始至终没有出现大幅值的运动。但实施主动抑舞作业时, 安装拉线会导致舞动能量在短时间内传递到导线两端线夹、绝缘子和横担上, 形成较大冲击载荷, 给连接金具、绝缘子串连接部位等薄弱环节带来损伤风险。

2) 临时拉线布设不便。常规的标准地锚应需提前布设混凝土基础, 无法满足现阶段线路舞动的突发性和应急性需求。

4 讨论与展望

传统观点认为架空导线一旦发生舞动, 其较大的能量无法短时间内消除。这是目前现场无法采取任何技术手段抑制甚至消除舞动的根本原因。但是随着这一偶发性问题变得越来越频繁, 在新技术、新方法、新装备不断进步后, 这一观点被推翻已经变得越来越可能。依照目前科技发展趋势, 安全可靠、经

济实用且便捷有效的技术装备很有可能从以下两个方面取得突破:

1) 随着无人机、人工智能、无线传感、高能电池以及复合材料等技术的出现, 以新型拉线等为代表的新装置将变得越来越小型化, 便于现场快速施工, 从而在几小时内完成相关作业。

2) 结构阻尼是线路防振减振的关键, 以电磁阻尼、颗粒阻尼等粘滞阻尼为代表的阻尼技术将被重点关注, 从而有效降低风场和偏心覆冰带来的气动负阻尼, 破坏舞动能量平衡。

5 结论

上面总结介绍了现有电网舞动灾害应对技术体系的优势、不足以及近期非线性动力减振、舞动机理、人工智能等相关领域研究成果, 指出今后可能实现更好舞动应对效果的技术领域和研究方向, 力图为解决非舞动易发区内线路段偶发的长时间舞动问题提供解决思路和方法, 建立完备的“避、抗、防、测、抑”舞动灾害应对技术体系, 为后续防冰防舞工作提供先进技术支持, 为电网防灾减灾和线路运维工作提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 李军辉, 程永锋, 龚坚刚, 等. 气象地理法在舞动分布图绘制中的改进与应用[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 121-126.
- [2] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 等. 输电线路舞动的有限元分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004(1): 76-80.
- [3] JIANG Yanyao, CHANG J J, LEE C-H, et al. An experimental study of the torque-tension relationship for bolted joints[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001, 16(4/5): 417-426.
- [4] 杨风利, 党会学, 杨靖波, 等. 导线舞动时输电铁塔承载性能及破坏模式分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 135-141.
- [5] 杨风利, 党会学, 杨靖波, 等. 500 kV 输电线路塔线体系舞动响应分析[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 139-145.
- [6] 任西春, 朱宽军, 刘超群. 特高压输电线路新型防舞器建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 96-101.
- [7] 赵彬, 程永锋, 王景朝, 等. 2015年初湖北架空线路覆

- 冰舞动灾害原因的理论分析与应对措施[J].振动与冲击,2017,36(10):93-97.
- [8] 郭应龙,李国兴,尤传永.输电线路舞动[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [9] 李新民,朱宽军,刘彬.典型覆冰导线空气动力学特性数值和试验模拟[J].高电压技术,2014,40(2):427-433.
- [10] 胡景.覆冰四分导线舞动与新型防舞器的数值模拟研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [11] 赵彬.特高压导线覆冰舞动机理与新型防舞器的应用基础研究[D].北京:中国电力科学研究院,2017.
- [12] 秦朝红.非线性动力学双参量奇异性方法及其工程应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [13] 严波,崔伟,何小宝,等.三相导线三角形排布线路相间间隔棒防舞研究[J].振动与冲击,2016,35(1):106-111.
- [14] 李新民,朱宽军,李军辉.输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J].高电压技术,2011,37(2):484-490.
- [15] 刘连光,赵强,葛江锋,等.线夹回转式导线阻尼间隔棒防舞模型与评估方法[J].电力建设,2014,35(4):59-64.
- [16] 刘连光,赵强,刘自发,等.线夹回转式导线阻尼间隔棒防舞机理与模态分析[J].电力建设,2014,35(3):74-78.
- [17] 楼文娟,孙珍茂,吕翼.扰流防舞器与气动力阻尼片的防舞效果[J].电网技术,2010,34(2):200-204.
- [18] 赵建青,姚瑶,邱玩辉,等.基于输电线路在线巡视系统的智能预警系统研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):49-54.
- [19] 李孟轩,欧文浩,马潇,等.基于惯性传感单元的输电线路舞动监测系统设计[C]//2020年中国通信学会能源互联网学术报告会,成都:中国通信学会学术委员会,2020:6.
- [20] 张帆.基于加速度传感器定位的输电线路舞动监测装置研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [21] 耿亮,王峥,王海宝,等.基于加速度传感器的输电线路舞动监测系统研发及应用[J].电气时代,2018(4):80-84.
- [22] 张树华,全杰,张璠,等.面向能源互联网智能感知的边缘计算技术研究[J].电力信息与通信技术,2020,18(4):42-50.
- [23] 龚彧,赵峰,李冬华,等.基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):97-104.
- [24] 袁敬中,潘国兵,谢景海,等.基于多模空间距离权重融合的高压架空输电线路舞动监测模块的设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):173-179.
- [25] 张孜豪,稂龙亚,晏节晋,等.基于北斗地基增强系统的输电线路舞动监测系统[J].电力信息与通信技术,2020,18(10):42-47.
- [26] 李锦林,张丽萍,马胜,等.基于北斗系统的输电线路舞动监测系统[J].中国新通信,2021,23(1):164-166.
- [27] 彭槐振.基于北斗差分定位的导线舞动在线监测研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [28] 王泉智,何怡刚,邓芳明,等.基于RFID加速度传感器标签的导线舞动在线监测[J].传感器与微系统,2017,36(8):99-102.
- [29] 王泉智.基于RFID传感器标签的导线舞动在线监测技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [30] 王晓楠.架空输电线路风舞监测信号分析与处理[D].成都:电子科技大学,2018.
- [31] 谢凯,张洪英,赵衍双,等.导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J].激光与光电子学进展,2018,55(7):113-125.
- [32] 穆汝婷.光纤复合架空地线舞动信号识别方法研究[D].吉林:东北电力大学,2020.
- [33] 曾荣,马媛媛,张传虎.偏振编码BB84系统在OPGW光缆舞动情况下的稳定性[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):749-752.
- [34] 庄文兵,祁创,熊小伏,等.计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):6-13.
- [35] 陈勇,李鹏,张忠军,等.基于PCA-GA-LSSVM的输电线路覆冰负荷在线预测模型[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):110-119.
- [36] 王燕,杜志叶,阮江军.高压架空输电线路覆冰情况下风险评估研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(10):84-90.
- [37] 朱斌,潘玲玲,邹扬,等.考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):79-84.
- [38] 黄宵宁,许瑞,许家浩.南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(23):111-116.
- [39] 邸悦伦,蔡泽林,李丽,等.环渤海地区大范围输电线路舞动风场特征分析[J].电网与清洁能源,2021,37(7):121-129.
- [40] 廖峥.基于BP神经网络的输电线路舞动预测及电网风险预警方法[D].重庆:重庆大学,2017.
- [41] MOU Z, YAN B, LIN X, et al. Prediction method for galloping features of transmission lines based on FEM

- and machine learning [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103031.
- [42] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等.计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J].电力系统保护与控制, 2018,46(9):86-93.
- [43] 廖峥,熊小伏,李新,等.基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J].电力系统保护与控制, 2017, 45(19):154-161.
- [44] 汉京善,吕海平,李丹煜,等.基于 GA-BP 神经网络算法的输电线路舞动预警方法[J].电网与清洁能源, 2021,37(4):1-7.
- [45] 蒋明,赵汉棣,马小强.高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J].电力安全技术, 2020, 22(4):26-32.
- [46] 王勇,苗虹,莫思特,等.高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J].电力系统保护与控制, 2020,48(18):178-187.
- [47] 李刚,邵毅.电力系统较为常用的线路融冰方法[J].科技与企业, 2013(5):275.
- [48] 覃晖,邓帅,黄伟,等.南方电网输电线路融冰措施综述[J].电力系统保护与控制, 2010,38(24):231-235.
- [49] 陆佳政,张红先,方针,等.湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J].电力系统保护与控制, 2009,37(12):99-105.
- [50] 赵国帅,李兴源,傅闯,等.线路交直流融冰技术综述[J].电力系统保护与控制, 2011,39(14):148-154.
- [51] 钟科,罗桑.沥青路面融冰化雪技术研究综述[J].公路交通科技(应用技术版), 2013,9(5):268-270.
- [52] 江宇轩.输电线路车载直流融冰装置设计与控制研究[D].扬州:扬州大学, 2019.
- [53] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制, 2010, 38(21):57-62.
- [54] 肖良成,李新民,江俊,等.典型覆冰导线气动绕流计算及动态特性分析[J].中国科学:结构和系统动力学与控制专刊, 2013,43(4):500-510.
- [55] 李梦丽,米俊,张博,等.相间间隔棒对特高压八分裂导线的静态张力影响分析[J].河南科技, 2017(1):123-125.
- [56] 向玲,唐亮,卢明,等.三相特高压输电线路相间间隔棒防舞仿真分析[J].中国工程机械学报, 2017, 15(4):298-304.
- 作者简介:**
赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;
刘彬(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾;
朱宽军(1969),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾。(收稿日期:2022-07-20)
- *****
- (上接第 6 页)
- [12] 鲁元兵,楼文娟,李焕龙.输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析[J].振动与冲击, 2010,29(9):47-50.
- [13] 王黎明,曹露,高亚云,等.输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J].高电压技术, 2018, 44(8):2442-2449.
- [14] YAN Bo, CHEN Kequan, GUO Yueming, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):216-225.
- [15] 张殿生.电力工程高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社, 2003.
- [16] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.塔线系统脱冰跳跃动力响应分析[J].振动工程学报, 2010, 23(1):86-93.
- [17] HUANG Guizao, YAN Bo, LIU Jiaqiong, et al. Experimental study on torsional behavior of twin bundle conductor lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1423-1431.
- [18] ROSHAN F M, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46:1-11.
- [19] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1964, 111(10):1736-1746.
- [20] KOLLAR L E, FARZANEH M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):604-611.
- 作者简介:**
闫向龙(1996),男,硕士研究生,研究方向为输电线路脱冰跳跃动力特性;
郭裕钧(1989),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;
黄桂灶(1993),男,博士,助理研究员,研究方向为输电线路脱冰、舞动动力学;
张血琴(1979),女,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;
吴广宁(1969),男,博士,教授,研究方向为高电压与绝缘技术。(收稿日期:2022-08-29)

台风对电网的影响分析及应对措施

徐湘忆,毛玮韵,高凯,任辰

(国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437)

摘要:台风是中国中东及东南沿海地区较为常见的灾害性天气,伴随台风的大风、降水及次生灾害会严重威胁电网设备安全运行,且传统气象部门台风预报精度有限,对电网制定防台应对措施指导意义不强。文中对近年来台风对沿海地区电网设备的主要影响进行了分析,介绍了基于国网台风监测预警中心的台风监测预警机制,主要包括台风监测预警中心总体架构、主站和子站功能以及中期、短期预警发布机制;提出了调度应急处置、设备性能提升、隐患排查治理、加强沟通联动等电网设备抗台风相关技术和管理措施。通过对电网遭受台风侵袭的危害特征、监测预测技术以及应对措施进行讨论,为电网防台抗风工作提供有益经验。

关键词:台风;电网防台抗风;监测预警;应对措施

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)06-0031-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220605

Impact Analysis of Typhoon on Power Grid and Its Countermeasures

XU Xiangyi, MAO Weiyun, GAO Kai, REN Chen

(State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: Typhoon is a common disastrous weather in the middle east and southeast coastal areas of China. Strong winds, precipitation and secondary disasters associated with typhoons can seriously threaten the safe operation of power grid equipment. Moreover, the accuracy of typhoon prediction in traditional meteorological departments is limited, which is not of strong guiding significance for power grid to formulate typhoon prevention countermeasures. The main impact of typhoons on power grid equipment in coastal areas in recent years is analyzed, and the typhoon monitoring and early warning mechanism based on State Grid typhoon monitoring and early warning center is introduced, mainly including the overall structure of typhoon monitoring and early warning center, the functions of main station and substations, and the medium-term and short-term early warning release mechanism. The technologies and management measures related to typhoon resistance for power grid equipment, such as dispatching emergency disposal, equipment performance improvement, hidden danger troubleshooting and treatment, and strengthening communication and linkage, are proposed. It is hoped that the discussion on the hazard characteristics, monitoring and prediction technologies and countermeasures for power grid suffering from typhoon will provide useful experiences for the typhoon prevention and wind resistance work of power grid.

Key words: typhoon; typhoon prevention and wind resistance for power grid; monitoring and early warning; countermeasures

0 引言

中国位于亚洲东部,太平洋西岸,背陆面海,中东及东南沿海地区属于亚热带季风气候,每年6月至10月属于台风高发期。中国习惯将形成于26℃

以上热带洋面上的热带气旋(tropical cyclones)称为台风,依据国家标准 GB/T 19201—2006,热带气旋按中心附近地面最大风力划分为6个等级:热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风^[1]。

据统计,2018—2021年期间,每年登陆中国的

热带气旋平均 7.25 个,其中 3.25 个达到台风及以上等级,台风经常在福建、浙江、广东等地登陆,影响范围包括江西、安徽、江苏、山东、辽宁及上海等地。伴随台风的大风、降水天气不仅会造成拔树倒屋、农田受淹等直接经济损失,也会严重威胁电网安全^[2]。目前中国特高压交直流输电网架主要集中在用电需求大、经济社会发展水平高的沿海及部分内陆地区,更容易遭受台风灾害侵袭;对于分布更为广泛的 500 kV 及以下电压等级输电线路,由于其杆塔抗风设计水平一般随电压等级逐级降低,台风灾害可能会导致线路倒塔、断线等严重后果;伴随台风的大暴雨更可能会引发滑坡、泥石流等次生地质灾害,严重威胁线路杆塔、变电站等输变电设备的安全运行。

随着电网规模的不断扩大,电网对台风灾害监测预警技术的需求日益迫切。目前,国内外相关学者结合台风气象因素进行电力系统风险评估已有一定研究。文献[3]从整体进行了电力系统风险评估;文献[4]对台风的风场进行了研究;文献[5-9]对输电线路风偏特性开展了研究,分析风偏特性的影响因素和防护措施,还从台风对电网运行的实际危害中汲取防范经验^[10-13]。但现有文献对台风侵袭下电网的预警预报及应对措施研究较少。因此,有必要研究台风对电网的影响以及电网防台抗风的预警机制与应对措施,减小台风带来的危害,保障电力供应。下面针对近年来台风对电网的影响进行分析,梳理台风过境期间基于国网台风监测预警中心的台风预测预警响应机制,提出电网设备防台抗风能力提升的技术手段和管理措施。

1 台风对电网的主要危害

2016 年福建遭遇台风“莫兰蒂”侵袭,造成多条 500 kV 线路损坏^[14]。2017 年台风“天鸽”在广东珠海南部沿海登陆,导致广东电网 35 kV 及以上变电站停运 77 座,110 kV 及以上线路跳闸 138 条,影响用户 292.1 万户^[15]。2019 年台风“利奇马”登陆浙江,造成浙江电网 500 kV 线路跳闸 32 条次、220 kV 线路跳闸 87 条次,3 个 220 kV 变电站全停^[16]。2020 年强台风“黑格比”在浙江沿海登陆,造成上海电网线路跳闸 92 起(停运 39 起),其中 110 kV 2 起、35 kV 4 起、10 kV 86 起,影响台区停电 296 个。

2021 年,强台风“烟花”前后两次在浙江登

陆,7 月 24 日 8 时左右开始影响上海,至 7 月 27 日 8 时,台风主要影响基本结束。台风“烟花”强度强、移速慢,对上海影响持续时间长,期间上海电网共计发生线路跳闸 402 起,其中 110 kV 5 起、35 kV 39 起、10 kV 358 起,影响台区停电 4292 个。受恶劣天气不可抗力影响,部分故障抢修时间较长。

综合来看,台风登陆前后,登陆地及附近地区的电网可能出现设备密集跳闸的情况,容易引发极端薄弱供电方式,造成变电站全停,导致电网局部供电能力下降。台风影响过程中,树木倒伏(见图 1)、树枝碰线(见图 2)、异物短路为台风天气下引起跳闸的主要原因,部分树木修剪不到位、户外设备裸露点等问题仍然存在,防台抗灾方面仍有大量工作要做。



图 1 台风引起树木倒伏



图 2 台风引起树枝碰线

2 基于国网台风监测预警中心的台风监测预警机制

2.1 台风监测预警中心架构

以提升电网防台抗风减灾能力为宗旨,国家电网有限公司在 2016—2021 年期间,逐步建成国网台风监测预警中心,实现九省两市(浙江、福建、江西、安徽、江苏、上海、山东、辽宁、吉林、黑龙江、天津)110 kV 及以上电压等级电网台风监测的全面覆盖和台风预报预警信息的高精准发布。

台风监测预警中心由主站和九省两市子站以及相关台风监测、数据传输和处理硬件设施构成。台风监测预警中心总体架构如图 3 所示。

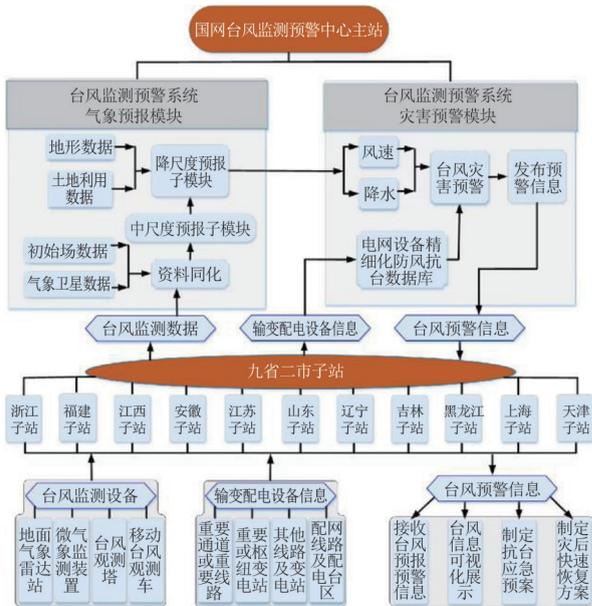


图3 台风监测预警中心系统架构

2.2 台风监测预警中心主站和子站

九省两市子站将各自区域内的气象监测数据通过上行数据传输网实时上传至中心主站;同时收集各电网输变配电设备信息,主要包括特高压输电线路或受台风灾害影响严重地区重要线路的三维建模信息、设计文件、计算载荷等以及其他线路运行资料、设计风速等,将上述信息上传至中心主站。

中心主站接收汇集九省两市子站上传的实时气象监测数据,结合接入的气象卫星数据和全球大气初始场数据先通过中尺度台风预报子模块获得 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$ 精度台风预报结果,再应用降尺度技术获得九省两市电网亚公里级($1\text{ km}\times 1\text{ km}$)台风预报结果,同时对台风路径、强度、风场、降雨量等进行可视化展示。中心主站基于九省两市输变配电设备信息,建立各自电网输变配电设备精细化防风抗风特性数据库,结合相应电网台风监测结果及 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 分辨率预报数据,及时、准确、有效发布台风预警信息,并将该预报预警信息通过下行数据传输网实时分发至相应的九省两市子站。九省两市子站在接收到由中心主站发布的台风预报预警信息后,根据各自电网防风抗台软硬件支撑能力,制定科学、经济、合理的防风抗台应急预案及灾后快速恢复方案,同时可视化展示各自电网风场、降雨量等信息及台风路径、强度等信息。

2.3 台风监测预警发布机制

台风监测预警中心可提前72 h从多层次实时监测台风中心轨迹的风速、风向以及重要输电通道

局部风速、降雨量等重要信息,并在台风来临前及过境期间发布中期和短期预警。其中中期预警为对未来72 h的台风灾害预警,每天发布2次;短期预警为对未来24 h的台风灾害预警,每天可发布4次。特高压等重要输电通道已完成杆塔三维力学分析数据库建设,台风灾害预警可精确至主材级别,对电网防风抗风工作起到了技术支撑作用。针对不同的预警等级,可制定对应的应急措施^[17]。

2021年9月台风“灿都”期间,上海电网依托台风中心主站和子站,跟踪观察预测风速变化和局部地区风速、雨量监测数据,对比线路杆塔设计值评估上海地区受台风影响的110 kV及以上杆塔风偏或倒塔预警等级。风偏闪络、异物外破等预警信息以日报的形式发送至运行单位。“灿都”期间,上海电网共发出台风灾害高风险线路预警信息80条、中低风险线路预警信息440余条,有力支撑各单位提前做好防范措施和应急准备。例如,上海金山供电公司在收到预警后,及时巡查线下大棚加固情况,加强输电通道隐患整改落实,提前完善应急抢修行动方案,有效防止了特高压复奉直流重要输电通道下蔬菜大棚、薄膜、彩钢板等异物被大风吹起碰线的意外发生,有序控制了台风次生灾害的扩展。

3 电网设备抗台风技术与管理措施

3.1 调度应急处置

台风登陆前,为增强电网网架强度,应对电力系统的运行方式提前进行调整,尽可能使全网保持全接线运行,具备复电条件的输变电设备提前复电,部分备用线路或备用主变压器可考虑将其转为正常运行;将沿海变电站无人值守模式恢复为有人值守模式,全方位做好防风抗风部署准备^[12]。台风影响下,需迅速辨识网架薄弱环节,结合风险危急程度排序,关注高电压等级线路故障跳闸及重合情况,及时开展故障线路试送。若地区电网存在孤岛运行的潜在风险,应提前做好孤岛运行的预控准备,控制该地区内电厂出力,尽量保持发电用电自平衡^[12-13,16],最大限度地减少台风造成的不良后果及经济损失,维护国家安全、社会稳定和人民生命财产的安全^[18]。

3.2 设备性能提升

配电设备防风抗风设计水平通常较主网设备

低,因此更易遭受台风侵袭和影响。以上海电网为例,其配电网建设起步早,部分区域老旧设备仍然占一定比例。架空户外设备受到近年来生态环境改善影响,树线矛盾、小动物(鸟、松鼠)、外部异物(风筝、气球)等数量呈现上升趋势。另外,由于杆塔基础周围土壤变化、拉线松弛等原因,少数线路存在杆塔倾斜风险。针对户外架空设备,一是全面选用全绝缘杆刀、全绝缘断路器,全绝缘熔断器、全绝缘横担等全绝缘设备,防止异物接地短路;二是对于线夹、接地环、避雷器导线连接处等裸露点,加装专用绝缘罩,使用绝缘自固包材进行绝缘包覆,实现线路全绝缘化;三是在架空线分段联络处,使用全绝缘杆刀,不使用断路器,减少二次设备故障导致的运行风险。

3.3 隐患排查治理

台风来临前需全面开展隐患排查整治:1)加强线路巡视工作,尤其是台风影响范围内的关键厂站和重要输电通道的特巡工作,对线路通道沿线的易漂浮物、大棚、彩钢瓦、树线矛盾等做好排查、清理、加固、拆除和修剪工作,加强对业主的危险源告知和风险宣传,在政府相关部门的支持下开展树木紧急修剪和大棚加固与拆除工作,增加户外设备抵御大风等极端天气的能力。2)对变电站门、窗户外构架、高型布置、排水沟、室外端子箱等做一次专项检查,检查清除站内及周边易漂浮物,部分受影响范围内重要变电站要安排有人值守。3)加强变配电站防汛设施检查,特别是地下变电站、地势低洼变配电站和电缆隧道,确保排水设施完好、防汛材料配备充足到位,做好防止暴雨倒灌的相关措施。4)排查施工现场临时工棚、线路跨越架、脚手架、井字架、塔吊、围墙及施工驻地隐患,并落实治理措施,组织好人员撤离工作。5)排查城市排水泵站等重要用户供电设施以及环网柜、配电箱、分支箱浸泡受潮隐患,检查临江防汛墙及排水设施,做好防汛防台各项措施,并加强运维保障。6)密切保持与重要用户、敏感用户的联系,认真开展重要用户、人员密集场所、用户地下站、泵站、码头、下立交和水产养殖户的安全用电服务。

3.4 加强沟通联动

借助防汛指挥部、气象等相关部门信息交互渠道及时掌握汛情灾情等紧急信息,有条件的可开展智能巡视^[19];强化与地方政府、防汛办、海事局、消防局、绿化、园林、市政等相关部门单位的联动机制,

加强沟通和联系,解决树线矛盾等问题,消除隐患源。同时做好抢修队伍、物资及配套保障等各项准备,增强 95598 接派单人员配置,确保故障报修通道畅通、信息流通快速、事故抢修便捷、应急支援迅速,更好地应对台风灾害影响。

4 结 论

上面分析了近年来台风对沿海地区电网设备的主要影响,介绍了基于国网台风监测预警中心的台风监测预警机制,提出了电网设备抗台风相关技术和管理措施,得出如下结论:

1) 台风对沿海地区的电网影响较为明显,台风登陆前后,登陆地及附近地区的电网可能出现设备密集跳闸、变电站全停,电网局部供电能力下降等情况。

2) 鉴于气象部门台风预报不具备电网自身抗台属性,国网公司建设了台风监测预警中心,基于九省两市输变配电设备信息,结合相应电网台风监测结果及 1 km×1 km 分辨率预报数据,及时、准确、有效发布台风中期和短期预警信息。

3) 为提升电网抗台风能力,应做好台风登陆前全接线运行、输变电设备复电、部分备用设备转正常运行,变电站无人值守模式调整等增强电网网架强度的各项抗台部署准备,并在台风影响期间做好故障线路试送、潜在孤岛系统发用电平衡调节等调度应急处置工作。

4) 为增强设备抗台风水平,建议配电设备选用全绝缘设备,裸露点处加装专用绝缘罩,架空线分段联络处使用全绝缘杆刀。同时加强台风来临前的隐患排查治理,开展针对性的线路巡视工作,检查清除站内及周边易漂浮物,实施变配电站防汛设施检查,排查施工现场临时搭建物,排查排水泵站等重要用户供电设施,与重要用户保持联络并提供安全用电服务。

5) 与相关部门加强沟通联动,及时掌握汛情灾情等紧急信息,合力解决树线矛盾等问题,消除隐患源;同时做好抢修队伍、物资及配套保障等各项准备,事故抢修便捷,应急支援迅速。

参考文献

- [1] 张勇,赵勇,王景亮,等.台风对电网运行影响及应对措施[J].南方电网技术,2012,6(1):42-45.

大功率电驱离心式压缩机组电压暂降问题 分析与治理

杨丽茹¹,张啟超¹,邹涛¹,马晴¹,徐方维²,郭凯²

(1.中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司输气管理处,四川成都 610213;
2.四川大学电气工程学院,四川成都 610065)

摘要:为有效治理含大功率电驱离心式压缩机组天然气压气站电压暂降问题,文中根据两座含大功率电驱离心式压缩机组压气站(简称压气站)的运行信息,通过分析压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率,提出压气站电压暂降分层分级治理方案。首先,根据压气站的设备参数信息,分析了压气站内电压暂降敏感设备类型、分布与连接关系;然后,分析了站内敏感设备电压暂降耐受机理,结合历史数据通过核密度估计方法拟合压气站电压暂降特征水平,利用能量损失函数评估敏感设备电压暂降故障概率;最后,根据压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率提出了有效的电压暂降问题分层分级治理方案。

关键词:压气站;压缩机组;变频器;电压暂降

中图分类号:TE 88 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0035-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220606

Analysis and Mitigation of Voltage Sag on High-power Motor-driven Centrifugal Compressor Units

YANG Liru¹, ZHANG Qichao¹, ZOU Tao¹, MA Qing¹, XU Fangwei², GUO Kai²

(1. PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610213, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to effectively control the voltage sag of natural gas compressor stations with high-power motor-driven centrifugal compressor units, a hierarchical mitigation scheme for voltage sag in compressor stations is proposed based on the operation information of two typical compressor stations with high-power motor-driven centrifugal compressor units (hereinafter abbreviated as compressor stations) and by analyzing the characteristic level of voltage sag and the failure probability of sensitive equipment in compressor stations. Firstly, according to the equipment parameter information of compressor stations, the type, distribution and connection relationship of sensitive equipment for voltage sag in compressor stations are analyzed, and then the mechanism of voltage sag tolerance of sensitive equipment in the station is analyzed. Combined with the historical data, the characteristic level of voltage sag in compressor stations is fitted by nuclear density estimation method, and the failure probability of voltage sag of sensitive equipment is evaluated by energy loss function. Finally, according to the characteristic level of voltage sag and the failure probability of sensitive equipment in compressor stations, an effective hierarchical mitigation scheme for voltage sag is proposed.

Key words: compressor station; compressor unit; frequency converter; voltage sag

0 引言

随着中国能源形势的不断紧张和环境问题的突

出,天然气长距离输气管道工程越来越多^[1]。压气站是天然气长距离输气管道工程的重要组成部分,通过站内压缩机组对天然气加压实现天然气远距离输送。一旦发生压缩机组停机,将会造成管网压力降低,影响管网的正常输气任务,造成巨大的经济损失,甚至影响某一区域的稳定^[2-3]。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51877141);西南油气田分公司输气管理处2021年科研计划项目(20210401-08)

某压气站投产后,先后多次发生因电压暂降(石化行业又称“晃电”)导致的压缩机异常停机故障。其中,既有因高压电网电压暂降致使变频器退出运行导致压缩机组停机,也有因低压辅助系统设备遭受电压暂降发生故障导致的压缩机组停机。针对压气站压缩机组电压暂降问题,现有研究主要集中在改变供电方式^[4-5]、加装补偿设备^[6-8]和改造用电设备^[9-10]3个方面:1)改变供电方式是指通过输电侧进行改造,减少压气站的电压暂降频次。文献[4]分析了压气站变电站供电方式、运行方式和负荷分配等对压气站供电可靠性的影响,提出了提高天然气压气站供电系统可靠性的技术措施。文献[5]提出了一种采用柔性直流配电技术供电的压气站供电方案,可以提高压气站供电系统的可靠性。但是柔性直流配电建设周期长、投资较大,且对于现有压气站直流配电改造难度大,难以应用于实际。2)加装补偿设备是指在压气站供电系统中合适位置安装电压暂降治理装置缓解电压暂降造成的影响。文献[6]设计了压缩机组双电源同期自备投装置,发生电压暂降时可以实现双电源无缝切换。文献[7]提出可以采用加装快切装置和动态电压补偿器(dynamic voltage restorer, DVR)来实现压缩机组电压暂降治理。文献[8]提出可以加装防晃电接触器提升压缩机组辅助系统的电压暂降耐受能力。3)改造用电设备是指对压缩机组的主要用电设备进行改造,提升设备的电压暂降耐受能力。文献[9]提出采用Z源逆变器来提高压缩机组变频器的电压暂降耐受能力。文献[10]提出可以通过启用变频器低电压穿越功能来维持电压暂降期间压缩机组的正常运行。

现有文献提出了一些压气站压缩机组电压暂降治理措施,但是没有从压气站内敏感设备电压暂降耐受机理出发,分析压气站敏感设备及其连接关系与电压暂降对压气站生产设备的影响。针对压气站电压暂降特征水平与敏感设备耐受能力,下面提出合适的治理方案。

为了减少压缩机组因电压暂降停机次数,提高压气站电压暂降治理水平,以某2个压气站为例,通过分析压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率提出了压气站电压暂降分级治理方案。首先,分析了压气站内电压暂降敏感设备类型、分布与连接关系;然后,分析了敏感设备电压暂降耐受机理,结合历史数据,基于核密度估计的方法拟合压气

站的电压暂降特征水平,结合敏感设备耐受能力,分析敏感设备对电压暂降的兼容性;最后,根据压气站供用电设备特性提出有效的电压暂降问题分层分级治理方案。

1 压气站电压暂降敏感设备及其连接关系分析

1.1 压气站供用电设备分析

1.1.1 压气站供电系统

压气站变电站主要为站内压缩机组、辅助系统、低压配电设施提供动力电源。以某2个压气站为例,分别记为T站与J站。T站电气接线如图1所示,35 kV变电站主要包含2条35 kV进线回路和3台容量为10 MVA有载调压油浸式变压器。

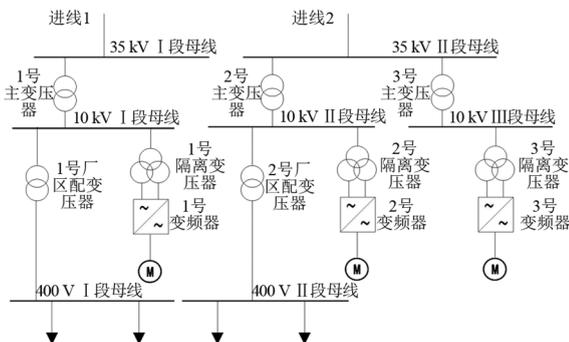


图1 压气站变电站T站电气接线

2条35 kV进线通过3台主变压器降压到3段10 kV母线。3段10 kV母线分别通过3条出线连接隔离变压器,隔离变压器二次侧通过电缆接入变频器,经变频器功率单元调制后引出6 kV馈线为电动机提供动力源,达到调频变速的目的;另外10 kV I段和II段母线分别经2台厂区配电变压器降压到2段400 V母线,为站内低压电气设备供电。

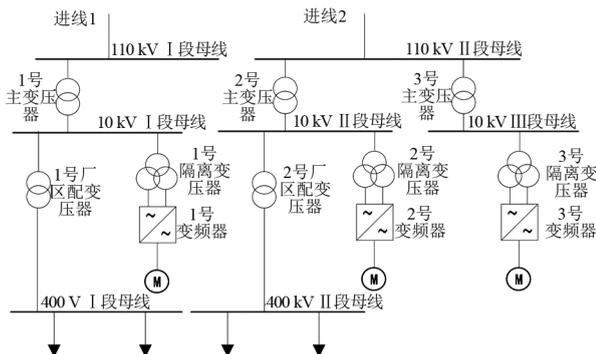


图2 压气站变电站J站电气接线

J 站电气接线如图 2 所示,与 T 站供用电结构相似,仅供电电压等级不同,T 站供电电压等级为 35 kV, J 站供电电压等级为 110 kV。

1.1.2 压气站主要用电设备

2 个压气站主要用电设备相同,主要包括 6 kV 电压等级下的压缩机组主系统设备和 400 V 电压等级下的压缩机组辅助设备。压气站主要用电设备如表 1 所示。主系统设备主要包括变频装置、压缩机主电动机;压缩机组辅助设备主要包括空压机系统、压缩机主电动机水冷系统、润滑油系统及后空冷机组。

表 1 压气站主要用电设备

所属系统	设备名称	数量/台
主系统	变频器	3
	三相异步电动机	3
	变频装置功率单元	6
辅助系统	空压机(变频)	2
	空压机(工频)	1
	冷冻式压缩空气干燥机	3
	润滑油泵驱动电动机	6
	油箱加热器	9
	油空冷器电动机	6
	排烟风机电动机	3
	电机水冷系统(增压泵电动机)	6
	电机水冷系统(空冷器电动机)	6
	后空冷电动机(变频)	3
	后空冷电动机(工频)	9
	风机电动机加热器	3
	电磁阀	45
	可编程逻辑控制器	30

1.2 压气站敏感设备连接关系分析

1.2.1 压气站敏感设备分析

压气站压缩机组使用到的电压暂降敏感设备包括变频器、可编程逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)、变频电动机、电磁阀和部分异步电动机。当压气站发生电压暂降时,这些敏感设备会因电压幅值的降低而停机或故障运行。

1) 变频器

主系统变频器的功率单元是变频装置实现变频调速输出的重要结构,额定容量为 8.5 MVA,设置有欠电压保护。压气站变频器结构如图 3 所示。当压气站 10 kV 母线发生电压暂降而使输入电压低于 0.9 倍额定值时,将引起变频装置的欠电压保护动作,使压缩机组转速下降或停机。

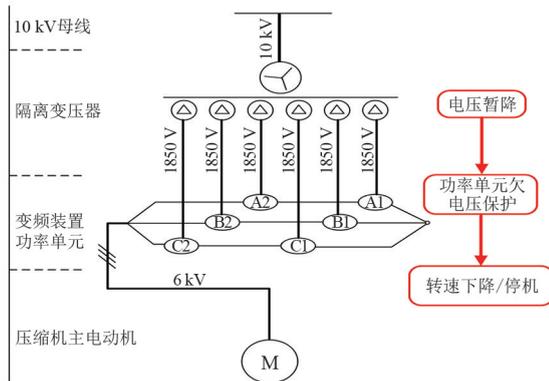


图 3 压气站变频器结构

2) PLC

PLC 电源模块遭受电压暂降时,可能会使电源模块输出电压减小或退出运行,会发生输入模块、输出模块或 CPU 因电源供电不足而出现错误或停止工作^[11]。PLC 电源模块功能结构如图 4 所示。

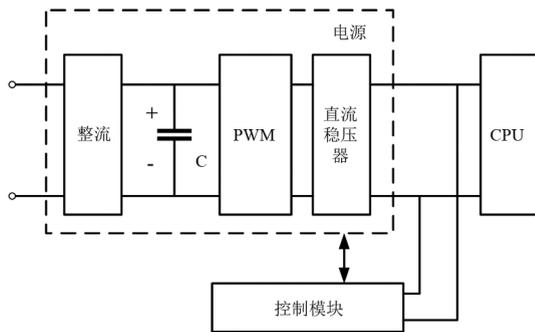


图 4 PLC 电源模块结构

发生电压暂降时,输入电压减小,从而导致直流侧的电容器 C 开始放电,直流侧电压降低,当低于维持直流稳压器正常运行所需的最低电压 U_{min} 时,使得 PLC 模块出现错误或停止工作。

设电源模块暂降期间所连接的负载为恒定功率 P , U_0 为电源模块正常运行时额定输出电压, U_t 为暂降发生 t 秒后直流侧电压,则有

$$Pt = \frac{C}{2}(U_0^2 - U_t^2) \quad (1)$$

如果 $U_0 > U_t$ 且 $U_t > U_{min}$, 则 PLC 仍可继续正常运行一段时间;当 $U_t = U_{min}$ 时,则 PLC 可继续正常运行的最大持续时间 T_{max} 为

$$T_{max} = \frac{C(U_0^2 - U_{min}^2)}{2P} \quad (2)$$

3) 变频电动机

对于压气站内一般的变频驱动电动机,如工艺后空冷风机和变频水冷泵电动机等,变频调速

器(variable-frequency devices, VFD)基本结构如图5所示,VFD由整流器、直流耦合环节、逆变器构成。当发生电压暂降时,输入端电压突然降低,使得直流电容放电,触发欠电压保护跳闸。此外,电压暂降发生后直流电容充电也可能瞬时过电流保护,导致设备停机。VFD保护措施主要包括欠压保护和过流保护^[11]。

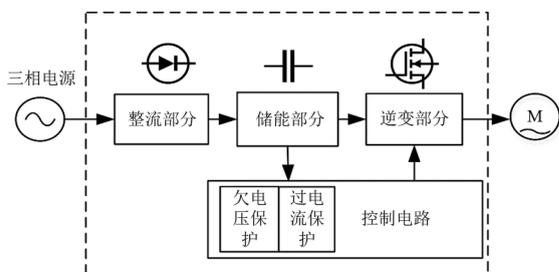


图5 VFD基本结构

4) 电磁阀

电压暂降会导致电磁阀的电磁线圈磁能不足而脱扣,使得电磁阀误动作。电磁阀的结构原理如图6所示,主要由动铁芯、阀体、电磁线圈和恢复力弹簧组成。电磁线圈通电时,吸引动铁芯动作带动阀芯至相应位置,控制气体通过;电磁线圈断电时,磁力消失,阀芯在恢复弹簧弹力的作用下复位,电磁阀关闭。电磁线圈虽然具有一定的磁储能作用,但在电压暂降期间,如果持续时间稍长,将使得电磁线圈提供的电磁力减小,不能抵消恢复弹簧弹力,从而导致电磁阀关闭。

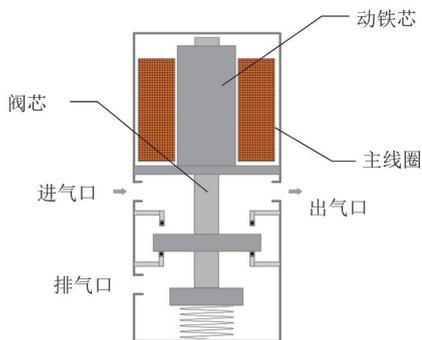


图6 直动式电磁阀基本结构

小气隙时接触器内瞬时电磁力可以表示为^[12]

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu} = \frac{\Phi^2}{2\mu S} \quad (3)$$

式中: Φ 为瞬时磁通量; μ 为空间磁导率; S 为磁极的横截面积。因此瞬时电磁力与瞬时磁通的平方值有关。设电磁线圈脱离所需的最小电磁力为 F_m 。

此时瞬时磁通为

$$\Phi_m = 2\mu S F_m \quad (4)$$

假定线圈自感是恒定的且对磁通占据主导地位,将 Φ_m 对时间进行微分,并与线圈的总匝数 N 相乘可近似获得使电磁阀保持连通状态的最小电压 U_{\min} 为

$$U_{\min} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

5) 异步电动机

虽然异步电动机通常对电压暂降不敏感,但因电压暂降产生的许多其他因素会使电动机停运,如转矩振荡、机械涌流等,导致生产过程中断。

1.2.2 敏感设备连接关系分析

压气站内用电设备的电压暂降耐受特性与设备间逻辑连接关系有关。合理刻画压缩机组生产过程中设备间的逻辑关系,是准确描述和分析压缩机组生产过程对电压暂降耐受特性的前提。

1) 主系统

在变频驱动压缩机运行这一过程中,隔离变压器、变频器功率单元与压缩机主电动机构成逻辑串联关系,变频器与压缩机主电动机对电压暂降的响应存在先后次序。变频器驱动压缩机主电动机过程如图7所示。



图7 变频器驱动压缩机主电动机过程

2) 辅助系统

以压气站辅助系统中的水冷系统为例,站内的3套变频装置均配有水冷系统,水冷系统的电源分别由相应压缩机1UMDS柜提供,额定电压为380V。变频水冷系统组成设备如图8所示。变频水冷过程的完成包括了2台循环泵电动机、1个电磁阀、2个电动阀和6台水冷风机。当发生电压暂降时,交流接触器、电动阀、电磁阀与水冷风机均同时受到电压暂降的影响,因此构成并联逻辑关系,任一设备的故障均会使变频水冷系统受到干扰甚至过程中断;2台电动机经交流接触器接入电源,只有当接触器因电压暂降失效跳闸时,电动机的供电才会中断,因此交流接触器与循环泵驱动电动机、交流接触器与补水泵电动机构成逻辑串联关系。

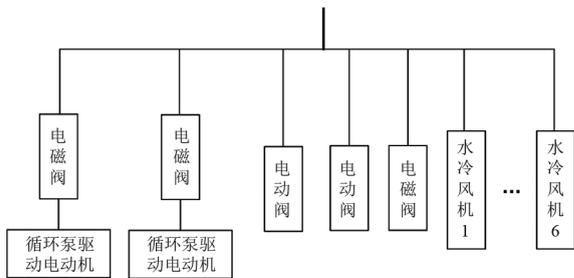


图 8 变频水冷系统组成设备

2 压气站的电压暂降特征水平与敏感设备兼容性分析

2.1 压气站的电压暂降特征水平分析

根据压气站内电压波动事件的记录信息,得到压气站电压暂降事件的频次、持续时间、幅值的分布特点以及对压缩机组运行的影响,是针对性治理电压暂降问题的关键步骤之一。压气站 T 站和 J 站一年内的电压暂降特征分布分别如图 9 和图 10 所示。

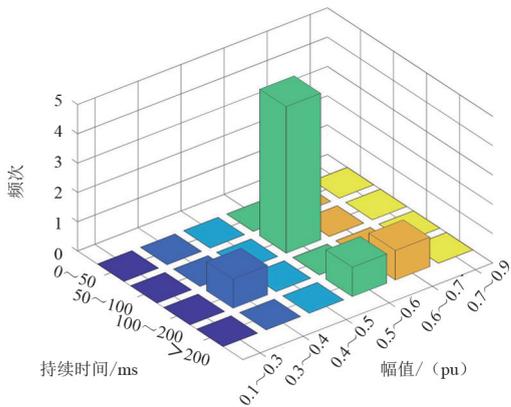


图 9 压气站 T 站 10 kV 母线电压暂降频次

根据监测得到的电压暂降特征分布,基于核密度估计的方法对电压暂降特征分布进行拟合,得到压气站接入点电压暂降特征概率分布。

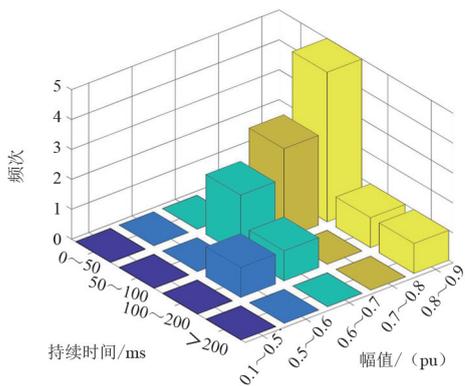


图 10 压气站 J 站 10 kV 母线电压暂降频次

设 U_i 和 T_i 分别为压气站第 i 次电压暂降的幅值和持续时间,则压气站电压暂降的幅值和持续时间的概率密度函数 $f(U)$ 和 $f(T)$ 为:

$$f(U) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{U - U_i}{h}\right) \quad (6)$$

$$f(T) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{T - T_i}{h}\right) \quad (7)$$

式中: h 为带宽; n 为监测到的电压暂降次数; $K(x)$ 为高斯核函数。

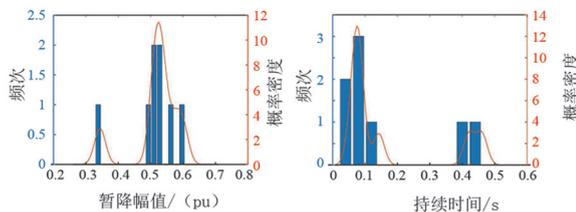
$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (8)$$

当采用高斯核函数时,使核密度估计结果与未知密度函数最接近的最优带宽为

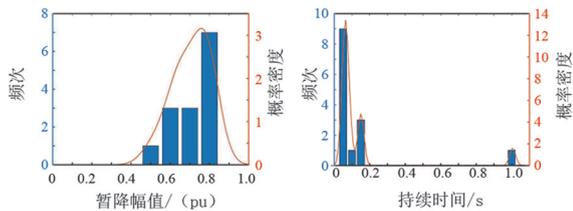
$$h = 1.06\sigma n^{-0.2} \quad (9)$$

式中, σ 为电压暂降样本幅值或持续时间的标准差^[13]。

分别对一年内压气站 T 站的 8 次和 J 站的 14 次电压暂降样本进行处理,压气站 10 kV 母线电压暂降特征概率分布如图 11 所示。



(a) 压气站 T 站接入点电压暂降特征概率分布



(b) 压气站 J 站接入点电压暂降特征概率分布

图 11 压气站 10 kV 母线电压暂降特征概率分布

如图 11 所示,T 站的电压暂降幅值大多分布在 0.5~0.6 倍额定值,持续时间大多分布在 50~200 ms; J 站电压暂降事件的暂降幅值分布在 0.5~0.9 倍额定值区间,多数电压暂降事件分布在 20~200 ms 区间。相较于 J 站,T 站的电压暂降较为严重,所发生电压暂降多为深度暂降,且发生过空压机、润滑油泵电机等低压用电设备停机的情况。造成这一情况的原因,主要为 T 站的供电电压等级为 35 kV,接入区域配电网系统;而 J 站供电电压等级为 110 kV,

且为专线供电,上游变电站为 220 kV 主网变电站,短路故障发生概率小。因此,J 站电压暂降水平要优于 T 站。

2.2 敏感设备兼容性分析

根据 2.1 节获得的电压暂降特征水平分析压气站内电压暂降敏感设备的兼容性。评估电压暂降对各用电设备的影响,确定电压暂降发生时设备运行状态的变化情况,为电压暂降治理方案制定提供各设备的补偿裕度。

2.2.1 压气站敏感设备耐受能力

压气站变频驱动控制系统设置有变频器输入欠电压保护,阈值为 0.9 pu,其耐受特性曲线如图 12 所示,当压气站 10 kV 母线因电压暂降导致变频器输入电压低于此阈值时,压缩机组将降低转速或联锁停机。

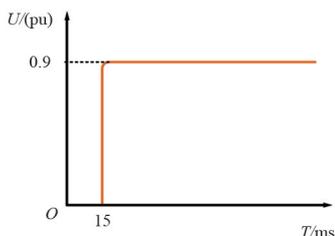


图 12 压气站主变频器电压耐受曲线

对于压缩机组辅助系统敏感设备而言,不同于主变频器的闭锁条件设置,这些低压敏感设备的耐受曲线上存在不确定区域,当电压暂降事件处于不确定区域时,其耐受特性将存在模糊性,设备运行状态的改变情况将以概率形式出现。并且由于辅助系统设备状态监测不够全面,而辅助系统设备停机也会影响压缩机组的正常运行,因此需要评估辅助系统设备电压暂降的影响程度,确定辅助系统设备电压暂降治理范围。

将辅助系统敏感设备耐受曲线的不确定区域划分为 3 个子区域,如图 13 所示,提出 2 个假设:1) 发生电压暂降时,暂降幅值和暂降持续时间是两个独立的随机变量;2) 发生电压暂降时,暂降幅值或持续时间若位于限值之外,设备故障率仅与另一个因素有关。

在图 13 中, U_{\max} 和 U_{\min} 分别为电压暂降幅值耐受范围的最大值和最小值; T_{\max} 和 T_{\min} 分别为电压暂降持续时间耐受范围的最大值和最小值。电压暂降

敏感设备的运行状态在耐受曲线上可分为正常运行区域、故障区域和不确定区域。曲线 1 的外部区域 ($U > U_{\max}$, $T < T_{\min}$) 为设备正常运行区域;曲线 2 的内部区域 ($U < U_{\min}$, $T > T_{\max}$) 为设备故障区域;曲线 1 和曲线 2 之间为设备运行不确定区域,包括 A 区域 ($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$)、B 区域 ($U < U_{\min}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$) 和 C 区域 ($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T > T_{\max}$) 3 个部分。

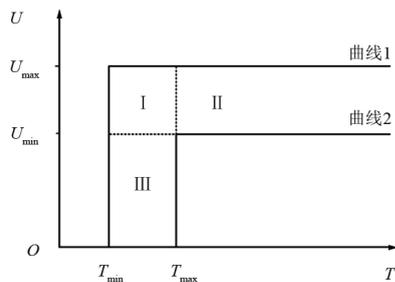


图 13 敏感设备耐受曲线

根据同类型设备的耐受特性测试结果,压缩机组辅助系统主要敏感设备的耐受范围限值 U_{\max} 、 U_{\min} 、 T_{\max} 和 T_{\min} 见表 2。

表 2 压气站敏感设备的耐受范围限值

设备类型	$U_{\max}/(\text{pu})$	$U_{\min}/(\text{pu})$	T_{\max}/ms	T_{\min}/ms
PLC	0.90	0.30	400	20
变频电动机	0.71	0.59	175	15
电磁阀	0.60	0.35	10	5

2.2.2 压气站敏感设备故障概率

对于敏感设备,故障率取决于电压暂降能量损失的大小。因此参考能量损失公式^[14],按暂降所处不确定区域,敏感设备故障率 P 可计算为:

$$P_B = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, (U_i, T_i) \in B \quad (10)$$

$$P_C = \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}, (U_i, T_i) \in C \quad (11)$$

$$P_A = \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, (U_i, T_i) \in A \quad (12)$$

综上所述,故障率的计算步骤为:1) 根据暂降的幅值和持续时间,确定暂降位于哪个区域;2) 当暂降处于正常运行区域或故障区域时,故障率分别为 0 或 1;3) 若暂降处于不确定区域,则需根据式(10)、式(11)或式(12)计算相应的故障率。

根据压气站电压暂降监测结果,2 个站辅助系

统敏感设备年故障次数如图 14 所示。

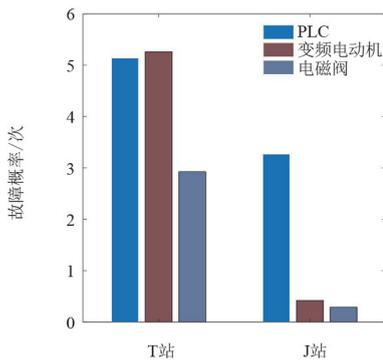


图 14 敏感设备年故障次数

对于压气站 T 站,由于电压暂降幅值较低,对设备造成的影响较为严重,因此,需要对辅助系统敏感设备中的 PLC、变频电动机和电磁阀均采用相应的治理措施,同时需要在 400 V 母线上加装电压暂降治理装置,对整个辅助系统进行治理。而对于 J 站,则仅需针对 PLC 设备进行治理,由于 PLC 设备容量较小,故可采用不间断电源 (uninterruptible power supply, UPS) 进行电压暂降治理。

3 压气站的电压暂降治理措施

3.1 案例分析

以 2020 年 6 月 18 日压气站 T 站发生的一次因电压暂降导致压缩机组停机的的事件为例。由于压气站变电站上游的 110 kV 变电站母线电压波动,电压暂降经 35 kV 进线 2 传导至压气站变电站 T 站。

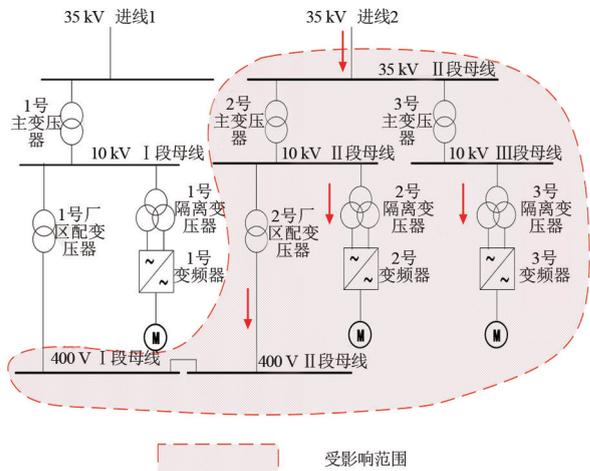


图 15 压气站电压暂降影响范围

压气站电压暂降影响范围如图 15 所示。由于电压暂降在变压器中的单向传递特性^[17],即电压暂

降只能从高压侧传导至低压侧,无法反向传导,因此 35 kV II 段母线电压暂降经过站内 2 号、3 号主变压器,同时使 10 kV II 段、III 段母线发生电压暂降,电压幅值跌落至 0.6 pu 左右,并持续了大约 23 个周波。2 号变频器与 3 号变频器均因电压暂降触发了输入欠电压保护。2 号变频器报警未停机,3 号变频器因此次电压暂降报警并停机,同时引起了站内 400 V I 段、II 段母线电压暂降。虽然,400 V I 段母线暂降,但是无法通过 1 号厂用变压器传导至 10 kV I 段侧。

此次暂降造成 3 号压缩机组辅助设备中 2 号润滑油泵电动机停机,3 台后空冷风机电动机和 3 台空压机停机。10 kV II 段、III 段母线电压波动情况见图 16,10 kV I 段母线运行正常。

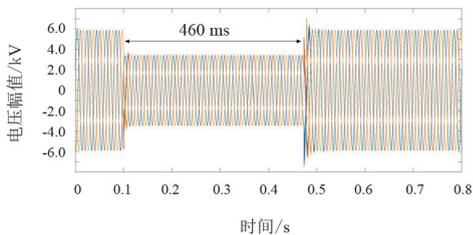


图 16 10 kV II 段、III 段母线电压波动情况

此次电压暂降事件造成了压气站主系统变频器停机,辅助系统中大面积设备停机,从停机至恢复正常运行耗时 2 h,严重影响了压气站的正常输气任务。

3.2 压气站电压暂降分层分级治理方案

为了有效地治理压气站电压暂降问题,根据压气站电压暂降水平,提出压气站电压暂降分层分级治理方案,如图 17 所示,方案包括场站级治理、主系统级变频器治理和辅助系统级治理 3 个部分。

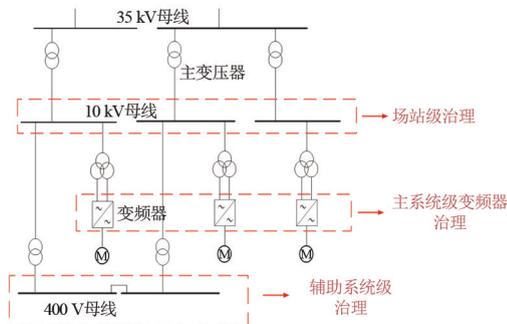


图 17 压气站电压暂降分层分级治理方案

场站级治理通常采用快切装置,即在 10 kV 母线侧加装固态切换开关装置 (solid state transfer switch, SSTS) 来实现;主系统级变频器治理采用更改变频器闭锁条件实现;辅助系统级治理采用加装电压暂降治理装置实现。

3.3 加装固态切换开关装置

由于压气站均采用两回独立进线供电,当其中一回进线发生电压暂降时,可通过 SSTS 切换装置切换至另一回进线。基于晶闸管投切控制的 SSTS 能快速地敏感负荷由故障常用电源切换至备用电源,并在故障恢复时将负荷切换回常用电源^[16]。

如 3.1 节中的案例所示,由于进线 2 的影响,压气站 10 kV II 段、III 段母线发生电压暂降,但 10 kV I 段母线运行正常。因此,可以通过 SSTS 切换装置将 10 kV II 段、III 段母线切换至进线 1。

SSTS 安装后正常运行时断路器位置如图 18 所示。正常运行时,10 kV 母线各自的断路器闭合,I 段和 II 段母线间的 04 母联断路器断开。当 35 kV II 段母线发生电压暂降时,35 kV II 段母线发生电压暂降时开关位置如图 19 所示,10 kV II 段、III 段母线 02、03 断路器断开,I 段和 II 段母线间的 04 母联断路器闭合,10 kV II 段和 III 段母线切换至进线 1 供电。

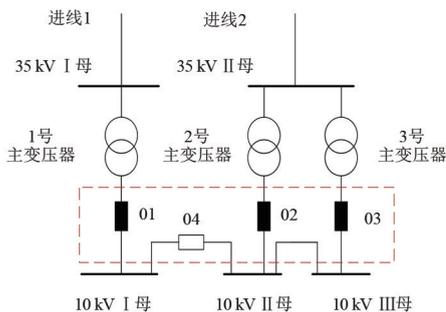


图 18 正常运行时断路器位置

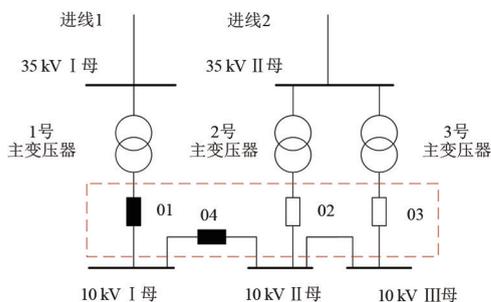


图 19 35 kV II 段母线发生电压暂降时断路器位置

对压缩机组进行建模仿真以验证治理方案的有效性,电压暂降幅值设置为 0.6 pu,持续时间为 400 ms。通过分析安装 SSTS 前后暂降期间的压缩机组转速变化情况仿真验证治理方案的有效性,治理前后压缩机转速 r_w 如图 20 所示。

根据图 20 所示,安装 SSTS 后压缩机组转速可

以维持在一个较为稳定的运行状态,通过安装 SSTS 可以保护压缩机组主系统不受电压暂降影响。

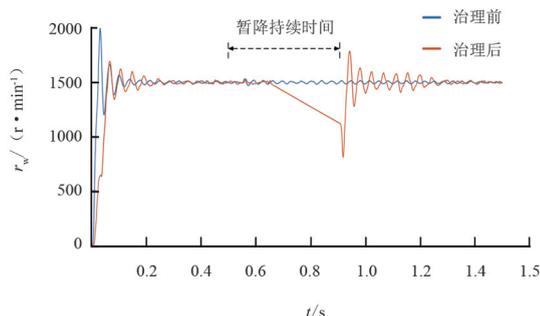


图 20 治理前后压缩机转速

3.4 更改变频器闭锁条件

由于压缩机组主系统变频器功率较大,无法通过储能类电压暂降治理装置进行治理。并且,通常电压暂降的持续时间较短,而变频器具有一定的低电压穿越能力,在发生幅值较高的电压暂降时,可以适当减小变频器的输出功率,使压缩机组转速下降。由于存在压缩机组转动惯量,此时能量由电动机反馈至变频器直流母线上,使直流母线电压维持在正常工作范围内不致变频器跳闸,电网电压恢复后变频器也恢复至正常运行状态。

电压暂降设置与图 20 相同,调整变频器的闭锁条件前后的压缩机转速 r_w 如图 21 所示。

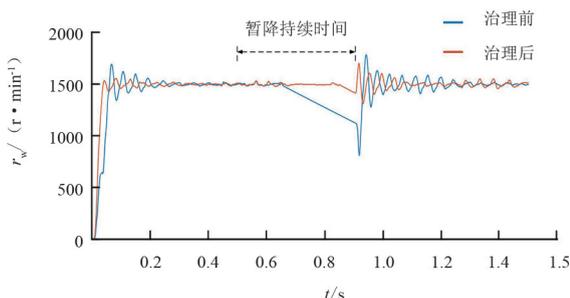


图 21 调整变频器的闭锁条件后压缩机转速

由图 21 可知,调整变频器的闭锁条件后,压缩机组转速虽然在电压暂降期间仍有波动,但相较于原闭锁条件,转速可以维持在一个较为稳定的运行状态。

3.5 辅助系统加装电压暂降治理装置

辅助系统中的敏感设备由于功率较小,且辅助设备停机也会对压缩机组正常运行造成影响,因此,可采用在 400 V 母线上安装电压暂降治理装置来维持供电稳定。由于 DVR 具有响应快、效率高的特点,

是目前较为常用的电压暂降治理装置^[18]。因此,可以在压气站 400 V 母线上串联 DVR,在电网发生电压暂降时,DVR 将自动输出一个差值电压,来补偿电网电压的降落,确保辅助系统负荷供电稳定。

3.6 其他措施

此外,还可通过对电网侧进行改造,包括更换电缆供电、定期清理架空线附近异物、定期清洗绝缘子降低污闪率、定期进行设备检修降低设备故障率和配电网小电阻接地改造等来减少电压暂降发生,从而缓解电压暂降对压气站的影响。

4 结 论

上面分析了 2 个压气站的电压暂降特征水平与敏感设备故障概率,并提出了有效的电压暂降分级治理方案。所提分级方案针对压气站不同电压等级用电设备,可以改善压气站电能质量水平,缓解电压暂降对压气站生产运行的影响。

参考文献

- [1] 夏雪,李嘉逸,余熙,等.四川省能源互联网发展路线研究[J].四川电力技术,2017,40(5):73-77.
- [2] 赵霞,戴蓉,王璐,等.考虑压气站运行特性的电-气最优能流两阶段方法[J/OL].中国电机工程学报:1-15 [2022-07-09]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211921.
- [3] 樊国旗,霍超,李小腾,等.含 P2G 的多能源网优化调度研究[J].四川电力技术,2022,45(2):67-73.
- [4] 尹贻功,宋宏志,王天文,等.提高压气站供电系统可靠性的技术措施[J].电气技术,2014(10):59-66.
- [5] 李福荣.天然气长输管道电驱压气站柔性直流配电技术探讨[J].电器工业,2020(10):68-71.
- [6] 文彬.输气管道大功率变频器失电跨越研究[J].电气时代,2017(7):82-85.
- [7] WU LF, YU X W, OU-YANG B Y, et al. The influence of voltage sag on gas compressor station and its treatment measures [C]//Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Systems Conference, Singapore, 2022:803-813.
- [8] 卓麟.天然气长输管道离心压缩机不间断运行的研究

与实现[J].电器工业,2019(8):73-78.

- [9] BELSKY A A, SALOV R A. Balanced voltage sag compensation on adjustable speed drive of a gas compressor [C]//2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2019:934-398.
- [10] 谢锐,杜权.电网波动对变频电驱压缩机组的影响及应对策略[J].油气田地面工程,2019,38(S1):147-148.
- [11] XU Y H, WU Y P, ZHANG M M, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 34(1):2-10.
- [12] 徐永海,兰巧倩,洪旺松.交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究[J].电工技术学报,2015,30(21):136-146.
- [13] XU Y H, LU W Q, WANG K, et al. Sensitivity of low-voltage variable-frequency devices to voltage sags [J]. IEEE Access, 2018, 7:2068-2079.
- [14] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J].中国电机工程学报,2018,38(2):505-513.
- [15] 周翔,王丰华,黄荣辉,等.考虑系统与敏感设备的变电站电压暂降综合评估[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1940-1946.
- [16] 姜欢笑.双电源快速切换装置在电驱压气站中的试验及分析[J].电世界,2015,56(1):30-33.
- [17] 陶顺,肖湘宁.中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(二)[J].电工技术学报,2007(10):156-159.
- [18] 黄瑞,肖先勇,陈振.基于过程免疫力的动态电压恢复器优化配置[J].四川电力技术,2019,42(3):50-55.

作者简介:

杨丽茹(1976),女,硕士,工程师,从事电气及机动设备管理工作;

张启超(1986),男,工程师,从事天然气输气生产管理工作;

邹涛(1971),男,工程师,从事油气储运管理工作;

马晴(1986),女,工程师,从事信息水电管理工作;

徐方维(1978),女,博士,副教授,主要研究方向为电能质量及谐波等;

郭凯(1997),男,博士研究生,主要研究方向为电压暂降分析与治理相关研究。

(收稿日期:2022-10-26)

电气化铁路接入末端电网的三相不平衡影响因素分析

段玉^{1,2}, 侯冰³, 张媛^{1,2}, 南东亮^{1,2}, 董雪涛^{1,2}, 宋鹏飞³, 刘震^{1,2}, 段青熙^{1,2}, 王小云^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:近年来,伴随着电气化铁路接入新疆电网,致使新疆电网末端弱联系地区电能质量问题突显出来,文中针对格库铁路接入新疆巴州地区电网带来的三相不平衡问题开展影响因素分析。首先,根据三相电压不平衡的概念及表达式开展电气化铁路负序三相不平衡的分析计算,得出三相不平衡的影响因素;然后,基于电力电气以及电能管理的综合分析软件(简称ETAP)搭建格库铁路接入新疆电网的典型仿真模型,仿真分析格库铁路接入末端弱联系电网带来的三相不平衡问题的影响因素;最后,分析基于实测数据的负序电流及电压产生的三相不平衡对电力系统及用户的影响,并利用ETAP软件分别从电铁侧和电网侧验证改善三相电压不平衡措施的有效性。

关键词:电气化铁路;三相不平衡;负序电流;影响因素;改善措施

中图分类号:TM 771 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0044-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220607

Analysis of Influencing Factors of Three-phase Unbalance for Electrified Railway Connected to Terminal Power Grid

DUAN Yu^{1,2}, HOU Bing³, ZHANG Yuan^{1,2}, NAN Dongliang^{1,2}, DONG Xuetao^{1,2}, SONG Pengfei³,
LIU Zhen^{1,2}, DUAN Qinxi^{1,2}, WANG Xiaoyun^{1,2}

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: In recent years, a large number of electrified railways have been connected to Xinjiang power grid, resulting in prominent power quality problems in weak connection areas of Xinjiang power grid. The influencing factors of three-phase unbalance caused by the connection of Geermu-Kuerle Railway to Xinjiang Bazhou regional power grid is analyzed. Firstly, according to the concept and expression of three-phase voltage unbalance, the negative sequence three-phase unbalance of electrified railway is analyzed and calculated, and the influencing factors of three-phase unbalance are obtained. Secondly, based on the comprehensive analysis software system of electric power analysis and electric power management (hereinafter abbreviated as ETAP), a typical simulation model of the connection of Geermu-Kuerle Railway to Xinjiang power grid is built to verify the influencing factors of three-phase unbalance of the connection of electrified railway to the power grid. Finally, the influence of three-phase unbalance caused by negative sequence current and negative sequence voltage based on the measured data on the power system and users is analyzed, and ETAP software is used to verify the effectiveness of improvement measures for three-phase voltage unbalance from the railway side and the grid side.

Key words: electrified railway; three-phase unbalance; negative sequence current; influencing factors; improvement measures

0 引言

新疆电网目前已全覆盖新疆 14 个地州,但由于新疆地域辽阔,部分地区在塔克拉玛干沙漠边缘,网架结构相对薄弱。新疆巴州若羌地区电网位于新疆电网末端,短路容量较小,电气联系相对薄弱。2020 年格库铁路建成通车后接入若羌电网,由于电气化铁路负荷具有单相、时变、冲击性等特点^[1],接入电力系统时产生大量的负序电流、谐波,如果处理不善,将严重危害公共电网的安全和可靠性^[2-5]。故格库铁路接入新疆电网后造成若羌地区电能质量问题突出,三相不平衡问题已严重影响到该地区用户、新能源场站及系统的正常运行^[6-8]。

电气化铁路作为单相非线性负荷,接入电网后产生电能质量问题^[9-11]。文献[12]分析了高速电气化铁路产生的负序电流和谐波在电力系统中的渗透情况,但仅分析了负序在电网常用元件中的传递特性,未考虑对元件的影响。文献[13]应用 ETAP 软件仿真了电气化铁路对电网的影响,分析发现交直交电力机车的各相电能质量指标均满足国家标准要求,但未考虑其他类型电力机车带来的电能质量问题。文献[14]基于某地区电网分析电气化铁路产生的三相不平衡以及负序对该地区电网的影响,验证了 ETAP 仿真模型的准确性。但未考虑电气化铁路对网架薄弱地区弱联系电网电能质量的影响。文献[15]分析了电气化铁路接入对新疆薄弱地区电网电能质量的影响,主要分析了三相不平衡的传递规律,未考虑三相不平衡的影响因素,也未提出有效的改善措施。

因此,首先从理论分析的角度研究三相不平衡的影响因素;随后基于 ETAP 搭建格库铁路的典型仿真模型仿真分析短路容量、电压、负荷对三相不平衡的影响;接着分析了三相不平衡超标给新能源场站、用户和电力系统带来的影响;再基于仿真结果提出相应的改善措施;最后对基于 ETAP 的格库铁路典型仿真模型进行仿真验证。

1 三相不平衡的计算及影响因素分析

理想的三相交流系统是 A、B、C 三相幅值相同,

相位互成 120°角,是完全平衡的。然而,实际三相电力系统并不是完全平衡的,电力系统中发生事故或不平衡的设备接入都会导致三相不平衡,下面主要分析不平衡的设备接入系统导致的三相不平衡问题。

1.1 三相不平衡的基本概念及其表达式

电力系统是由发电设备、输电设备、变电设备和配电设备及用电负荷组成,当发输变配用任一设备不对称时,就会引起三相电压不平衡。三相不平衡的评价指标通常由三相电压不平衡度表示。三相电压不平衡度用负序分量比正序分量的百分数表示,正序分量和负序分量通过对称分量法计算得到。依据国家标准 GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》^[16],三相电压不平衡度的表达式为:

$$\varepsilon_{U_2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon_{U_0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ε_{U_2} 为电压的负序不平衡度; ε_{U_0} 为电压的零序不平衡度; U_2 为三相电压的负序分量方均根值,kV; U_1 为三相电压的正序分量方均根值,kV; U_0 为三相电压的零序分量方均根值,kV。

式(1)可作为负序电压不平衡度的准确计算公式。通过测量三相电力系统中 A、B、C 三相的相位及幅值后,利用对称分量法求出正序分量和负序分量,借助式(1)求得负序电压不平衡度。据此可知三相电压不平衡度与正序和负序分量有关。

下面介绍几种不平衡度的近似估算式:

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta_{\max}}{U_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \frac{\Delta P_{\max} R + \Delta Q_{\max} X}{U_N^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ε_U 为三相电压的不平衡度; Δ_{\max} 为三相中对平均电压的最大偏差值,kV; U_{avg} 为三相线电压的平均值,kV; ΔP_{\max} 为公共连接点处单相有功功率的变化量最大值,MW; ΔQ_{\max} 为公共连接点(point of common coupling,PCC)处单相无功功率的变化量最大值,Mvar; R 为等效电阻, Ω ; X 为等效电抗, Ω ; U_N 为额定电压,kV。

根据式(3)、式(4)可知,三相电压不平衡度与电压偏差有关,电压偏差由系统初始电压、有功功

率、无功功率变化量及系统等效电阻、电抗决定。

工程上用式(5)来估计不平衡负荷在 PCC 处带来的不平衡度。

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{2}I_2 U_L}{S_k} \times 100\% \quad (5)$$

式中: I_2 为负荷电流的负序分量, kA; U_L 为线电压, kV; S_k 为 PCC 处的短路容量, MVA。

根据式(5)可知,三相电压不平衡度与电流的负序分量及系统 PCC 处的短路容量有关。

对于接于相间的单相负荷,所引起的不平衡度可用更为简单的公式为

$$\varepsilon_U = \frac{S_L}{S_k} \times 100\% \quad (6)$$

式中, S_L 为单相负荷的容量, MVA。

根据式(6)可知,三相电压不平衡度与单相负荷的容量及系统 PCC 处的短路容量有关。

综上所述三相不平衡度与序分量、电压偏差、系统 PCC 处的短路容量及不平衡负荷的容量有关。

1.2 基于电气化铁路的三相不平衡影响因素分析

格库铁路是由 110 kV 交流电经牵引变压器(V/v 接线)降压为 27.5 kV 后向牵引网及电力机车单相供电的电气化铁路。由于该供电方式为单相供电,将在电力系统中产生负序分量。这里主要基于 V/v 接线不平衡牵引变压器开展三相不平衡的影响因素分析。

V/v 接线的牵引变压器组成的一个变电所供电系统见图 1。

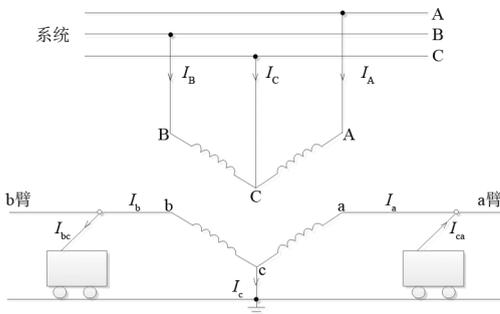


图 1 V/v 接线的牵引变压器

根据图 1 所示结构图可推出系统正负序电流与电铁路侧 a、b 臂电流的关系为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}k} \begin{bmatrix} e^{j30} & j \\ e^{-j30} & -j \end{bmatrix} [i_a i_b] \quad (7)$$

系统侧 A、B、C 三相电流与铁路侧 a、b 臂的电流的关系如下:

$$I_A = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{4I_a^2 + 2I_a I_b + I_b^2} \quad (8)$$

$$I_B = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{I_a^2 - I_a I_b + I_b^2} \quad (9)$$

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}k} \sqrt{I_a^2 + 2I_a I_b + 4I_b^2} \quad (10)$$

下面依据式(7)分析两供电臂在不同负荷时对电流不平衡度的影响。

设 I_a 为最大值,即 $I_a = I_{\max}$, I_b 在 $0 \sim I_{\max}$ 之间变化,令 $\frac{I_b}{I_{\max}} = x$,则式(7)改写为式(11)。

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}k} I_{\max} (1+x) \\ I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}k} I_{\max} \sqrt{x^2 + 1 - x} \end{cases} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (11)$$

表 1 列出了 V/v 接线变压器在 3 种典型工况下电流不平衡度。

表 1 3 种典型工况下电流不平衡度

x	I_2	I_1	I_2/I_1
0.5	$\frac{1}{2k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{2k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
0	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	1
1	$\frac{\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{2\sqrt{3}}{3k} I_{\max}$	$\frac{1}{2}$

综上所述电气化铁路的电流三相不平衡度与两供电臂负荷及所接相序有关,其中一臂电流最大、一臂电流为 0 时的三相不平衡度最大。

2 基于 ETAP 的三相不平衡仿真计算分析

ETAP 是一款全图形化的电力系统仿真软件,主要利用该软件的不平衡潮流模块开展基于电气化铁路的三相不平衡影响因素研究。

2.1 基于电气化铁路的典型仿真模型搭建

下面以格库铁路沿线为典型应用场景,选取新疆电网末端 3 座变电站及所接牵引站负荷搭建典型仿真模型。该地区的网架结构见图 2;依据网架结构图及用户提供的相应负荷侧参数,利用 ETAP 搭建的仿真模型见图 3。

电气化铁路模型的搭建主要为线路、选相器、单相变压器以及等效单相负荷,线路在实际运行中为

表 4 电压偏差不同时各电压等级对应不平衡度

母线名称	电压偏差小		电压偏差大	
	电压偏差/kV	不平衡度/%	电压偏差/kV	不平衡度/%
SLM220	8.9	6.5	14.1	9.5
SLM110	6.9	8.7	9.5	11
SLM35	1.5	8.8	3.6	11.1

由表 4 可知,母线电压偏差越大,所对应的不平衡度越大。

3) 系统 PCC 的短路容量:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站 PCC 处的短路容量,仿真计算得到不同短路容量所对应的负序三相电压不平衡度,如表 5 所示。

表 5 短路容量不同时各电压等级对应不平衡度

短路容量/MVA	不平衡度/%		
	SLM220	SLM110	SLM35
644	6.5	8.7	8.8
1000	4.5	6.7	6.8

由表 5 可知,PCC 处短路容量越大,所对应的不平衡度越小。

4) 不平衡负荷的容量:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站所带电气化铁路单相负荷的容量,仿真计算得到不同单相负荷容量所对应的负序三相电压不平衡度,如表 6 所示。

表 6 负荷容量不同时供电臂各电压等级对应不平衡度

负荷容量/MVA	不平衡度/%		
	SLM220	SLM110	SLM35
10	4.9	6.5	6.6
21	6.5	8.7	8.8
50	10.2	13.7	13.9

由表 6 可知,不平衡负荷容量越大,所对应的不平衡度越大。

5) 电铁供电臂:保持仿真模型中其他变量不变,仅通过改变 SLM 变电站所带电气化铁路单相负荷供电臂的接入系统的相序,仿真计算得到不同接入相所对应的负序三相电压不平衡度,如表 7 所示。

表 7 负荷接入相不同时各电压等级对应不平衡度

供电臂	负荷接入相	不平衡度/%		
		SLM220	SLM110	SLM35
AEJSq1an	CA	6.5	8.7	8.8
SEKLq1an	CA			
AEJSq1an	CA	3.3	4.4	4.5
SEKLq1an	AB			
AEJSq1an	BC	2.8	3.6	3.7
SEKLq1an	CA			
AEJSq1an	BC	3.3	4.4	4.5
SEKLq1an	AB			

由表 7 可知,当两个牵引站供电臂接入相相同时,所产生的不平衡度最大,当供电臂接入相不同时,会对负序电流有一定的中和作用,故不平衡度会减小。

综上所述,仿真得到系统负序分量越大、母线电压偏差越大、PCC 处短路容量越小、不平衡负荷容量越大、供电臂接入相相同,所对应的不平衡度越大。

3 基于实测数据的格库铁路对电力系统及用户的影响分析

为分析格库铁路接入新疆电网对接入地区电能质量的影响,对 SLM 变电站及附近的新能源场站开展了电能质量测试,下面基于实测数据开展分析。

3.1 对新能源场站的影响分析

实测新能源场站 35 kV 三相电压不平衡度如图 5 所示。

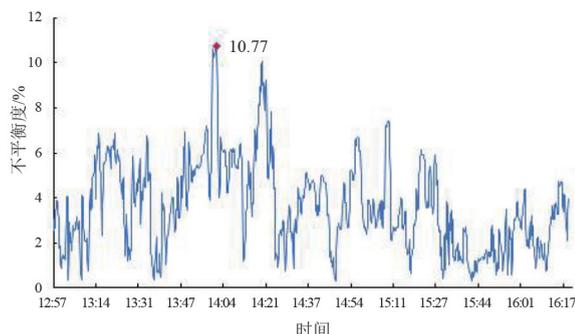


图 5 35 kV 母线三相电压不平衡度

由图 5 可知该新能源场站母线电压不平衡度最大达到 10.77%,已严重超出国标规定的短时不超过 4%的要求,造成新能源场站的逆变器以及无功补偿装置不能正常工作:在无列车经过时不平衡度小于 4%,设备可正常工作;有列车经过且影响较大时不平衡度将大于 4%造成设备频繁跳闸。根据图 5 测试曲线可以看出,不平衡度基本是时刻都在变化的,设备频繁跳闸将影响使用寿命。且由于无功补偿装置不能正常投运,将造成新能源场站出力限制,严重影响到场站的经济效益。

实测新能源场站 35 kV 母线电压偏差如图 6 所示。

由图 6 可知该新能源场站母线电压下偏差最大值为 12.967%,此时电压最低将低于 0.9 pu,按照光伏逆变器低电压穿越阈值,将可能存在进入低穿现

象,对新能源场站的逆变器产生影响。

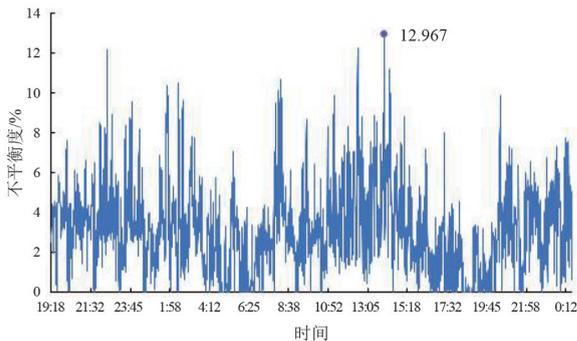


图6 35 kV 母线电压偏差

3.2 对电力用户的影响分析

实测 SLM220 母线三相电压不平衡度如图 7 所示。

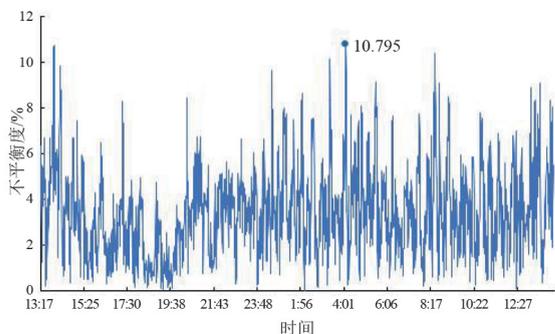


图7 SLM220 母线三相电压不平衡度

由图 7 可知 SLM220 母线三相电压不平衡度最大值为 10.795%。

电力用户通常由 110 kV 电压等级接入,主变压器将电能从 220 kV 变换到 110 kV 后供给用户使用,该地区的主要用户接入在 TD 变电站,通过实测数据将 SLM220 母线三相电压不平衡度传递到 TD 变电站后,依然超出国标要求。

三相电压不平衡度超标将增加电动机的定、转子铜损,降低电动机的最大转矩和过载能力,还有可能引起电动机振动。由于格库铁路造成的负序电压三相不平衡度超标致使用户 TS 水泥厂电动机不能正常工作,造成一定的经济损失。

3.3 对电力系统的影响分析

通过实测数据得到 SLM220 母线三相电压不平衡度和 SLM35 母线三相电压不平衡度对比曲线如图 8 所示。

由图 8 可知 SLM220 母线电压和 SLM35 母线电压三相不平衡度不考虑采样精度的条件下基本保持一致,最大值均为 10.7%。

故通过实测数据可以看出三相不平衡度将完全通过变压器传递,不会发生衰减,负序三相电压不平衡度较大将影响变压器的寿命,产生附加损耗;将引起以负序分量为起动元件的保护发生误动;引起电网损耗的增加。

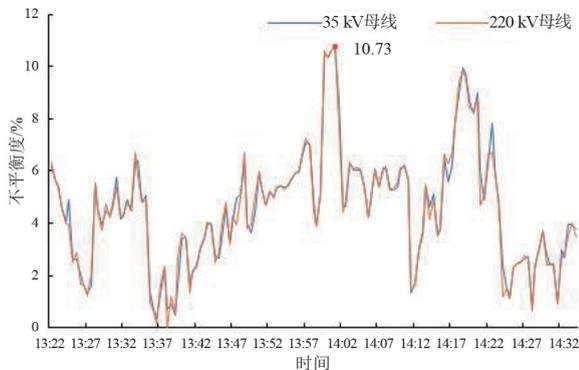


图8 SLM220 和 SLM35 母线三相电压不平衡度

4 改善三相不平衡的措施分析

基于格库铁路接入新疆电网带来的电能质量问题,考虑利用三相平衡化的机理分别从铁路侧和电网侧两方面开展分析验证。

4.1 三相平衡化的机理分析

不平衡的三相系统的总功率是在平均值的基础上上下脉动。要将不平衡系统变换为三相平衡系统时,在变换设备中应设有能够暂时储积能量的电感和电容元件。举例说明,一个不平衡单向负荷 R (如图 9 所示),为将其转化为平衡系统,在其他两相分别增加 $j\omega L = j\sqrt{3}R$ 的电感和 $1/j\omega C = -j\sqrt{3}R$ 的电容后,二者产生谐振,则可将单相系统构造成三相平衡系统,如图 10 所示。

4.2 铁路侧改进措施有效性验证

基于“谁污染,谁治理”的原则,新疆电网若羌地区的三相不平衡主要是由于格库铁路不平衡负荷接入引起的,以 SLM 变电站为研究对象,考虑在格库铁路 SLM 变电站的 SEKLqIan 供电臂 110 kV 母线处加装治理装置,以平衡负序电流。

基于文献[17]的分析机理,通过向系统中注入与负序电流方向相反的不平衡电流来中和系统中的负序电流,以不平衡度满足国标要求的 4% 开展仿真分析,在 ETAP 仿真软件中搭建无功电流的注入元件,仿真模型如图 11 所示,基于图 11 的仿真模型

得到如表 8 所示的仿真结果。

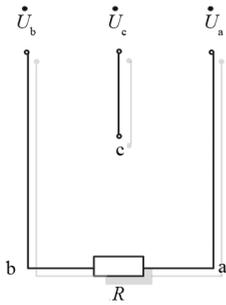


图 9 单相系统

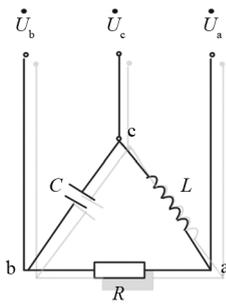


图 10 平衡后三相系统

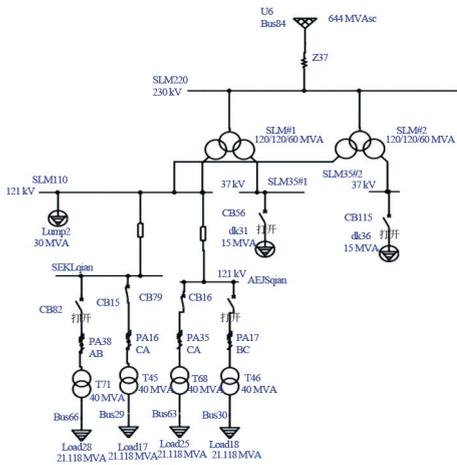


图 11 铁路侧改善措施仿真模型

表 8 铁路侧改善前后三相电压不平衡度 单位: %

母线	改善前	改善后
SLM220	6.5	0.38
SLM110	8.7	1.76
SLM35	8.8	1.86

通过在 SLM110 母线上搭建无功元件,向系统注入 BC 相无功电流 124 A 后,将 SLM 变电站各母线的负序三相电压不平衡度降低至 2% 以内,补偿效果较好,仿真验证了改善措施的有效性。

4.3 电网侧改进措施有效性验证

该地区网架结构相对薄弱,考虑对电网侧改进

措施开展仿真分析,SLM 变电站 220 kV 母线电压三相不平衡度超过 10% 的电网侧原因是该站 220 kV 母线短路容量较小。为提升该地区的短路容量,考虑网架补强的改善措施,根据十四五规划,该地区网架补强后短路容量将提升至 1570 MVA。

根据实测 SLM220 的三相不平衡度最大为 10.7%,利用 ETAP 开展仿真验证,仿真初始不平衡度按 SLM 变电站电气化铁路带来的最大不平衡度给定 SLM220 为 6.5%,加入改进措施的仿真模型如图 11 所示,模型中是将等效电网的短路容量改为 1570 MVA 来开展仿真分析的,基于图 12 的仿真模型得到如表 9 所示的仿真结果。

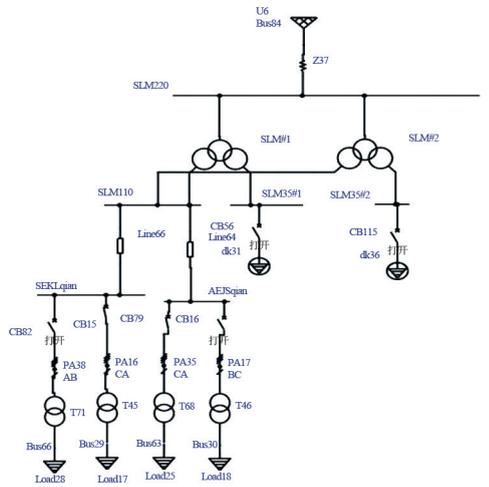


图 12 电网侧改善措施模型

表 9 电网侧改善前后三相电压各不平衡度 单位: %

母线	改善前	改善后
SLM220	6.5	3.1
SLM110	8.7	5.3
SLM35	8.8	5.4

根据上述仿真结果,网架结构补强后,SLM220 母线的负序三相电压不平衡度将小于 4%,满足国家标准短时不超过 4% 的要求。且该补强措施已开工建设,待建成后该地区三相电压不平衡将得到改善。

5 结论

上面分析了电气化铁路接入弱联系电网的三相不平衡影响因素,得到以下结论:

1) 三相不平衡的评价指标是负序三相电压不平衡度,通过理论分析得出负序三相电压不平衡度与序分量、电压偏差、系统 PCC 的短路容量及不平

衡负荷的容量有关。

2) 基于格库铁路接入新疆电网的实际搭建模型,仿真分析验证了电力系统负序分量越大、母线电压偏差越大、PCC 处短路容量越小、单相负荷容量越大、电气化铁路供电臂接入相相同,所对应的不平衡度越大。

3) 通过对格库铁路实测数据的分析,得出负序三相电压不平衡度超标将影响新能源场站、电力用户的正常工作,影响电力系统中变压器的寿命,产生附加损耗;将引起以负序分量为起动元件的保护发生误动;引起电网损耗的增加。

4) 借助 ETAP 仿真软件分别从铁路侧和电网侧两方面仿真验证了改善措施的有效性,铁路侧治理效果将优于网架补强的改善效果。待若羌地区十四五网架补强后,将进一步改善格库铁路接入新疆电网带来的电能质量问题。

参考文献

- [1] 李群湛,王帅,易东,等.电气化铁路贯通同相供电 AT 牵引网故障辨识与自愈技术研究[J].铁道学报,2022,44(7):46-54.
- [2] 宋平岗,林家通,李云丰,等.采用 MMC-RPC 治理牵引供电系统负序和谐波的 PIR 控制策略[J].电工技术学报,2017,32(12):108-116.
- [3] GHASSEMI A, MAGHSOUD I, Farshad S, et al. Power quality improvement in Y/ Δ electric traction system using a Railway Power Conditioner [C]//Proceedings of the 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEE, 2013.
- [4] 程鹏,刘文泉,陈冲,等.面向电气化铁路牵引供电的光伏发电分相电流控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(19):145-153.
- [5] DE LA TORRE S, SÁNCHEZ-RACERO A J, AGUADO J A, et al. Optimal sizing of energy storage regenerative braking in electric railway systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):149-150.
- [6] 胡斯佳,张志文,李勇,等.一种绕组补偿式电气化铁道电能质量控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2140-2150.
- [7] KNESCHKE T A. Control of utility system unbalance

caused by single-phase electric traction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, IA-21(6):1559-1570.

- [8] 王辉,李群湛,解绍锋,等.基于 Vv-SVG 的电气化铁路同相供电综合补偿方案及控制策略[J].铁道学报,2021,43(9):46-55.
- [9] DAI N Y, LAO K W, WONG M C. A hybrid railway power conditioner for traction power supply system [C]//Proceedings of the 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2013:1326-1331.
- [10] LAO K W, WONG M C, DAI N Y, et al. Analysis of DC-link operation voltage of a hybrid railway power quality conditioner and its PQ compensation capability in high-speed cophase traction power supply [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2):1643-1645.
- [11] 刘诗慧.基于阻抗分析的电气化铁路车-网-车耦合作用及系统稳定性研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [12] 邹大云.电气化铁路对电网电能质量影响仿真技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [13] 张一帆,邓昆玲,尹柏清.应用 ETAP 软件分析电气化铁路对电网的影响[J].内蒙古电力技术,2010,28(S2):20-22.
- [14] 邹大云.基于 ETAP 的电气化铁路对地区电网影响的分析研究[D].西安:西安工程大学,2016.
- [15] 王佩,朱辉,李骑,等.电气化铁路投入对南疆电网电能质量影响分析[J].电工技术,2021(23):57-61.
- [16] 全国电压电流等级和频率标准化委员会.电能质量三相电压不平衡:GB/T 15543—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [17] 吴传平,罗安,徐先勇,等.采用 V/v 变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J].中国电机工程学报,2010,30(16):111-117.

作者简介:

段玉(1993),女,硕士,工程师,研究方向为电能质量仿真分析、电力系统规划、多能源系统、电力系统运行;

侯冰(1987),男,硕士,工程师,研究方向为无线电专业管理、电能质量分析。

(收稿日期:2022-10-16)

基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊

张晓斌

(国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要:对负序源辨识研究不仅要找到主导源,更重要的是要定量各不平衡用户的责任。现有负序源识别的研究很大程度上依赖于等效负序阻抗,而由于电力系统的波动性较大,负序阻抗参数的确定是难以解决的问题。文中的方法避开了估算负序等效阻抗这个难题,基于建立等效电路并结合实际情况分析的负序电流在系统中散布的原理,将实测数据作为基础参考数据,减少人为估算参数的干扰,确保计算数据的实时性和准确性,能够快速简单地得到各个负序源的责任划分量化指标并进行对比。最后,采用 Matlab 仿真模型和实际算例分析验证了所提方法的正确性。

关键词:负序源辨识;等效负序阻抗;责任划分;仿真验证

中图分类号:TM 714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0052-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220608

Responsibility Allocation of Multiple Negative Sequence Sources Based on Theoretical Analysis of Actual Circuits

ZHANG Xiaobin

(State Grid Linyi Electric Power Supply Company, Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract:The research on the identification of negative sequence sources is not only to find the dominant source, but also to quantify the responsibilities of each unbalanced user. The existing researches on the identification of negative sequence sources depend largely on the equivalent negative sequence impedance, and due to the large fluctuation of power system, the determination of negative sequence impedance parameters is difficultly to be solved. The proposed method avoids the problem of estimating the equivalent negative sequence impedance, and based on the established equivalent circuit and the principle of the distribution of negative sequence current in system analyzed by the combination with the actual situation, the measured parameters are taken as the foundation data to reduce the human interference in parameter estimation and to ensure the real-time performance and accuracy of calculation data. Thus the quantitative indicators of responsibility division of each negative sequence source can be quickly and easily obtained and compared. Finally, Matlab simulation model and actual calculation are adapted to verify the validity of the proposed method.

Key words: negative sequence source identification; equivalent negative sequence impedance; division of responsibilities; simulation and verification

0 引言

随着供电系统的工业化发展,三相不平衡在电能质量问题中日益凸显。复杂的电力系统在运行中,三相不平衡负荷时刻存在着,由此产生的负序会出现影响设备安全运行、增大线路损耗及电动机效率低等诸多问题^[1-2]。然而,国内外对负序责任划

分的研究极少,一般对单污染源就只是通过监测到的数据对计算出的三相不平衡度进行分析。当公共连接点(point of common coupling,PCC)处连接有多个可能产生负序的用户,并没有明确的方案或标准解决该问题。考虑负序谐波在电力系统传播机理的相似性,可以借鉴谐波分析方法对多负序源进行责任分摊。与谐波责任划分对比,由于负序来源较为简单,多负序责任分摊的研究更为简便,但对于各

用户负序阻抗的确定仍然是一个问题,以致划分各用户负序责任难以得到令人满意的结果。

现有负序源识别的研究很大程度上依赖于等效负序阻抗,而由于电力系统的波动性较大,负序阻抗参数的确定是难以解决的问题^[2]。下面所提方法避开了估算负序等效阻抗这个难题,建立等效电路并结合实际情况分析负序电流在系统中散布的原理,其结果很大程度上是依赖实测数据,并不依赖于人为选取的参数,很具有实时性和准确性,并且能够快速简单地得到各个负序源的责任划分量化指标并进行对比。

1 理论分析

采用等效电路原理,忽略系统侧出现负序的少数情况,将系统侧等效为一个负序阻抗,将各个产生负序的用户等效为负序阻抗并联负序电流源^[3];结合实际电力系统的特点,根据等效电路的拓扑结构对负序电流的散布进行分析;最后,根据分析结论量化各个用户各自的负序责任。

由于在复杂的电力系统中,估算或者选取负序阻抗参数是一个难以解决的问题。因此,可以不考虑具体的负序参数,结合实际系统的特征,通过建模分析电路拓扑关系来进行多负序源的责任分摊。按照等效原理思想,将产生负序的一侧等效为等效负序阻抗并联等效负序电流源^[4];而由于等效电路本身一般适用于用电环节不平衡情况,不适用于由于输电线路换相不完全导致系统三相不平衡情况,则将系统侧等效为等效负序阻抗 Z_s ,可以由电网短路阻抗等参数确定,为一确定值^[5];多不平衡用户则各自等效为等效负序阻抗 Z_{ck} 并联等效负序电流源 i_{ck} 。对于一个存在 n 个不平衡用户的系统,其等效负序网络如图 1 所示。

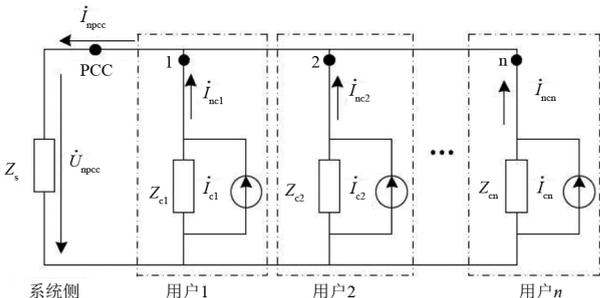


图 1 等效负序网络

实际监测到的三相数据经过对称分量处理就可以得到如图 1 中的各个负序电流 $i_{nc1}, i_{nc2}, \dots, i_{ncn}$, 这是在所有负序源共同作用下所监测到的量。 $Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, Z_{cn}$ 分别为各个用户的等效负序阻抗, $i_{c1}, i_{c2}, \dots, i_{cn}$ 为各个用户的等效负序电流源。PCC 点处监测到的负序电压 U_{npcc} 和负序电流 i_{npcc} 为各个用户单独产生的负序电压和负序电流共同叠加的结果,而对于各个用户处的负序电流,一部分是本身产生的,另一部分是由其余用户等效负序电流源作用产生的^[5-6]。以带有两个不平衡用户的系统举例,如图 2 所示。

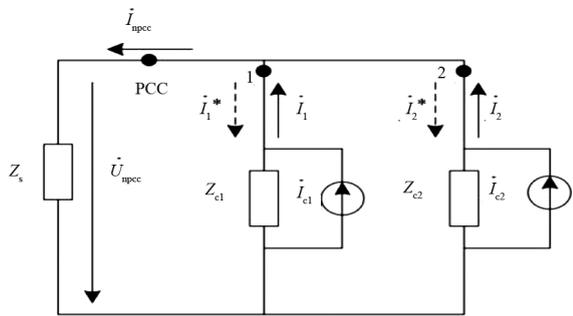


图 2 负序电流散布分析

图 2 中有两个不平衡负荷,即两个负序源;在两个用户处监测到的负序电流 i_{nc1} 和 i_{nc2} 都由两部分产生, i_{nc1} 由用户 1 自身负序电流源 i_{c1} 产生的负序电流 i_1 和用户 2 负序电流源 i_{c2} 单独作用时产生的反向负序电流 i_1^* 构成, i_{nc1} 与用户 1 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系, i_1^* 与用户 2 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系;同理, i_{nc2} 由用户 2 自身负序电流源产生的负序电流 i_2 和用户 1 负序电流源单独作用产生的反向负序电流 i_2^* 构成, i_2 与用户 2 的等效负序电流源 i_{c2} 呈倍数关系, i_2^* 与用户 1 的等效负序电流源 i_{c1} 呈倍数关系,即有以下关系式^[7]:

$$i_{nc1} = i_1 + i_1^* = \alpha_1 i_{c1} + \alpha_2 i_{c2} \quad (1)$$

$$i_{nc2} = i_2 + i_2^* = \alpha_1 i_{c1} + \beta_2 i_{c1} \quad (2)$$

式中, i_1 和 i_2 分别为用户 1 和用户 2 处实际的负序电流,分别是各自等效负序电流源单独作用产生的。

以用户 1 单独作用为例,分析用户 1 在 PCC 处单独产生的负序量 i_{n1} ,在自身处产生的负序量 i_1 以及它在用户 2 处产生的反向负序量 i_2^* ,如图 3 所示。

由此可得,当用户 1 负序电流源单独作用时,分别产生 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2^* ,即 $\alpha_1 \dot{I}_{c1}$ 和 $\beta_2 \dot{I}_{c1}$,其中:

$$\alpha_1 = \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2} // Z_s} = \frac{1}{1 + (Z_{c2} // Z_s) / Z_{c1}} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2} // Z_s} \frac{Z_s}{Z_{c2} + Z_s} = \alpha_1 \frac{1}{1 + Z_{c2} / Z_s} \quad (4)$$

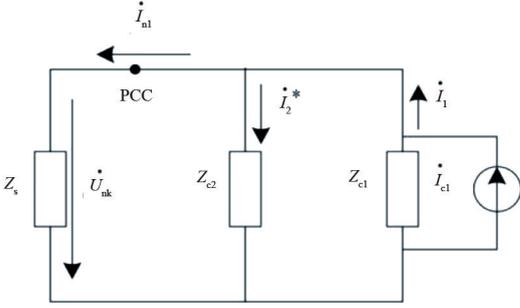


图 3 用户单独作用电路分析

同理,当用户 2 负序电流源单独作用时,分别产生 \dot{I}_2 和 \dot{I}_1^* ,即 $\beta_1 \dot{I}_{c2}$ 和 $\alpha_2 \dot{I}_{c1}$,则有:

$$\beta_1 = \frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1} // Z_s} = \frac{1}{1 + (Z_{c1} // Z_s) / Z_{c2}} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1} // Z_s} \frac{Z_s}{Z_{c1} + Z_s} = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \quad (6)$$

将式(3)一式(6)分别代入式(1)、式(2)可得:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{1 + (Z_{c2} // Z_s) / Z_{c1}} \dot{I}_{c1} \quad (7)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{1 + (Z_{c1} // Z_s) / Z_{c2}} \dot{I}_{c2} \quad (8)$$

$$\dot{I}_1^* = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_{c2} = \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_2 \quad (9)$$

$$\dot{I}_2^* = \beta_1 \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_{c1} = \frac{1}{1 + Z_{c1} / Z_s} \dot{I}_1 \quad (10)$$

最后,用户 1 在 PCC 处产生的负序电流 \dot{I}_{n1} 和负序电压 \dot{U}_{n1} 为

$$\dot{I}_{n1} = \frac{Z_{c2}}{Z_s + Z_{c2}} \dot{I}_1 = \frac{1}{1 + Z_s / Z_{c2}} \dot{I}_1 \quad (11)$$

$$\dot{U}_{n1} = \dot{I}_{n1} Z_s = \frac{Z_s}{1 + Z_s / Z_{c2}} \dot{I}_1 \quad (12)$$

同理,用户 2 在 PCC 处产生的负序电流 \dot{I}_{n2} 和 \dot{U}_{n2} 负序电压为:

$$\dot{I}_{n2} = \frac{Z_{c1}}{Z_s + Z_{c1}} \dot{I}_2 = \frac{1}{1 + Z_s / Z_{c1}} \dot{I}_2 \quad (13)$$

$$\dot{U}_{n2} = \dot{I}_{n2} Z_s = \frac{Z_s}{1 + Z_s / Z_{c1}} \dot{I}_2 \quad (14)$$

由叠加原理可以得到:

$$\dot{I}_{npcc} = \dot{I}_{n1} + \dot{I}_{n2} \quad (15)$$

$$\dot{U}_{npcc} = \dot{U}_{n1} + \dot{U}_{n2} \quad (16)$$

由于系统侧的等效短路阻抗为

$$|Z_r| = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (17)$$

式中: U_n 为额定电压; S_n 为短路容量。在整个电力系统中,都是由系统侧给各个用户供电,因此系统侧设定的短路容量肯定远远大于任意用户处的短路容量^[8],由式(17)可以得出结论:系统侧的等效负序阻抗远远小于各不平衡用户的等效负序阻抗;用户侧等效负序阻抗与系统等效负序阻抗并联得到的阻抗值,与系统侧的阻抗值在同一个数量级。

因此,式(3)中的 $\alpha_1 \approx 1$,式(5)中的 $\beta_1 \approx 1$,则 $\dot{I}_1 \approx \dot{I}_{c1}$, $\dot{I}_2 \approx \dot{I}_{c2}$;结合式(9)和式(10),可知 \dot{I}_1^* 远小于 \dot{I}_2 而接近 0,同样地 \dot{I}_2^* 远小于 \dot{I}_1 而接近 0,说明来自其他用户作用产生的负序量很少。由式(1)和式(2)可以得到 $\dot{I}_{nc1} \approx \dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_{nc2} \approx \dot{I}_2$,即直接监测到的负序电流值与各个用户实际产生的负序电流值相差不大,可以近视将两者看为相等。由式(11)和式(13)可以得到 $\dot{I}_{n1} \approx \dot{I}_1 \approx \dot{I}_{nc1}$ 和 $\dot{I}_{n2} \approx \dot{I}_2 \approx \dot{I}_{nc2}$,由此可以判定各用户产生的负序电流几乎全部都流向了系统侧,且在各用户监测到的负序量可以近视等同于它们在 PCC 处产生的负序量。由式(12)和式(14)可得到 $\dot{U}_{n1} \approx Z_s \dot{I}_{nc1}$, $\dot{U}_{n2} \approx Z_s \dot{I}_{nc2}$ 。

综上所述可以得出结论:每个负序源产生的负序电流大部分流向阻抗小的一侧,即系统侧;那么,可以直接用监测到的负序量代替各用户单独作用时产生的实际量来评估各个用户的负序责任。此结论适用于有两个及以上不平衡用户的系统。当系统中存在两个责任相当且不平衡度严重的负序源用户时,在这两个用户处监测到的负序电流可以近似于自身单独产生的实际负序电流相等,绝大部分负序电流都流向系统侧,相互抵消的反向电流是微乎其微的;当系统中存在一个责任较大和一个责任相对较小的两个用户,采用监测电流直接评判使得责任大的一方所得责任更大,而责任小的一方受到的责任更小,这样更加凸显责任大一方的负序责任。因此,可以直

接将实际监测到的负序电流作为多负序源责任分摊的评判标准^[9-13]。

同样地,为了能够量化各个用户对总负序的贡献责任,根据式(13)和式(14),将各处监测到的负序电流和负序电压分别投影到 PCC 处,得到总负序电流 \dot{i}_{npcc} 和总负序电压 \dot{U}_{npcc} ,继而得到负序电流责任指标 H_{I_k} 和负序电压责任指标 H_{V_k} ^[14]。

$$H_{I_k} = \frac{|\dot{i}_{nck}|}{|\dot{i}_{npcc}|} \cos(\theta_{I_{nck}} - \theta_{I_{npcc}}) \quad (18)$$

$$H_{V_k} = \frac{|\dot{i}_{nck}| |Z_s|}{|\dot{U}_{npcc}|} \cos(\theta_{I_{nck}} + \theta_{Z_s} - \theta_{U_{npcc}}) = H_{I_k} \quad (19)$$

式中: θ 为 PCC 处电压和电流的相位角。

在这里,负序电压责任指标 H_{V_k} 与负序电流责任指标 H_{I_k} 结果一样,因此只需考察负序电流责任指标 H_{I_k} 。负序责任指标大于 0 时,代表该用户对总负序起促进作用,且值越大责任越大,并结合 PCC 处负序分量大小判断是否需要及时治理;负序责任指标小于 0 时,代表该用户对总负序起抵消作用,应给予奖励^[14-15]。

还有一点需要关注的是,可能会出现产生负序很小的用户,造成其他用户对它的负序影响很大,导致在该用户处监测到的负序电流很大,这样可能造成错误分摊^[16]。为了避免多用户责任的误分摊,应该先判断每个用户处的总负序电流是否来自其他用户。对于每个用户,将其一侧看为等效用户侧,将系统侧和除该用户以外的用户都看为等效系统侧。如图 4 所示,假定负序电流 \dot{i}_k 的参考方向是从等效用户侧流向等效系统侧,即等效用户侧作为参考负序源。

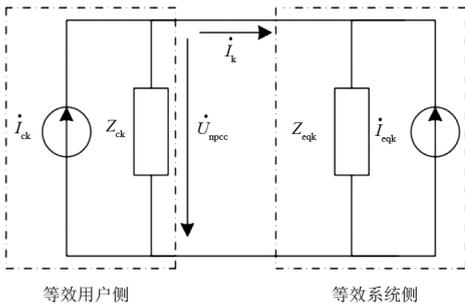


图 4 单用户判定原理

得到等效用户侧处的负序电流 \dot{i}_k 和负序电压 \dot{U}_{npcc} ,由式(20)计算此处的有功功率为

$$P_{nck} = |\dot{U}_{npcc}| |\dot{i}_{nck}| \cos(\theta_{U_{npcc}} - \theta_{I_{nck}}) \quad (20)$$

当 P_{nck} 大于 0,说明等效用户侧发出正负序有功功率,则证明等效用户侧为负序源;当 P_{nck} 小于 0,则证明等效用户侧总体在消耗负序有功功率,实际的负序电流 \dot{i}_{nck} 的方向与参考方向相反,说明等效系统侧作为负序源向等效用户侧发出更多的负序有功功率,可断定此用户不是负序源或者分摊的负序责任很小可忽略掉,此时在负序责任分摊过程中可不考虑此用户。

综上所述,基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊方法的完整步骤为^[17-20]:

- 1) 由电网参数确定系统侧等效负序阻抗;
- 2) 监测 PCC 处的电压和电流以及各个不平衡用户处的电流,将各监测值进行对称分量处理得到各负序分量。
- 3) 根据图 4 原理以及式(20),先初步排除非负序源用户或者对系统负序影响极小的用户。
- 4) 取各负序电流量,由式(18)计算得到除步骤 3 所排除用户以外的用户负序电流责任指标,通过比较可以直观地了解到各个负序源的责任划分。
- 5) 对负序责任严重的用户加以治理,治理后再次对各用户的责任进行评估,直到整个系统没有三相不平衡度超标的现象。

2 仿真分析

建立了一个 35 kV 电压等级的三相系统,带有两个不平衡用户 L_1 和 L_2 。从这个系统可以得到等效电路如图 5 所示。

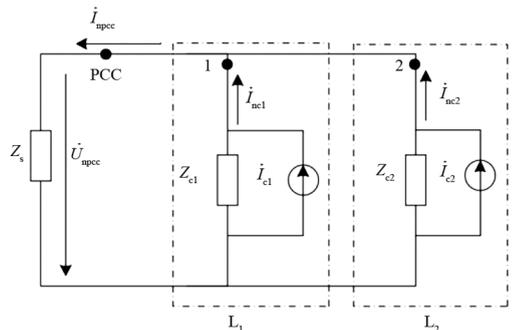


图 5 系统负序网络等效电路

图 5 中,系统等效负序阻抗 $Z_s = 0.0083 + j0.25$, L_1 和用户 L_2 处分别直接监测到负序电流 \dot{i}_{nc1} 和 \dot{i}_{nc2} ,且

用户 L_1 的三相不平衡度大于用户 L_2 , 即 i_{nc1} 大于 i_{nc2} 。用户 L_1 和用户 L_2 的阻抗信息如表 1 所示。

表 1 用户阻抗信息

用户	理论负序阻抗/ Ω
L_1	$0.5052 + j0.6197$
L_2	$0.5021 + j0.5479$

首先, 计算测试点 1 和测试点 2 处的负序有功功率, 结果都大于 0; 将负序电流 i_{nc1} 和 i_{nc2} 反向计算得到的功率小于 0; 并且, 将用户 L_1 和用户 L_2 的等效负序电流源分别流向对方的量最多只有自身等效负序电流的 20%。而在实际电力系统中, 系统侧阻抗与用户侧阻抗相比差得更多, 各用户负序源流向其他用户的量会更少。直接用监测的负序电流得到的负序责任指标与各用户单独产生的实际电流得到的负序责任指标进行对比, 如图 6、图 7 所示。

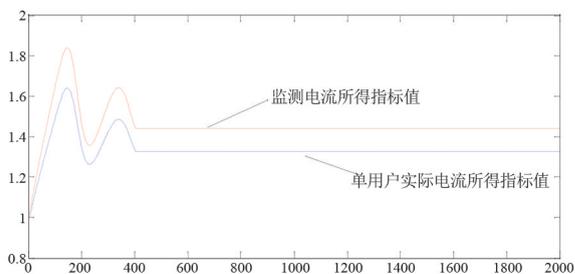


图 6 用户 L_1 指标对比

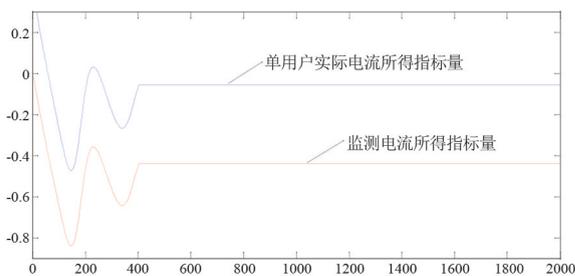


图 7 用户 L_2 指标对比

图 6 和图 7 中蓝色线为用户 L_1 和用户 L_2 分别单独作用时产生的负序电流, 即实际产生的负序电流所得的指标; 红色线为直接在网络里面监测到的负序电流所得指标, 两者趋势一致。显而易见, 用户 L_1 的负序责任大于用户 L_2 , 用户 L_1 为主要负序承担者; 用户 L_2 的责任不仅较小, 还呈负值, 表示用户 L_2 对 PCC 的总负序分量起抵消作用。直接使用监测值判别, 使得责任大的一方所分摊得到的责任更大、责任小的一方所分摊得到的责任更小。这样更凸现责任大的用户, 以便对主导源加以治理。

3 实测算例

实测数据来自于成都某地铁主变电站 35 kV 母线。该母线一侧通过变压器连接 110 kV, 一侧接有 3 个供电分区。利用城轨电能质量测试仪 PQSAS 获取电能质量过程数据。测试周期为 24 h, 采样频率为 6400 Hz, 测点分布如图 8 所示。图中: 测点 a_0 为电压测点; 测点 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别为对应馈线电流测点。基于获得的实测录波数据, PCC 处部分原始波形见图 9。

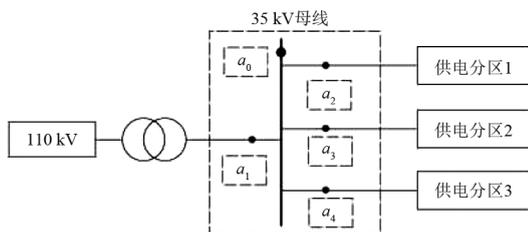
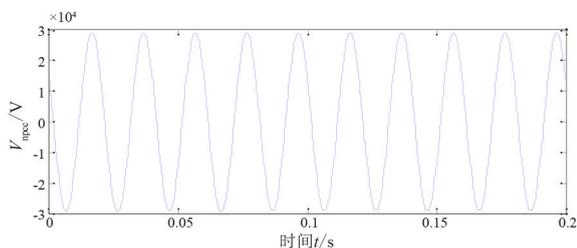
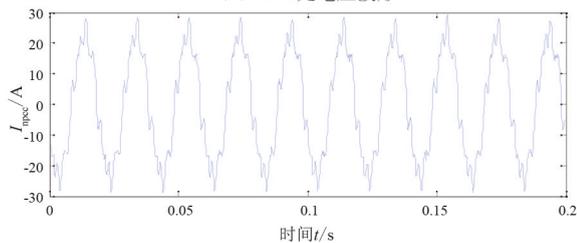


图 8 某地铁主变电站 35 kV 母线测量等效



(a) PCC 处电压波形



(a) PCC 处馈线 0 电流波形

图 9 PCC 处原始录波数据波形

为了验证所提算法的准确性, 在 PCC 处仿真抽取了 1800 个采样点, 在个别采样点加入异常值, 迭代过程中将采样点分段成 60 为一组的数组, 则可以得到 1741 组回归系数解, 分别得到 3 个供电分区的负序阻抗和负序压源, 如图 10—图 12 所示。

图 10—12 中, 蓝色线代表实际测量值, 红色线代表使用所提算法计算得到的曲线, 黑色直线标示出理论参考值。可以明显看出实际测量值和所提算法得到的计算值都很接近理论参考值。得到各个用户参数后, 再利用负序分摊原理计算各指标; 最后,

将理论、实测值、所提方法计算得到的负序责任指标做对比,如表 2 所示。

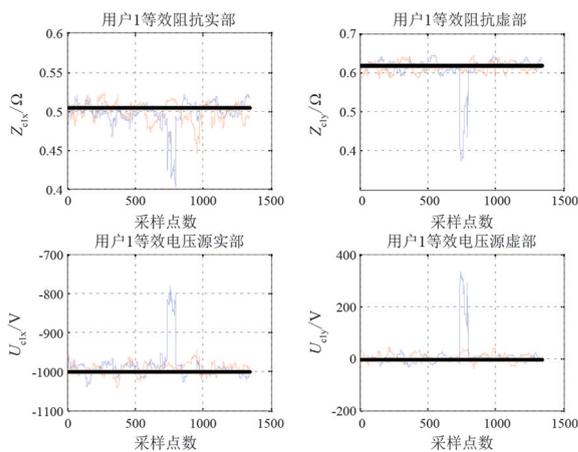


图 10 供电分区 1 负序参数估算结果

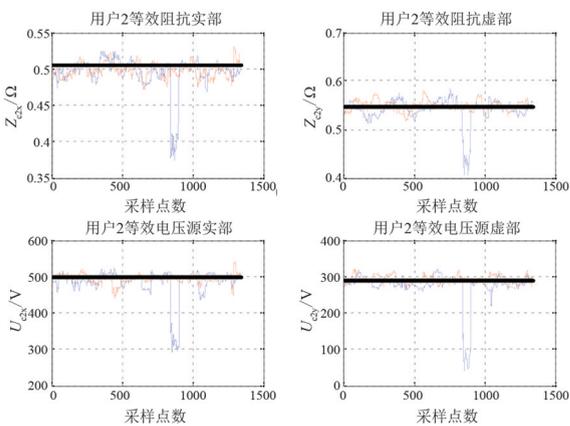


图 11 供电分区 2 负序参数估算结果

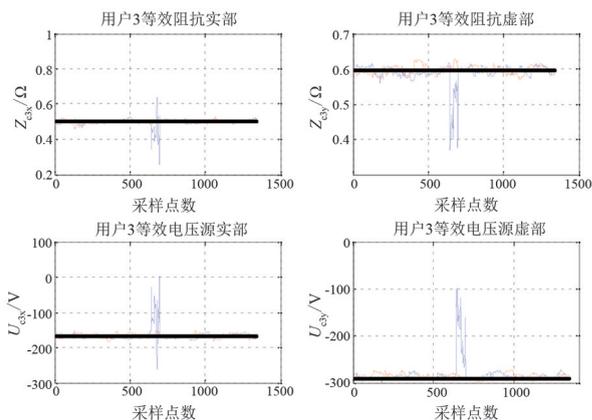


图 12 供电分区 3 负序参数估算结果

很明显地看出,作为不平衡度最大的 L_1 分摊责任最大,且对 PCC 处的负序电压和负序电流起促进作用,因此为主要承担者; L_2 对 PCC 处的负序起抵消作用,应该受到嘉奖; L_3 对 PCC 处的负序贡献较小,可以先对 L_1 进行适当治理后再对系统负序分量进行评估。

表 2 负序责任指标对比

指标	用户	理论值	实测值	误差/%	所提算法值	误差/%
H_{V_k}	L_1	168.03	160.56	4.45	167.62	0.24
	L_2	-83.44	-79.98	4.15	-82.92	0.62
	L_3	24.49	22.17	9.52	24.17	1.35
指标	用户	理论值	实测值	误差/%	所提算法值	误差/%
H_{I_k}	L_1	671.76	661.87	5.89	670.09	0.25
	L_2	-333.56	-324.72	2.65	-331.50	0.62
	L_3	98.32	92.62	5.80	96.62	1.73

4 结 论

基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊,从等效电路的理论分析并根据实际电力系统中供电系统侧等效负序阻抗远小于用户侧等效负序阻抗得出。该方法直接比较监测到的负序分量来划分各个用户的负序责任,这样可以避开确定负序阻抗这一大难题。并且,理论分析出几乎所有负序电流都流向了阻抗小的一侧,即系统侧或者等效系统侧,这样各用户处单独产生的负序量实际与监测量接近。因此,直接将监测量代替单用户实际量进行多负序源责任分摊是可行的,将实际系统中的波动都通过监测量反映,也不用顾及参数选择不当带来的影响。

参考文献

- [1] 郑再添,曾江,余涛.基于实测数据估算谐波阻抗及背景谐波电压[J].电气时代,2012(1):86-89.
- [2] 李世龙,滕予非,李小鹏,等.基于无功电流的中性点不接地系统小电流接地选线方案[J].四川电力技术,2019,42(2):20-23.
- [3] 李丽,马宏忠,姜宁,等.基于改进最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):92-95.
- [4] 康婕,谢绍锋,刘晓菊,等.基于支持向量机的谐波阻抗估计方法.电力系统保护与控制,2010,38(22):131-134.
- [5] 詹仲强,付菊霞.平滑风电出力的风储联合系统能量管理协调控制研究[J].四川电力技术,2019,42(5):29-36.
- [6] 王诗超,沈沉,程建洲.考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法[J].电力系统自动化,2012,36(3):65-69.
- [7] 仰彩霞,刘开培,王东旭,等.利用实矩阵的谐波谱振评估及其灵敏度分析[J].高电压技术,2011,37(2):491-496.
- [8] NOUROLLAH S, MOALLEM M. A data mining method for obtaining global power quality index[C]. 2011 2nd

- International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems(EPECS), 2011;1-7.
- [9] 师立涛. 电力系统谐波谐振及防治措施的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [10] 马晓兰. 计及背景谐波及背景负序影响的牵引供电系统谐波与负序评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [11] 李尚盛, 吴楠, 查晓明. 基于电容器分组投切的电网谐波阻抗特性研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3354-3360.
- [12] 吴命利, 吴丽然, 杨少兵, 等. 交流电气化铁道牵引网阻抗频率特性测试装置: 104090182A[P]. 2014-10-08.
- [13] 姜昊. 电网阻抗特性测试与辨识[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 师洪涛, 卓放, 杨祯, 等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统谐波阻抗测量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 257-264.
- [15] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.
- [16] 王诗超, 沈沉, 李洋, 等. 基于波动物量法的系统侧谐波阻抗幅值估计精度评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 145-149.
- [17] 惠锦, 杨洪耕, 林顺富, 等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
- [18] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2016, 1: 8PP.
- [19] 王能进, 周子洋, 李飞, 等. 主变压器低压侧三相空载电压不平衡分析[J]. 四川电力技术, 2019, 42(5): 92-94.
- [20] XU Wilsun, LIU Yilu. A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.

作者简介:

张晓斌(1994), 男, 工程师, 从事输配电工作。

(收稿日期: 2022-10-14)

(上接第 34 页)

- [2] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 高电压技术, 2009, 18(1): 64-73.
- [3] HOU H, HE X K, LI Z T, et al. Risk assessment of power system under typhoon disaster[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2014, 8(3): 289-296.
- [4] MENG Y, MATSUI M, HIBI K. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 68(1): 437-448.
- [5] 楼文娟, 罗罡, 杨晓辉, 等. 输电线路动态风偏响应特性及频域计算方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1493-1499.
- [6] 龙立宏, 胡毅, 李景禄, 等. 输电线路风偏放电的影响因素研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 19-21.
- [7] 范亚洲. 沿海架空输电线路防风防雷的综合治理[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7-22.
- [8] 孙保强, 候镭, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.
- [9] 李震宇, 武国亮, 王志利, 等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 125-131.
- [10] 张勇, 赵勇, 王景亮, 等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 42-45.
- [11] 周中秋. 台风对配电网的影响和防御对策[J]. 广东电力, 2009, 22(5): 29-31.
- [12] 张锋, 吴秋晗, 李继红. 台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 39-42.
- [13] 杨民京, 董锴, 吴龙腾, 等. 广东电网台风调度应急处置系统及策略[J]. 电工技术, 2021, (16): 121-123.
- [14] 李大虎, 袁志军, 何俊, 等. 面向台风气象的电网运行风险态势感知方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2301-2313.
- [15] 侯慧, 俞菊芳, 黄勇, 等. 台风侵袭下输电线路风偏跳闸风险评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3907-3915.
- [16] 谷炜, 朱炳铨, 沈绍斐, 等. 超强台风“利奇马”调度应急处置经验及启示[J]. 浙江电力, 2020, 39(8): 35-41.
- [17] 程向辉, 刘俊勇, 杨嘉湜, 等. 电力系统运行状态分析和识别方法研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(S1): 20-23.
- [18] 夏志军, 王刚. 地市供电企业遭受重大自然灾害时的应急处置[J]. 四川电力技术, 2008, 31(S2): 70-73.
- [19] 杨翮, 卢瀚顺, 李祥, 等. 基于信息比对的电力系统监控信息全面巡视工作研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(4): 41-44.

作者简介:

徐湘忆(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网设备状态监测;

毛玮韵(1991), 女, 学士, 工程师, 研究方向为输电线路台风预警监测;

高凯(1975), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电力设备状态检测与诊断技术;

任辰(1993), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网设备状态感知。
(收稿日期: 2022-09-11)

变压器套管的发展历程与挑战

王永琪^{1,2}, 吴广宁¹, 刘凯¹, 林牧¹, 丁镇¹, 汤浩³

(1.西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2.西南交通大学唐山研究院, 河北 唐山 063000;
3.中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 变压器套管主要用于固定引线和保证引线对外绝缘, 在运行中长期受到电、热、力多重物理场的作用, 其稳定性决定了变压器的安全运行。文中简述了套管的起源, 梳理了套管在时间、结构与材料3个维度的演化历程; 分析了套管内部过热、局部放电以及地震损坏等影响安全性与稳定性的故障, 归纳了现阶段上述问题的有效解决方法和检测技术, 对比了各方法的时效性与可靠性; 最后提出了变压器套管小型化、轻量化、低成本与大容量的发展方向, 为变压器套管未来的研发提供借鉴。

关键词: 变压器套管; 发展历程; 安全性与稳定性; 检测技术; 发展方向

中图分类号: TM 406 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0059-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220609

Development History and Challenges of Transformer Bushing

WANG Yongqi^{1,2}, WU Guangning¹, LIU Kai¹, LIN Mu¹, DING Zhen¹, TANG Hao³

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Tangshan Graduate School, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, Hebei, China;
3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Transformer bushing is mainly used to fix the leads and ensure the external insulation of the leads. It is subjected to multiple physical fields of electricity, heat and force for a long time in operation, and its stability determines the safe operation of transformer. Firstly, the origin of bushing is briefly described, the evolution of bushing in time, structure and material are summarized. Then, the defects and faults affecting the safety and stability of bushing, such as overheating, partial discharge and earthquake damage, are analyzed. Moreover, the existing effective solutions and detection techniques for the above problems are summarized, and the timeliness and reliability of each method are compared. Finally, the development goals of transformer bushing with miniaturization and lightweight, low cost and large capacity are put forward, which can provide references for the development of domestic transformer bushing.

Key words: transformer bushing; development history; safety and stability; detection technology; direction of development

0 引言

作为变压器核心组件之一, 套管承担着引线对地绝缘的作用, 还起到了固定支撑引线并将引线与外部隔绝的作用^[1-2]。

套管在投入运行后, 其服役周期长、工作环境复杂, 同时受到多震、高温、强电等复杂因素的影响, 因此其绝缘性能势必下降。变压器套管的主要故障包括接头过热、局部放电、地震损坏等^[3-4]。近年来,

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(SGTYHT/19-JS-215)

上述套管故障时有发生。据国家电网统计, 变压器事故中 20% 以上由套管损坏引起^[5]。因此套管的稳定性能对于变压器的安全是一重要关键保障, 更维系着电力系统输配电的可靠性。

针对变压器套管的各种故障, 工程上有不同的检测技术, 例如: 红外成像技术可甄别过热与渗漏油故障; 特高频法可检测套管局部放电故障; 油色谱法可通过监测套管内气体种类与比例诊断相关故障; 介电响应技术可检测绝缘系统受潮老化程度。另外, 为保证套管投入使用时的安全性, 其绝缘设计应当满足型式试验与例行试验检测标准^[6]。

下面梳理了变压器套管从雏形到成熟的演化历程,综述了接头过热、局部放电、地震损坏等影响安全性能的故障特征及解决措施,并分析了红外成像、介电响应、特高频与油色谱等检测技术的特点与不足,最后展望了国内超高压、特高压领域变压器套管的未来发展方向。

1 变压器套管起源

变压器套管作为变压器引线固定装置,其与变压器诞生的时间差较小。1850年德国技师路姆考夫(H D Ruhmkorff)在前人的基础上制作出改良版的感应火花线圈,即路姆考夫感应线圈^[7]。路姆考夫感应线圈的原边与副边引线处套加有玻璃管,内

部充入空气以增加电气性能;1891年,在特斯拉发明的高频变压器中,也将导线引入玻璃管中^[8]。两者将玻璃管作为套管装置,保护引线并保证其对外绝缘,这是变压器套管的雏形与起源。

2 变压器套管发展历程

2.1 时间节点

2.1.1 套管技术发展过程

套管发展各阶段时间节点如图1所示。

变压器套管的发展阶段基本对应套管的演化周期。从1831年出现法拉第感应线圈开始到1900年,变压器套管探索尚处在初级阶段,其作用只为接

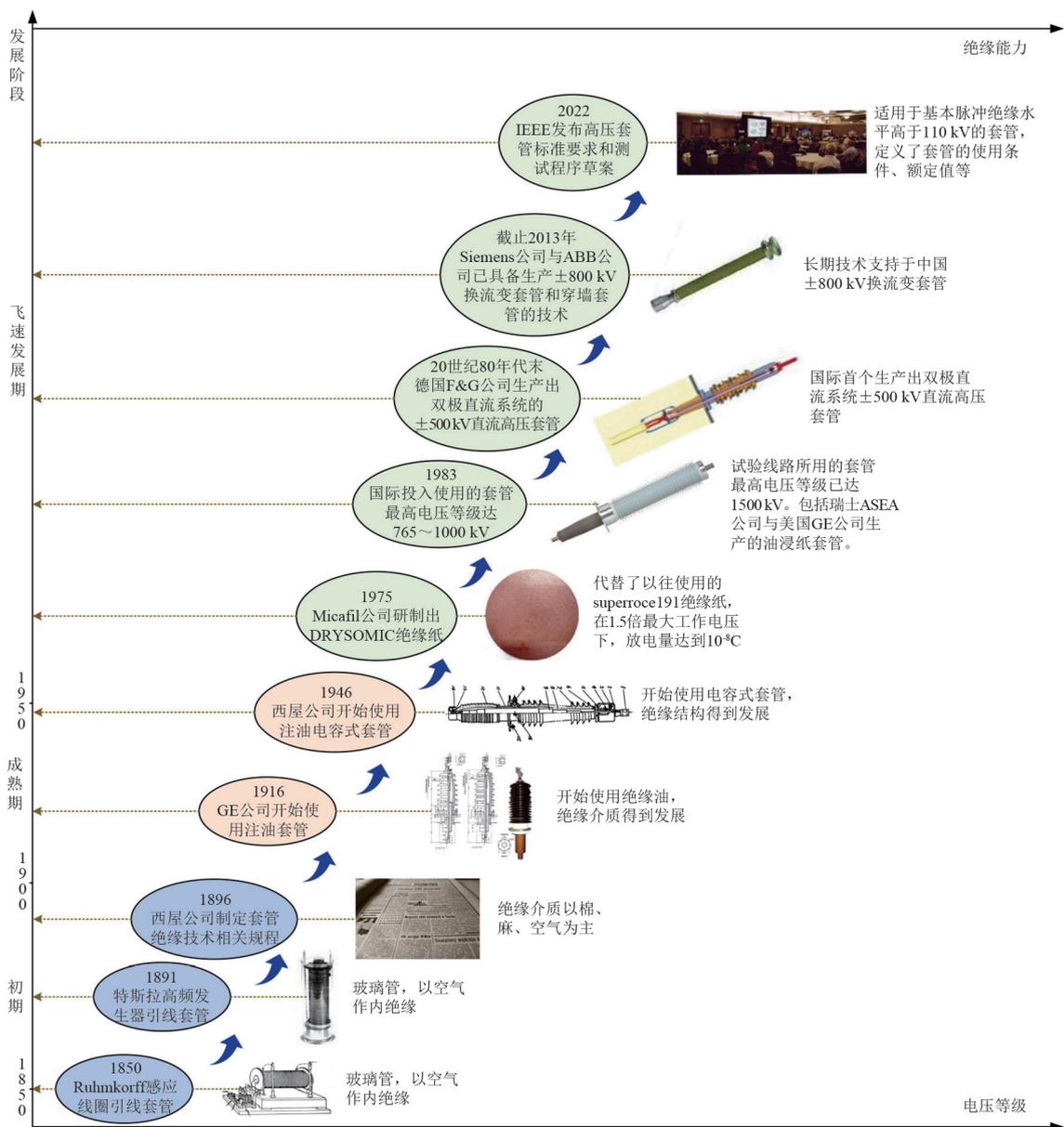


图1 套管发展阶段

入并保护引线,鲜有考虑绝缘性能的措施,因此无论是套管还是线圈层之间的绝缘措施都十分粗糙简陋。1895年以前工程上对于绝缘材料、绝缘方法知之甚少,直至1896年美国西屋公司才制定出相关规程。

而在1901年至1950年期间,变压器套管技术进入成熟阶段。套管绝缘结构与材料也逐渐推陈出新,由最开始的空气为绝缘介质发展到以棉、麻、绝缘油等作为内绝缘。为解决套管电压等级受限的难题,开始出现电容式套管^[8],典型产品为GE公司使用的充油套管和西屋公司使用的充油电容式套管。

20世纪50年代以后,变压器套管进入飞速发展阶段。为适应电压等级逐步升高的现状,套管绝缘形式开始多样化,并且体积质量增大。在绝缘结构方面,由胶粘纸电容式发展到胶浸纸电容式、油浸纸电容式;在绝缘材料方面,由纯瓷套管发展到树脂套管、复合材料套管等^[9]。随着直流输电工程的问世,换流变压器直流套管也得到快速发展,为适应换流变压器的复杂强电场,国际上各厂家相继研发出配套的套管结构,典型产品包括ABB公司研制出的GOA-GOE系列套管与 ± 800 kV换流变压器套管。

2.1.2 中国套管关键技术突破历程

中国套管研究起步晚,但受国际大环境影响,发展迅速。南京电气集团自20世纪50年代起开始研制电容套管,先后在关键技术取得突破,填补了国内相关领域的空白^[10]。新世纪以来,中国电力产业发展迅速,部分电压等级套管已达到行业先进水平。国电四维公司率先打破国外垄断,研制出220 kV电容式环氧玻璃干套管^[11]。同时中国已经能够生产直流 ± 400 kV穿墙玻璃钢套管和220 kV交流变压器玻璃钢套管,在20多个省份的电网中投运近万台,并有部分产品出口到北美国家。

但是中国套管研究仍处于瓶颈阶段,例如中国西电联合西安交通大学团队研发的 ± 800 kV特高压干式直流套管,在投入使用时出现诸多不足之处,如过热缺陷、绝缘劣化等问题并没有彻底解决,因此特高压换流变压器阀侧套管还需依赖进口。国际上高压套管技术处于领先地位的企业包括但不限于ABB公司、HSP公司、NGK公司。探其原因,还要归结于中国套管关键技术领域未得到突破,例如套管内绝缘材料之间的性能匹配机制、绝缘组件与载流导管的组合结构设计、温度分布变化特性规律等^[12-15]。基于此,中国特高压直流套管的研究任重道远,需要纵深发展和细致化探索。

中国套管关键技术突破概况如图2所示。

2.2 结构演化

早期变压器套管结构简单,电压应用等级较低。随着工程电压等级逐渐提高,套管结构不断翻新,由非电容式的单体瓷绝缘套管发展至油浸纸电容式套管。各阶段套管典型结构如图3所示^[2]。

国际上早期整体式套管由美国GE公司与西屋公司牵头制造;电容式套管的原理可以追溯到20世纪早期,西门子公司公司的R Nagel、西屋公司的A B Reynders以及麦克菲尔(Micafil)公司与瑞典通用电机公司(ASEA)公司相继发表论文,描述了电容式套管一般原理,并与整体式套管进行比较^[16]。以西门子公司为代表的各国厂家在高压、超高压、特高压领域逐渐试制出相应规格的套管,加快了电力工业的发展进程。

2.2.1 整体式套管

整体式套管主要用于25 kV及以下的场合,适用范围包括小配电变压器到大发电机升压变压器。

1) 复合瓷绝缘式套管又称复合式套管,由上、

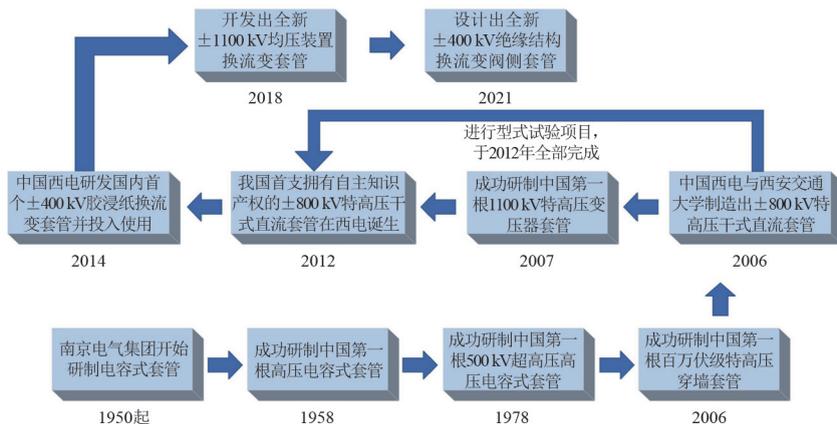


图2 中国套管关键技术突破概况

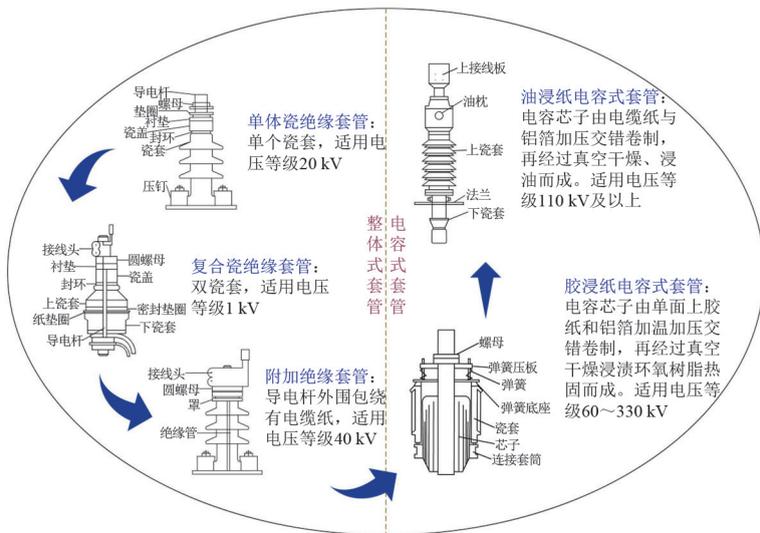


图 3 典型套管结构

下双瓷套组成,中间通有导电杆。复合式套管又分为内复合式与外复合式。外复合式套管易内部积存水分而发生闪络,因此通常使用内复合式套管。

2) 单体瓷绝缘式套管的单个瓷套通过法兰或者压钉固定安装在变压器箱盖上。当单体瓷绝缘套管中电流超过 600 A 时,顶部设有气孔且套管内腔充满变压器油以改善散热环境。

3) 附加绝缘套管中的导杆式套管的导电杆外围套有绝缘管,穿缆式套管的电缆表面包绕有 3~4 mm 厚度的电缆纸。这些附加结构不仅改善了套管内电场分布,还提升了击穿电压水平。事实上,当纯瓷套管电压等级达到 35 kV 或电压在 20 kV 以下同时电流大于 600 A 时,需要更优的散热与绝缘性能,于是便产生了附加绝缘结构。

2.2.2 电容式套管

常见的电容式套管包括胶粘纸电容式套管、胶浸纸电容式套管和油浸纸电容式套管。电容式套管几乎用于 25 kV 以上的所有电压等级。

1) 胶粘纸电容式套管的主绝缘为胶纸本身,电容芯子由涂抹树脂的绝缘纸卷绕而成,在卷绕过程中每一纸层因树脂的热固化而粘结。胶粘纸电容式套管是较早使用的电容套管,但其制造工艺简陋,未经过真空处理,在使用过程中极易发生电容阶跃,因此已渐渐被淘汰。

2) 胶浸纸电容式套管的主绝缘电容芯子由 0.05~0.07 mm 厚的单面上胶纸与 0.007 mm 或 0.01 mm 厚的铝箔加温加压交错卷制,再经过真空干燥浸渍环氧树脂热固而成。其基于良好的气密

性,无需护套,可直接与变压器油或 SF₆ 气体接触。

3) 油浸纸电容式套管是目前电气工程上主要使用的套管形式,其主绝缘电容芯子由 0.08~0.12 mm 厚的电缆纸与 0.007 mm 或 0.01 mm 厚的铝箔加压交错卷制,再经过真空干燥、浸油而成,芯子与绝缘套管内壁之间充入与浸润时相同的绝缘油。油浸纸电容式套管对气密性要求严格,因此套管下部与变压器油接触部分需要加上瓷套。

2.3 材料创新

套管常用外绝缘材料包括电瓷、环氧树脂与复合绝缘材料。

2.3.1 电瓷

早期电瓷以长石质瓷为主,坯料由黏土、长石和石英 3 种原料组成;后为提高瓷体强度常增加石英原料比例形成高硅瓷。

其后日本首次使用方石英质电瓷材料,机械强度高于普通电瓷,但后期强度下降较快,难以满足更高电压等级需求。

1931 年,西门子公司将烧结氧化铝陶瓷用于制造火花塞绝缘子,引发了人们对高铝陶瓷的研究。铝质瓷不仅使产品的可靠性有了极大的提高,而且使瓷绝缘子长期存在的质量问题大为减少。

2.3.2 环氧树脂

环氧树脂是指分子中含有 2 个以上环氧基团的一类热固性聚合物的总称,电气工程中常用的一类为双酚 A 型环氧树脂。

环氧树脂于 20 世纪 30 年代研制成功,40 年代末开始商业化使用,并首次用于电子设备的成型和

封装。环氧树脂化学结构稳定,具有耐紫外线照射、耐高温、抗老化、不易产生气隙、绝缘强度高等优势,使环氧树脂套管有其独特的应用价值^[17-18]。

2.3.3 复合绝缘材料

20世纪50年代左右,欧美等国家开始研究复合绝缘材料,采用聚四氟乙烯、乙丙橡胶和环氧树脂等作为主要的绝缘材料,但因工艺原因,绝缘强度不高;70年代后期采用硅橡胶材料后,复合绝缘材料才得到广泛应用。

复合绝缘材料套管具有机械强度高、耐污性与憎水性好、体积小以及重量轻等优点。但其材料化学稳定性较差,在长期紫外线照射以及高温、强电、环境腐蚀下,极易发生老化,造成伞裙损坏^[19-20]。

3 面临的挑战

3.1 变压器套管典型故障

套管长期服役于强力、高温、强电的多物理场环境中,多面临接头过热、局部放电与机械损坏的故障问题。

3.1.1 过热故障

接头过热是造成变压器套管故障原因之一。套管接头过热主要发生在接线板与外部引线接头连接处、将军帽与接线板连接处、导电头与内部绕组引头连接处。近年来,110 kV及以上变压器套管因接头温度较高导致损坏的事故时常发生^[21-24]。过热的本质在于热散失速率与热生成速率的失衡,热量长时间集中在套管内部必然导致热故障。过热原理本质在于焦耳热原理和电压型致热。基于此,引起套管接头过热的直接原因有紧固不足、实际接触面积小于标称接触面积、螺纹公差配合不当、加工尺寸存在偏差、接触螺纹长度不足、套管定位销变形及安装错位、定位螺母缺失或松脱等;另外,当接触面发生电化学腐蚀时易形成氧化膜增加接触电阻,导致套管过热烧毁。对于套管过热原因分析的具体关系如图4所示。

为优化套管热环境,需要从产热与散热两方面着手解决过热问题:

1) 优化套管内部结构,如改变气隙、芯子尺寸、绝缘管直径等。但套管本身体积受限,内部构件尺寸并不能大幅度变动,上述措施对于热场优化效果有限。

2) 架构闭式重力热管。热管换热能力可观,热管工质的选择多样,易于制备,价格低廉。但该技术需要考虑气液混合态下的气密性。

3) 研发高热导率材料。

4) 加强红外测温工作。

5) 对发热严重的套管进行停电处理,更换部件。

6) 加强设备出厂验收与安装管控。

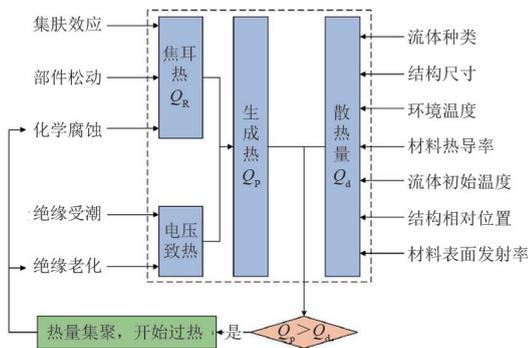


图4 套管过热原因分析

3.1.2 放电故障

变压器套管中电容芯子等绝缘介质由于受潮、老化和电场不均匀易产生放电现象^[25-29]。局部放电电弧释放大量能量,油纸绝缘和铝箔被烧毁,产生大量气体,易导致套管内气压增大引起爆炸。常见放电类型包括尖端放电、悬浮放电与电晕放电。悬浮放电多由于套管本身设计存在缺陷,如均压罩松动或松脱造成电场分布不均引起放电。尖端放电是在强电场作用下物体尖锐部分发生放电,一般由于金属部件加工工艺不良与绝缘老化造成。电晕放电常由其表面电压分布不均匀引起,如法兰下部裙体喷涂的金属粉脱落时,脱落部位将有强烈的电晕现象。

现有套管局部放电检测主要面临的难题有:

1) 安全性低。测量用传感器通常安装在套管表面或下端,距离高压线近,测试工作中人身与设备安全需要更多保障。

2) 抗干扰能力不足。变电站内接地装置的电磁干扰、变压器本身的机械振动和电流信号都会对检测装置造成多重干扰。

3) 局部放电故障难以精确定位和诊断。

套管局部放电技术优缺点对比如表1所示。

现阶段对于变压器套管局部放电的抑制措施主要包括:

1) 优化套管等放电裕度设计;

2) 使用如纳米 TiO_2 等新型材料;

3) 进行多物理场耦合分析, 根据场中放电规律提出抑制方案;

4) 对于受潮进水造成的放电故障可采用真空热油循环干燥处理;

4) 构建智能监测、诊断系统。

表 1 典型套管局部放电检测方法优缺点

检测方法	优点	缺点
高频电流互感法	精度高	测量频带窄, 易引入外部干扰, 引起误判
超声波法	对底部载流缺陷引起的放电和下瓷套内壁沿面放电敏感	对电容芯子内部放电不敏感
特高频法	对套管底部载流缺陷引起的放电敏感	对电容芯子内部和下瓷套内壁的早期局部放电不敏感

3.1.3 机械故障

中国部分地区处于环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 因地震导致变压器套管受损引起的系统瘫痪时有发生^[30-34]。

变压器套管为典型长悬臂结构, 具有“高、重、柔”的特点。地震时升高座发生摆动, 地震响应被放大并向上传递, 套管根部产生较大弯矩从而发生断裂。纯瓷套管瓷套具有脆性, 阻尼小, 基本频率低, 易与地震波发生共振而碎裂; 复合套管更容易产生较大的顶部位移, 但是具有较好的延展性和能量吸收能力。

目前常见的变压器套管基础减震隔震系统包括摩擦摆隔震系统、高阻尼橡胶隔震支座、叠层橡胶隔震支座和铅芯橡胶隔震支座等。其特点归纳如表 2 所示^[35-38]。

表 2 变压器套管典型隔震体系特点

隔震体系	特点
摩擦摆隔震系统	结构简单, 具有良好的承载能力、隔震性能、耗能能力、导振性能和自复位能力
高阻尼橡胶隔震支座	散能强且环境友好
叠层橡胶隔震支座	竖向承载力大, 易于控制, 自复位能力强; 但不能完全避免共振
铅芯橡胶隔震支座	结构简单, 可灵活改变阻尼

但目前隔震系统在变压器套管中的应用仍非十分完善, 有待研究的问题如下:

1) 变压器本身的机械震动与电磁噪声对于隔震系统的影响机制;

2) 隔震系统能否抑制套管底部开裂与滑移破坏现象;

3) 套管与隔震系统的物理场耦合关系。

3.2 变压器套管检测方法

3.2.1 常规试验

套管在设计、生产时为满足工程标准必须进行系列试验, 包括型式试验、例行试验。

型式试验针对设计的第一支套管, 确认设计值能够满足额定参数^[16]。试验包括:

1) 最大系统电压为 242 kV 及以下套管的低频湿耐压试验;

2) 全波雷电冲击耐受电压;

3) 截波雷电冲击耐受电压;

4) 最大系统电压 345 kV 及以上套管的湿操作冲击耐受电压;

5) 穿芯导线套管帽压力试验;

6) 抗弯耐受试验;

7) 额定电流下的温度试验。

例行试验针对生产的每支套管, 目的是检查生产中应用的工艺和质量^[39]。试验包括:

1) 10 kV 电容和介质损耗因数测量;

2) 带有局部放电测量的低频干耐受试验;

3) 抽头耐压试验;

4) 内部液压试验。

3.2.2 红外成像

红外检测技术是基于热辐射定律成立的, 红外检测是典型的非接触式测量, 不受电磁干扰。

高压套管内接线座与导电管通过螺纹进行连接; 变压器内部引线穿过导电管后其接头通过定位销固定在接线座上, 然后与导电头通过螺纹连接; 导电头与套管接线端子之间通过螺栓夹连接; 套管接线端子与外部导线接线端子通过螺栓连接。在变压器引线接头至导电接线端子很短的距离内就有多个电气接头, 发生热故障的可能性高。此时通过红外成像就可以发现异常的发热点以便及时排除故障。

套管内电压致热型故障发生时没有明显的发热点, 整体温度同步上升, 变化较为细微, 不易观察; 但是当温差超过 2~3 K 时已属严重故障, 这说明此时红外检测时效性不足。当套管内发生渗漏油时, 由于变压器油与空气的热物理性质相差甚大, 所以在分离界面的上、下区域温度梯度较大, 通过红外成像能够清晰发现。但是某些商家制作的套管上、下瓷套材料不一, 在套合处也会有明显的温度分界, 容易引起误判, 需要检测人员耐心甄别。

红外检测技术除上述不足外, 还有几个亟待解决的问题, 包括:

1) 成像图像质量差。红外辐射在空气中的衰减、光电信号处理图像固有属性差、传感器灵敏度有限等都会影响成像质量。

2) 红外图像处理软件与红外成像仪兼容性差。

3) 对于套管缺陷的定位精度较差。

4) 依赖人工诊断。一方面,人工检测效率低下;另一方面,人工检测多为经验性诊断,容易引起误判,延误检修。

因此,未来红外成像发展的方向应与智能算法、深度学习相结合,优化图像分辨率,高速处理图像信息使之与套管故障点特征相连接,实现精确定位。

3.2.3 特高频

特高频法常用来检测局部放电。特高频检测技术具有信息丰富、灵敏度高、抗干扰能力强的优点^[39-43]。

油纸电容式套管通常放电故障发生在套管顶部、电容芯子、末屏、下瓷套与底端均压环处。因此,特高频可用于顶部悬浮放电检测、下瓷套沿面放电检测、末屏引线接触不良放电检测和底部均压环悬浮放电检测等。对于位于油箱内部的套管局部放电,特高频信号可能通过套管瓷套底部向外辐射,造成传播路径的不确定。

特高频检测技术的关键在于传感器的灵敏度和响应速度,而传感器的灵敏度、响应速度又与其安装方式、类型等有关。

除传感器安装方式与类型的制约外,特高频技术亟待解决的问题如下:

1) 抑制套管引线上的电晕干扰;

2) 特高频信号传输特性的研究;

3) 电磁波在套管内部折反射产生复杂振荡波形,需要提高信号首波灵敏度;

4) 精确读取首波到达时刻。

3.2.4 油色谱法

当变压器套管内发生过热、放电时,所产生的气体种类与比例有所差异,包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 CO 、 CO_2 等,但只有出现强烈过热时才会析出 CO_2 气体。

油色谱分析法具有分离效能高、分析速度快、样品用量少、灵敏度高、适用范围广等优势。但也存在相应难点^[44]:

1) 套管油中气体组分的获取需要提供一套完善的系统,确保抽样准确;

2) 套管内气体组分来源广泛,涉及因素较多;

3) 通过气体浓度与比值诊断多依赖于历史经验,仍有不确定性;

4) 无法进行故障定位。

因此油色谱法现多与人工智能结合,搭建全面分析、诊断、监测的平台。

3.2.5 介电响应

在套管结构中,受潮与过热是导致绝缘性能下降的两个重要原因。套管内部绝缘油中的水分以溶解态、悬浮态和沉积态形式存在。绝缘纸中的水分通过表面毛细管、孔洞结构吸附,或通过纤维素渗透作用吸附。在过热温度下,绝缘油会发生裂解,而绝缘纸也会发生热老化。

介电响应是一种无损检测技术,分为回复电压法、极化/去极化电流法、频域介电谱法。回复电压法最早出现,但其只能检测套管整体绝缘系统,无法区分;极化/去极化电流法可分别检测绝缘油与绝缘纸劣化程度;频域介电谱法不同于前两者,其测量频带窄,囊括的信息丰富,抗干扰能力强。但这3种方法也都受到温度因素的影响,从而特征曲线变化各异。

介电响应技术的一个关键问题在于各种方法所测得的特征曲线无法对此作出合理统一的解释,因为无论哪种检测方法,都会受到外部或者内部一系列因素的影响,因此绝缘介质老化、受潮的评估机理十分复杂^[45-49]。

表3中归纳总结了介电响应技术中3种检测方法的优缺点。

表3 介电响应技术各方法对比总结

方法	测量参数	优点	缺点
回复电压法	回复电压	1) 抗干扰能力强;灵敏度高 2) 能较好评估绝缘状况	1) 无法分别评估绝缘纸与绝缘油 2) 测量结果难以合理解释 3) 测量完整光谱时间较长 4) 易受自身泄漏电流影响
极化/去极化电流法	极化电流、介电常数	1) 可分别评估绝缘纸与绝缘油 2) 灵敏度高	1) 极化、去极化初始电流不易测量 2) 易受现场干扰 3) 电流曲线各参量的解释不明确
频域介电谱法	复电容、复介电常数、介损因数	1) 获取的电气信息丰富 2) 抗干扰能力强 3) 可分别评估绝缘纸与绝缘油 4) 可通过工频试验数据验证准确性	1) 设备精密度高,成本高 2) 测量低频特征量时间漫长 3) 未形成统一理论体系描述曲线电气意义

综上,对于套管绝缘缺陷定位,检测方法中可应

用智能算法处理数据搭建计算模型,结合红外检测等其他技术辅助判断。在控制变量下,针对不同影响因素、同一影响因素的不同值可研究选取曲线上与之对应的独特参数点与变化规律,探究其电气与物理意义。

4 结 论

变压器套管由最初的用于接入并保护路姆考夫感应线圈引线的简易玻璃管形式,逐步推陈出新到如今各种精密复杂的形式。发展历程中具有工程进步意义的是其绝缘结构的突破、绝缘材料的创新、检测技术的提升、输电容量的扩增等,体现了工程科学进步的内在逻辑。

随着直流输电工程与新能源并网的发展,超高压、特高压领域变压器套管的自主研发意义十分重要,它关系着国家能源战略与经济民生,而下一阶段中国变压器套管(尤其是特高压领域)的发展方向为小型化、轻量化以及低成本、大容量。变压器套管的轻量化不仅有益于降低运输与安装成本,还大大减少了变压器箱体所承受的机械应力,削弱了风险累积指数。同时,经济性是工程应用的重要指标之一,低成本的内在需求也是技术的进步。而提升套管的输电容量即提升了电网系统的运转效率。

参考文献

- [1] 刘勇,侯向红,杨诚.新型电力变压器结构原理及常见故障处理[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 邱志贤.高压绝缘子的设计与应用[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 欧居勇,付东丰,陈芄.变压器套管事故的分析及预防[J].四川电力技术,2009,32(4):75-76.
- [4] 李林.一起主变压器套管将军帽发热故障的分析与处理[J].四川电力技术,2016,39(4):50-53.
- [5] 孙建锋,葛睿,郑力,等.2010年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2011,44(5):1-4.
- [6] 路长柏.电力变压器绝缘技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- [7] CAZIN M A.On a method of varying the tension of the discharge of an electric battery, and of a Ruhmkorff's coil[J].Philosophical Magazine Letters,1863,25(169):410-411.
- [8] 戴庆忠.电机史话[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [9] 蔡国材.高压套管的进展及其有关问题[J].中国电瓷,1983(1):6-13.
- [10] 赵新生.南京电气特高压变压器套管通过鉴定[J].电器工业,2007(12):1.
- [11] 陈冰心.典型缺陷真型电容式玻璃钢套管电气特征参量测试实验研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [12] 邓江.干式 SF₆ 气体绝缘特高压直流套管的电热场分布特性及内绝缘结构优化设计研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [13] 何常新.换流变压器阀侧套管的电场分布及绝缘特性研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [14] 彭松.特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [15] 王乾.特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性与优化方法研究[D].天津:天津大学,2020.
- [16] HARLOW J H.Electric Power Transformer Engineering[M].3rd ed.Boca Raton: CRC Press.
- [17] 芦竹茂.环氧树脂绝缘材料中的电树枝研究[D].保定:华北电力大学,2012.
- [18] 王旗.微/纳米氧化铝对环氧树脂导热和电气性能的影响研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [19] 齐玉.高压复合绝缘穿墙套管和电缆终端电场仿真及优化设计[D].北京:华北电力大学,2004.
- [20] 张程.环氧树脂/SiC 复合材料非线性电导特性研究[D].天津:天津大学,2018.
- [21] 田汇冬,靳守锋,龚傲,等.换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1146-1156.
- [22] 雷战斐,吴鹏,郭伊宇,等.基于三维电-磁-热流耦合方法的±800 kV 穿墙套管插接结构过热性故障分析[J].电瓷避雷器,2021(2):59-65.
- [23] 张晋寅,田汇冬,吴泽华,等.基于三维电磁-热-流耦合方法的换流变阀侧干式套管插接结构过热性故障研究[J].电瓷避雷器,2019(5):200-206.
- [24] 摆建品,孟杰,高翔.一起 220 kV 变压器低压套管局部过热分析及处理[J].变压器,2018,55(3):67-70.
- [25] 王颂,赵晓辉,方晓明,等.变压器局部放电超高频信号的外部检测[J].高电压技术,2007(8):88-91.
- [26] 葛宝金.变压器内部绝缘系统局部放电分析研究[D].

- 济南:山东大学,2018.
- [27] 朱文兵,辜超,王建,等.变压器套管典型缺陷检测技术研究[J].绝缘材料,2019,52(8):84-89.
- [28] 肖天为.变压器套管局部放电的特征与识别[J].高压电器,2015,51(7):141-147.
- [29] 孙勇,朱建新.换流变压器套管爆炸事故原因分析[J].南方电网技术,2008,2(5):82-83.
- [30] 马国梁,朱瑞元,谢强,等.变压器-套管体系基础隔震振动台试验[J].高电压技术,2017,43(4):1317-1325.
- [31] 谢强,孙新豪,赖炜煌.变压器-套管体系抗震加固理论分析及振动台试验[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6390-6399.
- [32] 马国梁,谢强.大型变压器的基础隔震摩擦摆系统理论研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):946-956.
- [33] 卿东生,陈星,李晓璇,等.大型变压器抗震加固方法及其经济效用分析[J].高压电器,2021,57(11):139-147.
- [34] 曹枚根,周福霖,谭平,等.大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):122-129.
- [35] LAO T P, YUAN W C, FENG R W. Development and application of thought of balance between force and displacement in seismic isolation design of bridges subjected to near-fault ground motions[C]. 2018 10th international conference on measuring technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2018:10-11.
- [36] DUAN C K. Parametric analysis of friction pendulum system Inter-story isolation structure based on benchmark model[C]. 2021 7th international conference on hydraulic and civil engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), 2021:6-8.
- [37] LIU Y F, ZHANG W X, BAO W G. Study on the seismic response of the extradosed cable-stayed bridges with continuous system for different seismic-isolated design scheme[C]. 2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), 2018:248-251.
- [38] YUAN W C, WANG S J, DANG X Z. Talking about the "Double-edged sword" attribute of the force and displacement of seismic mitigation and isolation techniques[C]. 2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), 2018:262-266.
- [39] 龚细秀.变压器局部放电高频和特高频联合监测法的研究[D].北京:清华大学,2005.
- [40] 何梦.变压器局部放电内置式特高频传感器优化与布置的研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [41] 郑书生.变压器绕组中局部放电特高频定位方法研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [42] 邢博.电力变压器局部放电特高频检测与诊断方法研究[D].保定:华北电力大学,2017.
- [43] 毛学飞.基于特高频技术的变压器局部放电特性研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [44] 韦远剑.变压器故障油色谱诊断技术研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [45] KUMAR Saha T. Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003,18(4):1293-1301.
- [46] KHANALI M, JAYARAM S H. Effect of high-frequency pulse ageing on dielectric response of paper/oil insulation[C]. 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 2017:22-25.
- [47] RIEGO D M, BREAZEL R C. Evaluation of distribution class transformers using narrow band dielectric frequency response measurements[C]. 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2020:22.
- [48] ROHITH S, BARUAH N, NAYAK S K. Influence of concentration of nanoparticles on the dielectric frequency response of an insulating nanofluid[C]. 2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2021:12-15.
- [49] RAO B, SUDHINDRA A, RAM ACHANDRA B. Low frequency dielectric response of thermally degraded epoxy-mica insulation[C]. 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009:19-23.

作者简介:

王永琪(1999),男,硕士研究生,主要研究方向为设备绝缘与在线监测;

吴广宁(1969),男,教授,博士生导师,主要研究方向为先进功能电工材料、设备绝缘在线监测、过电压及防护技术。

(收稿日期:2022-07-11)

雷电拦截新技术在高压输电线路的应用研究

宋海东¹, 杨 晖², 钟驰宇¹, 李默林³, 周茹萍⁴, 黄 昱⁵, 张 榆⁶, 李建明⁶

(1.四川盐源华电新能源有限公司, 四川 凉山 615000; 2.广州市气象局, 广东 广州 510530;
3.电子科技大学成都学院, 四川 成都 611731; 4.佛山市顺德区气象局, 广东 佛山 528399;
5.金盾防雷技术发展有限公司, 广东 佛山 528308; 6.国网四川省电力公司
电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:输电线路雷电防护主要依据电气几何模型-保护角法进行设计,是用一次放电(单脉冲)、多次重复实验统计得出。雷击放电包含多个脉冲,单脉冲放电不能完全反映雷电多脉冲放电的物理过程。文中采用CIGRE授权出版的《雷电参数的工程应用》中的观测数据,给出了雷电放电的5个阶段及主要物理参数,同时就避雷针与雷电拦截器对雷电的接闪过程物理参数进行计算。最后,比较分析现有高压输电线路防雷技术的特点和局限性,提出了雷电拦截新技术的应用方法。

关键词:高压送电线路;多脉冲放电;铁塔避雷针;雷电拦截新方法

中图分类号:TM 863 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0068-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220610

Application Analysis of New Lightning Interception Technology in High-voltage Transmission Line

SONG Haidong¹, YANG Hui², ZHONG Chiyu¹, LI Molin³, ZHOU Ruping⁴, HUANG Yu⁵,
ZHANG Yu⁶, LI Jianming⁶

(1.Sichuan Yanyuan Huadian New Energy Co., Ltd., Liangshan 615000, Sichuan, China; 2.Guangzhou
Meteorological Bureau, Guangzhou 510530, Guangdong, China; 3. Chengdu College, University of
Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 4. Meteorological
Bureau of Shunde District, Foshan 528399, Guangdong, China; 5.Jindun Lightning Protection
Technology Development Co., Ltd., Foshan 528308, Guangdong, China; 6. State Grid Sichuan
Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The lightning protection of transmission line is designed mainly based on electrical geometric model-protection angle method, and it is obtained by the statistics of a discharge (one pulse) and many repeated experiments. Single lightning discharge contains multiple pulses, and single pulse discharge can not truly reflect the physical process of lightning multi-pulse discharge. Five stages of lightning discharge and main physical parameters are given according to the observation data in "Lightning Parameters for Engineering Applications" authorized by CIGRE, and meanwhile, the physical parameters of tower lightning rod and lightning interceptor against lightning are calculated. Finally, the characteristics and limitations of the existing lightning protection technologies for high-voltage transmission line are compared and analyzed, and a new application method of lightning interception technology is proposed.

Key words: high-voltage transmission line; multi-pulse discharge; tower lightning rod; new lightning interception method

0 引言

现代雷电科学证实,雷电放电是多脉冲放电(正雷击的观测数据极少不足以描述其放电规律,雷电放电是指负雷击放电)^[1]。长期以来,人们基本按照雷电放电为单脉冲放电进行防护研究。2019年,经国际大电网会议(CIGRE)授权,中国出版了《雷电参数的工程应用》^[2]。经过对国内外雷电放电观测结果的系统研究,这里把雷电多脉冲放电分成5个阶段并定量分析了每个阶段的物理参数。显然,这是雷电防护的基本理论依据。

高压送电线路预防直接雷击主要采用安装架空避雷线(屏蔽线)进行保护。架空避雷线相当于一根水平的避雷带,而高压送电线路的铁塔犹如一根垂直的避雷针^[3]。下面对雷击铁塔避雷针的物理参数进行计算,并与雷击雷电拦截器的物理参数进行比较,给出了应用雷电拦截新技术预防直接雷击损害的新方法,为防雷工程设计人员提供参考和借鉴。

1 雷电放电过程及参数特征

1.1 雷电放电的5个阶段及其效应

雷电对铁塔放电的过程可以简单的分为5个阶段。第一阶段:先导的发生及对下风向的屏蔽作用。第二阶段:上行与下行先导的连接,即首次回击。第三阶段:箭式先导。第四阶段:继后回击。第五阶段:末次回击。下面以偶极子负地闪过程为例。

1.2 先导的发生及对下风向的屏蔽作用

雷云内部电荷极性为上正下负,电场强度可达50~100 MV/m。通常,雷云内部会发生放电现象,称为预击穿过程,为下行先导(又叫梯级先导)的形成提供条件。当底部电场强度达到300~500 kV/m时,开始击穿空气形成向下运动的流光,称为下行先导。其主要参数^[4]:梯级先导到地面的平均速度 V 为 2×10^5 m/s;每一梯级先导平均长度 L 为20~50 m;不连续梯级间隔时间 t 为10~200 μ s;通道温度 T 为 1×10^4 K;过程平均总电荷 Q 为5 C;先导头部端点电场强度 E 为5~10 MV/m。

受雷电下行先导端部电场的影响,铁塔端部感应出与下行先导端部电场相反极性的电荷。当其电场强度达到30~50 V/cm时就发生电晕,产生方向向上的流光,称为上行先导。上行先导与下行先导

受电场力的约束作相对运动,为上下先导连接提供必要条件。同时,铁塔端部的电晕会产生大量的离子,在下风向铁塔端部高度以下区域形成离子屏蔽层,抑制此区域地表物体上行先导的发展,其地面电场半峰值距离约为4 km^[5]。

1.3 首次回击及四大效应

当上行先导发展到距铁塔大约100 m左右,就与下行先导连接^[6]。上行先导端部与下行先导端部相连接的距离(最后一跳)叫击距^[4],用 r 表示。通常, r 的大小与雷电放电电流相关,可用经验公式估算: $r = ar^b$,式中 a 为10, b 为0.65^[7]。上下先导连接后,电荷从大地沿着放电通道冲向云端去中和通道和雷云电荷,形成放电通道,这一过程称为首次回击。其主要参数:电流峰值 i 为30 kA;电流陡度 di/dt 为10~20 kA/ μ s;总电荷量 Q 为5 C;传播速度 v 为 $(1 \sim 2) \times 10^8$ m/s;通道半径 r 为1~2 cm;通道温度 T 为 3×10^4 K。

首次回击将产生以下四大效应:1)在铁塔本体产生垂直电位梯度;2)在铁塔周围空间产生强烈电磁场;3)在铁塔所在的地面产生水平电位梯度;4)以铁塔底部为圆心向地下穿透形成电位漏斗^[8]。首次回击发生的同时,往往会有非主通道枝状雷击发生,在地面可见几个雷击点的痕迹。

1.4 箭式先导

箭式先导在首次雷击发生后沿着雷击通道运动,由于其运动路径从通道顶部直到底部,形状像箭一样而得名。它是首次回击与继后回击之间的过渡过程,起到承上启下的作用。其主要参数:传播速度 v 为 $(1 \sim 2) \times 10^7$ m/s;持续时间 t 为1~2 ms;过程通道滞留总电荷量 Q 为1~2 C;电流 i 峰值为1 kA;先导端部平均电场强度 E 为1~2 MV/m;通道温度 $T \geq 2 \times 10^4$ K。

1.5 继后回击及连续电流

继后回击在箭式先导结束后开始,不断重复首次回击的放电过程,幅值约为首次回击的一半。全球平均每次雷击过程存在3~5个回击,2010年9月12日瑞士桑德斯山记录到26个脉冲^[6]。因为每个回击都是一个脉冲,多次回击组成一组有时间间隔的脉冲串。2017年IEC 61643-11:2011/2 PFG《连接到低压配电系统的多脉冲电涌保护装置附加试验——性能要求和试验方法》正式使用“multi-pulses”,

多脉冲电涌保护器 (multi-pulses surge protective devices, MSPD) 成为专有名词^[9]。其主要参数: 电流 i 峰值为 10~15 kA; 电流陡度极值 di/dt 为 100 kA/ μ s; 电流陡度 di/dt (10%~90%) 为 30~50 kA/ μ s; 持续时间 t 为 30~40 μ s; 总电荷 Q 为 1 C; 传播速度 v 为 $(1\sim 2)\times 10^8$ m/s; 通道半径 r 为 1~2 cm; 通道温度 T 为 3×10^4 K。

从首次回击建立雷电通道后, 通道中存在着维持通道的电荷直到放电结束。在继后回击的多个回击之间, 可见到在脉冲底部有运动方向不变的脉动电流, 叫连续电流 (continuous current, CC)。连续电流定义为紧接回击过程后的较低幅值电流, 是雷击通道中雷击过程的直流分量, 通常呈现为一系列浪涌的叠加。其主要参数: 电流 I 为 100~200 A; 间隔时间 t 约为 100 ms; 总电荷量 Q 为 10~20 C。

连续电流转移大量的电荷, 会产生包括热效应在内最严重的雷击损坏。持续时间小于 40 ms 的连续电流叫短连续电流, 大于 40 ms 的叫长连续电流, 30%~50% 的负地闪包含长连续电流。连续电流中持续几毫秒或更短时间的扰动称为 M 分量^[10]。

1.6 末次回击

首次回击电流峰值通常比随后的继后回击电流峰值大 2~3 倍。然而, 大约三分之一的地闪包含至少一个具有大电场峰值的继后回击。理论上, 其电流峰值也应大于首次回击。大于首次回击的继后回击可能对供电线路和其他系统构成了额外的威胁。末次回击指的是最后的回击, 其特点是前一个回击到末次回击之间通常有一个长达 300~400 ms 的时间间隔, 幅值大于首次回击, 参数与首次回击类同。从首次回击到末次雷击, 一次完整雷击中多脉冲放电过程结束^[11]。

2 现有防雷技术特点及局限性

目前高压输电线路防雷主要由铁塔接地、避雷线和线路避雷器组成。为了便于比较, 重点分析雷击铁塔时传导电流产生的空间电磁场, 铁塔的垂直电位梯度和地面水平梯度。

2.1 空间电磁场强度

雷击铁塔的电流产生的空间磁场强度, 用比奥-萨伐尔定理, 计算公式^[12]为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度, T; μ_0 为真空磁导率, 取 $4\pi\times 10^{-7}$ T·m/A; I 为雷击点传导电流, A; R 为测量点至电流源点的距离, m。

电场强度与磁场强度之间系数为 120π (377)^[13-14], 取雷击电流 30 kA, 其磁场强度按式 (1) 计算, 结果如表 1 所示。

表 1 雷击铁塔空间磁场梯度

距铁塔水平距离/m	磁场强度 B /mT
1	6.00
5	1.20
10	0.60
15	0.40
20	0.30
25	0.24

2.2 垂直电位梯度与地面水平电位梯度

2.2.1 垂直电位梯度

铁塔的垂直电位梯度严格应按 $U_0 = Ldi/dt$ 计算, 按诺顿等效电路, 没有考虑雷电波的反射^[7]。

$$U_g = IZ_l \quad (2)$$

式中: U_g 为铁塔垂直电位, kV; I 为雷击点电流, kA, 这里采用 CIGRE 负雷击平均电流峰值的全球分布 I 为 30 kA; Z_l 为铁塔本体阻抗, 取 10 Ω /m。当铁塔高度为 30 m 时, 其值见表 2。

表 2 铁塔垂直电位梯度

铁塔高度 h /m	电位 U_g /kV
0	300
6	360
12	420
18	480
24	540
30	600

2.2.2 地面水平电位梯度

铁塔地面的水平电位梯度与铁塔接地体的面积和阻抗大小有关, 假定接地体的面积等于铁塔基础面积, 按土壤电阻率 $\rho = 100$ Ω /m 直接计算。距铁塔地面 1 m 处为电位参照点。

$$U_v = \frac{U_0}{\rho l} \times \rho \quad (3)$$

式中: U_v 为铁塔水平距离电位, kV; U_0 为铁塔距地面 1 m 处电位, kV; ρ 为土壤电阻率, Ω /m; l 为地面水平距离, m。设 1 m 处电位为 300 kV, 按式 (3) 计算, 其值见表 3。

表3 铁塔地面的水平电位梯度

距铁塔水平距离/m	电位 U_g /kV
1	300
2	150
3	100
5	60
7	43
10	30

2.3 现有防雷技术的局限性

1) 雷击铁塔时将产生强烈的空间电磁场, 30 kA 雷电流流过铁塔时, 在半径 30 m 处磁场强度高达 0.24 mT, 对铁塔搭载的电子设备安全带来威胁。

2) 雷击铁塔(塔高为 30 m, 雷电流为 30 kA)时, 在铁塔端部产生垂直电位高达 600 kV 和在距铁塔周围地面 10 m 处产生水平电位高达 30 kV, 对安全生产带来威胁。

3) 理论上, 铁塔的接闪概率比避雷线高。因为避雷线产生的电场是一个面电场, 受高斯定理约束; 铁塔产生的电场是一个点电场(铁塔角钢的 90° 拐弯处形成尖端), 用库仑定律计算。点电场比面电场电晕周围空气所需电场强度要小得多^[15]。

4) 避雷线也是接闪器, 采用电气模型-保护角法计算。当雷击避雷线时, 将对送电线路产生反击或耦合^[16]。

3 雷电拦截器的性能与优势

3.1 雷电拦截

雷电拦截器, 依据电磁波色散、传输线、波导理论, 应用色散波导谐振腔体结构技术, 自动识别雷电的空间位置, 全方位拦截直接雷击(包括过顶雷云产生的雷击和侧面雷云产生的雷击)并衰减雷击点电流。该装置适应雷电多脉冲放电^[17]。

雷电拦截器主要性能和优势^[18]如下:

- 1) 提前放电时间 Δt 为 46.55 μs , 因此比避雷针形成的上行先导长 46.55 m。
- 2) 直击雷接闪概率为 100%。
- 3) 侧击雷接闪概率为大于 90%。
- 4) 衰减雷击点电流 $I_a \geq 40\%$ 。
- 5) 30 kA 雷击点空间磁场强度 0.24 mT 半径为 15 m。

6) 下风向保护范围 $A = \pi r^2/2$, 式中 r 为下风向保护距离, m。

7) 预防过顶雷击和侧面雷击, 使用无需限高。

3.2 雷击铁塔与雷电拦截器的参数比较

设定铁塔高度与拦截器安装高度一致, 雷击电流 30 kA。用 3 组分析数据进行比较, 直观地了解各自的特点。

1) 铁塔周围空间磁场强度见表 4。

表4 铁塔周围空间磁场强度对比

距铁塔空间 距离/m	场强/mT		对比(减少) ΔB /mT
	传统避雷针	雷电拦截器	
1	6.00	3.60	2.40
5	1.20	0.72	0.48
10	0.60	0.36	0.24
15	0.40	0.24	0.16
20	0.30	0.18	0.12
25	0.24	0.14	0.10

2) 铁塔的垂直电位梯度见表 5。

表5 铁塔的垂直电位梯度对比

塔高/m	电位/kV		对比(减少) ΔU /kV
	传统避雷针	雷电拦截器	
0	30.0	18.0	12.0
6	36.0	21.6	14.4
12	42.0	25.2	16.8
18	48.0	28.0	19.2
24	54.0	32.4	21.6
30	60.0	36.0	24.0

3) 铁塔地面的水平电位梯度见表 6。

表6 铁塔地面的水平电位梯度对比

塔高/m	电位/kV		对比(减少) ΔU /kV
	传统避雷针	雷电拦截器	
1	30.0	18.0	12.0
2	15.0	9.0	6.0
3	10.0	6.0	4.0
5	6.0	3.6	2.4
7	4.8	2.6	2.2
10	3.0	1.8	1.2

3.3 雷电拦截器的优势

从 3.1 节和 3.2 节的参数比较可以直观地看出, 雷电拦截器具有显著的优势。

1) 对雷电具有强烈的吸引作用, 其产生的上行先导比避雷针长 46.55 m。

2) 采用的色散波导谐振腔体结构, 衰减雷击点电流 $\geq 40\%$, 而铁塔接闪时没有衰减。

3) 大大优化了雷击点的电磁环境。在雷击电流 30 kA 条件下,距雷击点 0.24 mT 强度的半径由铁塔的 25 m 减少为 15 m;垂直电位梯度在 30 m 高度从 600 kV 减少为 240 kV;水平电位梯度在距雷击点 10 m 处从 30 kV 减少到 12 kV。

4) 预防直接雷击和侧面雷击。拦截器直接雷击接闪概率 100%,侧击雷接闪概率 90%;而避雷针侧击雷接闪概率只有 10%。

4 结 论

上面通过分析全球自然雷电的观测数据,雷暴云时空变化与拦截点避雷针接闪的物理模型^[19-20],对雷电拦截技术^[21]与现有防雷技术进行比较:

1) 将雷击过程分为先导发展、首次回击、箭式先导、继后回击及末次回击 5 个阶段,并给出每个阶段的主要物理参数。

2) 通过计算雷击铁塔时的空间电磁场、铁塔的垂直电位梯度和水平电位梯度,进而提出了现有高压输电线路直击雷防护技术的局限性。

3) 提出可实现更长上行先导并衰减雷击点电流的雷电拦截新技术,通过与传统避雷针的参数比较,直观体现了雷电拦截新技术的优势。

应用雷电拦截新技术,可有效克服高压输电线路现有防雷技术的局限性,具有重要的现实意义。2021 年,在四川省盐源县的 3 条高压输电线路应用了该雷电拦截新技术,到目前为止未再发生高压断路器跳闸及损坏设备现象,防雷效果初显。

参 考 文 献

- [1] 戈尔德(R.H.Golde).雷电(上)[M].周诗健,孙景群,译.北京:水电出版社,1981.
- [2] 洛可夫(Rakov.V.A).雷电参数的工程应用[M].高焱,杨少杰,译.北京:气象出版社,2019.
- [3] 李建明.电力系统过电压测量及分析[M].北京:中国电力出版社,2018.
- [4] 洛可夫(Rakov.V.A),乌曼(Uman M.A)等.雷电[M].张云峰,吴建兰,译.北京:机械工业出版社,2016.
- [5] 郗秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学[M].北京:科学出版社,2016.
- [6] 克里斯丁.布克纽,王雪颖.雷电科学史话[M].北京:清

华大学出版社,2010.

- [7] 戈尔德(R.H.Golde).雷电(下)[M].李文恩,李福寿,译.北京:水电出版社,1981.
- [8] 苏邦礼,崔秉球,吴望平,等.雷电与避雷工程[M].广州:中山大学出版社,1996.
- [9] 国际电工委员会.连接到低压配电系统的多脉冲电涌保护装置附加试验——性能要求和试验方法:IEC 61643-11;2011/2 PFG[S].日内瓦:德国莱茵公司技术监督公司,2011.
- [10] 张义军,言穆弘,孙安平,等.雷暴电学[M].北京:气象出版社,2009.
- [11] 杨少杰,杨晖,杨彦,等.一种雷电抑制装置:217087135U[P].2022-07-29.
- [12] 杨晖,杨彦,陈绿文,等.区域防雷的理论和应用技术研究[J].广东气象,2018,40(4):69-73.
- [13] 杨慧春.电磁场与电磁波[M].北京:北京邮电大学出版社,2017.
- [14] 路宏敏,赵晓凡,谭康伯,等.工程电磁兼容[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [15] 福田务,赵立竹.图解电与磁[M].赵立竹,译.北京:科学出版社,2000.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑物防雷设计规范:GB 50057—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [17] 杨少杰,杨晖,杨彦,等.一种雷电拦截装置:217087138U[P].2022-07-29.
- [18] 北京雷闪防雷设施检测服务中心.试验报告[R].北京:S/N(京)雷检字[2019]第(L1011)号,[2020]第(L0504)号.
- [19] 杨晖,杨彦,李燕玉,等.雷暴云时空变化与拦截点避雷针接闪的物理模型[J].广东气象,2019,41(4):61-64.
- [20] 何量,高子钦,罗小峰,等.风力发电机雷击电磁场强度梯度分布的计算和应用[J].广东气象,2021,43(5):65-69.
- [21] 全国雷电灾害防防御行业标准化技术委员会.烟花爆竹生产企业防雷技术规范:QX/T 430—2018[S].北京:气象出版社,2018.

作者简介:

宋海东(1985),男,硕士,工程师,从事电力系统监测技术研究;

杨晖(1981),男,硕士,工程师,从事雷电科学和技术研究;

钟驰宇(1987),男,硕士,工程师,从事雷电技术及防雷接地研究。

(收稿日期:2022-08-08)

基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法

高艺文¹, 龙呈¹, 苏学能¹, 石铖², 高红均²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:针对传统 10 kV 配电网短路故障方法难以适应非健全信息环境的难题,文中利用配电网配用电信息系统的多源数据,以 Elman 神经网络模型为中心,建立基于模糊匹配的短路故障区段定位方法。首先,以配用电信息系统数据库为基础,对配电网短路故障相关的信号与电气量进行分析,建立配电网短路故障诊断特征库。然后通过 I-Relief 算法进行主要特征的筛选选取,来作为 Elman 神经网络的数据输入,并基于 Elman 神经网络模型对多源数据和配电网短路故障类型及位置进行模糊匹配。最后通过西南某地区实际算例分析,证明所提模型能高效快速地对 10 kV 配电网短路故障进行区段定位,且具有较好的容错性和实用性。

关键词:配电网;故障诊断;特征选择;Elman 神经网络

中图分类号:TM 863 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)06-0073-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220611

Short-circuit Fault Location Method of Distribution Network Based on Fuzzy Matching

GAO Yiwen¹, LONG Cheng¹, SU Xueneng¹, SHI Cheng², GAO Hongjun²

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

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the difficulty that the short-circuit fault method for traditional 10 kV distribution network is difficult to adapt to the unsound information environment, the multi-source data of electricity information system in distribution network is used to establish a short-circuit fault zone location method based on fuzzy matching with the Elman neural network model as the center. Firstly, based on the distribution information system database, the signals and electrical quantities related to short-circuit faults in distribution network are analyzed to establish a short-circuit fault diagnosis feature library for distribution network. Then, the main features are selected by I-Relief algorithm as the data input of Elman neural network, and the fuzzy matching for short-circuit fault type and location of multi-source data and distribution network is performed based on Elman neural network model. Finally, through the analysis of an actual case in a southwest region, the proposed model can efficiently and quickly locate the short-circuit faults in 10 kV distribution network with good fault tolerance and practicality.

Key words: distribution network; fault diagnosis; feature selection; Elman neural network

0 引言

配电网直接面向终端用户,和生产生活息息相关,担负着重要责任。然而,随着中国配电网规模的不断扩大,短路故障发生的次数也在不断增多,若未及时识别并处理故障,可能会造成设备烧毁、大面积

停电等危害。但是,目前市面上的各类终端质量良莠不齐,且施工水平和安装环境都有较大的差异。这导致一部分终端可能会在配电网发生故障后漏报故障信号或在配电网正常运行时误报误传故障信号^[1]。因此,如何在不完备信息的状况下快速准确地辨识、定位和处理配电网短路故障亟需研究。

文献[2]提出一种基于粗糙集与决策树的配电网故障诊断算法,实现了对故障样本决策表进行无

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(基于事件化匹配的配电网故障综合研判技术研究及应用,52199722000Q)

教师的规则提取。文献[3]基于时序贝叶斯知识库建立了故障定位模型,提出了一种故障元件与保护动作之间的时序信息表达,充分地利用了报警和时序信息。文献[4]利用最小故障判定区域这一概念构建了故障指示器故障诊断模型,该模型可以一定程度上克服故障定位中信号漏报误报的问题。文献[5]对故障指示器的特点进行了相关的分析,基于此提出了一种组合信号故障诊断方法;文献[6]通过对配电网故障后 2 ms 的零序电流进行经验模态分解,提取其暂态分量中的高频信号作为特征量,通过模糊神经网络实现中性点非有效接地的中低压配电系统的故障分类。文献[7]提取了故障电流及电流变化率作为特征量,通过 BP 神经网络实现电网的故障辨识与定位。但上述文献仍存在一些问题:单一数据源会导致故障定位的准确率不高;传统神经网络算法可以达到比较高的准确率,但容易陷入局部极小值,而且存在迭代时间过长、收敛速度慢等问题。

随着 10 kV 配电网数据实时监测系统的不断完善,诸多区域的大量运行电气量数据、故障数据等各类信息均可以实时上传至各类系统。从配电侧到用户侧的大量历史数据,为配电网的行为分析、负荷预测、故障区段定位奠定了坚实的基础。若能通过深度挖掘同类型数据中蕴含的特征信息以及不同类型数据间隐藏的关联信息得知故障发生的原因和位置,甚至预知网络中可能发生的故障,就可以为抢修工作提供一定的理论依据,达到更快更准确排除故障、恢复供电、减少停电损失的目的。但是,配电网大数据研究中数据库值过多会导致数据过剩、故障诊断效率过低等问题,这些难题都会给配电网及时准确的故障定位带来巨大的挑战。

因此,下面基于配电网故障的非健全信息环境,提出将配用电信息系统所采集的多类数据与具有模糊匹配能力的 Elman 神经网络相结合,进行 10 kV 配电网短路故障的区段定位。首先,以配用电信息系统中的多源数据为基础,分析与配电网短路故障相关的各信号和电气量,建立故障区段定位的数据特征库。其次,针对数据特征库过于庞大的问题,利用 I-Relief 算法来进行特征降维和筛选,选择最佳的故障区段定位特征;然后,利用 Elman 神经网络进行故障诊断与定位训练,得到短路故障区段定位的模糊匹配模型;最后,通过实际算例证明了所构建模型的可行性。

1 配用电信息系统及配电网故障区段定位数据特征库

配用电信息系统涵盖了供电电压检测、配电变压器负荷检测、电能质量、用户信息采集、可靠性分析等系统。这些系统实时搜集各类数据并上传至数据中心,运用这些数据可以更加有效准确地对故障进行诊断及定位。配用电信息系统中所记录的数据来源较为丰富,不仅包括电压、电流、有功和无功功率等电气量数据,还包括发生故障时的停电时间、停电区域、保护开关动作、告警信息等故障数据。

在传统的故障区段定位中,往往只依据断路器动作和保护动作来定位。但当故障电流较小时,很有可能难以捕捉信号而不发生跳闸动作,若长期未发现故障,会导致电压过高,加剧配电网的运行风险。并且当故障发生后,由于各种原因可能会导致监测数据缺失或者不准确。所以应当扩充故障诊断的数据源,通过挖掘多类数据找到可以直接或者间接反映故障位置及发生原因的数据类型,从而在不完备信息的前提下进行配电网故障区段定位。这里将故障区段定位的特征分为断路器跳闸及保护信号与电气量。

1) 断路器跳闸及保护信号

保护信号分为母差保护、电流保护、距离保护和差动保护信号等。当配电网发生单相接地故障时,若中性点有效接地,会产生较大的电容电流,此时相应的断路器和保护装置便会发生动作来切除故障转移供电,此类信号较为明显,可以有效地反映故障的发生。但是,当接地方式为非有效接地时,保护装置很难察觉其微弱的变化,便需要结合其他电气量数据来进行综合判断。

2) 电气量

配电网在发生各类故障后,即使断路器和保护装置未动作,但各系统所采集到的馈线侧、配电变压器侧和用户侧的电流、电压、有功和无功功率等电气量数据都会发生不同程度的变化。当主线发生故障后,馈线侧与配电变压器侧由于离故障位置距离更近,数据变化程度更加明显;用户侧位置虽较远,但结合多类数据的特征,也可以反映故障的位置和类型。上述电气量的数值可以有效反映故障情况,其随时间的变化率也是故障的重要表征之一。由于故

障后的暂态信息量采集困难,只考虑稳态数据。

以断路器跳闸及保护信号和电气量作为故障诊断特征量,构建了数据特征库,如表1所示。

表1 配电网短路故障诊断特征库

特征类型	特征名称
断路器跳闸及保护信号	断路器跳闸信号
	主保护动作信号
	后备保护动作信号
电气量特征	配电变压器故障相电压
	配电变压器故障相电流
	配电变压器非故障相电压
	用户故障相电流
	馈线电流
	馈线电压
	...
	配电变压器故障相电压变化率
	用户故障相电流变化率
	馈线电流变化率
...	

2 基于 I-Relief 算法的故障区段定位主要特征筛选机制

配电网短路故障与网络中的运行参数及设备质量等多类数据有着复杂的关联。为了挖掘其关联规则,首先需要选择最佳特征以表征故障的发生及其类型。但由于故障诊断特征库数量庞大,必然会出现故障特征较低或者特征冗余的现象,因此要选出特征性最强且特征之间相关性最弱的主要特征。

I-Relief 算法是以特征与类别相关程度为基础进行特征权重的计算,若某个特征在异类的样本中差异度较大而在同类样本差异度较小,则该特征有良好的表征能力。对于一个训练数据集 D ,算法会从其中任意选择一个样本 X ,从和 X 同类以及异类的样本中分别寻找 k 个最近邻样本集,之后对 X 和同类最近邻样本集、 X 和异类最近邻样本集在不同特征上的间隔进行比较。如果间隔越小,则该特征表征能力强,应加大其占比;反之,则减小其占比。I-Relief 算法克服了传统 Relief 算法在配电网短路故障区段定位应用中存在的弊病:1)传统算法只能解决二分类问题,然而实际配电网中短路故障是一个典型的多分类问题,而 I-Relief 算法可以

良好地解决多分类问题;2)由于特征库中存在大量无用特征,若目标函数中的间隔采用的是平均间隔,当存在异常值时,平均间隔可能出现与预期不符的负值,导致算法性能大大削弱;而 I-Relief 算法通过引入概率加权平均间隔向量 β_i 代替平均间隔向量 α_i ,将最近邻样本视为一种潜在变量,采用期望最大化算法来解决近邻信息的不确定性,可以良好地解决无关特征大量存在的问题。

将单相接地故障作为同类样本,三相短路、两相短路、两相短路接地以及未故障作为异类样本, I-Relief 算法流程如下:

1) 输入的样本集合 D 和特征集合 A

$$\begin{cases} D = \{(X_i, y_i)\}_{i=1}^N, y_i \in \{1, 2, \dots, C\}, i = 1, 2, \dots, N \\ A = \{a(j)\}, j = 1, 2, \dots, I \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_i 为样本; N 为样本总数; y_i 为样本类别; C 为类别数; $a(j)$ 为特征, I 表示特征数, $j=1, 2, 3, \dots, I$ 。

2) 对特征值进行归一化处理,且将样本根据时间升序分为故障后样本和故障前样本。

3) 初始化特征权重 ω 、样本抽样次数 T 、核参数 ε 、容许误差 γ 。

4) 任意选择一个样本 X_i ,在同类样本集中找到近邻样本 H_i ,从异类样本集中找到近邻样本 M_i ,且 $|H_i| = k, |M_i| = k$ 。

5) 计算加权平均间隔向量 β_i

$$\beta_i = \sum_{\substack{t=1 \\ y_t \neq y_i}}^N P(X_t = X_{i, NM} | \omega) |X_i - X_t| - \sum_{\substack{t=1 \\ y_t = y_i}}^N P(X_t = X_{i, NH} | \omega) |X_i - X_t| \quad (2)$$

$$\begin{cases} P(X_t = X_{i, NM} | \omega) = \frac{K(X_i, X_t)}{\sum_{\substack{m=1 \\ y_m \neq y_i}}^N K(X_i, X_m)} \\ P(X_t = X_{i, NH} | \omega) = \frac{K(X_i, X_t)}{\sum_{\substack{m=1 \\ y_m = y_i}}^N K(X_i, X_m)} \end{cases} \quad (3)$$

$$K(X_i, X_t) = \exp\left\{-\frac{\omega^T |X_i - X_t|}{\varepsilon}\right\}, \varepsilon > 0 \quad (4)$$

式中: $X_{i, NM}$ 为样本 X_i 的同类近邻样本; $X_{i, NH}$ 为样本 X_i 的异类近邻样本; $P(X_t = X_{i, NM} | \omega)$ 和 $P(X_t = X_{i, NH} | \omega)$

分别为样本 X_i 是样本 X_i 异类最近邻和同类最近邻的概率; ω 为特征的权重向量, ω^T 为向量转置。

6) 计算各个特征的权重

$$\omega_g = \omega_g - \text{diff}(g, X_i, H_i)/kT + \text{diff}(g, X_i, M_i)/kT \quad (5)$$

$$\text{diff}(g, X_i, H_i) = \sum_{n=1}^k \frac{|X_{ig} - X_{ig, NH_n}|}{\max_{i=1, \dots, N} \{X_{ig}\} - \min_{i=1, \dots, N} \{X_{ig}\}} \quad (6)$$

$$\text{diff}(g, X_i, M_i) = \sum_{n=1}^k \frac{|X_{ig} - X_{ig, NM_n}|}{\max_{i=1, \dots, N} \{X_{ig}\} - \min_{i=1, \dots, N} \{X_{ig}\}} \quad (7)$$

式中: X_{ig, NH_n} 为样本 X_i 的第 n 个同类近邻的第 g 个特征值; X_{ig, NM_n} 表示样本 X_i 的第 n 个异类近邻的第 g 个特征值。

7) 利用线性规划模型不断更新权重, 直至权重误差小于核参数, 输出结果, 作为下一步 Elman 神经网络的输入项来进行配电网故障区段定位。

3 基于 Elman 神经网络的配电网短路故障区段定位模糊匹配方法

3.1 Elman 神经网络

神经网络是通过对人脑的模拟, 通过抽取样本的重要特征, 实现从输入数据到输出结果的连接, 具有容错性好以及自学习和自动匹配等信息处理能力。因此, 神经网络被广泛应用于配电网的故障监测与诊断中。

与传统的二分类器不同的是, Elman 神经网络面对非线性曲面仍然具有良好的逼近效果。且不同于一般的神经网络, Elman 神经网络在第一层设置有反馈节点, 可以记录过往时刻的数据, 并运用于下一时段的计算, 正因为这个特点, 导致了即使两个 Elman 网络拥有相同阈值和权值, 也会因反馈节点的存在导致反馈具有较大差异, 相同输入的前提下也会有不同的输出结果。

配电网短路故障区段定位具有动态性时空变化的特点, 若使用本质为静态空间建模的 BP 神经网络必然会出现诸多问题。而 Elman 神经网络这种反馈型网络的特性在于其拥有一个中间层, 它的输出会到达状态层, 在这一层里进行信息存储, 再将输出连接至中间层的输入形成反馈, 使得 Elman 神经网络

对输入层数据的轨迹具有较高的敏感性。且由于网络具有内部反馈特性, Elman 神经网络对动态信息的处理能力也变得更强大, 解决了 BP 神经网络在反复迭代过程中速度较慢的问题。

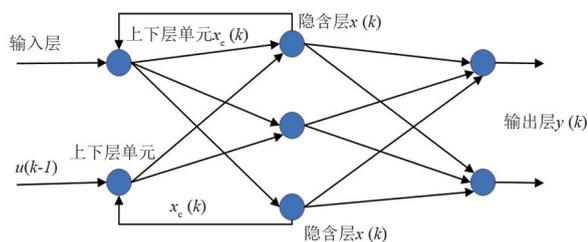


图 1 Elman 神经网络模型

Elman 神经网络模型见图 1, 包括输入层、隐含层、连接层和输出层。隐含层为 tansig 神经元, 输出层为 purelin 神经元, 在这两类神经元的特殊组合下形成的网络传递函数, 在隐含层的神经元数目足够多时, 可以在连续的有限时段内以足够高的精度逼近复杂性较高的函数, 从而满足训练需求。

Elman 神经网络的数学模型为

$$\begin{cases} y(k) = g[w_3x(k)] \\ x(k) = f[w_1x_c(k)] + w_2[u(k-1)] \\ x_c(k) = x(k-1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: w_1 、 w_2 和 w_3 分别为不同层之间的连接权矩阵; $y(k)$ 、 $x(k)$ 和 $x_c(k)$ 为神经网络、隐含层和承接层的输出; $u(k-1)$ 为神经网络的输入。

Elman 神经网络的目标函数为误差函数, 通过反馈不断调整权值参数和阈值参数从而最终输出精度最优的结果。假设该神经网络的输出在第 k 步为 $y_d(k)$, 计算公式为

$$E(k) = \frac{[y_d(k) - y(k)]^T [y_d(k) - y(k)]}{2} \quad (9)$$

式中, T 为转置矩阵或转置向量的表示符号。

3.2 基于 Elman 神经网络的故障区段定位方法

Elman 神经网络在配电网故障区段定位的应用流程如下: 首先, 基于配电网短路故障的各类样本对 Elman 神经网络进行训练; 然后, 确定其具体结构 (传递函数和神经元数量) 和参数 (权值和阈值); 最后, 根据故障特征来对故障进行分类, 完成故障集到特征集的连接映射。

基于 Elman 神经网络的配电网短路故障区段定位方法如图 2 所示。

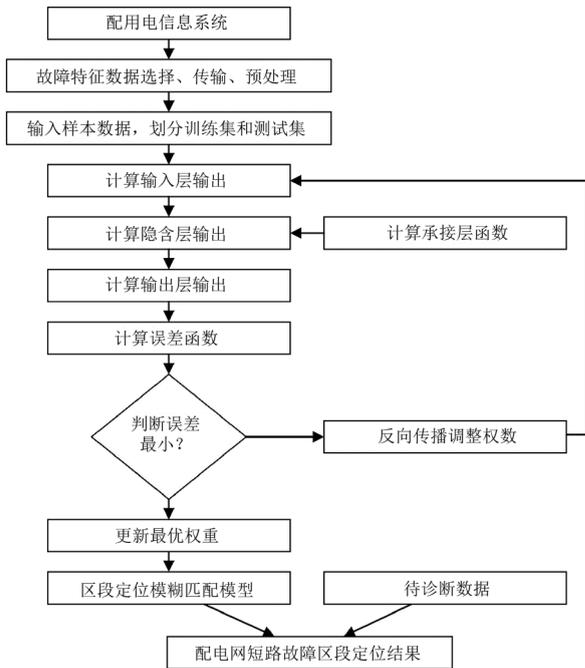


图 2 配电网短路故障区段定位方法流程

4 算例分析

为验证所提方法的有效性,采用西南某地区近两年所采集的数据进行 10 kV 配电网短路故障区段定位的算例分析。该地区电网共有 358 条 10 kV 母线和 1976 条 10 kV 馈线,其中,网络的拓扑结构、终端数量和位置以及线路区段划分均未发生变化的 10 kV 母线有 304 条,10 kV 馈线有 1542 条。采用这些未变化的线路进行算例分析。10 kV 馈线侧的数据来源为调度自动化系统和配电自动化系统;10 kV 变压器侧数据来源为配电变压器负荷监测系统;用户侧数据来源为用户信息采集系统。经过数据筛选与清洗后,将信息不完整和错误的的数据剔除,提取出近两年发生的具有完整、准确的特征数据、故障位置和故障类型的 1000 条配电网短路故障记录,基于此构建挖掘库和测试库。这两个库中分别包括 500 条数据记录。挖掘库中故障类型包括三相短路、两相短路接地、两相短路和单相接地故障。挖掘库和测试库中具有完全相同的数据样式,唯一的区别是挖掘库含有故障的具体类别和位置信息,用于分析获取规则,而测试库中并未包含任何故障具体信息,用于测试模型的可行性。

4.1 主要特征筛选

首先以前面所建立的断路器跳闸及保护信号和

电气量等条件特征作为候选特征量,构建了数据特征库,利用 I-Relief 算法对特征库中各特征的故障表征能力进行刻画与筛选,得到权重较高即表征能力最强的 6 个关键特征及其权重如表 2 所示。其中,配电变压器故障相电流变化率、配电变压器故障相电压、馈线电流、配电变压器非故障相电压、用户非故障相电流变化率和用户故障相电流变化率的候选特征权重都在 0.12 左右,因此选择这 6 个候选特征量作为 Elman 神经网络的输入。

表 2 特征权重

候选特征	权重
配变故障相电流变化率	0.143 0
配变故障相电压	0.134 9
馈线电流	0.129 0
配变非故障相电压	0.114 2
用户非故障相电流变化率	0.105 4
用户故障相电流变化率	0.095 7

4.2 故障区段定位及诊断精度

对比所提基于挖掘库数据的训练分别得到的 Elman 神经网络模型和 BP 神经网络模型,利用两者分别进行配电网短路故障区段定位测试,诊断准确率对比如表 3 所示。

表 3 Elman 和 BP 诊断准确率对比

故障类型	准确率/%	
	Elman	BP
三相短路	97.4	94.2
单相接地	95.4	91.5
两相短路接地	97.4	93.1
两相短路	96.8	92.2

在本算例测试下,基于所提方法的配电网短路故障区段定位的准确率较高,全部达到 95% 以上,均高于 BP 神经网络模型。

从时间上来看,由仿真的迭代训练曲线(图 3)知,Elman 网络训练次数只要 130 次就到达设置的误差精度,而从输入数据进行训练到输出测试结果,

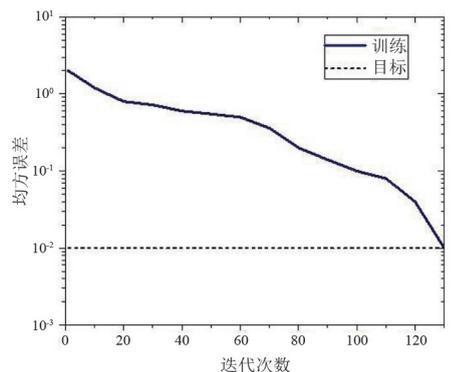


图 3 Elman 神经网络训练曲线

BP 神经网络模型花费 24 s, 而 Elman 神经网络模型仅花费 6.9 s, 定位速度大大提升。综上所述, 不论是在短路故障区段定位的准确率上, 还是收敛速度上, Elman 神经网络比 BP 神经网络所用时间更少, 速度更快、更高效。

为了进一步测试所提方法在出现各类特征数据信息错误、不完整以及故障定位漏报、误报情况下的准确率, 从近两年的历史数据中挑选出 160 条不完备信息, 分别添加 80 条至原来的挖掘库和测试库中, 每条不完备信息的不完备率保持在 10% 到 25%。在此情况下再次进行测试分析, 准确率对比如表 4 所示。

表 4 不完备信息下 Elman 和 BP 诊断准确率对比

故障类型	诊断准确率/%	
	Elman	BP
三相短路	92.6	84.1
单相接地	90.1	80.6
两相短路接地	91.2	83.1
两相短路	90.9	84.6

在本算例中, 由于存在数据错误或缺失的情况, BP 神经网络模型准确率下降到了 85% 以下。同样, Elman 神经网络模型准确率也下降至 90% 左右, 虽然两者准确率均有一定幅度的下降, 但 Elman 神经网络模型进行故障研判的准确率仍在可接受范围之内。

而从时间上来看, 从输入数据进行训练到输出测试结果, BP 神经网络模型花费 40 s, 而 Elman 神经网络模型花费 10.4 s, 都花费了更久的时间。

综上所述, 当原始数据信息正确时, 用所建模型进行故障诊断不仅准确率高且速度较快; 而当原始数据存在不完备的情况时, 虽然与数据完备时相比准确率有所下降且速度变低, 但依然在可接受范围内, 说明所做模型具有良好的容错性和实用性。

5 结 论

快速、精确的配电网短路故障区段定位对提高供电可靠性具有重要意义。上面基于配电网的多类数据, 提出了配电网短路故障区段定位方法:

1) 以配用电信息系统中的数据为基础, 构建了兼具电气量、保护量与开关量特征的 10 kV 配电网短路故障诊断特征库。

2) 所提主法不像传统故障研判方法一样只采用单一指标来进行判断, 而是在故障诊断特征库的

基础上, 采用 I-Relief 算法从特征库中筛选出 6 个权重最高的故障诊断关键特征量, 作为神经网络的输入项。采用具有模糊匹配特性的 Elman 神经网络进行模型训练, 利用多源数据不断挖掘其内部信息得到配电网短路故障区段定位模型。

最后, 以西南某地区电网为例进行数据计算验证, 从仿真结果分析可知, 所建的模型能高效地对 10 kV 配电网短路故障进行区段定位, 相比于 BP 神经网络, 其具有较高的速率和准确度。在数据不完备的环境下具有良好的容错性, 能够为故障的及时发现提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 李桐, 王刚, 刘扬, 等. 配电网智能终端信息安全风险分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 118-122.
- [2] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于粗糙集与决策树的配电网故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2008(4): 794-798.
- [3] 孙明蔚, 童晓阳, 刘新宇, 等. 运用时序贝叶斯知识库的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 715-722.
- [4] 姜桂秀, 张炳达, 江滔. 新型基于故障指示器的配电网故障寻址方法[J]. 电源技术, 2014, 38(9): 1702-1705.
- [5] 郑国华, 黄朵, 张伟, 等. 基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 105-110.
- [6] 孙鹏, 曹雨晨, 刘洋, 等. 采用二进制蚁群模糊神经网络的配电网故障分类方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2063-2072.
- [7] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
- [8] 赵庆周, 李勇, 田世明, 等. 基于智能配电网大数据分析的状态监测与故障处理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 774-780.
- [9] 赵腾, 张焰, 张东霞. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3305-3312.
- [10] 詹柳春, 黄长江. 云计算下物联网密集场景大数据挖掘技术[J]. 电子测量技术, 2019, 42(23): 164-168.
- [11] 章雅楠, 孙建平, 刘新月. 基于改进 Elman 神经网络的故障诊断模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 76-84.
- [12] 汪文达, 张伟. 基于多源非健全信息融合的配电网主动故障研判方法[J]. 电气传动, 2021, 51(12): 47-51.
- [13] 姚鹏, 刘岩, 张胜修, 等. 基于神经网络与最小二乘法在故障诊断中的应用研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(11): 4-6.

- [14] 吴素我,张焰,苏运.基于配用电数据关联的中压配电网断线故障诊断方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):101-109.
- [15] 王一卉,姜长泓.模糊神经网络专家系统在动力锂电池组故障诊断中的应用[J].电测与仪表,2015,52(14):118-123.
- [16] CAO M G, XU A D, JIANG Y X, et al. The application of elman neural network in uninterrupted maintenance of power grid[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1673(1):012057.
- [17] SUN X Y, GONG S J, HAN G, et al. Pruning Elman neural network and its application in bolt defects classification[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019(10):1847-1862.
- [18] 郭琰,刘森森,张萌,等.基于模糊优化多目标进化算法的配电网故障定位[J].电气工程学报,2015,10(5):61-67.
- [19] 孙铁军,曲丽萍,关海爽,等.基于智能优化的模糊 Petri 网的电网故障诊断[J].控制工程,2021,28(1):127-134.
- [20] 黄鹏,聂枝根,陈峥,等.基于优化 Elman 神经网络的锂电池容量预测[J].储能科学与技术,2022(7):2282-2294.

作者简介:

高艺文(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为配电网自动化、配电网故障诊断分析;

龙呈(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为配电网运行及自动化;

苏学能(1991),男,博士,工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与并行计算;

石铨(1999),男,硕士,研究方向为配电网运行与故障研判。(收稿日期:2022-07-31)

(上接第21页)

- [9] 東京電力株式会社.新潟県中越沖地震における所内変圧器火災状況および課題解決に向けた取組みについて[R].東京:東京電力株式会社,2007.
- [10] 東京電力株式会社.東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録[R].東京:東京電力株式会社,2013.
- [11] 曹枚根,周福霖,谭平,等.大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):122-128.
- [12] 孙宇晗,卢智成,刘振林,等.特高压变电站内110 kV电容器组模型地震模拟振动台试验[J].高电压技术,2017,43(3):879-884.
- [13] XIE Q, HE C, YANG Z, et al. Influence of flexible conductors on the seismic responses of interconnected electrical equipment[J]. Engineering Structures, 2019, 191:148-161.
- [14] 马国梁,廖德芳,何畅,等.1100 kV 变压器套管抗震性能[J].高电压技术,2017,43(6):2033-2041.
- [15] 孙新豪,谢强,李晓璇,等.带有滑动摩擦摆支座的500 kV 变压器地震响应[J].高电压技术,2021,47(9):3226-3235.
- [16] 柏文,唐柏赞,戴君武,等.考虑地震和材料强度不确定性的瓷柱型电气设备易损性分析[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2594-2605.
- [17] 张小军,卢智成,刘振林.特高压支柱类设备动力放大系数研究[J].电瓷避雷器,2020(2):204-210.
- [18] 朱全军,高政国,陈应禄,等.基于随机反应谱理论的支柱类电气设备抗震性能评估方法研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(2):194-200.
- [19] 田一,樊超,刘方,等.特高压干式平波电抗器用隔声罩及无磁金属[J].中国环保产业,2019(10):67-71.
- [20] 田一,王斌,金文德,等.干式平波电抗器隔声罩模块化设计[C].2020中国西部声学学术交流会议论文集,2020.
- [21] 何强,樊超,王斌,等.基于加密测点的干式空心平波电抗器声场分布特性[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(6):78-82.
- [22] 展猛,王社良,赵云.干式空心电抗器模型结构减震控制试验及数值分析[J].振动工程学报,2020,33(1):179-187.
- [23] 高嵩,高超,刘洋,等.新型平波电抗器复合支柱绝缘子力学性能分析[J].绝缘材料,2020,53(6):77-83.
- [24] 王黎明,汪创,傅观君,等.特高压直流平波电抗器的复合支柱绝缘子抗震特性[J].高电压技术,2011,37(9):2081-2088.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部.电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

作者简介:

朱旺(1996),男,博士研究生,研究方向为电网基础设施防灾减灾;

任阿阳(1986),男,研究方向为特高压直流运维技术;

薛志航(1987),男,硕士,研究方向为电网基础设施防灾减灾;

谢强(1971),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电网基础设施防灾减灾。(收稿日期:2022-07-27)

直升机带电修补雷击受损光缆技术及应用研究

杨 暘¹, 卢金奎², 邱中华¹, 王 爽³

(1. 国网四川省电力公司超高压分公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 高压架空输电线路的光缆修补技术直接影响修补作业的安全顺利实施和线路运行的可靠性。针对姜资一线500 kV 输电线路雷击导致的光缆断股危急缺陷, 考虑迎峰度夏期间电网无法停电检修的特殊情况, 文中采用直升机绞车吊椅作业法成功实现了该500 kV 输电线路受损光缆修补。所提方法采取地电位带电作业方式, 提出了运用“楔形线夹+纯铝引流线”全新修补模式修补断股光缆, 安全高效地完成了光缆断股危急缺陷消除工作, 为超高压输电线路的安全稳定运行提供了坚强保障, 为类似输电线路缺陷消除具有指导意义和参考价值。

关键词: 光缆断股; 直升机绞车吊椅作业法; 楔形线夹; 纯铝引流线; 修补

中图分类号: TM 726.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0080-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.202212

Research on Helicopter Live Repair Technology for Optical Cable Damaged by Lightning and Its Application

YANG Yang¹, LU Jinkui², QIU Zhonghua¹, WANG Shuang³

(1. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Electrical Engineering & Renewable Energy School, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: The optical cable repair technology of high-voltage overhead transmission lines directly affects the safe and smooth implementation of repair operations and the reliability of line operation. In view of the critical defects of optical cable breaking caused by lightning strike on 500 kV transmission line of JiangZi line, and considering the special situation that the power grid cannot be cut off for maintenance during the peak summer, the helicopter winch lifting chair operation method is used to successfully realize the repair of the damaged optical cable of 500 kV transmission line. This method adopts the live working mode of ground potential, and uses the new repair mode of "wedge clamp+pure aluminum drainage line" to repair the broken optical cable. By formulating all-round organization, technical and safety measures and emergency plans, the elimination of critical defects of broken optical cable is safely and efficiently completed, which provides a strong guarantee for the safe and stable operation of extra-high voltage transmission lines, and has an important guiding significance and reference value for similar defect elimination of transmission lines.

Key words: broken strand of optical cable; helicopter winch lifting chair operation method; wedge clamp; pure aluminum drainage line; repair

0 引言

高压架空输电线路常分布于高山峡谷等复杂恶劣的地理环境中^[1-2], 缺陷检修技术往往受到环境、

安全等诸多因素的影响, 检修工作呈现处理难度大、技术性强的特点^[3-5]。并且在实际操作过程中, 还需结合具体情况, 制定科学合理的检修方案。因此, 结合实际案例对线路缺陷检修技术的研究具有重要指导意义和工程应用价值。

1 故障概况

2022年7月13日,四川地区500 kV姜资一线光缆通信出现部分中断,查询雷电定位系统显示,500 kV姜资一线66-67号在同时间段内遭受过188.2 kA的雷击,运行单位随即开展无人机特巡工作。经排查,500 kV姜资一线66-67号光缆出现17股断12股的危急缺陷,还有2根光纤也严重受损,如图1所示。500 kV姜资一线是四川地区重要水电外送通道,一旦出现光缆断线,将导致线路跳闸,严重影响成都地区供电。



图1 500 kV姜资一线雷击导致光缆严重受损

经勘查发现,500 kV姜资一线光缆断股点位对地很高,现场吊车无法摆放,不具备吊车临停检修作业条件。因光缆断股数量过多,承载能力严重受损,光缆无法直接承载人员带电抢修。为了避免抢修过程中光缆断裂导致500 kV姜资一二线跳闸,同时为了降低抢险作业中人身安全风险,较有效的抢修方案是停电作业,采用放松直线串或放松耐张串至导线的修补法。但该方法需要500 kV姜资一二线同时停电12 h(含变电站操作时间),在迎峰度夏电网大负荷期间,无法满足500 kV姜资一二线同时停运条件。综合考虑上述影响因素,结合线路实际运行环境,最终确定采用直升机对光缆进行带电修补的技术方案。该方案运用直升机绞车吊椅作业、楔形线夹和纯铝引流线相结合的全新作业模式,在国网四川省电力公司和国家电网通用航空有限公司(以下简称国网通航公司)技术人员的密切合作下,现场应用得以顺利实施,达到了预期目标,取得了良好的效果。

下面给出的直升机带电修补雷击受损光缆技术方案在四川省境内为首次应用,通过方案设计和案例分析,得到了可供参考的工程经验,对消除类似的输电导线和光缆缺陷具有重要的指导意义和参考价值。

2 光缆修补技术原理

为了保证直升机带电修补光缆任务能够安全顺利完成,参考国内外光缆修补的相关方法,同时结合此次光缆断股严重的特殊情况,提出了以下3种修补方案及其对应的技术原理。

1)方案1:在断股点两侧首先加装卡线器作为后备保护,然后采用“直线帕尔普修补条修复和两侧耐张帕尔普修补条后保”的施工工艺。

该工艺首先加装2套卡线器作为后备保护,再安装直线帕尔普修补条,可以避免安装帕尔普修补条时光缆突然断线,导致作业人员受伤。同时考虑到断股点两侧光缆散股比较长,直线帕尔普修补条承受张力可能不够,耐张帕尔普修补条可以作为直线帕尔普修补条失效后的后备保护,后期运行比较可靠。但该工艺在实施过程中,卡线器及中间钢丝套比较长,直升机操作人员加装困难,同时若安装卡线器时光缆突然断线,卡线器飞起可能会对作业人员和直升机造成伤害。并且,在帕尔普修补条缠绕过程中,作业人员需要使用很大力气去缠绕,容易导致光缆断股位置发生断裂。

2)方案2:采用并沟线夹/元宝卡和引流线作为后备保护,然后采用直线帕尔普修补条进行修复的施工工艺。

该工艺实施过程中,并沟线夹/元宝卡安装对光缆断股位置外加荷载小,光缆突然断裂时对人员和直升机伤害比较小。但也存在明显的不足:光缆突然发生断裂时,虽然断点两侧光缆张力会出现下降,但并沟线夹/元宝卡可能无法承受断点张力,不能起到后备保护作用。同时只采用直线帕尔普修补条修复,因光缆散股比较长,直线帕尔普修补条本身长度有限,实际承受张力的帕尔普修补条受力面很可能不足,后期运行过程中依然有断线的风险。

3)方案3:施工过程中不采用后备保护,采用“楔形线夹+纯铝引流线”的全新施工工艺,如图2所示。

应用该工艺进行修补作业时,楔形线夹可以分体式安装,人员在安装过程中对光缆断股位置外加荷载很小,减少了光缆断线风险。同时为了防止雷击大电流烧损楔形线夹,导致楔形线夹失效,在楔形线夹外侧加装一组纯铝引流线,确保雷电流不对楔

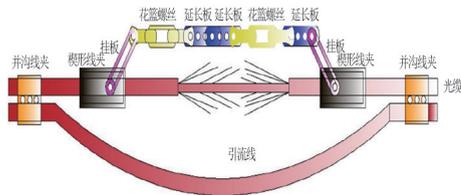


图2 “楔形线夹+纯铝引流线”连接工艺

形线夹造成损伤。但是,该工艺的施工过程中没有后备保护,楔形线夹及配套连接金具安装完成前,依然存在光缆断线风险,须加以防范。

考虑到直升机作业难度和每次作业时间的限制,为了最大程度保障作业人员和直升机的安全,同时最大程度减少作业环节,保障电网安全,经专家论证,最终确定方案3为该次直升机修补光缆作业的最佳方案。

3 光缆修补方案分析和设计

3.1 导线和光缆张力计算

1) 直升机作业时导线张力计算

查询该输电线路的设计文件可知,断股的光缆型号为 OPGW-36B1-120,抗拉强度 R_m 为 97 kN,承载截面积 A 为 121 mm^2 ,弹性模量 E 为 132 GPa,线膨胀系数 α 为 $13.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。耐张段长度为 3524 m,代表档距为 586 m,断股档的档距为 428 m。该代表档距下线路的控制气象为覆冰气象。气象条件 1 时气温为 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$,覆冰为 10 mm,风速为 10 m/s;为了确保作业安全,在直升机起飞时,现场测得直升机下方地面最大风速约为 25 m/s。故取作业现场风速为 25 m/s。气象条件 2 时气温为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,覆冰为 0,风速为 25 m/s。依据状态方程式^[6],有

$$\sigma_2 - \frac{E\gamma_2^2 l^2}{24\sigma_2^2} = \sigma_1 - \frac{E\gamma_1^2 l^2}{24\sigma_1^2} - \alpha E(t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: σ_2 为光缆在气象条件 2 时的应力; γ_2 为光缆在气象条件 2 时对应的比载; l 为档距; σ_1 为光缆在气象条件 1 时的应力; γ_1 为光缆在气象条件 1 时对应的比载; t_2 为气象条件 2 对应的温度; t_1 为气象条件 1 对应的温度。

$$F = \sigma \times A \quad (2)$$

式中: F 为光缆的张力; σ 为光缆的应力; A 为光缆的截面积。

根据以上公式计算,光缆在气象条件 2 时,张力 F 为 19.8 kN。

2) 光缆断股后剩余张力校核

根据光缆生产厂家提供的该型号光缆断股后残余力值测试结果,在光缆外层单丝全部断裂,剩余未断裂的 5 根铝包钢单丝整体完好时,未遭受雷击侵害的情况下,理论额定拉断力 F_1 为 29 kN。

因 $F_1 > F$,因此受损光缆理论上还可以承受 9.2 kN 张力,可以满足作业人员在断股光缆上的作业承载要求,故该次直升机作业理论上是安全的。为了确保现场安全,在直升机正式作业前,现场还进行了模拟试验。直升机由斜上方逐步进入光缆受损点正上方,并进行停留测试,经现场验证,受损光缆可以承受直升机自身风速带来的下压力。

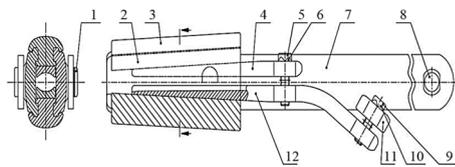
3.2 修补连接金具选配

1) 光缆散股长度测量

运用激光点云测量数据、无人机搭载竹竿刻度测量法和图纸刻度测量法,综合评估断股光缆散股长度约为 1.9 m,因此,现场作业时需要使用 2 套楔形线夹对接,线夹中间采用延长板和花篮螺丝进行长度调整,以完全覆盖光缆散股点。

2) 楔形线夹选型

该次修补点位光缆直径为 15.2 mm,据此选用配套的德国 Gorny 公司楔形线夹,如图 3 所示。该线夹采用楔形原理,卡住光缆受力后,越拉越紧,可承受 100 kN 张力,配套的延长板 PT-10 可以承受 100 kN 张力,花篮螺丝可以承受 120 kN 张力,满足此耐张段光缆金具 100 kN 设计值,符合使用要求。



1-支点;2-线夹本体;3-上方滑板;4-下楔子;5-六角形螺栓;6-防松扣;7-挂板;8-螺栓;9-螺栓;10-防松扣;11-盖板;12-上楔子

图3 楔形线夹

楔形线夹安装简便,使用时先在光缆上安装上楔子和下楔子;然后盖上楔形线夹本体和上方滑板,将楔形线夹挂板与延长板、花篮螺丝进行连接;最后通过收紧花篮螺丝让楔形线夹受力。这种修补方式可以最小程度减少作业人员对断股光缆的扰动,极大地降低了断线风险。

3) 并沟线夹选型

根据德国 Gorny 公司楔形线夹技术参数,线夹最大通流能力为 32 kA/s,考虑光缆运行过程中仍

然有遭受雷击的可能性,为保障光缆在通过雷电大电流的情况下,楔形线夹仍能正常工作,应在楔形线夹外侧加装一组引流线,保证流经楔形线夹最大电流低于 32 kA/s。根据 GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》和 DL/T 765.1—2021《架空配电线路金具技术条件》的规定^[7-8],选用并沟线夹和纯铝引流线的处理模式。由于并沟线夹导电能力不得低于接触光缆的电阻,因此选用 15.2 mm 光缆配套铝并沟线夹,且引流线也采用纯铝线。并沟线夹常见的结构形式有螺栓式并沟线夹、楔型并沟线夹和 H 型并沟线夹 3 种,为便于直升机作业人员一次性安装到位,该次作业选用螺栓式并沟线夹。

3.3 作业安全距离控制措施

1) 绝缘绳选择

直升机作业时,为了保证直升机的安全,同时避免感应电伤人,一般按照 10 kV 感应电进行预防。按照 Q/GDW 1799.2—2013《国家电网公司电力安全工作规程 线路部分》的规定^[9],至少要加装有效绝缘长度大于 60 cm 的绝缘绳。经国网通航公司综合分析和验证,现场选用 2 根直径为 16 mm、长为 3 m 绝缘绳并列使用,额定载荷为 1 t,充分保证作业的安全性。

2) 检修安全距离分析

采用激光雷达扫描点云数据,如图 4 所示,分析得到导线和光缆之间的距离为 11.74 m,考虑直升机吊椅操作人员活动站位 2 m,携带的最长物体为纯铝引流线长 2.6 m,直升机作业人员距离带电体的最小距离 $S = 11.74 - 2 - 2.6 = 7.14$ m,作业点海拔高度为 698 m,符合安规规定的 500~1000 m 海拔,安全距离大于 3.4 m 的要求。

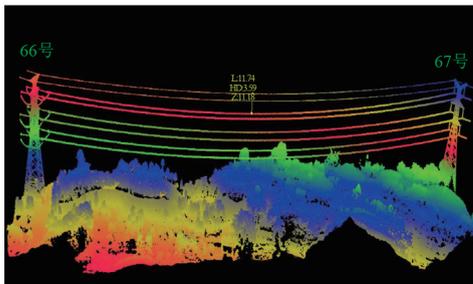


图4 激光点云计算的导线和光缆距离

3.4 直升机作业方法选择

根据综合评估,该次作业计划选用国网通航公司 Bell429 双发轻型直升机。目前国内直升机带电作业常用的方法有吊篮法、吊索法和绞车法 3 种^[10]。考虑光缆受损严重,同时兼顾作业效率,因

此选用绞车法,即在直升机上配置绞车设备。作业人员上下依靠绞车控制,绞车额定载荷约 249 kg,最大摆幅夹角不超过 20°。综合考虑海拔、温度、重量、风力、燃油消耗等因素,直升机一次空中作业可以持续约 35 min,考虑驾驶安全等因素,单次悬停修补作业不超过 10 min。本次直升机作业流程为: 1) 将散股光缆用铝丝简单绑扎,在完好光缆位置安装 2 套楔形线夹,再次估算安装总长度; 2) 将 2 套楔形线夹挂板与延长板、花篮螺丝进行螺栓连接,通过花篮螺丝收紧整串金具,使楔形线夹受力; 3) 在 2 套楔形线夹外侧,使用铝并沟线夹安装纯铝引流线。

4 现场应用

2022 年 7 月 17 日,在 500 kV 姜资一线断股光缆上,首次采用“楔形线夹+纯铝引流线”方式开展直升机修复作业。按照 MH/T 1064.4—2017《直升机电力作业安全规程 第 4 部分:带电作业》^[11]、DL/T 1720—2017《架空输电线路直升机带电作业技术导则》规定^[12],风速小于 5 m/s,相对湿度不大于 80%,能见度大于 3 km,垂直能见度大于 500 m,云底高度不低于吊挂作业点以及往返航线最高点为 300 m,即可开展现场作业。按照抢修作业流程,国网通航公司用 4 个飞行架次完成了楔形线夹及连接金具安装工作,1 个飞行架次完成了并沟线夹引流线安装工作。现场作业如图 5 所示,光缆修补后的现场如图 6 所示。



图5 现场作业

5 结论

针对 500 kV 姜资一线光缆雷击断股的危急缺陷,考虑迎峰度夏期间电网无法停电检修的特殊情况,上面给出了详细的直升机绞车吊椅作业方案。



图 6 光缆修补后现场

该方案运用了地电位带电作业方式修补断股光缆,修补作业采用“楔形线夹+纯铝引流线”全新修补模式,在保障人身、电网安全的基础上,高效完成了光缆断股危急缺陷修复工作,为四川地区超高压输电线路的安全稳定运行提供了强有力的保障。该方案首次在四川省境内得以应用,可为工程中类似缺陷的消除提供重要的参考价值。

参考文献

- [1] 邹德华,严宇,王伟,等.基于 ToF 技术的高压输电线路带电作业安全监测方法[J].高电压技术,2020,46(7):2570-2577.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [3] 胡毅,刘凯,彭勇,等.带电作业关键技术研究进展与趋势[J].高电压技术,2014,40(7):1921-1931.
- [4] 陶留海,孙超,李雪奎. ± 1100 kV 特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(1):134-139.
- [5] 梁栋.500 kV 输电线路 OPGW 光缆断股原理及分析[J].电工技术,2021(19):97-99.

- [6] 孟遂民,孔伟.架空输电线路设计[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 全国架空线路标准化技术委员会.电力金具通用技术条件:GB/T 2314—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [8] 全国架空线路(电力金具)标准化技术委员会.架空配电线路金具技术条件:DL/T 765.1—2001[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [9] 国家电网科技部.国家电网公司电力安全工作规程线路部分:Q/GWD 1799.2—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [10] 杨佳睿,陈炜,李胜花,等.吊索法带电作业在 ± 1100 kV 特高压直流输电线路的应用[J].宁夏电力,2021(6):62-65.
- [11] 中国民航科学技术研究院.直升机电力作业安全规程:MH/T 1064.4—2017[S].北京:中国民航出版社,2017.
- [12] 全国带电作业标准化技术委员会.架空输电线路直升机带电作业技术导则:DL/T 1720—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.

作者简介:

杨 暘(1987),男,硕士,高级工程师,主要从事输电线路运维技术工作;

卢金奎(1981),男,高级工程师,主要从事输电线路管理工作;

邱中华(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事超特高压输电线路带电作业工作;

王 爽(1987),男,博士,讲师,主要从事高压输电线路运维检修技术研究工作。

(收稿日期:2022-08-09)

《四川电力技术》投稿步骤及方法

1) 注册。在本刊首页(<https://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home>)进入“作者登录”,点击“新用户注册”链接,以 E-mail 地址作为用户名进行注册,进入注册页面后填写注册信息,填写完毕提交后,您将收到注册成功的电子邮件,请按电子邮件提示激活账户后方可登录。(注:本刊已注册用户名的作者,使用用户名和 E-mail 均可登录。)

2) 登录。在首页进入“作者登录”,输入您新注册的 E-mail(已注册过用户名的作者也可使用原用户名)和密码,以作者身份登录,进入“作者中心”。点击“投稿”,按照页面提示填写全部投稿信息和作者信息后提交即可。建议投稿作者就是论文的通讯作者,以方便联系。

3) 投稿后作者可随时登录网站,查询稿件的审理情况以及有关稿件的其他信息。个人信息或通信方式有变化时,请及时更新,便于联系。

4) 在提交修改稿时,请直接以作者身份登录本网站,点击“待修改稿件”可查阅作者所有需要修改的稿件信息、修改意见。找到该稿件编号对应的稿件后,请先点击“下载修改稿”可查阅编辑部是否有直接的批注或修改;修改稿或补充的内容需点击“上传修改稿”功能上传即可。请不要再使用投稿功能重投此修改稿,否则会被视为新稿件,已有的审稿结果将作废。

励磁整流柜可控硅故障模拟及分析

杨玲,许其品,朱宏超,林元飞,谢燕军

(国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 211106)

摘要:发电机励磁系统整流柜是实现励磁调节的基本单元,故障后果将会很严重。整流桥故障是励磁整流柜最常见的故障之一,为了在发生故障前提前预判出故障以及故障发生后能够准确分析故障发生的原因,有必要研究整流桥故障发生的各种情况。文中归纳了整流桥的故障类型,通过 Matlab/Simulink 软件搭建模型,对桥臂短路、桥臂不导通、脉冲丢失、提前导通、延时触发等故障条件下的整流桥输入及输出电压、励磁变压器副边电流的仿真波形进行分析;通过对某电厂的实际故障录波波形进行验证,仿真波形与实际波形基本一致。当发电机励磁整流柜出现故障时,可通过所模拟的三相全控整流桥各种故障条件下的波形进行对比分析,确定故障类型并快速分析出故障点。

关键词:励磁系统;可控硅故障;Matlab 仿真;波形分析

中图分类号:TM 761 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)06-0085-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220613

Simulation and Analysis of Thyristor Fault in Excitation Rectifier Cabinet

YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, LIN Yuanfei, XIE Yanjun

(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: Rectifier cabinet of generator excitation system is the basic unit to realize excitation regulation, and rectifier bridge fault is one of the most common faults in excitation rectifier cabinet. In order to predict the fault in advance and accurately analyze the cause of the fault after the fault occurs, it is necessary to study various situations of rectifier bridge fault. The fault types of rectifier bridge are summarized, a model through Matlab/Simulink software is built, and the simulation waveforms of the input and output voltage of rectifier bridge and the secondary side current of excitation transformer are analyzed under several fault conditions such as short circuit and non-conduction of bridge arm, pulse loss, early conduction and delayed triggering. Through the verification of the actual fault recording waveform of a power plant, the simulation waveform is basically consistent with the actual waveform. When there is a fault occurred in excitation rectifier cabinet of generator, the fault type can be determined by analyzing and comparing the waveform under various fault conditions of the three-phase fully controlled rectifier bridge simulated by Matlab/Simulink software, and the fault point can be quickly analyzed.

Key words: excitation system; thyristor fault; Matlab simulation; waveform analysis

0 引言

励磁系统是电厂的核心控制设备之一,它提供励磁电流给发电机转子,并通过自动励磁调节器调节励磁电流控制发电机输出电压。在现代同步发电机励磁系统中,通常是将交流电整流成直流电供给转子绕组。整流回路一般采用三相桥式晶闸管整流电路。当三相全控整流桥发生故障时,除了可能导

致励磁电压的下降以外,还会造成励磁变压器的不对称或缺相运行,同时还可能产生直流磁化导致其他可控硅的过载等问题。

已有不少文献对励磁系统整流柜可控硅故障进行了分析,例如文献[1]对某调相机机组整流柜故障进行了分析;文献[2]对不同情况下的可控硅故障进行了分析,但是缺少励磁变压器低压侧的电流波形分析;文献[3]通过人工神经网络算法对励磁系统故障,包括功率柜故障,进行了分析和改进;文

献[4]设计了一套励磁系统控制及整流回路功能检验装置,通过直接观察励磁调节器输出信号、功率柜输出电压波形、脉冲变压器原边和副边波形,快速而有效地判断励磁系统控制及整流回路功能是否正常;文献[5-6]都是以某电站整流柜事故为例,分析励磁可控硅击穿导致整流柜烧毁事故起因、过程以及后续处理措施。

但上述文献都没有对各种整流桥故障进行全面分析。因为分析故障的主要波形一般为励磁变压器低压侧电流和励磁系统输出电压波形;但通常现场故障录波器中实录波形中励磁系统输出电压采样不够准确,因此提出还需要完整分析励磁变压器交流侧电流波形,才能为励磁系统的安全运行和故障分析提供理论依据。下面,在归纳分析三相全控整流桥故障类型的基础上,通过 Matlab/Simulink 软件模拟三相全控整流桥故障分析各种故障条件下的波形;最后,根据现场的试验波形验证仿真分析的准确性。

1 三相全控整流原理简述

三相全控整流桥接线如图 1 所示,图中: e_a 、 e_b 、 e_c 分别为交流供电系统的等值相电势; X_b 为阳极回路各相等效阻抗; L 为发电机转子回路等效电感。6 个桥臂的元件均为晶闸管。

当电路工作在非换相区时,共阴极组和共阳极组各有一元件导通,例如 V5 和 V6 两元件导通。当 V1 收到触发脉冲时,由于 $e_a > e_c$, V1 元件承受正向电压, V5 元件承受反向电压,元件 V5 向 V1 换相,共阳极组元件 V6 继续导通,其他元件截止。此时直流侧输出电压 $U_d = U_{ac}$ 。其他换相情况与此类似。

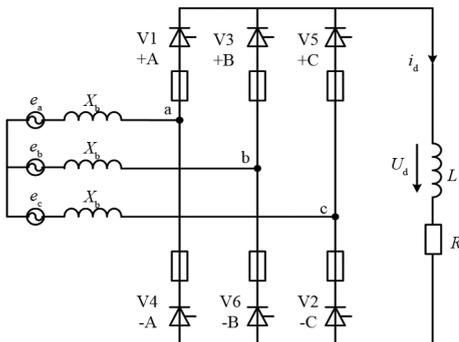


图 1 三相单个全控整流桥接线

2 故障类型分析

每套励磁系统包含至少两个三相全控整流桥,故障时刻可能是多桥并联单桥故障、多桥并联多桥故障的情况。多桥并联时,如发生单桥晶闸管击穿发生短路,那么通过励磁变压器低压侧即整流桥交流侧波形可分析出故障,直到该晶闸管的快熔发生熔断。此时由于非故障桥的作用,整流桥交流侧及直流侧波形恢复正常,为方便分析,下面仅考虑单桥情况。

整流桥的故障类型如图 2 所示。单个三相全控可控硅整流柜的故障主要包括晶闸管故障及脉冲故障两大类,其中:晶闸管故障分为晶闸管击穿、晶闸管不导通、晶闸管变为二极管故障^[7];脉冲故障包括脉冲丢失、提前触发、延时触发。这些故障还对应单桥臂故障,双桥臂故障及多桥臂故障。



图 2 三相全控可控硅整流桥的故障类型

3 仿真分析

3.1 仿真模型

依据三相全控整流桥的原理,基于 Matlab/Simulink 工具箱搭建三相全控整流桥模型。该模型包括机端电压部分、三相励磁变压器 (three-phase transformer)、三相全控整流桥 SCR、六路双窄脉冲 pulse、转子等效负载以及各测量回路^[8-10],如图 3 所示。电动机的励磁线圈负载属于电感性负载,为便于分析,通常将其等效为电阻与电感串联^[10]。

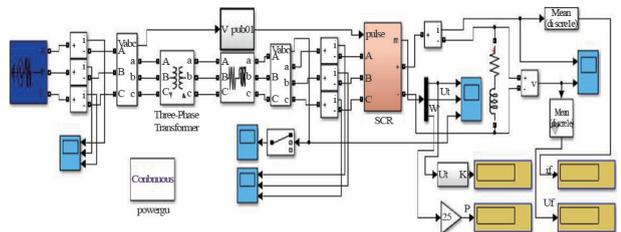


图 3 三相全控整流桥 Simulink 模型

仿真所使用的参数如下:整流桥交流侧电压 $U_2 =$

580 V,额定负载励磁电流 $I_f = 1100$ A,额定负载励磁电压 $U_f = 280$ V,额定空载励磁电流 $I_{f0} = 590$ A,额定空载励磁电压 $U_{f0} = 120$ V,转子负载等值电路中电阻 $r_f = 0.098 \Omega$, $r_L = 0.9 \text{ H}$,模型采用有名值并以直流输出为额定空载励磁电压条件进行仿真。

3.2 正常状态仿真分析

正常状态下,整流桥交流侧电压和电流、直流侧电压、触发脉冲的仿真波形如图 4 所示。由于每周期有 6 次换相,整流装置交流侧电压电流波形中换相过电压共有 6 个。整流装置交流侧电流波形即为励磁变压器低压侧波形,根据各相电流波形可以分析出可控硅的导通顺序,正常情况下导通顺序为



根据 $\dot{U}_d = 1.35 U_2 \cos \alpha$ 计算,可得此时触发角度约为 81° ,因此以下仿真均设定模型的触发角度为 81° 。图 4(a)为晶闸管触发脉冲仿真波形,触发脉冲为双窄脉冲。图 4(b)为整流桥交流侧电压波形,尖峰为换相过电压。图 4(c)为整流桥交流侧电流波形,以 A 相为例:电流为正对应的是整流装置的 +A 晶闸管导通,根据三相全控整流桥的原理,+A 晶闸管导通 120° ,时间为 6.667 ms ;接着,A 相电流为 0,说明此时 +A 晶闸管截止于 60° ;然后,A 相电流为负,此时 -A 晶闸管导通于 120° ;最后,A 相电流再一次为 0,此时 -A 晶闸管截止于 60° ,到此一个周期结束。因此可通过整流桥交流侧电流判断某时刻晶闸管的导通顺序及导通时间。图 4(d)为整流桥直流侧输出电压波形,每个周期有 6 个脉波,由于负载是电感性负载,因此波形中有负半波。

3.3 晶闸管回路故障仿真分析

3.3.1 晶闸管击穿

图 5 为 +A 晶闸管在 0.03 s 时发生击穿造成 A 相与 B 相短路的仿真结果。由图 5(a)整流桥交流侧电流波形可以看出:在 0.03 s 时由 +A-C 晶闸管向 +B-C 晶闸管换相,由于 +A 晶闸管发生击穿,+B 晶闸管导通的瞬间经 +A+B 晶闸管桥臂发生 AB 相短路;当换相到 -A 晶闸管导通时,除了 AB 相短路,+A-A 晶闸管直通短路,此时直流侧电压约为 0;当换相到 +C-A 晶闸管时经 +A+C 晶闸管桥臂发生 AC 相短路。由此得出的交流侧电流和直流侧电压如图 5(b)、(c) 所示。故障特征为励磁变压器低压侧出

现较大短路电流,且励磁电压波形中有为 0 的情况。

图 6 为 +A、-A 晶闸管在 0.03 s 时击穿,造成 ABC 三相短路的仿真结果。由于 +A、-A 晶闸管击穿,使得 A 相一直产生直通短路,直流侧电压约为 0。故障特征为励磁变压器低压侧出现较大短路电流,且励磁电压波形中有为 0 的情况。

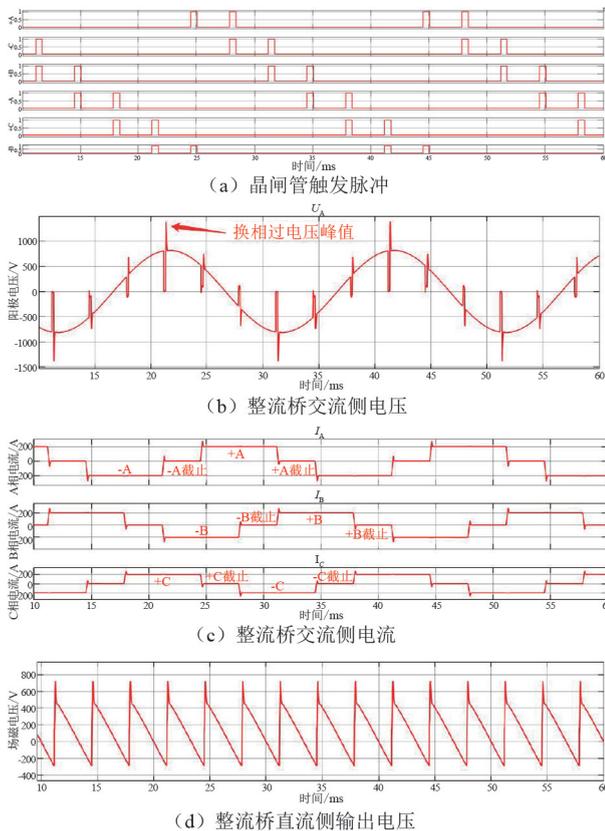


图 4 三相全控整流桥正常情况仿真波形

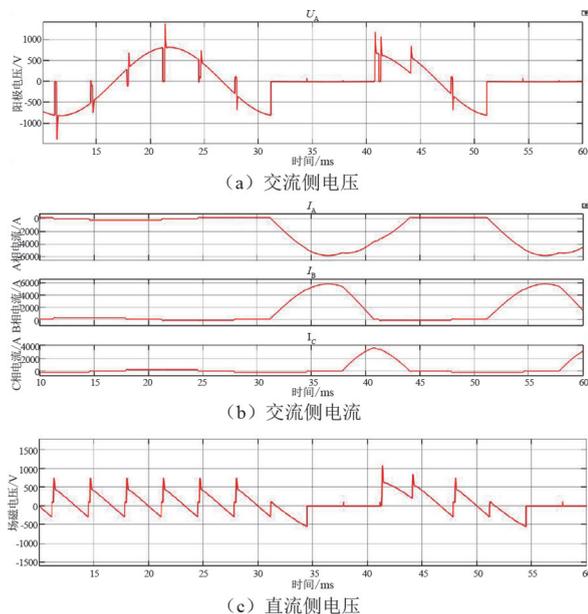


图 5 单桥臂晶闸管击穿仿真波形

图 7 为 +A、-B 晶闸管在 0.03 s 时击穿的仿真结果。在 0.03 s 时 -C 晶闸管导通,造成 BC 相经过 -B-C 晶闸管桥臂短路。随后 +B 晶闸管导通,发生 AB 短路,且 B 相直通短路,直流侧电压约为 0。

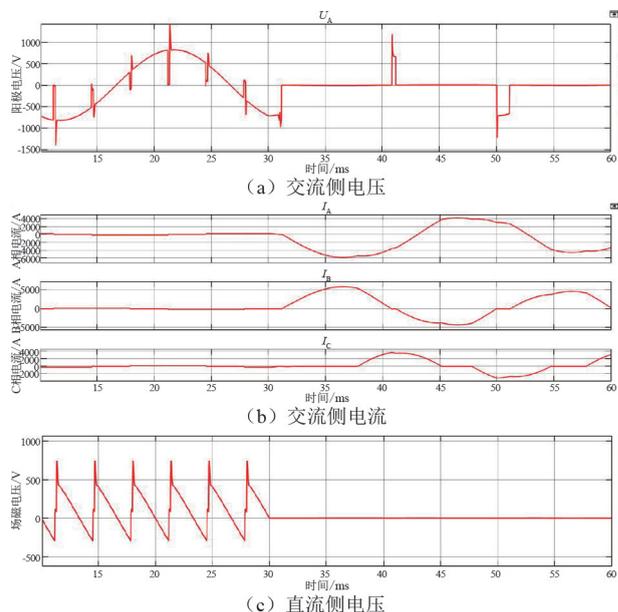


图 6 同相双桥臂晶闸管击穿仿真波形

晶闸管击穿故障特征为励磁变压器低压侧出现较大短路电流,且励磁电压波形中有为 0 的情况。

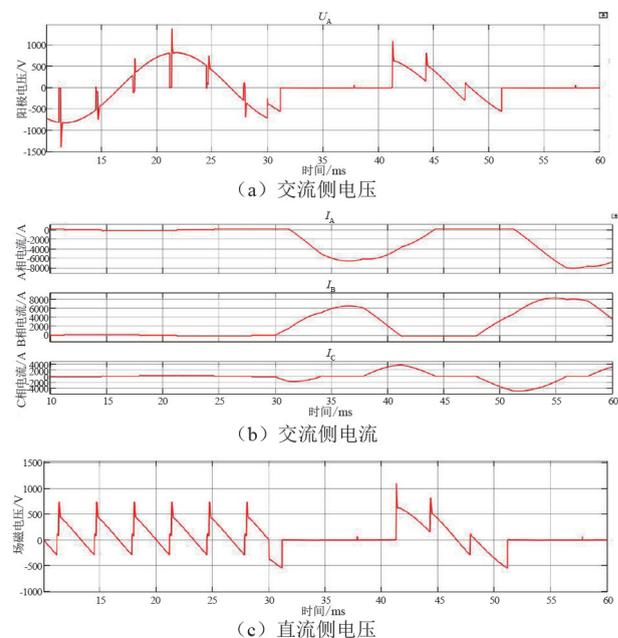


图 7 非同相双桥臂晶闸管击穿仿真波形

3.3.2 晶闸管不导通

造成晶闸管不导通的原因主要包括晶闸管元件损坏不通、该桥臂快熔熔断、该晶闸管对应脉冲丢失。下面主要分析单个晶闸管不通、同一相的两个桥臂晶闸管不通、不同相的两个桥臂晶闸管不通。

1) 单桥臂晶闸管不导通,换相过电压每周期减少一个。例如 +A 晶闸管不导通,仿真波形如图 8 所示。正常情况下,当换相到 +A-B 晶闸管导通时,直流侧输出电压为 A、B 相之间的线电压 U_{ab} ,由于 +A 晶闸管不通,因此只能保持 +C-B 晶闸管继续导通,此时直流侧输出电压为 U_{cb} 的负半波。而相应地,交流侧电流表现为无 +A 相电流,而 +C 晶闸管一直导通 180° ,导致 +C 晶闸管和 -C 晶闸管出现直通短路,此时直流侧输出电压约为 0,交流侧电流出现三相均为 0 的情况。

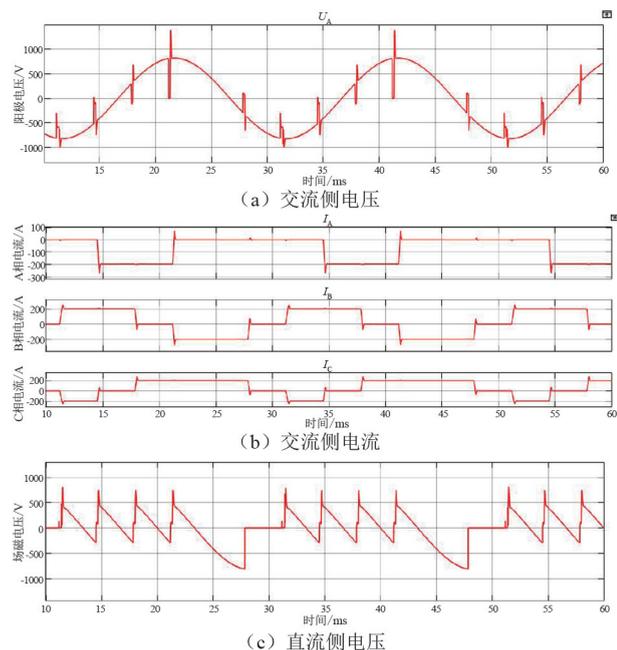


图 8 单桥臂晶闸管不导通仿真波形

2) 同相双桥臂晶闸管不导通,每个周期出现 2 次同相直通,换相过电压每周期减少 2 个。例如 +A、-A 晶闸管不导通,造成 A 相不通,仿真波形如图 9 所示。

3) 非同相双桥臂晶闸管不导通,与之构成回路的电压均不能输出。例如 +A、-B 晶闸管不导通,仿真波形如图 10 所示。开始 +B-C、+B-A、+C-A 晶闸管导通正常输出波形;接下来应该是 +C-B 晶闸管导通,但是由于 -B 晶闸管不导通继续维持 +C-A 晶闸管导通,因此输出 C 相与 A 相的线电压 U_{ca} 的负半波;然后,应当是 +A-B 晶闸管导通,由于 +A 晶闸管不导通继续维持 +C-A 晶闸管导通,因此继续输出 C 相与 A 相的线电压 U_{ca} 的负半波。

以上几种晶闸管不导通的故障特征为交流侧电流出现三相均为 0 的情况,励磁电压波形中有为 0

的情况,且励磁电压有效值变小。

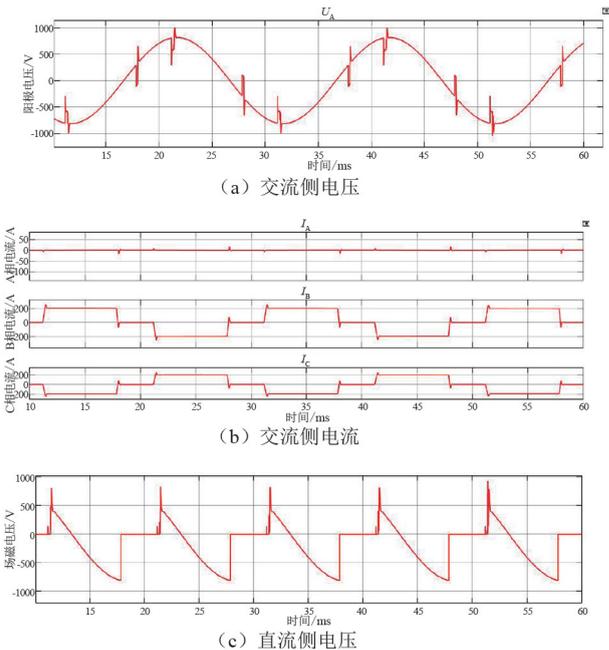


图9 同相双桥臂晶闸管不导通仿真波形

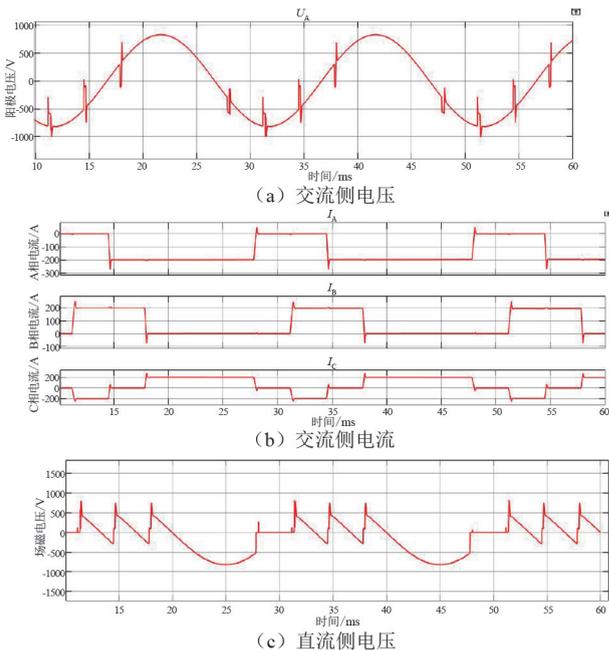


图10 非同相双桥臂晶闸管不导通仿真波形

3.3.3 晶闸管变二极管

工程中,由于晶闸管G、K极绝缘不好可能导致G、K间的PN结损坏,使得晶闸管变为二极管。图11为晶闸管二极管仿真波形。在图11中,设定+A由晶闸管变为二极管,由交流侧电流可知,+A晶闸管导通180°,当由+B-A晶闸管向+C-A晶闸管换相时,+B晶闸管还没有完全换到+C晶闸管,由于+A晶闸管一直导通,因此+A晶闸管此时与-A晶闸管形成短暂的同相直通,对应直流输出电压约为0。且

由于+A晶闸管一直导通,导致+C晶闸管提前截止。

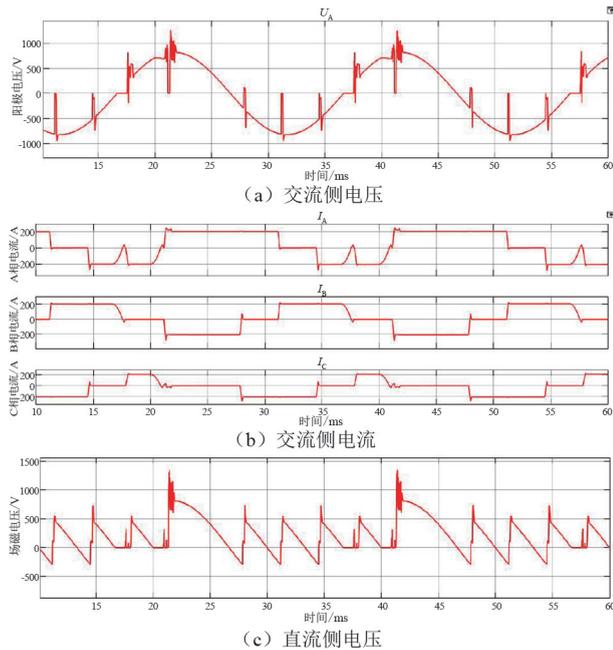


图11 晶闸管变二极管仿真波形

晶闸管变为二极管的故障特征是交流侧电流中出现导通接近55°后截止10°又继续导通55°的情况,且励磁电压每个周期有5个波头。

3.4 脉冲故障仿真分析

针对脉冲回路故障进行模拟仿真,并对仿真波形进行分析。

1) 脉冲丢失

脉冲丢失与晶闸管不导通的情形一致,在此不再赘述。

2) 提前触发

图12为+A晶闸管脉冲提前仿真波形。图中+A晶闸管脉冲提前触发20°,造成+C晶闸管提前截止,由原来的导通120°缩短为导通100°,导通时间变短;同时+A晶闸管提前导通,由原来的导通120°延长为导通140°,+A晶闸管导通时间变长。励磁直流电压波形如图12(c)所示,正常时是均匀分布的锯齿波,现在其中一个锯齿波缩短,紧接着的锯齿波提前输出 U_{ac} 的部分。

3) 延时触发

图13为+A晶闸管脉冲延时触发仿真波形。图中+A晶闸管脉冲延时触发20°,由于本该+A晶闸管导通时,+A晶闸管脉冲没有到,使得+A晶闸管没有导通,所以+C晶闸管继续维持导通,原来的导通120°延长为导通140°,导通时间变长,直流电压

继续输出 U_{cb} 的部分;同时+A 晶闸管的脉冲由于延迟了 20° ,使得+A 晶闸管导通 100° 后换相,导通时间变短。

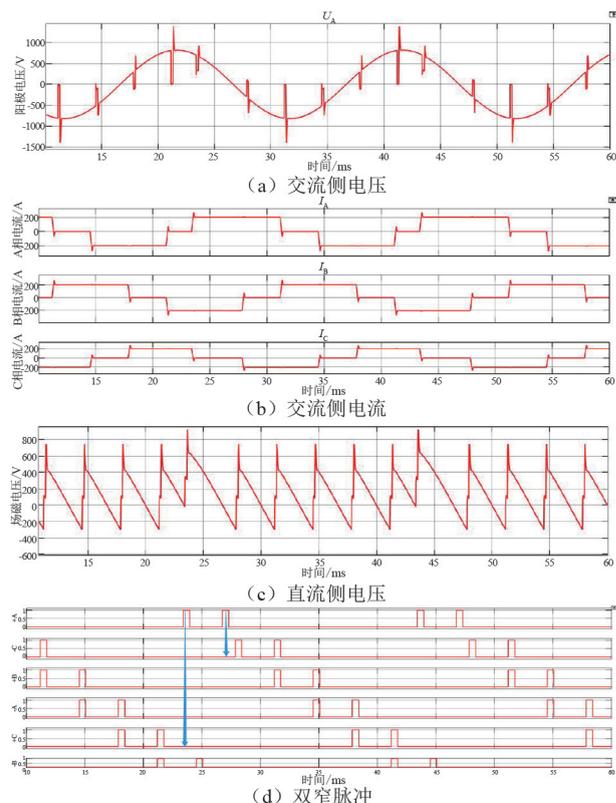


图 12 +A 晶闸管脉冲提前仿真波形

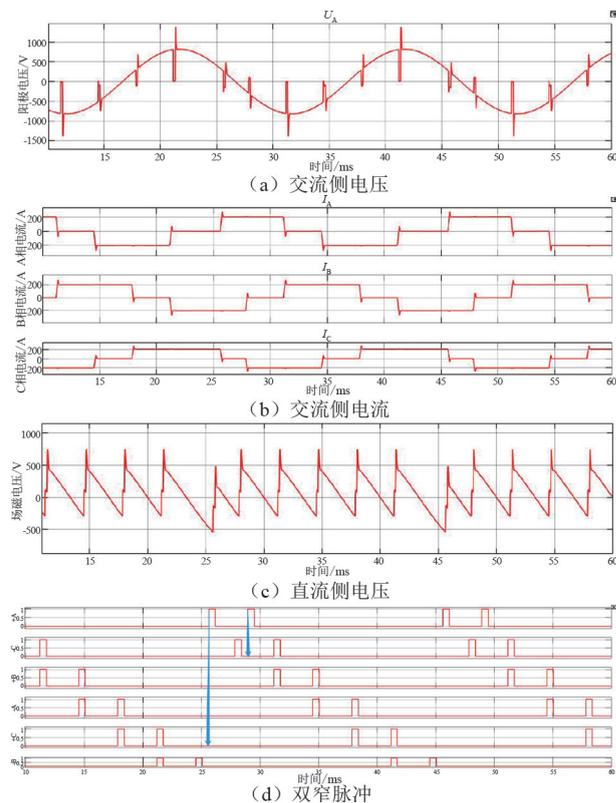


图 13 +A 晶闸管脉冲延时触发仿真波形

脉冲故障的故障特征为交流侧电流中出现导通角度过大或者过小的问题,且励磁电压 6 个波头不一致。

4 故障特征验证

根据第 3 章波形分析,总结出晶闸管在不同故障情况下的故障特征如表 1 所示。一般来说发生晶闸管击穿,势必会造成励磁变压器低压侧出现较大短路电流,具体是哪一相的晶闸管击穿,需要结合波形来分析。晶闸管不导通的时候不易被发现,需要看波形才能识别。晶闸管变为二极管的波形比较有特征,很容易识别。脉冲故障时,如果是脉冲丢失,那么将出现与晶闸管不导通一样的波形,而提前触发或者延时触发可结合交流侧电流和励磁电压波形进行识别。

表 1 晶闸管故障特征汇总

故障类型	故障特征
晶闸管击穿	1) 励磁变低压侧出现较大短路电流 2) 励磁电压波形中有为 0 的情况
晶闸管不通	1) 交流侧电流出现三相均为 0 的情况 2) 励磁电压波形中有为 0 的情况,且励磁电压有效值变小
晶闸管变二极管	1) 交流侧电流中出现导通接近 55° 后截止 10° 又继续导通 55° 的情况 2) 励磁电压每个周期 5 个波头
脉冲故障	1) 交流侧电流中出现导通角度过大或者过小的问题 2) 励磁电压 6 个波头不一致

4.1 现场波形验证

图 14 为某电厂故障录波器所录的励磁变压器低压侧电流波形。图中 t_1 时刻即将由+B-C 晶闸管向+B-A 晶闸管换相时,正常情况下-C 晶闸管还没有完全换到-A 晶闸管,且共阳极没有其他导通通路的话,-C 晶闸管截止不了,直到有通路。但从波形来看: t_1 时刻-C 晶闸管已经截止而-A 晶闸管还没有导通,说明共阳极有其他导通通路,因此判断-B 晶闸管一直导通,+B 晶闸管此时与-B 晶闸管形成短暂的同相直通,出现短暂的三相电流为 0 的情况;同时,-A 晶闸管提前截止,-B 晶闸管提前导通并导通 180° ,推测-B 晶闸管桥臂晶闸管不受控制,有变为二极管的可能。对比第 3.3.3 节图 11(b)晶闸管变二极管仿真波形 A 相电流,波形基本一致。由此分析出该厂整流柜出现的问题是某台功率柜的-B 晶闸

管发生故障变为二极管造成,需要立即处理。

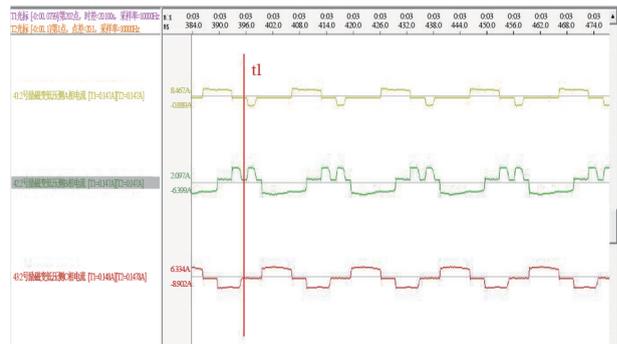


图 14 某电厂故障录波器录波

4.2 仿真数据验证

通过模型仿真一组波形数据,如图 15 所示,根据表 1 的故障特征,推测判断发生故障原因及部位。

从仿真故障波形数据中的交流侧电流可以看出,故障发生时 A、B、C 三相先后均出现短路电流,且出现一段直流侧励磁电压为 0 的情况。通过表 1 故障特征可以判断,这是发生了晶闸管击穿。从交流侧电流可以推断出,故障发生前+A-C 晶闸管导通换相到+B-C 晶闸管,正当-C 晶闸管向-A 晶闸管换相时,A、C 两相出现短路电流。前两次换相过程中共阳极侧只有-C 晶闸管导通,当共阳极侧出现另一通路-A 晶闸管时,AC 发生短路,可以推测-C 晶闸管发生击穿,击穿时间发生在短路前-C 晶闸管导通期间。

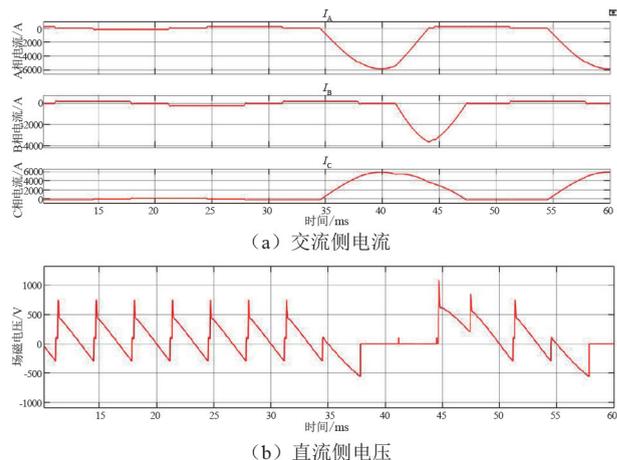


图 15 仿真故障波形

5 结论

上面归纳了整流桥的故障类型,并通过 Matlab/Simulink 软件搭建模型,对相应故障条件下的整流

桥输入及输出的电压、电流仿真波形进行分析。通过某电厂的故障实例及仿真实例进行波形验证,结果表明:仿真波形与实际录波波形一致,并能通过总结的故障特征基本准确地分析出故障发生原因及部位。

因此,当发电机励磁整流柜出现故障时,可根据所总结的故障特征及仿真波形判定故障类型,快速分析出故障点。所研究的成果对于开发励磁整流故障诊断、研发智能化励磁整流具有重要意义,也可用于电厂运行人员对励磁系统整流桥进行分析。

参考文献

- [1] 赵强,徐浩原. 300 Mvar 空冷调相机励磁整流柜故障分析及改进[J]. 电工技术,2021(11):146-148.
- [2] 张凯. 同步发电机励磁系统可控硅故障分析与研究[J]. 水电站机电技术,2022,45(2):67-71.
- [3] 李大焱. 水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究[J]. 计算机测量与控制,2021,29(1):10-13.
- [4] 张超,武永恒,赵举. 励磁系统控制及整流回路功能检验装置的设计及应用[J]. 水电与新能源,2022,36(2):45-48.
- [5] 陈伟坚. 励磁整流柜故障引起跳机的分析处理[J]. 电力安全技术,2009,11(9):52-53.
- [6] 庞争争,王刚,侯飞,等. 某大型机组励磁系统整流柜烧毁分析[J]. 水电与新能源,2015(1):51-53.
- [7] 吴龙. 发电机励磁设备及运行维护[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [8] 许其品,朱晓东,许其质. 可控硅整流桥故障对励磁系统的影响[J]. 水电厂自动化,2005(3):16-20.
- [9] 郝勇,许其品,曾继伦,等. 晶闸管换相过电压的 MATLAB 仿真[J]. 水电厂自动化,2007(4):195-199.
- [10] 王兆安. 电力电子技术(第5版)[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

作者简介:

杨玲(1988),女,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作;

许其品(1967),男,硕士,研究员级高级工程师,从事励磁系统控制工作;

朱宏超(1981),男,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作。

(收稿日期:2022-04-23)

2022年《四川电力技术》总目录

第1期

山火对 10~35 kV 输电线路安全运行影响试验研究	杨佳才,任欣悦,王 勋,张星海,范松海,陈天翔(1)
山火烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究	杨弄潮,杨博闻,杨淳岚,张星海,范松海,陈天翔(6)
山火条件下 35 kV 输电线路故障信号特征试验研究	李唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈天翔(10)
山火对空气间隙绝缘击穿特性影响试验研究	刘 磊,杨宇航,徐会凯,张星海,吴 驰,陈天翔(16)
基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究	曾先锋,任百群,宋 兵,石 勇,朱中华(21)
基于柔性光学电流互感器的接地选线装置	石 勇,任百群,王 耀,李宇琦,刘倪宣,姜 磊(26)
基于小波包能量的漏电保护方案研究	赵 恒,左金威,瞿 科(30)
弧光保护通道自检技术的应用研究	王 杰,侯 炜,陈 俊,牛洪海(36)
电流互感器位置与死区故障保护动作行为分析	王利平,程 浪,胡 杨(40)
分布式光伏储能系统的优化配置方法	彭 伟,郑连清,郑天文(45)
适用于采动影响区的新型可调式钢管桁架设计研究	周建军,蒋 锐,向 越,车 达,杨昌金(50)
湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践	李成鑫,王志高,安 政,耿 植,王方强(57)
图像识别技术在机组运行状态判断及监控对点中的应用	满亚勤,张翅飞,曾 燃,卿 明,童 静,尹永亮,谢晓鸣,王秋霖(62)
一种调压开关触头装置的优化设计	李海国(66)
基于多种检测手段的高压电缆头绝缘放电诊断分析	赵文君,栾崇彪,冯 藩,施 逸,蒋益强,兰 浩(71)
一起雷击跳闸事故中电动机返送电对电网的影响分析	蓝彬桓,黄宇涵,陈 鹏(75)

某主变压器保护多次动作跳闸事故分析	王 伟,王婷婷,张 里(78)
变电站保护装置状态监测的优化和异常处置	余骏阳,李继尧,李 辉,宋麟飞,李飞鹏,蒋 枝(81)
110 kV GIS 隔离开关缺相故障分析	黄克全,郑荣锋,屈飞飞,刘圆方,陆晓彬,黄 鑫(87)
老型号变压器排油注氮灭火装置接口改造	谭文强,宋 宇,邓 浩(91)

第2期

抽水蓄能在四川电网的应用前景展望	陈 刚,丁理杰,韩晓言,王 亮,李 甘,史华勃(1)
基于支路潮流模型约束的分布式储能系统优化配置方法	谢 波,戴博伟,郝文斌,胡俊阳,杨彩虹,李宇宁(7)
高弹性电网下新能源消纳研究	黄 健,樊国旗,季克勤,陈梓翰,郑 庆,胡济恒,蒋轶澄,潘伟东(12)
生物质发电机组调速系统涉网功能研究及应用	高 剑,兰立刚,王鸿砾,李 甘(17)
基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究	郑 鑫,王若瀚(21)
500 kV 线路避雷器保护失效分析及改进措施研究	刘守豹,侯玉成,盛明珺,方 圆,童 理,韦昌伟(28)
SF ₆ /N ₂ 混合气体绝缘特性实验研究	贾程乾,夏亚龙,倪 源,谢施君,张晨萌(33)
基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障建模分析	李世龙,张 华,龙 呈,高艺文,苏学能(38)
500 kV 交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究	吴高波,岳 浩,李 健,罗楚军,吴庆华(43)
基于调匝式消弧线圈的虚幻接地解决措施	袁明哲,马娅妮,汪祺航,邹经鑫,曹 柯(48)
交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究	邵千秋,范松海,张 榆,罗东辉,穆 舟,夏亚龙(55)
城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响	

的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳(61)

含 P2G 的多能源网优化调度研究 樊国旗,霍超,李小腾,刘斌,樊国伟,程林,王志远,潘伟东(67)

基于复杂网络属性的电网灾难性事件综合风险评估 张灏(74)

基于组合式变换器的川藏铁路贯通供电方案电气性能仿真分析 夏焰坤,任俊杰(82)

断路器的旋转式互联双动触头接触系统设计 李启辉,吴锦松,王叔悦,陈天翔(87)

变电站铝合金接线板的失效仿真与结构优化 陈家慧,冯杰,兰贵天,赵兴虹,彭倩,王方强,赵莉华,吴隆文(90)

第3期

计及响应不确定性的可调度负荷响应及惩罚价格随机优化 周涛,钱寒晗,张纬,方天扬,李生虎(1)

基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态聚合优化模型 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张宏业(8)

适用于电力场景的人工智能中台技术与探索 张凌浩,潘文分,庞博,吴凯军,张颀(16)

基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举(23)

基于旋转 YOLOv5 的电力作业车态势感知方法研究 张劲松,邓元实,常政威,吴杰,陈明举(29)

海南电网电压暂降监测数据特征分析 方铭,李天楚(35)

500 kV 同塔双回输电线路感应电压和感应电流建模分析 唐浩龙,樊艳,冯千秀,牟婷婷(41)

基于增量维纳反卷积的暂态过电压波形还原算法 郑鑫,董乘甫(46)

超高压交叉线路空间电磁环境分析 马明智,杨昌杰(53)

布置于线路中部的 500 kV 独立串抗站技术方案探讨 曹尹,李龙才,郭劲,伍晓伦,李春梅(57)

海上柔性直流输电工程直流电压等级确定方法 陈鹏,周国梁,马亮,杨金根,梁言桥,周思远(61)

角钢塔曲臂 K 节点变形原因分析及对策研究 辜良雨,李林,廖邢军,刘翔云,陇源杰,付卫斌(66)

新型锚杆基础破坏机理及影响因素研究 鄢秀庆,辜良雨,余国庆,董碧霞,王仲富,王波(73)

110 kV 线路钢芯铝绞线断裂分析 陈家慧,王方强,冯杰,刘曦(80)

±800 kV 特高压复龙换流站西门子大组件换流阀饱和抗器缺陷分析与改造 唐世雄,喻悦箫,曹运龙,张鹏,黄宇,赵冉,刘隆晨(83)

链式网络中区域备用电源自动投入的风险控制及策略优化 殷攀程,刘鑫,袁明哲,郑茜元,陈翔(89)

第4期

四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系统设计 徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跃(1)

源网荷储互动的主配一体调度控制系统研究 黄天意,李晨昕,刘玥伶,刘登伟,李健华,刘治凡,胡悦(7)

基于短时傅里叶变换的局部放电窄带干扰抑制 周涛,万子逸,段永生,吴辰阳,钱琪(11)

单信号驱动的固态脉冲源 罗雨航,郑静,杨鸽,李恩成(16)

10 kV 配电线路避雷器优化布置研究 雷潇,许安玖,刘强,崔涛,廖文龙(21)

穿越森林草原配电线路的一二次融合成套柱上开关优化布置研究 高艺文,罗凡波,苏学能,李世龙,龙呈(26)

一种基于三维模型的输电线路塔基设计方法 李美峰,冯运超,骆俊林,黄兴,梁明,李力(32)

山区风电场新型筒承式风机基础设计及生态环境效益分析 陈晓琳,尹武君,张体强(40)

山区线路承压水地基基础治理及沉降观测研究 辜良雨,刘翔云,张利如,甘运良,翟洪利(44)

电网滑坡隐患多域早期识别技术及应用 卜祥航,曹永兴,吴驰(51)

电缆隧道火灾事故特点与灭火系统研究综述 曾晓亮,李富祥,李明伟,谭文强,宋宇,王方强(55)

电力设备故障声学检测技术综述及展望 张灏(60)

基于过零偏移检测的分布式台区户变关系辨识研究 梁捷,梁广明,黄水莲(66)

一起多套保护装置同时动作的分析

..... 赵晓东,李 锋,曹飞翔,付雷雷(73)

一起 500 kV 电缆外护套放电故障分析及防治措施研究 ...

..... 管毓瑶,刘守豹,宋佳骏,胡思宇,王晓兰(77)

一起 35 kV 开关柜局部放电缺陷检测及分析.....

..... 杨 洁,刘 鑫,何 良(83)

一起油流继电器重瓦斯误动事故分析.....

邱 炜,郑荣锋,黄 鑫,刘 君,陆晓彬,胡 林,徐清鹏(87)

一起因 500 kV 线路传输功率过大而导致线路同频并网失败

案例分析 罗义军,李 飞,李 超(91)

第 5 期

考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统技术经济研究

..... 田玉婷,魏 巍,孙昕炜,刘俊勇,梅生伟(1)

考虑实时需求的冷热电联供型微电网优化调度.....

..... 杜晓婷(6)

飞轮储能风力发电系统的功率快速平滑控制策略研究.....

邵宜祥,过 亮,蔡国洋,刘 剑,郭春岭,胡丽萍,孙素娟(14)

基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法.....

..... 吴天宝,马小敏,唐 军,彭 旭,庄 杰(20)

山区输电线路微型桩模块化钻机的研制.....

..... 董 杰,范荣全,贺 前,王 杰,李何钰秋(26)

基于握手式交互策略智能复合开关研究.....

..... 胡天祥,黎军华(31)

多逆变器并网系统谐振混合阻尼参数设计.....

..... 郑嘉龙,陈 静,赵丽华(35)

220 kV 变压器中性点接地方式改造后相关设备的安全校核

分析 孙鹏程,王贞强,梁 伟,杨万波(42)

基于 YOLOv5 的电力巡检图像缺陷识别研究.....

..... 庞 博,鲍志远,杨明坤,张凌浩,孙小毛,胡 强(48)

变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究

..... 谢 茜,张宗喜,丁理杰,冯 运,刘 睿(54)

基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位方法

..... 何宇航,丁理杰,周 波,李敬雄,姚 晓,周电波(58)

生物降解油浸绝缘纸特征产物及微观结构研究.....

..... 王 杰,吴晓晖,胡仕红,兰新生,张 力(64)

基于 ER 算法的智能站保护二次回路故障定位方法.....

..... 汪 勤,吴 旻,姚辉昌,李江洋(70)

一起低频减载误动作事件分析及改进措施.....

..... 张华杰,杨紫苓,刘明忠,张 纯(75)

一起 220 kV 变压器匝间短路故障诊断与分析.....

..... 梁弘毅,廖文龙,刘 睿(79)

一起 110 kV 敞开式隔离开关合闸失败原因分析.....

..... 郭 杨,高世宇,陈 昊,余 爽,李义峰(83)

利用油中溶解气体含量分析套管漏气的方法.....

..... 鲁力铭(89)

第 6 期

大档距/高差线路非均匀覆冰下的脱冰跳跃特性研究.....

..... 闫向龙,郭裕钧,黄桂灶,张血琴,吴广宁(1)

特高压换流变压器套管电连接结构地震累积效应评估方法

研究..... 庄一豪,毛宝俊,谢 强(7)

± 800 kV 干式平波电抗器抗震性能分析.....

..... 朱 旺,任阿阳,薛志航,谢 强(16)

电网舞动灾害应对技术体系研究综述.....

..... 赵 彬,刘 彬,朱宽军(22)

台风对电网的影响分析及应对措施.....

..... 徐湘忆,毛玮韵,高 凯,任 辰(31)

大功率电驱离心式压缩机组电压暂降问题分析与治理

..... 杨丽茹,张啟超,邹 涛,马 晴,徐方维,郭 凯(35)

电气化铁路接入末端电网的三相不平衡影响因素分析.....

..... 段 玉,侯 冰,

张 媛,南东亮,董雪涛,宋朋飞,刘 震,段青熙,王小云(44)

基于实际电路理论分析的多负序源责任分摊.....

..... 张晓斌(52)

变压器套管的发展历程与挑战.....

..... 王永琪,吴广宁,刘 凯,林 牧,丁 镇,汤 浩(59)

雷电拦截新技术在高压输电线路的应用研究

..... 宋海东,

杨 晖,钟驰宇,李默林,周茹萍,黄 昱,张 榆,李建明(68)

基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法.....

..... 高艺文,龙 呈,苏学能,石 铖,高红均(73)

直升机带电修补雷击受损光缆技术及应用研究.....

..... 杨 暘,卢金奎,邱中华,王 爽(80)

励磁整流柜可控硅故障模拟及分析.....

..... 杨 玲,许其品,朱宏超,林元飞,谢燕军(85)

2022 年全年总目录 (92)