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

(国网四川省电力公司,四川成都 610041)

摘 要:近年来,随着四川地区水电站数量和装机规模的急剧增加,大规模水电集群同时采取停机避峰措施对电网安 全运行的影响日益突出。文中结合四川地区水电站运行、水电调度管理和电网运行实际情况,明确了引发水电站停 机避峰的主要因素为流量、泥沙和杂质,分析了大规模集群径流式水电站停机避峰对电网调度的影响;从时间和空间 (流域)2个维度研究了停机避峰发生的分布特征,提出了以流量和水质作为预测水电站是否发生停机避峰的可行判 断方法;从预测方法、实时监测和系统架构等方面介绍大规模水电集群停机避峰管理系统设计思路。所设计的管理 系统在四川电网的实际应用表明,该系统可以提高电网调度机构对实时停机避峰掌控能力,有助于辅助电网汛期安 全稳定运行,可以为区域电网和水电站厂停机避峰管理提供参考。

关键词:停机避峰;径流式水电站;防洪;电网调度

中图分类号:TM 612 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0001-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220401

Analysis of Shutdown and Peak Averting Characteristics and Design of Management System for Centralized Large-scale Hydropower Generator Group in Sichuan Area

XU Tao, DU Chengrui, WANG Jinlong, HUANG Shansong, WANG Lili, WANG Qiongyue (State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In recent years, with the rapid increase of the number and installed capacity of hydropower stations in Sichuan, the impact of simultaneous shutdown and peak averting measures of the centralized large-scale hydropower generator group on the safe operation of power grid has become increasingly prominent. Combined with the actual situation of hydropower station operation, hydropower dispatching management and power grid operation in Sichuan, it is defined that the main factors causing shutdown and peak averting in hydropower station are flow, sediment and impurities, and the impact of shutdown and peak averting of the centralized large-scale run-of-river hydropower stations on power grid dispatching is analyzed. The distribution characteristics of shutdown and peak averting is studied from two dimensions of time and space (watershed), and the flow and water quality are proposed as a feasible judgment method to predict whether the hydropower station will shut down and avoid peak load. Finally, the design idea for shutdown and peak averting management system of the centralized large-scale hydropower generator group is introduced from the aspects of prediction method, real-time monitoring and system architecture. The practical application of the management system in Sichuan power grid shows that the proposed system can improve the organization ability of power grid dispatching to control the real-time shutdown and peak averting, help to assist the safe and stable operation of power grid in flood season, and provide a reference for the shutdown and peak averting management of the regional power grid and hydropower plants.

Key words: shutdown and peak averting; run-of-river hydropower stations; flood control; power grid dispatching

0 引 言

停机避峰是指径流式或调节能力弱的水电站由 于河道洪水流量大、水质差,不满足安全发电要求, 为避开洪峰采取闸门全开、机组停运的防洪措施。 受季风气候影响,四川地区在汛期多持续性暴雨,易 发生山洪、泥石流和洪水等灾害,导致无调节或日调 节等调节能力弱的水电站经常采取停机避峰措施, 造成电力系统出力减少。四川电网水电装机规模 大、比例高,同一流域内水电站群水力电力联系密 切,当遭遇全流域洪水时,将发生流域性停机避峰, 系统出力大规模减少,造成电力系统电力供应失衡, 威胁电网安全^[1-2]。

因此,分析水电站停机避峰发生条件,科学开展 停机避峰预测预警,对实现电网安全调度具有重要 意义。下面在研究停机避峰特性和发生条件的基础 上,设计了大规模水电集群停机避峰管理系统,以期 减轻停机避峰对四川电网的影响。

1 停机避峰原因及对电网的影响

1.1 停机避峰原因分析

强降雨对地表强烈的扰动,使汇入河道的水流 中泥沙含量大幅增加。当暴雨形成洪水时,河道中 裹挟的大量泥沙以及泥石流带来的大量推移质、悬 移质、断枝和其他杂质,造成河道水质差^[3-4]。遇河 道水质差时,径流式或日调节电站一般采取冲沙 (库容蓄水水位达到一定高度后,提起对应冲沙闸 门放水,利用泄流冲击进水闸门及库区内淤积的泥 沙)、反冲(水库蓄水后全开闸门,利用泄流反向冲 击取水口拦污栅淤塞物)和停机避峰等措施。相对 于冲沙、反冲而言,停机避峰是一种被动的防御操 作,可减少洪水、泥沙和水中杂质对电站的影响。

除洪水流量大影响水电站安全运行需泄洪外, 洪水引发水电站停机避峰的原因一般可分为泥沙 (悬移质、推移质)影响、杂质(断枝、垃圾等)影响和 水头受阻。

1.1.1 泥沙引发停机避峰

泥沙的影响可以分为对机组磨蚀(悬移质)的影 响、对建筑物冲蚀(悬移质、推移质共同作用)的影响 以及对库区淤积(悬移质、推移质共同作用)的影响。

1) 机组磨蚀

机组磨蚀主要是指在汽蚀和泥沙磨损的共同影响下对水轮机过流部件的破坏^[5]。清水以汽蚀破坏为主;水质差时以泥沙磨蚀为主,特别是高速含沙水流,在冲击过流部件表面时,所生成的高温高压导致金属保护膜破坏,在进一步冲击下金属表面细微颗粒逐步脱落,形成沟槽、波纹及鱼鳞坑。磨蚀对水轮机的破坏与含沙浓度、成分、大小、硬度、形状、流速等有关,减少或消除泥沙可减轻破坏。

山区河流径流式水电站水轮机磨蚀更为严重。 洪水时急剧增加的水中泥沙也会加剧水轮机及各过 流断面的磨蚀。

2)水工建筑物冲蚀

含沙洪水由于流速快加之推移质和悬移质对建 筑物表面的碰撞、冲击,常增加水工建筑物过水表面 的冲蚀破坏,特别是对护坦、取水口边墙、引水隧洞、 闸墩、导墙的破坏尤为显著,常形成冲坑,造成露筋。

3) 库区淤积

含沙洪水在流经库区时,受闸门、闸墩等挡水建 筑物的影响,流速相对减缓,造成水流中的悬移质、 推移质在库区淤积,严重减少有效库容。

1.1.2 杂质引发停机避峰

洪水中裹挟的断枝、塑料袋等生活垃圾,常被水 流冲击后卡在取水口拦污栅栅片内,造成过流不畅, 流速减缓。推移质和悬移质在拦污栅前沉积,进一 步加剧拦污栅淤塞,淤塞导致拦污栅两侧水位差 (下面简称栅差)过大,取水困难,影响机组运行水 头。所以在水中泥沙和杂质过多时,机组需停机甚 至采取反冲措施来减少栅差。此类事件在岷江上游 流域的水电站中较为常见。

1.1.3 水头受阻引发停机避峰

持续性暴雨引发的洪水整体抬高了河道水位, 可能造成尾水水位过高。对于一些低水头径流式水 电站,当上、下游水位差小于水轮机最小发电水头, 即水头受阻时,水电站被迫停机。此类事件多见于 嘉陵江流域的径流式水电站。

1.2 停机避峰对电网调度的影响

停机避峰主要由短时集中降雨引发,与降雨强 度、降雨区域形成的洪水规模、水质情况等因素密切 相关,具有明显的突发性及流域一致性。停机避峰 会导致短期内水电站群可调出力大幅下降,对电力 系统运行稳定冲击较大,将直接影响电网的电力调 度计划执行,限制电站的供电能力,严重时将造成电 网供电能力失衡。停机避峰对电网的影响主要体现 在电力和电量两方面:

1) 对电力的影响

四川地区在汛期发生过停机避峰的电站约占四 川电网统调水电站总数量的57%。以2020年为例, 入汛后自6月下旬开始出现停机避峰,单日最大停 机避峰容量出现在8月18日,约占当日四川地区最 大负荷的28%。停机避峰受降雨影响,但不同降雨 强度、降雨区域形成的洪水规模、水质情况不尽相 同,其发生呈突发性,最终是否造成水电站停机避峰 的预测难度高。区域降雨多导致河流、支流规模性 停机避峰。快速、大规模的水电站出力减少,对电力 系统运行稳定冲击较大。

2) 对电量的影响

水电站停机避峰时长受洪水和水质变化影响, 时间一般在6~36h,但短时可在2h后恢复,长时也 可持续2~3日。停机避峰直接造成水电站发电量减 少,影响地区清洁能源消纳,例如,2020年8月18日 四川电网因停机避峰引起的电量损失高达80GWh。

2 四川地区水电站停机避峰分布特征 及发生条件

停机避峰目的是为有效降低含沙洪水对径流式 水电站的危害,因此停机避峰分布与区域降雨的时 空分布关系密切。下面以四川地区 2020 年为例分 析停机避峰分布特征。

2.1 时间分布特征

四川地区 2020 年主要降雨分布情况见表 1,单 日水电停机避峰容量如图 1 所示。



从时间尺度上看,停机避峰发生于主汛期6月

下旬至9月下旬,集中于8月中下旬,停机避峰时间 与几次较大范围暴雨天气过程时间一致。受7月 14日—16日前期降雨影响,7月18日四川电网 停机避峰电站的数量出现一轮小高峰;8月13日至 8月末,接连4轮强降雨导致8月停机避峰电站的 数量逐渐攀高,至8月18日达101座水电站。

表 1 2020年主要降雨分布情况

日期	范 围	最大日降 雨量/mm
6月15日—17日	阿坝、巴中、达州等16市(州) 35个水电站出现暴雨天气,其 中4站大暴雨。	144.3(西昌市)
6月25日—27日	广元、巴中、广安等 9 市 26 个 水电站出现暴雨天气,其中 3 站大暴雨。	153.6(古蔺县)
7月9日—10日	宜宾、达州、甘孜等11市(州) 19个水电站出现暴雨天气,其 中5个水电站大暴雨。	161.7(苍溪县)
7月14日—16日	阿坝、达州、甘孜等12市(州) 39个水电站出现暴雨天气,其 中8个水电站大暴雨。	174.0(邻水县)
7月23日—26日	阿坝、巴中、达州等 16 市(州) 42 个水电站出现暴雨天气,其 中 13 个水电站大暴雨。	163.9(盐亭县)
8月10日—13日	阿坝、成都、德阳等15市(州) 68个水电站出现暴雨天气,其 中26个水电站大暴雨,5个水 电站特大暴雨。	423.2(芦山县)
8月15日—18日	阿坝、巴中、成都等17市(州) 75个水电站出现暴雨天气,其 中40个水电站大暴雨,1个水	275.3(绵竹市)
8月22日—24日	电站付入泰时。 阿坝、甘孜、德阳等14个市(州) 29个水电站出现暴雨天气,其 中2个水电站大暴雨。	115.0(峨眉山市)
8月28日—31日	阿坝、雅安、成都等11市(州) 39个水电站出现暴雨天气,其 中12个水电站大暴雨。	242.1(大邑县)
っ 法様公左(H++ //T	

2.2 流域分布特征

2020年四川省年降水量及暴雨天气最大日降 水量分布如图 2 和图 3 所示。



从空间尺度上看,停机避峰主要发生在青衣江、 岷江、嘉陵江、涪江和大渡河流域,最大日停机避峰 装机容量超 1000 MW。雅砻江和金沙江流域的停 机数量较少;岷江上游、青衣江、大渡河支流(磨西 河、南桠河、尼日河)、嘉陵江干流及支流(白水河、 涪江)等流域,其上下游径流式电站呈流域性、规模 性的停机避峰状态。空间分布规律与 2020 年四川 省降水量分布和暴雨最大日降水量分布较为接近。





2.3 水电站特征

从易发生停机避峰的电站来看,主要存在以下 特征:

1)停机避峰为调节能力弱的水电站,多为日调节 或无调节能力电站;其无调蓄能力或调蓄能力差。

2)下游水头较低的水电站,如嘉陵江流域下游 设计水头为5~17 m,涨水后河道整体水位抬高或超 过正常尾水位,水头降低后不满足发电要求。

3)装机容量多小于400 MW,为小1型、中型水 电站;除东西关、凤仪、青居、上石盘、玉津等水电站, 大部分水电站有效库容量小,大多小于2×10⁶ m³。

4)正常蓄水位与死水位差值小于16m,大多为3~5m。

5)水电站栅差多为1~3 m。

2.4 停机避峰发生条件

分析清楚停机避峰的原因和分布特征后,可以 找出水电站采取停机避峰的条件,来预测区域内电 站是否会发生停机避峰,并研判停机避峰对电网的 影响。根据电站防洪度汛设计及实际运行停机避 峰经验,停机避峰发生条件大致可分为流量条件、 水质条件、上下游运行条件、山洪及地质灾害等其 他条件。

1)流量条件即停机避峰流量限值,当达到或超 过此限值,水电站将按照规程、防汛方案要求进行停 机避峰操作。流量限值主要由各水电站根据实际运行工程中河道来水避峰经验设定,或选用设计洪水流量值。四川电网统调水电站约77%的水电站有明确流量限值条件。可量化的流量限值是判断水电站是否采取停机避峰最直接和准确的方法。水电站停机避峰流量限值大多为长期运行经验值,较为稳定;但受河床严重冲淤等因素影响,该流量限值为一个动态值,随时间推移会做出调整。部分典型流域停机避峰流量范围见表2。有部分水电站会在流量达到限值时增加水质因素来共同判断。

2)由于水中漂浮物、含沙石等严重影响水电站 技术供水系统运行并造成转轮等过水部件磨蚀,所 以除大型水库外,其他水电站运行时均对水质提出 了要求。停机避峰的水质条件判断方式较多,分为 非数值类判断条件和数值类判断条件,主要有河道 水质差、水浑浊、漂浮物多以及拦污栅栅差(部分拦 污栅栅差要求见表 2)、水质浊度、机组技术供水系 统压力值、含沙量等。

表 2 部分典型流域停机避峰条件范围

序号	流域范围	停机避峰流量 范围/(m ³ ・s ⁻¹)	栅差范围/m
1	岷江干流上游	800~1500	1.0
2	嘉陵江干流下游	2700~8280	1.0
3	涪江干流上游	300~500	
4	涪江干流下游	900~3500	
5	青衣江干流下游	3500~4000	1.0~1.5
6	南桠河	100	
7	白水河	120~210	1.0
8	磨西河	50~200	

含沙量及水质浊度是可直接量化的水质指标。 但含沙量的数据采集需经专业水文站利用缆道分段 取样、烘干、称重测量,流程较长、速度慢、时效性差, 且多数水电站无专业水文站。水质浊度可直接由浊 度仪测量获取实时数据,如文献[6]采取一种基于 90°散射光测量原理的浊度仪,在映秀湾水电站建立 了泥沙浓度在线监测系统。该系统通过泥沙浓度与 浊度相关性率定后,可获得重复性好、准确度高、能 较好反映水域泥沙浓度的变化趋势,能及时反映监 测水域发电水体的泥沙变化情况,指导水电站发电和 停机避峰工作;但浊度仪测量前需建立与含沙量的对 应关系,且需经常保养维护以免测量数据误差过大。 拦污栅栅差也可作为间接判断水质的数值方式,但也 存在易受漂浮物等的影响,不能完整反映水质情况。

3)受区域强降雨影响,停机避峰还存在流域性, 即上游水电站出现停机避峰或冲沙、反冲等操作,能 间接反映水质情况还会直接影响河道水质,这时下游 水电站会同时进行停机避峰或冲沙操作。因此将上 游水电站停机避峰作为下游水电站停机避峰的一个 条件。同时也可利用流域核心水电站停机避峰情况 来判断其上下游水电站是否进行停机避峰操作。

4)各水电站具体环境不同,也会形成其他停机 避峰条件,如区间强降雨,周边泥石流、滑坡、河道淤 塞,尾水位异常升高等。水电站周边发生的山洪、泥 石流也易造成取水口、尾水淤塞,直接影响水电站安 全取水、用水。另外,水电站受灾导致长期停机不在 讨论范围。

3 大规模水电集群停机避峰管理系统

停机避峰是一种被动的防御措施,其发生时间 和持续时间不受人为控制,主要受降雨和来水影响。 而不同区域由于地形、河道、植被、冲沟、地面侵蚀程 度等因素不同,形成洪水流量、水位、含沙量、杂质含 量、历时都不同,造成的停机避峰范围和影响时间也 不同,给停机避峰的预测和管理带来较大挑战^[7]。

提前掌握四川地区水电站停机避峰及恢复开机 情况,做好预判、预测、预警,优化电力调度,加大水 能消纳。减少因停机避峰产生弃水是停机避峰调度 的主要目标。

为有效提升电网应急能力,加强短期停机避峰 管理,为极端天气下电网安全评估提供技术支撑,建 立了探索预测、跟踪和统计水电厂停机避峰清淤容 量机制,设计了大规模水电集群停机避峰管理系统, 实现对四川地区水电站停机避峰统一管理。

3.1 停机避峰预测方法

由于停机避峰受降雨及外部环境因素影响较 多,且最终由各水电站独自研判并执行停机避峰操 作,现阶段可行的预测方法是基于水电站自评估为 基础的多维校验预测方法。该方法收集水电站上报 未来三日预测停机避峰(或正常运行)状态以及平 均流量,将上报流量先与各水电站停机避峰流量限 值进行校核,再与上报的停机避峰(或正常运行)状 态进行校核,同时可通过同一河流上下游的水力联 系进行人工校核。

3.2 停机避峰实时监测

除预测外,当停机避峰发生时,快速准确地掌握 停机避峰影响的装机容量及其所在的流域和送出断 面,对判断系统电力平衡、及时优化电力调度、安排 备用容量有重要指导意义。

停机避峰实时监测根据停机避峰条件分析,主 要基于监测到的实时流量和水质。流量包括测流断 面流量、上游出库和区间流量、发电和出库反推流量。 水质包括浊度、含沙量、栅差等可量化指标以及水质 感官情况。此外降雨量的监测也可作用辅助依据。

目前,在实际工作中采用水电站实时停机避峰 状态填报辅以水电站出力、入库流量的方式实现快 速、综合判定停机避峰情况。

随着后期浊度、栅差等可量化、可获得数据源的 丰富,基于大数据的积累,各水电站针对水质的判断 指标将逐渐建立,有助于更加准确地指导停机避峰 和对应影响装机容量规模的判断。

3.3 停机避峰分级预警

考虑到停机避峰的不同容量规模和可能的影响 时长对电力系统的冲击也不同,结合电网、水电站防 汛应急管理需求,应考虑对大规模停机避峰按照流 域、送出断面对系统的影响及采取的措施进行分级、 分层预警。

3.4 管理系统基本构架

所设计的大规模水电集群停机避峰管理系统功 能如图 4 所示,包含实时监测、预测监测、统计分析、 评价考核、水电站基础信息。



图 4 系统功能

1)实时监测功能,其核心功能是在分析引起停 机避峰条件的基础上,对停机避峰后出力、水质、流 量参数的变化进行识别,并进行综合判定,避免错 报、漏报以及数据错误、遗漏等影响,该模块主要功 能如图5所示。通过建立四川地区各大流域水电站



四川电力技术



图 6 主要流域停机避峰实时监测

分布图(如图6所示),可直观显示停机避峰流域发 生情况,便于准确掌握停机避峰情况,实时监测日内 各时段停机避峰容量。

2) 预测监测功能, 采集水电站上报未来三日停 机避峰和流量预测情况。

3)统计分析功能,可根据网架结构和区域管理 需要,按主要输电断面和流域分别统计逐日停机避 峰容量;也可提供各水电站出力、流量、状态、预测、 开停机时间、流域断面等信息,为准确分析水电站停 机避峰提供数据。

4)评价考核功能,通过对比流量等综合研判结 果与水电站上报实际状态,分析上报的及时性和准 确性,督促各水电站按要求开展工作。

5)水电站基础信息,包括水电站运维管理单 位、所在流域、装机容量、设计洪水流量、停机避峰流 量、水质条件以及上下游停机避峰条件等信息。

4 结 论

四川省作为水电大省,水电装机容量达 80 GW, 水电站群水力电力联系密切。为减轻大规模水电站 停机避峰对电网的影响,在分析了四川地区水电站停 机避峰的主要原因及分布特征后,上面提出了停机避 峰监测与预测可行方法,并设计了大规模水电集群停 机避峰管理系统。在四川电网的实际应用表明,该系 统提高了电网调度机构对停机避峰情况实时掌控能 力,有力地保障了四川电网汛期安全稳定运行。

但受限于专用监测设备数量较少,缺乏对水质 等数据的获取和积累,停机避峰预测主要停留在流 量监测和人工判断阶段。此外,流量数据对水电站 人工填报的依赖性较高,其可靠性有待加强。加强 对降雨、流量、水质监测数据的获取与积累,建立更 精准的预测模型进一步提高停机避峰预警的准确性 和预见性,将是未来电网应对大规模停机避峰的研 究重点。

参考文献

- [1] 王亮, 苗树敏, 滕予非, 等. 基于运行数据的水电站
 MILP 模型最优代表水头选取方法[J].四川电力技
 术, 2020, 43(4):1-4.
- [2] 苗树敏,滕予非,罗彬,等.计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J].四川电力技术,2020, 43(2):1-6.
- [3] 毕华兴,朱金兆,张学培.晋西黄土区小流域场暴雨
 径流泥沙模型研究[J].北京林业大学学报,1998,
 20(6):14-19.
- [4] 王正成,毛海涛,申纪伟,等.长江上游主要支流水沙特 性及其影响因素分析[J].华东师范大学学报(自然科 学版),2020(1):126-138.
- [5] 解建军,龙建明.中国水轮机磨蚀研究及防护、治理技术的进展[J].中国农村水利水电,2007(6):137-139.
- [6] 唐明亮, 倪亮, 张文渊, 等. 浊度仪在映秀湾水电站 泥沙浓度监测中的应用[J].水力发电, 2017, 43(12): 71-75.
- [7] 杨丹,宋英华,洪志坤,等.洪涝灾害数据可视化预警系 统研究[J].中国安全科学学报,2016(5):158-163.

作者简介:

徐 涛(1987),男,硕士,工程师,从事水电运行管理工作;

杜成锐(1976),男,硕士,高级工程师,从事水电及新能源管理工作;

王金龙(1988),男,博士,高级工程师,从事水电运行管 理工作;

黄山松(1985),男,工程师,从事水库调度系统运维管理;

王丽莉(1977),女,硕士,高级工程师,从事新能源与分 布式电源调度管理工作;

王穹跃(1987),男,工程师,从事小水电及分布式电源 管理工作。

(收稿日期:2021-11-15)

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

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘 要:在建立以新能源为主体的新型电力系统背景下,为适应新型电力系统的发展需求,文中提出一种主配一体调 度控制系统建设方案。通过建立适应广域范围内分布式电源、可控负荷参与的调度控制系统架构,采用云端控制和 本地控制相结合的方法,把主网和配电网监视和控制功能有机结合,有效提升了源网荷储间的协调能力和清洁能源 的消纳水平。

关键词:源网荷储; 主配一体; 协同控制

中图分类号:TM 727 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0007-04 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220402

Research on Main Distribution Integrated Dispatching and Control System Based on Source-Grid-Load-Storage Interaction

HUANG Tianyi, LI Chenxin, LIU Yueling, LIU Dengwei, LI Jianhua, LIU Zhifan, HU Yue (Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Under the background of establishing a new power system with new energy as the main body, and in order to meet the development needs of new power system, a construction scheme of main distribution integrated dispatching and control system is proposed. By establishing a dispatching and control platform suitable for the participation of distributed generation and controllable load in a wide area, the method of combining cloud control and local control is adopted. The monitoring and control functions of the main power grid and distribution network are organically combined, which will effectively improve the coordination ability of source-grid-load-storage and the consumption level of clean energy.

Key words: source-grid-load-storage; main distribution integration; collaborative control

0 引 言

由"源随荷动"的调度模式,向源网荷储协同控 制模式转变,是构建新型电力系统的理论基础。随 着高比例分布式电源、柔性负荷、储能系统的接入, 传统无源配电网逐渐过渡到有源配电网,其功率优 化特性发生了变化。主网的功率优化计算需要计及 配电网的有功、无功功率支撑,配电网的功率优化也 需要主网提供支持,因此传统的主配网相对独立的 调度控制模式不再适用。为充分体现主配网的相互 作用,亟需开展主配一体调度控制系统,支撑主配网 广域范围内的源网荷储友好互动,从而实现新能源 的大规模消纳,助力"双碳"目标的实现。 目前,国内外学者对主配一体调度控制系统的 架构进行了大量的研究,文献[1]对传统地区调度 控制系统的架构及功能进行分析。文献[2-4]对分 布式电源接入的源网荷储优化控制方法及调度体系 进行概述。文献[5]对集中式、分布式和离散式等 不同的主配一体调控系统进行了介绍,并说明不同 模式的优劣势。文献[6]研究了一种平台和模型统 一的主配一体调控系统,其应用功能采用分布式和 一体式结合的方式,但未对应用功能的适用场景进 行分析。文献[7]研究了统一支撑平台的强耦合主 配一体调度控制系统,对于功能在云端与就地部署 的模式未进行详细分析。文献[8]提到了云端部署 的主配协同调度控制系统,但缺乏对于源网荷储互 动及场景的研究。 下面提出了考虑源网荷储友好互动的主配一体 调度控制系统建设方案。首先,介绍了两种常见的 主配一体调度控制系统建设模式,并说明其对源网 荷储接入的适用性;在此基础上,提出一种云端与就 地部署结合的主配一体调控系统技术架构,说明调 度生产系统相关应用的部署形态(云端或就地);最 后提出主配一体化系统的实施路径,分析主配一体 系统在源网荷储应用场景下的技术支撑作用。

1 主配一体运行模式

1.1 松耦合模式

松耦合模式是主配一体系统最常见的运行模式,主网和配电网采用相互独立的两套调度控制系统,服务器、存储等资源独立配置,基于各自的支撑平台完成主网和配电网的运行监视和状态管控。配电网系统采用 CIM/E/CIM/G 数据格式向主网系统转发图模信息,再由主网系统实现主配一体的全网模型拼接。主网系统通过前置服务器采集主网变电站、发电厂的量测及状态信息,配电网中压侧馈线及站房数据由配电网系统转发,配电网低压侧配电变压器及点表数据由用电采集主站转发。主网系统向配电网系统转发主网的端口阻抗、潮流等计算结果,对配电网解合环计算等分析应用提供支撑。基于主网系统转发出口电压、用户负荷功率等数据,准确计算配电网开关站、环网柜母线节点电压以及配电分支线路电流、功率分布,从而实现主配一体调控。

这种模式下,主配网系统之间存在图模、遥信、 遥测以及分析计算结果等大量数据的转发。在分布 式电源、可调负荷、电动汽车等源网荷储资源大规模 接入系统的情况下,基于主配网数据实现的分析校 核类应用存在较大的延时,难以支撑运行监视和自 动控制等实时性业务的需求。除此之外,系统间的 模型维护工作较复杂,为调度运行人员的日常操作 带来不便。

1.2 紧耦合模式

紧耦合模式下,主网和配电网应用功能建设在 同一个主站系统,硬件资源统一部署,主网和配电网 量测及状态数据均采用前置直采方式;主网与配电 网的模型数据、运行数据、分析计算数据均可在本地 数据库实现共享,调度运行人员基于同一个操作界 面完成日常调度任务。

紧耦合模式有分离式和集中式两种部署形态。 集中式主配网的实时监视、自动控制和分析校核采 用同一个全网模型,并作为同一个功能模块来实现, 主配一体调度达到了高度统一,主网和配电网的业 务完全融合。分离式模式下主配网实时监视、自动 控制和分析校核相对独立,主配网数据独立采集,一 方面通过模型拼接技术完成电网全模型的监理;另 一方面通过功能模块的分析计算数据交互,实现主 配一体化调度。

集中式应用模式适用于规模较小、量测及运行 数据较少、分析计算难度小的电力系统。在大规模 的源网荷储资源纳入调控范围后,遥测、遥信呈现数 量级的增长趋势,集中式模式调控系统的实时数据 处理能力面临极大的挑战,分析计算工作大幅度增 加。分离式应用模式很好地解决了集中式主配一体 调度控制系统实时性能低、吞吐能力不足、可扩展性 差的问题,对于分布式电源、可控负荷等源网荷储资 源规模庞大、数据海量、自动化程度高的系统具有很 好的适应性。因此,所提到的紧耦合模式均采用分 离式应用部署的方式。

目前,主配一体均在地区范围内实现,同级调度 之间的联系较薄弱,上下级调度机构也缺乏协同调 度手段,不利于广域范围内源网荷储友好互动,难以 实现全省范围内的新能源大规模消纳。

2 云端与就地结合的主配一体系统建 设方案

下面提出云端与就地结合的主配一体系统建设 方案,在地调采用紧耦合运行模式,就地部署实时监 控、自动控制、网络分析等实时性要求高的主配一体 化应用,省调云端部署检修计划、运行评估、调度管 理等实时性要求较低的省地配一体化应用。

省调搭建电网全景模型,准确地计及省级电网 和地级电网的源网荷储资源的相互影响,可有效提 高分析决策的准确性,有利于在广域范围内实现源 网荷储友好互动。

2.1 技术架构

云端与就地结合的主配一体化系统架构如图 1 所示。地调本地基于统一支撑平台,在确保主配电 网模型、图形、数据一体化的基础上降低主配应用之 间的耦合度,保证主配网整体模型完整、不重复、边 界不泄露。结合云端功能建设,实现省、地、配电网 之间的信息安全交互桥梁,实现信息融合与共享,解 决主配网监控信息孤立、模型数据冗余、业务无法协 同等问题。



图 1 主配一体调控系统架构

本地的主网采集实现对主网范围内的稳态、动态、暂态数据以及非电量数据、保护数据和烟气、气象等数据的采集与处理。主网监控实现对主电网一、二次设备全面监视,融合各类分析计算结果,向全系统自动推送系统级故障告警及处置策略,协同全网多级调度联合开展故障处置。主网分析主要包括模型验证、状态估计、潮流计算、灵敏度分析、可用输电能力分析、安全约束调度、无功电压优化、静态安全分析、短路电流计算、短路比分析、负荷聚合及可调节能力评估等功能。主网自动控制通过全局优化分析结果闭环控制,实现对电网频率、电压和潮流的优化自动控制。

本地的配电网采集实现对配电网范围内的馈线

段、母线、断路器的一、二次设备等数据的采集与处 理。配电网监控实现对配电网的状态监视、远方控 制防误闭锁、拓扑着色、操作票等功能。配电网分析 实现配电网状态估计、潮流计算、解合环分析、负荷 转供分析、供电风险分析、网络重构及保供电分析。 配电网故障处置实现馈线自动化、单相接地故障分 析、配电网故障智能告警及配电网仿真测试。

在省调云端部署检修计划和培训仿真主配一体 化应用功能,检修计划可实现主配一体的检修计划 校核、方式安排以及检修时间窗调整等功能。培训 仿真可实现多级电网调控运行人员开展电网协同监 视、跨区故障协同处置、多级调度故障预案联合执 行、源网荷优化协调、省地负荷协同控制、新能源跨 区消纳等仿真模拟。

2.2 主配一体化系统的实施路径

在地调本地,主网应用和配电网应用基于同一 的数据库和支撑平台进行快速和大量的主配网数据 交互,并结合省调云端部署的检修计划数据,实现主 配一体化监视、一体化分析以及一体化控制。

如图 2 所示,主网监视模块向配电网监视应用 发送主网量测及事故信号,配电网监视依据主配一 体的电网拓扑分析和主配一体方式计划运行数据, 实现主配一体的供电范围、供电路径以及线路合环 着色。配电网分析依据实时运行数据,进行主配一 体转供路径分析,对存在负荷失电风险的母线及相 关路线发出警告,同时提供一体化调控策略和分析



图 2 主配一体调控系统数据流

结果,并将命令传输至故障处置应用执行。配电网 故障处置应用利用主配一体的潮流计算和负荷转供 功能,自动分析设备故障后的故障诊断分析结果,并 提供停电恢复方案,实现输配协同的故障预案在线 编制、预演校核、事件匹配推送和断路器操作序列的 一键控制。

主网分析依据配电网量测、转供策略、事故信息 以及云端检修计划的相关数据,实现主配一体的潮 流计算、灵敏度分析、可用输电能力分析、安全约束 调度,为充分考虑配电网源网荷储对主网调度运行 决策的影响。主网自动控制基于馈线控制、分布式 电源控制等数据,并获取实时断面限额、灵敏度、优 化信息和越线调整信息计算常规机组发电和电压控 制目标,并优化新能源有功功率自动控制目标和网 源荷储有功功率协同控目标。

省调云端部署的检修计划应用,通过主网检修数 据以及自动发电控制系统(automatic generation control, AGC)控制目标等计算配电网设备停电及供电电源 电变化的分析校核结果,并依据配电网检修计划结 果计算主网设备过载的分析校核结果。基于主配网 一体化负荷转供,自动生成检修设备的转供方案,并 考虑制定时间段的主配网多个检修计划的互斥、重 复停电等影响,结合主配一体的网络分析,优化主配 网检修时间安排。实现与调度管理、供电服务指挥 等业务贯通,向营销等专业推送计划停电、运行风险 和实时停电等信息。

省调云端部署的培训仿真应用基于主配一体的 潮流计算、仿真过程控制和教案制作,实现主网设备 故障情况下主配网告警信号、失电范围、负荷转移和 配电网自动化的协同仿真,支撑主配人员的培训演 练,实现省、地、配一体化的多级、多用户联合仿真, 满足多点、多场景联合仿真的需求。

3 源网荷储互动的应用场景研究

所提出的主配一体系统架构可基于省调云端部 署的大数据和聚类分析等高级应用,全面感知分布 式电源、储能、电动汽车等可调节负荷的时空特性、 响应特性,对重要用户完整供电路径进行识别,分析 各电压等级电源点冗余程度,评估供电可靠性及风 险,从而构建源网荷储协同互动的支撑功能,其应用 场景如图 3 所示。

利用省调云端部署的源网荷储有功协同控制应 用,获取省调现货市场系统中电力市场、电网调峰、 内部断面过载等控制需求,通过全网内风光水、储能 和可调节负荷等新型调节资源的有功功率控制,实 现电网频率和内部断面的安全稳定运行以及市场出 清结果的顺利执行。再基于主配一体 AGC 控制目 标和主配网检修数据计算源网荷储的调节策略和调 节计划,并将这些优化控制目标下发至各个地调控 制系统。根据系统运行需求、电力市场交易品种及 通信资源,制定不同时间尺度上的控制目标,可涵盖 超短期(未来5 min 至多个小时,5 min 颗粒度)、短期 (未来1~8 天,15 min 颗粒度)和中长期(未来1月 至1年,1h 颗粒度)。

地调主网应用根据云端数据进行负荷辅助决策 分析并由负荷控制实现地方电厂、电源侧储能、工业 大用户等可调容量调节策略的下发,与配电网应用模 块交互可调资源控制策略等信息。结合配电网应用 提供的源网荷储各类聚合资源,根据电网当前及未来 运行状态,对电网运行方式进行优化,并将计算出来 的策略下发给配电网应用,由配电网应用进行控制。



图 3 源网荷储互动应用场景

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

(云南电网有限责任公司昆明供电局,云南 昆明 650200)

摘 要:为有效抑制局部放电(PD)信号中周期性窄带干扰,文中提出短时傅里叶变换和矩阵束相结合的局部放电窄 带干扰抑制方法。该方法利用短时傅里叶变换分析染嗓 PD 信号,得到窄带干扰数目,同时分离出染嗓 PD 信号中信 号帧和噪声帧;采用矩阵束算法在噪声帧中对窄带干扰参数进行估计,重构出全时段的窄带干扰,实现局部放电的窄 带干扰抑制。仿真及实测染嗓 PD 信号的去噪效果表明,与传统的傅里叶级数法和局部能量比法相比,所提方法去嗓 后的残余噪声更小,对染嗓 PD 信号中窄带干扰有很好的抑制效果。

关键词:局部放电;周期性窄带干扰;短时傅里叶变换;矩阵束

中图分类号:TM 935 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0011-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220403

Narrowband Interference Suppression of Partial Discharge Based on Short-time Fourier Transform

ZHOU Tao, WAN Ziyi, DUAN Yongsheng, WU Chenyang, QIAN Qi

(Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunan, China)

Abstract: In order to effectively suppress the periodic narrowband interference in partial discharge (PD) signal, a method combining short-time Fourier transform and matrix pencil is proposed. The short-time Fourier transform algorithm is used to analyze the noisy PD signal, and to obtain the number of narrowband interference and separate noise frame and signal frame from noisy PD signal. The matrix pencil algorithm is used to estimate the narrowband interference parameters in the noise frame, and to reconstruct the narrowband interference of the entire period and suppress the narrowband interference in partial discharge. The denoising results of the simulated and measured noisy PD signals show that compared with the traditional Fourier series method and local energy ratio method, the proposed method can get the smaller residual noise and produce a good effect of narrowband interference suppression.

Key words: partial discharge; periodic narrowband interference; short-time Fourier transform; matrix pencil

0 引 言

局部放电(partial discharge, PD)是监测电力电 缆绝缘老化状态的有效手段之一^[1-2],但是实际的 PD 信号能量极其微弱,容易被白噪声、窄带干扰和 脉冲性干扰所污染;其中窄带干扰有着能量强、数量 多和持续时间长的特点,会严重污染 PD 信号,使得 PD 信号难以识别,因此国内外学者针对 PD 信号的 窄带干扰抑制技术开展了大量研究工作^[3]。

文献[4-5]采用傅里叶变换在频域中抑制窄带 干扰,该方法可以有效提高 PD 信号的信噪比,但是 实际该方法的窄带干扰抑制效果会受到频谱泄露效 应的限制。文献[6-7]提出利用小波分解方法来抑 制 PD 信号中窄带干扰;小波分解方法拥有优异的 时频局部化能力,可以清晰地分离出 PD 信号和窄 带干扰,但是该方法中小波基函数、分解层数和小波 阈值等参数难以选择,窄带干扰抑制效果受人为因 素影响较大。文献[8-9]提出将经验模态分解方法 应用于窄带干扰抑制中;该方法可以根据信号的特 征自适应地选取分解的基函数,窄带干扰抑制效果 更好,但是该方法存在的模态混叠现象会使算法的 稳定性和准确性受到影响。文献[10-11]提出了基 于奇异值分解的窄带干扰抑制方法:该方法可以自 针对上述局部放电窄带干扰抑制方法存在的问题,提出了一种基于短时傅里叶变换和矩阵束的局部放电窄带干扰抑制方法。该方法首先对染噪 PD 信号做短时傅里叶变换,并将时间-频率-幅值信息 绘制成图谱,得到短时傅里叶变换的模矩阵(short-time fourier transform modular matrix,STFTMM)。在 STFTMM 中借助 PD 信号和窄带干扰信号不同的时频特征,确定窄带干扰个数并分离出染噪 PD 信号中的噪声帧得到窄带干扰参数的估计值;最 后,通过重构全时段的窄带干扰信号实现干扰抑制。

1 技术原理

1.1 STFTMM

傅里叶变换算法可以将信号从时域转换到频域 开展分析,但该方法只能对全时段开展分析,无法得 到信号的时频信息,因此短时傅里叶变换算法^[12]应 运而生。

定义一个具有一定时间宽度的窗函数 w(t),使 该窗函数顺着时间轴平移,截取对应信号 y(t)的时 间片段开展傅里叶变换,以此得到 y(t)的短时傅里 叶变换为

$$S_{\rm F}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi/\tau} d\tau \qquad (1)$$

式中: τ 、t为时间;f为频率; $S_{\rm F}(t, f)$ 为时刻t的频谱。

考虑实际局部放电信号为离散信号,因此需要 研究短时傅里叶变换的离散形式。令 y(t)的离散 形式为 y(k),k=0,1,...,N-1。N 为 y(k)的采样点总 数。进而得到 y(k)的离散短时傅里叶变换结果为

$$S_{\rm F}(t,f) \Big|_{t=mT,f=\frac{n}{NT}} = S_{\rm F}(m,n) = \sum_{k=0}^{N-1} y(kT) w(kT - mT) e^{-j2nk\pi/N}$$
(2)

式中:T 为采样周期;m 和 n 分别为时间和频率的离 散点,为了便于观察,通过将 n 取小数的方式进行了 频域谱细化;S_F(m,n)为二维复数矩阵,行变量为时 间,列变量为频率,矩阵元素包含了各时刻和各频率 的幅值相位信息。

进一步得到 $S_{\rm F}(m,n)$ 的 STFTMM 为

$$S_{\rm Fa}(m,n) = \left| S_{\rm F}(m,n) \right| \tag{3}$$

1.2 矩阵束算法

矩阵束算法通过矩阵的分解和变换求解指数型 函数的参数^[13],将其引入用于窄带干扰参数估计, 其具体计算步骤如下:

1)利用 y(k)构造对应的时延矩阵 Y_{\circ}

	• •	• •	• •		• •	
	:	:	:		:	
<i>Y</i> =	y_2	y_3	${\mathcal Y}_4$	•••	y_{L+1}	(4)
	${\mathcal{Y}}_1$	y_2	y_3	•••	\mathcal{Y}_L	
	y_0	y_1	y_2	•••	y_{L-1}	

式中:L为列长度,通常选为 N/4~N/3。

2)对Y开展奇异值分解。

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{V} \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}$$
(5)

式中:S 和 D分别为左正交矩阵和右正交矩阵;V为 奇异值对角阵,其对角元素 δ_i 被称为Y的奇异值,并 会呈现由大到小的排列。

3)p 个窄带干扰的能量会集中于前 2p 个δ_i中, 因此取 V 中前 2p 列为 V₂,取 D 的前 2p 个右奇异向 量构成矩阵 D₂,以此得到窄带干扰能量集中矩阵 Y₂。

$$\boldsymbol{Y}_2 = \boldsymbol{S} \boldsymbol{V}_2 \boldsymbol{D}_2^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

4)根据 Y₂ 构造具有时延关系的矩阵 Y₃ 和 Y₄,
 其中 Y₃ 为 Y₂ 去掉矩阵最后 1 行, Y₄ 为 Y₂ 去掉矩阵
 第 1 行,求解矩阵束 Y₄-λY₃ 的广义特征矩阵 G₀

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{Y}_3^* \boldsymbol{Y}_4 \tag{7}$$

式中: Y_3^+ 为 Y_3 的伪逆矩阵。G存在 2p个特征值为 λ_i 。

5)根据式(8)通过最小二乘法求解参数 C_i。

$\begin{bmatrix} y(0) \end{bmatrix}$		1	1	•••	1	$\begin{bmatrix} C_1 \end{bmatrix}$	
y(1)		$\boldsymbol{\lambda}_{1}$	λ_2	•••	λ_{2p}	<i>C</i> ₂	
:	=	÷	÷		:	:	
$\left\lfloor y(N-1) \right\rfloor$		λ_1^{N-1}	λ_2^{N-1}	•••	λ_{2p}^{N-1}	$\begin{bmatrix} C_{2p} \end{bmatrix}$	
							(8

6)确定估计的窄带干扰幅值 \tilde{B}_i 、频率 \tilde{f}_i 和相 \hat{U} $\tilde{\theta}_i$ 。

$$\tilde{B}_i = 2 \left| C_i \right| \tag{9}$$

$$\tilde{f}_{i} = \frac{1}{2\pi T} \operatorname{angle}(\lambda_{i})$$
(10)

$$\tilde{\theta}_i = \operatorname{angle}(B_i)$$
 (11)

式中,angle()为对复数求相角。

1.3 窄带干扰抑制流程

1)利用短时傅里叶变换算法生成染噪 PD 信号 的 STFTMM,在 STFTMM 中 PD 信号的频率能量分 布宽且时间范围有限;窄带干扰的频率能量分布集 中且时间范围长。

2)利用上述窄带干扰和 PD 信号不同的时频特 征确定信号帧和噪声帧,同时确定窄带干扰数目 p。

3)在噪声帧中利用矩阵束算法确定窄带干扰 参数,利用该参数重构全时段的窄带干扰信号,最后 通过和染噪 PD 信号进行时域相减得到干扰抑制后 的 PD 信号。

仿真测试 2

2.1 PD 信号与窄带干扰

由于实际的 PD 信号通常呈现衰减振荡的趋 势,因此选用了如式(12)所示的单指数衰减模型和 如式(13)所示的双指数衰减模型开展仿真测试^[11]。

$$s_1(t) = A e^{-t/\tau} \sin(2\pi f_s t)$$
 (12)

 $s_2(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau})\sin(2\pi f_s t)$ (13)式中:A为PD幅值:f,为PD振荡频率。

这里共构建4组PD脉冲,脉冲1和脉冲2由 式(12)构成,脉冲3和脉冲4由式(13)构成;A分 别为7 mV、7 mV、28 mV、28 mV;t 分别为 0.8 μs、 1.2 μs \0.8 μs \1.2 μs; f. 分别为 3 MHz \2 MHz \2 MHz \2 MHz \ 3 MHz。仿真的采样频率为 20 MHz,时间总长为 90 µs,即采样点总数为1800,得到原始的 PD 脉 冲波形如图 1(a) 所示。在原始的 PD 脉冲波形 中叠加窄带干扰信号,窄带干扰信号可由式(14) 所示的正弦信号产生。

$$z(t) = \sum_{i=1}^{p} B_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \qquad (14)$$

式中:B_i为窄带干扰幅值;f_i为窄带干扰振荡频 率:θ,为初始相位。

文中 p 设置为 4, B_i 分别设置为 1.2 mV、1.2 mV、 2.2 mV、2.2 mV; f; 分别设置为 1.03 MHz、2.10 MHz、 3.14 MHz、6.30 MHz;θ;分别设置为 π/2 rad、π/3 rad、 $\pi/4$ rad、 $\pi/6$ rad。以此得到染噪 PD 信号的波形如 图 1(b) 所示, 从图 1(b) 中可以看出 PD 信号几乎完 全淹没在窄带干扰中,难以进行识别。

2.2 窄带干扰抑制

STFTMM 可以有效反应出染噪 PD 信号的时

频能量分布特征,为了保证合理的时频分辨率,将 w(t)选为汉宁(Hanning)窗^[14],窗口长度设置为 128.以此得到图 1(b) 中染噪 PD 信号的 STFTMM 如图 2 所示。从图 2 中可以清晰看出 PD 信号和窄 带干扰的时频特征,其中 PD 信号的频率能量分布 宽且时间范围有限:窄带干扰的频率能量分布集中 且时间范围长,利用上述时频分布特征可以提取出窄 带干扰数并区分染噪 PD 信号中的噪声帧和信号帧。



图 1 叠加窄带干扰前后的 PD 信号

根据图 2 中染噪 PD 信号的 STFTMM 可以确定 窄带干扰数为4.然后利用矩阵束算法对染噪 PD 信 号某一噪声帧内数据进行窄带干扰参数估计(文中 对噪声帧 2 内数据进行窄带干扰参数估计),得到 窄带干扰参数估计结果如表 1 所示。值得说明的 是,表1中窄带干扰参数估计值为噪声帧2内数据 的窄带干扰参数值。因为噪声帧 2 的起始时间和整 个染噪 PD 信号的初始时间存在时间差,所以估计 得到窄带干扰相位和整个染噪 PD 信号中窄带干扰 相位会存在相位差:同时矩阵束算法估计得到为余 弦函数下的相位,而非正弦函数下的相位;上述两者 共同造成了表 1 中 $\tilde{\theta}_i$ 和 θ_i 的差异。以此得到重构 全时段的窄带干扰信号 $\tilde{z}(t)$ 为

$$\tilde{z}(t) = \sum_{i=1}^{p} \tilde{B}_{i} \cos\left[2\pi \tilde{f}_{i}(t-t_{0}) + \tilde{\theta}_{i}\right] \quad (15)$$

式中,t₀为噪声帧2的初始时间。

利用式(15)重构全时段的窄带干扰信号,进而 得到干扰抑制后的 PD 信号如图 3 所示,同时对干 扰抑制后的 PD 信号进行短时傅里叶变换,得到其 STFTMM 如图 4 所示。从图 3 和图 4 中可以清晰看 出,所提方法可以精准重构窄带干扰,以达到抑制染 噪 PD 信号中窄带干扰的目的,并且 PD 波形的还原 度较高。



(b) 窄带干扰抑制前后的波形对比

图 3 所提方法的窄带干扰抑制结果

参数	干扰 1	干扰 2	干扰 3	干扰 4
$\tilde{B}_{\rm i}/{ m mV}$	2.200 0	2.200 0	1.200 0	1.200 0
$\tilde{f}_{\rm i}/{ m MHz}$	6.300 0	3.140 0	2.100 0	1.030 0
$\tilde{\theta}_{\rm i}/{\rm rad}$	0.115 2	-1.143 5	1.958 3	-0.637 7





为了进一步说明所提方法的优越性,利用傅里 叶级数法^[15]和局部能量比法^[16]对图1(b)中染噪 PD信号进行窄带干扰抑制,得到窄带干扰抑制结果 如图5所示。从图5中可以清晰地看出,传统的傅 里叶级数法和局部能量比法的窄带干扰抑制结果中 存在较大的残余噪声,PD波形的还原度较差。而所 提方法不存在上述问题,得到的PD波形更利于后 续波形特征分析。



3 应用案例

为了证实所提方法的实际使用效果,对实验 室中10 kV 交联聚乙烯电缆开展工频局部放电测 试,电缆中预制有终端刀痕缺陷。局部放电采集 传感器选用高频电流传感器,采集局部放电时将 高频电流传感器扣在电缆的接地线上,采集频率 设置为100 MHz,采样时长设置为40 s,即采样点总 数为4000。由于实验室中采集的 PD 信号噪声较 小,人为向采集的 PD 信号中添加幅值为2 mV,频 率为 2.00 MHz、4.00 MHz、16.00 MHz、6.31 MHz,相 位为 $\pi/3$ rad、 $\pi/4$ rad、 $\pi/2$ rad 以及幅值为4 mV、频 率为 9.32 MHz 和 12.00 MHz、相位为 $\pi/6$ rad 和 $\pi/3$ rad 的多组窄带干扰,得到实测带有窄带干扰 信号的 PD 信号如图 6 所示,可以看出此时窄带干 扰已经完全淹没了 PD 信号。





利用短时傅里叶变换得到图 6 中染噪 PD 信号 的 STFTMM 如图 7 所示,由于实测的染噪 PD 信号 中窄带干扰呈现数目多且频率分布密集的特点,此 处将短时傅里叶变换的窗口长度设置为 256,以提 高频率分辨率。从图 7 中可以确定窄带干扰的数目 为 5,同时可以确定信号帧和噪声帧,利用矩阵束算 法在噪声帧 2 中估计窄带干扰参数,得到参数估计 结果如表 2 所示,进而重构出全时段窄带干扰,得到 去噪结果如图 8(a)所示。为了对比,采用传统的傅 里叶级数法和局部能量比法对图 6 中染噪 PD 信号 进行了窄带干扰抑制,得到抑制结果如图 8(b)和图 8(c)所示。从图 8 的对比结果中可以看出,相比于

参数	干扰 1	干扰 2	干扰 3	干扰 4	干扰 5
$\tilde{B}_{\rm i}/{ m mV}$	4.005 1	4.014 1	1.993 5	2.001 1	2.004 0
$\tilde{f}_{\rm i}/{\rm MHz}$	11.999 9	9.320 0	6.309 0	4.160 1	2.000 0
$\tilde{\theta}_{\rm i}/{ m rad}$	-1.272 2	-1.381 4	-1.525 0	2.218 8	-0.642 7

表 2 实测 PD 信号的窄带干扰参数估计结果





传统算法,所提方法的窄带干扰抑制效果更好,去噪 后波形的残余噪声更小。

由于仅仅是利用短时傅里叶变换确定窄带干扰 个数和噪声帧的时间段,而不需要用短时傅里叶变 换估计窄带干扰相关参数,所以短时傅里叶变换中 频率分辨率的影响有限。在实际应用所提方法时, 可以多次选取不同长度的窗长来分析染噪 PD 信 号,当能较为清晰地确定窄带干扰数目和噪声帧的 时间段即可。

4 结 论

1)将短时傅里叶变换用于局部放电的窄带干 扰抑制中,短时傅里叶变换可以有效提取出窄带干 扰数目和确定染噪 PD 信号中信号帧和噪声帧。

2)矩阵束算法可以精确估计噪声帧中窄带干扰参数,从而重构全时段的窄带干扰,实现染噪 PD 信号的窄带干扰抑制。

3) 仿真和实测结果表明,相比于传统的傅里叶 级数法和局部能量比法,所提方法对染噪 PD 信号 的窄带干扰抑制效果更好,残余噪声更少。

(下转第31页)

单信号驱动的固态脉冲源

罗雨 \hat{m}^1 ,郑 静¹,杨 鸽¹,李恩 \hat{n}^2

(1.四川水利职业技术学院,四川成都 611231;2.国网四川省电力公司攀枝花供电公司,

四川 攀枝花 617000)

摘 要:随着脉冲功率电源在材料表面改性、污水处理以及生物医学等方面的广泛应用,脉冲功率电源正在朝着小型 化、驱动简单及稳定的方向发展。目前,由于固态脉冲电源信号需要进行高压隔离,造成系统复杂且体积庞大。为了 降低系统的质量和体积,文中提出了一种单信号驱动的固态脉冲源的拓扑结构,通过一个信号控制第一级开关的导 通和关断,经主电容对剩余开关的门极电容充电后自行触发余下开关。最后,基于该拓扑结构在通用电路分析 (PSPICE)中仿真了10级单信号驱动的固态脉冲源电路,结果表明该新型电路拓扑直流充电源工作在800 V,系统输 出幅值约为8 kV,脉宽约为200~800 ns 的脉冲电压,对于生物医学应用、肿瘤消融以及污水处理有重大意义。

关键词:固态脉冲电源;单信号驱动;固态开关;脉冲功率

中图分类号:TN 782 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0016-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220404

Solid-state Pulsed Generator Driven by Single Signal

LUO Yuhang¹, ZHENG Jing¹, YANG Ge¹, LI Encheng²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, Sichuan, China; 2. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: With the wide application of pulsed power supply in material surface modification, sewage treatment and biomedicine, pulsed power supply is developing towards miniaturization, simple driving and stability. At present, since the solid-state pulse power signal needs to be isolated at high voltage, the system is complicated and bulky. In order to reduce the weight and volume of the system, a topology of a single-signal-driven solid-state pulsed generator is proposed. The turn-on and turn-off of the first-stage switch is controlled by a signal, and the gate capacitance of the remaining switches is charged through the main capacitor, and then the remaining switches are triggered themselves. Finally, based on this topology, a 10-level single-signal-driven solid-state pulsed generator circuit is simulated in PSPICE. The results show that the DC charging source of the new circuit topology works at 800 V, the system output amplitude is about 8 kV, and the pulse width is about 200~800 ns pulsed voltage, which is of great significance for biomedical applications, tumor ablation and sewage treatment.

Key words: solid-state pulsed generator; single-signal-driven; solid-state switch; pulse power

0 引 言

固态脉冲源是一种储能装置,可以实现脉冲压 缩和电压放大的功能,被广泛应用于国防^[1]、电力 装备^[2]、绝缘材料^[3]、等离子体放电^[4]、生物医学工 程^[5]等领域,特别是在生物工程领域,脉冲电场引 起的电穿孔效应^[6-8]已广泛应用于肿瘤消融^[9]、消 毒杀菌^[10]等领域。传统脉冲电源是基于火花隙开 关^[11],可输出兆瓦级功率,主要应用于国防军工领 域。但由于火花隙开关具有重复频率低、寿命短、效 率低、体积大等缺点,造成系统庞大,较少应用于民 用领域。随着电力电子技术的发展,电力电子开关 的应用促进小型脉冲电源的发展,同时全控性固态 开关可使脉冲电源输出的脉冲参数任意可调^[12-15], 大幅提升输出效率且操作简单。传统的固态脉冲电 源通常采用高压磁隔离驱动技术^[16],该技术可将驱 动信号和功率部分进行隔离,避免脉冲电源在放电 时冲击驱动电路。但高压磁隔离驱动需要较多的磁 芯来完成多路隔离信号驱动,加大了系统的体积和 质量,同时驱动电路复杂且不稳定。而采用光纤提 供隔离同步信号的驱动方案隔离电压高,同步性更 好,但是成本也较高,且需提供多路隔离的驱动供电 电源。因此,驱动稳定且结构简单的高压脉冲发生 器将使得结构更加紧凑,节约成本。文献[17]提出 一种可靠的功率 MOSFET 堆叠方法,控制一个 MOSFET,通过特定的电路结构使得后续 MOSFET 自动开通和关断。这种方法可以使高压脉冲发生器 的驱动更为简单,减少了体积和质量。但受驱动电 路、控制型号、半导体开关差异等因素的影响,不同 步的半导体开关的开通,容易引起过压击穿^[18]。通 常需要添加有源钳位电路或 RCD 缓冲电路。传统的 有源钳位电路反馈时间较长,文献[19]采用了一种高 速的反馈电路,将钳位动作时间缩短到 30 ns,从而减 少过压尖峰。

目前的串联半导体开关技术,由于开通关断不同步,在有源区工作时长不一致。文献[20]提出了一种自触发高频纳秒发生器,其主电路结构采取 Marx 电路,在远离电源一级提供一路信号驱动开关 的导通状态,其余开关通过主电容对开关门极电容 充电自行触发导通,驱动电路简单且无需磁芯隔离, 大大缩减电源的体积和质量。因此,在此基础上提 出了一种单信号驱动的固态脉冲电源的拓扑结构, 该结构只需要一路信号驱动第一级固态开关,其余 开关通过主电容的充电分压自行进行导通,系统即 可实现对负载释放脉冲高压。该结构无需磁芯隔离 驱动,除第一级开关外其余开关均不需单独的驱动 电路,大大缩减了系统的体积和质量,节约成本。

1 单信号驱动的固态脉冲源工作原理

图 1 为单信号驱动的固态脉冲源的拓扑结构, 以 3 级为例,每一级包含一个主电容,2 个充电电阻 和一个 MOSFET 开关。直流电源 DC 通过充电电阻 对各级主电容进行并联充电。当各级主电容达到额 定电压时,触发开关 Q1 导通,电容 C1 经过 Q1— Ctr1—Ciss1—C1 回路对开关 Q2 的门极电容 Ciss1 进行充电。当电容 Ciss1 两端电压达到开关 Q2 的 阈值电压时,开关 Q2 自行触发导通。同理,后级开 关依次导通。当全部开关均可靠导通后,各级主电 容 C1、C2、C3 串联对负载放电。此时,如果提供关 断信号使第一级开关 Q1 切换到关断状态,各级主 电容依然处于充电状态;而第二级开关 Q2 的门极 电容 Ciss1 无法形成充电回路,电容 Ciss1 停止充电 且通过 Ciss1—Ctr1—R2 回路对电阻 R2 释放电能。 当 Ciss1 两端电压降到阈值电压以下无法维持开关 Q2 导通,开关 Q2 自行关断。同理,后级开关逐级 关断。当各级开关均关断时,系统处于截止状态,电 源将不再对负载放电。



图 1 单信号触发的固态脉冲源

1.1 充电模型

图 2 为单信号驱动的固态脉冲源的主电容充电 回路示意图,直流电源 DC 经过充电电阻对各级主 电容进行并联充电,充电电阻可防止在系统放电时 脉冲高压冲击直流电源,同时也可在放电时起到隔 离作用。但由于充电电阻的存在限制了充电电流的 大小,也限制了各级主电容的充电速度。通过设置 直流电源 DC 的充电电压可改变各级主电容两端的 电压,进而可输出不同幅值的脉冲高压。



图 2 单信号的固态脉冲源的主电容充电回路

图 3 为单信号驱动的固态脉冲源的单信号导通 回路的示意图。当导通信号触发开关 Q1 开通时,由 于主电容 C1 电容值远大于开关 Q2 门级电容 Ciss1 的电容值,此时电容 C1 会充当直流电源对电容 Ciss1 进行充电,充电回路为 C1—Q1—Ctr1—Ciss1—C1,如 图 3(a) 红色实线所示。与此同时,电容 C1 经过 C1—Q1—R1 对电阻 R1 放电,但该回路与 Ciss1 充 电回路是并联关系,两个回路独立并不会互相影响。 当 Ciss1 两端电压达到开关 Q2 的阈值电压时,开关 Q2 自行导通。同理,开关 Q2 导通后,主电容 C1 和 C2 串联等效为直流电源对 Ciss2 进行充电,Ciss2 两 端电压达到开关 Q3 的阈值电压时,开关 Q3 自行导 通。充电回路如图 3(b)红色实线所示,充电路径为 C1—Q1—Ctr2—Ciss2—C2。同理,电容 C1 和 C2 并 联也会对电阻 R4 放电,但该回路与电容 Ciss2 充电 回路为并联关系,二者互相独立。当开关 Q1、Q2、Q3 均触发导通时,系统会进入放电状态,此时可通过测 试是否有输出电压来确定各级开关是否完全导通。



图 3 单信号的固态脉冲源的单信号导通回路

1.2 放电模型

图 4 为单信号驱动的固态脉冲源的放电回路示 意图。当各级开关全部导通时,系统进入放电状态, 主电容 C1、C2、C3 将会串联对负载放电,实现电压 的叠加。通过改变 DC 直流电源的充电电压可改变 系统输出脉冲电压的幅值,通过调节开关 Q1 的导 通信号脉宽,可使系统输出不同脉宽的脉冲电压。

图 5 为单信号驱动的固态脉冲源的第二级单信 号关断回路示意图。提供信号触发开关 Q1 关断 时,门极电容 Ciss1 和 Ciss2 都将停止充电,同时门 极电容 Ciss1 和 Ciss2 都将分别对电阻 R2 和 R4 进 行能量泄放,放电回路如图中绿色实线所示。当门 极电容 Ciss1 和 Ciss2 两端电压低于开关阈值时,开 关 Q2 和 Q3 断开,系统进入截止状态。根据一阶电 路的零输入响应原理,电阻 R2 和电阻 R4 的阻值决 定了开关 Q2 和开关 Q3 的下降沿,阻值越大其下降 沿越慢。但对系统输出脉冲的下降沿几乎没有影 响,这是由于开关 Q1 一旦断开,整个系统对负载的 放电回路就处于开路状态。因此系统输出脉冲的下降沿取决于开关Q1的信号。





2 仿真实验

为验证单信号驱动的固态脉冲源的工作原理,通 过通用电路分析(PSPICE)仿真了 10 级电路拓扑,如 图 6 所示。直流充电源工作电压设置为 800 V,负载 为 500 Ω 纯电阻负载,每级主电容的容量为 1 μ F, 各级开关的选型为 CREE 公司的 C2M0080120D,耐 压 1200 V,门极电容为 950 pF,导通阈值电压为 3.2 V, 门源极电压范围为-10~25 V。由于级数越大,驱 动电容的充电电压越大。因此根据电容分压关 系,随着级数的增加,驱动电容 Ctr*i* 的取值越小。 Ctr1—Ctr9 的电容取值依次为 330 pF、160 pF、105 pF、 80 pF、65 pF、55 pF、45 pF、40 pF、30 pF。驱动电容 参数的选择可参考文献[21]。表 1 为仿真电路实 验参数。

为比较自触发驱动电压和第一级信号的电压差 异,测试了第一级开关Q1和第二级开关Q2的门源 极电压,测试结果如图7所示。从图中可明显看出 Q1的驱动电压为完整的方波,幅值为20V。而Q2 的自触发驱动电压有一个明显的欠阻尼震荡,这是 由于自触发过程中Q2门极电容Ciss2充电回路中 的电阻电容参数引起的,可在各级开关门源极并联 瞬态二极管得到一定的抑制。同时,从图中可看出 Q2自触发驱动电压幅值约为17.2V,已达到开关

笛 45 差



图 6 单信号的固态脉冲源的仿真电路



表1 实验参数

第4期

Q2 的阈值电压,能可靠导通开关 Q2。

为验证单信号驱动的固态脉冲源可输出不同幅 值和不同脉宽的脉冲电压,分别测试了 DC 直流充 电源工作在 500 V、600 V、700 V、800 V 时的输出电 压,如图8(a)所示,此时第一级开关驱动信号脉宽 为 200 ns,负载为 500 Ω。从图中可明显看出不同 幅值的输出电压波形顶宽约为200 ns.这是由于电 源对负载放电回路必须经过开关 01,而后级开关 由于门极串联电阻导致开通速度变慢,会导致后 级开关的脉宽变宽。因此脉宽最窄的开关 01 决 定了电源输出电压脉冲顶宽。同时,可看出电源 输出 5 kV、6 kV、7 kV、8 kV 的脉冲电压的上升沿 分别约为81 ns、65 ns、54 ns、49 ns、输出电压越高 上升沿越短,这是由于输出电压的幅值取决于直 流充电源的工作电压,工作电压越大,各级主电容 的电压越大,自触发回路电流越大,触发上升沿越 窄,促使电源对负载输出的脉冲电压上升沿越窄。 如图 8(b)测试了该电源工作电压在 800 V,负载为 500 Ω ,第一级开关 Q1 的驱动信号脉宽分别为 200 ns、 400 ns、600 ns、800 ns 的输出脉冲电压波形,从图中可

明显看出各输出脉冲波形顶宽接近开关 Q1 的驱动 信号脉宽,进一步验证了该电源可输出不同脉宽的 脉冲电压。



图 8 单信号驱动的固态脉冲源脉宽可调 和电压可调波形

为验证该电源可应用不同阻值负载的功能,测 试了工作电压为 800 V,Q1 信号脉宽为 200 ns,负载 分别为 500 Ω 和 2 kΩ 的输出脉冲波形,如图 9 所 示。从图中可明显看出,负载为 500 Ω 和 2 kΩ 的输 出波形脉冲顶宽与 Q1 驱动信号脉宽保持一致,下 降沿分别为 352 ns 和 903 ns,负载阻值越大,下降沿 越大,这是由于在相同幅值的电压下,阻值越大,放 电电流越小,因此负载越大输出脉冲的下降沿越大。



3 结 论

上面提出的单信号驱动的固态脉冲源只需单个 驱动信号即可控制整套电源的开通和关断,通过控 制第一级开关的导通状态,自行导通和关断其余开 关,极大简化驱动电路,大幅缩减系统的体积和质 量,最终输出幅值高达8 kV、脉宽 200~800 ns 的脉 冲电压,对于生物医学应用、肿瘤消融以及污水处理 有重大意义。但该技术由于充电电阻的存在造成系 统的充电速度较慢,充电损耗较大且输出脉冲频率 会受到限制,今后将围绕这些问题展开研究工作。

参考文献

- [1] 刘锡三.高功率脉冲技术的发展及应用研究[J].核物 理动态,1995,12(4):16-18.
- [2] L Hamada, N Otonari, T Iwasaki. Measurement of electromagnetic fields near a monopole antenna excited by a pulse [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, 2002, 44(1):72-78.
- [3] 杜伯学,梁虎成,杜强,等.交流与脉冲电压联合作用 下环氧树脂表面电荷的动态特性[J].高电压技术, 2018,44(3):688-695.
- [4] Shoulong DONG, Chenguo YAO, Nan YANG, et al. The Development of Solid-State Nanosecond Pulsed Plasma Jet Apparatus Based on Marx Structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24):35-44.
- [5] K SUBRAMAINI, R VEERARAGHAVALU. Diode clamped gate driver-based high voltage pulse generator for electroporation [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2018, 26:2374-2384.
- [6] 唐潇,姚陈果,郑爽,等.不可逆电穿孔多因素动态
 电导率模型的研究与分析[J].电工技术学报,2021, 36(14):2912-2921.
- [7] 姚陈果,宁郡怡,刘红梅,等.微/纳秒脉冲电场靶向不同尺寸肿瘤细胞内外膜电穿孔效应研究[J].电工技

术学报,2020,35(1):115-124.

- [8] 姜松,张旺,饶俊峰,等.一种用于细胞电穿孔的新型
 宽窄脉冲结合的高压脉冲发生器: 202110885515
 [P]. 2021-09-24.
- [9] 吕彦鹏,姚陈果,董守龙,等.高频双极性脉冲诱导 SKOV-3细胞生物电效应的实验研究[J].高电压技 术,2018,44(2):617-623.
- [10] Maj Kobe ZGALIN, Dusa HODZIC, Matej REBERSEK, et al. Combination of Microsecond and Nanosecond Pulsed Electric Field Treatments for Inactivation of Escherichia Coli in Water Samples [J]. Journal of Membrane Biology, 2012, 245:643-650.
- [11] 褚宗兰,张适昌,刘正华.采用火花隙开关的冲击磁体 脉冲发生器[C]//中国物理学会全国粒子加速器学 术年会论文集.北京:中国物理学会,1988:342-347.
- [12] 饶俊峰,李恩成,王永刚,等.自触发驱动的全固态 Marx 发生器[J].强激光与粒子束,2021,33(2):1-11.
- [13] 刘克富.固态 Marx 发生器研究进展[J].高电压技术, 2015,41(6):1781-1787.
- [14] 饶俊峰.基于固态开关的重复频率脉冲功率源的脉冲 调制技术及其应用[D].上海:复旦大学,2013.
- [15] 李柳霞.容性负载下全固态脉冲源的特性研究[D]. 上海:复旦大学,2013.
- Ying LIU, Rui FAN, Xiaoning ZHANG, et al. Bipolar high voltage pulse generator without H-bridge based on cascade of positive and negative Marx generators [J].
 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019,26(2):476-483.
- H L HESS, R J BAKER. Transformerless capacitive coupling of gate signals for series operation of power MOS devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5):923-930.
- [18] 张春朋,张树卿,赵国亮.串联 IGBT 动态均压方法综 述[J].电工技术学报,2013,28(S1):197-202.
- [19] Ting LU, Zhengming ZHAO, Shiqi JI, et al. Active clamping circuit with status feedback for HV-IGBT[C].
 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, 2012:1-5.
- [20] Weirong ZENG, Chenguo YAO, Shoulong DONG, et al. Self-Triggering High-Frequency Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(8):8002-8012.
- [21] Lei PANG, Tianjun LONG, Kun HE, et al. A Compact Series-Connected SiC MOSFETs Module and Its Application in High Voltage Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (12): 9238–9247.

作者简介:

罗雨航(1993),男,硕士,助教,研究方向为脉冲功率、 脉冲电源、高电压等。 (收稿日期:2022-06-03)

10 kV 配电线路避雷器优化布置研究

雷 潇¹,许安玖²,刘 强¹,崔 涛¹,廖文龙¹

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

2.国网四川省电力公司广元供电公司,四川 广元 628000)

摘 要:雷击跳闸是 10 kV 配电线路运行维护面临的主要问题之一。文中在 Agrawal 模型的基础上,在 ATP/EMPT 建 立了计及导线耦合效应的 10 kV 三相导线雷电感应过电压模块。研究了雷击距离线路 50 m 情况下的感应雷跳闸概 率,结果发现:跳闸所需最小雷电流幅值均随绝缘子 50% 闪络电压的增大而呈线性增加;分支处更易发生绝缘闪络。 研究了避雷器布置方式,结果发现:相同安装密度下,三相避雷器分散安装比集中安装的效果更好;对于分支杆塔,宜 在最近干线或支线杆塔上安装避雷器。

关键词:配电线路;雷电感应过电压;避雷器;优化布置 中图分类号:TM 862 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0021-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220405

Research on Optimal Configuration of Lightning Arrester for 10 kV Distribution Line

LEI Xiao¹, XU Anjiu², LIU Qiang¹, CUI Tao¹, LIAO Wenlong¹

(1.State Gird Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;2.State Gird Guangyuan Electric Power Supply Company, Guangyuan 628000, Sichuan, China)

Abstract:Lightning trip-out is one of the major problems in operation and maintenance of 10 kV distribution lines. Based on the Agrawal model, a lightning-induced overvoltage module of 10 kV three-phase conductor is established in ATP/EMTP considering the conductor coupling effect. The trip-out rate of induced overvoltage is studied when lightning stroke is 50 m far away from the line, and the results show that the minimum lightning current amplitude required for tripping increases linearly with the increase of 50% flashover voltage of insulator, and insulation flashover occurs more easily at branch. The arrangement of lightning arrester is also studied, and the results show that under the same installation density, the effect of scattered installation of three-phase arrester is better than the centralized installation, and for branch tower, it is better to install arrester on the nearest main line or branch line tower.

Key words: distribution line; lightning-induced overvoltage; lightning arrester; optimal configuration

0 引 言

10 kV 配电线路因绝缘强度较低而极易发生雷击 跳闸和设备损坏等故障^[1-3]。部分多雷地区的 10 kV 配电线路雷击跳闸比例超过 50%^[4-6]。而在雷击故 障中,由雷击线路附近大地或构筑物产生的雷电感 应过电压造成的比例占 90%以上^[7]。因此,亟需开 展雷电感应过电压抑制方法的研究,以大幅改进雷 基金项目:国家电网公司总部项目(5500-202037100A-0-0-00) 电防护性能。

雷电感应过电压的产生机理已较为明确,并由 Agrawal、Chowdburi和 Rusck等人提出了若干理论 计算模型^[8-10]。其中,Agrawal模型是一种以散射电 压表示的外界电磁场机理多导体传输线模型,在理 论上较其他模型更合理,并且得到了试验验证。在 此基础上,国内学者开展了模型改进完善工作,建立 了雷电感应过电压的仿真计算基础^[11]。

雷电感应过电压的特征与直击过电压有明显的 区别,文献[12-13]对此开展了仿真分析,但没有 涉及避雷器等防雷措施对过电压的抑制作用。文 献[14]开展了雷电过电压闪络率的研究,但忽略了 多相闪络问题。对于 10 kV 配电线路,通常为中性 点不接地系统或谐振接地系统,只有两相或三相同 时闪络才会触发保护跳闸。部分文献^[15-18]研究了 避雷器安装密度对雷电感应过电压闪络率的影响, 并提出了安装密度优化建议,但研究过程未考虑多 相闪络和分支线路的问题。文献[11]提及了分支 线路台区避雷器对过电压的影响,但没有开展线路 避雷器优化配置的研究。实际上,配电线路拓扑结 构复杂,潜在雷击范围广,在计及经济投入和后期运 维的情况下,必然面临避雷器优化配置的问题。

针对雷电感应过电压造成的雷击跳闸问题,下 面以 Agrawal 模型为基础,在 ATP/EMTP 中建立了 三相导线的雷电感应过电压仿真模型,开展了两相 闪络概率和避雷器配置方式的研究。

1 雷电感应过电压

根据 Agrawal 模型^[10],线路上的电压 U(x,t)为 入射电压 $U_i(x,t)$ 和散射电压 $U_s(x,t)之和。入射$ 电压 $U_i(x,t)$ 为雷电流在线路垂直方向上电场的积 分,如式(1)所示。

$$U_{i}(x,t) = -\int_{a}^{b} E_{z}(x,y,z,t)$$
(1)

式中:h 为线路高度; $E_z(x,y,z,t)$ 为坐标(x,y,z) 处 沿地面垂直方向的电场。散射电压 $U_s(x,t)$ 是由雷 电流 i(x,t) 切向电场分量所激发的,且受自身及邻 近导体电流影响的电压分量,其多导体传输线电报 方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial U_s(x,t)}{\partial x} + \mathbf{R}i(x,t) + \mathbf{L} \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = E_x(x,y,z,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial U_s(x,t)}{\partial t} = 0 \end{cases}$$
(2)

式中:R、L和C分别为多导体传输线单位长度的电 阻矩阵、电感矩阵和电容矩阵; $E_x(x,y,z,t)$ 为雷电 流在沿导线方向上产生的电场。

由上述公式可以推导出,导线上的过电压不仅 取决于雷电流在其水平和垂直方向上的电场强度, 同时也受到自身及邻近导线上瞬时电流的影响。文 献[16]研究发现架空地线对雷电感应过电压有较 明显的抑制作用,即验证了邻近接地导体上流过的 瞬时电流对散射电压的改变。进一步可知,当一相 导体绝缘闪络后,势必会对其他两相导体上的感应 过电压产生影响,而这一机制与雷电直击造成多相 同时跳闸明显不同。同时,一相导线的雷电流经杆 塔入地后,横担电位抬升,也会改变另两相绝缘子上 承受的电压。因此,可通过 Agrawal 模型对 10 kV 配 电线路多相闪络的现象进行分析。

2 仿真建模

文献[12-13]结合 Agrawal 模型和雷电流 Heidler 模型和 Bergeron 模型,在 ATP/EMTP 中建立了单相 导线雷电感应过电压计算模块。在其基础上建立了 三相导线的计算模块,如图 1 所示。模块两边的 RL 线路模型中只包含 *R* 分量,用于表征导线波阻抗及 互阻抗。该计算模块只能监测线路两端的电压,如 要观测线路任意点电压则需级联多个计算模块。大 地电导率为 0.01 S/m。



图 1 感应过电压计算模块

雷电流波前时间为 2.6 μs,半波时间为 50 μs。 雷电流幅值和位置可根据计算需要进行调节。 10 kV 线路平均高度一般不超过 10 m,在城乡居民 区、山地和丘陵地区的引雷作用不强,一般认为线路 附近 65 m 以内为直击。然而,当线路附近 65 m 内 有微波塔、输电线路杆塔等引雷构筑物时,由于线路 被屏蔽,雷击点与线路的最短水平距离可能不超过 50 m。这里将雷击点距离设置为 50 m,以体现雷电感 应过电压计算的最严苛情况。通过仿真计算可获取 不发生两相闪络的最大可承受雷电流,结合雷电流 幅值概率分布即可评估其雷电感应过电压承受能 力。中国多雷地区的雷电流幅值概率函数如式(3) 所示。

$$P(I \ge i_0) = 10^{-\frac{10}{88}} \tag{3}$$

式中:I为雷电流幅值的变量; i_0 为给定的雷电流幅 值; $P(I \ge i_0)$ 为雷电流幅值超过 i_0 的概率。

研究主要考虑配电线路在无分支处和有分支处 的两种基本结构。对于无分支处,可以长直线路为 计算对象。为了防止线路末端的反射影响,将线路 总长设置为11 km,雷电点发生在线路中点附近,并 将线路两端经与导线波阻抗等值的电阻接地。对于 分支线路,在长直线路的中点处垂直引出支线,长度 为5.5 km,终端经与导线波阻抗等值的电阻接地。

10 kV 杆塔为典型的三角形塔头布置,中相线路高为 11 m,边相线路高为 10 m,相间水平距离为 1 m。杆塔采用 8 μH 的电感模拟,接地电阻取 10 Ω。 绝缘子简化为常开的理想开关,当电压超过绝缘子 50%闪络电压时闭合。10 kV 避雷器采用文献[17]给 出的伏安特性。典型的杆塔节点处模型如图 2 所示。



图 2 杆塔节点模型

为了验证模型的有效性,对文献[11]的算例进行仿真。雷电流为 30 kA,落雷点距离线路中相为 50 m,到两端线路距离相等。各观测点至落雷最近 位置的水平距离为 0、250 m、750 m 和 1500 m。仿 真结果如图 3 所示,与原文基本一致。



3 感应雷过电压跳闸概率

3.1 无分支处

在雷电流幅值较小时,雷电感应过电压小于绝缘子闪络电压,不会造成绝缘闪络。雷电流幅值增大到一定值会造成单相绝缘子闪络,但不能造成两相闪络。雷电流幅值继续增大将会造成两相闪络, 形成两相短路导致跳闸。 当落雷点在线路附近 50 m 处时,各种绝缘强度 下的跳闸概率如表 1 所示。所需最小雷电流幅值均 随绝缘子 50%闪络电压的增大而呈现线性增加的 规律。对于目前应用最广的绝缘配置,绝缘子 50% 闪络电压接近 200 kV,其两相闪络所需雷电流为 51.9 kA,发生概率为 25.7%。

表 1 不同绝缘强度下的跳闸概率

绝缘子 50%闪络电压/kV	雷电流/kA	概率/%
100	≥25.9	50.8
150	≥38.9	36.1
200	≥51.9	25.7
250	≥64.8	18.4
300	≥77.7	13.1

3.2 有分支处

分支处距离线路 50 m 的可能落雷点位置如图 4 所示。过电压幅值最高的位置如表 2 所示。可 见,当落雷点为 3,即雷击发生在干线和支线交叉处 50 m 时,线路过电压幅值最高,最易发生闪络。为 更好地防治雷电感应过电压,应针对该落雷点进行 研究。



图 4 分支处的落雷位置

表 2 不同雷击位置对应的最大过电压位置

落雷点	位置	幅值/kV
1	M 中相	420
2	L中相	413
3	L/F 中相	465

注: 雷电流幅值为 60 kA, 绝缘子闪络电压为 200 kV。落雷点 3, L 和 F 点的过电压数值相同。

当落雷点为3时,各种绝缘强度下的闪络概率 如表3所示,所需最小雷电流幅值均随绝缘子50% 闪络电压的增大而呈现线性增加的规律。与无分支 的情况相比,闪络明显更易发生。如绝缘子50%闪 络电压为200kV时,跳闸所需雷电流幅值为28kA, 仅为无分支情况的0.54倍。这是雷击同时在主线

和分支线感应出极性相同的过电压所致。 表3 不同绝缘强度下的闪络概率

绝缘子 50%闪络电压/kV	雷电流/kA	概率/%
100	≥14.0	69.3
150	≥21.0	57.7
200	≥28.0	48.1
250	≥35.0	40.0
300	≥42.0	33.3

4 避雷器配置方式

4.1 无分支处

主要对比研究 6 种避雷器配置方式下的防雷效 果。6 种配置方式分别如图 5 所示。配置方式 1、3、 5 是在一基杆塔上同时安装三相避雷器,安装间隔 距离分别为 150 m、300 m 和 450 m;配置方式 2、4、6 是在不同杆塔的各相上分散安装避雷器,安装杆塔 间隔距离分别为 50 m、100 m 和 150 m。配置方式 1 和方式 2、方式 3 和方式 4、方式 5 和方式 6 的安装 密度分别相同。



图 5 无分支情况下避雷器配置方式

对于每种配置方式,两相闪络所需雷电流幅值 与雷击位置密切相关。这里选择雷击点在线路附近 50 m 处,以最严苛情况进行比较。各配置方式下两 相闪络所需雷电流幅值见表4所示。在相同配置密 度下,各相避雷器分散布置方式的防雷效果更好。 如绝缘子 50%闪络电压为 200 kV 时,配置方式3 两 相闪络需雷电流 77 kA,而方式4 需雷电流 93 kA。 为更清晰地反映三相集中配置和分散配置的防雷效 果,计算了两相闪络概率,如图6所示。

避雷器动作后,一方面降低了本相导线在相邻 杆塔的过电压;另一方面也降低了本基杆塔其他两 相绝缘子承受的过电压。对于三相避雷器集中布置 于一基杆塔的情况,若雷击点距避雷器安装杆塔较 远,避雷器对雷击点附近三相导线的过电压限制能 力弱。而对于分散安装的情况,雷击点附近且离避 雷器最远的相导线首先闪络,而此时其他两相的过 电压又受近距离避雷器的限制,因此两相闪络的难 度更高。



图 6 各配置方式下两相闪络概率

表 4 无分支情况下两相闪络所需雷电流幅值

绝缘子 50%		两相闪络所需雷电流幅值/kA				
闪络电压/kV	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5	方式6
100	65	73	35	36	28	29
150	110	135	56	63	44	50
200	155	200	77	93	60	72
250	205	265	98	123	75	94
300	250	334	119	155	91	116

4.2 有分支处

无避雷器时,分支处的两相闪络概率比无分支 情况高,分支处为绝缘薄弱点。以干线和支线均按 照第4.1节中配置方式4为例进行研究,各相避雷器 分散安装在不同杆塔上,安装杆塔间隔距离为100m。 选择雷击点在干线和支线交叉处50m处,此时过电 压幅值最高。由第2.2节可知,离雷击点最近的干 线和支线处过电压最高,因此避雷器配置的典型方 式可有两种,即雷击点最近处杆塔有避雷器和无避 雷器,如图7所示。

表 5 有分支情况下两相闪络所需雷电流幅值

绝缘子 50%	两相闪络所需雷电流幅值/kA				
闪络电压/kV	方式 4	方式 7	方式 8		
100	36	42	30		
150	63	73	52		
200	93	105	74		
250	123	137	96		
300	155	168	118		

将上述两种方式和无分支情况下两相闪络所需 雷电流进行对比,如表5所示。离雷击点最近的干线 和支线杆塔处安装有避雷器时,两相闪络所需雷电流 最高。在实际改造中,干线和支线按照各相分散配置

25

后,方式7和方式8会随机出现。对于方式8则应在 距离分支处最近的干线、支线杆塔上增加避雷器。



5 结 论

上面研究了 10 kV 配电线路避雷器配置方式, 得出如下结论:

 1) 雷电感应过电压闪络所需雷电流幅值随绝 缘强度的提升而线性增加。在相同雷击距离下,分 支杆塔的闪络概率明显高于普通杆塔。

2)对于雷电感应过电压的防治,三相避雷器分 散布置的防治效果优于集中布置。对于分支处,应 在最近的干线和支线杆塔上安装避雷器。

参考文献

- [1] 李琳,齐秀君.配电线路感应雷过电压计算[J].高电压 技术,2011,37(5):1093-1099.
- [2] 罗大强,唐军,许志荣,等.10 kV 架空配电线路防 雷措施配置方案分析[J].电瓷避雷器,2012(5): 113-118.
- [3] 苏宜靖,董立,唐律,等.柔性直流配电网过电压及避雷 器配置研究[J].浙江电力,2019,38(3):20-24.
- [4] 张利庭.雷电对配电安全运行的影响及防范研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [5] 区伟潮. 10 kV 配电用避雷器故障分析[J].高电压技术,2006,32(7):127-128.
- [6] 王敬春,罗军,吕诗月,等.降低配电线路雷击断线和跳闸

率的防护措施[J].高电压技术,2009,35(12):2958-2962. 文习山,彭向阳,谢广润.架空配电线路感应雷过电压的

- [7] 文习山,彭向阳,谢广润.架空配电线路感应雷过电压的数值计算 [J]. 中国电机工程学报,1998,18(4):76-78.
- [8] Singarajah C, Chowdhuri PRITINDRA. Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973(10):1259-1260.
- [9] A PIANTINI, J M JANISZEWSIJ. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures [J].IEEE Transactions on Magnetics, 1998,34(5):2799-2802.
- [10] A AGRAWAL, H PRICE, S GURBAXANI. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field [C]. 1980 Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE:1980.
- [11] 边凯,陈维江,李成榕,等.架空配电线路雷电感应过电
 压计算研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):
 191-199.
- [12] H Kr HOIDALEN. Analytical formulation of lightninginduced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground [J]. IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 92-100.
- [13] H Kr HOIDALEN. Calculation of Lightning-induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects[C]. International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, 2003.
- [14] 雷潇,刘强,刘守豹,等. 土壤电阻率对 10 kV 架空线 路雷害风险的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2016(6): 116-119.
- [15] 王希,王顺超,何金良,等. 安装避雷器后 10 kV 配电线路的雷电感应过电压特性[J]. 电网技术,2012,36(7): 149-154.
- [16] 边凯,陈维江,沈海滨,等. 配电线路架设地线对雷 电感应过电压的防护效果[J]. 高电压技术,2013, 39(4):993-999.
- [17] Jankov V, Grzybowski S. Flashover rates of overhead distribution lines caused by nearby lightning strokes [C].
 Proceedings of the 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, IEEE, 1997:134-135.
- [18] 横山茂. 配电线路雷害对策[M].北京:中国电力出版 社, 2008.

作者简介:

雷 潇(1988),男,博士,主要研究方向为过电压与接 地技术。

(收稿日期:2021-12-01)

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¹,罗凡波²,苏学能¹,李世龙¹,龙 呈¹

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

2.国网四川省电力公司达州供电公司,四川达州 635000)

摘 要:目前供电公司 10 kV 配电线路的一二次融合成套柱上开关仅凭经验进行安装布置,其安装数量和安装位置会 直接影响穿越森林草原配电线路的故障处置效果。为了科学地开展一二次融合成套柱上开关安装选址,文中提出基 于改进 DBPSO 优化的穿越森林草原配电线路一二次融合成套柱上开关优化布置算法。实验结果表明,该算法能通过 较少的迭代次数实现最优一二次融合成套柱上开关位置组合的获得,为配电网一二次融合成套柱上开关安装选址提 供科学参考,充分发挥其故障处置的实际效果。

关键词:森林草原火灾;DBPSO;一二次融合成套柱上开关;火灾概率;最优开关位置 中图分类号:TM 76 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0026-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220406

Research on Optimal Placement for Complete Set of Primary and Secondary Integrated Overhead Pole Mounted Switch in Distribution Lines through Forest and Grassland

GAO Yiwen¹, LUO Fanbo², SU Xueneng¹, LI Shilong¹, LONG Cheng¹

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

2. State Grid Dazhou Electric Power Supply Company, Dazhou 635000, Sichuan, China)

Abstract: At present, the installation and placement of the complete set of overhead pole mounted switches for the primary and secondary integration of 10 kV distribution lines of power supply company is only based on experiences, and its installation quantity and location will directly affect the fault disposal effect of the distribution lines passing through forests and grasslands. In order to scientifically carry out switch installation and location, an optimal placement algorithm for the complete set of overhead pole mounted switches based on the improved discrete binary particle swarm optimization (DBPSO) is proposed. The test results show that the proposed algorithm can achieve the optimal switch location combination through fewer iterations, which can provide a scientific reference for the installation and location of the primary and secondary integrated overhead pole mounted switch in distribution network, and give full play to the actual effect of switch fault disposal.

Key words: forest and grassland fire; discrete binary particle swarm optimization (DBPSO); complete set of primary and secondary integrated overhead pole mounted switch; fire probability; optimal switch position

0 引 言

近年来,因配电线路断线或接地故障引发火灾 的风险开始凸显^[1],如何有效识别配电线路断线和 接地故障成为电力行业关注的重点。随着配电网智 能化和数字化发展,一二次融合成套设备开始涌现, <u>基金项目:</u>国网四川省电力公司科技项目(521997190014) 成套设备的功能大幅提升,其中故障就地快速处理 能力成为基本配置^[2]。经过国内多家检测机构试 验验证和电力企业运行实践,开始在配电线路推广 安装一二次融合成套设备,从本质上提升配电网的 故障处理能力,降低线路断线或接地故障引发火灾 的概率^[3-7]。

随着一二次融合成套柱上开关的大量应用,在 设备的选址上遇到以下现实问题^[8-10]:1)根据相关 规程,配电网线路建议分为3~4 段安装2~3个断路 器或分段负荷开关,可酌情在主要分支处安装分段 负荷开关;由于该规定并未考虑供电可靠性的问题, 可参考意义大打折扣。2)目前配电网设备优化选 址主要集中在配电智能终端上,如馈线终端(feeder terminal unit,FTU),但大多从经济性角度考虑最佳 选址方案。3)国内外研究暂未考虑穿越森林草原的 配电线路风险对一二次融合成套柱上开关选址的影 响。4)部分电力企业为了确保一二次融合成套柱上 开关的接地故障保护功能可覆盖整条线路,在变电站 出线断路器后的线路第一个杆塔处安装该设备,虽然 可减少现场运行维护压力,却损失了供电可靠性。

综上,下面从配电网防山火的实际需求出发,针 对穿越森林草原配电线路存在火灾风险与供电可靠 性等问题,提出一二次融合成套柱上开关(下称融 合成套开关)选址的火灾风险影响指标和供电可靠 性指标,建立融合成套开关选址的目标函数,利用改 进离散二进制粒子群(discrete binary particle swarm optimization,DBPSO)优化智能算法进行最优融合成 套开关安装位置求解,最后通过算例验证了所提方 法的可行性和有效性,为穿越森林草原配电线路的 融合成套开关的选址提供科学参考。

1 断路器保护范围与供电可靠性

1.1 断路器保护范围计算

融合成套开关安装后按照目前配电线路断路器 保护整定原则^[11],其保护整定范围为该融合成套开 关下游所有区域,当同条线路上安装多个断路器时, 通过上下游时延进行级差配合,实现故障区段快速 隔离^[12]。下面将借助图1所示配电网进行说明。



图1 配电网结构

根据上述保护范围整定规则,针对图1的简单 配电网,在位置3和7安装融合成套开关后各断路 器保护范围如图2所示。

考虑配电网线路不同线段穿越森林草原的实际 情况,尽管森林草原中的配电线路区段已经明确且 固定,但融合成套开关的位置可以进行变化,以新装



图 2 保护范围

融合成套开关后尽可能多地使火灾风险线路均在保 护范围内为目标,实现最大范围的风险线路保护,结 合如电压时间型、电压电流时间型、自适应综合型等 就地馈线自动化功能实现故障区段快速隔离恢复非 故障区段供电,进而提高供电可靠性。根据变电站 出线断路器以及新装融合成套开关安装位置确定的 保护范围,计及火灾风险影响断路器保护范围指标 如式(1)所示。

$$R = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot L_i \cdot m_i \tag{1}$$

式中:R为计及火灾风险影响的断路器保护范围; r_i为第 i 条线段火灾风险指数(考虑森林草原线路 沿线的火灾风险等级、线路通道和设备本体健康程 度等);L_i为第 i 条线段长度;m_i为第 i 条线段是否 在保护范围内,"是"时值为 1,"否"时值为 0。

1.2 供电可靠性的影响计算

断路器安装后,当断路器保护范围内发生故障 时,断路器会立刻跳开,保护范围内的线路会立即停 电,待故障消除后该区域才会恢复供电,进而影响该 区域的供电可靠性。为缩小故障停电区域,在线路 不同位置安装融合成套开关后,因融合成套开关之 间保护配合,当故障发生时能快速隔离故障区。停 电区域和停电用户受融合成套开关安装的具体位置 影响,其选址对供电可靠性的影响指标可表述为

$$T = \frac{\sum_{k=1}^{p} \lambda_k L_k qt}{\sum_{i=1}^{n} L_j q}$$
(2)

式中:T为用户年均故障停电时间; λ_k 为第k个断路器(包含出线断路器和融合成套开关)可靠保护范围线段故障概率之和; L_k 为第k个断路器(包含出线断路器和融合成套开关)可靠保护范围内线段长度之和;t为单次故障停电时间(包含故障查找时间和故障修复时间); L_j 为第j条线段的长度;q为每公里用户数。

2 改进 DBPSO 优化融合成套开关位 置选取

受限于配电网资金投入、线路实际运行情况、现 场运行维护等多方面因素影响,不可能在配电网线 路的每一个断路器位置进行融合成套开关安装,故 在一定融合成套开关数量下,结合各断路器的线路 保护范围、各断路器保护的线路长度、各断路器保护 范围内线路故障概率、各断路器保护范围内线路沿 线火灾概率等因素,实现线路一定数量的融合成套 开关最优位置安装,使其能实现最大程度的线路保 护,降低线路引发森林草原火灾概率。为实现融合 成套开关的最优位置安装,通过改进 DBPSO 算 法^[13]结合所提出的目标函数,实现对融合成套开关 安装位置的最优选取。

2.1 粒子群算法原理

粒子群(particle swarm optimization, PSO)^[14]算 法广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控 制以及其他遗传算法等领域,粒子通过模拟鸟的捕 食过程实现寻优。粒子具有两个属性:速度 V 和位 置 X,速度代表粒子在参数空间移动的快慢,位置代 表粒子在参数空间的移动方向。粒子在一定区间内 单独进行最优解搜寻,并将获得的最优解记为当前 个体极值 P_{best} ,再将其传递给其他粒子,找到最优个 体极值作为当前整个粒子群体全局最优解 G_{best} ;所 有粒子与全局最优解进行比较,进而调整自己的 V 和 X。

PSO 算法的一般迭代方程为

$$V_{i,G+1} = w \times V_{i,G} + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{i,G} - X_{i,G}) + c_2 \times \text{rand}() \times (P_{g,G} - X_{i,G})$$

 $S(V_{i,G+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-V_{i,G+1})}$
 $X_{i,G+1} = \begin{cases} 1 & \text{if rand}() \leq S(V_{i,G+1}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ (3)

式中:G 为 PSO 迭代的代数; $V_{i,c}$ 为第i 个粒子前G代迭代中的速度; $X_{i,c}$ 为第i 个粒子前G代迭代中的 位置; $P_{i,c}$ 为第i 个粒子在前G代迭代中寻找到的最 优适应值的位置信息; $P_{g,c}$ 为在前G 代迭代中种群 找到的最优适应值的位置信息;w 为惯性权重; c_1 为 局部学习因子; c_2 为全局学习因子; $S(V_{i,c+1})$ 为粒子 轨迹为1的概率; $X_{i,c+1}$ 为位置绝对变化取值。

2.2 改进粒子速度与位置更新公式

针对所提问题,融合成套开关是否在相应的位置进行安装反映为矩阵形式是含 0-1 的矩阵,属于 DBPSO 优化问题,所以需对粒子的位置更新公式做 相应的修改。以 20 节点配电网线路安装 3 个融合 成套开关为例,对速度变化通过比对当前个体极值 对应的融合成套开关组合与全局极值对应的融合成 套开关组合的情况,判断有多少个不同的融合成套 开关位置。当不同位置数小于 2,融合成套开关位置 不变;当不同位置数大于 2,以一定概率进行融合成 套开关位置变化更新。具体更新公式如式(4)所示。

 $X_{i,G+1} = \begin{cases} x_i = 1 & \text{if } \operatorname{rand}() > 0.5 \&\&k < 3 \parallel q > 16 \\ x_i = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

(4)

式中:X_{i,G+1}为融合成套开关位置的更新结果; rand()>0.5&&k<3 || q>16 是确保该条 20 节点线路 上仅进行 3 个融合成套开关的安装,即组合矩阵中 只能有 3 个1;当有 3 个1 出现即证明融合成套开关 分配完毕,其余位置值均为 0。通过上述办法实现 融合成套开关位置按一定概率进行更新,避免算法 陷入局部最优。

2.3 目标函数

优化问题是想让算法达到设定的目标,为了实 现目标,需构造一个目标函数,通过使目标函数取最 大值或最小值,从而使优化算法优化方向向最优解 不断靠近,最终求得最优解。所提目标函数由通过 配电网线路参数计算得到的融合成套开关保护范围 R与用户年均故障停电时间T两个参数相除构成。 融合成套开关保护范围 R 越大,代表其保护范围越 大,保护作用得到更大的体现:年均故障停电时间 T 越小,代表供电可靠性越高,用户停电时间越短。所 提目标函数所表征的是既满足线路保护范围尽可能 大,又满足年均故障停电时间尽可能少,这两个因素 之间相互影响。但并不意味着单一参数最优,最终 的融合成套开关安装位置就是最好,应取两个参数 相对最优,即在考虑线路保护范围情况下也对供电 可靠性进行充分考虑。故使用融合成套开关保护范 围R与用户年均故障停电时间T相除,取其最大值构 成目标函数,即使 R、T 取相对最优。具体如式(5) 所示。

$$f(x) = \max \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i L_i m_i}{\sum_{k=1}^{p} \lambda_k L_k q t} \sum_{j=1}^{n} L_j q$$
(5)

式中,f(x)为目标函数值。

2.4 算法流程

1)完成线路相关参数输入,完成各融合成套开关 安装位置保护范围、保护范围内故障概率、保护范围内 火灾概率、保护范围内年均停电时间等参数的计算。

2) 完成 DBPSO 相关参数初始化,输入粒子种 群数、学习因子、惯性权重、种群位置、种群速度、迭 代次数等相关参数的初始化赋值。

3)通过设定的目标函数,更新粒子位置、速度、 局部最优值与全局最优值等对最优融合成套开关组 合进行寻优。

4)寻找到最优个体即最优融合成套开关位置 组合,达到设定的迭代次数,输出最优融合成套开关 位置组合,算法结束。

算法寻优过程流程如图3所示。



图 3 算法寻优过程流程

3 算例验证

实验环境: CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-3230M+2.60GHz+matlab2016a,实验分别进行了 8 节点与 20 节点的配电网线路最优融合成套开关 位置选择。算例中的线路区段火灾概率与线路区段 故障概率等数据来源于文献[15-17]。对于模型的 适用性,在不同区域使用所提算法进行融合成套开 关安装位置选取时,需根据当地穿越森林草原配电 线路实际运行情况来选取当地实际的历史线路火灾 概率、线路故障概率与故障停电时间。

3.1 8节点配电网线路最优融合成套开关位置选择

8节点配电网线路模型融合成套开关选址实验 结果如图4所示。



(a) 线路拓扑结构与线路相关参数



图 4(a)为 8 节点配电网线路模型。图中1~8 为 线路可安装融合成套开关位置,融合成套开关位 置安装与否用 0 或 1 表示,1 表示在该位置安装融 合成套开关,0 表示不安装融合成套开关。对该配 电网进行 3 个融合成套开关位置选取,构成融合成 套开关安装 0-1 矩阵。此外标明了线路上各位置 断路器的保护线路范围与线路故障概率,结合前面 两个指标构造的目标函数,当目标函数取得最大值 时,认为找到了最优融合成套开关组合。通过仿真 结果图 4(b)可以看出,在种群规模设置为 10 时,迭 代 4 次即达到最优值,得到了最优的融合成套开关 位置组合[0,1,0,0,1,1,0,0],其断路器保护范围 值为 14.182 7,年均停电时间为 1.925 6 h。与其他 5 个依靠经验选取的融合成套开关位置组合对比结果 如表 1 所示。

通过表1可以看出,多因素下的断路器保护范 围最大达到了 R=16.5497,年均停电时间最低为 T=1.9256h。最优融合成套开关位置并不意味着 在融合成套开关组合中断路器保护值最大或年均停 电时间最少,最优融合成套开关组合是充分考虑各 断路器保护线路范围长度,以及保护范围内线路故 障概率和火灾概率等多个因素下的一个相对最优融 合成套开关安装位置组合。反映到数据表现层面, 就是在所计算得到的断路器保护范围与年均停电时 间两个指标下取相对最优值,不是单一考虑某一指 标最优。

表1 8节点不同融合成套开关位置组合的指标计算结果

_				
	融合成套 开关组合	断路器保护值 <i>R</i>	年均停电时间 <i>T/</i> h	<i>R</i> /T
	最优值[01001100]	14.182 7	1.925 6	7.365 1
	经验值[11001000]	16.549 7	2.727 9	6.066 9
	经验值[10101000]	16.549 7	2.898 7	5.709 2
	经验值[01001001]	14.182 7	2.019 3	7.023 6
	经验值[01001010]	14.182 7	2.343 9	6.050 8
	经验值[11000001]	16.549 7	2.817 0	5.874 9

3.2 20 节点配电网线路最优融合成套开关位置选择

20节点配电网线路模型融合成套开关选址实验结果如图 5 所示。







图 5(a)为 20 节点配电网线路模型。图中 1~20 为线路可安装一二次成套开关位置,对该配电网 进行 3 个融合成套开关位置选取。通过仿真结 果图 5(b)可以看出,在种群规模设置为 200 时, 迭代 9 次达到最优值,得到了最优的开关位置组合 为[0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0],

其断路器保护范围值 R 为 14.046 8,年均停电时 间 T 为 4.931 3 h。与其他 5 个经验选取的融合成 套开关位置组合对比结果如表 2 所示。

表 2 20 节点不同融合成套开关位置组合的指标计算结果

融合成套	断路器保护值 P	年均停电时间 T/b	<i>R/</i> T
步入组日 最优值[0010000000 0010010000]	14.046 8	1.732 5	8.107 8
经验值[0010010000 0000000000]	15.973 0	11.164 5	1.430 7
经验值[0010000000 0100010000]	15.286 4	2.276 8	6.713 9
经验值[0001000100 010000000]	11.029 8	6.885 6	1.601 9
经验值[0100000001 0001000000]	15.549 7	7.032 9	2.211 0
经验值[0100100001 0000000000]	15.548 7	11.914 2	1.305 1

通过表 2 可以看出,多因素下断路器保护值最 大达到了 15.549 7,年均停电时间最低为 4.931 3 h, 结合图 5(b)可知随着配电网规模越大,融合成套开 关可选位置越多求得最优解所需的迭代次数也会增 加。但所提寻优算法在 20 节点的配电网规模下,通 过 9 次即找到最优融合成套开关组合,表明所提算 法具有较强的寻优求解能力,在复杂的配电网结构 下,也能很快得到寻优结果。

4 结 论

上面通过各断路器的线路保护范围、保护的线路长度、保护范围内线路故障概率、保护范围内线路 次灾概率等因素,计算在多因素下断路器保护范围 *R*与年均用户停电时间*T*,进而构造目标函数,通过 改进 DBPSO 进行融合成套开关位置组合寻优,得到 计及穿越森林草原配电线路火灾风险因素的融合成 套开关最优安装位置选取。最后的算例验证也表明 该方法的可行性与有效性,给融合成套开关的安装 选址提供了新的方法,有利于穿越森林草原配电线 路火灾防范。

参考文献

- [1] 王宾,崔鑫.中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接 地故障非线性建模及故障解析分析[J].中国电机工程 学报,2021,41(11):3864-3873.
- [2] 宫璇,任欣旭,王秋杰,等.具有高容错稳定性的含 DG
 配电网区段定位方法[J].高电压技术,2021,47(11):
 3992-4006.

- [3] 胡国,颜云松,吴海,等,基于主配协同的配电网紧急 负荷控制策略及终端实现[J].电力系统自动化, 2022.46(2):180-187.
- [4] 吕军,盛万兴,刘日亮,等.配电物联网设计与应用[J]. 高电压技术,2019,45(6):1681-1688.
- [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,2017,46(16); 105 - 110.
- [6] 刘皓璐,邵建伟,王雪,等,基于数字孪生的配电自动 化终端设备状态评价与故障预判[J].电网技术,2022, 46(4):1605-1613.
- 王东芳,黄国权,黄廷城,等.一二次融合柱上开关组合 [7] 加权模糊状态评价[J].浙江电力,2020,39(2):48-52.
- [8] 周勐,么军,姚远,等.基于故障可观性指标的配电网 FTU 最优配置模型研究[J].电力系统保护与控制, 2019,47(17):117-124.
- [9] 闫磊,李远,赵文娜.关于配网自动化终端布点优化的 研究[J].国外电子测量技术,2019,38(10):49-53.
- [10] 刘小春,伍惠铖,李映雪,等.配电自动化终端配置 的双层优化模型[J].电力系统保护与控制,2020, 48(24):136-144.
- [11] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型

(上接第15页)

参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等.基于改进 SVD 算法的局 部放电窄带干扰抑制方法[J].高电压技术,2021, 47(2):705-713.
- [2] 李乃一,曹俊平,王少华,等.高压交联聚乙烯电缆附 件典型缺陷局部放电特性分析[J].浙江电力,2019, 38(1):58-63.
- [3] 唐炬,黄江岸,张晓星,等.局部放电在线监测中混频 周期性窄带干扰的抑制[J].中国电机工程学报,2010, 30(13):121-127.
- [4] 樊高辉,刘尚合,刘卫东,等.FFT 谱最小熵解卷积滤波 抑制放电信号中的周期性窄带干扰[J].高电压技术, 2017,43(4):1378-1385.
- [5] 卢毅,韩志锟,陈瑜.基于能量比预处理的 FFT 窄带 滤波方法[J].东南大学学报(自然科学版),2010. 40(5):948-951.
- [6] 钱勇,黄成军,陈陈,等.多小波消噪算法在局部放电检 测中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(6):89-95.
- [7] 刘卫东,刘尚和.基于小波分解与滑动峰态的微弱放 电信号联合检测方法[J].电力自动化设备,2016, 36(11):152-156.
- 姚林朋,郑文栋,钱勇,等.基于集合经验模态分解的局 [8] 部放电信号的窄带干扰抑制[J].电力系统保护与控 制,2011,39(22):133-139.

馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化, 2019,43(19):179-184.

- [12] 刘小春,王巍璋,姚文昊,等.中压配电网故障处理模式 配置研究综述[J].电测与仪表,2021,58(10):49-58.
- [13] 白宗璠, 竞霞, 张腾, 等. MDBPSO 算法优化的全波段 光谱数据协同冠层 SIF 监测小麦条锈病[J].作物学 报,2020,46(8):1248-1257.
- [14] 罗凡波,王平,徐桂菲,等.基于多尺度卷积神经网络 的人群聚集异常预测[J].计算机工程与科学,2020, 42(12):2223-2232.
- [15] 谢桦,亚夏尔·吐尔洪,陈昊,等.基于支持向量机算 法的配电线路时变状态预测方法[J].电力系统自动 化,2020,44(18):74-80.
- [16] 谢桦,陈昊,张沛.配电线路多源数据挖掘时变故障概 率计算[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(9): 63-67.
- [17] 刘辉,李鹏飞,林济铿,等.基于元胞自动机的山火蔓 延及电力线路故障概率计算新方法[J].中国电力, 2019,52(11):85-93.
- 作者简介:

高艺文(1989),男,高级工程师,主要研究方向为配电 网自动化、继电保护。 (收稿日期:2021-12-08)

- - 沈宏,张蒲,徐其惠,等.基于经验模态分解和自适应 [9] 噪声对消算法的窄带干扰抑制[J].高压电器,2009, $45(1) \cdot 8 - 14.$
 - [10] 张宇辉,段伟润,李天云.抑制局部放电信号中周期性 窄带干扰的子空间重构方法[J].电力自动化设备, 2017,37(7):178-183.
 - [11] 徐永干,姜杰,唐昆明,等.基于 Hankel 矩阵和奇异值 分解的局部放电窄带干扰抑制方法[J].电网技术, 2020,44(7):2762-2769.
 - 「12〕 陈正颖,王黎明,怡勇.基于短时傅里叶变换的直流电 晕无线电干扰激发电流计算[J].高电压技术,2019, 45(6):1866-1872.
 - [13] 陶顺,郭傲,刘云博,等.基于矩阵束和奇异值分解 的间谐波检测算法系[J].电力统保护与控制,2021, 49(2):57-64.
 - 「14] 许珉, 王玺, 程凤鸣. 基于加 Hanning 窗递推 DFT 算法 的测频方法[J].电力自动化设备,2010,30(11):73-74.
 - [15] 程养春,李成榕,王伟.用傅立叶级数法消除局部放电 检测中窄带干扰的研究[J].中国电机工程学报, 2005,25(20):106-111.
 - [16] 罗新,牛海清,胡日亮,等.一种改进的用于快速傅里 叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J].中国电 机工程学报,2013,33(12):167-175.

作者简介:

周 涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和 故障诊断方面的工作。 (收稿日期:2022-05-20)

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

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:输电线路塔基设计方案一般是在二维图纸上标绘的,这种方式没有充分考虑地形起伏和周边环境对方案的 影响,且工程量计算也存在偏差。三维设计技术在输电线路中的应用,为塔基设计提供了新的手段。文中分析了塔基 设计的工作内容,提出了一种基于三维模型的塔基设计方法。首先,对比二、三维设计的优缺点后,确定了通过建立塔 位三维虚拟小场景和大场景可更直观地评估和优化塔基设计方案;然后,基于参数化建模的思想,确定了塔基设计包 含的模型类型并分析其建模规则;最后,利用塔基三维建模程序及 GIS 平台,以工程中实际塔位为例建立三维数字化 模型,直观评估塔基设计方案的合理性并采取优化措施,其准确性较二维设计有明显提高。

关键词:塔基设计;三维数字化模型;小场景;大场景;参数化建模

中图分类号:TM 752 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0032-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220407

A Design Method of Tower Foundation Based on Three-dimensional Model for Transmission Line

LI Meifeng, FENG Yunchao, LUO Junlin, HUANG Xing, LIANG Ming, LI Li (Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: At present, the design of tower foundation for transmission line is plotted on two-dimensional (2D) drawings, but this method does not fully consider the impact of topography and surrounding environment on the scheme, and there also exists deviations in the calculation of quantities. The application of three-dimensional (3D) design technology in transmission line provides a new method for tower foundation design. The work contents of tower foundation design are analyzed, and a new tower foundation design method based on 3D model is proposed. Firstly, after comparing the advantages and disadvantages of 2D and 3D design, it is confirmed that through the establishment of virtual 3D small scene and 3D large scene of tower location, the evaluation and optimization of tower foundation design are defined and its modeling rules are analyzed. Finally, an actual tower location in the project is chosen to build a 3D digital model by using 3D modeling program of tower foundation and GIS platform. The rationality of tower foundation design scheme is intuitively evaluated. Compared with the 2D design, the proposed method can improve the accuracy obviously.

Key words: tower foundation design; 3D digital model; virtual 3D small scenes; virtual 3D large scenes; parametric modeling

0 引 言

目前输电线路塔基设计方案一般是在塔基断面 图和塔基地形图上标绘的,塔位范围为宽 30~50 m 的方形区域。设计单位对塔基区的塔腿、基础、防护 设施、水保措施进行设计和计算后,将图纸交付施工 单位。由于线路工程大多位于野外,塔位范围内存 在地形起伏且与周边环境关系密切,尤其是在设计 水土保持方案时需要考虑塔基对周边 100~200 m 内外部环境的影响。因此,在塔位地形图和断面图 上标绘的方式不能充分体现设计意图。在工程实施 的过程中,常常发生施工人员对塔基设计图纸理解 偏差、设计统计工程量考虑不全面等问题。

近年来,三维数字化设计技术在输电工程中逐 步推广应用。采用三维数字化的设计手段建立三维 模型,可更直观地表达设计意图;通过数据库技术来 管理和分析各种设计数据,可更快捷地查询各种信 息,使数据统计更加精确从而提高设计效率和质量。 因此,塔基设计也可利用三维数字化技术进一步提 高设计质量。

国内对塔基设计及优化工作做了大量研究。文 献[1]提出了一种塔基数字地面建立的方法。文献[2] 研究了基于地理信息系统平台 ArcGIS 和可视化类 库 VTK(visualization toolkit)的等高线地形图三维可 视化技术。文献[3]提出了一种基于 ObjectARX 应 用程序的塔腿基础接腿自动配置以及塔基地形和断 面自动绘制技术。文献[4]提出了基于软件开发包 Teigha 的塔基断面图自动绘制及长短腿自动配置技 术。文献[5-9]分析和研究了塔基设计中的水土保 持措施、环境保护措施和基础选型等内容。文献 [10]研究了铁塔长短腿和高低基础配置的优化方 法。文献[11]研究和应用了输电线路三维基础设 计场景构建技术。上述文献虽然从不同层面研究了 塔基设计的相关技术,但是没有涉及对整个塔基设 计方案的综合评价,因而无法从根本上提升塔基设 计的精细化水平。

目前输电工程塔基设计和施工所依据的文件仍 是二维图纸。但是,基于三维数字化技术对二维成 果进行验证并辅助完成方案优化是可行的。下面从 二维设计的薄弱点入手提出一种基于三维模型的塔 基设计方法。该方法从建模规则和软件架构两个方 面出发,首先借鉴参数化建模的思路,建立塔基设计 主要元素的三维数字化模型体系。然后,基于开源 的三维平台,开发了一款塔基设计三维建模软件。最 后,针对工程中实际塔位进行建模,验证并分析了三 维数字化技术应用于塔基设计的准确性与合理性。

1 塔基设计主要内容

结合工作过程分析,塔基设计主要的工作内容 如表1所示。

表1 塔基设计工作内容

步骤	项目	工作内容
1	提资整理	勘测提资和电气提资
2	基础数据组织	制作基础模板、铁塔模板、材料模板
3	塔腿组合设计	铁塔长短腿配置
4	基础设计	基础计算与配置
5	水土保持设计	确定水土保持措施及工程量
6	施工方案设计	确定施工技术方案和要点

输电线路塔基设计的最终成果主要是以图纸的 形式体现,其常规格式如图1所示,其中包含铁塔使 用条件、塔腿配置、基础配置、地形地貌描述、施工说 明、水土保持设计等模块。



图 1 塔基设计二维成果

2 塔基设计优化的技术方案

2.1 二维设计的缺点及对策分析

从图 1 可以看出,用二维图纸描述塔基设计方 案存在以下缺点:

1)空间位置关系表达不直观

二维图纸只能表达塔腿方向剖面和地形平面中 地物模型的相对位置关系,当地形起伏较大时,平面 表达方式不够直观明确。另外,当塔基范围内修筑 防护措施时,断面图上只能反映塔腿方向的相对位 置关系,超出断面则无法准确测量。

2) 工程量计算与实际存在差异

由于塔基设计过程中的基面土石方、基础外露、 防护措施工程量均需计入地形影响,而二维图纸只 能从平断面上进行简化计算,容易造成工程量与实 际发生量存在差异。

3) 塔位与环境的关系表达不全面

从宏观来看,塔基是线路工程的一连串节点。

当需要对线路工程进行总体评价时,这种一塔一图 的表达方式不能体现出线路工程在整个通道范围内 对周边环境的影响。

针对二维设计的缺点,三维数字化技术可以利 用二维设计的数据建立三维模型,从而直观表达模 型之间的位置关系,还可进行距离测算;而地理信息 系统(grographic information system,GIS)平台可在更 大范围内体现整个工程在现实世界中的位置。因 此,提出基于当前广泛应用的三维数字化技术和 GIS 平台,根据塔基设计二维成果数据建立塔基范 围内三维小场景和三维 GIS 平台中大场景的优化方 案,如图 2 所示。



图 2 塔基三维设计优化方案

2.2 塔位小场景优化方案

塔位小场景方案指通过三维建模软件将塔基区 工程实地测量范围内的主要设施进行建模,通过三 维模型表达塔位地形、塔腿、基础、防护措施、地质条 件等信息,如图3所示。这种方式可直观体现出各 种设施的空间位置关系,同时还能进行距离测算,当 方案不合理时,重新修改二维设计方案,从而综合评 价塔基设计方案的合理性。



2.3 塔位大场景优化方案

由于塔基工程测量范围一般不超过 50 m,因此 在考虑 100~200 m 更大范围的场地因素时,必须借 助 GIS 平台进行建模分析。塔位大场景方案即通过 GIS 系统可视化技术将塔基三维模型与 GIS 平台相 结合,在输电线路全景模型中仿真模拟塔基设计方 案,从而综合评价方案的合理性,如图 4 所示。



图 4 塔位大场景构建

3 塔基设计三维建模流程

结合图 2 的技术路线,对塔基设计三维建模流 程如下:

1)完成塔基二维设计,形成基础配置成果。

2)构建铁塔塔腿、基础、防护设施的参数表。

3)输入基础配置成果(包含排位信息、塔腿配置、基础配置等)。

4) 输入勘测提资的塔位地形数据和岩土信息。

5)调用参数表,通过基础配置成果和勘测数据 生成塔位小场景。

6)在塔位小场景中,根据设计要求添加防护措施 模型,通过空间距离分析确定防护措施合理性。随后 确定其他水土保持措施和施工措施,统计工程量。

7) 当方案不合理时, 返回步骤1重新设计。

8)进入 GIS 平台,将塔基设计三维模型经坐标 变换后加载到大场景中,随后完成方案评价。不合 理的方案重新返回步骤1进行调整。

工作流程如图5所示。

4 塔基设计建模规则

塔基三维设计的主要元素包括地形、地质、塔腿、 基础和防护设施。参照国家电网公司《输变电工程三 维设计建模规范》^[12]的规定,三维模型应描述类型、 空间位置、几何尺寸信息和材料属性,尽量采用参数 化建模。下面分别分析各种要素的建模规则。





图 5 塔基三维设计工作流程

4.1 塔基地形模型

由于塔基地形图是由一系列离散高程点和等 高线组成的测绘数据,不含绝对坐标,因此不属于 涉密资料。塔基地形图的文件格式一般为*.dwg 或*.dxf,通过格式转换可将其转换为数字高程模型 (digital elevation model, DEM)数据文件,利用程序 生成三维地形模型。图6为通过等高线拉伸形成的 地形曲面模型。



图 6 塔基地形图三维建模示例

4.2 地质模型

塔基地质模型主要用于体现 A、B、C、D 4 个接

腿下的岩土分层信息,主要参数为塔腿序号、岩土类型、岩层厚度,其中地质的岩土类型和岩层厚度根据 岩土专业提资来确定。表2展示了某个常规塔位各 塔腿的岩土分层信息。

表 2 某塔位各接腿岩土分层信息

A 腿		B 腿		C 腿		D 腿	
岩土	岩层	岩土	岩层	岩土	岩层	岩土	岩层
类型	厚度/m	类型	厚度/m	类型	厚度/m	类型	厚度/m
普土	1	普土	2	普土	3	普土	4
坚土	4	松砂	6	松砂	6	坚土	1
松砂	1	岩石	3	岩石	4	松砂	2
岩石	2					岩石	1

由于现场勘测时,地质专业一般只提供4个塔 腿位置的地质分层信息,而构建三维模型需要反映 整个塔基范围内的地质分层情况,因此接腿之间的 区域通过插值计算,从而形成分层的地质三维模型, 如图7所示。



图 7 塔基地质模型三维建模示例

4.3 基础模型

输电线路常用的桩基、大板、承台桩等基础形 式,均可通过参数化构建。以桩基础为例,其参数包 括桩基全高 H、直段高度 H₁、扩底斜段高度 H₂、扩底 直段高度 H₃、基础立柱直径d、扩底直径D,三维模



图 8 桩基础三维模型参数

型及参数如图 8 所示。另外,直接读取基础 * .mod 宽度、墙顶宽度等。 文件也可获取基础尺寸信息。

4.4 塔腿模型

通过输入塔腿的三维模型参数包括塔型、单面坡 度、变坡口宽、变坡上折减高度、呼高、接身高、接腿高 等,即可构建塔腿模型,其参数如图9所示。另外, 直接读取铁塔*.mod文件也可获取接腿信息。



图 9 塔腿三维模型参数

- 4.5 防护措施模型
- 4.5.1 参数构建

防护措施主要包括堡坎、护坡、排水沟、防撞桩、 挡土墙等,都可通过参数构建。

1) 排水沟建模参数如图 10 所示,包括上口宽 度、下口宽度、锁口宽度、深度、壁厚等。



图 10 排水沟建模参数

2) 护坡、堡坎、挡土墙建模参数如图 11 所示, 包括型号、外露高度、基脚埋深、基底逆坡高度、基底



图 11 护坡、堡坎、挡土墙建模参数

3) 防撞桩建模参数如图 12 所示,包括外露高 度、基脚埋深、截面宽度、截面长度、间距等。



图 12 防撞桩建模参数

4.5.2 建模方法

防护措施按模型的组成要素和表现形态可分为 节点类和路径类。模型的建模参数对应设施类型, 空间位置控制参数按节点和路径分别对应设置节点 和开放多线段。在三维建模软件中以模型参数为基 元,以空间位置控制参数为设计表达,即可实现防护 措施的参数化建模。



防撞桩三维建模采用节点类绘制法,按照节点 布置单个防撞柱的位置,如图 13(a)所示;程序根据
尺寸参数自动完成建模,如图 13(b)所示。

护坡、堡坎、排水沟、挡水墙三维建模采用路 径类绘制法,按照拐点绘制路径,如图14(a)所示; 程序根据截面尺寸参数自动完成建模,如图14(b) 所示。





4.6 塔位大场景地理信息模型

通过在 GIS 平台加载 DEM 数据和数字正向影 像图(digital orthophoto map, DOM)数据,可构建包 含整个线路工程和塔位的三维地理信息模型。GIS 平台选择易智瑞(北京)软件研发中心有限公司发 布的 ArcGIS 10.7 系统^[13],该系统具有突出的数据 处理能力和兼容性。由于所提研究的目的是完成塔 基设计方案的综合评估,仅使用网络公开的高程和 影像数据即可满足要求,而不需要高精度的 DEM 和 DOM 数据等涉密资料,因此该系统不存在涉密问题。

5 软件实现方案

5.1 程序架构

行业内尚没有专门用于输电线路塔基设计三维 建模的通用软件,因此在开源平台的基础上,自主开 发了一款输电线路塔基设计三维建模软件。该软件 可实现塔位小场景的构建,同时还可导出铁塔、基 础、防护设施的三维模型。由于塔位小场景采用局 部坐标系,因此需经坐标变换才可将模型加载到 GIS 平台构建的塔位大场景中。三维建模软件的程 序架构主要分为功能组件、平台组件和基础技术组 件 3 部分,如图 15 所示。

图 15 中的基础技术组件提供软件的必要技术 支撑。其中, Open Cascade 是一个专业的几何构型 软件,适用于各类参数化零部件的建模, 这里使用 Open Cascade 构建塔腿、基础和防护设施等。VTK 是一个网格操作库,用于将地形图*.dwg 文件进行格 式转换,实现地形的三维建模以及挖填方操作。 SQLITE 是用于管理模型的数据库平台。BCGPControl 是一个控件库。



图 15 塔基设计三维建模软件架构

平台组件为软件提供基础功能,比如命令管理、 工程管理之类。主要服务于交互操作,可满足二三 维联动、多窗口应用的操作需求。

功能组件即软件功能模块,所有基于界面的设 计交互均通过功能组件封装和实现,并提供建模、导 出模型和测距等功能。

通过分析与塔基设计相关的要素,构建全过程 的塔基设计数字化模型。模型通过参数驱动,数据 分布存储在底层数据库中。塔基设计的数据结构是 通过对输入数据的解析,逐步形成分层级的塔基设 计数字化模型。主要层级包括工程级、塔位级、方案 级,如图 16 所示。



图 16 塔基设计数据结构

5.2 程序界面

该软件采用一档多视的界面布局,可以同时查 看一个塔基的俯视二维图、剖面图以及三维视图。 软件功能遵循二三维实时联动的原则进行功能开发,以俯视二维图为操作核心,以三维及剖面图作为 辅助设计视图,帮助设计人员实时检查自己的设计 效果。图 17 为程序界面。



图 17 软件二三维联动界面示例

5.3 操作方法

塔基地形、地质、塔腿和基础模型可直接通过导 入勘测提资和配置成果表批量生成。防护设施建模 可通过设计人员在软件的二维地形图视口中绘制路 径并修改截面参数完成。

6 工程应用实例

下面以某山区线路工程为例,对三维建模方法 进行验证。某塔位位于山脊顶部,A 腿位于山脊后 侧斜坡,坡度为25°~30°;C 腿位于山脊前侧斜坡,坡 度为15°~20°;B、D 腿位于脊顶,坡度为10°~15°。设 计采用人工挖孔桩基础,配置成果如表3 所示。

腿号	腿长/m	基础型号	防护措施
А	20	WKZ16090	
В	17	WKZ16080	六十伊梅
С	18	WKZ16080	开工堡以
D	12	WKZ16090	

表 3 某塔位塔基设计成果

由于余土外运困难,设计方案经评估后采取在 C腿左侧约4m外修筑弃土堡坎的措施,堡坎外露 1.2m,埋深0.8m,长20m,二维设计地形如图18 所示。

将二维设计的成果数据导入三维建模软件 中,然后根据二维设计图在程序中绘制堡坎模型。 点击堡坎模型,软件自动生成剖切断面和属性信息, 如图 19 所示。从图中可以看出,堡坎右侧(黄色方 框内)已埋入土体中,因此需要对方案进一步优化。 重新调整堡坎的路径和露高,使其断面更加合 理,如图 20 所示。堡坎长度从 20 m 减小到 15 m,

理,如图 20 所示。 堡以长度从 20 m 减小到 15 m, 露高从 1.2 m 调整为 1.5 m。



图 18 二维设计地形



(a)三维视图窗口



(b)三维视图窗口图 19 根据二维设计三维建模成果

塔位小场景建模完成后,将模型导出,加载到 ArcGIS平台中。从三维地图视口可以看出,塔位处 于山脊,两侧不适合堆积弃土,修筑堡坎的位置具有 合理性和唯一性,如图 21 所示。



图 20 三维建模成果调整



图 21 模型加载到 GIS 平台

综上所述,经过塔位小场景调整和大场景综合 评估,优化后的方案更加合理准确。

7 结 论

上面基于三维数字化技术,将塔基设计成果转 化为三维模型,实现从"二维图纸绘制"到"三维优 化设计"的转变。采用二三维联动设计和三维场景 仿真模拟的技术,基于二维设计数据自动建立三维 模型,辅助设计人员全面分析塔基设计的合理性和 可行性,从而提高设计质量。

但在 GIS 平台中批量加载模型时,考虑到模型 精度和 GIS 平台的高程数据的精度可能相差较大, 这时需在每基塔附近(约 100 m 范围)地形进行修 正和平滑处理。这一地形修正技术还在研究中。

另外,目前塔基设计三维模型仅能作为方案优 化和展示,后期还需研究将塔基设计数字化成果的 信息传递至建设管理领域的技术以及数据交互方 式^[14-15],实现塔基设计三维模型的导出,并根据需 要提供给相关单位进一步应用。

参考文献

- [1] 杨景胜. 输电线路塔基数字地面建立的研究与实现[J].科技创新导报,2012(5):112.
- [2] 苏智剑,王瑞,朱高杰. 基于 ArgGIS 和 VTK 的等高线 地形图三维可视化研究[J].郑州大学学报(工学版), 2010,31(3):42-45.
- [3] 侯晓燕,崔强,鲁先龙,等. 输电线路高低腿杆塔基础
 配置策略及软件研发[J].地下空间与工程学报,2014, 10(S2):1917-1921.
- [4] 王轶,房正刚,金欢,等.基于 Teigha 的塔基断面图自动绘制及长短腿自动配置技术[J].建筑结构,2016,46(S1):1013-1017.
- [5] 刘旭,范宇,王星,等. 输电线路塔基工程中水土保护 措施的研究[J].资源节约与环保,2017(8):100-103.
- [6] 郭晓俊.输电线路工程山区塔基水保措施经验总结[J]. 机电工程技术,2019,48(4):193-196.
- [7] 王卫.输电线路杆塔及基础设计中的环境保护措施[J].西北水力发电,2005,21(S1):25-26.
- [8] 王高益.输电线路的环保设计[J].四川电力技术, 2007,30(5):52-54.
- [9] 程智余.浅析山区输电线路塔位选择及基础选型设 计[J].工程与建设,2015,29(4):511-521.
- [10] 薛乐.输电线路铁塔长短腿与高低基础配置的优化研 究[D].吉林:吉林建筑大学,2015.
- [11] 王轶,马潇,金欢,等.输电线路三维基础设计场景构 建[C]//第三届智能电网会议论文集.北京:中国电 力科学研究院有限公司,国网电投(北京)科技中心, 《电信科学》杂志社,2018:419-422.
- [12] 国家电网有限公司.输变电工程三维设计建模规范
 第2部分:架空输电线路:Q/GDW 11810.2—2018
 [S].北京:中国电力出版社,2019.
- [13] 易智瑞(中国)信息技术有限公司.易智瑞地理信息 系统 10.7 产品白皮书[EB/OL].北京:易智瑞(中 国)中国信息技术有限公司,2020.
- [14] 国家电网有限公司.输变电工程三维设计模型交 互规范:Q/GDW 11809—2018[S].北京:中国电力 出版社,2019.
- [15] 国家电网有限公司.输变电工程数字化移交技术导则
 第2部分:架空输电线路:Q/GDW 11812.2—2018[S].
 北京.中国电力出版社.2019.

作者简介:

李美峰(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计及数字化设计研究。

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

(四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610041)

摘 要:文中以重庆某山区风电场工程为依托,创新性提出适用于陡峻山区风电场的新型筒承式风机基础。通过对 比分析,新型筒承式风机基础较常规扩展基础在占地和植被的影响、土石方开挖量、弃土量的影响和对水土流失量的 影响等生态环境效益方面具有显著的优势。筒承式风机基础实现了对生态环境的最少破坏,能够有效减少永久占地 面积、土石方开挖量和弃土量、水土流失量,为建设"生态风电"提供良好的示范。

关键词:山区风电场;筒承式;风机基础;生态环境效益

中图分类号:X 36 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0040-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220408

Design for New Tube-supported Wind Turbine Foundation of Wind Farms in Mountainous Areas and Analysis on Its Ecological and Environment Benefits

CHEN Xiaolin, YIN Wujun, ZHANG Tiqiang

(Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Based on a wind farm project in a mountainous area in Chongqing, a new type of tube-supported wind turbine foundation suitable for wind farms in steep mountainous areas is creatively proposed. Through calculation and comparative analysis, the new type of tube-supported wind turbine foundation has more significant advantages in ecological and environmental benefits than the conventional expanded foundations, such as the impact on land occupation and vegetation, soil and rock excavation volume, spoil volume and the amount of soil erosion, which can realize the minimal ecological destruction, effectively reduce the permanent area covered, the oil and rock excavation volume, spoil volume and the amount of soil erosion, and provide a good demonstration for the construction of "ecological wind power".

Key words: wind farm in mountainous areas; tube-supported type; wind turbine foundation

0 引 言

ki2021-b-9)

在碳达峰与碳中和背景下,加速推进清洁能源发展是未来中国能源建设的主要路径和方向。风力发电在提供清洁能源的同时也带来一定程度的生态破坏和水土流失^[1-2]。中国幅员辽阔、地形复杂多样,随着大容量低风速风机的研制成功,越来越多的山区风能具备经济上的开发优势和技术上的开发条件,成为陆上风电开发的重点^[1,3]。但是,山区风电场具有地形复

杂、海拔高、气候恶劣和生态环境脆弱等特点^[4-6], 植被破坏后恢复难度大,在开发过程中引起的生态 破坏和水土流失尤为突出。下面以重庆市某山区风 电工程为依托,创新性提出适用于陡峻山区风电场 的新型筒承式风机基础,并对其产生的生态环境效 益进行了分析,其研究对建设"生态风电"创新模式 具有重要的意义。

1 山地风电场生态环境影响特点

1) 生态环境脆弱, 恢复困难 风电场的生态环境影响主要是施工期永久占地 和临时占地对地表原有生态系统的破坏^[7]。风机 基础、升压站等永久占地将会导致地表植被完全损 失,且一般是不可逆的;吊装场地、施工道路等临时 占地也会一定程度上碾压地表植被,影响区域内植 被覆盖度和植物群落组成,使区域植被生产能力降 低。同时,由于山区生态环境脆弱,植被一旦被破坏 则恢复困难^[8]。但是,山地风电场建设后植被恢复 覆盖率往往不达标,常出现青山挂白的现象,生态恢 复的代价极高。

2) 施工扰动大,水土流失严重

风电场基建开挖、临时堆放土石方等施工活动 将不可避免地扰动原有地貌,建设过程中点、线、面 扰动并存,施工作业面大,使原生地表的覆盖物和土 壤结构遭受严重破坏,土壤抗蚀性降低,加剧土壤侵 蚀强度,且恢复难度大^[9]。风电场建设过程中本身 会产生大量的土石方,基础开挖和填筑等施工活动 严重影响了土层的稳定性,进一步加剧水土流失。

2 简承式风机基础的特点

2.1 设计依托工程概况

筒承式风机基础的设计以重庆某山区风电场工 程为依托,该风电场属于典型的山区风电场,东侧存 在高耸陡崖,且存在岩土崩塌失稳的不良地质作用。 风电机组机位需距离东侧陡崖满足一定安全距离, 大多数机位均移动至西侧的山坡下。采用常规方法 需向下开挖边坡形成风机基础及吊装平台,从而导 致风电机组机位的东侧、东北侧、东南侧普遍存在约 10~30 m 左右的高边坡。常规风机基础将会导致 开挖面积增大,大量增加土石方开挖量和渣土量,造 成严重的生态破坏,且后期恢复难度极大。

2.2 筒承式风机基础的特点

中国陆上风机基础主要结构形式包括扩展基础、梁板基础、桩基础、锚杆基础,其中扩展基础(如图1所示)和桩基础应用最多,但是上述基础不能很好地解决不同地形高差的风机基础问题,导致开挖面大、开挖土石方多、生态环境破坏严重等问题。

参照重庆地区吊脚楼建筑及火力发电厂烟囱特征,针对特殊的陡峻山区地形特点,首次创新性地提

出适用于陡峻山区地形的筒承式风机基础,其具体 的基础形式如图 2 所示。筒承式风机基础可分为 上、中、下 3 个部分:上部为圆形承台,圆形承台内预 埋风机塔筒基础环或预应力锚栓,圆形承台顶部为 与风机塔筒底部连接的圆柱台;中部为适应于调整 坡地高差的圆环筒,圆环筒位于圆形承台边缘下部, 圆环筒与上部圆形承台采用刚接连接;下部为设置 在设计持力层上部、适应于坡地高差调节的圆环形 基础。



图 1 常规扩展风机基础



图 2 筒承式风机基础

筒承式风机基础已在重庆某山区风电场工程进行应用,共6台风机(基础编号为6号、9号、16号、 20号、23号、29号机位)采用筒承式风机基础。

3 筒承式风机基础的生态环境效益分析

风电场在建设过程中对生态环境的影响,主要 体现风机基础开挖等施工活动干扰和扰动原地貌, 造成植被破坏和水土流失^[6]。以重庆某山区风电 场工程为例,将常规的方案 1(大开挖平台+扩展风 机基础)与所设计的新型方案 2(高低吊装平台+筒 承式风机基础)就对占地和植被的影响、对土石方 开挖量和弃土量的影响以及对水土流失量的影响等 方面进行比较分析。

3.1 对占地和植被的影响

风电场风机基础占地属于永久占地,永久占地 面积将对原有植被造成破坏,改变原有土地利用类 型。现将方案1与方案2的永久占地面积、生物损 失量进行对比分析,如表1和表2所示。

由表 1 可知,6 台风机机组均采用方案 2,较常规的方案 1 可有效减少因风机基础及平台施工开挖 面积和永久征地面积,减少面积高达 8896 m²,减少 比例为 36.2%。

风电场建设对植被的影响主要集中在建设过程 中,永久占地和临时占地对植被造成破坏,尤其是风 础永久占地将直接破坏地表植被,导致植被完全损 失^[10]。由表 2 可知,方案 2 的永久和临时扰动地表 面积更少,永久和临时占地造成的生物损失量较方 案 1 分别减少 106.85 t、172.08 t,总损失量较方案 1 减少 43.1%。由此可见,相同地形条件下,简承式风 机基础减少扰动地表优势明显,在控制水土流失方 面效果更佳,更有利于项目区生态环境的保护。

3.2 对土石方开挖量和弃土量的影响

对采用方案1与方案2的土石方开挖量和弃土 量变化情况进行对比分析,说明新型基础在减少土 石方工程量的优势,计算结果见表3。

由表 3 可知,6 台风机机组均采用方案 2 较常规的方案 1 可有效减少因风机基础及平台施工开挖的土石方量(300 695 m³),减少比例为 73.2%。通过分析不同基础形式弃土量可以看出,采用筒承式风

机基础后,风机及风机平台弃土量减少303860m³,减 少比例为75.1%。从生态环保角度分析,土石方开 挖量和弃土量的减少,从根源上减少了水土流失的 来源,有利于水土保持和生态环境保护。同时,弃土 量的减少可减少工程弃土场的数量,进而减少因布 置弃土场扰动地表和破坏植被的面积,达到减少水 土流失、保护生态环境的目的。

3.3 对水土流失量的影响

结合重庆某山区风电场工程区域地形地貌特征、 土壤质地和植被覆盖情况等情况,按照 SL 190—2007 《土壤侵蚀分类分级标准》土壤侵蚀强度分级表,水 土流失强度以轻度、中度为主。根据 SL 773—2018 《生产建设项目土壤流失量测算导则》推荐公式计 算方案1与方案2的水土流失量见表4。

由表 4 可知,6 台风机机组采用方案 1 和方案 2 水土流失总量分别为 174 t、110 t,新增水土流失量 分别为 116 t、73 t,方案 2 较方案 1 的水土流失总量 和新增流失量减少比例分别为 36.8%、37.1%。这 主要是筒承式风机基础贴合陡峻地形的特点进行了 高低基础和高低平台的设计,有效减少了地表扰动 面积和土石方开挖量,从而大大减少了水土流失量, 在控制水土流失方面有积极作用。

机位	方案 1(大开 基础	挖平台+扩展员) 面积/m ²	风机 方案		增减量(方案 2-方案 1)/m ² 增减百	1 ² 增减百分比/%	
6号		5045		3498		-1547	-	30.7	
9号		4117		2798		-1319	-	32.0	
16号	4082			2395		-1687	-	41.3	
20 号		3538		2672		-866	-	-24.5	
23 号		3594		2238		-1356 -3			
29 号		4232		2111		-2121	-	-50.1	
合计	24 608			15 712		-8896	-	36.2	
		表 2	简承式风机	仍基础和扩展风机基础生	主物量损失:	量对比			
		占地面	积/hm ²	单位面积生物	损失生	主物量/t	_ 增减量	增减	
占地性质	植被类型	方案1	方案 2	量/ $(t \cdot hm^{-2})$	方案1	方案 2	(方案2-方案1)	百分比/%	
永久占地	林地	2.460 8	1.571 2	120.11	295.57	188.72	-106.85	-36.2	
吃时上地	林地	2.920 0	1.490 0	120.11	350.72	178.96	-171.76	-49.0	
旧叫白地	草地	草地 0.1500 0		4.58	0.69	0.37	-0.32	-46.4	
今 计		5 530 8	3 1/1 2		646.98	368.05	-278.03	-43.1	

表 1 筒承式风机基础和扩展风机基础永久占地面积对比

29号

合计

64 161

410 975

63 121

404 430

10 368

110 280

		表 3 筒	承式风机基础利	口扩展风机基码	础开挖量和弃土	量对比分析表			
机位	方案 1(大手 扩展风材	开挖平台+ 几基础)	方案 2(高低 筒承式风	吊装平台+ 机基础)	增减量(方案	2-方案1)	增减百分	计比/%	
	开挖方量/m ³	弃土量/m ³	开挖方量/m ³	弃土量/m ³	开挖方量/m ³	弃土量/m ³	开挖方量	弃土量	
6号	96 284	95 244	25 946	24 396	-70 338	-7084 8	-73.1	-74.4	
9号	92 742	91 702	16 439	14 889	-76 303	-76 813	-82.3	-83.8	
16 号	42 135	41 095	13 430	11 880	-28 705	-29 215	-68.1	-71.1	
20 号	57 978	56 938	22 097	20 547	-35 881	-36 391	-61.9	-63.9	
23 号	57 675	56 330	22 000	20 040	-35 675	-36 290	-61.9	-64.4	

表 4 筒承式风机基础和扩展风机基础水土流失量对比分析

-53 793

-300 695

-54 303

-303 860

-83.8

-73.2

8 818

100 570

扣合	方案 1(大) 扩展风根	方案 1(大开挖平台+ 扩展风机基础)		方案 2(高低吊装平台+ 筒承式风机基础)		増减量(方案 2-方案 1)		增减百分比/%	
10 L JLL	水土流失 总量/t	新增流 失量/t	水土流失 总量/t	新增流 失量/t	水土流失 总量/t	新增流 失量/t	水土流失 总量	新增流 失量	
6号	36	24	25	16	-11	-8	-33.6	-33.3	
9号	29	19	20	13	-9	-6	-31.0	-31.6	
16号	29	19	17	11	-12	-8	-41.4	-42.1	
20号	25	17	19	12	-6	-5	-24.0	-29.4	
23 号	25	17	16	10	-9	-7	-36.0	-41.2	
29 号	30	20	15	10	-15	-10	-50.0	-50.0	
合计	174	116	110	73	-64	-43	-36.8	-37.1	

结 论 4

新型筒承式风机新型基础与传统的扩展风机基 础相比,有效减少了风机基础永久和临时占地面积, 降低了植被破坏和生物损失量,减少了土石方开挖 量和弃土量,从而减小了水土流失量,实现了对生态 环境的最小影响。新型筒承式风机基础,主要适用 于地形复杂、生态环境脆弱、植被恢复困难的陡峻山 区风电场,该风机基础的创新设计改善了生态环境 影响,有效缓解了山区风电工程建设的痛点和难点, 为建设"生态风电"提供了良好的示范。

参考文献

- [1] 张荣,陈正洪,孙朋杰.山地风电场开发过程中水土 流失相关问题研究进展[J].气象科技进展,2020, 10(1):47-53.
- [2] 梁改革,郝连安,徐洪霞,等.山地风电场工程水土保持 与生态景观设计初探[J].中国水土保持, 2016(12): 37-39.

张华,刘志远,朱晓玲.山地风电场微观选址复核的研 [3] 究[J].现代电力,2014,31(4):19-23.

- [4] 史东瑞.山地风电场道路设计、施工及运行风险要素分 析[J].电力勘测设计,2004,37(1):4-5.
- [5] 张帅领,张磊,程艳红,等.河南省平原风电和山地风电 差异性研究[J].电力勘测设计,2019(S1):249-252.
- [6] 钱怡伶.湖南山地风电场开发对区域环境的影响及 生态恢复措施研究[J].中国资源综合利用,2018, 36(4):117-119.
- [7] 李国庆,李晓兵,风电场对环境的影响研究进展[J].地 理科学进展,2016,35(8):1017-1026.
- [8] 魏科技,王伟,周训华,等,风力发电场环境影响评价分 析[J].环境科学与管理,2013,38(2):168-171.
- [9] 柴亚凡,周波,罗进选,等.河西走廊风电场道路建设探 讨[J].中国水土保持,2018(7):41-43.
- [10] 段有爱,段禾祥.滇西北亚高山地区风电场植被保护 与恢复对策[J].环境科学导刊,2016,35(S1):6-7.

作者简介:

陈晓琳(1986),女,硕士,高级工程师,从事新能源项目 环境影响评价及竣工环保验收工作。

(收稿日期:2021-12-20)

-86.0

-75.1

山区线路承压水地基基础治理及沉降观测研究

辜良雨¹,刘翔云¹,张利如¹,甘运良²,翟洪利²

(1.中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021;

2.中国南方电网有限责任公司超高压输电公司,广东广州 510663)

摘 要:山区输电线路由于受到交通条件限制,对承压水地基的应对措施有限,且一旦出现基础偏移沉降等问题后, 治理难度很大,严重时甚至会影响到输电线路的安全运行。文中结合工程实例,通过数值模拟对山区输电线路承压 水地基采用直柱大板基础出现的偏移沉降问题进行了分析和治理,并提出了有效的治理措施;通过2年的长期持续观 测数据验证了所提出的治理方法是有效可靠的,可以为今后的工程实践提供指导和借鉴。 关键词:山区输电线路;承压水地基;基础偏移及不均匀沉降;有限元分析;沉降观测 中图分类号:TM 753 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0044-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220409

Research on Ground Treatment and Settlement Observation of Confined Water Foundation for Transmission Line in Mountainous Area

GU Liangyu¹, LIU Xiangyun¹, ZHANG Liru¹, GAN Yunliang², ZHAI Hongli²

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: Due to the limitation of traffic conditions, the countermeasures for confined water foundation of transmission lines in mountainous areas are limited, and once the problems such as foundation deflection and settlement occur, it is very difficult to deal with, and even will affect the safe operation of transmission lines. Combined with an engineering example, the deflection and settlement problem of straight-column big-plate foundation for confined water foundation of transmission line in mountainous area is analyzed and renovated through numerical simulation, and the treatment effect is verified by two years of long-term continuous observation data. The verification results show that the proposed treatment method is effective and reliable, which can provide a guidance for engineering practice.

Key words: transmission lines in mountainous areas; confined water foundation; deflection and uneven settlement of foundation; finite element analysis; settlement observation

0 引 言

承压水具有埋藏深、水头高、易受外力的影响形 成自流水等特点,对地基基础存在较大的危害性。 平原地区输电线路通常采用预制方桩、管桩、沉井、 沉箱或机械施工灌注桩基础等基础形式,可有效降 低承压水的不利影响。西南地区多山少路,道路交 通条件差,输电线路建设施工受到很多外部因素制 约,基础施工机械化率较低,承压水地区通常采用人 工开挖的方式进行板式基础的施工。因此,难以避 免地存在不同程度的地基扰动、回填不均、基坑支护 困难等施工问题,可能导致基础出现不同程度的沉 降和偏移。在承压水的作用下可能导致基础垫层不 规则隆起,并进一步加大沉降和偏移,对输电线路的 安全稳定运行造成较大影响。

目前国内外对于承压水地质条件下的输电线路 柔性板式基础的沉降治理尚无系统的研究^[1-4],结 合云南山区某特高压线路工程实例,数值模拟对山 区输电线路承压水地区采用柔性直柱大板基础出现 的偏移、不均匀沉降等问题进行了分析,提出了有效 的治理措施,并通过近2年的长期持续观测对治理 效果进行了实践验证。验证结果表明所提出的治理 措施具有良好的效果,对类似工程问题的处理具有 借鉴和推广价值。

1 承压水相关规定

1.1 承压水定义

建筑工程中通常将充满于2个稳定隔水层(或 弱透水层)之间的含水层中的重力水,称承压水,如 图1所示。



图1 承压水埋藏

承压水主要有以下特性:1)承压性,承受静水 压力;2)补给区、承压区和排泄区的分布较为明 显;3)补给区具有潜水的特点;4)埋藏深度大,动 态稳定。

1.2 承压水地基设计和施工要求

国内关于山区输电线路承压水地基基础设计和 施工的相关理论和案例较少,仅有限的几本规程规 范做出了基本要求如下:

1)GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[6]

附录 W.01 条规定:当上部为不透水层,坑底下 某深度处有承压水层时,如图2所示,基坑底抗渗流 稳定性可按式(1)验算。

$$\frac{\gamma_{\rm m}(t+\Delta t)}{p_{\rm w}} \ge 1.1 \tag{1}$$

式中: γ_m 为透水层以上土的饱和容重, kN/m^3 ; $t+\Delta t$ 为透水层顶面距基坑底面的深度,m; p_w 为含水层水 压力, kPa_o

2)GB 1004—2015《建筑地基基础工程施工规范》^[7] 第 7.3.4条规定:承压含水层顶埋深小于基坑开 挖深度,应采取有效的降水措施,将承压水水头降低 至基坑开挖面和坑底以下,如图3所示。当验算基坑 承压水稳定性不满足式(2)要求时,应通过有效的减 压降水措施,将承压水水头降低至安全水头埋深以下。



式中:k为基坑抗承压水稳定性系数; γ 为土的容重, kN/m^3 ;H为基坑底距承压含水层顶板的距离,m; γ_w 为水的容重, kN/m^3 ;h为承压水头高于含水层顶板 的高度, m_o



图 3 承压含水层

2 工程案例分析

2.1 案例概况

西南地区某特高压直流线路工程 AJ106 塔位 C、D 腿基础垫层施工后出现基底隆起现象。经现 场勘察,C、D 腿基坑开挖未按设计要求支护,且开 挖的土石方未按设计要求外运,而是在基坑周边堆 放形成集中堆载,C、D 腿已浇筑的基础垫层局部有 隆起现象,如图4所示。

AJ106 塔位于中山斜坡中下部,整体地形坡 度为10°~15°。基本地质条件为:塔位0~9.8 m 为可塑粉质粘土混碎块石;9.8~13.7 m 为稍密碎石; 13.7~17.1 m 为强风化泥岩,再以下为中风化泥岩;勘 探期间地下水深 10.4 m,静止水位 0 m,为承压水。



图 4 基础垫层隆起



图 5 AJ106 塔位各腿相对位置

该塔位处于大片农田中,因塔位附近无交通条件且塔位下坡侧有民房和大棚等设施,设计采用了 直柱板式基础,各腿基础配置均为 DJ6563,底板宽 6.5 m×6.5 m,基础埋深 5.4~6.0 m。各腿相对位置 见图 5 所示。

结合现场调查情况研究表明:该基坑未支护,也 未按设计要求放坡,坑边有大量弃土堆载;基坑开挖 后长时间暴露,在承压水作用下造成基坑一定程度 的隆起。因此,确定采用浆砌块石回填反压的应急 处理措施。考虑到基底扰动、回填土沉降固结等不 利因素,对基础地脚螺栓采取了加长措施。

采用浆砌块石反压处理后,经观测,未见继续隆起。基础浇筑回填完成后,经过测量,C、D 腿基础 高程与设计理论值相比有下沉,且C、D 腿之间距离 较设计理论值减小约60 mm。根据隐蔽工程验收记 录分析,上述偏移沉降主要发生在基础浇筑完成后。

2.2 基础沉降影响数值分析

根据 AJ106 塔位现场实际情况,结合 SmartTower 铁塔计算软件和 ANSYS 有限元分析软件,开展了基 础沉降对基础和铁塔的影响分析,并对基础沉降的 治理效果进行了数值分析,为制定基础处理方案提 供了依据。

2.2.1 沉降对基础的影响分析

AJ106 塔转角为左转 20°04′,大风运行工况下, A、B 腿为下压腿,C、D 腿为上拔腿。根据各主要施 工阶段,基础加载分析分为 3 个阶段。

阶段 1:基础回填完成后,各腿承受的回填土及 基础自重产生的下压力约 6116 kN。

阶段 2:铁塔组立完成后,各腿增加下压荷载 320 kN,水平荷载约 38 kN。

阶段 3:架线完成后,架线后基础作用力理论极 限值如表 1 所示,表中: T_{max} 为最大上拔力; T_x 、 T_y 分 别为最大上拔力对应的横担方向和垂直横担方向的 水平力; N_{max} 为最大下压力; N_x 、 N_y 分别为最大下压 力对应的横担方向和垂直横担方向的水平力; 正、反 向风速为设计风速 27 m/s。

表1 架线后基础作用力

丁况米刑	井杖 配日		基础作用力/kN							
工机关型	增越	T _{max}	$T_{\rm X}$	$T_{\rm Y}$	$N_{\rm max}$	$N_{\rm X}$	$N_{\rm Y}$			
正向风	C `D	3068	-486	441						
	A \B				-3742	-593	494			
	C `D				-1829	294	-236			
反间风	A \B	917	158	-144						
准永久	C 'D	1244	-184	189						
	AS				-2268	-318	298			

C、D 腿基础施工全过程加载情况分析见表 2。

表 2 C、D 腿基础加载情况分析

阶段	工况	作用力/kN	增幅%
阶段1:基础回填后		-6116(下压)	
阶段2:铁塔组立后		-6500(下压)	6
	正向内	3068(上拔)	-150
阶段3:架线后	反向风	-1829(下压)	-70
	准永久	1244(上拔)	-120

基础沉降会引起基础水平力明显增大,沉降前 后的最大基础作用力对比见表3。

表 3 沉降前后基础作用力对比

中本	状胞		基础作用力/kN							
扒心	增越	T _{max}	$T_{\rm X}$	$T_{\rm Y}$	$N_{\rm max}$	$N_{\rm X}$	$N_{\rm Y}$			
沉降前	C 、D	3068	-486	441						
	A、B				-3742	-593	494			
沉欧丘	C `D	3498	-637	776						
们唯口	A \B				-4079	-765	825			
增大比例		1.14	1.31	1.76	1.09	1.29	1.67			

依据表1-表3可以得出如下结论:

1)铁塔组立完成后,相比当前基础回填的状态,其下压荷载增加约6%,对地基变形影响较小。

2)架线完成后,在各类计算工况下 C、D 腿基础理 论上均承受上拔力,无下压力,对地基变形是有利的。

3)架线完成后,偶尔存在反向风作用。虽然此时 C、D 腿基础可能产生下压荷载,但下压力远小于铁塔组立完成后的下压力,且反向风属于瞬时荷载, 对地基变形影响也非常微小。

4)所有工况作用下各基础(包括 D 腿偏心受力 基础)在考虑基础沉降后的承载力经均满足要求, 无需对基础本体进行特殊处理。

2.2.2 沉降对铁塔的影响分析

输电线路铁塔基础沉降分为均匀沉降和不均匀 沉降。工程实践和理论计算分析表明:1)各腿的均 匀沉降对铁塔受力影响较小;2)两腿稳定、其余两 腿同步沉降也基本没有影响;3)各腿都不均匀沉降 且持续加大会导致铁塔各控制尺寸发生改变,产生 较大的次内力,对杆件受力产生不利影响。

有限元计算分析表明,当 AJ106 塔位各腿的相 对不均匀沉降达到 20 mm 时,理论上会引起塔腿以 上第 2 个隔面角部斜材,见图 6(a)中标红杆件,螺 栓抗剪强度不足。补强后继续加大不均匀沉降至 28 mm 时,塔腿以上第 2 个隔面交叉斜材超限破坏, 见图 6(b)标红杆件。

因此,治理方案首先需采取有效措施,减小各腿 的不均匀沉降,并在后期分阶段持续监测,一旦不均 匀沉降值接近20mm,就须立即采取应急处理预案, 如打临时拉线、加垫钢板等。



2.3 基础处理方案确定

相关研究表明^[8],基坑未采取降排水措施、垫 层浇筑前基底有扰动且未处理、未按规定进行放坡 和支护、回填时机械碾压等是造成输电线路大板式 基础不均匀沉降的主要原因。

对 AJ106 塔位现场开展了补充勘探,包括探坑、 探井和地质点调查,并进行了工程地质钻探、标贯试 验和土工试验,再次确认了场地稳定性、地质分层情 况与原设计一致。根据补充勘探及土力学分析结 果,并结合现场实际情况确定基础的偏移沉降主要 由以下因素造成:

1)基础浇筑后,重力荷载增加,使扰动土进一步压实,引起基础沉降;

2)回填的浆砌块石之间存在空隙,基础浇筑和 基坑回填后,受压力影响,浆砌块石被挤密压缩,间 隙减小,引起基础偏移和不均匀沉降;

3)反压用的浆砌块石未满浆满铺且基础未按 要求分层回填夯实,如图7所示,以及单侧施工和反 复碾压等因素导致了基础偏移和不均匀沉降进一步 加大。



图 7 浆砌块石反压施工现场

针对 AJ106 塔位基础不均匀沉降和偏移问题, 根据前述现场调查和数值模拟计算结果,分析认为 目前基础根开及相对高差已不满足验收规范要求, 需采取下列处理措施:

1)不均匀沉降矫正:在 C、D 基础加垫钢板,减 小基础顶面高差至满足验收规程要求,对于加垫钢 板后基础顶面与塔脚板间的缝隙,按验收规程要求 采用水泥砂浆回填密实。

2) 偏移矫正: 重新加工 D 腿塔脚板, 通过调整

塔脚板上地脚螺栓孔位,保证铁塔各腿根开满足验 收规程要求。对基础进行偏心受力验算,满足承载 力要求。

采取上述处理措施后,基础不均匀沉降和偏移 问题得到了有效处理,各项参数均满足现行输电线 路施工及验收规程^[9]的相关要求。

3 治理效果长期观测验证

根据工程经验,在后期组塔、架线施工过程中由 于施工扰动和杆塔加载可能会导致基础沉降和偏移 进一步扩大。同时,该工程为特高压直流线路工程, 输送容量巨大,作为南方电网的骨干输电网络,不允 许其遗留安全隐患。因此,对 AJ106 塔位从施工到 运行持续进行了为期近 2 年的基础沉降和偏移观 测,对治理效果进行了充分验证。

3.1 长期观测方案

AJ106 塔位在 2019 年 10 月完成基础浇筑,2020 年 3 月完成铁塔组立,2020 年 5 月完成架线,2020 年 8 月竣工投运。根据相关规范^[9-11]中沉降观测的要 求,对 AJ106 塔位制定了更为严格的长期观测计划, 整个观测期为 2 年,共计观测 75 次,详见表 4。

本次持续观测分别在 AJ106 塔位各腿基础顶 面、塔脚板及地脚螺栓上固定测点,并通过在 100 m 外农房墙壁贴反光片对测量数据进行高精度修正,始 终将人工持镜造成的测量误差影响控制在毫米级。

3.2 观测结果

虽然铁塔组立期间频繁有大型施工机械进出塔 位,对各腿基础回填土层反复碾压,对观测数据有一 定影响,但是各项观测数据均未出现持续扩大的变 化趋势。各项数据指标变化主要是由于基础地基自 然沉降、频繁持续降雨回填土沉积固结以及人工持 镜测量误差3个因素共同作用的结果。

表 5 的根开数据表明, AJ106 塔位各施工阶段 的根开值均满足现行施工及验收规程^[9]对根开误 差不大于±0.2%的要求。

图 8 为 AJ106 塔位各基础根开变化趋势图,可 以看出基础根开前期变化幅度相对稍大,但是到 2020 年 7 月以后根开值已基本收敛趋于稳定状态。

表 6 的各腿基础沉降数据表明,自 2020 年 9 月 30 日至 2021 年 11 月 5 日的 100 天内, AJ106 塔位 各腿基础的最大沉降速率均小于 0.04 mm/d,满足 建筑变形测量规范^[11]对沉降速率的要求,基础沉降 已经达到了稳定状态。

4 结 论

上面结合工程实例,通过理论和数值模拟对山 区输电线路承压水地基采用直柱大板基础出现的偏 移沉降问题进行了分析和治理,并结合2年的长期

	阶段	时间节点			观测	频率	121	实际观测次数		
铁塔	组立前	2019-1-2	2019-1-28 至 2020-3-11			/月	3次(春节	和疫情影响,少1	次)	
铁塔	组立中	2020-3-17 至 2020-3-25			1次/天 83			下雨影响,少1次)		
铁塔	组立后	2020-3-26 至 2020-4-21			1次	/天	29次(7	有两天为每天2次)	
张力	放线中	2020-4-22 至 2020-5-8			1次/天 19次(有两天为每天2次)	
张力	放线后	2020-5-15 至 2020-5-31			1次	/周		3次		
竣工	验收后	2020-6-	-30	2 次/月			8次			
2020-11至2021-5			5	1次/2月 3次			3次			
上柏	按运后	2021-	5至2021-1	1	1次/3月 2次					
				表 5 现场观	见测根开数	据				
阳旦	理込担工/	2020-3-11(组塔前)	2020-3-26(2020-3-26(组塔后) 2020-5-6(架线后) 2021-11-5		
加区与	理比很开/mm	测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%	测量根开/mm	误差/%	
AB	17 913	17 921	0.04	17 917	0.02	17 922	0.05	17 927	0.08	
BC	17 518	17 530	0.07	17 534	0.09	17 536	0.10	17 545	0.15	
CD	17 740	17 729	-0.06	17 732	-0.05	17 731	-0.05	17 724	-0.09	
AD	18 215	18 206	-0.05	18 204	-0.06	18 225	0.05	18 237	0.12	

表 4 AJ106 塔位沉降偏移长期观测计划



图 8 各腿基础正面根开变化趋势

表6 各腿基础沉降值数据

		A 腿]	B 腿			C腿			D腿	
测量时间	测量值/ mm	沉降量⁄ mm	沉降速率∕ (mm・ d ⁻¹)	测量值/ mm	沉降量/ mm	沉降速率/ (mm・ d ⁻¹)	测量值/ mm	沉降量⁄ mm	沉降速率∕ (mm・ d ⁻¹)	测量值 /mm	沉降量/ mm	沉降速率∕ (mm・ d ^{−1})
2020-9-30	1 795 671.73			1 798 665.40			1 798 482.67			1 796 506.93		
2020-11-3	1 795 672.70	0.97	0.030	1 798 666.40	1.00	0.030	1 798 483.23	0.56	0.020	1 796 507.60	0.67	0.02 0
2021-1-6	1 795 673.24	0.54	0.010	1 798 666.55	0.15	0.000	1 798 482.17	-1.06	0.020	1 796 507.43	-0.17	0.000
2021-1-6	1 795 673.24	0.54	0.010	1 798 666.55	0.15	0.000	1 798 482.17	-1.06	0.020	1 796 507.43	-0.17	0.000
2021-3-3	1 795 672.30	-0.94	0.020	1 798 667.40	0.85	0.020	1 798 483.23	1.06	0.020	1 796 508.06	0.63	0.010
2021-5-7	1 795 674.07	1.77	0.030	1 798 668.35	0.95	0.010	1 798 482.93	-0.30	0.000	1 796 508.03	-0.03	0.000
2021-5-7	1 795 674.07	1.77	0.030	1 798 668.35	0.95	0.010	1 798 482.93	-0.30	0.000	1 796 508.03	-0.03	0.000
2021-8-10	1 795 672.53	-1.54	0.020	1 798 668.10	-0.25	0.000	1 798 481.28	-1.65	0.020	1 796 505.90	-2.13	0.020
2021-8-10	1 795 672.53	-1.54	0.020	1 798 668.10	-0.25	0.000	1 798 481.28	-1.65	0.020	1 796 505.90	-2.13	0.020
2021-11-5	1 795 673.97	1.44	0.020	1 798 669.90	1.80	0.020	1 798 482.77	1.49	0.020	1 796 507.83	1.93	0.020
总沉降		2.24	0.006		4.50	0.011		0.10	0.000		0.90	0.002

持续观测对治理效果进行了验证。验证结果表明, 采用所推荐的治理方法是有效可靠的,可以为今后 的工程实践提供指导。

针对山区输电线路承压水地基建议采取以下措施,可有效减小或消除基础偏移沉降等可能出现的 各类问题:

1) 在交通条件具备前提下,承压水地基建议优 先采用灌注桩基础,穿透承压水层,同时应采用有效 的降水、排水和防护措施; 2)承压水地基采取大开挖基础时,应根据承压 水埋深、水头高度等参数,进行基坑抗渗流稳定性计 算,并加强坑壁支护,严禁在坑口堆载;

3) 对承压水水头过大导致基底隆起的,应立即 采取反压措施,如浆砌块石反压;

4)应加强现场施工监督,按要求采取坑壁支 护、弃土外运、基坑分层回填夯实以及反压的浆砌块 石应满浆满铺等保证施工质量的措施;

5) 对基础可能发生偏移和不均匀沉降的塔位

基础,应适当加大地脚螺栓孔径和出露长度,以便后 期调节塔脚板高度,抵消偏移和不均匀沉降对铁塔 的不利影响;

6)各腿基础不均匀沉降加大后可能首先导致腿部以上隔面斜材和螺栓失稳破坏,对可能出现不均匀沉降塔位的上述杆件和螺栓应进行适当加强处理;

7)施工期间应定期进行基础偏移、沉降观测, 尤其是基坑回填前必须采集相关数据,一旦发现问 题及时处理,消除隐患。

参考文献

- [1] 季善浩,李勃.煤矿采空区 220 kV 输电线路转角塔基 础沉降及处理[J].山东电力技术, 2011(2):30-33.
- [2] 毛吉贵. 输电线路运行直线塔微倾治理技术探索与实践[J].水电能源科学,2010(11):140-142.
- [3] 熊卫红,刘先珊,李正良,等. 500 kV 输电线路基础沉 降铁塔的可靠度分析[J].电力建设, 2015,36(2):41-47.
- [4] 李志宏, 汪春凤. 750 kV 线路直线铁塔基础沉降安全评 估[J].城市建设理论研究:电子版,2015,5(10):25-26.
- [5] 麻坚,袁建国,应健,等.山区输电线路转角塔压力型锚

(上接第10页)

地调配电网应用,建设负荷侧资源聚合建模、监视、控制等功能,实现分布式电源、充电桩、可控负荷 等设备的监视、分析和控制功能。配电网应用对不 同类型、不同区域的可调节负荷资源进行汇集和优 化控制,解决可调节负荷资源数量多、种类多、部分 单体容量偏小的问题。最后,基于云端和本地的主 配网一体优化控制目标和策略,完成源网荷储协同优 化、柔性控制,从而实现了广域区域主配一体化控制。

4 结 论

前面立足于"双碳"战略和建设新型电力系统 的背景,针对源网荷储协调优化问题,提出一种主配 一体调度控制系统建设方案,以云端部署和本地部 署相结合的形式,在广域范围内实现源网荷储协同 优化互动,有效提升源网荷储间的协调能力和清洁 能源的消纳水平。

参考文献

- [1] 彭自友,钟苏帆,潘大恩,等.地区智能电网调度控制系 统研究[J].电气开关,2021,59(6):25-29.
- [2] 张振伟,赵晋泉,韩佳兵,等.考虑大量分布式电源接

索承台基础研究[J].浙江电力,2019,38(7):53-57.

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设 计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版 社,2011.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础工 程施工规范:GB 51004—2015[S].北京:中国计划出版 社,2015.
- [8] 陆国智,王彤,李从刚.大板式基础不均匀沉降原因分析及控制措施[J].吉林电力,2013,41(1):46-48.
- [9] 国家能源局.±800 kV 及以下直流架空输电线路工程 施工及验收规程:DL/T 5232—2010[S].北京:中国电 力出版社,2010.
- [10] 中国电力企业联合会.电力建设施工技术规范 第1 部分:土建结构工程:DL 5190.1—2012[S].北京:中 国电力出版社, 2012.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑变形测量规 范:JGJ 8—2016[S].北京:中国建筑工业出版社, 2016.

作者简介:

辜良雨(1979),男,高级工程师,主要研究方向为输电 线路结构设计。 (收稿日期:2021-11-12)

入的主配网协同优化控制[J].电网与清洁能源,2017, 33(7):110-115.

- [3] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动配 电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制, 2022,50(1):167-173.
- [4] 游大宁,刘航航,鲍冠南,等.源网荷储多元协同调度体 系研究与实践[J].浙江电力,2021,40(12):20-26.
- [5] 嵇文路,徐春雷,余璟,等.调配一体化电网调度控制
 系统建设模式及方案研究[J].电力工程技术, 2018, 37(3):61-66.
- [6] 肖贤.电网调度控制系统主配网一体化建设模式研究[J].通信电源技术,2019,36(1):54-55.
- [7] 史清芳,唐卫华,刘胜利,等.强耦合主配一体化智能 调度控制系统建设方案适应性分析[J].电工技术, 2021(19):11-13.
- [8] 贾亚飞,刘海峰,杨立波,等.省地协同主配一体化调度技术支持系统的研究[J].河北电力技术,2021,40(3):67-71.

作者简介:

黄天意(1990),女,硕士,工程师,从事电力调度自动化 系统设计工作;

李晨昕(1992),女,助理工程师,从事电力调度自动化系统设计工作;

刘玥伶(1992),女,硕士,助理工程师,从事电力调度自动化系统设计工作。 (收稿日期:2022-03-10)

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

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:以四川电网为例,电网滑坡隐患具有点多面广、隐蔽性强等特点,传统的人工排查显得势单力薄,无法满足山 区电网大范围滑坡隐患识别、滑坡变形分析的要求和精度。文中提出以卫星遥感、无人机遥感和地面调查为载体,发 挥多域技术手段优势,包括卫星遥感覆盖范围广、重复观测能力强,空基遥感机动能力强、分辨率高等优势,实现"普 查""详查"和"调查"多维度手段解决"如何从源头上识别电网滑坡隐患"的难点。以某 500 kV 架空输电线路昭觉区 域为研究对象,成功开展了基于"三查"技术体系的架空输电线路滑坡隐患早期识别。

关键词:电网滑坡;早期识别;"三查"体系

中图分类号: P 642 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954 (2022) 04-0051-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220410

Multiple-domain Early Detection Technology and Its Application to Potential Landslide in Power Grid

BU Xianghang, CAO Yongxing, WU Chi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Taking Sichuan power grid for example, the potential landslides in power grid covers a wide range and is hard to be detected. The traditional manual investigation is weak, which cannot meet the requirements and accuracy of potential landslide detection and landslide deformation analysis in a wide mountainous area. Satellite remote sensing, unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing and ground survey technology are proposed to be carriers, and it will bring into full play the advantages of multiple-domain technology, including the wide coverage and strong repetitive observation ability of satellite remote sensing, and strong maneuverability and high resolution of UAV remote sensing, so as to realize the multidimensional means such as "general investigation", "detailed assessments" and "investigation", which solves the difficulties of detecting potential landslide from the source. Taking a certain 500 kV overhead transmission as research object, the early detection of potential landslide is successfully carried out based on an integrated space-air-ground investigation system.

Key words: landslide in power grid engineering; early detection; space-air-ground investigation system

0 引 言

国际能源电力设施互联互通的合作进程,促进 了电力工程建设发展。输电线路穿越地理环境多 样、地质条件恶劣等区域,面临着崩滑等地质灾害分 布广、防范难度大等挑战^[1]。以四川省为例,电网 滑坡分布特征为:1)输电线路长约 70 000 km,走廊 空间地形地质环境脆弱,滑坡点多面广,植被覆盖隐 蔽性强,已建立台账地质灾害点近 4000 处;2) 汶川 地震后,"崩滑-碎屑流-堰塞湖-溃决"链式灾害突 显,如 2018 年"10 · 10"金沙江白格大滑坡堰塞体 泄洪和 2018 年"12 · 9" 叙永大滑坡不同程度地造 成多条 10 kV 线路停运、断线,共 9000 余户停电; 3) 四川省地跨中国二、三级地形台阶,地形高差悬 殊,输电线路穿越高海拔、高寒或无人区(人不能 至)的滑坡点难以观测。针对架空输电线路滑坡空 间发育分布的不确定性和和隐蔽性,传统的人工排 查显得势单力薄,传统手段很难提前发现此类灾害 隐患。推进架空输电线路滑坡隐患期识别,是防范

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000401);国网四川省电力 公司科技项目(521997200032)

化解重特大地质灾害安全风险的关键。

国际上已利用不同类型传感器,搭载不同信息 获取平台对滑坡识别及监测预警,国内也多次提出 "从注重灾后救助向注重灾前预防转变",多次强调 "发现隐患、监测隐患"。在地质领域,国内外研究 人员结合卫星遥感、无人机等技术,开展了地质 灾害早期识别及变形特征分析^[2-8],但合成孔径雷 达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术在获取区域地表形变时间维上的演化 情况具有局限性,无人机摄影测量技术与机载激光 雷达(light detection and ranging, LiDAR)技术,无法 实现大范围连续跟踪微小形变特征。在电力领域, 文献[9]利用 3S 技术集成分析了丹巴、康定输电走 廊地质灾害遥感特征及预警对策: 文献 [10] 利用光 纤传感器和 GPRS 分析了四川某输电走廊滑坡的变 形特征。然而所运用的手段较为单一,无法满足山 区电网大范围滑坡隐患识别、滑坡变形分析的要求 和精度, 亟需可靠有效的地质灾害隐患早期识别、调 查和监测预警方法。

卫星遥感覆盖范围广,重复观测能力强,适合对 大范围灾害孕灾环境开展全天时全天候的大范围普 查识别;空基遥感机动能力强,分辨率高,适合对重 点区域进行变形特征详查识别;地面调查适合采集 重点区域地质特征因素。下面以卫星遥感、无人机 遥感和地面调查为载体,利用多域立体识别手段,构 建"大范围普查""重点详查""地面核查"技术体系 (以下简称"三查"技术体系),对电网滑坡隐患开展 全方位、全链条的早期识别。

1 "三查"技术体系构建

"三查"技术体系总体思路是:利用多域立体式 隐患识别技术手段,对电网目标区域和点位进行持 续普查和详查;通过地面调查隐患点的特征等的分 析和验证,提出相应的措施及建议,获得区域尺度、 场地尺度兼具的电网地质灾害隐患早期识别技术手 段。多域"三查"技术体系及空间维度如图1所示。

不同空间维度技术手段需要相互配合。现有的 卫星系统可以缩短重访周期,虽覆盖范围广,可以监 测孕灾环境、地表覆被变化等,但如果不与低空和地 面传感器相互配合使用,难以发现重大滑坡灾害发 生过程中相互关联的各种因素的精细内容,对结构 复杂、影响因素众多、快速变化的灾害只能观测到结果,而不能有效地分析成因,难以跟踪事件的过程从 而造成真实性检验和预测变化趋势的缺失。基于上 述因素,可充分利用天基遥感、空基和地面调查的技 术优势,结合隐患对象的空间维度,构建基于"三 查"技术体系的立体式隐患识别方法。



图 1 多域"三查"技术体系及空间维度

2 "三查"体系内容及应用

2.1 电网大范围滑坡隐患普查

基于卫星遥感技术,建立电网滑坡地质灾害判 别准则,探测电网大范围地表形变,给出大范围滑坡 隐患普查和趋势预警,筛选出变形重点区域。

所提方法利用卫星差分合成孔径雷达干涉测量 (differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术,通过某 500 kV 架空输电线路昭觉 区域不同时相的升降轨雷达影像消除几何畸变引起 的探测盲点,利用重复轨道观测获取的多时相雷达 数据,时序差分干涉测量高精度提取可疑地质灾害 形变信息,反演可疑地质灾害地表形变平均速率和 时间序列形变信息。订购了加拿大的 Radarsat-2 卫 星 SAR 图像5幅,全极化模式,分辨率为4 m×5 m,覆 盖范围为 25 km×25 km,时间为某年 5 月 25 日至 8 月 26 日,每隔 24 天一幅,共5 幅。

昭觉区域地形形变提取结果如图 2—图 5 所示。 根据观测区域的形变结果以及输电铁塔经纬度,可以判断 282 号、275 号和 355 号铁塔周边也存 在两处滑坡隐患点,但距离较远对铁塔未构成威胁。 313 号铁塔所在区域在 5 月 22 日至 8 月 26 日期间 地表形变速率为-0.3 cm(负号代表地形下降),因 此可估算出从 5 月至 9 月 313 号铁塔区域地表下降 约为-1.2 cm。最后,锁定 313 号铁塔滑坡隐患点为 重点分析对象。



图 2 SAR 图像上观测区域处位置



图 3 高精度光学图像



图 4 5月 25日—8月 29日地表垂直形变速率



图 5 5月 25日—8月 29日地表水平形变速率

2.2 电网重点滑坡隐患点详查

基于无人机数字摄影测量、机载 LiDAR 技术进 行灾害体形变特征的早期识别与成灾前兆信息的快 速捕获等关键技术,研发机载 LiDAR 影像和无人机 数字摄影测量,进行重点疑似区域的地质灾害隐患 详查,初步确定地质灾害隐患点。若研究区域植被 较少,可仅开展无人机低空摄影测量,实现无人机实 景三维模型的解译;若植被茂密、遮挡严重,则采用 机载 LiDAR 剔除植被覆盖,开展地表微形变信息的 定量提取,如体积方量几何尺寸测量、地质分区、形 变特征等。

研究区滑坡特征如下:313 号—314 号铁塔位滑 坡位于昭觉县解放沟乡,坐标位置为 N 27°52′26″、 E 102°33′51″,地貌单元为中山地貌,以构造作用为 主。出露地层岩性以褐灰色紫色砾岩为主,夹有灰 色、灰黑色砂岩、泥岩,局部含薄煤层和炭质泥岩, 基岩产状近水平 93°∠3°~8°。滑坡后缘边界呈 "圈椅"状,滑坡壁坡角为 52°左右,地表坡度为 20°~40°,上缓下陡,主滑方向为 52°,纵向长约 52 m, 前缘宽约 70 m,后缘与前缘高差约 18 m,堆积厚度为 4.0~8.0 m,堆积方量约 (1.5~3.0)×10⁴ m³。

利用无人飞机航测技术采集 313 号铁塔滑坡隐 患点的三维影像,可见 313 号铁塔下方滑坡边界较 清晰,滑坡变形迹象明显,局部变形强烈,可以初步 判定该滑坡目前正处于蠕滑变形阶段,滑坡特征分 析如图 6 所示,对 313 号铁塔的安全运营有直接威 胁。从影像上可以看出,在 313 号铁塔下方已经修 建布设挡墙和斜坡下部构锚索,在坡脚位置沿公路 已修建抗滑挡土墙。利用无人机遥感技术,初步识 别出 313 号铁塔滑坡边界特征及变形迹象,验证了 锁定架空输电线路滑坡隐患重点点位的准确性。



图 6 313 号铁塔滑坡区域无人机三维影像

2.3 电网重点滑坡隐患地面调查

对重点滑坡区域开展地面调查,如利用地质雷 达探测技术,紧密结合现代遥感观测解译成果,掌握 地质结构组成、形成机制、变形特征及稳定性状态等 精细化识别。

所提方法利用地质雷达探测技术和人工现场勘查,结合现代遥感解译成果,掌握313号铁塔滑坡变形特征、破坏原因,提出相应的防治措施。从而最后验证"三查"早期识别技术体系的可行性。

根据野外调查,坡体周边地下水出露,313 号铁 塔滑坡体上部有次级滑坡发育,上部挡土墙有较大 的贯穿裂缝发育,整个挡墙裂缝发育且贯穿,裂缝宽 度较大。其主要原因是墙后次级滑坡沿主滑方向下 滑,挤压挡土墙,产生墙体不均匀沉降裂缝及下部的 横向挤压裂缝。

利用地质雷达探测 313 号铁塔滑坡内部结构及 滑坡范围,如图 7 所示。探测结果显示地层基覆交 界面清晰,已滑动区域部分地下存在大量的拉张裂 缝,部分区域可以探测到滑面,地下水存在局部 富集之处。根据探测结果,确定了滑坡性质为牵 引式滑坡,下方坡脚的开挖带来上方坡体的失稳 并逐级上传。

根据上述研究成果,利用光纤传感技术,目前已 在该滑坡体上布设 15 个光纤传感器,包括裂缝、倾 斜、降雨量等传感器,对 313 号铁塔倾斜、坡体变形 和降雨量进行在线监测。

3 结 论

国际能源电力设施互联互通的合作进程,促进 了电力工程的建设发展,输电线路势必穿越地理环 境多样、地质条件恶劣等区域。所提方法分析了四 川电网地质灾害分布特点,引进了先进遥感技术,拟 重点解决"如何从源头上识别电网滑坡隐患"这个 难点,并得出以下认识及思考:

1)四川电网输电线路线性分布广泛且穿越高山、高寒、地震带等地质脆弱区域,四川电网地质灾 害分布呈现出点多面广、隐蔽性强的特点,且链式灾 害对输电线路的影响突显。

2)卫星遥感技术应用于电网地质灾害隐患的 识别中,其主要优势表现在对电网区域大范围扫描 普查,但光学遥感易受天气影响,而 InSAR 受复杂 地质和植被影响较大,且机动性都不强。电网灾害 识别需要全方位的信息,需配合空基遥感使用,提高 识别对象的分辨率和时效性,建立电网地质灾害隐 患早期识别"三查"技术多域协同指挥模式。



图 7 313 号铁塔基滑坡地质雷达探测剖面与解释图

电缆隧道火灾事故特点与灭火系统研究综述

曾晓亮¹,李富祥¹,李明伟²,谭文强²,宋 宇³,王方强¹

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;2.国网四川省电力公司,四川成都 610041;3.国网四川省电力公司绵阳供电公司,四川 绵阳 621000)

摘 要:基于近年来国内外电缆隧道火灾事故统计数据,文中总结了电缆隧道火灾事故发生的原因和特点,详细介 绍、分析了目前应对电缆隧道火灾的各种消防灭火系统,如水喷雾灭火系统、高压细水雾灭火系统、气体灭火系统、气 溶胶灭火系统、超细干粉灭火系统等。针对不同电缆隧道消防灭火系统的选择提出了推荐建议,认为对于保护长距 离、大容积的电缆隧道,应优先考虑高压细水雾灭火系统,其次为超细干粉灭火系统;对于电缆接头或其他局部灭火 重点防护区域可考虑超细干粉灭火系统等;不建议在长距离、大容积的电缆隧道内使用气体灭火系统、水喷雾灭火系统

关键词:电缆隧道;综合管廊;火灾事故;灭火系统 中图分类号:U 45 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0055-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220411

Research Review on Characteristics of Cable Tunnel Fire Accident and Fire Extinguishing System

ZENG Xiaoliang¹, LI Fuxiang¹, LI Mingwei², TAN Wenqiang², SONG Yu³, WANG Fangqiang¹

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

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract:Based on the statistical data of cable tunnel fire accidents at home and abroad in recent years, the causes and characteristics of cable tunnel fire accidents are summarized and the various fire extinguishing systems are introduced, such as water spray fire extinguishing system, high-pressure water mist fire extinguishing system, gas fire extinguishing system, aerosol fire extinguishing system and ultra-fine dry powder extinguishing system. According to the analysis of technology and economics, it is recommended to adopt the high-pressure water mist fire extinguishing system in the long-distance and large-volume cable tunnels, and the ultra-fine dry powder fire extinguishing system is recommended in the cable joints or other key protection areas for local fire extinguishing. However, it is not recommended to use gas fire extinguishing system, water spray fire extinguishing system and aerosol fire extinguishing system in long-distance and large-volume cable tunnel; utility tunnel; fire accident; fire extinguishing system

0 引 言

随着中国社会和经济的快速发展,城市电力输 送逐渐由地上架空线路向地下隧道深入发展。电缆 隧道可抵御外界恶劣气候的影响,极大地提高了城 市输电线路维护保养的便利性,也有效缓解了地面 空间紧缺的压力。截至 2021 年年底,国网四川省电 力公司成都供电公司共有地下电缆 8467 km,其中 110 kV 及以上电缆 1473 km,电缆隧道 310 km,长度 排名全国第二,仅次于北京。然而,电缆隧道具有空 间封闭性、潜在可燃物较多、火灾扑救难度大等特 点,一旦发生火灾就会造成严重后果,严重威胁城市 电网的安全运行^[1-2]。2020 年 5 月 4 日凌晨,位于 西安市高新区的地下隧道综合体工程施工现场内电 缆桥架起火,多条电缆线路故障,造成周边区域约 6000 户用户停电。2009 年 2 月 10 日,昆明市区东 南部由于高压电缆外护套被盗引发短路起火,造成 两回 220 kV 电缆、两回 110 kV 电缆烧损,220 kV 官 渡变电站等多个变电站全站失压,导致昆明市区东 南部发生大面积停电,影响恶劣。因此研究电缆隧 道火灾事故发生的原因和特点,分析电缆隧道灭火 系统的适用性,有利于预防电缆隧道火灾,减少电缆 隧道火灾事故造成的损失和影响。

1 电缆隧道火灾事故原因分析

电缆隧道内存在较多的可燃物,主要包括电缆 护套层、绝缘层材料及电缆接头中的环氧树脂等可 燃物,引起电缆隧道发生火灾的原因可分为电缆自 身故障引起着火和外界因素引发着火。据相关研究 统计,约 30%的电缆隧道火灾事故源于电缆自身故 障,其余约 70%的事故由外界因素引起^[3-5]。

电缆自身故障主要包括 3 个方面:1)电缆接地 不良或短路。电缆接地不良导致电缆护套层悬浮电 压升高,击穿绝缘的电弧可能引燃电缆,发生火灾。 电缆受水浸渍或其他原因导致电缆发生接地和短路 事故时,过电流将引起电缆过热而自燃。2)电缆及 其附件质量或施工工艺不达标。电缆本身质量不达 标,或电缆接头因制造、安装工艺不良等,可能导致 运行中电缆接头氧化、局部发热或爆炸引起火灾。 3)电缆绝缘老化或长期过负荷运行。电缆使用寿 命一般为 15~20 年,运行时间的增加会使其逐渐老 化,容易引起自燃。此外,长期过负荷运行也将损坏 电缆绝缘,容易造成电缆短路起火。

外界因素较为复杂,主要包括3个方面:1)施 工引起的焊接火花飞溅或机械性损伤。施工过程 中,电气焊接产生的火花飞溅,可能会引起电缆火 灾;外力导致的电缆机械性损伤,可能导致接地故障 并引发火灾。2)外部火灾蔓延引燃。电缆隧道防 火措施不完善,可能造成外部火灾侵入,引燃电缆从 而扩大火灾事故。3)鼠害。电缆隧道内冬暖夏凉, 是老鼠的"理想"栖息地,电缆容易被老鼠咬坏并造 成接地或短路起火。

2 电缆隧道火灾事故特点

电缆隧道属地下建筑物,无法自然采光,且为狭 长的管道空间。这些建筑构造特点决定其火灾事故 主要呈现以下特点: 1)起火点隐蔽,初期难以被发现。封闭性是电 缆隧道的基本特点,而且其空间结构形式复杂多样, 使起火点的位置在火灾初期无法被及时发现,因此 难以对初期火灾采取有效的灭火措施,也无法对其 进行有效控制,最终可能造成严重后果。

2) 气热难以扩散, 火灾蔓延速度快。电缆隧道 发生火灾事故后, 受到地形等自然因素限制, 产生的 气热难以快速扩散, 烟气积聚达到一定阈值后会出 现爆燃的情况。由于电缆堆叠密集布置、可燃物连 续排列、通道狭小热量不易排出等特点, 火势会沿着 电缆线迅速蔓延燃烧。电缆燃烧过程中还会释放出 大量高浓度可燃气体和浓烟, 在隧道内特定气流作用 下, 温度、浓烟急剧上升, 将进一步加速火势的蔓延。 实验表明, 电缆火灾传播速度一般可达 20 m/min, 即使在电缆发生爆炸后迅速切断电源, 也难以控制 火势^[6]。

3)空间狭窄,灭火难度大。一方面,电缆隧道 内部具有较大的纵深且空间狭窄,电缆桥架密集堆 放,影响灭火救援行动的实施;另一方面,电缆隧道 封闭且照明条件差,发生火灾时,隧道内迅速充满有 毒有害烟气(一氧化碳和氯化氢等),能见度低,严 重危害救援人员身体健康并影响灭火救援行动。因 此,电缆隧道一旦着火,灭火抢救非常困难。

4)损失严重,恢复困难。电缆隧道着火,常常 会造成严重的火灾,不仅烧毁大量的电缆和电气设 备,还会引发大范围的停电,严重影响人们的生产生 活。电缆隧道发生火灾,后期修复难度极大、时间 长,也会造成巨大的经济损失。

3 电缆隧道灭火系统比较分析

目前,比较成熟的灭火系统种类较多,主要有水 喷雾灭火系统、高压细水雾灭火系统、气体灭火系 统、气溶胶灭火系统、超细干粉灭火系统等,其中在 电缆隧道和综合管廊电力舱中应用业绩较为成熟的 是高压细水雾灭火系统和超细干粉灭火系统 等^[7-10]。下面将从灭火机理、灭火性能、空间利用和 成本等方面综合比较分析几种灭火系统的优劣,从而 结合电缆隧道火灾特点及投资选用合适的灭火系统。

3.1 水喷雾灭火系统

水喷雾灭火系统技术相对比较成熟,适用范围 广,灭火机理主要为表面冷却、窒息、乳化及稀释等 作用。相比其他灭火系统,水喷雾灭火系统具有设 备简单、灭火速度快、不复燃、可靠性高、持续灭火能

57

力强等特点,但存在系统用水量大、消防后需大量排水,可能影响电力电缆的绝缘性等不足^[7,11-12]。电缆隧道空间狭长且封闭,不适合铺设大直径水喷雾 灭火系统,并且由于无法及时排除大量积水及影响 电缆绝缘性等不足,不建议在电缆隧道中使用水喷 雾灭火系统。

3.2 高压细水雾灭火系统

高压细水雾是通过向特殊的喷嘴加压,使水在 空间中形成细小的水雾状态(微米级尺寸),隔离火 焰和被保护对象,通过吸热、表面冷却、隔离、窒息等 综合作用实现灭火。与其他灭火系统相比,高压细 水雾具有用水量少、灭火效果好、可扑救电气火灾等 优点,在电力设施灭火系统中有着广泛的应用,但也 存在前期安装成本高、安装工艺复杂、对水质和管材 要求高等不足。

文献[13]选取"雾滴粒径"为研究对象,依据相 关地下综合管廊电力舱的设计参数,采用数值模拟 方法,研究了"雾滴粒径"对电缆桥架底层火场温 度、灭火时间和火灾热释放速率的影响规律,提出在 实际工程中采用粒径为75~100 μm的高压细水雾 灭火系统具有较好的灭火效果。文献[14]则研究 了雾滴粒径对 I型结构地下综合管廊灭火效果的影 响。通过火灾数值模拟,分析了温度场、烟气流动以 及能见度变化情况,实验结果表明雾滴粒径越小对 烟气层沉降的影响越显著。在研究的6种粒径细水 雾中,50 μm高压细水雾灭火效果最好,200 μm高 压细水雾降温效果最快。

文献[15]利用 FDS 建立了全尺寸综合管廊模 型,研究了高压细水雾灭火系统喷头压力对灭火效 率的影响,实验结果表明:适当增加喷头压力有利于 提高灭火效率,但喷头压力过大可能导致最大热释放 速率波动变大,不利于灭火;当喷头压力为17 MPa 时,灭火效果最好。文献[16]在自建的综合管廊实 体火灾试验平台上,开展了不同工况下的高压细水 雾灭火系统局部应用与全淹没应用的灭火试验研 究,结果表明:对于综合管廊电力舱,宜采用全淹没 灭火方式的高压细水雾灭火系统:若采用局部灭火 方式,需同时对着火分区与相邻分区喷射细水雾,并 保证一定的喷雾强度和灭火区间。文献[7]则从技 术性能、设计方案和全生命周期成本等3个方面对 常用的几种灭火系统进行了对比分析,结果表明高 压细水雾灭火系统在设计使用合理性、灭火性能和 全生命周期成本方面均具有优势。

研究者们对高压细水雾灭火系统的雾滴粒径、

喷头压力、管网布置和安装成本等重要影响因素进行了深入研究,结果表明高压细水雾灭火系统在综 合灭火效果、性价比以及设计适用合理性等方面均 具有显著优势,也是目前在电缆隧道中应用较为广 泛和成熟的灭火系统^[17-19]。

3.3 气体灭火系统

气体灭火系统是以气体作为灭火介质,绝大部 分为全淹没应用灭火方式,在密闭空间内灭火效果 好。尽管二氧化碳及六氟丙烷灭火系统可用于开放 空间的局部应用灭火,但所需灭火剂浓度较高。目 前,气体灭火介质很多,主要有二氧化碳、七氟丙烷、 IG541 混合气体和全氟己酮等,其中七氟丙烷灭火 介质具有较高的性价比,市场占有份额高达 47%, 是中国目前应用最多的气体灭火介质^[20]。气体灭 火系统具有清洁无残留、密闭空间灭火效率高等优 点,但也存在储瓶间占地面积大、全生命周期成本 高、无法扑灭复燃火灾等不足。

文献[20]以全氟己酮灭火剂局部应用灭火技 术为研究对象,对旋芯喷嘴的雾化特性进行了深入 研究,结果表明:温度升高、雾化半角变大、粒径变小 等均会导致灭火流量增大,其中雾化半角对灭火流 量的影响最为显著;根据实体灭火模型计算结果,局 部应用高度在 3.5~5.0 m 区间内灭火流量较低,能 够实现可靠灭火。文献[21]对比了备压式和储压 式两种七氟丙烷灭火系统的特点和应用区别,结果 表明备压式七氟丙烷灭火系统更适合用于城市综合 管廊,具有输送距离更远(可达 200m)、充装密度 更大、输送能力更强、资金投入相对较低等优势。文 献[7]从防火分区内气体灭火系统配置、全生命周 期成本等方面,详细对比了气体灭火系统和其他常 见灭火系统在电力电缆舱室的应用特点,相关数据 结果表明七氟丙烷等气体灭火系统占地空间大、药 剂量大,不宜保护长距离电缆隧道和综合管廊,此外 还存在资金投入高等不足。因此,目前气体灭火系 统主要应用于短距离封闭空间内的全淹没应用灭 火,但不适用于保护长距离、大容积的电缆隧道和综 合管廊,几乎无相关应用业绩,不建议在电缆隧道中 使用气体灭火系统。

3.4 气溶胶灭火系统

目前,气溶胶灭火系统根据灭火药剂不同主要 分为S型和K型。其中K型气溶胶灭火分解产物 和喷射物吸水后会生成氢氧化钾,对电缆隧道内的 设备具有腐蚀作用,此外其喷射物中的金属离子具 有一定的导电性,可能导致线路短路,因此不适用于 电缆隧道。S型气溶胶以锶盐类物质为主氧化剂, 其分解产物的吸湿性较小,不会产生腐蚀性物质,通 常采用全淹没应用灭火方式,灭火效果较好,前期安 装方便、空间占用体积小,但存在后期维护成本高、 设备故障率高、保护容积有限等不足,且不具备强制 性产品认证制度(3C认证),因此不推荐在长距离、 大容积的电缆隧道内使用^[9,12,19]。

3.5 超细干粉灭火系统

超细干粉成分为磷酸铵盐,灭火剂的主要颗粒 粒径不大于 20 μm,具有较好的流动性、弥散性、抗 复燃性和电绝缘性,可扑救 A、B、C 类火灾及带电电 气火灾。灭火机理为化学和物理双重灭火,以化学 灭火为主。超细干粉与燃烧物火焰发生化学反应, 捕获燃烧自由基及热量,切断燃烧链,迅速熄灭火 焰;超细干粉还可隔绝空气与被保护物,通过物理作 用防止复燃。相比其他灭火系统,超细干粉灭火系 统具有灭火能力强、安装方便、初期成本低等优点, 但存在后期维护成本高、灭火后难以清理、可能破坏 电缆绝缘等不足。

文献[22]基于实际工程对悬挂式超细干粉和 高压细水雾两种灭火系统的技术性能、参数配置、费 用等进行了详细对比,研究结果表明:长度小于2km 的综合管廊宜采用悬挂式超细干粉自动灭火系统; 长度大于2km的综合管廊宜采用高压细水雾灭火 系统。文献[23]整理了目前综合管廊消防保护相 关标准规范,总结分析了干粉灭火装置在综合管廊 的应用情况,从干粉灭火装置特点出发,提出了其在 管廊内应用的设计方法和应用优缺点;但针对灭火 后难以清理、后期维护费用高等不足仍未提出很好 的解决方法。综合来看,超细干粉灭火系统在短距 离或电缆接头等局部灭火应用上具有一定优势,但 不适合保护长距离、大容积的电缆隧道。

3.6 其他新型灭火系统

压缩空气泡沫灭火系统是近年来新发展的灭火 系统,其基本原理是向泡沫混合液中通入一定比例 的压缩空气,充分混合后产生灭火泡沫再经管路输 出。与传统的吸气式泡沫灭火技术相比,压缩空气 泡沫灭火技术具有灭火效率高、环境污染小、防复燃 能力强等优点,适用于扑救电缆接头火灾。但目前 压缩空气泡沫系统还没有相应的国家规范,应用受 限,其产品设计、电气火灾应用拓展等还有待深入研 究^[24]。文献[25]对液氮扑灭综合管廊电缆火灾的 适用性进行了实验研究,结果论证了液氮扑灭综合 管廊火灾的有效性。但目前液氮灭火系统面临费用 昂贵、技术不成熟等不足,不适用于长距离、大容积 电缆隧道的高效灭火,有待进一步发展。

3.7 各灭火系统技术比较

各灭火系统技术比较如表1所示。

4 结 论

上面总结了电缆隧道火灾事故的原因和特点, 综述并分析了目前应对电缆隧道火灾的各种消防灭 火系统及其适用性。分析主要从灭火性能、空间利 用、喷射后处理和全生命周期成本等方面开展,所得 主要结论如下:

1)高压细水雾灭火系统在综合灭火效果、性价 比以及电缆隧道适用性等方面均具有较大优势,尤

表1 各灭火系统技术比较

对比项	水喷雾灭火系统	高压细水雾灭火系统	气体灭火系统	气溶胶灭火系统	超细干粉灭火系统
灭火性能	好	好	一般	一般	一般
降温性能	好	好	差	差	差
除烟性能	好	好	差	差	差
灭火时间	一般	快	一般	快	快
防复燃能力	好	好	差	一般	一般
电气绝缘性	差	好	好	一般	一般
系统布置	可局部保护, 也可全线布置。	可局部保护,也可全线 布置,但系统对水质 和管材要求高。	全线布置, 不可局部保护。	可局部保护, 也可全线布置。	可局部保护, 也可全线布置。
喷射后处理	需排水	无需排水,需通风	需通风	需清理残留粉末	需清理残留粉末
3C 认证体系	有	有	有	无	有
全生命周期成本	低	一般	高	高	声同
由继隊道活田姓	羊	47.	羊		

其适用于保护长距离、大容积的电缆隧道,是目前在 电缆隧道中应用业绩较为成熟的灭火系统。

2)水喷雾系统尽管具有降温除烟效果好、绿色 环保、全生命周期成本低等优点,但其占地面积大、 喷射后需排水等不足导致其在电缆隧道适用性较 差;气体灭火系统具有钢瓶数量多、占地面积大、全 生命周期成本高、无法扑灭复燃火灾等不足;气溶胶 灭火系统虽然前期安装方便,但存在后期维护成本 高、设备故障率高、不具备强制性产品认证制度(3C 认证)等不足。因此不建议在长距离、大容积的电 缆隧道中使用水喷雾灭火系统、气体灭火系统和气 溶胶灭火系统。

3)超细干粉灭火系统在设计上具有可行性,可 用于电缆接头等故障多发区域的局部灭火应用,但 由于其全生命周期成本高、需清理残留粉末等不足, 性价比在长距离、大容积电缆隧道保护上不如高压 水喷雾灭火系统。

总的来说,不同的灭火系统各有其优缺点,适用 场景和范围也各有不同,因此在实际工程中应根据 电缆隧道的实际情况和特点综合选用合适的灭火系 统。近年来,随着科学技术的快速发展,各种新型灭 火系统不断涌现,如压缩空气泡沫、液氮等灭火系 统,为电缆隧道灭火应用提供了更多选择,但这些新 型灭火系统在灭火效能、全生命周期成本、降温除烟 性能等方面还有待进一步完善和改进。

参考文献

- [1] 张佳庆,李文杰,范明豪,等.城市电力电缆隧道消防安 全评估研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工 程版),2020,42(2):109-114.
- [2] 郝振昆,刘安畅,周菲.电缆隧道消防安全管理问题及 对策研究[J].中国电力企业管理,2020(32):76-78.
- [3] 陈孝湘,鄢庆锰,李扬森.高压电缆通道火灾起因分类
 及其预防措施分析[J].建筑技术开发,2019,46(11):
 72-73.
- [4] 王娟娟,袁伟衡,刘月,等.北京市既有电力隧道发展现 状与常见灾害分析[J].工程质量,2016,34(11):75-78.
- [5] 黄鑫,阚强. 高压电缆搭载交通隧道的火灾危险性及 防火措施[C] // 2020 中国消防协会科学技术年会论 文集.西安:中国消防协会,2020;661-665.
- [6] 刘爽,黄自元,李剑,等.细水雾消防系统在电缆隧道中的应用[J].公路隧道,2007(3):59-60.
- [7] 许云骅,邹丽,倪杨,等.综合管廊自动灭火系统选型 分析及全生命周期成本核算[J].中国市政工程, 2020(5):62-65.

- [8] 李青涛,许萍,李嘉乐,等.综合管廊适用灭火技术比较 与探讨[J].城市建筑,2021,18(29):131-134.
- [9] 王若云,崔文静,余一.高压细水雾系统在综合管廊电缆火 灾消防中的应用[J].市政技术,2021,39(5):114-119.
- [10] 黄自元,甄兰兰,杨旭红.电缆隧道灭火技术应用 研究[J].上海电力学院学报,2008,24(4):377-380.
- [11] 欧阳卫华.城市地下综合管廊自动灭火系统设计研究[J].隧道与轨道交通,2018(1):35-38.
- [12] 张雯,陈苗苗,艾庆升.城市地下综合管廊消防系统的 对比分析[J].建材与装饰,2017(40):169.
- [13] 石磊,杨永斌.细水雾粒径对地下综合管廊电力舱火 灾灭火效果的影响[J].消防技术与产品信息,2018, 31(11):47-50.
- [14] 张华杰,梁天水.细水雾粒径改变对电缆火灾的影响[J].科学技术与工程,2021,21(32):14022-14027.
- [15] 吴亚倩,胡祖祥.综合管廊电缆火灾细水雾灭火性能 研究[J].工业技术创新,2021,8(5):13-17.
- [16] 徐大军,张晋,陶鹏宇,等.基于综合管廊火灾特性的 细水雾灭火系统应用研究[J].消防科学与技术, 2021,40(11):1625-1630.
- [17] 陈治君,张刚,石晓龙,等.城市地下综合管廊灭火系 统试验[J].消防科学与技术,2019,38(1):110-112.
- [18] 白静.浅谈高压细水雾灭火技术在综合管廊消防的应用[J].智能建筑与智慧城市,2018(4):36-37.
- [19] 孙瑞雪.城市地下综合管廊灭火系统的实验与数值 模拟研究[D].安徽:中国科学技术大学,2018.
- [20] 羨学磊,董海斌,刘连喜,等.全氟己酮灭火剂局部应 用灭火技术研究[J].消防科学与技术,2021,40(2): 255-258.
- [21] 林帅,周博,田鹏,等.城市综合管廊自动灭火系统选 用探讨[J].消防界(电子版),2016(6):65-66.
- [22] 席林,郭俊,李琰.综合管廊自动灭火系统选择[J].给 水排水,2018,54(S2):200-204.
- [23] 高云升,刘连喜,廖荣华,等.干粉灭火装置在综合管 廊内应用分析[J].消防科学与技术,2018,37(12): 1682-1684.
- [24] 时彦霞,周东凯,王越超,等.压缩空气泡沫灭火装置 在地下电缆沟中的应用[J].现代制造技术与装备, 2021,57(7):170-171.
- [25] 李华祥.城市综合管廊液氮灭火可行性实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

作者简介:

曾晓亮(1991),男,博士,工程师,主要从事六氟化硫气 体分析检测、电网消防检测工作。

电力设备故障声学检测技术综述及展望

张 灦

(国网四川省电力公司,四川成都 610041)

摘 要:随着电力系统智能化水平的提高,使得电力系统关键设备运行健康状态的检测要求不断提高。声学检测技 术因具有无损检测、准确性高、应用前景广泛及定位方便等特性而成为电力系统故障检测技术领域的研究热点。首 先,阐述了声学检测技术的机理,并且总结了声学检测技术在电力系统中的应用架构;其次,分别从声源信号采集、故 障诊断、故障定位及典型应用场景等方面综述了电力设备故障声学检测技术的关键问题与研究现状;最后,分析了电 力设备故障声学检测技术的局限性,并提炼出声学检测技术可能的四大研究方向。

关键词:声学检测;故障检测;电力系统;电力设备

中图分类号:TM 83 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0060-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220412

Review on Acoustic Detection Technology for Power Equipment Fault and Its Prospect

ZHANG Xian

(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the development of intelligent power system, the detection requirements of the operation state of key equipment in power system are increasing. Acoustic detection technology has become a research hotspot in the field of power system fault detection because of its non-destructive detection, high accuracy, wide application prospect and convenient location. Firstly, the mechanism of acoustic detection technology is described, and the application architecture of acoustic detection technology in power system is summarized. Secondly, the key problems and research status of acoustic detection technology for power equipment fault are summarized from the aspects of sound source signal acquisition, fault diagnosis, fault location and typical application scenarios. Finally, the limitations of acoustic detection technology for power equipment fault are analyzed, and four possible research directions of acoustic detection technology are extracted.

Key words: acoustic detection; fault detection; power system; power equipment

0 引 言

电力系统的安全稳定运行关乎民生国计,电力 系统设备不可避免会发生各种形式的故障,毫无预 警的电力事故可能造成严重的社会影响,因此加强 电力设备的状态检测具有重大意义。为了适应电力 系统不断智能化及电力系统不断提高的检测要求, 无损检测技术受到越来越广泛的关注。声学检测技 术作为无损检测的典型代表,具有检测精度高、准确 性强、定位方便等优势。国内外学者已开展若干研 究,研究的方向主要涉及声学检测技术中信号采集、 故障诊断、故障定位以及声学检测系统的研发应用 等方面。

文献[1]概述了声学检测技术在电力设备绝 缘状态诊断、电力设备故障识别、电力设备局部放 电定位等电力领域的应用概况和发展前景,表明声 学检测技术的不断完善与发展将在电力系统中具有 更重要的作用;但声学传感技术、声信号数据分析方 法、故障声源定位方法等作为限制声学检测在电力 系统中发展的关键技术在该文中缺少对应的评述。 文献[2]研究绝缘子不同放电类型的声发射信号特 征,利用主成分分析法提取声学信号时域特征,采用 可靠性指标进行故障模式识别,提高了模式识别的 效率和准确性,为电力设备异常放电类型的识别奠定了一定的基础。文献[3]介绍了国内基于超声波 检测的电力变压器故障定位技术研究进展,研究表 明超声波传感器阵列比单个探头具有更好的定位能力,主要阐述了数学算法对于定位技术优化和超声 波传感器阵列结构优化的发展现状。

电力设备的声学检测技术正处于飞速发展的阶段,其关键技术及工程应用方面还有待完善。现有 的文献报道通常单独介绍不同的声学检测技术原 理、声学检测技术在不同的场景下的应用,较少有系 统性的综述声学检测技术的报道。此外,对于声学 检测技术在电力系统的典型应用场景、主要难点和 未来可能的研究方向鲜有文献报道。

鉴于此,首先,介绍声学检测应用于电力系统的 基本原理及架构;然后,从故障信号采集、故障信号 诊断、故障源定位及典型的应用等方面对相关研究 成果进行系统的梳理;最后,提出目前电力系统中的 声学检测技术存在的问题以及可能的解决思路,为 声学检测技术在电力系统中的应用发展提供有益的 借鉴。

1 电力系统声学检测原理

1.1 电力设备异响机理

电力系统中的电力设备异响主要有两大 类^[4-5]:1)电力设备机械振动异常引起的异响;2)电 力设备异常放电引起的异响。

电力设备机械振动引起的异常声响通常是由于 设备过负荷、设备组件松动或老化、设备潜在缺陷、 运输及安装不当的情况下,设备受到的电磁力导致 设备产生异常振动,进而通过设备的机械结构和空 气传导,形成异响。如电力变压器的铁芯松动异响、 风扇异响等都属于电力设备的机械振动异响。

电力设备放电所致异响的激励源类型比较多, 激励源主要包括电晕放电、局部放电、沿面放电、微 粒放电等。例如,电晕放电导致的异响通常是由于 电力设备高压端表面不均匀而导致电场畸变引起。 畸变的电场将电离附近的空气而产生等离子体,在 空气的电离过程中部分能量以声音的形式向外传递 产生异响。

不同电力设备的不同异常作为激励源所产生的 声信号各具特点,且电力设备故障类型和其激励产 生的声音信号通常具有强对应关系,因此通过检测 声音信号对电力设备运行状态进行监测,保证电力 系统正常运行,具有较强的技术可行性。

1.2 声学检测系统架构

声学检测技术与电力设备故障检测技术中的超 高频检测、红外检测、光学检测等技术的本质区别在 于所采集和分析的信号不同,但是基本应用架构有 着共通之处。声学检测技术在电力系统中应用的具 体解决方案架构一般如图1所示。



图 1 电力系统声学检测应用架构

图 1 中, 声学检测在电力设备故障检测的应用 架构主要包括待测对象层、硬件处理层、数据分析 层, 各层通过数据交互, 为系统应用层提供故障处理 解决方案及依据。待测对象层主要为电力系统中需 要检测的关键设备; 硬件处理层主要功能为高保真 地采集待测对象的声音信号; 数据分析层主要是通 过声音信号的识别, 从而实现系统设备故障诊断及 故障定位。

2 电力设备异常声信号采集

声信号精确采集是声学检测在电力系统的应用 基础。声音传感器作为可将声音信号转换为电信号 的测量元件,是可准确进行电力设备异常信号声学 检测的先决条件。根据有效检测频率可将声音传感 器分为噪声传感器和超声波传感器两大类,噪声传 感器有效检测频率为 20 Hz~20 kHz,超声波传感器 有效检测频率大于 20 kHz,可从物理上滤除人耳可 听范围的背景声信号,具有较强的抗干扰能力。

声音传感器阵列技术比传统的单一声传感器检 测具有更高的检测精度,更能实现电力设备故障的 精确定向^[6]。文献[7]针对电力变压器中局部放电 难以准确定位的问题,引入相控阵列技术,研制了 16×16 阵元的平面超声传感器相控阵列用以故障检 测与定位,但阵元数量较多。文献[8]研发了一种 用于电力设备局部放电检测的复合式声传感器,通 过应用高阶积量处理技术,对十字形超声阵列传感 器进行虚拟扩展使其具有 61 阵元的阵列性能,从而 提高了超声阵列孔径和方向性锐度,将定位的相对 误差减小为 5%,为阵列技术在电力设备故障检测 领域的实用化提供了可能性。

此外,学者在声传感器阵列排布对检测准确 率和定位效果等方面的影响也进行了诸多研究。 文献[9]对不同的声传感器阵列排布的声学性能进 行了定量评估,对比分析了 3×3 的平面阵和9个阵 元均匀圆环阵的声源定位效果,采用声源定向的准 确度作为评价指标对声传感器阵列排布的性能差异 进行定量评价,研究结果表明在阵元数量一致的情 况下,均匀圆环阵列具有更优的声学检测性能。文 献[10]基于降维技术优化了圆环形局部放电超声 阵列传感器的稀疏结构,计算时将二维阵列分解为 多组一维阵列,采用遗传算法执行直线阵搜索,最后 还原为二维圆形阵列计算其检测性能,提高了稀疏 阵列检测的成功率和准确度。

3 电力设备故障声信号分析与诊断

3.1 信号去噪

虽然电力系统中的声学信号可反映电力设备的 异常运行状态,但是通常也伴随着噪声污染,影响检 测结果的准确性。除了电力设备产生的异响外,工 作人员运维时走动、巡视车运行、电力设备周围环境 等都会产生干扰噪声。

如何去除噪声污染是声学检测技术准确检测的 关键。除在硬件设计过程中加入滤波环节以外,还 可通过数据处理进行去噪,已有研究表明小波去噪 是最常用的方法^[11]。

小波去噪的质量受到小波基、小波分解层数及 阈值设定的限制,目前大多数学者仅仅对其中某一 影响因素进行优化,不一定能达到最优的去噪效 果^[12]。文献[13]定义了适用于气体绝缘金属封闭 输电线路的声发射小波去噪复合评价指标,并提出 一种最优小波去噪算法;该算法通过小波基、分解层 数、阈值等自适应选择,实现最优化去噪效果的目 的。文献[14-15]基于离散小波变换统计与能量分 析技术,使用小波数学形态联合降噪算法对信号进 行预处理,利用快速傅里叶变换与均方根技术优化 的 Morlet 小波参数,结合改进组合的神经网络算法 建立了滚动轴承故障振动信号模型。

3.2 特征提取

电力系统中不同设备的不同故障类型对应有不同的声音信号特征。为了准确地进行故障的分析与 定位,电力设备的故障特征提取方法显得尤为重要。

电力设备异常情况的声音信号特征提取方法包 括统计特征法、小波分析法、指纹特征法等[16]。小 波分析法具有能够从极强背景干扰中检测微弱信号 与提取时-频结构信息中"指纹"特征的能力[17]。 文献[18]通过对电力设备多种典型缺陷模型数据 的统计,提出一种改进的小波分析方法,重新定义了 充分利用小波变换域提供的时-频结构信息的特征 量。文献[19]提出基于风电机组叶片裂纹声发射 信号优化的小波重分配尺度谱裂纹扩展识别方法. 利用最小香农熵优化小波基函数的带宽参数,克服 了小波重分配尺度谱的时频分辨率不能同时达到最 佳的困难。文献[20]提出了自适应白噪声完备经 验模态分解算法以实现对电力设备放电故障异常声 信号的特征提取。首先,对信号进行分解得到若干 个本征模态函数:然后,求取各峭度值:最后,选取合 适的峭度值对信号进行重构,提取放电故障的特征 量。但是该方法仅针对变压器的放电故障进行测 试,不具有普适性。

3.3 异常识别

随着人工智能技术的不断发展,人工智能算法 不断被应用于电力设备故障声学检测技术的故障识 别方面。神经网络^[21]、支持向量机^[22]等人工智能 算法在电力设备故障声学检测技术应用较多。

人工神经网络是最常见的应用于电力设备缺陷 识别的方法,将所提取到的特征量作为网络的输入, 利用已知的缺陷样本改变网络中的各层神经元的权 重来完成学习。最后,设定权重进行电力设备缺陷 类型识别,但是训练过程中存在所需样本基数大且 容易局部收敛问题^[23]。应用于电力设备故障声学 检测的人工神经网络主要有 BP 神经网络、学习向 量量化(learning vector quantization,LVQ)、自适应共 振理论(adaptive resonance theory,ART)等^[24]。

支持向量机适合用于解决样本较少、数据维度 高、非线性等问题,但是难以确定规则化系数,预 测的结果不具备统计意义。文献[25]采用相关向 量机(relevance vector machine)有效地解决了上述 问题,同时还以概率形式输出最终结果,提高了 电力设备故障的识别率。文献[26]提出一种多 特征融合与改进量子粒子群优化的相关向量机 (yelevance vector machine)融合声音检测算法,进行断路器机械故障的识别,解决单一特征识别故障的低准确性和低稳定性问题。

3.4 故障定位

随着电力系统的不断发展,电力设备故障准确定 位的要求也不断被提高。目前,基于声学信号的故障 定位技术可大致分为延时定位、衰减定位、声电联合 定位、基于传感器阵列的定位技术等。

延时定位通过在待测设备的不同位置布置多个 声传感器,利用声音到达不同传感器的时差乘以波 速等于传感器与距离声源坐标距离之差的原理,求 得声源的三维坐标^[27]。衰减定位通过声信号能量 和传播距离的指数衰减模型,反推求得到故障声音 位置^[28]。

基于阵列传感器的定位技术采集声源信号到 各声音传感器的相位差与方向角度,利用波速成 型算法等阵列信息处理技术进行声源位置的确定。 文献[29]提出一种变压器局部放电的超声窄带阵 列信号波达方向估计算法,并提出了一种基于多平 台侧向定位原理及优化全局搜索的变压器局部放电 超声阵列定位方法,大量试验表明算法定位成功率 高,且故障定位精度小于 10 cm。

声电联合定位中电磁波信号为光速传播,达到 传感器的时间可视为 0,声传感器和电传感器之间 的信号延时即为声源信号传到检测点的时间,利用 声信号传播速度乘以传播时间即可找到声源位置。 文献[30]提出应用于气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS)的声电联合定位方 法,首先,利用特高频定位法定位声源位置的大致范 围;然后,结合特高频与超声波进行二次定位,精确 定位声源的确切位置,有效排除了现场干扰并提高 了局部放电的定位准确性。文献[31]通过对基于 超声波传感器和特高频传感器的声电联合定位的建 模、求解完成 GIS 盆式绝缘子的局部放电定位,相对 于常规的基于到达时差(time difference of arrival, TDOA)的声电联合定位法的检测精度有所提高。

4 声学检测技术在电力系统的应用

4.1 噪声检测

噪声检测在电力设备的变压器、电抗器、断路器 等关键电力设备的机械振动、谐波引起的谐振、典型 放电故障检测中应用广泛。

文献[32] 基于 GIS 机械故障时振动产生的噪

声信号辐射的声场变化特性,采用具有方向性的声 传感器探头设计 GIS 声场测量的声成像系统,并验 证了系统的检测性能,对 GIS 设备安全稳定运行具 有十分重要的意义。文献[33]开发了基于 web 技 术的变压器噪声监测系统,主要实现对监测信号的 查询与显示交互功能,缺少对异常信号的分析。文 献[34]利用.NET 技术开发了一套用于变压器振动 噪声检测的综合分析系统,该系统可采集变压器稳 态与短路冲击下的噪声信号,采用不同的分析方法 提取噪声特征量,为全面评估变压器运行状态提供 了可靠参考。文献[35]搭建了基于声音阵列传感 器的电力变压器铁芯振动声成像检测试验平台,得 到了图像特征值和铁芯不同松动程度的变化规律。

4.2 超声检测

超声波检测技术的有效检测频率较高,因而具 有低频干扰信号噪声抑制能力,而被广泛应用于电 力变压器、GIS、断路器等电力系统关键设备的放电 故障的检测。典型的放电故障有局部放电、沿面放 电、微粒放电等。

文献[36]利用超声波检测仪与常规脉冲电流 检测仪搭建了交流运行电压下 GIS 故障实验检测系 统,对金属微粒的运动行为、局部放电及危害程度进 行研究。文献[37]研发了基于无线通信的声电联 合检测定位系统,主要用于 GIS 交流耐压试验全过 程的局部放电和闪络放电的检测。

4.3 声发射检测

声发射检测主要应用领域包括电力设备绝缘健 康状态、机械健康状态及局部放电故障的检测等。

文献[40-42]从实验产生的有效声发射信号特 性、故障检测系统研发和叶片损伤的定位技术等方 面,阐明了声发射技术在风电机组叶片故障检测的 多种应用,但是对风电机组叶片不同裂纹发生阶段 产生的信号特征量的分析和归纳较少。文献[43] 研发了一种光纤声发射传感器,并且利用光纤声发 传感器的光栅体积小、重量轻、灵敏度高和抗电磁干 扰的特点,研制了一套应用于变压器局部放电的在 线监测系统。波兰的 T.Boczar 研制了基于声学检测 法的变压器局部放电故障专家系统,主要包括测量 子系统、处理分析子系统、知识库和故障分类子系 统,并开展大量的声发射实验,实验结果表明该系统 具有较高的检测可靠性^[44]。

5 声学检测的关键问题及研究思路

声学检测技术在电力系统中具有良好的发展前

景。为了能够更好地适应电力系统智能化发展检测 要求,声学检测技术的检测有效性及故障定位精确 性等方面有待进一步研究。

1) 传感器阵列及算法优化

目前,电力系统声学检测技术的发展瓶颈在于 定位准确性有待提高和直观交互性较差。综合研究 声传感器阵列的排布规律及信号处理算法,减小声 传感器在电力系统应用中的检测误差,提高电力设 备故障定位的准确率。一方面研究声传感器阵列的 最优排布,提高检测精度并减少阵元数目降低成本; 另一方面深度优化基于阵列信号处理技术的电力设 备故障定位或者声学成像处理算法。

2) 声场仿真技术的发展

随着计算机技术的快速发展,基于声学检测的 仿真分析技术具有较好的发展潜力。未来基于声学 检测的仿真分析技术可更准确地描述声场,更精准 地分析声波组成成分,可对声传感器的设计、故障诊 断分析等方面起到理论指导作用。研究声场理论, 构建适应多种环境的电力设备故障声场分析模型, 利用 Matlab 等软件对声场进行仿真并给出可视化 结果,从而使得电力设备故障声信号分析或预测难 度得到极大简化。

3) 故障诊断技术的发展

电力系统中的电力设备不仅种类多且运行环境 复杂,给基于声信号的电力设备故障诊断带来一定困 难,因此有必要更深入地研究软件、硬件处理层面的 抗干扰能力、信号高保真能力以及提高去除干扰噪 声信号的能力;故障特征的选择与提取是电力设备 故障声学检测技术缺陷识别的前提条件,需提高电 力设备故障声信号特征提取的智能化水平,建立更 丰富的特征数据库,优化特征提取方法的自适应性。

4)故障定位技术

为提高电力设备故障定位的准确性及精度,提 高电力设备故障检测的效率,基于传感器阵列技术 及阵列信号处理方法的定位技术是未来一段时间内 声学检测故障定位技术发展的重点方向,主要包括 阵列信号处理方法的优化、新方法的提出及人工智 能算法的应用等。

6 结 论

推进以电力设备故障声学检测技术为代表的无 损检测技术的发展,是适应智能电网及电力系统智 能化发展的重要举措。声学检测技术具有与设备无 直接电气连接、可实时在线监测、定位准确等优点, 为解决电力系统关键电气设备的状态检修提供重要 支撑,具有广阔的应用研究前景。

前面主要针对电力设备中故障声学检测技术的 基本原理、故障分析诊断及典型的应用等方面,综述 了声学检测技术的研究现状和关键问题,并对后续 可能的研究方向与思路进行探讨。希望可以为声学 检测技术在电力系统故障检测方面的发展提供有益 参考,不断推进电力系统设备故障检测技术的发展。

参考文献

- [1] 项添春,房向阳,干耀生,等.声学检测技术在电力系统 中的应用概况及前景[J].华北电力技术,2007(11):7-10.
- [2] 王成江,李光.基于声发射技术的绝缘子放电识别用特 征量研究[J].电力自动化设备,2012,32(7):143-148.
- [3] 王建元,梁惠娟,康爱民.国内电力变压器局部放电超声波定位研究进展[J].东北电力大学学报,2019, 39(2):10-14.
- [4] Weidong WU, Zhengyang WU, Shouchun GUO, et al. Design of sound monitoring and fault diagnosis system for dry-type transformers [J]. 2021 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 770 012002.
- [5] 刘媛,贾勇勇,杨景刚,等.一起220 kV GIS 设备异响缺陷分析与处理[J].高压电器,2020,56(2):246-251.
- [6] 王国利,杜非,潘伟,等.用于变压器中局部放电定向的超声阵列 RSS 改进算法[J].高电压技术, 2019, 45(8):2509-2514.
- [7] 李继胜,李军浩,罗勇芬,等.用于电力变压器局部 放电定位的超声波相控阵传感器的研制[J].西安交 通大学学报,2011,45(4):93-99.
- [8] 辛晓虎,李继胜,纪海英,等.用于变压器中局部放 电定位的十字形超声阵列传感器研究[J].中国电机 工程学报,2013,33(21):154-162.
- [9] 谢庆,程述一,耿江海,等.基于定向准确度的局部放电 超声阵列传感器声学性能定量评价[J].中国电机工程 学报,2014,34(6):965-970.
- [10] 刘丹, 孔静, 谢庆, 等. 基于降维技术的 CRPDUAS 稀疏结构优化设计[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 80-85.
- [11] 李红玲, 文习山, 舒乃秋, 等. 小波变换去噪在绝缘 子污秽放电声发射监测中的应用[J]. 电力系统保护 与控制, 2010,38(6): 56-59.
- [12] 李化,杨新春,李剑,等.基于小波分解尺度系数能 量最大原则的 GIS 局部放电超高频信号自适应小波 去嗓[J].电工技术学报,2012,27(5):84-91.
- [13] 律方成,张瑜,董蒙,等.基于复合评价指标的金属微

粒声发射信号最优小波去噪及其特征提取[J].高压电器,2017,53(11):1-8.

- [14] J XIANG, Simon WATSON. Practical condition monitoring techniques for offshore wind turbines [C]. EWEC 2008 conference proceedings, Brussels Expo., Belgium, PO. 2008, 195:1-8.
- [15] 郭艳平.面向风力发电机组齿轮箱滚动轴承故障诊断的理论与方法研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [16] Zheng ZHONG, Kexiong TAN. Partial discharge recognition based on pulse waveform using time domain data compression method[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 00CH36347), IEEE, 2000: 483-486.
- [17] 曹浩,黄韬,周舟,等.基于主成分分析法的变压器直流 偏磁声学异常检测[J].湖南电力,2021,41(5):1-6.
- [18] 淡文刚,陈祥训,郑健超.采用小波分析与神经网络 技术的局部放电统计识别方法[J].中国电机工程学 报,2002,22(9):1-5.
- [19] 陈长征,赵新光,周勃,等.风电机组叶片裂纹故障特征 提取方法[J].中国电机工程学报,2013,33(2):112-117.
- [20] 舒畅,金潇,李自品.基于 CEEMDAN 的配电变压器放 电故障噪声诊断方法[J].高电压技术,2018,44(8): 2603-2611.
- [21] 缪希仁,吴晓梅,石敦义,等.采用 HHT 振动分析的 低压断路器合闸同期辨识[J].电工技术学报,2014, 29(11):154-161.
- [22] 赵书涛,张佩,申路,等.高压断路器振声联合故障诊断方法[J].电工技术学报,2014,29(7):216-221.
- [23] 李燕青,陈志业,律方成,等.超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(2):108-111.
- [24] Gulski E,Krivda A.Neural networks as a tool for recognition of partial discharges [J].IEEE transactions on electrical insulation, 1993, 28(6):984-1001.
- [25] 尹金良,朱永利,俞国勤.基于多分类相关向量机的变 压器故障诊断新方法[J].电力系统保护与控制, 2013,41(5):77-82.
- [26] 孙曙光,于晗,杜太行,等.基于多特征融合与改进 QPSO-RVM 的万能式断路器故障振声诊断方法[J]. 电工技术学报,2017,32(19):107-117.
- [27] 周电波,丁登伟,盖世诚,等.基于超声波诊断的 GIS 设备异常分析方法[J].中国电力,2018,51(4):53-60.
- [28] 张宇, 卢文秀, 褚福磊. 基于声发射衰减特性的故障行 星轮定位研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(3):14-19.
- [29] 谢庆.基于空间谱估计的变压器局放超声阵列定位方 法研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [30] 刘君华,姚明,黄成军,等.采用声电联合法的 GIS 局 部放电定位试验研究[J].高电压技术,2009,35(10): 2458-2463.

- [31] 马跃虎,田禄,牛勃.GIS 盆式绝缘子局部放电缺陷定 位分析[J].内蒙古电力技术,2019,37(2):24-29.
- [32] 李秀广,吴旭涛,师愉航,等.基于声学成像的 GIS 机械 故障带电检测系统[J].高压电器,2019,55(5):42-46.
- [33] Ting-Ting HE, Jing-Di WANG, Jie GUO, et al. A Vibration Based Condition Monitoring System for Power Transformers
 [C] // 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2009:1–4.
- [34] 何苗忠,王丰华,钱国超,等.基于.NET 框架的变压器 振动噪声综合分析系统设计与开发[J].电力系统自 动化,2017,41(1):150-154.
- [35] 司文荣,傅晨钊,徐鹏,等.基于声学成像及图像处理的变压器铁心松动检测研究[J].高压电器,2021, 57(11):180-186.
- [36] 季洪鑫.交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及 放电特征[D].北京:华北电力大学,2017.
- [37] 白尧, 陈敏, 汪涛, 等. GIS 交流耐压试验局部放电 和闪络放电同步检测及定位技术研究[J]. 高电压技 术, 2018, 44(S1): 161-163.
- [38] Denja LEKOU, P VIONIS, PA JOOSSE et al. Full-scale blade testing enhanced by acoustic emission monitoring
 [C].Processings of the European Wind Energy Conference CEWE(2003), Madrid, Spain, 2003.
- [39] Joshua PAQUETTE, JO Shuavan DAM, Scott HUGHES. Structural Testing of 9m Carbon fFiber Wind Turbine Research Blades [C] // the AIAA 2007 Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, USA, 2007.
- [40] Kirikera G R, Shinde V, Schulz M J, et al. A Structural Neural System for Real-time Health Monitoring of Composite Materials [J]. Structural Health Monitoring, 2008,7(1):65-83.
- [41] 马宾,徐健. 一种用于变压器局部放电在线监测的光
 纤声发射传感器实验研究[J]. 光谱学与光谱分析,
 2017, 37(7):2273-2277.
- [42] 林介东, 胡平. 声发射技术测量变压器局部放电的现 状与进展[J]. 广东电力, 2005, 18(1):12-15.
- [43] 廖传军,李学军,刘德顺.小波再分配尺度谱在声发 射信号特征提取中的应用[J].机械工程学报,2009, 45(2):273-279.
- [44] Tomasz BOCZAR, Andrzej CICHON, Sebastian BORUCKI.
 Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method [J].
 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 854-865.

作者简介:

张 灦(1968),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为 电网经营管理及综合风险评估。

基于过零偏移检测的分布式 台区户变关系辨识研究

捷1,梁广明2,黄水莲2

(1.广西电力工程建设公司,广西南宁 530003;2.南宁百会药业集团有限公司,广西南宁 530003)

要:针对传统基于高速电力线载波通信技术的集中式台区户变关系辨识方法在不同的载波厂家设备混装时易出 摘 现辨识失败的问题,提出了一种基于分布式模式和双沿过零偏移检测的台区辨识方案。文中设计了由集中器经通信 模块主节点向从节点下发台区特征,在从节点处进行特征比对并判断电能表计台区归属的分布式辨识模式。此外, 针对不同高速电力线载波通信模块对特征信号沿过零检测算法的兼容性问题,设计了交流电信号双沿用户特征采集 和辨识算法及相关通信协议支持。最后,通过对不同辨识模式的抄读性能以及抄读和辨识失败的实例进行分析,验 证了所提方案的可行性。

关键词:高速电力线载波通信:分布式:双沿:台区辨识 中图分类号:TM 933 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0066-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220413

梁

Research on User-transformer Relation Identification in Distributed Station Areas Based on Zero-crossing Offset Detection

LIANG Jie¹, LIANG Guangming², HUANG Shuilian²

(1. Guangxi Electric Power Engineering Construction Company, Nanning 530003, Guangxi, China;

2. Nanning Baihui Pharmaceutical Group Co., Ltd., Nanning 530003, Guangxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional user-transformer relation identification method in centralized station area based on high-speed power line carrier (HPLC) is prone to having identification failure when the equipment of different carrier manufacturers are mixed, a station area identification scheme based on distributed mode and double edge zero-crossing offset detection is proposed. A distributed identification mode is designed, in which the concentrator sends the station area characteristics to station (STA) through central coordinator (CCO), compares the characteristics at STA and judges the ownership of meter station area. In addition, aiming at the compatibility of different HPLC communication modules with the feature signal zero-crossing detection algorithm, the AC signal double edge user feature acquisition and identification algorithm and the related communication protocol support are designed. Finally, the feasibility of the proposed scheme is verified by analyzing the reading performance of different identification modes and the examples of reading and identification failure.

Key words: high-speed power line carrier; distributed; double edge; station area identification

言 0 弓[

准确建立台区户变关系是确保台区线损准确计 算的关键之一[1-2]。台区户变关系辨识技术可通过 高速电力线载波^[3] (high-speed power line carrier, HPLC)技术确定各用户计量点与低压配电变压器 的归属关系,提高户变关系判断的准确性,帮助电网 公司完善用户的基础数据资料,确保业扩用电报装 管理时不出现漏装、多装等问题,提高台区档案管理 水平,同时也有利于台区线损的管理,避免偷换电能 表计、重复装电能表等窃电行为[4],提高电网经济 运行水平。

作为面向电力抄表的高速电力线通信技术, HPLC 的通信工作频率范围主要包括 2.4~5.6 MHz、 2~12 MHz、0.7~3.0 MHz、1.7~3.0 MHz 等,相比传 统的窄带载波方式具有相对较宽的信道带宽,通信 速率可根据需要在 2.048 kb/s~2.4 Mb/s 之间任意 选择^[5],可有力支撑高频数据采集、停电主动上报、 时钟精准管理、相位拓扑识别、台区自动识别、ID 统 一标识管理、档案自动同步、通信性能监测和网络优 化等高级应用功能的实现^[6]。此外,相对于窄带载 波通信方式,电力线在高频段的噪声相对较弱,通信 可靠性和稳定性显著提升。

文献[7]依据不同台区工频交流电过零相位偏 移量不同的特征来辨识台区户变关系。具体是由从 节点将偏移量原始数据发送至原归属主节点,由主 节点进行比对判断。由于未对工频交流电过零信号 的上升和下降特征进行区分,有误判的可能。此外, 特征采集和识别的工作集中在主节点进行,主节点 的数据处理压力较大。下面提出一种基于交流电双 沿过零偏移检测的分布式台区辨识方案,介绍了双 沿检测的原理,比较了分布式和集中式辨识的差异, 并通过实验室和现场案例测试对所提方案的有效性 进行验证。

1 台区户变关系辨识原理

台区户变关系辨识是指利用用户计量点采集的 用电瞬时量数据等特征信息判断通信网络中各节点 与台区的挂接从属关系。常用的特征量包括工频电 压特征、信噪比、工频频率特征等。设计台区辨识方 案时,需要考虑台区辨识任务启动和关闭的时机、辨 识周期、台区辨识的判断规则以及结果上报方式等 问题。

低压 HPLC 通信网络主要包括两种设备角色, 即中央协调器(central coordinator, CCO)和通信节点 (用 station 表示,通常简称为 STA)。CCO 作为主节 点负责完成组网控制、采集任务管理等功能,其对应 的设备实体为低压集抄系统集中器本地载波通信模 块,STA 是网络底层负责用户数据采集的从节点,其 对应的设备实体为电能表或采集器中的本地通信模 块^[8-9]。

1.1 交流电信号的沿特征

如图 1 所示过零检测原理,在低压 HPLC 通信 时,若 STA 节点能够接收到多个 CCO 节点的采集指 令。定义过零偏移 $\Delta\eta$ 为通信节点接收到采样信号 的时刻 t_j 与上一个工频电压波形发生零点穿越时刻 的时间差。若 STA 节点均处于同一相位或排除三 相之间的已知偏移,当 STA 节点 *j* 接收到 CCO 节点 的数据采集命令后即可计算出 $\Delta\eta$ 。同台区的 CCO 节点与 STA 节点由于台区串扰影响小,电压波形特 征重合度高;而不同台区负载的容量大小、容(感) 性和三相平衡度等特性不同,导致其节点之间的波 形特征一致性较弱。根据上述特点,通过统计 STA 节点与 CCO 节点间的电压波形过零偏移大小判断 该 STA 节点是否为跨台区节点,即通过工频电压特 征信号过零检测的方法实现台区辨识^[10]。



图 1 过零检测原理

对于同一个基准时刻 t_0 ,此时有两种情况:1)如 图 1 中的 t_0 与 t_1 ,当前数据采样点的电压值 $S(t_1)$ 为 正,处于电信号上升阶段(沿)时,采样时刻 t_j 与基准 时刻 t_0 的过零偏移 Δη 为两者之间的数值差减去通 信延时,如式(1)中 S(t+1)>S(t)的情况。2)如图 1 中的 t_2 与 t_3 ,当前数据采样点的电压值 $S(t_3)$ 为负, 处于计量点电信号下降阶段(沿)时,采样时刻 t_i 与 基准时刻 t_0 的过零偏移 Δη 为两者之间的数值差 减去通信延时和半个工频周期,如式(1)中 S(t+1)<S(t)的情况。

$$\Delta \eta_{j,k} = \begin{cases} | t - t_i | - \alpha & S(t+1) > S(t) \\ | t - t_i | - \alpha - T_0/2 & S(t+1) < S(t) \end{cases}$$
(1)

式中: $\Delta\eta_{j,k}$ 为 STA 节点 j 采集到的用户特征信号与 台区 k 基准特征信号之间的过零偏移; t_i 为数据采样 时间点,且 $i=0,1,\cdots,I$,其中, t_0 为台区的基准过零 时刻,通常由台区配电变压器低压出口侧安装的基 准表进行采集; α 为相邻采集点之间的通信延时,即 通信模块发送请求数据帧的时刻与接收数据应答帧 的时刻之间的差值; T_0 为工频周期时长;S(t)为t时 刻的电压值。

为了在特征信息采集时区分用户电信号中的沿

特征,定义	く台区	区特征信息交互报文格式如表1	所示。
Ę	表 1	台区特征信息采集交互报文格式	

序号	定义字段	字节长度/byte			
1	TEI	12			
2	采集方式	2			
3	保留	2			
4	采集序列号	8			
5	告知总数量	8			
6	起始采集 NTB1	32			
7	台区特征信息序列1	(<i>N</i> -7)×8			
8	起始采集 NTB2(可选)	32			
9	台区特征信息序列2(可选)	$(M - N - 4) \times 8$			

表1中:序号2的采集方式字段的数值为1时 表示下降沿采集,数值为2表示上升沿采集,数值为3 表示双沿采集,数值为0表示保留;序号6和序号8 的起始采集NTB表示本次采集过零点的起始时刻, 即发送第一个特征数据采集帧的时刻;序号7和序 号9的台区特征信息序列的内容为采集的用户特 征数据,根据数据类型确定;*M*为台区从节点序号; *N*为从节点数量。当采集方式为上升沿或者下降沿 时,起始采集NTB2和台区特征信息序列2字段留 空。当采集方式为双沿时,起始采集NTB1和台区 特征信息序列1为下降沿数据,起始采集NTB2和 台区特征信息序列2为上升沿数据。

1.2 过零检测判断规则

在集中式辨识模式下,CCO收集到多个 STA 上 报的特征信息后,通常以同一时刻上升沿或下降沿 的过零偏移不超过某一个阈值,作为该 STA 节点是 否属于该 CCO 对应台区的判断规则,如式(2)所示。

$$\frac{\sum_{p \in \mathbf{P}'} \Delta \eta^p}{\|\mathbf{P}'\|} < \delta \tag{2}$$

式中: $\Delta \eta^{P}$ 为时刻 p的过零偏移;p为采样数据对应

时间序列编号且 *p* ∈ *P*';δ 为集中式辨识模式下台区 辨识的判断阈值;*P*'为过零偏移的特征采样数据时 间序列,由原始数据经预处理和剔除无效数据后获 得,其模为 || *P*' ||,表示序列长度。

在分布式辨识中,STA 收到多个可能同台区的 CCO 节点的辨识任务时,通常根据各 CCO 提供的台 区基准特征信号优选出其中过零偏移量最小的节点 作为该 STA 节点的归属节点,即若 $\exists j \in J, k \in K$,满足 式(3),则认为台区 k 为 STA 节点 i 的优选归属台区。

 $\Delta \boldsymbol{\eta}_{j,k} = \min(\Delta \boldsymbol{\eta}_{j,1}, \Delta \boldsymbol{\eta}_{j,2}, \dots, \Delta \boldsymbol{\eta}_{j,k}, \dots, \Delta \boldsymbol{\eta}_{j,K})$

(3)

式中,J和K分别为STA节点集合和台区集合,且 $j \in J = \{1, 2, \dots, J\}, k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

低压台区集中器和电能表的 HPLC 通信模块通 过内置过零检测电路,对各相电压过零点进行检测 判断,记录电压过零点的时刻。通过上述过零检测 算法实现偏差计算,从而得到各待定电能表是否归 属于某台区的辨识结果。但现场安装的各厂家的 HPLC 通信模块对上升沿、下降沿采集和式(1)判别 功能的支持能力存在差异,实际使用时可能会出现 判别失败的问题。

2 台区户变关系辨识模式

2.1 集中式台区辨识

以全载集抄方式为例,台区通信网络拓扑见 图 2,台区辨识功能可根据应用需求部署在营销 主站或计量主站(以下简称主站),它通过 GPRS/ CDMA 无线网络与所辖多个集中器进行远程通 信^[11]。为了获取台区基准特征,每个集中器和基准 表与所在台区的变压器低压侧出线端相连。



集中式辨识为传统台区辨识模式,其主要特征 是 STA 向 CCO 上报台区特征,在 CCO 处进行比较 判断。其辨识流程如图 3 所示。首先,主站下发台 区辨识使能命令;接着,集中器控制 CCO 模块启动 台区辨识任务,CCO 采用轮询或点对点下发方式向 载波电能表发送台区特征查询帧,即查询台区特征 的报文。若通信成功,STA 模块接收到查询帧后向 CCO 模块回复告知帧,CCO 模块接收该帧后提取其 中的电能表用户特征信息与台区基准特征信息进行 比对,从而对该电能表所挂接从属的台区进行辨识。 完成所有电能表的辨识后存储获取到的台区辨识名 单。在 CCO 台区辨识功能使能过程中,若 CCO 上 报了无法辨识的电能表计或节点跨台区事件,集中 器需将该信息上报主站,便于主站安排运行维护人 员至现场勘查,针对相关档案进行完善或修正。



图 3 集中式台区辨识流程

表2为两种辨识模式比较,在集中式辨识过程 中,STA 模块与台区辨识相关的工作内容主要包括 执行台区用户特征采集任务,采集 CCO 本地台区用 户特征信息,响应 CCO 下发的台区用户特征查询命 令等。CCO 模块与台区辨识相关工作内容主要包 括响应集中器下发的台区辨识使能控制命令,向 STA 下发台区辨识任务启动报文和台区特征采集方 案,以及收集各 STA 的采集结果并进行比对分析 等。值得注意的是,为了保证台区辨识期间正常的 日冻结抄读、费用控制下发、高频采集、事件上报等 数据业务通信,STA 即使判断台区辨识结果归属错 误也不允许主动离网。此外,为了保持辨识对象固 定,减少辨识难度,在台区辨识期间设置 CCO 的白 名单过滤功能处于开启状态,即仅对当前搜索到的 电能表进行台区辨识,对于新增电能表则在台区辨 识完成之后再处理。当 CCO 发现非本台区的电能

表节点后,需立即上报给集中器。

表 2 两种辨识模式比较

模块类型							
		集中式	分布式				
	通用	响应集中器台区辨识使能控制命令和 搜集台区基准特征					
CCO	特有	收集各 STA 的台区用户 特征采集结果	下发台区特征				
		分析获取的数据, 进行对比判断	查询台区辨识结果				
	通用	台区用户特征数据采集和存储					
STA	特有	响应台区特征查询命令	响应台区特征发布信息 分析获取的数据,进行 对比判断 响应台区辨识结果 查询命令				
发现台区 关系异常 勘查 结束		◆ 主站 集中器 启动台区辨识 自动台区辨识 直动台区辨识 返回查询台区辨识 返回查询台区辨识 修止台区辨 取明电影表 否 台区档案 更新	CCO STA 铭山 台区特征采集启动 等待 台区判别结果查询 台区判别结果查询 台区判别结果查询 经增果 记到别结果告知 说出果 1000000000000000000000000000000000000				

图 4 分布式台区辨识流程

2.2 分布式台区辨识

由第 2.1 节可知,集中式台区辨识模式依赖于 CCO集中式的数据分析和控制中心,辨识过程中 CCO需进行台区全局节点任务控制、特征量的获取 以及进行集中分析和计算,与 STA 之间需进行大量 的信息交换,对信道质量依赖度高,辨识模式不够灵 活,在信道质量不佳或易受干扰时应用具有一定 的局限性。对此,提出一种分布式台区辨识模式, 如图 4 所示,它采用分布式的控制方案,主要思路是 集中器经 CCO 向 STA 下发台区特征,在 STA 处进 行特征比对并判断台区归属,最后将辨识结果提供 给 CCO。

如表 2 所示,分布式辨识模式中 STA 区别于集 中式的特有工作内容主要为由 STA 进行台区用户 特征信息比对、台区归属初步分析,以及响应 CCO 下发台区判断结果查询命令。分布式辨识模式中, CCO 模块的特有工作内容主要为向各个 STA 通过 全网广播方式下发台区特征信息、轮询读取 STA 的 台区判别结果。

比较上述两种辨识模式可知,分布式台区辨识

模式将台区特征比对和判断归属的工作分配给 STA 节点完成,对 CCO 的数据处理压力较小,同时对不 同厂家 STA 混装的识别算法兼容能力较强。

3 案例测试

3.1 实验室测试

为验证所提台区辨识方案的可行性,在实验室 采用模拟配电变压器和单相、三相智能电能表模拟 现场环境搭建两个小规模模拟台区进行测试。两个 模拟台区的单相电能表分别安装在模拟配电变压器 低压出线端的 A 相和 B 相。三相电能表与集中器 通过 RS-485 方式连接,用于获取台区基准特征,不 参与性能测试指标评价。

为对辨识结果进行定量评价,评价指标采用准 确率β和召回率γ。

$$\beta = n/J \times 100\% \tag{4}$$

$$\gamma = r/J \times 100\% \tag{5}$$

式中:n 为当前台区中能准确辨识的 STA 节点数;r 为当前台区中能正常采集和召回辨识结果的 STA 节点数。

测试时首先对台区集中器及电能表进行对时,并 通过三相基准表采集各台区的特征电参量数据;然 后,清空集中器单相电能表档案,启动无档案自动搜 表任务,使电能表通过数据主动上报的方式,将自身 地址发送给集中器;接着,集中器更新台区的档案信 息;最后,分别通过集中式和分布式辨识模式进行台 区辨识。实验室测试结果见表3的台区1和台区2。

3.2 现场测试

在广西某城市低压居民台区进行现场测试,该 现场包括4个台区,下属共计388只用户电能表。 最长允许测试时间设为2min。在现场已安装的采 集设备的基础上,通过集中器软件升级和HPLC通信 模块更换方式使设备支持上述两种辨识模式。所更 换的 STA 模块来自不同的厂家。表 3 中序号 3~5 和 6A 的 4 个台区中通信模块的台区辨识算法仍沿用 现场原 HPLC 通信模块厂家的方法。为便于对比辨 识效果,将两种辨识模式的辨识结果绘制成图 5。 图 5(a)、(b)分别展示识别用时和识别准确率的测 试结果,其中的台区编号按用户数由少到多排序。



1) 识别用时

图 5(a)中的台区 1 和台区 2 为实验室模拟台 区,由于用户数较少,比较可知在两种模式辨识所 需的时间差距不大,且均能准确辨识所有用户。 台区 3~6 为现场测试台区。由图 5(a)可见,随着用 户数的增多,两种辨识模式的用时均随之增长,但集 中式模式的测试用时增长较快。这是由于集中式辨 识模式需收集台区内 STA 高频采集的台区用户特征 信息,数据传输容量大,对通信信道质量和CCO的大

表 3 测试结果

石区序旦	田白粉	测试用时/s		准确率/%		召回率/%	
百区庁丐	用厂奴	集中式	分布式	集中式	分布式	集中式	分布式
1	23	16.9	16.9	100	100	100	100
2	46	18.2	18.1	100	100	100	100
3	63	21.9	21.2	100	100	100	100
4	84	30.8	29.9	100	100	100	100
5	102	52.9	43.6	100	100	100	100
6A	139	120.0	61.7	96.4	100	99.3	100
6B	139	120.0	61.8	99.3	100	99.3	100

数据处理能力要求较高,故测试时间较长。而分布 式模式用户特征信息的获取和分析判断工作由 STA 完成,节约了信息在信道传输的时间和 CCO 的数据 分析时间,故辨识效率较高。

2) 识别准确率

将现场测试台区的电能表编号按台区归属绘制 成图 6。图 6 中的真实情况是指通过现场勘察确定 的电能表真实户变归属关系。



图 6 现场台区辨识结果

由图 6 和表 3 可见,分布式辨识结果与真实情况一致。集中式辨识中台区 6A 的召回率为 99.3%, 但辨识准确率仅为 96.4%。即本次测试过程中有 1 只电能表抄表失败,除此之外,还有 3 只电能表通 信正常但辨识失败。结合图 6 可知,编号为 265 和编 号为 286~288 的 4 只电能表在测试过程中辨识失败。

3) 异常问题分析

对上述抄表失败问题,现场调查发现电能表 265 与该台区的集中器地理距离相对较远,HPLC 抄 表传输距离较长,信号衰减较严重。由于集中式辨 识模式下需传输大量的台区用户特征信息,数据传 输量大,故抄表速度慢且成功率低。虽然采集任务 有补抄机制,但由表 3 可见,该模式下测试时长为 120 s,即达到了预设的最大允许测试时间,此时集 中器会下发台区辨识任务停止命令,强制终止辨识 任务。此时该电能表的数据未完成补抄,后续的辨 识流程无法完成,故认为是辨识失败。而分布式辨 识模式下,用户特征信息的获取和分析判断工作由 STA 完成,信道上只需传输下发台区基准特征信息 和辨识结果查询交互报文,数据传输量较小,故辨识成功率较高。

此外,现场调查发现:编号为 286~288 的 3 只 电能表在测试过程中能正常抄表,但辨识失败;本次 测试的辨识算法采用工频交流电压过零检测法,辨 识失败的 STA 生产厂家为同一厂家,与同台区其他 电能表的生产厂家不同。该厂家由于早期标准未 统一的历史原因,仅支持下降沿信息的采集和特征 辨识,但依然支持双沿工频信号特性信息采集。台 区 6 的 CCO 厂家考虑到芯片的处理能力有限,其 产品仅提供上升沿特征辨识功能,CCO 厂家与该 STA 厂家在辨识算法的沿数据处理方式上存在不兼 容的情况。

据此推断,集中式辨识模式下,CCO 可采集到 该问题 STA 回复的双沿台区用户特征信息,但却无 法进行辨识,造成现场不同 HPLC 厂家的产品混装 时台区辨识功能无法互联互通的情况。而在分布式 辨识模式下,CCO 在辨识时仅负责下发台区基准特 征信息和向各 STA 查询台区判别结果,台区归属判 别在各用户的 STA 模块上实现,该厂家的 STA 收到 CCO 下发的双沿台区基准特征信息与自身采集到 的用户特征信息进行比对,可正常辨识,故在该模式 下,未发生上述 CCO 辨识功能兼容性缺陷造成的辨 识失败问题。

为验证上述推断结果,通过更换模块和集中器 软件升级的方式使台区 6 的 CCO 支持双沿检测功 能,并重新进行测试,结果如表 3 中的台区 6B 所示。 可见,CCO 支持双沿检测后,召回率与辨识准确率 相等,即除了 1 只电能表抄表失败外,其余电能表均 能准确辨识,说明支持双沿检测的 CCO 能准确辨识 上升沿和下降沿的用户特征信息,辨识失败问题不 再发生,故上述推断结果是可信的。

4 结 论

上面分析了传统集中式台区户变关系辨识技术 中存在的不足,提出了一种基于 HPLC 通信模块的 分布式双沿台区辨识方案。该方案在 HPLC 相关通 信设备的基础上,建立由集中器经 CCO 向 STA 下发 台区特征,在 STA 处进行特征比对并判断台区归属 的分布式辨识模式,设计了交流电信号双沿检测算 法并提供通信规约支持,避免了不同厂家的 HPLC 通信模块设计的沿过零检测算法的兼容性问题。案 例测试情况表明,在现场台区用户较多时,分布式辨 识模式的处理性能更佳,且出现抄读失败和辨识失 败的情况较少,验证了所提方案的可行性。所提方 案辨识户变关系仅利用了低压台区用户电信号的工 频电压特征,如何综合利用工频周期特征、工频频率 特征提高辨识的准确率值得进一步研究。

参考文献

- [1] 蔡永智,唐捷,阙华坤,等.基于电压集群特性分析的台 区户变关系校验方法[J].广东电力,2021,34(8):50-60.
- [2] 梁捷,梁广明,黄水莲.基于 LSSVM 的用户异常用电行 为辨识研究[J].青海电力,2021,40(2):27-31.
- [3] 李彩霞.基于 HPLC 通信模块的智能电表深化应用[J]. 电子技术与软件工程,2021(9):205-206.
- [4] 潘明明,田世明,吴博,等.基于智能电表数据的台区识别与窃电检测方法研究[J].智慧电力,2017,45(12): 80-84.

(上接第54页)

3)利用"三查"技术,可发现人不能至或其他原 因未列入台账的电网地质灾害隐患点,同时对列入台 账的地质灾害隐患点能够进行及时跟踪监测,提高汛 期前电网地质隐患点排查的精度和效率,锁定重点关 注对象。仍需在电网防灾减灾事业中进一步推广, 逐步建立全省至全国范围内电网地质灾害标志库。

4)"三查"技术也可运用到电网规划选址、施工 阶段。遥感技术是电网防灾减灾重要技术手段,探 求新的遥感数据处理技术,将人工智能引入遥感地 质数据分析中,为构建坚强智能电网中电网规划技 术领域提供技术支撑。

参考文献

- [1] Chuang DENG, Yongxing CAO, Zhihang XUE, et al. A case study of landslide monitoring system for a transmission tower in Maoxian, Sichuan China [C] // 2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks, IEEE; 2017.
- Marie COSTANTINI, Alessandro FERRETTI, Federico MINATI, et al. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202;250-275.
- [3] D Di MARTIRE, M PACI, P CONFUORTO, et al. A nation-wide system for landslide mapping and risk management in Italy: The Second Not-ordinary Plan of Environmental Remote Sensing[J].International Journal of Applied Earth

- [5] 邱志辉,伍栋文,刘水,等.基于 HPLC 通信模块的智能 电表深化应用研究[J].江西电力,2018,42(10):25-29.
- [6] 余鹤,夏水斌,鄢烈奇,等.低压用电"台区识别技术" 研究[J].通信与信息技术,2019,49(2):35-39.
- [7] 柯海波.基于 HPLC 在智能电网数据采集中的应用探 讨[J].四川电力技术,2021,44(1):58-61.
- [8] 梁捷,梁广明.宽带电力线载波通信资源优化调度方案 分析[J].内蒙古电力技术,2020,38(5):9-13.
- [9] 梁捷.计量自动化系统上行和载波通信联合测试研究[J].云南电力技术,2019,47(2):84-87.
- [10] 朱阳光,刘瑞敏,沈鑫,等.基于过零点检测的台区电 压畸变研究[J].数据通信,2019,38(4):27-31.
- [11] 范杏元,周纯.兼容电力线载波通信的低压集抄研 究[J].信息技术,2019,43(5):65-70.
- 作者简介:

梁 捷(1987),男,硕士,工程师,主要从事电能计量管 理方面的工作。

(收稿日期:2021-11-10)

Observation and Geoinformation, 2017,63:143-157.

- [4] Jie DONG, Lu ZHANG, Menghua Li, et al. Measuring precursory movements of the recent Xinmo landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets[J]. Landslides, 2018,15(8): 135–144.
- [5] Emanuele INTRIERI, Federico RASPINI, Alfio FUMAGAL-LI, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. Landslides, 2018, 15:123-133.
- [6] 石菊松, 吴树仁, 石玲. 遥感在滑坡灾害研究中的应 用进展[J].地质评论,2008,54(4):505-514.
- [7] 戴岚欣,许强,范宣梅,等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨 沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初 步研究[J].工程地质学报,25(4):1151-1164.
- [8] 曹永兴,邓鹤鸣,蔡炜,等. 电力设施应对地震及其次
 生灾害的研究进展[J]. 高电压技术,2019,45(6):
 1962-1974.
- [9] 曹永兴,常鸣,唐川,等.丹巴康定输电走廊滑坡泥 石流遥感调查及预警对策[J].地质灾害与环境保护, 2013(2):8-15.
- Yong Xing CAO, Zhi Hang XUE, Chang Hua ZHANG, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 3160-3163.

作者简介:

卜祥航(1987),男,博士,高级工程师,从事输变电工程 防灾减灾技术研究工作。 (收稿日期:2021-11-05)
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

(国网安徽省电力公司宿州供电公司,安徽 宿州 234000)

摘 要:文中结合保护装置动作录波情况,对一起多套保护装置同时动作的事故进行分析。某变电站进线断路器线路电压互感器发生爆炸,引起该间隔线路保护、相邻间隔线路保护以及上一级变电站线路保护、主变压器中后备保护同时动作。由于保护配合貌似不合理,对故障波形和保护动作情况进行了深入的分析和探讨,发现此次故障期间发生了多次短路故障转换,各保护装置配合并无问题,保护装置均为正确动作。

关键词:主变压器保护;故障波形;接地故障;故障电流;异相接地

中图分类号:TM 63 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)04-007-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220414

Fault Analysis of Simultaneous Operation of Multiple Protective Devices

ZHAO Xiaodong, LI Feng, CAO Feixiang, FU Leilei

(State Grid Suzhou Electric Power Supply Company, Suzhou 234000, Anhui, China)

Abstract: Combined with the action recording of protection device, an accident in which multiple sets of protection devices act at the same time is analyzed. The explosion takes place in the voltage transformer of incoming switch line in a substation, and this causes the simultaneous action of the line protection of this interval and line protection of adjacent interval as well as line protection of the upper substation and backup protection in the main transformer. Because the protection coordination seems unreasonable, the fault waveform and the protection action are analyzed and discussed in depth. It is found that during this fault, there are many times of short-circuit fault conversion, there is no problem in the cooperation of various protection devices, and the protective devices acted correctly.

Key words: main transformer protection; fault waveform; ground fault; fault current; out-of-phase grounding

0 引 言

继电保护装置作为电力系统密不可分的一部 分,起着保障电力设备安全和防止电力系统大面积 停电的最基本、最重要、最有效的技术手段^[1-4]。继 电保护装置动作行为分析对电力系统的安全可靠运 行起着非常重要的作用^[5-9]。

2021 年 7 月 31 日,110 kV 白云变电站 110 kV 黑白 783 线路电压互感器发生爆炸。该线路电压互 感器接于黑白 783 线 A 相,爆炸后电压互感器引线 在振荡过程中先后与黑白 783 线 B 相以及相邻间隔 110 kV 白云 785 线 C 相发生接触,造成 220 kV 黑土变 电站 1 号主变压器中后备保护动作,跳开主变压器中 压侧断路器,同时该站 110 kV 黑白 783 线线路保护距 离Ⅱ段、零序Ⅱ段保护动作,断路器重合闸不成功。

根据现场查看及保护装置的动作情况,产生以 下两点疑问:

1)220 kV 黑土变电站内,主变压器保护中压侧 过流 I 段 1 时限定值为 0.6 s,线路保护 II 段定值为 0.3 s,而主变压器及线路保护装置均显示大于 900 ms 动作;根据保护装置定值配合,应该线路保护先动 作,而此次故障主变压器保护却先于线路保护动作。

2)110 kV 白云变电站内,一次故障点为 A 相线路 电压互感器爆炸,而该站内动作的两套线路保护却只 显示故障相为 C 相,故障录波中仅有 C 相故障电流。

鉴于故障的特殊性,下面通过查阅保护故障波 形,结合一次设备故障动作情况,对此次多套保护动 作行为进行了深入的分析。

1 保护动作情况

保护动作后,检查 220 kV 黑土变电站主变压器 保护装置,两套保护装置均发"AB 相 II 侧过流 T11" 动作,即中压侧过流 I 段 1 时限动作。同时对相关 变电站各间隔保护装置进行检查,发现 220 kV 黑土 变电站黑白 783 线 110 kV 线路保护动作,110 kV 白 云变电站黑白 783 线线路保护、白云 785 线线路保 护动作,相关间隔示意如图 1 所示。此次故障期间 故障类型转换及保护动作时序图如图 2 所示。



图 1 故障相关变电站及间隔分布

1)220 kV 黑土变电站

1 号主变压器保护:在 5:55:34.056 时 220 kV 黑土变电站 1 号主变压器中压侧后备保护启动;相对 时间 930 ms 过流 I 段 1 时限动作,跳开 701 断路器。

110 kV 黑白 783 线线路保护:在 5:55:34.054 时 783 断路器保护装置启动;相对时间 990 ms 零序 过流 II 段保护动作;相对时间 999 ms 距离 II 段保护 动作,跳开 783 断路器;相对时间 2042 ms 重合闸动 作出口,783 断路器重合;相对时间 2251 ms 距离加 速保护动作,再次跳开 783 断路器。 2)110 kV 白云变电站

黑白 783 线线路保护:在 5:55:34.059 时保护 启动;相对时间 636 ms 接地距离 I 段保护动作,故 障相 C 相故障电流为 17.88 A。

白云 785 线线路保护:在 5:55:34.054 时保护 启动;相对时间 629 ms 分相差动保护动作,保护三 跳出口,故障相 C 相差动电流为 18.173 A;相对时间 641 ms,接地距离 I 段保护动作。

2 保护动作逻辑分析

2.1 220 kV 黑土变电站号保护先于线路保护动作

2.1.1 1号主变压器保护动作逻辑

在5:55:34.056时,根据波形分析系统有A相接地故障,1号主变压器中压侧后备保护启动,故障随后消失。但保护启动后展宽5s进入故障逻辑计算,因该装置无法提取电子版波形,其保护启动至再次感受到故障电流的时间可参考黑白783线线路保护,根据分析该时间间隔为319ms,如图3所示。

故障开始后,其故障电流二次值为25A(定值为9.73A),折算到一次电流值为6000A(CT变比为1200/5),故障持续至保护发出跳闸命令的时间为612ms,故障开始后1号主变压器故障波形如图4所示。

2.1.2 黑白 783 线线路保护动作逻辑

在 5:5:34.054 时,线路发生 A 相接地故障,线路保护装置保护启动。保护启动后并展宽 5 s 进入故障逻辑计算。由故障录波波形可知其保护启动至 再次感受到故障电流的时间为 319 ms,如图 3 所示。

由上述分析可知,主变压器中后备保护从启动 到故障跳闸的总时间为931 ms 左右。

保护装置启动 319 ms 后,线路发生 AB 两相接地短路故障。此时零序电流为12A(I段定值



图 2 故障类型转换及保护动作时序

为18.58 A, II 段定值为4.5 A, II 段时间为0.3 s), 折算到一次电流值为2.88 kA(CT变比为1200/5); 故障持续时间为285 ms,小于定值0.3 s。此时故障 类型发生改变,由AB相间接地短路发展为三相短 路故障,零序电流消失。因零序电流持续时间小于 定值时限(0.3 s),因此零序过流 II 段保护不动作, 零序电流保护动作元件返回,其波形如图5所示。



图 3 黑白 783 线线路保护启动至故障开始时间分布



图 4 1 号故障波形





三相短路故障持续 82 ms 后,故障类型再次 转变为 AB 两相接地短路故障,其故障波形分别如 图 6、图 7 所示。此时零序电流再次出现,零序电流值 为 14.5 A(I 段定值为 18.58 A, II 段定值为 4.5 A), 折算到一次电流值为 3.48 kA(CT 变比为 1200/5), 持续时间为 342 ms(零序过流 II 时限为 0.3 s),零序 过流 II 段保护动作,线路断路器跳开。相对时间 2042 ms 重合闸动作出口,线路断路器重合,此时故 障依然存在,110 kV 清泉变电站清泉风电通过黑清 I线依然向故障点提供故障电流。相对时间 251 ms, 距离加速保护动作,再次跳开线路断路器。



图 7 黑白 783 线 AB 两相故障波形

由上述分析可知线路保护装置启动到零序过流 Ⅱ 段保护动作的时间为 992 ms(319 ms+25 ms+82 ms +306 ms)。

线路保护装置的距离 II 段保护动作逻辑和零序 过流 II 段类似。根据保护装置原理,保护启动后 160 ms 以内没动作需要振荡闭锁元件开放;然后,两 相故障通过不对称故障振荡闭锁元件开放,但是没到 300 ms 故障又转换成三相故障,不对称故障元件 开放收回,又转成对称故障元件开放。大概4个多周 期又转成两相故障,又需要不对称故障元件开放。后 面连续满足定值 300 ms,距离保护动作。

2.1.3 小 结

根据波形分析,此次故障比较特殊,中间经过多次的故障类型改变:首先是 A 相接地后消失,然后

是 AB 相接地短路,再后来是三相短路,最后转为两 相短路接地至故障切除。此种特殊故障情况下主变 压器中后备保护 Ⅰ 段 1 时限、线路零序过流 Ⅱ 段保 护、线路距离 Ⅱ 段保护最终动作时间在 900 ms 以后。

2.2 110 kV 白云变电站 783 线 C 相产生电流

2.2.1 保护动作逻辑分析

故障时黑白 783 线与白云 785 线波形对比如 图 8、图 9 所示。



图 8 110 kV 白云变电站 783 线 A 相与 785 线 C 相故障时 783 线路故障波形



图 9 110 kV 白云变电站 783 线 A 相与 785 线 C 相故障时 785 线路故障波形

110 kV 白云变电站黑白 783 线线路保护启动后 601 ms 开始产生 C 相故障电流,电流值为 17.88 A,持 续 82 ms 后跳开断路器,C 相电流消失。

110 kV 白云变电站黑白 783 线的相邻间隔白云 785 线线路保护启动后 601 ms 开始产生 C 相故障电流,即为差流,差值值为 18.173 A,持续 82 ms 后跳开故障间隔断路器,C 相电流消失。因该差流值与故障间隔线路保护 C 相故障电流 17.88 A 几乎一致,因此判断白云 785 线没有向系统输送电,为负荷侧。

220 kV 黑土变电站侧黑白 783 线线路保护在 5:55:34.054 启动,启动后 600.7 ms 开始产生 C 相故 障电流,电流值为 18 A,持续 81.6 ms 后跳开故障间 隔断路器,C 相电流消失,其故障波形如图 10 所示。



图 10 220 kV 黑土变电站侧黑白 783 线路故障波形

2.2.2 小 结

110 kV 白云变电站黑白 783 线线路保护、相邻 白云 785 线线路保护以及 220 kV 黑土变电站侧黑 白 783 线线路保护 C 相故障电流同时产生,且大小 一致、持续时间相同,可以推断出 110 kV 白云变电 站侧黑白 783 线 A 相线路电压互感器引线与相邻 白云 785 间隔 C 相接线放电短路。并且由在此期 间的 220 kV 黑土变电站侧黑白 783 线线路保护波 形可知 AB 相已短路,对于 220 kV 黑土变电站来 说,出现了短时间的 ABC 三相短路。此时,220 kV 黑土变电站为电源侧,110 kV 白云变电站为负荷 侧,其故障电流如图 11 所示。

由图 11 可知,因故障电流跨过白云变电站 783 线 AB 两相电流互感器,因此该间隔只有 C 相有故 障电流,且该电流同白云 785 线线路保护的差动保 护差流大小一致,与 220 kV 黑土变电站侧黑白 783 线 C 相电流大小一致。



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

(大唐水电科学技术研究院有限公司,广西南宁 530007)

摘 要:交联聚乙烯由于其电气性能、结构轻便等优势被广泛应用于高压交直流电缆绝缘领域,但是近年来因电缆故 障导致的停电事件呈现出逐年增多的趋势。文中针对某水电厂主变压器空载充电过程中存在的 500 kV 交联聚乙烯 电缆外护套对夹件间隙放电的问题。首先,利用 ATP-EMTP 仿真软件建立了全厂一次设备电磁暂态仿真分析模型, 对导致电缆铝护套放电现象的故障原因进行了分析;然后,对不同种类的故障治理措施进行比较;最后,提出了针对 性解决方案。

关键词:交联聚乙烯电缆;间隙放电;电磁暂态;过电压;避雷器;剩磁;励磁涌流 中图分类号:TM 855 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0077-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220415

Analysis on Discharge Fault of 500 kV Cable Outer Protective Sheath and Research on Its Prevention Measures

GUAN Yuyao, LIU Shoubao, SONG Jiajun, HU Siyu, WANG Xiaolan

(Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract:Due to the advantages of electrical performance and light structure, cross-linked polyethylene (XLPE) is widely applied in the insulation field of high-voltage AC/DC cable. However, in recent years, the number of power outages caused by cable faults has been increasing year by year. Aiming at the gap discharge problem of 500 kV XLPE cable sheath to clamp during the no-load energization of main transformer in a hydropower plant, firstly, ATP-EMTP software is used to establish the electromagnetic transient simulation analysis model of primary equipment in the whole plant. Then, the fault causes of discharge phenomenon of the cable aluminum sheath are analyzed, and the different kinds of fault treatment measures are compared. Finally, the corresponding solution is put forward.

Key words: cross-linked polyethylene (XLPE) cable; gap discharge; electromagnetic transient; overvoltage; lightning arrester; residual magnetism; excitation inrush current

0 引 言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE) 由于其电气性能、耐热性能和机械性能优良、传输容 量大、结构轻便等优势被广泛应用于高压交直流电 缆绝缘领域^[1-3]。但是近年来因电缆故障导致的停 电事件呈现出逐年增多的趋势^[4-7],其中,据相关机 构调查统计,由于电缆终端或中间接头环境的安装 方式不合理导致了电力电缆运行中的大部分异常或 故障^[8-14]。因此,针对高电压等级的电力电缆,需要 根据电缆具体参数选择合理的安装方式。

下面,结合一起 500 kV 交联聚乙烯电缆外护套 放电的故障分析进行防治措施研究。首先,利用 ATP-EMTP 仿真软件建立了全厂一次设备的仿真模 型,分析了电缆铝护套合闸过电压现象以及电缆铝 护套过电压的影响因素;然后,分析了放电故障的原 因;最后,制定了处理方案并提出了预防措施。

1 故障简介

某水电厂的 500 kV 电缆为 XLPE 电缆,导体截

面积 800 mm², 于 2012 年 3 月投入运行, 用于连接 主变压器高压侧至 500 kV 的气体绝缘金属封闭开 关设备(gas insulated switchgear, GIS), 如图 1 所示。



图 1 某水电厂一次接线及 500 kV 电缆位置

该水电厂的 500 kV 电缆采用平行敷设的敷设方 式,电缆最大长度为 795 m,电缆满载电流为 770 A, 电缆敷设间距为 400 mm。电缆的主变压器侧铝护 套通过电压限制器接地。电压限制器额定电压为 15 kV,1 mA 参考电压经试验约为 22.5 kV。500 kV 电缆 GIS 侧金属护套采用直接接地方式。自设备投 运以来,在进行主变压器倒闸充电瞬间,存在夹具对 电缆外护套放电现象,如图 2 所示。



图 2 现场放电现象

2 仿真模型建立

为了对故障原因及治理措施进行研究,采用 ATP-EMTP 软件建立了该水电厂电磁暂态分析模型,对不同运行方式、电压限制器和变压器铁芯非 线性及剩磁情况下的电缆合闸过电压进行了量化 计算。

建立全厂一次设备模型如图 3 所示,其中电缆被 分为 5 等分,依次设置 6 个观察点。观察点 1 位于电 缆与 GIS 的终端头处,观察点 6 位于电缆与变压器高 压侧相连的终端头处,以便对合闸过程中铝护套电 压情况进行观察。GIS 管道和 500 kV 电缆采用单芯管道模拟,主变压器高压侧入口电容为 117.5 pF, 如图 4 所示。远端线路采用标准三相电压源,线电压幅值为 500 kV,冲击合闸时间设置为 0.1 s。



图 3 一次设备电磁暂态仿真模型



图 4 基于 ATP-EMTP 的 GIS 和电缆模型

为了考察合闸过程中主变压器高压绕组铁芯非 线性和剩磁所导致的励磁涌流对电缆铝护套过电压 的影响,采用高压绕组磁滞回线,如图 5 所示。当对 某台变压器进行冲击合闸时,对应合闸前各绕组剩 磁,按照 A 相为 1430 Wb、B 相为-1430 Wb、C 相为 -1430 Wb 来设置,其中 1430 Wb 为变压器绕组磁 链稳态值。



3 电缆铝护套合闸过电压分析

全厂除了2号发变组及其2号主变压器高压电 缆外,其余一次设备均带电。在此运行方式下,通过 GIS 断路器在0.1 ms 时对2号电缆及2号主变压器 充电,得到电缆铝护套观察点的电压波形,如图6所 示。图中,蓝色、红色、绿色曲线分别代表A、B、C 三 相电压波形(下同)。

从图 6 的波形可知,除了观察点 1 因为接地点、 观察点 6 因为过电压保护器使电压得到限制外,其 他观察点的过电压波形均处于较高幅值。观察点 2 的 A 相过电压峰值达 270 kV,对应波形局部放大如 图 7 所示,其波头时间约 1.5 μs,波尾时间 2 μs。









对电缆铝护套放电原因开展的研究,集中在电 厂运行方式、电缆电压限制器参数、主变压器高压绕 组剩磁 3 个方面,下面对这 3 个可能因素进行定量 分析。

4.1 电厂运行方式的影响

分别在全厂仅 GIS 带电时对 2 号电缆及 2 号主 变压器充电,以及在 GIS、1 号和 3 号电缆主变压器 带电时对 2 号电缆和 2 号主变压器充电两种情况进 行分析。为了便于比较,以观察点 2 的电压作为比 较标准,得到两种情况下的电压波形,如图 8 所示。

将图 8 与图 7 比较可知,这 3 种运行方式下的 过电压峰值分别为 228 kV、248 kV、270 kV。从整体 上看,运行设备越多,对应合闸导致的电缆铝护套过 电压幅值越大,但增加幅值并不明显。



图 8 不同运行方式下电缆铝护套过电压波形

4.2 电缆电压限制器参数的影响

以全厂除了2号发变组及其2号主变压器高压 电缆外其余一次设备均带电(第3章运行方式)时 对2号电缆和主变压器合闸充电作为分析对象。将 电压限制器从 HC15型替换为 HC5型, HC15 的直 流1mA参考电压比 HC5大三倍, HC5的伏安特性 曲线比 HC15的伏安特性曲线低, 如图9所示。



采用 HC5 过电压限制器情况下,观察点 2、观察 点 5 和观察点 6 的电压波形如图 10 所示。



图 10 采用 HC5 过电压限制器时的电压波形

通过对比图 6 和图 9 可知,在降低过电压限制 器的伏安特性曲线之后(动作电压和残压降低),观 察点 6(过电压限制器安装点)的电压明显降低,观 察点 2 的电压几乎没有变化,观察点 5 的电压反而 有所上升。

4.3 主变压器高压绕组剩磁

第3章中的过电压分析结果是在2号主变压器 铁芯最大剩磁情况下得到的。对变压器高压绕组零 剩磁情况进行计算,得到观察点2电压波形如图11 所示。

对比图 6(b) 和图 11 可知, 变压器铁芯是否有

剩磁对电缆铝护套过电压基本无影响。这是因为合 闻过程中电缆铝护套过电压和变压器绕组励磁涌流 的时间为两个不同的数量级。以最大剩磁情况下的 合闻过程(第3章运行方式)为例,对应的励磁涌流 电压波形和观察点2A相电压波形如图12所示。



图 11 2 号主变压器铁芯剩磁为 0 时观察点 2 电压波形



图 12 励磁涌流波形和观察点 2 A 相电压波形

从图 12 可知:励磁涌流是一个缓慢的过程,它 是由电感决定的,由于电感具有阻碍电流变化的特 性,因此其过渡过程是以基波为时间尺度的;电缆的 过电压是由分布电容决定的,电容对瞬态电压具有 导通作用,所以其过渡过程是以微秒为时间尺度的。

4.4 小 结

就电厂运行方式、电缆电压限制器参数、变压器 高压绕组剩磁 3 种因素对电缆铝护套合闸过电压的 影响分析得出如下结论: 1)电缆铝护套合闸过电压主要受系统参数,尤 其是其自身分布电容参数的影响,运行方式对其影 响不大;

2)过电压限制器对电缆铝护套合闸过电压的 影响集中在安装点附近,对于其他部分基本起不到 限制过电压的功效;

3)励磁涌流和过电压是两个时间尺度的变化 量,变压器是否存在剩磁对电缆铝护套过电压没有 影响。

5 放电原因分析及处理措施

5.1 放电原因分析

该水电厂 500 kV 电缆夹具实际安装形式如图 13 所示,其内部橡胶垫不是全包裹形式,采用的是两个 不能紧密配合的不完整半圆组合而成,导致电缆外护 套表皮与金属夹件之间存在空气间隙。在系统侧给 电缆冲击合闸的过程,实际上是电荷在系统-电缆-变压器中重新分布的过程,在合闸的瞬间电荷分布 是动态波动到逐步平衡的。在合闸瞬间,通过电容 分压电缆芯线-屏蔽层-外套均能够感应电荷,这些 电荷无法在合闸瞬间被接地线疏导进入大地,将产 生过电压,其中屏蔽层过电压峰值达 270 kV。半导 体层电位受屏蔽层影响也将达到 270 kV 的幅值,最 终导致夹件空气间隙击穿。



图 13 该水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装情况

电缆铝护套在合闸冲击时刻的最大过电压可到 达 270 kV,对于夹具和电缆外护套之间的空气间隙 (约1 cm)被击穿是必然的。就放电过程而言,其本 质上是一种电容分压导致的感应放电,由于能量较 低,不会对电缆外护套造成明显破坏。

5.2 处理措施

参考某水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装方式,

如图 14 所示,可知其外护套与金属夹具之间采用直 接接触方式。由于外护套外皮采用的是导电层,因 此冲击合闸过程中电缆外护套表面的感应放电直接 以紧密接触传导的方式释放,不会出现可见火花。



图 14 某水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装情况

参考其他电厂 500 kV 电缆金属夹具安装形式, 结合该水电厂实际情况,为了消除冲击合闸过程中 存在的火花放电现象,在不对现有安装方式进行大 改变的前提下,可通过在夹件空气间隙处填充软质 导电橡胶或塞入铝箔纸的方式,实现夹具与电缆外 护套的紧密电气连接,将冲击合闸过程中产生的感 应电荷及时释放。

6 结 论

1)对于单端接地的高压短距离电缆,空载冲击合
 闸过程中在铝护套上产生较高的过电压是由于电缆
 自身结构固有的分布电容决定的。采取改善接地或
 改变电压限制器难以降低铝护套上最大过电压幅值。

2)该水电厂电缆外护套放电的原因在于采用 了不合适的金属夹具安装方式,其橡胶垫片未能对 电缆外护套进行全包裹,使得外护套与金属夹具之 间的空气间隙在合闸过程中承受了过电压而发生空 气击穿。

3)建议在高压电缆安装过程中,采用导电橡胶 作为金属夹具垫片,在柔性固定电缆的同时起到释 放感应电荷的作用。

参考文献

- [1] 杜伯学,韩晨磊,李进,等.高压直流电缆聚乙烯绝缘材 料研究现状[J].电工技术学报,2019,34(1):179-191.
- [2] 朱晓辉,杜伯学,周风争,等.高压交联聚乙烯电缆在 线监测及检测技术的研究现状[J].绝缘材料,2009, 42(5):58-63.

- [3] 吴洋,朱庆东,高路,等.高压直流系统电缆接头中空间
 电荷与电场分布的仿真计算[J].山东电力技术,2021,
 48(5):23-28.
- [4] 官志民.电力电缆绝缘击穿问题原因分析及探讨[J].科技资讯,2019,17(33):55-57.
- [5] 田巍. 35 kV 电缆突发绝缘击穿事故分析及防范措施[J].电世界,2021,62(1):29-30.
- [6] 张志芳.一起 110 kV 高压电缆异常的分析及处理[J].
 绝缘材料,2010,43(4):70-73.
- [7] 赖嘉豪.10 kV 交联电缆线路的故障分析及处理措施[J].科技与创新,2016(18):123-124.
- [8] 郑必成,顾蔚泉.一起 220 kV 交联聚乙烯电缆中间接
 头击穿故障原因分析及措施[J].电工技术,2021(9):
 99-100.
- [9] 刘凤莲,朱军,卢金奎,等.一起由接地工艺引起的
 220 kV高压电缆故障分析[J].四川电力技术,2019,
 42(3):64-67.
- [10] 边航,王金锋,杨大渭,等.一种容易被误判的 XLPE 电缆附件故障机理[J].电线电缆,2016(6):30-32.
- [11] 刘作鹏,丁亮,吴琼,等.一起 66 kV 电缆中间接头局
 部放电故障的检测与分析[J].东北电力技术,2020,
 41(6):50-52.
- [12] 项恩新,杨能,王科,等.110 kV 电缆中间接头半导电
 层缺陷局部放电测试技术研究[J].云南电力技术,
 2019,47(3):44-47.
- [13] 刘凤莲,邓元实,薛志航,等.110 kV 高压电缆中间接头系列故障分析[J].电线电缆,2017(6):36-40.
- [14] 徐虹,黄丽秋,娄建勇.35 kV XLPE 电缆中间接头
 典型缺陷三维电场仿真分析[J].浙江电力,2020,
 39(10):9-13.

作者简介:

管毓瑶(1996),女,硕士,从事电气设备试验工作;

刘守豹(1983),男,博士,研究方向为电力系统暂态分 析及工程电磁场数值计算;

宋佳骏(1995),男,硕士,从事电气设备试验工作;

胡思宇(1996),女,硕士,从事电气设备试验工作;

王晓兰(1995),女,硕士,从事电气设备试验工作。

(收稿日期:2021-12-25)

一起 35 kV 开关柜局部放电缺陷检测及分析

杨 洁¹,刘 鑫²,何 良³

(1.成都航空职业技术学院,四川成都 610100;2.国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041;3.清华四川能源互联网研究院,四川成都 610213)

摘 要:文中分析了一起35 kV 开关柜局部放电缺陷案例,采用暂态地电压、超声波及特高频等多种局部放电带电检测技术进行分析诊断,利用电磁波时差法对局部放电源进行定位,结合开关柜内部结构给出局部放电源位置范围,停 电检查发现 A 相避雷器引线与绝缘板间存在明显放电痕迹,验证了缺陷分析诊断及定位的正确性。结果表明,局部 放电带电检测技术可以有效发现开关柜内绝缘缺陷,案例为类似开关柜缺陷处理提供经验。

关键词:开关柜;局部放电;带电检测;时差法

中图分类号:TM 854 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)04-0083-04 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220416

Defect Detection and Analysis of Partial Discharge in 35 kV Switchgear Cabinet

YANG Jie¹, LIU Xin², HE Liang³

(1. Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, Sichuan, China; 2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Sichuan Energy Internet Research Institute under Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: A case of partial discharge defect in 35 kV switchgear cabinet is analyzed. The live detection technologies such as transient earth voltage , acoustic emission and ultra-high frequency is adopted to detect and analyze the defect, and the electromagnetic wave time difference method is used to locate the partial discharge source. Combined with the internal structure of switchgear cabinet, the location range of the partial discharge source is given. The obvious discharge trace between the lead of A-phase arrester and the insulation board is found during the power failure inspection, which verifies the correctness of the defect diagnosis and positioning result. The results show that the live detection technologies for partial discharge can effectively find insulation defects in switchgear cabinet, which provides experiences for similar defects treatment of switchgear cabinet.

Key words: switchgear cabinet; partial discharge; live detection; time difference method

0 引 言

35 kV 金属封闭式开关柜用于接收和分配电 能,并对电路进行控制、保护和监测,在配电网中广 泛使用,其运行可靠性对于电网的安全稳定运行具 有重要意义。在长期运行过程中,由于环境温度、湿 度、过电压、绝缘老化等影响,开关柜绝缘性能逐渐 劣化,导致绝缘强度降低,甚至造成严重事故^[1]。 据统计,开关柜故障中绝缘故障超过 50%,而绝缘故 障发生前期往往伴随着局部放电现象^[2]。因此,开展 开关柜局部放电带电检测及诊断具有重要意义^[3]。

开关柜内部发生局部放电时,一般伴有光、电、 声、热等现象,因此可采用紫外成像、红外成像、特高 频(ultra high frequency,UHF)、暂态地电压(transient earth voltages,TEV)、高频(high frequency,HF)、超 声波(acoustic emission,AE)等多种方法开展检测与 诊断^[4-7]。高频法需要在带电显示器处加装高频电 流传感器(high frequency current transformer,HFCT), 而开关柜带电运行时禁止打开柜门,导致该方法现 下面以某 110 kV 变电站 35 kV 开关柜局部放 电缺陷为例,介绍了缺陷检测、分析及定位的过程, 并通过解体验证,为开关柜局部放电缺陷分析及处 理积累了经验。

1 局部放电缺陷发现过程

某 110 kV 变电站开关柜型号为 KYN61-40.5, 额定电压为 40.5 kV, 额定频率为 50 Hz, 额定电流为 1250 A, 出厂时间为 2014 年 7 月。

2020年7月,在对该变电站内35kV开关柜开 展带电检测时,发现335开关柜超声波数据异常,具 有典型绝缘类局部放电信号特征,最大值出现在 335开关柜后部下半部分区域,即电缆室下半部分。

为进一步确认该异常信号,采用了暂态地电压、 特高频等检测手段综合分析。暂态地电压法未发现 明显异常;特高频法检测到明显局部放电信号,且 具有典型绝缘类局部放电信号特征,与超声波法检 测结果相对应。

通过定位分析,最终判断信号来自开关柜后下 部电缆室,靠近 A 相区域,为固体绝缘类放电。

2 带电检测数据分析

2.1 超声波检测结果

检测人员采用超声波法对开关柜进行局部放电 检测,在 335 开关柜后柜门缝隙处检测到异常超声 波信号,典型图谱如图 1 所示。图 1(a)为连续模 式图谱,信号有效值及周期最大值分别为 7.8 mV、 16.8 mV,均大于背景值的 2 mV 和 2.5 mV,信号具有 50 Hz 及 100 Hz 相关性,且后者大于前者;图 1(b)为 相位模式图谱,在一个工频周期内有两簇放电信 号,呈"驼峰"状,信号幅值较分散,相位分布较广; 图 1(c)为时域模式图谱,在一个工频周期内存在 两个"峰值"。综合判断,该信号具有典型固体绝 缘放电特征。



图1 超声波检测图谱

通过横向对比发现,335 开关柜后下部分超声 波信号幅值最大,初步判断局部放电信号来自335 开关柜内部。

2.2 特高频检测结果

采用特高频法进行局部放电检测,在 335 开关 柜后下部分缝隙处检测到明显的特高频信号,典型 图谱如图 2 所示。可以看出,在工频相位的正、负半 周均有放电信号,放电次数较多,信号幅值变化较 大,最大值将近 54 dB。放电信号相位主要集中在 90°及 270°附近,具有对称性,疑似固体绝缘类放 电,与超声波检测结果相对应。

在 335 开关柜附近空间背景中及相邻开关柜缝



隙处,均未检测到异常特高频信号。通过横向对比, 判断局部放电信号来自 335 开关柜内部。

2.3 暂态地电压检测结果

使用暂态地电压法对 335 开关柜进行局部放电 检测,分别选取开关柜前(中、下)、侧(上、中、下)、 后(上、中、下)等多个点位进行测试。开关柜暂态 地电压检测结果与背景值相近,约为 15 dB,未见明 显异常。

2.4 综合分析

考虑到单一检测手段的局限性,在现场采用了 超声波法、特高频法、暂态地电压法等手段,检测表 明 335 开关柜内部存在放电信号。该信号在一个工 频周期内存在两簇放电脉冲,其 100 Hz 相关性大于 50 Hz 相关性,信号幅值变化较大,相位分布较宽,疑 似为固体绝缘类放电。

3 局部放电缺陷定位分析

为进一步确认放电源位置,采用电磁波时差法 对局部放电源进行定位,原理如图3所示。通过比 较电磁波到达传感器的时间先后顺序,判断局部放 电源更靠近哪个传感器。

由于开关柜密封性好,传感器布置位置受到 限制,仅能开展水平方向、竖直方向的定位分析。 特高频传感器布置在 335 开关柜后下部分缝隙处, 如图 4 所示。





图 4 传感器布置

水平方向定位结果如图 5 所示,可以看出特高频传感器 2 处接收到的局部放电信号领先特高频传 感器 1 约 2 ns,表明局部放电源与传感器 2 的距离 比传感器 1 近 60 cm,即局部放电源在开关柜中偏 右的位置处。



图 5 水平方向定位结果

竖直方向定位结果如图 6 所示,可以看出特高频传感器 4 处接收到的局部放电信号领先特高频传感器 4 约 2.5 ns,表明局部放电源与传感器 4 的距离比传感器 3 近 75 cm,即局部放电源在开关柜下半部分中偏下的位置处。

开关柜结构如图 7 所示,后下部分为电缆室,包 含接地开关、避雷器、电缆、电流互感器、绝缘板等多 个元器件。结合开关柜结构及定位结果,判定该固 体绝缘类放电缺陷位于电缆室内靠近 A 相区域。



图 6 竖直方向定位结果



4 停电检查验证

为消除故障隐患,先将 335 开关柜及其他 相关设备停电,再将开关柜小车摇至检修位置并开 柜检查,发现 335 开关间隔电缆室内 A 相避雷器引 线与绝缘隔板间存在明显放电痕迹,如图 8 所示。



图 8 局部放电痕迹

分析发现,由于 A 相避雷器引线过长,致使引 线与绝缘隔板间绝缘距离过近引发局部放电。停电 检查与带电检测的结果相符,验证了带电检测技术 的有效性。对 A 相避雷器引线及绝缘隔板进行处 理并恢复送电后,对该开关柜再次进行了带电检测, 局部放电信号消失。

5 结 论

1)采用带电检测技术可以有效发现开关柜内 部局部放电缺陷。综合使用多种检测方法分析诊 断,可避免单一检测方法的不足,为开关柜的状态检 修提供可靠依据。

2)所述放电故障是由于避雷器引线与绝缘隔板间 距离过近,导致局部场强过高,引发局部放电。故现场 安装中应严格控制工艺,避免该类现象再次发生。

参考文献

- [1] 杨帆,邓一帆,李东东,等.基于最优等级数的多维特 征量开关柜健康状态评价方法[J].高电压技术,2020, 46(11):3934-3942.
- [2] 杨堃. 2015 年国家电网公司开关设备运行情况及近十年 GIS 故障专题分析[R]. 北京:中国电力科学研究院, 2015.
- [3] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测 技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [4] 李任明, 彭华东, 陈晓清. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [5] 曾雄杰, 江健武. TEV 和 UHF 在 10 kV 开关柜带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2012,48(1):41-47.
- [6] 冯波,肖代波,李 毅,等. 暂态对地电压和超声法用 于开关柜不同湿度 PD 检测研究[J].高压电器,2015, 51(4):67-70.
- [7] 郑雷. 开关柜局部放电声电波检测技术的运用[J]. 高 压电器,2012,55(2):87-93.
- [8] 陶诗洋,冯义,张天辰,等.基于脉冲电流法的高压 开关柜局部放电在线监测装置[J].电力系统保护与控 制,2019,47(9):145-149.
- [9] 邵进, 胡武炎, 贾风鸣, 等. 红外热成像技术在电力 设备状态检修中的应用[J].高压电器,2013,49(1): 126-129.
- [10] 陆忠,朱卫东. 多种局部放电检测手段诊断开关柜放 电缺陷[J].高压电器,2012,48(6):94-98.
- [11] 嵇丽明,邱崑,徐翀,等.开关柜局部放电综合诊断技 术的应用研究[J].高压电器,2014,57(7):106-110.
- [12] 邹璟,方勇,施涛,等.一起 10 kV 开关柜局部放电研 究[J].云南电力技术,2020,48(1):105-108.

作者简介:

杨 洁(1988),女,硕士,讲师,研究方向为输变电设备 状态检测及诊断;

刘 鑫(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变 电设备运维检修;

何 良(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变 电设备状态检测及诊断。 (收稿日期:2022-04-25)

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

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘 要:文中结合一起有载分接开关油流继电器重瓦斯保护误动导致 220 kV 变压器跳闸事故展开分析。通过对油流 继电器干簧管的绝缘电阻测试、试验,结合现场检查、试验情况和故障录波对事故动作逻辑进行反复推演分析,找到 了油流继电器干簧管的设计缺陷及事故诱因,并提出合理的整改建议。

关键词:变压器;有载重瓦斯;游离碳;事故分析

中图分类号:TM 77 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)04-0087-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220417

Analysis of An Accident Caused by Heavy Gas Misoperation of Oil-flow Relay

QIU Wei, ZHENG Rongfeng, HUANG Xin, LIU Jun, LU Xiaobin, HU Lin, XU Qingpeng (State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: A 220 kV transformer tripping accident caused by heavy gas misoperation of oil-flow relay in on-load tap-changer (OLTC) is analyzed. Through the test and examination of the insulation resistance of reed switch in oil-flow relay and combined with the fault recording wave, the accident action logic is repeatedly deduced and analyzed. The root causes of the accident and a design defect of reed switch in oil-flow relay are found out, and some reasonable suggestions are put forward.

Key words: transformer; heavy gas of OLTC; free carbon; accident analysis

0 引 言

电力系统常常因负荷变化导致电网电压波动, 为缓解电网压力,有载分接开关需频繁切换而极易 发生故障,影响变电站的安全运行^[1]。油流继电器 是变压器调压系统中的重要组成部分,其内部有轻 瓦斯保护和重瓦斯保护接点,运行中的有载分接开 关油流继电器通常只要求保留两组重瓦斯保护接 点。当有载分接开关内部存在缺陷时,容易在调压 过程中产生剧烈电弧,并生成大量气体。气体随着 油流朝着油枕方向涌动,作用在有载油流继电器的 下挡板。当油速达到油流继电器动作整定值时,重 瓦斯保护动作,电力变压器三侧断路器跳闸^[2-3]。

据相关数据分析,电力变压器事故中有 40%以 上为有载分接开关发生故障导致,因此统计并分析 由有载分接开关故障导致电力变压器误动以及故障 的典型事故具有十分重要的工程意义和现场需 求^[2,4]。下面基于一起由 220 kV 等级电力变压器 有载分接开关的油流继电器重瓦斯保护误动引起的 变压器三侧断路器跳闸的案例,结合现场检查、油化 试验、高压试验、保护及故障录波等情况,对事故经 过、误动原因进行了分析总结,并提出了具有现场指 导性的建议以及预防控制措施。

1 事故过程及处理

2020年6月10日,220 kV 某变电站发生有载 油流继电器重瓦斯保护误动事故。事故发生前接线 方式220 kV、110 kV 均为双母接线,10 kV 为单母分 段接线,共两台变压器。故障前220 kV、110 kV 分 段断路器均在合位,10 kV 分段断路器在分位,两台 变压器处于并列运行状态。

该变电站2号主变压器由保定天威保变电气股

份有限公司生产,产品型号为 SSZ - 240000/220, 2009年出厂。有载调压开关为瑞典 ABB 公司生 产,型号为 UCLRN650/900/Ⅲ,额定电流为 700 A, 2009年出厂。有载油流继电器为 EMB 公司生产,型 号为 URF 25/10,整定流速为 3.0 m/s,2009年出厂。

2020年6月10日6:55:10.894时,该变电站2 号主变压器非电量保护装置启动,17ms后有载重 瓦斯保护动作,27ms后主变压器三侧202、102、902 断路器跳闸,10kV备自投正确动作合上912断路 器带10kVII母负荷。故障发生时变压器运行工况 良好,有载调压开关未进行调挡操作。

事故发生后现场检查发现:有载调压开关在1 挡位置;油流继电器内集有瓦斯气体(如图1所示);重瓦斯保护挡板并未动作(一旦挡板动作,必 须手动复归);油流继电器芯子内干簧管接线桩积 有游离碳(如图2所示),干簧管密封良好无破损。 现场试验:有载调压开关油室绝缘油耐压试验合格; 变压器直流电阻、分接开关切换波形、开关过渡电阻 合格;但两组重瓦斯保护接点绝缘电阻为0.3 MΩ, 偏低。保护及故障录波结果显示,有载重瓦斯保护 动作持续时间约40 s,随后重瓦斯保护及故障录波 信号返回;现场检查二次回路接线正确,二次重瓦斯 回路绝缘及保护出口试验等结果正确。非电量保护 动作期间及保护动作时刻,无2号变压器差动及后 备保护启动或异常报告。



图 1 瓦斯内部存在大量气体

该有载调压开关总调挡次数 7336 次,2019 年 12 月停电检修时变压器直流电阻、有载分接开关切换波 形均无异常,油流继电器接点绝缘电阻无异常,检修 时对有载调压开关的切换油室进行了换油处理。近 几个月调挡次数分别为 6 月 6 次,5 月 8 次,4 月 12 次,3 月 4 次,最近一次调挡时间为 6 月 9 日 23 时,由 2 挡调至 1 挡运行。

综合现场保护动作信息分析情况,当即决定将



图 2 干簧管接线处游离碳

2号变压器有载重瓦斯保护接信号、有载压力释放 信号接跳闸,调试合格后将该变压器定挡投入运行, 15:40送电成功。

2 油流继电器结构与基本原理

油流继电器主要由接线盒与引线口、法兰连接、 试验与复位探针、玻璃观察窗以及继电器本体组成, 其中:玻璃观察窗可直接观察继电器内部集气情况 和继电器各功能元件状态;试验与复位探针用于检 修人员对继电器进行动作测试,同时在继电器动作 后进行复位(重瓦斯挡板动作后,不能自动复位,需 人工手动复位);继电器引出两组出线,并接入二次 保护系统^[5-6]。油流继电器内部结构如图3所示。



图 3 油流继电器内部结构

油流继电器的基本原理是:当有载分接开关由 于故障产生强烈气体造成向油枕方向的高速油流, 并且油流速度超过限定数值(整定值为 3.0 m/s) 时,有载油流继电器将通过挡板与恒磁磁铁的联动, 使玻璃干簧管内触点闭合,启动跳闸信号^[7-8]。

3 事故原因分析

变压器跳闸前无调挡动作,运行工况良好,故障 后变压器本体及附件未见异常;变压器绕组直流电 阻、有载分接开关切换波形、变压器过渡电阻等试验 均无异常,变压器本体油色谱数据正常(见表1):基 本排除变压器本体故障可能。同时,油流继电器挡 板未动作,说明油流速度未超过整定值,有载调压开 关切换芯子油室油耐压合格,也可排除有载调压开 关内部故障可能。

表 1 变压器本体油色谱试验结果

项目	含量	注意值
脱气量/ml	4.0	
氢气 H₂/(μL・L ⁻¹)	1.2	150
一氧化碳 CO/(μL・L ⁻¹)	10.3	
二氧化碳 CO ₂ /(μL・L ⁻¹	256.3	
甲烷 CH4/(μL・L ⁻¹)	0.6	
乙烯 C2H4/(μL・L ⁻¹)	0	
乙烷 C2H6/(μL・L ⁻¹)	0	
乙炔 C2H2/(μL・L ⁻¹)	0	5
总烃/(μL・L ⁻¹)	0.6	150

注:检测结果判断依据为 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》。结论为正常。

故障后检查油流继电器干簧管端部接线部位有 游离碳,重瓦斯接点绝缘电阻低。该 240 MVA 变压 器配备的是瑞典 ABB 公司原装、额定电流为 700 A 的有载调压机构(而目前 240 MVA 变压器一般装配 额定电流 1000 A、串联双断口、4 个过渡电阻的有载 调压机构),其切换电流裕度较小,有载切换过程中 电弧在油中燃烧产生的大量游离碳在涌流作用下进 入油流继电器,附着于干簧管正负电引出线端部,长 期累积形成放电小桥,造成绝缘降低甚至击穿。

有载保护配备的是 EMB 公司原装油流继电器, 该产品采用早期设计,干簧管端部附近两引线的绝 缘仅靠引线表面一层绝缘管包裹隔离。所述事故 中,干簧管端部受到接点两侧正负电压的影响(直 流电压 220 V),较容易吸附有载切换过程中产生的 游离碳,且游离碳会根据正负电荷产生的电场方向, 较有规律地排列形成放电小桥。随着运行时间地增 加,干簧管端部两引线间逐渐布满游离碳。

同时,该油流继电器早期产品端部引线的绝缘 极易破损,绝缘破损后极易通过游离碳导通,从而导 致了瓦斯保护的误动。因此 EMB 公司在后期新产 品中做了改进,如图 4 所示。新产品在干簧管端部 引线间采用绝缘材料包裹后,在内部浇注环氧树脂, 增强了端部绝缘强度。即使有载切换中累计产碳量 较大,并且在干簧管附近堆积,也不会导致接点两侧 的引线导通。

此外,油流继电器与油枕间连接管设计不当,该 连接管采用"L"型90°折弯钢管,折弯处内径减小, 造成切换过程中产生的瓦斯气体无法通畅进入油 枕,集聚在油流继电器上部,将干簧管暴露于瓦斯气 体中。当干簧管端部放电小桥积碳中混杂的液态有



图 4 改进型干簧管

载油在重力作用下断断续续滴落,进一步降低放电小桥电阻,最终形成近似短路的放电通道导致击穿。

变压器停电后完成油流继电器更换,将拆下的 油流继电器进行绝缘电阻测试,一组接点绝缘电阻 为0(节点 13-14);另一组接点绝缘电阻为大于 1000 MΩ(节点 23-24)。将干簧管端部游离碳擦拭 干净后,两组接点绝缘电阻均大于 1000 MΩ。试验 结果见表 2。

表 2 故障油流继电器节点绝缘电阻

节点名称	绝缘电阻/MΩ		反论
	清洗前	清洗后	
13-14	0	>1000	故障节点
23-24	>1000	>1000	正常节点



图 5 干簧管端部游离碳清理前



图 6 干簧管端部游离碳清理后

经诊断,该油流继电器重瓦斯保护误动根本原 因为干簧管引线绝缘设计缺陷导致。由于连管油路

第4期

不畅,在有载调开关切换过程中油流继电器汇集气体,覆满游离碳的干簧管引线暴露在空气中产生了放电小桥,形成近似短路的放电通道导致击穿,造成油流继电器重瓦斯保护误动。

4 改进措施

电力变压器误动将极大地影响电力系统的安全 稳定运行,案例所发现的有载重瓦斯保护误动以及 该型号油流继电器的家族性缺陷对电力变压器的安 全稳定运行造成极大隐患,因此提出以下建议:

1)EMB公司早期类型油流继电器由于存在部 分设计缺陷,建议配合停电检修周期对油流继电器 进行开盖检查,清除积碳,若干簧管绝缘设计存在缺 陷应立即更换油流继电器;

2)对存在油路设计不合理的变压器进行整改, 预防油路不通导致有载切换过程中产生的瓦斯气体 无法通畅进入油枕,集聚在油流继电器上部,将干簧 管暴露于瓦斯气体中;

3)同时强化变压器本体及有载油流继电器油路的验收要求,杜绝存在类似油路不畅隐患的变压器投运,加强变压器油流继电器的巡视力度,及时发现并消除类似隐患。

(上接第76页)

.....

3 结 论

通过上述分析,此次故障在动作时间上,虽然看 似 220 kV 变电站 1 号主变压器中后备保护动作时 间早于线路保护装置零序过流 II 段保护和距离 II 段 保护动作时间不合理,但实则为中间经过故障多次 转换导致的。主变压器保护电流元件采用相过流元 件,中间无间断;线路保护的零序过流元件发生间断 导致重新进行故障判断;距离 II 段保护同样由于间 断导致重新进行故障判断,产生一段延时。鉴于故 障的特殊性,可以判定此次故障期间主变压器保护 和线路保护间的定值配合并无问题,保护装置均为 正确动作。

参考文献

[1] 赵丹,孙红军.电气设备事故分析及解决方案[J].科学 技术创新,2020(21):186-187.

参考文献

- [1] 赵全胜,胡伟,刘新海,等.110 kV 主变有载分接开关 故障引起重瓦斯跳闸分析[J].变压器,2017,52(7): 45-46.
- [2] 黄鑫,陆晓彬,胡林,等.一起有载切换开关故障引起的 110 kV 变压器运行事故原因分析[J].四川电力技术, 2019,42(3):80-86.
- [3] 陈晓云,张伟光. 220 kV 变压器重瓦斯事故分析及预 防措施[J].电气技术,2018(1):94-96.
- [4] 谢茜,刘睿,张宗喜,等.一起变压器 M 型有载分接开 关事故的分析[J].四川电力技术,2020,43(1):63-66.
- [5] 杨军亭,彭鹏,温定筠,等.一起变压器有载分接开关事故分析[J].变压器,2016,53(2):65-67.
- [6] 满凯凯,刘爱丽,王政,等.有载分接开关故障引起主变 跳闸事故分析[J].电工电气,2019(12):72-73.
- [7] 王楠,孙成,刘宝成,等.220 kV 变压器有载分接开关 油流继电器故障分析[J].变压器.2014,51(6):74-76.
- [8] 李冠华,金鑫,李爽.换流站有载调压开关油流继电器 动作分析[J].东北电力技术,2014(11):29-30.

作者简介:

邱 炜(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事变电设 备检修、技术监督工作;

郑荣锋(1993),男,硕士,助理工程师,主要从事变电设 备检修工作。 (收稿日期:2021-12-21)

- [2] 张玉玺, 王静. 一起 110 kV 线路距离保护动作案例分 析[J]. 农村电工, 2021, 29(8):47-48.
- [3] 汪曼乙.继电保护越级跳闸故障分析与处理[J].铜业 工程,2021(2):93-96.
- [4] 程嘉诚,许超,邓晨,等.线路保护拒动导致主变后备保 护动作的事故分析[J].电工电气,2021(3):45-51.
- [5] 季委.110 kV 变电站继电保护的故障与对策[J].电力 设备管理,2021(4):159-160.
- [6] 王向丽,许刘峰,刘宁超,等.110 kV 紫1号主变差动保 护动作分析[J].电世界, 2021,62(6):14-17.
- [7] 高慧,周泽民.某 110 kV 变电站 2 号主变故障及处理 分析[J].大众用电,2021,36(4):55-56.
- [8] 黄岗,冉梦东,陈挺,等.110 kV 坪桥变1号主变压器 35 kV 侧越级跳闸分析[J].农村电气化,2021(4):40-41.
- [9] 谢伟,赵鸣鸣,陈硕,等.一起 220 kV 变压器短路事故 分析[J].河南科技,2020(22):120-122.

作者简介:

赵晓东(1986),男,高级工程师,从事继电保护工作;

李 锋(1989),男,工程师,从事继电保护工作。

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

(雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051)

摘 要:文中通过分析某大型水电站在单条 500 kV 送出线路带大功率情况下,另一条线路同频并网失败的案例。简 要地分析了影响同频并网的因素以及正在运行线路传输功率与同频合闸相角差之间关系,进而提出解决大功率同频 并网失败的措施。

关键词:同频并网;线路传输功率;相角差

中图分类号:TM 76 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)04-0091-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220418

Case Analysis of Same-frequency Paralleling Failure Caused by Excessive Transmission Power of 500 kV Line

LUO Yijun, LI Fei, LI Chao

(Yalong River Hydropower Development Company Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract: In the case of a single 500 kV transmission line with high power, the same-frequency paralleling failure of another line is analyzed. The factors affecting the same-frequency paralleling are briefly analyzed as well as the relationship between the transmission power of the running line and the phase-angle difference in the same-frequency switching, and then the measures to solve the same-frequency paralleling failure with high power are put forward.

Key words: same-frequency paralleling; line transmission power; phase-angle difference

0 引 言

某大型水电站(以下简称 A 水电站)装机 6 台, 单机容量为 600 MW,总装机容量为 3600 MW。A 水 电站 500 kV 电气一次设备由 500 kV GIS、500 kV GIL 及其附属设备组成,主接线采用 4/3 和双断路 器的混合接线方式。3 回出线至某换流站(以下简称 B 换流站),线路长度为 81 km,其中 500 kV I、Ⅱ 线为同塔双回线路,另外还有单独的某Ⅲ线。

2020 年 1 月 9 日,500 kV I、Ⅱ线停电检修完成,等待调度命令合环,此时,A 水电站 5 台机组运行,总功率为 2400 MW,系统采用 500 kV Ⅲ线单回线路送出 2400 MW。

500 kV I 线由 B 换流站侧充电正常后,A 水电站侧自动同期装置因相角差无法满足并网条件,导致线路两侧中断路器均合闸失败。经检查发现线路

与主变压器高压侧相角差为±12°左右,而同期装置 相角差定值为±10°,同期合闸相角差不满足定值要 求,是同期合闸失败的主要原因,而以往线路正常同 期合闸时的相角差通常小于±1°。

下面将探讨分析造成同期合闸相角差变大的原因,并采取措施减小同期并网相角差,成功实现同期 并网,进而探讨影响同频并网的因素。

1 同频并网与差频并网概述

目前,根据并网的应用场景不同,电力系统将并 网操作分为同频并网和差频并网。

同频并网是指同步点两侧的系统已经存在着电 气联系,只是通过并网操作再增加一条回路的操作。 例如已经并网运行的系统,再增加一条送出线路或 者开环系统的合环操作。其主要特点是同步点两侧 系统频率相同,但可能存在一定的电压幅值差,并且 存在着一个固有的相角差。这是因为并网点两侧频 率相同,但在实现并网前并网点两侧电压幅值可能 不同,而且两侧会出现一个功角。并网条件是当并 网点断路器两侧的电压差及功角在给定范围内时, 即可实施并网操作。完成并网后,并网点断路器两 侧的功角消失,系统潮流将重新分布。

差频并网是指将两个在电气上没有联系的系统 同步并网,如发电机准同期并网或者两个解列运行 的系统通过一回线路重新联接;其特点是在同步点 两侧系统之间不仅存在着电压差、相角差,同时也存 在着频率差。由于有频率差的存在,同步点两端的 功角差处在一个动态变化过程中,此时要求在电压、 频率满足要求的前提下同期装置捕捉相角差为0的 时机完成并网操作。

2 功率、相角差及同频并网三者的关系

2.1 超高压线路功角特性

假设超高压线路为均匀长线路,其等值电路如 图1所示。



图 1 超高压长线路等值电路

假设线路首端为 *M*,末端为 *N*,线路全长为 *l*,以 末端电压、电流为参考电压、电流,超高压长线路电 压的分布方程为^[1]

 $U_{\rm m} = U_{\rm n} \cosh \gamma l + I_{\rm n} Z_{\rm c} \sinh \gamma l$ (1) 式中: $U_{\rm m}$ 为首端电压; $U_{\rm n}$ 为末端电压; $I_{\rm n}$ 为末端电 流; $Z_{\rm c}$ 为线路波阻抗; γ 为线路的传播常数。

由于输电线的电阻与感抗之比以及电导与电纳 之比均随输电电压的提高而减小,超高压输电线路 的正序电抗一般是电阻的10~20倍,通常可以忽略 不计,即将其视为无损线^[2],无损线的波阻抗和传 播常数表达式分别为:

$$Z_{\rm c} = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2}$$

$$\gamma = jw \sqrt{LC} = j\beta \tag{3}$$

式中,*L*、*C*分别为输电线路单位长度的电感和电容。 由式(1)、式(2)、式(3)可得

$$U_{\rm m} = U_{\rm n} \cos \theta + j I_{\rm n} Z_{\rm C} \sin \theta \qquad (4)$$

式中, $\theta = \beta l_{\circ}$

所以由式(4)可得超高压线路的相量图,如图 2 所示。



图 2 超高压线路相量

图 2 中, δ 为超高压输电线路的功角,即首端电 压超前于末端电压的角度; α 为末端电压超前末端 电流的角度。

所以,由图2可得超高压线路的功角特性方程 为

$$U_{\rm BC} = I_{\rm n} Z_{\rm C} \sin \theta \cos \alpha = U_{\rm m} \sin \delta \qquad (5)$$

$$I_{\rm n} \cos \alpha = \frac{U_{\rm m} \sin \delta}{Z_{\rm c} \sin \theta} \tag{6}$$

$$P_{\rm n} = U_{\rm n} I_{\rm n} \cos \alpha = U_{\rm n} \frac{U_{\rm m} \sin \delta}{Z_{\rm c} \sin \theta} \tag{7}$$

式中, P_n为超高压线路传输功率。

2.2 功率、相角差及同频并网三者的关系

同频并网就是在已经有了电气连接的两个系统 间,再增加一回联接线路,如图 3 所示。在所有边断 路器合闸时,在 Ⅲ 线将发电侧与电力系统相连接的 情况下,投入 I 线,此时在 E 或 F 断路器两侧电压 幅值不同、频率相同,且两侧电压间存在一个相角差。 假设选取 E 断路器作为并网点,相角差实质就是正 在运行的Ⅲ线的功角δ,δ的取值范围 0°~90°。

所以由式(7)可得

$$P = \frac{U_1 U_5}{Z_c \sin \theta} \sin \delta \tag{8}$$

式中: U_1 为I线的线路电压; U_5 为 5B 高压侧电压或者 母线电压;P为III线传输的有功功率; $Z_1 = Z_c \sin \theta$, 为III线的阻抗。

由此可知,线路传输功率 *P* 与功角 δ 的关系为 正弦函数关系,从理论上来说,功角 δ 的取值范围为 0°~90°,因此,当传输功率 *P* 及阻抗*Z*₁越大,则功角

可得:

δ越大。无论是合环还是开环操作,都会改变系统的潮流分布。当合环时,新投入的线路总是会分担一定的负荷,在新线路中形成冲击电流。但是这与差频并网不同,新投入的线路承担负荷是增加线路投入的目的,形成冲击也是不可避免的。



图 3 500 kV 主接线

同频并网的条件与差频并网要求电压、频率、 相角3个参数都相同的条件不同,因为同频并网的 功角是固定的(相对差频并网的功角随时间变化而 言),不存在差频,只是需要检测两侧电压差。也就 是说,相对于差频并网,同频并网必然存在电压差和 相角差,能否并网成功,只是比较两侧电压差与功角 的大小而已;电压差决定了无功功率通过新投入线 路的潮流冲击大小,功角δ决定了有功功率和无功 功率通过新投入线路的潮流冲击大小,这种冲击实 质是系统潮流的突变性瞬时再分配。这种冲击形成 的巨大冲击电流可能造成继电保护装置的动作跳 闸,导致线路并网失败。

3 案例分析

所述案例中,A水电站5台机组运行,总功率为 [rr[0:05.5](10001点)

2400 MW,开关站所有边断路器合闸,系统采用 500 kVⅢ线单回线路送出 2400 MW。500 kV I 线由 B 换流站侧充电正常后,A 水电站侧自动同期 装置因相角差无法满足并网条件。通过故障录波曲 线,能够得到此时 500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号 主变压器(5B)高压侧电压(即 1M 电压)的相角差 和电压差,如图 4 所示。

由图 4 可知,500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号 主变压器(5B)高压侧电压(即 1M 电压)的相角差 为 11° 左右(其中 δ_a = 11.177°、 δ_b = 11.002°、 δ_c = 10.978°),而电压差小于 2 kV(其中 A、B、C 相电压 差分别为 0.305 kV、1.401 kV、0.098 kV),可以忽略 电压差。而同频并网相角差的定值为 10°,正常情 况同频并网相角差小于 1°,根据式(8)可知,影响相 角差的因素有线路输送功率 P、500 kV I 线的线路 电压 U_1 、5B 高压侧电压或者母线电压 U_5 、500 kV II线的阻抗 Z_1 ,在当前状态下同频并网时,500 kV I 线的线路电压 U_1 、5B 高压侧电压或者母线电压 U_5 、500 kV II 线的阻抗 Z_1 等参数不变,将其作为一

个参数,即
$$K = \frac{U_1 U_5}{Z_c \sin \theta}$$
,所以:

$$P = K \sin \delta \tag{9}$$

将 P=2400 MW,δ=11°代入可得 K=12 578.02 MW。

根据式(8)可知,要使 500 kV I 线并网成功,可 以采取以下措施:

1) 减小 500 kV I 线电压与 A 水电站 5 号主变 压器(5B)高压侧电压的相角差至定值 10°以下。为 防止并网冲击电流过大,最好将相角差减小至尽量 小,因此必须将线路输出功率减小,但考虑涉及电网 调度出力的调减,不宜将输出功率减少过多。当相 角差为 10°时,由式(9)可得 P=2184 MW。



图 4 并网失败两侧相角关系



图 5 并网成功瞬间两侧电压相量

δ由0°~10°变化时,各值对应的有功功率如表1所示。

δ/(°)	P/MW	δ/(°)	P/MW
1	219	6	1314
2	439	7	1533
3	658	8	1750
4	877	9	1936
5	1096	10	2184

表1 相角差与有功功率的关系

考虑到单机容量为 600 MW,结合表 1,最好将 输出功率调减 600 MW 左右。

2)提高同频并网相角差定值。由于定值提高后,并网瞬间的冲击电流会比较大,此措施可能会造成继电保护设备误动,将刚并网的 500 kV Ⅰ线跳闸,甚至又造成在运行的 500 kV Ⅲ线跳闸,造成全厂失电的风险,因此建议不采用。

由上可得,面对线路输送功率较大引起的并网 相角差大于定值的情况,最好采取调减负荷的方式 来实现同频并网。

当调减 600 MW 负荷使输出功率为 1800 MW 时,500 kV I 线并网一次成功,其并网瞬间波形及两侧电压相量如图 5 所示。

由图 5 可得,并网瞬间各相相角差为 δ_a = 8.296°、 δ_b = 8.208°、 δ_c = 8.184°。

由此可以进一步验证输送有功功率与功角之间 的正弦函数关系。

4 结 论

在同频并网中,影响并网成功的因素有同步点 两侧相角差和电压差。而在稳定的电力系统中,两 侧电压趋于一致,电压差较小,对于同频并网的影响 较小。相角差可以认为是合环点另外正在运行的半 环的功角,其大小与系统阻抗和传输功率有关,代表 了并网瞬间潮流再分配和并网冲击的大小。对于确 定的将要并网系统,由于系统阻抗确定,功角差只受 正在运行线路传输功率的影响。当线路传输功率较 大,从而引起相角差超过同频并网功角定值,导致同 频并网失败。因此,这种情况下最好采取调减传输 功率的方式来解决并网失败的问题。

参考文献

- [1] Prabha KUNDUR.电力系统稳定与控制[M].北京:中 国电力出版社,2002.
- [2] Carson WTAYLOR.电力系统电压稳定[M].北京:中国 电力出版社,2002.

作者简介:

罗义军(1996),男,助理工程师,主要从事水电站检修 维护工作。

(收稿日期:2021-12-30)