

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第46卷第**3**期

2023年6月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二三年
第四十六卷
第三期



ISSN 1003-6954



- 四川省一级期刊
- 万方数字化期刊群入网期刊
- 中国学术期刊（光盘版）入编期刊
- 中国期刊全文数据库收录期刊
- 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

- 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊
- 重庆维普中文科技期刊数据库收录期刊
- 超星数字图书馆入网期刊
- 中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊

面向新型电力系统的 配电网故障检测与处置技术 征稿启事

配电网是新型电力系统建设的主战场。分布式电源、储能、多元负荷等新要素的发展将深刻改变配电网的结构、特性和运行方式，电力用户对高可靠性、高质量电力供应的需求不断提升，同时社会各界对山火、人身触电等安全风险的防范提出了更高的要求。

故障检测与处置技术是配电网安全、可靠运行的关键保障。为了支撑新型配电网的发展，满足高质量发展目标下的高安全性、高可靠性供电需求，国内外学者在新型配电网故障特性、检测方法、继电保护以及快速恢复等技术领域开展了广泛的研究，并取得了一定的突破。为此，《四川电力技术》特邀电子科技大学张真源教授、四川大学高红均副教授、国网四川电科院张华高级工程师作为特约主编，主持“面向新型电力系统的配电网故障检测与处置技术”专题，希望与作者和广大读者一起探讨新形势下配电网故障检测与处置技术领域面临的挑战、机遇和发展方向。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

征稿方向（包括但不限于）

- (1) 含分布式电源的配电网故障特性
- (2) 适应分布式电源接入的配网继电保护技术
- (3) 满足高可靠性供电需求的配电网故障快速定位、处置与复电技术
- (4) 面向防灾减灾需求的配电网故障处置技术
- (5) 微电网、直流配电网故障特性及处置技术

投稿要求

- (1) 本次专栏接受研究论文（包括理论研究、数值模拟和实验研究）及高质量的综述。
- (2) 摘要250~300字为宜，须包含四要素，即目的、方法、结果、结论，同时应着重说明文章的创新点。
- (3) 论文引言中研究目的清晰明确，详细介绍国内外研究背景，对现有其他研究者的工作进行客观的评述；阐述自己的观点，并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚，数据合理并被正确地分析和解释；比较所提出的方法和现有方法的优缺点。
- (4) 正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练，避免长篇公式推导，字数以不超过6000字(包括图表)为宜。
- (5) 结论部分应概括文章研究工作，给出创新性、指导性结论。

来稿请用Word排版，格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。

投稿须知

- (1) 请登录《四川电力技术》投稿网站：<http://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home>注册作者用户名和密码进行投稿，投稿栏目请选择“配电网故障检测与处置技术”专题。
- (2) 投稿截止时间：2023年7月30日。
- (3) 投稿联系人：雷老师18602855676 程老师028-69995169 罗老师028-69995168

《四川电力技术》
编辑委员会

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

目次

· 新型电力系统 ·

新型配电系统分布式源网荷储资源广域电压自趋优管控方法
..... 卢宇,向月,刘俊勇,曾平良(1)

PMSG 风机直流电容虚拟惯性控制及虚拟惯性影响因素分析
..... 曾雪洋,李小鹏,陈刚,张华杰,张纯(9)

数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估
..... 陈振,王曦,陈刚,石鹏,范成围,王永灿,史华勃(16)

基于负载再分配的边缘计算任务均衡调度策略
..... 谢欢,杜书,陈少磊,马玫,张秋铭,邓冰妍(20)

西藏高原地区光伏配套储能系统设计与运行研究
..... 粟刚,李科峰,王辉,郎春雷,晏小彬(27)

· 电力经济技术 ·

水风光互补系统碳电打捆交易技术及闭环回购策略
..... 陈雪,李健华,武云霞,付浩(35)

考虑振动区和水-电耦合的现货市场出清模型
..... 熊志杰,王彦洋,张大伟,张勤勤,邓志森(41)

碳电市场环境下水电厂市场竞价策略及交易技术
..... 李健华,陈雪,付浩,武云霞,白智丹(46)

· 电力运检技术 ·

油纸绝缘套管内部压强监测中温度的影响及抑制措施研究
..... 涂彦明,龙震泽,王志川,朱鑫,刘强,蒋伟,陈凌(53)

张北柔性直流输电工程接地系统监测技术研究
..... 黄宇,吴金波,唐世雄,陈香香,朱生辉(58)

输电线路谐波过电压保护实现方法
..... 丁宣文,朱鑫,周文越(66)

变压器油色谱检测数据误差来源浅析
..... 田倩倩,兰新生,王杰,胡仕红,董仲明,王燕(71)

基于 IEEE 1459 标准的非线性负载有功功率测量研究
..... 曹庆,王灿,刘锐,李骁睿,周秉成(74)

· 经验交流 ·

某 GIS 设备黄铜三通阀法兰失效分析
..... 赵兴虹,陈家慧,冯杰,彭倩,王方强(81)

某变电站直流电源阀控式铅酸蓄电池失效分析
..... 王志高,董汉彬,陈家慧,王方强,许光达(85)

一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析
..... 骆欣瑜,廖文龙,刘睿,李龙蛟,任阿阳(90)

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003-6954

CN 51-1315/TM

2023 年第 46 卷第 3 期(总 285 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主编:李富祥

副主编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发行:四川电力科学研究院

地址:成都市高新区锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169/5168/5165

邮箱:cdsedljs@163.com

设计:四川科锐得实业集团有限公司

文化传播分公司

印刷:四川和乐印务有限责任公司

国内定价:每册 12.00 元

[期刊基本参数]CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 16

* 2023-06

CONTENTS

· New Power System ·

- Wide-area Voltage Self-optimization Control of Distributed Generation-Grid-Load-Storage Resources in Novel Distribution Systems
 LU Yu, XIANG Yue, LIU Junyong, ZENG Pingliang(1)
- DC-link Capacitor Virtual Inertia Control and Inertia Effect Analysis for PMSG-based Wind Turbine
 ZENG Xueyang, LI Xiaopeng, CHEN Gang, ZHANG Huajie, ZHANG Chun(9)
- Joint Data-Physical Driven Frequency Security Intelligent Assessment of Large Power System
 CHEN Zhen, WANG Xi, CHEN Gang, SHI Peng, FAN Chengwei, WANG Yongcan, SHI Huabo(16)
- Balanced Scheduling Strategy for Edge Computing Tasks Based on Load Redistribution
 XIE Huan, DU Shu, CHEN Shaolei, MA Mei, ZHANG Qiuming, DENG Bingyan(20)
- Research on Design and Operation of Photovoltaic-Energy Storage System in Tibet Plateau
 SU Gang, LI Kefeng, WANG Hui, LANG Chunlei, YAN Xiaobin(27)

· Electric Power Techno-Economics ·

- Carbon Electricity Bundled Transaction Technology and Close-loop Buyback Strategy for Hydro-Wind-Solar Complementary System
 CHEN Xue, LI Jianhua, WU Yunxia, FU Hao(35)
- Spot Market Clearing Model Considering Cascaded Hydropower Vibration Area and Hydroower Coupling Constraints
 XIONG Zhijie, WANG Yanfeng, ZHANG Dawei, ZHANG Qinqin, DENG Zhisen(41)
- Bidding Strategy and Trading Technology of Thermal Power Plant in the Environment of Carbon and Electricity Market
 LI Jianhua, CHEN Xue, FU Hao, WU Yunxia, BAI Zhidan(46)

· Operation and Maintenance Technology ·

- Study on Influence of Temperature on Internal Pressure Monitoring of Oil-paper Insulated Bushing and Its Suppression Measures
 TU Yanming, LONG Zhenze, WANG Zhichuan, ZHU Xin, LIU Qiang, JIANG Wei, CHEN Ling(53)
- Study on Monitoring Technology of Grounding System in Zhangbei Flexible DC Transmission Project
 HUANG Yu, WU Jinbo, TANG Shixiong, CHEN Xiangxiang, ZHU Shenghui(58)
- Implementation Method of Harmonic Overvoltage Protection for Transmission Line DING Xuanwen, ZHU Xin, ZHOU Wenyue(66)
- Superficial Analysis on Error Source of Transformer Oil Chromatographic Detection Data
 TIAN Qianqian, LAN Xinsheng, WANG Jie, HUSHihong, DONG Zhongming, WANG Yan(71)
- Research on Active Power Measurement of Nonlinear Load Based on IEEE 1459 Standard
 CAO Qing, WANG Can, LIU Rui, LI Xiaorui, ZHOU Jiancheng(74)

· Experience Sharing ·

- Failure Analysis of Brass Three-way Valve Flange in A GIS Equipment
 ZHAO Xinghong, CHEN Jiahui, FENG Jie, PENG Qian, WANG Fangqiang(81)
- Failure Analysis of Valve-regulated Lead-acid Battery of DC Power Supply in A Substation
 WANG Zhigao, DONG Hanbin, CHEN Jiahui, WANG Fangqiang, XU Guangda(85)
- Analysis on An Abnormal Acetylene of Vacuum On-load Tap-changers for Converter Transformer
 LUO Xinyu, LIAO Wenlong, LIU Rui, LI Longjiao, REN Ayang(90)

SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

2023 Vol.46 No.3

(Ser.No.285)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, High-tech Zone,
 Chengdu, Sichuan, China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: LI Fuxiang

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

新型配电系统分布式源网荷储资源 广域电压自趋优管控方法

卢宇¹, 向月¹, 刘俊勇¹, 曾平良²

- (1. 智能电网四川省重点实验室(四川大学), 四川 成都 610065;
2. 区域能源互联网技术浙江省工程实验室(杭州电子科技大学), 浙江 杭州 310018)

摘要:不同于单纯电能分配的传统配电网,新型配电系统逐步展现出源-网-荷-储等众多资源的强耦合强关联复杂大系统形态,其各类资源呈现出“点多、面广、量少”的广域分布特征。挖掘可再生能源发电、分布式储能及柔性负荷等分布式资源的广域电压调控潜力对构建源网荷储深度融合的新型配电系统具有重要意义。文中提出了一种基于数据驱动的新型配电系统分布式源网荷储资源广域电压自趋优管控方法,通过可再生能源发电、储能及柔性负荷等分布式资源的综合协同控制,在保证储能后备容量和降低网损的同时能够提高配电网广域电压质量。最后,以某城市配电网为例验证了所提方法的有效性和先进性,比传统调压方法更加契合新型配电系统的电压调控需求。

关键词:新型配电系统; 广域电压控制; 分布式源网荷储资源; 深度强化学习

中图分类号: TM 761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0001-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230301

Wide-area Voltage Self-optimization Control of Distributed Generation-Grid-Load-Storage Resources in Novel Distribution Systems

LU Yu¹, XIANG Yue¹, LIU Junyong¹, ZENG Pingliang²

- (1. Sichuan Province Key Lab of Smart Grid (Sichuan University), Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. Engineering Laboratory of Regional Energy Internet Technology (Hangzhou Dianzi University), Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Differing from the traditional distribution network which is a pure power distribution system, the novel distribution system gradually shows the form of a large complex system with strong coupling and strong correlation of generation-grid-load-storage. These resources show the characteristics of wide-area distribution with many points, wide area and small amount. It is of great significance to explore the wide-area voltage regulation potential of distributed resources such as renewable energy generation, distributed energy storage and flexible load to the novel distribution system. A wide-area voltage self-optimization control method considering distributed generation-grid-load-storage for data-driven novel distribution system is proposed, the wide-area voltage quality of distribution network is improved through integrated cooperative control of these distributed resources, which can ensure backup capacity of energy storage and reduce network loss at the same time. Finally, taking an urban distribution network for example, the effectiveness and advancement of the proposed method are verified, which is more suitable for the voltage regulation requirements of novel distribution system than the traditional voltage regulation method.

Key words: novel distribution system; wide-area voltage control; distributed generation-grid-load-storage resources; deep reinforcement learning

0 引言

在全球能源“低碳”大趋势下,以风光为主的可再生分布式发电(renewable distribution generation, RDG)、分布式储能(energy storage system, ESS)及柔性负荷(flexible load, FL)等分布式资源在配电网中的渗透率逐年升高^[1]。2021年3月,中央财经委员会第九次会议提出要构建以新能源为主体的新型电力系统^[2];2022年8月,四川省提出积极推进源网荷储一体化,积极构建源网荷储深度融合的新型电力系统发展模式^[3]。

然而,作为新型电力系统的重要物理载体和基石,新型配电系统中众多可调控资源不确定性、开放性、复杂性的增加给上述目标的实现,特别是保证配电系统电压质量带来巨大挑战,比如电压越限、电压突变等事故的发生^[3]。因此,充分挖掘源网荷储等分布式资源的广域电压调控潜力对建立源网荷储灵活高效、互动互济的新型配电系统可靠运行体系具有重要意义。

就调控设备而言,传统的电压调控主要是通过控制电网中的无功调节设备如有载调压变压器(on-line tap changer, OLTC)、并联电容器(parallel capacitor bank, PCB)组和静止无功补偿器(static var compensator, SVC)调节。这些机械装置通过改变配电网的潮流分布进行电压管控,调控能力与其在配电网中的安装位置强相关,因此无法有效调节馈线远端的电压^[4];另外,由于设备动作周期较长、动作较慢而无法适应新型配电系统中RDG和负荷的快速波动^[5]。随着新型电力电子器件的发展,新型电压调控设备如风光逆变器和ESS应运而生,风光通过新型逆变器可以为电网提供快速灵活的无功电压支撑^[6],另外配电网中较高的R/X比使得有功功率在电压控制方面和无功功率同样有效,因此ESS通过调节充放电功率能够补偿RDG的有功出力间接性,提高电压质量^[7-8]。

就调控方法而言,现有电压调控模型多为基于最优潮流^[9]的混合整数非线性规划问题,由于系统中存在整数和非线性状态变量,该模型通常是非凸的和NP-hard问题^[10]。但是这些方法存在计算速度慢^[11]、优化模型复杂^[12]等问题,一方面这些方法具有较高的建模依赖性,而另一方面准确描述某些

非线性电力电子器件特性的系统模型非常困难^[13]。当以上基于模型的方法遇到瓶颈时,不需要精确的系统模型且具有快速响应速度的数据驱动方法应运而生,其中,深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)正成为研究者关注的热点^[14]。文献[15]提出了利用深度神经网络技术求解配电网动态最优潮流问题。文献[16]将自动电压无功控制(automatic voltage control, AVC)问题通过启发式分割智能体方法建模为马尔可夫博弈过程。文献[8]将储能运行行为建模为马尔可夫决策过程并使用DRL方法进行求解,算例仿真表明储能可以控制配电网有功功率的动态平衡以有效改善系统电压分布。上述研究虽然使用了数据驱动的方法,但未充分挖掘配电系统中多种分布式资源的综合协调互动在配电网广域电压调控中的巨大潜力。

因此,下面提出一种基于数据驱动的新型配电系统分布式源网荷储广域电压自趋优管控方法,通过源-网-荷-储的综合协同控制实现配电网的广域电压调控。首先,考虑新型电力系统中广域分布式资源模型,以保证储能后备容量、降低网损、提高电压质量为目标函数,提出了分布式源-网-荷-储广域电压管控模型;然后,将该模型建模为非中心部分可观马尔可夫决策过程(decentralized partially observable markov decision process, Dec-POMDP),使用基于数据驱动的多智能体深度确定性策略梯度(multi-agent deep deterministic policy gradient, MADDPG)算法求解;最后,以某中型城市配电网算例对所提方法的有效性和先进性进行验证。

1 广域分布式资源模型

1.1 光伏发电系统

光伏发电系统利用光伏板将太阳能转换成电能,由电池阵列、控制器、电力电子逆变器等元件组成。其中,逆变器是光伏并网发电系统的核心,通过控制逆变器实现光伏有功无功解耦控制。有功无功解耦模型如下:

$$Q_{PV} = a_{PV} \sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV}^2} \quad (1)$$

$$a_{PV}^{\min} \leq a_{PV} \leq a_{PV}^{\max} \quad (2)$$

式中: S_{PV} 为光伏逆变器的最大容量; a_{PV} 为光伏逆变器的无功系数。当 $a_{PV} > 0$ 时,逆变器发出无功;当

$a_{PV} < 0$ 时,逆变器吸收无功。夜间逆变器基于静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 模式产生无功功率^[17]。

1.2 风力发电系统

风力发电系统通过风力发电机将风能转化为电能。随着新型电力电子器件的发展,风力发电同样可以通过控制逆变器实现有功无功的解耦控制。有功无功解耦模型如下:

$$Q_{WT} = a_{PV} \sqrt{S_{WT}^2 - P_{WT}^2} \quad (3)$$

$$a_{WT}^{\min} \leq a_{WT} \leq a_{WT}^{\max} \quad (4)$$

式中: S_{WT} 为风电逆变器的最大容量; a_{WT} 为风电逆变器的无功系数。当 $a_{WT} > 0$ 时,逆变器发出无功功率;当 $a_{WT} < 0$ 时,逆变器吸收无功功率。

1.3 分布式储能模型

分布式储能系统具有负荷与电源的双重特性,可以通过自身的充放电吸收过剩电能或补充功率缺额。分布式储能模型主要包括容量递推模型、充放电功率模型和容量模型,如式(5)~式(9)所示。

$$E_{ESS}(t+1) = E_{ESS}(t)(1 - \sigma_{sdr}) + P_{ESS}(t)a_{ESS} \quad (5)$$

$$S_{oc}(t) = \frac{E_{ESS}(t)}{E_{ESS}^{\max}} \quad (6)$$

$$P_{dc}^{\max} \leq P_{ESS}(t) \leq P_c^{\max} \quad (7)$$

$$a_{ESS}^{\min} \leq a_{ESS} \leq a_{ESS}^{\max} \quad (8)$$

$$E_{ESS}^{\min} \leq E_{ESS}(t) \leq E_{ESS}^{\max} \quad (9)$$

式中: $E_{ESS}(t)$ 、 $P_{ESS}(t)$ 、 $S_{oc}(t)$ 分别为分布式储能在时刻 t 的容量、充放电功率、荷电状态 (state of charge, SOC); σ_{sdr} 为储能介质的自放电率; a_{ESS} 为分布式储能的充放电系数; P_c^{\max} 、 P_{dc}^{\max} 为 ESS 最大充、放电功率; E_{ESS}^{\min} 、 E_{ESS}^{\max} 为 ESS 容量上、下限。

1.4 柔性负荷模型

随着电动汽车、智能空调和热控负荷等设备的发展,为新型配电系统提供了众多可控的柔性负荷资源。柔性负荷可以通过主动调整自身的用电量和用电时段来提高配电网运行可靠性,按照调整方式的不同可分为可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷,这里主要考虑可削减负荷。可削减负荷是指时间上不可转移,但在一定时间内的需求量可以灵活增减的负荷^[18],模型为:

$$P_{FL}^{\text{after}} = (1 + a_{FL})P_{FL}^{\text{before}} \quad (10)$$

$$a_{FL}^{\min} \leq a_{FL} \leq a_{FL}^{\max} \quad (11)$$

式中: P_{FL}^{before} 、 P_{FL}^{after} 分别为柔性负荷参与需求响应前、

后的需求量; a_{FL} 为柔性负荷的需求响应系数。

2 分布式源网荷储广域电压管控模型

在 RDG、ESS、柔性负荷等分布式资源大规模接入的新型配电系统中,通过调控 RDG 逆变器的无功输出为配电网提供无功支撑,通过调控储能充放电功率和柔性负荷参与需求侧响应实现配电网有功平衡,达到源网荷储的协调互动,保证各节点电压在安全范围内。下面构建了以保留储能后备容量、降低网损和使各节点电压始终在安全范围为目标的分布式源网荷储广域电压管控模型,所提模型包含的目标函数和约束条件如下所示。

2.1 目标函数

广域电压管控的目标函数是在保证储能后备容量和最小化网络无功损耗的同时,使各节点电压始终在安全范围内。

$$\min F(P(i,t), Q(i,t)) = \partial_1 F_v + \partial_2 F_{ESS} + \partial_3 F_{P_{loss}} \quad (12)$$

$$F_v = \sum_{i \in T} \frac{1}{N} \left[\sum_{i \in N} 2(v(i,t) - v_{ref})^2 \right] \quad (13)$$

$$F_{ESS} = \sum_{i \in V_{ESS}} |S_{oc}(i,t) - S_{oc}(i,0)| \quad (14)$$

$$F_{P_{loss}} = \sum_{i \in T} \frac{P_{loss}(t)}{S_N} = \sum_{i \in T} \frac{|I_{ij}(t)|^2 r_{ij}}{S_N} \quad (15)$$

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 1 \quad (16)$$

式中: $P(i,t)$ 、 $Q(i,t)$ 、 $v(i,t)$ 分别为节点 i 在时刻 t 的有功功率、无功功率和电压幅值; F_v 、 F_{ESS} 、 $F_{P_{loss}}$ 分别为对应节点电压质量目标函数、储能后备容量目标函数和网络有功损耗目标函数; ∂_{1-3} 为权重系数; $S_{oc}(i,t)$ 和 $S_{oc}(i,0)$ 分别为安装在节点 i 上的 ESS 在时刻 t 和初始时的荷电状态; N 、 T 、 V_{ESS} 分别为配电节点集合、电压调控周期和 ESS 安装节点集合; $I_{ij}(t)$ 和 r_{ij} 为支路 (i,j) 上时刻 t 的电流幅值和支路电阻; S_N 为网络参考视在功率。

2.2 约束条件

约束条件包括配电网拓扑约束、配电网潮流约束、分布式 RDG 的无功出力约束、ESS 充放电功率和容量约束、柔性负荷参与需求响应的功率约束。

1) 配电网拓扑约束

$$K = (V, E) \quad (17)$$

配电网拓扑约束包括配电网拓扑 K 中所有的

节点 V 和支路 E 集合。

2) 配电网潮流约束

$$P_S(t) + P_{PV}(i,t) + P_{WT}(i,t) + P_{ESS}(i,t) - P_{FL}^{after}(i,t) - P_{Load}(i,t) = v^2(i,t) \sum_{j \in V_i} g_{ij} - v(i,t) \sum_{j \in V_i} v(j,t) (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (18)$$

$$Q_S(t) + Q_{PV}(i,t) + Q_{WT}(i,t) - Q_{Load}(i,t) = -v^2(i,t) \sum_{j \in V_i} b_{ij} + v(i,t) \sum_{j \in V_i} v(j,t) (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (19)$$

式中: $P_S(t)$ 、 $Q_S(t)$ 分别为平衡节点注入有功、无功功率; $P_{PV}(i,t)$ 、 $Q_{PV}(i,t)$ 分别为节点 i 上 PV 在时刻 t 的有功、无功出力; $P_{WT}(i,t)$ 、 $Q_{WT}(i,t)$ 分别为节点 i 上 WT 在时刻 t 的有功、无功出力; $P_{ESS}(i,t)$ 为安装在节点 i 上的 ESS 在时刻 t 的充放电功率; $P_{FL}^{after}(i,t)$ 为节点 i 上的柔性负荷参与需求侧响应后的有功功率; $P_{Load}(i,t)$ 、 $Q_{Load}(i,t)$ 为分别节点 i 上负荷在时刻 t 的有功、无功需求; j 为与节点 i 相连的节点集合, $j \in V_i$; g_{ij} 、 b_{ij} 分别为支路 ij 上的电导、电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的相位差。

3) 分布式 RDG 的无功出力约束

$$Q_{PV}^{\min}(i,t) \leq Q_{PV}(i,t) \leq Q_{PV}^{\max}(i,t) \quad (20)$$

$$Q_{WT}^{\min}(i,t) \leq Q_{WT}(i,t) \leq Q_{WT}^{\max}(i,t) \quad (21)$$

式中: $Q_{PV}^{\max}(i,t)$ 、 $Q_{PV}^{\min}(i,t)$ 分别为节点 i 上 PV 在时刻 t 的无功出力上、下限; $Q_{WT}^{\max}(i,t)$ 、 $Q_{WT}^{\min}(i,t)$ 分别为节点 i 上 WT 在时刻 t 的无功出力上、下限。

4) ESS 充放电功率和容量约束

$$P_{dc}^{\max} \leq P_{ESS}(i,t) \leq P_{dc}^{\max} \quad (22)$$

$$E_{ESS}^{\min} \leq E_{ESS}(i,t) \leq E_{ESS}^{\max} \quad (23)$$

5) 柔性负荷参与需求响应的功率约束

$$P_{FL}^{\min} \leq P_{FL}^{after} \leq P_{FL}^{\max} \quad (24)$$

3 基于 MADRL 的电压管控方法

所提出的基于多智能体深度强化学习 (multi-agent deep reinforcement learning, MADRL) 的电压管控方法, 将 PV、WT、ESS、柔性负荷等分布式资源建模为神经网络组成的智能体, 将配电网建模为多智能体环境。多智能体通过与环境交互感知并适应配电网中源网荷储状态的变化并调节自身动作, 最终实现对配电网电压的广域分布式控制。

广域分布式控制如图 1 所示。首先, 将配电网

通过网络分区的方法建模为多智能体环境; 然后, 将分布式广域电压管控问题建模为 Dec-POMDP; 最后, 使用 MADDPG 算法求解所提 Dec-POMDP。

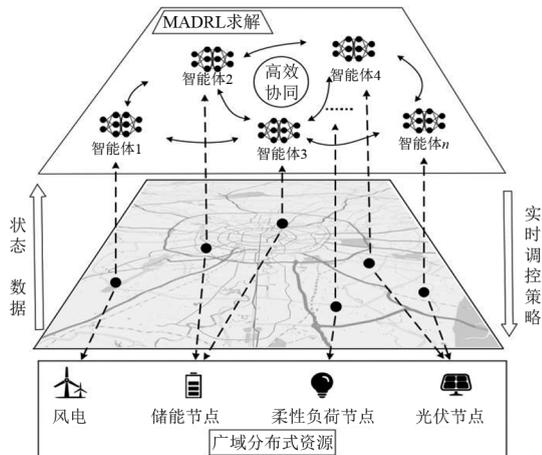


图 1 广域分布式控制

3.1 网络分区

新型配电系统中的分布式资源具有“点多、面广、量少”的特征。如果对所有分布式资源采取传统集中控制, 会导致变量过多、控制过程复杂等问题。另外, 传统集中式控制难以有效保障新型配电系统中源网荷储的高效协同运行。因此, 将配电网划分为若干控制区, 每个控制区含有一个或多个分布式资源, 不同区域内分布式资源的控制相互独立, 即每个控制区内的分布式资源只观测本地信息并接收反映全局电压状态的反馈, 可以实现对分布式资源的广域分布式控制。

网络分区过程为: 首先, 确定配电内部的电压等级, 不同电压等级的区域属于不同控制区; 然后, 在相同电压等级的区域, 按照最短路径的分区方法, 先确定一条主馈线, 将其他馈线的终端节点到主馈线的最短路径视为一个控制区, 保证每个控制区包含一个或多个分布式资源。

3.2 Dec-POMDP 建模

MADRL 是对深度强化学习问题的扩展, 环境有多个智能体, 依靠智能体之间的协调互动探索环境并完成共同目标。多智能体之间合作的 DRL 问题通常被表述为 Dec-POMDP。Dec-POMDP 通常由一组元组表示, 即 $\langle I, S, A, O, T, \rho, \gamma \rangle$ 。其中: I 为智能体集; S 为状态集; A 为联合动作集, $A = \{A_r, r \in I\}$, A_r 为智能体 r 的动作集; O 为联合观测集, $O = \{O_r, r \in I\}$, O_r 为智能体 r 的动作集; $T: S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$ 为描述环境动态变化的状态转移函数; R

为描述所有智能体在当前动作下的全局奖励函数; $\rho: S \rightarrow [0, 1]$ 为描述初始状态的概率函数; γ 为折扣系数,描述未来状态对当前奖励的影响。Dec-POMDP 框架中,所有智能体的目标是找到一个最优的联合策略以获得最大折扣奖励。分布式广域电压管控问题中 Dec-POMDP 模型如下所示。

1) 智能体集

将配电网中的 PV、WT、ESS 和柔性负荷等分布式资源视为智能体,PV、WT 通过控制逆变器来调节输出无功;ESS 通过控制自身充放电功率来调节与电网的交换有功;柔性负荷通过控制需求响应系数来调节其参与需求响应的功率,智能体集表示为

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}, N = N_{PV} + N_{WT} + N_{ESS} + N_{FL} \quad (25)$$

式中: N 为全部智能体数量; N_{PV} 、 N_{WT} 、 N_{ESS} 、 N_{FL} 分别为 PV、WT、ESS、FL 的数量。

2) 状态集和观测集

状态集 S^t 包括所有智能体在时刻 t 的状态量。对于智能体 r ,状态集 S_r^t 包含智能体 r 在时刻 t 的状态量,包括本区域内 PV 和 WT 有功无功出力、节点电压、有功无功负荷、ESS 充放电功率、SOC、柔性负荷参与需求响应后的有功功率。

$$S_r^t = \{P_{PV}(i, t), Q_{PV}(i, t), P_{WT}(i, t), Q_{WT}(i, t), v(i, t), P_{Load}(i, t), Q_{Load}(i, t), P_{ESS}(i, t), S_{oc}(i, t), P_{FL}^{after}(i, t)\} \quad (26)$$

式中, i 为对应分布式资源所在节点, $i \in Z_r$, Z_r 为智能体 r 所在区域。

观测集 O^t 包括所有智能体在时刻 t 的观测测量,与状态集一致。

3) 动作集

动作集 A^t 包括所有智能体在时刻 t 的动作集。对于智能体 r ,动作集 A_r^t 包含智能体 r 在时刻 t 的动作。

$$A_r^t = \left\{ a_{PV}^1, \dots, a_{PV}^{N_{PV}}, a_{WT}^1, \dots, a_{WT}^{N_{WT}}, a_{ESS}^1, \dots, a_{ESS}^{N_{ESS}}, a_{FL}^1, \dots, a_{FL}^{N_{FL}} \right\} \quad (27)$$

$$a_{PV}^{\min} \leq a_{PV}^i \leq a_{PV}^{\max}, 1 \leq i \leq N_{PV} \quad (28)$$

$$a_{WT}^{\min} \leq a_{WT}^i \leq a_{WT}^{\max}, 1 \leq i \leq N_{WT} \quad (29)$$

$$a_{ESS}^{\min} \leq a_{ESS}^i \leq a_{ESS}^{\max}, 1 \leq i \leq N_{ESS} \quad (30)$$

$$a_{FL}^{\min} \leq a_{FL}^i \leq a_{FL}^{\max}, 1 \leq i \leq N_{FL} \quad (31)$$

式中: a_{PV}^i 为 PV 逆变器的无功容量系数; a_{WT}^i 为 WT 逆变器的无功容量系数; a_{ESS}^i 为 ESS 的充放电功率

系数; a_{FL}^i 为柔性负荷的需求响应系数。

4) 奖励函数

奖励函数 R^t 为时刻 t 所有智能体在状态 S^t 下执行动作 A^t 获得的实时奖励,参考优化目标式(12)一式(16),奖励函数为:

$$R_1^t = - \sum_{i \in T} \frac{1}{N} \left[\sum_{i \in N} 2 (v(i, t) - v_{ref})^2 \right] \quad (32)$$

$$R_2^t = - \sum_{i \in V_{ESS}} \frac{1}{N_{ESS}} |S_{oc}(i, t) - S_{oc}(i, 0)| \quad (33)$$

$$R_3^t = - \sum_{i \in T} P_{loss}(t) \quad (34)$$

$$R^t = \begin{cases} \partial_1 R_1^t + \partial_2 R_2^t + \partial_3 R_3^t & 0 \leq S_{oc}(i, t) \leq 1 \\ R_{done} & \text{else} \end{cases} \quad (35)$$

式中: R_1^t 为节点电压奖励; v_{ref} 为节点参考电压; R_2^t 为 ESS 中 SOC 奖励; R_3^t 为网络损耗奖励; R_{done} 为一个很大的惩罚项。

3.3 MADDPG 算法求解

MADDPG 算法是一种基于 Actor-Critic 框架的多智能体深度强化学习算法,每个智能体有自己的 Actor 网络和 Critic 网络。Actor 网络以智能体观测集 O_r^t 为输入,做出的最优动作集为输出。Critic 网络以智能体状态集和动作集为输入,对 Actor 网络决策的评价为输出。整个算法结构可以解释为使用 Actor 网络进行策略探索,使用 Critic 网络作为策略的评价者,对 Actor 网络的探索策略进行评估比较并得出最终的优质策略。

1) 在 Actor 网络中,智能体 r 的动作探索可以表示为

$$A_r^t = \pi_r(O_r^t | \theta_r^r) + N(0, \sigma_r^t) \quad (36)$$

式中: $\pi_r(O_r^t | \theta_r^r)$ 为智能体 r 的动作函数; $N(0, \sigma_r^t)$ 为正态分布噪声。

根据所提广域分布式电压调控模型,目标动作值函数定义为

$$Q_r(S^t, A^t) = - (\partial_1 R_1^t + \partial_2 R_2^t + \partial_3 R_3^t), S^t \in D \quad (37)$$

式中: D 为经验回放池; ∂_1 、 ∂_2 和 ∂_3 分别为奖励权重因子。

以智能体 r 为例,在每一次智能体 r 与环境交互过程中,以动作值函数期望最大化为目标,通过实现梯度上升方法更新 Actor 网络,目标函数和梯度解析式为:

$$J(\theta_r^\pi) = \max_{S^t \sim D} E [Q_r(S^t, A^t)] \quad (38)$$

$$\nabla_{\theta_r^\pi} J(\theta_r^\pi) \approx E_{S^t \sim D} [\nabla_{\theta_r^\pi} Q_r(S^t, A_r^t = \pi_r(O_r^t | \theta_r^\pi), A_{-r}^t)] \quad (39)$$

式中: A_{-r}^t 为除 r 外其他智能体的动作集; θ_r^π 为智能体 r 的 Actor 网络参数。

2) 在 Critic 网络中, 以最小化损失函数为目标优化 Critic 网络参数 θ_r^Q , 表示为:

$$L(\theta_r^Q) = E_{S^t \sim D} [(Q_r(S^t, A_r^t, A_{-r}^t | \theta_r^Q) - y_r^t)^2] \quad (40)$$

$$y_r^t = rd_r^t + \gamma Q_r(S^t, A_r^t, A_{-r}^t | \theta_r^Q) \quad (41)$$

式中: θ_r^Q 为智能体的 Critic 网络参数; γ 为折扣系数。

为了提高学习的稳定性, 引入了 Target 网络^[19], Target 网络中包括参数 $\theta_r^{\pi'}$ 、 $\theta_r^{Q'}$, 分别与 Actor 网络参数 θ_r^π 和 Critic 网络参数 θ_r^Q 相对应。目标网络中的参数通过缓慢跟踪的方式更新到 Actor 和 Critic 网络, 更新表达式为:

$$\tau \theta_r^Q + (1 - \tau) \theta_r^{Q'} \rightarrow \theta_r^{Q'} \quad (42)$$

$$\tau \theta_r^\pi + (1 - \tau) \theta_r^{\pi'} \rightarrow \theta_r^{\pi'} \quad (43)$$

式中, τ 是一个接近于 0 的小值, 用于更新 Target 网络。

MADDPG 算法的集中训练过程如表 1 所示。

表 1 MADDPG 算法训练过程

步骤	训练过程
1)	For episode = 1, 2, ..., M do
2)	初始化环境, 包括 $t=0, rd^t=0, S^0, A^0$
3)	将 S^0, A^0 带入环境进行潮流计算, 并反馈给智能体
4)	For $t = 1, 2, \dots, T$ do
5)	通过式 (36) 获取 A^t , 通过潮流计算获取 S^{t+1}, A^t, rd^t 并反馈给智能体
6)	For agent = 1, 2, ..., J do
7)	将经验集 $\{S_r^t, A_r^t, r_r^t, S_r^{t+1}\}$ 放入回放经验池 D
8)	通过式 (38)、式 (39) 更新 Actor 网络参数
9)	通过式 (40)、式 (41) 更新 Critic 网络参数
10)	通过式 (42)、式 (43) 更新 Target 网络参数
11)	End if agent = R
12)	End if $t = T$
13)	End if episode = M

4 算例分析

4.1 场景与参数设置

算例采用四川某中型城市配电网拓扑结构, 如图 2 所示, 由一座 110 kV 变电站连接上级电网, 电

网供电面积约 79 km², 共 3 个电压等级, 不同电压等级之间通过变压器连接。该电网包括 6 台变压器、5 个 PV、5 个 WT、5 个 ESS 和 2 个柔性负荷。各类分布式资源的安装位置如表 2 所示, ESS 参数如表 3 所示。各节点负荷选自 3 年 152 位用户负荷有功数据, 在默认功率因数的基础上随机扰动 5% 产生实时无功损耗, 然后将负荷和 RDG 数据^[20-21] 以 3 min 分辨率进行插值。从 3 年数据中选取其中 2 年数据作为训练集, 1 年数据作为测试集。

所用 MADDPG 算法的超参数设置如表 4 所示, 每个智能体的 Actor 网络和 Critic 网络架构相同, 包含 1 个输入层、2 个隐藏层和 1 个输出层。Actor 网络输入层为 1×114 维的状态向量, 隐藏层包含 128 个神经元, 输出层为 1×23 维的动作向量; Critic 网络输入层为 1×137 维的状态-动作向量。训练过程中使用 5 个随机种子随机抽取每个回合的初始状态, 每回合持续 12 h 即 240 个时间步。

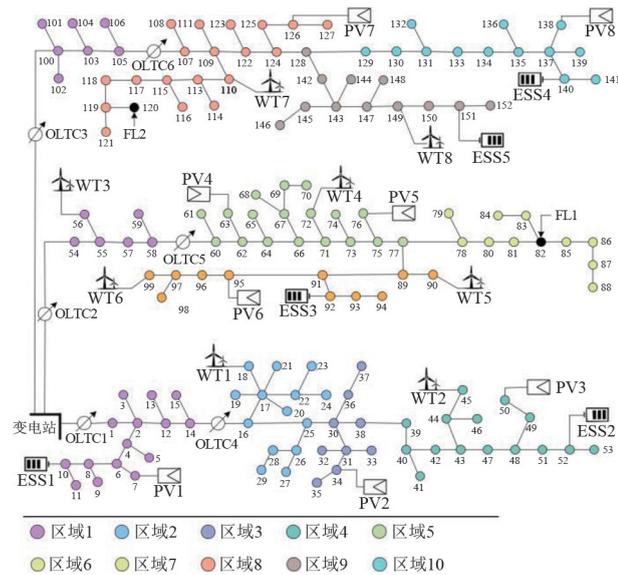


图 2 算例配电网拓扑结构

表 2 分布式资源参数

设备类型	数量	安装节点/支路
PV	8	7, 34, 50, 63, 76, 95, 126, 138
WT	8	18, 45, 56, 72, 90, 99, 110, 149
ESS	5	10, 52, 92, 140, 151
FL	2	82, 120

表 3 ESS 参数

E_{ESS}^{\max}	P_c^{\max}	P_{dc}^{\max}	σ_{sdr}	$S_{oc}(i, 0)$
1.2	0.025	-0.025	0.01	0.5

表 4 MADDPG 算法参数

参数类型	值
∂_1	0.8
∂_2	0.1
∂_3	0.1
γ	0.99
R_{done}	-50
τ	0.000 1
学习率	0.000 1
D 规模	5000
最大回合数	8000
最大时间步	240
激活函数	ReLU
$(a_{PV}^{\min}, a_{PV}^{\max})$	(-0.6, 0.6)
$(a_{WT}^{\min}, a_{WT}^{\max})$	(-0.6, 0.6)
$(a_{ESS}^{\min}, a_{ESS}^{\max})$	(-0.8, 0.8)
$(a_{FL}^{\min}, a_{FL}^{\max})$	(-0.3, 0.3)

4.2 训练结果分析

图 3 展示了 10 000 回合训练过程中每回合平均累计奖励变化曲线。由图可以看出:在训练初期智能体获得的奖励为很小的负值,说明此时总体处于探索阶段,尚未学习到有效的行动策略;在 1000 到 3500 回合左右奖励逐渐上升并达到稳定,说明智能体性能在学习过程中不断增强,已经能够学习并适应环境中的状态变化;4000 回合左右奖励收敛至稳定状态,说明此时已经达到了比较理想的控制效果,验证了所用 MADRL 算法在求解分布式广域电压调控问题的有效性。

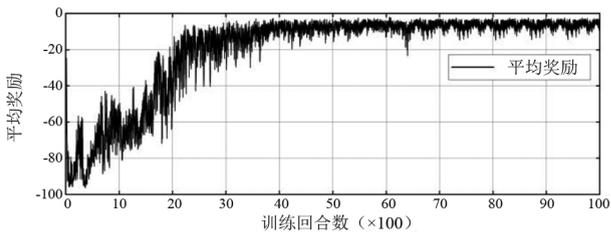


图 3 平均累计奖励曲线

4.3 测试结果分析

在测试集中随机选取连续 3 天数据进行测试,共 1440 个时间步,每个时间步持续时间为 3 min,测试平均耗时 2.65 s,图 4 为测试结果。为方便展示,负荷、PV、WT、柔性负荷有功和无功率取每小时的平均值,ESS 充放电功率取每小时所有时间步的有功功率之和。

通过测试结果可以看出:PV、WT 逆变器可以感

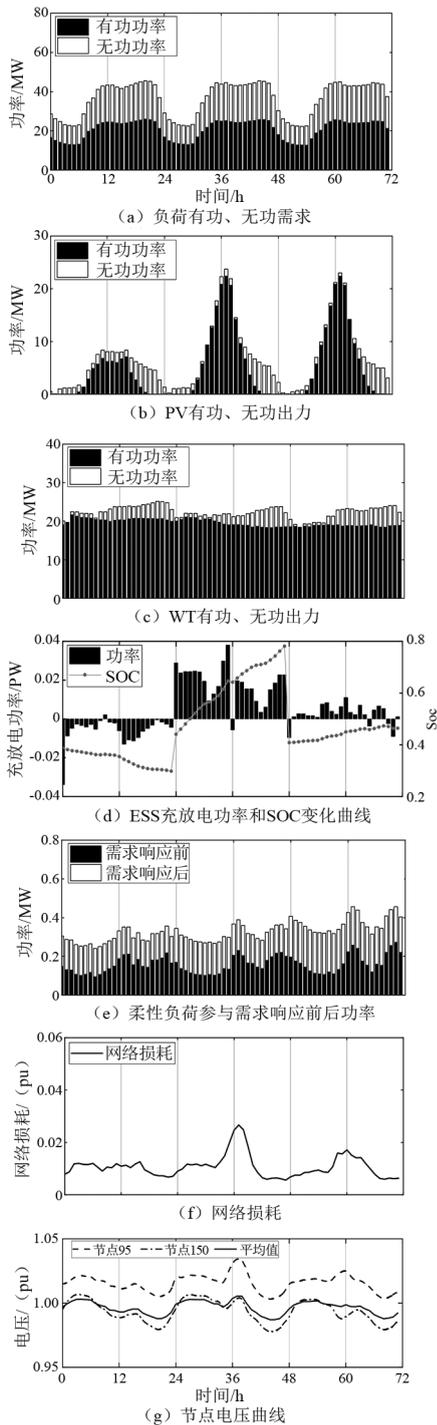


图 4 在线测试结果

知并适应配电网中无功需求的变化实时调节自身无功系数,实现全网无功功率平衡;ESS 可以感知并适应配电网中有功需求的变化实时调节自身与电网的交换功率,实现全网有功功率平衡;柔性负荷在负荷高峰期通过需求侧响应降低自身需求功率,在低谷期通过需求侧响应提高自身需求功率;ESS 的 SOC 始终在(0.2, 0.8)范围内,说明分布式储能参与电压管控的过程中能够保持一定的后备容量,网络损

耗始终保持在较低水平(0.005~0.020 pu),说明各种分布式资源在参与电压管控的同时能够兼顾网络的损耗;系统所有结点的平均电压在连续 3 天的测试结果中均保持在(0.98,1.01)范围内,节点 95 最高电压为 1.034,最低电压为 1.002;节点 105 最高电压为 1.007,最低电压为 0.977,说明通过对源网荷储的广域分布式控制,可以监测并实现电网的实时稳定。

为更好地验证所提广域电压自趋优管控方法相比传统调压方法的优越性,设置对比算例:将网络中 6 台变压器改造为 OLTC,每个 OLTC 含有 5 个抽头位置(-2~+2),增设 3 台电压调节器(voltage regulators, VR),每个 VR 含有 21 个抽头位置(-10~+10),OLTC 和 VR 的调节范围均为 $\pm 10\%$;增设 3 台 CB,每个 CB 含有 4 个调节单元,共 2.4 MVar 的调节能力(0.6 MVar/单元),各元件的最小动作间隔为 1 h;在测试集中随机选取 1 天进行测试。使用电压控制率、电压最大偏差作为衡量指标,测试对比结果如表 5 所示。由对比结果可以看出在电压调控过程中,使用 OLTC、CB 等传统调压手段无法适应新型配电系统中 RDG、负荷的快速波动,电压控制率仅为 68.2%,部分节点电压出现严重越限。

表 5 两种方法测试对比结果

电压调控方法	电压控制率/%	电压最大偏差
所提方法	100.0	0.008
传统方法	68.2	0.862

5 结 论

上面提出了一种基于数据驱动的新型配电系统分布式源网荷储资源广域电压自趋优管控方法,通过配电网分布式资源的协调互动实现对电网电压的广域控制。同时,将新型配电系统中的光伏、风电、ESS、柔性负荷等分布式资源建模为智能体,使用基于数据驱动的 MADDPG 算法进行求解,避免了传统优化方法对精确模型的依赖。仿真结果表明,所提方法能够实现保留分布式储能后备容量,降低网损的同时提高全网电压水平,使各节点电压始终处于安全范围内,整个过程是自趋优进行的,相比传统调压策略更加符合新型配电系统中实时可靠性的电压调控需求。

参考文献

- [1] 陈文淑乐,向月,彭光博,等.“双碳”目标下电力系统供给侧形态发展系统动力学建模与分析[J].上海交通大学学报,2021,55(12):1567-1576.
- [2] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
- [3] 重庆市人民政府办公厅,四川省人民政府办公厅.关于印发推动川渝能源绿色低碳高质量发展协同行动方案的通知:渝府办发[2022]91号[Z/OL].[2022-08-20].http://www.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/szfwj/qtgw/202208/t20220817-11015192.html.
- [4] FUSCO G, RUSSO M. A decentralized approach for voltage control by multiple distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3115-3127.
- [5] CARLI R, CAVRARO G. Algorithms for voltage control in distribution networks[C]. 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2015: 737-742.
- [6] 刘蕊,吴奎华,冯亮,等.含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制[J].太阳能学报,2022,43(2):189-197.
- [7] SUN X Z, QIU J, YI Y, et al. Cost-effective coordinated voltage control in active distribution networks with photovoltaics and mobile energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 501-513.
- [8] 史景坚,周文涛,张宁,等.含储能系统的配电网电压调节深度强化学习算法[J].电力建设,2020,41(3):71-78.
- [9] WANG Z Y, WANG J H, CHEN B K, et al. Mpc-based voltage/var optimization for distribution circuits with distributed generators and exponential load models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(5): 2412-2420.
- [10] DE Souza BA, DE Almeida M F, Multi-objective optimization and fuzzy logic applied to planning of the volt/var problem in distributions systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1274-1281.
- [11] YAO Haotian, XIANG Yue, HU Shuai, et al. Optimal prosumers' peer-to-peer energy trading and scheduling in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022,58(2): 1466-1477.
- [12] CAPITANESCU F, BILIBIN I, RAMOS E R. A comprehensive centralized approach for voltage constraints management in active distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 933-942.

PMSG 风机直流电容虚拟惯性控制及惯性影响分析

曾雪洋, 李小鹏, 陈刚, 张华杰, 张纯

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为解决风电在电力系统中渗透率不断增加而导致的电网惯量不断降低的问题,提出了永磁直驱风机参与电网频率调节的直流电容虚拟惯性控制。该虚拟电容控制能够耦合直流电压和交流频率,利用储存在直流电容中的静电能提供惯性支撑,并能有效地抑制频率变化的斜率和减小最大频率偏差,提高频率的动态特性。此外,详细研究了影响虚拟惯性时间常数的关键参数以及虚拟惯性时间常数与直流电容的确切关系,并给出了相关参数的选取方法。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例,仿真结果表明直流电容虚拟惯性控制能够准确模拟同步发电机的惯性响应,其控制性能优于传统转子虚拟惯性控制。

关键词:PMSG; 风力发电; 虚拟惯性; 直流电容; 频率支撑

中图分类号:TM 614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0009-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230302

DC-link Capacitor Virtual Inertia Control and Inertia Effect Analysis for PMSG-based Wind Turbine

ZENG Xueyang, LI Xiaopeng, CHEN Gang, ZHANG Huajie, ZHANG Chun

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

Abstract: In order to solve the problem that power grid inertia is continuously reduced due to the increasing penetration of wind power in power system, a DC-link capacitor inertia control of permanent magnet synchronous generator (PMSG)-based wind turbine (WT) for participating in grid frequency regulation is proposed. With the virtual inertia control, the DC-link voltage and AC frequency are coupled to release the static electricity stored in DC-link capacitor to provide inertial support for power system during frequency disturbance. This virtual inertia control can effectively suppress the rate of change of frequency (ROCOF) and reduce the maximum deviation of frequency under frequency disturbance, and improve the dynamic characteristics of frequency. In addition, the key parameters affecting the virtual inertia time constant and the exact relationship between virtual inertia time constant and DC-link capacitor are discussed in details, and the selection method of the relevant parameters is given. Finally, a simulation study is built in PSCAD/EMTDC, and the simulation results show that the DC-link capacitor virtual inertia control can accurately simulate the inertia response of synchronous generator, whose control performance is better than that of the traditional rotor virtual inertia control.

Key words: PMSG; wind power generation; virtual inertia; DC-link capacitor; frequency support

0 引言

近年来,由于能源危机、气候变化与环境污染等问题,风能作为清洁能源发展迅速,在电力系统中的渗透率不断增加^[1-3]。与同步发电机不同,永磁直驱风机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)通过电力电子变流器接入电网,并且为了捕

获最大的风能,PMSG输出的功率通常由最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,这导致风机的转速与电网频率呈现出解耦状态,风机转子的旋转惯量被隐藏了^[3-5]。随着风电接入比例的不断增长,传统的同步发电机将会被风电机组部分替代,电力系统的惯量将会减少,这给电力系统的频率稳定与控制带来了严峻的挑战^[6]。

为了解决这个问题,国内外开展了大量研究工作,提出了许多利用风机自身调节能力来提供惯性

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200);国家电网有限公司科技项目(52199722000D)

的措施,其中传统转子虚拟惯性控制最为常见^[7-8]。它利用转子旋转的动能提供虚拟惯性支撑,在由 MPPT 控制获得的参考功率上叠加一个与频率变化的斜率(the rate of change of frequency, ROCOF)成比例的附加功率,用以模拟同步发电机的惯性响应。但由于引入了 ROCOF,转子虚拟惯性控制会引入频率微分的测量噪声,可能导致风机不稳定运行^[5]。此外,由于转子虚拟惯性控制的附加功率与 MPPT 控制获得的参考功率相叠加,存在转子虚拟惯性与 MPPT 功率跟踪的交互影响^[9]:一方面会削弱虚拟惯性的控制效果;另一方面会影响频率的动态过程,在频率恢复阶段,转子要吸收部分功率用于转速恢复,这可能导致频率二次跌落。此外,在转子动能提供惯性的过程中,风机捕获的机械功率会随着转子转速的变化(无论转子转速上升还是下降)而减少。

为了避免上述利用转子动能提供虚拟惯性而存在的一些问题,一些研究人员在风机中增加储能设备来提供虚拟惯性,例如在风机变流器通过一个双向 DC/DC 变流器接入一个储能电池或者超级电容^[10-12]。但这会增加工程的造价以及增加控制策略的复杂性。实际上,风机变流器的直流电容中储备的静电能也可以用于提供虚拟惯性。文献[12-13]提出利用直流电容的能量来平滑风机输出的功率。文献[14-16]提出直流电压-频率下垂控制,在频率扰动期间,直流电压会临时改变,吸收或者释放直流电容的部分能量用于提供虚拟惯性支撑。与上述传统转子虚拟惯性控制相比,该控制避免了频率的微分,且不会影响风机的 MPPT 控制。然而,虽然上述研究成果表明储存在直流电容中的能量可以提供虚拟惯性支撑,但直流电压-频率下垂控制提供的虚拟惯性并不精确,并且没有研究如何确定下垂系数,也未深入研究虚拟惯性与直流电容、直流电压和最大允许直流电压偏差之间的确切关系,以及如何选取直流电容等虚拟惯性控制的参数。

为了解决上述问题,下面建立直流电压与交流频率的耦合关系,提出直流电容虚拟惯性控制,并详细研究影响虚拟惯性时间常数的关键参数以及虚拟惯性时间常数与直流电容的确切关系,并给出了相关参数的选取方法。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例,仿真结果表明直流电容虚拟惯性控制能够有效地抑制频率变化的斜率,减缓频率跌落的速度,其控制效果优于传统转子虚拟惯性控制。

1 PMSG 直驱风机模型和传统转子虚拟惯性控制

1.1 PMSG 直驱风机模型

典型的 PMSG 直驱风机的模型如图 1 所示。PMSG 风机通过一个背靠背变流器接入电网,其发出的有功功率可以由发电机侧变流器或者电网侧变流器控制。在所研究的模型中,发电机侧变流器控制风机发出的有功功率,电网侧变流器控制直流电压。风机模型详细介绍参考文献[17-18]。

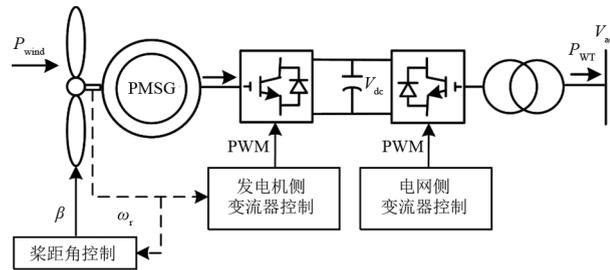


图 1 PMSG 直驱风机模型

根据空气学动力原理,风机捕获的功率 P_{wind} 为^[19]:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风机叶片半径; v_w 为风速; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; C_p 为风机的风能利用系数; ω_r 为风机转子转速。

正常运行条件下,当风机转速 ω_r 低于桨距角控制的参考值 ω_{max} 时,桨距角 β 为 0。此时 C_p 仅仅与 λ 有关,对于给定的 λ , C_p 将会取最大值 $C_{p\text{max}}$ 。当给定风速 v_w 后,风机将由式(2)确定最佳的转速 ω_r 。

将式(2)代入式(1)可得风机由 MPPT 控制获得的有功功率参考值 P_{MPPT} ^[20]。

$$P_{\text{MPPT}} = \frac{\pi \rho R^5 C_{p\text{max}}}{2 \lambda^3} \omega_r^3 = k_{\text{opt}} \omega_r^3 \quad (3)$$

式中, k_{opt} 定义为 MPPT 曲线系数。

1.2 传统转子虚拟惯性控制

传统的转子虚拟惯性控制在风机定功率控制的参考功率中引入频率的导数^[8],从而让风机模拟同步发电机的惯性响应。风机加入虚拟惯性控制后,新的参考功率 P_{ref1} 为

$$P_{\text{ref1}} = P_{\text{opt}} + \Delta P_{\text{RVIC}} = P_{\text{opt}} - \frac{2H_{\text{RVIC}}}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} \quad (4)$$

式中: H_{RVIC} 为风机转子虚拟惯性时间常数; ΔP_{RVIC} 为传统转子虚拟惯性控制的附加功率; f_{N} 为电力系统的额定频率。

图2为传统转子虚拟惯性控制的控制框图,一阶惯性环节主要用于滤掉频率中的高频噪声。

传统的转子虚拟惯性控制是在由MPPT控制获得的参考功率上增加一个与频率的导数成比例的附加功率。

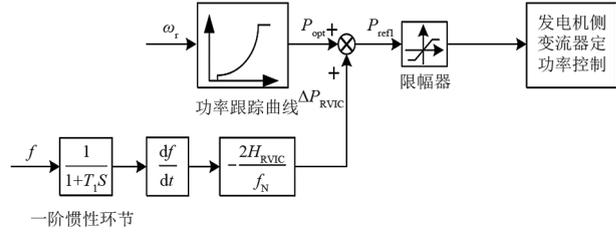


图2 风机传统转子虚拟惯性控制

2 直流电容虚拟惯性控制

直流电容静电能提供虚拟惯性,可以避免上述转子动能提供虚拟惯性的问题。但是正常运行时,直流电压通常由定直流电压控制而维持在一个恒定值,当交流系统的频率波动时,储存在直流电容中的能量不会响应交流系统频率的波动。为了解决这个问题,这里提出了一种利用存储在直流电容中的能量提供虚拟惯性的直流电容惯性控制。

对于交流系统,交流频率可以反映发电机出力与负荷的功率平衡关系。典型的同步发电机转子运动方程为

$$\frac{2H_g}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_1 \quad (5)$$

式中: H_g 为同步发电机的惯性时间常数; f 为测量的交流频率; P_M 和 P_E 分别为同步发电机输入的机械功率和输出的电磁功率; ΔP_1 为当发电机转速变化时,同步发电机由于惯性响应而释放或者吸收的转子旋转功率。

对于背靠背变流器,直流电压可以像交流频率一样反映变流器输入与输出功率的平衡关系。忽略变流器的功率损耗,与式(5)类似的直流电容动态方程如式(6)所示。当直流电容的电压产生偏差时,直流电容将会充电或者放电,对变流器输出的有功功率进行补偿。

$$\frac{C_{\text{dc}} V_{\text{dc}}}{S_{\text{WT}}} \cdot \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} = P_{\text{RS}} - P_{\text{CS}} = \Delta P_2 \quad (6)$$

式中: C_{dc} 为变流器的直流电容值; V_{dc} 为直流电压; S_{WT} 为风机变流器的额定容量; P_{RS} 为输入直流电容的有功功率; P_{CS} 为直流电容输出的有功功率; ΔP_2 为直流电压变化时直流电容存储或释放的静电功率。

令 $\Delta P_1 = \Delta P_2$,建立交流频率与直流电压的耦合关系^[21]。

$$\frac{2H_{\text{dc}}}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{C_{\text{dc}} V_{\text{dc}}}{S_{\text{WT}}} \cdot \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \quad (7)$$

式中, H_{dc} 为直流电容提供的虚拟惯性时间常数。

同时对式(7)两边求积分可得:

$$\int_{f_0}^{f_1} \frac{2H_{\text{dc}}}{f_0} df = \int_{V_{\text{dc}0}}^{V_{\text{dc}1}} \frac{C_{\text{dc}} V_{\text{dc}}}{S_{\text{WT}}} dV_{\text{dc}} \quad (8)$$

$$\frac{2H_{\text{dc}}}{f_0} (f_1 - f_0) = \frac{C_{\text{dc}}}{2S_{\text{WT}}} (V_{\text{dc}1}^2 - V_{\text{dc}0}^2) \quad (9)$$

$$\frac{2H_{\text{dc}}}{f_N} \Delta f = \frac{C_{\text{dc}}}{2S_{\text{WT}}} [(V_{\text{dc}0} + \Delta V_{\text{dc}})^2 - V_{\text{dc}0}^2] \quad (10)$$

式中: f_0 、 $V_{\text{dc}0}$ 分别为功率扰动前的交流频率和直流电压; f_1 、 $V_{\text{dc}1}$ 分别为扰动后的交流频率和直流电压; Δf 为频率偏差, $\Delta f = f_1 - f_0$; ΔV_{dc} 为直流电压偏差, $\Delta V_{\text{dc}} = V_{\text{dc}1} - V_{\text{dc}0}$ 。

由式(10)可以推导出直流电容虚拟惯性控制的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 和定直流电压控制新的参考值 V_{dc}^* 。图3为直流电容虚拟惯性控制框图。

$$H_{\text{dc}} = \frac{C_{\text{dc}} f_N V_{\text{dc}0}^2}{4S_{\text{WT}} \Delta f_V} \left[\left(\frac{\Delta V_{\text{max}}}{V_{\text{dc}0}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

$$V_{\text{dc}}^* = \sqrt{\frac{4H_{\text{dc}} S_{\text{WT}} (f - f_0)}{f_N C_{\text{dc}}} + V_{\text{dc}0}^2} \quad (12)$$

式中: ΔV_{max} 为直流电压最大允许的偏差值; Δf_V 为直流电压达到限幅值时对应的频率偏差,定义为直流电容虚拟惯性控制所能覆盖的频率偏差范围。这里,将 Δf_{max} 取交流频率最大允许的偏差值,表示在最大允许的频率偏差内,直流电容虚拟惯性都能起作用。

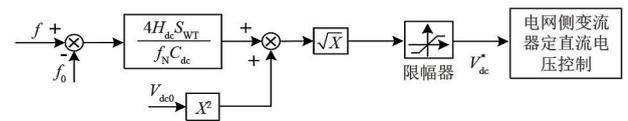


图3 直流电容虚拟惯性控制

3 直流电容虚拟惯性控制参数分析

3.1 虚拟惯性时间常数的影响因素

由式(11)可知虚拟惯性时间常数 H_{dc} 由直流电

容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} 和直流电容虚拟惯性控制所能覆盖的频率偏差范围 Δf_v 决定。

风机采用表 1 中的参数, $\Delta V_{max} = 0.1$ pu, 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 Δf_v 的关系如图 4 所示。

表 1 PMSG 风机主要参数

参数	参数值	参数	参数值
额定容量 S_{WT}/MW	2	直流电容 C_{dc}/mF	50
机端电压 V_{WT}/kV	0.69	正常运行	
额定频率 f_N/Hz	50	直流电压 V_{dc0}/kV	2
惯性时间常数 H_s/s	4	叶片半径 R/m	42
额定转速/(pu)	1.23	阻尼系数	0.01
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	11	切入风速/($m \cdot s^{-1}$)	4
		极限风速/($m \cdot s^{-1}$)	25

从图 4 可知随着 Δf_v 的增大, H_{dc} 呈现出加速下降的趋势, 特别是 Δf_v 较小时, 这种趋势尤为明显。这表明着 Δf_v 越小, 直流电容提供的虚拟惯性时间常数越大。然而当风机参数确定后, 可利用的直流电容能也就确定了。 Δf_v 越小, 直流电压随频率变化的趋势越快, 当交流频率超过 Δf_v 时, 直流电压将会达到限幅值, 意味着直流电容虚拟惯性控制失去了控制作用。这里, 将 Δf_v 取交流频率最大允许的偏差值, 表示在最大允许的频率偏差内, 直流电容虚拟惯性控制都能起作用。而最大允许的频率偏差值是由电力系统中的发电机、负荷、输电网络等设备决定的。 GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率允许偏差》规定: 电力系统正常频率偏差允许值为 0.2~0.5 Hz。而暂态过程中允许的最大频率偏差是由不触发低频减载和高频切机决定, 通常取 1 Hz。因此, 取 $\Delta f_v = 1$ Hz。

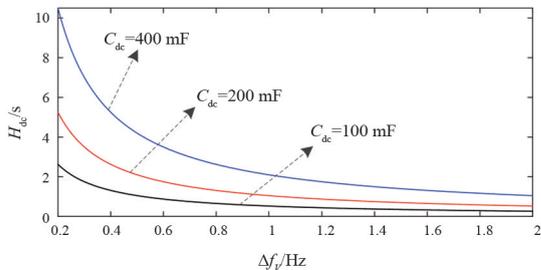


图 4 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 Δf_v 的关系

图 5 为虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 和 C_{dc} 的关系图。图 5 表明, H_{dc} 随着 C_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 的增大而增大, 故可以通过调整这 3 个参数来增大直流电容提供的虚拟惯性。但需要注意增大 C_{dc} 、 V_{dc0} 会增大变频器的成本和体积, 增大 ΔV_{max} 可能带来绝

缘和 PWM 调制等问题。

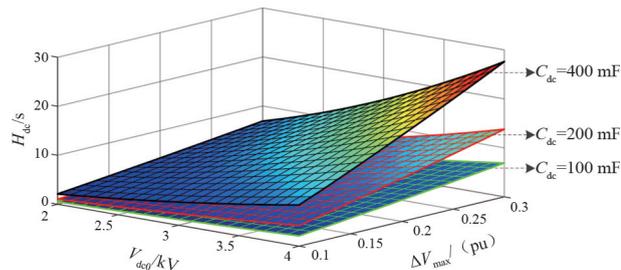


图 5 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 和 C_{dc} 的关系

3.2 直流电容的选取

直流电容的容量需要满足频率调节的需求。如果容量太小, 不能满足调频的需求; 如果容量太大, 会增加设备的造价, 造成一定容量的浪费。

正常直流电压运行下, 直流电容用于频率调节可储存的能量 ΔE_s 为

$$\Delta E_s = E_{max} - E_0 = \frac{1}{2}C(V_{dcmax}^2 - V_{dc0}^2) \quad (13)$$

式中: E_{max} 为在最大允许直流电压 V_{dcmax} 下直流电容储存的能量; E_0 为正常运行电压 V_{dc0} 下直流电容储存的能量。

与此同时, 正常运行电压下, 直流电容用于调频可释放的能量 ΔE_r 为

$$\Delta E_r = E_0 - E_{min} = \frac{1}{2}C(V_{dc0}^2 - V_{dcmin}^2) \quad (14)$$

式中, E_{min} 为最小允许直流电压 V_{dcmin} 下储存的能量。

假设直流电容充放电过程中, 电容值保持不变, 正常情况下直流运行电压 V_{dc0} 为:

$$\Delta E_s = \Delta E_r \quad (15)$$

$$\frac{1}{2}C(V_{dcmax}^2 - V_{dc0}^2) = \frac{1}{2}C(V_{dc0}^2 - V_{dcmin}^2) \quad (16)$$

$$V_{dc0} = \sqrt{\frac{V_{dcmax}^2 + V_{dcmin}^2}{2}} \quad (17)$$

假设风机的直流电压和允许的直流电压偏差量给定, 由式 (11) 可以得到直流电容与风机提供虚拟惯性的定量关系式为

$$C_{dc} = \frac{4H_{dc}S_{WT}\Delta f_v}{f_N V_{dc0}^2 [(\Delta V_{max}/V_{dc0} + 1)^2 - 1]} \quad (18)$$

图 6 为 C_{dc} 与 H_{dc} 、 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 的关系图。从图 6 可以看出, 当需要风机提供的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 确定后, 增大 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 都可以减小 C_{dc} , 而且呈现加速减小的趋势。故在设计直流电容虚拟惯性控制的参数时, 在保证绝缘和不出现 PWM 调制等稳

定性问题的前提下,可以适当增加 V_{dc0} 和 ΔV_{max} , 这样风机在提供相同 H_{dc} 时所需的 C_{dc} 更小。

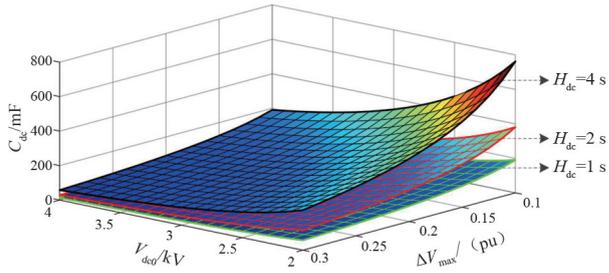


图 6 直流电容 C_{dc} 与 H_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 的关系

4 仿真分析

4.1 仿真模型

为验证所提控制策略的准确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 7 所示的仿真系统,包含一个 PMSG 风机、一个同步发电机、一个固定负荷和一个可投切负荷。PMSG 风机的参数见表 1。同步发电机采用 7 阶模型,相关参数见表 2。固定负荷 PL1 为 3 MW+0.3 Mvar,可变负荷为 PL2 为 0.15 MW + 0.015 Mvar。风速为 10 m/s,为了制造频率扰动,10 s 时刻投入可变负荷 PL2。

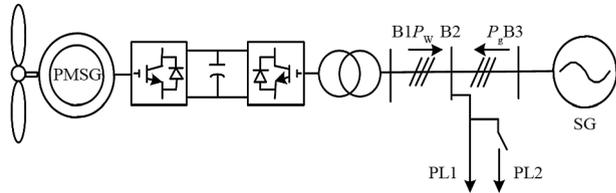


图 7 仿真测试系统

表 2 同步发电机主要参数

参数	参数值	参数	参数值
额定容量 S_g /MW	3	原动机时间常数/s	2.67
机端电压 V_g /kV	6.6	伺服电机时间常数	0.07
惯性时间常数 H_g /s	3.2	励磁调节器增益	400
原动机调差系数	0.04	励磁时间常数	0.01

4.2 有效性验证

为了验证直流电容虚拟惯性控制的有效性,在系统等效惯性一致的前提下,对比分析直流电容虚拟惯性控制、传统转子虚拟惯性控制和增加发电机惯性时间常数的控制效果。设定等效惯性时间常数为 3.2 s,直流电容提供的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 为 3.2 s ($C_{dc} = 291$ mF, $V_{dc0} = 2$ kV, $\Delta V_{max} = 0.2$ pu)。增加发电机的惯性时间常数 H_g 为 5.33 s (风机不提供虚拟惯性,增加发电机的惯性时间常数让系统的

等效惯性等于风机提供虚拟惯性后的等效惯性),式(19)为计算系统等效惯性时间常数的方法。转子传统虚拟惯性控制下风机转子提供的虚拟惯性 H_{RVIC} 为 3.2 s。即采用 4 种不同的控制方式,分别为:案例 1,无虚拟惯性控制 $H_g = 3.2$ s;案例 2,增加发电机惯性 $H_g = 5.33$ s;案例 3,传统转子虚拟惯性控制;案例 4,直流电容虚拟惯性控制。图 8 为仿真对比图。

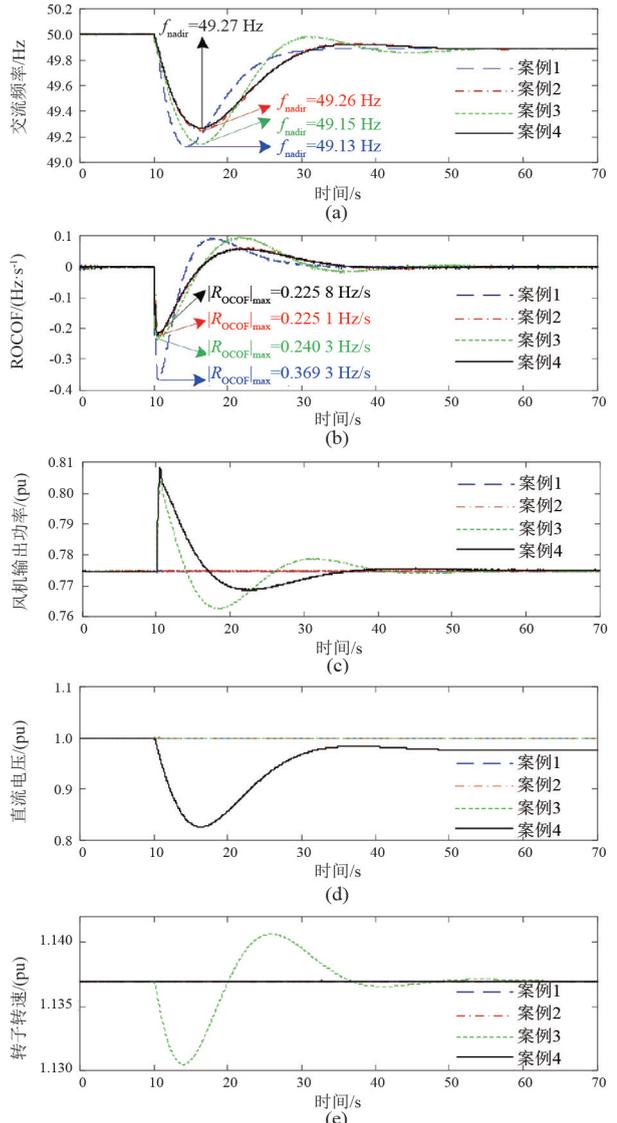


图 8 不同控制方式的对比

$$H_{eq} = \frac{\sum_1^m H_{g-i} S_{g-i}}{\sum_1^m S_{g-i} + \sum_1^n S_{w-j}} \quad (19)$$

式中: H_{eq} 为含风电的交流系统等效惯性时间常数; H_{g-i} 为第 i 台发电机的惯性时间常数; S_{g-i} 为第 i 台发电机的额定容量; S_{w-j} 为第 j 台风机的容量; m 为

交流系统中发电机的数量; n 为交流系统中风机的数量。

从图 8(a) 和 (b) 可知: 1) 无虚拟惯性控制下的最低频率 f_{nadir} 为 49.13 Hz, 频率跌落了 0.87 Hz, 频率变化的最大斜率 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 达到了 0.369 3 Hz/s; 2) 采用传统的转子虚拟惯性控制时, 频率跌落限制在了 0.85 Hz, 相对无虚拟惯性控制提升了 2.3%, $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 限制在了 0.240 3 Hz/s, 相对无虚拟惯性控制提升了 34.9%; 3) 直流电容虚拟惯性控制下, 频率跌落限制在了 0.73 Hz, 相对无虚拟惯性控制提升了 16.1%, $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 限制在了 0.225 8 Hz/s, 相对无虚拟惯性控制提升了 38.9%。

从图 8(c) 和图 8(e) 可知: 1) 无虚拟惯性控制时, 风机输出的功率和风机转速保持不变, 风机不响应交流系统的频率变化。2) 传统转子虚拟惯性控制下, 由于风机释放动能提供惯性支撑, 转速下降, 风机从功率跟踪曲线获取的参考功率下降, 削弱了风机提供频率支撑的能力, 如图 8(c) 所示风机提供的附加功率先于直流电容虚拟惯性控制下的附加功率过零。这也可以解释传统转子虚拟惯性控制对 ROCOF 抑制效果好而对频率最低点的提升不大。3) 在系统等效惯性时间常数一样的前提下, 增加发电机的惯性时间常数与直流电容虚拟惯性控制在频率变化的趋势和波形上一致, ROCOF 的波形和变化趋势也一致。这说明直流电容虚拟惯性控制能够准确模拟同步发电机的惯性响应, 能够有效地为交流系统提供虚拟惯性, 改善频率的动态特性。4) 与传统转子虚拟惯性控制相比, 直流电容虚拟惯性控制最大的优势是不引入频率的微分项, 可以避免引入频率微分的高频噪声, 也不会影响风机的 MPPT 运行。

4.3 虚拟惯性时间常数影响因素验证

为了验证不同参数对直流电容虚拟惯性控制的控制效果影响, 设置 8 种仿真案例, 参数如表 3 所示。设定风速为 10 m/s, 图 9—图 11 分别为不同 C_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 对直流电容虚拟惯性控制效果的影响图, 表 4 为不同仿真案例的频率响应特性。

采用频率变化率绝对值的最大值 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 、频率最低值 f_{nadir} 和扰动后的稳定频率 f_{final} 作为评估恒定风速下所提控制方法的性能。 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 和 f_{nadir} 可以表示频率的动态特性, f_{final} 可以表示扰动后频率的稳态特性。

表 3 仿真案例参数

仿真案例	C_{dc}/mF	V_{dc0}/kV	$\Delta V_{\text{max}}/(\text{pu})$	$\Delta f_{\text{max}}/\text{Hz}$	H_{dc}/s
案例 5 ^①	100	2	—	—	—
案例 6	100	2	0.1	1	0.525
案例 7	200	2	0.1	1	1.050
案例 8	400	2	0.1	1	2.100
案例 9	100	3	0.1	1	1.181
案例 10	100	4	0.1	1	2.100
案例 11	100	2	0.2	1	1.100
案例 12	100	2	0.3	1	1.725

注: ①案例 5 没有采用直流电容虚拟惯性控制。

从图 9—图 11 和表 4 可知, 采用直流电容惯性控制后, 频率扰动过程中, 直流电压会随着交流频率降低而降低。这表明存储在直流电容中的静电能量为交流系统提供了频率支撑。增加直流电容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} , 都可以减少频率变化的最大斜率 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$, 提高频率最低点 f_{nadir} , 改善频率的动态性能, 这与第 3 章理论分析相吻合。从风机输出的功率可以看出, 直流电容提供的是短暂的功率支撑, 是虚拟惯性支撑, 所以对最终频率 f_{final} 的改善作用不大。对于一些投运的风机, 直流额定电压都确定了, 在满足绝缘要求和不出现 PWM 调制问题时, 应优先增加 ΔV_{max} , 再根据所需的 H_{dc} , 采用式 (18) 计算出所需的 C_{dc} 。

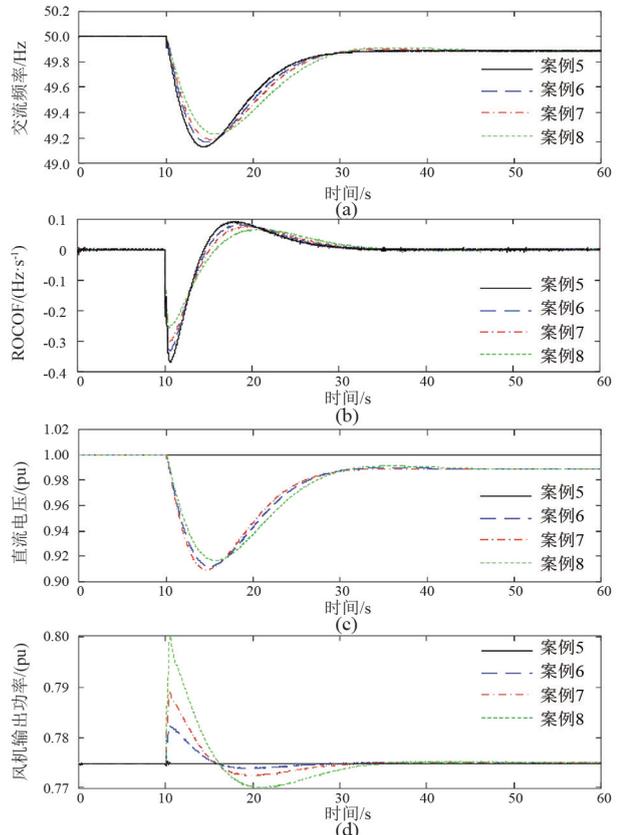


图 9 不同 C_{dc} 对虚拟惯性的影响

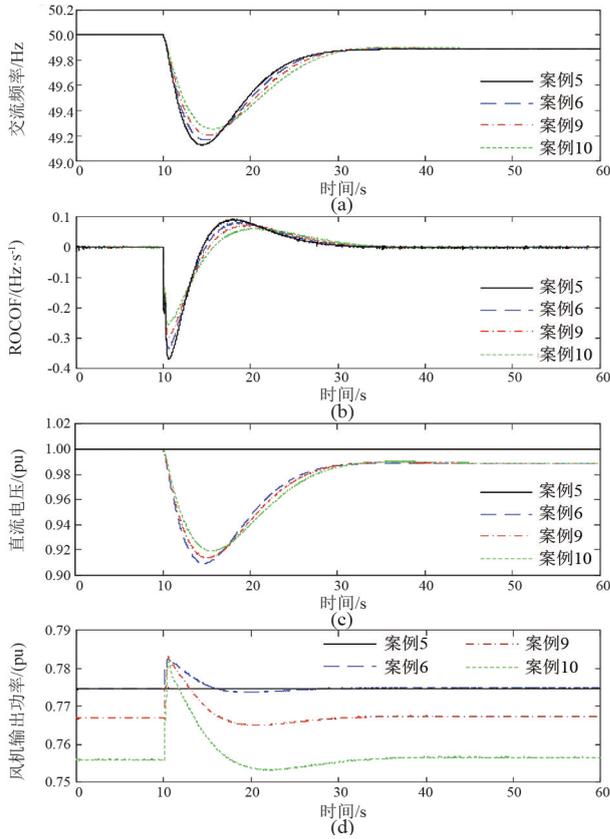


图 10 不同 V_{dc0} 对虚拟惯性的影响

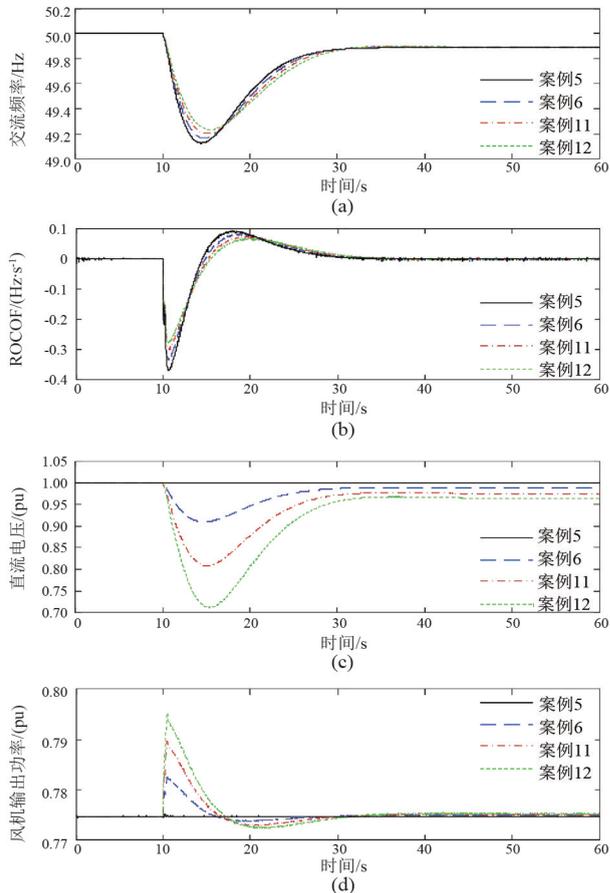


图 11 不同 ΔV_{max} 对虚拟惯性的影响

表 4 不同控制下的频率响应结果

仿真案例	$R_{OCOF} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	f_{nadir} / Hz	F_{final} / Hz
案例 5	0.369 2	49.13	49.89
案例 6	0.339 0	49.16	49.89
案例 7	0.303 9	49.20	49.89
案例 8	0.258 9	49.23	49.89
案例 9	0.296 3	49.21	49.89
案例 10	0.255 8	49.24	49.89
案例 11	0.301 6	49.20	49.89
案例 12	0.273 7	49.23	49.89

5 结 论

1) 直流电容虚拟惯性控制,利用存储在直流电容中的静电能为交流系统提供惯性支撑,定位为模拟同步发电机的惯性响应。在系统等效惯性时间常数一样的前提下,增加发电机的惯性时间常数与所提出的直流电容虚拟惯性控制在频率变化的趋势和波形上一致,也与 ROCOF 的波形和变化趋势一致。这说明所提出的直流电容虚拟惯性控制,能够准确地模拟同步发电机的惯性响应,能够有效地为交流系统提供虚拟惯性,改善频率的动态特性。这对于未来高比例风电接入的“低惯量”电力系统具有重要的工程意义。

2) 定量探究了影响直流电容提供虚拟惯性的关键影响因素,并给出了直流电容虚拟惯性控制参数的选取方法。增加直流电容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} 都可以提高虚拟惯性。但对于一些投运的风机,直流额定电压已经确定,在满足绝缘要求和不出现在 PWM 调制问题前提下,应优先增加最大允许的直流电压偏差,再根据所需的虚拟惯性时间常数,计算直流电容。

3) 直流电容虚拟惯性的控制效果优于传统转子虚拟惯性控制。与传统转子虚拟惯性控制相比,直流电容虚拟惯性控制最大的优势是不引入频率的微分项,避免了引入频率的高频测量噪声,也不会影响风机的 MPPT 运行。

参考文献

[1] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等.风电参与电力系统调频控制策略综述[J].电力自动化设备,2021,41(11):81-92.

数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估

陈振, 王曦, 陈刚, 石鹏, 范成围, 王永灿, 史华勃
(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610041)

摘要:新型电力系统的低惯量特征为其频率安全带来严峻挑战。为快速准确评估大电网受扰后的频率响应,文中提出数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估方法。为实现数据模型和物理模型分析手段的有效结合,设计了频率安全评估的可信集成学习方法,准确评估数据驱动频率安全结果的可信度,并通过设定可信度阈值作为数据模型和物理模型的切换依据。若数据模型评估结果的可信度高于阈值,则采纳为可靠的数据驱动频率安全评估结果,否则切换为基于物理模型的时域仿真方法进行评估。利用四川电网仿真模型生成数据集并进行模型性能分析,结果表明所提方法兼具频率安全评估的快速性和准确性。

关键词:频率安全; 数据-物理联合驱动; 可信集成学习; 人工智能

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)03-0016-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230303

Joint Data-Physical Driven Frequency Security Intelligent Assessment of Large Power System

CHEN Zhen, WANG Xi, CHEN Gang, SHI Peng, FAN Chengwei, WANG Yongcan, SHI Huabo
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The low-inertia characteristic of new power system brings serious challenge for its frequency security. In order to quickly and accurately assess the frequency response of large power grids after disturbance, a joint data-physical driven intelligent assessment method for frequency security of large power grids is proposed. To realize the effective combination of data model and physical model, a credible ensemble learning method for frequency security assessment is designed to realize the accurate credibility evaluation of data-driven frequency security results, and the credibility threshold is set as the basis for switching between data model and physical model. If the credibility index of data model is higher than the threshold, it is adopted as a reliable data-driven frequency safety evaluation result, otherwise it is switched to the physical model-based time-domain simulation method for evaluation. The simulation model of Sichuan power grid is utilized to generate datasets and carry out model performance analysis, and the results show that the proposed method combines the rapidity and accuracy of frequency safety assessment.

Key words: frequency security; joint data-physical driven; credible ensemble learning; artificial intelligence

0 引言

随着“双碳”目标下新型电力系统建设逐步推进,新能源渗透率不断提高,新型电力系统呈现低惯量特征,频率安全已经成为其面临的关键难题^[1-2]。快速准确评估大电网受扰后频率态势,对于及时采取有效控制措施,保障新型电力系统频率安全具有

重要意义。

现有的电网频率稳定分析方法多采用基于物理模型的分析方法^[3-4],由于频率稳定属于长时间尺度问题,在进行扰动后频率特性分析时,需要对诸多系统元件进行精细化或等值化建模,并通过时域仿真计算得到受扰后电网的频率动态特性。该类方法可靠性高,但时间开销大,难以实现对频率态势的在线感知。

人工智能技术的快速发展,为基于数据模型的电网频率安全评估提供了新的思路。基于人工智能的频率安全评估属于回归问题,利用电网运行状态信息和故障信息预测电网受扰后的频率特性指标。常用于频率预测的人工智能技术主要包括极限学习机^[5]、支持相量机^[6]、深度信念网络^[7]和随机森林^[8]等。这些方法尽管能够快速预测系统受扰后的频率态势,但存在可靠性不足的缺点,工程实用性有待进一步提升^[9-10]。

结合数据模型和物理模型分析手段的特点,下面从数据-物理联合驱动的角度出发,提出了大电网频率安全智能评估方法。通过可信集成学习评估数据驱动频率样本的可信度,进而实现数据模型和物理模型的有效结合。

1 电网频率安全特征构建

1.1 电网频率响应特性

电网动态频率是指由系统不平衡功率的总和作用于系统惯性中心的系统总的等值旋转惯量上所产生的转速增量随时间的变化。通常使用系统的惯性中心频率表示全系统的频率,惯性中心频率定义^[11]为

$$f_{\text{COI}} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i f_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

式中: f_{COI} 为系统惯性中心频率; M_i 为第*i*台发电机组的惯性时间常数; f_i 为第*i*台发电机频率; n 为系统中并网发电机组数量。

当电网遭受有功功率扰动后,系统频率的动态变化过程可由式(2)表示。

$$M \frac{d\Delta f_{\text{COI}}}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta f_{\text{COI}} \quad (2)$$

式中: Δf_{COI} 为系统频率偏差; M 为系统总的惯性时间常数; D 为阻尼系数; ΔP_m 和 ΔP_e 分别为系统总的机械功率和电磁功率不平衡量。

电网频率动态变化过程中,极值频率是指频率曲线的最低点或最高点,其直接决定了电网是否触发第三道防线,导致低频减载或高频切机等措施动作。因此,选择电网受扰后的极值频率作为刻画频率安全的指标,即人工智能模型的预测目标。

1.2 频率安全输入特征集

输入特征对于人工智能预测性能具有重要影

响。对于电网频率安全问题,输入特征应尽可能包含反映电网频率响应特性的电网运行信息和故障信息。根据上述分析及大量仿真经验,选择以下特征构成输入特征集,具体如表1所示。

表1 频率预测输入特征集

序号	特征量表述
1	总的负荷水平
2	旋转备用
3	功率缺额
4	扰动后 0.5 s 的频率值
5	扰动后 0.5 s 主力机组的电磁功率

2 数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估

为实现数据驱动和物理驱动频率安全分析方法的结合,首先设计了频率安全评估的可信集成学习方法,实现数据驱动频率安全结果的可信度评价,并通过设定可信度阈值作为数据模型和物理模型的切换依据。

2.1 可信集成学习与可信度指标

不同于传统数据驱动方法,可信集成学习的目标不仅得到预测数值,更进一步是利用集成学习中多个基学习模型的预测差异评估数据模型的可信程度。

对于有*T*个基学习器的集成学习模型,假设*T*个基学习器的输出分别为 $\{h_1, h_2, \dots, h_T\}$,统计得到*T*个基学习器输出的中位数 h_{median} ,定义基学习器可信性判据为

$$\begin{cases} \alpha \times h_{\text{median}} \leq h_i \leq \beta \times h_{\text{median}} \rightarrow \text{可信} \\ h_i > \beta \times h_{\text{median}} \text{ or } h_i < \alpha \times h_{\text{median}} \rightarrow \text{不可信} \end{cases} \quad (3)$$

式中, α 和 β 分别为设定的阈值。可信性判据解释为:若基学习器 h_i 的输出在 $\alpha \times h_{\text{median}} - \beta \times h_{\text{median}}$ 时,认为该基学习器的输出结果可信;否则认为输出结果不可信。

对于样本*x*,统计*T*个基学习器输出结果的可信性,得到共有 N_c 个基于学习器可信的输出结果,定义样本的预测可信度指标 η 为

$$\eta = \frac{N_c}{T} \quad (4)$$

在此基础上,可得到基于可信性集成学习的频

率预测输出值为

$$\begin{cases} H(x) = \frac{\sum_{i \in N_c} h_i(x)}{N_c} & \eta \geq \eta_0 \\ \text{reject} & \eta < \eta_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, η_0 为预设的可信度阈值。

2.2 大电网频率安全评估流程

数据-物理联合驱动的大电网频率安全评估流程如下:

1) 根据大电网仿真模型生成样本集, 通过随机生成电网负荷水平和开机方式产生大量运行方式, 并通过模拟功率盈余和功率缺额仿真电网的频率响应特性, 收集频率安全输入特征和极值频率。循环样本生成过程, 直到收集到足够的样本数据集。

2) 对样本集进行归一化处理, 并随机分为训练样本集和测试样本集。

3) 以极限学习机^[12]为基学习机器, 利用随机抽样法从预设范围内抽取隐藏层的神经元数量并使用训练样本对该基学习器进行训练。循环上述过程, 直到训练生成预设数量的基学习器。

4) 在测试评估阶段, 将样本分别输入到离线训练完成的基学习器中, 统计所有基学习器的预测值, 计算数据驱动模型的预测可信度。

5) 将数据驱动模型的频率预测可信度与设置的可信度阈值比较, 若可信度大于阈值, 则采纳该频率预测结构; 否则, 判定该样本的数据预测结果不可信, 切换为基于物理模型的时域仿真方法进行分析。

数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估流程如图 1 所示。

2.3 频率安全评估性能指标

1) 评估性能指标

采用 3 个指标刻画数据-物理联合驱动方法的频率安全评估性能, 分别为: 平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE)、最大绝对误差 (maximum absolute error, MAAE)。

误差指标越小, 表示评估方法的性能越好。

2) 时间效率指标

数据-物理联合驱动方法结合数据驱动和物理驱动的特点, 可信度高的样本可使用数据驱动方法评估, 时间开销小; 可信度低的样本则使用物理驱动方法评估, 时间开销大。为刻画数据-物理联合驱

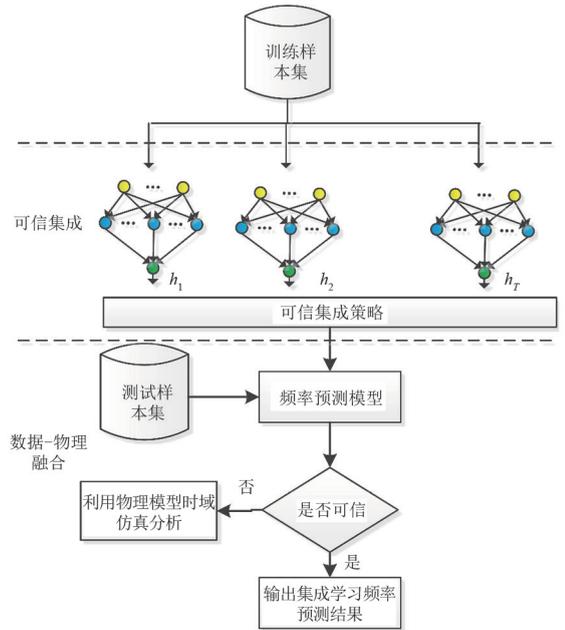


图 1 数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估流程

动方法的整体时间效率, 定义时间效率指标 (time efficiency, TE) 用样本保留率来表示。

$$T_E = \frac{N_{cre}}{N_A} \quad (6)$$

式中: T_E 为样本保留率; N_{cre} 为数据驱动的可信样本数量; N_A 为样本总数量。 T_E 越大, 表明数据-物理联合驱动方法的时效性越好。

3 算例分析

以四川电网为例, 设置负荷水平在 80%~120% 范围内随机波动, 并根据负荷水平的变化调整发电水平以保障潮流的收敛性和合理性。随机模拟该电网出现功率缺失和功率盈余, 共生成频率安全评估样本 393 个, 其中随机选择 60% 作为训练样本集, 剩余 40% 为测试样本集。

3.1 可信度阈值的影响分析

在进行频率安全评估时, 基本学习模型数量为 100 个, 基学习器阈值设置为 0.998 和 1.002。在此基础上, 分析可信度阈值对样本保留率与平均绝对误差的影响, 结果如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 可知, 可信度阈值越大, 模型 MAE 越小, 即数据-物理模型的评估性能越好; T_E 越小, 即数据-物理模型的时效性越差。综合模型性能和时效性, 以下对比分析可信度阈值设定为 0.95。

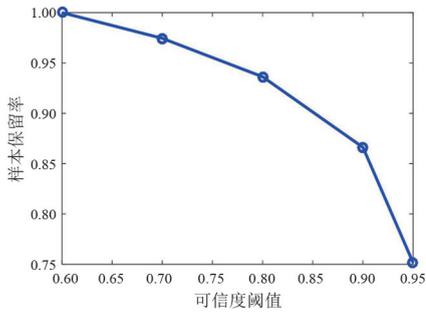


图 2 可信度阈值对样本保留率的影响

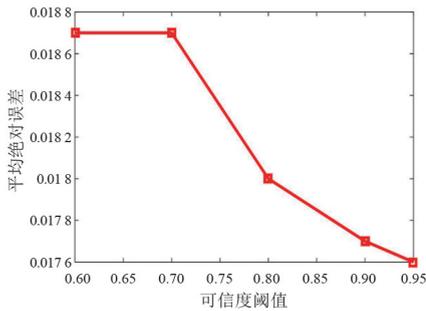


图 3 可信度阈值对 MAE 的影响

3.2 性能分析

在测试集中对数据-物理联合驱动方法的频率安全评估性能进行分析,频率预测的绝对误差分布和单样本预测对比结果分别如图 4 和图 5 所示。

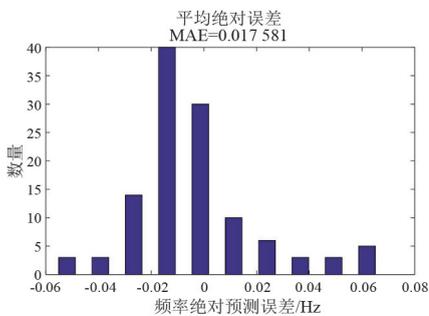


图 4 数据-物理联合驱动方法的绝对误差分布

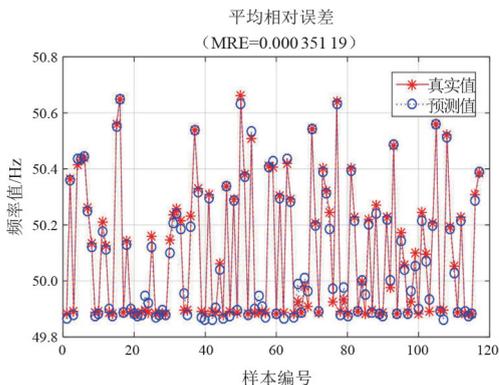


图 5 数据-物理联合驱动方法频率预测值与真实值对比

由图 4、图 5 可知,数据-物理模型的频率安全评估结果的绝对误差分布集中于 0 Hz 附近,且预测

值与真实值十分接近。

将数据-物理模型方法与传统数据驱动方法进行对比,传统数据驱动方法选择平均集成学习,即预测结果为所有基学习器预测的平均值。对比两种方法的评估性能指标,结果如表 2 所示。

表 2 结果对比分析

方法	MAAE/Hz	MAE/Hz	MRE/%
传统数据驱动方法	0.108 7	0.018 7	3.73
数据-物理联合驱动方法	0.068 2	0.017 6	3.51

由表 2 可知,在平均绝对误差和平均相对误差方面,数据-物理联合驱动模型的评估性能均优于传统数据驱动方法。更为重要的是,数据-物理模型的最大绝对误差仅为 0.068 2 Hz,远小于传统数据驱动方法的 0.108 7 Hz,证明了所提的数据-物理联合驱动方法可有效筛选出利用数据驱动预测时误差较大、可信度较低的样本。将这些样本通过物理模型进行分析,从而保证了数据-物理模型的整体可信度,降低预测风险。

4 结 论

为快速准确评估大电网频率安全,上面提出了一种数据-物理联合驱动的频率安全智能评估方法,通过可信集成学习评估数据驱动频率样本的可信度,进而实现数据模型和物理模型的有效结合。通过在实际大电网生成仿真样本并进行模型测试,结果表明数据-物理模型在进行频率安全评估时具有比传统数据驱动方法更好的性能,并且数据-物理模型能够有效筛选出数据驱动的不可信样本,保证了频率安全评估的准确性和可信度,降低预测风险。

下一步将探索更多的数据驱动和物理驱动的结合方式,进一步提升频率安全评估性能。

参考文献

[1] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.

[2] 孙凯祺,李可军,刘奕路,等. 基于直流互联的交流电网频率稳定控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 723-730.

基于负载再分配的边缘计算任务均衡调度策略

谢欢, 杜书, 陈少磊, 马玫, 张秋铭, 邓冰妍
(国网四川省电力公司信息通信公司, 四川成都 610041)

摘要:目前5G异构网络的计算卸载机制在边缘节点资源方面和电力业务调度算法时延与负载均衡方面存在问题。综合考虑边缘服务器负载均衡和业务计算时延,针对min-min算法与max-min算法的不足,文中提出了基于电力业务优先级二次再分配的均衡调度算法。该算法根据业务的最大容忍时延划分业务的优先级,并且根据最小完成时间标准差确定长短业务比例,实现业务的预分配。基于各个边缘服务器的负载情况,该算法再将高负载边缘服务器上的业务分配给负载低的服务器,实现二次再分配。仿真结果表明,与典型的算法相比较,所提算法缓解了现有技术中存在的以上问题,降低了计算时延,实现负载均衡,提高了系统资源利用率。

关键词:边缘计算; 负载均衡; 二次再分配; 5G; 电力物联网

中图分类号: TN 929.5 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0020-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230304

Balanced Scheduling Strategy for Edge Computing Tasks Based on Load Redistribution

XIE Huan, DU Shu, CHEN Shaolei, MA Mei, ZHANG Qiuming, DENG Bingyan
(State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The current computational offloading mechanism of 5G heterogeneous network has problems in terms of edge node resources and latency and load balancing of power service scheduling algorithm. The balanced scheduling algorithm based on secondary redistribution of power service priorities is proposed for the shortcomings of min-min algorithm and max-min algorithm, comprehensively considering the load balancing and service computation delay of edge server. The algorithm divides the priority of services according to the maximum tolerated delay of services, and determines the ratio of long and short services according to the standard deviation of minimum completion time to realize the pre-allocation of services. Based on the load of each edge server, the algorithm then allocates the services on the high-load edge servers to the low-load servers to achieve secondary redistribution. Simulation results show that, compared with typical algorithms, the proposed algorithm alleviates the above problems in the existing technologies, reduces computational latency, achieves load balancing, and improves system resource utilization.

Key words: edge calculation; load balancing; secondary redistribution; 5G; power Internet of things

0 引言

边缘计算是在第五代移动通信技术(5G技术)中,为附近终端设备提供云计算能力的一种有前途的范例。5G技术的通信特征与电力系统的特征和需求之间具有互补性,电力物联网将5G技术与电力系统相结合,进一步提高新型电力系统信息化水

平,全面提高资源利用率,为电力系统各部分提供强有力的技术支持^[1]。海量的电力业务给计算能力有限的终端设备带来了前所未有的挑战,因此,边缘计算技术应运而生。边缘计算被认为是一种有前途的提高卸载效率的方法。终端设备能够将其任务卸载到网络边缘的服务器,而不是利用核心网络中的服务器,也就是说将云计算下沉到电力终端设备近端执行。边缘计算在计算卸载过程中提供低延迟、

高带宽和计算敏捷性等性能,保证数据传输和计算的高效可靠^[2]。

文献[3]提出了 JCORA 算法分配资源的方案,解决了 NP-hard 问题,有效降低能耗、任务完成时间和复杂度。文献[4]利用软件定义网络思想,旨在减少延迟,将卸载问题描述为混合整数非线性规划,将优化问题转化为两个子问题。文献[5]提出了一维搜索算法寻找计算卸载的最优策略。上述研究中计算任务之间的关系平等,但在实际中业务的优先级会有区分,计算顺序也有先后。文献[6]提出改进的离散粒子群优化算法,综合考虑用户费用和业务截止时间,实现云计算任务在短时间内的全局较优调度方案。文献[7]根据业务重要程度、CPU 的处理速度和业务数据量大小等因素,通过将业务的预期完成时间与业务的重要程度相结合来改进 min-min 算法和 max-min 算法负载不均衡的问题。文献[8]提出了一种面向业务优先级的业务调度算法,该算法在保证负载均衡的前提下,基于最小时延进行业务分配,同时适配业务优先级;当业务调度器中短任务比长任务多时,使用 max-min 算法会优先考虑调度长任务,同时,短任务会被分配给其他的边缘服务器去执行,所以使用 max-min 调度策略相对于 min-min 调度策略会得到更好的资源利用率,而且减少了时间复杂度并提高了资源利用率;当业务调度器中长任务较多而短任务较少时,则反之。

基于 min-min 业务调度算法和 max-min 业务调度算法的不足,如时延大、资源利用率较低、负载不均衡、最大完成时间 (Makespan) 较高等,对其做出改进,根据不同优先级进行任务划分,设计了长短任务标准差匹配函数,提出基于标准差的改进算法。改进算法旨在结合 min-min 算法和 max-min 算法的优点,合理利用已有资源,同时在完成预分配之后加入二次分配机制,充分利用预分配阶段的空闲资源,提高算法的灵活性,进一步降低时延,使资源利用率最大化,实现负载均衡。

1 电力业务场景及调度模型

1.1 电力业务场景

在当前泛在电力物联网大规模推进和电力市场化改革的条件下,边缘计算技术应用存在于如表 1 所示的传统业务及新兴业务。

受无线网络中的带宽和边缘服务器计算资源的限制,调度模型直接影响系统的卸载时延和资源利用率。相对于边缘服务器,终端设备的计算能力和电池容量受限制的情况下,业务在终端设备本地执行不能够保证满足用户的服务质量 (quality of service, QoS) 需求。所以,终端设备决定将其业务卸载到边缘服务器以进行远程计算,并将结果返回给终端设备。因此,如何在边缘计算中通过卸载策略来合理地分配资源,提高资源利用率以达到更好的负载均衡并降低计算时延,是当前边缘计算中的一个重要问题^[9]。

表 1 业务分析

业务分类	业务需求	协同方式
提升配电网运行效率	1) 故障快速处置与精准主动抢修 2) 状态在线评价与设备预先检修 3) 台区能源自治与电能质量优化	云-边协同 边-边协同 边-端协同
现有业务	1) 规划系统科学与投资精准高效 2) 资产精益管理与设备全寿命管控 3) 线损实时分析与区域综合降损	云-边协同
提升客户服务水平	1) 供电方案优化与用电可视化 2) 停电准确定位与精准透明发布 3) 负荷特性识别与用电能效优化	云-边协同
新兴业务	1) 助推智能设备产业升级 2) 支持第三方应用开发 3) 共享配用电数据服务	云-边协同 边-边协同

在此列举电力物联网在 5G 边缘计算场景下的典型网络架构如图 1 所示。该场景下电力业务主要为无人机巡检、智能充电桩、光伏发电等,部署了多个边缘服务器,边缘服务器与电力终端通过无线通信进行数据交换。

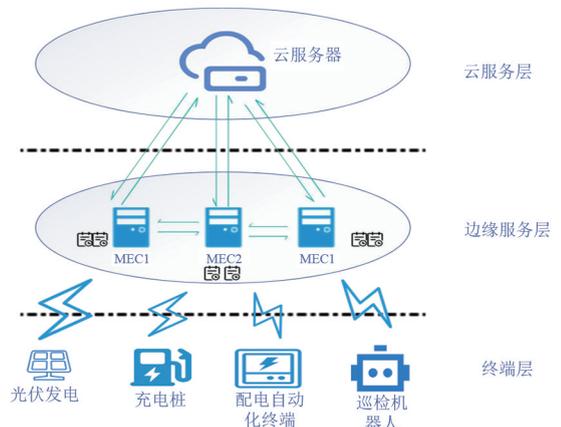


图 1 边缘服务器业务调度场景

1.2 系统模型

在多电力终端设备与多边缘服务器的场景下,

每一个终端设备都有一个要在一定延迟约束内完成的计算业务,根据不同业务的最大容忍时延要求,对队列中的业务进行优先级的划分。改进算法以业务的优先级、预期最小完成时间和等待队列中业务预期完成时间的标准差等参数作为依据进行任务调度,并根据各边缘服务器计算能力的不同,合理分配,从而达到降低业务处理时间、实现负载均衡的目的。针对业务优先级与传输过程中的资源调度和边缘服务器队列进行建模,主要分为如下部分:

1) 业务优先级模型:根据业务所能容忍的最大时延确定业务优先级。

2) 业务传输模型:设定边缘服务器的信道带宽和设备终端的数据传输功率,计算无线通信链路传输速率,得出传输时延。

3) 边缘服务器调度模型:设定边缘服务器中业务调度队列模式。由电力终端、无线通信传输和边缘服务器组成的系统,计算过程如图 2 所示。

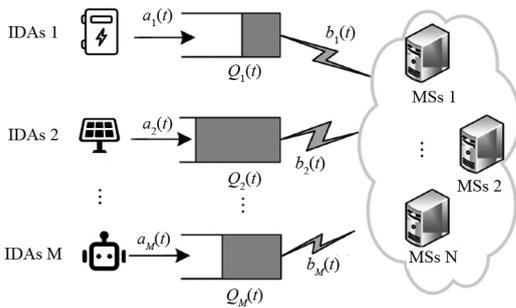


图 2 业务计算调度过程

1.2.1 业务优先级模型

在模型中假设有 n 个终端设备表示为 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, 每个终端设备产生一个电力业务表示为 $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$, T_n 代表第 n 个电力业务, 每个计算业务 T_n 可以用术语描述为 $T_n = \{I_{T_n}, D_{T_n}, C_{T_n}, W_{T_n}, P_{T_n}, t_{T_n}^{\max}\}$, 其中: I_{T_n} 为业务的标志编号; D_{T_n} 为业务的数据量; C_{T_n} 为完成此业务所需的计算能力; W_{T_n} 为业务传输至边缘服务器后处于业务调度队列中的等待时间; P_{T_n} 为业务优先级; $t_{T_n}^{\max}$ 为计算业务所需的最大容忍延迟, 与业务的优先级成反比。

1.2.2 业务传输模型

在 5G 异构网络中, 为了有效地重用频谱, 边缘服务器都在同一频带中工作。频谱被划分为 k 个信道, 表示为 $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 。每个信道的带宽都是相同的, 用 W 表示。5G 网络中的多用户 OFDMA

系统中的每个信道都与其他信道正交。当终端设备选择由边缘服务器计算其业务时, 输入数据通过无线通信链路传输到边缘服务器。在终端设备 i 访问边缘服务器下数据传输速率可以表示为

$$R_{T_i} = W \log_2 \left(1 + \frac{P_i g_i}{N_0} \right) \quad (1)$$

式中: W 为信道带宽; P_i 为终端设备 i 在信道中传输数据的功率; g_i 为终端设备 i 和边缘服务器之间的信道增益; N_0 为信道内噪声功率。

因为边缘服务器传输功率相较于终端设备的传输功率大得多, 而且计算结果数据量小于业务的数据量, 所以回传结果的时间可以忽略不计。

1.2.3 边缘服务器调度模型

所研究场景为电力系统中多设备、多边缘服务器的分布式计算。终端设备通过 5G 异构网络将其计算电力业务卸载到边缘服务器, 暂时存储在业务调度器中。业务调度器将业务按照优先级进行从大到小排序, 形成不同优先级的待处理任务调度队列 $D = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ 。该场景下边缘服务器有 j 台, 边缘服务器集合用 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_j\}$ 表示。集合 S 中的第 m 个服务器可以用 $S_m = \{I_m, F_m, P_m, W_m\}$ 表示该服务器的具体状态, 各项参数的具体含义如下: I_m 为边缘服务器的编号标志; F_m 为边缘服务器的计算能力; P_m 为边缘服务器的优先级; W_m 为边缘服务器的就绪时间^[10]。业务调度器中按照 P_m 排序所有边缘服务器, 形成边缘服务器调度队列, 便于后续待传输业务进行资源匹配。

2 边缘计算任务调度算法

2.1 基于最小完成时间标准差的预调度分配算法

所做研究场景中, 边缘服务器比电力设备终端的数量少, 将所有边缘服务器的状态初始化为空闲状态。从优先级最高的业务开始进行分配, 首先计算所有业务的最小完成时间和最小完成时间标准差, 第 i 个业务的最短完成时间为

$$E_i = W_m + t_m^c + t_m^r \quad (2)$$

式中: E_i 为第 i 个业务的最小完成时间; W_m 为第 m 个边缘计算服务器的就绪时间; $t_m^c = \frac{C_{T_n}}{F_m}$, 为第 m 个

边缘计算服务器计算业务 T_i 所消耗的时间; $t'_m = \frac{D_{T_i}}{R_{T_i}}$, 为终端设备将业务 T_i 传输到边缘服务器所消耗的时间。因此, 该业务集中所有业务的最小完成时间标准差 S_D 可表示为

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s E_i - \bar{E}}{n}} \quad (3)$$

式中: n 为该业务的个数; \bar{E} 为所有业务最小完成时间的平均值。

计算出 S_D 后, 查找待分配业务中连续两个业务最小完成时间差值大于标准差的位置。找到之后, 如果该位置在业务集的前半段, 则说明该业务集中短业务少、长业务多, 则采用 min-min 算法完成预调度; 否则, 采用 max-min 算法完成预调度。

基于标准差的预调度资源分配算法描述如下:

输入: 任务 T_n , 边缘服务器 S_m , E 矩阵。

输出: 任务总完成时间, 各边缘服务器工作时间。

- 1) 计算每一个业务 E_i 。
- 2) 将所有业务的最小完成时间递增排序。
- 3) 计算 S_D , 在待完成分配的业务调度器中找到相邻业务之间的最小完成时间差值大于 S_D 的位置 p , 判断 p 是否处于业务集的前半段, 如果是跳转到步骤 4; 如果不是则跳转到步骤 5。
- 4) 采用 min-min 算法分配该业务, 并从待分配业务集中删除该业务。
- 5) 采用 max-min 算法分配该业务, 并从待分配业务集中删除该业务。
- 6) 判断所有业务是否完成分配, 如果是则结束; 如果不是跳转到步骤 1。

2.2 边缘计算服务器资源分配

在完成业务优先级排列及预调度后, 算法通过二次分配, 将执行时间最长的边缘服务器上的业务分配给执行时间最短的边缘服务器, 如果将业务分配出去使总体执行时间减少, 则分配出去实现负载均衡。二次再分配的流程如下:

算法将根据各个服务器执行时间来调整边缘服务器中的业务, 将执行时间最长的边缘服务器上的业务分配给执行时间最短的边缘服务器, 更新边缘服务器的完成时间^[11]。如果将此业务分配出去可以减少总体完成时间, 则将从该边缘服务器上删除此业务, 分配到执行时间最小的边缘服务器, 更新所

有边缘服务器的工作时间; 若不能减少总体完成时间则将需要调整的边缘服务器上的其他业务分配出去, 更新所有边缘服务器的工作时间^[12]。

重复上述操作, 直到该边缘服务器上的业务不能分配出去为止, 得到最终的完成时间。

边缘服务器二次再分配资源调度算法伪代码如下:

输入: 任务 T_n , 边缘服务器 S_m , E 矩阵

For $n = 1 : n \in E_{\max}$ in S_m

For $m = 1 : m-1$ in other S_m

IF Makespan' < Makespan

Reset T_n

Update M_n

END IF

END FOR

END FOR

输出: 任务完成时间, 各边缘服务器工作时间

在输出之后, 计算各边缘服务器工作时间标准差, 作为负载均衡的指标, 公式为

$$S_{Ds} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^j M_n - \bar{M}}{j}} \quad (4)$$

式中: j 为边缘服务器的总个数; M_m 为第 m 个边缘服务器的工作时间; \bar{M} 为所有边缘服务器的完成时间平均值。

2.3 策略描述

边缘服务器的业务调度和资源分配策略的流程如下: 设置业务的数据量、最大容忍时延、优先级以及服务器的优先级等参数。业务的调度和服务器分配是根据业务的优先级、服务器的工作状态以及匹配服务器后任务的预期完成时间来进行的^[13]。具体调度策略如下:

1) 根据业务优先级排序生成业务等待队列, 计算所有业务的最小完成时间标准差, 并找到连续两个业务最小完成时间差值大于标准的位置 p 。

2) 如果 p 位于业务组的前半部分, 则采用 min-min 算法进行业务调度分配; 否则采用 max-min 算法进行业务调度分配。

3) 每完成一个业务的调度分配, 更新剩余业务的最小完成时间, 重新计算剩余业务最小完成时间标准差。返回步骤 1, 直到完成所有业务的调度分配。

4) 在完成所有业务的预调度分配之后, 算法基

于二次分配的原则,将工作时间最长的服务器的业务按照预期最小完成时间递增排列,依次尝试分配给工作时间最短的服务器,若能降低最大完成时间,则分配过去。

3 仿真分析

3.1 仿真场景

通过 python 语言对提出的电力业务资源分配调度算法进行仿真并分析其性能。实验运行在 CPU 为 i5 8300H 2.3 GHz、物理内存 16 GB 的 PC 机上。根据不同的业务数量从 10 到 100 分为 10 组进行对比实验,参考相关文献设置并优化仿真平台相关参数^[8]。为模拟近似实际应用场景下所需要计算的电力业务相关数据,对其进行随机初始化。调度算法根据业务的优先级、最小完成时间标准差和待处理服务等数据为每个业务匹配对应计算能力的边缘服务器,推导出每个边缘计算服务器的计算延迟和负载均衡标准差^[14]。

表 2 数据范围及参数设定

仿真参数	仿真数值
终端设备个数	[10, 100]
上行链路带宽	[$10^8, 10^9$]
终端设备发射功率/W	0.25
边缘服务器计算能力/(bit · s ⁻¹)	[$10^9, 7 \times 10^9$]
移动端计算能力/(bit · s ⁻¹)	10^7
任务数据量/bit	[$10^6, 10^7$]

所提算法的对比算法为传统的 min-min 调度算法、max-min 调度算法和基于任务优先级的改进 min-min(task priority-based min-min, TPMM) 调度算法。传统的 min-min 和 max-min 算法是启发式算法中的一个具有代表性的算法,有总完成时间短、算法思路简单的优点,这两种经典算法依据它们特点和优点,在资源任务调度算法研究中备受关注,满足部分电力业务要求。TPMM 算法即为 min-min 调度算法的改进算法,其本质是根据业务优先级为业务分配资源,以此确保较高优先级的业务分配到更多的计算资源优先进行计算,对比 min-min 算法时延得到了改善,同时进行了一定程度上的负载均衡优化。基于这 4 种算法在业务数量相同的基础上进行仿真,采用不同调度策略得到计算时延和负载均衡标准差。

3.2 结果分析

为证明所提算法的优越性,以计算业务时延和边缘服务器负载均衡标准差作为评估依据,通过综合负载均衡与时延,考察资源分配的合理性。根据预分配与二次再分配策略,达到降低最大工作时间和时延、提高资源利用率的效果。仿真结果表明,所提算法在负载均衡与降低时延方面的性能有所提升。

在低异构性业务与服务器计算资源的前提下,4 种业务调度策略所消耗的时间以及负载均衡标准差如图 3、图 4 所示。通过对比可知,当业务数量从 10 增加至 100 的过程中,所提算法采用的调度策略消耗的时间最少;其次是 TPMM 算法,而 max-min 和 min-min 算法消耗的时间相差无几。在服务器负载均衡方面,TPMM 算法相较 min-min 和 max-min 算法表现优异。因为 TPMM 算法对任务进行合理的优先级划分,有效平衡了计算负载。而 min-min 和 max-min 算法资源分配缺少合理性,使得负载不均衡的缺点较明显。

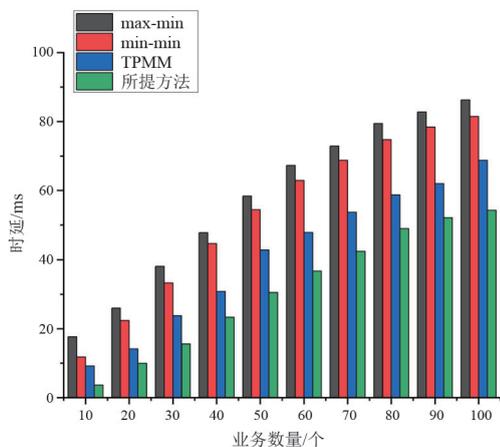


图 3 低异构性环境下时延的关系

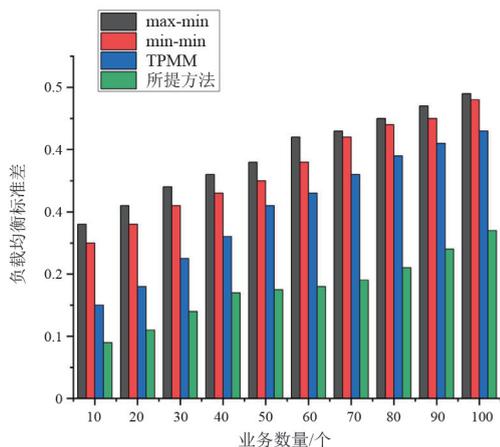


图 4 低异构性环境下负载均衡标准差的关系

在高异构性业务与服务器计算资源的前提下。4种业务调度策略所消耗的时间以及负载均衡标准差如图5、图6所示。高异构型环境中,各业务数据量之间相差较大,同时各服务器计算能力差异明显。在这种情况下, min-min 和 max-min 算法表现较差,负载均衡标准差升高,甚至会出现几个边缘计算服务器长时间空闲的情况,资源利用率严重降低,性能较差。TPMM 算法在时延这项指标上会有所减低,且得到了较低负载均衡标准差,边缘服务器组的负载分配较为合理。而所提出的算法,首先计算业务的最小完成时间标准差,进行预分配算法的动态选择,并搭配二次分配策略,前后两次优化业务集计算时间与服务器工作时间标准差,提升了资源利用率,降低了工作时间。

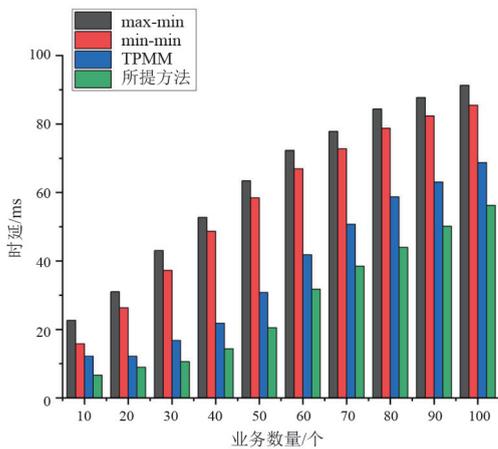


图5 高异构性环境下时延的关系

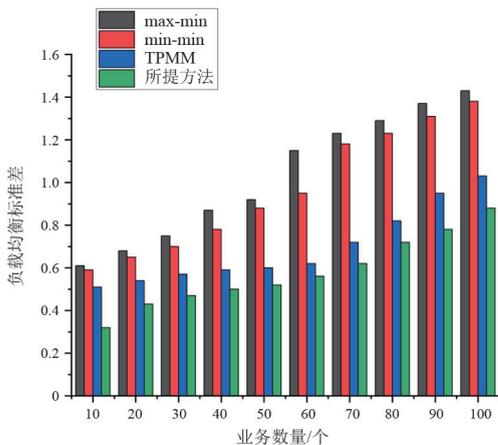


图6 高异构性环境下负载均衡标准差的关系

4 结论

5G 新型电力系统中,相关电力业务具有超低时

延和高可靠性的需求,并且不同的新型电力物联网业务需要差异化的通信和计算服务^[15]。上面针对 min-min 调度算法、max-min 调度算法和 TPMM 调度算法所存在的问题,在时延和负载均衡两个方面进行了改进,提出了二次分配的业务调度算法,并且从理论与实验两方面证明了所提算法的有效性。实验结果表明,该算法通过前后两次优化,达到了降低业务调度时延和服务器负载均衡标准差,提高资源利用率的目的。

国家电网有限公司针对电力控制类、采集类、视频类等典型业务,在实验室根据 5G 试验专网资源设置三类不同的端到端网络来承载验证,速率、空口时延、端到端时延、丢包率和时钟同步精度均满足要求。在外场测试中,速率和时钟同步精度满足要求,而端到端时延、丢包率不稳定需进一步查明。

所提算法虽然结合了 3 个算法的优点,而且考虑到了任务优先级和服务器的负载情况等因素,达到了一定改进效果,但仍存在不足。比如,不能动态地调整队列情况,没有与云服务器形成协同达到云-边-端协同的效果,这些也将是进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [2] 叶万余. 面向电力物联网 URLLC 业务的智能网络切片管理方法[J]. 工业工程, 2022, 25(1): 129-135.
- [3] ZHANG J, XIA W W, YAN F, et al. Joint computation offloading and resource allocation optimization in heterogeneous networks with mobile edge computing[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19324-19337.
- [4] CHEN M, HAO Y X. Task offloading for mobile edge computing in software defined ultra-dense network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 587-597.
- [5] LIU J, MAO Y Y, ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Barcelona, IEEE, 2016: 1451-1455.
- [6] 蒲汛,杜嘉,卢显良. 基于用户优先级的云计算任务调度策略[J]. 计算机工程, 2013, 39(8): 64-68.

青藏高原地区光伏配套储能系统设计与运行研究

栗刚¹, 李科峰¹, 王辉¹, 郎春雷¹, 晏小彬²

(1. 国家电力投资集团有限公司西藏分公司, 西藏 拉萨 851414;

2. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 西藏太阳能资源丰富, 提升光伏应用水平对于提高电力保障能力, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系具有重要意义。针对青藏高原地区极端条件造成的地区电网电源供电能力不足、光伏利用小时数较低以及电网安全稳定影响较大等问题, 以海拔4700 m的西藏当雄羊易10 MW光伏电站配套储能项目为例进行了研究。首先, 研究了高海拔电池储能系统的设计方法, 提出了储能变流器的高海拔修正策略和降容选型原则, 分析了电池系统的热管理设计方法; 然后, 对光储控制系统架构和控制策略进行了详细阐述分析; 最后, 结合政府保供政策和投资运维费用, 对该项目储能系统的经济性进行了分析评价。研究结果可为高原地区光伏配套储能系统的设计提供参考。

关键词: 电池储能系统; 高海拔修正; 光储控制策略; 经济性评价

中图分类号: TM 910 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0027-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230305

Research on Design and Operation of Photovoltaic-Energy Storage System in Tibet Plateau

SU Gang¹, LI Kefeng¹, WANG Hui¹, LANG Chunlei¹, YAN Xiaobin²

(1. Tibet Branch of State Power Investment Group Co., Ltd., Lhasa 851414, Tibet, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Tibet is rich in solar energy resources, and promoting the application level of photovoltaic is of great significance for improving power security and building a clean, low-carbon, safe and efficient energy system. Aiming at the problems caused by the extreme conditions in Tibetan Plateau region, such as insufficient power supply capacity of regional power grid, low photovoltaic utilization hours, and great influence of photovoltaic on power grid security and stability, the research is carried out taking the energy storage project of Yangyi 10 MW photovoltaic power station for example, which is connected to Tibet Dangxiong power station at an altitude of 4,700 meters. Firstly, the design of high-altitude battery energy storage system is studied, the high altitude correction strategy and the selection principle to reduce capacity for energy storage converter are proposed, and the thermal management design of battery system is analyzed. Then the architecture and control strategy of photovoltaic-energy storage control system are analyzed in details. Finally, combined with the power supply guarantee policy made by the government and the investment costs on operation and maintenance, the economy of energy storage system of this project is analyzed and evaluated. The results can provide a reference for the design of photovoltaic-energy storage system in plateau area.

Key words: battery energy storage system; high altitude correction; photovoltaic-energy storage control strategy; economic evaluation

0 引言

西藏有着丰富的太阳能资源, 通过对太阳能进

行合理有序地开发利用, 建设资源节约型、环境友好型能源基地, 将节能减排与可再生能源发展形成有机结合, 可促进地区电力事业、生态保护、区域经济的可持续发展^[1-2]。随着“双碳”目标的推进以及新

型电力系统的建设,新能源发电规模日益增大,其间歇性和波动性问题对电网的影响越来越突出,导致在一些电网薄弱地区弃光率较高^[3-6]。2021年,西藏地区以19.8%的弃光率高居全国首位^[7]。因此,研究高原地区电池储能系统设计方法,比较分析光储电站控制系统架构,开展光储配套系统运行经济性评价,对于建设清洁低碳、安全高效能源体系,以及增加电网保供能力、充分利用弃光电量、保障光伏利用小时数等具有重要的现实意义和深远的战略意义。

国内外学者已对光伏配套储能系统的选型设计及优化控制开展了较多的研究。文献[8-10]通过对不同类型组件的性能和空间要求进行分析,研究各组件的环境适应能力,针对不同系统提出了对应的储能方式。文献[11-12]将分布式模块化变流器技术、物联网技术、智能控制技术和蓄电池相结合,设计了一种新型智慧蓄电池的结构。为了将系统的光伏自我消纳水平得到切实保障,文献[13-14]将储能系统与光伏发电模式进行了充分整合,明确电池储能容量配置及经济效益的变化规律。文献[15]提出了一种将光伏组件与储能电池有机结合构成光伏-储能单元,克服了集中式或普通分布式光储系统存在的稳定性差、容量利用率低和质量比功率低等问题。为了对储能系统的经济性进行评价,文献[16-17]考虑寿命衰减及电价机制,评估了电池储能系统在整个寿命期内的能量吞吐量和平准化储能成本,提出了电池储能系统技术经济分析框架。以上文献对光伏配套储能系统进行了较为充分的研究,但是并未考虑西藏高海拔、长距离、电网动态无功支撑能力较弱等因素对储能系统的影响。

下面以海拔4700 m的西藏当雄羊易10 MW光伏电站配套储能为例,研究了高海拔储能系统设计方法,包括储能系统配置、储能变流器绝缘修正及散热校核、电池系统热管理设计,并分析了光储电站的控制架构和策略设计,最后结合当地电网政策和实际运行时长等因素对储能系统的经济性进行了评价。

1 项目建设概况

当雄羊易10 MW光伏电站位于拉萨市当雄县羊易村境内,海拔高程在4700 m,是目前世界上海拔最高的光伏电站。工程站址东北距当雄县约

110 km,东距拉萨市约180 km。S304省道从站址北侧通过,交通便利,运输方便。

该光伏电站以35 kV汇集后升压至110 kV,通过1回110 kV线路接入羊易汇集开关站,羊易汇集开关站通过1回110 kV线路接入110 kV佳木变电站,接入系统方案如图1所示。由于西藏电网新能源承载能力较低且调峰电源缺乏,2021年弃光率达到36.5%。为了提高羊易光伏电站的利用率,在该光伏电站配置电化学储能2 MW/10 MWh,储能升压至35 kV后接入电站35 kV汇集母线。

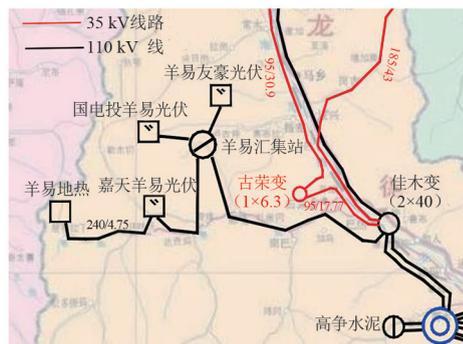


图1 接入系统方案

2 储能系统设计

2.1 储能系统配置

10 MW羊易光伏电站配套储能,采用单个2 MW/10 MWh储能单元,放电倍率为0.25C,由4组2.5 MWh电池堆分别经4台500 kW变流器逆变成交流550 V,4台变流器交流侧两两并联接入升压变压器的低压双分裂绕组,储能单元接线如图2所示,升压变压器采用油浸式变压器,变比为35 kV/0.55 kV,容量为2280 kVA。

2 MW/10 MWh储能单元实际主设备由1个变流升压舱和2个电池集装箱组成。变流升压舱由4台户外型储能变流器(power conversion system, PCS)及1台升压变压器构成。单个电池集装箱内包含两堆电池,每堆7簇,单簇电池由25个1并16串的电池模组串联构成,单堆容量为2 508.8 kWh,单舱容量为5 017.6 kWh。储能系统内变压器、断路器等常规设备选型均按5000 m高海拔型设备选择。

2.2 储能变流器设计

PCS采用强迫风冷散热,应用于高海拔环境时,随着海拔升高,空气密度降低,气温降低,对变流器运行有较大影响,主要影响因素如表1所示。

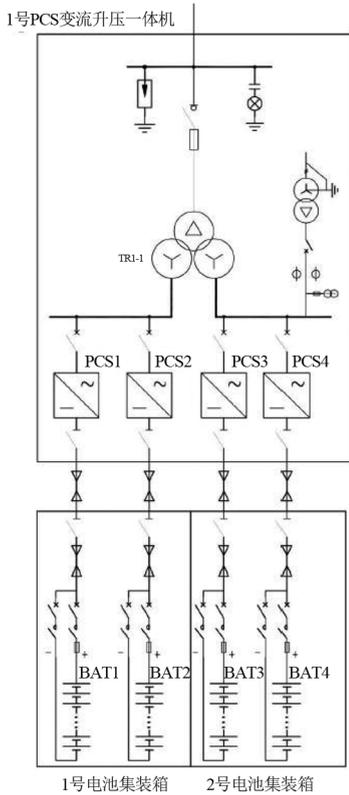


图2 储能单元接线

表1 变流器高海拔应用影响因素分析

影响因素	变化趋势	影响
气压与空气密度	下降	绝缘强度:影响电气距离等; 影响散热:不利于风冷散热。
气温	下降	每升高 1000 m,气温下降 6℃, 有利于散热。
断路器等开关器件 高海拔降容需求	降容	以海拔 2000 m 为基准,超过 2000 m,每升高 100 m降容 1%。

从表1可以看出,海拔升高对变流器的不利影响主要体现在电气间隙与爬电距离、风冷散热以及断路器等开关器件的降容等3个方面。

1) 电气距离校核

空气绝缘强度随着海拔升高而降低,同时对电气间隙和爬电距离的要求更高。这也是变流器在高海拔设计时考虑的第一要素。由于PCS为低压电器,电气间隙和爬电距离的设计相对其工作电压等级而言已经有较大裕量。

以所述项目为例,由于PCS直流侧电压最高为1500 V,交流侧电压为690 V(进行了降额应用,断路器额定电压800 V降额到0.7倍使用,实际使用交流侧电压为550 V),由于变流器属于低压电器,实际设计时考虑的极限电气间隙(>10 mm)与爬电距离(>20 mm)要求远大于PCS实际电压等级对电气间隙和爬电距离的要求。

依据国家标准GB 4793.1—2007《测量、控制和实验用电气设备的安全要求》^[18],获取到相关的电气距离倍增系数为1.48。按照低海拔低压系统在低海拔下电气距离10 mm核算,在5000 m海拔场景下,电气距离需要保证不小于15 mm来进行校核。

2) 整机内部风冷散热校核

针对变流器额定功率下的散热情况进行了高海拔场景下的热仿真。

图3为变流器功率模组散热路径示意图。主功率舱风道主要包括百叶窗、风机、模组、电抗器、进风口及相关通道钣金连接件。散热风机采用大风量、大风压的离心风机匹配鼓风式风道结构,采用上进风,下出风结构。

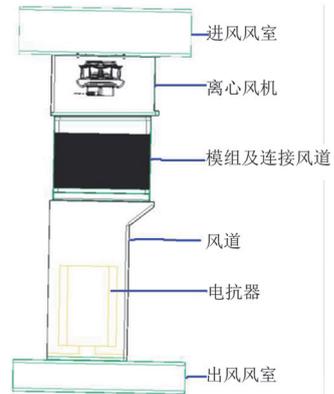


图3 变流器模组散热风道

变流器功率器件为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),功率器件应用时温度升高,需依靠散热器来保证其安全正常工作。风机置于功率模块顶部,四周用钣金围成密闭风腔,3个功率模块散热器顶部与风腔接触面开有对应进风口,每个功率模块散热器底部开有方形出风口。空气通过箱壁百叶窗进入变流器内部,经风机四周叶片甩出到风腔内;然后,通过风腔挤压至功率模块进风口处流入功率模块散热器;最后,通过底部功率模块出风口排出,形成风道回路。

仿真结果如下:进风口采用面板表面开孔结构,孔口有一定倾斜度的挡板具备防止雨水主动进入的作用,进风侧的开孔率为25%。

该变流器应用于高海拔(4700 m)工况下,变流器容量降容、额定电流降容,故对应功率器件的发热功率也按比例降容。单个功率模组总损耗为6.8 kW。1000 m海拔以下,风机的风压-风量曲线如图4所示。

随着海拔高度的增加,达到 5000 m 后风机静压与常规差值为 200 Pa,因此仿真过程中需按照降容后的风压-风量曲线作为输入。基于上述信息建立仿真模型并得到散热器表面温度分度云图,如图 5 所示。

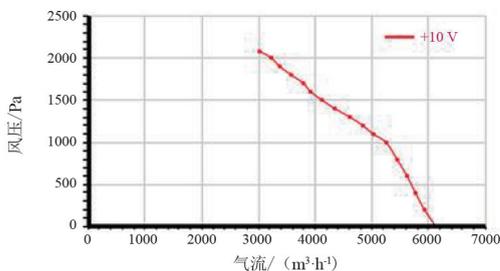


图 4 1000 m 以下离心风机风压-风量曲线

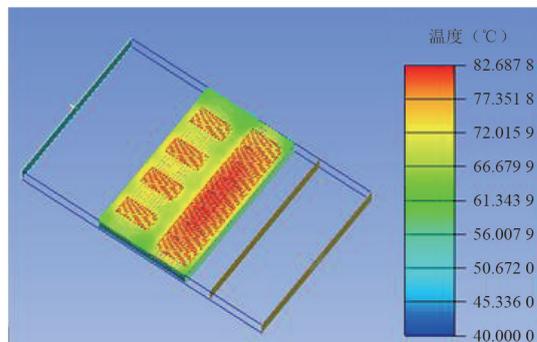


图 5 散热器表面温度分度云图

在环境温度 40 °C 条件下,变流器 ABC 三相模组的散热器表面温升最大为 42 K,满足设计要求 (<45 K)。相关内部气流速度分布如图 6 所示。仿真结果显示,散热满足工程应用要求。

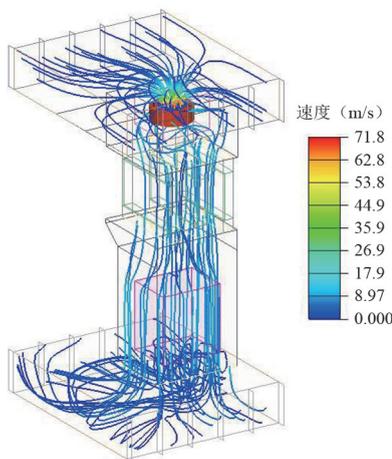


图 6 变流器散热内部气流速度分布仿真

3) 器件降容校核

针对储能变流器内的所有核心电气元件,对高海拔场景下的电压和电流参数的降额运行情况进行

校核,主要包括直流断路器、直流熔断器、交流断路器、交流电抗器等,校核结果如表 2 所示。

表 2 储能变流器内部分器件高海拔(5000 m)校核

设备	电压降额系数	电流降额系数
直流断路器	1.0	1.00
直流熔断器	1.0	0.85
交流断路器	0.7	0.92
交流电抗器	1.0	0.60

2.3 电池系统热管理设计

电池系统电压范围为 1000~1460 V,按 1500 V 对电芯和电池系统直流侧元器件在 5000 m 高海拔条件下进行绝缘校核,低压器件的选型和绝缘间隙的设计均应满足绝缘要求^[19]。

电池系统的主要发热器件为电芯,在电池充放电过程中,会产生一定的热量。为满足电芯合理的工作温度范围,需进行散热系统设计。电池舱采用空调散热,风管安装在舱顶及侧壁上,空调出风口对接风管将冷风送至电池簇间;电池模组自身风机抽冷风,对电池单体进行冷却。每套储能电池配置独立工业空调,对称布置,通过风管导流确保舱内气流组织合理,保证电池模组温升均匀一致。在高海拔环境应用,需考虑模组散热风机特性曲线随海拔升高的变化以及空调的高海拔降容选型。

1) 空调选型设计

高海拔条件下,空调性能衰减比的经验值如表 3 所示。

表 3 空调制冷量和制热量随海拔衰减系数

海拔/m	制冷量衰减比/%	制热量衰减比/%
<2000	0	0
2000	10	14
3000	15	21
4000	20	28
5000	25	35

所述项目应用于 4700 m 海拔条件下,电芯的充放电倍率为 0.25C,电芯单体发热量按 4 W 计算。根据电池堆配置,初步核算电池堆级电池发热量为 11.2 kW,考虑箱体两堆电池及箱体热辐射,总散热量为 27.4 kW。

选用单个空调的标称制冷量为 15 kW,在外界环境温度 45 °C、舱内环境温度 25 °C 条件下,空调制冷量为 12 kW。根据表 2 高海拔制冷量降容后,实际单个空调制冷量为 9 kW,单舱选用 4 个空调,高

海拔下的制冷总量为 36 kW,可满足电池舱的热管理要求。

2) 散热仿真计算

空调风道由两部分组成,主风道水平出风,电池簇上方与主风道之间通过子风道连接,保证纵向从簇顶到簇底的送风量。空调出风口送出冷空气,通过对空调送风风道的设计以及电池模块轴流风机的应用,改善集装箱内空气的流场分布,确保每个电池模组都能引入空调的冷风。

空调额定制冷量为 15 kW,送风风量为 4500 m³/h。由于电池舱两侧 14 个电池簇呈对称布置,仿真建模取 1/4(3.5 个电池簇+1 台空调)。舱内空气流线仿真结果如图 7 所示。

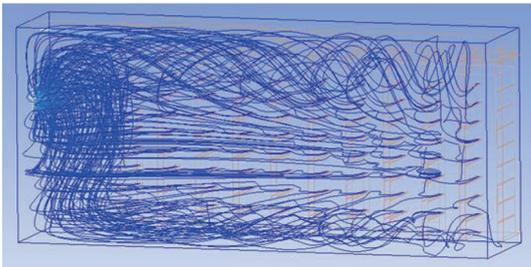


图 7 储能电池集装箱舱内流线分布

由于 280 Ah 储能电芯的合理工作温度范围为 20~35 ℃。根据仿真输入,最终舱内电芯温度分布如图 8 所示,满足电芯使用的工作环境。

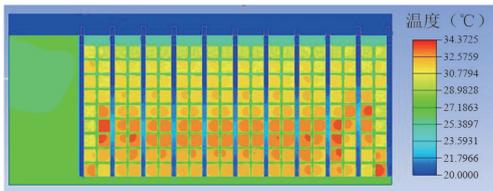


图 8 储能电池温度分布

3 控制系统设计

3.1 控制系统架构

光伏电站的储能控制系统架构如图 9 所示。

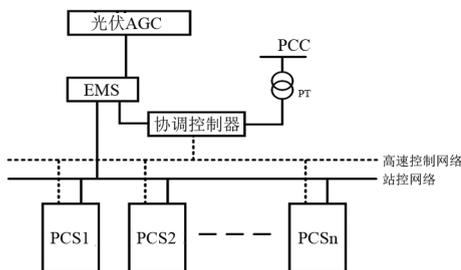


图 9 储能控制系统架构

系统中配置储能监控系统对储能设备进行监视,配置储能协调控制器进行储能自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 以及多 PCS 功率分配,并实现储能快速功率控制功能。同时和光伏电站 AGC 进行对接,接受光伏 AGC 的分配的控制指令。

光储协调主要有联合控制和独立控制两种模式^[20],可根据电网要求进行模式选择。

3.2 光储联合控制

光储联合控制模式下,电网调度机构按原有光伏电站的调度模式,给电站下发单个 AGC 调节指令,储能充放电指令由光伏电站 AGC 系统根据 AGC 指令和光伏实时发电功率计算得到,主要有以下 3 种控制策略:

1) 精确跟踪调度 AGC、减小弃光策略

当需要根据电网计划或实时指令实时跟踪调整并网点出力时,可采用光储联合跟踪控制模式,利用储能吸收光伏逆变器多余发电,减少弃光。在限电情况下,优先控制储能增加充电功率或降低放电功率,在储能无充电能力的情况下才考虑弃光。当并网总功率不能满足调度计划时,优先提高光伏逆变器出力,若仅靠光电出力无法满足调度目标,控制储能增加放电功率或降低充电功率。

2) 功率预测曲线补偿策略

根据当地功率预测考核规则,功率预测考核仅限于不限电时段。其中在不限电时段,短期功率预测考核计算逻辑为前日上送的功率预测曲线和当日输出功率比较,差异越小,准确率越高。前日上送的预测曲线不可变更,当日输出功率可以借由储能调节。控制储能出力,跟踪前日上报的功率预测曲线,达到提升功率预测准确率的目的,从而减少考核电量(处罚),提高效益。

根据考核指标,实时计算预测曲线最大误差值,当光伏总出力超出规定的指标范围前(需设定启动值和储能动作时间),对储能进行充放电控制,使得光储联合总出力在考核范围之内。在补偿过程中,通过设定电池充电状态的上、下阈值,避免储能过充、过放。

3) 平抑发电功率波动策略

光伏发电由于具有较大的间歇性和波动性,其并网发电的性能会受到严重影响。电池储能系统可以通过电池的充、放电来平抑光伏发电的功率波动。

平抑波动控制根据算法分为一阶滤波控制方式和功率波动限制控制方式^[21],可通过控制字整定。一阶滤波控制策略是根据电源端的输出功率进行一阶低通滤波,对于变化快速且不满足波动限制要求的功率分量,利用储能系统来消除,因此剩下的就是波动小的平滑功率分量了。功率波动限制控制策略是实时检测电源端的输出功率,统计其在一定时间周期内的波动量,若功率波动分量超出装置设定的波动限制值,则储能系统进行充、放电,抑制波动量。可通过定值整定,使得控制目标满足不同时间尺度的功率波动限制。平抑波动效果如图 10 所示。

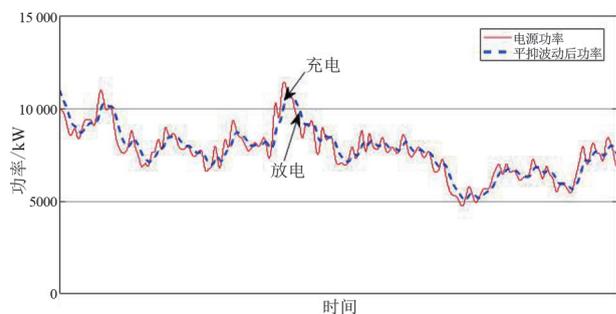


图 10 储能平抑波动效果

3.3 光储独立控制

光储独立控制模式下,储能系统由调度系统直接控制。光储电站可采用光、储独立控制模式运行,光伏 AGC 和储能 AGC 各自独立控制和独立考核,储能系统独立充放电控制主要有以下两种控制策略:

1) 按调度 AGC 实时指令控制

调度向光电 AGC 系统和储能 AGC 系统分别下发光电有功目标指令和储能有功目标指令,储能根据调度储能 AGC 指令进行充放电出力,并上送储能实际充放功率、储能充放电上下限等交互信号,调度根据光电 AGC、储能 AGC 上送的实际功率与目标指令分别独立进行比对考核。该运行方式下,光电 AGC 上送的光伏实发功率不包含储能充放功率。

2) 按设定的有功功率计划曲线控制

按照峰谷电价或参与电网调峰要求,制定峰谷跟踪计划曲线,设定高峰时段和低谷时段及相应时段的充、放电功率。当处于高峰时段,储能切换为放电模式,以设定的放电功率向电网返送电能;当处于低谷时段,储能切换为充电模式,以设定的充电功率从电网吸收电能。

3.4 快速一次调频控制

为了对电网的频率支撑做出贡献,储能系统具备快速一次调频控制功能,通过储能协调控制装置和 PCS 之间的快速通信架构,构建储能快速功率控制系统。

储能协调控制装置采集光伏电站并网点电压和电流参数,同时计算电网频率,按照图 11 所示的一次调频控制来调节储能系统的有功输出,从而完成快速辅助调频。图中: f_1, f_2, f_3, f_4 为可设置频率参数,参数可根据电网调度需求设置; $[f_2, f_3]$ 为频率死区范围。当系统频率越过死区范围时,协调控制器快速响应生成有功指令,并通过快速通讯将指令发送给 PCS 执行,控制储能系统进行快速有功功率调节,设计响应时间小于 100 ms。

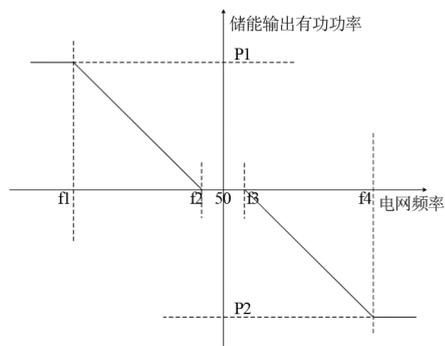


图 11 一次调频控制

一次调频通过有功功率-频率(P-F)下垂控制来调节有功功率,当系统频率下降时,储能系统放电增加有功功率输出;当系统频率上升时,储能系统充电减小有功功率输出。调频效果如图 12 所示。

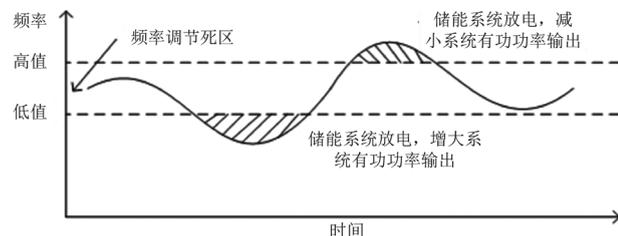


图 12 一次调频效果

4 储能系统经济性评价

4.1 项目投资

该项目总装机容量为 10 MWh,预计年平均上网电量约 2 471.56 MWh。项目建设总工期为 3 个月,财务评价计算期为 13 年,其中建设期 3 个月,运行期 12 年。

4.1.1 资金来源

1) 固定资产投资

根据工程投资概算,工程固定资产静态投资为1 947.7万元。建设期借款按复利计算利息,该项目计入固定资产的建设期利息为4.48万元。

2) 流动资金

流动资金按30元/kWh估算,总计30万元。流动资金全部自有,流动资金随储能设备投产投入使用,在计算期末一次性收回。

4.1.2 总成本费用

发电总成本费用包括折旧费、维修费、工资及福利费、保险费、材料费、摊销费、利息支出和其他费用等。

1) 折旧费折旧年限取10年,残值为3%。

2) 保险费取固定资产原值的0.057 5%。

3) 材料费和其他费用取固定资产投资的0.3%。

4) 利息支出为固定资产和流动资金等在运行期应从成本中支付的借款利息。

4.2 发电效益

4.2.1 上网电价及补贴

根据西藏自治区发改委2018年发布的《西藏自治区人民政府关于进一步规范和理顺全区上网电价及销售电价的通知》,羊易光伏电站标杆上网电价为0.1元/kWh。根据国家发改委关于《完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》等相关文件确定,羊易电站的补贴价格为0.8元/kWh。

4.2.2 发电收入

上网电量考虑:磷酸铁锂储能电池充放电深度取90%;系统放电效率为87%;电池每年按照1.6%的速度衰减。根据光伏电站设备及送出线路检修历史情况,储能电站有效充电时间按350天考虑,则首年充放电一次的上网电量为2 696.65 MWh。按此计算上网电量如表4所示。

表4 上网电量

年份	2023	2024	2025	2026	...
可用百分比/%	98.4	96.8	95.3	93.8	...
上网电量/MWh	2 696.65	2 653.51	2 611.05	2 569.27	...

在计算期内,发电利润总额为299.51万元。

4.2.3 税金

根据国家税收政策,电力项目缴纳的税金包括增值税、销售税金附加和所得税。电力产品增值税

税率为13.00%,经计算,该项目固定资产可抵扣的增值税额约为165.28万元。销售税金附加包括城市维护建设税和教育费附加(含国家和地方教育费附加),以增值税税额为基础计征,税率分别取5.00%和5.00%。所得税按照9.00%的税率征收。

4.2.4 发电利润

税后利润提取10.0%的法定盈余公积金,剩余部分为可分配利润,再扣除分配给投资者的应付利润,即为未分配利润。在计算期内,利润总额为299.51万元,税后利润为271.63万元。

4.3 评价结果

通过对羊易光伏电站配置储能前后电站收益率进行测算,该电站配置储能投资财务内部收益率为3.75%,资本金财务内部收益率为9.48%,投资回收期为10.47年。资本金财务内部收益率(9.48%)不低于资本金基准收益率(8%)。因此,财务评价为可行,通过配置储能能够有效提高电站的收益率,同时减少由于消纳限制而引起的弃电。

5 结 论

结合海拔4700 m的西藏当雄10 MW羊易光伏电站配套储能项目,研究了高海拔电池储能系统的设计方法,提出了储能变流器的高海拔修正策略和降容选型原则,并对该项目储能系统的经济性进行了分析评价,主要结论如下:

1) 西藏当雄10 MW羊易光伏电站配套储能项目,设计采用单个2 MW/10 MWh储能单元。储能变流器采用强迫风冷散热,变流器ABC三相模组的散热器表面温升最大为42 K,满足小于45 K的设计要求。电池舱采用空调散热,通过风管导热确保舱内气流组织合理,保证电池模组温升均匀一致。储能系统设计在满足工作环境使用需求的基础上留有余量。

2) 控制系统中配置储能监控系统和储能协调控制器对储能设备进行监视和自动功率控制,同时完成多PCS功率分配,实现储能全站的监视控制、能量管理,并实现与新能源厂站监控系统及调度集控等信息交互。

3) 对该项目的经济性进行分析评价可得,电站在不考虑储能配置的情况下资本金财务内部收益率为12.19%,配置储能后资本金财务内部收益率为

17.31%。所提出的配置储能方法能够有效提高电站的收益率,同时减少由于消纳限制而引起的弃电。

参考文献

[1] 孙雯雯,徐玉杰,丁捷,等.高原高寒地区可再生能源与储能集成供能系统研究[J].储能科学与技术,2019,8(4):678-688.

[2] 赵斌,呼如威,蒋东方,等.高寒高海拔地区微网储能锂电池系统优化设计[J].中国电力,2020,53(5):128-134.

[3] 杨凌帆,刘倩,张雨金,等.基于光伏发电影响因素分析的集成建模及预测应用[J].中国计量大学学报,2019,30(2):158-165.

[4] 陈刚,袁越,傅质馨.储能电池平抑光伏发电波动的应用[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):27-31.

[5] JIN-XIN L I, ZHANG J C, ZHOU Y. Energy Management Strategy of wind-PV-ES Hybrid Power System[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11):2026-2029.

[6] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,48(7):19-25.

[7] 赵斌,谭恒,梁告,等.高原高寒地区局部阴影下光伏阵列输出功率提升实验研究[J].中国电力,2021,54(8):199-208.

[8] EDIFOMN A-O I, EDWIN N I, MACAULAY E U. Comparative analysis of the performance of different photovoltaic (PV) technologies based on PVSyst thermal model [J]. Science Journal of Energy Engineering, 2016,4(6):62-67.

[9] EKE R, BETTS T R, GOTTSCHALGR. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,69:429-434.

[10] LI L Y, LIU P, LI Z, et al. A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems [J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 115: 213-225.

[11] 彭伟,郑连清,郑天文.分布式光伏储能系统的优化

配置方法[J].四川电力技术,2022,45(1):45-49.

[12] 王超,胡浩,郑炼,等.基于智慧蓄电池的光伏储能系统及其控制策略[J].可再生能源,2022,40(4):506-512.

[13] 钟倩文,孙以泽,陈玉洁,等.基于图形逻辑分析的光伏储能系统能量管理方法[J].太阳能学报,2020,41(3):291-297.

[14] 吴边.光伏储能系统的电池容量配置研究[J].科学与信息化.,2022,1(7):136.

[15] 曾国宏,潘一飞,吴学智.新型分布式光伏-储能系统设计及控制策略的研究[J].电源学报,2020,18(4):144-150.

[16] 冯晓丽.光伏储能电站的经济性分析[J].电工电能新技术,2019,38(9):52-58.

[17] 田玉婷,魏巍,孙昕炜,等.考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统技术经济研究[J].四川电力技术,2022,45(5):1-5.

[18] 中国电子技术标准化研究所.测量、控制和实验用电气设备的安全要求 第 1 部分:通用要求:GB 4793.1—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

[19] 全国低压电器标准化技术委员会.低压系统内设备的绝缘配合:第 1 部分:原理、要求和试验.GB/T 16935.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[20] 马伟,王玮,吴学智,等.光储协调互补平抑功率波动策略及经济性分析[J].电网技术,2018,42(3):730-737.

[21] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等.风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):88-97.

作者简介:

粟刚(1975),男,工程师、高级人力资源师,研究方向为光伏发电并网与消纳;

李科峰(1982),男,高级工程师,研究方向为新能源并网;

王辉(1976),男,工程师,研究方向为新能源并网;

郎春雷(1980),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源并网。

(收稿日期:2022-11-23)

欢迎投稿

欢迎订阅

水风光互补系统碳电打捆交易技术及 闭环回购策略

陈雪,李健华,武云霞,付浩

(西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:文中提出了一种发电企业碳电打捆交易技术及闭环回购策略,并提出了发电企业与用户之间通过签订“中长期电量+附加CCER(国家核证自愿减排量)”的合约交易模式,形成发电企业与用户之间的碳电打捆交易与闭环回购模式。同时,计入电力现货市场和碳市场,发电企业和用户均可以在碳电市场中出售电力或CCER提升其经济性。进一步以水风光互补系统为例,建立了一体化电站碳电市场交易效益评估模型和用户成本评估模型。最后,通过算例仿真,分析了水风光互补系统中长期市场和现货市场下的碳电综合效益,并评估了该碳电交易模式下的用户侧经济性成本。所提方法可以在增加发电企业综合收益、降低用户成本的同时,推动可再生能源消纳,促进电力市场与碳市场的协同发展。

关键词:电力市场;碳市场;国家核证自愿减排量(CCER);交易技术;水风光互补系统

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0035-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230306

Carbon Electricity Bundled Transaction Technology and Close-loop Buyback Strategy for Hydro-Wind-Solar Complementary System

CHEN Xue, LI Jianhua, WU Yunxia, FU Hao

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: A carbon electricity bundled transaction technology and closed-loop buyback strategy for power generation enterprises are put forward. The contract transaction mode of "medium and long-term electricity quantity + additional CCER (Chinese certified emission reduction)" between power generation enterprises and users is proposed, and the carbon electricity bundled transaction and closed-loop buyback mode between power generation enterprises and users have been formed. At the same time, taking into account the electricity spot market and carbon market, both power generation enterprises and users can sell electricity or CCER in carbon electricity market to improve their economy. Taking the hydro-wind-solar complementary system for example, the trading benefit evaluation model and user cost evaluation model of carbon electricity market for integrated power stations are established. Finally, the comprehensive carbon and electricity benefits of hydro-wind-solar complementary system in middle and long-term market and spot market are analyzed through an example simulation, and the economic cost of user side under the proposed carbon electricity transaction mode is evaluated. The proposed method can not only increase the comprehensive income of power generation enterprises and reduce the cost of users, but also promote the absorption of clean energy and the coordinated development of electricity market and carbon market.

Key words: electricity market; carbon market; CCER; transaction technology; hydro-wind-solar complementary system

0 引言

中国碳市场在2011年开始建立试点工作,并在

2020年“碳达峰”“碳中和”目标提出后发展逐渐迅速。全国碳排放权交易市场于2021年在上海正式开始,标志着中国碳市场自由试点逐渐向全国推广。在中国的各行业中,电力行业碳排放量约占全国的

40%^[1]。近年来电力消费增长迅速,目前全国碳交易市场仅将电力行业纳入^[2],火电机组主要参与碳配额交易,水电、风电、光伏等可再生能源则可以通过申请自愿减排抵消项目。通过国家核证自愿减排量(Chinese certified emission reduction, CCER)开展碳市场交易增加收益,因此,进行碳电市场交易的研究对于推动碳市场和电力市场发展有重要意义。

目前中国关于碳交易市场的研究尚处于起步阶段,主要是从影响因素、相关政策分析以及交易机制等方面开展。文献[3]介绍了自愿减排抵消项目的基本概念和评价标准,并针对中国碳市场纳入自愿减排抵消项目提出了建议。文献[4]主要分析了中国碳交易政策以及碳配额实行机制对碳市场交易的影响,得出了碳交易政策对碳市场发展初期影响较大的结论。文献[5]对中国“双碳”战略目标以及中国碳市场的建设发展情况、交易体系、业务体系等进行分析,并提出了完善全国碳排放权交易体系的政策建议。文献[6]研究了碳交易市场与电力市场的相互影响,提出了两个市场协同运作的具体流程,通过算例验证了所提模式有助于促进“双碳”目标实现。文献[7]建立了包含电化学储能、电动汽车、可再生能源以及燃机在内的虚拟电厂模型,并依据碳电市场典型特征建立了虚拟电厂碳电交易模型。文献[8]在计及碳电市场交易价格的不确定性下,建立了风电场投资模型,在算例分析中计算讨论了碳电交易价格对风电场投资收益的影响。

然而,上述研究仅针对碳电市场中的单一主体进行了分析,例如虚拟电厂、可再生能源电厂,未对碳电市场交易双方的互相作用进行研究,也较少涉及碳市场和电力市场耦合机理。根据当前的市场规则,风电、光伏不可同时参与绿证和 CCER 交易。现在的绿电交易由电力交易中心负责,包括了电力+绿证,绿电交易过程中绿证将随着绿电的交易划转至用户;绿证交易则是由国家可再生能源中心负责管理的。在绿电、绿证与 CCER 交易的选择方面,用户需要分别计算参与 CCER 与绿电、绿证交易的效益,从而抉择相应的市场进行交易。

下面主要分析了风电、光伏在参与 CCER 交易与电力市场交易的策略问题,提出了一种水风光互补系统碳电打捆交易技术及闭环回购策略;简述了温室气体自愿减排项目;介绍了水风光等碳市场和电力市场的参与规则与现状问题;提出了发电企业

“中长期电量+CCER”捆绑合约交易模式与现货市场售电和碳市场交易方法;进一步地建立了发电企业碳电市场交易效益评估模型和用户购电成本模型,并建立了发电侧和用电侧的碳电市场交易方式。最后,通过算例仿真分析了水风光互补系统中长期市场和现货市场下的碳电综合效益,并评估了该碳电交易模式下的用户侧经济性成本。所提方法可以在增加水风光等发电企业综合收益、降低用户成本的同时,促进可再生能源电力消纳,推动电力市场与碳市场的交叉融合。

1 温室气体自愿减排项目

1.1 CCER 基本概念

当前阶段,强制减排市场和自愿减排市场是碳交易市场的主要组成部分,主要包括碳排放权配额交易和项目减排量交易两种交易类型。温室气体自愿减排过程,一般是可再生能源或节能企业等温室气体自愿减排项目业主通过开发建设节能减排项目来替代传统项目,从而产生二氧化碳排放减少量的过程。中国温室气体自愿减排项目产生的减排量被称为“中国核证自愿减排量”(CCER),简称为 CCER 项目^[9]。

1.2 交易现状

CCER 项目是全国碳排放权交易下的配额市场的抵消机制,经温室气体自愿减排项目业主申请,由经过备案的专业核查机构根据自愿减排开发方法学进行计算并核定备案后,进入碳市场交易,具有碳排放需求的相关个人和企业可以购买^[10]。目前各个碳交易市场针对 CCER 的抵消能力进行了规定,例如 1 个 CCER 被认为能够抵消 1 t 二氧化碳当量,CCER 的抵消比例和条件在各个市场中存在一定差异,但基本在 10% 以内。

CCER 交易不仅可以为碳配额交易提供补充支撑,还有助于实现统一的碳市场,有效提高碳市场交易活跃度。因此,CCER 交易将在建设全国碳市场、完善碳资产管理中起到重要作用。虽然目前大多试点碳市场对于 CCER 抵消碳配额设定了约束,但是 CCER 仍然可以在全国试点碳市场流通。

1.3 CCER 交易存在的问题

目前 CCER 交易过程中的主要问题是 CCER 价值在不同市场中的分化以及交易不透明。由于不同

试点碳市场对可以用于抵消碳配额的 CCER 所设条件不同,因此 CCER 在不同市场价格不同。例如,可用于履约的 CCER 价格明显高于不能用于履约的 CCER 价格。此外,中国目前各个独立 CCER 交易平台的交易规则和所属地区不同,CCER 交易价格因此不同,加剧了 CCER 价值分化。

2 可再生能源中长期市场交易

2.1 可再生能源中长期市场交易现状

随着中国电力市场改革持续推进,全国电力市场的交易规模快速扩大。其中中长期市场交易占据较大比例,2022 年全国电力市场中长期电力直接交易电量合计为 5 254 340 GWh,占全社会用电量近 60.8%。此外,电力系统中风电和光伏比例迅速扩大,截至 2022 年 12 月,风电、光伏累计装机规模分别达到 370 GW、390 GW。

大规模风光的接入使电网消纳困难,各地出现大量弃风弃光,造成大量经济损失。风光等发电企业在当前形势下为了获得更多上网电量,不得不开始参与电力市场交易。然而,由于风电和光伏波动性与不确定性,导致风光等发电企业参与市场时投标出力与实际出力可能出现较大偏差,极大削弱了风电和光伏参与市场的竞争力。在电力现货市场中,实时市场价格波动较大,而中长期交易将起到稳定市场价格的关键作用^[11]。

目前多个地区开展了可再生能源市场化交易,其中主要为中长期交易,在总交易电量中超过 97%,交易类型主要是大用户直供交易及跨省跨区外送交易。

2.2 可再生能源中长期市场交易存在的问题

1) 可再生能源难以保证全额收购

首先,目前仍存在一些区域可再生能源保证利用小时数难以达到规定数额;另外,电力现货市场建设的全面加速,将会对可再生能源非交易区域存量项目的全额保障性收购带来不确定的降价冲击,从而将进一步挤压可再生能源企业的盈利空间。

2) 可再生能源市场交易竞争激烈

由于目前普遍认为可再生能源发电成本较低,在电力市场交易中,只能以较低价格参与交易^[12];大用户直供交易中可再生能源价格通常低于火电,交易价格并未考虑可再生能源发电区别于火电的绿

色价值,省内现货市场的启动会加剧可再生能源交易价格的不确定性,造成可再生能源发电企业经营风险增大。

2.3 可再生能源参与碳电交易

可再生能源在参与电力市场交易产生电量效益的同时,产生的 CCER 也可以作为其附加产品通过碳市场进行交易来产生附加效益。CCER 项目中可再生能源类项目(主要以风电、水电、光伏为主)占最大比例,达到约 66.76%^[13],说明风电、光伏和水电等可再生能源项目的开发最受 CCER 项目业主企业青睐。CCER 是可再生能源对碳减排贡献的量化,二氧化碳减排量主要根据电力及减排因子计算,减排因子具体数值在不同地区存在差异。目前,中国电网分为 6 个区域,根据每个区域总碳排放量和总发电量得出相应减排因子,该数值随地区碳排放量和发电量波动。二氧化碳排放因子的具体计算公式为

$$E = 75\%E_{OM} + 25\%E_{BM} \quad (1)$$

式中: E 为二氧化碳排放因子; E_{OM} 为电量边际排放因子; E_{BM} 为容量边际排放因子。2019 年度区域电网基准线排放因子如表 1 所示。

表 1 2019 年度区域电网基准线排放因子

电网名称	$E_{OM}/(t \cdot (MWh)^{-1})$	$E_{BM}/(t \cdot (MWh)^{-1})$	$E/(t \cdot (MWh)^{-1})$
华北电网	0.941 9	0.481 9	0.826 9
东北电网	1.082 6	0.239 9	0.871 9
华东电网	0.792 1	0.387 0	0.690 8
华中电网	0.858 7	0.285 4	0.715 4
西北电网	0.892 2	0.440 7	0.779 3
南方电网	0.804 2	0.213 5	0.656 5

目前可再生能源参与碳电市场基本可以分为以下两种方式:

1) 中长期市场交易

该部分电能产生的 CCER 作为附加交易,即通过“中长期电量电价+CCER 附加值”的形式确定中长期合同价格;通过与电能用户签订协议,实现电量和 CCER 的转移,产生碳电效益。

2) 现货市场交易

现货交易电量通过现货市场进行结算,该部分现货电能产生的 CCER 通过碳市场进行竞价出清,实现电量和 CCER 的转移,产生碳电效益。

对于第一种碳电交易方式,将电能与 CCER 捆绑销售,可再生能源发电企业可以同时获得电能收益和 CCER 收益,减少了交易次数,提高了交易效

率;用户则可以较为优惠的价格购入电能和 CCER,满足自身电能需求以及抵消碳配额指标。但是在交易中出现竞争方时,原交易双方可能难以达成长期合作。对于第二种碳电交易方式,将电能与 CCER 单独交易,受市场价格波动影响较大,难以保障可再生能源企业效益,同时会影响用户对可再生能源的消纳率。

因此,为提高可再生能源消纳率,减少弃风、弃光、弃水等现象,提出了一种可以充分体现可再生能源绿色价值以及有效促进用户消纳可再生能源的交易方式。

3 可再生能源碳电闭环交易

3.1 碳电市场交易技术

下面提出一种以电能为核心的碳电市场闭环交易模式,大用户与风电、光伏、水电等可再生能源发电企业签订中长期电能合同时,拟定“中长期电量+CCER”的合同形式。将所购电能产生的 CCER 作为附加交易,大用户再次与可再生能源发电企业签订合同购买电能时,可以通过用户已购买的 CCER 抵扣部分购电费用,具体比例可由双方协商得到。

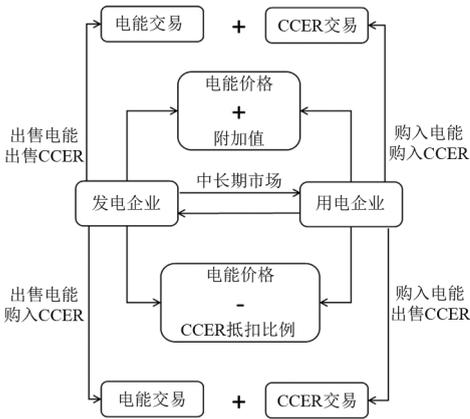


图 1 碳电闭环交易模式

大用户再次购电时可通过已有的 CCER 抵扣部分费用,即是发电企业回购用户的 CCER,形成发电企业与用户之间 CCER 的闭环交易模式,有助于促进可再生能源消纳,同时促成可再生能源供需双方交易,实现互利共赢。发电企业与用户之间的具体交易模式如图 1 所示。发电企业与大用户之间 CCER 附加值以及后续交易的抵扣比例由双方商议决定,同时可以规避碳市场交易价格波动对双方经济效益的影响。

3.2 碳电市场交易效益评估模型

考虑水风光一体化电站同时参与电力市场和碳市场交易,可以同时从上述市场中获取效益。中长期市场,一体化电站与用户之间采用“中长期电量+CCER”的中长期交易模式;现货市场,一体化电站将剩余的电力和 CCER 分别在现货市场和碳市场中出售,用户则通过现货市场满足实时负荷需求,同时剩余的 CCER 可以在碳市场进行出售。

3.2.1 水风光一体化电站效益

水风光一体化电站收益主要包括售电收益和 CCER 收益,可表示为

$$\max R = R_{\text{ccer}} + R_{\text{power}} \quad (2)$$

式中: R 为发电企业总收益; R_{ccer} 为通过出售 CCER 获得的收益; R_{power} 为售电获得的收益。

$$R_{\text{power}} = \lambda_{M,t} \sum_{t=1}^T P_{M,t} + \lambda_{R,t} \sum_{t=1}^T P_{R,t} \quad (3)$$

式中: $P_{M,t}$ 为 t 时段中长期市场的售电量; $P_{R,t}$ 为 t 时段现货市场的售电量; $\lambda_{M,t}$ 、 $\lambda_{R,t}$ 分别为 t 时段中长期市场和现货市场电价。

$$R_{\text{ccer}} = \lambda_{\text{ccer},M} E \sum_{t=1}^T P_{M,t} + \lambda_{\text{ccer},t} E \sum_{t=1}^T P_{R,t} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{\text{ccer},M}$ 为约定的 CCER 价格; $\lambda_{\text{ccer},t}$ 为碳市场的 CCER 价格。表示光伏、水电和风电 CCER 的价格为

$$P_t = P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{wind}} + P_t^{\text{hydro}} \quad (5)$$

$$P_t = P_{M,t} + P_{R,t}$$

式中: P_t 为水风光发电系统在 t 时段的总出力; P_t^{PV} 、 P_t^{wind} 、 P_t^{hydro} 分别为光伏、风电和水电在 t 时段的出力。

3.2.2 用户成本效益模型

用户的成本主要为中长期合约成本与现货市场成本之和减去 CCER 的效益。

$$C_n = \lambda_{M,t} \sum_{t=1}^T P_{M,t}^{\text{load}} + \lambda_{R,t} \sum_{t=1}^T P_{R,t}^{\text{load}} - \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{ccer},M} Q_{\text{ccer},M}^n - \lambda_{\text{ccer},t} Q_{\text{ccer},t}^n$$

$$Q_{\text{ccer}}^{n-1} = E \times \sum_{t=1}^T P_{M,t}^{n-1} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{ccer},M}^n + Q_{\text{ccer},t}^n = Q_{\text{ccer}}^{n-1} \\ Q_{\text{ccer},M}^n \leq E \sum_{t=1}^T P_{M,t}^{\text{load}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_n 为用户第 n 次的总购电成本; $P_{M,t}^{\text{load}}$ 、 $P_{R,t}^{\text{load}}$ 分别为 t 时段用户中长期市场和现货市场的电量; $\lambda_{\text{ccer},M}$ 为在签订中长期合同购电时,通过 CCER 抵扣

电费的 CCER 价格; $\lambda_{ccer,t}$ 为 t 时段用户在碳市场出售 CCER 的价格; Q_{ccer}^{n-1} 为 $n-1$ 次中长期购电获得的 CCER 量; $Q_{ccer,t}^n$ 、 $Q_{ccer,M}^n$ 分别为第 n 次的现货市场和 中长期市场出售量。

4 算例仿真

4.1 基础数据

选取了水风光一体化互补电站开展分析,且考虑一体化电站可以参与电力市场交易,同时均是通过了 CCER 项目开发认定。即上述电源企业可以通过电力交易和 CCER 交易两种方式获取效益。本算例中的风电、光伏和水电站典型出力曲线如图 2 所示,现货市场价格如表 2 所示。此处选取华中区域电网二氧化碳排放因子为 0.7154 t/MWh ,CCER 单价按 $20\sim 70 \text{ 元/t}$ 考虑。根据上述基础,测算了发电企业和用户在该碳电市场交易模式下的经济效益。

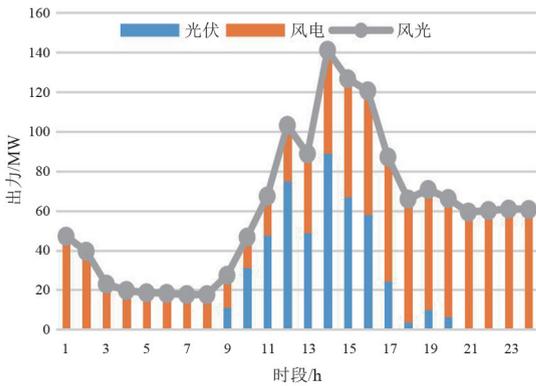


图 2 风光出力曲线

表 2 现货市场电价

时段/h	现货电价/ (元·(MWh) ⁻¹)	时段/h	现货电价/ (元·(MWh) ⁻¹)
1	528	13	387
2	501	14	429
3	504	15	479
4	481	16	441
5	435	17	456
6	396	18	405
7	409	19	386
8	395	20	419
9	519	21	415
10	464	22	418
11	414	23	422
12	417	24	466

4.2 结果分析

4.2.1 水风光互补电站市场收益

基于风光出力基础数据,所提算例中考虑风光全额消纳,即在风光出力的基础上优化水电出力,实现水风光一体化参与电力市场交易。考虑现货价格

与中长期合约电量需求,求得的水风光一体化出力曲线如图 3 所示。

水风光一体化电站在中长期市场和现货市场中售电获得利润。中长期市场阶段与用户侧签订中长期物理合约,在满足中长期合约的基础上,富余的电量参加现货市场竞价。图 4 为水风光一体化电站的中长期分解曲线和现货交易曲线。发电企业中长期合约电价按 320 元/MWh ,其中长期售电收益为 53.76 万元 ,现货售电收益为 86.6466 万元 ,售电总收益为 140.4066 万元 。



图 3 水风光出力曲线

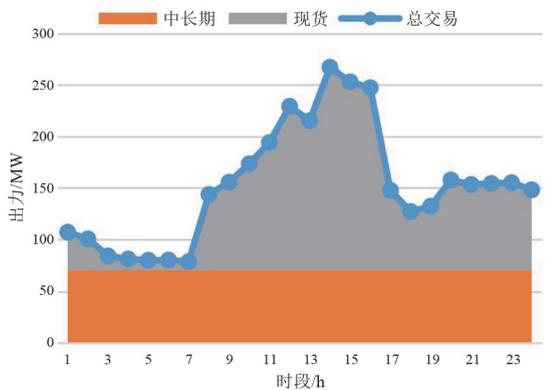


图 4 发电企业市场交易曲线

在中长期市场中,由于发电企业与用户之间直接签订物理合约,双方直接通过合同约定进行结算,故该部分电量的买卖双方较为明确。风光水一体化电站在生产电力的同时会产生相应的 CCER。一部分 CCER 可以通过与中长期合约电量的捆绑方式直接与用户交易;另一部分是现货电量产生的 CCER,该部分 CCER 则可以在碳市场中出售获得收益。CCER 与用户的合约出售量和碳交易市场的出售量及相应的收益如表 3 所示。

4.2.2 用户成本分析

用户根据其负荷需求,通过中长期市场和现货市场两种方式进行购电,可以实现降低用电成本和

表 3 发电企业 CCER 收益

碳市场 交易量/t	合约收益/元	市场交易 收益/元	总收益/元
1420	33 652	49 718	83 370

规避偏差的目标,各部分购电量如图 5 所示。同时,中长期合同约定了中长期电量及发电企业该部分的 CCER 通过打捆的方式从发电企业购得。中长期电量和 CCER 成本通过中长期合约共同约定,剩余负荷需求则在现货市场中购买,该部分则不存在电量与 CCER 的打捆交易。



图 5 用户市场交易曲线

从表 4 可以看出用户的购电成本主要来自中长期购电和现货购电两部分。在中长期购电成本中,用户可以获得电量以及相应的 CCER 量 1022 t。用户作为该部分 CCER 的所有者,可以将该部分 CCER 通过两种方式进行使用,一方面可以在下次与发电用户签订中长期电量合约的时候抵扣部分供电费用;另一方面可以通过碳市场交易的方式进行出售。如表 5 所示,用户将中长期购电所得的 CCER 分为两部分,一部分为中长期购电费用抵扣模式;另一部分通过碳市场交易进行出售获得利润。

表 4 用户购电成本

中长期 成本/元	中长期 CCER/t	现货成本/元	总成本/元
537 600	1022	82 923	620 523

表 5 用户 CCER 收益

CCER 总量/t	中长期 CCER 量/t	市场 交易量/t	合约 收益/元	市场交易 收益/元	总收益 /元
1202	1022	180	28 604	6309	34 914

5 结 论

碳电打捆交易技术及闭环回购策略对发电企业和电力用户是两者双赢的模式。发电企业可以通过

中长期碳电打捆的合约方式提升对用户的吸引力,获取相应的 CCER 利润;并结合相应的 CCER 回购策略,进一步实现对用户的捆绑交易,实现发电企业与用户的双赢。用户侧通过中长期购电获取相应的 CCER 资源,一方面可以利用该部分 CCER 获取效益;另一方面用户可以推动可再生能源利用率,为全社会二氧化碳减排做出贡献。

参考文献

- [1] 陈丽霞,周云,方陈,等.考虑碳交易的发电商和电力用户竞价博弈[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(10):66-72.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.全国碳排放交易市场建设方案(发电企业)[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2017.
- [3] 潘晓滨.碳排放交易中的自愿减排抵消机制[J].资源节约与环保,2018(9):117-118.
- [4] LUO W,ZHANG Y R,GAO Y L,et al.Life cycle carbon cost of buildings under carbon trading and carbon tax system in China[J].Sustainable Cities and Society,2020,66:102509.
- [5] 曾维翰.“双碳”背景下完善中国碳排放权交易体系研究[J].福建金融,2021(11):60-70.
- [6] 吉斌,孙绘,梁肖,等.面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J].2021,43(6):33-40.
- [7] 贾德香,柳占杰,高骞,等.计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):89-97.
- [8] 王喜平,李崇焯.碳交易机制下风电项目投资决策研究[J].电力科学与工程,2018,34(7):25-31.
- [9] 俞薇.中国温室气体自愿减排机制运行效果影响因素研究[D].武汉:中南财经政法大学,2019.
- [10] 赵金兰,王灵秀,刘骁,等.中国自愿减排项目的发展与问题探讨[J].能源与节能,2018(5):54-56.
- [11] 许爽,和军梁,米晨旭,等.电力现货市场背景下的可再生能源中长期交易分析[J].太阳能,2020(10):19-25.
- [12] 张蓉.解读可再生能源发电市场化交易[J].中国电力企业管理,2019(10):58-60.
- [13] 刘庆强,姜冬梅,陈磊山,等.中国与印度 CDM 开发现状比较研究[J].四川环境,2007(6):96-100.

作者简介:

陈雪(1997),女,硕士研究生,研究方向为电力系统经济性分析及电力市场;

李健华(1994),男,硕士研究生,研究方向为电力市场、电力系统优化调度。

(收稿日期:2022-09-18)

考虑振动区和水-电耦合的现货市场出清模型

熊志杰¹, 王彦泮¹, 张大伟¹, 张勤勤², 邓志森¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司
天府新区供电公司, 四川 成都 610218)

摘要: 梯级水电站优化调度模型具有振动区、带时滞、非线性等特点, 其市场出清问题需要增加更多离散变量数; 同时, 电力市场中水力和电力存在复杂的耦合约束, 使得计算时间显著增加, 难以满足实际生产需求。首先, 对电力现货市场水-电耦合产生的物理制约进行联动分析, 建立了考虑水-电耦合约束的出清模型; 然后, 针对水-电耦合约束中振动区的大量离散变量, 基于电厂的流域关系和隶属关系, 将振动区相关变量和约束进行压缩; 最后, 基于实际电网数据开展了算例分析。结果表明, 所提现货市场出清模型和变量降维方法可以有效减少含梯级水电的市场出清时间, 满足电力现货市场的实际运行需求。

关键词: 梯级水电; 市场出清; 变量降维; 振动区

中图分类号: TM 734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0041-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230307

Spot Market Clearing Model Considering Cascaded Hydropower Vibration Area and Hydroower Coupling Constraints

XIONG Zhijie¹, WANG Yanfeng¹, ZHANG Dawei¹, ZHANG Qinjin², DENG Zhisen¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid
Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610218, Sichuan, China)

Abstract: The market clearing problem needs to add more discrete variables due to the characteristics of optimal dispatch model of cascaded hydropower station with vibration area, time delay and nonlinearity. At the same time, the hydraulic and power coupling constraints are complex, which makes the calculation time significantly increased so as to difficultly meet the actual requirements. Firstly, a market clearing model considering hydropower coupling constraints is formulated. Secondly, for a large number of discrete variables of vibration area in hydropower coupling constraints, and based on the basin relationship and membership relationship of power plants, the variables and constraints related to the vibration area are compressed. Finally, based on the actual power grid data, an example analysis is carried out, and the results show that the proposed spot market clearing model and variable dimension reduction method can effectively reduce the market clearing time, and meet the actual operation demand of spot market.

Key words: cascaded hydropower station; market clearing; variable dimension reduction; vibration area

0 引言

随着电力体制改革的不断推进, 水电富集的四川省被选为电力现货市场试点单位之一。与一般的发电机组不同, 梯级水电出力受到了上下游时滞、振动区带来的物理制约。相对于火电机组, 模型的变

量和约束之间有更为复杂的耦合关系。在以梯级水电为主体的电力市场中, 多类型变量和耦合约束的数目比火电为主的电力市场显著增加, 给市场出清的计算时效性带来了更大挑战^[1-4]。

目前水电调度计划优化已有一些研究文献, 主要采用运筹算法和智能算法。传统方法方面: 文献[5-6]基于动态规划对梯级水电优化调度问题进

行求解;文献[7-8]采用了正交离散微分动态规划、分层优化等方法对水电调度动态规划算法进行了改进。此外,智能算法也在梯级水电调度优化中有所应用,文献[9]通过自适应混合粒子群算法,提高了粒子群的寻优速度;文献[10]提出了基于布谷鸟算法的水电优化调度模型。但以上研究较少地考虑多水库和振动区的影响,含梯级水电的市场在考虑振动区的建模后,存在高维度和变量多的问题,需要对模型降维方法进行研究以提高计算速度。

因此,针对梯级流域水-电耦合难题,分析影响单水库、多水库的水平衡因素,如区间来水、上下游时滞等,构建电力市场环境下的流域水-电耦合平衡模型;然后,针对振动区约束,进行变量优化和降维,提高模型效率;最后,以四川实际运行数据为例,验证所提模型的适用性。

1 电力现货市场出清模型

电力现货市场出清模型以购电成本最小化为约束目标,目标函数如式(1)所示。

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t}(P_{i,t})] + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T M[S_l^+ + S_l^-] \quad (1)$$

式中: N 为机组总数; T 为总时段; $P_{i,t}$ 为机组 i 在时刻 t 的出力; $C_{i,t}(P_{i,t})$ 为机组 i 在时刻 t 的购电费用函数; L 为支路和断面总数; M 为电网安全约束惩罚系数; S_l^+ 、 S_l^- 为支路或断面 l 的松弛量。

电力现货市场还考虑系统平衡、机组出力限值、备用等常规约束,而含有梯级水电的电力现货市场出清还需要考虑水电机组的振动区约束和水-电耦合约束。

2 水-电平衡约束构建

基于水情、流域关系等构建流域上下游水拓扑结构,然后分析影响单水库、多水库间的水平衡因素,如区间来水预测、时滞、水库蓄水量和出/入库水量等,考虑水电振动区约束,构建电力市场环境下的水-电-价三维联动模型。

2.1 水电振动区约束

通常将水轮机的工作区间划分为稳定运行区、许可运行区和禁止运行区(禁止运行区也称为振动

区)。一般情况下,水轮机应尽量运行于稳定运行区,以提高水电机组寿命。由此,考虑水电机组不能在振动区运行的约束,如式(2)所示。

$$P_{i,t} \in \begin{cases} [P_{i,l1}, P_{i,h1}] \\ [P_{i,l2}, P_{i,h2}] \\ \vdots \\ [P_{i,lk}, P_{i,hk}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}$ 为水电机组 i 的出力; $P_{i,lk}$ 、 $P_{i,hk}$ 分别为水电机组 i 允许运行区的第 k 个出力区间的功率下限和上限。

2.2 单水库水平衡模型

根据水库间的关系,可以分为单水库和多水库,据此分别构建单水库模型和多水库模型。

对于单水库而言,考虑水库水量平衡约束、水拓扑关系、水力-电力关系等,构建单水库水平衡模型。

1) 水库水量平衡关系

各个时段的水库蓄水量与上时段的水库蓄水量、本时段的区间来水预测量、本时段发电用水量、本时段水库下泄水量的关系如式(3)所示。

$$w_{s,t} = w_{s,t-1} + w_{f,t} - w_{u,t} - w_{v,t} \quad (3)$$

式中: $w_{s,t}$ 为水库 t 时刻的蓄水量; $w_{s,t-1}$ 为水库上一时刻($t-1$)时的蓄水量; $w_{f,t}$ 为水库 t 时刻的区间来水预测量; $w_{u,t}$ 为水库 t 时刻的发电用水量; $w_{v,t}$ 为水库 t 时刻的下泄水量。

2) 水拓扑关系

各个时刻的水库入库水量仅为区间来水预测量。

$$w_{in,t} = w_{f,t} \quad (4)$$

式中, $w_{in,t}$ 为水库 t 时刻的入库水量。

各个时刻的水库出库水量由本时段发电用水量、本时段水库下泄水量决定。

$$w_{out,t} = w_{u,t} + w_{v,t} \quad (5)$$

式中, $w_{out,t}$ 为水库 t 时刻的出库水量。

3) 水力-电力关系

各个时刻的发电用水量是发电功率与该时刻耗水率的乘积,用公式描述为

$$w_{u,t} = P_t \times \eta_t \quad (6)$$

式中: P_t 为水库 t 时刻的发电功率; η_t 为水库 t 时刻的耗水率。耗水率与水库水量为非线性关系,具体建模过程中使用分段线性化,以此来逼近阶梯水库的水量和电力之间的复杂非线性关系。

2.3 多水库水平衡模型

对多水库而言,除考虑水库水量平衡约束、水拓扑关系、水力-电力关系等外,还要考虑上下游间时滞对入库水量、出库水量的影响,构建多水库水平衡模型。

针对任意水库,其入库流量由区间来水预测水量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)和上游电站下泄水量(考虑时滞因素)组成;出库流量包括本库发电用水量和本库下泄水量;各时段蓄水量=上时段蓄水量+区间来水预测水量+上游电站发电用水量(考虑时滞因素)+上游电站下泄水量(考虑时滞因素)-本库发电用水量-本库下泄水量。出清过程中满足各水库出库水量(发电用水量-下泄水量)大于等于生态用水量。

1) 水库水量平衡关系

各个时段的水库蓄水量与上时段的水库蓄水量、本时段的区间来水预测量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)、本时段发电用水量、本时段水库下泄水量、上游电站下泄水量(考虑时滞因素)的关系如式(7)所示。

$$w_{s,t} = w_{s,t-1} + w_{f,t} + w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} - w_{u,t} - w_{v,t} \quad (7)$$

式中: $w_{u,up,t-m}$ 为上游水库经过时滞 m 时刻后到达本水库的发电用水量; $w_{v,up,t-m}$ 为上游水库经过时滞 m 时刻后到达本水库的下泄水量。

2) 水拓扑关系

各个时刻的水库入库水量由区间来水预测量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)、上游电站下泄水量(考虑时滞因素)共同决定。

$$w_{in,t} = w_{f,t} + w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} \quad (8)$$

各个时刻的水库出库水量由本时段发电用水量、本时段水库下泄水量决定。

$$w_{out,t} = w_{u,t} + w_{v,t} \quad (9)$$

3) 流域时滞关系

下游水库的时滞入库水量为当前时刻往前推 m 时滞时刻所对应的上游出库水量。

$$w_{m,t} = w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} \quad (10)$$

式中, $w_{m,t}$ 为下游水库 t 时刻的时滞入库水量。

4) 水力-电力关系

各个时刻的发电用水量同样用式(6)描述,由于耗水率与水库水量为非线性关系,此处将其转化为分段线性表达。

2.4 水-电-价三维联动模型

水-电-价三维联动模型是根据水库发电用水量、机组出力及机组出力价格之间的联动关系建立的模型。

1) 电平衡模型为机组出力与电力现货市场中标电力相等,即

$$\sum P_t = D_t \quad (11)$$

式中, D_t 为时段 t 的系统负荷。

2) 价格平衡模型为机组出力分段区间及每个分段区间对应的机组出力价格的集合。由此可知,市场出清的目标函数为

$$\min \sum_t \sum_w F(P_t) \quad (12)$$

式中: $F(P_t)$ 为机组的购电费用; w 为水库数。

3) 水-电联动约束为:水库当前时刻的发电用水量=水库当前时刻所有机组的发电功率×水库当前时刻的耗水率,如式(6)所示。

4) 电-价联动约束为:水电发电单元的运行费用=将每个机组的电力现货市场中标电力与每个机组的电力现货市场中标电力所处的机组出力分段区间对应的机组出力价格相乘后叠加,如式(12)所示。

通过以上分析,市场出清模型为线性规划模型,可以采用成熟的商业优化软件如 CPLEX 进行求解。

3 振动区约束降维优化

在梯级水电为主的电力现货市场中,可以通过分区报价让多个电站协同报价,通过整合来减少离散变量,降低振动区约束维数,分区主要原则如下:

1) 水力联系法:对处在同一流域的电站,按照相互间的水力关系构建分区报价单元。

2) 属主分类法:对处于同一竞价市场的电站,按照各自的属主关系构建分区报价单元。

3) 同一个上网点:在当前电力现货市场环境下,对同一个市场中网络节点的水电站可以组建分区报价单元。

以上原则为考虑的主要因素,具体实施可以结合实际情况和工程经验进行分区。

在分区之后,对各个分区的机组进行分别合并,形成各机组群,这样机组的离散运行区间也通过合并形成机组群的离散区间。各水电机组离散区间的

所有和的并集,如式(13)所示。

$$P_{b,t} \in [P_{1,t1} + \dots + P_{k,t1}, P_{1,h1} + \dots + P_{k,h1}] \\ \cup \dots \cup [P_{1,lm} + \dots + P_{k,ln}, P_{1,hm} + \dots + P_{k,hn}] \quad (13)$$

式中: k 为机组群 b 包含的水电机组数; m 、 n 为各机组的允许运行区间数。

通过分区机组的并集,一方面把待求解规模从机组数减少为机组群数;另一方面,多个机组振动区间交叠而大幅减少了离散变量,因此大幅减少了模型的变量规模。

4 算例分析

对含大规模梯级水电的四川电网进行了日前优化出清计算,模型包括机组 1263 台、支路 2921 条,采用所提的机组分区合并方法得到机组群 553 个。如电厂耿达和渔子溪可以合并为机组群“渔耿”,进行统一出清,出清后再把出力保证到各机组上并且满足振动禁止运行区间要求。

采用所提的降维方法和直接计算进行了优化出清,计算对比结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出:通过振动区约束降维,机组出清结果的平均偏差为 0.352%;最大偏差为 0.742%;目标函数也只偏差了 0.240%;在精度上未出现明显下降,证明了振动区约束降维方法的可行性。而总体计算时间从 267.62 s 减少为 52.45 s,仅为原来的 19.60%,有效地减少了出清计算的时间,提高了市场出清效率。这是由于通过振动区约束整合,变量和约束的数目都大幅降低,从而有效降低了问题的求解规模。

表 1 振动区约束降维计算结果

结果类型	直接计算	所提方法
出清变量数目	1263	553
平均机组出清结果偏差/%	0	0.352
最大机组出清结果偏差/%	0	0.742
目标函数/万元	2 835.31	2 842.07
目标函数偏差/%	0	0.24
计算时间/s	267.62	52.45

以 2021 年市场运行的某两个典型日为例,考虑水-电耦合约束和未考虑水-电耦合约束的后续电厂调整结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,采用所提的水-电耦合模型可以有效提高电厂出力和来水情况的匹配程度,进而减少后续的再调整申请,如不进行调整则会出现弃水或无法按照要求发电,通过所

提方法,提高了电力现货市场出清结果的合理性。

表 2 市场出清后续电厂再调整结果

结果类型	未采用水-电耦合模型	水-电耦合模型
需要增加出力的电厂/座	17	2
需要降低出力的电厂/座	26	3
需要增加出力/次	23	5
需要减少出力/次	31	8

5 结论

上面提出的含梯级水电的电力现货市场优化变量的降维方法,降低了优化出清的计算规模。针对机组振动区离散变量多的问题,按照水库分区原则,对各个分区的机组进行合并形成各机组群,减少机组数和运行区间离散数。从水-电耦合关系约束出发,对电力现货市场水-电耦合产生的物理约束进行了联动分析,建立了基于水-电耦合约束的市场出清模型。通过实例证明,所提方法能够有效地提高含梯级水电的电力现货市场优化出清性能,进而提高电力现货市场运营水平。

参考文献

- [1] 张粒子,刘方,许通,等.多运营主体梯级水电站参与的日前市场出清模型[J].电力系统自动化,2018,42(16):104-110.
- [2] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等.基于改进的电力现货交易下调度研究[J].四川电力技术,2020,43(4):15-19.
- [3] 刘方,张粒子.流域梯级水电优化调度模型与方法研究综述[J].华北电力大学学报,2017,44(5):81-90.
- [4] 李亚鹏,赵志鹏,于申,等.计及风险的多尺度电力市场下梯级水电月度发电计划制定方法[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2525-2534.
- [5] HELSETH Arild, FODSTAD Marte, MO Birger. Optimal medium-term hydropower scheduling considering energy and reserve capacity markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(3):934-942.
- [6] 马宇航,黄媛,刘俊勇,等.考虑日内来水不确定和电网断面约束的梯级水电日前调度[J].电力建设,2020,41(9):39-49.
- [7] 冯仲恺,廖胜利,牛文静,等.梯级水电站群中长期优化调度的正交离散微分动态规划方法[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4635-4644.
- [8] CHEN Shijun, YAN Shang, HUANG Weibin, et al. A method for optimal floodgate operation in cascade

reservoirs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2016; 81-92.

- [9] BAHMANI-FIROUZI B, FARJAH E, AZIZIPANAH Abarghooee R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Energy, 2013,50:232-244.
- [10] MARICHELVA M K, PRABAHARAN T, YANG X S. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop

(上接第16页)

- [2] 曾雪洋,张纯,王顺亮,等.基于减载系数变化的风电机组一次调频控制[J].电力自动化设备,2022,42(8):119-125.
- [3] 周天沛,孙伟.高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J].中国电机工程学报,2017,37(2):486-495.
- [4] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(5):4002-4011.
- [5] LI Y J, XU Z, ZHANG J L, et al. Variable gain control scheme of DFIG-based wind farm for over-frequency support[J].Renewable Energy, 2018,120:379-391.
- [6] 金铭鑫,王彤,黄世楼,等.含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):170-177.
- [7] 侍乔明,王刚,马伟明,等.直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(8):2033-2042.
- [8] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006,21(1):433-434.
- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等.基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J].电网技术,2021,45(5):1658-1665.
- [10] QU L, QIAO W. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011,47(1):359-367.
- [11] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.
- [12] HOWLADER A M, SENIYU T, SABER A Y. An integrated power smoothing control for a grid-interactive wind farm considering wake effects [J]. IEEE Systems Journal, 2015,9(3):954-965.

scheduling problems to minimize makespan[J]. Applied Soft Computing, 2014, 19: 93-101.

作者简介:

熊志杰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及网络安全运行管理;

王彦泮(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及调控运行管理;

张大伟(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化运行管理。

(收稿日期:2022-09-01)

- [13] LYU X, ZHAO J, JIA Y W, et al. Coordinated control strategies of PMSG-based wind turbine for smoothing power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(1):391-401.
- [14] LICARI J, EKANAYAKE J, MOORE I. Inertia response from full-power converter-based permanent magnet wind generators [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013,1(1):26-33.
- [15] LI Y J, XU Z, WONG K P. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):2017.
- [16] LIU X G, XU Z, ZHAO J. Combined primary frequency control strategy of permanent magnet synchronous generator-based wind turbine [J]. Electric Power Components and Systems, 2018,46(11a15):1704-1718.
- [17] HANSEN A D, MICHALKE G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults [J]. IET Renewable Power Generation, 2009,3(3):333-348.
- [18] ARANI M F M, MOHAMED Y A I. Assessment and enhancement of a full-scale PMSG-based wind power generator performance under faults[J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016,31(2):728-739.
- [19] PADRON J F M, LORENZO A E F. Calculating steady-state operating conditions for doubly-fed induction generator wind turbines[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(2):922-928.
- [20] 王同森,张峰,丁磊.考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):22-28.
- [21] ZHU J B, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(2):1277-1287.

作者简介:

曾雪洋(1992),男,博士,研究方向为高压直流输电、新能源并网与控制。

(收稿日期:2022-08-15)

碳电市场环境下火电厂市场竞价策略 及交易技术

李建华^{1,2}, 陈雪¹, 付浩¹, 武云霞¹, 白智丹¹

(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. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电力现货市场与碳排放权市场建设的不断推进, 为火电厂的生产运营带来了新的机遇与挑战。文中提出了一种碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术。首先, 分析了火电机组碳排放权交易及管理方法, 研究了碳电市场的关联关系与关键影响因素; 然后, 基于火电机组出力特性模型与成本模型, 计入碳电市场价格分别建立了电力市场、电力市场+免费配额、电力市场+有偿配额3种模式下的机组竞价模型, 并进一步提出了以火电机组效益最大化为目标的出力优化模型及求解方法; 最后, 通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力市场; 碳市场; 边际电价成本; 竞价策略

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0046-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230308

Bidding Strategy and Trading Technology of Thermal Power Plant in the Environment of Carbon and Electricity Market

LI Jianhua^{1,2}, CHEN Xue¹, FU Hao¹, WU Yunxia¹, BAI Zhidan¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The construction of electricity spot market and carbon emission rights market has been continuously promoted, which brings new opportunities and challenges to the production and operation of thermal power plants. A bidding strategy and trading technology are proposed for thermal power plants in carbon and electricity market. Firstly, the carbon emission trading and management methods of thermal power units are analyzed, and the association and key influencing factors of carbon and electricity market are studied. Then, based on the output characteristic model and cost model of thermal power units, the price of carbon and electricity market is taken into account, and the unit bidding models in three modes are established respectively, that is, electricity market, electricity market with free allocation, electricity market with paid allocation. And furthermore, the output optimization model and solution method aiming at maximizing the benefit of thermal power units are proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by an example simulation.

Key words: electricity market; carbon market; marginal electricity price cost; bidding strategy

0 引言

2015年中国开启了新一轮深化电力体制改革, 管住中间, 放开两头^[1], 实现市场在电力资源配置中的决定性作用。火电厂作为电力市场的重要市场主体, 其市场竞价策略受到成本和现货电价的

较大影响。此外, 碳排放权概念的提出, 使火电企业需要拥有相应的碳配额才可以进行电力生产。火电企业作为中国发电行业减排的重点行业, 其运营将会受到电力市场与碳市场的双重影响, 因此研究火电企业碳电市场下的交易技术具有重要意义。

现在已有许多文献开展了相关研究。如文献[2]利用最优基准值确定方法, 分析了不同工况下火电机组的碳排放量, 并利用机器学习算法求得

更准确的排放权最优基准值,为碳配额的统筹和划分提供了较好的价值基础。文献[3]建立了碳交易机制下的火电机组经济调度模型,在满足系统运行需求的前提下,实现了低碳性与经济性的协调优化。文献[4]计及火电机组碳减排约束,建立了以碳排放成本最低的碳电优化协调模型,实现了火电机组在碳市场中的有力竞争。文献[5]考虑火电机组深度调峰下的成本损耗,建立了满足系统调峰需求的阶梯型碳交易成本模型,并证明了该方法的合理性。上述文献主要研究了火电机组在碳排放权、碳减排和低碳调度等方面内容,基于火电机组的碳排放边界约束,综合考虑环境价值效益与经济效益,进一步优化火电机组出力。文献[6]基于 Copula 函数建立了现货电价与碳价的联合概率分布模型,构建了发电机组的风险竞价策略。文献[7]分析了电力市场与碳市场关联,通过引入市场机制下的碳排放因子,提升低碳电力的竞争力,推动火电机组的低碳化改造。文献[8]在考虑电力市场竞价效益与碳排放成本的基础上,提出了基于机组有效容量的补偿机制,实现了容量电价与机组容量的协调性。以上文献研究了碳价和电价的关联关系,分析了碳排放成本对火电机组运行生产效益的影响,协调了碳电生产之间耦合因素。

上述文献主要从碳电市场对发电机组运行、规划与成本效益等方面进行了研究,但均未综合考虑碳排放权市场和电力市场对火电行业的定价和交易带来的影响和挑战,完善的碳排放权市场和电力市场体系能促进火电行业运营模式由传统计划体制向全面市场化竞价转变。基于对电力市场和碳市场交易价格的双重分析,下面建立了火电机组边际成本与碳电价格的强关联因素模型,从而进一步优化了火电机组出力,提出了全面考虑碳电市场下的运行风险与市场竞价策略,并根据碳电市场的动态变化实现对机组出力的实时调整,保障机组的最大化利润。此外,通过算例仿真分析了火电机组在电力市场、电力市场+免费配额市场、电力市场+有偿配额市场下的经济效益。

1 国内外碳电市场发展现状

1.1 国内碳电市场

自2015年新一轮电力市场改革开启以来,国内

相关机构、电力企业及科研单位均围绕电力现货市场开展了大量的政策、机制及理论技术等方面的研究。2017年开启了第一批电力现货市场8个试点省份,根据各个省份的电力系统现状、特点及省内实际情况,其市场建设模式如表1所示。2022年1月,发改委、能源局发布了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,要求加快建设全国统一电力市场体系,实现电力资源在更大范围内共享互济和优化配置,提升电力系统稳定性和灵活调节能力,推动形成适合中国国情、有更强新能源消纳能力的新型电力系统。电力现货市场进入改革发展新阶段,未来电力现货市场将会向着省内、省间、全国相互协调、相互衔接的立体化交易模式迈进。

表1 试点省份市场建设模式

试点省份	市场模式
广东	中长期+全电量日前+实时现货市场
内蒙古(西部)	中长期+日前+日内+实时交易
浙江	日前市场+实时市场(全电量)
山西	中长期+日前+日内交易、实时交易
山东	日前+日内+实时(全电量)
福建	中长期+现货市场
四川	中长期+日前+实时市场
甘肃	中长期市+日前+实时市场 富余新能源跨省区现货交易的区域

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上表示,中国将力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,双碳成为了能源结构转型的重要导向。中国在2011年开启碳配额交易试点,2013年逐渐形成了8个碳交易试点地区,并在2021年7月16日正式启动全国碳市场。碳市场主要有两种类型,分别为碳配额交易和自愿减排交易。碳配额交易市场是以控排企业获得的碳配额为交易对象,如火电、水泥等行业;自愿减排交易是通过实施项目削减温室气体排放而取得的减排凭证,如风电、光伏。

碳配额交易市场的运行机制总体分为碳配额核定与分配、市场交易、监测核查、清缴抵消等。碳配额总量由主管部门采用基准法、祖父法、拍卖法等进行核定,中国目前碳配额采用免费发放为主,各地预留碳配额采用有偿分配。交易供需方依托交易平台开展碳配额的交易,交易形式包括协议转让、竞价交易、拍卖交易等。在监测、报告与核查方面,企业对排放源进行监测,提交监测报告,主管部门委托第三方机构进行核查。在清缴抵消方面,重点排放单位在规定时间内向省级主管部门清缴上年度的碳配额。

自愿减排交易以自愿减排项目备案和自愿减排量备案为前提。自愿减排项目备案是对项目合理性的评判,自愿减排量备案是对已合格项目所产生的减排量的量化评估。中国碳交易市场作为市场化的减排机制,相比传统的财政补贴等政策,在节约成本、促进技术创新和调动企业积极性方面都具有更好的优势。

在双碳目标下,中国碳市场建设在相关立法支持、碳配额价格、CCER 审批等方面,存在积极的预期。

1.2 国外碳电市场

国外电力现货市场经过多年的建设与发展,已经相对较为成熟。美国 PJM 电力市场、英国电力市场和北欧电力市场是 3 种较为典型的市场模式。美国 PJM 市场的电力供需相对偏紧,强调现货市场的资源优化配置功能,日前市场采用“全电量优化”,同时考虑电能与备用、调频等辅助服务资源的统一优化,利用节点电价引导电网的阻塞管理。英国现货市场采用电力库的模式,提供一个集中的电能购买平台,并允许市场成员对已签订的交易计划进行偏差修正,交易量较小。北欧电力市场水电装机比例高达 50%,阻塞主要存在于一些重要断面上,功能在于协调各国的资源特性,提供一个高效的跨国资源优化配置平台。美国 PJM、英国和北欧电力市场的现货市场模式如表 2 所示。

表 2 国外典型市场模式

市场	模式	价格
美国 PJM	日前市场(电能+备用)	节点边际
	实时市场(电能+调频)	节点边际
英国	日前市场(电能)	系统边际
	平衡机制(电能+辅助服务)	按报价
北欧	日前市场(电能)	分区边际
	日内市场(电能)	撮合定价
	平衡机制(电能与辅助服务)	系统边际

当前,国际碳市场发展相对较为迅速。截至

2021 年 4 月,全球运行的国家和地区碳市场有 30 个,涵盖 CO₂ 年排放量为 43 亿 t,约占全球排放量的 9%,覆盖地区的 GDP 之和占全球 GDP 的 37% 左右。目前,全球相对成熟的碳市场有欧盟、瑞士、韩国、美国区域温室气体倡议、美国加利福尼亚州和加拿大魁北克省等 6 个。欧盟碳市场启动于 2005 年,是最早的碳市场,涵盖了欧盟 28 个成员国、挪威、冰岛和列支敦士登,覆盖电力、工业和航空,以 4 年为一个履约周期。加利福尼亚州政府于 2013 年实施碳交易制度,是北美最大的区域性强制市场。自该市场运行以来,加州 GDP 平均每年增长 6.5%,而美国全国 GDP 每年增长 4.5%,碳交易市场的建立为经济的发展起到了一定的促进作用。

电力行业作为碳排放领域的主力军,碳排放市场中的配额机制、交易规则、碳交易价格将会对电力企业的生产运行造成较大的影响,两者之间存在相互影响、相互制约、相互促进的关系。未来随着双碳建设的不断推进与能源结构低碳转型,碳电市场的协同发展将会成为未来的趋势,也能更好地促进碳电技术提升和经济发展。

2 火电机组碳电市场关系联动

2.1 火电机组碳排放权分配机制

碳排放权是单位或企业根据相关法律规定取得的温室气体排放权利。火电厂碳配额分配一般为无偿碳配额、免费碳配额或两者结合的方式,如图 1 所示。无偿配额目前是通过基准线法进行分配,公式为

$$E_q = \delta \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi,t} \quad (1)$$

式中: E_q 为初始碳配额分配量; δ 为分配因子; N_G 为机组数量; $P_{Gi,t}$ 为机组 i 在 t 时段的计划电量; T 为调度周期。

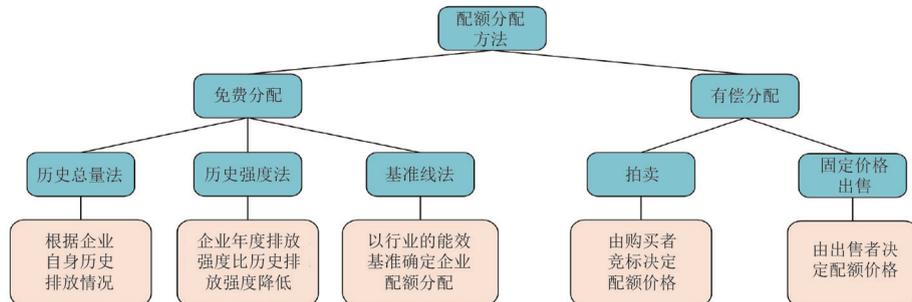


图 1 碳配额分配方法

电厂根据获得的初始无偿碳配额量安排生产计划,当碳配额量不足时,则需要通过碳市场交易购买所需的新增碳排放权额度,即初始获得量与市场购买所得碳排放权的总额不得高于其总排放量。当总碳排放量低于免费碳配额量,则可以通过市场交易将多余的碳配额进行出售,获得利润。

火电企业通过改进碳排放权碳配额的管理,实现经济发展和环境治理的双重效益目标。在碳达峰、碳中和的背景下,火电企业低碳化发展更有助于实现经济利益和社会效益的双赢。

2.2 碳排放权对电力市场的影响分析

电力行业是碳排放权交易市场的主要参与者,碳排放权交易市场的建立有助于促进火电机组低碳技术发展,减少碳排放,助力新型电力系统建设。同时根据《国家发展改革委关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》(发改价格〔2021〕1439号),规定有序放开全部燃煤发电电量上网电价,即所有燃煤发电机组原则上均需要进入市场进行竞价。碳排放市场将会影响火电机组在电力市场中的竞价交易,为火电机组带来了新的市场和技术挑战。火电机组需要在以往的运行成本和市场电价的基础上,将碳排放交易纳入火电机组运营综合考虑。

火电机组利用煤炭、天然气等化石燃料进行电力生产的过程会产生碳排放,需要具有相应的碳排放额度才可以生产,同时碳排放权市场的建立能够促进火电机组和清洁能源机组之间的发电权交易,从而更好地促进清洁能源的消纳^[9]。

火电机组需要有相应的碳排放额度方可以进行生产,当碳排放额度无法满足部分高耗能火电机组的生产需求时,则需要进行碳配额交易或者低碳技术改造,才可以保证火电机组的上网电量。当碳配额的价格高于碳减排边际成本时,火电机组需要利用碳捕集、封存与利用等低碳技术降低火电机组的碳排放,从而控制履约期内的碳排放总量不超过额定配额数量。此外,当配额价格较低,火电机组可以通过配额购买的方式来进行履约。

火电机组需根据生产边际成本在现货市场中进行竞价出清。引入碳排放权市场之后,火电机组在报价的时候需要考虑碳排放成本对火电机组造成的影响,其碳排放权交易市场出清价格将会影响火电机组的竞价。火电机组会根据碳排放成本调整报

价,可能会导致机组中标电量减少,若不考虑碳排放成本,火电机组的度电收益将会降低。因此,综合考量火电机组在碳市场和电力市场的成本与效益是目前火电机组运营亟待解决的问题。

3 火电机组碳电市场模型

电力现货市场中,发电机组通过单调递增的竞价方式进行电价和电量的申报,用户侧则采取报量和报价或者报量不报价两种方式。目前的四川电力现货规则中规定,发电侧报价、用户侧不报价的市场,发电侧和用户侧均按照市场统一出清价格进行结算,即现货市场电价。火电机组则需要根据成本特性与现货价格参与市场竞争,提高其市场利润。同时,由于火电机组在电力生产过程中会产生CO₂排放,火电机组的碳配额分配及交易将会对火电机组的效益造成影响。

3.1 火电机组出力模型

火电机组具有良好的调节性能,运行成本函数是与出力相关的二次函数,在市场中竞价需要基于其出力特性和约束条件。

1) 火电机组出力成本

$$F_{i,t} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (2)$$

式中: $F_{i,t}$ 为火电机组*i*在*t*时段的出力成本; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为火电机组*i*出力成本系数; $P_{i,t}$ 为火电机组*i*在*t*时段的出力。

2) 火电机组出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

式中, P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为火电机组*i*出力上、下限。

3) 机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta t U_i \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta t D_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t-1}$ 为火电机组*i*在*t-1*时段的出力; Δt 为计划周期内的时间间隔; U_i 和 D_i 分别为火电机组*i*的爬坡速率和降坡速率。

3.2 火电机组碳电市场竞价模型

电力市场与碳市场环境下,火电机组需要考虑电力与碳排放权的综合成本与收益进行出力优化,现货市场电价、碳市场价格与火电机组成本的关联关系是调整火电出力、保证其经济性的重要依据。

3.2.1 电力市场竞价模型

电力市场环境下,火电机组需要尽可能大的利

润,即市场售电收入减去机组发电成本,可表示为

$$R_{i,t} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (5)$$

式中: $R_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的利润; $\lambda_{e,t}$ 为 t 时段的现货电价。

利用极值法求解火电机组的最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d(\lambda_{e,t} P_{i,t})}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i)}{dP_{i,t}} = 0 \quad (6)$$

$$f(P_{i,t}) = \frac{dF_{i,t}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i \quad (7)$$

式中, $f(P_{i,t})$ 为火电机组的边际成本函数,表示当前机组生产 1 MW 电能所需要的成本。

根据上述模型式(6)一式(7)求解,通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润,如式(8)所示。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i \quad (8)$$

通过式(8),可以求得与现货电价对应的机组边际成本,继而调整其机组当前时段出力。上面仅从电力市场角度考虑,未考虑碳市场。

3.2.2 计入免费碳配额市场竞价模型

电力市场和碳市场环境下,一方面要考虑火电机组的售电效益;另一方面需要考虑碳配额带来的影响。考虑到目前火电机组的碳配额是由国家免费发放,且剩余部分碳配额可以进行再出售,火电机组碳电成本可表示为

$$F_{ci,t}^{(0)} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i - Q_{ex,t} \lambda_{c,t} \quad (9)$$

$$Q_{i,t} = q_i P_{i,t} \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_{ex,i,t} = W \quad (11)$$

式中: $F_{ci,t}^{(0)}$ 为免费碳配额条件下的火电机组生产成本; $Q_{ex,i,t}$ 为 t 时段的碳配额交易量; $Q_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段生产电力所需求的碳配额; q_i 为机组 i 的碳排放强度基准值; W 为火电厂生产计划划分至当天的碳配额量。

碳电市场环境下火电机组的利润可表示为

$$R_{i,t}^{(0)} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - [(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) - Q_{ex,t} \lambda_{c,t}] \quad (12)$$

式中: $R_{i,t}^{(0)}$ 为碳电市场环境下火电机组 i 在 t 时段的利润; $\lambda_{c,t}$ 为 t 时段碳交易市场的碳价。

利用极值方法求解最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d\lambda_{e,t} P_{i,t}}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i - Q_{ex,t} \lambda_{c,t})}{dP_{i,t}} = 0 \quad (13)$$

$$f(P_{i,t}^{(0)}) = \frac{dF_{ci,t}^{(0)}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (14)$$

式中, $f(P_{i,t}^{(0)})$ 为当前火电机组的边际成本函数。

同样通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (15)$$

通过式(15),求得与现货电价对应的机组边际成本,同时可以看出,火电机组的出力与电价和碳排放权价格均有关联。

3.2.3 计入有偿碳成本竞价模型

考虑到未来碳市场的不断完善,碳配额的免费发放将逐步转为有偿碳配额,故火电机组的生产成本需要计入碳配额购买成本,可表示为:

$$F_{ci,t}^{(1)} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i + Q_{i,t} \lambda_{c,t} \quad (16)$$

$$Q_{i,t} = q_i P_{i,t} \quad (17)$$

式中, $F_{ci,t}^{(1)}$ 为火电机组生产成本。火电机组的利润可表示为

$$\max R_{i,t}^{(1)} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - [(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + Q_{i,t} \lambda_{c,t}] \quad (18)$$

式中, $R_{i,t}^{(1)}$ 为碳电市场环境下火电机组 i 在 t 时段的利润。

利用极值方法求解最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d\lambda_{e,t} P_{i,t}}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i + Q_{i,t} \lambda_{c,t})}{dP_{i,t}} = 0 \quad (19)$$

$$f(P_{i,t}^{(1)}) = \frac{dF_{ci,t}^{(1)}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (20)$$

式中, $f(P_{i,t}^{(1)})$ 为当前火电机组的边际成本函数。

同样通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (21)$$

通过式(21),求得与现货电价对应的机组边际成本。同时可以看出,电价较高时可以增加火电机组的出力,碳排放权价格较高时可以下调机组出力。

3.3 现货价格预测

现货电价是一个时间序列,采用自回归积分滑动平均模型电价进行预测:

$$\lambda'_{e,t} = e_t + \varphi_1 \lambda_{e,t-1} + \theta_1 \lambda_{e,t-1} + \varepsilon_t \quad (22)$$

$$\varepsilon_t \sim N(0, \delta_t^2) \quad (23)$$

式中: $\lambda'_{e,t}$ 为 t 时段预测现货电价; e_t 为随时间变化而变化的电价均值; φ_1 为电价序列的自回归系数; θ_1 为滑动平均系数; δ_t^2 为电价序列方差。

4 火电机组市场出力优化模型

市场环境下,火电机组要转变传统的计划发电为市场竞价方式,根据市场价格调整机组生产的边际成本,从而优化机组出力,保障经济效益。

4.1 目标函数

基于火电机组出力特性和成本模型,计入现货电价和碳配额等关键因素,建立以火电机组利润最大化为目标的函数模型为

$$F(x) = \max \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t} & \text{场景 1} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t}^{(0)} & \text{场景 2} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t}^{(1)} & \text{场景 3} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $F(x)$ 为火电机组一天内利润目标函数;场景1表示仅考虑电力市场;场景2表示电力市场和免费碳配额市场;场景3表示电力市场和有偿碳配额市场。

4.2 优化求解

从以上3个不同的场景进行分析优化发电机组出力。基于现货价格预测和碳市场价格,求得不同场景下的边际成本模型,进一步优化调整发电机组出力,实现碳电综合效益最大化,具体求解流程如图2所示。

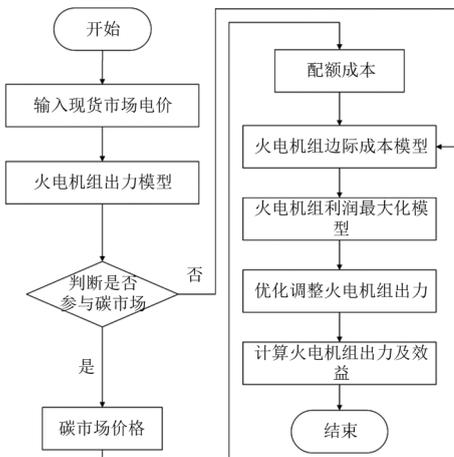


图2 求解流程

求解步骤:

1)输入数据。输入电力市场现货电价和火电机组出力特性模型。

2)判断是否参与碳市场。若不参与碳市场,则转向步骤3;若参与碳市场,则转向步骤4。

3)成本与利润模型建立。建立该情景下的火电机组边际成本模型和利润最大化模型,继而转向步骤5。

4)输入碳市场价格,按有偿碳配额或免费碳配额两种方式分别计入碳配额成本,按不同的场景分别转向步骤3。

5)分析计算。调整该场景下的火电机组最优出力并计算相应的效益。

5 算例仿真

5.1 基础数据

算例以某发电厂为例,该发电厂有两台1000 MW火电机组,机组的成本系数及碳排放强度如表3所示。由于两台机组性能相同,算例仅针对单台进行分析。现货市场电价如图3所示,碳排放权交易价格按国内目前的碳市场行情基本在30~70元/t,简化采用正态分布的方式生成其价格如图4所示。

表3 火电机组参数

参数	数值
$a/(元 \cdot (MWh)^{-2})$	0.2
$b/(元 \cdot (MWh)^{-1})$	120
c 成本参数/元	1560
碳排放强度 $q/(t \cdot (MWh)^{-1})$	0.88

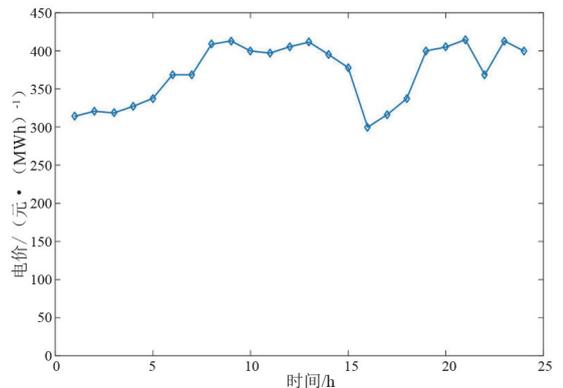


图3 现货市场电价

5.2 仿真分析

基于上述机组参数与碳电市场生成价格,通过所建模型和求解方法分别分析和计算了电力市场、电力市场+免费碳配额、电力市场+有偿碳配额3种情况下的火电机组优化出力、运营情况及效益分析。

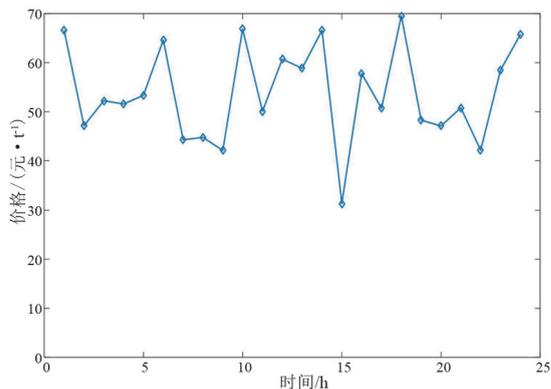


图 4 碳市场价格

1) 电力市场运行分析

电力市场环境下,根据火发电机组的出力特性与成本模型,考虑电力市场现货价格,依据现货市场价格调整火发电机组的出力,使得火发电机组的边际成本等于现货电价,求得火发电机组出力及相应的碳排放量,如图 5 所示。可以看出在机组出力与现货价格存在明显的正相关,价格越高,机组出力越大。

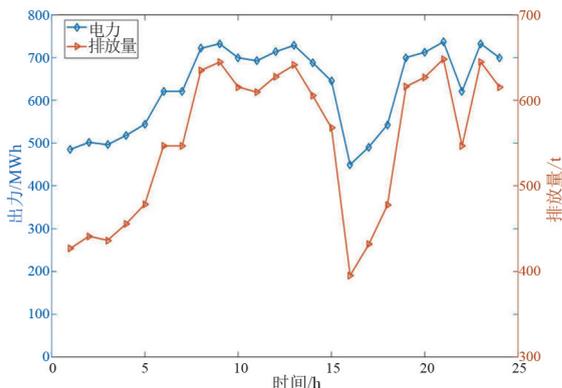


图 5 电力市场下火发电机组运行情况

2) 电力市场+免费配额运行分析

考虑电力市场与免费配额环境下,火电机组需要根据电力现货市场价格与碳市场交易价格调整火电机组的出力,使得该条件下的机组边际成本等于现货电价,即可求得当前条件下的机组出力与碳排放量,如图 6 所示。此处火电机组为免费发放配额,故剩余的配额可以在碳市场中交易售出,进一步获取利润。

3) 电力市场+有偿配额运行分析

考虑到未来碳配额将进行调整,火电机组需要购买相应的配额满足电力生产需求,将会提升机组的生产成本。考虑碳电市场的价格,火电机组将调整其出力至该条件下的边际成本等于现货电价,求得火电机组出力及相应的碳排放量,如图 7 所示。

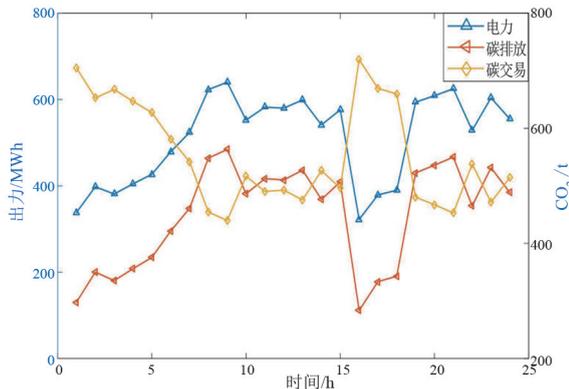


图 6 电力市场+免费配额下运行情况

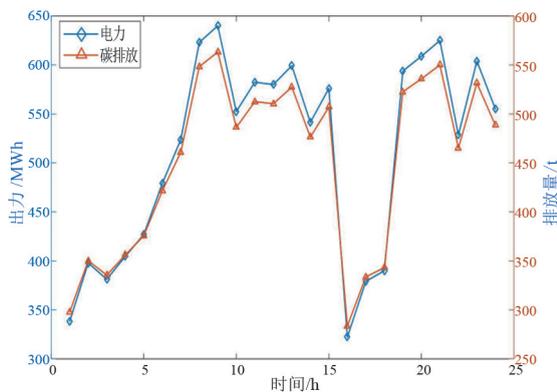


图 7 电力市场+有偿配额下运行情况

基于上述不同条件下的火电机组运营分析,根据机组出力、碳排放量及交易量,进一步求得火电机组市场收入和运行成本,求得各个模式下的收益,其中:电力市场为 369.49 万元;电力市场+免费配额为 255.76 万元;电力市场+有偿配额为 129.78 万元。

6 结 论

电力市场与碳市场环境下,火电机组需要面临电价与碳排放权价格的双重不确定性的考验,上面分析了电力市场、电力市场+免费配额、电力市场+有偿配额等模式下的火电机组边际成本模型与市场出力优化策略,建立了以火电机组效益最大化为目标的碳电市场竞价模型,并对其效益和运行结果进行了分析,建议火电机组需要根据碳电市场的运行情况适时调整其出力及市场交易策略。

随着碳达峰、碳中和目标的不断推进,将会持续推动碳交易市场的建设,从而进一步加深对电力市场的影响。火电机组在碳电关系上的耦合度将会不断加深,影响其生产运行与经济效益。

(下转第 89 页)

油纸绝缘套管内部压强监测中温度的影响及抑制措施研究

涂彦明¹,龙震泽¹,王志川²,朱鑫¹,刘强¹,蒋伟¹,陈凌¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究所,四川成都 610041;

2. 国网四川省电力公司,四川成都 610041)

摘要:油纸绝缘套管内部发生放电或过热性故障时,内部的绝缘油和绝缘纸会分解产生特征气体,随气体的增加内部压强相应增加,从而通过监测套管内部压强可实现缺陷的监测与预警。但是环境温度和负荷电流的变化会导致套管内部温度的变化,从而引起内部压强的变化,为采用压强监测进行预警带来了干扰。为消除温度对压强预警带来的干扰,文中研究了温度对内部压强的影响规律,提出了共模抑制的方法来降低温度的影响。结果表明,该方法可以有效降低套管压强监测时的温度影响。

关键词:油纸绝缘套管; 压强响应; 在线监测; 温度影响抑制; 缺陷预警

中图分类号: TM 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)03-0053-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230309

Study on Influence of Temperature on Internal Pressure Monitoring of Oil-paper Insulated Bushing and Its Suppression Measures

TU Yanming¹, LONG Zhenze¹, WANG Zhichuan², ZHU Xin¹, LIU Qiang¹, JIANG Wei¹, CHEN Ling¹

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

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

Abstract: When discharge or overheating fault occurs in oil-paper insulated bushing, the internal insulation oil and insulation paper will be decomposed to produce characteristic gas, and the internal pressure will increase correspondingly with the increase of gas, so that the monitoring and warning of defects can be realized by monitoring the internal pressure of bushing. However, the changes in ambient temperature and load current will lead to the changes of temperature inside the bushing, which will lead to the changes in internal pressure, thus bringing disturbance to the early warning using pressure monitoring. In order to eliminate the disturbance of temperature on pressure warning, the law of the influence of temperature on internal pressure is studied, and the method of common mode suppression to reduce the influence of temperature is proposed. The results show that the proposed method can effectively reduce the influence of temperature on pressure monitoring of bushing.

Key words: oil-paper bushing; pressure response; online monitoring; temperature suppression; defect warning

0 引言

油纸绝缘套管作为电力变压器等设备的重要部件,一旦发生内部缺陷而不能及时发现最终可能发生爆炸的恶性事故^[1-4]。但油纸绝缘套管的缺陷监测和预警一直以来都没有得到较好的解决。

近年来,相对介质损耗(相对电容量)^[5-8]、泄漏

电流^[9]、局部放电^[10-13]等方法得到了广泛的研究,并获得了一些应用。但这些方法的测量信号较为微弱,易受到变电站强电磁干扰,且因其判据需进一步研究等原因,而未能得到大规模的应用。目前针对油纸绝缘套管的缺陷检测主要依赖停电试验和带电取油。

近年,部分研究机构提出采用监测套管内部压强来实现对其内部缺陷的预警^[14-16],并得到了应

用。其基本原理是:套管内部发生放电或过热缺陷时,内部油纸绝缘会分解产生特征气体,特征气体一部分溶解于油中,一部分游离于油面,从而引起内部压强增加。如果缺陷不断发展,其内部压强会不断增加;如果套管发生渗漏油缺陷时,会导致内部的压强降低。因此,通过在套管取油口处监测内部的压强可实现对套管缺陷的预警,避免爆炸事故的发生。

然而,油纸绝缘套管内部压强除了受内部缺陷的影响,还受到内部温度(环境温度和负荷电流导致)的影响。如果不消除套管内部温度对压强的影响,就会对内部缺陷(特别是早期缺陷)的预警产生干扰,形成误判。因此,研究温度对套管内部压强的影响及消除措施是采用压强监测进行预警的重要基础,具有较大的意义。

下面,通过对温度对套管内部压强影响的分析研究,提出了抑制温度对内部压强影响的方法,为压强监测预警的正确性提供了保障。

1 特征气体对内部压强的敏感度分析

油纸绝缘在放电或过热的作用下会生成氢气(H_2)、甲烷(CH_4)、乙炔(C_2H_2)等特征气体,如表 1 所示^[17]。

表 1 不同故障类型产生的气体

故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油纸绝缘中局部放电	H_2, CH_4, CO	C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2
油中火花放电	H_2, C_2H_2	
油中电弧	H_2, C_2H_2, C_2H_4	CH_4, C_2H_6
油和纸中电弧	H_2, C_2H_2, C_2H_4, CO	CH_4, C_2H_6, CO_2
油纸过热	CH_4, CO, C_2H_4	H_2, CH_4, C_2H_6

这些特征气体一部分溶解于油中,一部分游离于油面,溶解与游离的部分最终达平衡状态。平衡状态下溶解于油的气体与游离于油的气体的关系由奥斯特瓦尔德系数 k_i 表征。

$$k_i = \frac{C_{oi}}{C_{gi}} \quad (1)$$

式中: C_{oi} 为平衡条件下溶解在油中特征气体 i 的浓度, $\mu L/L$; C_{gi} 为平衡条件下气相中特征气体 i 的浓度, $\mu L/L$ 。

根据 DL/T 722—2014^[18],各特征气体在矿物绝缘油的瓦尔德系数如表 2 所示。

表 2 各种特征气体在绝缘油中的奥斯特瓦尔德系数

温度/ $^{\circ}C$	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6
20	0.05	0.12	1.08	0.43	1.20	1.84	2.40
50	0.05	0.12	1.00	0.40	0.90	1.40	1.80

套管是一个刚性的密闭系统,内部除充有绝缘油外,在上部还有一定体积的气体,如图 1 所示。

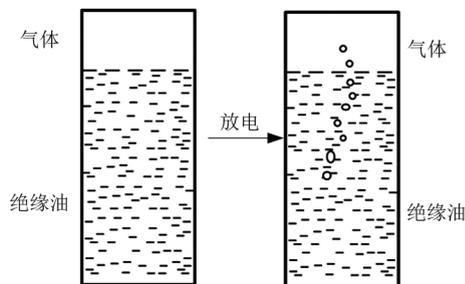


图 1 套管内部

假定套管气体侧容积为 $V_g(L)$,油体积为 $V_l(L)$ 。在无缺陷时,各种气体在气液两相已达到平衡,气侧温度为 T ,压强为 $P_0(101\ 325\ Pa)$ 。缺陷产生的某种特征气体平衡后油中浓度增加值为 $\Delta C_{oi}(\mu L/L)$,则气侧浓度增量 ΔC_{gi} 为

$$\Delta C_{gi} = \frac{\Delta C_{oi}}{k_i} \quad (2)$$

气体侧第 i 种气体增加的体积为

$$\Delta V_{gi} = \frac{V_g \times \Delta C_{oi}}{k_i} \quad (3)$$

各种特征气体体积的总增加量 A 为

$$A = \sum \frac{V_g \times \Delta C_{oi}}{k_i} \quad (4)$$

而实际上由于套管的刚性,气体侧容积几乎不变,在温度 T 下气侧压强为 P ,则

$$P \times V_g = P_0 \times V_g + P_0 \times \sum \frac{V_g \times \Delta C_{oi}}{k_i} \quad (5)$$

压强增加值为

$$\Delta P = P - P_0 = P_0 \times \sum \frac{\Delta C_{oi}}{k_i} \quad (6)$$

由式(6)可知,油中特征气体浓度的增加会引起内部气体部分压强的增加。

结合 DL/T 722—2014^[17]和 GB/T 24624—2009^[18]的规定,油浸式套管油中溶解气体注意值如表 3 所示。

根据式(6)和表 1 可以得出运行中套管如果出现缺陷而达到注意值时内部压强的变化,如表 4 所示。

表3 油浸式套管绝缘油特征气体含量注意值

组分	330 kV 及以上			220 kV 及以下		
	投运前	注意值	增量	投运前	注意值	增量
H ₂	<50	500	450	<150	500	350
C ₂ H ₂	<0.1	1.0	0.9	<0.1	2.0	1.9
CH ₄	<10	100	90	<10	100	90
CO	<100	1000	900	<100	1000	900

表4 套管内特征气体达到注意值时导致的压强变化

电压等级	气体	油中气体浓度增加值/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	内部压强	内部压强
			增加值 (20 °C)/Pa	增加值 (50 °C)/Pa
330 kV 及以上	H ₂	450	911	911
	C ₂ H ₂	0.9	0.07	0.10
	CH ₄	90	21.2	22.8
	CO	900	759	759
220 kV 及以下	H ₂	350	709	709
	C ₂ H ₂	1.9	0.16	0.21
	CH ₄	90	21.2	22.8
	CO	900	759	759

从表4可以看出,当H₂和CO达到注意值时,内部压强绝对变化量非常明显;CH₄达到注意值时压强增长比较明显;C₂H₂增长对压强增长的贡献较小。从表2中的瓦尔德系数来看,虽然C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆和CO₂的增长对压强的贡献较小,但在套管内部缺陷发展过程中,产生这些气体时必然会有H₂、CO、CH₄的产生。一般来说,当C₂H₄、C₂H₆出现显著增长或C₂H₂达到注意值时,H₂、CH₄或CO均会达到注意值,也即是标准^[10-11]将H₂、CH₄和CO作为主要特征气体并给出注意值的意义所在。因此,通过监测内部套管内部压强可以实现缺陷的监测与预警。

从表4可知,当H₂、CO或CH₄达到注意值时,它们引起的压强增长绝对值较为明显,并易于监测。但是由于各电压等级套管高度不同,因此在套管法兰取油口处的压强也不同,从而当特征气体达到注意值时,内部压强变化量所占压强的百分比也不相同。如果所占百分比太小(缺陷发展还未达到注意值的初期时),可能会被温度导致的压强变化而掩盖。

此处选取110 kV套管BRDLW-110/1250为例分析内部缺陷导致特征气体H₂达到注意值时内部压强变化率。通过实际测量,套管基本参数如表5所示。

根据表5的参数,结合绝缘油的密度,可获得套管在法兰取油口处的压强以及特征气体引起的压强

变化的比例,如表6所示。

表5 套管基本参数

型号	运行注油重量时	运行注油重量/kg	完全注满后油重量/kg
	油面距取油口高度 (20 °C)/mm		
BRDLW-110/1250	1180	36	40

注:完全注满后油的重量-运行注油重量=套管顶部空腔所能容纳的油量。

表6 套管内部特征气体(H₂和CO)在缺陷初期和达到注意值时的压强变化率

参数	H ₂		CO	
	注意值	初期	注意值	初期
气体浓度增加值/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	350	50	900	100
内部压强增加值/Pa	709	101	759.0	84.4
内部初始压强/Pa	10 141		10 141	
变化率(内部压强增加值/内部初始压强)/%	7.00	1.00	7.50	0.83

说明:表中H₂增量为50 $\mu\text{L}/\text{L}$,CO增量为100 $\mu\text{L}/\text{L}$ 为假设缺陷初期的含气量。

由表6可知:对于110 kV套管,当内部特征气体(H₂、CO)达到注意值时相对变化率明显,达7%左右;在缺陷初期(H₂增量50 $\mu\text{L}/\text{L}$,CO增量100 $\mu\text{L}/\text{L}$)时相对变化率较小,为1%左右。

2 套管内压强响应的温度敏感度分析

运行中套管的内部温度随着环境温度和负荷电流的变化而变化。温度对内部压强的影响主要来自于以下几个方面:

- 1)套管内部绝缘油体积变化,导致套管上部气体体积变化,从而引起内部压强变化;
- 2)套管上部气体部分温度变化,导致内部压强变化;
- 3)温度和压强的变化影响气体溶解度变化,溶解度变化引起气体部分气体含量的变化,进而引起内部压强变化。

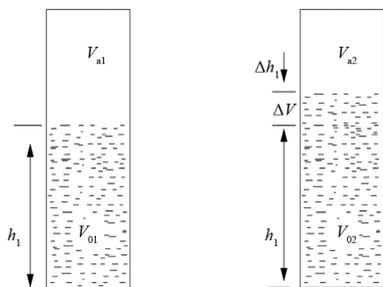
为获得温度对套管内部压强的影响,采用上述110 kV套管进行分析。为简化分析,可做如下合理简化:

- 1)套管内上部的气体为理想气体;
- 2)忽略温度引起的套管瓷套、导电杆、电容芯子的体积变化。

假设套管顶部空间全部充满氮气(N₂),压强为1个标准大气压(101 325 Pa),且此时内部没有其他

特征气体。当套管从温度 T_1 变化到 T_2 时,内部绝缘油和气体侧的体积变化如图 2 所示。

图中: V_{a1} 和 V_{a2} 分别为温度 T_1 和 T_2 时套管内气体侧的体积; V_{o1} 和 V_{o2} 分别为温度 T_1 和 T_2 时套管内绝缘油的体积。



(a) 温度为 T_1 时内部油位 (b) 温度为 T_2 时内部油位

图 2 不同温度下套管内部的油位

根据假设套管内顶部气体为理想气体,因此符合理想气体状态方程为

$$\begin{cases} P_1 V_{a1} = n_1 RT_1 \\ P_2 V_{a2} = n_2 RT_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_1 和 T_2 为不同的温度; V_{a1} 和 V_{a2} 分别为温度 T_1 和 T_2 时套管顶部气体体积; n_1 和 n_2 分别为温度 T_1 和 T_2 时的套管顶部气体物质的量; R 为摩尔气体常数。

由于套管为一个密封系统,因此根据绝缘油的膨胀系数 δ 可得 V_{a1} 和 V_{a2} 的关系为

$$V_{a2} = V_{a1} - (T_2 - T_1)\delta V_{o1} \quad (8)$$

套管顶部空间的 N_2 在 1 个标准大气压下达达到平衡时,浓度为 C_{N1} ($10^6 \mu\text{L/L}$)。根据 N_2 在温度 T_1 时溶解于绝缘油的瓦尔德系数 k_{NT1} 可得温度 T_1 时油中溶解 N_2 的浓度 C_{N-o1} 为

$$C_{N-o1} = k_{NT1} C_{N1} \quad (9)$$

当温度变化到 T_2 时,套管内部气体侧和油中氮气浓度的关系可表示为

$$k_{NT2} = \frac{C_{N-o2}}{C_{N2}} = \frac{(C_{N-o1} V_{o1} + \Delta V_{a-o}) / V_{o2}}{(C_{N1} V_{a1} - \Delta V_{a-o}) / V_{a2}} \quad (10)$$

式中: k_{NT2} 为 N_2 在 T_2 时溶解于绝缘油的瓦尔德系数; C_{N-o2} 和 C_{N2} 分别为温度为 T_2 状态下绝缘油侧和气体侧 N_2 的浓度; ΔV_{a-o} 为温度从 T_1 变化到 T_2 时 N_2 溶解进绝缘油的体积(标准大气压下)。

由于在表征气体浓度时,无论是绝缘油侧还是气体侧,无论是温度 T_1 还是 T_2 状态下,气体的体积均是以标准大气压为参考。因此根据标准大气压下的

的摩尔体积可得在 T_1 和 T_2 状态下,套管气体侧物质的量的关系为

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{V_{a1}}{V_{a1} - \Delta V_{a-o}} \quad (11)$$

根据表 5 中的参数和式(7)一式(11),可以获得不同温度下套管内部压强的变化情况。另外,由于温度变化引起油的体积变化,套管内部油柱高度发生变化,而油的密度与高度成反比。因此,可认为在温度变化过程中在取油嘴处由于油柱引起的压强不变,即温度导致的内部压强变化主要是来自于套管内顶部气体压强的变化。

根据上述分析,可以计算得到 110 kV 套管内部压强变化,如表 7 所示。

表 7 温度变化和特征气体对内部压强等影响对比

温度/ °C	套管内部 压强/Pa	温度变化时压强的 变化量		H ₂ 达注意值时内部 压强变化量	
		变化量/Pa	百分比/%	变化量/Pa	百分比/%
20	10 141	0	0	709	7.0
21	10 810	669	6.6	709	6.6
50	32 244	22 103	218	709	2.2

从表 7 可以看出,当氢气达到注意值时引起内部压强的变化量与温度升高 1 °C 引起的变化量相当。然而,对于运行的套管来说每天的温度变化可能会达到 20~30 °C,由此引起的变化将完全淹没特征气体引起的变化量。

某运行中变压器 110 kV 套管内部压强的监测数据如图 3 所示。由图可知,套管内部压强随温度波动较大,这将对缺陷预警带来极大的干扰。因此,必须采取有效措施消除温度干扰,才能实现缺陷的准确预警。

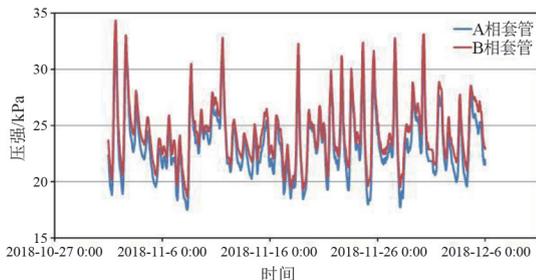


图 3 某运行变压器 110 kV 套管内部压强

3 温度对内部压强影响的抑制措施

为了能够通过压强变化来准确发现缺陷,就必须抑制温度的影响。这里提出采用共模抑制的

方法,即采用运行在相同状态(相同环境温度、相同负荷电流)下的两支相同套管内部压强作差的方法。在实际运行中的套管可采取同一台变压器的三相套管来进行互相作差。下面对以下两种情况开展分析。

情况1:安装于同一台变压器的同厂家同型号的两支套管,内部盛油量完全相同,且注油量完全相同。

情况2:安装于同一台变压器的同厂家同型号的两支套管,内部盛油量完全相同,且注油量有所偏差,假设注油高度相差1 cm。

由于变压器运行时套管处于同一环境温度,且三相负荷电流基本平衡,可假设运行中三相套管的温度几乎相同。此时,两支套管的差压变化以及特征气体引起的压强变化可根据前述计算条件进行计算分析,结果如表8所示。

表8 差压随温度变化与特征气体引起的压强变化对比

H ₂ 增量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	350	50	350	50	350	50
压强增量/Pa	709	101	709	101	709	101
温度/°C	20		21		50	
差压(情况1)/Pa	0		0		0	
差压(情况2)/Pa	471		485		1051	
百分比/%	150	21.4	146	20.8	67.5	9.6

由表8可知,采取共模抑制后温度的影响得到极大的抑制。即使在两支套管注油高度相差1 cm的情况下,特征气体(H₂)达到注意时引起的内部压强变化所在的比重得到极大的提升,20 °C时从7.0%提升到150%;21 °C时从6.6%提升到146%;50 °C时从2.2%提升到67.5%。即使在H₂只增加50 $\mu\text{L}/\text{L}$ 时,引起的内部压强变化也非常明显。

采用共模抑制后,温度的影响能够得到有效抑制。对于某运行变压器套管内部压强采用共模抑制后,其差压波动大幅降低,如图4所示。

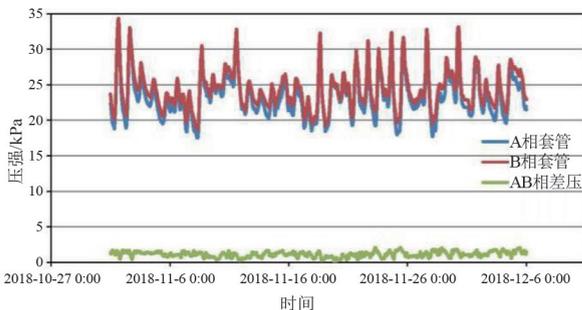


图4 某运行变压器110 kV套管内部压强及差压

4 结论

通过对特征气体及温度对油纸绝缘套管内部压强的影响研究,得出结论如下:

1)套管缺陷产生的H₂、CO等特征气体将显著增强其内部压强,但温度对压强的影响更大,对采用压强监测来开展预警产生极大的干扰;

2)采用所提方法后,温度的影响得到极大的降低,使得套管内部缺陷在发展初期就能通过差压得以发现。

参考文献

- [1] 赵春明,何秋月,杨代勇,等. 66 kV 变压器套管故障分析[J]. 变压器,2018,55(10): 74-78.
- [2] 任晓红,王伟,郑健康,等. 500 kV 变压器套管典型故障及分析[J]. 高电压技术,2008, 34(11): 2513-2516.
- [3] 苏文,王志鹏,袁露,等. 500 kV 变压器中压套管故障分析及处理[J]. 电力安全技术,2018, 20(9): 50-55.
- [4] 许广虎,郑义,苑龙祥,等. 一起750 kV 电抗器高压套管故障的分析与处理[J]. 变压器,2018, 55(5): 72-76.
- [5] SETAYEHSMEHR A, ALKBARI A, BORSI H, et al. On-line monitoring and diagnoses of power transformer bushings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3): 608-615.
- [6] GAO Qiang, DING Pinnan, HAN Yue, et al. Development of distributed on-line monitoring system for dielectric loss tangent of high voltage capacitive apparatus[C]. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, IEEE, 2008.
- [7] 王亮. 基于相对测量法的电容型设备绝缘在线监测系统研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [8] CRISTALDI Loredana, FAIFER Marco, LAURANO Christian, et al. Monitoring of power transformer bushings in high voltage substations[C]. 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power System, IEEE,2015: 1-6.
- [9] 周海洋,李辉,严璋. 改进中性点测量法的变压器套管在线监测[J]. 高电压技术,2002,28(5): 35-37.
- [10] JACOB Nathan D, MCDERMID William M, KORDI Behzad. On-line monitoring of partial discharges in a HVDC station environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 925-934.

张北柔性直流输电工程接地系统监测技术研究

黄宇¹, 吴金波², 唐世雄¹, 陈香香², 朱生辉²

(1. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041;

2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:文中介绍了张北柔性直流输电工程主回路结构、运行方式、接地极及其作用并阐明了作为接地极的接地电阻的重要性。针对接地极可能出现的故障,研究分析了可以采取的实时监测方法;比较了电压电流法和注入法的差异,并说明张北柔性直流工程采用注入法的原因和优势;分析了注入信号频率的选择依据,并根据张北柔性直流工程的系统特性、参数,选配满足注入法原理对应的一次设备以及监测回路结构组成。通过理论分析与系统仿真试验,验证了有无阻波器对主系统的影响;最后,确定了张北柔性直流输电工程接地极在线监测的技术方案。

关键词:柔性直流; 接地电阻; 注入法; 分布参数; 阻波器

中图分类号: TM 721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)03-0058-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230310

Study on Monitoring Technology of Grounding System in Zhangbei Flexible DC Transmission Project

HUANG Yu¹, WU Jinbo², TANG Shixiong¹, CHEN Xiangxiang², ZHU Shenghui²

(1. State Grid Sichuan Electrical Power UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: The main circuit structure, operation mode, grounding electrode and its function of Zhangbei flexible DC transmission project are introduced, and the importance of grounding resistance as grounding electrode is described. Aiming at the possible faults of grounding electrode, the adopted real-time monitoring methods are studied and analyzed. The differences between voltage and current method and injection method are compared, and the reasons and advantages using injection method for Zhangbei flexible DC project are also explained. The selection basis of injection signal frequency is analyzed. According to the system characteristics and parameters of Zhangbei flexible DC project, the primary equipment and the structure of monitoring circuit are selected to meet the injection principle. Through the theoretical analysis and system simulation test, the influence of wave trap coil or not on main system is verified. Finally, the technical scheme of on-line monitoring of grounding electrode in Zhangbei flexible DC project is determined.

Key words: flexible direct current; grounding resistance; injection method; distributed parameter; wave trap coil

0 引言

张北柔性直流电网工程(以下简称张北工程)是一个汇集和输送大规模风电、光伏、储能、抽水蓄能等多种形态能源的柔性直流电网,系统电压为 ± 500 kV,线路全长约 648 km。该工程是采用架空输电线路的世界首个具有网络特性的直流电网示范工程,是世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性

直流工程,也是世界首个应用柔性直流技术进行陆地可再生能源大规模并网的示范工程。张北工程采用环形电网结构,具有以下优点:

- 1) 可靠性高,能够实现多电源供电或多落点供电;
- 2) 灵活性好,可以在送端直接实现可再生能源、抽水蓄能等储能与负荷间的灵活能量交互;
- 3) 扩展性好,再生能源接入可向承德、锡盟等风电、光伏发电基地延伸,同时消纳范围可进一步覆

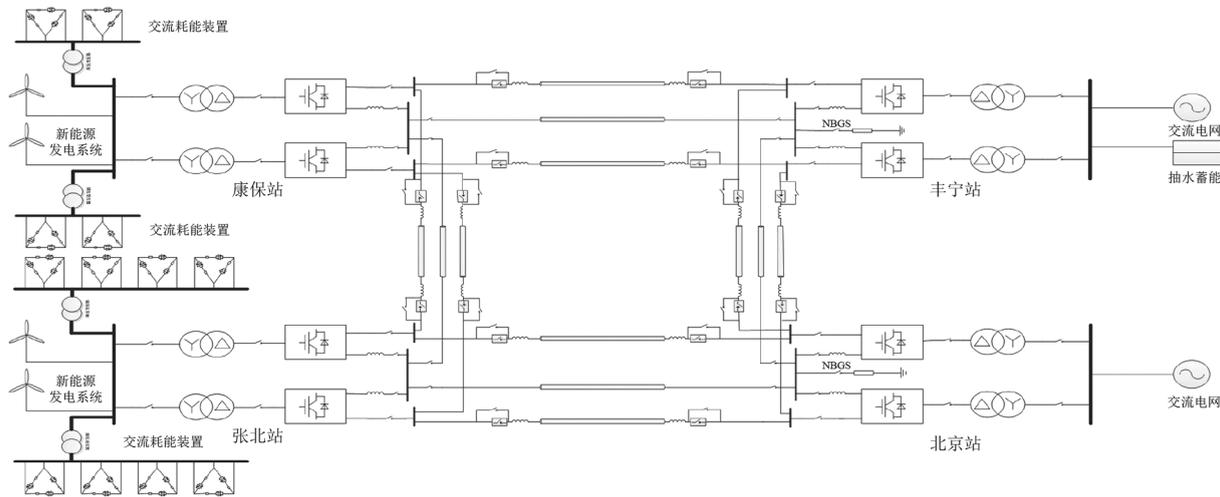


图1 张北工程主回路

盖至唐山、天津等负荷中心。

总之,张北工程能够为未来电网的风、光、储、抽水蓄能一体化运作、功率互补输送起到非常好的技术指导和示范作用^[1-4]。

文献[1]阐述了柔性直流输电工程常用的主电路拓扑结构、多端柔性直流输电系统的结构方式以及换流站系统接地方式等,接地极系统作为柔性直流输电系统的重要组成部分,其运行状态影响到直流系统。文献[2]阐述了柔性直流输电工程常用的控制方式和运行方式等。文献[3]主要介绍了常规直流工程接地极引线的监测方法。下面通过对比电压电流法和注入法两种现有监测手段的差异,综合考虑柔性直流输电系统特性和一次设备组成,最终确定张北工程接地极的最优监测方案。

1 接地电阻及接地系统的作用

张北工程主回路如图1所示。工程设有4个换流站:北京站、张北站、康保站以及丰宁站。常规运行方式为张北站、康保站作为送端输送功率,丰宁站和北京站作为受端接收功率;丰宁站作为调节换流站主要控制电压,使本站电压稳定在 ± 500 kV,其余3站分配协调功率。因张北工程输电线路穿越保护区、军事区,为防止入地电流对保护区、军事区设备产生干扰,所以无论采用何种运行方式,其回路构成均采用金属回线,无入地电流。

基于MMC技术的柔性直流输电系统控制的是极线间的电压,即 ± 500 kV是两极线对中性线的电压;但为了使正常运行时正负极线对称,需要保证中

性线的电位为0,因此需要在换流站合适的地方设置接地点。换流站常用的接地方式主要有通过直流电阻接地、通过联结变压器Y绕组经接地电阻接地和通过电抗器形成中性点经电阻接地3种方式^[4-5],张北工程选用经直流电阻直接接地。

如图1所示,丰宁站和北京站在NBGS开关之后,均有一个阻值为 $15\ \Omega$ 的接地电阻作为张北工程的接地极。常规运行时北京站NBGS闭合,为主接地点,丰宁站NBGS打开,为备用接地点。接地电阻的作用是在系统金属回线方式下,为柔性直流输电系统提供电压钳制点,作为零电位的参考基准^[6-8]。系统正常运行时,接地电阻只起到钳制电位的作用,无电流流过。当直流系统发生接地故障时,接地电阻串入故障回路,增大故障电阻,抑制故障电流,降低对直流回路中一次设备的冲击和危害。

2 接地系统监测方法选择

如果接地极丢失,直流输电系统失去电位参考基准。当直流电压波动,无论是采用下垂控制、偏差控制还是主从控制,势必影响控制系统的控制策略,直流系统将跟随电压波动而震荡,稳定性变差,影响电网运行安全。当接地点开路,一旦输电系统发生故障,将发生电位偏移,接地电阻无法起到抑制电压过冲作用,故障电压可能将对中性区域一次设备产生极大危害。如果在接地电阻之前发生接地故障,与接地电阻并联,这样就造成接地系统电阻极小,甚至可以忽略不计。在这种情况下,系统发生故障时接地极同样不能起到抑制故障的作用,还会对系统

运行产生重大危害^[9-10]。因此在张北工程中,对接地电阻进行实时监测十分必要。

由于张北工程是第一个完全金属回线系统,对于站内接地极并没有现成的监测方法。综合考虑监测需求、技术复杂度、设备成本、工程经验等因素,对张北工程接地电阻进行监测可以选用电流电压法、注入法。

2.1 电流电压法

在接地电阻和入地点之间增加 CT 和 PT,系统正常运行时,CT 和 PT 无电流电压。一旦直流系统发生接地故障,接地电阻串入故障回路,CT 与 PT 就有故障电流和对地电压。通过 CT 和 PT 有无电流、电压判断接地系统是否正常。如果采用电压电流法,就要考虑 CT 和 PT 的量程选择问题,选取多大的量程能够完全覆盖故障电流、电压。关于 CT 和 PT 的量程选择,根据张北工程主回路参数报告^[11],利用 PSCAD 软件进行建模仿真,在两个接地换流站做了 4 种类型的典型故障试验:故障类型 1,张北站阀侧交流相接地故障;故障类型 2,北京站阀侧交流相接地故障;故障类型 3,北京站上桥臂内电抗器与换流阀之间接地故障;故障类型 4,北京站下桥臂内电抗器与换流阀之间接地故障。

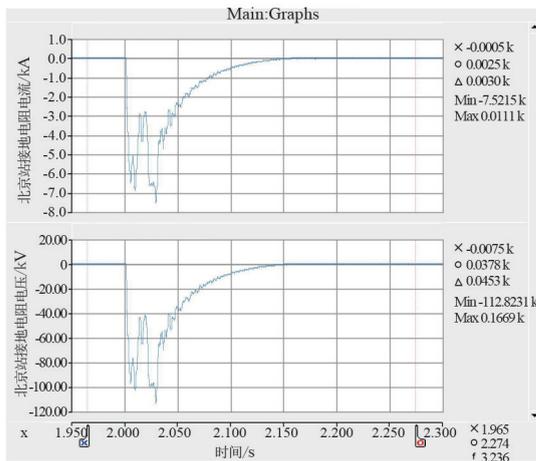


图 2 故障类型 1 电压电流波形

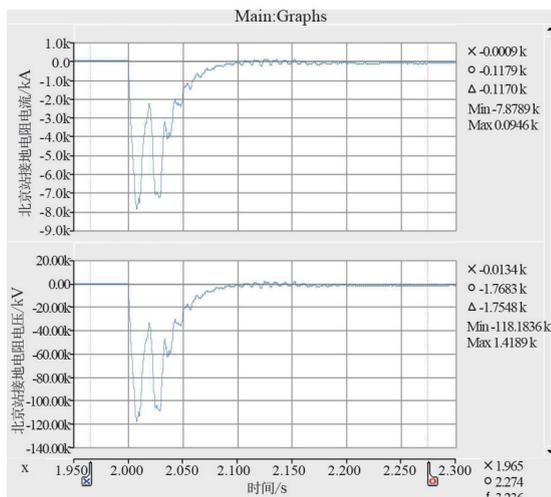


图 3 故障类型 2 电压电流波形

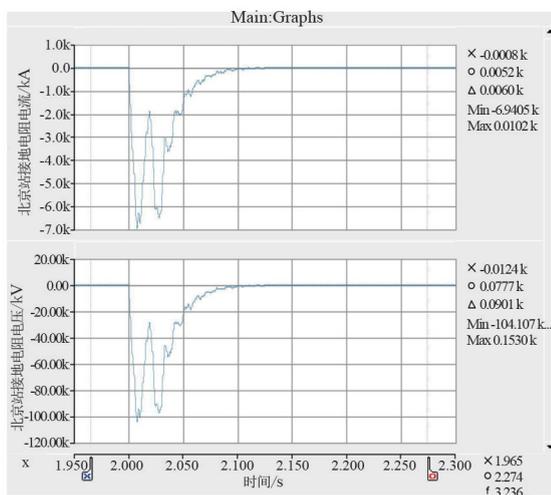


图 4 故障类型 3 电压电流波形

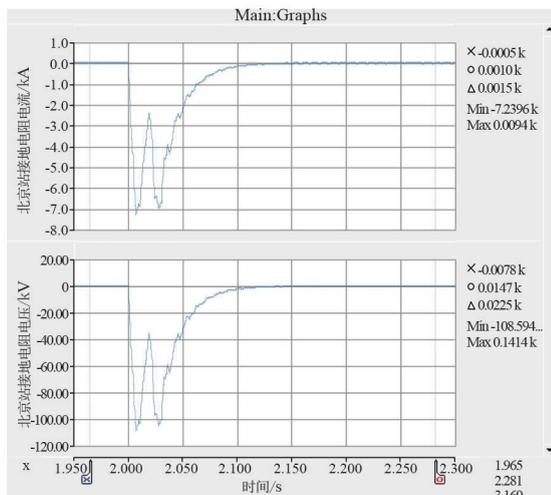


图 5 故障类型 4 电压电流波形

4 类故障的接地电阻承载的电流、电压数值如表 1 所示,波形分别如图 2—图 5 所示。

表 1 4 类故障的接地电阻电压电流值

换流站	故障类型	接地电阻 电流/kA	接地电阻 电压/kV
张北站	故障类型 1	7.52	112.8
	故障类型 2	7.87	118.2
北京站	故障类型 3	6.94	104.1
	故障类型 4	7.24	108.6

通过仿真试验可得,控制保护正常动作时,最严重故障类型为北京站阀侧单极接地故障(故障类型 2),对应接地电阻的最大耐受电压为 118.2 kV,电流为 7.87 kA。考虑到故障时刻交流电网相位角的影响

响,应在该仿真最大耐受电压的基础上保留裕量。可在此数据的基础上选择合适量程的 PT 和 CT 用以故障观测。

采用电流电压法只需在接地回路装设合适量程的 CT 和 PT 设备,甚至只装设 CT 或 PT 设备中的一种,将 CT、PT 监测值接入后台监测系统显示即可。此方法结构简单、成本较低,但有两个不可回避的缺点:1)不能实时监测接地电阻的运行状况,只有当系统发生故障时监测系统才有数值显示;2)更为严重的是,当对称双极运行状态下接地点开路时中性母线电压波动不明显,无法直接判断开路故障。

2.2 高频注入法

高频注入法是在接地系统中注入一个持续的恒定大小的高频电流信号,根据此注入信号的返回电流、电压数值,利用欧姆定律可以计算出接地电阻的大小来判断接地系统运行状况。接地系统正常时,监测电流和电压基本恒定,计算出的接地电阻维持在 $15\ \Omega$ 左右。当接地电阻故障时,计算出的电阻值将随着故障情况围绕 $15\ \Omega$ 波动变化,若接地极出现接地或开路的极端工况,电阻值会相应趋于 0 或无穷大。

采用高频注入法监测系统可以实时显示接地电阻的阻值,通过阻值有效判断接地系统正常运行及短路、开路故障,有利于运行人员监盘。但此方法也有弊端:为了使注入电流不影响主系统设备及直流电网,需要在监测回路上架设注入滤波器和阻波器。所以注入法需要增加较多的一次设备,成本较高。

3 接地电阻监测系统与一次系统配合

3.1 监测系统的参数

常规高压直流输电工程接地极引线长度基本在 $60\sim 100\ \text{km}$ 。长距离的输电线路,单位线长上的分布电感、分布电容、分布电阻和分布电导不能忽略,应等效为分布参数模型进行分析,所以监测装置注入信号在回路上传输要考虑阻抗匹配^[12-14]。这就需要考虑交流信号的频率选择和注入滤波器、阻波器的参数匹配。注入电流频率的选择,有以下原则:1)避开直流系统特征谐波;2)频率越高越好;3)考虑测量回路采集步长以及一次设备尺寸。综合考虑上述 3 个原则,目前所有常规直流工程运用注入法对接地极引线进行监测均选用 $13.95\ \text{kHz}$ 。

鉴于张北工程系统特性和接地电阻位置:首先,柔性直流系统特征谐波极小,可忽略不计,所以该工程不用考虑避开特征谐波的问题;其次,接地点在站内经电阻直接接地,接地系统为集中参数回路,不用考虑阻抗匹配问题。所以一次设备的配置比较常规的直流接地极引线阻抗监测,可直接减少入地点阻波器,极线侧阻波器是否需要将在下一章重点讨论,暂时保留主系统侧阻波器,张北工程接地电阻监测主回路如图 6 所示。注入器将监测信号注入接地系统,通过大地形成回路,监测装置通过信号电缆采集注入回路的电流电压值,计算出接地电阻的阻值。

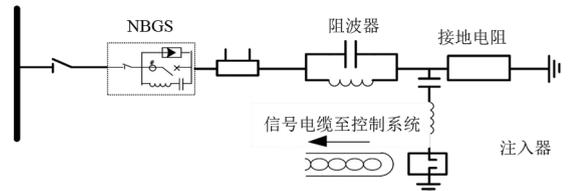


图 6 张北工程接地电阻监测原理

3.2 一次设备配合

常规的高压直流工程接地极线监测,为了调整注入滤波器的谐振频率,阻波器的截止频率为 $13.95\ \text{kHz}$,根据 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,结合一次设备体积及现场占地,一般选取的电感、电容参数如表 2 所示。

表 2 注入滤波器、阻波器技术参数

名称	电容/nF	电感/mH
注入滤波器	13.64	9.54
阻波滤波器	65.00	2.00

因监测回路极短不用考虑阻抗匹配,张北工程监测信号频率选择也无须越高越好,原则上任何频率均可以,工频下即可对接地电阻进行监测。但考虑到一次设备的占地面积不宜过大及固有装置再利用节省成本,考虑继续选用频率为 $13.95\ \text{kHz}$,注入器和阻波器技术参数与表 2 也相同。

4 阻波器对主系统的影响

下面讨论柔性直流系统接地极线路配置阻波器的合理性和必要性,并进一步研究阻波器的配置对张北直流电网系统的影响及范围。

4.1 设置阻波器的必要性

若极线侧不装设阻波器,监测系统注入器向接地极注入 $100\sim 150\ \text{mA}$ 的 $13.95\ \text{kHz}$ 频率交流

电流,将在接地电阻非接地端形成 1.5~2.25 V 的对地交流电压。当直流电网中由于接地点转移或发生接地故障,形成两个接地点时,阻抗监测的高频交流电流将在整个直流电网中流通。

其次,考虑到张北柔性直流电网的可扩展性,同时考虑线路架构具备不同的组合方式,架空线路的电容、电感参数不能明确。因此若不设置阻波器,直流电网架空线路及金属回线的电容、电感参数有可能引发 13.95 kHz 频率下的直流电网系统谐振。例如,一条金属回线直挂在北京站中性线母线上,或在距离北京站中性线母线特定距离的金属回线处发生接地故障,若该段金属回线的杂散电容及杂散电感参数乘积恰为 0.13 (nF×H),则会导致系统振荡,整个直流电网的对地电压将发生大幅振荡,影响系统稳定。

因此,为保障张北柔性直流电网的安全稳定运行,应在接地极线路处装设阻波器,避免监测装置可能对张北柔性直流电网和设备造成的影响。

4.2 配置阻波器对直流电网影响的理论分析

电感与电容元件并联构成的阻波器,其直流分量阻抗为 0,对直流电网完全无影响。阻波器工频分量阻抗可以按式(1)计算得到,整体呈感性元件,换言之可以忽略电容元件,近似为该通路在接地电阻上串联了 2 mH 的电感元件。考虑到电感元件较小,对系统影响也可以近似忽略。

$$Z = sL // \left(\frac{2}{sC} \right) = 2\pi Lf // \left(\frac{1}{2\pi Cf} \right) = 0.628 \text{ } 3 \text{ } \Omega \quad (1)$$

对于 13.95 kHz 频率分量,阻波器阻抗近似无穷大,即开路状态,此时直流电网系统与接地电阻相互独立。因此需要考虑各类特殊工况下,尤其故障工况下是否会造成 13.95 kHz 频率分量的过电压问题。但经过对系统操作过电压的频域分析^[15-16],13.95 kHz 频率对应的过电压幅值分量相对于过电压峰值非常小,可以忽略其影响。

综上所述,阻波器可以阻断 13.95 kHz 频率电气量对张北柔性直流电网的影响,且注入信号形成的交流对地电压会被限制在接地电阻回路内部,不会对直流电网的正常运行造成影响。

4.3 配置阻波器对直流电网影响的仿真试验

下面将通过仿真试验,确认在特殊工况及接地故障工况下,阻波器对直流电网及一次设备的影响。

对于系统非单点接地的特殊工况,选取典型工况进行仿真,以验证各类接地故障工况下阻波器对直流电网运行产生的影响。具体选取的仿真工况包括:接地点转移过程中北京站、丰宁站短时双站接地工况;直流电网架空线路及母线接地故障工况;换流阀阀内接地故障工况等。3 个故障试验分别定义为试验 1、试验 2 和试验 3。

试验 1:丰宁站至北京站的金属回线开断,系统双极不对称。正极系统额定功率运行,张北站 0 MW,康保站 750 MW,北京站-1500 MW,丰宁站定直流电压;负极系统空载运行。仿真时序为:初始北京站接地,2 s 闭合丰宁站接地开关,2.1 s 断开北京站接地开关。试验录波如图 7 所示。

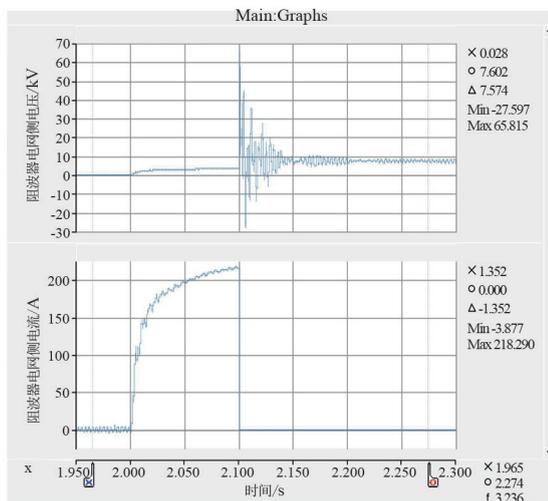


图 7 试验 1 电压电流波形

图 7 波形中,阻波器电压侧电压在 2.1 s 后出现震荡,是由于该时刻断开北京站接地极开关导致。接地点转移完成后网侧电压电流稳定。

试验 2:张北站至北京站线路通道退出,张北站出口处发生接地故障,系统双极不对称。正极系统额定功率运行,张北站 1500 MW,康保站 0 MW,北京站-1500 MW,丰宁站定直流电压;负极系统空载运行。仿真时序为:初始北京站内接地,北京站至张北站间线路通道退出,2 s 闭合设置张北站出口正极架空线接地故障,2.003 s 闭锁张北站正极换流器,断开交、直流断路器及金属回线 MBS。试验录波如图 8 所示。

图 8 中左侧为不带阻波器试验波形,右侧为带阻波器试验波形(下同),从录波文件看有无阻波器时各项参数几乎一致,波形也基本重叠。由此可以得出阻波器的配置对直流电网几乎没有影响。

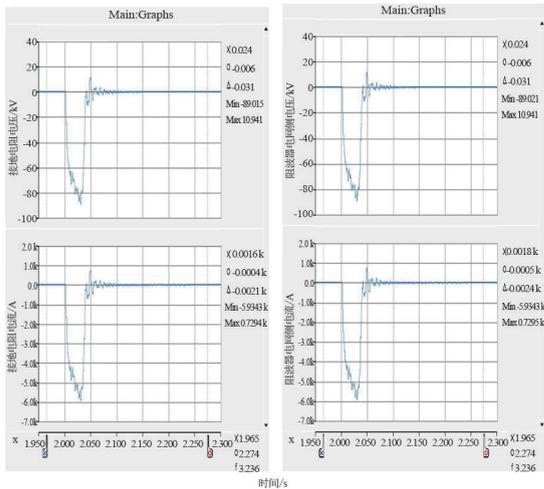


图 8 试验 2 电压电流波形

试验 3:四端环网双极额定功率运行工况,系统双极对称,张北站 3000 MW,康保站 1500 MW,北京站-3000 MW,丰宁站定直流电压。仿真时序为:初始北京站站内接地,2 s 设置北京站换流阀侧单相接地故障,2.003 s 闭锁张北正极换流器,断开交、直流断路器及金属回线 NBS。试验录波如图 9 所示。

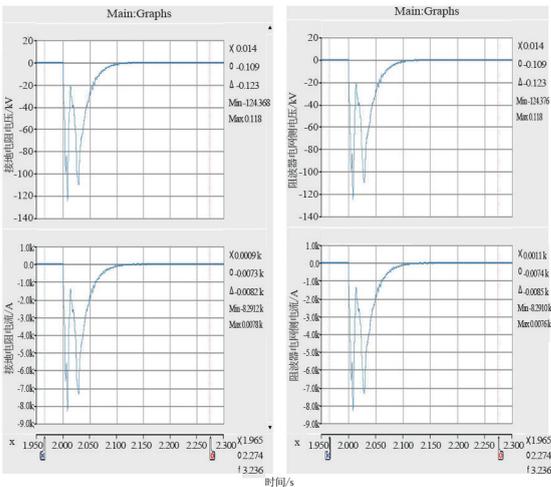


图 9 试验 3 电压电流波形

试验 3 同试验 2 一样,可以得出阻波器并不会影响直流电网的结论。

另外,在进行试验 2 和试验 3 时,还对比了不带阻波器和带有阻波器两种情况下,4 个换流站的正极对地电压和中性线电压。图 10 和图 11 是试验 2 时的对比波形,可以看出极线电压和中性线电压在有无阻波器情况下,波动轨迹基本重叠。阻波器存在与否并不会对极线和中性线电压产生影响。

试验 3 录波情况与图 10、图 11 基本完全一致。由此可以得出,阻波器对直流系统影响极小可以忽略。

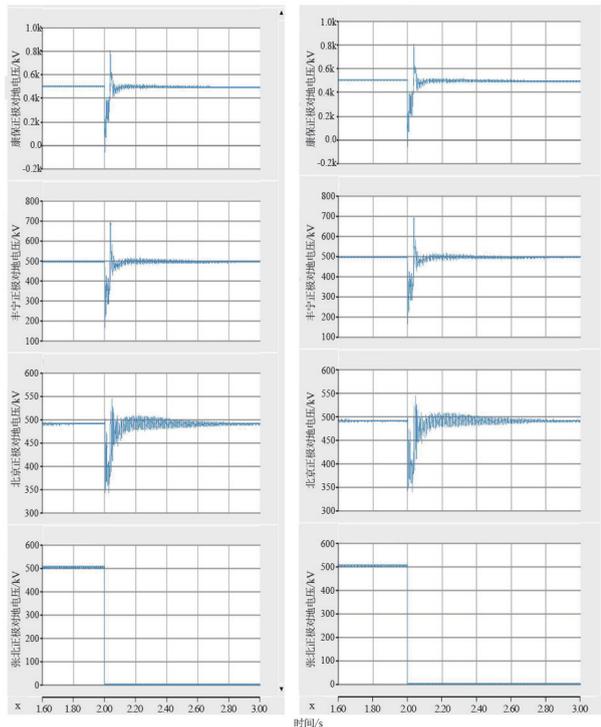


图 10 试验 2 时极线电压波形对比

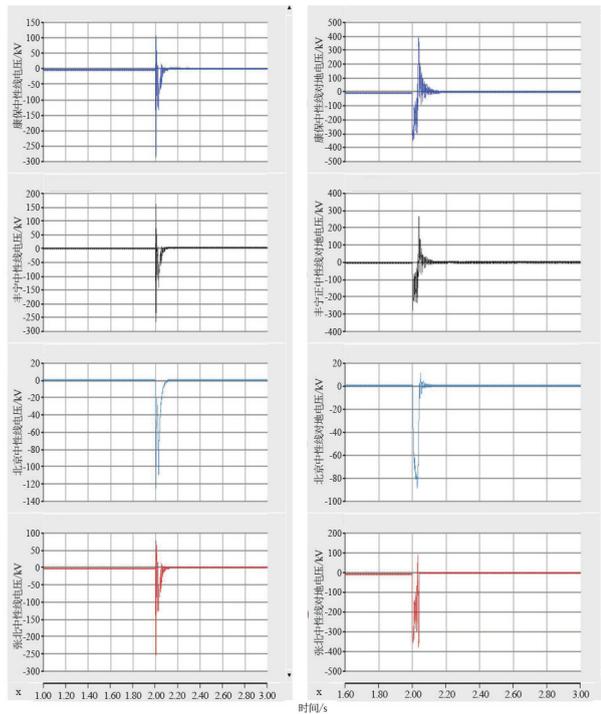


图 11 试验 2 时中性线电压波形对比

4.4 接地电阻监视系统仿真试验

下面将通过仿真试验,验证在直流正常运行工况下,接地电阻正常和电阻故障状态下的接地电阻实时监测功能,如图 12—图 15 所示。

保持直流输电系统运行,采用 13.95 kHz 频率、有效值为 0.17 A 的高频电流通过电容、电感谐振回

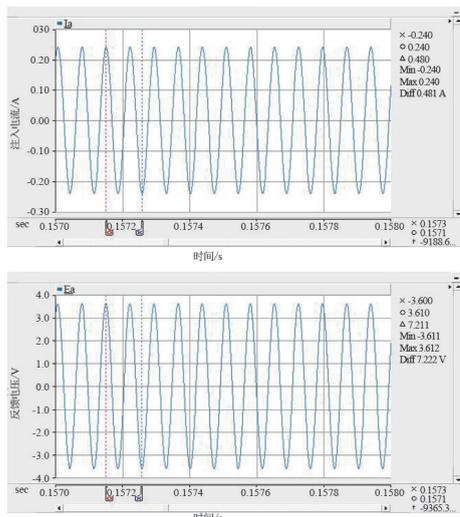


图 12 验证 1 电压电流波形

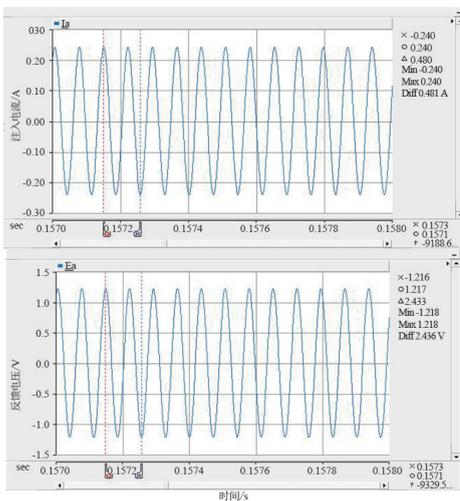


图 13 验证 2 电压电流波形

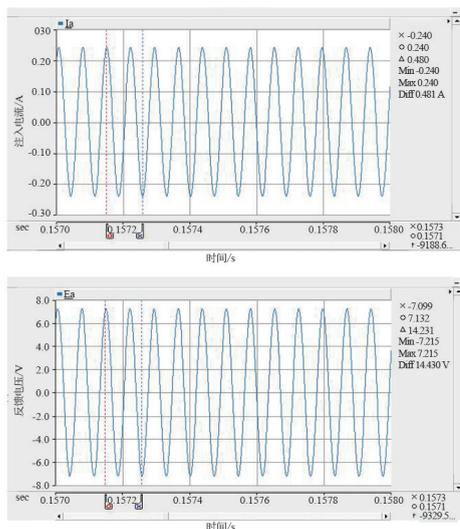


图 14 验证 3 电压电流波形

路注入接地电阻系统,分别验证接地电阻为 $15\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 以及开路状态下,电阻监测系统测量电压波形和实时监测功能。

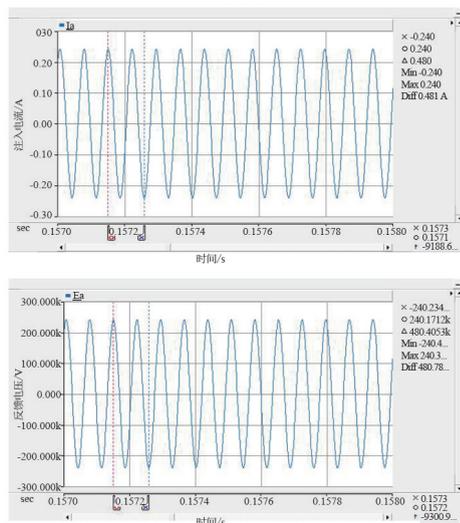


图 15 验证 4 电压电流波形

验证 1:设置接地电阻为 $15\ \Omega$,计算接地电阻值与设定值一致,接地电阻正常。

验证 2:设置接地电阻为 $5\ \Omega$ 左右,计算接地电阻与设定值一致,较正常值偏小。

验证 3:设置接地电阻为 $30\ \Omega$ 左右,计算接地电阻值与设定值一致,较正常值偏大。

验证 4:设置接地电阻为开路状态,计算接地电阻值大于 $1 \times 10^6\ \Omega$,与设定值一致,并产生接地电阻开路告警。

通过在不同接地电阻阻值下的仿真波形,可以看出高频注入法可以实时监测计算接地电阻变化,当接地电阻超过设定阈值时产生报警信号送监控系统,为接地电阻异常的快速处置提供强大支撑。

5 结论

通过对高频注入法的分析以及阻波器对主系统回路影响的理论分析和仿真试验结果,可以得出以下结论:

1)注入法可以对接地电阻进行实时监测,注入信号频率选择 $13.95\ \text{kHz}$,并在直流电网回路中配置阻波器;

2)配置阻波器阻断了 $13.95\ \text{kHz}$ 信号对张北直流电网系统的影响,避免在直流电网架空线路及金属回线的电容、电感参数可能导致的 $13.95\ \text{kHz}$ 频率直流电网系统谐振;

3)通过理论分析和系统仿真验证,配置阻波器后并不影响直流电网系统的正常稳态运行和直流电网接地故障、换流阀接地故障等故障类型下的故障保护。

所以,注入法可以有效实时监测接地电阻的阻

值,观测接地电阻运行状况,准确掌握各种工况下接地极运行状态。

参考文献

- [1] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.
- [2] 吴庆范,付艳,张克辉,等.柔性直流输电系统交流母线差动保护研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):100-104.
- [3] 滕予非,王鱼,焦在滨,等.特高压直流输电系统接地极引线阻抗监视策略[J].电工技术学报,2016,31(11):157-164.
- [4] 陈朋,李梅航,严兵,等.适用于多端柔性直流输电系统的通用控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(21):47-52.
- [5] 杨柳,黎小林,许树楷,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J].南方电网技术,2015,9(1):63-67.
- [6] 张悛宁,束洪春,田鑫萃,等.特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):1-7.
- [7] 徐韬,徐政,张哲任,等.特高压直流输电圆环型接地极电流场计算[J].高电压技术,2012,38(6):1445-1450.
- [8] 孙帮新,陈辉祥.高压直流输电共用接地极技术研究[J].高电压技术,2006,32(12):150-153.
- [9] 郭剑,陆家榆.直流接地极结合均流系统的计算模型与求解[J].中国电机工程学报,2008,28(19):1-6.
- =====
- (上接第19页)
- [3] 艾鹏,滕予非,王晓茹,等.计及紧急直流功率支援的扰动后稳态频率预测算法[J].电力系统自动化,2017,41(13):92-99.
- [4] 刘克天,王晓茹,薄其滨.基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2188-2195.
- [5] 文云峰,赵荣臻,肖友强,等.基于多层极限学习机的电力系统频率安全评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(1):133-140.
- [6] 胡益,王晓茹,滕予非,等.基于多层支持向量机的交直流电网频率稳定控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4104-4117.
- [7] 仇怡超,闻达,王晓茹,等.基于深度置信网络的电力系统扰动后频率曲线预测[J].中国电机工程学报,2019,39(17):5095-5104.
- [8] 张怡,张恒旭,李常刚,等.深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J].中国电机工程学报,2021,41(10):3392-3406.

- [10] 程志友,李小静,汤明金,等.一种快速的配电网单相接地故障时域测距方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):24-30.
- [11] 郭庆雷,吴延坤.张北可再生能源柔性直流电网示范工程主回路参数技术报告[R].北京:国网经济技术研究院,2017.
- [12] 曾祥君,张玺,阳韬,等.高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):132-137.
- [13] 张纯,滕予非.特高压直流输电系统接地极线路保护性能分析[J].四川电力技术,2017,40(1):84-88.
- [14] 邹强,马云龙,杨建明,等.串联多端直流输电系统接地极拓扑研究[J].电力工程技术,2018,37(5):132-136.
- [15] 杨勇,李立涅,杜林,等.采用时频矩阵奇异值分解和多级支持向量机的雷电及操作过电压识别[J].电网技术,2012,36(8):31-37.
- [16] 张洛.电力系统操作过电压特征提取和识别研究[D].成都:西华大学,2016.

作者简介:

黄宇(1987),男,硕士研究生,高级工程师,从事特高压直流输电系统检修工作;

吴金波(1989),男,工程师,研究方向为直流控制保护系统;

唐世雄(1992),男,工程师,从事特高压直流输电系统检修工作;

陈香香(1986),女,硕士研究生,工程师,研究方向为直流输电控保系统硬件开发;

朱生辉(1987),男,助理工程师,研究方向为直流输电控保系统。

(收稿日期:2022-10-08)

- [9] WANG Q, LI F, TANG Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(6):4557-4568.
- [10] 李冠争,李斌,王帅,等.基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测[J].电网技术,2021,45(7):2492-2502.
- [11] 赵荣臻,文云峰,叶希,等.基于改进堆栈降噪自动编码器的预想事故频率指标评估方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4081-4092.
- [12] CHEN Z, XIAO X, LI C, et al. Real-time transient stability status prediction using cost-sensitive extreme learning machine[J]. Neural Computing and Applications, 2016,27(2):321-331.

作者简介:

陈振(1991),男,博士,研究方向为人工智能在能源电力系统中的应用。

(收稿日期:2022-08-31)

输电线路谐波过电压保护实现方法

丁宣文,朱鑫,周文越

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:在弱联系电网中,一台普通主变压器空载合闸后,随着其引发的励磁涌流注入到电网中,极有可能在系统末端产生较大的谐波畸变导致系统末端出现严重的谐波过电压,造成设备与负荷的损毁,带来严重的经济损失。为解决现有输电线路过电压保护无法反应谐波过电压的问题,提出了输电线路谐波过电压保护实现方法。该方法可正确反应输电线路中的基波过电压和谐波过电压,有效隔离谐波过电压在电网中的传播,保护设备免受谐波过电压的伤害。并通过试验验证了所提方法的有效性。

关键词:继电保护;谐波过电压;过电压保护;励磁涌流;输电线路

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0066-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230311

Implementation Method of Harmonic Overvoltage Protection for Transmission Line

DING Xuanwen, ZHU Xin, ZHOU Wenyue

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

Abstract:In weak-link power grids, after a normal main transformer closing without load, the inrush current is injected into power grid. It is very likely to cause large harmonic distortion at the end of the system, thus lead to serious harmonic overvoltage, which can cause damage to electrical equipment and load and bring serious economic losses. In order to solve the problem of over-voltage protection which is unable to respond to harmonic overvoltage for the existing transmission lines, the method of harmonic overvoltage protection for transmission lines is put forward. The proposed method can correctly respond to fundamental overvoltage and harmonic overvoltage of transmission line, effectively isolate the propagation of harmonic overvoltage in power grid and protect equipment from harmonic overvoltage damage. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

Key words:relay protection; harmonic overvoltage; overvoltage protection; inrush current; transmission line

0 引言

对于采用串供式长线路等弱联系方式与主网相连的弱电网,其联络线上潮流较轻,联络线的运行方式近似于一条空载长线路。在此类电网中,若对电网中某台主变压器进行空载合闸操作,随着主变压器励磁涌流^[1-6]注入电网的谐波,极有可能在系统末端产生较大的谐波畸变,从而导致系统末端出现谐波过电压,引发设备与负荷的损毁,带来严重的经济损失。在四川省的藏区电网,就发生过多起因线路谐波过电压造成电力

设备或负荷受损的事件。随着川藏联网工程和藏中联网工程等弱联系电网的建成,此类问题将更加突出。

当线路出现过电压时,利用保护装置的及时动作可有效隔离过电压线路,因此给线路装设过电压保护^[7-9]可有效解决此问题。目前,现有过电压保护装置均是基于基波电压有效值实现其保护原理,仅能反应线路中的基波过电压,无法反应谐波过电压。当线路中谐波电压含量较大时,如何使保护装置正确反应线路中的谐波过电压、保护电网设备免受谐波过电压的侵害是继电保护技术人员亟待解决的问题。

1 谐波过电压产生机理

变压器在进行空载合闸操作时,在满足某些合闸条件时将产生很大的励磁涌流,其数值可达变压器额定电流的6~8倍。励磁涌流内含有大量的2次、3次、4次等谐波,当电网为弱电网且线路较长时,励磁涌流所激发的谐波电流会在电网沿线进行传播并被逐渐放大,最终将在线路的末端引发很大的谐波过电压^[10-11]。

这种过电压主要是由电压电流在输电线路中传输时的驻波效应产生的。对于空载线路末端,在考虑分布参数的影响下,其首末两端电压电流的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{\sin \beta l}{\cos \theta} \\ \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_1 \sin \beta l}{Z_c \cos \theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 为始端电压、电流; \dot{U}_2 为末端电压; β 为线路的传播常数,由线路的单位阻抗和导纳决定; Z_c 为特征阻抗,同样由线路的单位阻抗和导纳决定; l 为线路长度; θ 为 β 与 l 的乘积。

定义末端电压和始端电压的比值为过电压倍数。以3次谐波和5次谐波为例,其过电压倍数与线路长度的关系如图1所示。从图1可以看出,当线路长度接近1/4波长(对于3次谐波和5次谐波而言,1/4波长分别约为500 km和300 km)时,线路末端的电压降趋于无穷大。藏区电网的弱联系电网中存在大量的此类长距离线路,导致线路末端的谐波电压极易被放大到较高的值。

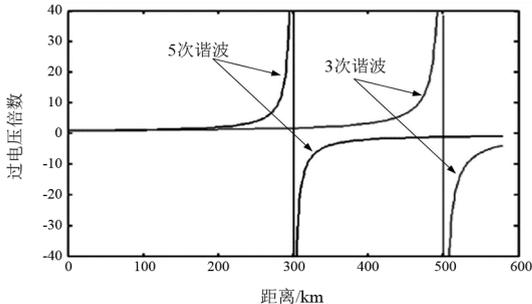


图1 谐波分布特性

2 现有过电压保护分析

对于现有的输电线路过电压保护装置,其过电

压保护的电压判据仅判断线路电压的基波有效值。即保护装置利用傅里叶算法,计算某个固定周期内(≤ 20 ms)的基波电压有效值,若此有效值大于过电压定值,则满足判据。

某110 kV藏区电网实际出现过的谐波过电压波形如图2所示。从图2可以看出:线路电压波形出现了严重的畸变,线路电压中含有大量的谐波分量,其中3次谐波含量尤为高;A相线路电压的峰值已达到167 kV(即1.85倍的额定电压),而A相线路电压的基波有效值基本保持恒定在线路的额定电压为63 kV。在此情况,即使线路配置有过电压保护,但由于基波电压有效值正常,过电压保护也不会动作。



图2 谐波过电压实际波形

3 谐波过电压保护实现方法

由上面的分析可知,在弱联系电网中,极大可能发生因励磁涌流导致线路末端出现谐波过电压的事件,而现有的过电压保护无法反应此类谐波过电压。因此,有必要在现有的过电压保护基础上,研究谐波过电压保护实现方法。

3.1 谐波过电压判据

现有的过电压判据是基于基波有效值实现的,此判据将自动忽略掉线路中的谐波电压,无法正确反应线路中的谐波过电压。因此引入谐波过电压判据来正确度量线路中谐波电压的大小。

从发生过的谐波过电压损坏电气设备的事件来看,谐波过电压对电气设备的伤害主要体现在高电压对电气设备绝缘的影响。若参考基波过电压判据,以谐波的有效值作为保护动作判据,但此有效值虽可正确度量谐波的大小,并不能代表全电压的大小。而导致设备绝缘受损的电压值并不只是电压中的谐波含量,而是全电压的大小。综上,定义谐波过电压判据如下:

1) 将全电压波形的瞬时值作为谐波过电压判据;

2) 考虑到判据的灵敏性,以工频周期 20 ms 作为一个判据计算周期,在保护动作延期内,每个计算周期均有至少一个电压采样点的绝对值大于瞬时值定值,则满足判据;

3) 为简化保护定值的整定,将基波过电压定值的 $\sqrt{2}$ 倍作为瞬时值定值。

3.2 保护装置硬件要求

现有的过电压保护装置,其 A/D 采样频率通常为 1200 Hz,即每个工频周期采 24 个点。在利用傅里叶算法^[12-15]计算基波有效值的情况下,此采样频率完全够用。但对于所提出的瞬时电压判据,由于需采集电压的瞬时值,在单个测量周期内,受采样率限制,可能存在测量结果躲过峰值附近的小区间而产生较大的误差(如图 3 所示),从而使得装置漏判该周期内的过压情况,引起保护拒动。

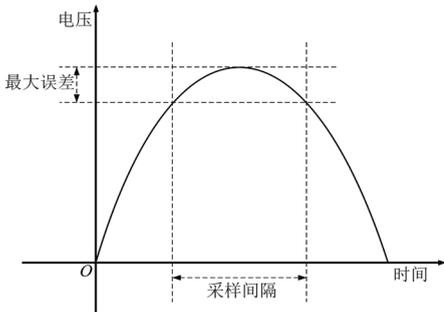


图 3 采样误差

采样过程中单个采样点电压值越限即视为过电压。如图 3 中,当相邻两测点以峰值时刻为 midpoint 时,实测值为峰值时刻偏移半个采样周期对应值,此时一个 n 次谐波周期内测得的谐波电压峰值的误差 $\delta\%$ 最大,满足式(2)。

$$\delta\% = \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} - n \times \frac{2\pi}{k} \times \frac{1}{2} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

式中: n 为谐波次数; k 为每个工频周期内采样点数。从式中可看出,谐波次数越大、采样率越低,误差越大。

励磁涌流的谐波以 2~7 次为主。以最大的 7 次谐波为例,误差与每个工频周期内采样点数的关系如图 4 所示。在 1200 Hz 的采样频率下,即每个工频周期采样点数为 24 时,误差约为 39%,可看出,若按目前保护装置的采样率,则误差将非常大。基于上述原因,为实现谐波过电压保护,需提升保护装置的采样频率。为降低保护装置的升级成本,提升后

的频率需为 1200 Hz 的整数倍,对于 7 次谐波,不同采样率的误差如表 1 所示。

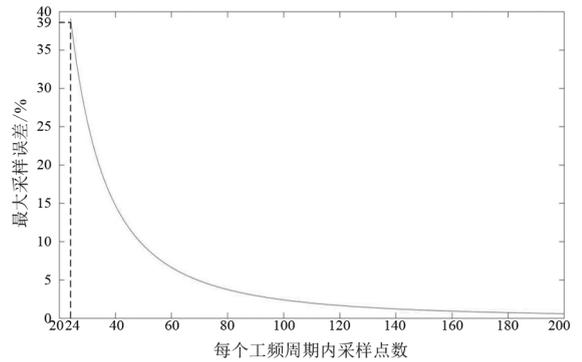


图 4 7 次谐波下采样误差与每个工频周期内采样点数的关系

表 1 7 次谐波采样误差

采样率/Hz	工频周期采样点数	最大采样误差/%
1200	24	39.12
2400	48	10.31
3600	72	4.63
4800	96	2.61
6000	120	1.68

DL/T 478—2013《继电保护和安全自动装置通用技术条件》规定:110 kV 及以上电压等级保护装置电压采样相对误差不大于 2.5%。考虑到 6000 Hz 的采样率制造难度太大,且需要升级保护底层平台。因此,将保护装置的采样频率定为 4800 Hz,其工频周期采样点数为 96,7 次谐波的最大采样误差为 2.61%。

另一方面,由于保护装置的采样频率提升了,A/D 前端的硬件滤波环节也应该进行相应的改变。考虑到励磁涌流的谐波以 2~7 次为主,则保护装置的硬件滤波环节应按照电压通道可保留 99% 的 7 次谐波设计。

3.3 保护动作逻辑

谐波过电压保护除具备反应谐波过电压能力的同时,还应具备常规过电压保护的功能。因此,设计谐波过电压保护的逻辑如图 5 所示。

对于图 5 所示的保护动作逻辑,需注意以下几点:

1) 在动作逻辑中,“ $U_A/U_B/U_C >$ 过电压定值”这个动作判据包含基波过电压和谐波过电压两个判据。由于两个判据使用同一个定值,在逻辑图中用同一个方框表示。但基波过电压判据使用的是过电压定值本身的值,而谐波过电压判据使用的定值则是保护程序在过电压定值自身数值的基础上乘以 $\sqrt{2}$ 。

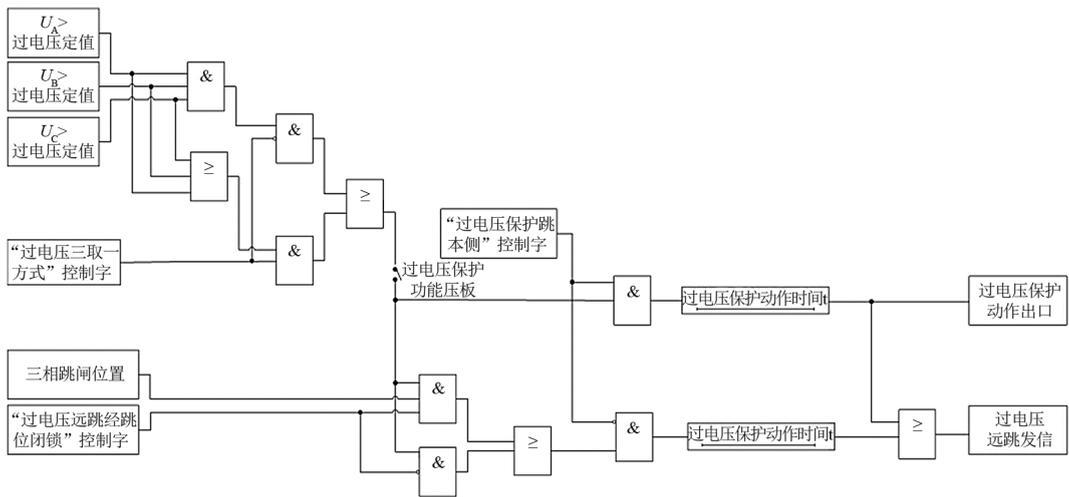


图5 谐波过电压保护动作逻辑

2) 基波过电压与谐波过电压采用或逻辑,任一过压元件动作时,过电压保护动作。

3) “过电压保护”功能压板退出时,过电压保护不出口跳闸,不远跳对侧。

4) “过电压保护跳本侧”控制字为1:当过电压元件满足时,“过电压保护动作时间”开始计时,延时满足后,过压保护出口跳本侧,同时不经跳位闭锁直接向对侧发过电压远跳信号。

5) “过电压保护跳本侧”控制字为0:当“过电压元件”和“三相跳闸位置”均满足要求时,“过电压保护动作时间”开始计时,延时满足后,过压保护不跳本侧仅向对侧发过电压远跳信号。但是,是否经本侧跳位闭锁发信由“过电压远跳经跳位闭锁”控制字整定。

4 谐波过电压保护试验

根据所提方法开发出了谐波过电压保护装置。为验证所提方法的有效性,对该装置进行谐波过电压保护专项试验。

4.1 理想电压波形下的保护试验

利用继电保护测试仪给谐波过电压保护装置加入基波电压与不同谐波电压叠加后的电压波形,测试保护装置的动作情况。

1) 动作时间测试:过电压跳闸方式整定为三取一,过电压保护定值 U_{zd} 整定为 75 V(二次值),过电压保护动作延时整定为 0.5 s,三相均加入额定电压值的基波电压,在 A、B、C 三相分别叠加 2 次、3 次、5 次、7 次谐波电压,测试保护的过电压保护动作时间。其中,所叠加谐波的有效值为 $1.1U_{zd} \sim U_n$ (U_n 为额定电压)。

保护动作时间如表 2 所示。

表2 保护动作时间测试结果

叠加谐波次数	A相动作时间/s	A相误差/%	B相动作时间/s	B相误差/%	C相动作时间/s	C相误差/%
2	0.534 8	6.96	0.532 8	6.56	0.533 6	6.72
3	0.534 3	6.86	0.533 3	6.66	0.533 4	6.68
5	0.534 1	6.82	0.533 0	6.60	0.533 1	6.62
7	0.534 7	6.94	0.532 9	6.58	0.532 8	6.56

2) 动作值精度测试:过电压跳闸方式整定为三取一,过电压保护定值 U_{zd} 整定为 75 V(二次值),过电压保护动作延时整定为 0.5 s,三相均加入额定电压值的基波电压,将 A、B、C 三相分别叠加的 2 次、3 次、5 次、7 次谐波电压设为变化量,按谐波与基波实现峰值叠加原则控制谐波与基波间的相位差。谐波电压从 0.9 倍整定值往上升至保护动作,步长不大于 1‰ 整定值,单步变化时间不小于整定延时 +100 ms,其初始谐波电压有效值为 $0.9U_{zd} - U_n$ 。测试保护动作时的动作电压值与理论动作电压值差异,测试结果如表 3 所示。理论动作电压应为保护整定值的 $\sqrt{2}$ 倍,即 106.05 V。

表3 保护动作值精度测试结果

叠加谐波次数	A相动作电压/V	A相误差/%	B相动作电压/V	B相误差/%	C相动作电压/V	C相误差/%
2	105.57	0.45	105.81	0.23	105.75	0.28
3	105.56	0.46	105.78	0.25	105.74	0.29
5	105.53	0.49	105.77	0.26	105.74	0.29
7	105.50	0.52	105.80	0.24	105.74	0.29

从理想电压波形下的保护试验可看出,谐波过电压保护能正确反应谐波过电压。在保护动作时间的测试中,谐波过电压保护的过电压保护动作时间偏差在 7% 以内;在保护动作值精度测试中,谐波过电压保护的

动作值精度在 0.6% 以内。两项测试结果均较好。

4.2 实际电压波形下的保护试验

利用继电保护测试仪的波形回放功能,导入实际的谐波过电压波形文件,设置相关波形回放参数后,启动测试仪进行波形回放,检验保护装置在特定谐波过电压水平下动作行为的正确性。谐波定值和时限设定与理想电压波形下的试验一致。所导入的两个实际电压试验波形如图 6 和图 7 所示。

试验结果如表 4 所示。从试验结果中可以看出,将两个实际电压波形加入到保护装置中,保护均正确动作,再次验证了所提方法的有效性。

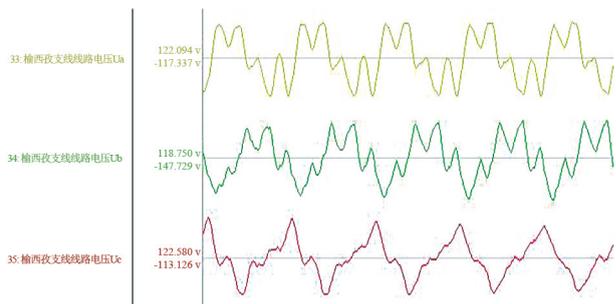


图 6 试验波形 1

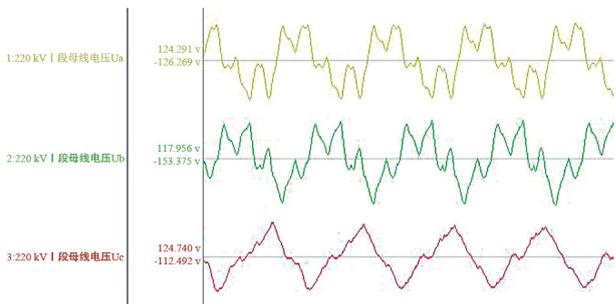


图 7 试验波形 2

表 4 实际电压波形测试结果

试验电压波形	动作时间/s
波形 1	0.535 8
波形 2	0.534 9

5 结 论

上面针对现有过电压保护无法反应谐波过电压的问题,从保护判据、保护装置硬件要求、保护动作逻辑三方面入手,提出了谐波过电压保护实现方法。通过理想电压波形和实际电压波形下的试验,验证了所提方法的有效性。所提出的谐波过电压保护可有效解决弱联系电网中的谐波过电压问题,依据所提方法研制的谐波过电压保护装置已成功应用于川藏联网、藏中联网工程中的若干条长线路中,作为控制谐波过电压的主要手段之一。

参考文献

- [1] 傅伟,赵莉华,梁勇,等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
- [2] 凌光,苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
- [3] 范兴明,葛琳,张鑫,等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 54-59.
- [4] 王业,陆于平,蔡超,等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-711.
- [5] 王雪,王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
- [6] 李振强,谷定燮,戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-392.
- [7] 焦在滨,金吉良,行武,等. 交直流混联电网自适应交流过电压保护方案的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2541-2547.
- [8] 张哲任,徐政,薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
- [9] 杨凤民,罗旻,郑琰. 架空绝缘线路过电压保护技术的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 68-70.
- [10] 滕予非,丁理杰,汤凡,等. 基于谐波互阻抗的励磁涌流引发谐波电压畸变风险识别[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 155-161.
- [11] 魏巍,向天堂,丁理杰,等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析以及抑制措施研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(24): 24-32.
- [12] 李斌,李永丽,贺家李. 一种提取基波分量的高精度快速滤波算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 39-43.
- [13] 刘益青,高伟聪,孙天德. 适用于数字化保护的改进递推傅里叶算法[J]. 电网技术, 2006, 40(5): 1601-1606.
- [14] 薛春旭. 电力系统微机继电保护交流采样算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [15] 韩正庆,高仕斌,李群湛. 基于半波傅里叶算法的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 60-63.

作者简介:

丁宣文(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

朱鑫(1988),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期:2022-08-30)

变压器油色谱检测数据误差来源浅析

田倩倩, 兰新生, 王 杰, 胡仕红, 董仲明, 王 燕
(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 变压器油色谱检测作为充油设备状态评价的重要技术之一, 其测量数据的微量偏差, 都将导致对设备状态的误判。文中基于2022年度35个实验室间色谱比对数据, 并结合试验谱图等, 从色谱检测过程中环境信息输入偏差、仪器零部件老化及试验细节把控不严3个因素着手, 对引起变压器油色谱数据偏差的可能原因进行简要分析; 最后, 对油色谱检测中仪器的维护、试验环节的把控提出了处理建议。

关键词: 变压器; 绝缘油; 色谱检测; 误差来源

中图分类号: TM 41 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0071-03

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230312

Superficial Analysis on Error Source of Transformer Oil Chromatographic Detection Data

TIAN Qianqian, LAN Xinsheng, WANG Jie, HUSHihong, DONG Zhongming, WANG Yan
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Transformer oil chromatographic detection is one of the important techniques for state evaluation of oil-filled equipment. The trace deviation of the measured data will lead to the misjudgment of the state of equipment. Based on the chromatographic data in 2022 compared among 35 laboratories, and combined with the experimental spectra, the possible causes for the deviation of transformer oil chromatographic data are briefly analyzed from environment information input deviation, aging equipment parts and test details in the process of chromatographic detection. Finally, some suggestions are proposed for instrument maintenance and test control in chromatographic detection.

Key words: transformer; insulating oil; chromatographic detection; error sources

0 引言

绝缘油因具有良好的绝缘、冷却、灭弧等特点, 被广泛应用于电力变压器、套管、互感器、断路器等高压电器设备中。当设备内部出现放电、过热等缺陷时, 会引起绝缘油中溶解气体的量值产生变化。油色谱检测是对充油设备油中溶解气体跟踪的最直接的手段, 因其灵敏度高、试验操作便捷、适用范围广等优点, 目前在充油设备故障检测与诊断中受依赖度最高^[1-4]。但在现场工作中, 因检测设备零部件老化、检测过程中细节把控不严等原因, 导致检测结果偏离真实值, 造成了对设备状态的误判。

为掌握各实验室的仪器状态、人员的检测能力, 高效支撑充油主设备的故障分析与诊断, 国网四川省电力公司电力科学研究院于2022年7月组织四川省电力公司域内所有实验室开展油色谱比对试验。比对样品为低、中两个不同浓度的油样, 要求每个检测人员均需完成这两个样品的检测, 且每个样品均提供连续两针的检测值。最终共收到35个实验室、64台色谱仪、105人的比对结果。通过对各实验室比对结果进行分析, 一一核对各检测人员比对全过程的数据、图谱等, 对数据进行深度挖掘, 并结合个人的工作经验, 下面对油色谱检测数据误差的来源进行简要分析。

1 环境信息输入偏差的影响

比对试验所提供的低浓度(样品一)、中浓度(样品二)两个油样的各组分检测结果中位值如表 1 所示。

表 1 各组分检测结果中位值 单位: $\mu\text{L/L}$

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一	1.92	1.05	1.10	0.46	16.22	64.10	306.19
样品二	27.89	20.96	15.65	6.55	68.64	513.51	2 455.95

根据 GB/T 17623—2017《绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法》中绝缘油中溶解气体各组分浓度计算公式,如式(1)所示^[5],可知采用气相色谱法对油中溶解气体进行检测时,试验环境温度、环境压力都直接参与检测结果的计算。通过公式计算可知,当输入的环境压力高于真实值,将导致检测结果高于真实值;当输入环境温度高于真实值,将导致检测结果低于真实值。所以,准确输入试验环境信息是试验必要环节。

$$X_i = 0.929 \times \frac{P}{101.3} \times c_{si} \times \frac{\bar{h}_i}{h_{si}} \left(K_i + \frac{V'_g}{V_1} \right) \dots$$

$$\text{其中: } V'_g = V_g \times \frac{323}{273+t}$$

$$V_1 = V_1 [1 + 0.0008 \times (50 - t)] \quad (1)$$

式中: X_i 为 101.3 kPa 和 20 °C 时油中溶解气体 i 组分浓度, $\mu\text{L/L}$; P 为试验时环境大气压, kPa; \bar{h}_i 为样品气中 i 组分的平均峰高, $\text{mV} \cdot \text{s}$; h_{si} 为标准气中 i 组分的平均峰高, $\text{mV} \cdot \text{s}$; V'_g 为 50 °C 时试验压力下平衡气体体积, mL; V_1 为 50 °C 时的油样体积, mL; t 为试验时的室温, °C; V_g 为室温 t 时试验压力下平衡气体体积, mL; V_1 为室温 t 时所取油样体积, mL; 0.0008 为绝缘油的膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; 0.929 为油样中溶解气体浓度从 50 °C 校正到 20 °C 时的温度校正系数; K_i 为 50 °C 时油中溶解气体 i 组分的奥斯特瓦尔德系数; c_{si} 为标准气中 i 组分的浓度。

2 仪器零部件老化的影响

通过对各实验室进行比对试验,从仪器、人员、配件等多方面进行分析,发现大部分的检测结果中,仪器零部件老化主要会对单组分或几种组分引起较

大偏差,不会同时引起所有组分的偏差,其中引起误差最直接的因素就是色谱柱失效。

2.1 色谱柱失效

2.1.1 引起 H₂ 结果偏高

H₂ 作为主要故障特征气体之一,在设备发生放电性、过热性故障时均会产生^[6],与其他故障特征气体联合分析,可有效评判设备的故障类型。但如果在检测量值上发生较大的偏差,则可能对设备状态进行误判。例如 1 号实验室,其比对结果如表 2 所示,可以看出低浓度(样品一)、中浓度(样品二)样品的检测结果显示 H₂ 量值都明显偏高,但其他组分未见明显差别。

表 2 1 号实验室的比对结果 单位: $\mu\text{L/L}$

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一	测定值 1	2.12	1.12	1.16	0.47	27.14	59.47
	测定值 2	2.17	1.13	1.20	0.46	27.83	62.63
样品二	测定值 1	30.74	23.55	17.03	6.96	84.66	567.69
	测定值 2	29.56	22.38	16.03	6.65	84.34	568.23

调取谱图发现 H₂ 组分所在的数据展示通道,如图 1 所示,因检测时间设置较长,在保留时间 1.0 min 左右,有一个峰高较高的干扰峰。在干扰峰的影响下,H₂ 的峰形不能直观地完整显示。局部放大 H₂ 峰,如图 2 所示,可发现在 H₂ 峰后面(保留时间 0.62~0.72 min)有个干扰峰。因没有对检测峰进行人工确认及删除,导致两个峰均被识别成 H₂,最终致使 H₂ 的检测结果明显偏高。

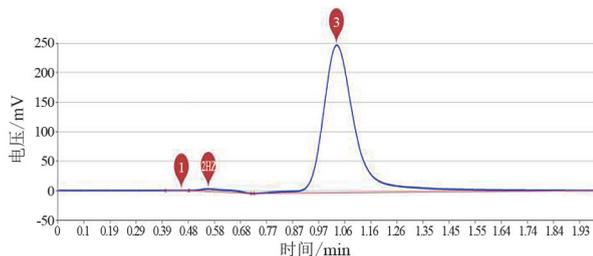


图 1 H₂ 检测图谱展示通道整体

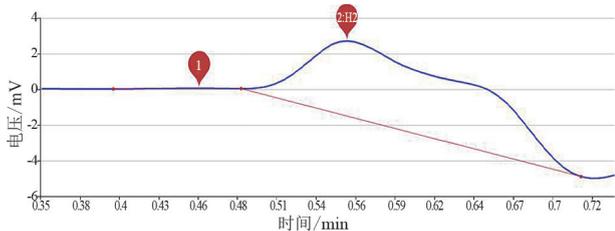


图 2 H₂ 检测图谱局部放大

2.1.2 引起 CO 结果偏低

CO 和 CO₂ 作为充油设备内部故障是否涉及到

固体绝缘的评判性气体^[7],准确地捕捉到其量值的变化,对设备故障的原因分析与查找都有重要意义。气体样品中的CO和CO₂是通过镍触媒转化炉转化为CH₄,再通过氢火焰离子化检测器进行检测。如若两者中的任一个效率降低,都将导致检测结果偏低。例如2号实验室的检测结果,如表3所示,样品一中的CO测定值明显低于表1所示中位值,而其他组分的测定值与中位值较为一致。

表3 2号实验室的比对结果 单位:μL/L

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一 测定值1	1.95	1.09	1.11	0.47	17.44	45.98	292.631
测定值2	1.92	1.07	1.19	0.48	16.40	43.51	282.247

通过调取试验谱图,发现该样品测试所用的气相色谱仪的色谱柱对CO和干扰峰的分度不够,致使峰形显示不完全、峰高(峰面积)偏低,造成检测结果的偏低,如图3所示。

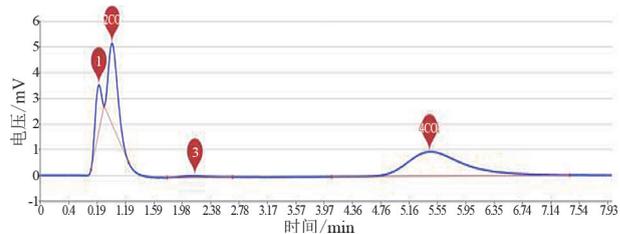


图3 色谱柱失效时CO的峰形

3 试验细节把控不严的影响

在油色谱检测试验中,有很多因素会引起多组分检测结果偏差很大,这部分因素大多以试验细节把控不严、人为因素为主。

3.1 标气引入的误差

标气作为气相色谱检测的标准物质,是样品结果计算的基础,如若标气标定环节出现问题,将直接影响样品的测定结果。在本次比对中,例如3号实验室报送的结果(如表4所示),低、中浓度的样品检测结果都较表1的中位值偏高,但是每个浓度样品的两针测定值的重复性均很好,疑似为标气标定环节引起的误差。

表4 3号实验室的比对结果 单位:μL/L

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一 测定值1	2.16	1.12	1.15	0.51	17.96	60.13	353.69
测定值2	2.17	1.13	1.15	0.53	18.36	61.93	370.08
样品二 测定值1	30.89	22.18	16.45	7.29	76.96	604.26	2 626.25
测定值2	30.66	22.18	16.43	7.26	77.91	613.02	2 668.22

经与实验室检测人员核实,并再次进行标气标定并将标气作为样气进行反标,经对比发现:在比对试验时,标气的峰高明显偏低一点,确认为标气测定峰高偏低导致测定结果的偏高。原因为比对时所使用的标气为新打开的一瓶标气,因对管路冲洗时间不够,管路中仍存有部分空气,致使标气的浓度低于标准值;但计算时,仍使用标准值,进而导致样品检测结果均偏高。

3.2 注射器密封不严(样品油、样品气)

注射器(100 mL、5 mL、1 mL)是色谱检测中的关键配件,注射器密封不严,将直接对检测结果造成一定的偏差。如4号实验室的比对试验结果(如表5所示),两个样品的测定重复性都很好,说明其样品测定环节把控比较严格。样品一各组分的测定值与中位值较为一致,样品二各组分的测定值明显低于中位值,确认不是标气引入的误差,判断为装载绝缘油的100 mL注射器密封不严,在样品运输或者振荡脱气过程中,造成油中溶解气体逸散,使检测结果中各组分的测定值低于中位值。

表5 4号实验室的比对试验结果 单位:μL/L

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一 测定值1	1.87	1.03	1.07	0.43	15.99	66.45	316.89
测定值2	1.88	1.01	1.03	0.42	15.87	66.24	324.26
样品二 测定值1	25.35	18.93	14.07	5.77	64.86	480.06	2 316.15
测定值2	25.53	18.91	14.03	5.77	65.08	479.40	2 298.19

5号实验室的比对试验结果如表6所示,两个样品的测定结果均低于中位值。仔细对比每个样品的连续两个测定值,发现第二个测定值的各组分均低于第一个测定值,尤其是奥斯特瓦尔德系数较小的H₂、CO,相对差值较其他组分大,判断为装载样气的5 mL注射器密封不严,在进行取样气时和连续两个测定间隙,致使样品气逸散,所以直观表现为第二个测定值各组分均低于第一个测定值。

表6 5号实验室的比对试验结果 单位:μL/L

样品名称	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
样品一 测定值1	1.94	1.09	1.16	0.46	15.07	65.5	370.28
测定值2	1.88	0.97	1.01	0.41	9.64	58.35	381.53
样品二 测定值1	27.1	20.66	15.39	6.56	60.93	473.49	2 435.69
测定值2	26.44	20.19	15.18	6.39	51.53	453.17	2 371.92

可见,装载绝缘油的注射器密封不严,将导致检测结果中各组分均偏低,但连续两个测定结果的重复性很好。装载样品气的注射器密封不严,不仅会

基于 IEEE 1459 标准的非线性负载有功功率测量研究

曹庆,王灿,刘锐,李骁睿,周秉成

(国网四川省电力公司乐山供电公司,四川 乐山 614000)

摘要:针对谐波有功损耗测量问题,文中改进了 Emanuel 功率理论中非线性负载等效模型,并结合基于 Emanuel 功率理论的 IEEE 1459 标准中视在功率分解公式,推导了基于改进的非线性负载等效模型的谐波有功损耗测量表达式;利用 Matlab 仿真分析非线性负载有功损耗的 3 种测量方式;通过比较得出所提测量方法能更准确方便地测量非线性负载有功损耗。最后,利用电能质量测量仪器,实测某电网 10 kV 负载谐波含量,结合所提方法计算负载有功损耗,验证了该方法的有效性及其带来的经济效益。

关键词:谐波有功损耗;非线性负载等效模型;IEEE 1459;功率流;Matlab

中图分类号:TM 933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0074-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230313

Research on Active Power Measurement of Nonlinear Load Based on IEEE 1459 Standard

CAO Qing, WANG Can, LIU Rui, LI Xiaorui, ZHOU Jiancheng

(State Grid Leshan Electric Power Supply Company, Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract:The nonlinear load equivalent model of Emanuel power theory is improved for harmonic active loss measurement problem. Combined with the apparent power decomposition formula of IEEE 1459 standard based on Emanuel power theory, the harmonic active loss measurement expression based on the improved nonlinear load equivalent model are derived. The results of three measurement methods for nonlinear load active loss is analyzed by Matlab simulation. By comparison, the proposed measurement method can measure the nonlinear load active loss more accurately and conveniently. Finally, the power quality measurement instrument is used to measure the harmonic content of 10 kV load in a power grid. The load loss is calculated by the proposed method, which verifies the effectiveness of the proposed method and the economic benefits.

Key words:harmonic active loss; nonlinear load equivalent model; IEEE 1459; power flow; Matlab

0 引言

随着大量电力电子设备的涌入,电网所受谐波污染已经越来越严重^[1],目前对谐波引起线路损耗的问题已有很多研究^[2-4],而对非线性负载损耗的计量研究相对较少。文献[5-8]利用传统的计量方式评估了谐波对线路损耗的影响,并未考虑传统计量方式计算谐波损耗的合理性。文献[9]分析了感应式和电子式电能表两类计量装置的误差频率特性,指出了现行计量方式存在的不合理性,提出了考

虑背景谐波源的新型电能计量方式,但未进行理论及实验验证。在当今电力系统中,由于智能电网建设的快速推进,智能电能表的功能强化及测量准确性的提高已经成为全面推进智能电网的关键,因此找出一种正确有效计量非线性负载有功损耗的方法是目前电网迫切需要的。

2010年,IEEE发行IEEE 1459正式标准,强调在非正弦系统下,将基波有功功率、无功功率和其余视在功率分量进行分解,重新定义了功率因数,为功率理论的研究和智能电能表的开发提供了坚实的理论依据^[10-12]。

IEEE 1459 利用傅里叶分解方法,将电压和电流分解为各次谐波之和,在此基础上定义了谐波有功功率的计算方法,但该计算方法并不是针对非线性负载所提出,并未规定非线性负载谐波有功损耗为非线性负载两端各次电压、电流以及功率因素的乘积之和。然而,现有的大量文献以及目前市场上很多谐波计量芯片,如上海钜泉光电科技公司开发的 ATT2026A、美国亚德诺公司开发的 ADE7880 等都是依据 IEEE 1459 标准对谐波有功功率的定义,并未考虑非线性负载内部等效模型对谐波有功损耗计量的影响,而是利用采集的非线性负载两端电压电流及相角数据,计算得到非线性负载的谐波有功损耗^[13-17]。

下面,根据 IEEE 1459 功率流理论的主要作者 Emanuel 在《功率定义及功率流的物理机制》书中提到的非线性负载模型^[18],将非线性负载等效为戴维南模型,结合 IEEE 1459 功率流理论推导了非线性负载有功损耗计量方式,仿真分析了基波计量方式、傅里叶分解计量方式以及功率流计量方式在计量非线性负载有功损耗情况下的准确性。最后,通过实际测量电网 10 kV 砂石场负载,与电网计量关口对比分析,验证了用所提方法计量负载谐波损耗的有效性,评估了用该方法计量负载有功损耗的经济效益。

1 有功功率的计量原理

当今电力系统中,由于非线性负荷导致电压电流产生畸变,传统的基于正弦波的计量有功损耗方式已不再适用,需要对谐波所引起的损耗加以考虑,重新定义非正弦情况下,负载有功损耗的计算方法。

1.1 正弦情况下的单相负载有功功率计算

传统有功功率计量方式都是基于电压、电流为正弦波。

$$P = I^2 R_L = VI \cos \theta \quad (1)$$

式中: V 为负荷电压的有效值; I 为负荷电流的有效值; $\cos \theta$ 为功率因数, θ 为电压和电流相角差; R_L 为负载的等效阻值。

1.2 非正弦情况下的单相非线性负载有功功率计算

在谐波环境下,电压和电流曲线发生畸变,此时计量负荷损耗需要对谐波这部分损耗加以

考虑。

1.2.1 IEEE 1459 功率流理论

为了更好地表示功率流理论的含义,文献[19]将非线性负载等效为如图 1 所示电路, R_s 与 L_s 分别为线路的等效电阻与等效电感。将非线性负载等效为基波电压源和谐波电压源串联。由于谐波是由非线性负载产生,所以谐波电压源和电源电压同向,与等效基波电压源反向。

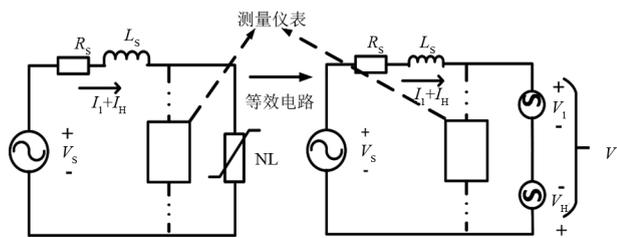


图 1 非线性负载等效电路

根据 IEEE 1459 标准规定,在谐波环境下将电流电压分解为:

$$I^2 = I_1^2 + I_h^2; I_h^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2)$$

$$V^2 = V_1^2 + V_h^2; V_h^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (3)$$

式中: I_h 、 V_h 分别为总谐波电流、电压有效值; I_h 、 V_h 分别为 h 次谐波电流、电压有效值; I_1 、 V_1 分别为基波电流、电压有效值。

在非线性负载系统中,线路总谐波电压畸变率 T_{HDV} 与总谐波电流畸变率 T_{HDI} 分别定义为:

$$T_{HDV} = \frac{V_h}{V_1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{V_h^2}{V_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

$$T_{HDI} = \frac{I_h}{I_1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{I_h^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

对视在功率 S 进行分解。

$$\begin{aligned} S^2 = V^2 I^2 &= (I_1^2 + I_h^2)(V_1^2 + V_h^2) = \\ &= (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_h)^2 + (V_h I_1)^2 + \\ &= (V_h I_h)^2 = S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_h^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中:电流畸变功率 D_I 为

$$D_I = V_1 I_h = V_1 \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2} \quad (7)$$

电压畸变功率 D_V 为

$$D_V = V_h I_1 = I_1 \sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2} \quad (8)$$

谐波视在功率 S_h 为

$$S_h = \sqrt{P_h^2 + D_h^2} = V_h I_h =$$

$$V_1 I_1 T_{HDV} T_{HDI} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2 \sum_{h \neq 1} V_h^2} \quad (9)$$

谐波畸变功率 D_H 为

$$D_H = \left\{ \left(\sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin \theta_h \right)^2 + \sum_{m=1}^{\gamma-1} \sum_{n=m+1}^{\gamma} \left[(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2V_m V_n I_n I_m \cos(\theta_m - \theta_n) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, m, n, r 为不同的谐波次数。

非线性负载能量转化如图 2 所示。

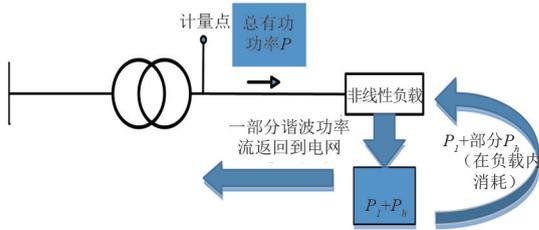


图 2 非线性负载功率流向

1.2.2 基于傅里叶方法分解计量单相非线性负载有功损耗的准确性分析

为了研究非线性负载内部有功损耗, 将图 1 中 V_1 等效为阻值 R_L 、等效电感 L_L 串联, 再和谐波源 V_H 串联构成等效电路, 当电流 I_1 流经 R_L, L_L 时产生 V_1 的压降, 如图 3 所示。该电路实际是非线性负载诺顿等效电路的戴维南转换, 相比图 1 等效模型, 以该等效电路来计算非线性负载损耗, 能更贴切地描述非线性负载内部损耗的转换过程。

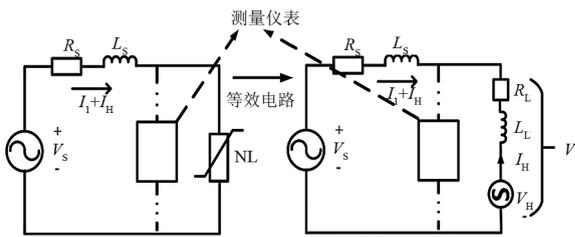


图 3 非线性负载等效电路

利用叠加原理, 将图 3 进一步等效为电源单独作用与谐波源单独作用两种情况, 当谐波源单独作用时, 其等效电路如图 4 所示。

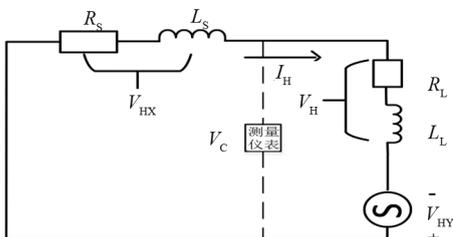


图 4 谐波源单独作用的等效电路

结合图 3、图 4 可得测量仪表两端电压 V_C 等于谐波源在线路上产生的电压 V_{HX} , 测量仪表两端的各次谐波电压 V_C 与各次谐波电流 I_h 关系为

$$V_C = V_{hx} = I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy} \quad (11)$$

式中: V_{hy} 为等效谐波源 V_{HY} 发射的各次谐波电压; V_{hx} 为线路上的各次谐波电压。由上述分析可得, 实测各次谐波电压 V_C 受谐波源 V_{hy} 与等效电阻 R_L 以及谐波电流 I_h 共同影响, 且等效阻值 R_L 是根据非线性负载基波有功功率 P_1 求得。

$$P_1 = I_1^2 R_L = U_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (12)$$

上述分析证明了实际非线性负载谐波电压和谐波电流的含量与负载所运行的基波有功功率存在着一定的联系, 这与实际生活中的情况也相吻合。

谐波源单独作用时, 各部件谐波视在功率如图 5 所示。从图中可以看出, 以非线性负载两端电压 V_C 来计算得到的谐波视在功率实际为线路的谐波视在功率 S_{HX} 。

$$S_C = S_{HX} = I_H V_{HX} = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy}] \quad (13)$$

理论上非线性负载的谐波视在功率 S_H 应与谐波源提供的视在功率 S_{HY} 分开考虑, S_H 应为等效阻值 R_L 和 L_L 上消耗的谐波视在功率。

$$S_H = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L)] \quad (14)$$

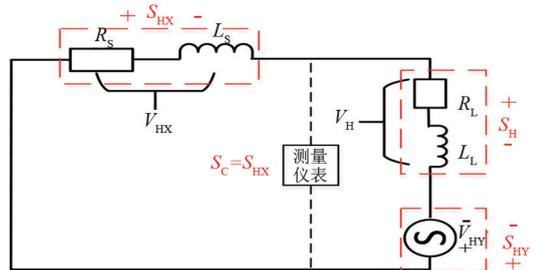


图 5 各部件谐波视在功率

因此以测量仪表两端的谐波电压 V_C 计算得到非线性负载谐波有功损耗势必会带来错误, 计算结果如式(15)所示。

$$P_C = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy}] \cos \theta_h = \sum_{h \neq 1} V_{hx} I_h \cos \theta_h \quad (15)$$

测量仪表计量结果 P_C 为线路的谐波有功损耗, 并不等于非线性负载上消耗的谐波有功功率。

1.2.3 基于功率流分解方法计算单相非线性负载谐波损耗

考虑从功率流分解方法入手,可得非线性负载有功损耗 P 为

$$P = \frac{S^2}{V^2} R_L \quad (16)$$

结合式(2)一式(9)可得

$$S^2 = S_1^2 \left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\} \quad (17)$$

结合式(16)、式(17)整理可得

$$P = \frac{S_1^2 \left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\}}{V_1^2 + V_H^2} R_L = \frac{\left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\}}{1 + T_{HD_V}^2} I_1^2 R_L = (1 + T_{HD_I}^2) I_1^2 R_L \quad (18)$$

分析图 3、图 4 等效电路,由欧姆定律可得非线性负载有功损耗 P 为

$$P = I_1^2 R_L + \sum_{h \neq 1} I_h^2 R_L = (1 + T_{HD_I}^2) I_1^2 R_L \quad (19)$$

基于功率流分解计算方法与基于欧姆定律计算方法得到的结果是相同的,验证了非线性负载谐波有功损耗计算式(18)的准确性。

设功率流修正因子 K 为

$$K = 1 + T_{HD_I}^2 \quad (20)$$

则基于功率流分解方法所测非线性负载总损耗 P 就可以表示为功率流修正因子与传统基波计量损耗的乘积,即

$$P = KP_1 = KI_1^2 R_L = KV_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (21)$$

即非线性负载谐波损耗 P_H 可表示为

$$P_H = (K - 1)P_1 = (K - 1)I_1^2 R_L = (K - 1)V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (22)$$

1.2.4 基于功率流分解方法与基于傅里叶分解方法计量结果的对比分析

设非线性负载基波视在功率 S_1 为 800 kVA,基波有功损耗为 760 kW(基波功率因数为 0.95),代入式(9)和式(22)。由于各次谐波功率角随机性较大难以假定,导致基于傅里叶分解方法计量的非线性负载谐波有功功率很难确定,所以仅做出基于功率流方法计量的非线性负载谐波有功损耗和基于傅里叶分解方法计量的非线性负载谐波视在功率随不同电压、电流畸变率的变化曲面图,以此来对比分

析两种计量方式的准确性,如图 6 所示。

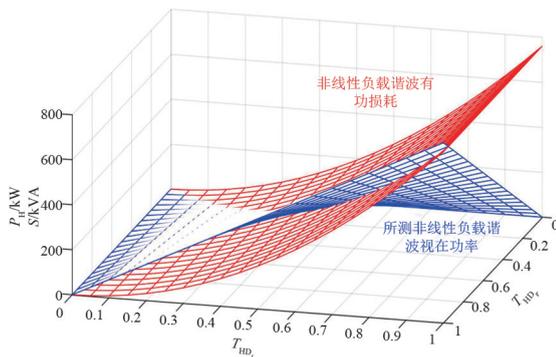


图 6 谐波视在功率与负载谐波功率对比

从图 6 中可以看出,两个空间平面在谐波电压畸变率 T_{HD_V} 与电流畸变率 T_{HD_I} 相等时相交,在 $T_{HD_I} > T_{HD_V}$ 区域内傅里叶分解计量模块计量的非线性负载谐波视在功率小于功率流计量模块计量的非线性负载谐波有功损耗;在 $T_{HD_V} > T_{HD_I}$ 区域内傅里叶分解计量模块计量的非线性负载谐波视在功率大于负载谐波有功损耗。可见以测量仪表(非线性)两端的谐波电压 V_c 代入式(15)得到非线性负载谐波损耗的计算方法是错误的,其未对非线性负载谐波有功损耗正确计量。考虑用所提出的谐波损耗计算方式不仅理论上依据,而且还能更好地评估非线性负载谐波损耗的经济效益。

由式(20)、式(21)可知,当计算非线性负载损耗时,只需知道用户的基波有功损耗及电流畸变率,就可以通过 K 系数修正,准确计量负载的谐波损耗。该运算方法不仅对谐波引起负载有功损耗进行了准确的计量,而且避免了求取电压畸变率的繁琐及引入不必要的计量错误,其理论依据更有说服力。图 7 为 K 系数随电压、电流畸变率变化的三维立体图,可以看出修正系数 K 受电流畸变率的影响,随着电流畸变率的增大, K 系数逐渐增大。

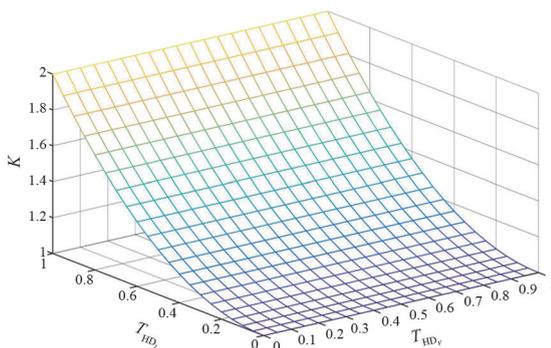


图 7 K 系数与电压、电流畸变率关系

2 实验仿真分析

变频器广泛应用于日常生活中,而其中 AC-DC-AC 电路被广泛用于大功率变频电动机。因此结合 Matlab/Simulink 搭建 AD-DC-AC 变频器模型,变频器将 50 Hz 电网电源变换为直流,再经过无源逆变,变换到 60 Hz 供三相负载使用。其仿真模型如图 8 所示。在 10/0.4 kV 变压器高压侧及低压侧连接测量模块,观察各测量模块对变频负载的损耗计量结果(负载为三相平衡负载,只对一相进行测量)。

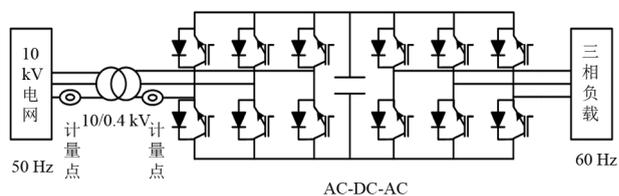


图 8 非线性负载有功损耗测量仿真模型

高压侧电压畸变率为 0.07%, 电流畸变率为 7.49%; 低压侧电压畸变率为 0.65%, 电流畸变率为 7.76%。低压侧仿真的电压、电流波形如图 9、图 10 所示。

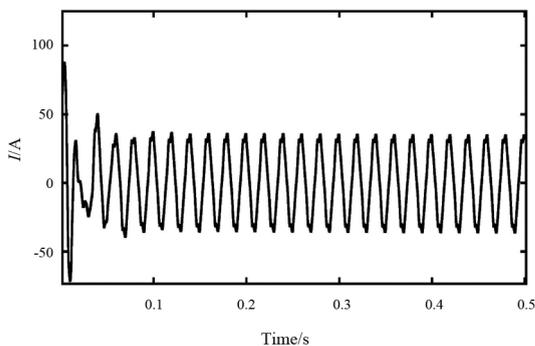


图 9 低压侧仿真电压波形

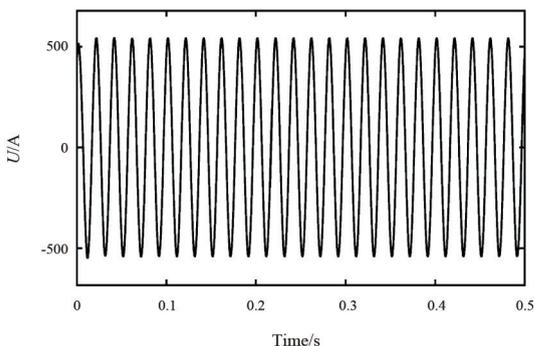


图 10 低压侧仿真电流波形

变压器高、低压侧各计量方式计量结果如表 1、表 2 所示。

表 1 变压器高压侧各计量方式计量结果 单位: W

计量方法	计量有功功率	谐波有功功率
传统计量	5235	0
功率流量计	5271	36(变压器+负载)

表 2 变压器低压侧各计量方式计量结果 单位: W

计量方法	计量有功功率	谐波有功功率
传统计量	4945	0
傅里叶分解计量	4947	2(变压器内部)
功率流量计	4978	33(负载)

传统的基波损耗计量模块只考虑了基波(50 Hz)供给负载损耗,基于傅里叶分解计量模块则考虑了 2~50 次谐波损耗,该计量模块计量的是线路谐波损耗与负载基波损耗;功率流量计模块,则按功率流分解方法计量了所有次数谐波造成的额外损耗,该计量模块计量的是负载谐波损耗与负载基波损耗。从仿真结果可以看出,只考虑基波引起损耗的计量模块并没有计量谐波损耗;且由于电流和电压在非线性负载里发生畸变,导致电网传输的电压电流基波有效值减小,因此影响了基波损耗计量模块的计量准确性,造成计量结果最小。

将低压侧傅里叶分解计量模块的计量结果与基波损耗计量结果对比得出,2~50 次谐波引起的有功损耗功率为 2 W。该计量方法是将各次谐波电压电流及各次谐波对应下的功率因数相乘再求和得到谐波有功损耗,由第 1 章分析可知,该计算方法计量的是系统及线路上的损耗。由于仿真中并未设置线路阻值,所以此计量结果是针对变压器内部谐波有功损耗的计量,并不是对非线性负载谐波损耗的计量,计量的对象有误,所统计的谐波损耗相对较小。

低压侧功率流量计模块计量到非线性负载有功损耗为 33 W, 高压侧功率流量计模块计量到的谐波有功功率(变压器+负载)为 36 W。将高、低压侧功率流模块的计量结果对比可得变压器谐波有功损耗为 3 W;傅里叶分解计量统计到的线路损耗(变压器)为 2 W。两种方法计量变压器谐波有功损耗的结果相差 1 W,造成该误差的原因是基于傅里叶分解方法考虑的是 2~50 次谐波。50 次以后的谐波未统计其损耗,且变压器低压侧傅里叶测量模块测量的变压器谐波有功损耗只计量了低压侧变压器绕组

损耗。谐波传递到高压侧绕组以及变压器磁芯里的谐波有功损耗并未统计到(由图 2 功率流理论分析,一部分谐波功率将返回系统内消耗),造成了傅里叶计量模块计量的变压器谐波有功损耗存在 1 W 的漏记。仿真结果表明,以傅里叶分解计量模块计量谐波有功损耗的对象为变压器,而功率流计量模块才是对非线性负载谐波有功损耗的计量,验证了第 1 章的理论分析。

3 实测数据分析

FLUCK435 是基于 IEEE 1459 标准制造的电能质量分析仪器,它能分析负载电流电压谐波成分。考虑砂石场负载在加工时,会用一些特殊电动机设备(产生谐波),所以利用 FLUCK435 实测某电网的 10 kV 砂石场负载(高供高计),如图 11 所示。在电网计量的关口处加装 FLUCK435 电能质量测试仪器,监测线路谐波含量。

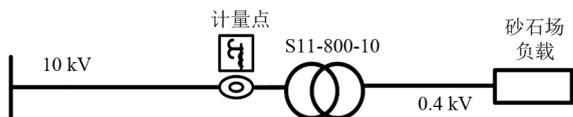


图 11 电网结构计量点

实测线路的电压电流曲线如图 12、图 13 所示。

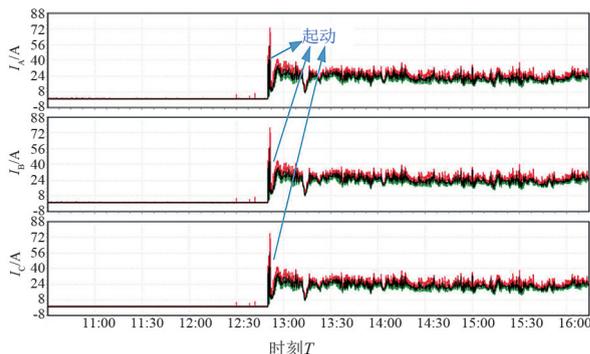


图 12 实测电流曲线

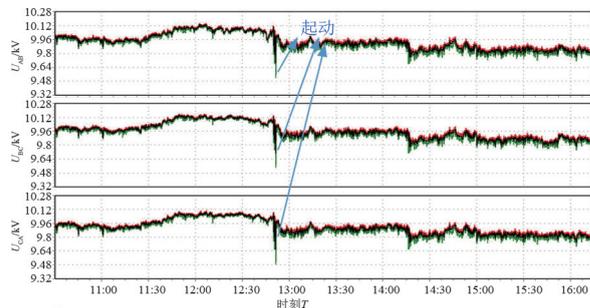


图 13 实测电压曲线

对采集的负载电压电流波形谐波进行分析,其畸变率如图 14、图 15 所示,谐波电流畸变率为 13.713%,谐波电压畸变率为 0.739%。

以第一天 13:45 至第二天 14:00 时间段统计数据分析,负载基波有功功率为 400 kW,功率因数为 0.87。根据式(9),以傅里叶分解计量方式计量的谐波视在功率为 $0.001S_1$;而根据式(18),以功率流方法计算出谐波有功损耗为 $0.019P_1$ 。可以看出,以傅里叶分解计量方式计量的非线性负载有功损耗一定是小于功率流计量方式计量的非线性负载有功损耗。这满足第 1 章理论分析,以傅里叶分解计量方式计量的对象有误,结果并不准确,且在 $T_{HD_I} > T_{HD_V}$ 区域以傅里叶分解计量方式计量非线性负载有功损耗计量结果小于功率流计量方式的标准计量结果,造成错计及少计。

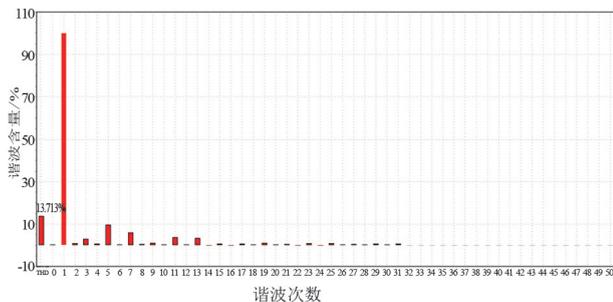


图 14 实测谐波电流含量

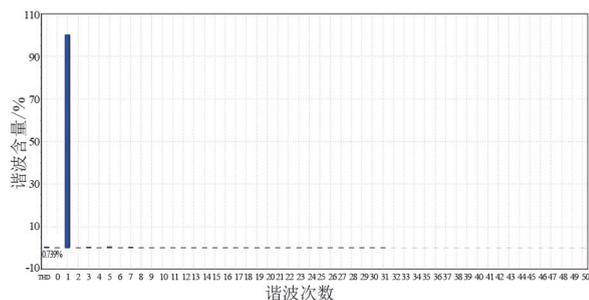


图 15 实测谐波电压含量

从电网系统导出关口表统计的该负载运行时的有功功率如图 16 所示,用所提出的功率流计量方法计量该电网关口谐波有功损耗,评估该方法带来的经济效益。假设运行时间段的电网统计到负载基波平均功率为 400 kW,则有 7.6 kW 谐波功率电网关口表未统计到。在负载运行的 4.5 h 内,有 34.2 kWh 的谐波电量未计量。假设工业用电 1 元/kWh,则 4.5 h 内直接经济损失 34.5 元,占电网关口表计量的 1.9%。可见以所提出的计量方式能有效计量负载谐波损耗,其经济效益也是可观的。

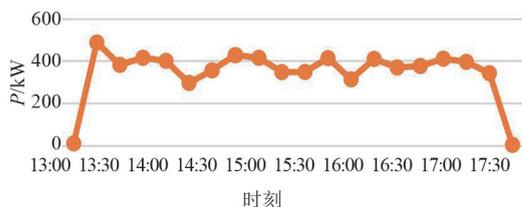


图 16 电网计量负载总有功功率

4 结 论

上面提出了非线性负载戴维南等效模型,结合功率流理论推导了非线性负载谐波损耗的计算公式,通过理论分析并结合仿真验证得出如下结论:

1) 基于傅里叶分解计量,由于其未考虑非线性负载内部等效模型对计量结果的影响,利用非线性负载两端各次谐波电压电流及各次谐波对应下的功率因数相乘再求和得到谐波有功损耗的方法,实际计量的是线路谐波有功损耗,并不是计量的非线性负载谐波有功损耗,计量对象有误,导致计量结果错误。

2) 功率流计量模块,基于功率流分解方法考虑了谐波对负载有功损耗的影响,重新定义了非线性负载有功损耗。理论分析及仿真结果表明,该计量模块有效计量了非线性负载有功总损耗,该方法不仅算法简单,理论上更具有说服力。

最后,用所提出的非线性负载有功损耗计量方法结合实测电网谐波数据计算表明,考虑将所提出的功率流计量模块用于负载有功损耗计量是有效的,其长期经济效益也相当可观。

参考文献

- [1] 原凯,宋毅,李敬如,等.分布式电源与电动汽车接入的谐波特征研究[J].中国电机工程学报,2018,38(S1): 53-57.
- [2] 林顺富,李扬,汤波,等.基于改进 FastICA 及偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J].电网技术,2018,42(1): 308-314.
- [3] 王葵,李建超,关淑华,等.低压配电网谐波有功损耗估计[J].继电器,2008,36(3):56-59.
- [4] 刘书铭,施红,冯蕾.考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J].电力自动化设备,2015,35(3): 133-139.
- [5] 吴丹,赵婉茹,张永康.电站直流充电桩能效计量智

能预测方法研究[J].电子设计工程,2020,28(3): 157-161.

- [6] 祁顺然.电动汽车充电负荷对电能计量准确性的影响研究[D].南京:东南大学,2019.
- [7] 孙风艳.电网谐波功率计量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [8] 黄冰心,龚国兴,赵莉华.谐波对电网电能计量系统影响的研究[J].四川电力技术,2012,35(6):32-35.
- [9] 何群.电力谐波对电能计量影响的研究[J].四川电力技术,2009,32(1):45-49.
- [10] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE Std1459: 2010[S/OL]. [2022-06-17]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5953405>.
- [11] EMANUEL A E. On the assessment of harmonic pollution [of power systems] [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 3(10): 1693-1698.
- [12] ARSENEAU R, BAGHZOUZ Y, BELANGER J, et al. Practical definitions for powers in systems with non-sinusoidal waveforms and unbalanced loads [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 79-101.
- [13] 赵云斌,李鹏程,尉怡青,等.不平衡畸变负荷无功功率理论分析与应用[J].电测与仪表,2018,55(2):1-7.
- [14] 耿锐,李春燕,郑可,等.谐波电能计量芯片测试分析[J].电测与仪表,2013,50(5):36-41.
- [15] 徐文佳,赵伟,黄洪涛,等.计及间谐波的电能计量方法[J].电网技术,2016,40(2):656-662.
- [16] 邱陶歆.电力谐波对电能计量的影响研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [17] 许仪勋.谐波对电能计量的影响与对策[D].上海:上海交通大学,2008.
- [18] 亚历山大·艾格列斯·伊曼纽尔.功率定义及功率流的物理机制[M].北京:中国电力出版社,2014.

作者简介:

曹庆(1992),男,硕士,研究方向为电能质量对电网的影响;

王灿(1982),男,学士,工程师,从事继电保护工作;

刘锐(1993),男,硕士,研究方向为智能电网、配电网运行与技术;

李骁睿(1994),男,硕士,研究方向为智慧电网、电力建设数字化转型;

周秉成(1994),男,硕士,研究方向为电力电子技术。

(收稿日期:2022-08-07)

某 GIS 设备黄铜三通阀法兰失效分析

赵兴虹¹, 陈家慧², 冯杰¹, 彭倩², 王方强²

(1. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:某变电站 GIS 设备黄铜三通阀法兰出现大批量的断裂或开裂现象, 易导致 SF₆ 气体泄漏, 存在严重安全隐患。文中通过对失效三通阀的宏观形貌、化学成分、金相组织、结构等多方面进行分析、研究, 明确了三通阀的开裂原因并提出改进措施。结果表明三通阀法兰材质为铅黄铜, 因结构设计及装配方式不当受到较大的周向拉应力, 在周围环境含有氧、硫元素的腐蚀性作用下, 沿法兰的应力集中区域发生应力腐蚀开裂。

关键词:GIS; 黄铜; 三通阀; 应力腐蚀; 开裂

中图分类号: TG 146 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2023)03-0081-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230314

Failure Analysis of Brass Three-way Valve Flange in A GIS Equipment

ZHAO Xinghong¹, CHEN Jiahui², FENG Jie¹, PENG Qian², WANG Fangqiang²

(1. Gaoxin District Branch of Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

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

Abstract: A large number of fractures or cracks occurs in brass three-way valve flange of GIS equipment in a substation, which is easy to cause SF₆ gas leakage and has serious safety hazards. Through the analysis and research on macroscopic appearance, chemical composition, metallographic structure, structure of the failed three-way valve, the reasons for the cracking of three-way valve are clarified and the improvement measures are put forward. Results show that the flange of three-way valve is lead brass and subjected to large circumferential tensile stress due to improper structural design and assembly method. Under the action of surrounding corrosive environment containing oxygen and sulfur elements, stress corrosion cracking occurs along the stress concentration area of the flange.

Key words: GIS; brass; three-way valve; stress corrosion; cracking

0 引言

黄铜具有良好的工艺性能、力学性能以及较高的导电、导热性, 在电气设备中得到了广泛应用^[1-3]。轴销、阀体等电网材料的黄铜部件通过加工成型可提高其塑性和强度, 但设计、制造、装备以及运行环境均可能造成其开裂, 直接影响电网的安全稳定运行^[4-5]。

某 220 kV 变电站 GIS 设备运行 5 年, 其充气接头三通阀法兰出现不同程度的断裂或开裂, 可能导

致 SF₆ 气体泄漏, 影响设备安全稳定运行。该法兰材质为加工黄铜, 牌号未知。下面以该起事故为例, 通过宏观检查、成分分析、金相检测、断口形貌及能谱分析等技术方法, 结合结构设计及运行环境分析找出法兰开裂原因, 并提出防护改进措施, 为 GIS 充气接头的设计、制造、运维检修提供参考依据, 避免类似失效再次发生。

1 理化检验与结果

1.1 运行环境

该变电站处于化工园区内, 环境相对恶劣, 存在

腐蚀性物质。另外该市常年气温在 15 ℃ 左右,雨量充沛,环境相对潮湿,因此三通阀法兰长期处于潮湿且有腐蚀性物质的运行环境中。

1.2 宏观检查

三通阀本体与法兰非一体式结构,两颗铆钉将法兰固定在三通阀本体上,三通阀法兰通过两个螺栓与 GIS 设备壳体连接,如图 1 所示。



(a) 运行工况 (b) 断裂法兰

图 1 GIS 设备三通阀法兰现场形貌

图 2 为开裂三通阀法兰的宏观形貌。可见,裂纹位于法兰一侧铆钉连接部位,沿着自上而下、由外到内的方向扩展,直至贯穿法兰径向薄弱处。断口无明显塑性变形,呈典型的脆性断裂特征。



(a) 侧视图 (b) 仰视图

图 2 失效三通阀法兰宏观形貌

1.3 化学成分

对失效法兰取样进行化学分析,结果如表 1 所示。可看出,法兰为铅黄铜,其化学成分符合 GB/T 5231—2012《加工铜及铜合金牌号和化学成分》中铅黄铜 HPb59-1 的要求。HPb59-1 具有良好的可切削性及力学性能,但耐腐蚀较差,易出现应力腐蚀开裂。

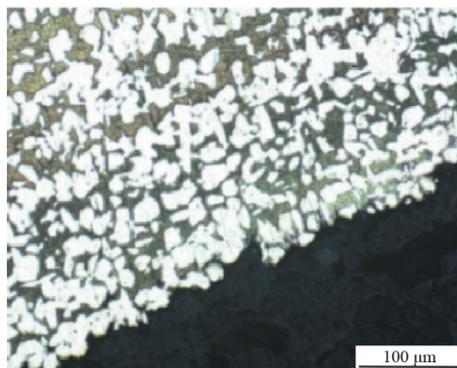
表 1 失效法兰的化学成分质量分数 单位:%

对比项	Cu	Fe	Pb	杂质总和	Zn
测试值	58.03	0.15	1.58	0.89	39.35
HPb59-1 的标准值	57.0~60.0	≤0.5	0.8~1.9	≤1.0	余量

1.4 金相分析

垂直于断裂面取样,制成金相试样。经磨制、抛光、腐蚀后进行金相显微组织观察,结果如图 3 所示。可看出,金相组织为白色 α 相+灰色 β 相+黑色

颗粒 Pb 相, α 相呈块状、针状及卵状。裂纹整体沿 α 和 β 相晶界分布,符合沿晶开裂特征。



(a) 放大200倍



(b) 放大500倍

图 3 法兰断口附近金相组织

1.5 断口分析

为进一步分析法兰断裂形式,使用扫描电子显微镜观察断口微观形貌,如图 4 所示。断口整体表现为沿晶断裂形貌,并伴有二次裂纹的产生,且存在一定量非导电的腐蚀产物。对断口进行能谱分析,断口处合金基体的 3 种元素 Cu、Zn、Pb 含量分别为 43.5%、28.3% 及 8.6%。此外,还检测到较多 O、S 等腐蚀元素,含量分别为 16.1% 和 3.4%。

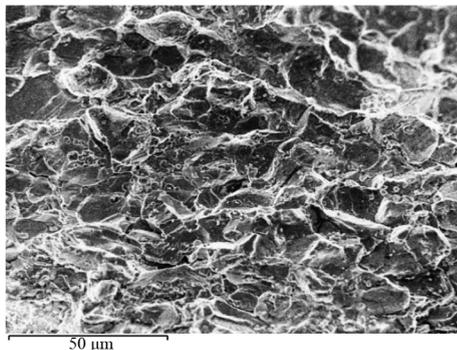


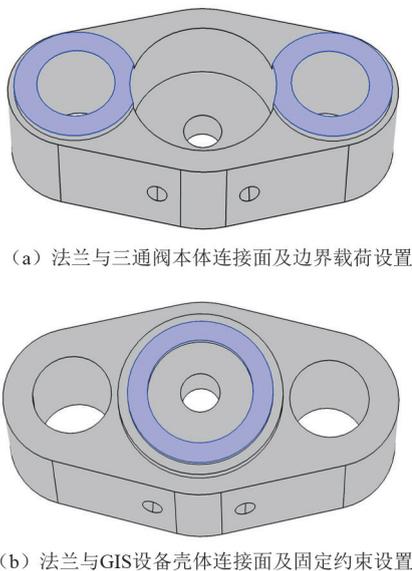
图 4 三通阀法兰断口的微观形貌

1.6 结构分析

裂纹位于三通阀法兰径向厚度较薄区域,极易造成应力集中。为了深入分析三通阀法兰运行时的

受力情况,并提出结构优化方案,利用 SolidWorks 构建三通阀模型,通过 COMSOL 有限元分析软件进行仿真计算。

图 5 为失效三通阀法兰的几何模型,选择材料杨氏模量为 90 GPa,密度为 8500 kg/m^3 ,泊松比为 0.35。结合实际运行情况,法兰主要承受螺栓位置施加的垂直应力为 1 MPa,将其设置为法兰边界载荷,整个几何体为线弹性材料。法兰与三通阀本体连接面(上表面)如图 5(a)所示。法兰与 GIS 设备壳体连接面(下表面)存在一个橡胶垫片,在使用螺栓固定时垫片被压缩形成一个固定的圆环平面,因此在仿真时将此面作为固定约束,如图 5(b)所示。



(a) 法兰与三通阀本体连接面及边界载荷设置

(b) 法兰与GIS设备壳体连接面及固定约束设置

图 5 失效三通阀法兰的几何模型

图 6 为三通阀法兰在服役过程中所受应力的整体分布情况。可见法兰在铆钉连接部位对应位置存在显著的应力集中,且上表面应力大于下表面应力。三通阀法兰的形变分布情况如图 7 所示,由图可知:法兰中间部分形变不明显,法兰两端形变较为严重,这就导致法兰下部承受压应力,而上部承受拉应力;孔所在位置金属厚度较小,因此法兰的小孔侧为易失效区域,与实际失效情况吻合。

2 结构优化

通过上述分析,在底座上由于垫片及小孔的存在,造成法兰小孔附近部位成为应力集中和受力薄弱区,在不均匀应力和腐蚀的共同作用下导致一侧

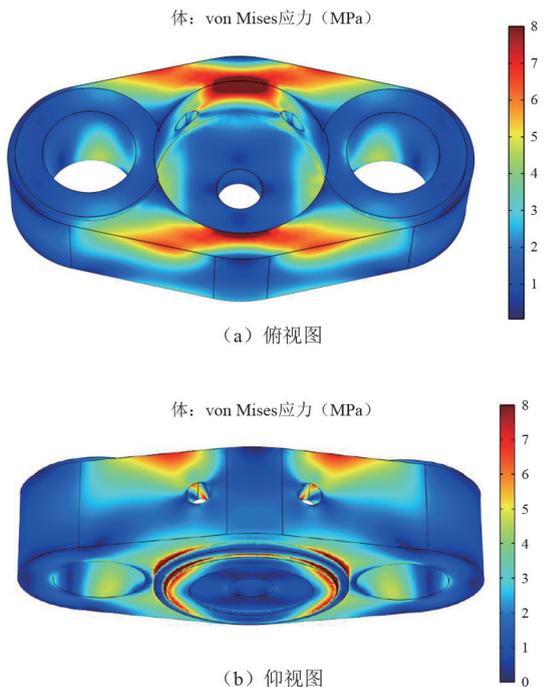


图 6 三通阀法兰整体应力分布

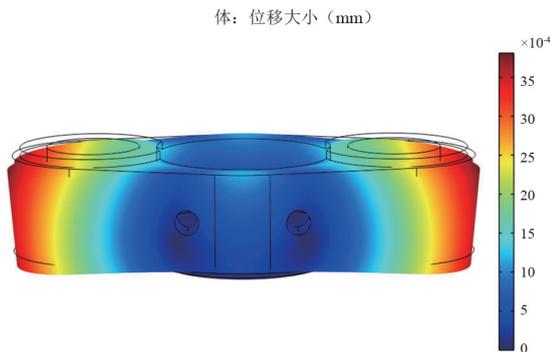


图 7 三通阀法兰整体形变分布

先发生断裂失效。进一步,该截面应力全部转移集中到对侧,最终可造成底座的整体断裂甚至脱落。因此为防止法兰发生断裂失效,可以通过去除小孔的方式改进法兰结构,即对法兰和三通阀本体进行一体化设计,改善应力分布降低区域的应力值,降低其断裂失效的风险。计算结果显示,一体化设计后形变情况与初始相差不大,而法兰应力分布的均匀性得到提升,容易开裂部位的应力值降低近 30%。

3 分析讨论

通过法兰的化学成分及显微组织分析可知,法兰盘属于铅黄铜,含 Zn 量为 40.24%,属于高锌 ($w(\text{Zn}) > 30\%$) 黄铜,存在较多脆性 β 相组织,黄铜

在受力状态下易在 β 相内及 α 相、 β 相的晶界处形成应力集中,为裂纹的产生提供内在条件,降低了铜合金的延展性和耐蚀性,易发生脆性断裂。

通过断口能谱分析可知,断口处存在一定比例的 O、S 等腐蚀元素,与三通阀法兰所处的运行环境相吻合,运行环境为腐蚀提供了条件。由法兰本身结构可知,法兰径向厚度较薄处或铆钉孔处为受力薄弱区域,极易应力集中;从法兰安装结构和现场失效法兰应力分布可知,法兰下部承受压应力,而上部承受拉应力,且小孔附近为法兰受力薄弱区,易导致裂纹的产生并沿着从上到下的方式扩展。通过显微组织观察分析,金相组织整体形貌上呈带状分布,法兰内部可能留有残余应力。通过裂纹附近显微组织和断口形貌观察分析,三通阀法兰开裂处晶粒无变形,断口为典型的准解理形貌,属于穿晶脆性断裂,符合典型的高锌黄铜应力腐蚀开裂的断口特征。故而在外力、残余应力、腐蚀介质的共同作用下,法兰在其径向厚度较薄处或铆钉孔处发生了应力腐蚀开裂。

4 结 论

该铅黄铜三通阀法兰长期处于潮湿且有腐蚀性物质的运行环境中,且结构设计和安装方式使其受到较大周向拉应力,在加工过程中法兰内部可能存在残留应力。在设计、制造、装配、运行环境等共同

因素作用下,铅黄铜法兰发生了应力腐蚀断裂或开裂。因此,提出以下建议:

1) 黄铜三通阀进行挤压或冷加工工艺后须进行退火消除内应力,防止残余应力为应力腐蚀提供基础件;

2) 优化三通阀结构设计,将法兰和气管采取一体化设计,减小法兰受力薄弱位置的受力;

3) 因黄铜具有较大应力腐蚀倾向,三通阀法兰运行环境恶劣时,建议用防腐性能较好且具有一定强度的金属材料代替,比如优质的不锈钢和铝合金。

参考文献

- [1] 路俊攀,李湘海.加工铜及铜合金金相图谱[M].长沙:中南大学出版社,2012.
- [2] 李炯辉,林德成.金相图谱下册[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [3] 郑宏晔,陈胤桢,裘吕超,等.变压器铅黄铜线夹开裂原因分析[J].热处理,2021,36(1):51-53.
- [4] 张健,刑明军,陈国宏,等.主变黄铜轴销断裂失效分析[J].机械设计,2020,37(S2):133-137.
- [5] 张铭,伍超群,李扬.铅黄铜阀体开裂原因分析[J].材料研究与应用,2009,3(3):200-203.

作者简介:

赵兴虹(1990),女,工程师,从事电网材料检测及失效分析工作。

(收稿日期:2022-07-27)

(上接第 57 页)

- [11] 肖天为,张磊,黄炎光,等.特高频方法用于套管局部放电检测的可行性研究[J].电网技术,2015,39(6):1719-1724.
- [12] AMORIM H P, CARVALHO A T D, RODRIGUES T B, et al. On-site measurements of partial discharges through tap of the bushings-Brazilian experience in power transformers[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, IEEE, 2013(12):2010-1023.
- [13] 朱学成,高自伟,姜德胜,等.套管局放 UHF 检测用传感器的必选与应用[J].黑龙江电力,2016,38(3):257-262.
- [14] 唐炬,尹佳,张晓星,等.基于压力和特高频的少油设备绝缘缺陷联合在线监测[J].高电压技术,2020,46(2):546-553.

- [15] 国网四川省电力公司.电力少油设备监测器:201720551103[P].2018-02-09.
- [16] 国网四川省电力公司.电力少油设备监测装置:201720554508[P].2018-06-05.
- [17] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.变压器油中溶解气体分析与判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [18] 全国绝缘子标准化技术委员会.绝缘套管油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则:GB/T 24624—2009[S].北京:中国标准出版社,2010.

作者简介:

涂彦明(1972),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术和电力系统继电保护工作。

(收稿日期:2023-05-19)

某变电站直流电源阀控式铅酸蓄电池失效分析

王志高¹,董汉彬¹,陈家慧¹,王方强¹,许光达²

(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成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:对某110 kV变电站直流电源故障蓄电池组铅酸蓄电池开展了失效分析。拆解试验结果表明,该站直流电源蓄电池失效主要是由正极板栅腐蚀断裂与负极汇流排腐蚀断裂所致。正极板栅腐蚀断裂与蓄电池浮充电压过高有关。负极汇流排腐蚀与其材质和工艺密切相关,该负极汇流排采用Pb-Sn-Sb合金配方,会引起Sb、Sn在合金晶界处偏析,加速负极汇流排的晶间腐蚀。最后,根据存在的问题,提出了改进措施,避免以后类似故障发生。

关键词:直流电源; 铅酸蓄电池; 失效分析; 腐蚀

中图分类号:TM 912 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)03-0085-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230315

Failure Analysis of Valve-regulated Lead-acid Battery of DC Power Supply in A Substation

WANG Zhigao¹, DONG Hanbin¹, CHEN Jiahui¹, WANG Fangqiang¹, XU Guangda²

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

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

Abstract:The failure analysis of lead-acid battery of DC power supply in a 110 kV substation is carried out. The results of dismantling test show that the failure of DC power supply battery in this station is mainly caused by the corrosion fracture of positive plate grid and negative bus bar. The corrosion and fracture of positive plate grid is related to high floating charging voltage of the battery. The corrosion of negative bus bar is closely related to its material and process. The negative bus bar uses Pb-Sn-Sb alloy, which will cause Sb and Sn segregation at the alloy grain boundary, and poor welding process could accelerate the intergranular corrosion of negative bus bar. Finally, according to the existed problems, the improvement measures are put forward to avoid similar failures in the future.

Key words:DC power supply; lead-acid battery; failure analysis; corrosion

0 引言

阀控式铅酸蓄电池作为变电站直流系统中的核心部件,当交流电突发故障失电时,是变电站继电保护装置、自动化装置、高压断路器跳合闸机构、通信和调度等重要负荷的紧急供电电源^[1-3]。蓄电池的可靠与否对变电站的安全运行起着至关重要的作用^[4]。下面对某110 kV变电站故障蓄电池组铅酸

蓄电池开展了失效分析工作。

该站直流电源蓄电池组由108只阀控式铅酸蓄电池串联组成。单体电池额定电压为2 V,额定容量为300 Ah,参考内阻为0.9 mΩ。故障发生前该蓄电池组处于浮充状态。故障发生后,对蓄电池进行参数测量,108只蓄电池的平均内阻为1.562 mΩ,23号蓄电池内阻为4.369 mΩ,42号蓄电池内阻为4.258 mΩ,明显高于其他蓄电池。为查明故障原因,拆解了23号、42号蓄电池,检查蓄电池内部是否异常,分析故障原因并提出改进措施,避免以后类似故障发生。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0610600);国网四川省电力公司科技项目(521997200030,521997230012)

1 蓄电池拆解情况

1.1 外部检查

经过外观检查,23号、42号蓄电池外壳无漏液、无爬酸、无破裂、无鼓胀现象,接线端子无腐蚀现象,安全阀无漏液现象。

1.2 内部结构

切割蓄电池外壳,将电池芯从外壳中全部取出,根据阀控式铅酸蓄电池的结构,依次对蓄电池的正极极柱、正极汇流排、正极极板、正极铅膏、负极极柱、负极汇流排、负极极板、负极铅膏、隔板、安全阀等进行拆解和检查。采用 Bruker S1 TITAN 300 型 X 射线荧光光谱仪对蓄电池内部金属部件成分进行分析。结果显示正极板栅和负极汇流排成分为 Pb-Sn-Sb 合金。

该型蓄电池共有正极极板 10 片、负极极板 11 片,正负极之间用隔板隔开。极板为涂膏式,正极极板铅膏为黑色 PbO_2 ,负极极板铅膏为青灰色海绵状铅。正负极极板的极耳通过焊接分别与正负极汇流排连接。中间为白色玻璃纤维隔板,用于吸附和储存电解液,并隔离正负极极板,防止正负极短路,但电解液中的正、负离子和氧气可以通过。

正极汇流排、正极极耳的外观状况较好。但正极板栅腐蚀严重,拆解过程中伴随着板栅筋条的断裂和铅膏的脱落,表明正极板栅筋条已不能起到支撑和导流的作用,并且正极板栅与铅膏的结合能力也出现劣化,影响到电池的内阻、容量和寿命。

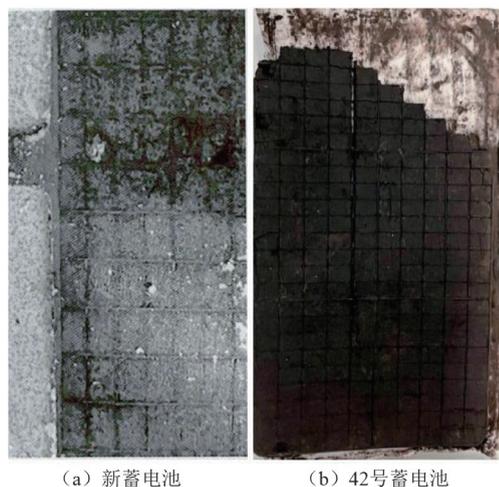
负极汇流排弯曲变形及腐蚀较为严重,部分负极汇流排以及汇流排与极耳的焊接处发生断裂,未断裂的汇流排与极群的连接较疏松。负极极板状态较好,其板栅筋条不易折断,负极板栅与铅膏的结合较为紧密不易脱落。

2 正极板栅腐蚀断裂原因分析

2.1 宏观形貌

解剖 23 号、42 号故障蓄电池,研究上面 2 只蓄电池的正极极板。从结果可以看出,23 号、42 号蓄电池正极板栅腐蚀较为严重,起到支撑和导流作用的板栅筋条断裂或消失,已无法保持极板骨架的正

常使用,在解剖过程中轻轻一碰,极板即发生断裂,而且活性物质从板栅筋条上龟裂、脱落、破碎,板栅与活性物质之间出现明显缝隙。而作为对照研究的新蓄电池正极板栅筋条粗壮,板栅与活性物质结合紧密。对比照片如图 1 所示。



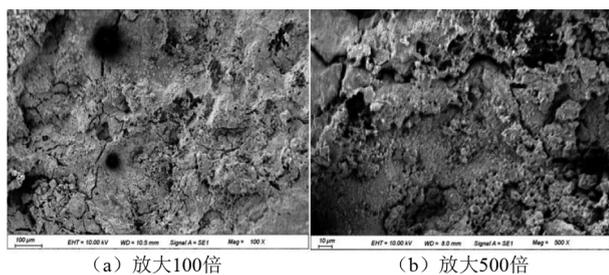
(a) 新蓄电池

(b) 42号蓄电池

图 1 新蓄电池与 42 号蓄电池正极板栅及活性物质对比

2.2 微观形貌

采用德国蔡司扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察正极板栅的微观腐蚀形貌。以 42 号蓄电池为例,从图 2 可以看出,42 号蓄电池正极板栅放大后,表面裂纹、碎屑较多,呈疏松孔洞状,说明腐蚀程度较重。



(a) 放大100倍

(b) 放大500倍

图 2 42 号蓄电池正极板栅微观腐蚀形貌

2.3 元素分析

通过能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 测量正极板栅基体和表面腐蚀层化学成分。以 42 号蓄电池为例,EDS 结果如图 3 所示。基体化学成分说明正极板栅材质为 Pb-Sn-Sb 合金,少量的 O 元素峰来自未打磨完全的氧化层。正极板栅表面腐蚀层化学成分中 O 元素含量大幅增加到 16.2%,S 元素从 0 增加到 4.8%,表明正极板栅先腐蚀继而氧化,腐蚀产物以 PbO_2 为

主,还有少量 PbSO_4 , 腐蚀导致使栅呈疏松脆性, 容易断裂而失效。

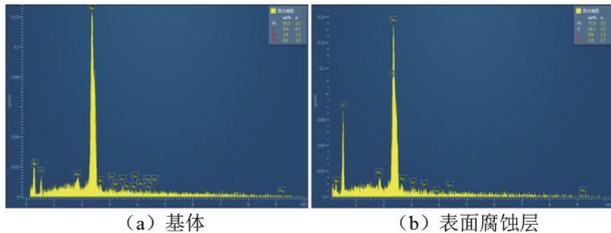


图3 42号蓄电池正板栅基体和表面腐蚀层EDS谱图

2.4 腐蚀原因分析

正极板栅的腐蚀,一方面使得与活性物质直接接触的高导电性的铅合金生成了导电性较差的腐蚀产物 PbO_2 ; 另一方面,由于 PbO_2 的体积大于 Pb , 会使板栅发生膨胀变形^[5]。然而活性物质方块不受腐蚀过程的影响,尺寸始终未变,会导致活性物质发生明显脱落、缝隙以及板栅断裂,从而导致内阻增大、正极板失效、电池容量下降等严重后果。

3 负极汇流排腐蚀断裂原因分析

3.1 宏观形貌

拆解蓄电池后发现,23号、42号蓄电池负极汇流排腐蚀严重。23号蓄电池负极汇流排已断裂,断口处覆盖着一层厚厚的白色粉末状腐蚀产物,极柱表面覆盖一层厚厚的白色粉末。42号蓄电池负极汇流排腐蚀同样严重,表面腐蚀状态与23号蓄电池类似,缓慢拉出极群即发生汇流排断裂,表明汇流排疏松脆易断,已无法抵御轻微的应力作用。且部分汇流排与极耳焊接处已经断裂,断口处覆盖着一层厚厚的白色粉末状腐蚀产物,未断裂的极群与汇流排之间的连接极为疏松,有明显的腐蚀现象。极柱表面覆盖一层厚厚的白色粉末状腐蚀产物。23号蓄电池和42号蓄电池负极汇流排宏观形貌照片如图4所示。

3.2 断面分析

为进一步研究负极汇流排腐蚀机理,对42号蓄电池负极汇流排断面进行了分析。断面扫描电镜(SEM)10倍到500倍放大图如图5所示。从图中可以看到,负极汇流排的腐蚀属于典型的晶间腐蚀,表现为腐蚀分层、明显裂纹与粗大晶粒,裂纹沿晶界生长,促使沿晶断裂产生,断层放大后可以明显观察



(a) 23号蓄电池

(b) 42号蓄电池

图4 23号蓄电池和42号蓄电池负极汇流排宏观形貌照片

到重结晶形成的粗大 PbSO_4 晶体。这种腐蚀使负极汇流排合金晶粒之间失去结合力,金属强度下降。负极汇流排材质为 Pb-Sn-Sb 合金,腐蚀产物主要为 PbSO_4 , Pb 在腐蚀过程中体积由 $18.27 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 膨胀变大至 PbSO_4 的 $48.91 \text{ cm}^3/\text{mol}$, 体积增加近2.7倍,造成其应力腐蚀开裂,进一步加剧晶间腐蚀,导致负极汇流排腐蚀断裂^[6]。

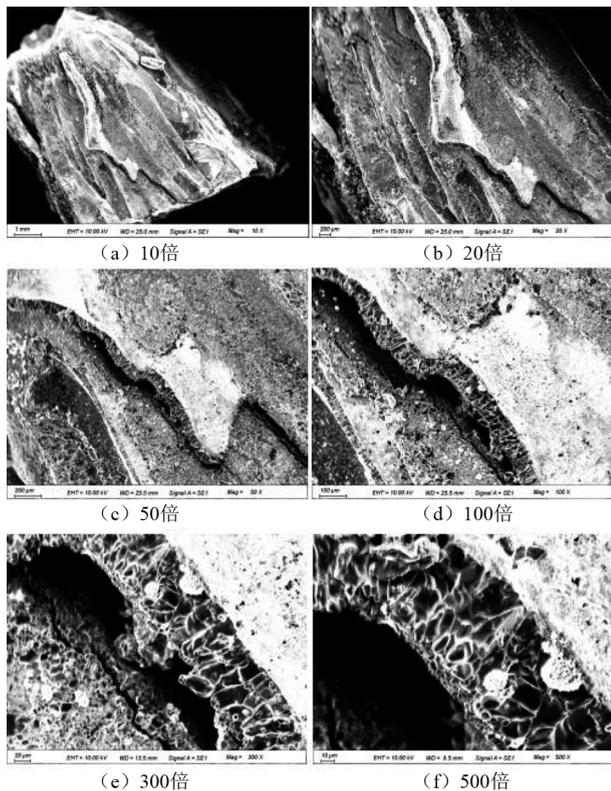


图5 42号蓄电池负极汇流排断面扫描电镜照片

3.3 微观形貌

采用SEM对负极汇流排不同部位腐蚀层进行微观形貌分析,放大倍数均为500倍。图6为42号蓄电池负极极耳表面腐蚀层、汇流排表面腐蚀层、汇流排断口处腐蚀层、极柱表面腐蚀层的SEM腐蚀形貌照片。从图中可以看出,负极极耳腐蚀层较为致密,说明腐蚀程度不高;汇流排表面腐蚀层由疏松的

絮状物、针状物和细小的 PbSO_4 晶体组成; 汇流排断面处白色粉末状腐蚀产物主要由中等大小的 PbSO_4 晶体组成; 极柱腐蚀层由重结晶形成的粗大 PbSO_4 晶体和 PbO_2 细小晶粒组成, 阻止极柱处的腐蚀进一步深入进行。

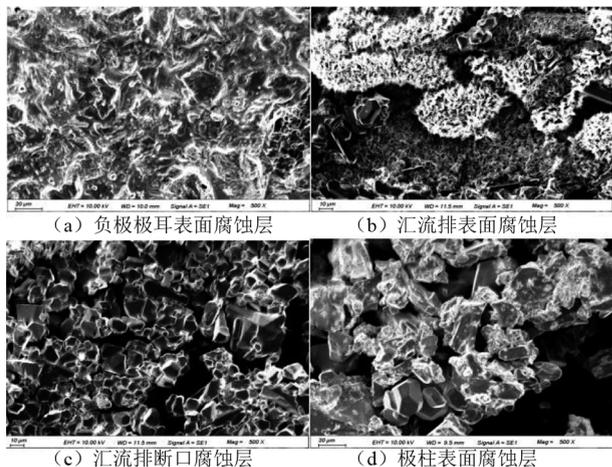


图 6 42 号蓄电池不同部位腐蚀层微观形貌照片

3.4 元素分析

采用 EDS 对负极汇流排基体和不同部位的腐蚀层进行元素分析, 结果如表 1 所示。负极汇流排基体成分为 Pb-Sn-Sb 合金, 少量的 O 元素峰来自表面未打磨完全的氧化层。从极耳到汇流排, 表面腐蚀层化学成分中 O 元素含量从 12.4% 增长到 22.3%, S 元素含量从 4.0% 增长到 9.6%, 表明负极汇流排较极耳腐蚀更严重。此外, 负极汇流排腐蚀层的 Sn 含量为 21.6%, 较极耳腐蚀层的 Sn 含量 (5.5%) 增长明显, 也比汇流排基体的 Sn 含量 (2.1%) 高出许多。说明 Sn 集中在腐蚀区, 发生严重的偏析, 使 Sn 富集在晶带处。晶间腐蚀导致负极汇流排铅合金晶粒之间结合力下降, 降低铅合金的力学强度, 导致负极汇流排腐蚀断裂^[7]。除了 Sn 以外, 汇流排合金中含有的 Sb, 也会引起合金中 Sb 偏析, 加速汇流排腐蚀^[5]。极柱处腐蚀层的 O 元素、S 元素含量与负极汇流排相比变化不大, 而 Pb 元素含量明显升高, 且 Sn 的峰明显降低, Sn 含量仅为 0.8%, 说明极柱处腐蚀程度低于汇流排。汇流排和极柱腐蚀层发现少量 Na 元素, 可能来源于硫酸电解液中添加的 Na_2SO_4 。

3.5 腐蚀机理分析

由于蓄电池是立式安装, 负极极板与电解液接触程度不同, 导致不同区域的电位会有差异。将负极极板分为区域 I、区域 II、区域 III, 如图 7

所示^[2,6]。

表 1 42 号蓄电池负极汇流排基体、极耳、汇流排、极柱处腐蚀层元素含量分析

元素质量分数/%	Pb	O	Sn	Sb	S	Na
基体	91.5	5.8	2.1	0.5	—	—
极耳	77.9	12.4	5.5	0.2	4.0	—
汇流排	45.5	22.3	21.6	—	9.6	1.0
极柱	63.8	23.4	0.8	0.8	10.1	1.1

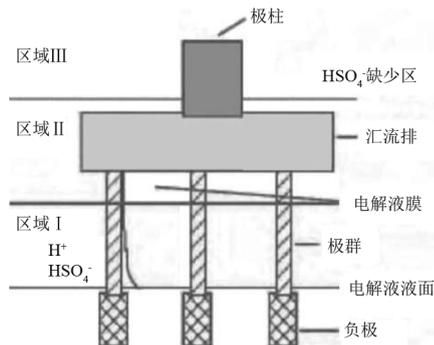


图 7 负极极板腐蚀机理解析

区域 I 为电解液液面上方 2 cm 以内的负极极耳, 此部分金属 Pb 相对于电解液的电位为负, 所以被阴极保护, 腐蚀程度较轻。

区域 II 的负极汇流排属于电解液膜减薄区, 由于负极汇流排以及汇流排与极耳的焊接处相对于电解液形成正电位差, 导致该区域失去阴极保护, 进而造成汇流排及极耳焊接区的腐蚀。该区域为负极汇流排的最大腐蚀区域。

区域 III 所在的极柱属于 HSO_4^- 缺少区, 由于表层液膜中的 H^+ 和 SO_4^{2-} 离子已经几乎完全消耗, 因此, Pb 被氧化成 PbO_2 , 腐蚀产物较为致密, 减缓了极柱处的腐蚀进一步发生。

综上所述, 距离液膜一定高度的负极汇流排及极耳焊接区的腐蚀最严重。腐蚀最终会导致汇流排断裂、极耳与汇流排断开, 以致负极极板失效。

3.6 腐蚀原因分析

从材质和工艺角度, 负极汇流排腐蚀可能与以下两个方面原因有关:

1) 负极汇流排腐蚀可能与含有金属 Sb 有关。研究发现汇流排铅合金中含有 Sb 元素会引起 Sb 在合金晶界处偏析, 从而加速汇流排的晶间腐蚀^[8]。

2) 负极汇流排与极耳在焊接过程中会改变合金金相结构, 导致 Sn 的偏析, 引起晶间腐蚀^[5]。此外, 焊接不均匀造成的虚焊, 也会引起缝隙腐蚀。

4 结 论

拆解试验结果表明,该站直流电源蓄电池失效主要是由正极板栅腐蚀断裂与负极汇流排腐蚀断裂所致。

1) 正极板栅腐蚀断裂与蓄电池浮充电电压过高有关。过充电时会加速正极板栅腐蚀,使正极板活性物质与板栅脱离,导致蓄电池内阻增大、正极板失效、电池容量下降。

2) 负极汇流排腐蚀与其材质和工艺密切相关。该型蓄电池负极汇流排为 Pb-Sn-Sb 合金材质,会引起 Sb、Sn 在合金晶界处偏析,加速汇流排的晶间腐蚀。同时,负极汇流排的焊接工艺不良也会在一定程度上加速其腐蚀。负极汇流排腐蚀的危害较大,甚至会导致汇流排断裂、电池开路等严重后果。

参考文献

- [1] 汪毅,马小平,宋昭昭. 浅谈铅酸蓄电池在变电站中的应用与发展[J]. 蓄电池, 2012, 49(5): 204-208.
- [2] 刘敏,朱宇勋,伍廉奎. 某变电站用铅酸蓄电池失效分析[J]. 蓄电池, 2021, 58(2): 74-79.
- [3] 钟国彬,刘石,徐凯琪,等. 变电站用 VRLA 蓄电池典型失效模式及危险性分析[J]. 蓄电池, 2017, 54(4):

160-169.

- [4] 季虎. 一起蓄电池引发的事故分析[J]. 电力安全技术, 2007(7): 32.
- [5] 吴章权. 阀控式铅酸蓄电池负极汇流排腐蚀的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 朱华,李国民,赵光金,等. 阀控式铅酸蓄电池负极汇流排的腐蚀成因及防护对策[J]. 材料保护, 2015, 48(12): 61-63.
- [7] 唐明成,梁景志. 密封铅酸蓄电池负极汇流排腐蚀研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007(4): 76-80.
- [8] 国家电网有限公司. 变电站蓄电池组采购标准 第1部分:通用技术规范:Q/GDW 13183.1—2018[S]. 北京:中国电力出版社, 2019.

作者简介:

王志高(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为输变电设备腐蚀与防护;

董汉彬(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为直流电源;

陈家慧(1991),女,博士,高级工程师,研究方向为金属技术监督;

王方强(1970),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网环境监测;

许光达(1987),男,硕士,高级工程师,从事变电站交直流电源运检。

(收稿日期:2022-08-26)

(上接第52页)

参考文献

- [1] 李健华,刘继春,付浩,等. 基于国外现货市场与四川实际的现货市场建设分析[J]. 四川电力技术, 2021, 44(2): 83-88.
- [2] 胡阳,杨泽,房方,等. 火电机组供电碳减排高维运行特征提取及其最优基准值确定[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 210-220.
- [3] 彭元,娄素华,范越,等. 考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3339-3345.
- [4] 刘铠诚,何桂雄,孙洪,等. 碳减排约束下风火发电商市场效益的协调优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 89-95.
- [5] 王淑云,娄素华,刘文霞,等. 考虑火电深度调峰的电力系统低碳发电优化研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 226-231.

- [6] 闫园,林鸿基,文福拴,等. 考虑电价和碳价间 Copula 风险依赖的虚拟电厂竞标策略[J]. 电力建设, 2019, 40(11): 106-115.

- [7] 刘洋,崔雪,谢雄,等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 112-117.

- [8] 王斯娴,刘文霞,王丽娜,等. 容量电价与风光火配比相协调的电源规划[EB/OL]. [2022-07-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220715.1818.004.html>.

作者简介:

李健华(1994),男,博士研究生,研究方向为电力市场、电力系统优化调度;

陈雪(1997),女,研究生,研究方向为电力系统经济性分析及电力市场;

付浩(1981),男,高级工程师,研究方向为电力优化调度。

(收稿日期:2022-08-05)

一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析

骆欣瑜¹, 廖文龙¹, 刘睿¹, 李龙蛟², 任阿阳³

(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特高压直流中心, 四川 成都 610041)

摘要:真空有载分接开关是特高压换流变压器最关键的组部件之一。在某换流站年度检修中,首次报告某厂商特高压换流变压器真空有载分接开关油室乙炔异常增大,经过油色谱分析和现场吊芯检查后,发现过渡电阻与中性点连接处紧固螺栓与螺孔的配合松动引起的放电烧蚀是有载分接开关独立油室乙炔值超标的直接原因。根据异常现象的机理分析,文中针对有载分接开关的检修规程和日常运维提出了建议,为后续类似工作处置提供了宝贵经验。

关键词:换流变压器; 真空有载分接开关; 油色谱; 乙炔; 放电烧蚀

中图分类号: TM 403.4 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2023)03-0090-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230316

Analysis on An Abnormal Acetylene of Vacuum On-load Tap-changers for Converter Transformer

LUO Xinyu¹, LIAO Wenlong¹, LIU Rui¹, LI Longjiao², REN Ayang³

(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 Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The vacuum on-load tap-changer is one of most important components of UHV converter transformers. During an annual maintenance for converter stations, the abnormal increase of acetylene in the oil chamber of vacuum on-load tap-changers of UHV converter transformer is reported for the first time. Based on the oil chromatographic analysis and hanging-core inspection, it is found that the discharge ablation caused by the loose fit between the bolt and the screw hole directly leads to the abnormal acetylene. According to the mechanical analysis of abnormal phenomenon, the suggestions for maintenance standards and daily operation of on-load tap-changers are put forward, which provides precious experiences for the follow-up similar works.

Key words: converter transformer; vacuum on-load tap-changer; oil chromatogram; acetylene; discharge ablation

0 引言

在高压直流输电系统中,有载分接开关为换流变压器的关键组部件。它通过改变调压绕组接入回路的匝数来调节变压器变比,主要功能为维持网侧电压恒定,保证换流阀控制角处于最佳工作范围以及控制直流系统降压运行等^[1-2]。鉴于对换流变压器可靠性和运行安全性的高要求,真空有载分接开关在特高压换流变压器中被广泛采用。

相比于传统油灭弧有载分接开关,真空有载分

接开关引入真空泡技术,拉弧的动静开关触头处于真空泡内。由于真空泡内有屏蔽罩,当动静触头拉弧时所产生的金属蒸汽将被密闭于真空泡内,不会导致绝缘油裂解或炭化^[3]。因此,真空有载分接开关油室内乙炔含量远少于传统油灭弧式有载分接开关。根据某厂商内部资料可知,换流变压器用VR型真空有载分接开关油室中乙炔主要来源于每次正常切换时暴露于油中的主触头尾流放电。通常,在固定的切换次数下油中乙炔浓度将保持恒定。在换流变压器有载分接开关控制策略不变的前提下,每年有载分接开关的切换次数大致上保持固定^[4]。

因此,在运行 1 年后,有载分接开关油室中乙炔浓度不应超过一定的浓度水平。在年检时,可通过测量油室中乙炔浓度来评估单位运行时间里真空有载分接开关的设备状态。

在对某特高压换流站换流变压器进行年度检修时,发现多台换流变压器分接开关油室乙炔浓度值异常增长,超过了其切换次数下对应的乙炔浓度水平。为此,下面基于油色谱分析和切换开关芯子解体检查,分析了乙炔异常原因并提出了修复措施,为后续类似异常处置工作提供了宝贵经验。

1 异常情况

2022 年 3 月 23 日,在某特高压换流站年检期间开展换流变压器有载分接开关绝缘油试验时,发现 4 台有载分接开关油色谱乙炔值相比往年异常增长,如表 1 所示。极 II 低 Y/D-B、极 II 低 Y/Y-C、极 I 高 Y/Y-A 和极 II 低 Y/D-A 的有载分接开关乙炔值分别为 14.774 $\mu\text{L/L}$ 、3.744 $\mu\text{L/L}$ 、2.588 $\mu\text{L/L}$ 和 2.126 $\mu\text{L/L}$,复测后无差异,其余分接开关乙炔值均在 1 $\mu\text{L/L}$ 以下。

该换流站在 2020 年完成了双极高低端及备用换流变压器的 28 台有载分接开关芯子更换和联接管路更换,并进行了换新油和滤油处理,投运时油中乙炔值应为 0。2021 年年检时,极 I 高 Y/Y-A 有载分接开关油中乙炔含量为 12.41 $\mu\text{L/L}$,进行了滤油处理后继续运行。由此可知,目前极 I 高 Y/Y-A 有载分接开关的乙炔含量 2.588 $\mu\text{L/L}$ 为 1 年运行中产生。

根据 DL/T 574—2021《电力变压器分接开关运行维修导则》第 7.2.1.5 条可知^[5]:“运行中油浸式真空有载分接开关绝缘油含水量及击穿电压试验周

期,与变压器本体保持一致。油色谱分析,检测周期与变压器本体一致,乙炔含量的注意值为 40 $\mu\text{L/L}$;若乙炔含量超过注意值,应缩短检测周期,增长量不宜大于 10 $\mu\text{L/L}$;若乙炔含量超过以上数值与制造厂联系进一步分析处理”,表 1 中乙炔值均未达到注意值。然而,根据厂商提供的书面说明,真空有载分接开关正常切换时主触头尾流放电会有微量乙炔产生,对于该站使用的 VRG 型分接开关,油中乙炔值应小于每 1000 次 4 $\mu\text{L/L}$ 。因此,可以根据有载分接开关的动作次数估算得到乙炔的注意值。

以 2022 年的极 II 低 Y/D-B 有载分接开关和 2021 年的极 I 高 Y/Y-A 有载分接开关为典型案例进行估算。2020 年 2 月至 2021 年 4 月,极 I 高 Y/Y-A 有载分接开关动作 884 次;2020 年 2 月至 2022 年 4 月,极 II 低 Y/D-B 有载分接开关动作 1512 次。根据厂商提供的书面说明材料可估算得到;2022 年极 II 低 Y/D-B 有载分接开关油室的油中乙炔含量应不高于 6.050 $\mu\text{L/L}$ 以及 2021 年极 I 高 Y/Y-A 的乙炔含量应不高于 3.540 $\mu\text{L/L}$ 。然而,2022 年极 II 低 Y/D-B 和 2021 年极 I 高 Y/Y-A 的有载分接开关油中乙炔含量实测值分别为 14.774 $\mu\text{L/L}$ 和 12.400 $\mu\text{L/L}$,均已远超厂家要求的注意值,如图 1 所示。

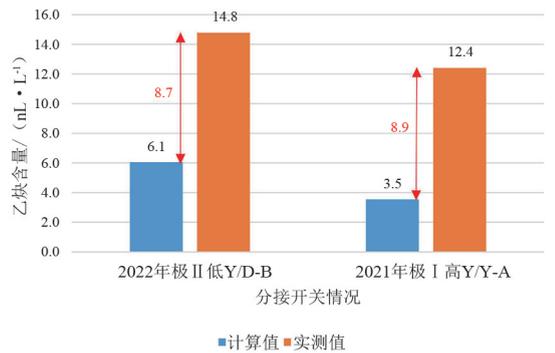


图 1 有载分接开关产气计算和实测对比情况

表 1 换流变压器真空有载分接开关油室油中溶解气体组分及含量

设备名称	检测时间	油中溶解气体组分及含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)							
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C _n H _n
极 I 高 Y/Y-A 有载分接开关	2022-03	35.642	227.209	2040.160	7.992	4.546	1.071	2.588	16.197
	2021-04	114.600	511.920	3294.140	18.640	9.840	1.440	12.410	42.330
极 II 低 Y/Y-C 有载分接开关	2022-03	84.050	320.031	3695.341	17.047	5.936	2.127	3.744	28.854
	2021-04	8.200	32.050	185.360	14.300	5.790	3.760	0.440	24.290
极 II 低 Y/D-A 有载分接开关	2022-03	64.497	388.354	2276.989	16.576	3.923	3.357	2.126	25.982
	2021-04	1.660	151.630	53.760	14.960	1.550	4.770	0	21.280
极 II 低 Y/D-B 有载分接开关	2022-03	95.748	347.241	3270.041	17.775	12.118	1.728	14.774	46.395
	2021-04	9.350	50.900	487.820	7.470	4.090	0.510	0.100	12.170

综上所述,可推测得知:极 I 高 Y/Y-A 和极 II 低 Y/D-B 有载分接开关独立油室内部应存在其他形式的高能量放电,导致有载分接开关油室中乙炔值异常增长。此外,其他 2 台有载分接开关的乙炔值相比往年也有异常增长,可能也存在放电隐患。因此,对这 4 台有载分接开关进行吊芯检查。

2 现场吊芯检查

在对极 II 低 Y/D-B 有载分接开关进行吊芯检查时,发现在扇面过渡电阻上部的白色支撑板上存在大量黑色杂质颗粒。经无毛吸油纸擦拭后,颗粒表面呈金属光泽,判断为金属碎屑,如图 2 所示。

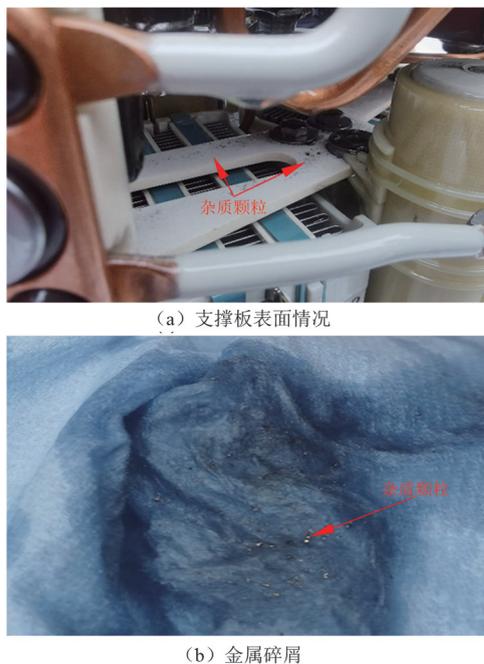
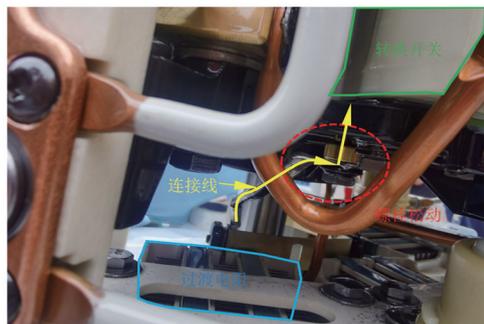


图 2 支撑板表面金属碎屑

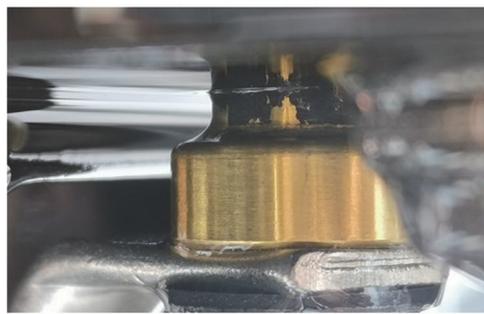
在与厂家技术人员讨论后,一致认为前述杂质及金属碎屑为非正常现象,分接开关继续运行风险大,可能导致有载分接开关严重故障,需要在现场对设备本身进行解体,查找杂质来源。根据杂质的分布情况,首先检查了过渡电阻区域。在拆除过渡电阻到转换开关连接线的紧固螺栓时,发现该螺栓存在松动,螺栓表面有放电烧蚀痕,如图 3 所示。其余 2 台有载分接开关吊芯检查后也发现了相同缺陷。

3 机理分析及措施

针对吊芯检查后发现的現象,需要根据有载分接开关的电气原理和机械构造深入分析隐患机理。



(a) 连接螺栓松动



(b) 连接处存在烧蚀



(c) 正常螺栓与烧蚀螺栓比较

图 3 过渡电阻到转换开关连接线紧固螺杆菌烧蚀

图 4 为 VRG 型有载分接开关的电气原理图。当有载分接开关从分接挡位 n (tap n) 转换至分接挡位 $n+1$ (tap $n+1$) 时,在经过主触头 MC 和主通断触头 MSV 分别转移负载电流 I_L 后,负载电流由 tap n 经转换开关过渡支路 TTF 流经过渡电阻 R ,最后到达中性点 NP。本次吊芯检查中发现的烧蚀点发生在过渡电阻连接中性点的区域。

为了进一步弄清楚过渡电阻连接中性点的区域的结构,图 5 展示了图 4 电气原理图对应的机械结构、转换开关和电流从过渡电阻到中性点的电流路径。由图可知,从过渡电阻流出的电流经紧固螺栓,由长导杆传导至中性点。长导杆本身由转换开关盒子(MTF 和 TTF)底部竖直穿过至其顶部与中性点连接。

对于长导杆和紧固螺栓的连接,其结构设计为:过渡电阻的引出线由紧固螺栓压接于 T 型钢护套上,紧固螺栓与贯穿过转换开关的长金属导杆通过

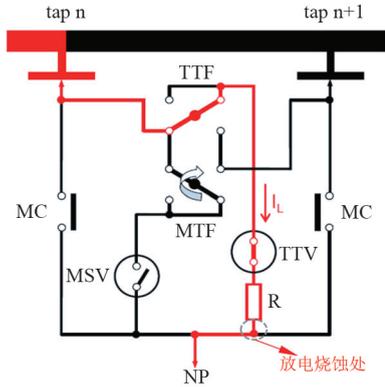


图 4 VRG 型有载分接开关的电气原理

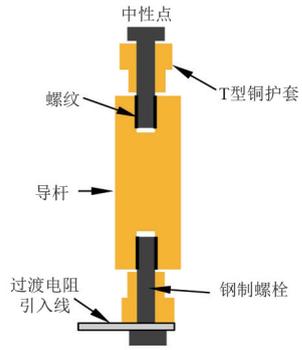
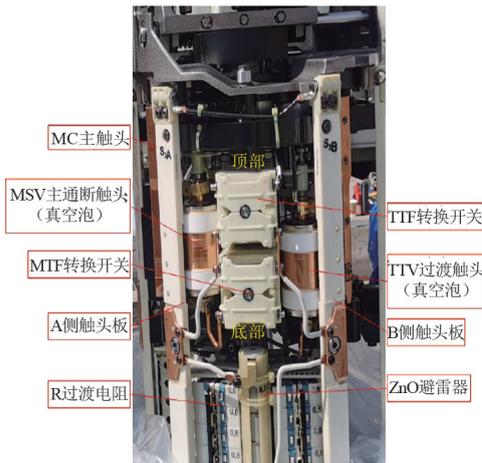


图 6 连接中性点长导杆



(a) 机械结构

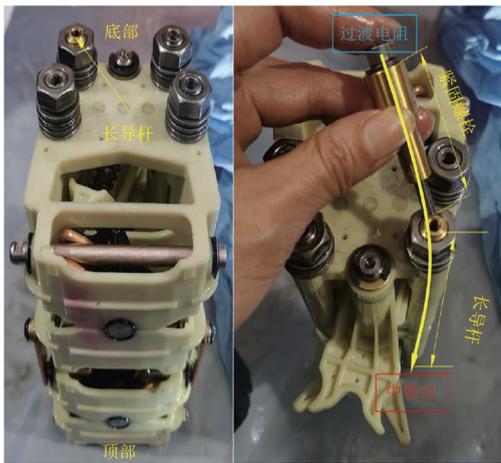


图 7 导杆烧蚀螺孔行纵向切剖

综上所述,由于过渡电阻与中性点通过导杆过渡连接,导杆两端采用盲孔式平面压接载流。该结构(铜质)载流截面小,高度依赖盲头螺栓(钢质)对铜导杆的压接压力。如果压接不紧密或松动,就会造成钢质螺栓分流过热以及载流平面间间隙放电。

在现场及厂内检查,尚未发现造成螺栓松动的原因,初步认为是制造时安装工艺不到位所致。导致安装不良的因素包括:定距螺栓间隙混入异物、螺栓加工尺寸或材料性能未达到工艺要求以及力矩安装时螺栓未充分紧固等。

根据以上的原理和结构可知,螺栓松动引起接触电阻增大,导致过热烧蚀,一旦螺栓压接处烧完脱落,过渡电流支路将失去作用。由于负载电流无法转移,真空泡中电弧无法熄灭,使得主通断支路持续流过大电流,MTF 转动时拉弧造成 tap n 和 tap n+1 级间短路,严重时致油室爆炸。因此,紧急更换烧蚀损螺栓和导杆,并按照厂内装配标准紧固螺栓等相关连接部位。



(b) NTF和TTF

(c) 电流路径

图 5 过渡电阻连接中性点的区域

螺纹配合。当螺纹旋紧时,T 型铜护套与导杆紧密压接,负载电流可从压接端子流经铜护套,然后经金属导杆连接至中性点。

由于烧蚀发生在紧固螺栓与导杆连接处,对其中的导杆烧蚀螺孔进行纵向切割,并与正常螺孔剖面比较,如图 7 所示。相比正常剖面,发现螺孔底部有约 6 丝螺纹被烧毁,并在底部形成明显烧蚀空洞,其余几台的情况均类似。

4 结 论

上面分析了多台换流变压器的真空有载分接开关的油色谱,吊芯检查真空有载分接开关,分析造成乙炔增长的机理,提出修复措施,总结如下:

1) 过渡电阻与中性点连接处紧固螺栓和螺孔之间的松动是导致乙炔异常的直接原因;

2) 目前真空有载分接开关检修规程乙炔注意值偏高, 需要进一步讨论和研究;

3) 真空有载分接开关的乙炔增长可以反映油室内部的缺陷状态, 加装油色谱在线监测装置是必要的。

参考文献

- [1] 沈大中, KRAEMER A, DOHNAL D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 变压器, 2007, 5(1): 58-59.
- [2] 刘雪丽, 李金忠, 高飞, 等. ± 800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程

(上接第 73 页)

造成检测结果中各组分偏低, 而且会导致连续两个测定结果的重复性偏差较大, 尤其是奥斯特瓦尔德系数较小的 H_2 、 CO , 造成的负偏差较其他组分气体更大。

3.3 进样量把控不严

在色谱检测中, 另外一个最常见的引起误差的原因, 就是样品进样量把控不严, 进样量少于 1 mL, 则会引起检测结果各组分低于真实值; 进样量多于 1 mL, 则检测结果各组分高于真实值。从 6 号实验室的比对试验结果显示, 样品一的连续两次测定值的重复性很好, 但样品二的测定值 2 各组分明显高于测定值 1 中的量值, 如表 7 所示。可排除注射器密封不严的原因, 判断为检测人员进样量把控不严导致的。

表 7 6 号实验室的比对试验结果 单位: $\mu L/L$

样品名称	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	H_2	CO	CO_2
样品一	测定值 1	2.06	1.15	1.21	0.49	15.53	67.74 360.33
	测定值 2	2.01	1.16	1.21	0.50	15.22	67.30 335.04
样品二	测定值 1	28.27	21.54	15.75	6.90	64.76	503.60 2 529.44
	测定值 2	29.89	22.35	16.34	7.18	67.25	521.53 2 596.05

4 结 论

由上面的分析可知, 影响变压器油色谱检测结果的因素有多种, 包括未准确输入试验环境信息、测量仪器零部件老化、检测过程中细节把控不严等, 对检测结果的影响也不尽相同, 可能导致油中溶解气体的单组分或多组分的产生较大偏差。为了提高油色谱数据质量, 更准确地掌握充油设备的状态, 对油色谱检测中仪器的维护、试验环节的把控提以下建议:

1) 每次试验时, 准确输入当前试验环境温度、

学报, 2016, 36(19): 5350-5356.

- [3] 张德明. 变压器真空有载分接开关[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 郭贤珊, 李凤祁, 阮思焯, 等. 高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 9-19.
- [5] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

作者简介:

骆欣瑜(1991), 男, 博士, 工程师, 从事变压器故障诊断和隐患机理研究。

(收稿日期: 2022-07-27)

大气压等环境信息;

2) 气相色谱仪应定期维护, 更换老化的零部件, 确认仪器的准确性和稳定性;

3) 每次标定气体前, 对标气瓶管路进行充分清洗, 并核对标气谱图的峰高、峰位置;

4) 使用的注射器无卡涩、密封良好, 试验时可用空白油对注射器进行浸润, 杜绝使用含故障特征气体浓度较高的绝缘油进行浸润;

5) 试验时, 准确读取 1 mL 样气, 若气样量不足 1 mL, 需准确填写实际进样量;

6) 在进行样品检测时, 尤其是低浓度样品, 注意对谱图进行人工确认, 及时去除干扰峰。

参考文献

- [1] 林永平. 色谱分析在变压器故障诊断中的应用和探讨[J]. 变压器, 2008, 45(8): 58-63.
- [2] 谢荣斌, 薛静, 张霖, 等. 基于油色谱分析的变压器故障诊断与应用[J]. 广电电力, 2017, 30(8): 117-121.
- [3] 吴立增. 变压器状态评估方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [4] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [5] 全国电气化学标准技术委员会. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法: GB/T 17623—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 操敦奎. 变压器油色谱分析与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [7] 牟雪云, 李东东. 利用油中特征气体诊断变压器绝缘寿命[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(5): 433-442.

作者简介:

田倩倩(1989), 女, 硕士, 研究方向为电气设备绝缘介质检测及分析。(收稿日期: 2022-10-25)

“源网荷储” 统筹规划、科学有序、 创新发展等方面的发展及应用 征稿启事

在中国适时推进加快构建新发展格局的政策背景和“双碳”战略目标指引下，建设清洁低碳、安全高效的新型能源体系，提高能源供给保障能力成为转变经济发展方式、保障国家能源安全的重要一环。

新型能源体系的构建，是全面推进碳达峰、碳中和的重要举措，新型电力系统是能源高质量发展、中国现代化经济体系转型升级的重要载体。在国家发展大局中，“经济—能源—环境”三方关系正在向“新发展格局—新型电力系统—碳达峰碳中和”目标同步演化，也对当前能源与电气工程领域提出了新的挑战。针对新型能源体系构建研究、新型电力系统的转型路径以及电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧等相关领域的支撑技术，《四川电力技术》开展“新型能源体系构建与新能源高质量发展的研究及应用”专题探讨，诚邀广大专家、学者和专业人士投稿！

一、征稿范围（包括但不限于）

- （1）构建新型能源体系对新能源高质量发展的作用
- （2）新能源发展现状及关键技术研究进展
- （3）以新能源为主体的新型电力系统路径优化
- （4）新型能源体系构建中“源、网、荷、储、共性关键支撑”的技术应用，以及在统筹规划、科学有序、创新发展等方面的发展及应用研究
- （5）新型能源体系中的市场机制与交易模式
- （6）新型储能与氢能技术
- （7）综合能源联合优化及多能互补

二、截止时间

2023年6月15日

三、投稿要求

- （1）论文应具有原创性，未公开发表，未一稿多投，不涉及署名争议，不涉及侵犯他人知识产权和泄露国家机密的内容，作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- （2）摘要250~300字为宜，须包含四要素，即目的、方法、结果、结论，同时应着重说明文章的创新点。
- （3）论文引言中研究目的清晰明确，详细介绍国内外研究背景，对现有其他研究者的工作进行客观的评述；阐述自己的观点，并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚，数据合理并被正确地分析和解释；比较所提出的方法和现有方法的优缺点。
- （4）正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练，避免长篇公式推导，字数以不超过6000字(包括图表)为宜。
- （5）结论部分应概括文章研究工作，给出创新性、指导性结论。
- （6）来稿请用Word排版，格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。
- （7）请保留论文图片、曲线和表格原始文件，必要时提交。

四、投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站：<http://scdljts.ijournals.cn/scdljts/home>，投稿栏目请选择“源网荷储的发展及应用”专题。

五、投稿联系人

陈老师：028-68134130

程老师：028-69995169

罗老师：028-69995168

公益



保护环境·从我做起

低碳减排 绿色生活

Low Emission Green Life

绿色 低碳

