

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第48卷第2期

2025年04月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二五年
第四十八卷
第二期



ISSN 1003-6954



9 771003 695258



《四川电力技术》公众号



《四川电力技术》官网

- 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

“柔性直流输电系统运行控制与故障防御” 专栏征稿启事



随着中国双碳战略的加快推进，新型电力系统建设进入关键期，新能源发展迈入大规模、高比例新阶段。柔性直流输电系统作为支撑新能源并网、远距离输送及电网灵活控制的重要手段，其应用规模不断扩大。当前，柔性直流多类型换流器设备渗透率、送电容量和电压等级正持续提升，接入形式更加多样化、复杂化，为其高效稳定运行与安全防御带来重大挑战。一方面，多类型换流器设备大量接入，电力系统转动惯量和频率调节能力持续下降，电压调控能力弱化，电网频率稳定、电压稳定和宽频带振荡等问题进一步凸显，严重威胁着系统稳定和设备安全。另一方面，柔性直流固有的弱阻尼特征导致故障电流上升速度快、峰值高，随着送电容量和电压等级的进一步提升，对柔性直流故障防御能力提出了更高要求。随着新型电力系统建设提速，亟需加强在柔性直流输电系统主动支撑技术、故障防御技术等关键领域的研究与应用。

为了促进柔性直流输电系统运行控制与故障防御技术的发展与应用，集中呈现和交流研究成果，《四川电力技术》特邀**国网四川省电力公司电力科学研究院正高级工程师李小鹏**与**国网经济技术研究院有限公司高级工程师徐莹**作为特约主编，主持“柔性直流输电系统运行控制与故障防御”专栏，希望与作者和广大读者一起探讨柔性直流输电领域的关键技术和应用问题。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

一、征稿内容（包括但不限于）

- (1) 柔性直流输电系统跟网、构网控制技术
- (2) 柔性直流输电系统优化运行及控制方法
- (3) 柔性直流输电系统宽频振荡分析与控制技术
- (4) 柔性直流输电系统稳定性分析
- (5) 柔性直流输电系统故障分析与保护新原理

二、截止时间

2025年4月30日截稿，并在《四川电力技术》择期刊出。

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。

四、投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站<https://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“**柔性直流输电系统运行控制与故障防御**”专题。

五、投稿联系人

李老师：18116560616

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 李建
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
唐万斌 梅生伟 黄琦
董秀成 蒋兴良 韩晓言
廖学静 滕予非
秘书 贺含峰
程文婷

目次

· 新型电力系统 ·

基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法研究
..... 潘 翀,郝文斌,谢 波,孟志高,何凌云,卫佳奇(1)
考虑牵引负荷接入的薄弱电网风光储选址定容规划
..... 姜晓锋,王 豪,潘鹏宇,陈 刚,王 曦,韩晓言(8)
基于改进白鲸算法的分布式光储优化规划方法
..... 姚建东,吴 凡,谢 波,郝文斌,杨毅强,孟志高(16)
飞轮储能辅助火电机组一次调频控制策略
..... 赵 康,田玉婷,刘锶淇,孙昕炜,魏 巍(24)
基于短路电流约束的新能源最大接入容量实用化计算方法
..... 潘 艳,李付强,黄明辉,赵 伟,张 野,张文朝(32)
变速抽水蓄能机组的快速调频能力与动态特性分析
..... 杨桂兴,郭小龙,常喜强,亢朋朋,宋朋飞,颜 勤(38)
基于空间近似的主动配电网灵活性区间优化调度..... 张胜飞,刘 毅(46)

· 电网技术 ·

基于整数规划的配网故障供电负荷恢复优化算法
..... 杨向飞,向 博,金 震,王可淇,钟俊,徐方维(55)
接入光伏发电系统的电力电子变压器控制策略研究
..... 陈仁钊,李惠祝,夏 岩,杨屹立,石进辉,陈 杨,张 蕊(61)

· 电力运检技术 ·

基于电压互感器非线性宽频模型的宽频电压测量
..... 穆 舟,姜聿涵,张晨萌,程 铭,罗东辉,谢施君,邵千秋,夏亚龙(70)
计及三相隔离变压器保护的铁磁谐振防护措施
..... 苏学能,张 华,王 晶,于宗民,龙 呈(75)
基于多任务学习的变电站设备腐蚀检测
..... 王志高,兰新生,张文瑄,王方强,王 玫(81)

智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法

..... 韩 睿,姜振超,李小鹏,郑永康,吴 杰(87)

· 电力设计与优化 ·

基于变电站雷电安全运行年的避雷线塔空气击距简化计算方法
..... 邢 毅,骆 玲,丁晓飞,李良霄,唐紫婧(92)
永磁同步电机无位置传感器全速域控制方法
..... 廖宗毅,孙睿哲,冉韵早,刘鑫东,赵尧麟,郑国鑫(96)
单相多电平并网级联逆变器调制技术的研究..... 郑嘉龙,陈开宇,杨 鸽(103)

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

2025年第48卷第2期(总296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 * 112 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 16

* 2025-04

CONTENTS

· New Power System ·

- Research on Operating Load Forecasting Method for Virtual Power Plants Based on Feature Decomposition
 PAN Chong, HAO Wenbin, XIE Bo, MENG Zhigao, HE Lingyun, WEI Jiaqi(1)
- Planning for Siting and Sizing of Wind-Solar-Storage in Weak Power Grid Considering Traction Load Access
 JIANG Xiaofeng, WANG Hao, PAN Pengyu, CHEN Gang, WANG Xi, HAN Xiaoyan(8)
- Optimal Planning Method for Distributed Photovoltaic and Energy Storage Based on Improved Beluga Whale Optimization Algorithm
 YAO Jiandong, WU Fan, XIE Bo, HAO Wenbin, YANG Yiqiang, MENG Zhigao(16)
- Primary Frequency Regulation Control Strategies for Thermal Power Units Assisted by Flywheel Energy Storage
 ZHAO Kang, TIAN Yuting, LIU Siqi, SUN Xinwei, WEI Wei(24)
- Practical Calculation Method for Maximum Capacity of New Energy Access Based on Short-circuit Current Constraint
 PAN Yan, LI Fuqiang, HUANG Minghui, ZHAO Wei, ZHANG Ye, ZHANG Wenchao(32)
- Analysis on Fast Frequency Regulation Capability and Dynamic Characteristics of Variable-speed Pumped Storage Units
 YANG Guixing, GUO Xiaolong, CHANG Xiqiang, KANG Pengpeng, SONG Pengfei, YAN Qin(38)
- Flexible Interval Optimal Dispatching of Active Distribution Network Based on Spatial Approximation ZHANG Shengfei, LIU Yi(46)

· Power System Technology ·

- Optimization Algorithm Based on Integer Planning for Supply Load Recovery after Distribution Network Failure
 YANG Xiangfei, XIANG Bo, JIN Zhen, WANG Keqi, ZHONG Jun, XU Fangwei(55)
- Research on PET Control Strategy for Connecting to PV Power Generation Systems
 CHEN Renzhao, LI Huizhu, XIA Yan, YANG Yili, SHI Jinhui, CHEN Yang, ZHANG Rui(61)

· Operation and Maintenance Technology ·

- Wideband Voltage Measurement Based on Nonlinear Wideband Model of Potential Transformer
 MU Zhou, JIANG Yuhan, ZHANG Chenmeng, CHENG Ming, LUO Donghui, XIE Shijun, SHAO Qianqiu, XIA Yalong(70)
- Protective Measures Against Ferroresonance Considering Three-phase Isolation Transformer Protection
 SU Xueneng, ZHANG Hua, WANG Jing, YU Zongmin, LONG Cheng(75)
- Corrosion Detection of Substation Equipment Based on Multi-task Learning
 WANG Zhigao, LAN Xinsheng, ZHANG Wenxuan, WANG Fangqiang, WANG Mei(81)
- A Method for Full-link Monitoring and Fault Diagnosis of Supervisory and Control Information in Smart Substation
 HAN Rui, JIANG Zhenchao, LI Xiaopeng, ZHENG Yongkang, WU Jie(87)

· Electric Power Design and Optimization ·

- Simplified Calculation Method for Air Striking Distance of Lightning Protection Towers Based on Lightning Safe
 XING Yi, LUO Ling, DING Xiaofei, LI Liangxiao, TANG Zhiqiang(92)
- Sensorless Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor in Full Speed Domain
 LIAO Zongyi, SUN Ruizhe, RAN Yunzao, LIU Xindong, ZHAO Yaolin, ZHENG Guoxin(96)
- Research on Modulation Technology of Single-phase Multilevel Grid-connected Cascaded Inverter ZHENG Jialong, CHEN Kaiyu, YANG Ge(103)

SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

2025 Vol.48 No.2

(Ser. No. 296)

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

基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法研究

潘 翀,郝文斌,谢 波,孟志高,何凌云,卫佳奇
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘要:虚拟电厂是将各种分布式能源资源相合作为一种高效电厂的能源管理系统,其能够根据电力系统需求进行快速响应,并能降低电力系统运行成本、提高电力系统的整体可靠性和稳定性。然而,由于虚拟电厂的用电负荷具有波动性、随机性、季节性及峰谷差异显著等特征,给虚拟电厂电力供应管理带来了挑战。为解决上述问题,提出了一种基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法,这对虚拟电厂的电力的调度和需求响应提供信息支撑。首先,使用局部加权散点平滑法的季节趋势分解方法捕捉虚拟电厂负荷数据的趋势、季节性变化特征,得到历史负荷资源特征数据;然后,结合历史负荷资源数据和外部影响因素构建基于长短期记忆网络负荷预测模型;最后,应用虚拟电厂运行数据进行实验验证。结果表明,所提方法的决定系数 R^2 为0.98,能够实现电厂负荷精准预测。

关键词:虚拟电厂;分布式能源资源;负荷预测;长短期记忆网络;特征分解

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0001-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250201

Research on Operating Load Forecasting Method for Virtual Power Plants Based on Feature Decomposition

PAN Chong, HAO Wenbin, XIE Bo, MENG Zhigao, HE Lingyun, WEI Jiaqi
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Virtual power plants (VPPs) integrate various distributed energy resources to create an efficient energy management system, which can swiftly respond to the demands of power grid, reduce operational costs and enhance the overall reliability and stability of power supply. However, the management of power supply in VPPs is challenged by the volatility, stochasticity, seasonality and substantial peak-valley variations inherent in electricity load dynamics. To address these challenges, an operating load forecasting method for virtual power plants based on feature decomposition is proposed, which provides essential information support for both power dispatching and demand response within VPPs. Firstly, seasonal-trend decomposition using LOESS (STL) is employed to capture trend and seasonal variation characteristics in virtual power plant load data, thereby extracting historical load resource features. Secondly, a load forecasting model based on long short-term memory (LSTM) network is developed by integrating historical load resource data with external influencing factors. Finally, experimental verification is carried out using operational data from virtual power plants. The results show that the determination coefficient R^2 of the proposed method is 0.98, which can accurately predict the power plant load.

Key words: virtual power plant; distributed energy resources; load forecasting; long short-term memory; feature decomposition

0 引言

随着生态环境的恶化,中国提出了于2030年实现碳达峰、2050年实现碳中和的宏伟目标^[1]。在此

基金项目:国网四川省电力公司科技项目“新型电力系统背景下虚拟电厂控制策略及运行方法研究”(521904240005)

背景下,新能源逐渐成为新型电力系统的主要发展方向和核心电力来源。然而,由于风能和太阳能等新能源具有间歇性和不确定性,导致其在电力供应过程中存在波动性和不可预测性,给电力系统的稳定运行带来了挑战^[2]。虚拟电厂以其能够整合和优化分布式能源资源、提高电力系统灵活性和响应速度的特性,为解决上述问题提供了一种创新且有

效的方案^[3]。通过分布式能源资源的聚合和链接,虚拟电厂能够将分散的风能、太阳能发电装置、储能系统、可控负荷以及电动汽车等多种分布式资源聚合成一个可统一调度和管理的虚拟整体。这样不仅可以实现对新能源发电量的实时预测和动态调节,确保电力供需的平衡和稳定;还能在新能源发电过剩时通过储能和负荷调节等手段,有效吸纳并储存多余电量,待需求高峰时再释放,从而大幅提升能源利用效率,促进新能源的可持续发展^[4]。

当前,为提高虚拟电厂的电力利用效率,对其用电负荷预测展开了大量研究。首先,为了解决储能配置有限导致的可调容量不足、光伏短时出力难以精确预测以及功率分配不合理等问题,文献[5]提出了一种基于随机模型预测控制的虚拟电厂二次调频策略。该策略通过聚合多种分布式能源资源,实现了对电力系统需求的快速、准确响应,并显著降低了功率调节对系统内部电压的不良影响。与此同时,为了更深入地分析挖掘分布式资源与电力系统之间的交互活跃程度,文献[6]提出了一种基于长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)的短期混合信息流预测模型。该模型能够综合考虑多种外部因素,对分布式能源的出力情况进行精准预测,从而有效提高了系统的控制效率和能源利用效率。此外,虚拟电厂能够将需求侧资源和分布式能源与传统电网进行深度融合。然而,随着虚拟电厂规模的扩大和应用的深入,电能质量与可靠性问题成为制约其发展的关键因素。为此,文献[7]通过聚类分析和关联度分析方法对负荷进行精准预测,为虚拟电厂的需求响应、清洁能源消纳等业务提供了有力支撑。随着智能终端的异构连接和海量数据的接入,传统虚拟电厂的运行管理需求已经远远超出了云计算技术的处理能力。因此,文献[8]将边缘计算技术引入到虚拟电厂的运行管理中,提出了基于边缘计算的虚拟电厂架构及光伏出力预测方法。该方法通过在网络边缘侧进行数据处理和分析,有效提高了系统的实时性和协同性能。另外,为了解决虚拟电厂中光伏不确定性数据挖掘的难题,文献[9]还引入了条件生成对抗网络和变分自编码器。这两种方法能够提取虚拟电厂的不确定性特征,并实现对光伏发电功率的精准预测和稳定控制,为电力系统的运行和规划提供了更加可靠的支持。同时,针对极端天气条件下温度敏感负荷波动剧烈

的问题,文献[10]提出了一种基于时序对抗生成网络的卷积神经网络预测方法。该方法能够充分利用历史数据和实时气象信息,对温度敏感负荷进行精准预测,为虚拟电厂的调度和决策提供科学依据。

上述研究从虚拟电厂的分布式能源资源预测、电能质量与可靠性提升、数据处理与分析技术引入以及光伏不确定性数据挖掘等多个方面入手,推动了虚拟电厂技术的快速发展和广泛应用。这些研究显著提升了虚拟电厂的电力利用效率、系统响应速度、能源管理水平和调度决策的科学性。然而,由于虚拟电厂用电负荷具有复杂性、多变性和不确定性,导致传统的负荷预测方法难以准确捕捉其动态特性,进而影响了虚拟电厂的电力调度精度、能源消纳效率和系统稳定性^[11]。

针对虚拟电厂运行负荷预测中存在的挑战,特别是考虑到负荷数据所固有的季节性和趋势性特征^[12],传统预测方法如基于梯度提升决策树(gradient boosting decision tree, XGBoost)、支持向量机(support vector machine, SVM)和反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)均存在各自的局限性。其中,XGBoost 虽然在处理复杂数据集上表现出色,但在捕捉时间序列数据的季节性、趋势性和长期依赖关系方面存在不足;SVM 虽然能够处理非线性问题,但训练速度慢、对异常值敏感,且其非线性处理能力在面对复杂时间序列数据时显得有限;BPNN 作为多层前馈神经网络,虽具有强大的学习能力,但易陷入局部最优解,还面临梯度消失和爆炸的问题,导致其对时间序列特性的捕捉不够精确。为解决上述问题,下面提出了一种基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法。该方法首先采用基于局部加权散点平滑法(locally weighted scatterplot smoothing, LOESS)的季节趋势分解(seasonal-trend decomposition using LOESS, STL),以精确捕捉虚拟电厂负荷数据中的长期趋势、季节性波动等关键特征。随后,结合温度、节假日效应等外部影响因素,构建了 LSTM 负荷预测模型^[13]。通过选取虚拟电厂数据进行实验验证,对比预测结果与实际负荷数据,评估了模型的预测精度、鲁棒性和泛化能力。实验结果表明,该方法不仅能够准确预测虚拟电厂的未来负荷变化,还能有效应对各种外部因素的不确定性,为虚拟电厂的电力调度和资源优化配置提供了有力的决策支持。

1 虚拟电厂分布式能源出力特性分析

虚拟电厂是一种新型能源管理系统,整合了风力发电、光伏发电、小型发电机、燃料电池等多种发电设备及储能系统^[14]。其中:风力与光伏发电是核心,推动清洁能源利用^[15];其他发电设备作为补充,确保电力稳定并优化生产;储能系统则平衡电网供需,提高电能利用效率,减少对传统电网的依赖,从而增强电网的稳定性和可靠性^[16]。下面对虚拟电厂分布式能源出力特征进行分析。

1.1 风电机组

风力发电受到当地气候因素影响,自然风速的不稳定性决定了虚拟电厂的发电能力,风电机组的发电功率可表述为

$$P_w = \begin{cases} 0, & 0 < v < v_{in} \cup v > v_{out} \\ (v - v_{in})(v_r - v_{in})g_r, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ g_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_w 为风电机组的发电功率; v 为自然风速; v_{in} 和 v_{out} 分别为切入和切出风速; v_r 为额定风速; g_r 为额定输出功率。

1.2 光伏发电

光伏发电的稳定性受到天气和光照影响,光伏发电机组的发电功率可表述为

$$P_{PV} = \eta_{PV} Q_{PV} \theta_{PV} \quad (2)$$

式中: P_{PV} 为光伏发电机组的发电功率; η_{PV} 为光伏板的光电转化系数; Q_{PV} 为光伏板的面积; θ_{PV} 为当地的光照强度。

1.3 化石燃料发电机组

由于虚拟电厂中的可再生分布式能源的发电能力受到环境因素制约,通常需要配备化石燃料发电机组(如柴油发电机)等设备来抑制可再生分布式能源发电的波动性,从而稳定虚拟电厂对外的电力输出,其表现形式为

$$P_o = \frac{T \times n}{\Phi} \quad (3)$$

式中: P_o 为化石燃料发电机组功率; T 为发动机的扭矩; n 为发动机的转速; Φ 为功率转换系数。

1.4 储能系统

由于环境因素的不可预测性,如天气变化等,可再生能源的发电能力呈现出显著的波动性。这种波动性不仅给电力系统的稳定运行带来了挑战,还因电力市场存在峰、平、谷期的分段式定价机制,进一步影

响了电力供应的经济性。储能系统能够在可再生能源发电过剩时储存多余的电能,并在发电不足或需求高峰时释放电能,从而有效平滑电力供需曲线,减少因可再生能源波动对电网造成的冲击。

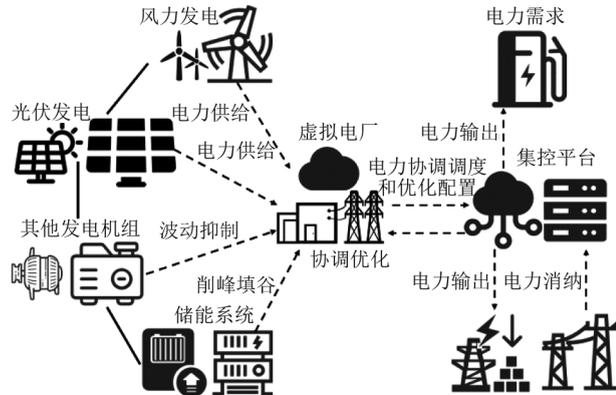


图1 虚拟电厂的分布式能源架构

2 基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法

为了更全面地挖掘虚拟电厂运行负荷数据的特征并提升负荷预测的准确性,下面提出了基于特征分解的虚拟电厂运行负荷方法。首先,利用 STL 特征分解方法,对虚拟电厂的运行负荷数据进行深入解析。STL 方法能够有效地将时间序列数据分解为趋势特征、季节性特征和残差成分,从而区分并提取出负荷数据中的长期趋势性和周期特征,为后续的分析建模提供更为纯净的数据基础^[17]。随后,进一步考虑了影响虚拟电厂运行负荷的多种外部因素,并作为重要的输入变量纳入后续的预测模型中。在此基础上,构建了一个基于 LSTM 的负荷预测模型。LSTM 作为一种特殊的循环神经网络,擅长于捕捉时间序列数据中的长期依赖关系,非常适合处理像虚拟电厂运行负荷这样具有复杂动态特性的数据。最后,将 STL 分解得到的趋势性、季节性特征以及外部影响因素数据作为输入特征,通过多层 LSTM 单元进行特征学习和模式识别,最终输出未来一段时间内的负荷预测值。

2.1 STL 特征分解

STL 特征分解是一种用于时间序列分解的有效方法,通过调整参数来优化季节性和趋势性分量的提取,确保即使在数据中存在异常值时也能获得准确的分解结果。具体计算方法为

$$U_t = S_t + T_t + R_t, t \in [1, N] \quad (4)$$

式中: U_t 、 S_t 和 T_t 分别为 t 时刻虚拟电厂的负荷数据、季节特征和趋势特征; R_t 为残差特征; N 为时间序列数据的长度。

STL 通过执行内外循环实现对虚拟电厂负荷数据的分解, 具体分解方法为:

1) 去除趋势项。用虚拟电厂的运行负荷数据 U_t 减去第 $k-1$ 次内循环的趋势特征 $U_t - T_{t,k}$, 其中取 $T_{t,k}$ 的初始值取 0, 并进行迭代更新。

2) 对子序列进行平滑处理。基于 LOESS 对所有子序列进行回归, 选择适当的周期参数, 并向前后各延展一个周期, 利用平滑结果构建临时季节分量 $S_{t,k-1}^{\text{temp}}$ 。

3) 周期子序列的低通量过滤。根据步骤 2 计算的 $S_{t,k-1}^{\text{temp}}$ 进行滑动平均, 滑动平均的周期取值作为 LOESS 周期参数的值, 继续用 LOESS 对回归结果再次进行回归, 以提取周期子序列的低通量, 得到的结果记作 $L_{t,k+1}$ 。

4) 提取和去除季节特征。其中提取的季节特征为 $S_{t,k+1} = S_{t,k-1}^{\text{temp}} - L_{t,k+1}$ 。去除季节特征的操作则为 $U_t - S_{t,k+1}$ 。

5) 进行趋势平滑操作。对去除季节特征后的数据进行 LOESS 残差分析, 趋势特征记作 $T_{t,k+1}$ 。

最后, 当内迭代达到预定的精度要求时, 内循环终止。随后, 执行外循环, 利用提取的季节和趋势特征计算负荷数据的残差特征 R_t 。

$$R_{t,k+1} = U_t - S_{t,k+1} - T_{t,k+1} \quad (5)$$

在处理虚拟电厂运行负荷时, 将较大 R_t 视为异常值, 据此计算权重系数。并根据权重系数更新季节性和趋势特征, 以减小异常值对结果的影响。权重计算公式为

$$\rho_t = \begin{cases} [1 - (|R_t|/h)^2]^2, & 0 \leq |R_t|/h < 1 \\ 0, & |R_t|/h \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ_t 为 t 时刻的权重; $h = 6 \times m_{\text{edian}}(|R_t|)$, $m_{\text{edian}}(\cdot)$ 为求解时间序列数据的中位数。

2.2 LSTM 负荷预测模型

在 STL 特征分解的基础上提取了虚拟电厂运行负荷的趋势性和季节性特征, 下一步是建立负荷预测模型。较于传统前馈神经网络, 循环神经网络通过连接连续时间步长, 能捕获时间依赖性并提取相关特征。但其在处理长序列数据时易遭遇梯度消失或爆炸问题, 影响长时间依赖关系的获取^[18]。为解决此问题, 采用 LSTM 构建虚拟电厂运行负荷预测模型。其中, LSTM 网络由多个 LSTM 单元依次连

接而成, 一个 LSTM 单元主要由 4 个部分组成: 遗忘门、输入门、存储单元状态和输出门, 其基本结构如图 2 所示。LSTM 模块中各门函数的计算公式可表示为:

$$f_t = \sigma(\omega_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (7)$$

$$i_t = \sigma(\omega_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (8)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(\omega_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (9)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (10)$$

$$o_t = \sigma(\omega_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (11)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh C_t \quad (12)$$

$$\sigma = 1/(1 + e^{-x}) \quad (13)$$

式中: f_t 为遗忘门; i_t 为输入门; \tilde{C}_t 为候选记忆细胞; C_{t-1} 和 C_t 分别为 LSTM 单元在前一个细胞单元和当前细胞单元的状态; o_t 为输出门; h_{t-1} 和 h_t 分别为前一个细胞单元和当前细胞单元的隐藏状态; x_t 为当前时间的输入向量; σ 为 sigmoid 函数; \tanh 为双曲正切函数; ω 和 b 分别为对应各部分的权重参数和偏置项。

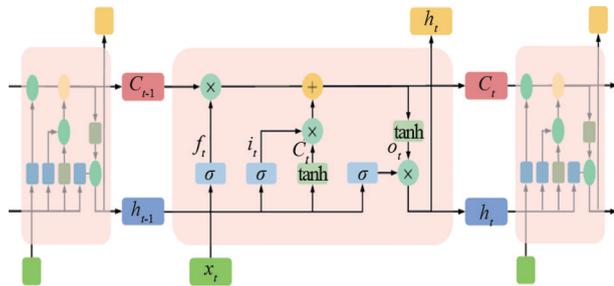


图 2 LSTM 预测模型的基本结构

3 实验验证

所采用的实验数据来源于一个集成了光伏发电、储能系统和风力发电的虚拟电厂, 时间跨度从 2021 年至 2024 年。虚拟电厂具备灵活的电力调度能力, 不仅能够将多余电力及时输送到主电网中, 以满足电力峰值的需求, 还能在电价低谷期有效利用储能系统存储主电网的多余电力, 从而实现电力的平衡和优化配置。其中, 电力峰期和谷期因供需变化而带来的负荷波动, 均与节假日的电力消费模式以及温度等环境因素具有高度关联性。因此, 在深入分析虚拟电厂负荷特性时, 充分考虑了节假日和温度这两个对虚拟电厂运行负荷产生显著且复杂影响的外部因素, 以期准确预测和评估虚拟电厂的运行状态和性能。

在上述数据的基础上,构建 LSTM 负荷预测模型,并将预测结果和 XGBoost、SVM、BPNN、门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)等多种预测方法的结果对比,以验证所提方法的准确性。

3.1 案例数据分析

3.1.1 虚拟电厂负荷数据

虚拟电厂用电负荷数据如图 3 所示,负荷呈现出鲜明的日周期性变化特征。具体而言,负荷峰值显著地集中于白天时段,尤其是工作日的上午至傍晚,这与人们日常的生产生活活动紧密相连,如工业生产、商业运营及居民生活用电等均在此时间段内达到高峰。相对地,负荷低谷则自然而然地出现在夜间,此时大部分生产活动暂停,居民用电也大幅下降。负荷在一天之内的波动幅度不仅大,而且具有一定的规律性,这深刻反映了电力需求的日变化特性,即“昼高夜低”的基本模式。面对如此显著的负荷波动,虚拟电厂必须具备高度的灵活性和强大的调节能力,才能有效平衡供需,确保电力系统的稳定运行。因此,精准预测虚拟电厂的用电负荷可以为电力调度提供科学依据提前布局,如合理安排发电资源、优化储能配置,以及必要时采取需求响应措施,从而应对负荷波动带来的挑战。

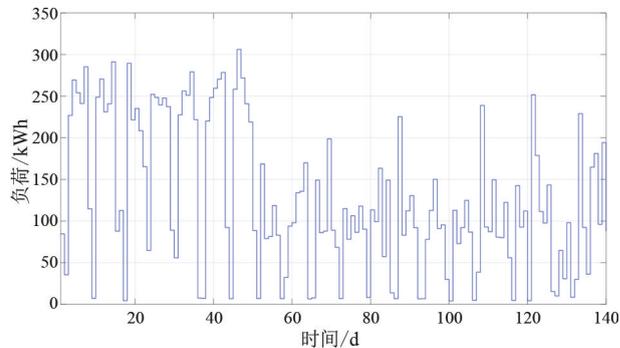


图 3 虚拟电厂负荷数据

3.1.2 外部因素数据分析

在实验数据中,电动汽车充电站作为虚拟电厂用电负荷的主要来源,温度和节假日是影响电动汽车充电的重要因素。外部因素中的温度变化如图 4 所示。温度是影响电动汽车充电需求的重要因素之一。在极端高温或低温天气下,为了维持车内舒适环境,电动汽车的空调系统会消耗更多电能,因此会增加车辆充电的需求。此外,温度还会影响电池的性能和效率,间接影响充电时间和充电量。因此,温度变化对虚拟电厂负荷预测的准确性具有重要影响,必须纳入数据分析模型中进行细致考虑。

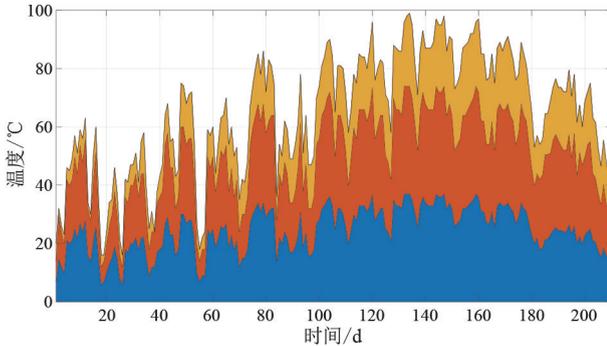


图 4 外部因素的温度变化

节假日期间虚拟电厂的用电负荷如图 5 所示。由于节假日期间人们的出行模式与工作日大相径庭,这直接导致了电动汽车充电需求的波动。例如,长假期间,随着家庭自驾游的增多,电动汽车的充电需求会激增;相反,在部分短假期或特定节日习俗下,充电需求会减少。因此,节假日对电动汽车充电负荷的预测和管理提出了更高要求,需要在数据分析中予以充分考虑。

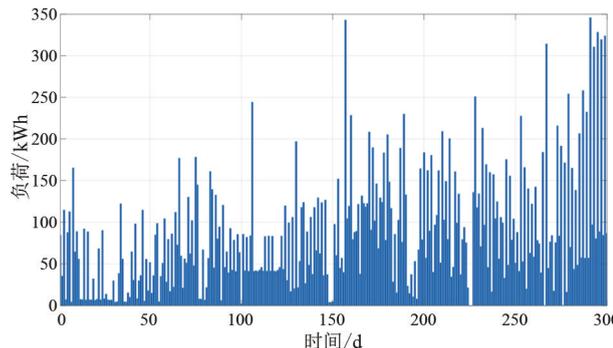


图 5 节假日期间虚拟电厂用电负荷

3.2 STL 特征分解

基于 STL 方法提取的趋势特征和季节特征如图 6 所示。首先,虚拟电厂负荷的趋势特征呈现出逐步增长的趋势,这与电动汽车的数量不断增加相

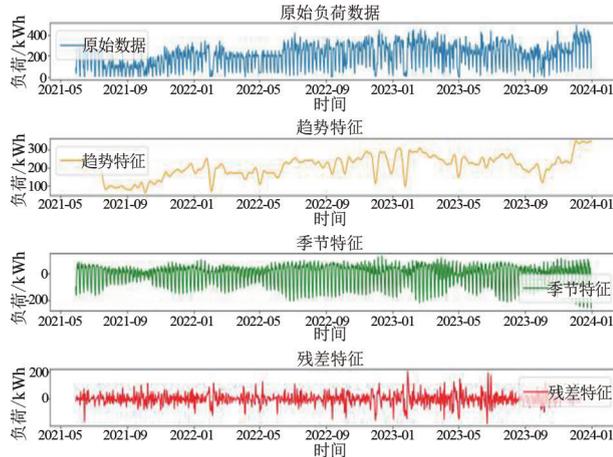


图 6 STL 分解特征

符合。其次,虚拟电厂负荷的季节特征展示了负荷在一定时间段内呈现出周期性波动,如在部分月份的负荷要高于其他时间。最后,负荷数据的残差特征代表着负荷数据中无法以趋势性和季节性解释的部分信息,包括随机波动和异常值,这与虚拟电厂负荷存在一定的不确定性相关。

3.3 基于 STL 特征分解的 LSTM 负荷预测

在 STL 提取的趋势特征、季节特征和残差特征的基础上,结合虚拟电厂负荷影响的外部因素,构建了基于 STL-LSTM 的虚拟电厂负荷预测模型。其中,在数据集划分中将收集到的数据集按照 70%、20%、10% 的比例划分为训练集、验证集和测试集。具体而言,70% 的数据用于模型的训练和学习;20% 的数据作为验证集,用于在训练过程中调整模型参数和选择最佳模型;剩余的 10% 数据作为测试集,用于最终评估模型的性能。LSTM 训练过程的损失曲线如图 7 所示,模型在 400 轮左右实现损失收敛,模型的预测结果达到最优。

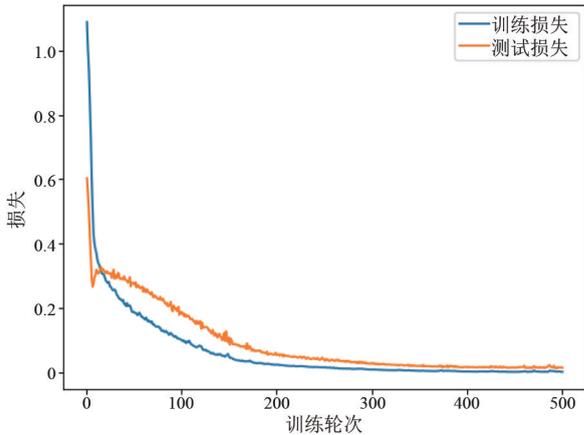


图 7 STL-LSTM 负荷预测模型

3.4 预测结果对比分析

下面采用平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方误差 (mean squared error, MSE) 以及决定系数 (R^2) 3 项指标来评估能耗预测模型的效能。其中,MAE 因其对异常值的低敏感性,在数据含有噪声或异常值时能提供稳定的模型评估结果,有助于把握模型的整体表现。相比之下,MSE 对异常值更为敏感,较低 MSE 值意味着模型预测性能更佳。 R^2 用于量化模型的拟合程度,其取值范围在 0~1 之间, R^2 值越趋近于 1,表明模型与数据的拟合度越高。综上所述,结合 MAE、MSE 与 R^2 3 项指标,可以在不同场景下为预测模型的性能提供一个全面

的评估视角,既涵盖了预测误差的分布情况,也反映了模型的拟合优劣。这些指标的计算公式为:

$$M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*| \quad (14)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (16)$$

式中: n 为虚拟电厂负荷数据的长度; y_i^* 和 y_i 分别为第 i 个样本的实际值和预测值; \bar{y}_i 为样本的平均值。

不同算法的预测结果评价指标如图 8 所示。其中,所提 STL-LSTM 的 R^2 为 0.98 时预测效果最好。STL-LSTM 模型结合了 STL 分解和 LSTM 模型的各自优势:STL 分解能够将原始时间序列数据分解为趋势、周期和随机序列,从而简化数据并提升预测精度及模型解释性;LSTM 模型则擅长处理时间序列中的长期依赖关系,具有门结构控制、细胞状态保存以及适应性强等特性。STL 与 LSTM 的结合通过数据预处理、分别建模和预测以及结果组合等步骤,充分利用了分解后的数据信息,实现了对时间序列数据的精确预测。

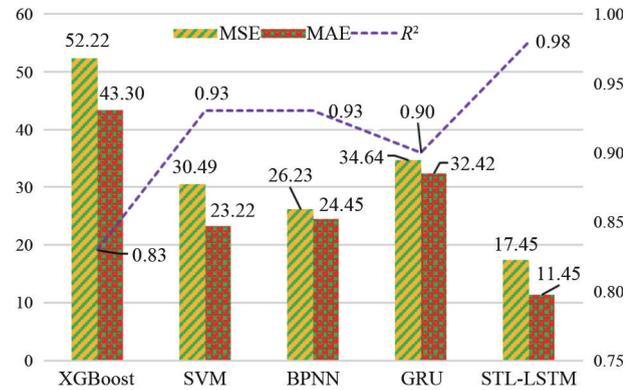


图 8 不同算法的预测指标

不同算法的预测结果如图 9 所示。其中,XGBoost 是一种给予梯度提升的预测算法,但其无法很好地捕捉时间序列数据中的长期依赖关系;SVM 在处理非线性关系时可能需要额外的技巧或特征工程,且其非线性处理能力在面对复杂时间序列数据时显得有限;BPNN 可能受到梯度消失或爆炸问题的影响;GRU 虽然也是一种循环神经网络,但其门控机制可能不如 LSTM 复杂,因此在处理长期依赖关系时可能表现不如 LSTM。STL-LSTM 模型能够充分利用 STL 在时间序列分解上的优势,以

及 LSTM 在处理长期依赖关系上的能力,从而实现虚拟电厂运行负荷的更精确预测。

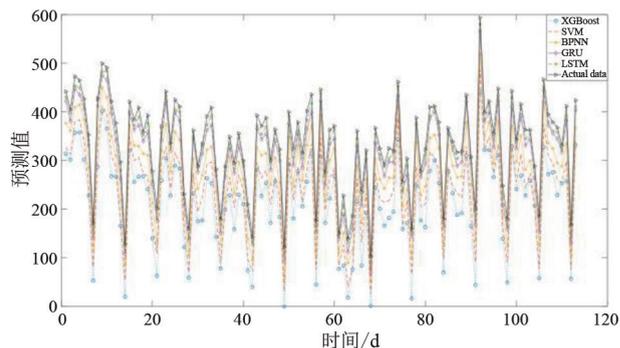


图 9 不同算法预测结果对比

4 结 论

上面以虚拟电厂的用电负荷为预测目标构建了基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法。该方法首先使用 STL 特征分解方法,将虚拟电厂的用电负荷分解为趋势特征、季节特征和残差特征;同时,考虑到电动汽车充电桩作为该虚拟电厂负荷的主要来源,节假日和温度作为影响其充电功率的主要外部因素,将其与 STL 方法提取的分解特征相结合构建预测指标体系;然后,基于构建的预测指标体系,建立基于 LSTM 的虚拟电厂用电负荷预测模型;最后,以 MAE、MSE 和 R^2 为预测结果评价指标并与多种不同算法进行对比分析,证明了所提出的基于特征分解的虚拟电厂运行负荷预测方法的准确性和优越性。

参考文献

- [1] 曾鸣,马嘉欣,许彦斌,等. “双碳”目标下虚拟电厂参与调峰产品交易的机制与路径探索[J]. 价格理论与实践,2021(10):9-14.
- [2] 唐岚,束洪春,于继来. 风能资源估算中的不确定性分析[J]. 太阳能学报,2011,32(10):1560-1565.
- [3] 许泽凯,和敬涵,刘墨,等. 基于耦合约束解耦的虚拟电厂动态可行域求解方法[J]. 中国电机工程学报,2024,44(9):3440-3452.
- [4] 赵丰明,樊艳芳. 分时电价影响下的多能源虚拟电厂双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(20):33-40.
- [5] 戴睿鹏,窦晓波,喻洁,等. 含光储充的配网虚拟电厂二次调频随机模型预测控制策略[J]. 电网技术,2024,48(8):3228-3237.
- [6] 杨成鹏,侯萌,张曦,等. 面向分布式能源能量交互画像的虚拟电厂信息流量预测方法[J]. 电力信息与通

信技术,2024,22(6):18-27.

- [7] 杨玉锐,姚强,钱金跃,等. 基于高弹性电网的虚拟电厂短期负荷预测[J]. 电力大数据,2022,25(6):9-15.
- [8] 洪媛,黄亮,谢长君,等. 基于边缘计算的虚拟电厂架构及光伏出力预测算法研究[J]. 湖北电力,2020,44(1):26-34.
- [9] 高琳,刘甲林,李静. 基于 VAE-CGAN 的虚拟电厂光伏不确定性数据挖掘[J]. 电子产品世界,2024,31(4):22-24.
- [10] 周颖,白雪峰,王阳,等. 面向虚拟电厂运营的温度敏感负荷分析与演变趋势研判[J]. 中国电力,2024,57(1):9-17.
- [11] 原启涛,李志勇,燕续峰,等. 分布式能源资源的通用数字孪生体构建与模拟方法[J]. 可再生能源,2022,40(6):822-829.
- [12] 王晓玲,王成,王佳俊,等. 大坝渗压混合预测的 STL 分解-集成学习模型[J]. 水力发电学报,2024,43(9):106-123.
- [13] 乔长建,刘震,邵建豪. 基于 LSTM 的水文站流量短期预测建模差异性研究[J]. 人民黄河,2024,46(6):119-125.
- [14] 刘国新,吴杰康,蔡志宏,等. 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态聚合优化模型[J]. 四川电力技术,2022,45(3):8-15.
- [15] 罗翼婷,杨洪明,牛犇,等. 考虑多风能预测场景的虚拟电厂日内滚动柔性优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2):51-59.
- [16] 张晋磊,付春立,唐志均,等. 考虑多源互补特性的新能源打捆销售交易策略[J]. 四川电力技术,2024,47(3):31-38.
- [17] 殷建华,戴冠正,丁宁,等. 基于 STL-Informer-BiLSTM-XGB 模型的供热负荷预测[J]. 科学技术与工程,2024,24(21):8942-8949.
- [18] 刘昱辰,刘佳,刘录三,等. 基于 LSTM 实时校正的 WRF/WRF-Hydro 耦合径流预报[J]. 水利学报,2023,54(11):1334-1346.

作者简介:

潘 翀(1980),男,博士,高级工程师,研究方向为电网规划;

郝文斌(1976),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计;

谢 波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

孟志高(1990),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

何凌云(1992),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划;

卫佳奇(1992),女,工程师,研究方向为电力系统分析。

(收稿日期:2024-10-26)

考虑牵引负荷接入的薄弱电网 风光储选址定容规划

姜晓锋^{1,2}, 王豪^{1,2}, 潘鹏宇^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 王曦^{1,2}, 韩晓言³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:针对西部山区电气化铁路面临外部电网薄弱的问题,考虑将铁路沿线的风光发电接入薄弱电网,并接入储能为牵引负荷提供可靠的电能。因此,建立了考虑牵引负荷接入的电网两阶段协调优化的选址定容规划模型。第一阶段建立了以年综合费用最少的单目标分布式电源选址定容优化模型,采用粒子群优化算法求解分布式电源接入位置,为第二阶段储能的选址提供参考;第二阶段以储能费用、节点电压波动和功率波动为目标建立了储能选址定容优化模型,采用多目标粒子群优化算法进行求解。研究表明,分布式电源的接入提高了电网的供电容量,保障了牵引负荷的供电,而储能的接入降低了分布式电源和牵引负荷的功率波动,保障了电网的安全与牵引负荷的可靠供电。

关键词: 选址定容; 牵引负荷; 分布式电源; 储能系统

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0008-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250202

Planning for Siting and Sizing of Wind-Solar-Storage in Weak Power Grid Considering Traction Load Access

JIANG Xiaofeng^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, PAN Pengyu^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, HAN Xiaoyan³

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

2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China;

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

Abstract: In view of the problems that the electrified railway in the western mountainous area is faced with the weak external power grid, it is considered to connect the wind and solar power generation along the railway to the weak power grid, and integrate energy storage to provide reliable power for traction load. Therefore, a planning model of siting and sizing with two-stage coordinated optimization for power grid is established considering traction load access. In the first stage, a single-objective distributed generation siting and sizing optimization model with the lowest annual comprehensive cost is established, and the particle swarm optimization algorithm is used to solve the access location of distributed generation, which provides a reference for the location of energy storage in the second stage. In the second stage, the optimization model of siting and sizing for energy storage is established with the objectives of energy storage cost, node voltage fluctuation and power fluctuation, and the multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to solve the model. The results show that the access of distributed generation improves the power supply capacity of power grid and ensures the power supply of traction load, while the access of energy storage reduces the power fluctuation of distributed generation and traction load, and ensures the safety of power grid and the reliable power supply of traction load.

Key words: siting and sizing; traction load; distributed generation; energy storage system

0 引言

随着高速铁路的迅猛发展,西部高海拔山区的电气化铁路也在不断规划和建设中。然而西部山区电气化铁路面临外部电网极端薄弱的难点^[1],如电网的电源薄弱、短路容量小、供电能力不足。在接入牵引负荷时,线路电压损失大,会导致供电臂末端网压偏低,影响电力机车的运行^[2]。西部山区铁路沿线地形和气候环境复杂,电气化铁路牵引负荷在大长坡道和隧道的情形下,具有更强的冲击性和波动性,这对薄弱电网条件下牵引负荷的可靠供电带来了巨大挑战。

西部山区铁路沿线存在丰富的风能和太阳能等可再生资源。因此,可以考虑将分布式电源(distributed generation, DG)接入系统以提高外部电网的供电能力,为牵引负荷提供稳定可靠的电能。这既有助于提升薄弱电网的供电容量,又能实现节能减排、低碳发展的目标^[3]。但具有间歇性、随机性等特点的 DG 发电系统大量接入电网,对电网安全控制带来了不利影响^[4]。DG 安装位置和容量的不同,导致电网潮流分布也不同,可能会引起节点电压或线路传输功率越限等问题^[5]。目前已有许多文献对其进行了研究,如文献[6]通过计算等效网损微增率来确定 DG 最优安装位置,并考虑网损、电压和环境进行了多目标定容优化;文献[7]考虑了分布式电源的不确定性,建立了计及环境因素在内的年综合费用最小的目标函数,对分布式电源进行选址定容。

储能系统(energy storage system, ESS)是解决 DG 发电波动性的有效途径,其具有灵活的充放电功率调节能力,可以用于抑制 DG 的波动性^[8],同时能有效缓解 DG 出力与牵引负荷需求间的时序不匹配性。因此考虑将 ESS 接入电网抑制输出波动和削峰填谷,以应对 DG 出力的波动性、间歇性和列车负荷的冲击特性的影响。然而,ESS 接入电网位置与容量的不同对 DG 和牵引负荷波动的抑制效果的影响很大^[9]。文献[9]以电网节点电压波动、负荷波动以及 ESS 总容量为目标建立了 ESS 多目标选址定容优化模型;文献[10]兼顾经济性与功角稳定性,建立了 ESS 选址定容的双层优化模型。目前针对 DG 和 ESS 的单一规划问题已有大量的研究成果,而 DG 和 ESS 的联合规划研究是近年的热点问

题。文献[11]对配电网进行集群划分,建立了光伏与储能双层协调选址定容规划模型;文献[12]提出了一种考虑电网安全约束的风光联合储能系统规划方法,用于求解风光联合储能系统的安装位置、额定功率和容量。

上述文献都是针对电网的 DG 和 ESS 进行的选址定容研究,鲜有对一些特殊负荷(如牵引负荷)在接入薄弱电网条件下进行 DG 和 ESS 选址定容研究,而西部山区电气化铁路接入薄弱电网对其有更高的要求。因此,下面考虑牵引负荷接入薄弱电网条件下,对电网进行 DG 和 ESS 选址定容研究。以电气化铁路接入的西部山区薄弱电网为例,建立了两阶段协调优化的风光储选址定容规划模型,为提升薄弱电网的供电容量、抑制 DG 与牵引负荷的波动性以及保障牵引负荷的稳定供电,提供了符合实际的规划方案。

1 牵引负荷及风光储模型

1.1 牵引负荷模型

1.1.1 牵引负荷概率模型

牵引负荷的不确定性体现在负荷功率的间歇性和波动性。牵引负荷功率与列车消耗功率和数量有关,列车功率可认为与列车的位置有关,可以通过位置-功率曲线获得;而列车数量可根据首辆车的位置,由发车时间和停站时间推算获得^[13-14]。因此,列车运行时的位置不断变化,体现了牵引负荷的随机性。建立牵引负荷的列车位置概率密度函数,如式(1)所示^[14],用于表征列车在 x_1 位置上出现的概率。

$$F(x_1) = P(x \leq x_1) = P(t \leq T_{x_1}) = \frac{T_{x_1}}{T} \quad (1)$$

式中: $F(x_1)$ 为列车位置的累计分布函数; P 为概率; T 为列车运行的总时间; T_{x_1} 为列车运行到 x_1 位置花费的时间。

1.1.2 牵引负荷确定性模型

由于列车位置具有一定的时序性,可根据抽样的列车的位置进行排序,根据列车的运行图得到牵引负荷的时序功率曲线。同时根据如图 1 所示的列车全天平行运行图^[14],可以绘制出牵引负荷的全天功率曲线,如图 2 所示。图 1 中列车中途经过 3 个站到终点站,其中 a、b、c、d 分别表示列车的非运营、首发车运行、稳定运行、末班车运行 4 个时间段^[14]。

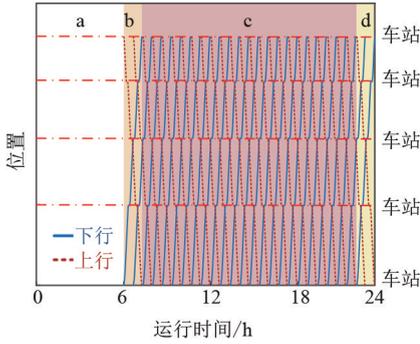


图 1 列车全天平行运行

图 2 为以 1 min 为步长抽取的牵引负荷全天有功功率曲线图,从图中能反映出牵引负荷全天的波动性与冲击性。

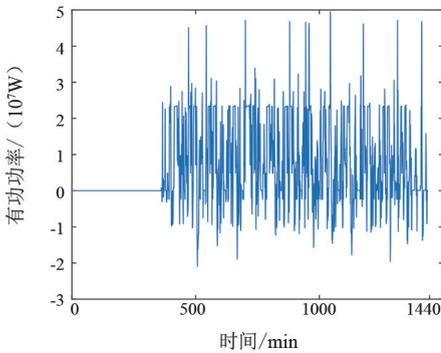


图 2 牵引负荷全天有功功率曲线

1.2 DG 模型

1.2.1 风电机组出力时序模型

风电机组的输出功率与风速有关,常用式(2)的分段函数表示^[15]。

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ or } v_{co} \leq v \\ P_{wr} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{wr} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电机组的功率输出; v 为风速; v_{ci} 为风电机组切入风速; v_{co} 为风电机组切出风速; v_r 为额定风速; P_{wr} 为额定输出功率。图 3 为根据典型日风速对风电机组出力建模得到的风电机组出力曲线^[9]。

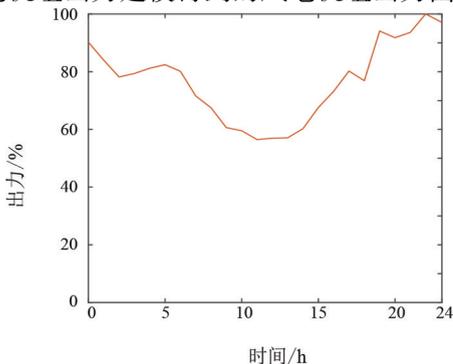


图 3 风电机组典型日出力曲线

1.2.2 光伏机组出力时序模型

光伏机组发电主要与光照强度有关,光伏机组出力与光照强度关系如式(3)所示^[15]。

$$P_s = \begin{cases} P_{sr} \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ P_{sr} & I > I_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_s 为光伏机组功率输出; P_{sr} 为光伏机组额定输出功率; I 为光伏机组光照强度; I_r 为额定输出对应的光照强度。

根据典型日光照强度对光伏机组出力建模,得到光伏机组出力曲线如图 4 所示^[9]。

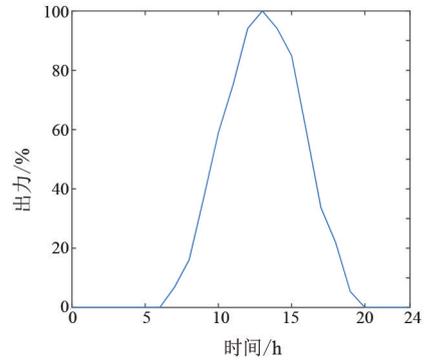


图 4 光伏机组典型日出力曲线

1.3 储能系统模型

在仿真分析中,常用 ESS 的容量和荷电状态表示储能系统模型,如式(4)、式(5)所示^[16]。

$$\begin{cases} E_{ESS,t} = E_{ESS,t-1} + \eta_c P_{c,t-1} \Delta t \\ E_{ESS,t} = E_{ESS,t-1} + \eta_f P_{f,t-1} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{ESS,t}$ 为 ESS 在 t 时刻的容量; $P_{c,t-1}$ 和 $P_{f,t-1}$ 分别为 ESS 在 $t-1$ 时刻的充放电功率,充电时为正,放电时为负; η_c 和 η_f 分别为 ESS 的充放电效率; Δt 为时间差。

$$S_{OC,t} = \frac{E_{ESS,t}}{E_{ESS,r}} \quad (5)$$

式中: $S_{OC,t}$ 为 ESS 在 t 时刻的荷电状态; $E_{ESS,r}$ 为 ESS 的额定容量。

2 两阶段选址定容优化模型

2.1 两阶段规划架构

针对考虑牵引负荷接入的薄弱电网风光储联合规划问题,建立了两阶段协调优化的风光储选址规划模型,模型架构如图 5 所示。



图5 两阶段规划架构

第一阶段规划模型: 规划目标是电网年综合费用最小; 约束条件包括潮流方程约束、节点电压约束、支路功率约束、新能源安装容量约束; 决策变量是各节点是否安装 DG 及 DG 容量; 采用粒子群算法进行求解。

第二阶段规划模型: 规划目标是 ESS 综合费用最小、电压波动最小和功率波动最小; 约束条件包括 ESS 充放电功率约束、ESS 能量平衡约束、ESS 安装容量约束、潮流方程约束、节点电压约束、支路功率约束; 决策变量是各节点是否安装 ESS、ESS 容量及 ESS 每时刻出力; 采用多目标粒子群算法进行求解。

两阶段规划模型间的协调关系: 以综合费用最小规划 DG, 让电网接入足够的 DG 以提升电网的供电容量, 根据 DG 规划的位置以及牵引负荷的位置, 进行第二阶段 ESS 的规划。ESS 能够抑制新能源和牵引负荷的波动, 将其接入 DG 规划和牵引负荷位置附近, 能更大程度上缓解 DG 出力与牵引负荷需求间的时序不匹配性。因此, 第二阶段根据第一阶段的规划结果来进行 ESS 选址定容。

2.2 考虑牵引负荷的 DG 规划模型

2.2.1 目标函数

以电网综合年费用 C_T 最小为目标函数, 如式(6)所示。

$$\min C_T = C_I + C_{OM} + C_L - C_P - C_E \quad (6)$$

式中: C_I 为投资费用; C_{OM} 为运行维护费用; C_L 为网损费用; C_P 为减少的发电费用; C_E 为环境效益。

1) 投资费用

$$C_I = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (C_{I, DGk} E_{DGkj}) \quad (7)$$

式中: r 为贴现率; y 为规划年限; k 为 DG 的类型; N_{type} 为 DG 类型的数量; N_{DGk} 为第 k 种 DG 可以安装的节点集合; $C_{I, DGk}$ 为第 k 种 DG 单位容量的投资成本; E_{DGkj} 为在待安装节点 j 第 k 种 DG 所安装的容量。

2) 运维费用

$$C_{OM} = \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (C_{OM, DGk} P_{DGkj} T_k) \quad (8)$$

式中: $C_{OM, DGk}$ 为第 k 种 DG 单位发电量的维护费用; P_{DGkj} 为第 k 种 DG 在节点 j 的年平均有功出力; T_k 为第 k 种 DG 的年发电时长。

3) 网损费用

$$C_L = c_1 P_{loss} \quad (9)$$

式中: c_1 为上网电价; P_{loss} 为电网年有功损耗。

4) 减少的发电费用

$$C_P = c_p \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (P_{DGkj} T_k) \quad (10)$$

式中, c_p 为发电费用。

5) 环境效益

$$C_E = c_e \sum_{k=1}^{N_{type}} \sum_{j \in N_{DGk}} (P_{DGkj} T_k) \quad (11)$$

式中, c_e 为 DG 单位发电量的环境效益。

2.2.2 约束条件

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功注入功率和无功注入功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 间支路电压相角; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 间支路电导和电纳。

2) 节点电压约束

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (13)$$

式中, $U_{i, \min}$ 和 $U_{i, \max}$ 分别为节点 i 的电压下限和电压上限。

3) 支路功率约束

$$-S_{l,\max} \leq S_l \leq S_{l,\max} \quad (14)$$

式中, S_l 和 $S_{l,\max}$ 分别为支路 l 的传输功率和最大传输功率。

4) DG 安装容量约束

$$0 \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i,\max} \quad (15)$$

式中, P_{DG_i} 和 $P_{DG_i,\max}$ 分别为节点 i 安装的 DG 容量和允许安装的上限。

2.3 考虑牵引负荷的储能规划模型

2.3.1 目标函数

1) ESS 投资和运维费用

ESS 价格比较昂贵, 考虑其经济性, 以使电网在满足供电可靠性的前提下成本最低。总费用如式(16)所示。

$$f_1 = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} (C_{1,e}E_{\text{ESS}} + C_{1,p}P_{\text{ESS}}) + \sum_{t=1}^T C_{\text{OM,ESS}} |P_{\text{ESS},t}| \quad (16)$$

式中: $C_{1,e}$ 和 $C_{1,p}$ 分别为 ESS 单位容量和单位功率投资成本; E_{ESS} 、 P_{ESS} 分别为安装的总 ESS 额定容量和额定功率; T 为运行时间, 取 8760 h; $C_{\text{OM,ESS}}$ 为 ESS 单位充放电电量运维成本; p_{ESS} 为 ESS 充放电功率。

2) 节点电压波动

节点电压波动可用于表征系统稳定性以及电能质量^[9]。而 DG 接入电网可以提高节点的电压, 但是和牵引负荷同样会导致节点电压波动加剧, 恶化电能质量。因此以各节点电压波动总和最小为目标函数。

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^{24} |U_i(t) - \bar{U}_i| \quad (17)$$

式中: N_b 为系统中总节点数; $U_i(t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻的电压幅值; \bar{U}_i 为第 i 个节点在 24 h 内的电压平均值。

3) 节点功率波动

由于 DG 出力具有波动性, 和牵引负荷同时接入电网时, 可能会加剧功率的波动, 给电网带来不利影响^[9]。ESS 具有削峰填谷和抑制波动的特性, 可以减小系统功率的波动, 采用式(18)计算功率波动。

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} |P_{\text{JL}}(t) - \bar{P}_{\text{JL}}| \quad (18)$$

式中: $P_{\text{JL}}(t)$ 为在 t 时刻系统风光荷储的净功率; P_{JL} 为 24 h 内净功率的平均值。

综合考虑 ESS 投资和运维费用、系统节点电压波动和功率波动, ESS 选址定容多目标优化函数如式(19)所示。

$$\min F = [f_1, f_2, f_3] \quad (19)$$

2.3.2 约束条件

1) 储能功率约束

$$P_{s,\min} \leq P_s \leq P_{s,\max} \quad (20)$$

式中, $P_{s,\min}$ 和 $P_{s,\max}$ 分别为储能系统功率的下限和上限。

2) 储能能量平衡约束

$$\sum_{t=1}^{24} P_s(t) \Delta t = 0 \quad (21)$$

3) 潮流方程约束、节点电压约束和支路功率约束与 DG 选址定容相同, 见式(12)一式(14)。

3 求解算法

3.1 第一阶段粒子群优化

采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对 DG 规划问题进行求解。并在粒子群算法的基础上对惯性权重系数 ω 进行改进, 使其可以随着迭代次数的变化而变化, 从而加强了粒子的全局搜索能力。 ω 表达式为

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})n/n_{\max} \quad (22)$$

式中: ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为惯性权重系数的最大值和最小值; n 和 n_{\max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

3.1.1 编码方式

假设待安装的节点数量为 N_{DG} , 第一阶段 DG 选址定容编码由两部分组成: 1) 待安装节点是否安装, 进行 0/1 编码 (0 表示不安装, 1 表示安装); 2) 待安装节点的安装容量, 采用离散整数编码。每个粒子的维度为 $2N_{\text{DG}}$, 具体编码为

$$X = [x_i, \dots, X_{C,i}] \quad (i = 1, 2, \dots, N_{\text{DG}}) \quad (23)$$

式中: x_i 为待安装节点 i 是否安装 DG, 0/1 编码; $X_{C,i}$ 为待安装节点 i 的 DG 容量, 采用整数编码。

3.1.2 模型求解步骤

1) 初始化算法参数 (种群位置、迭代次数等), 根据 DG 待接入节点对粒子进行编码;

2) 进行初始种群的潮流计算, 计算初始种群的适应度值、个体最优值、种群最优值;

3) 更新粒子位置, 进行潮流计算, 计算适应度函数, 更新适应度值;

- 4)更新粒子个体最优位置和粒子种群最优位置;
- 5)判断迭代次数是否满足条件,不满足则返回步骤3,满足则输出种群最优位置 and 最优值。

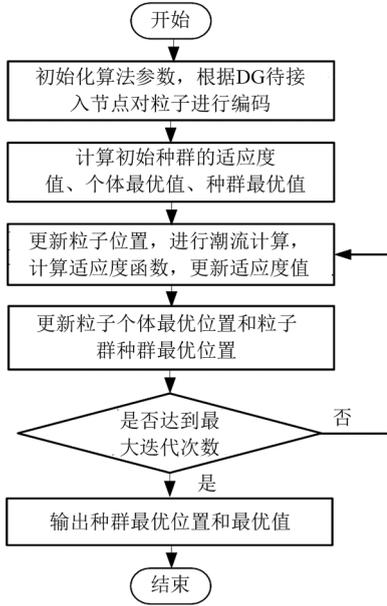


图6 PSO算法求解DG规划流程

3.2 第二阶段多目标粒子群优化

采用自适应网格策略的多目标粒子群优化算法 (adaptive grid multiple objective particle swarm optimization, AG-MOPSO)^[17-18]对储能规划问题进行求解。该方法采用自适应网格技术,对帕累托(Pareto)解集进行删减,Pareto解集即非劣解集。在目标函数空间内,进行均匀网格划分,计算每个网格中的非劣解集数量,当非劣解集的数量超过给定值时,随机删去网格中一定数量的非劣解^[18]。这解决了非劣解集数量过大且容易导致局部收敛的问题,同时也加快了计算效率。惯性权重系数同样设置为式(22)所示的表达式。

3.2.1 编码方式

根据前一阶段的优化结果,加上牵引负荷接入节点,假设ESS接入节点数量为 N_{ESS} ,对第二阶段ESS选址定容编码为

$$Y = [y_i, \dots, Y_{C,i}, \dots, Y_{i,t}] \quad (24)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N_{ESS}; t = 1, 2, \dots, T)$$

式中: y_i 为待安装节点 i 是否安装ESS,0/1编码; $Y_{C,i}$ 为待安装节点 i 的ESS容量,采用整数编码; $Y_{i,t}$ 为第 i 个节点ESS在 t 时刻的功率,取值精度为0.1。

ESS需要满足式(21)的能量平衡约束,需对ESS编码进行修正。

$$Y_{i,t} = - \sum_{t=1}^{T-1} Y_{i,t} \quad (25)$$

3.2.2 模型求解步骤

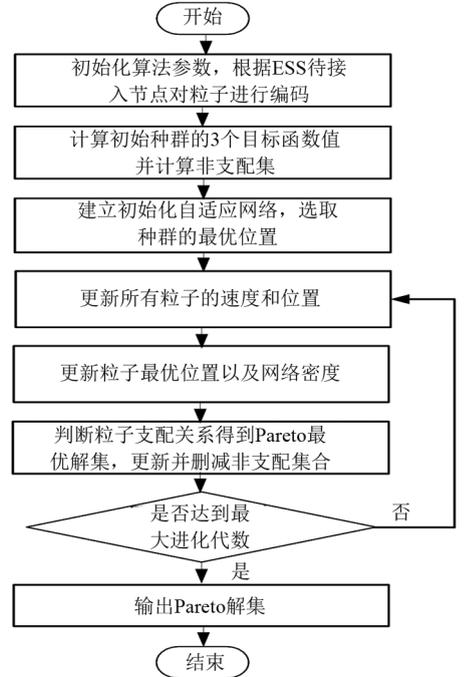


图7 多目标储能规划求解流程

- 1) 初始化算法参数(粒子速度、位置、迭代次数、非劣解集数量),根据ESS待接入节点对粒子进行编码;
- 2) 进行初始种群的潮流计算,计算初始种群的3个目标函数值,判断各粒子之间的支配关系,计算非支配集;
- 3) 建立初始化自适应网络,选取种群的最优位置;
- 4) 更新所有粒子的速度和位置,并随机变异。通过潮流计算,更新粒子最优位置以及网络密度;
- 5) 判断粒子支配关系得到 Pareto 最优解集,更新并删减非支配集合;
- 6) 判断迭代次数是否满足条件,不满足则返回步骤4,满足则输出 Pareto 解集。

4 算例分析

4.1 算例和参数设置

以中国某条在建电气化铁路接入的西部山区薄弱电网为例。网络拓扑结构如图8所示,图中牵引

负荷接入节点为 1、8、15、18, 所接区域网架结构简单, 500 kV 电压等级少, 供电容量小。

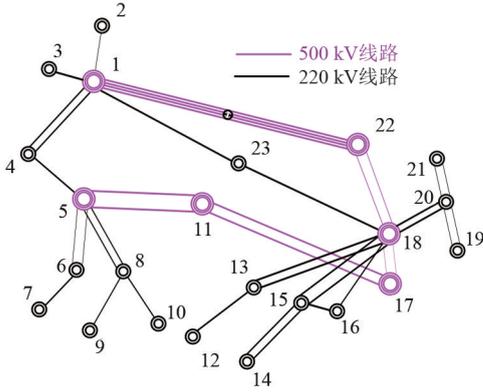


图 8 西部山区薄弱电网拓扑结构

根据西部山区的风光资源分布, 筛选出光伏机组的候选安装节点为 6、7、8、16、18, 风电机组的候选安装节点为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10。以容量 100 MVA 和电压 220 kV 为系统基准值。DG 和 ESS 的单位容量为 1 MW, 贴现率 r 为 0.1, 规划年限 y 为 20 年, ESS 充放电单位功率为 0.1 MW。DG 的功率因数为 0.85, 每个节点安装 DG 容量的上限为 60 MW, ESS 容量上限为 60 MWh, 充放电功率上限为 30 MW, 只发出有功功率。DG 和 ESS 单位成本见表 1 和表 2^[7,11]。DG 出力曲线采用典型日出力曲线, 如图 3 和图 4 所示。考虑到牵引负荷功率变化较快以及总体仿真时长与仿真步长有关, 选取步长为 0.5 h, 对 DG 和 ESS 进行选址定容规划。

表 1 DG 单位成本

参数	风电	光伏
投资成本/(元·kW ⁻¹)	10 000	13 000
维护成本/(元·kWh ⁻¹)	0.33	0.20
环境效益/(元·kWh ⁻¹)	0.083	0.083
年运行小时数/h	8760	4745
电价/(元·kWh ⁻¹)	0.50	0.50
减少的发电费用/(元·kWh ⁻¹)	0.45	0.45

表 2 ESS 单位成本

参数	ESS
单位功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	1650
单位容量投资成本/(元·kWh ⁻¹)	1270
单位发电量运维成本/(元·kWh ⁻¹)	0.08
充放电效率	0.9

第一阶段粒子群的初始种群规模为 50 个, 最大迭代次数为 50, 学习因子均取 0.5, 最大惯性权重系数为 0.9, 最小惯性权重系数为 0.4。第二阶段多目

标粒子群, 种群数量为 100 个, 最大迭代次数为 20, 学习因子均取 1.495, 最大惯性权重系数为 0.8, 最小惯性权重系数为 0.2, 非劣解集数量上限为 200, 网格划分数量为 20。

4.2 算例仿真与分析

4.2.1 DG 规划配置

根据 DG 安装位置可知 DG 总安装数量 $N_{DG} = 15$, 则编码长度为 30。选取了两种优化结果(方案 2 和方案 3)与不安装 DG(方案 1)的结果进行对比, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 不同方案及相应的规划结果

方案	安装节点(容量/MW)
1	—
2	光伏:18(49); 风电:1(30)、2(48)、3(20)、4(18)、5(48)、7(42)、9(35)、18(16)
3	光伏:15(16); 风电:1(48)、2(48)、4(54)、5(35)、6(48)、7(51)、8(18)、9(18)、10(49)

表 4 不同方案优化效果对比

单位: 万元

年费用	方案 1	方案 2	方案 3
投资费用	0	37 669.3	45 785.8
运维费用	0	59 431.0	82 601.7
网损费用	17 272.2	17 256.7	17 815.6
减少的发电费用	0	83 223.0	113 350.8
环境效益	0	15 345.0	20 900.2
总费用	17 223.2	15 789.0	11 952.1

由表 3 可知, 方案 3 中安装的风电机组数量较多。由于风电机组每日出力较多, 发电收益高于光伏机组。从最终的规划结果来看, 安装风电机组的效益要优于安装光伏机组。

由于所提的薄弱电网 DG 选址是先根据资源分布图筛选出待安装节点再进行优化, 同时还考虑了牵引负荷, 因此接入新能源之后, 并不一定能减少网损费用, 而更多的效益来自减少的发电和环境效益两方面。由表 4 可知, 接入新能源后总费用是降低的。其中方案 2 的网损费用降低、总费用减少, 但接入的容量较少, 且总费用仍高于方案 3。而方案 3 的安装容量多, 网损费用虽有所增加, 但减少的发电费用和环境效益更高, 总费用最少。

4.2.2 ESS 规划配置

根据 DG 接入位置优化方案 3, ESS 安装的位置有节点 1、2、4、5、6、7、8、9、10、15、18, 则 $N_{ESS} = 11$, 编码长度为 550。采用 AG-MOPSO 求解得到 Pareto 解集, 如图 9 所示。

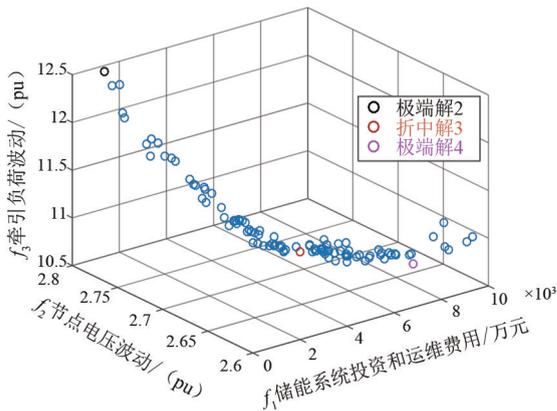


图 9 Pareto 解集情况

由图 9 可见 Pareto 解集的多样性好,解的分布均匀。选取了基于 Pareto 解集的折中解和两个极端解进行对比分析,如表 5 所示。其中:解 1 为未安装 ESS 的结果;解 2 和解 4 为极端解;解 3 为折中解。极端解是只考虑多目标函数中的某个目标最优选取的解,折中解是考虑各个目标函数选出来的一个较优的解。

表 5 不同解对应的储能规划结果

解	f_1 /万元	f_2 /(pu)	f_3 /(pu)	位置(容量/MWh)
1	0	3.17	15.71	—
2	1 226.2	2.80	12.47	5(44)
3	4 206.6	2.66	11.01	1(18);2(12);4(2);5(17); 6(7);7(11);8(7);9(15); 10(5);15(16);18(32);
4	7 810.3	2.63	10.76	1(23);2(11);4(9);5(15); 6(12);7(13);8(10);9(18); 10(4);15(19);18(51)

由表 5 可知:极端解 2 安装的 ESS 总容量较少,ESS 投资和运维费用也较低,节点电压波动和负荷波动情况比未安装 ESS 有一定的改善;极端解 4 所安装的 ESS 总容量是最多的,相应的费用也是最高的,对于节点电压波动和负荷波动的改善是最好的,但是相比其他的效果没有特别明显,一般不采用此规划方案;折中解 3 是权衡了投资运维费用和电压波动、负荷波动得到的一个较合适的规划方案,可以采用此解作为最终 ESS 的规划方案。

以 DG 规划方案 3 接入电网,绘制了安装 ESS 前后的典型日内风光接入节点和牵引负荷接入节点的电压波动,如图 10 和图 11 所示。

从图 10 和图 11 中可以明显看出,7 号和 8 号节点的电压一天内的波动减少,ESS 主要抑制了 7 号和 8 号节点的波动,其他节点波动本身并不大,ESS 抑制效果也不明显。同时从坐标轴来看,图 10 中 z

轴的电压刻度最大值为 1.05 pu,且电压在 1.03 ~ 1.04 pu 范围内有较大的波动。而图 11 中 z 轴减少到了 1.04 pu,大部分在 1.03 pu 以下。可见随着 ESS 的接入,系统部分节点在一天内的电压波动情况得到了一定的改善。

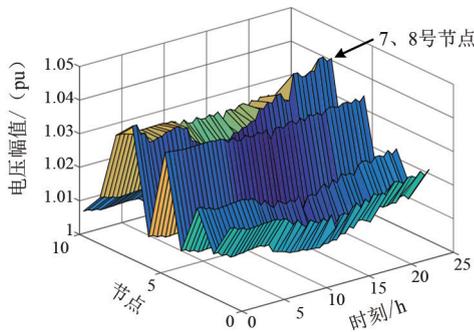


图 10 未安装 ESS 节点电

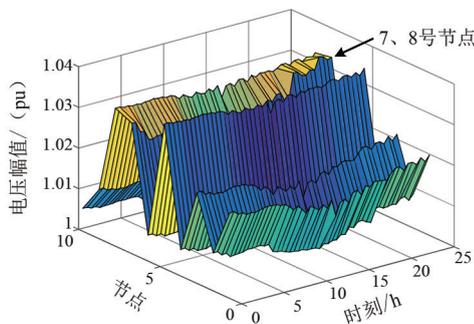


图 11 安装 ESS 后节点电压波动

从表 5 中的最优折中解数据以及图 10 和图 11 可以得到,为电网配置一定容量的 ESS,可以减小牵引负荷及新能源带来的电压和功率波动,为牵引负荷可靠供电提供保障。

5 结 论

上面基于两阶段协调规划模型,研究了考虑牵引负荷接入的薄弱电网风光储选址定容规划。研究结果表明:

1) 针对 DG 规划问题,采用惯性权重动态变化的 PSO 算法,优化了 DG 接入薄弱电网的位置和容量,提升了薄弱电网的供电容量,保障牵引负荷稳定供电的同时,还能实现节能减排以及综合支出的减少。

2) 针对 ESS 规划问题,采用 AG-MOPSO 算法进行多目标优化,平衡了 ESS 经济性和削峰填谷特性。ESS 接入薄弱电网降低了牵引负荷以及新能源带来的波动,保障了电网的安全稳定运行,同时为牵

基于改进白鲸算法的分布式光储优化规划方法

姚建东¹, 吴凡², 谢波¹, 郝文斌¹, 杨毅强², 孟志高¹

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041;

2. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘要:针对分布式光伏接入配电网的选址定容规划问题,考虑并网带来的电压波动、电压越限等对电能质量的影响,通过引入储能系统来调节配电网节点电压。首先,采用迭代自组织数据分析算法,对分布式光伏出力数据进行聚类划分,并以类间相似度和类内相似度对聚类效果进行评价;然后,构建配电网两阶段优化模型:第一阶段以总成本最低为目标来考虑分布式光储的选址定容,并将规划参数代入下一阶段;第二阶段以节点电压偏移量最小和运维成本最低为目标函数,动态调节储能系统荷电状态;接着,使用改进白鲸算法求解模型,该算法引入可变螺旋搜索策略和纵横交叉策略使算法的局部寻优和全局寻优能力增强;最后,在IEEE 33节点下进行仿真验证。

关键词:聚类划分; 分布式光储; 选址定容; 白鲸算法; 优化配置

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0016-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250203

Optimal Planning Method for Distributed Photovoltaic and Energy Storage Based on Improved Beluga Whale Optimization Algorithm

YAO Jiandong¹, WU Fan², XIE Bo¹, HAO Wenbin¹, YANG Yiqiang², MENG Zhigao¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at optimal siting and sizing for distributed photovoltaic (PV) access to distribution network, and considering the impacts of voltage fluctuation and voltage overlimit brought by grid connection on power quality, the voltage at distribution network nodes is regulated by introducing energy storage system. Firstly, an iterative self-organizing data analysis algorithm is employed to cluster the output data of distributed PV, and the clustering performance is evaluated based on between-class similarity and within-class similarity. Secondly, a two-stage optimization model for distribution network is established: the first stage aims to minimize the total cost by considering the siting and sizing of distributed PV and energy storage, and the planning parameters will be passed to the second stage; the second stage takes minimum node voltage deviation and minimum operation and maintenance costs as objective function. And then, the Beluga whale optimization algorithm is applied to solve the model, which incorporates variable spiral search strategy and crisscross strategy to enhance its local and global optimization capabilities. Finally, simulation verification is carried out on IEEE 33-node system.

Key words: cluster partition; distributed photovoltaic and energy storage; siting and sizing; Beluga whale algorithm; optimal configuration

0 引言

“双碳”目标的推进为中国能源结构调整指明

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“新型电力系统背景下虚拟电厂控制策略及运行方法研究”(521904240005)

了方向,为了应对传统能源储量有限的问题,同时减少温室气体的排放并保证清洁能源的可持续发展,国家开始大力调整能源结构,分布式光伏也因此迅速发展。分布式光伏并网规划和分布式光伏并网带来的配电网电压波动^[1]、电压越限^[2]、谐波^[3]等对

电能质量的影响成为当下研究热点。引入分布式储能消纳光伏发电多余的电力,并在负荷高峰时段放电起到电压调节的作用^[4],从而解决分布式光伏并网造成的节点电压越限、电压偏差等问题。

尽管分布式储能能够有效缓解光伏发电带来的电压问题,但光伏发电数据的复杂性和大规模数据的处理仍是规划中的一大挑战,若直接调用这些数据作为光伏规划的依据,易造成求解难度大、计算复杂等问题^[5]。所以需要对其繁多的光伏数据进行聚类划分。文献[6]通过改进的 K-means++ 算法将高比例分布式光储聚合为数量较少的特征集群,有效降低了光储变量繁多带来的数据量大的问题。文献[7]通过改进迭代自组织数据分析方法(interative selforganizing data analysis techniques algorithm, ISODATA)算法对风光场景进行聚类分析,提高了聚类的准确性和稳定性。上述文献通过对分布式光伏场景进行聚类划分,有效简化了计算的复杂性,但均未涉及分布式光伏储能系统的协调优化。

光储系统的选址定容需兼顾经济性与电网安全性。文献[8]提出了一个两阶段重构方法,第一阶段进行重构优化,第二阶段进行最优潮流优化,有效减少了开关重构次数,降低了网络有功损耗。文献[9]提出了一个双层规划方法,上层模型以配电变压器全寿命周期成本最小为目标,下层模型计及光伏与负荷的不确定性影响,提高了分布式光伏消纳的经济性。文献[10]构建了一个综合考虑电能质量、供电能力、光伏接入效果的多维度评价体系,有效降低了节点电压偏差和线路传输压力。文献[11]通过改进蝴蝶优化算法,以配电网中的总网损和电压偏差最小为目标,建立了光伏选址定容的优化模型,提高了选址定容的优化精度。文献[12]将蚁群算法和动态规划算法结合,以提高优化容量配置性能为目标,将衰减参数引入调节因子,提高了算法的优化性能。但上述文献模型在多目标协同与算法收敛精度上仍有提升空间。

下面提出一种融合改进聚类算法与多目标优化的分布式光储协调规划框架。首先,基于改进的 ISODATA 算法对分布式光伏场景聚类分析,提取不同场景下的光伏出力特征;其次,构建两阶段优化模型:第一阶段以投资成本最低为目标确定光储容量与位置,第二阶段通过动态调节储能荷电状态优化电压质量与运维成本;接着,采用改进白鲸优化算法

(improved Beluga whale optimization, IBWO) 进行求解;最后,采用 IEEE 33 节点验证优化算法的可行性和准确性。

1 分布式光伏出力场景聚类划分

由于受光照强度、温度、组件角度和方位、阴影遮挡等因素的影响,光伏出力是随机和波动的。为了更好地掌握光伏出力的规律,需要对光伏出力的数据进行聚类划分,形成不同场景下的典型特征,有助于提高分布式光储系统选址定容的鲁棒性。

1.1 改进 ISODATA 聚类算法

K 均值(K-means)聚类算法的原理简单,收敛速度良好,需要调节的参数少,但是聚类数 K 值需要预给定。ISODATA 算法虽在 K-means 算法的基础上对聚类结果引入“合并”和“分裂”,使 K 值能在不同特征下变动,但对于初始聚类中心的随机选取可能会导致收敛速度慢,聚类效果差。因此,提出采用负荷曲线(load curve)与 ISODATA 算法相结合的 L-ISODATA 聚类算法对聚类中心的选取进行优化,使当前聚类中心更远的点被选取为聚类中心的概率更高,使各聚类中心尽可能远离让簇间差异最大化,这一改进不仅加快了收敛速度,还对聚类效果进行了优化。算法聚类过程如下:

首先,设定预期的聚类数目 c ,后续的聚类数将在 $[c/2, 2c]$ 中产生。输入初始光伏出力样本集 $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$,从中随机选取一个样本作为第一个聚类中心,计算剩余样本中 x_i 到当前聚类中心的最短距离 $d(x_i)$ 。通过式(1)计算样本 x_i 被选取为下一个聚类中心的概率为 g ,再根据概率 g 选取下一轮的聚类中心,直到出现 c 个初始聚类中心停止迭代。样本的 $d(x_i)$ 越大,其被选取为下一个聚类中心的概率也越高。

$$g = \frac{d^2(x_i)}{\sum_{i=1}^n d^2(x_i)} \quad (1)$$

然后,通过式(2)计算出样本 x_i 与 x_j 间的距离 $d(x_i, x_j)$,再将 x_i 分配到最近的聚类样本簇 C_τ ($\tau = 1, 2, \dots, C$),如 C_τ 中的样本数量小于其余聚类样本中最少的样本数 n_{\min} ,则通过式(3)对聚类中心进行更正,并将当前聚类中心数 c 减去 1。

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{u=1}^N (x_{iu} - x_{ju})^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$K_\tau = \frac{1}{D_\tau} \sum_{x_i \in C_\tau} x_i \quad \tau = 1, 2, \dots, c \quad (3)$$

式中: x_i 与 x_j 为输入的两个 N 维样本; x_{iu} 和 x_{ju} 分别为 x_i 与 x_j 的第 u 维样本 ($u=1, 2, \dots, N$); K_τ 为第 τ 个聚类中心; D_τ 为在第 τ 个聚类中心的样本。

对各聚类样本簇 C_τ 计算其内样本 D_τ 到其聚类中心 K_τ 的平均距离 \bar{D}_τ 为

$$\bar{D}_\tau = \frac{1}{D_\tau} \sqrt{\sum_{x_i \in C_\tau} |x_i - K_\tau|^2} \quad (4)$$

全部样本到其对应聚类中心 K_τ 的总平均距离

\bar{D}_b 为

$$\bar{D}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_\tau \bar{D}_\tau \quad (5)$$

最后,在聚类结果稳定后停止迭代。如聚类中心数大于 $2c$, 则对现有聚类结果进行合并;如聚类中心数小于 $c/2$, 则对现有聚类结果进行分裂;如两个聚类中心间的距离小于允许的最小距离,则这两个聚类中心需进行合并。最终聚类簇划分得到 K 个簇 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p, \dots, C_K\}$, 即 K 个光伏出力缩减场景。将 K 个不同概率的典型场景代入规划模型作为光伏出力数据。

1.2 聚类评价指标

不同簇之间的距离越远,同一簇内样本距离越近,则表示聚类的效果越好。可用类间相似度戴维斯-博尔丁指数 (Davies-Bouldin index, DBI) 和类内相似度邓恩指数 (Dunn index, DI) 表示聚类效果的优劣。

DBI 指数的表达式为

$$I_{DB} = \frac{1}{K} \sum_{p,q=1}^K \max_{p \neq q} \left[\frac{D_{\text{avg}}(C_p) + D_{\text{avg}}(C_q)}{d_{\text{cen}}(\omega_p, \omega_q)} \right] \quad (6)$$

式中: I_{DB} 为计算得到的 DBI; ω_p 为簇 C_p 的聚类中心点; $D_{\text{avg}}(C_p)$ 为簇 C_p 中全部数据与中心点的平均距离; $d_{\text{cen}}(\omega_p, \omega_q)$ 为簇 C_p 与簇 C_q 的聚类中心点之间的距离。DBI 的值越小表明聚类效果越好^[13]。

DI 指数的表达式为

$$I_D = \min_{1 \leq p \leq K} \min_{p \neq q} \frac{d_{\min}(C_p, C_q)}{\max_{1 \leq q \leq K} d_{\max}(C_q)} \quad (7)$$

式中: I_D 为计算得到的 DI; $d_{\min}(C_p, C_q)$ 为簇 C_p 和簇

C_q 样本之间的最小距离; $d_{\max}(C_q)$ 为簇 C_q 中样本的最大距离。DI 的值越大表面聚类效果越好^[14]。

2 分布式光储两阶段规划模型

分布式光储的位置和容量影响着配电网的电压波动、谐波、经济效益等问题,合理调节分布式光储可以减小电压降落横分量,有效改善系统电压稳定性^[15]。在规划中,不同问题之间存在着相互约束和制约的关系,使得规划成为一个复杂的多目标多维度的难题。因此需要结合地区实际的负荷和分布式光伏在不同场景下的出力情况,来配置光储系统的容量和在配电网中接入的位置。

根据分布式光伏削减后的典型场景数据,将得到的分布式光伏出力功率曲线代入规划模型进行求解。其中第一阶段模型把分布式光伏和储能安装的位置和容量作为控制变量,以系统总成本最低为目标函数,通过使用 IBWO 对光储系统接入容量和位置进行优化;第二阶段模型以系统的运维成本和配电网节点电压偏移量最小为目标函数,通过输入规划层结果,借助粒子群算法来调整光储系统的荷电运行状态以降低运维成本和节点电压偏移量。

2.1 第一阶段模型

2.1.1 目标函数

以分布式光储系统总成本 D 最低为目标函数,其表达式为:

$$D = \sum_k (D_{\text{inv},k} + D_{\text{op},k}) \quad (8)$$

$$D_{\text{inv},k} = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} (D_{\text{inv}}^{\text{PV}} P_k^{\text{PV}} + D_{\text{inv}}^{\text{ESS}} P_k^{\text{ESS}}) \quad (9)$$

式中: $D_{\text{inv},k}$ 为第 k 个节点光储系统的投资成本; $D_{\text{op},k}$ 为第 k 个节点光储系统的运维成本; P_k^{PV} 和 P_k^{ESS} 为第 k 个节点光伏系统和储能系统的安装容量; r 为折现率; y 为设备运行年限; $D_{\text{inv}}^{\text{PV}}$ 和 $D_{\text{inv}}^{\text{ESS}}$ 分别为分布式光伏和储能的单位投资成本。

2.1.2 约束条件

1) 为保证配电网的平衡,需要进行潮流约束

$$\begin{cases} P_k - U_k \sum_{l=1}^{N_j} U_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) = 0 \\ Q_k - U_k \sum_{l=1}^{N_j} U_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_k 和 Q_k 分别为节点 k 的有功功率和无功功

率; U_k 为节点 k 的电压; G_{kl} 为节点 k 和节点 l 之间的电纳; B_{kl} 为节点 k 和节点 l 之间的电导; θ_{kl} 为节点 k 和节点 l 之间的相角; N_j 为系统节点数。

2) 分布式光伏约束

$$E_{PV,\min} \leq E_{PV} \leq E_{PV,\max} \quad (11)$$

$$P_{PV,\min} \leq P_{PV} \leq P_{PV,\max} \quad (12)$$

式中: E_{PV} 、 $E_{PV,\min}$ 、 $E_{PV,\max}$ 分别为分布式光伏的安装容量及其最小、最大安装容量; P_{PV} 、 $P_{PV,\min}$ 、 $P_{PV,\max}$ 分别为分布式光伏的出力及其最小、最大出力。

3) 储能电池约束

$$\begin{cases} 0 \leq E^{\text{ESB}} \leq E_{\max}^{\text{ESB}} \\ S_{\text{oc,start}}^{\text{ESB}} = S_{\text{oc,end}}^{\text{ESB}} \\ P_{\min}^{\text{ESB}} \leq P^{\text{ESB}} \leq P_{\max}^{\text{ESB}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: E^{ESB} 、 E_{\max}^{ESB} 分别为储能电池容量及其可安装的最大容量; $S_{\text{oc,start}}^{\text{ESB}}$ 、 $S_{\text{oc,end}}^{\text{ESB}}$ 分别为储能电池开始和结束时刻的荷电状态; P^{ESB} 、 P_{\min}^{ESB} 和 P_{\max}^{ESB} 分别为储能电池的运行功率及其允许的最小额定功率和最大额定功率。

4) 光伏接入位置约束

$$1 \leq N_{PV} \leq N_{PV,\max} \quad (14)$$

式中, N_{PV} 、 $N_{PV,\max}$ 分别为分布式光伏接入节点及其最大接入节点。

5) 储能接入位置约束

$$1 \leq N_{\text{ESS}} \leq N_{\text{ESS},\max} \quad (15)$$

式中, N_{ESS} 、 $N_{\text{ESS},\max}$ 分别为储能接入节点及其最大接入节点。

2.2 第二阶段模型

2.2.1 目标函数

以分布式光储的运维成本 D_{op} 最低和配电网节点电压偏移量 D_{ev} 最小为目标函数。

$$D_{\text{op}} = D_{\text{gv}} + D_{\text{bm}} + D_{\text{pvq}} + D_{\text{loss}} \quad (16)$$

$$D_{\text{ev}} = \sum_t \sum_k |U_{k,t} - U_N| \quad (17)$$

式中: D_{gv} 为系统的购电成本; D_{bm} 为光储系统的维修成本; D_{pvq} 为分布式光伏的弃光成本; D_{loss} 为系统的网损成本; $U_{k,t}$ 为节点 k 在 t 时刻的电压; U_N 为额定电压。

2.2.2 约束条件

1) 为防止电压过低或过高, 需要对节点电压 U_k 进行约束

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max} \quad k = 1, 2, \dots, N_j \quad (18)$$

式中: U_{\min} 为节点电压下限; U_{\max} 为节点电压上限。

2) 支路电流约束

$$I_s \leq I_s^{\max} \quad (19)$$

式中, I_s 、 I_s^{\max} 分别为支路 s 的电流及支路 s 允许通过的最大电流。

3 基于改进白鲸优化算法

白鲸优化算法 (Beluga whale optimization, BWO) 是一种受到自然界白鲸捕食的 3 个阶段行为启发所提出的优化算法^[16], 这 3 个阶段分别为: 探索阶段、开发阶段和鲸落行为阶段。BWO 是一种启发式算法, 不需要计算梯度或其他二阶信息, 它通过模拟白鲸捕食猎物的行为, 具备了强大的全局搜索能力, 特别是在面对复杂的多峰函数或高维度的优化问题时, 能够有效地避免陷入局部最优解, 并最终收敛到全局最优解或近似最优解。无论是连续优化、离散优化, 还是约束优化、无约束优化, BWO 都可以通过调整参数和更新策略来适应不同的优化环境。

3.1 探索阶段

BWO 的探索阶段是通过白鲸捕食的行为建立的, 假设光储系统的位置和容量为不同位置的白鲸行为。随机初始化位置保证算法的全局搜索能力, 通过选择奇数、偶数维度更新位置, 表达式为

$$\begin{cases} X_{w,u}^{(T+1)} = X_{w,pu}^{(T)} + (X_{v,p1}^{(T)} - X_{w,pu}^{(T)}) (1 + r_1) \sin(2\pi r_2), & u \text{ 为偶数} \\ X_{w,u}^{(T+1)} = X_{w,pu}^{(T)} + (X_{v,p1}^{(T)} - X_{w,pu}^{(T)}) (1 + r_1) \cos(2\pi r_2), & u \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (20)$$

式中: T 为当前的迭代次数; $X_{w,u}^{(T+1)}$ 为第 w 条白鲸在第 u 维度更新后的位置; $X_{w,pu}^{(T)}$ 为随机选取的 u 维度下第 w 条白鲸的当前位置; $X_{v,p1}^{(T)}$ 为随机选取的第 v 条白鲸的当前位置; r_1 和 r_2 都为范围在 $(0, 1)$ 的随机数; $\sin(2\pi r_2)$ 和 $\cos(2\pi r_2)$ 模拟鱼鳍朝向水面的镜向运动。

3.2 开发阶段

白鲸通过莱维 (Levy) 飞行策略捕捉猎物, 更新白鲸位置 $X_w^{(T+1)}$, 使白鲸算法收敛性提高, 其表达式为

$$X_w^{(T+1)} = r_3 X_{\text{best}}^{(T)} - r_4 X_w^{(T)} + J_1 L_F (X_v^{(T)} - X_w^{(T)}) \quad (21)$$

式中: r_3 和 r_4 为范围在 $(0, 1)$ 的随机数; $X_{\text{best}}^{(T)}$ 为当前最好的位置; $X_w^{(T)}$ 为第 w 条白鲸的当前位置; $X_v^{(T)}$ 为随机的第 v 条白鲸位置; J_1 为白鲸飞行中随机的跳跃度; L_F 为白鲸的飞行函数。 J_1 和 L_F 计算方式为:

$$J_1 = 2r_4 \left(1 - \frac{T}{T_{\max}} \right) \quad (22)$$

$$L_F = 0.05 \frac{\mu \cdot \sigma}{|\gamma|^{1/\zeta}} \quad (23)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \zeta) \cdot \sin(\pi\zeta/2)}{\Gamma[(1 + \zeta)/2] \cdot \zeta \cdot 2^{(\zeta-1)/2}} \right)^{1/\zeta} \quad (24)$$

式中: T_{\max} 为总迭代次数; μ 和 γ 为正态分布的随机数; ζ 是一个值为 1.5 的常数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

3.3 鲸落行为阶段

为确保在鲸落行为中种群数量一致, 利用白鲸的坠落步长和位置来建立更新的位置, 其表达式为

$$X_w^{(T+1)} = r_5 X_w^{(T)} - r_6 X_v^{(T)} + r_7 X_s \quad (25)$$

式中: r_5 、 r_6 和 r_7 为范围在 $(0, 1)$ 的随机数; X_s 为白鲸坠落的步长。 X_s 计算方式为:

$$X_s = (u_b - l_b) \exp\left(-\frac{2fnT}{T_{\max}}\right) \quad (26)$$

$$f = 0.1 - \frac{0.05T}{T_{\max}} \quad (27)$$

式中: u_b 为变量上界; l_b 为变量下界; n 为白鲸种群数; f 为阶跃因子。

3.4 改进白鲸优化算法

IBWO 在原有的 BWO 算法中引入可变螺旋搜索策略, 使白鲸的位置更新更加灵活, 对未知位置的选择增加, 加强了跳出局部最优解和更新全局最优解的能力。其更新策略如下:

$$X_w^{(T+1)} = r_3 X_{\text{best}}^{(T)} - r_4 X_w^{(T)} + J_1 L_F (X_v^{(T)} - X_w^{(T)}) \cdot e^{zL} \cdot \cos(2\pi L) \quad (28)$$

$$z = \exp\left[a \cos\pi \left(1 - \frac{T}{T_{\max}} \right) \right] \quad (29)$$

式中: L 为 $(-1, 1)$ 中的随机数; a 为变化系数, 这里取 5。通过可变螺旋搜索策略增大了更新位置的范围, 使白鲸的探索阶段有更充足的搜索范围, 增加了算法的灵活性。

为平衡算法局部最优解和全局最优解的能力, 在此基础上再加入纵横交叉策略, 防止白鲸陷入局部最优解中, 提高了算法的准确性。纵横交叉策略分为两个步骤, 首先执行横向交叉, 其表达式为:

$$M_{w1,u}^{(T+1)} = r_8 M_{w1,u} + (1 - r_8) M_{w2,u} + c_1 (M_{w1,u} - M_{w2,u}) \quad (30)$$

$$M_{w2,u}^{(T+1)} = r_9 M_{w2,u} + (1 - r_9) M_{w1,u} + c_2 (M_{w2,u} - M_{w1,u}) \quad (31)$$

式中: $M_{w1,u}^{(T+1)}$ 和 $M_{w2,u}^{(T+1)}$ 为 $M_{w1,u}$ 和 $M_{w2,u}$ 通过横向交叉产生的下一代; r_8 和 r_9 为 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数; c_1 和 c_2 为 $(-1, 1)$ 中的随机数, 生成的个体与个体进行竞争寻优。

再进行纵向交叉, 其表达式为

$$M_{w,u1}^{(T+1)} = r_{10} M_{w,u1} + (1 - r_{10}) M_{w,u2} \quad (32)$$

式中: $M_{w,u1}^{(T+1)}$ 为 $M_{w,u1}$ 通过纵向交叉产生的下一代; r_{10} 为 $(0, 1)$ 中的均匀分布的随机数, 生成的个体与个体进行竞争寻优。

3.5 求解流程

基于 IBWO 的配电网优化流程如图 1 所示。

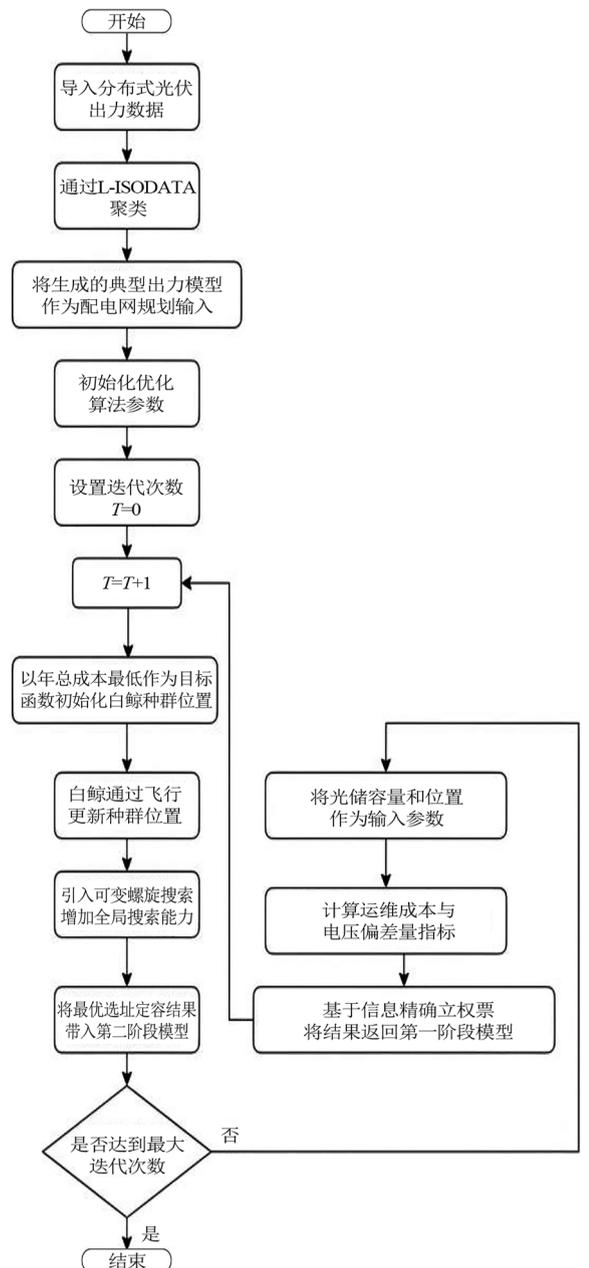


图 1 优化流程

4 算例分析

为验证模型的可行性,在 Matlab 2018a 中采用如图 2 所示的 IEEE 33 系统对分布式光储的选址定容进行仿真分析^[17]。基准电压为 12.66 kV,假设选择 1 个分布式光伏和 1 个储能接入 IEEE 33 系统,分布式光伏允许的最大容量为 400 kW,储能电池允许的最大容量为 600 kW,分布式光伏的功率因素为 0.9,储能的容量不超过 90%。分布式光伏和储能的使用年限为 10 年;折现率为 0.08;网购电价为 0.6 元/kWh;网损电价为 0.4 元/kWh;弃光电价为 0.6 元/kWh;单位容量下光伏和储能的投资成本分别是 5000 元/kW 和 2000 元/kW,单位容量下光伏和储能的运行成本分别为 0.05 元/kWh 和 0.1 元/kWh。

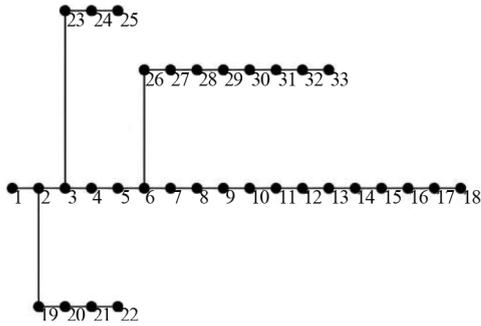


图 2 IEEE 33 节点

4.1 分布式光伏聚类分析

根据图 3 所示的某地一年的分布式光伏出力数据,采用 L-ISODATA 算法进行整合聚类,得到典型光伏出力场景,建立分布式光储多目标优化模型。为了保证出力场景包含样本典型特征值,保留聚类场景为 4 个,最终得到的聚类结果如图 4 所示。为验证 L-ISODATA 算法在分布式光伏出力缩减中的合理性,将 K-means、ISODATA 与 L-ISODATA 进行对比分析,得到分布式光伏评价指标结果如表 1 所示。

表 1 不同聚类算法的评价指标

聚类算法	DBI	DI
K-means	1.845 5	0.068 1
ISODATA	1.250 3	0.070 4
L-ISODATA	1.210 9	0.074 3

根据表 1 的评价指标结果可得,通过 L-ISODATA 算法对聚类中心选取进行优化后,使不同的簇相对远离,同一簇内的样本相对接近,聚类的结果相对于 K-means 算法和 ISODATA 算法有所优化,DBI 和 DI

的指标相较于 K-means 算法和 ISODATA 算法有所提升,提高了聚类的准确性和稳定性。通过对一年的光伏出力数据进行聚类缩减后,将缩减后的场景作为光伏出力数据代入分布式光储模型进行求解。

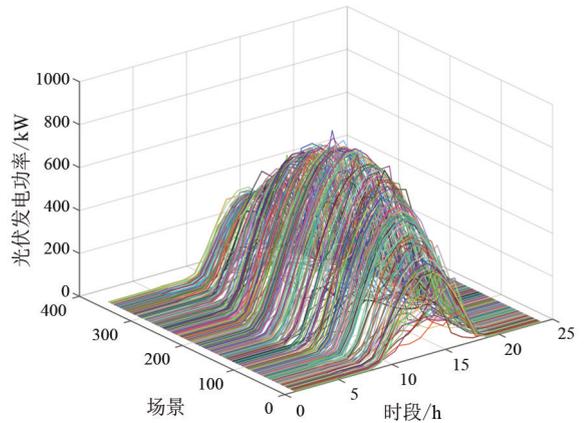


图 3 光伏场景抽样

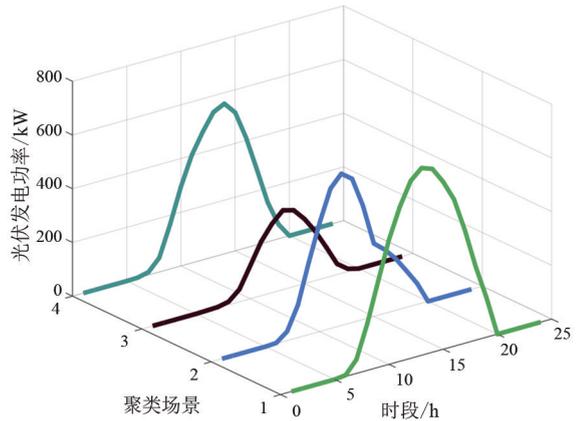


图 4 光伏场景缩减

4.2 配电网优化分析

为验证 IBWO 算法对多目标函数的计算能力,采用测试函数分别对粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、BWO 算法、IBWO 算法进行对比分析,设置迭代次数为 100,函数的收敛曲线如图 5 所示。

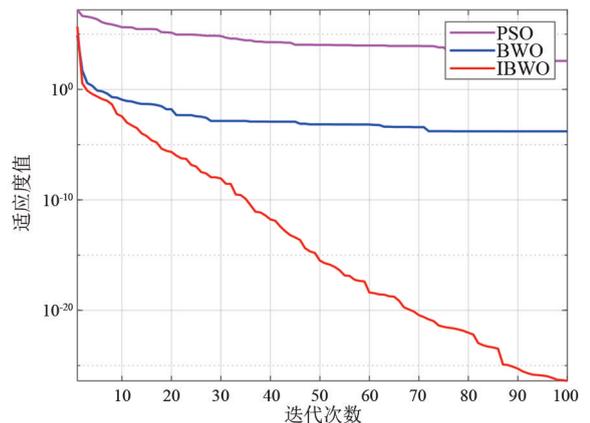


图 5 算法寻优对比

通过图 5 的收敛曲线可以看出,IBWO 算法在对多目标函数的求解中能使用较少的迭代次数得到较优的结果,且 IBWO 算法跳出局部最优解和获取全局最优解的能力更强,能有效地平衡全局寻优和局部寻优之间的关系,IBWO 算法相较于 BWO 算法和 PSO 算法具有更快的收敛速度和更优的收敛性能。

分别采用 PSO 算法、BWO 算法和 IBWO 算法对分布式光储规划模型进行求解,得到对比结果如表 2 所示。

表 2 不同算法下规划对比

规划方案	PSO	BWO	IBWO
光伏接入容量/kW	700	700	700
光伏接入节点位置	24	28	15
储能接入容量/kW	1000	950	900
储能接入节点位置	9	10	17
运维成本/元	247 054	235 483	222 610
节点平均电压偏移量	0.173 7	0.159 4	0.151 3
总成本/元	1 066 554	1 040 083	1 012 466

由表 2 可以看出 IBWO 算法从分布式光储接入的位置和容量上对模型进行了优化,其总成本比 PSO 算法和 BWO 算法分别降低了 5.07% 和 2.66%,不仅降低了储能的安装容量,使系统的投资成本减少,而且运维成本也最少。同时,如图 6 所示,IBWO 算法能有效降低了系统运行时的电压偏移量,达到电压控制的目的。由此证明,所提 IBWO 算法能在确保配电网平稳运行的前提下通过合理配置提高经济性。

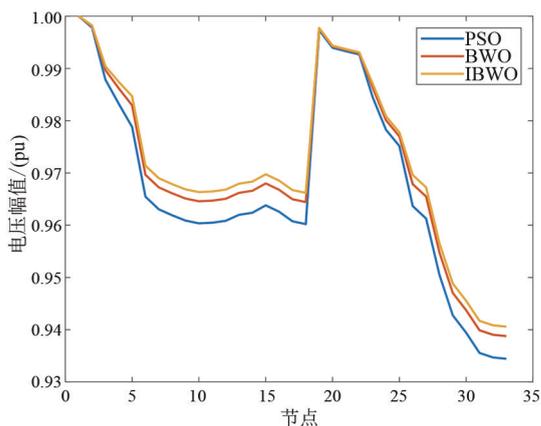


图 6 不同算法接入对比

5 结论

为寻求分布式光储的选址定容最优方案,上面使用了一种改进的 ISODATA 聚类算法用于分布式光伏出力聚类,再结合 IBWO 通过两阶段优化模型在 IEEE 33 节点下仿真分析,得到了以下结论:

1) 相较于典型聚类算法,改进的 ISODATA 聚类算法在面对繁多的光伏出力数据下具有更好的聚类效果,得到的聚类场景更具有稳定性和典型特征。

2) 配电网优化是一个多维度多目标的优化问题,从经济性和安全性的角度出发,构造的两阶段优化模型能够考虑多方面因素对配电网的影响,在安全性的前提下提高经济效益。

3) 基于白鲸优化算法的优化模型具有更高的计算准确性和寻优效果,在优化中能提高分布式光伏的经济效益并增加配电网的稳定性。

参考文献

- [1] 贾雨龙,米增强,刘力卿,等.分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J].电力自动化设备,2019,39(4):1-7.
- [2] 王华佳,张岩,尹书林,等.分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J].电网与清洁能源,2024,40(3):128-138.
- [3] 何宁辉,李文,李秀广,等.电网供电系统储能电源大功率变换器的谐波控制研究[J].微型电脑应用,2023,39(8):48-51.
- [4] 李军徽,孙大朋,朱星旭,等.光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(10):47-56.
- [5] 颜勤,余国翔,曾林俊.考虑光伏场景聚合的配电网光储选址定容[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(8):117-126.
- [6] 武艺,姚良忠,廖思阳,等.一种基于改进 K-means++ 算法的分布式光储聚合调峰方法[J].电网技术,2022,46(10):3923-3931.
- [7] 姚明明,张新,杨培宏,等.基于改进风光场景聚类联合虚拟储能的源荷储低碳优化调度[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):115-130.
- [8] 靳攀润,宋汶秦,刘永成.考虑 DG 不确定性的有源配电网两阶段动态鲁棒重构方法[J].太阳能学报,2024,45(6):208-216.
- [9] 张勇军,张德恒,刘斯亮,等.考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):9-15.
- [10] 陈奇芳,李若凡,夏明超,等.计及多维性能评估的新型配电网光伏选址定容方法[J].中国电力,2024,57(10):172-178.
- [11] 刘柳,赵俊勇,马亮.基于改进蝴蝶算法的分布式光伏选址定容[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(8):152-158.
- [12] 李圣清,邓娜,颜石,等.基于改进蚁群动态规划的光储微网容量优化配置[J].太阳能学报,2023,44(2):

468-476.

- [13] 张辰睿.基于机器学习的短期电力负荷预测和负荷曲线聚类研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [14] BEN NCIR C E, HAMZA A,BOUAGUEL W. Parallel and scalable Dunn Index for the validation of big data clusters[J].Parallel Computing,2021,102:102751.
- [15] 张师,李卫国,田蕾,等.分布式电源接入对配电网电压稳定性的影响[J].分布式能源,2017,2(4):36-39.
- [16] ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 251:109215.
- [17] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(2):1401-1407.

作者简介:

- 姚建东(1972),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划;
- 吴凡(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与稳定;
- 谢波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;
- 郝文斌(1976),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计;
- 杨毅强(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力系统规划与稳定;
- 孟志高(1990),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2024-10-31)

(上接第15页)

引负荷提供可靠稳定的电能。这为提升薄弱电网供电容量和保障牵引负荷供电提供了参考。

此外,牵引负荷和风光都具有不确定性,需进一步探究牵引负荷和风光不确定性对风光储选址定容规划的影响。

参考文献

- [1] 邓云川,林宗良.川藏铁路电气化工程面临的挑战和对策思考[J].电气化铁道,2019,30(增刊1):5-11.
- [2] 盛望群.电源薄弱地区电气化铁路关键技术与接入系统方案研究[J].电气应用,2013,32(6):18-21.
- [3] 解绍锋,方曼琪,夏国华,等.光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响[J].电力自动化设备,2018,38(10):53-59.
- [4] 康龙云,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010,34(11):43-47.
- [5] 张沈习,李珂,程浩忠,等.考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2015,39(8):53-58.
- [6] 郑漳华,艾芊,顾承红,等.考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J].中国电机工程学报,2009,29(13):23-28.
- [7] 初壮,李钊,白望望.计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):34-41.
- [8] 李相俊,王上行,惠东.电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J].电网技术,2017,41(10):3315-3325.
- [9] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等.基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J].电网技术,2014,38(12):3405-3411.

- [10] 程浩,秦文萍,韩肖清,等.基于功角稳定性的区域电网储能选址定容方法[J].电力自动化设备,2024,44(7):21-29.
- [11] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201.
- [12] 孟源,樊小朝,史瑞静,等.基于机会约束及 $N-1$ 安全约束的风光联合储能系统选址定容优化[J].电网技术,2021,45(5):1886-1893.
- [13] 刘炜,李群湛,唐兵,等.基于蒙特卡洛模拟的城市轨道概率潮流分析[J].西南交通大学学报,2010,45(4):561-567.
- [14] 朱恒恺.薄弱电源条件下的牵引供电系统供电能力评估方法研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [15] 徐迅,陈楷,龙禹,等.考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J].电网技术,2013,37(4):914-921.
- [16] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等.基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):30-36.
- [17] 苏福清,匡洪海,钟浩.基于AG-MOPSO的含风电配电网无功优化[J].电源学报,2024,22(4):192-199.
- [18] 杨俊杰,周建中,方仍存,等.基于自适应网格的多目标粒子群优化算法[J].系统仿真学报,2008(21):5843-5847.

作者简介:

- 姜晓锋(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为新型电力系统稳定控制及主动支撑关键技术;
- 王豪(1994),男,博士,工程师,研究方向为考虑新能源接入的新型控制保护技术及应用;
- 潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为电力电子化电力系统建模、稳定性分析及控制。

(收稿日期:2024-05-10)

飞轮储能辅助火电机组一次调频控制策略

赵康¹, 田玉婷², 刘锶淇¹, 孙昕炜², 魏巍³

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 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:为应对新能源大规模并网造成的电力系统频率不稳定性问题,提出了一种基于飞轮储能辅助火电机组一次调频控制策略。针对火电机组爬坡速度慢、易引发机组振荡等问题的影响,利用飞轮储能的高频次瞬间精准放电、高转换效率及长寿命等特点来弥补传统调频方式的不足。基于 Matlab/Simulink 建立了含火电与飞轮储能的电力系统频率特性模型,对比分析了火电机组单独调频、定系数下垂控制以及变系数下垂控制下飞轮储能辅助调频的电力系统频率特性、机组输出功率以及联络线交换功率变化。仿真结果表明:飞轮储能的引入能够显著提高电力系统频率稳定性,减少火电机组出力并延长其寿命;变系数下垂控制充分考虑了储能荷电状态,相较于定系数下垂控制,变系数下垂控制下储能荷电状态变化范围缩小,能够减少储能过充过放等问题。

关键词:飞轮储能; 汽轮机; 频率特性; 一次调频

中图分类号: TM 621 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0024-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250204

Primary Frequency Regulation Control Strategies for Thermal Power Units Assisted by Flywheel Energy Storage

ZHAO Kang¹, TIAN Yuting², LIU Siqu¹, SUN Xinwei², WEI Wei³

(1. School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: To address the frequency instability in power systems caused by the large-scale integration of new energy sources, a primary frequency regulation control strategy for thermal power units assisted by flywheel energy storage (FES) is proposed. This strategy aims to make up for shortcomings of traditional frequency regulation methods, such as slow ramping speed and potential oscillations of thermal power units, with the characteristics of FES, including its high-frequency instantaneous precise discharge capability, high conversion efficiency, and long service life. A power system frequency characteristic model incorporating thermal power and FES is established using Matlab/Simulink. Comparative analyses are carried out on power system frequency characteristics, unit output power and tie-line power exchange under three different control scenarios: thermal power unit frequency regulation alone, fixed-coefficient droop control and variable-coefficient droop control with FES-assisted frequency regulation. The simulation results show that the introduction of FES significantly enhances the frequency stability of power system, reduces the output power of thermal power units, and prolongs its service life. Moreover, compared with the fixed-coefficient droop control, variable-coefficient droop control takes into account the state of charge (SOC) of energy storage system, which can narrow the variation range of SOC and effectively mitigate overcharging and over-discharging of energy storage system.

Key words: flywheel energy storage; turbine; frequency characteristics; primary frequency regulation

0 引言

为了实现“双碳”目标,中国筹划构建一种以风、光等新型清洁能源为主的电力供应体系,旨在加速能源电力行业的低碳化转型^[1]。截止2024年6月底,全国风电、光伏装机容量分别达到467 GW和714 GW,合计规模已超过煤电装机^[2]。以风光为代表的新能源具有间歇性与波动性,其大规模并网势必会影响电网内发电量与用电量的实时平衡,使输出功率不稳定,进而影响电力系统的有功功率与负荷需求的平衡,使系统频率波动较大。以火电、水电为代表的传统调频方式由于调节精度低、响应速度慢等问题难以满足当下调频需求。

为了增强系统调频能力,可以引入储能系统协同火电机组参与电网调频。近年来,国内外关于电化学储能技术辅助电力系统调频的研究取得了显著进展,尽管在其应用领域方面已积累一定成果,但电化学储能系统由于其存在的安全风险与循环寿命限制问题,仍面临多重挑战^[3-4]。飞轮储能是一种新兴物理储能技术,凭借其高频次瞬时充放电、长寿命及高转换效率等特性,被视为改善电网频率波动、辅助火电机组调频的理想选择^[5-7]。文献[8]基于已建的风光储基地实施了飞轮储能系统的充放电实验,实验结果表明,飞轮储能系统展现出了高度的运行稳定性与可靠性,在功率输出与响应速度等方面均凸显出较优的性能,能针对电网频率波动迅速做出反应,较为适合辅助电力系统调频。文献[9-10]通过仿真计算,利用飞轮储能耦合火电机组进行一、二次调频,能够有效提高机组调频性能,延长机组寿命。文献[11-12]将飞轮储能系统应用于风电功率的平滑处理,明显减小了风电输出功率的波动性,提高了电网频率稳定性。文献[13]研究了飞轮储能与风电机组的协同运行策略,不仅优化了系统恢复同步稳定过程中的动态响应能力,还减轻了同步发电机在调频过程中的有功调节压力,提高了调频效率。文献[14]提出了一种电网负荷分配策略,依据负荷周期的不同特点,将调频任务合理分配至飞轮储能与火电机组,有效提升了整体的调频效果与资源利用效率。文献[15]构建了一个融合虚拟同步发电机与永磁同步电机的飞轮储能系统,该系统能够基于电网频率的实时变化信号,灵活调节飞轮转

速,从而有效减缓电网频率的波动速度。

上述研究表明,飞轮储能可有效平滑新能源功率波动、降低火电机组调频压力,但其与火电联合调频的协同控制策略仍存在动态适应性不足或动态响应速度相对较慢等缺点。如定系数下垂控制可能在抑制频率恶化的同时阻碍频率的恢复,导致系统频率二次下降,影响电力系统的稳定性,并且可能造成储能系统过充、过放等问题。针对上述问题,下面提出一种基于罗吉斯蒂克(logistic)函数的自适应下垂控制策略。通过Matlab/Simulink建立火-储一次调频系统低阶线性模型,引入logistic函数以储能荷电状态(state of charge, SOC)为自变量用于动态调整下垂系数,合理规划储能出力,分析对比在火电机组单独调频、定系数下垂控制以及所提自适应下垂控制3种策略下的调频结果,以验证火-储系统在所提自适应下垂控制下的调频性能。

1 飞轮储能辅助火电机组一次调频模型

飞轮储能利用其高频次瞬间精准放电的能力以及转换效率高、安全性好、使用寿命长等特点,弥补火电机组调频能力的不足,通过两者的协同作用,可以实现更快速、更准确的调频效果。

1.1 一次调频原理

一次调频属于有差调节,其调频原理^[16]如图1所示,实现流程为:1) 设初始稳定状态系统频率为 f_0 ,此时机组运行点为 a 点。2) 当电网负荷发生波动,负荷功率增加 P_1 ,负荷功频特性曲线从 $L_1(f)$ 变为 $L_2(f)$,此时发电机通过控制调速器启动一次调频,增发功率 P_g ,新的功频特性曲线 $L_2(f)$ 与 $G(f)$ 相交于 c 点,达到新的频率稳定状态,频率为 f_1 ,频率偏差为 Δf ,一次调频过程结束。

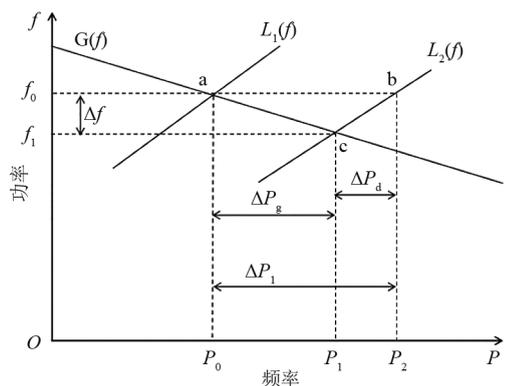
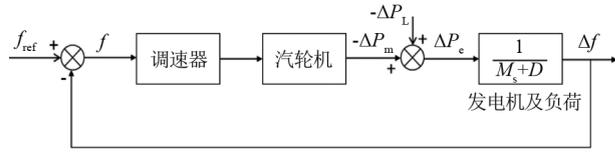


图1 一次调频原理

在分析电力系统总体频率特性时,忽略对电压和功角的动态特性研究,采用小信号模型将电力系统一次调频模型简化为图 2 中的结构^[17],该模型由 3 个模块所构成。



M_s —与系统惯量相关的转子时间常数; D —负荷有功频率响应系数;
 ΔP_m —汽轮机变化功率; ΔP_L —负荷变化功率; ΔP_c —负荷变化总功率;
 f_{ref} —参考频率; f —实际频率; Δf —频率变化量

图 2 传统火电机组一次调频结构

1.2 燃煤火电机组模型

随着电力系统的发展,其运行模式从单一独立向多区域互联转变。在区域负荷扰动引发功率失衡与频率偏差时,调频机组启动一次调频。由于不同区域机组转速响应差异,会导致联络线交换功率的变化^[18]。为了更有效地分析储能系统参与调频的应用效果,采用含有联络线的两区域模型进行仿真,分析机组输出功率变化量、频率变化量以及联络线交换功率变化量,其中两区域模型是通过划分不同

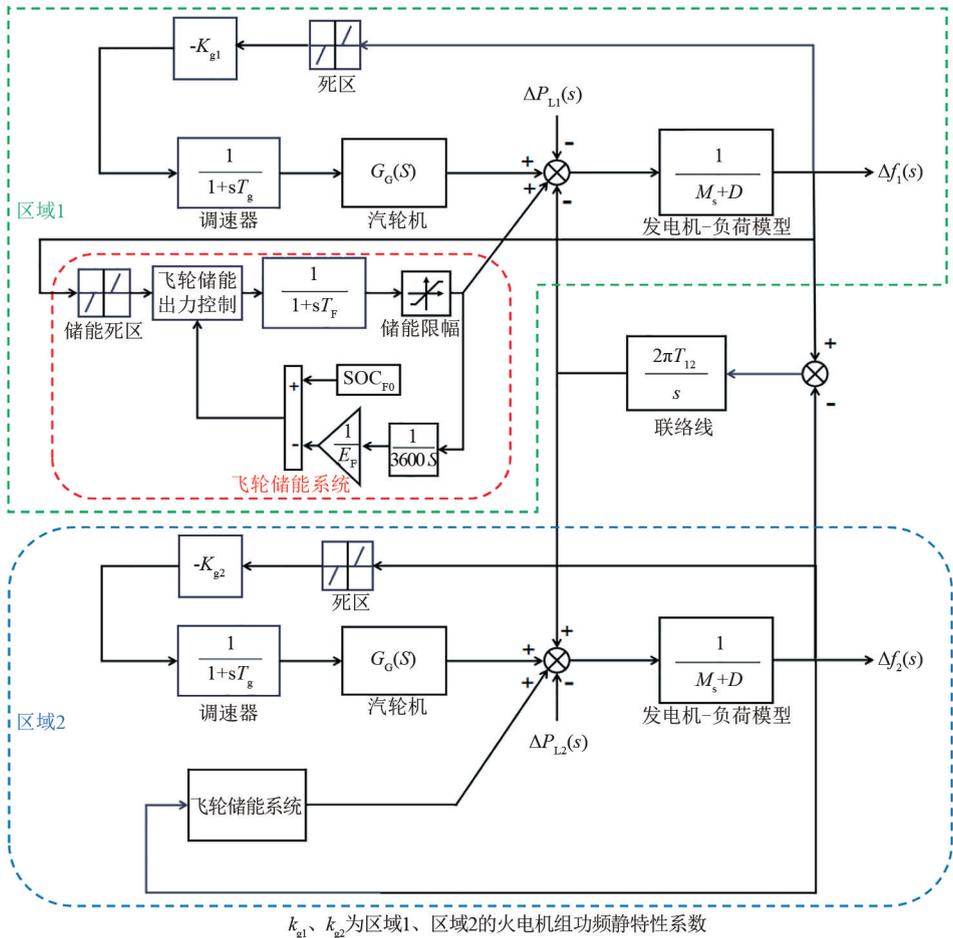
动态特性的子系统模拟区域间功率交换及频率响应,以评估系统调频性能和稳定性。这里主要针对系统中功率变化与频率变化进行仿真研究,当电网频率发生波动时,火-储联合系统作为调频主体对频率变化信号共同做出反应,实现快速的频率调节。在 Matlab/Simulink 中建立包含飞轮储能的一次调频的两区域模型,如图 3 所示。

为了提高机组热力循环效率,仿真研究中选择搭建再热式汽轮机。再热凝气式汽轮机结构如图 4 所示。

为了使再热式汽轮机模型能准确跟随频率偏差信号进行调频动作,根据现有的汽轮机理论模型^[19],完成模型的搭建如图 5 所示。其中各缸的输出功率用功率系数体现。

再热式汽轮机模型传递函数为

$$G_{en}(s) = \frac{F_{HP}}{1+sT_{CH}} + \frac{F_{IP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} + \frac{F_{LP}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})(1+sT_{CO})} \quad (1)$$



k_{g1} 、 k_{g2} 为区域1、区域2的火电机组调频静特性系数

图 3 火储联合调频两区域模型

火电机组调速器模型传递函数为

$$G_{OV}(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (2)$$

式中, T_g 为调速器时间惯性常数。

发电机-负荷模型传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Ms + D} \quad (3)$$

式中, $M=2H$, H 为惯性时间常数。

两区域之间联络线的传递函数为

$$G_l(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} \quad (4)$$

式中, T_{12} 为联络线同步系数。

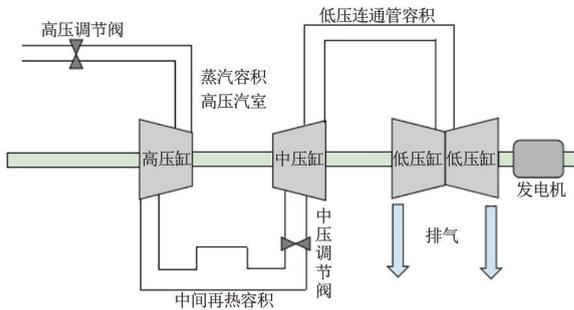
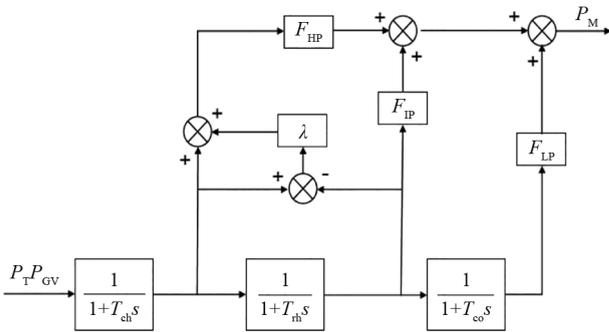


图 4 再热凝气式汽轮机结构示意图



P_T —蒸汽压力; P_{GV} —调门开度; T_{ch} —高压蒸汽容积时间常数; T_{rh} —再热蒸汽容积时间常数; T_{co} —低压蒸汽容积时间常数; F_{HP} —高压缸功率系数; F_{IP} —中压缸功率系数; F_{LP} —低压缸功率系数; λ —高压缸过调系数; P_M —汽轮机机械功率输出

图 5 再热式汽轮机动态模型

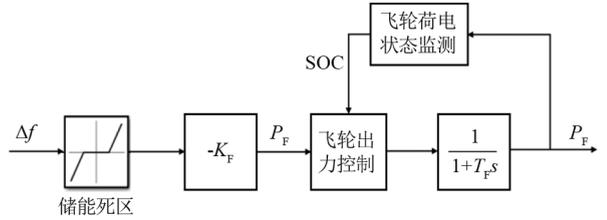
1.3 飞轮储能模型

飞轮储能的基本原理就是利用飞轮转子的高速旋转来存储与释放能量。采用一阶惯性模型作为飞轮储能的等效模型^[20],并设计虚拟下垂控制为其运行的控制方法^[21],因此飞轮储能系统的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{K_F}{1 + sT_F} \quad (5)$$

式中: K_F 为虚拟下垂控制系数; T_F 为储能时间惯性常数。

飞轮储能系统如图 6 所示,其模块主要由 5 部分组成。



K_F —飞轮储能下垂控制系数; T_F —飞轮储能响应时间常数; P_F —飞轮储能实际输出功率值; P_F —飞轮储能输出功率理论值; SOC—飞轮储能荷电状态

图 6 飞轮储能系统

飞轮储能荷电状态监测系统通过飞轮储能输出功率值计算得出 SOC 实时值,再将 SOC 信号反馈给储能出力控制模块。飞轮储能实时储电量模型计算公式^[22]为

$$S_{OCt} = S_{OC0} - \frac{\int_0^t P_F dt}{E} \quad (6)$$

式中: P_F 为飞轮储能实时输出功率, MW; S_{OC0} 为飞轮储能初始 SOC; E 为飞轮储能总储存电量, MWh。

提出以 logistic 函数^[23]模型为基础,自变量为飞轮储能 SOC 量,因变量为输出功率与额定功率的比值,并以此模型作为飞轮出力的控制方式。其 t 时刻最大充放电值如式(7)与式(8)所示^[24-25]。

$$P_d(t) = \frac{KP_m p \times e^{\frac{r \times (S_{OCt} - S_{OCmin})}{b}}}{K + p_0 \times e^{\frac{r \times (S_{OCt} - S_{OCmin})}{b}}} \quad (7)$$

$$P_c(t) = \frac{KP_m p \times e^{\frac{r \times (S_{OCmax} - S_{OCt})}{b}}}{K + p_0 \times e^{\frac{r \times (S_{OCmax} - S_{OCt})}{b}}} \quad (8)$$

式中: $P_d(t)$ 为飞轮储能放电功率, MW; $P_c(t)$ 为飞轮储能充电功率, MW; S_{OCmax} 为飞轮储能 SOC 上限值; S_{OCmin} 为飞轮储能 SOC 下限值; P_m 为飞轮储能额定输出功率, MW; K, p_0, p, b, r 均为常数。

飞轮储能的 SOC 也可由飞轮转子转动角速度计算,如式(9)所示^[26],可知飞轮的最大转速对应的 SOC 值取 1,最小转速对应 SOC 值取 0。将其值带入式(7)与式(8)中可得出飞轮储能出力控制曲线,如图 7 所示。

$$S_{OC} = \frac{\omega_F^2 - \omega_{Fmin}^2}{\omega_{Fmax}^2 - \omega_{Fmin}^2} \quad (9)$$

飞轮储能,作为一种高效的物理储能系统,为确保其稳定运行,通过设置储能死区,以避免飞轮储能因电网微小频率波动引发非必要的充放电动作。这里,飞轮储能系统的死区设定遵循了电网调频领域

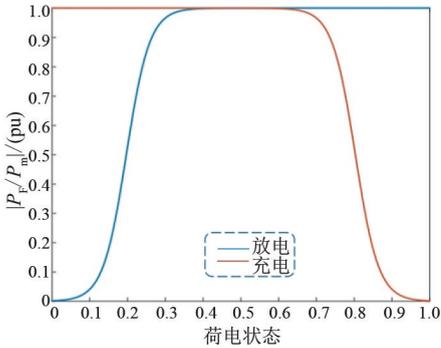


图 7 飞轮储能出力控制曲线

中对于储能设备死区设置的通用准则,将死区值设定为 0.033 Hz,以此作为启动飞轮充放电响应的基准频率变化量^[26]。飞轮储能动作的策略如图 8 所示。

在飞轮充电过程中,为了提高飞轮储能的充电效率,可选择在 SOC 低于 0.6 时进行充电,其最大充电功率可按照额定功率输出,则实际出力值可表示为

$$P_F = -\min(|P'_F|, |P_m|) \quad (10)$$

式中, P'_F 为频率发生波动后系统计算出本应由飞轮储能承担的输出功率值。

当飞轮储能的 SOC 值超过 0.6 时,需要对其输出功率进行调节以避免其储电量过快到达上限,此时飞轮储能实际充电功率为

$$P_F = -\min(|P'_F|, |P_c(t)|) \quad (11)$$

在飞轮放电过程中,由图 6 可知,飞轮储能能在其 SOC 高于 0.4 的情况下放电相对较强,这时可以管好其额定功率输出,其实际出力值表示为

$$P_F = \min [P'_F, P_d(t)] = \min(P'_F, P_m) \quad (12)$$

当飞轮储能 SOC 低于 0.4 时,其储能容量偏小,放电能力较弱,因此需按照飞轮储能的实时 SOC 值来调节输出功率,实际出力值可表示为

$$P_F = \min [P'_F, P_d(t)] \quad (13)$$

故飞轮储能系统的功率指令为

$$P_F = \begin{cases} \min [P'_F, P_d(t)], & \Delta f < -0.033 \text{ Hz} \\ -\min(|P'_F|, |P_c(t)|), & \Delta f > 0.033 \text{ Hz} \end{cases} \quad (14)$$

基于 logistic 函数的储能充电自适应下垂系数仿真模型如图 9 所示。

2 仿真分析

通过所搭建的火-储联合一次调频的仿真模型(见图 3),分别对火电机组单独调频以及火-储联合调频时采用定系数下垂控制和所提基于 logistic 函

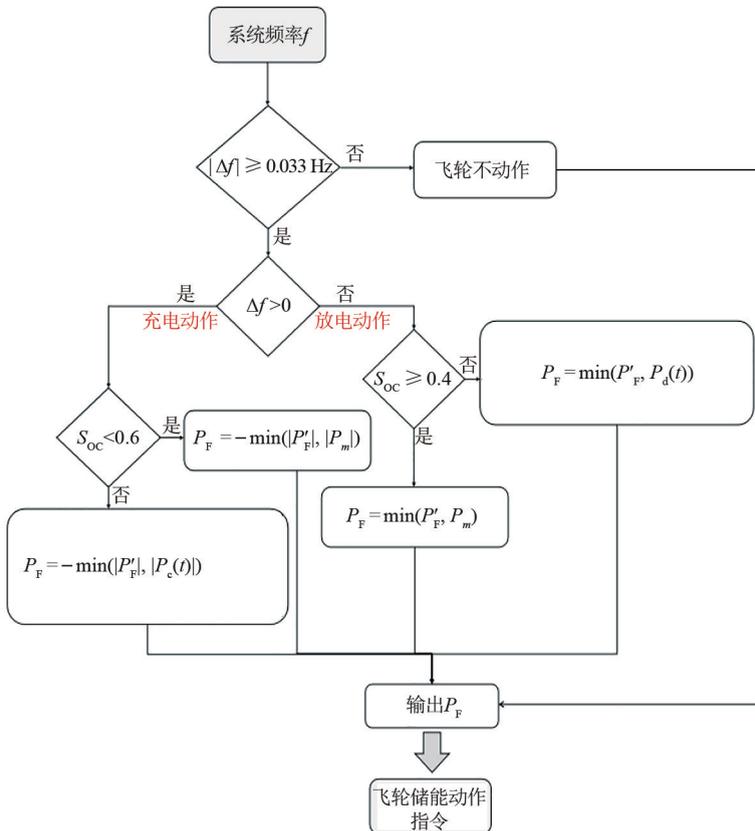


图 8 飞轮储能动作控制策略

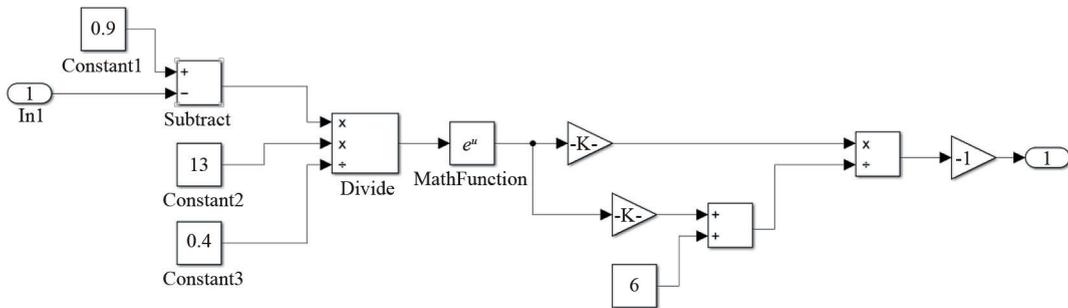


图 9 飞轮储能充电时自适应下垂系数模型

数的自适应下垂控制进行对比分析。模型中火电机组额定功率设为 600 MW, 并采用 1 MW/0.25 MWh 的飞轮储能辅助调频, 飞轮储能初始 SOC 设为 0.6, 模型中相关参数均采用标幺值, 以 600 MW、50 Hz 为基准值, 其中模型选取的各项参数如表 1 所示^[17]。

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
T_g	0.08	T_{CO}	0.5
F_{HP}	0.3	H	6
F_{IP}	0.3	D	2
F_{LP}	0.4	T_{12}	0.881
T_{CH}	0.3	T_F	0.02
T_{RH}	10	K_{g1}/K_{g2}	20
λ	0.805		

2.1 阶跃扰动

$t = 1\text{ s}$ 时, 在区域 1、2 中分别加入了 0.01 pu、0.02 pu 的阶跃扰动量。由于两区域的仿真曲线变化相似, 故以区域 1 的仿真结果为分析对象。仿真结果如图 10—图 13 所示。

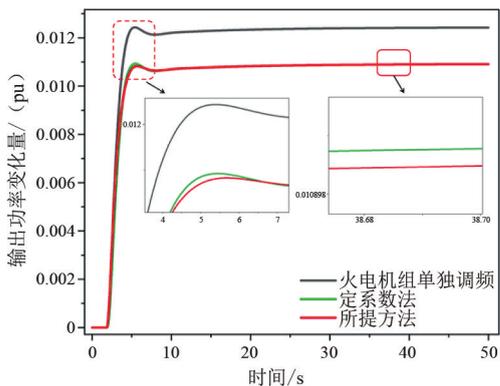


图 10 区域 1 火电机组输出功率变化曲线

由图 10 可知在火电机组单独调频时, 汽轮机的输出功率峰值为 0.013 2 pu, 稳态输出功率为 0.012 5 pu; 在耦合了飞轮储能进行联合调频后, 所用两种控制方法的汽轮机输出功率峰值与稳态值均有所下降, 从图中可以看出所提方法相比于定系数法控制效果更好。其中, 定系数下垂控制下火电机组输出功率峰值比火电机组单独调频减少了 16.67%,

稳态功率减少了 12.71%; 所提方法输出功率峰值比火电机组单独调频减少了 18.93%, 稳态输出功率减少了 12.73%。

由图 11 可知, 在火电机组单独调频时, 联络线交换功率峰值为 0.005 4 pu; 采用火-储联合调频时, 传统定系数法下联络线上交换功率峰值降低了 1.85%, 而所提方法交换功率峰值降低了 5.56%, 同样体现出所提控制方法更优。

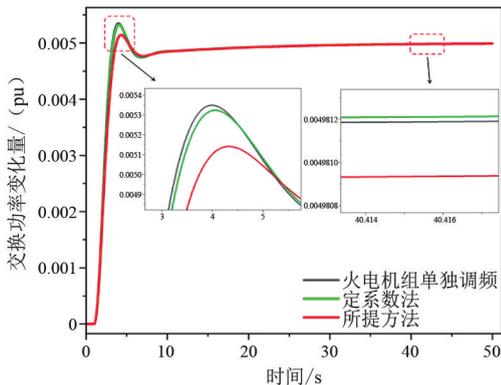


图 11 区域 1 联络线交换功率变化曲线

从图 12 中可以看出, 相较于火电机组单独调频, 耦合了飞轮储能后调频能力得到明显提升。其中定系数法最大频率变化量为 0.001 56 pu, 相比于火电机组单独调频降低了 7.69%, 而所提方法最大频率变化量为 0.001 52 pu, 相比于火电机组单独调频降低了 10.06%, 二者频率偏差相对于无储能的情

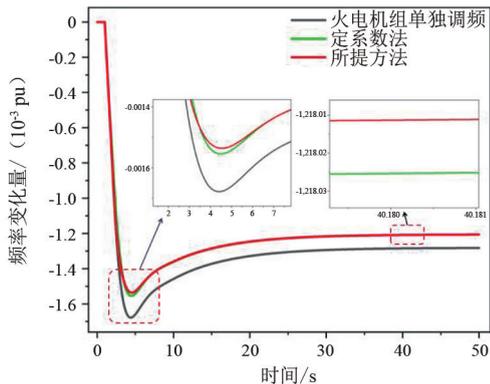


图 12 区域 1 频率变化曲线

况下均有提升,但所提方法的效果更佳。

从图 13 可知,所提基于 logistic 函数的自适应下垂控制相比于传统定系数法最大的优势则是考虑了储能 SOC,能够缩小储能 SOC 的变化范围,减少过充、过放等问题。

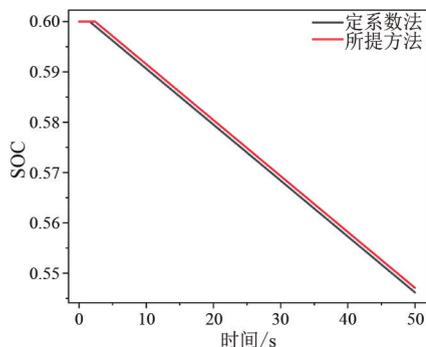


图 13 储能 SOC 变化曲线

2.2 连续扰动

通常一次调频动作是由连续无规律的小幅度负荷快速波动而引起的。因此,下面进一步研究连续扰动下的火-储联合调频效果。区域 1、区域 2 的连续负荷扰动范围分别设置为 $[-0.02, 0.02]$ pu、 $[-0.03, 0.03]$ pu,其中连续扰动持续时间为 5 min。区域 1 与区域 2 仿真结果相似,因此以区域 1 为分析对象,其仿真结果如图 14—图 17 所示。由图 14—图 16 可知,连续扰动下飞轮储能参与调频时在两种控制方法下系统调频效果均有所提升,而所提方法相较于定系数法效果更好,这是由于定系数法存在动态适应性不足等问题,并且定系数法未考虑储能 SOC,飞轮储能在调频过程中还容易造成

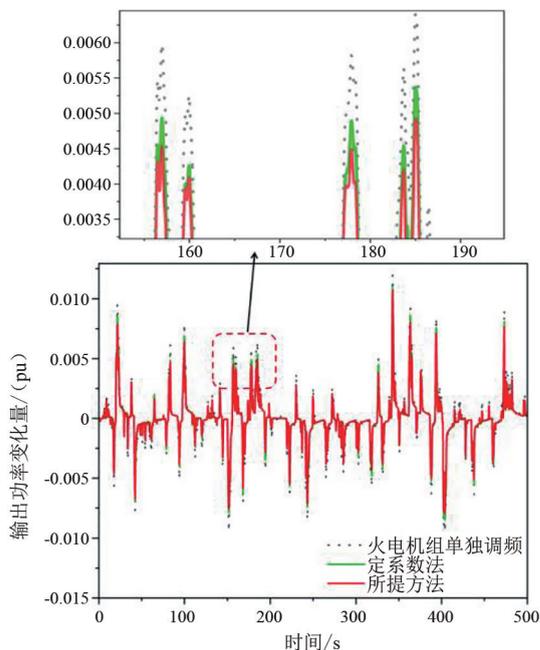


图 14 区域 1 火电机组输出功率变化曲线

过充、过放,而所提方法着重考虑了储能 SOC 与储能输出功率的关系,能够在提高系统调频能力的同时避免飞轮储能在长时间动作时过充、过放。

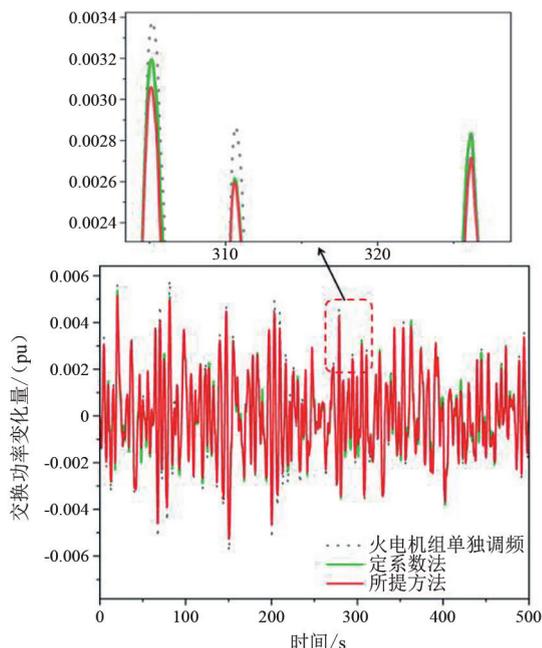


图 15 区域 1 联络线交换功率变化曲线

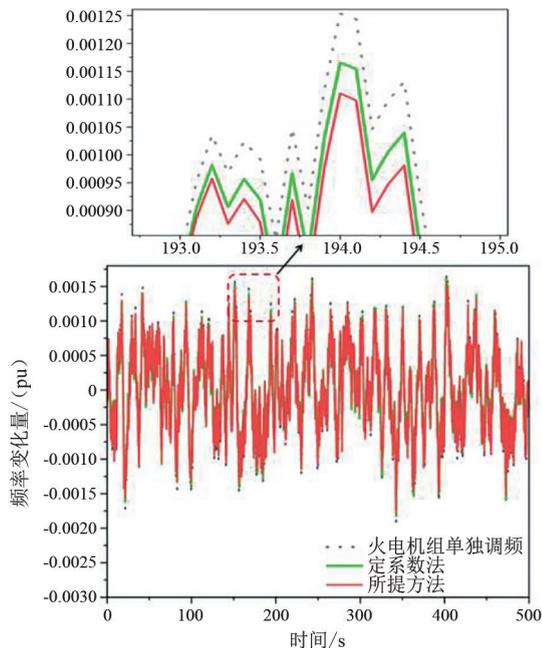


图 16 区域 1 频率变化量

从图 17 可知,采用所提控制方法时储能 SOC 变化相比于定系数法更加稳定,储能 SOC 变化速度和变化范围均有所减小,飞轮储能在输出功率时会结合自身 SOC 情况决定最终输出功率,不会造成储能系统过充、过放等问题。

表 2 为一次调频中两区域频率偏差的峰值绝对值 ($|f_{\max}|$) 与频率偏差的标准差 ($|f_{\text{std}}|$) 仿真结果。

从表 2 中 3 种不同情况下两区域频率偏差对比可知,在飞轮储能参与调频时系统频率偏差波动更小,两种控制方法的调频能力均有提升,其中所提方法控制效果更佳。

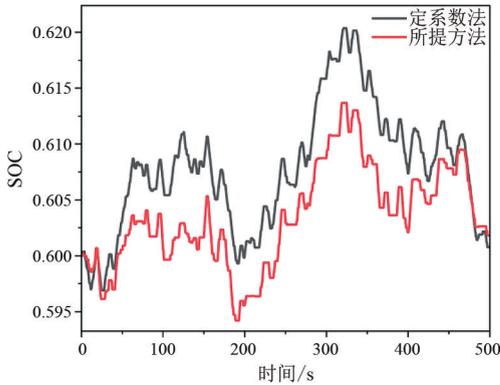


图 17 区域 1 飞轮储能 SOC 变化曲线

表 2 连续扰动下一次调频中频率波动仿真结果

单位: 10^{-3} pu

调频方法	区域 1		区域 2	
	$ \Delta f_{1\max} $	$\Delta f_{1\text{std}}$	$ \Delta f_{2\max} $	$\Delta f_{2\text{std}}$
仅火电机组	1.908	0.668	2.672	0.723
火-储联合定系数法	1.827	0.617	2.585	0.683
所提方法	1.804	0.609	2.538	0.678

3 结 论

针对高比例新能源并网引发的电力系统频率失稳问题,上面提出了一种基于飞轮储能辅助火电机组的变系数下垂控制策略,通过仿真分析与实验验证,得出以下结论:

1) 所提控制方法在飞轮储能系统辅助火电机组一次调频时能够更有效地减少频率偏差,提高电力系统稳定性。如区域 1 加入 0.01 pu 阶跃扰动量时,所提方法最大频率偏差相比于火电机组单独调频时减少了 10.06%,相较于定系数法减少了 2.37%。

2) 所提控制方法在减小两区域间联络线上交换功率波动以及火电机组输出功率效果更佳。如区域 1 加入 0.01 pu 阶跃扰动量时,所提方法联络线交换功率峰值相比于定系数法降低了 3.71%,火电机组输出功率峰值相比于定系数法降低了 2.26%,说明所提方法能够更有效地提高电力系统稳定性,减少火电机组出力。

3) 所提方法通过引入 logistic 函数动态调整储能下垂控制系数,提升储能系统的动态适应性,合理

优化了储能出力,减少了飞轮储能过充、过放等问题,并且所提方法能够在保持较好调频效果的同时使储能 SOC 也维持良好。

参考文献

- [1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
- [2] 刘园园.国家能源局:我国风电光伏发电装机规模超过煤电[N].科技日报,2024-08-01(003).
- [3] 唐亮,尹小波,吴候福,等.电化学储能产业发展对安全标准的需求[J].储能科学与技术,2022,11(8):2645-2652.
- [4] 陈海生,李泓,徐玉杰,等.2023 年中国储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(5):1359-1397.
- [5] JONES C R, HILPERT P, GAEDE J, et al. Batteries, compressed air, flywheels, or pumped hydro? Exploring public attitudes towards grid-scale energy storage technologies in Canada and the United Kingdom[J]. Energy Research & Social Science, 2021(80):102228.
- [6] 戴兴建,魏鲲鹏,张小章,等.飞轮储能技术研究五十年评述[J].储能科学与技术,2018,7(5):765-782.
- [7] 涂伟超,李文艳,张强,等.飞轮储能在电力系统的工程应用[J].储能科学与技术,2020,9(3):869-877.
- [8] 李树胜,王佳良,李光军,等. MW 级飞轮阵列在风光储能基地示范应用[J].储能科学与技术,2022,11(2):583-592.
- [9] 隋云任,梁双印,黄登超,等.飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2597-2606.
- [10] 何林轩,李文艳.飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J].储能科学与技术,2021,10(5):1679-1686.
- [11] 罗耀东,田立军,王垚,等.飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(9):71-82.
- [12] 陈玉龙,武鑫,滕伟,等.用于风电功率平抑的飞轮储能阵列功率协调控制策略[J].储能科学与技术,2022,11(2):600-608.
- [13] 刘颖明,徐中民,王晓东.考虑飞轮储能的风电场有功功率平滑控制[J].储能科学与技术,2015,4(2):194-197.
- [14] 梁恺,彭晓涛,秦世耀,等.基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2628-2641.

(下转第 45 页)

基于短路电流约束的新能源最大接入容量 实用化计算方法

潘艳¹, 李付强¹, 黄明辉², 赵伟¹, 张野², 张文朝²

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要:随着并网新能源规模的迅猛增加,对短路电流的贡献愈发凸显。针对新能源最大装机容量难以估计的问题,提出了一种基于短路电流约束的新能源最大接入容量实用化计算方法。通过计算新能源固定装机容量接入高电压等级汇集站对短路电流的贡献值,并根据现有系统中高电压等级汇集站的短路电流与断路器遮断容量的差值,在保障断路器遮断能力的前提下,折算出新能源最大接入容量。所提方法可有效评估新能源接入电网时对电网短路电流的贡献问题,并简单快速得出集中并网节点可接入新能源最大装机规模。实际电网算例计算表明,所提方法具有良好的指导意义和实际应用价值。

关键词:新能源最大装机规模; 短路电流计算; 新能源并网; 接入容量实用化计算

中图分类号: TM 612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0032-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250205

Practical Calculation Method for Maximum Capacity of New Energy Access Based on Short-circuit Current Constraint

PAN Yan¹, LI Fuqiang¹, HUANG Minghui², ZHAO Wei¹, ZHANG Ye², ZHANG Wenchao²

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

2. Beijing Kedong Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: With the rapid increase in the scale of grid-connected new energy, the contribution to short-circuit current is becoming increasingly prominent. Aiming at the difficulty in estimating the maximum installed capacity of new energy, a practical calculation method for the maximum capacity of new energy access to power grid based on short-circuit current constraints is proposed. Through calculating the contribution value to short-circuit current by the fixed installed capacity of new energy access to high voltage level collection stations, and according to the difference between the short-circuit current of high voltage level collection stations and the breaking capacity of circuit breaker in the existing system, the maximum capacity of new energy access to power grid is calculated under the premise of ensuring the breaking capacity of circuit-breaker. The proposed method can effectively evaluate the contribution of short-circuit current when new energy access to power grid, and can easily and quickly determine the maximum installed capacity of new energy that can be connected to the centralized grid-connecting point. Actual grid calculation examples show that the proposed method has good guiding significance and practical application value.

Key words: maximum installed capacity of new energy; short-circuit current calculation; new energy grid connection; practical calculation of access capacity

0 引言

随着清洁能源的大力发展,以风电、光伏为代表的可再生能源的开发与应用进入高速发展阶段^[1]。

基金项目: 国家电网有限公司华北分部项目“计及电压源电流源设备影响短路电流水平下的网架优化技术研究”(SGNC0000FZJS2310247)

由于受自然条件的约束,新能源电能多以集中接入的形式将功率馈入电网。伴随新能源电源并网容量的大幅提升,新能源大规模接入占用了常规机组开机空间,场站短路电流水平接近或超过断路器额定遮断电流等问题日益突出^[2]。世界各国都出台了风力发电机组和光伏发电装置并网规范,要求当电网发生短时间故障时,新能源厂站仍能持续运行,即

具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力^[2-3]。新能源电源在实施 LVRT 后,当电网故障时即向外馈出短路电流^[4]。短路电流超标可能会影响系统的安全性,甚至会导致大电网崩溃^[5-7]。随着新型电力系统的建设,新能源必将成为主力电源,而短路电流已经成为制约交流网架进一步加强的主要因素,新能源的接入规模终将达到上限。在短路电流的限制下,集中网点所能接入的新能源最大装机容量已经成为各方关注的焦点。

为评估新能源接入容量,国内外学者进行了众多研究。文献[8]基于恒电流模型,研究了分布式发电接入位置和注入容量的上限。文献[9]研究了保证系统运行安全稳定的前提下,配电网最大可接入的分布式光伏容量。文献[10]考虑分布式光伏出力及负荷的不确定性,用区间过电压风险衡量电压越限严重程度,并提出了配电网光伏承载能力评估方法。文献[11]基于混合整数非线性规划问题,分析了新能源的最优接入位置与最大渗透率。文献[12-13]引入机会约束刻画约束越限的概率,以此反映新能源预测误差的不确定性,建立基于机会约束的新能源最大并网容量评估模型。文献[14]考虑了光伏电源不同功率因数下电压波动因数,建立了各节点最大容量可接入方案。文献[15]通过配电网的分区消纳策略实现了分布式新能源的就地消纳,提高了系统的接入能力。文献[16]通过主动配电网的快速遍历重构方法有效遏制了功率倒送所带来的电压抬升问题。文献[17]针对传统配电网分布式光伏承载能力评估方法中未考虑光伏集群的问题,构建了一种以光伏集群为评估单元的承载能力双层评估模型,以不向主网反送电作为指标,考虑电压偏差和设备热稳定约束,提出灵敏度排序方法求取光伏承载能力。文献[18]在含有多电压等级的系统中测试得出,联络线协同各区能实现一体化消纳和新能源渗透率提升。

目前现有文献大部分研究是针对单电网或者是单个上、下两级电网间的新能源承载能力进行评估。对于汇集电网中新能源的承载能力如何评估并没有给出有说服力的方法,仍需针对多层级汇集网络的承载能力问题提出实用化计算方法。同时,短路电流作为电力系统重要运行指标,以短路电流为约束评估新能源接入容量却少有研究。

综上所述,下面提出一种基于短路电流约束的

汇集系统新能源最大接入容量实用化计算方法。首先计算固定新能源装机容量接入高电压等级汇集站对短路电流的贡献值,再基于实际运行系统中高电压等级汇集站的短路电流与断路器遮断容量的差值,折算出汇集网络新能源最大接入容量。

1 电流源提供短路电流公式推导

传统电力系统中的电源以同步发电机为主,电力电子性质的电源比例非常小,电网中的故障电流主要由同步发电机贡献。直驱风机、光伏、储能等属于全功率换流设备,这些电源输出的电流由换流器的控制环节决定,具有可整定的性质。在故障瞬间这些电源可近似模拟为与机端电压相关的可变电流量。

带可变电流量的两节点小系统如图 1 所示。图中: X_{pv} 为新能源机组的等值电抗(约等于 0); X_s 为同步发电机组等值电抗; X_L 为输电线路电抗; X_1 为负荷等值电抗; U_A 为母线 A 正常运行方式下的母线电压; U_B 为母线 B 正常运行方式下的母线电压。

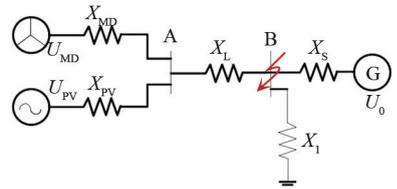


图 1 带可变电流量的两节点小系统

如果在母线 B 附近发生三相短路故障,短路电流计算步骤如下:

1) 初始状态计算。进行小系统潮流计算,确定母线 A 电压 U_A 、母线 B 电压 U_B 、线路电抗 X_L 、负荷电抗 X_1 、同步机组电抗 X_s 、同步发电机出力、感应电动机负荷、电流源输出功率。

2) 形成系统阻抗矩阵。两节点系统矩阵 Z 表示为

$$\begin{cases} Z = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} \\ Z_{BA} & Z_{BB} \end{bmatrix} \\ Z_{AA} = X_L + X_s // X_1 \\ Z_{BB} = X_s // X_1 \\ Z_{AB} = Z_{BA} = \frac{X_s // X_1}{X_L + X_s // X_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{AA} 为图 1 中短路点左侧系统自阻抗; Z_{BB} 为图 1 中短路点右侧系统自阻抗; $Z_{AB} = Z_{BA}$ 为图 1 中短路点左右两侧互阻抗。

3) 计算恒定激励产生的短路电流 I''_{F1} , 并计算该短路电流影响下的 A、B 节点电压变化量 ΔU_{1A} 、 ΔU_{1B} 。

$$I''_{F1} = -\frac{U_B}{Z_{BB}} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} \\ Z_{BA} & Z_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I''_{F1A} \\ I''_{F1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{1A} \\ \Delta U_{1B} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 节点 A 短路电流 $I''_{F1A} = 0$; 节点 B 短路电流 $I''_{F1B} = I''_{F1}$ 。

4) 计算可变电流源产生的短路电流 $I_{F2}^{(1)}$ 。先修正可变电流源机端电压 $U_A^{(1)}$, 计算可变电流源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(1)}$, 再计算可变电流源输出电流变化量引起的短路电流 $I_{F2}^{(1)}$ 。

$$U_A^{(1)} = U_A - \Delta U_{1A} \quad (4)$$

$$\Delta I_S^{(1)} = I_S(U_A^{(1)}) - I_S(U_A) \quad (5)$$

$$I_{F2}^{(1)} = \frac{\Delta I_S^{(1)} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (6)$$

5) 修正计算可变电流源机端电压。根据可变电流源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(1)}$ 计算可变电流源机端电压变化量 $\Delta U_{2A}^{(1)}$, 再计算可变电流源机端电压 $U_A^{(1)}$ 。

$$\Delta U_{2A}^{(1)} = (I_{F2}^{(1)} - I_S) Z_{AB} \quad (7)$$

$$U_A^{(1)} = U_A - \Delta U_{1A} + \Delta U_{2A}^{(1)} \quad (8)$$

6) 迭代计算。依次修正计算可变电流源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(2)}$ 及其引起的短路电流 $I_{F2}^{(2)}$ 、可变电流源机端电压变化量 $\Delta U_{2A}^{(2)}$ 及机端电压 $U_A^{(2)}$ 。

$$\Delta I_S^{(2)} = I_S(U_A^{(1)}) - I_S(U_A) \quad (9)$$

$$I_{F2}^{(2)} = \frac{\Delta I_S^{(2)} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (10)$$

$$\Delta U_{2A}^{(2)} = (I_{F2}^{(2)} - I_{F2}^{(1)}) Z_{AB} \quad (11)$$

$$U_A^{(2)} = U_A - \Delta U_{1A} + \Delta U_{2A}^{(2)} \quad (12)$$

7) 迭代计算结束。当 $I_{F2}^{(n)} - I_{F2}^{(n-1)} \leq \varepsilon$ 时, 计算结束。

由上述可变电流源计算步骤可知, 迭代计算的目的是精确计算故障后可变电流源输出的电流。如果已估算出故障后可变电流源输出的电流, 即可建立故障后可变电流源提供短路电流的快速估算模型, 如式(13)所示。

$$I''_{F2} = \frac{I_{qFc} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (13)$$

式中, I_{qFc} 为故障后可变电流源输出电流的估算值。

新能源在故障期间输出的无功电流计算公式^[19]如式(14)所示。

$$\begin{cases} 0 & U_{FG} > 0.9 \\ K_q(0.9 - U_{FG}) I_N & U_{FG} \leq 0.9 \\ I_{qmax} & K_q(0.9 - U_{FG}) I_N > I_{qmax} \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_{FG} 为发电机端电压, 标幺值; I_{qmax} 为无功电流限幅, 取值范围 1.1~1.3; I_N 为发电机额定电流, 以本机为基准时取值 1.0; K_q 为无功电流倍数, 一般取值 1.5。

2 新能源最大接入容量分析

目前新能源接入时先升压至 10 kV, 再基于辐射型汇集网络采用逐级汇集的方式接入最高电压等级汇集站。这里考虑接入新能源全部为双馈风机以及新能源全部为全尺寸换流器接入两种情况。假如新能源接入 750 kV 汇集站, 基于汇集系统的整体短路阻抗和 750 kV 汇集站主变压器容量计算新能源接入后对短路电流的贡献值。

对于接入新能源全部为双馈风机的情况, 短路阻抗 Z_H 计算为

$$Z_H = Z_T + Z_C \cdot \frac{S_T}{S_{DF}} \quad (15)$$

式中: Z_T 为汇集网络短路阻抗; Z_C 为双馈风机的短路阻抗; S_{DF} 为双馈风机的装机容量; S_T 为 750 kV 汇集站主变压器容量。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况, 短路阻抗为汇集网络短路阻抗 Z_T 。

汇集网络短路阻抗 Z_T 根据汇集网络采用以下其中一种计算方式:

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{35}}{K_{35}} + \frac{Z_{10}}{K_{10}} \quad (16)$$

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{35}}{K_{35}} \quad (17)$$

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{10}}{K_{10}} \quad (18)$$

式中: Z_{750} 、 Z_{330} 、 Z_{110} 、 Z_{35} 、 Z_{10} 分别为 750 kV、330 kV、110 kV、35 kV、10 kV 变压器等效内阻抗; K_{750} 、 K_{330} 、 K_{110} 、 K_{35} 、 K_{10} 分别为 750 kV、330 kV、110 kV、35 kV、10 kV 变压器实际额定电压比。

基于上述汇集系统的整体短路阻抗,计算新能源接入后对短路电流的贡献值。对于接入新能源全部为双馈风机的情况,新能源接入后对短路电流的贡献值为

$$I''_{DF} = \frac{1}{Z_H} \cdot \frac{S_T}{\sqrt{3}U_n} \quad (19)$$

式中: I''_{DF} 为新能源接入后对短路电流的贡献值; U_n 为主变压器额定电压。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况,新能源接入后对短路电流的贡献值为:

$$I_{qFC} = \begin{cases} 0 & U_{IG} > 0.9 \\ K_q(0.9 - U_{IG})I_N & U_{IG} \leq 0.9 \\ I_{qmax} & K_q(0.9 - U_{IG})I_N > I_{qmax} \end{cases} \quad (20)$$

$$I'_{qFC} = I_{qFC} \cdot \frac{S_T}{\sqrt{3}U_n} \quad (21)$$

式中: I_{qFC} 为新能源接入后对短路电流的贡献值,标么值; I'_{qFC} 为 I_{qFC} 的有名值。

进一步的,基于所计算的对短路电流的贡献值计算新能源最大接入容量。对于接入新能源全部为双馈风机的情况,新能源最大接入容量为

$$P_{maxDF} = 0.9 S_{DF}(I_{SC} - I''_{DF})/I''_{DF} \quad (22)$$

式中: P_{maxDF} 为双馈风机最大接入容量; I_{SC} 为断路器遮断容量; I''_{k0} 为新能源接入前 750 kV 汇集站短路电流。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况,新能源最大接入容量为

$$P_{maxFC} = 0.9 S_{DF}(I_{SC} - I''_{k0})/I'_{qFC} \quad (23)$$

式中, P_{maxFC} 为直驱风机或光伏最大接入容量。

3 短路电流约束的新能源最大接入容量实例分析

3.1 短路电流实例分析

下面搭建了小系统算例,来验证所提出的任一节点短路电流快速估算方法的有效性。小系统仿真算例如图 2 所示。

考虑基准容量 S_B 为 100 MVA,小系统变压器以及线路的参数如表 1 和表 2 所示。此外火电暂态电抗取值 0.2。

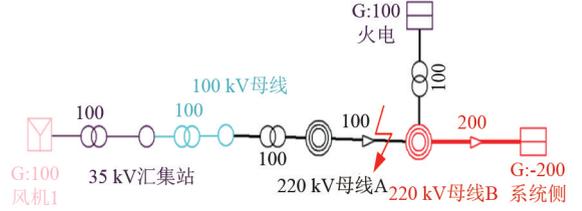


图 2 新能源风机小系统算例

表 1 小系统新建变压器参数

变压器	容量/MVA	漏抗百分数/%	漏抗/(pu)
35 kV 厢式变压器	100	7	0.07
110 kV 升压变压器	100	10	0.10
220 kV 变压器	100	12	0.12

表 2 小系统新建线路参数

线路参数	长度/km	阻抗/(pu)
35 kV 输电线	10	0.388
110 kV 汇集线	20	0.061
220 母线 A—母线 B	30	0.070
母线 B—系统侧	30	0.070

当系统接入新能源为电流源设备时,将电路等效为图 2 模型,形成阻抗矩阵计算远端电压。

1) 形成系统阻抗矩阵。两节点系统矩阵 Z 为:

$$Z_{AA} = 0.07 + 0.388 + 0.1 + 0.061 + 0.12 + 0.07 + (0.07 // (0.12 + 0.2)) = 0.866 \quad (24)$$

$$Z_{BB} = 0.07 // (0.12 + 0.2) = 0.057 \quad (25)$$

$$Z_{AB} = 0.057 \times 0.866 = 0.066 \quad (26)$$

2) 计算恒定激励产生的短路电流。其中 $U_B = 1$, 则恒定激励产生的短路电流 I''_{F1} 和节点电压变化量 ΔU_1 为:

$$I''_{F1} = - (1/0.057) = -17.41 \quad (27)$$

$$\Delta U_1 = 0.066 \times (-17.41) = -1.15 \quad (28)$$

3) 计算可变电流量产生的短路电流。取故障前新能源机端电压 1 pu, 满出力时 I_s 为 1 pu, 故障时刻机端电压 U_A 跌落至 0, 可得修正可变电流量机端电压 $U_{(1)A}$ 和输出电流变化量 $\Delta I_{(1)S}$ 以及可变电流量输出电流变化量引起的短路电流 $I_{(1)F2}$ 。

$$U_{(1)A} = 0 - (-1.15) = 1.15 \quad (29)$$

$$\Delta I_{(1)S} = 1 \times (1.15 - 0) = 1.15 \quad (30)$$

$$I_{(1)F2} = 1.15 \times 0.066 / 0.057 = 1.33 \quad (31)$$

4) 修正计算可变电流量机端电压。根据可变电流量产生的短路电流计算可变电流量机端电压变化量 $\Delta U_{(1)2}$, 进而计算可变电流量机端电压 $\Delta U_{(1)A}$ 。

$$\Delta U_{(1)2} = (1.33 - 1) \times 0.066 = 0.022 \quad (32)$$

$$\Delta U_{(1)A} = 0 - (-1.15) + 0.022 = 1.17 \quad (33)$$

5) 迭代计算。修正计算可变电​​源输出电流变化量引起的短路电流 $I_{(2)F2}$ 、 $I_{(3)F2}$ 以及可变电​​源机端电压变化量 $\Delta U_{(2)A}$ 、 $\Delta U_{(3)A}$ 。

$$I_{(2)F2} = 1.36 \quad (34)$$

$$\Delta U_{(2)A} = 1.18 \quad (35)$$

$$I_{(3)F2} = 1.36 \quad (36)$$

$$\Delta U_{(3)A} = 1.18 \quad (37)$$

转换成短路电流计算值为

$$I = I_1 I_B = I_1 \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{1.36 \times 100 \text{ MVA}}{1.732 \times 230 \text{ kV}} = 0.34 \text{ kA} \quad (38)$$

迭代计算的目的是精确计算故障后可变电​​源输出的电流。经迭代法计算,当接入系统为容量 100 MW 的新能源时,提供 220 kV 厂站短路电流约为 0.34 kA。此外根据故障后可变电​​源提供短路电流的快速估算模型见式(13),计算短路电流为 0.33 kA,系统仿真软件计算短路电流为 0.34 kA,计算结果如表 3 所示。由此证明了所提短路电流计算方法的有效性。

表 3 100 MW 新能源投运前后短路电流 单位:kA

电压等级	风机未投	风机投入	增加量	计算值
220 kV	22.20	22.52	0.34	0.33
110 kV	0	0.93	0.93	0.92
35 kV	0	3.04	3.04	3.01

3.2 新能源最大接入容量实例分析

以华北电网为实际算例来验证所提基于短路电流约束的新能源最大接入容量实用化计算方法的有效性。张北地区风光资源丰富,张南站是向北京和门头沟地区供电的重要枢纽厂站,该站汇集了新能源(坝上新能源汇集站)和火电装机(沙岭子火电),因此 500 kV 线路出线较多,其 500 kV 母线三相短路电流为 59.32 kA。张南站近区新能源主要通过厢式变压器以及升压变压器将电力通过汇集线路输送至 220 kV 站,打捆通过双回 220 kV 线路接至 500 kV 站,通过 500 kV 主变压器输送至主网。新能源接入系统接线如图 3 所示,参数如表 4、表 5 所示。

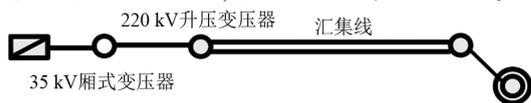


图 3 新能源接入系统接线

表 4 新能源接入系统变压器参数

变压器	容量/MVA	漏抗百分数/%	漏抗/(pu)
35 kV 厢式变压器	100	7	0.070
220 kV 升压变压器	2×240	12	0.050
500 kV 变压器	4×750	18	0.024

表 5 新能源接入系统线路参数

线路参数	长度/km	阻抗/(pu)
35 kV 输电线	15	0.50
220 kV 汇集线	40	0.04

在近区新增 1000 MW 风电装机容量,单台机组容量为 100 MW,机端到短路点的等效阻抗 X 为 0.621。新能源接入前短路电流为 59.32 kA,接入后为 60.13 kA,增加了 0.81 kA。

根据式(20),可得出故障期间提供的短路电流如式(39)所示。

$$I_{qFC} = K_q (0.9 - I_{qFC} X) I_N \quad (39)$$

由式(39)可计算出张南站 500 kV 母线提供的短路电流 I_{500} 为

$$I_{500} = 10 \times \frac{0.9}{1/(K_q I_n) + X} \times \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = 10 \times \frac{0.9}{1/(1 \times 1.5) + 0.621} \times \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 525 \text{ kV}} = 0.77 \text{ kA}$$

计算所得新增短路电流为 0.77 kV,与实际值相对误差为 4.9%,由此可证明所提方法的有效性。

根据公式(41)计算接入新能源极限。假设风电接入前 500 kV 短路电流水平为 I''_{k0} ,断路器遮断容量为 I_{SC} ,新能源未接入前张南站 500 kV 母线三相短路电流为 59.32 kA,按照 1000 MW 提供约 0.77 kA 短路电流计算,此时张南站最大新能源接入容量为

$$P_{\max FC} = 0.9 \times S_{DF} \times \frac{(I_{SC} - I''_{k0})}{I'_{qFC}} = 0.9 \times 1000 \times \frac{(63 - 59.32)}{0.77} \approx 4300 \text{ MW} \quad (41)$$

式中,0.9 为有功功率系数,1000 MVA 为视在功率,1000×0.9 为有功功率。

在张南站短路电流为 59.32 kA 的基础上,当在张南站近区接入 4300 MW 容量的新能源,仿真计算张南站 500 kV 母线短路电流为 62.89 kA,临近短路器遮断容量。

4 结 论

随着并网新能源规模的迅猛增加,特别是集中式接入的新能源对并网点短路电流的贡献越来越大,受限于短路电流水平,集中并网点所能接入的新能源最大装机容量已成为各方关注的焦点。所提基于短路电流约束的汇集系统新能源最大接入容量实用化计算方法,可简单快速得出集中并网点可接入新能源最大装机规模。以华北电网张南站为实际案例计算新能源最大接入容量,并使用仿真软件计算验证了所提方法的准确性,对于指导电网规划具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17):5493-5506.
- [2] MULJADI E, SAMAAN N, GEVORGIAN V, et al. Short circuit current contribution for different wind turbine generator types[C]//IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2010.
- [3] 刑鲁华,陈青,吴长静,等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4):1121-1127.
- [4] YE R K, WANG H F, BASHIR T, et al. Fast and accurate method for short-circuit current calculation in distribution network with IIDGs[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 155:109622.
- [5] LI J, ZHANG X P, YAO W, et al. Study on the calculation methods for short-circuit current DC component[C]//2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI), July 22-24, 2022, Shijiazhuang, China. IEEE, 2022:378-382.
- [6] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):1-9.
- [7] BERIZZI A, SILVESTRI A, ZANINELLI D, et al. Short-circuit current calculations for DC systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5):990-997.
- [8] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1):53-58.
- [9] DUBEY A, SANTOSO S. On estimation and sensitivity analysis of distribution circuit's photovoltaic hosting capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4):2779-2789.
- [10] WANG S X, DONG Y C, WU L, et al. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):2709-2721.
- [11] RAVIKUMARPANDI V, ZEINELDIN H H, XIAO W D, et al. Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97:68-75.
- [12] 吴素农,于金镒,杨为群,等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11):3691-3697.
- [13] 丁琦欣,覃洪培,万灿,等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6):28-38.
- [14] 翁毅选,程韧俐,等. 计及电压波动约束的光伏电源最大可接入容量分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(11):28-32.
- [15] 尤毅,余南华,张晓平,等. 主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8):71-76.
- [16] 黄河,朱磊,高松,等. 提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3):166-172.
- [17] 于昊正,赵寒杰,李科,等. 计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J]. 电力建设, 2023, 44(2):122-131.
- [18] LI H, LU Z X, QIAO Y, et al. The flexibility test system for studies of variable renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2):1526-1536.
- [19] 杨杉,同向前. 含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11):93-99.

作者简介:

潘艳(1986),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

李付强(1977),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统规划;

黄明辉(1996),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统规划;

赵伟(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

张野(1998),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统规划;

张文朝(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2024-11-04)

变速抽水蓄能机组的快速调频能力与动态特性分析

杨桂兴^{1,2}, 郭小龙¹, 常喜强¹, 亢朋朋¹, 宋鹏飞¹, 颜勤³

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要:与定速抽水蓄能机组相比, 变速抽水蓄能机组可以通过调节机组转速实现灵活功率调节, 并在不同工况下运行时均具备调频能力。为充分对比分析定速与变速抽水蓄能机组的快速调频能力与动态特性, 首先, 建立了包含调频功能模块的全阶双馈变速抽水蓄能装置模型; 其次, 分析了变速抽水蓄能机组在不同工况下的控制与运行特性; 最后, 通过基于三机九线系统的动态仿真实验对比分析了定速与变速抽水蓄能机组的调频能力与动态特性。仿真结果表明, 通过有功功率下垂控制, 抽水蓄能机组可以在发电和抽水工况下为系统提供快速频率调节, 且变速抽水蓄能的调频能力优于定速抽水蓄能性能。

关键词:变速抽水蓄能机组; 单机无穷大系统; 快速调频; 下垂控制

中图分类号: TM 612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0038-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250206

Analysis on Fast Frequency Regulation Capability and Dynamic Characteristics of Variable-speed Pumped Storage Units

YANG Guixing^{1,2}, GUO Xiaolong¹, CHANG Xiqiang¹, KANG Pengpeng¹, SONG Pengfei¹, YAN Qin²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, Xinjiang, China; 2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan, China)

Abstract: Compared with fixed-speed pumped storage units, variable-speed pumped storage units can achieve a flexible power adjustment by regulating the speed of units, and have frequency regulation capability under different operating conditions. In order to fully compare and analyze the fast frequency regulation capability and dynamic characteristics of fixed-speed and variable-speed pumped storage units, firstly, a model of full-order doubly-fed variable-speed pumped storage model including frequency regulation function module is established. Secondly, the control and operation characteristics of variable-speed pumped storage units under different operating conditions are analyzed. Finally, through the dynamic simulation experiment based on three-machine nine-wire system, the frequency regulation capability and dynamic characteristics of fixed-speed and variable-speed pumped storage units are compared and analyzed. The simulation results show that the pumped storage unit can provide fast frequency regulation for the system under power generation and pumping conditions through active droop control, and the frequency regulation capability of variable-speed pumped storage units is better than that of fixed-speed pumped storage units.

Key words: variable-speed pumped storage units; stand-alone infinity system; fast frequency regulation; droop control

0 引言

随着新型电力系统的建设, 以风电、光伏为代表

的新能源大规模并网, 并不断取代同步机组成为系统常规电源。在此情况下, 由于新能源存在间歇性、随机性、非同步特性, 导致电力系统的安全稳定性面临严峻挑战, 调峰调频灵活性资源不足^[1]。抽水蓄

能机组由于其技术成熟、运行可靠且较为经济等优势已成为促进新型电力系统新能源消纳的重要装备^[2]。目前,最常见的抽水蓄能机组仍运行于恒转速状态,不能全范围发电,轻载时效率降低、频率支撑能力弱且在发电工况下机组响应缓慢^[3]。文献[4]通过将固定转速抽水蓄能装置改造成可调速度装置来克服上述恒转速运行的缺点。双馈变速抽水蓄能机组采用双馈感应电动机,根据机组运行工况可作为发电机或电动机,在电网出现功率不平衡时,通过机侧变流器控制双馈电机迅速调节机组功率,为系统提供快速频率支撑,以降低新能源出力波动所引发的电网频率失稳问题,提高电网频率稳定性^[5]。

目前,国内关于双馈变速抽水蓄能机组的研究主要集中在机组模型构建^[6-7]。机组运行自启动^[8]、不同运行工况之间的相互转换、功率解耦控制^[9]以及各种故障状态下机组的运行控制^[10-12]等,但有关双馈变速抽水蓄能机组直接参与电网频率快速调节的研究较少。文献[13]仅介绍了运行在发电工况下的双馈变速抽水蓄能机组参与电网的一次调频特性。由于导叶阀门本身具有机械延迟特性,通过将功率前馈控制加入到水泵水轮机的转速调节器中,提升了导叶阀门的机械调节速度,减少了水泵水轮机输出机械力矩的响应时间。文献[14]研究了在风电出力波动时使用双馈变速抽水蓄能机组平抑的控制策略,使系统产生的频率偏差明显减小。文献[15]为提高双馈抽水蓄能机组参与系统调频能力,通过转子动能与导叶开度协调控制提高了机组频率响应能力和电网的风电消纳能力。文献[16]在基于对机组多控制模式振荡特性和功频响应特性的分析,提出了变速抽水蓄能机组在发电工况下快速频率控制与快速功率控制相结合的协调控制策略,以及在水泵工况下定导叶开度变转速控制策略,并应用于中国第一台全功率变速抽水蓄能机组启动调试中,验证了该控制策略的有效性。

为弥补当前变速抽水蓄能机组在快速频率支撑功能研究中存在的不足,构建了能准确反映快速调频特性的双馈变速抽水蓄能机组动态模型,并分析了变速抽水蓄能机组快速频率支撑的工作原理与动态过程,并在此基础上对比分析了定速与双馈变速抽水蓄能机组的控制响应特性、不同工况下的动态运行特性及其对系统的快速频率支撑效果。

1 双馈变速抽水蓄能机组建模

1.1 双馈变速抽水蓄能机组拓扑结构

双馈变速抽水蓄能机组主要包括水力、机械和电气以及控制等部分,水力、机械部分主要包括引水系统、可逆水泵水轮机和导叶伺服机构,电气部分主要包括双馈感应电机、网侧变流器和机侧变流器。其中:机组的机侧变流器与双馈电机的转子连接,通过调节输入到电机转子电流角速度进而控制电机的转子转速和电磁转矩等物理量;网侧变流器用于维持直流母线电压的稳定;可逆水泵水轮机通过转轴与双馈感应电机的转子连接,进行机械功率与电磁功率转换,机组工作在发电工况和抽水工况下分别向电网输入和吸收功率。双馈可变速抽水蓄能机组拓扑如图1所示。

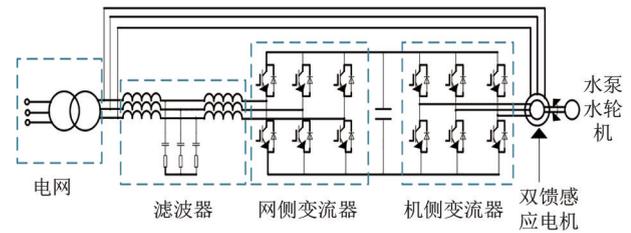


图1 双馈可变速抽水蓄能机组拓扑

1.2 双馈感应电机动态模型

双馈感应电机定、转子都取电动机惯例,将电机定、转子电压方程转化到 dq 轴上进行表示,双馈感应电机的 dq 轴等效电路如图2所示。

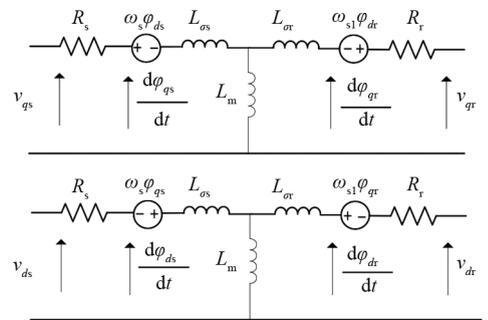


图2 双馈感应电机的 dq 轴等效电路

定、转子电压方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ_{ds} 、 φ_{qs} 、 φ_{dr} 、 φ_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴磁链; v_{ds} 、 v_{qs} 、 v_{dr} 、 v_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴电压; R_s 、 R_r 为定、转子电阻; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴电流; ω_s 为同步角速度; ω_r 为转子角速度。

定、转子的磁链方程为:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_s = L_{ls} + L_m \\ L_r = L_{lr} + L_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_s 、 L_r 分别为定、转子电感; L_{ls} 、 L_{lr} 为分别为定、转子绕组漏感; L_m 为定、转子绕组之间的互感。

转子的机械运动方程为

$$\begin{cases} \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L \\ T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: J 为转子转动惯量; T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和机械转矩; n_p 为电机的极对数。

机组选用基于定子磁链定向控制策略时,将定子磁链定位到 d 轴,则在 q 轴上磁链分量为 0,定子磁链方程转化为

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)、(2)、(6)可得电磁转矩为

$$T_e = -\frac{3n_p L_m \varphi_{ds} i_{qr}}{2L_s} \quad (8)$$

转子电压方程可转化为

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \sigma L_r \omega_{sl} i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \sigma L_r \omega_{sl} i_{dr} + \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} i_m \\ \varphi_{ds} = L_m i_m \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_m 为通用励磁电流; σ 为漏磁系数; ω_{sl} 为同步角速度与转子角速度之间的滑差。

根据式(8)可知,当 d 轴上定子磁链的幅值不变时,电磁转矩的变化仅与转子电流 q 轴分量有关,机组定子侧的有功功率可由电磁转矩和转子角速度两者的乘积表示,进而将转子电流的 q 轴分量视为定子侧的有功电流。因此双馈变速抽水蓄能机组可根据运行工况分别选取转速、有功功率以及电磁转矩作为机组的控制目标,进而对有功电流进行控制,以保证机组稳定运行。

1.3 可逆水泵水轮机动态模型

在发电工况下水泵水轮机主要包括转速调速器、导叶开度调节器、引水系统以及水轮机模型,引水系统压力管道假设为一个刚性管道。发电工况下的水泵水轮机模型如图 3 所示,可表示为

$$\begin{cases} \sqrt{H} = \frac{G_1}{Q} \\ Q_{nl} = \frac{1 - H - f_p Q^2}{T_w} \\ P_m = A_t H (Q - Q_{nl}) - D G_1 \Delta\omega \end{cases} \quad (10)$$

式中: G_1 为导叶开度; H 为水头; Q 为引水管道中的水流量; f_p 为水头损失系数; T_w 为水流惯性时间常数; A_t 为比例系数; Q_{nl} 为空载流量; D 为水轮机阻尼系数; $\Delta\omega$ 为机组转速变化量; P_m 为水轮机输出机械功率。

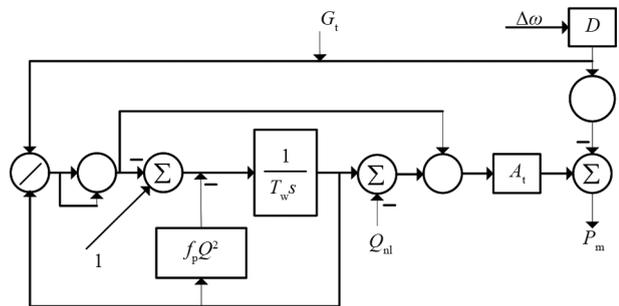


图 3 发电工况下的水泵水轮机模型

双馈变速抽水蓄能机组工作在抽水工况下水泵模型与发电工况时水轮机模型略有不同。发电工况下水泵水轮机的导叶阀门是速度和水头的函数,如式(10)所示,而在抽水工况水泵模型中,工作时通常将导叶阀门完全打开以防止由于节流效应而造成的任何能量损失,水流速度 Q 是水头 H 和机组

转速 n 的函数,与导叶开度 G_1 无关。水泵模型中水头和水流速度之间的关系由式 (11) 给出。

$$H = A - BQ^{1.75} \quad (11)$$

式中, A 、 B 为拟合系数。通常有关水头、水流速度、机组工作效率之间的数学方程制造商并不会专门给出,可以依据关联原则推导出它们之间的数学关系,如式 (12) — 式 (13) 所示。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0} \quad (12)$$

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (13)$$

式中, Q_0 、 H_0 和 n_0 分别为水泵水轮机在额定功率下工作时所对应额定水流速度、额定水头和同步转速。

将式 (12)、(13) 代入式 (11), 得到

$$H = A \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - B \left(\frac{n}{n_0}\right)^{0.25} Q^{1.75} \quad (14)$$

由式 (14) 可知,水泵模式下工作水头是机组转速和水流速度的函数。抽水工况下的可逆水泵水轮机模型如图 4 所示。

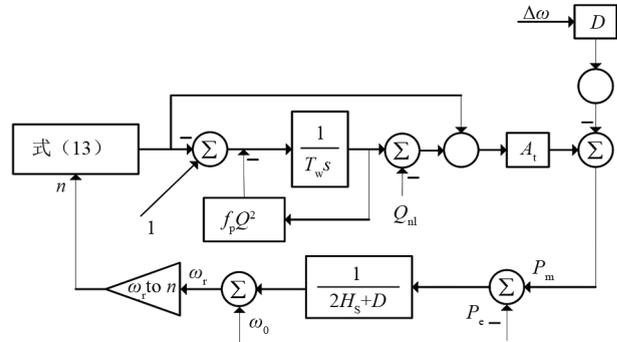


图 4 抽水工况下的水泵水轮机模型

1.4 机组转速寻优控制

为了使水泵水轮机在不同水头和出力下,机组能以较高效率运行,在发电工况下选择转速作为机组控制目标,通过最优转速指令调节导叶阀门开度,水泵水轮机输出的机械力矩由导叶阀门开度进行控制,最终对机组输出的有功功率进行控制^[17]。

水泵水轮机的单位出力为

$$P_1 = \frac{P_{ref}}{D_1^2 H^{3/2} P_t} \quad (15)$$

式中: P_{ref} 为给定有功功率; D_1 为水泵水轮机的标称直径; P_t 为双馈变速抽水蓄能机组的发电功率。

水泵水轮机的最高出力曲线为

$$P_{1max} = f_1(q_1) = 9.81q_1\eta_{max} \quad (16)$$

式中: q_1 为单位流量; η_{max} 为水泵水轮机效率。

水泵水轮机最高效率曲线为

$$\eta_{max} = f_2(q_1) \quad (17)$$

依据制造商给出水泵水轮机运行特性表查找单位流量 q_1 对应的水泵水轮机效率 η_{max} , 效率峰顶曲线为

$$n_1 = f_3(q_1) | \eta_2 = \eta_{max} \quad (18)$$

机组最优转速为

$$n^* = \frac{n_1 \sqrt{H}}{D_1} \quad (19)$$

通过上述拟合得到机组最优转速 n^* 并将其作为机组转速参考指令。在机组输出功率和工作水头发生变化时,水泵水轮机依据最优转速指令维持机组在最高效率下运行。

2 双馈变速抽水蓄能机组的快速调频

2.1 发电工况下的快速调频

在发电工况下,由制造商给出的可逆水泵水轮机运行特性曲线可以拟合得到操作水头下水轮机输出所需功率对应的最优转速 n^* 由调速器的比例积分微分 (proportion integral differential, PID) 控制器跟踪,通过增加或减少水轮机的导叶阀门开度 G_1 , 控制水泵水轮机输出机械功率以满足电网需求。考虑目前最常见的下垂控制策略作为变速抽水蓄能机组的一次调频控制,将频率的偏差整定为有功功率的附加指令,结合拟合的最优转速得出相应转速参考指令,机组跟随参考转速指令调节机械导叶开度,通过控制水轮机输出功率 P_m 进而调整变速抽水蓄能机组有功功率 P_e 输出^[18]。变速抽水蓄能机组发电工况下的频率控制框图如图 5 所示。

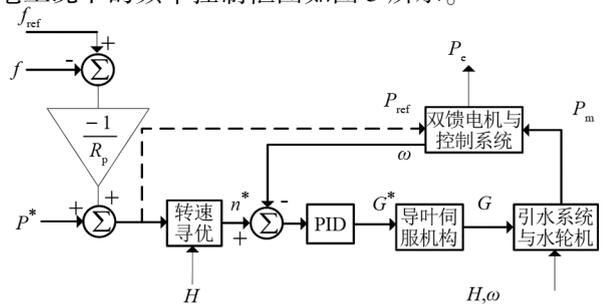


图 5 发电工况下的频率控制

2.2 抽水工况下的快速调频

由于在抽水工况下机组的主要功能是提供频率调节和功率参考跟踪,而不是提高效率,将频率的偏差整定为有功功率的附加指令,通过机侧转换器控制跟随参考功率。水泵模式下导叶阀门完全打开,以防止由于节流而造成的任何能量损失。抽水工况下的调频控制框图如图 6 所示。

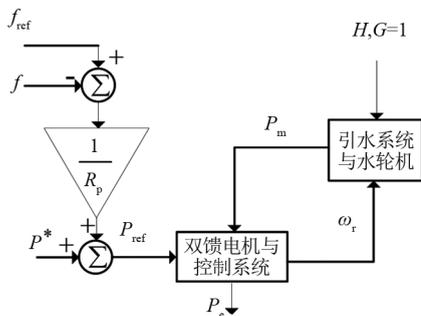


图 6 抽水工况下的频率控制

3 案例分析

3.1 变速抽水蓄能机组控制与运行特性分析

为分析变速抽水蓄能机组的运行特性,现将所构建的双馈变速抽水蓄能机组模型接入单机无穷大等值系统,并通过仿真实验分析变速抽水蓄能机组跟踪给定的控制参考值的能力。

图 7、图 8 分别为发电和抽水工况下给定系统功率参考值时的跟踪结果。如图 7(a) 所示,发电工况下,机侧变流器优先控制有功功率。当机组给定的有功功率参考值发生变化时,机侧变流器迅速响应控制双馈电机发出功率快速跟踪参考值,系统输出功率值与参考值重叠,展现出了良好的瞬时跟踪能力。图 7(b) 为放大后的功率跟随参考值的动态响应过程,当参考值变化时,机侧变流器响应参考值变化时可在 0.15 s 内跟踪到参考值。图 7(c) 显示了变速抽水蓄能机组输出参考功率时水轮机组输出的机械功率,水轮机组输出功率始终与变速抽水蓄能机组输出功率之间存在差值,这是由于变速抽水蓄能机组中也存在功率损耗。图 7(d) 显示了机组转速由 PID 调速器控制时的最优速度的跟踪性能,可以看到 PID 调节器在每个设定点上均能很好地跟踪最优转速。这里需要注意的重要一点是,机械功率的偏差并不影响电力输出,因为转轴的惯性补偿了缓慢的机械响应。此外,机械功率相对于参考值

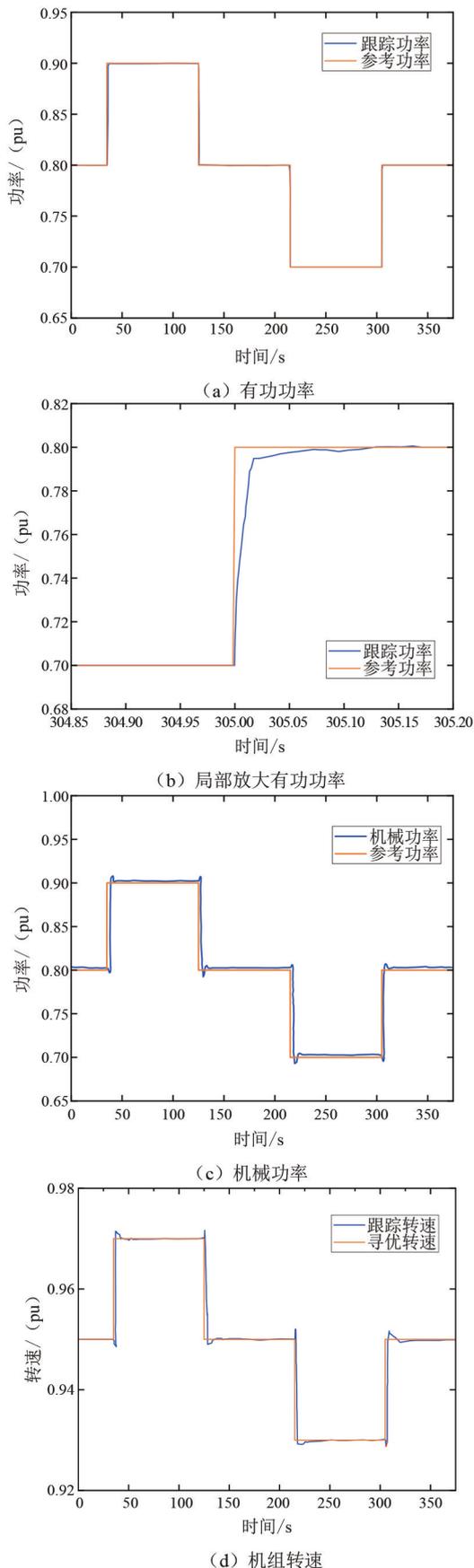


图 7 发电工况下机组跟踪参考值动态

的偏移量也显示了 PID 调速器满足电气和机械系统

损失的能力,这是定速抽水蓄能所不具备的。

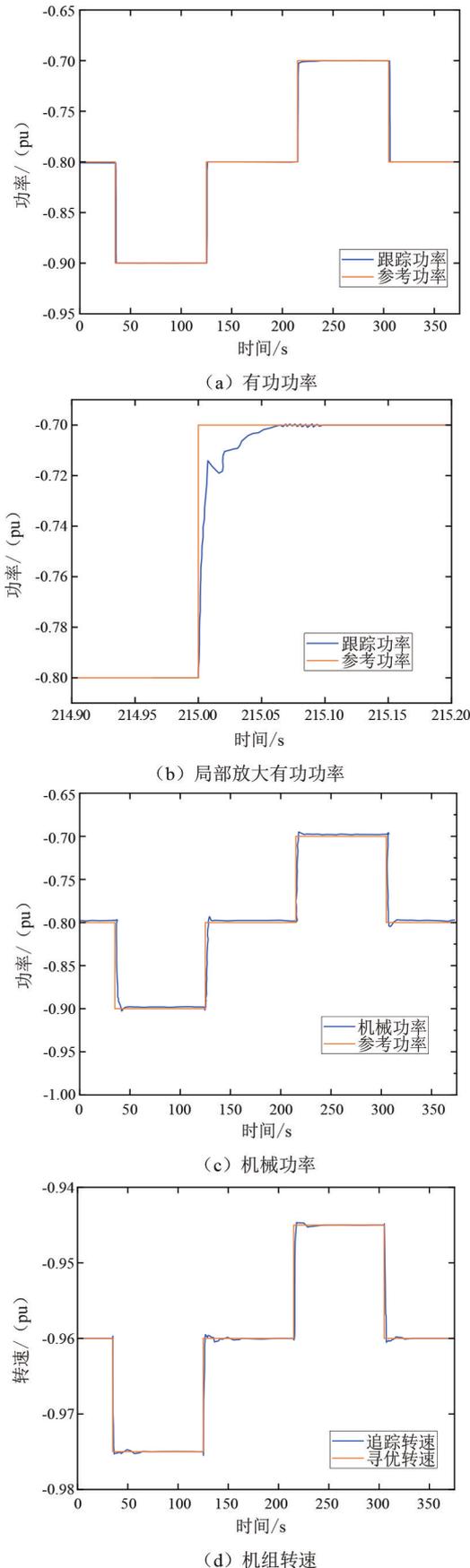


图 8 抽水工况下机组跟踪参考值动态

同样,在抽水工况下可获得同发电工况相类似的过程。图 8(a)为抽水工况时双馈感应电机输出功率跟随参考功率的过程;图 8(b)为放大后的功率跟随参考值的动态响应过程;图 8(c)中,双馈感应电机输入到水泵水轮机的机械功率略低于参考功率,是因为从电网吸收的总功率中减去了电力和机械损耗的部分功率。图 8(d)为机组转速跟随参考值的响应过程,在此模式下,由于导叶开度不受控制,机组转速并不是运行在最优转速下。

3.2 定速与变速抽水蓄能机组动态性能的比较

选用 IEEE 三机九线系统作为实验平台,将定速和变速抽水蓄能机组分别接入实验平台替换掉 3 号同步机。在发电和抽水工况下,通过在母线 5 上施加 10%的负荷变化,研究定速与变速抽水蓄能机组的动态频率响应特性。实验平台如图 9 所示。

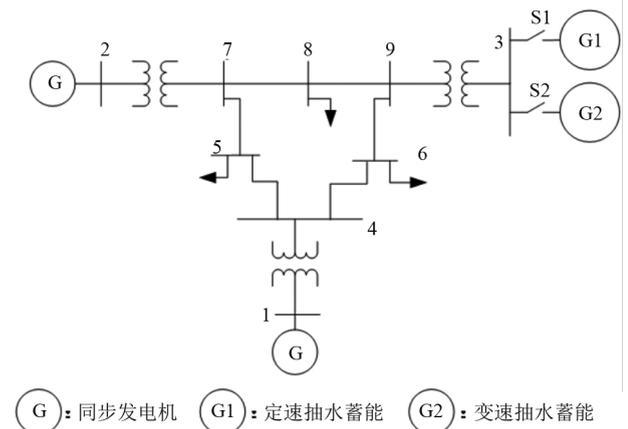
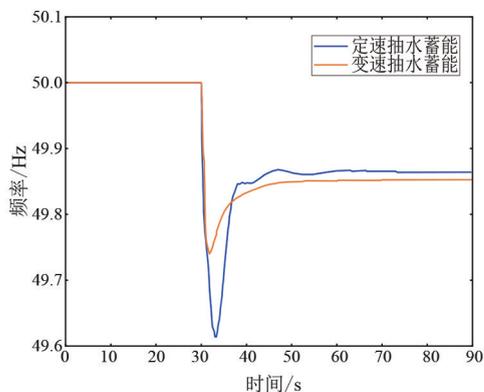


图 9 含抽水蓄能机组的三机九线算例

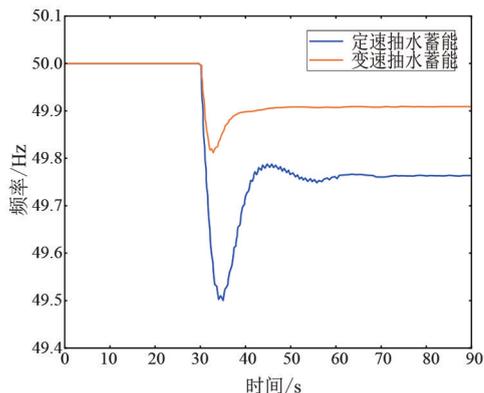
图 9 中定速与变速抽水蓄能机组均采用相同的有功下垂系数。图 10 的仿真结果表明了双馈变速抽水蓄能机组瞬时响应的优势,使用变速抽水蓄能机组,在发电和抽水工况下比定速抽水蓄能机组有更小的极限频率变化率和频率极值点,且均能使系统更快达到稳态。基于控制策略的特性,在发电工况下,如图 10(a)所示,频率出现波动时,频率偏差整定为附加功率指令与系统功率指令结合,拟合出机组最优转速。通过水轮机调节输出,而受限於水轮机机械延迟特性,定速与变速抽水蓄能机组对频率变化率抑制效果差别不大;变速抽水蓄能机组通过转子变频器快速响应调节转子电流角速度,为系统提供快速功率支撑,比定速抽水蓄能机组能够提高频率下降极值点,并能快速趋近于稳态。由于所

选取的下垂控制策略是一种比例控制策略,系统中所有下垂控制发电机的响应与频率偏差成正比,而变速抽水蓄能机组的频率偏差程度较小,因此其他所有调频单元的频率响应也小于定速抽水蓄能机组,导致变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比在稳态时稳态偏差较大。

在抽水工况下,定速抽水蓄能机组的频率最低点非常低,因为定速抽水蓄能机组不参与抽水工况下的频率控制。与定速抽水蓄能机组不同,变速抽水蓄能机组在抽水工况下通过其固定的下垂系数来参与系统的一次频率调节。如图 10(b)所示,频率出现波动时,频率偏差整定为附加功率指令与系统功率指令结合,通过机侧变流器快速响应调节转子电流角速度,为系统提供快速功率支撑,能够显著抑制系统频率变化率以及减小频率下降程度,并且能够快速使系统达到稳态;在稳态时,变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比稳态偏差明显减小。此外,在图 10(a)、(b)中,都可以看到定速抽水蓄能机组能够衰减小的低频振荡。



(a) 发电工况



(b) 抽水工况

图 10 定速与变速抽水蓄能机组动态性能的比较

4 结 论

变速抽水蓄能机组控制可将频率偏差整定为有功功率的附加指令,通过双馈电机和可逆水泵水轮机协调运行完成电网的快速频率调节。在发电工况下,当电网频率出现波动时,机组将电网频率偏差整定为功率附加指令与功率指令结合,拟合出最优转速使得机组维持在最高效率运行,为系统提供快速的频率支撑;在抽水工况下,机组将电网频率偏差整定为功率附加指令与功率指令结合,通过机侧变流器快速响应控制双馈电机输出功率以满足电网需求,水泵水轮机转速根据变速抽水蓄能机组平衡运行进行调节。依据仿真结果得出:

1) 双馈变速抽水蓄能机组在不同工况下,均能快速响应频率控制指令;

2) 双馈变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比,在下垂系数相同的情况下能实现更好的调频效果,有效抑制系统频率变化率以及减小频率极值,使系统能更快达到新稳态,增强系统频率稳定性。

参考文献

- [1] 劳文洁, 史林军, 吴峰, 等. 计及转速及功率限制的双馈抽蓄自适应调频控制[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(1): 28-37.
- [2] 黄炜栋, 李杨, 李璟延, 等. 考虑可再生能源不确定性的风-光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 91-98.
- [3] 卢伟甫, 王勇, 樊玉林, 等. 抽水蓄能变速机组应用技术概述[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(3): 62-66.
- [4] 戴理韬, 高剑, 黄守道, 等. 变速恒频水力发电技术及其发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 169-177.
- [5] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
- [6] 刘开培, 朱蜀, 冯欣, 等. 双馈式变速抽水蓄能电厂的机电暂态建模及模型预测控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2407-2418.
- [7] 井浩然, 李佳, 赵红生, 等. 双馈变速抽水蓄能全工况转换过程建模与仿真[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 41-50.

- [8] 邵宜祥, 纪历, 袁越, 等. 可变速抽水蓄能机组在抽水工况下的自启动方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24):125-130.
- [9] 王欣竹, 韩民晓, TESHAGER B G. 双馈式可变速抽水蓄能机组无功特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2918-2925.
- [10] JOSEPH A, CHELLIAH T R. Analysis of doubly fed asynchronous machine operating at condenser mode subjected to power converter faults [C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), December 14-17, 2016, Trivandrum, India. IEEE, 2017:1-6.
- [11] 陈亚红, 邓长虹, 武荷月, 等. 发电工况可变速抽蓄机组模式切换过程多阶段柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15):5258-5274.
- [12] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3):942-957.
- [13] 李俊辉. 可变速抽水蓄能机组发电工况一次调频特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [14] ZOU J, ZHU J Z, XIE P P, et al. Regulating short-time wind power fluctuation by variable speed pumped storage unit [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Augsut 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2020:1-5.
- [15] 罗远翔, 李鑫明, 潘超, 等. 含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):76-85.
- [16] 丁理杰, 史华勃, 陈刚, 等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备, 2021, 44(3):166-171.
- [17] 龚国仙, 吕静亮, 姜新建, 等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6):1878-1884.
- [18] 朱珠, 潘文霞, 刘铜锤, 等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2):463-474.

作者简介:

杨桂兴(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

郭小龙(1983),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定控制;

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

亢朋朋(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制。

(收稿日期:2024-10-23)

(上接第31页)

- [15] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [16] YU J L, FANG J Y, TANG Y. Inertia emulation by flywheel energy storage system for improved frequency regulation [C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 10-13, 2018, Singapore. IEEE, 2018:1-8.
- [17] 高翔. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [18] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11):3498-3507.
- [19] 吴天宇. 基于模糊控制理论的两区域互联电网 AGC 的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [20] 田云峰, 郭嘉阳, 刘永奇, 等. 用于电网稳定性计算的再热凝汽式汽轮机数学模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5):39-44.
- [21] LUO Y D, TIAN L J, WANG X, et al. A new coordinated control strategy of flywheel energy storage system participating in primary frequency regulation of power grid [C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I & CPS Asia), July 13-15, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020:536-544.
- [22] 丰云鹤. 储能电池参与电力系统一次调频控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [23] 马智慧. 考虑调频死区的储能参与电网一次调频控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [24] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [25] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [26] 隋云任. 飞轮储能辅助 600 MW 燃煤机组调频技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

作者简介:

赵康(2000),男,硕士研究生,研究方向为基于飞轮储能提升电网频率稳定性。

(收稿日期:2024-08-16)

基于空间近似的主动配电网灵活性区间优化调度

张胜飞, 刘毅

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:高比例新能源并网使得电力系统的不确定性水平显著增高, 现有仿射潮流计算中非线性运算新增噪声元将导致计算结果产生过于悲观的界限, 从而增大结果的保守性。针对上述问题, 提出一种基于空间近似的主动配电网灵活性区间优化调度方法。首先, 引入空间近似逼近法对仿射非线性运算进行修正, 得到保守性更低的改进仿射运算法, 并将其引入配电网潮流计算中; 其次, 构建主动配电网运行灵活性需求模型以及各灵活性资源供给模型; 接着, 以系统运行经济性、净负荷波动率和运行灵活性裕度为目标, 构建主动配电网区间多目标优化调度模型; 最后, 在IEEE 33节点系统中分别对比所提出的基于空间近似的仿射潮流计算与传统潮流计算和蒙特卡洛模拟法的结果。结果显示, 所提方法具有更低的保守性, 区间结果可以为配电系统调度人员提供良好的参考价值。

关键词:高比例新能源; 主动配电网; 仿射潮流计算; 灵活性资源

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0046-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250207

Flexible Interval Optimal Dispatching of Active Distribution Network Based on Spatial Approximation

ZHANG Shengfei, LIU Yi

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:The high proportion of new energy connected to power grid has significantly increased the level of uncertainty in power system. The addition of noise elements in nonlinear operations in the existing affine power flow calculations will lead to overly pessimistic limits on the calculation results, thereby increasing the conservatism of the results. In response to the above problems, a flexible interval optimal dispatching method for active distribution network based on spatial approximation is proposed. Firstly, the spatial approximation method is introduced to modify the affine nonlinear operation, and an improved affine operation algorithm with less conservatism is obtained, which is introduced into power flow calculation of distribution network. Secondly, the models of operational flexibility requirements and each flexibility resource supply are constructed for active distribution network. And then, taking the system operating economy, net load fluctuation rate and operating flexibility margin as the goals, an interval multi-objective optimal dispatching model for active distribution network is established. Finally, in IEEE-33 node system the results of the proposed affine power flow calculation based on spatial approximation are compared with the traditional power flow calculation and Monte Carlo simulation method. The results show that the proposed method has less conservatism, and the interval results can provide good reference value for distribution system dispatchers.

Key words:high proportion of new energy; active distribution network; affine power flow calculation; flexibility resources

0 引言

随着配电网的发展和转型, 其呈现出高比例可

再生能源(renewable energy source, RES)的主动配电网(active distribution network, ADN)形式^[1]。这种供电结构不仅仅是单一的电网供电, 而是更多地提供大规模可再生能源供电。高比例的可再生能源

使得电力系统的不确定性水平显著增高,并被广泛关注^[2]。相对于确定性潮流计算,不确定性潮流计算能够充分考虑到各种不确定性因素的影响,可更为有效地给电力系统提供支持^[3]。

区间潮流作为不确定性潮流计算的重要方法之一,其运算过程简洁高效,能够在多重不确定性因素共同作用下获得潮流区间结果^[4-5]。不过,与其他技术相比,区间潮流并不能充分明确各种不确定因素的影响,并且往往倾向于过度保守^[6]。为了应对这一难题,作为区间潮流的扩展方法——仿射潮流,将功率的不确定性表示为中心值和噪声元的线性组合形式。仿射潮流与区间潮流有所不同,它采用噪声元来单独考虑各种不确定性因素的影响,因此更能明确不确定性变量之间的相关性。目前,仿射潮流用于处理特定的源荷不确定性情景时,其处理步骤包括确定注入含不确定性功率的中心值和噪声元系数,并运用高斯迭代法^[7]、前推回代法^[8]、牛顿迭代法^[9]以及优化求解^[10]等技术,以获得相应情景下系统潮流区间的分布情况。文献[11]将前推回代法和复仿射运算结合构建了复仿射潮流计算,并与蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)模拟法的抽样计算结果对比,论证了引入仿射能保证计算结果的完备性和保守性。然而,仿射算术中非线性运算会导致运算结果的保守性增加,从而增大计算的误差^[12]。文献[13]采用切比雪夫近似法对仿射乘法运算进行了改进,简化了新增噪声元系数的求解,然而在计算规模较大时该方法的复杂度将急剧增大。文献[14]通过仿射除法的线性化,使得区间结果包含的误差更少、区间解更加精确,但忽略了计算效率。文献[15]引入区间泰勒公式对仿射除法运算进行改进,缩小了运算的保守性,然而并未对仿射乘法运算进行改进。因此,确保运算结果完备性的同时减小保守性,成为了当前仿射运算研究的重点。

随着新能源和分布式能源的大规模接入以及用户需求的变化,电力系统对灵活性的需求越来越高^[16-17]。国内外许多学者陆续提出了不同的灵活性评价指标,在定性和定量分析电力系统灵活性方面进行了广泛的研究^[18-21]。文献[22]基于经济和技术因素提出了技术不确定灵活性指标和经济不确定灵活性指标。文献[23]重点研究了电力系统灵活性评估方法,并将该方法应用于电力市场。文献[24]构建了大规模风电并网条件下电力系统灵活性的定量评价指标体系,采用 MC 模拟方法建立

了经济调度模型,定量计算了灵活性指标。上述研究利用随机场景优化得到概率型的灵活性评估结果,适用于长时间尺度运行或者规划层面;而对于日前和日内的短期运行,难以确定系统在应对一定区域的风电波动时的灵活性,并难以保证鲁棒性。区间算术能更简洁直观地表征电力系统灵活性特性,并保证较好的鲁棒性^[25-26]。

综上所述,如何在含高渗透率可再生能源的主动配电网中实现保守性更低的不确定性仿射潮流计算,同时既保证功率平衡又考虑主动配电网运行灵活性值得深入研究。因此,下面以系统运行经济性、净负荷波动率和运行灵活性裕度为目标,提出一种基于空间近似法的主动配电网灵活性区间优化调度方法,并验证了该方法的有效性和正确性。

1 基于最小空间近似的改进仿射算术

1.1 仿射算术

在仿射算术中,不确定量用中心值和一组噪声元的线性组合来表示,既能辨识不确定性因素的来源,还可以表征不确定变量之间的依赖关系,有效改善区间过度扩张的问题,其表达式为

$$\hat{x} = x_0 + x_1 \varepsilon_1 + \cdots + x_n \varepsilon_n = x_0 + \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:顶标“ $\hat{\cdot}$ ”表示仿射量; x_0 为仿射数 \hat{x} 中点值; $\varepsilon_1, \varepsilon_i, \varepsilon_n$ 为噪声元,其值均为 $[-1, 1]$ 且相互独立; x_1, x_i, x_n 为对应各个噪声元的实数系数。

给定两个仿射数 $\hat{x} = x_0 + x_1 \varepsilon_1 + \cdots + x_n \varepsilon_n$ 和 $\hat{y} = y_0 + y_1 \varepsilon_1 + \cdots + y_n \varepsilon_n$,仿射算术的基本运算规则为:

$$\hat{x} \pm \hat{y} = (x_0 \pm y_0) + (x_1 \pm y_1) \varepsilon_1 + \cdots + (x_n \pm y_n) \varepsilon_n \quad (2)$$

$$k \hat{x} = k x_0 + k \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\hat{x} \pm k = x_0 \pm k + \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\hat{x} \times \hat{y} = x_0 y_0 + \sum_{i=1}^n (x_0 y_i + y_0 x_i) \varepsilon_i + \left(\sum_{i=1}^n |x_i| \right) \times \left(\sum_{i=1}^n |y_i| \right) \varepsilon_{n+1} \quad (5)$$

式中: k 为常量; ε_{n+1} 为新增噪声元。

对于除法运算 \hat{x}/\hat{y} 则将其转化为 $\hat{x} \times (1/\hat{y})$ 进

行求解,仿射倒数运算为

$$1/\hat{y} = \alpha\hat{x} + \beta + \delta\varepsilon_{n+1}$$

$$\begin{cases} \alpha = -1/ab \\ \beta = 1/2a + 1/2b + 1/\sqrt{ab} \\ \delta = 1/2a + 1/2b - 1/\sqrt{ab} \end{cases} \quad (6)$$

式中, a 、 b 为仿射变量 \hat{y} 对应的区间上、下限值。

1.2 基于最小空间近似的改进仿射算术

由仿射算术的运算规则可知,仿射非线性运算将会产生额外的二次项噪声元 ε_{n+1} ,而新增噪声元往往采用易于计算的系数,这会导致计算结果产生过于悲观的界限,从而增大结果的保守性。因此,引入最小空间近似逼近法对仿射非线性运算进行改进,使得仿射非线性运算可以得到更为保守的界限。

将仿射非线性运算近似为 $\hat{z} = f(\hat{x}, \hat{y})$,其表达式为

$$\hat{z} = A\hat{x} + B\hat{y} + C + D\varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为新增噪声元; A 、 B 、 C 、 D 为空间近似逼近法所确定的常数。

从几何角度来看,空间近似逼近法可以看作是在 (x, y, z) 空间中找到两个平行平面,使得它们之间的体积由 $U^{xy} = \{[x], [y]\}$ 给出的域上的表面尽可能紧密地包围,如图 1 所示。这可以表述为

$$\min C_1 \quad \text{and} \quad \max C_2$$

$$\begin{cases} z \geq Ax + By + C_2 \\ z \leq Ax + By + C_1 \\ C_1 < C_2 \end{cases} \quad x, y \in U^{xy} \quad (8)$$

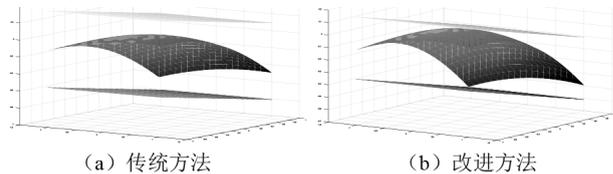


图 1 空间近似逼近法精度

将式(8)代入式(7)中,则仿射非线性运算公式为

$$\hat{z} = A\hat{x} + B\hat{y} + 0.5(C_1 + C_2) + 0.5(C_1 - C_2)\varepsilon \quad (9)$$

通过计算两个平面的值,使它们尽可能地接近,同时仍然包含所有 \hat{z} 的相关值。

为了简化问题,把 A 和 B 固定为中心点的偏导值,即:

$$A = \frac{\partial}{\partial x}z(x_0, y_0) \quad (10)$$

$$B = \frac{\partial}{\partial y}z(x_0, y_0) \quad (11)$$

进一步将两个平面参数计算简化为

$$\begin{cases} C_1 = \max d(x, y) \\ C_2 = \min d(x, y) \\ d(x, y) = z - (Ax + By) \end{cases} \quad x, y \in U^{xy} \quad (12)$$

式中, $d(\cdot)$ 为距离函数,表征两个平面与仿射非线性运算值 \hat{z} 的距离。通过计算距离函数的最值,即可确定两个平面的截距。

为了给出空间近似逼近法在仿射非线性运算中的具体应用,以仿射乘法为例(除法处理方式类似),其计算过程为:

$$A = \frac{\partial}{\partial x}(x, y)(x_0, y_0) = y_0 \quad (13)$$

$$B = \frac{\partial}{\partial y}(x, y)(x_0, y_0) = x_0 \quad (14)$$

距离函数为

$$d(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{x} \times \hat{y} - (y_0\hat{x} + x_0\hat{y}) = (\sum_i x_i \varepsilon_i) (\sum_i y_i \varepsilon_i) - x_0 y_0 \quad (15)$$

参数 C_1 和 C_2 由联合范围内距离函数的极值得到。

假设 $u = x - x_0 = \sum_i x_i \varepsilon_i$ 和 $v = y - y_0 = \sum_i y_i \varepsilon_i$, 由于 $x_0 y_0$ 为固定常数,因此,当 uv 取得极值的同时,距离函数也取得极值。并且, U^w 和 U^{xy} 具有相同的可行域, U^w 的中心位于 $(0, 0)$ 。由于 u 和 v 均为连续单调的,因此容易证明 uv 的极值只能出现在任意封闭区域的边界上。鉴于此,只需要扫描多边形的边缘,并且也只需要扫描任何边缘上的 3 个点,即两个端点和 $v = c/(2b)$ 处,其中边缘线的方程为 $au + bv = c$ 。

假设求解得到 uv 的极值分别为 $p = \min(uv)$ 和 $q = \max(uv)$, 则改进仿射算术可以近似为

$$\hat{z} = y_0\hat{x} + x_0\hat{y} - x_0 y_0 + (p + q)/2 + (q - p)\varepsilon/2 \quad (16)$$

2 主动配电网运行灵活性分析与指标构建

随着高渗透率分布式电源和大规模电动汽车(electric vehicle, EV)的接入,配电网正在经历转型和快速发展,这也导致了多样性和不确定性成为配电网的主要特征。

2.1 大规模 EV 充电负荷区间模型

根据 EV 出行和充电规律构建 EV 充电负荷的

不确定性区间模型。

1) EV 起始充电时刻 t_{arr}

$$f(t_{arr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{(t_{arr} - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (17)$$

式中: $f(t_{arr})$ 为 EV 充电时刻概率分布函数; μ_m 为充电开始时间的均值, 这里取 19^[27]; σ_m 为充电开始时间的标准差, 这里取 2^[27]。

2) EV 日行驶里程 R_d

EV 日行驶里程符合对数正态概率密度分布。

$$f(R_d) = \frac{1}{R_d \sqrt{2\pi\sigma_d^2}} \exp\left(-\frac{(\ln R_d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (18)$$

式中: $f(R_d)$ 为 EV 日行驶里程概率分布函数; μ_d 为日行驶里程的均值, 这里取 3.2^[27]; σ_d 为日行驶里程的标准差, 这里取 0.88^[27]。

3) EV 单次充电时间 T_c

假设 EV 充电为慢充方式, 根据日行驶里程可知每辆 EV 单次充电时间的概率密度为

$$f(T_c) = \int_3^4 \frac{1}{T_c \sqrt{2\pi\sigma_d}} \exp\left(\frac{\ln \frac{T_c P_c}{0.242} - \mu_d}{-2\sigma_d^2}\right) dP_c \quad (19)$$

式中: P_c 为 EV 慢充充电功率, 其值为 3~4 kW。

4) EV 期望荷电状态 S_e

假设 EV 接入充电桩的时刻为 T_{on} , 初始 EV 电池荷电状态 S_s 服从 μ 、 σ 分别为 0.5 和 0.1 的正态分布, 则可以计算其离网时的荷电状态 S_e 为

$$S_e = S_s + \frac{\eta \times P_c \times T_{on}}{E} \quad (20)$$

式中: E 为 EV 电池的额定容量; η 为 EV 充电效率。

综上, EV 在各时段处于充电状态的概率计算公式为

$$P(\theta_{t_0} = 1) = 1 - F_{STc}(t_{arr} > t_0, t_{arr} + T_c \leq t_0 + 24) - F_{STc}(t_{arr} + T_c \leq t_0) \quad (21)$$

式中: θ_{t_0} 为 EV 在 t_0 时刻的充电状态, $\theta_{t_0} = 1$ 表示处于充电状态; F_{STc} 为非充电状态的概率分布函数, 由于 t_{arr} 和 T_c 相互独立分布, 则 $F_{STc} = F_s F_{Tc}$, F_s 为充电起始时刻的概率分布函数, F_{Tc} 为充电时长的概率分布函数。

2.2 系统运行灵活性需求模型

系统运行灵活性需求分为上行灵活性需求和下

行灵活性需求, 考虑了单位时间净负荷波动和预测误差所引起的安全裕度。系统运行灵活性需求的情况如图 2 所示。

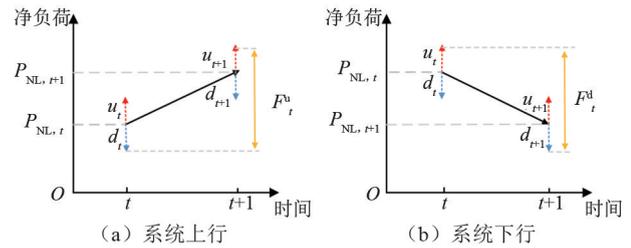


图2 系统运行灵活性需求分析

图中: $P_{NL,t}$ 为 t 时刻的净负荷; $P_{NL,t+1}$ 为 $t+1$ 时刻的净负荷; u_{t+1} 、 d_{t+1} 分别为 $t+1$ 时刻系统所需的上行、下行灵活性。由图 2(a) 可知, 当净负荷增大的时候, 若 $d_{t+1} < P_{NL,t}$, 则可以用 $F_t^u = u_{t+1} - P_{NL,t}$ 表示系统上行灵活性需求, 用 $F_t^d = P_{NL,t} - d_{t+1}$ 表示系统下行灵活性需求; 如果 $d_{t+1} > P_{NL,t}$, 则系统没有下行灵活性需求 ($F_t^d = 0$)。由图 2(b) 可知, 当净负荷减小的时候, 如果 $u_{t+1} > P_{NL,t}$, 则可以用 $F_t^u = u_{t+1} - P_{NL,t}$ 表示系统上行灵活性需求, 用 $F_t^d = P_{NL,t} - u_{t+1}$ 表示系统下行灵活性需求; 如果 $u_{t+1} \leq P_{NL,t}$, 则系统没有上行灵活性需求 ($F_t^u = 0$)。计算式为

$$\begin{cases} F_t^u = F_{M,t}^u + P_{NL,t+1}^u - P_{NL,t}^u \\ F_t^d = F_{M,t}^d + P_{NL,t}^d - P_{NL,t+1}^d \end{cases} \quad (22)$$

式中: F_t^u 、 F_t^d 分别为系统的上行、下行灵活性需求; $F_{M,t}^u$ 、 $F_{M,t}^d$ 分别为系统的上行、下行灵活性; $P_{NL,t}^u$ 、 $P_{NL,t+1}^u$ 分别为系统在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的净负荷。

2.3 系统供给灵活性模型

新型电力系统中源荷两端都具有较高不确定性, 通过可调度资源可以对其进行调节, 这些可调度资源为系统灵活性资源。而预留灵活性资源以调节净负荷的波动能够提高系统运行灵活性。所考虑的灵活性资源有: 储能系统 (energy storage system, ESS)、上级电网购电、微型燃气轮机 (microturbine, MT) 及 EV。

1) ESS 灵活性供应

电力系统中储能具有快速响应的能力, 但其灵活性供应能力仍然受制于自身容量和荷电状态的约束。

$$\begin{cases} F_{ESS,n_e}^u(t, \tau) = \min[P_{dis,n_e}^{\max}, E_{ESS,n_e} \eta_{ESS,n_e} (S_{n_e,t} - S_{n_e}^{\min}) / \tau] \\ F_{ESS,n_e}^d(t, \tau) = \min[P_{ch,n_e}^{\max}, E_{ESS,n_e} (S_{n_e,t}^{\max} - S_{n_e,t}) / \tau \eta_{ESS,n_e}] \end{cases} \quad (23)$$

式中: τ 为时间尺度, 这里取 1 h; $F_{ESS,n_e}^u(t, \tau)$ 、

$F_{\text{ESS},n_e}^{\text{d}}(t,\tau)$ 分别为 t 时刻第 n_e 组 ESS 上调、下调灵活性裕度; $P_{\text{dis},n_e}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{ch},n_e}^{\text{max}}$ 分别为第 n_e 组 ESS 最大放电、充电功率; E_{ESS,n_e} 为第 n_e 组 ESS 额定容量; η_{ESS,n_e} 为第 n_e 组 ESS 充放电效率; $S_{n_e,t}$ 为 t 时刻第 n_e 组 ESS 荷电状态; $S_{n_e}^{\text{max}}$ 、 $S_{n_e}^{\text{min}}$ 分别为第 n_e 组 ESS 荷电状态的最大值、最小值。

2) 上级电网灵活性供应

变压器和输电线路承载能力决定了上级电网提供的灵活性裕度,配电网通过与上级电网连接的变压器进行交互。配电变压器关口的功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq F_{\text{NET}}^{\text{u}}(t,\tau) \leq P_{\text{NET},t}^{\text{max}} \\ P_{\text{NET},t}^{\text{min}} \leq F_{\text{NET}}^{\text{d}}(t,\tau) \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: $F_{\text{NET}}^{\text{u}}(t,\tau)$ 、 $F_{\text{NET}}^{\text{d}}(t,\tau)$ 分别为 t 时刻上级电网向上、向下灵活性裕度; $P_{\text{NET},t}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{NET},t}^{\text{min}}$ 分别为配电变压器关口在 t 时刻最大正向、反向传输功率。

3) MT 灵活性供应

电力系统 MT 中的灵活性供应能力主要由两点约束而定:爬坡率与额定发电量。

$$\begin{cases} F_{\text{MT},n_M}^{\text{u}}(t,\tau) = \min(v_{\text{MT},n_M}^{\text{u}}\tau, P_{\text{MT},n_M}^{\text{max}} - P_{\text{MT},n_M,t}) \\ F_{\text{MT},n_M}^{\text{d}}(t,\tau) = \min(v_{\text{MT},n_M}^{\text{d}}\tau, P_{\text{MT},n_M,t} - P_{\text{MT},n_M}^{\text{min}}) \end{cases} \quad (25)$$

式中: $F_{\text{MT},n_M}^{\text{u}}(t,\tau)$ 、 $F_{\text{MT},n_M}^{\text{d}}(t,\tau)$ 分别为第 n_M 台 MT 在 t 时刻上行、下行裕度; $v_{\text{MT},n_M}^{\text{u}}$ 、 $v_{\text{MT},n_M}^{\text{d}}$ 分别为 MT 上行、下行灵活性爬坡率; $P_{\text{MT},n_M,t}$ 为第 n_M 台 MT 在 t 时刻出力; $P_{\text{MT},n_M}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{MT},n_M}^{\text{min}}$ 分别为第 n_M 台 MT 出力的最大值、最小值。

4) EV 灵活性供应

EV 可以为系统提供灵活性供应,但受到充放电效率、荷电状态和车主充电计划的限制。

$$\begin{cases} F_{n_V}^{\text{EV,u}}(t,\tau) = \min(P_{\text{dis},n_V}^{\text{EV,max}}, E_{n_V}^{\text{EV}}\eta_{n_V}^{\text{EV}}(S_{\text{EV},n_V,t} - S_{\text{EV},n_V}^{\text{min}})/\tau) \\ F_{n_V}^{\text{EV,d}}(t,\tau) = \min(P_{\text{ch},n_V}^{\text{EV,max}}, E_{n_V}^{\text{EV}}(S_{\text{EV},n_V}^{\text{max}} - S_{\text{EV},n_V,t})/\tau\eta_{n_V}^{\text{EV}}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $F_{n_V}^{\text{EV,u}}(t,\tau)$ 、 $F_{n_V}^{\text{EV,d}}(t,\tau)$ 分别为 t 时刻第 n_V 组 EV 上调、下调灵活性裕度; $P_{\text{dis},n_V}^{\text{EV,max}}$ 、 $P_{\text{ch},n_V}^{\text{EV,max}}$ 分别为第 n_V 组 EV 最大放电、充电功率; $E_{n_V}^{\text{EV}}$ 为第 n_V 组 EV 额定容量; $\eta_{n_V}^{\text{EV}}$ 为第 n_V 组 EV 充放电效率; $S_{\text{EV},n_V}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{EV},n_V}^{\text{min}}$ 、 $S_{\text{EV},n_V,t}$ 分别为第 n_V 组 EV 最大、最小及 t 时刻的荷电状态。

2.4 主动配电网运行灵活性指标模型

为了评价高渗透可再生能源配电网的灵活性,引入了灵活性裕度作为评价指标。

$$f_{\text{u}} = \sum_t \mu_{\text{FLEX},t} \left[\sum_{n_M} F_{\text{MT},n_M}^{\text{u}}(t,\tau) + \sum_{n_e} F_{\text{ESS},n_e}^{\text{u}}(t,\tau) + F_{\text{NET}}^{\text{u}}(t,\tau) + \sum_{n_V} F_{n_V}^{\text{EV,u}}(t,\tau) - F^{\text{u}}(t,\tau) \right] \quad (27)$$

$$f_{\text{d}} = \sum_t (1 - \mu_{\text{FLEX},t}) \cdot \left[\sum_{n_M} F_{\text{MT},n_M}^{\text{d}}(t,\tau) + \sum_{n_e} F_{\text{ESS},n_e}^{\text{d}}(t,\tau) + F_{\text{NET}}^{\text{d}}(t,\tau) + \sum_{n_V} F_{n_V}^{\text{EV,d}}(t,\tau) - F^{\text{d}}(t,\tau) \right] \quad (28)$$

式中: $\mu_{\text{FLEX},t}$ 为 t 时刻系统灵活性需求状态变量,用 1 和 0 分别表示向上、向下灵活性需求; f_{u} 、 f_{d} 分别为主动配电网向上、向下灵活性裕度; $F^{\text{u}}(t,\tau)$ 、 $F^{\text{d}}(t,\tau)$ 分别为向上、向下灵活性需求总和。

3 考虑运行灵活性的主动配电网区间多目标调度模型

计及 MT、ESS、上级电网和 EV 集群共 4 种灵活性调度资源,构建系统运行费用最小和灵活性最大的 ADN 多目标区间优化调度模型。

3.1 目标函数

1) 目标函数 1: 系统运行费用 f_1 最小

主动配电网运行费用包括系统购电、系统网损、储能费用,构建的目标函数为

$$\min f_1 = \sum_t C_t^{\text{g}} \hat{P}_t^{\text{g}} + \sum_t C_t^{\text{l}} \hat{P}_t^{\text{loss}} + \sum_t \sum_{n_e} L_{n_e}^{\text{ess}} \hat{P}_{t,n_e}^{\text{ess}} + \sum_t \sum_{n_w} L_{n_w}^{\text{w}} \hat{P}_{t,n_w}^{\text{w}} + \sum_t \sum_{n_p} L_{n_p}^{\text{pv}} \hat{P}_{t,n_p}^{\text{pv}} \quad (29)$$

式中: C_t^{g} 和 \hat{P}_t^{g} 分别为 t 时刻配电网向上级电网购电价格、购电量; \hat{P}_t^{loss} 为有功功率网损; $L_{n_e}^{\text{ess}}$ 、 $L_{n_w}^{\text{w}}$ 、 $L_{n_p}^{\text{pv}}$ 分别为第 n_e 台 ESS、第 n_w 台风电机组、第 n_p 台光伏机组的平准化度电成本; $\hat{P}_{t,n_e}^{\text{ess}}$ 、 $\hat{P}_{t,n_w}^{\text{w}}$ 、 $\hat{P}_{t,n_p}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时段第 n_e 台 ESS、第 n_w 台风电机组、第 n_p 台光伏机组功率仿射值。

2) 目标函数 2: 负荷波动 f_2 最小

最小化负荷波动以提高系统运行的稳定性,目标函数为

$$\min f_2 = \sum_t |P_t^{\text{load}} - P_{\text{av}}| \quad (30)$$

式中: P_t^{load} 为配电网在 t 时段的总负荷; P_{av} 为配电网调度周期内负荷平均值。

3) 目标函数 3: 灵活性裕度 f_3 最大

为提高运行稳定性,以系统运行灵活性裕度最大作为目标,函数为

$$\max \hat{f}_3 = \sum_t \sqrt{f_u^2 + f_d^2} \quad (31)$$

3.2 约束条件

1) 系统有功功率约束

$$\begin{aligned} \hat{P}_t^g + \hat{P}_t^{\text{MT}} + \sum_{n_w} \hat{P}_{t,n_w}^w + \sum_{n_p} \hat{P}_{t,n_p}^{\text{pv}} + \sum_{n_e} \hat{P}_{t,n_e}^{\text{ch}} - \\ \sum_i r_i^L w_{t,i}^L - \sum_{n_e} \hat{P}_{t,n_e}^{\text{dis}} = \sum_i \hat{P}_{t,i}^L + \hat{P}_t^{\text{EV}} \end{aligned} \quad (32)$$

式中: \hat{P}_t^{MT} 为 t 时段 MT 发电量仿射值; $\hat{P}_{t,n_e}^{\text{ch}}$ 、 $\hat{P}_{t,n_e}^{\text{dis}}$ 分别为第 n_e 台 ESS 在 t 时段的充电负荷和放电负荷; \hat{P}_t^{EV} 为 t 时段 EV 充电功率; r_i^L 为 i 支路阻抗值; $w_{t,i}^L$ 为 t 时段流过 i 支路的电流平方。

2) ESS 充放电功率及荷电状态约束

$$\begin{cases} \hat{S}_{\text{OC},n_e,t} = \hat{S}_{\text{OC},n_e,t-1} + (\eta_{\text{ESS},n_e} \hat{P}_{t,n_e}^{\text{ch}} - \hat{P}_{t,n_e}^{\text{dis}} / \eta_{\text{ESS},n_e}) \tau \\ S_{\text{OC},n_e}^{\min} < \hat{S}_{\text{OC},n_e,t} \leq S_{\text{OC},n_e}^{\max} \end{cases} \quad (33)$$

式中, $\hat{S}_{\text{OC},n_e,t}$ 、 S_{OC,n_e}^{\max} 、 S_{OC,n_e}^{\min} 分别为第 n_e 台 ESS 在 t 时刻荷电状态及其荷电状态的上、下限。

3) 节点电压幅值约束

$$U_{\min,g} \leq \hat{U}_{t,g} \leq U_{\max,g} \quad (34)$$

式中: $\hat{U}_{t,g}$ 为节点 g 在 t 时刻的电压值; $U_{\min,g}$ 为节点 g 的电压下限; $U_{\max,g}$ 为节点 g 的电压上限。

4) EV 集群的充电功率约束

设 \hat{P}_t^{EV} 为 t 时刻接入配电网的 EV 充电负荷,其约束条件为

$$\mu_t^{\text{EV}} - 3\sigma_t^{\text{EV}} \leq \hat{P}_t^{\text{EV}} \leq \mu_t^{\text{EV}} + 3\sigma_t^{\text{EV}} \quad (35)$$

式中, μ_t^{EV} 、 σ_t^{EV} 分别为 t 时刻 EV 充电负荷的期望值和标准差。

4 基于空间近似法的主动配电网多目标区间优化调度求解

采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法求解所提考虑源荷不确定性的 ADN 区间优化调度模型,并引入 D-S (Dempster-Shafer) 证据理论计算各粒子的适应度;此外,所提出的基于空间近似法的仿射潮流计算用于获得更紧凑的潮流区间结果。解决方案步骤为:

1) 输入预测得到的 WT 和 PV 出力间隔值,以及系统的基本参数;

2) 设置粒子群计算的参数信息,初始化设置迭代次数 $G_{\text{en}} = 1$;

3) 通过基于空间近似法的改进仿射算法 (improved affine arithmetic, IAA) 进行潮流计算,并通过 D-S 证据理论计算初始粒子的适应度值;

4) 更新每个粒子的速度和位置;

5) 基于 IAA 的区间潮流计算,利用改变的节点数据进行潮流计算;

6) 判断系统状态量是否满足约束条件。是,则进行下一步;否,则返回步骤 4;

7) 计算每个粒子的适应度值和个体的历史最佳位置;

8) 计算种群的最优适应度值和种群的历史最优位置;

9) 返回步骤 4,直到满足 $G_{\text{en}} > G_{\text{en_max}}$;

10) 计算评估指标和输出结果。

5 算例仿真

以改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真,其包含 2 个 500 kW 的小型风力发电厂,分别接在节点 16 和 30,以及 2 个 600 kW 的小型光伏发电厂,分别接在节点 12 和 27;3 个 ESS 配置均为 200 kW/800 kWh;1 个 EV 充电站接在节点 22 处。ADN、ESS 和分布式 RES 的爬坡率上限分别设置为 1000 kW/h、200 kW/h 和 200 kW/h;ESS 荷电状态上、下限分别为 0.9、0.3;可控负荷出力上、下限分别为 250 kW、100 kW。系统结构如图 3 所示。

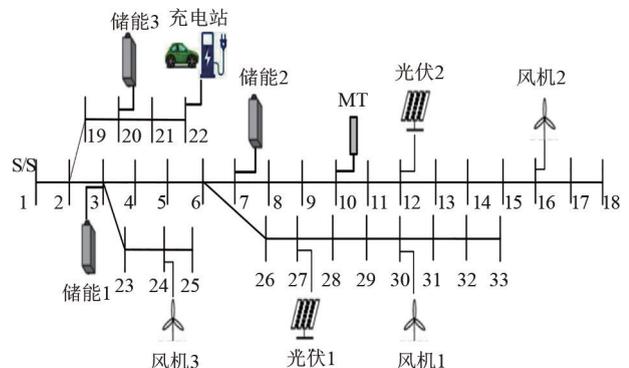


图 3 IEEE 33 节点系统拓扑

基于风电和光伏历史数据,采用灰色神经网络^[28]预测得到次日风电和光伏的出力值,将多次预测值合并即得到了 WT 和 PV 的出力区间值,其结果如图 4 所示。

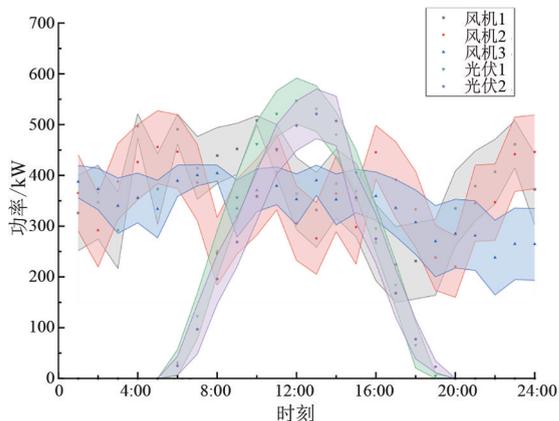


图4 WT和PV出力功率区间值

5.1 各方案对比分析

为了对比分析单独考虑经济成本和运行灵活性与综合考虑二者构建多目标的区别,分别构建了3种方案。

方案1:仅考虑运行经济性和负荷波动;

方案2:仅考虑运行灵活性裕度;

方案3:同时考虑运行经济性、负荷波动和灵活性裕度。

3种方案的优化调度区间结果如表1所示。

表1 各方案结果对比

场景	运行成本/元	向上灵活性裕度/kW	向下灵活性裕度/kW
方案1	[76 079.65, 77 734.45]	[23 006.86, 23 777.16]	[7 871.11, 13 487.35]
方案2	[82 253.73, 83 436.06]	[27 746.58, 28 770.91]	[23 570.65, 24 218.72]
方案3	[78 000.56, 78 441.39]	[24 811.17, 24 834.41]	[15 853.23, 15 935.58]

从表1可以看出:方案1只考虑经济性和负荷波动,在3个方案中运行成本相对最低,但同时其灵活性裕度也是3个方案中最低的,特别是向下灵活性裕度相较于其他两个方案低了50%以上;方案2仅考虑系统运行灵活性裕度最大,所得调度结果中系统灵活性裕度获得了较大的提升,但同时增大了系统的运行成本;方案3同时考虑了运行成本、负荷波动和运行灵活性裕度构建多目标优化调度,在牺牲了一定运行成本的基础上,使系统灵活性裕度有了较好的提升。方案3相较于方案2而言成本较低,在系统运行灵活性裕度上相较于方案1也有了较好的提升。

5.2 优化结果及分析

根据所构建的多目标区间优化调度模型,考虑

了ADN的运行成本、负荷波动和运行灵活性。采用第4章中提出的求解方法对模型进行求解,得到如图5和图6所示的各灵活性资源功率区间值。为了更加直观地展示优化后的调度结果,将区间调度结果分成区间上界和区间下界两部分,两者结合可以反映调度的整体区间情况。

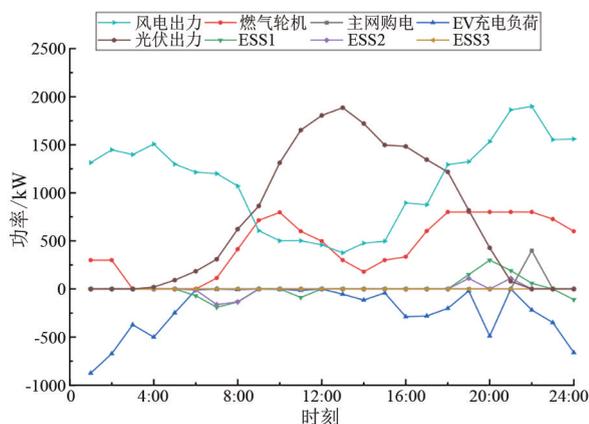


图5 各灵活性资源功率区间值下界

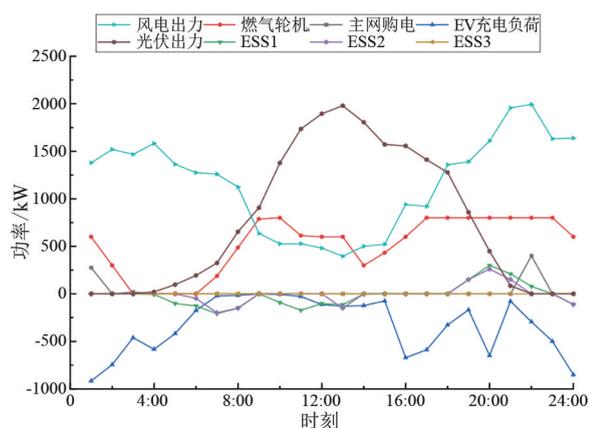


图6 各灵活性资源功率区间值上界

在图5与图6中,功率值为负表示其为用电负荷,功率值为正表示其为放电电源。由图可以看出,在5:00—13:00时段内,由于负荷较少,可再生能源出力较大,此时ESS1、ESS2处于充电状态储存电能;相反在18:00—21:00时段,ESS1、ESS2、ESS3处于放电状态,以弥补该时段负荷高峰带来的供电不足。为避免大规模EV充电造成负荷“峰上加峰”的情况出现,优化调度后的EV充电负荷集中于夜晚23:00—24:00时段及次日凌晨至5:00时段,部分EV充电负荷分布于16:00—17:00时段和20:00—21:00时段。总体来说,优化调度后的配电网负荷波动较小,大规模EV调度后实现了削峰填谷的效果,使得整个主动配电网系统充分消纳可再生能源

的同时整体负荷波动较小。

5.3 系统运行灵活性分析

图 7 为基于所提的灵活性区间优化调度方法得到的 ADN 系统运行灵活性裕度和净负荷波动范围示意图。系统净负荷波动是由负荷波动以及可再生能源出力波动造成,而系统运行灵活性裕度由 MT、ESS、上级电网购电和接入电网的 EV 提供。

由图 7 可以看出,系统净负荷波动范围始终位于运行灵活性裕度范围以内,并留有一定的上、下调节区间,说明系统具有良好的灵活性,能够应对可再生能源的不确定性扰动,同时还具有一定的裕度以应对其他的不确定性扰动。系统净负荷波动在 1:00—7:00 时段和 10:00—18:00 时段波动相对较大,是由于风电和光伏在这两个时段的出力波动相对较大造成的。相对应的系统运行灵活性裕度在 1:00—7:00 时段上调裕度较大,是由于该时段负荷较小,MT、ESS 和上级电网等灵活性资源可以提供更多的灵活性供应。

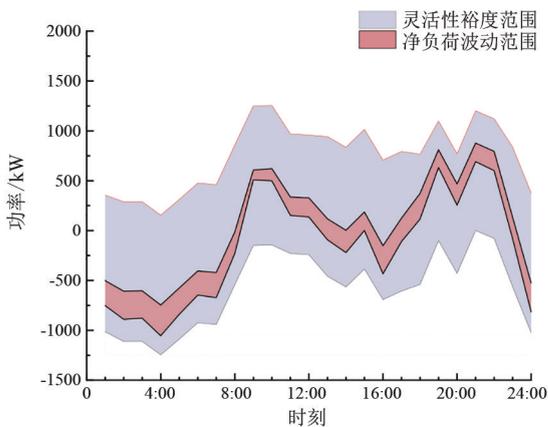


图 7 系统运行灵活性裕度

5.4 结果保守性对比分析

所提出的基于空间近似法的 IAA 使得仿射非线性运算过程中产生保守性更低的结果,而将基于空间近似法的 IAA 引入主动配电网区间潮流计算中,使得主动配电网潮流计算区间结果值保守性更小,更不容易越限,进而获得更佳的调度结果和系统状态结果。为了验证所提方法的有效性和优越性,将所提基于空间近似法的仿射潮流计算与传统仿射潮流计算^[8]和 MC 模拟法得到的配电网潮流计算结果进行对比分析。所得到的 12:00 时刻配电网节点电压幅值和相角如图 8、图 9 所示。

由上述潮流计算结果可以得出:

1)采用传统仿射算法和 IAA 进行潮流计算得到的电压幅值和相角区间都严格大于 MC 模拟法得到的区间,表明所提出的 IAA 算法可严格获得潮流计算解集的上、下边界包络线,验证了所提的基于空间近似法的配电网潮流计算的有效性。

2)所提出的 IAA 得到的区间结果相比传统仿射算法得到的区间结果更窄,更靠近 MC 模拟法的仿真结果。因此,所提方法得到的区间结果具有更低的保守性而更为准确,验证了所提方法的优越性。

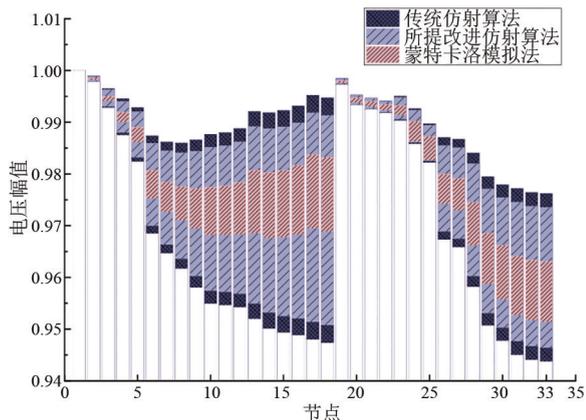


图 8 12:00 时节点电压幅值结果对比

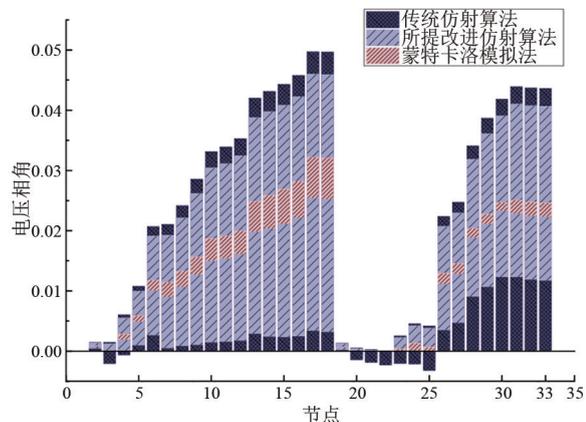


图 9 12:00 时节点电压相角结果对比

6 结论

上面提出了一种基于空间近似的主动配电网灵活性区间优化调度方法,并分析和验证了所提方法的有效性。所得结论主要如下:

1)将仿射计算方法引入空间近似逼近的思想,使得仿射非线性运算更为精确快速,降低了仿射非线性运算过程中保守性扩张的问题,使得区间潮流计算结果更接近实际值。

2) 构建了主动配电网灵活性需求模型以及主动配电网中多灵活性资源的灵活性供应模型, 将灵活性指标引入主动配电网优化调度中, 既保证了经济性又提高了主动配电网运行灵活性。

参考文献

- [1] 高志远, 张晶, 庄卫金, 等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 137-143.
- [2] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [3] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 447-458.
- [4] 李卓然. 考虑不确定预算的区域电热综合能源系统区间潮流计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [5] 宋佳磊, 盛东, 谢赢朋, 等. 基于特征融合的多环复杂电网区间的潮流计算方法[J]. 电气应用, 2022, 41(9): 64-70.
- [6] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 624-632.
- [7] 王守相, 武志峰, 王成山. 计及不确定性的电力系统直流潮流的区间算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 18-22.
- [8] 程杉, 杨堃, 汪业乔, 等. 含风力发电的电动汽车充电站区间优化调度[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(6): 101-109.
- [9] 韩帅, 孙乐平, 卢健斌, 等. 含电动汽车的气电互联虚拟电厂区间多目标优化调度策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1428-1436.
- [10] 胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 等. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 827-835.
- [11] GU W, LUO L Z, DING T, et al. An affine arithmetic-based algorithm for radial distribution system power flow with uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 58: 242-245.
- [12] 王守相, 韩亮. DG 出力不确定性对配电网影响力分析的复仿射数学方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5507-5515.
- [13] 孙瑞一, 张岩. 位宽优化中乘法运算的一种自动范围分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 43-48.
- [14] ADUSUMILIH B S, KUMAR B K. Backward/forward

sweep-based power flow analysis of distribution systems under uncertainty using new affine arithmetic division [C]//2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 17-20, 2020, Washington, DC, USA. IEEE, 2020: 1-5.

- [15] 程杉, 左先旺, 杨堃, 等. 基于改进仿射算法的主动配电网区间调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 40-48.
- [16] BÄRENFÄNGER R, DRAYER E, DANILUK D, et al. Classifying flexibility types in smart electric distribution grids: A taxonomy [C]//CIRED Workshop 2016, June 14-15, 2016, Helsinki. IET, 2016: 1-4.
- [17] BIEGEL B, ANDERSEN P, STOUSTRUP J, et al. The value of flexibility in the distribution grid [C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, October 12-15, 2014, Istanbul, Turkey. IEEE, 2015: 1-6.
- [18] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
- [19] 陈建凯. 含分布式电源配电网灵活性优化提升方法[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [20] 杨运国, 侯健生, 边晓燕, 等. 面向高比例新能源配电网的灵活性资源综合评价[J]. 供用电, 2021, 38(11): 68-76.
- [21] 马汝祥, 姚康宁, 邵林, 等. 考虑场景聚类的配电网运行灵活性评价[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(3): 86-91.
- [22] CAPASSO A, FALVO M C, LAMEDICA R, et al. A new methodology for power systems flexibility evaluation [C]//2005 IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2005: 1-6.
- [23] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.
- [24] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [25] 史喆, 梁毅, 李华, 等. 计及灵活性多目标电-热-交通综合能源系统区间优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 33-42.
- [26] 唐君毅, 丁碧薇, 杨琪. 考虑风电预测区间的电力系统灵活性评估方法[J]. 电气传动, 2023, 53(7): 49-55.

基于整数规划的配电网故障供电负荷恢复优化算法

杨向飞¹, 向博¹, 金震², 王可淇³, 钟俊³, 徐方维³

(1. 四川电力调度控制中心, 四川成都 610041; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏南京 211102; 3. 四川大学电气工程学院, 四川成都 610065)

摘要:随着分布式电源大规模接入配电网, 电力网络系统变成了多电源多端供电系统, 电网潮流更为复杂。目前, 传统的故障供电恢复算法普遍存在计算冗杂、算法易陷入局部最优解、实时性不高等缺点。基于此, 提出一种含分布式电源的配电网故障负荷恢复供电的优化策略。为了满足需求度高的节点负荷优先供电, 建立了典型时变性负荷需求模型, 并以总失电负荷最小和开关动作次数最少作为约束条件, 确定了综合目标函数, 从而得到了紧急供电恢复模型。通过适用于负荷恢复优化的0-1整数规划算法得到最优负荷恢复方案策略。在修复故障后的负荷优化供电中, 确保配电网快速恢复正常运行状态, 动态调整紧急负荷供电恢复最佳策略。基于IEEE 33节点网络作为算例仿真并与基于粒子群算法的供电恢复策略进行对比, 仿真结果验证了所提算法能够快速、更优地最大限度恢复供电。

关键词:分布式电源; 配电网; 负荷恢复; 0-1整数规划; IEEE 33; 粒子群算法

中图分类号: TM 714.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0055-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250208

Optimization Algorithm Based on Integer Planning for Supply Load Recovery after Distribution Network Failure

YANG Xiangfei¹, XIANG Bo¹, JIN Zhen², WANG Keqi³, ZHONG Jun³, XU Fangwei³

(1. Sichuan Power Dispatch Control Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. NR Electric Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China; 3. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: When distributed generation is widely integrated into distribution network, power grid system has become a multi-source and multi-end power supply system, making power flow more complex. Currently, traditional fault power supply restoration algorithms generally suffer from disadvantages such as excessive computation, being prone to local optimal solutions and low real-time performance. So, an optimized strategy for restoring power supply to faulty loads in distribution networks with distributed generation is proposed. In order to prioritize the power supply of nodes with high demand, a typical time-varying load demand model is established, and a comprehensive objective function is determined with the constraints of minimizing the total off-line load and minimizing the number of switch operations, resulting in the emergency power supply restoration model. The optimal load recovery strategy is obtained through the 0-1 integer programming algorithm applicable to load recovery optimization. In the optimal power supply after fault repair, the best emergency load power recovery strategy is dynamically adjusted to ensure the rapid return of distribution network to normal operation. Based on IEEE-33 node network as a simulation case, the proposed algorithm is compared with power recovery strategies based on particle swarm algorithms, and the simulation results validate that the proposed algorithm can quickly and optimally recover power supply to the maximum degree.

Key words: distributed generation; distribution network; load recovery; 0-1 integer programming; IEEE-33; particle swarm algorithm

0 引言

在实施“双碳”目标及构建新型电力系统的大背景下,大量分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网,导致配电网从单电源网络转化为多端有源网络,这种转变影响了配电网的结构和运行方式,传统配电网的故障恢复策略难以应对大规模 DG 接入的配电网。因此,如何有效且迅速地抢修和恢复受 DG 影响的配电网是当前研究的热点之一。

关于含 DG 的配电网故障恢复策略的研究主要有启发式搜索^[1]和图论法^[2]等经典算法。如文献[3]采用图论法的生成树与启发式搜索的蚁群算法相结合,求解配电网的故障最优恢复方案;因此,文献[4]利用启发式搜索的二进制粒子群算法实现了满足约束条件的最优切负荷策略。然而常用的蚁群算法^[5-7]、粒子群算法^[8-10]等比较容易陷于局部最优解。文献[11]提出了变异粒子群算法,并将其引入配电网故障恢复策略中,提升了二进制粒子群算法寻找全局最优解的能力,但其恢复过程相对较为复杂。

针对在大规模 DG 接入的配电网系统中,经典的智能算法存在计算量大、效率偏低、易陷入局部最优解等问题,下面提出了一种含 DG 的配电网故障后供电负荷恢复优化算法。首先,根据紧急负荷供电恢复过程中节点负荷的供电需求会随时间变化而改变的特点,推导了典型的时变性负荷需求模型;然后,根据优先保障高等级负荷恢复供电原则,确定了紧急恢复供电模型的目标函数,并将负荷恢复优化问题转化为 0-1 整数规划问题;最后,利用单纯形算法进行求解,以实现配电网负荷恢复控制,并确保供电需求得到满足。

1 供电恢复模型

当主电源断开时,配电网中的 DG 成为孤岛继续承担部分或全部供电能力。然而因为环境变化、气候条件变迁对 DG 的供电影响较大,给孤岛的安全稳定运行增加了较大的风险。当孤岛运行不当时,配电网中设备将受到严重危害,主要包括以下几个方面^[12-14]:1) 孤岛内电压和电流可能会产生严重偏移,导致电网无法正确进行重合闸操作、保护动

作;2) 当 DG 并网系统发生孤岛效应时,逆变器处于不可控状态,可能会产生浪涌电流造成人员受伤;3) 由于 DG 的输出功率存在波动性和间歇性,当外部环境变化时, DG 出力可能会极快响应导致电流骤增,易产生二次故障;4) 孤岛内的频率和输出电压由于 DG 容量与负载容量不匹配而存在较大的变化范围,这将降低电能质量给用电设备的安全造成危害;5) 孤岛的存在可能导致配电网无功功率缺额、有功功率难以支撑的情况,不利于电网稳定运行。

因此,这里暂不考虑 DG 孤岛运行的情况,在故障发生后为保证配电网的用电可靠性,引入典型负荷时变需求模型^[15],并提出适用于紧急恢复供电的数学模型。

1.1 典型负荷时变需求模型

在故障抢修完成后的恢复供电过程中,应保障重要等级负荷优先进行电能转供,并根据负荷需求时变性,动态建立负荷时变需求模型。在 t 时刻,将节点 i 所对应的负荷时变性优先恢复系数定义为

$$F_{i,t} = C_{i,t} \omega_{f,i} \quad (1)$$

式中: $C_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷时变需求系数; $\omega_{f,i}$ 为节点 i 的负荷等级系数。

在设定参数 $C_{i,t}$ 及 $\omega_{f,i}$ 时,通过比较在不同时刻得到的优先恢复系数集 $F_{Rload,t}$,可以得到实际效果最佳的 $F_{Rload,t}$ 。

$$C_{i,t} = \frac{P_{i,t} C_{i,max}}{P_{i,max}} \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷需求量; $C_{i,max}$ 为节点 i 的最大负荷时变需求系数,取值为 10; $P_{i,max}$ 为节点 i 的最大负荷需求量。

隔离故障后,计算所有负荷的时变性优先恢复系数,并进行降序排列。将拥有较高 $F_{i,t}$ 的负荷按比例纳入 $F_{Rload,t}$,并在故障恢复期间,对 $F_{Rload,t}$ 中的失电负荷采取优先恢复。为了尽可能优先恢复 $F_{i,t}$ 较大的负荷供电,该比例通常设定为 15%~25%。

1.2 供电恢复数学模型

发生故障后,原来配电网中的 DG 并网系统因故障而不能接入配电主网且不考虑孤岛效应,则在故障抢修完成后,当系统恢复容量不足时,需要对配电网中的节点负荷进行必要的控制,以确保重要负荷不间断供电。

考虑负荷恢复的配电网故障后优化算法中,对配电网紧急供电恢复而言,可中断负荷具有相当重

要的价值^[16]。为了分析问题,假设配电网中的节点负荷均为可中断负荷^[17],利用合理的负荷最优恢复策略,可以优先对重要、等级高的负荷进行电能转供。故障供电恢复数学模型以总失电负荷最小、开关动作次数最少为目标函数,即

$$\min g = \omega_1 g_1 + \omega_2 g_2 \quad (3)$$

式中: ω_1 为失电负荷在整体目标中所占权重; ω_2 为开关动作次数所占权重; g_1 和 g_2 分别为总失电负荷和开关动作次数。

1) 总失电负荷

$$\min g_1 = \sum_{i \in N} F_{i,t} P_{i,t} x_{i,t} \quad (4)$$

式中: $x_{i,t}$ 为时段 t 节点 i 的接入状态, $x_{i,t} = 1$ 表示负荷所在的节点 i 被切除, $x_{i,t} = 0$ 表示负荷处于恢复供电状态; N 为配电网中所有节点的集合。

2) 开关动作次数

$$\min g_2 = \sum_{i \in N} x_{i,t} \quad (5)$$

1.3 约束条件

配电网恢复应该以尽可能多地恢复供电为目标,为确保恢复结果能够达到电网的正常供电需求,有以下相应的约束条件^[15]:

1) 配电网功率约束

$$P_{\text{dg}}^{\text{cul}} \leq \sum_{i \in N} P_{i,t}^{\text{cul}} x_{i,t} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{dg}}^{\text{cul}}$ 为未投入的分布式电源的总功率; $P_{i,t}^{\text{cul}}$ 为被切断的 i 节点负荷功率。式(6)表示未投入的分布式电源的总功率不大于被切断的节点总负荷功率。

2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (7)$$

式中: U_{\min} 为节点 i 的电压下限; U_{\max} 为节点 i 的电压上限; $U_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压值。

3) 辐射状运行结构约束

$$l \in L \quad (8)$$

式中: L 为配电网辐射状运行拓扑结构集合; l 为当前配电网运行结构。

2 配电网负荷恢复优化算法

在配电网负荷恢复优化的过程中,首先,需要采用拓扑搜索方法找到因故障未接入配电网的节点,并确定无法接入主网的DG并计算切除的DG供电量;然后,通过适用于节点负荷恢复优化问题的0-1整数规划算法进行配电网的供电恢复求解,得到节

点负荷切除以保障主网供电的最优方案。

2.1 拓扑搜索方法

配电网主要呈现为树状和辐射状网络,而广度优先搜索对树状图有着清晰、准确、全面遍历的优点^[18]。广度优先搜索的方法是以根节点为初始点,遍历所有和根节点相连的节点,并依次标号;然后,按照标号顺序依次将已有编号点作为父节点,搜索与其相连的子节点;重复上述操作,直至遍历配电网所有节点。

在发生故障后,可以利用广度优先搜索方法快速遍历配电网结构,找出所有因故障而未接入电网的DG^[19],然后确定其故障前的供电总量,为后续节点负荷控制、保障主网供电恢复策略提供参数。

2.2 0-1 整数规划

整数线性规划需要将变量取整数值,且有一种特殊情况:当变量以0-1变量来描述约束条件时,称为0-1型整数规划,模型为

$$\min f^x, \text{ s.t. } \begin{cases} x_i = 0 \text{ or } 1 \\ Ax \leq b \end{cases} \quad (9)$$

式中: f 为整数规划函数; A 、 b 为整数规划中的可变参数; x_i 为第 i 个节点下的负载接入状况, $x_i = 1$ 表示负载被切除, $x_i = 0$ 表示负载正常接入。

那么根据式(6)和紧急供电恢复模型表达式(3)可以推导得到:

$$\begin{cases} \min g = \omega_1 g_1 + \omega_2 g_2 \\ P_{\text{dg}}^{\text{cul}} = \sum_{i \in N} P_{i,t}^{\text{cul}} x_{i,t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \min \sum_{i \in N} (\omega_1 F_{i,t} P_{i,t}^{\text{cul}} + \omega_2) x_{i,t} \\ \sum_{i \in N} (-P_{i,t}^{\text{cul}}) x_{i,t} \leq P_{\text{dg}}^{\text{cul}} \end{cases} \quad (10)$$

不难看出,该模型的约束条件呈线性,且紧急供电恢复模型的目标函数及对应的约束条件都与0-1整数线性规划模型的特征所对应,因此可以使用该模型进行求解,求解过程简单快速。

在一组线性约束条件下,求解目标函数最优解的问题即是线性规划问题。满足线性约束条件的所有解所构成的集合可以通过目标函数的可行域得出。如果可行域存在边界,则遍历可行域的所有顶点,比较顶点所等价的目标函数的大小,即为线性规划问题的最优解。单纯形法是一种通用的线性规划求解方法,由被称为线性规划之父的美国数学家George Bernard Dantzig提出^[20]。单纯形法的求解过程是一个不断迭代循环的过程:通过设定多个互斥的基向量,线性变换由基向量组成的矩阵,获得基的

所有可行解;最后判断这些可行解是否为全局最优解,若不是则重复这个过程,直到找到最优解。

2.3 算法步骤

所建模型的约束数较少,采用单纯形法求解线性规划问题的复杂度较低。单纯形法的求解步骤为:

- 1) 将紧急供电恢复模型的方程组式(10)转化为标准型,确定初始可行基和基本可行解;
- 2) 从初始基本可行解开始迭代,根据目标函数和约束条件,将基变量替换为非基变量,尽可能降低目标函数的维度。对变换后的目标函数求解,寻找优化的基本可行解;
- 3) 判断校验解是否满足最优性条件,若不满足则重复步骤2,反之,输出目标函数的最优解;
- 4) 如果在迭代的过程中目标函数值无界,则停止迭代。

3 有源配电网紧急供电恢复流程

在发生故障后对配电网进行紧急供电恢复时,首先需要确定整个配电网中因故障导致失去的 DG 供电量,在完成故障修复后,应对配电网各节点负荷进行必要的切除操作,从而使主网能够最大程度地保障用户供电需求。紧急供电恢复具体流程如图 1 所示。

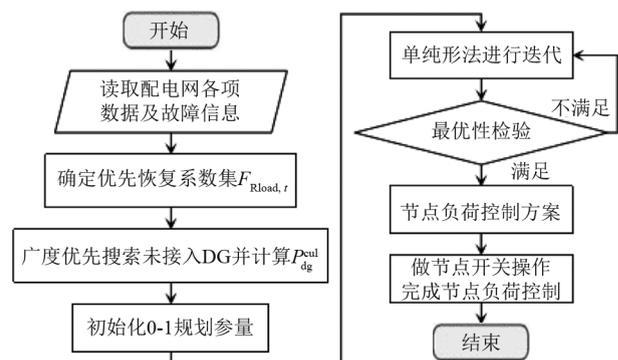


图 1 紧急供电恢复流程

具体流程如下:

- 1) 记录配电网的拓扑结构及电器特征参数。
- 2) 记录故障信息,确定故障点。
- 3) 根据故障时刻由典型负荷时变需求模型确定优先恢复系数集 $F_{Rload,t}$ 。

4) 以主电源点(source generation, SG)所在的节点为根节点,采用广度优先搜索的方法快速遍历配电网拓扑结构中的所有节点,并确定因故障而未能接入配电网主网的 DG,计算未接入的 DG 所提供的总电量 P_{dg}^{cul} 。

5) 根据已获得的配电网数据,确定紧急供电恢复模型所需参量,初始化 0-1 整数规划参数。

6) 进行算法迭代,寻找最优解,即用单纯形法寻找目标函数最优解,以满足开关动作次数及节点负荷重要等级和总切除负荷总量等约束,得到节点负荷控制恢复方案作为紧急供电恢复策略。

7) 按照紧急供电恢复策略对节点负荷进行相对应的控制,做相应的开关操作。

4 算例分析

算例采用 IEEE 33 节点系统,对比粒子群算法与所提 0-1 整数规划算法的仿真结果,验证所提方法的优势。

节点负荷等级见表 1。假定故障都能够被成功抢修,考虑到配电网的真实运行状态,算例将设置 1~3 个故障点,故障随机设计在配电网不同支路上。DG 接入节点为 6、12、16、23、30 位置,配电网的网络拓扑结构如图 2 所示。

表 1 节点负荷等级

负荷等级	一级负荷	二级负荷	三级负荷
节点编号	6、12、23、30	1、5、8、14、16、18、21、22、24、25、29、32	其余节点

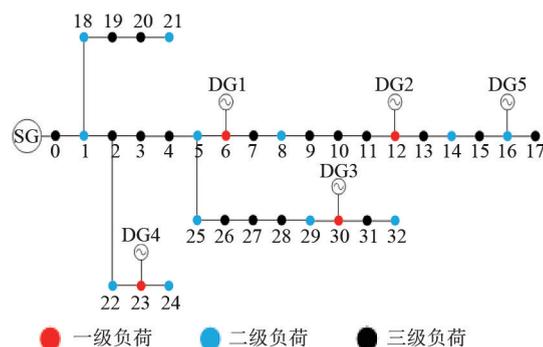


图 2 IEEE 33 节点配电网拓扑

故障被成功抢修后,电源点 SG 将会为配电网中的所有节点负荷供电,为保障配电网供电与负荷匹配,通过负荷控制,切断部分节点负荷以达到最大供电保障及供需平衡。所提算法与粒子群算法的仿真结果对比如表 2 所示。

从表 2 的仿真结果可以看到,两种方案切除的节点负荷均为三级负荷,且都可以达到电量供需平衡。对比相同故障点情况下的两种算法的紧急供电恢复策略:情况 1 中,在仅有一个故障点时,所提算

表 2 节点负荷控制方案算例对比

算例	故障点	被切除的 DG 总容量/kVA	切除的负荷节点及开关次数		被切除节点总负荷/kVA	
			粒子群	所提算法	粒子群	所提算法
情况 1	节点 6-7	468	4,9,13,15,28(5)	2,28,31(3)	476.72	470.01
情况 2	节点 7-8,25-26	628.58	7,13,17,19,26(5)	2,7,11,17,28(5)	629.81	628.97
情况 3	节点 14-15,25-26	398.58	9,17,19,28(4)	11,19,31(3)	399.15	400.54
情况 4	节点 2-22,25-26	380.58	2,4,7(3)	2,13,28(3)	389.18	381.63
情况 5	节点 15-16,22-23,25-26	618.58	2,7,19,27,28(5)	3,13,17,31(4)	622.76	619.52

法切除的总负荷比粒子群算法少 6.71 kVA,切除的节点也比粒子群算法少 2 个;发生两处故障时,情况 2 和情况 4 从切除的节点数上看,二者相同,而情况 3 中所提算法比粒子群算法切除的节点负荷少。从切除的负荷总量来看,情况 2 和情况 4 中所提算法均比粒子群算法切除的总量少,而情况 3 仅比粒子群算法多 1.39 kVA;情况 5 中有 3 处故障点,无论是切除的负荷节点数量还是从切除的节点负荷总量来看,所提算法都是要优于粒子群算法所生成的节点负荷切除策略的。

粒子群算法在搜寻最优解的过程中,由于缺乏速度的动态调节,对粒子的局部及全局搜索的协调程度不佳,会因为较易陷于局部最优的问题而造成不易收敛及降低了收敛精度,而 0-1 整数规划所采用的单纯形法搜索最小值时迅速又直接,并不要求目标函数的解析性,有着较快的收敛速度,适用范围更加广泛,且经过仿真验证分析,在所提的问题模型中采用 0-1 整数规划的方法完成策略求解更为适合。

5 网损分析

配电网网损与经济效益密切相关,对其进行计算与分析具有较大的实用价值。进一步对配电网故障恢复后采用不同算法进行负荷切除后的网损计算,计算公式^[15]为

$$g_s = \sum_{s \in M} \left(\frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} \right) R_s \quad (11)$$

式中: M 为配电网中的支路集合; P_s 和 Q_s 分别为第 s 条支路上流入末端节点的有功功率和无功功率; U_s 是第 s 条支路末端节点的电压幅值; R_s 为第 s 条支路的电阻值。

通过前推回代法完成配电网潮流计算,进而计算网损。表 3 是所提算法与粒子群算法仿真结果的配电网网损对比。

表 3 网损对比

算例	故障点	网损/VA	
		粒子群	所提算法
情况 1	节点 6-7	145.547 8	150.985 0
情况 2	节点 7-8,25-26	141.453 2	138.119 0
情况 3	节点 14-15,25-26	161.273 1	160.093 3
情况 4	节点 2-22,25-26	173.409 1	161.153 3
情况 5	节点 15-16,22-23,25-26	152.128 8	131.695 0

从表 3 可以看出,所分析的 5 种情况,除了情况 1 以外,与粒子群算法相比较而言,所提算法网损较小一些。情况 1 中,所提算法的网损与粒子群算法也比较接近,且均在可容许的网损范围内。所以,在出现 2 个及以上故障时,所提算法网损更小一些,能够进一步保障配电网实际经济效益。

6 算法复杂度分析

对两种算法的时间复杂度进行分析,用 N 代表问题规模,则粒子群算法的复杂度是 $O(KN^2)$,其中 K 为一个任意的常数^[21],最坏情况下粒子群算法的复杂度可能会达到 $O(N!)$ 。所提算法采用的单纯形法的时间复杂度在最坏情况下为指数级的 $O(2^N)$,但在实际运行时,其为多项式时间复杂度,文献[22]中提出的平滑型复杂度理论对其作了详细的解释。而文献[23]给出了单纯形法平均步数的上界为 $m^2+1.5m+0.5$,其中 m 为不等式约束个数,也验证了其时间复杂度为多项式复杂度。在仿真实验中对比二者的运行时间,如表 4 所示。

从表 4 可以看出,不同故障情况下所提算法运行时间都小于粒子群算法。在实际运算中,所提方法比粒子群算法更为便捷快速,对于含 DG 的配电网紧急供电恢复问题而言则更为适用。

表 4 不同算例仿真时间对比

算例	故障点	运行时间/s	
		粒子群	所提算法
情况 1	节点 6-7	0.518 864	0.044 466
情况 2	节点 7-8,25-26	0.460 474	0.057 610
情况 3	节点 14-15,25-26	0.533 347	0.024 948
情况 4	节点 2-22,25-26	0.507 382	0.045 113
情况 5	节点 15-16,22-23,25-26	0.520 138	0.061 811

7 结 论

上面对发生故障经抢修后含有 DG 的配电网建立了紧急供电恢复优化策略,主要结论如下:

在紧急恢复过程中,利用典型负荷时变性需求模型以及配电网总功率,对节点负荷控制恢复策略形成约束条件,优先切除需求度低的负荷,最大可能满足了用户用电需求并提高了电网供电的可靠性。

通过算例综合分析表明,所采用的基于 0-1 整数规划的故障后紧急供电恢复与负荷切除控制策略,比粒子群算法具有更快速、更高效的优势,对实际配电网的供电恢复控制有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 丁磊,潘贞存,丛伟.基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J].中国电机工程学报,2008,28(25):62-67.
- [2] 冯雪平,宋晓辉,梁英,等.基于最小生成树及改进遗传算法的含分布式电源配电网孤岛划分方法[J].高电压技术,2015,41(10):3470-3478.
- [3] 陈昕玥,唐巍,陈禹,等.基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J].电网技术,2014,38(1):99-106.
- [4] 王增平,姚玉海,郭昆亚,等.基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J].电工技术学报,2015,30(20):185-192.
- [5] 唐念,夏明超,肖伟栋,等.考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J].电力系统自动化,2015,39(8):45-52.
- [6] 马草原,孙展展,尹志超,等.基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J].电工技术学报,2016,31(11):120-128.
- [7] 李振坤,陈星莺,余昆,等.配电网重构的混合粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):35-41.
- [8] RAJESWARI K, NEDUNCHELIYAN S. Genetic algorithm based fault tolerant clustering in wireless sensor network[J]. IET Communications, 2017, 11(12): 1927-1932.
- [9] GHOLAMI M, MOSHTAGH J, GHADERNEJAD N. Service restoration in distribution networks using combination of two heuristic methods considering load shedding[J].

Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4):556-564.

- [10] 袁玉松,钟建伟,李沁,等.混合型粒子群算法在含分布式电源配电网重构中的应用[J].电气自动化,2019,41(6):55-57.
- [11] 徐岩,张荟,孙易洲.基于变异粒子群算法的主动配电网故障恢复策略[J].电力自动化设备,2021,41(12):45-53.
- [12] 刘翀.分布式光伏并网对电能质量的影响及对策[J].机械工程与自动化,2021(5):197-198.
- [13] 时珉,郭捷,王晓蔚,等.光伏电站防孤岛保护装置功能分析及整定原则[J].河北电力技术,2018,37(3):1-4.
- [14] 王镜植,刘姿,刘晓强.分布式光伏发电孤岛效应的影响及对策[J].科技风,2018(17):181.
- [15] 徐岩,张荟,马天祥,等.含分布式电源的配电网故障紧急恢复与抢修协调优化策略[J].电力系统自动化,2021,45(22):38-46.
- [16] 章妍会.考虑负荷控制的配电网故障恢复探讨[J].科学中国人,2017(5):42.
- [17] 邹必昌.含分布式发电的配电网重构及故障恢复算法研究[D].武汉:武汉大学,2012.
- [18] 邦詹森,古廷.有向图的理论、算法及其应用[M].姚兵,张忠辅,译.北京:科学出版社,2009:44-46.
- [19] 张海波,张晓云,陶文伟.基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J].电网技术,2010,34(7):103-108.
- [20] DANTZIG G B. The simplex method[M]. Santa Monica:Rand Corporation, 1956:489-492.
- [21] 郝瑞芝.粒子群优化算法及其应用研究[D].兰州:西北师范大学,2010.
- [22] SPIELMAN D A, TENG S-H. Smoothed analysis of algorithms: Why the simplex algorithm usually takes polynomial time[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 2004, 51(3):385-463.
- [23] ADLERI, MEGIDDO N. A simplex algorithm whose average number of steps is bounded between two quadratic functions of the smaller dimension[J]. Journal of the ACM, 1985, 32(4):871-895.

作者简介:

杨向飞(1975),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网继电保护装置的运行和技术管理;

向博(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

金震(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及自动化;

王可洪(1999),女,硕士研究生,从事电力系统的信号处理研究;

钟俊(1972),男,博士,副教授,从事电力系统的信号处理研究;

徐方维(1978),女,博士,教授,从事电能质量等研究。

(收稿日期:2024-04-10)

接入光伏发电系统的电力电子变压器控制策略研究

陈仁钊¹,李惠祝²,夏岩²,杨屹立¹,石进辉²,陈杨²,张蕊²

(1. 兴储世纪科技股份有限公司,四川自贡 643000;2. 四川轻化工大学
自动化与信息工程学院,四川自贡 643000)

摘要:电力电子变压器是一种新型电力电子设备,其拓扑接入灵活,在交直流微电网中应用前景广泛。针对接入光伏发电系统,对由双有源桥和模块化多电平换流器所构成的电力电子变压器的拓扑与控制方法开展了研究。首先,介绍模块化多电平换流器与双有源桥的基本拓扑与工作原理,分析了两者的数学模型;然后,研究了模块化多电平换流器的最近电平逼近调制、桥臂子模块电容电压平衡控制、环流抑制和功率控制以及双有源桥的单重移相控制方法;最后,在 Matlab/Simulink 中搭建了含有光伏系统和电力电子变压器的微电网模型,在光伏系统工作于最大功率跟踪工况下,对所提模块化多电平换流器与双有源桥的控制方法进行了仿真实验,结果表明了所提出的基于电力电子变压器的微电网模型与控制方法的可行性与有效性。

关键词:电力电子变压器;光伏发电;模块化多电平换流器;双有源桥

中图分类号:TM 615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0061-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250209

Research on PET Control Strategy for Connecting to PV Power Generation Systems

CHEN Renzhao¹, LI Huizhu², XIA Yan², YANG Yili¹, SHI Jinhui², CHEN Yang², ZHANG Rui²

(1. Zonergy, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract:Power electronic transformer (PET) is a new type of power electronic device with flexible topology access, which has a wide range of application prospects in AC and DC microgrids. The topology and control method of PET constructed by dual active bridge (DAB) and modular multilevel converter (MMC) are studied for a photovoltaic (PV) power generation system. Firstly, the basic topologies and working principles of MMC and DAB are introduced, and the mathematical models of MMC and DAB are analyzed. And then, the nearest level modulation, capacitor voltage balancing control of bridge arm submodule, circulating current suppression and power control of MMC, and the single phase shift control of DAB are analyzed. Finally, the microgrid model containing PV system and PET is constructed in Matlab/Simulink. Simulation experiments on the control methods of the proposed MMC and DAB are carried out with the PV system operating at maximum power tracking condition, and the results show the feasibility and effectiveness of the proposed PET-based microgrid model and control method.

Key words: power electronic transformer; photovoltaic power generation; modular multilevel converter; dual active bridge

0 引言

随着传统不可再生能源的日益减少,风、光、潮汐等新能源飞速发展。为应对可再生能源间歇性、

随机性等问题,国内外学者提出了微电网的概念。微电网以电力为基础,依靠能量转变和储能装置,将多种能源系统进行有机结合,充分调控能源结构,实现能源的梯级利用和协调互补,保证供需平衡。

电力电子变压器(power electronic transformer, PET)作为能源微电网中能量调节、电能变换及信息沟通的重要装置,它不是简单地将能源微电网与主网连接,而是把能源微电网内的分布式电源、储能和

基金项目:企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室开放基金项目(2023WYJ01);四川省科技计划项目(2022SZYZF01)

多元可控负荷有机地整合起来,使能源微电网既能独立自治运行,又能主动地参与主网的运行和管理,从而提高电网系统的运行效率与稳定性。

PET 结构灵活多变,主要有两电平换流器、三电平换流器、级联 H 桥换流器和模块化多电平换流器^[1]。其中,两电平换流器结构简单,在低压中应用广泛,但在高压应用中需要多个开关器件串联和安装滤波器^[1];三电平换流器相较两电平换流器虽可以减少谐波输出,但在高压应用中仍需要采用多个开关器件串联,限制了换流器的功率容量^[2];级联 H 桥换流器尽管可以通过增加子模块来满足谐波要求,并具有简单可靠的冗余机制,但由于没有共同的直流母线,故不能有效吸收或输出有功功率^[3]。虽然功率问题可以通过引入多绕组移相变压器来解决,但多绕组也带来了变压器环流较大、发热量大和成本较高等问题^[4]。相比两电平和三电平换流器,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的谐波含量更低,没有功率器件动态电压均衡问题,而且更容易维护和安装^[5]。相比级联 H 桥换流器,MMC 的结构更简单,并且可以通过调整子模块数目灵活地改变功率和电压等级。文献[6]研究了 MMC 型 PET 的拓扑与控制,但未考虑光伏系统接入的情况。

双向 DC/DC 变换器分为隔离型和非隔离型。非隔离型双向 DC/DC 变换器主要分为双向 Buck-Boost 变换器、双向 Cuk 变换器和双向 Zeta/SePIC 变换器。双向 Buck-Boost 变换器,由于输入和输出侧没有加入电感,使得电流纹波较大。而后面的两种变换器,虽然加入电感减小了电流纹波,但其结构复杂,目前实际应用较少。非隔离型双向 DC/DC 变换器传输效率通常比隔离型双向 DC/DC 变换器低。为了提升非隔离双向 DC/DC 变换器的传输效率,可以使用多电平技术来降低器件的电压应力^[7]。在电路中加入辅助电路或改进控制方法^[8]可以提高转换的效率,但此方法会增加系统的控制难度与成本。

隔离型双向 DC/DC 变换器主流有隔离型双向 Flyback、Forward、Cuk、Zeta/SePIC 和推挽直流变换器。前两种变换器由于属于单向励磁,使得变压器利用率低,受漏感影响较大,导致开关管会承受较大的电压尖峰^[9-10]。隔离型双向 Cuk、Zeta/SePIC 电路

由于多了一级电容缓冲环节,使得其不适用于大功率的应用场合^[11-12]。隔离型推挽直流变换器虽可以解决上述大部分问题,但其成本较高。

双有源桥式变换器简称双有源桥(dual active bridge, DAB),属于隔离型双向 DC/DC 变换器,它分为谐振型与非谐振型变换器。谐振型 DAB 容易实现软开关,使得变换器可在更高的开关频率下工作,提高变换器的功率密度。但谐振槽的存在使变换器的体积增大,功率密度得不到保障。

而非谐振型 DAB,作为 PET 隔离级常用电路,其拥有着能量信息双向传输和软开关的作用,可以提高系统的稳定性。为了满足不同应用需求,DAB 有多级和多拓扑结构,可提供更高的电压和功率级别,同时具有更好的控制和调节能力。目前 DAB 广泛应用于电力电子转换器领域,如电动汽车充电器。文献[13]对 DAB 提出了一种基于输出反馈的误差校正方法,可提高系统鲁棒性,但未考虑多 DAB 级联的问题。文献[14]构建了 PET 系统并考虑多 DAB 级联的问题,但其交流侧选用的级联 H 桥系统难以有效吸收或输出有功功率。

针对 PET 系统运行机理和相关控制技术研究还不充分的问题,下面在 Matlab/Simulink 中构建了含有光伏发电系统、MMC 和 DAB 的 PET 微电网模型。通过分析 PET 拓扑结构及其控制原理,研究了 PET 的控制方法,设计了针对功率、环流、电容电压均衡等的控制器。最后,在设定输出功率变化的工况下验证了所建 PET 微电网模型与控制方法的有效性。

1 基于光伏系统的 PET 模型

PET 微电网拓扑包含 MMC 模块、DAB 模块、光伏发电模块,如图 1 所示。

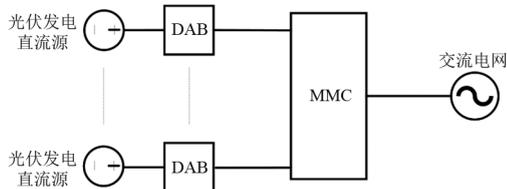


图 1 含光伏发电的 PET 微电网拓扑

1.1 MMC 模块拓扑

MMC 由多个级联子模块组成,如图 2 所示。

当 MMC 作为逆变器使用时,右侧为直流电输入,左侧为交流电输出。图 2 采用的是应用较为广泛的半桥型子模块(submodule, SM),每个桥臂有 8 个 SM,每一个 SM 的结构如图 3 所示,功率器件采用绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)。

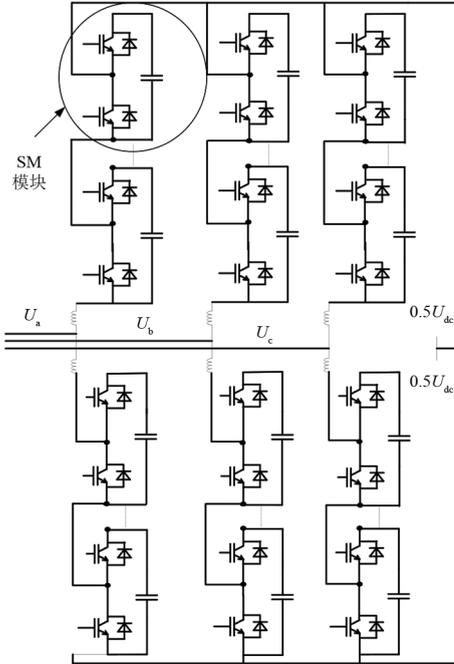


图 2 MMC 拓扑

图 3 中 SM 的工作原理为:通过改变上下 IGBT 的导通和截止,可以改变 SM 的投入和切除状态。当电流 I_s 从左侧正方向流入时,子模块的上桥臂导通,下桥臂截止。根据 IGBT 的特性,电流通过上桥臂的二极管直接对桥臂电容充电。此时子模块电压 U_s 的方向、幅值与桥臂电容电压 U_c 相同,子模块处于投入状态。当 I_s 流向相反时,子模块的上桥臂导通,下桥臂截止,此时桥臂电容处于放电状态,子模块电压 U_s 的方向、幅值与桥臂电容电压 U_c 相反,子模块处于投入状态。当子模块的上桥臂截止,下桥臂导通时,桥臂电容既不充电也不放电,此时子模块处于切除状态^[15]。

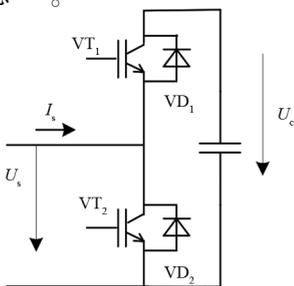


图 3 MMC 半桥型子模块

选择 MMC 中 A 相来分析 MMC 的数学模型,如图 4 所示。图中: U_{dc} 为 MMC 的直流侧电压; U_{pa} 为上桥臂 SM 电压和; U_{na} 为下桥臂 SM 电压和; L_0 与 R_0 分别为桥臂上的电感与电阻; U_{sa} 为网侧电压; L_G 为网侧电感; I_{pa} 、 I_{na} 和 I_{va} 分别为上桥臂、下桥臂和电网侧电流; O 点与 N 点的电势差为 U_{ON} ,其数值为 0。

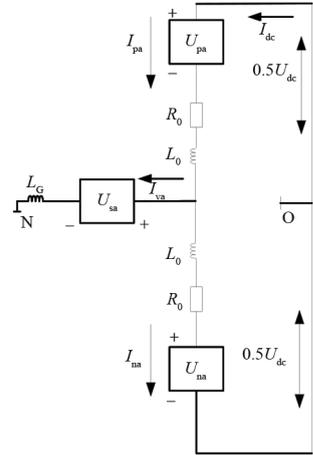


图 4 MMC 中 A 相的简化图

对图 4 使用基尔霍夫电流电压定律,可以得到上桥臂的方程为

$$-\frac{U_{dc}}{2} + U_{pa} + R_0 I_{pa} + L_0 \frac{dI_{pa}}{dt} + L_G \frac{dI_{va}}{dt} + U_{sa} - U_{ON} = 0 \quad (1)$$

下桥臂的方程为

$$\frac{U_{dc}}{2} - U_{na} - R_0 I_{na} - L_0 \frac{dI_{na}}{dt} + L_G \frac{dI_{va}}{dt} + U_{sa} - U_{ON} = 0 \quad (2)$$

将式(1)与式(2)相加得到式(3)。

$$U_{pa} - U_{na} + R_0(I_{pa} - I_{na}) + L_0 \left(\frac{dI_{pa}}{dt} - \frac{dI_{na}}{dt} \right) + 2L_G \frac{dI_{va}}{dt} + 2U_{sa} - 2U_{ON} = 0 \quad (3)$$

令 A 相差模电压为 $U_{diff} = (U_{na} - U_{pa})/2$,则式(3)就变为式(4)。

$$\left(\frac{L_0}{2} + L_G \right) \frac{dI_{va}}{dt} + \frac{R_0}{2} I_{va} = -U_{sa} + U_{ON} + U_{diff} \quad (4)$$

将式(1)与式(2)相减得到式(5)。

$$-U_{dc} + U_{pa} + U_{na} + R_0(I_{pa} + I_{na}) + L_0 \left(\frac{dI_{pa}}{dt} + \frac{dI_{na}}{dt} \right) = 0 \quad (5)$$

令 A 相共模电压为 $U_{com} = (U_{na} + U_{pa})/2$, MMC 的 A 相桥臂环流为 $I_{cira} = (I_{na} + I_{pa})/2$,则式(5)可写为

$$U_{\text{com}} + R_0 I_{\text{cira}} + L_0 \frac{dI_{\text{cira}}}{dt} = \frac{U_{\text{dc}}}{2} \quad (6)$$

令 $R=0.5R_0, L=0.5L_0+L_C$, 并将式(4)分解到 dq 轴坐标系上得到:

$$(Ls + R)I_{vd} = -U_{sd} + U_{\text{diff}d} + \omega LI_{vq} \quad (7)$$

$$(Ls + R)I_{vq} = -U_{sq} + U_{\text{diff}q} - \omega LI_{vd} \quad (8)$$

式中: $I_{vd}、I_{vq}$ 分别为 $d、q$ 轴的桥臂电流; $U_{sd}、U_{sq}$ 分别为 $d、q$ 轴网侧电压; $U_{\text{diff}d}、U_{\text{diff}q}$ 分别为 $d、q$ 轴的差模电压; ω 为 dq 轴的旋转角速度; s 为微分算子。

1.2 DAB 模块拓扑

对于 PET 而言, 其隔离级 DC/DC 电路一般采用 DAB 电路。DAB 基本结构如图 5 所示。DAB 的核心是原、副两边完全相同的 H 桥以及中间的隔离变压器, 原、副两边分别有滤波电容。原边 H 桥与隔离变压器中间有隔离变压器的等效电感, V_{ab} 与 V_{cd} 为方波电压^[16]。通过控制两边 H 桥上开关器件, 使 V_{ab} 与 V_{cd} 两者的相位偏移, 达到功率控制的目的。 V_{ab} 与 V_{cd} 的相位差值决定了功率传递的数值。当 V_{ab} 相位超前 V_{cd} 时, DAB 正向运行, 电流由原边向副边流动; 当 V_{ab} 相位滞后 V_{cd} 时, DAB 反向运行, 电流由副边向原边流动。

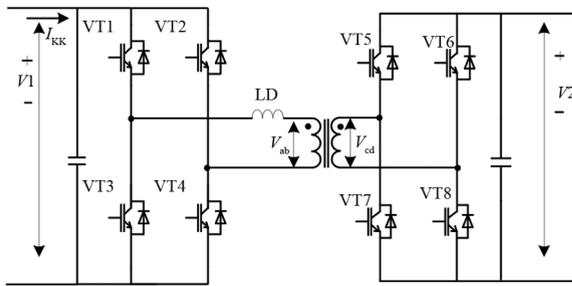


图 5 DAB 拓扑

1.3 光伏发电系统拓扑

光伏发电系统由光伏阵列和升压斩波电路构建而成。光伏发电系统通过最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制策略实现最大功率输出, 提升系统的整体效率。光伏发电系统拓扑如图 6 所示。

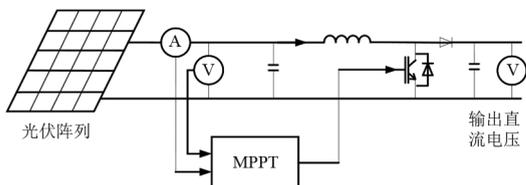


图 6 光伏发电系统拓扑

2 系统的控制策略

2.1 MMC 的控制策略

2.1.1 最近电平逼近调制控制策略

最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)是 MMC 常用的控制方式, 它实际上是对于取整函数的应用, 若要得到 MMC 中各相实时投入的子模块数量, 需在取样点处进行数据取整, 令交流侧的输出电压逼近于调制波。其公式为:

$$n_p = \frac{N}{2} - R_{\text{round}}\left(\frac{V_s}{V_c}\right) \quad (9)$$

$$n_1 = \frac{N}{2} + R_{\text{round}}\left(\frac{V_s}{V_c}\right) \quad (10)$$

式中: $n_p、n_1$ 分别为上、下桥臂投入的子模块数量; V_s 为正弦调制波瞬时值; V_c 为子模块电容电压的平均值; $R_{\text{round}}()$ 为取整函数。

图 7 为 MMC 采用 NLM 法得到的 A 相电压输出波与调制波的波形图。NLM 法的核心是通过测定调制波的瞬时值大小, 实时调整各相上下桥臂的子模块投入数量, 从而得到拟合正弦调制波, 且电平数越多, 相似度越高。

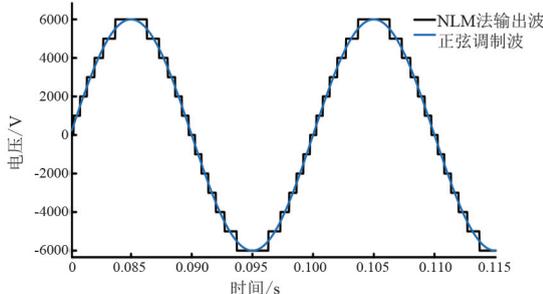


图 7 NLM 调制法输出电压波形

2.1.2 桥臂子模块电容电压平衡控制策略

MMC 中由于开关时刻、通信的延时和元器件的参数差异等问题会导致桥臂子模块电容的充放电不一致, 这可能会导致输出电流、电压畸变, 影响设备寿命, 严重的还会危害人身安全, 所以子模块电容电压的平衡非常重要^[17]。冒泡排序法原理简单、运用广泛且方法稳定, 将其应用于桥臂子模块电容电压控制策略: 首先, 对全部桥臂子模块电容电压进行检测; 然后, 通过冒泡排序法比较各桥臂子模块的电容电压并进行排序; 最后, 根据需要子模块的数目和桥臂电流的方向选择符合条件的桥臂子模块投入, 从

而实现桥臂子模块电容电压平衡。相应流程如图 8 所示。

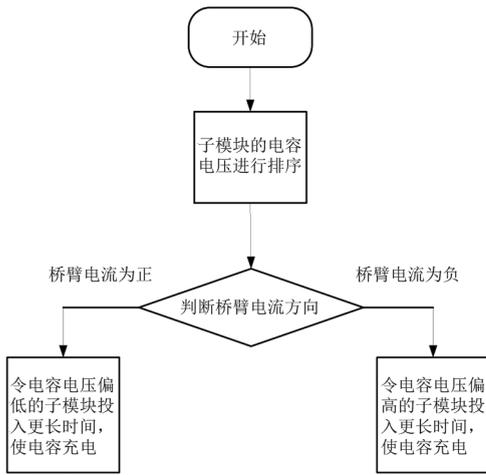


图 8 电容电压平衡控制流程

2.1.3 功率控制策略

功率控制是 MMC 控制的重点。由式(7)与式(8)可以得到 MMC 的差模电压模型, 如图 9 所示。

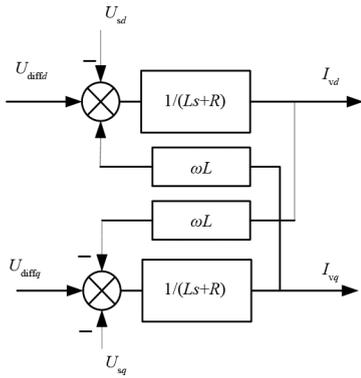


图 9 MMC 的差模电压模型

图 9 中明显可以看出差模电压 d 轴上有 $\omega L_0 I_{vq}$ 的耦合项, q 轴上有 $\omega L_0 I_{vd}$ 的耦合项。为此, 设计了比例积分 (proportional plus integral, PI) 控制器来抵消其耦合项。电流内环控制器结构如图 10 所示。

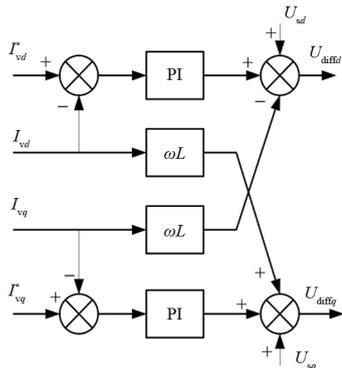


图 10 内环电流控制器

MMC 作为逆变器时一般用功率外环, 加上功率外环后的控制器模型如图 11 所示。

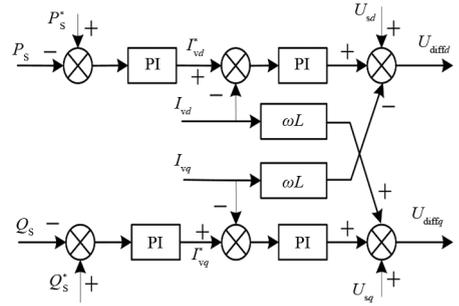


图 11 功率电流双闭环控制器

2.1.4 环流抑制控制策略

MMC 桥臂电压作用到桥臂电感上的谐波分量^[18]有

$$2L_0 \frac{di_p}{di_1} = -N \frac{MI_0}{16\omega C} \sin(2\omega t - \varphi) + \frac{MN}{2} \frac{I_0 \sqrt{4 + (M^4 - 4M^2) \cos^2 \varphi}}{8\omega C} \cos(2\omega t + \arctan \frac{2 - M^2}{2 \tan \varphi}) \quad (11)$$

式中: I_0 为 MMC 输出电流幅值; φ 为相位滞后角; C 为桥臂电容; M 为输出交流相电压幅值与直流电压一半的比值; N 为桥臂数; i_p 、 i_1 分别为 MMC 的上、下桥臂电流。

对式(11)进行积分可得出环流中会出现二倍频谐波成分。由于环流中的谐波成分会使桥臂电流产生畸变, 所以抑制环流十分重要。

环流抑制控制器的设计思路与功率电流双闭环控制的内部电流控制器相同, 对式(5)进行频域上的 dq 轴坐标分解可以得到 MMC 的共模电压模型, 如图 12 所示。设计 PI 控制器对桥臂环流进行解耦, 可得到环流控制器模型, 如图 13 所示。图中: I_{cird} 、 I_{cirq} 分别为 d 、 q 轴的 MMC 内部环流; U_{comd} 、 U_{comq} 分别为 d 、 q 轴的 MMC 共模电压。

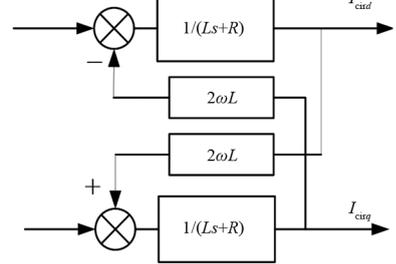


图 12 MMC 的共模电压模型

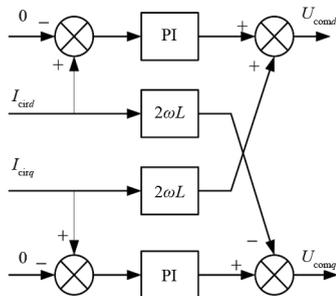


图 13 环流控制器

2.2 DAB 的控制策略

DAB 的控制策略是单重移相(single phase shift, SPS)调制,其工作原理如图 14 所示。图中: V_{ab} 、 V_{cd} 分别为 DAB 变压器左、右两端的电压; i 为 DAB 输出的电流; U_m 、 U_n 分别为 V_{ab} 、 V_{cd} 的幅值; φ_1 为移相角度。

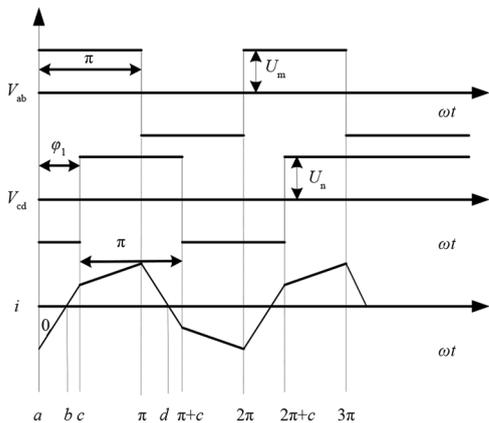


图 14 DAB 正向工作模式

结合图 5 分析,DAB 在 SPS 控制下正向的工作情况以 I_{KK} 流动方向为正,一个周期可以分为 6 个阶段。

1) $a \sim b$ 阶段。在 0 时刻,图 5 中 VT1、VT4 的开关管导通,VT2、VT3 开关管关断,此时 LD 上电流流动方向相反,处于放电状态,原边电流通过 VT1、VT4 续流,而副边电流与 LD 上电流方向相同,因此通过 VT6、VT7 进行续流。此时,流过等效漏感两端的电压、电流方向相反,LD 上电流开始减小。

2) $b \sim c$ 阶段。在角度为 b 时,LD 上电流为 0。而后方向由负变正,此时原边 VT1、VT4 和副边 VT6、VT7 导通,均实现零电压开关(zero voltage switch, ZVS)运行,原边、副边电压 V_1 、 V_2 向等效漏感充电,LD 上电流逐渐增大。

3) $c \sim \pi$ 阶段。原边 VT1、VT4 仍处于导通状态,向等效漏感充电,LD 上电流增加,但在 c 时刻,VT5、VT8 导通,VT6、VT7 关断,因此,副边通过 VT5、VT8 续流。此时等效漏感两端的电压仍为正,但

其幅值开始减小,所以 LD 上电流的增加速度下降。

4) $\pi \sim d$ 阶段。在角度为 π 时,VT2、VT3 导通,VT1、VT4 关断,但此时 LD 上电流为正且等效漏感两端电压为负,故原边电流通过 VT2、VT3 续流,LD 上电流开始减小,到角度为 d 时减小为 0,副边开关管的导通状态不变,仍由 VT5、VT8 续流。

5) $d \sim \pi+c$ 阶段。在角度为 d 时,LD 上电流为 0,方向由正到负,且 LD 上电流逐渐增大,此时原边 VT2、VT3 和副边 VT5、VT8 导通,均实现 ZVS 运行,原边、副边电压 V_1 、 V_2 向等效漏感充电。

6) $\pi+c \sim 2\pi$ 阶段。在角度为 $\pi+c$ 时,VT2、VT3 仍处于导通状态,原边侧的工作模式不变,仍向等效漏感充电,LD 上的电流持续反向增加,但副边侧 VT5、VT8 关闭,VT6、VT7 导通,由 VT5、VT8 续流。此时由于等效漏感两端的电压开始减小,所以 LD 上电流的增加速度下降。

2.3 光伏阵列控制策略

光伏阵列的最大功率跟踪采用电导增量法。判断最大功率点处的依据是,在均匀光照条件下,光伏阵列的最大功率点处功率对电导的导数为 0。具体流程如图 15 所示。

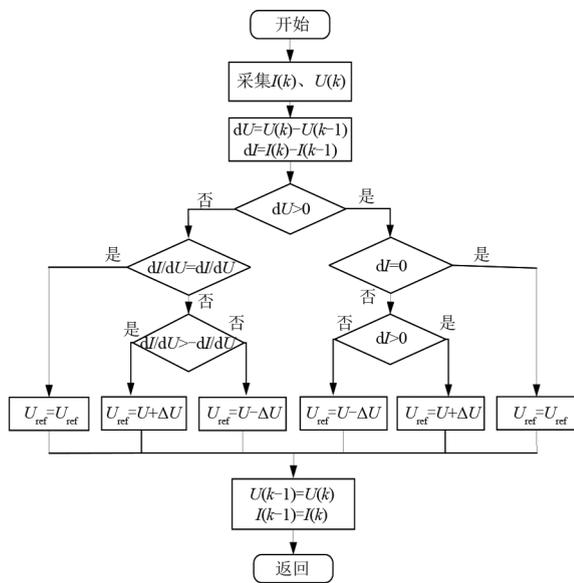


图 15 电导增量法

图中: $I(k)$ 、 $U(k)$ 分别为 k 时刻光伏阵列的电流、电压; U_{ref} 为参考电压; ΔU 为输出电压偏差。

3 实验仿真

基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型,模型参考

图 1 所示。光伏阵列首先通过 boost 电路实现 MPPT 功能,boost 电路输出电压经过 DAB 模块转化为 667 V 直流电压。此系统有 6 套光伏阵列电路和 DAB 电路,所以 DAB 系统最终输出的直流电压为 4 kV。4 kV 直流电压作为 MMC 模块的直流侧输入,最终经过 MMC 模块输出交流电压,并将其并入交流电网上。模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 PET 微电网系统的主要参数

参数	数值
交流电网侧电压/kV	2
MMC 桥臂子模块数量	8
MMC 子模块电容/mF	7
MMC 桥臂电感/mH	5
MMC 桥臂电阻/ Ω	1
MMC 设定输出功率/kW	300(3 s 前) 500(3 s 后)
DAB 电路电感/mH	1.2
DAB 开关频率/kHz	10
单套光伏阵列直流侧输出/kV	0.6
单套光伏阵列最大功率输出/kW	103.165

图 16 为单套光伏阵列的 PV 曲线图,图 17 为单套光伏阵列的输出功率。由图 16、图 17 可得,单套光伏阵列输出为 103.165 kW,符合最大功率跟踪法的预期。

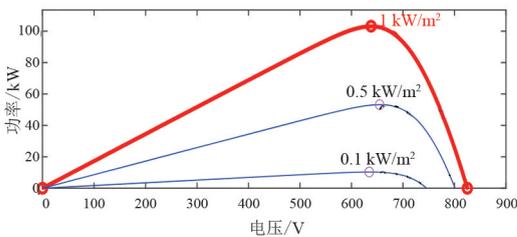


图 16 单套光伏阵列 PV 曲线

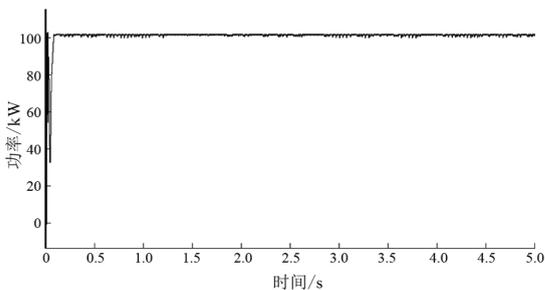


图 17 单套光伏阵列输出功率

为验证 MMC 系统功率控制的有效性,考虑功率的变化情况,MMC 系统初始输出功率为 0.3 MW,3 s 后输出功率突变为 0.5 MW。

MMC 系统的输出功率曲线如图 18 所示。0.6 s 的波动是由于在 0.6 s 时引入了环流控制器,其减少 MMC 内部环流,从而减少 MMC 输出功率幅值振荡使输出功率更加稳定。由于功率控制策略上的差异,功率控制的效果还有提升的空间,可使用加入功率补偿等手段来提升功率的控制效果。

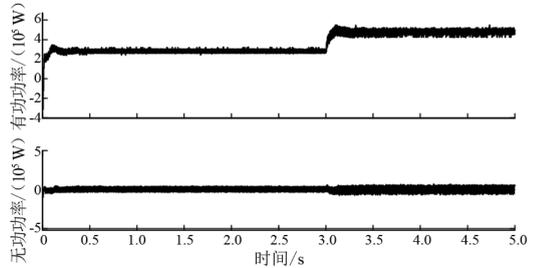


图 18 MMC 输出功率

为验证 MMC 桥臂环流抑制的有效性,在有、无环流控制器的不同工况下进行对比仿真。图 19 和图 20 分别为未加入、加入环流抑制器的 A 相桥臂环流图。

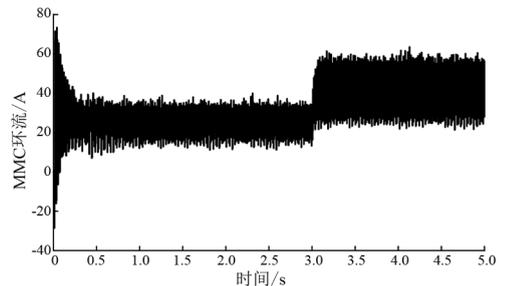


图 19 MMC 未加入环流控制器波形

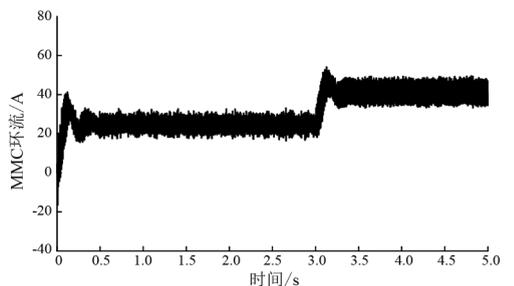


图 20 MMC 加入环流控制器波形

图 21 为 MMC 的 A 相桥臂电流波形图,图 22 和图 23 分别为未加入、加入环流控制器 A 相桥臂电流的快速傅里叶交换分析图。由图 22 和图 23 可知,未加入环流控制器的桥臂电流二倍频谐波较多,加入环流控制器后总谐波失真(total harmonic distortion, THD)值由 18.89%减少到了 4.97%。由图 19 至图 23 可知,MMC 的环流抑制效果良好。

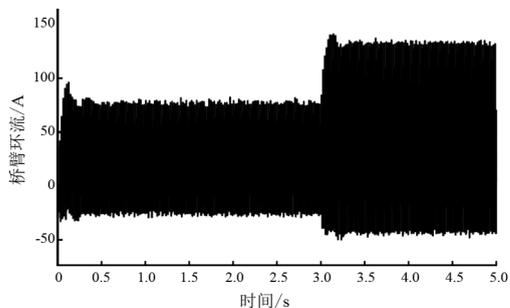


图 21 MMC 桥臂电流波形

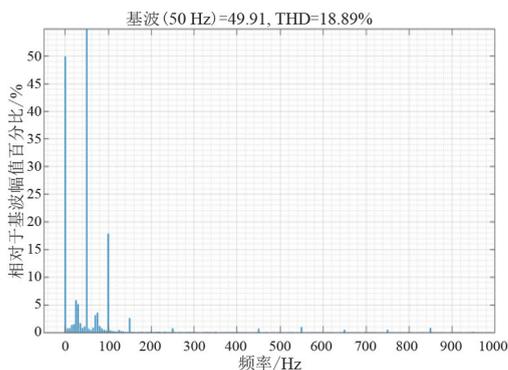


图 22 未加入环流控制器的桥臂电流

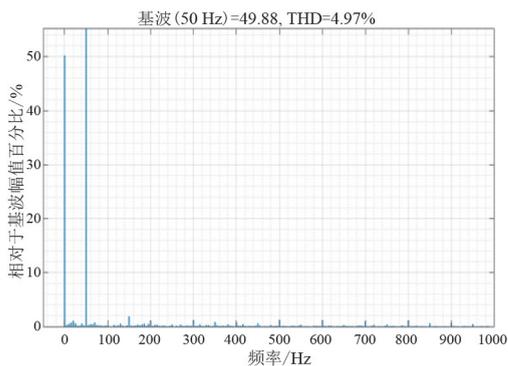


图 23 加入环流控制器的桥臂电流

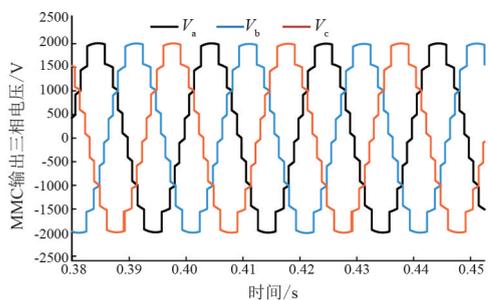


图 24 MMC 输出电压

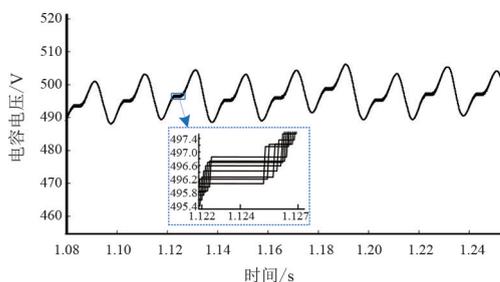


图 25 MMC 桥臂子模块电容电压

图 24 和图 25 分别为 MMC 的输出电压图、MMC 桥臂子模块电容电压图。由图 24 可得,每一相输出电压从波峰到波谷有 9 个电平,符合 NLM 控制理论要求。图 25 可得,子模块的电容电压基本重合,偏差较小,符合电容电压平衡控制预期。

图 26 为 DAB 的输出电压,由图可得 DAB 能有效跟踪 667 V 的设定电压。

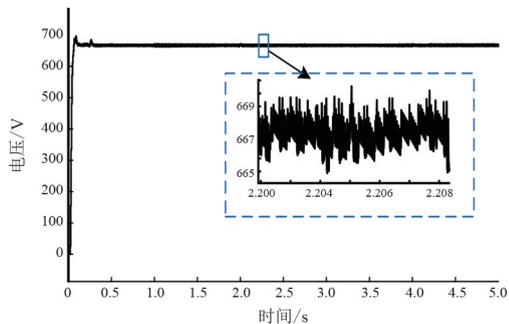


图 26 DAB 输出电压

4 结 论

上面研究了面向光伏发电系统的 PET 拓扑结构及其数学模型,设计了相关的控制器。结果表明:

1) 微电网在保证光伏系统输出最大功率的基础上,PET 可稳定运行;

2) MMC 系统使用环流控制器对 MMC 的桥臂环流进行解耦,使得 MMC 的桥臂电流二倍频谐波含量明显减少,MMC 的输出功率更加稳定;

3) 系统在 PET 进行功率切换过程中,可保障切换后功率的快速跟踪。

所建 PET 系统为搭建 PET 样机建立了基础,今后还可通过加入风力发电系统进一步完善。

参考文献

- [1] ZHANG Yushu, ADAM G P, LIM T C, et al. Voltage source converter in high voltage applications: multilevel versus two-level converters [C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2010), October 19-21, 2010, London. IEEE, 2010.
- [2] RODRIGUEZ J, BERNET S, STEIMER P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2219-2230.

- [3] PENG F Z, LAI J S, MCKEEVER J, et al. A multilevel voltage-source converter system with balanced DC voltages[C]//Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference, June 18–22, 1995, Atlanta, USA. IEEE, 1995, 2:1144–1150.
- [4] MEYNARD T A, FOCH H, THOMAS P, et al. Multicell converters: Basic concepts and industry applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5):955–964.
- [5] DEBNATH S, QIN J C, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):37–53.
- [6] 周彬,徐靖楠,郭旋.一种模块化多电平电力电子变压器及其控制策略研究[J].电器与能效管理技术, 2020(1):71–77.
- [7] RUAN X B, LI B, CHEN Q H, et al. Fundamental considerations of three-level DC-DC converters: Topologies, analyses, and control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2008, 55(11):3733–3743.
- [8] YAN X X, SECKOLD A, PATTERSON D. Development of a zero-voltage-transition bidirectional DC-DC converter for a brushless DC machine EV propulsion system[C]//2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), June 23–27, 2002, Cairns, QLD, Australia. IEEE, 2002: 1661–1666.
- [9] CHUNG S H, CHEUNG W L, TANG K S. A ZCS bidirectional flyback DC/DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1426–1434.
- [10] KASHIF M. Bidirectional flyback DC-DC converter for hybrid electric vehicle: Utility, working and PSPICE computer model[C]//2012 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics, December 5–7, 2012, Hyderabad, India. IEEE, 2012: 61–66.
- [11] DEEPA K, MHAH L R, YUVASRI, et al. Bi-directional push-pull converter fed four quadrant DC drive [C]//2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications (C2SPCA), October 10–11, 2013, Bangalore, India. IEEE, 2013:1–6.
- [12] MURTHY-BELLUR D, KAXIMIERCZUK M K. Isolated two-transistor Zeta converter with reduced transistor voltage stress [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2011, 58(1):41–45.
- [13] 关维德,李涛,钟健,等.电机控制器直流侧前置双有源桥 DC-DC 变换器的模型预测与应力优化混合控制[J].电工技术学报,2024,39(12):3787–3801.
- [14] 丁江萍,高晨祥,许建中,等.级联 H 桥型电力电子变压器的电磁暂态等效建模方法[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7047–7056.
- [15] RAY B. Bidirectional DC/DC power conversion using constant-frequency quasi-resonant topology [C]//1993 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 3–6, 1993, Chicago, USA. IEEE, 1993:2347–2350.
- [16] 李福,邓红雷,张国驹,等.一种中间电容谐振型级联双向 DC-DC 变换器[J].电工技术学报,2022,37(20):5253–5266.
- [17] SANCHEZ-SANCHEZ E, PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRE A, et al. Analysis of MMC energy-based control structures for VSC-HVDC links[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3):1065–1076.
- [18] 杨舒婷,陈新,黄通,等.考虑 MMC 环流控制的海上风电经柔直送出系统阻抗塑造方法[J].中国电力,2023,56(4):38–45.

作者简介:

陈仁钊(1970),男,硕士,高级工程师,从事智能微电网分布式能源、储能电池及电池管理系统研究。

(收稿日期:2024-04-25)

(上接第 54 页)

- [27] 李扬,韦钢,马钰,等.含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J].电力系统自动化,2018,42(5):102–110.
- [28] 王守相,张娜.基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J].电力系统自动化,2012,36(19):37–41.

作者简介:

张胜飞(1983),男,高级工程师,从事电力系统规划研究、输变电设计及其管理工作;

刘毅(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划研究、输变电设计及其管理工作。

(收稿日期:2024-05-10)

基于电压互感器非线性宽频模型的宽频电压测量

穆舟¹, 姜聿涵², 张晨萌¹, 程铭², 罗东辉¹, 谢施君¹, 邵千秋¹, 夏亚龙¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072)

摘要: 宽频暂态电压测量有望在未来的电力系统中得到广泛的应用。电力系统广泛配置宽频暂态测量的最具技术和经济效益的方法之一是升级现有的电压互感器, 使其具有宽频暂态测量能力。针对电磁式电压互感器 (potential transformer, PT), 提出了一种基于宽频模型和算法的技术, 该技术涉及 PT 的非线性特征和宽频线性, 使 PT 具有宽频暂态电压测量能力, 方法包括建立非线性宽频模型的方法和基于输出电压的逆计算方法, 以恢复输入电压波形。并详细介绍了 PT 等效电路模型的综合方法, 同时, 给出了基于电路理论和储能元件及非线性元件的等效方法, 以及基于电路模型的逆计算方法。以雷电冲击为验证源, 对 10 kV PT 进行了验证实验。实验结果与标准器记录的输入波形匹配良好。

关键词: 电压互感器; 暂态电压; 非线性; 宽频

中图分类号: TM 451 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0070-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250210

Wideband Voltage Measurement Based on Nonlinear Wideband Model of Potential Transformer

MU Zhou¹, JIANG Yuhan², ZHANG Chenmeng¹, CHENG Ming², LUO Donghui¹,
XIE Shijun¹, SHAO Qianqiu¹, XIA Yalong¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: Wideband transient voltage measurement is expected to be widely applied in future power systems. One of the methods with the most technical and economical benefits for widely-equipped wideband transient measurement in power system is to upgrade the existing potential transformers (PT) to be enabled with wideband transient measurement. A method based on wide-band models and algorithms is proposed for electromagnetic voltage transformers, which involves the nonlinear characteristics and wideband linearity of PT, enabling PT to have the capabilities of wideband transient voltage measurement. The methods include the establishment of a nonlinear wideband model and an inverse calculation method based on output voltage to recover the input voltage waveform. The comprehensive method of PT equivalent circuit model is introduced in detail, and the equivalence method based on circuit theory, energy storage components and nonlinear components is given, as well as an inverse calculation method based on the entire model. A verification experiment is conducted on 10 kV PT taking lightning impulse as the verification source. The experimental results match well with the input waveform recorded by the standard device.

Key words: potential transformer; transient voltage; nonlinearity; wideband

0 引言

随着新型电力系统的建设、更多新能源的引入

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“准确测量的电压互感器宽频化扩能应用技术研究”(521922220006)

以及电网规模的扩大, 预计电力系统中宽频暂态电压扰动将增加, 极可能损坏设备并造成严重后果^[1-5]。因此, 未来电力系统对宽带暂态电压的准确监测需求突显, 这对设备可靠运行、精准维护运行、绝缘优化设计、故障预警、设备状态监测等具有重要意义。

包括电容式电压互感器 (capacitor voltage

transformer, CVT) 和电磁式电压互感器 (potential transformer, PT) 在内的电压互感器是电力系统中广泛应用的电压测量设备,但其只能准确测量工频电压波形。目前的电力系统尚不具备监测宽频暂态电压的能力。

尽管当前电阻分压器或电容分压器等技术可实现宽频暂态电压测量,但其广泛应用需要大量的投资,并且作为新的一次设备会带来额外的安全问题^[5]。在电力系统中广泛布置宽频暂态电压测量的一种可行方法是升级现有的电压互感器,使其具备宽频电压测量的能力。下面提出了一种基于 PT 的非线性宽频模型,通过数值算法,恢复 PT 一次侧宽频暂态电压测量的方法,并在 10 kV PT 上进行了标准冲击电压的验证试验。

1 宽频模型

电压互感器宽频非线性模型如图 1 所示。下半部分为稳态物理模型,由非线性铁芯和传统变压器模型构成,该物理模型囊括了非线性特性。上半部分的宽频线性模型表征了电压互感器在特定频带内的线性响应。

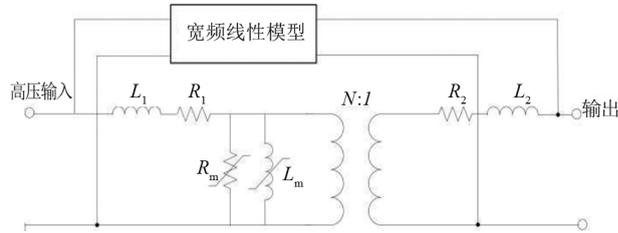


图 1 PT 非线性宽频模型

稳态物理模型可通过变压器传统试验而构建。稳态物理模型中, L_1 、 L_2 、 R_1 和 R_2 分别为 PT 一次侧和二次侧绕组的漏抗电感和绕组阻值,其值可通过短路试验或者变压器参数测量设备获得; R_m 和 L_m 为 PT 励磁支路的非线性电阻和非线性电感,可通过变压器开路伏安试验或者专门的变压器励磁测量设备,获得非线性电感和非线性电阻特性曲线的多项式数学表达式; N 为 PT 匝数比。

宽频线性模型的构建主要基于网络分析仪测量的散射参数(S 参数),通过模型的导纳参数可构建模型^[6]。值得注意的是,通过网络分析仪测量互感器的 S 参数的表征范围,是网络分析仪带同轴电缆校准时的校准件连接点之外的范围,这包含了由于

互感器和同轴电缆之间为非标准接口而采用鳄鱼夹或其他电缆芯引出的连接件的端口效应。不过在保证连接件尽量短且连接面紧固的情况下,可忽略此部分的影响。

直接从 PT 测量的 S 参数包括了稳态物理模型,因此需要通过式(1)分离出宽频线性模型的 Y 参数。

$$Y_{\text{宽频线性模型}} = Y_{\text{PT}} - Y_{\text{稳态物理模型}} \quad (1)$$

式中: Y_{PT} 为网络分析仪直接测量 PT 的 S 参数经转化后得到的 PT 散射参数; $Y_{\text{稳态物理模型}}$ 为稳态物理的 Y 参数,由于其电路结构和元件值已知,可直接通过 Y 参数的定义进行理论计算,具体如式(2) 所示。

$$Y_{\text{电磁单元稳态模型}} = \begin{bmatrix} \frac{Z_m + N^2 Z_2}{(Z_m + Z_1)(Z_m + N^2 Z_2) - Z_m^2} & \frac{N^2 Z_m}{Z_m^2 - (Z_m + Z_1)(Z_m + N^2 Z_2)} \\ \frac{N^2 Z_m}{Z_m^2 - (Z_m + Z_1)(Z_m + N^2 Z_2)} & \frac{N^2(Z_m + Z_1)}{(Z_m + Z_1)(Z_m + N^2 Z_2) - Z_m^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + L_1 \\ Z_2 = R_2 + L_2 \\ Z_m = \frac{R_m \cdot L_m}{R_m + L_m} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_m 和 L_m 分别为非线性电阻和非线性电感的线性段的值。

至此,可得到宽频线性模型的 Y 参数并根据文献[6]构建模型。具体而言,宽频线性模型由 3 个子模块呈 π 型布置,并通过矢量匹配法与电路综合构成 R、RL 和 RLC 支路并联的各个子模块,整个宽频线性模型如图 2 所示。

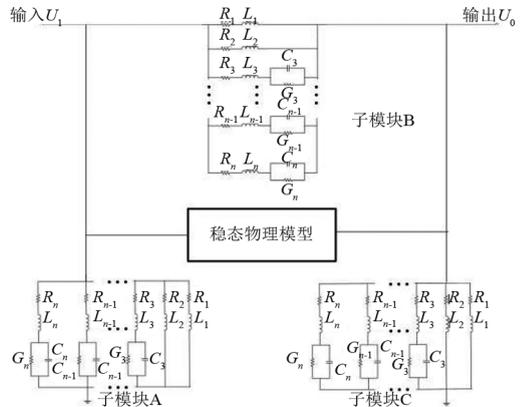


图 2 宽频线性模型

2 反演计算

根据 PT 输出端子记录的电压波形,通过宽频

模型从输出端到高压输入端计算高压侧的输入电压波形。

需要注意的是,输出电压 U_o 正是宽频线性模型中子模块 C 的电压,则需要计算子模块 C 的电流波形。在这种情况下,可以采用时域卷积法来计算子模块 C 的电流波形。具体而言,对于脉冲响应为 $h(t) = K_i e^{pt}$ 的系统,输入为 $U_{\text{input}}(t)$,输出为 $U_{\text{output}}(t)$,可由式(4)计算。

$$U_{\text{output}}(n) = M \cdot U_{\text{output}}(n-1) + P \cdot U_{\text{input}}(n) + Q \cdot U_{\text{input}}(n-1) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} M = e^{p\Delta t} \\ P = \frac{k}{p} \left(1 - \frac{1 - e^{p\Delta t}}{p\Delta t} \right) \\ Q = \frac{k}{p} \left(\frac{1 - e^{p\Delta t}}{p\Delta t} - e^{p\Delta t} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 代表离散的数据; k 为极点; p 为留数。

从式(5)可以看出,系统下一步的输出与前一步的输入和输出相关联。而子模块 C 是多个支路的并联,它们有着相同的电压波形激励,每条支路独立输出电流波形。因此,一种可用的方法是计算每个支路的电流并相加即为该模块的总电流。子模块 C 每条支路将 PT 输出电压作为激励电压波形,将每条支路的电阻元件的电压作为输出。根据欧姆定律,可以计算出电阻的电流,即为相应支路的电流。RL 支路是一阶电路,其传递函数见式(6),即等效于 $h(t) = K_i e^{pt}$ 的响应形式,可使用时域卷积法计算该支路的响应。RLCG 支路是一个二阶电路,其传递函数见式(7),可以看作是两个 $h(t) = K_i e^{pt}$ 响应的相加,因此也可以使用时域卷积法计算该支路的响应。

$$H(s) = \frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (6)$$

$$H(s) = \frac{K_1}{s - P_1} + \frac{K_2}{s - P_2} \quad (7)$$

将所有支路的响应电流波形相加,即是子模块 C 的总电流波形 I_c 。值得注意的是, I_c 也是流过稳态物理模型和子模块 B 的电流。

不难发现,下一步就是要根据流过稳态物理模

型和子模块 B 的电流去计算子模块 B 或者说稳态物理模型的电压波形 U_b 。

计算 U_b 的基本方法是建立由子模块 B 和稳态物理模型共同构成的电路矩阵来计算相关部件的电压波形。然而这需要对电容、电感和非线性元件进行等效处理。对于电容和电感,可以采用贝杰龙等效将其转换为电导和理想电流源^[7]。电感的贝杰龙等效模型如图 3 所示,参数可由式(8)和式(9)计算。

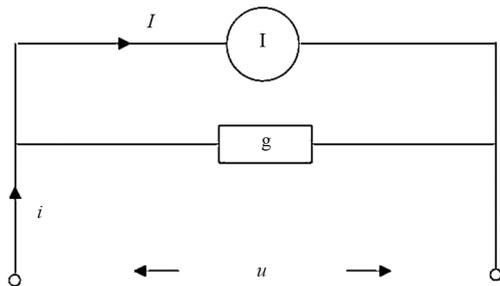


图 3 电感的等效电路

$$i_n = I_{n-1} + g_L u_n \quad (8)$$

$$I_{n-1} = i_{n-1} + \frac{\Delta n}{2L} u_{n-1}, g_L = \frac{\Delta t}{2L} \quad (9)$$

式中: L 为电感值; Δt 为采样周期。

可见,电流源的电流值与前一步的参数有关。电容的贝杰龙等效也与图 3 相同,其参数由式(10)和式(11)计算。

$$i_k = I_{k-1} + g_c u_k \quad (10)$$

$$I_{k-1} = - \left(i_{k-1} + \frac{2C}{\Delta t} u_{k-1} \right), g_c = \frac{2C}{\Delta t} \quad (11)$$

式中, C 为电容值。

此外,非线性电阻和非线性电感也需要进行等效处理才能被列入电路矩阵。采用牛顿-拉夫森(NR)等效转化法用于处理非线性电阻和非线性电感^[8]。具体而言,具有非线性表达式 $i_R = f_R(u_R)$ 的非线性电阻的等效模型如图 4 所示。

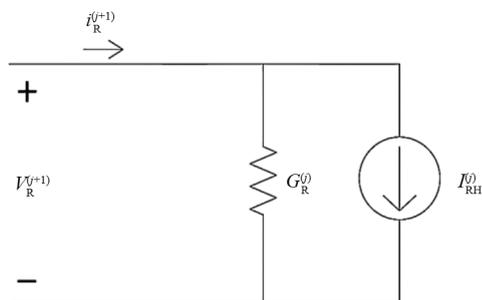


图 4 非线性电阻的等效电路

图 4 中:

$$G_R^{(j)} = (di_R/dv_R) | v_R^{(j)} \quad (12)$$

$$I_{Rh}^{(j)} = f_R(u_R^{(j)}) - G_R^{(j)} u_R^{(j)} \quad (13)$$

式中: $G_R^{(j)}$ 为非线性电阻增广电导; $I_{Rh}^{(j)}$ 为 $j+1$ 次迭代步骤中使用的非线性电阻历史电流。

而具有非线性表达式 $\frac{d\varphi}{dt} = v$ 的非线性电感等效模型如图 5 所示。

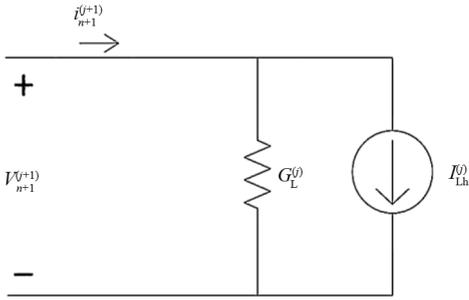


图 5 非线性电感的等效电路

图 5 中:

$$I_{Lh}^{(j)} = g(\lambda_R^{(j)}) - \Gamma^{(j)}(\lambda_{n+1}^{(j)} - \lambda_n) + G_L^{(j)} v_n \quad (14)$$

$$\Gamma^{(j)} = (d i_{n+1} / d \lambda_{n+1}) / \lambda_{n+1}^{(j)} \quad (15)$$

$$G_L^{(j)} = \frac{h}{2} \Gamma^{(j)} \quad (16)$$

式中: $G_L^{(j)}$ 为非线性电感增广电导; $I_{Lh}^{(j)}$ 为 $j+1$ 的迭代步骤中使用的非线性电感历史电流; g 为电感的非线性特性表达式; h 为离散数据时间步长; λ 为磁链; v 为电压。

通过贝杰龙等效和 NR 等效,所有电感、电容和非线性元件转换为线性电阻或电导和理想电流源。因此,可以基于支路电流法或节点电压法建立子模块 B 和稳态物理模型共同构成的电路矩阵。并且将总电流波形 I_o 作为已知量,求解计算出电路矩阵。

实际上,每一个采样点都对应一个电路矩阵,通过求解每个电路矩阵,可以计算出每一步模型的各节点电压和各分支电流,直到计算至波形最后一位。

还应该注意的,在电路矩阵的每一步求解过程中,还存在着非线性电阻和非线性电感的等效电路的多次迭代。每一次迭代实际上都是电路矩阵的一次求解。每次迭代后,图 4 和图 5 所示电路的参数都会被刷新,直到参数变得稳定,即计算出了非线性元件的工作点。至此,可以进入波形的下一个数据点执行新的计算。

当完成波形最后一个数据点的计算后,整个点

电路矩阵计算完成,此时子模块 B 和稳态物理模型的所有节点和支路的电流波形都已知,可计算出整个模型的电压波形 U_b 。而 $U_b + U_o$ 即是 PT 一次输入端子的电压波形。

3 试验验证

采用上述方法在 10 kV PT(JDZ-10) 上应用雷电冲击波形进行了试验。实验设置如图 6 所示。

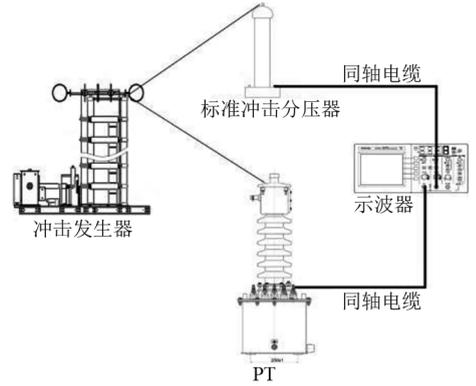


图 6 试验接线

实验采用 20 kV 便携式雷电脉冲发生器作为电源, Northstar 高压探头作为标准分压器。将波形参数为 $2/50 \mu s$ 的 5.8 kV、12 kV、18 kV 和 20 kV 的冲击波形依次施加于试验 PT。高压探头和 PT 二次侧均使用示波器测量并记录结果。示波器由高压探头触发。使用网络分析仪 (Keysight 5071C) 在 9 kHz ~ 2 MHz 内测量 PT 的 S 参数,且测量期间,PT 一次侧和二次侧断开其他连接。

由示波器记录的在试验雷电冲击波形作用下 PT 二次侧输出波形和经过第 2 章波形恢复计算方法的恢复波形如图 7 和图 8 所示。

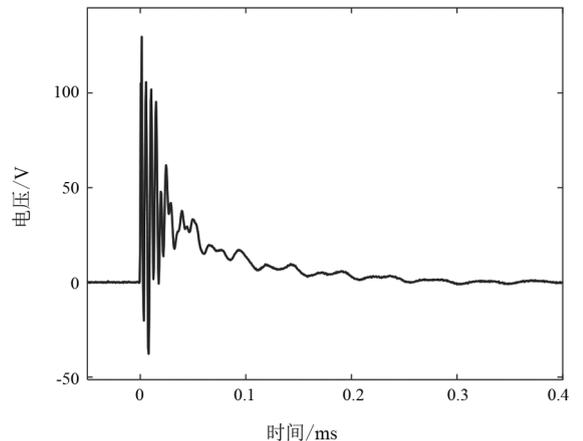


图 7 PT 输出波形 (5.8 kV 输入)

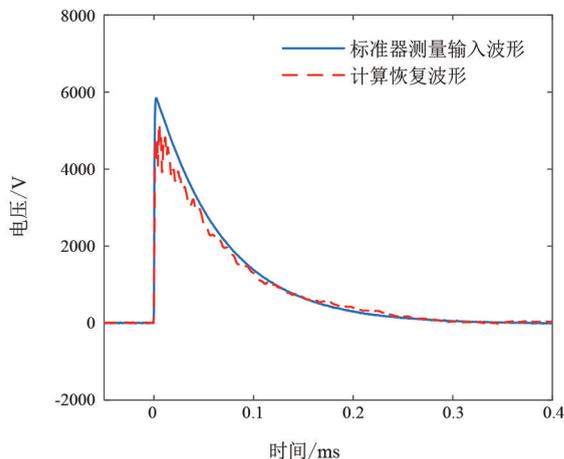


图 8 典型恢复计算波形(5.8 kV 输入)

从图 7 可以看出,PT 的输出波形已经出现了明显的振荡和变形,已与图 8 中的输入冲击波形产生明显的差异。而经过计算得到的输入波形与高压探头测量得到的输出波形在波形上较为一致。

表 1—表 3 总结了不同幅值冲击电压下,高压探头测得的波形和计算恢复得到的波形的幅值和时间参数之间的差异。

表 1 幅值比较

输入波形幅值/V	恢复计算输入波形幅值/V	误差/%
5849	5283	9.67
11 784	10 665	9.50
17 270	16 810	2.67
20 600	19 318	6.22

表 2 上升时间比较

输入波形上升时间/ μs	恢复计算输入波形上升时间/ μs	误差/%
2.00	2.02	1.00
2.00	2.03	1.50
2.00	2.03	1.50
2.00	2.04	2.00

表 3 半波时间比较

输入波形半波时间/ μs	恢复计算输入波形半波时间/ μs	误差/%
48.3	49.2	1.86
49.8	49.0	1.00
51.1	48.6	4.89
53.0	51.1	3.58

可以发现,计算恢复波形在时间参数上显示出

良好的精度,而在幅值上精度欠佳,但是误差都在 10% 以内。

4 结 论

上面提出了一种包括非线性特征的基于宽频模型数值算法的 PT 宽频化测量扩能方法。首先,建立非线性宽频等效模型,并基于该模型通过逆算法计算出 PT 一次侧输出电压波形;然后,详细介绍了 PT 模型的建立方法及逆算法,同时给出了电容、电感和非线性元件的等效方法;最后,以标准雷电冲击为验证源,在 10 kV PT 上进行了所提方法的验证实验。实验结果验证了所提方法在 PT 试验样机上的有效性。

参考文献

- [1] 范鹏,刘飞,王建,等.大规模新能源接入系统暂态过电压研究综述[J].电瓷避雷器,2023(6):94-102.
- [2] 杨大业,项祖涛,马世英,等.新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(3):127-134.
- [3] 赵晋泉,朱尧靓,潘尔生,等.适用于大规模新能源接入直流送端电网的暂态压升严重性指标研究[J].南方电网技术,2020,14(12):1-9.
- [4] 李佑准.暂态过电压监测与记录系统研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- [5] 穆舟,江波,赵伟,等.电力系统暂态过电压测量技术综述[J].电测与仪表,2022,59(5):1-13.
- [6] 潘飞,穆舟,刘浩,等.基于二端口散射参数的 CVT 宽频暂态模型[J].四川电力技术,2021,44(4):11-15.
- [7] 张斌,贝杰龙算法在乐山 500 kV 变电站雷击过电压分析中的应用研究[D].成都:四川大学,2006.
- [8] 陈毅苇.电磁暂态计算非线性模型研究[D].济南:山东大学,2008.

作者简介:

穆舟(1991),男,博士,高级工程师,研究方向为高电压技术、暂态过电压测量技术等;

姜聿涵(1989),女,硕士,高级工程师,研究方向为过电压在线监测。

(收稿日期:2024-06-26)

计及三相隔离变压器保护的铁磁谐振防护措施

苏学能¹, 张 华¹, 王 晶², 于宗民², 龙 呈¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要:在某些森林草原配电网中,会通过使用三相隔离变压器提高高阻接地故障下的故障点零序电压,从而有效提高高阻接地故障的识别准确率,降低因故障引发山火的风险。但由于三相隔离变压器将变电站各馈线隔离成独立的小型子网络,会使每条馈线对地电容减小,导致在故障消除后馈线对地电容更容易与电压互感器产生铁磁谐振。针对这个问题,首先建立了森林草原配电网的仿真模型,还原了配电网在高阻接地故障下的实际运行态势,模拟分析了三相隔离变压器对配电网在故障消除后产生的铁磁谐振现象的影响;然后,再基于零序电流变化监测高阻接地故障,采用形态滤波提取高频成分,并将其作为输入信号给控制模块;最后,控制模块根据输入信号控制电压互感器与铁磁谐振消除装置之间的断路器,从而实现了铁磁谐振自动消除操作,同时也避免了非故障期间的电能损失。

关键词:铁磁谐振; 森林草原配电网; 高阻接地故障; 隔离变压器

中图分类号: TM 77 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)02-0075-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250211

Protective Measures Against Ferroresonance Considering Three-phase Isolation Transformer Protection

SU Xueneng¹, ZHANG Hua¹, WANG Jing², YU Zongmin², LONG Cheng¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: In some distribution networks in forests and grasslands, the zero-sequence voltage at the fault point under high-impedance grounding fault can be enhanced by employing three-phase isolation transformers, which effectively improves the identification accuracy of high-impedance grounding faults and reduces the risk of wildfires caused by such faults. However, as the three-phase isolation transformer isolates each feeder of the substation into a separate small sub-network, the capacitance to ground on each feeder is diminished, which makes the capacitance to ground on the feeder be more vulnerable to generate ferroresonance with potential transformer once the fault is eliminated. Aiming at this issue, firstly, a simulation model of distribution network in forests and grasslands is established to replicate the actual operation of distribution network during a high-impedance grounding fault. Secondly, the impact of three-phase isolation transformer on ferroresonance phenomenon occurring in distribution network after fault elimination is simulated and analyzed. And then, the high-impedance grounding faults are monitored based on zero-sequence current variation, and the high-frequency components are extracted using morphological filtering, which serves as an input signal to control model. Finally, the control model regulates the circuit-breaker between potential transformer and ferroresonance elimination device based on the input signal, so as to facilitate the automatic elimination of ferroresonance while prevent power loss during non-fault periods.

Key words: ferroresonance; distribution networks in forests and grasslands; high-impedance grounding fault; isolation transformer

0 引言

位于森林草原的配电网会因为人口稀少、地形复杂、环境恶劣而难以进行定期和高效的预防性维护,造成用户侧电能质量下降。而导致电能质量下降的具体原因可能有:因持续过热而引起的变压器故障、电气设备老化以及绝缘性能急剧下降^[1-3]。而这些问题都可能是由于频繁的铁磁谐振而引起。

配电网中各种情况都可能引起铁磁谐振,例如接地故障消除、非同期合闸以及重负荷投切^[4]。单相接地故障约占配电网故障的 60%,而相间故障通常也是由于单相接地故障未及时切除所引起的^[5-6]。单相接地故障的故障电阻越低,越容易被检测出来,但越容易恶化为相间故障或引起森林草原的山火。森林草原配电网发生的接地故障通常是高阻接地故障,这类故障难以准确识别、选线,若长时间带故障运行会导致电气设备损坏、用户侧电能质量下降。

配电网中铁磁谐振引起的过电压和过电流会导致电气设备过热、老化、绝缘能力降低甚至损坏^[1,7]。文献[8]提出在配电网中通过选择电气元件来避免出现铁磁谐振。选择不同的电气元件类型也可以降低铁磁谐振的风险或者减轻其影响,例如选用不同类型的变压器^[9]。文献[10]表明,气隙电感对不对称运行和铁芯饱和状态下的变压器有重要影响。并且气隙电感与可饱和变压器的电感密切相关,而可饱和变压器的电感是产生铁磁谐振必要条件之一。配电网架空线路含有对地电容,电压互感器具有低励磁电流、高磁化和电感非线性特性^[11]。系统中电容和电感相等时,会产生一个弱阻尼谐振电路,当系统电压、电流、频率发生变化时就可能导致铁磁谐振。铁磁谐振还取决于配电网所采用的接地方式,同时受电压互感器铁芯与系统对地电容之间相互作用的影响。产生铁磁谐振时,电压水平可达 1.5~4.0 pu^[12-14]。

铁磁谐振的暂态抑制模型因其特殊性而各不相同。文献[15]提出了一种使用直流电抗器、隔离变压器和阻尼电阻的消谐模型,还添加了一些电力电子元件,以提高其主动消谐的效率。文献[12]中探讨了双馈感应发电机风能转换系统中的消谐方法,

得出的结论是与单独使用电阻相比,采用电阻和电感串联的开口三角形结构的三级绕组对铁磁谐振消除效率较低。文献[14]提出了一种由金属氧化物避雷器与串联电阻器和电容器并联组成的消谐装置。文献[16]提出了带有电力电子器件的 LC 串联电路来消除谐振。文献[17]提出了基于忆阻模拟器的消谐装置。文献[18]提出了基于反激电阻仿真器的消谐装置。以上每种消谐方式都是基于特定情况,若直接在其他情况中使用,难以保证有效性。

文献[4]提出了一种基于三相隔离电源变压器结构和零序电压变化矢量化的高阻接地故障识别方法。下面将文献[4]提出的方法在 PSCAD/EMTDC 中复现,并在此基础上提出了一种铁磁谐振的抑制措施。通过建立森林草原配电网的仿真模型,分析了高阻接地故障消除后铁磁谐振的影响,并提出了一种基于零序电流变化的主动监测策略,实现了铁磁谐振的自动消除,避免了非故障期间的电能损失。将所提方案在 PSCAD 中进行仿真验证,结果表明:该方案对铁磁谐振的抑制非常有效,并且可以避免非故障期间的电能消耗。

1 网络模型

10 kV 森林草原配电网的简化等效 PSCAD/EMTDC 模型如图 1 所示。实际工程中,馈线大多是以架空线的形式敷设。文献[4]通过在配电系统中引入三相隔离变压器,以有效隔离故障线路和正常线路的零序电流,限制故障电流的流动,从而减少零序电流对其他线路的干扰,进而提高高阻接地故障的检测灵敏度。该方法对高阻接地故障的识别非常有效,但加入隔离变压器后会对系统造成影响,使系统更容易引起铁磁谐振。

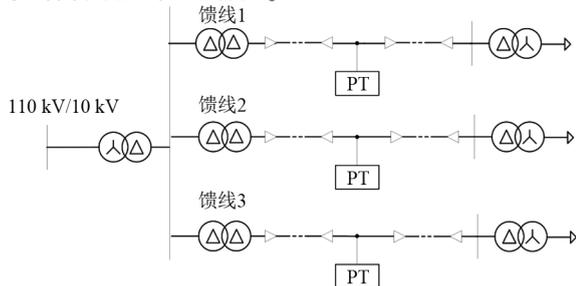


图 1 带有隔离变压器的三馈线配电网 PSCAD 简化模型

图 1 中,PT 模块为馈线上的三相电压互感器,其内部结构如图 2 所示。在 PSCAD 中采用 3 个单相双绕组统一磁路模型(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)变压器,星形连接组成三相电压互感器。其内部参数设置如表 1 所示。

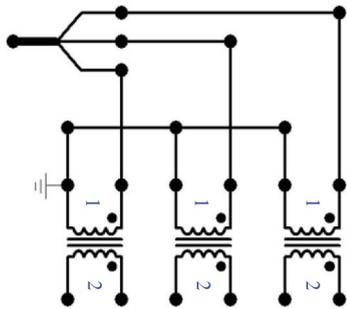


图 2 电压互感器结构

表 1 单相双绕组 UMEC 变压器参数

参数	取值
变压器容量/MVA	500
一次电压/kV	5.77
二次电压/V	57.7
基本工作频率/Hz	50.0
漏电抗/(pu)	0.10
无负荷损失/(pu)	0.001
铜损/(pu)	0.027

为更加便于分析隔离变压器对系统的影响,将图 1 中加入隔离变压器之后的一条馈线模型展示出来,如图 3 所示,其中: g_f 为单相接地故障电阻; C_A 、 C_B 、 C_C 分别为线路的三相对地电容。

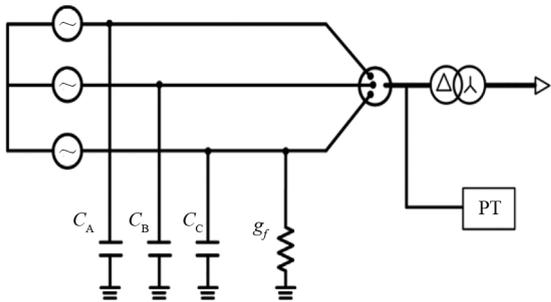


图 3 单馈线模型

为了更好计算线路上的电容,采用文献[19]中的方法计算架空线上的电容,并忽略接地和中性点的影响。架空线的横截面如图 4 所示,其中: L_A 、 L_B 、 L_C 为架空线的三相导线; $G1$ 、 $G2$ 为架空地线。

以 A 相导线 L_A 为例,计算其对地电容 C_A 。

$$C_A = C_u D_{LA} \quad (1)$$

式中: C_u 是单位线路上的对地电容; D_{LA} 为 L_A 总长度。

$$C_u = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{xyz}}{r}} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为导体的介电常数, $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$; x 、 y 、 z 分别为 L_A 与 L_B 之间、 L_A 与 L_C 之间、 L_B 与 L_C 之间的距离; r 为 L_A 、 L_B 和 L_C 的半径; C_B 、 C_C 计算方式与 C_A 相同。

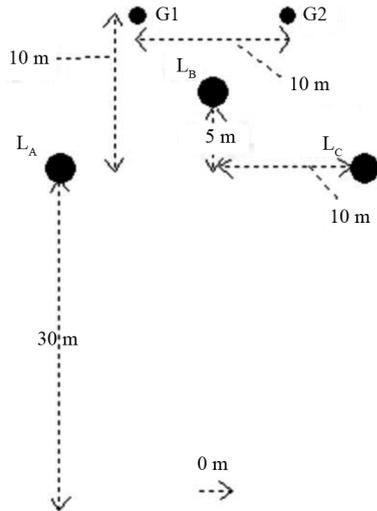


图 4 架空线横截面

根据图 3 可得,如果没有对系统使用隔离变压器进行子网划分,那么 C_A 将是变电站后所有线路的 A 相对地电容。不加隔离变压器的馈线示意图及馈线 1 的 A 相简化模型如图 5 所示。

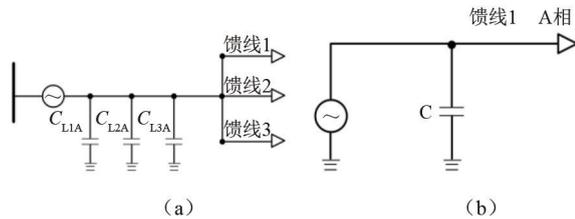


图 5 不加隔离变压器的馈线

图 5 中, C_{L1A} 、 C_{L2A} 、 C_{L3A} 分别为 3 条馈线上的 A 相电容; $C = C_{L1A} + C_{L2A} + C_{L3A}$ 。

C 和 C_A 的关系为

$$C_A = \frac{C}{N_f} \quad (3)$$

式中, N_f 为同一个变电站所接的馈线总数。由此分析出,在馈线前端加入隔离变压器后,会使线路对地电容减小。根据文献[3]可知,系统对地电容减小会使系统更容易达到铁磁谐振的激发条件。

2 铁磁谐振抑制方法

铁磁谐振的激发需要一定条件,这里以单相高阻接地故障的清除作为铁磁谐振激发条件进行研究。而系统中的零序电流是伴随着单相高阻接地故障的。因此,所提出的消谐装置谐振抑制方法是基于对系统中零序电流的检测。谐振抑制电路如图 6 所示。

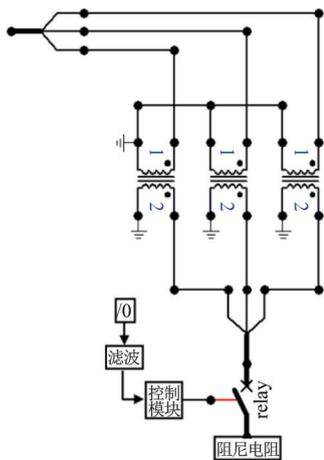


图 6 谐振抑制电路

由于故障时产生的零序电流会出现高频振荡对控制模块产生影响,因此将其作为控制模块的输入信号,并采用形态学滤波将高频部分滤除,实现方法为

$$N_r = \frac{1}{2} \times [(I_0 \oplus \beta) + (I_0 \ominus \beta)] \quad (4)$$

式中: N_r 为滤除高频噪声后的零序电流信号; I_0 为零序电流信号; β 为形态学滤波中的三点线型结构元素集合; $(I_0 \oplus \beta)$ 、 $(I_0 \ominus \beta)$ 分别表示形态学滤波中 β 对信号 I_0 的膨胀和腐蚀运算。

$$I_0 \ominus \beta = \bigcap_{b \in \beta} I_{0b} = x: \beta_x \subset I_0 \quad (5)$$

$$I_0 \oplus \beta = \bigcup_{b \in \beta} I_{0b} = x: \beta_x \cap I_0 \neq \emptyset \quad (6)$$

式中: I_{0b} 为 I_0 中与 β 对齐的子集; β_x 为结构元素 β 在特定位置 x 的子结构元素; \bigcap 是 β 的镜像集合。

然后再将滤除高频噪声后的零序电流信号输入至控制模块,控制模块流程如图 7 所示。

将滤除高频噪声后的零序电流信号输入至控制模块后,若信号产生阶跃变化并恢复,表示系统发生故障并及时切除,则在检测到信号阶跃变化时立即闭合断路器,将阻尼电阻接至电压互感器并在检测

到信号消失后延迟 2 s 断开断路器;若信号产生阶跃变化未恢复,并连续产生 5 次以上阶跃变化,表示系统发生故障且未及时切除,则延时 12 s 后断开断路器。

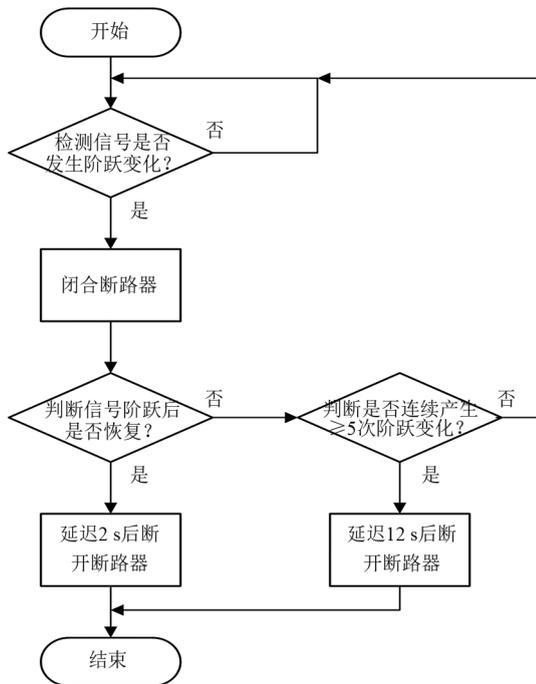


图 7 控制模块流程

所提阻尼电阻的最小值 R 计算式为

$$R = \frac{U_s^2}{(k \times P_1) - P_m} \quad (7)$$

式中: U_s 为电压互感器二次侧额定电压; k 为介于 0.25 和 1.00 之间的因子; P_1 为电压互感器的额定输出功率; P_m 为电压互感器测量所需功率。

3 算例分析

为了验证所提方法的有效性,以图 1 所示系统作为仿真系统,采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真,并将 3 条馈线从上至下命名为馈线 1、馈线 2、馈线 3,所有仿真的接地故障电阻均设置为 5 k Ω 。

3.1 由于故障清除而引起的铁磁谐振

算例 1:模拟正常情况下配电网发生单相高阻接地故障并清除;将故障设置在馈线 2 的 B 相,开始时间是 0.1 s,持续 0.1 s。3 条馈线上 B 相电压、电流在故障前后的仿真波形如图 8 所示。

在发生故障后,馈线 2 的 B 相在清除瞬间发生铁磁谐振,其电压峰值可达 2 倍正常值并且短时间不会衰减。

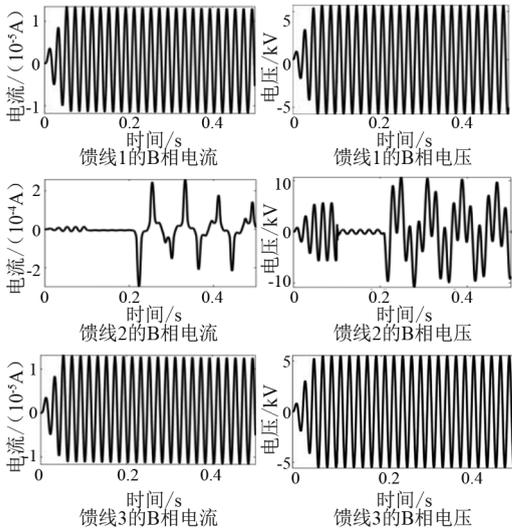


图8 算例1仿真波形

3.2 隔离变压器对系统的影响

算例2:删除馈线1、馈线2上的隔离变压器,再按第3.1节中算例1的工况进行仿真。所得3条馈线的B相电流、电压波形如图9所示。

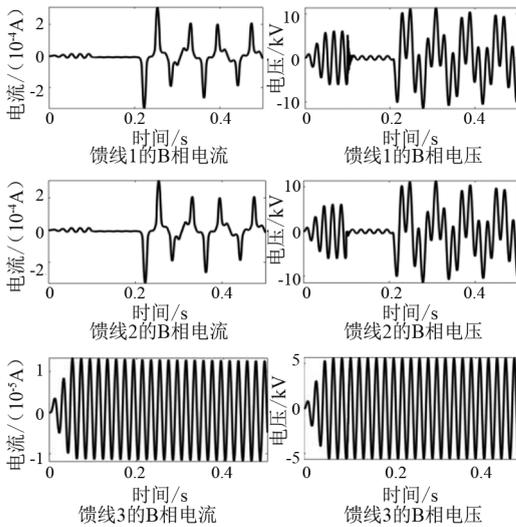


图9 算例2仿真波形

由图9可知:若馈线上没有隔离变压器,那么故障电流、电压就会在各个馈线上传播;反之则不会。

3.3 验证消谐装置有效性

算例3:为了便于观察和控制变量,先删除3条馈线上的隔离变压器,启用图6所示消谐装置,再按照第3.1节中工况进行仿真。启用消谐装置前,3条馈线B相电流、电压波形如图10所示。

在馈线2所连接的电压互感器上启用所提消谐装置,然后观察馈线2的各相电压、电流,如图11所示。

从图10、图11中可以看出:启用了所提消谐装置后,谐振现象得到明显改善,在单相接地故障切除

后很快便恢复至故障前的状态。

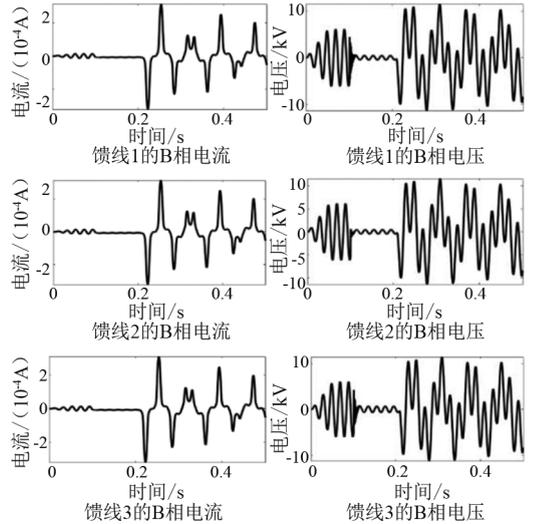


图10 启用消谐装置前仿真波形

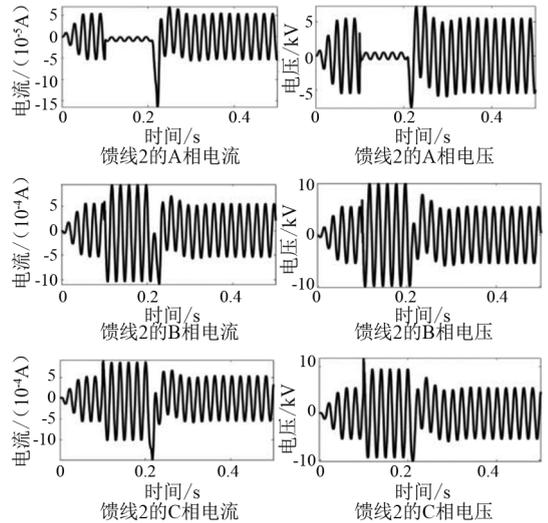


图11 启用消谐装置后仿真波形

3.4 适用性分析

中性点不接地系统在遇到不对称故障时,如单相接地、单相断开或跳闸、间歇性放电和严重的三相负载不平衡,都可能会导致系统中的铁磁谐振。因此,有必要分析所提方法在其他场景中的适用性。

算例4:馈线1分别发生单相断线故障和三相不平衡负载投切,其三相电压仿真波形如图12所示。

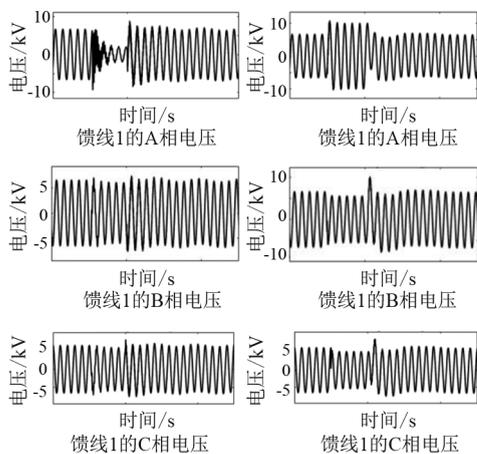
从图12中可以看出,所提方法在单相断线故障和三相不平衡负载投切下仍然适用。因为所提的铁磁谐振自动消除方法是基于零序电流的,而不对称故障都会产生类似于单相接地故障的零序电流。

3.5 考虑光伏接入对所提方法有效性的影响

目前,分布式光伏在新型配电网中所占比例越来越高,因此有必要考虑分布式光伏接入配电网是

否对所提方法有效性产生影响。

算例 5: 在图 1 所示仿真系统中馈线 2 的三相隔离变压器之后接入分布式光伏, 其余仿真条件与算例 3 相同, 并启用消谐装置。此时, 馈线 2 的各相电压仿真波形如图 13 所示。



(a) 单相断线故障 (b) 三相不平衡负载投切

图 12 算例 4 仿真波形

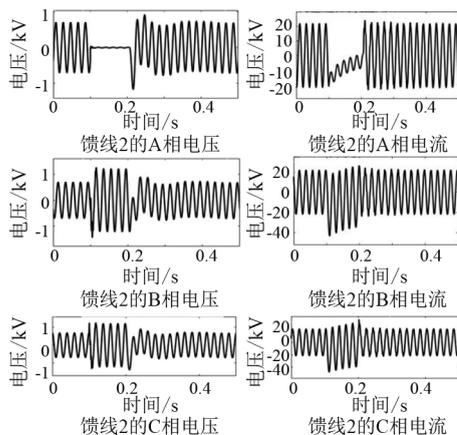


图 13 算例 5 仿真波形

由图 13 可见, 由铁磁谐振产生的过电压、过电流仍然可以被有效限制, 与第 3.3 节中结果几乎一致。因此, 所提方法在配电网中不受分布式光伏接入的影响, 可用于接入分布式光伏的新型配电网。

4 结 论

上面针对森林草原配电网中在单相接地故障消除后出现的铁磁谐振暂态现象, 进行了案例研究, 并通过理论分析和计算机仿真解决了这一问题。首先在 PSCAD/EMTDC 平台下, 复现了系统的正常运行模式; 然后提出并测试了一种消谐装置。结果表明, 所提方法不仅可以通过控制模块智能控制阻尼电阻

的连接达到消谐目的, 并且在正常运行的情况下还不会为系统带来额外的负载。

参考文献

- [1] KOVÁČ M, ELESCHOVÁŽ, HERETÍK P, et al. Analysis and mitigation of ferroresonant oscillations in power system [C] // Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), May 12–14, 2014, Brno-Bystrc, Czech Republic. IEEE, 2014: 211–216.
- [2] MUNIR N A A, LESTARI D S, NURSITA E D. Ferroresonance in medium voltage transformer: A review of failure investigation, effect, and mitigation techniques [C] // 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), August 6–10, 2023, Denpasar Bali, Indonesia. IEEE, 2023: 711–716.
- [3] BERA P K, ISIK C, KUMAR V. Discrimination of internal faults and other transients in an interconnected system with power transformers and phase angle regulators [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3450–3461.
- [4] DUGAN R C. Examples of ferroresonance in distribution [C] // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No. 03CH37491), July 13–17, 2003, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2003: 1213–1215.
- [5] ZHANG H, SU X N, LI L J, et al. Three-phase isolated power transformer based novel structure for power distribution system and new theoretical/practical judgement criteria in detecting high-impedance earth faults [J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(12): 2997–3010.
- [6] MAHAYNI R E, GHEETH A, THOMAI J, et al. Ferroresonance measurements and modeling: A waveform is worth a thousand words [C] // 2018 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe), June 5–7, 2018, Antwerp, Belgium. IEEE, 2018: 1–10.
- [7] PORDANJANI I R, LIANG X D, WANG Y F, et al. Single-phase ferroresonance in an ungrounded system during system energization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3530–3537.
- [8] FERRACCI P. Ferroresonance [J]. Schneider Electric Cahier Technique, 1998, 190: 1–28.
- [9] WU Q, DESWAL D, YANG M, et al. Experimental study of magnetic effects of steel tanks on three-phase transformer transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 665–673.

基于多任务学习的变电站设备腐蚀检测

王志高^{1,2}, 兰新生^{1,2}, 张文瑄³, 王方强^{1,2}, 王玫³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 变电站设备的工作状态直接影响到电力系统的稳定性、可靠性、安全性及抵抗事故的能力。而在众多变电站设备故障原因中, 金属材料腐蚀是十分常见的一种。于是提出了一种基于深度学习的变电站腐蚀检测方法, 可以直接通过图像检测变电站设备的腐蚀位置以及腐蚀程度, 有效完成变电站设备的巡视和实时监控工作, 及时排除腐蚀风险, 从而保障变电站稳定运行。为了验证所提出方法的有效性, 采用经过裁剪、旋转、镜像扩充后的变电站设备腐蚀数据集对网络进行训练。最终结果表明, 所提出的网络能够准确地对变电站设备进行腐蚀区域检测以及腐蚀程度检测。

关键词: 语义分割; 腐蚀检测; HRNet; 深度学习

中图分类号: TG 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0081-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250212

Corrosion Detection of Substation Equipment Based on Multi-task Learning

WANG Zhigao^{1,2}, LAN Xinsheng^{1,2}, ZHANG Wenxuan³, WANG Fangqiang^{1,2}, WANG Mei³

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

2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The operational status of substation equipment directly influences the stability, reliability, safety and ability against accidents of power grid. Among numerous causes of substation equipment faults, corrosion of metal materials is a common issue. A method for substation corrosion detection based on deep learning is proposed, which can directly detect the corrosion location and corrosion degree in substation equipment through image detection, which can effectively accomplish the inspection and real-time monitoring of substation equipment, promptly eliminate potential hazards and ensure the stable operation of substation. In order to validate the effectiveness of the proposed method, the corrosion data set of substation equipment, which has been augmented through cropping, rotation and mirroring, is used to train the network. The results show that the proposed network can accurately detect the corrosion areas and corrosion degree of substation equipment.

Key words: semantic segmentation; corrosion detection; HRNet; deep learning

0 引言

随着科技的不断进步和电力行业的发展, 变电站设备的工作状态对于电力系统的稳定性、可靠性、安全性以及事故防范的能力至关重要。在变电站设备故障的众多原因中, 金属材料的腐蚀是一种常见且严重的问题。腐蚀不仅会导致设备的性能下降,

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521997230012)

还可能造成设备不可逆的损坏和电力系统中断。因此, 寻找一种有效、高效的腐蚀检测方法, 对于实现变电站设备的巡视、实时监控以及保障变电站的稳定运行具有重要意义。

传统的腐蚀检测方法包括人工检测、厚度测量、质量测量等, 但这些方法受经验、环境等因素的影响较大^[1-2]。随着检测方法的逐步发展, 电化学检测、电阻检测、超声检测、红外检测等方法逐渐被推广并应用^[3]。但该类方法存在价格昂贵、操作繁琐、易

受环境影响等缺点。而在变电站设备的正常工作环境中,腐蚀的加剧总是伴随着金属表面腐蚀形态和结构的变化^[4],这使得用数字图像对腐蚀程度进行判别成为了可能。数字图像处理技术早期主要用于局部腐蚀的研究。文献[5]开发了一种图像处理模型来检测铁锈,文献[4]则提出使用纹理分析的方法进行表面无损腐蚀监测。

随着计算机视觉技术的不断发展,各种图像处理算法逐渐运用于腐蚀检测中。利用图像数字处理技术,针对钢结构的锈蚀区域进行语义分割,可实现锈蚀部位的提取^[6-7]。文献[8]提取了材料锈蚀图像的颜色和纹理特征,并将其与材料锈蚀等级的标准图像特征进行了比较。文献[9]提出了一种基于深度学习的钢结构锈蚀检测方法,对图像中的锈蚀区域进行检测及分析。文献[10]用 AlexNet、ResNet-50、VGG-16 及 GoogLeNet 这 4 种不同的神经网络对桥梁钢结构的锈蚀进行检测,发现神经网络在公用设施结构锈蚀检测方面具有巨大的潜力。文献[11]提出了一种基于全卷积神经网络的语义分割方法,用于发现电线杆上的锈蚀区域。但是,上述方法均未能同时实现对变电站设备的腐蚀区域检测和腐蚀程度检测。

下面提出了一种基于深度学习的变电站腐蚀检测新方法,该方法可以通过对变电站设备的图像进行分析,直接检测出腐蚀位置和腐蚀程度,为变电站设备的维护和管理提供了一种可靠的手段。具体而言,采用了高分辨率网络^[12](high-resolution network, HRNet)模型作为基础模型,通过对模型的特征融合方式进行优化,实现识别腐蚀区域的同时判别腐蚀等级。此外,还添加了高效通道注意力(efficient channel attention, ECA)机制并采用动态加权平均(dynamic weight averaging, DWA)方法对两个任务的损失函数进行优化,以进一步提高模型的准确度和鲁棒性。

为了验证所提方法的有效性,使用经过多种数据增强技术处理后的变电站设备数据集对网络进行了训练,并进行了详细的实验和分析。结果表明,所提出的网络能够准确地对变电站设备中的腐蚀区域进行检测,并能够进行腐蚀程度检测。这些结果为变电站设备的维护、故障排除和管控提供了有力支持,将有助于保障电力系统的安全稳定运行。

1 HRNet 算法

HRNet 是一种用于人体姿势估计、目标检测、语义分割的多用途深度学习网络模型。与传统的金字塔结构或者自下而上的特征融合方法不同,HRNet 采用了高分辨率的特征图并在多个分辨率上并行操作,从而保留了更多的空间信息和细节。HRNet 能够在不丢失分辨率的情况下进行多尺度信息的融合,因而在关键点检测和目标检测等领域表现出色,尤其是在处理复杂工况和遮挡情况下的性能较为突出。

HRnet 算法的整体结构如图 1 所示,主要分为 4 个阶段(Stage):

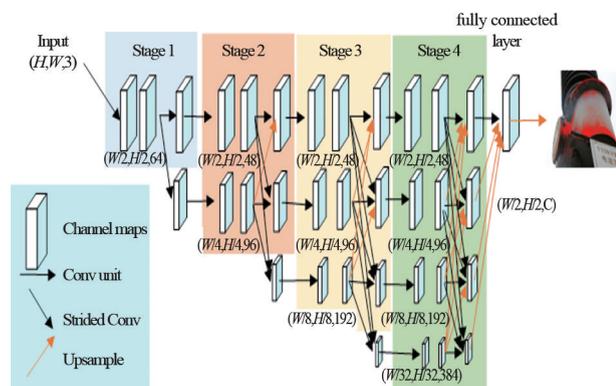


图 1 HRNet 网架结构

1) 输入数据:输入数据通常是目标检测的图像。这个输入图像首先被送入 HRNet 网络进行处理。

2) 特征提取:输入图像经过骨干网络进行特征提取,与其他网络在这一阶段对图像进行了下采样操作不同,HRNet 保留了高分辨率的特征图,从而保留了更多原始图像的细节和空间信息。

3) 多尺度特征融合:HRNet 在后续阶段进行了多尺度特征的融合。它并行地操作高分辨率的特征图和下采样后的特征图,并通过密集连接的结构将不同分辨率下的特征图进行全方位的交互和融合,从而生成丰富的多尺度特征表示。

4) 任务执行:经过多阶段的特征处理和融合后,HRNet 生成的多尺度特征表示将被用于执行具体的任务。这些任务将利用 HRNet 生成的丰富、准确的特征表示来进行具体的识别和分析。

综合而言,HRNet 中的数据流经历了特征提取、多尺度特征融合和任务执行等关键阶段,最终实

现了对输入图像的准确处理和特征表示生成。

1.1 高效通道注意力机制

通道注意力机制是一种用于加强神经网络模型对输入特征的关注度的技术。与传统的全局池化操作相比,通道注意力机制能够自适应地学习每个通道在特定任务中的重要性,并据此对特征图的不同通道加权。这样做有助于模型更好地捕捉输入数据中的关键信息,提升模型的表达能力和性能。具体可以表示为:

$$w = F_a(X, \theta) \quad (1)$$

$$X_a = wX \quad (2)$$

式中: w 为通道的权重; X 是输入; X_a 为是输出; θ 为参数; F_a 表示注意力模块。

在挤压和激励(squeeze and excitation, SE)网络中,注意模块由挤压模块和激励模块组成。在挤压模块中,全局空间信息通过全局平均池收集。激励模块通过全连接和非线性层捕捉信道关系并输出注意力向量。相对 SE 模块模型存在复杂度高的问题,ECA 具有更低的计算成本,但却能达到更好的性能。ECA 在每个通道上都通过一个自适应的加权平均操作来增强通道间的交互,调整不同通道的重要性使模型能够更有效地利用通道间的信息。该模块使用一维卷积来确定信道间权重,其计算公式为

$$F_a = \sigma\{C_{\text{onv1D}}[G_{\text{ap}}(X)]\} \quad (3)$$

式中: $\sigma(\cdot)$ 为 sigmoid 函数; $C_{\text{onv1D}}(\cdot)$ 为一维卷积,卷积核的大小为 k ; $G_{\text{ap}}(\cdot)$ 为全局平均池化。 k 的计算公式为

$$k = \left\lfloor \frac{\log_2 C}{\gamma} + \frac{b}{\gamma} \right\rfloor_{\text{odd}} \quad (4)$$

式中: C 为通道维数; γ 和 b 为超参数; $\lfloor \cdot \rfloor_{\text{odd}}$ 表示求距离最近的奇数。

1.2 多任务学习

为了同时识别腐蚀位置和腐蚀程度,需要神经网络同时输出两个任务的结果,因此提出了一种基于多任务学习的方法。多任务学习是多标签学习的一种推广形式。多标签学习是由 Caruana 首次提出的一种监督机器学习的变体。与传统的单标签学习任务即将对象映射到单个类别不同,多标签学习涵盖了更广泛的现象,并满足了更复杂的现实情境。在多标签学习中,训练集中的每个实例都与一组标签相关联,任务是根据所学知识对未见实例的标签集进行预测。

在多任务学习设置中,存在一种机制,可以将学习的知识转移到其他任务中。其核习思想是,每个任务都可以通过重用在其他任务训练过程中学到的知识而受益。在多任务学习中,需要定义一个综合考虑所有任务的损失函数。常见的方法包括手动加权平均、DWA 和动态任务优先级等。这使得网络能够在训练过程中全面优化多个任务的目标,而不会导致两个任务的学习速率不同。

DWA 方法会在每次训练迭代中动态调整每个任务的损失权重,以确保不同任务之间的学习率相等。具体来说,对于损失下降较快的任务,权重会降低;反之,权重会增加。DWA 方法可表述为

$$w_i(t) = \frac{N \exp \frac{r_{i,t-1}}{T}}{\sum_n \exp \frac{r_{n,t-1}}{T}} r_{n,t-1} - \frac{L_{n,t-1}}{L_{n,t-2}} \quad (5)$$

式中: w_i 为任务 i 的权重; $L_{n,t-1}$ 、 $r_{n,t-1}$ 分别为任务 n 在步骤 $t-1$ 的损失和训练速度; N 为任务数量; T 为常数,其越大,任务的权重越趋近于 1。

2 结合注意力机制的图像语义分割及分类算法

针对现有变电站设备腐蚀检测方法无法同时识别腐蚀区域以及腐蚀级别的问题,提出了一种基于 HRNet 的变电站设备腐蚀区域分割以及腐蚀程度检测方法。首先是在 HRNet 的第四阶段(Stage 4)后,添加了 ECA 机制以使模型在进行最后的特征融合时对图像通道尺度上的重要特征给予更高的关注度。另外,将两种不同的特征融合方式(neck)同时应用到了 HRNet 中,使其成为了一个具有 2 类输出的多任务神经网络,网络结构如图 2 所示,用以同时得到设备腐蚀区域以及腐蚀程度。

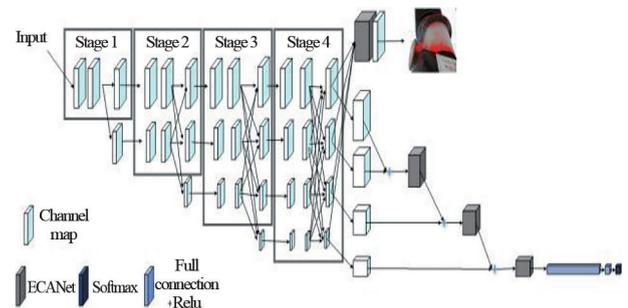


图 2 所提网络的结构

2.1 注意力机制的引入

针对 HRNet 中各个分支所包含的语义信息重要性及其在计算过程中所占权重不匹配的问题,引入了 ECA 模块以提升 HRNet 模型高分辨率与低分辨率分支之间的计算分配,同时尽量减轻由此带来的计算内容的增加。具体方法为在 HRNet 的多尺度特征融合阶段,添加 ECA 模块以重新分配各个分支信息的权重,计算过程如下:

给定输入特征图 $X \in R_{C \times H \times W}$,其中: C 为通道数; H 和 W 分别为高度和宽度。首先,计算全局平均池化得到通道的全局平均响应。

$$z = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W X_{ij} \quad (6)$$

式中, z 为一个长度为 C 的向量,包含了每个通道的全局平均响应。

接下来,通过一维卷积操作和 sigmoid 激活函数计算通道注意力权重。

$$\alpha = \sigma(w_2 * \delta(w_1 * z)) \quad (7)$$

式中: $\delta()$ 为 ReLU 激活函数; w_1 、 w_2 分别为一维卷积的权重; $*$ 为卷积操作; $\sigma()$ 为 sigmoid 激活函数; α 为一个长度为 C 的向量,包含了每个通道的注意力权重。

最后,使用计算得到的注意力权重对输入特征图进行加权。

$$Y = \alpha \odot X \quad (8)$$

式中: Y 为加权后的特征图; \odot 为逐元素相乘操作。

2.2 改进的 HRNet

在 HRNet 的特征融合阶段,通常为了满足不同任务的需求会采用不同的 neck 来使输出适配不同的任务,而在此处,由于需要同时完成语义分割和分类两个任务,因此将两种不同的 neck 同时应用在 HRNet 的特征融合阶段,使其具有两种不同类型的输出,结构如图 3 所示。

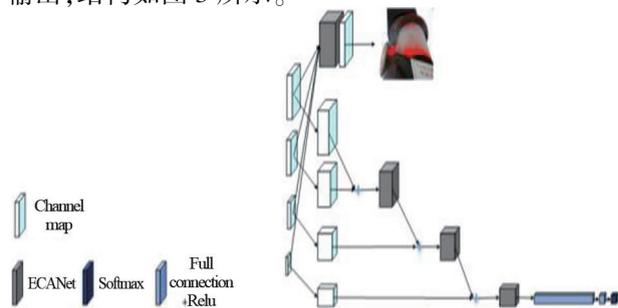


图 3 网络的 neck 结构

3 实验结果与分析

3.1 数据集

所使用的图像数据集由变电站工作人员现场拍摄的设备腐蚀图像、智能巡检机器人拍摄的设备腐蚀图像、变电站监控拍摄的设备图像以及轻载云台拍摄的设备腐蚀图像组成。其中:主变压器腐蚀图像 1845 张;互感器腐蚀图像 1526 张;隔离开关腐蚀图像 2031 张;断路器腐蚀图像 1388 张;电容器腐蚀图像 425 张,共 7215 张。每张变电站设备腐蚀图像的分辨率均为 4032 像素 \times 3024 像素,且都有完整的变电站设备以及腐蚀区域标注信息。将这些图像数据按照一定比例(3:1:1)划分为训练集(4329 张)、验证集(1443 张)、测试集(1443 张)。变电站设备腐蚀数据集使用三维标注软件 Labelme 进行标注。

此外,在模型训练过程中还对数据集进行了预处理,包括镜像、裁剪、缩放等数据增强操作。在预处理后又对数据集进行了筛选,使得各类设备以及各种腐蚀级别的数量达到均衡。

3.2 实验设备及参数设置

实验时使用的操作系统为 Windows 10,使用 Pytorch 1.7.1 和图形处理器(graphic processing unit, GPU)加速进行训练和测试。GPU 型号为 NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti(8G),软件环境为 Anaconda 3、Cuda 12.2 和 Python 3.8,开发工具为 PyCharm。

在保证能够正常训练的前提下,将初始学习率设置为 0.01,批大小(batch size)设置为 12,轮次(epoch)设置为 51 个,每 3 个 epoch 进行一次验证。

3.3 实验指标与损失函数

平均交并比(mean intersection over union, mIoU)是语义分割任务中常用的评价指标,它的定义是各个类别的交并比的平均值。设有 K 个类别,在每个类别上计算交并比 I_{oUk} ,然后取这 K 个 I_{oUk} 的平均值得到 m_{IoU} 。 m_{IoU} 的计算公式为

$$m_{IoU} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{T_{Pk}}{T_{Pk} + F_{Pk} + F_{Nk}} \quad (9)$$

式中: T_{Pk} 表示第 k 个类别真正例(正确分类)的像素数; F_{Pk} 表示第 k 个类别假正例(预测为正但实际为负)的像素数; F_{Nk} 表示第 k 个类别假负例(预测为负但实际为正)的像素数。通过计算各个类别的 I_{oU} 并求平均, m_{IoU} 能够更全面地评估模型在不同类别上的分割性能。

Dice 损失函数是一种常用于语义分割任务的损失函数,它根据预测分割区域和真实分割区域的重叠情况来衡量分割的相似度。具体来说,Dice 损失函数使用 Dice 系数作为评价指标,将其转化为损失值。下面是对 Dice 损失函数的详细解读。

设预测分割区域的二值化结果为 P ,真实分割区域的二值化结果为 G 。Dice 系数的计算式为

$$D_{ice} = \frac{2 \times |P \cap G|}{|P| + |G|} \quad (10)$$

式中: $|P \cap G|$ 为预测分割和真实分割的交集的像素数,也就是正确预测的像素数; $|P|$ 为预测分割区域的像素数; $|G|$ 为真实分割区域的像素数; D_{ice} 为 Dice 系数,取值范围为 $[0, 1]$, 1 表示完全匹配, 0 表示完全不匹配。

一般采用式(11)将 Dice 系数转化为损失函数 L_{Dice} 。

$$L_{Dice} = 1 - D_{ice} \quad (11)$$

L_{Dice} 的取值范围为 $[0, 1]$, 0 表示完全匹配, 1 表示完全不匹配。该损失函数的目标是 minimized Dice 系数,即最大化分割的相似度。通过最小化 Dice 损失函数,可以引导模型学习更准确的分割结果,使得预测与真实分割区域之间的重叠更大,从而提升语义分割的准确性。

3.4 实验结果及分析

首先使用所提方法进行实验,选取 4329 张变电站设备腐蚀图像进行训练,1443 张图像作为验证集,1443 张图像作为测试集。语义分割以及腐蚀程度的实验结果如表 1 所示。

表 1 所提方法在测试集上的实验结果

实验项目	mIoU	Dice 系数	准确率
语义分割	0.809 5	0.938 2	—
腐蚀程度	—	—	96.83%

为了验证所提方法对网络改进的有效性,进行了对比基础的 HRNet 以及其他经典的语义分割网络的消融实验,以确定算法改进的贡献的合理性。各算法实验结果如表 2 所示。

表 2 所提方法与传统算法在测试集上的实验结果比较

网络	mIoU	Dice 系数
HRNet	0.786 3	0.910 1
DeepLabv3+	0.772 1	0.839 2
U-Net	0.771 8	0.783 1
所提改进 HRNet	0.809 5	0.938 2

根据实验结果,可以得出以下结论:

1) 观察实验数据显示,所提改进后的 HRNet 在语义分割任务中取得了明显的性能提升。新的模型 mIoU 和 Dice 系数分别比传统的 HRNet、DeepLabv3+ 和 U-Net 高出约 3.2% 和 2.1%, 这表明所做的改进策略在语义分割任务中显示出良好的效果。

2) 相对于经典的 DeepLabv3+ 和 U-Net 模型,改进后的 HRNet 在 mIoU 和 Dice 系数上都取得了更好的性能。这表明所提改进不仅仅是在 HRNet 上的优化,而且相对于其他经典的语义分割网络也具有一定的竞争力。

3) 改进后的 HRNet 在 Dice 系数上取得了显著的提升,进一步验证了改进后的模型在像素级别的预测准确性方面取得了较大改善,尤其是对于细微结构的预测效果更加出色。

4 结 论

上面针对同时检测变电站设备腐蚀区域及其腐蚀等级的难题,提出了基于改进 HRNet 的变电站设备腐蚀检测方法。该方法将变电站内智能巡检机器人、轻载云台、变电站内监控拍摄的变电站设备腐蚀图像作为输入,基于 HRNet 的多任务网络,检测腐蚀区域及腐蚀程度。同时采用两种不同的 neck 结构以使其同时具有语义分割和分类两类输出,并在原网络的基础上引入了 ECA 模块,在语义分割任务中取得了显著的性能提升,特别是在像素级别的精度上有了明显的改善。

参考文献

- [1] 王守琰. 金属材料自然环境腐蚀的图像识别[D]. 天津:天津大学,2003.
- [2] 周立新,程江,杨卓如. 有机涂层防腐性能的研究与评价方法[J]. 腐蚀科学与防护技术,2004(6):375-377.
- [3] 刘浩宇,梁小峰,邵亚薇,等. 静水压力下 Q235 钢环氧涂层在 3.5%NaCl 溶液中的失效过程[J]. 中国腐蚀与防护学报,2010,30(5):374-378.
- [4] FELICIANO F F, LETA F R, MAINIER F B. Texture digital analysis for corrosion monitoring[J]. Corrosion Science, 2015, 93:138-147.
- [5] GAMARRA ASOSTA M R, VÉLEZ DÍAZ J C, SCHETTINI CASTRO N. An innovative image-processing model for rust detection using Perlin Noise to simulate oxide

- textures[J].Corrosion Science,2014, 88:141-151.
- [6] CHEN P H, YANG Y C, CHANG L M. Automated bridge coating defect recognition using adaptive ellipse approach[J].Automation in Construction, 2009, 18(5): 632-643.
- [7] SHEN H K, CHEN P H, CHANG L M. Automated steel bridge coating rust defect recognition method based on color and texture feature[J]. Automation in Construction, 2013, 31:338-356.
- [8] ZHANG X W. Evaluation of material surface corrosion based on image recognition [J] Advances Materials Research, 2014, 2990(889-890):1048-1051.
- [9] 王达磊, 彭博, 潘玥, 等. 基于深度神经网络的 锈蚀图像分割与定量分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(12):121-127.
- [10] HOLM E. Classification of Corrosion and Coating Damages on Bridge Constructions Using Deep Learning [D]. Trondheim:NTNU(Norway), 2019.
- [11] LE D D, NGO T A, NGO T S, et al. Deep learning in semantic segmentation of rust in images[C] //Proceedings of the 2020 9th International Conference on Software and Computer Application, February 18 - 21, 2020, Langkawi, Malaysia. ACM, 2020:129-132.
- [12] SUN K, XIAO B, LIU D, et al. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation [C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. IEEE, 2020:5693-5703.
- 作者简介:**
王志高(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电网设备腐蚀防护。
(收稿日期:2024-04-15)
-
- (上接第 80 页)
- [10] AKBARI M, REZAEI-ZARE A, CHEEMA M A M, et al. Air gap inductance calculation for transformer transient model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1):492-494.
- [11] OLIVEIRA H, SANTOS L H S, DE MATOS J G, et al. Challenges in medium voltage microgrids case study: alcântara launch center [C]//2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP), Nov. 26 - 29, 2003, Florianopolis, Brazil. IEEE, 2023:1-6.
- [12] MOSAAD M I, SABIHA N A, ABU-SIADA A, et al. Application of superconductors to Suppress ferroresonance overvoltage in DFIG-WECS [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2):766-777.
- [13] TORRES-GARCÍA V, SOLÍS-RAMOS N, GONZÁLEZ-CABRERA N, et al. Ferroresonance modeling and analysis in underground distribution feeders [J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2023, 10: 583-592.
- [14] KHURSHID Z M, AZIZ N F A, RHAZALI Z A, et al. Effect of GIC neutral blocking devices (NBDs) on power network ferroresonance in Malaysia [J]. IEEE Access, 2022, 10:77225-77238.
- [15] RADMANESH H, HEIDARY A, FATHI S H, et al. Dual function ferroresonance and fault current limiter based on DC reactor [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(9):2058-2065.
- [16] RADMANESH H. Distribution network protection using smart dual functional series resonance-based fault current and ferroresonance overvoltage limiter [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):3070-3078.
- [17] POORNIMA S, SATHYANANDAN L, SUGUMARAN C P. Ferroresonance mitigation in an inductive voltage transformer using memristor emulator [C]// 2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET), February 7-8, 2019, Ayderabad, India. IEEE, 2019:1-6.
- [18] BAYONA E, AZCONDO F J, PIGAZO A, et al. Ferroresonance mitigation device in voltage transformers with a flyback based resistor emulator [C]// 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), June 25-28, 2018, Padua, Italy. IEEE, 2018:1-5.
- [19] ILLIAS H A, BAKAR A H A, MOKHLIS H, et al. Calculation of inductance and capacitance in power system transmission lines using finite element analysis method [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(100): 278-283.
- 作者简介:**
苏学能(1991),男,博士,工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与并行计算;
张 华(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;
王 晶(1989),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析;
于宗民(1997),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析;
龙 呈(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为配电网运行及自动化。
(收稿日期:2024-06-11)

智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法

韩睿,姜振超,李小鹏,郑永康,吴杰

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:针对监控信息传输环节缺陷难以发现,且缺陷的处置高度依赖于调试人员的经验和技术水平的问题,提出了一种智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法。该方法通过建立监控信息的全链路配置信息流,实现监控信息在全站系统配置描述文件、远动配置描述文件和监控信息表中的一致性校核;通过建立在变电站各通信层之间传送过程的监控信息流,实现监控信息的全链路监测;并基于全链路配置信息流与监控信息流的比对实现监控信息传输异常的诊断。通过实例分析,验证了所提方法能有效定位配置错位、二次回路接线错位等故障点,提高了监控信息传输缺陷排查的效率,具有一定的实用价值。

关键词:智能变电站;监控信息;监测;故障诊断

中图分类号:TM 63 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2025)01-0087-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250213

A Method for Full-link Monitoring and Fault Diagnosis of Supervisory and Control Information in Smart Substation

HAN Rui, JIANG Zhenchao, LI Xiaopeng, ZHENG Yongkang, WU Jie

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

Abstract: For solving the problem that the defects in the transmission link of supervisory and control information are difficult to be found and the solution of defects is highly dependent on the experiences and technical level of commissioning workers, a method for full-link monitoring and fault diagnosis of supervisory and control information in smart substation is introduced. By establishing the full-link configuration information flow of supervisory and control information, the consistency check among system configuration description, remote configuration description and monitoring information table is realized. By establishing the real-time supervisory and control information flow during the transmission of supervisory and control information between communication layers of substation, the full-link monitoring of supervisory and control information is realized. And intelligent diagnosis of abnormal transmission of supervisory and control information is realized based on the matching of full-link configuration information flow and real-time supervisory and control information flow. Through case analysis, it is verified that the proposed method can effectively locate the fault points such as the misalignment of configuration and secondary circuit wiring, and improves the efficiency of defect investigation in transmission link of supervisory and control information, which has certain practical value.

Key words: smart substation; supervisory and control information; monitoring; fault diagnosis

0 引言

随着调控一体化运行及变电站无人值守管理的逐步实施,监控信息的重要性愈发凸显。变电站投运前需要对变电站的监控信息进行验收,监控信息

工作具有监控信息点多、传输环节多的特点^[1-3]。近年来,已有较多关于变电站监控信息验收方法的研究^[4-10],变电站监控信息自动验收技术相关的行业标准及国家电网有限公司企业标准也陆续出台^[11-12],同时自动验收技术已逐步推广应用,一定程度上提高了监控信息验收效率。但是,验收过程中监控信息传输环节缺乏有效的监测和分析手段,

难以发现监控信息传输环节中存在的问题;同时缺陷的处置高度依赖于调试人员的经验和技术水平。因此,在监控信息验收工作中需要耗费较多的时间和精力查找故障点,验收效率已成为困扰验收人员的一大难点。虽然文献[13]通过建立功能关联模板库与实际报文进行比对,可以发现报文缺失、乱序、延时超长等问题,但由于监控信息数量较大,难以建立完整的模板库,且该方法未考虑配置错误的问题。

针对上述监控信息验收存在的问题,下面提出一种智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法。首先,建立全链路配置信息流,并校核监控信息在系统配置描述(system configuration description, SCD)文件、远动配置描述(remote configuration description, RCD)文件和监控信息点表中的一致性;然后,通过监控信息传输各环节报文建立监控信息流,实现对监控信息的全链路监视及自校核;最后,将监控信息全链路配置信息流与监控信息流比对,定位传输异常的环节。通过实例验证,所提方法实现了监控信息全链路监视,能有效识别配置错位、二次接线错位等传输环节中存在的问题,并快速定位缺陷位置,具有一定的实用价值。

1 全链路配置信息流及校核

保护、测控、数据通信网关机等设备的配置及监控信息表信息的正确性,是监控信息验收工作顺利开展的基础条件。SCD 文件是变电站配置描述文件,RCD 文件是数据通信网关机配置描述文件,监控信息表包括遥信、遥测、遥控(调)信息。因此,对监控信息在 SCD 文件、RCD 文件和监控信息表中的一致性校核是非常必要的。

监控信息的全链路配置信息流建立过程如下:

1) 根据实际触发的监控信息,查询其在监控信息表中对应的点号和中文描述。由点号和中文描述组成监控信息在监控信息表中的配置信息。

2) 在 RCD 文件中查询该点号对应的中文描述和 IEC 61850 路径名。由点号、中文描述、IEC 61850 路径名组成监控信息在数据通信网关机中的配置信息。

3) 在 SCD 文件中查找该 IEC 61850 路径名对应的间隔层设备模型中监控信息的中文描述、内部短地址。该中文描述、内部短地址组成监控信息在 SCD 文件中对应间隔层设备模型中的配置信息。

4) 在 SCD 文件中依据监控信息在对应间隔层设备模型中的内部短地址,查找在过程层设备模型中对应的中文描述。

通过上述过程,建立实际触发的监控信息的全链路配置信息流,全链路配置信息流模板如图 1 所示。

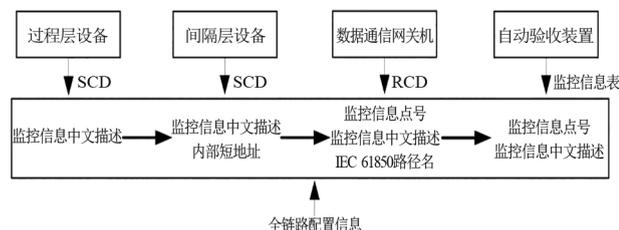


图 1 全链路配置信息流模板

将监控信息在 RCD 文件、SCD 文件中间隔层设备及 SCD 文件中过程层设备中的中文描述进行比对,若中文描述不一致,则提示配置信息异常。

2 全链路监视及校核

2.1 监控信息流建立

在变电站过程层网络、站控层网络的中心交换机上配置镜像端口,接入监控信息在过程层、站控层、调度数据网等三层传输环节的报文:自动验收装置接入过程层中心交换机,接收面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)、采样值(sampled value, SV)报文;自动验收装置接入站控层中心交换机,接收制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)报文;自动验收装置连接数据通信网关机输出口,接收 IEC 60870-5-104(以下简称 104)报文。对各传输环节的报文进行记录,实现监控信息的全链路监视。

自动验收装置与过程层中心交换机、站控层中心交换机、数据通信网关机的连接如图 2 所示。

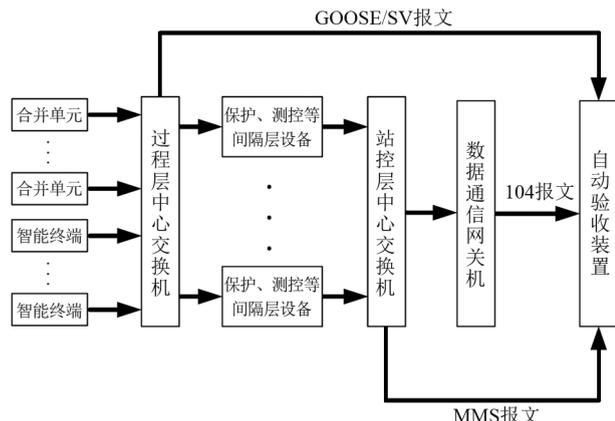


图 2 全链路监视

接入监控信息在过程层、站控层、调度数据网等三层传输环节的报文后,根据三层报文关联关系建立监控信息流,建立过程如下:

1) 解析 104 报文获取监控信息的点号和事件顺序记录(sequence of event, SOE) 时标,在监控信息表中查询该点号对应的中文描述,由监控信息的点号、SOE 时标、中文描述组成其在调度数据网层的信息记录。

2) 以监控信息 SOE 时标为依据,找出具有相同 SOE 时标的 MMS 报文、GOOSE 报文、SV 报文以及前一帧 GOOSE 报文。解析 MMS 报文、SV 报文获取监控信息在各报文中的中文描述;将两帧 GOOSE 报文进行对比,获取状态不一致的监控信息的中文描述。将中文描述作为监控信息在过程层、站控层的信息记录。

由监控信息在过程层、站控层、调度数据网层的信息记录共同组成监控信息流,其模板如图 3 所示。

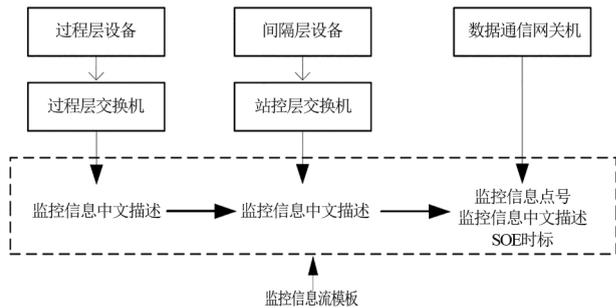


图 3 监控信息流模板

2.2 监控信息流自校核

经过全链路配置信息校核后,比对监控信息流各传输环节中文描述,结果判定如下:

1) 若各环节中文描述一致,则表示信息从源端设备发出到自动验收装置接收均保持一致;

2) 各环节中文描述不一致,即当前环节的信息与前一环节的信息不一致,表示两者间的二次回路出现异常,按照该逻辑,找出所有异常的二次回路。

然后,通过全链路配置信息流与监控信息流比对确定故障原因。

3 监控信息流与全链路配置信息流比对

将监控信息流与全链路配置信息流进行比对,结果判定如下:

1) 将监控信息在监控信息流各环节的中文描述与监控信息在全链路配置信息流各环节的中文描述分别进行比对,找出首个出现中文描述不一致的

环节,则代表该环节至前一正常环节之间的二次回路异常。

2) 由于变电站监控信息在各个传输环节的中文描述可能未统一,在这种情况下,建立监控信息流和全链路配置信息流后,不再进行全链路配置信息、监控信息流各自内部的中文描述一致性比对,只进行监控信息在监控信息流和全链路配置信息流各环节的中文描述的比对。

4 实例分析

为了验证所提智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法的有效性,以 SCD 文件配置错位、二次回路接线错位为例进行实例分析。

实例中涉及的 IEC 61850 路径名、内部短地址均为简写。

4.1 配置错位实例分析

以某变电站 SCD 文件中虚端子连接错位为例进行实例分析。实例中,5011 断路器第一套智能终端“50111 刀闸位置”虚端子与 5011 断路器测控装置“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”虚端子连接,5011 断路器第一套智能终端虚端子“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”与 5011 断路器测控装置“50111 刀闸位置”虚端子连接。

当合上 5011 断路器第一套智能终端处检修压板,5011 断路器第一套智能终端发出含“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”的 GOOSE 报文,经过程层交换机进入 5011 断路器测控装置。然后,5011 断路器测控装置发出含“50111 刀闸位置”的 MMS 报文经站控层交换机进入数据通信网关机,数据通信网关机转发 104 报文并进入自动验收装置,解析 104 报文获取点号“30”及其时标“10:11:22.303”,在监控信息表中点号“30”对应的中文描述为“50111 刀闸位置”。实际触发的信号为“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”,实际接收的信号与实际触发的信号不一致,启动故障诊断。

建立全链路配置信息流,过程如下:

1) 实际触发的监控信息的点号为“1400”,从数据通信网关机导出的 RCD 文件中查找点号为“1400”的信号的中文描述、IEC 61850 路径名。由点号“1400”、中文描述“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”、IEC 61850 路径名“5011CTRL/1\$ST\$Pos\$stVal”组成监控信息在数据通信网关机中的配置信息。

2) 依据第一步找出的 IEC 61850 路径名, 在 SCD 文件里面的 5011 断路器测控装置模型中找到对应的中文描述、内部短地址。该中文描述“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”、内部短地址“PI/GOINGGIO.DPCSO.stVal”为监控信息在 5011 断路器测控装置中的配置信息。

3) 依据第二步在 SCD 文件中找到的 5011 断路器测控装置模型中的内部短地址, 在 5011 断路器第一套智能终端模型中找到对应的中文描述, 该中文描述“50111 刀闸位置”为监控信息在 5011 断路器第一套智能终端中的配置信息。

配置错位后的“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”的全链路配置信息流如图 4 所示。

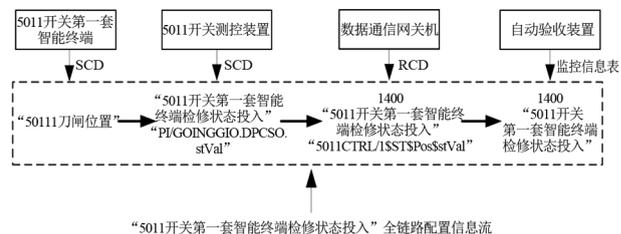


图 4 配置错位后的“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”全链路配置信息流

通过比对全链路配置信息流中各环节的中文描述, 发现监控信息在 5011 断路器第一套智能终端模型中的中文描述与其他环节的中文描述不一致。由此, 判断出误将 SCD 文件中 5011 断路器第一套智能终端虚端子“50111 刀闸位置”与 5011 断路器测控装置虚端子“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”连接。

所做分析中, 通过全链路配置信息流自校核定位故障点, 验证了所提方法可有效诊断由配置错位引起的故障。

4.2 二次回路接线错位实例分析

以某变电站接入 5011 断路器第一套智能终端的检修压板硬接线与 50111 隔离开关位置硬接线错位为例进行分析。

当合上 5011 断路器第一套智能终端检修压板, 5011 断路器第一套智能终端发出含“50111 刀闸位置”的 GOOSE 报文, 经过程层交换机进入 5011 断路器测控装置, 然后 5011 断路器测控装置发出含“50111 刀闸位置”的 MMS 报文经站控层交换机进入数据通信网关机, 数据通信网关机转发 104 报文并进入自动验收装置, 解析 104 报文获取点号、SOE 时标, 在监控信息表中对应点号的中文描述为“50111 刀闸位置”。实际触发的监控信息为“5011

开关第一套智能终端检修状态投入”, 实际接收的监控信息与现场实际触发的监控信息不一致, 启动故障诊断。

首先, 建立全链路配置信息流, 过程如下:

1) 根据实际触发的监控信息的点号, 在 RCD 文件中查找对应的中文描述、IEC 61850 路径名, 由点号“1400”、中文描述“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”、IEC 61850 路径名“5011CTRL/1\$ST\$Pos\$stVal”组成监控信息在数据通信网关机中的配置信息。

2) 依据第一步找出的 IEC 61850 路径名, 在 SCD 文件里面的 5011 断路器测控装置模型中找到对应的中文描述、内部短地址。该中文描述“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”、内部短地址“PI/GOINGGIO.DPCSO.stVal”为监控信息在 5011 断路器测控装置中的配置信息。

3) 依据第二步在 SCD 文件中找到的 5011 断路器测控装置模型中的监控信息的内部短地址, 在 5011 断路器第一套智能终端模型中找到对应的中文描述。该中文描述“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”为监控信息在 5011 断路器第一套智能终端中的配置信息。

正确配置下的“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”的全链路配置信息流如图 5 所示。

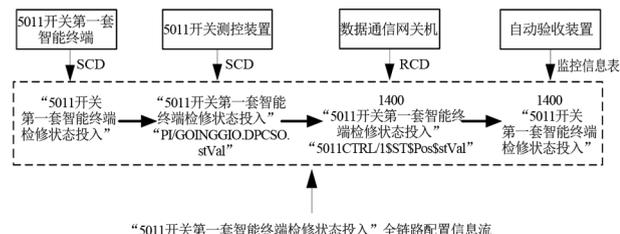


图 5 正确配置下的“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”全链路配置信息流

对监控信息在全链路配置信息流各环节的中的中文描述进行比对, 确认一致后进行下一步。

然后, 建立监控信息流, 过程如下:

1) 自动验收装置接收数据通信网关机输出的 104 报文。解析 104 报文获取监控信息的点号和 SOE 时标, 根据点号查找出监控信息表中对应的中文描述, 由监控信息的点号“30”、中文描述“50111 刀闸位置”、SOE 时标“10;11:22.303”组成其在调度数据网层的信息记录。

2) 自动验收装置接收站控层交换机输出的 MMS 报文, 依据第一步获取的 SOE 时标, 找出对应的 MMS 报文并解析获取其中文描述。由中文描述

“50111 刀闸位置”作为监控信息在站控层的信息记录。

3) 自动验收装置接收过程层交换机输出的 GOOSE 报文,依据 SOE 时标找出对应的 GOOSE 报文以及前一帧 GOOSE 报文,将两帧 GOOSE 报文进行对比,获取状态不一致的监控信息的中文描述。由中文描述“50111 刀闸位置”作为监控信息在过程层的信息记录。

“5011 开关第一套智能终端检修状态投入”的监控信息流如图 6 所示。

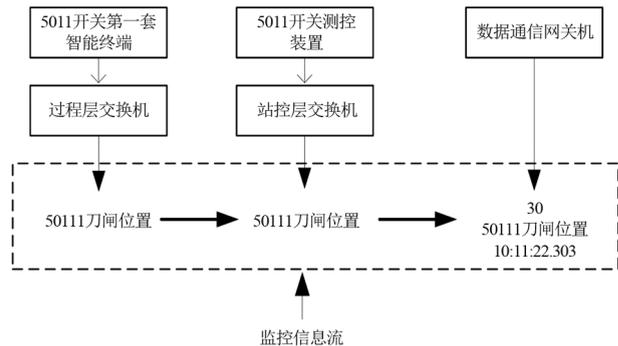


图6 “5011 开关第一套智能终端检修状态投入”的监控信息流

通过对监控信息流各环节的中文描述进行对比,确认各环节的中文描述一致,表明监控信息从断路器第一套智能终端发出至自动验收装置接收的各环节均传输正常。

最后,将监控信息流与全链路配置信息流进行比对,可发现断路器第一套智能终端配置信息与发出信息不一致,确断路器第一套智能终端前端回路异常。

通过全链路配置信息流自校核、监控信息流自校核以及监控信息流与全链路配置信息流的比对,定位出故障位置,表明所提出的故障诊断方法可以有效解决监控信息验收传输环节缺陷定位难的问题。

5 结论

上面提出一种智能变电站监控信息全链路监测及故障诊断方法,通过对变电站内 SV、GOOSE、MMS 和 104 报文的记录分析实现监控信息全链路监视,通过配置信息校核、监控信息流自校核、配置信息与监控信息流比对等 3 个方面查找监控信息传输异常环节,可发现 SCD 和数据通信网关机配置错位、二次回路接线错位等缺陷,大大减轻了调试人员的工作量,提高了故障定位效率,且受人为因素影响较

小。所提方法可应用于变电站端模拟主站验收监控信息及主站验收监控信息时的故障定位,即使当同一监控信息在不同设备中的中文描述不同时,该方法仍然可有效进行故障诊断。实例证明了所提方法对监控信息传输异常诊断的有效性。

参考文献

- [1] 陈月卿,陈建洪,邱建斌,等.一种智能变电站监控信息自动验收系统的研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):143-150.
- [2] 田茜.基于智能变电站的监控信息一体化自动验收系统[J].电力与能源,2022,43(2):129-131.
- [3] 李振文,徐彪,刘力,等.基于“三层两网”结构的智能变电站监控信息分步验收方法[J].湖南电力,2021,41(6):58-63.
- [4] 彭志强,刘翌,罗俊,等.智能变电站监控信息自动验收体系架构及关键技术[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):174-181.
- [5] 仲梓维,罗俊,高翔,等.变电站监控信息自动验收方法研究和应用[J].电力与能源,2019,40(1):28-31.
- [6] 高峰.变电站监控信息接入自动验收方法研究[J].电子设计工程,2018,26(21):151-155.
- [7] 高翔,罗俊,仲梓维.变电站监控信息接入自动验收方法探索[J].电力与能源,2017,38(03):263-267.
- [8] 熊焰,席明湘,秦泽宇,等.变电站监控信息自动验收技术的应用[J].大众用电,2020,35(12):22-23.
- [9] 夏立萌,宋巍,郭飞,等.智能变电站监控信息自动验收方法研究[J].电气工程学报,2020,15(2):1014-109.
- [10] 唐升卫,李波,张勇志,等.智能变电站监控信息一体化自动验收测试系统研究[J].自动化技术与应用,2022,41(8):161-165.
- [11] 国家电网运行与控制标准化技术委员会.变电站监控信息自动验收技术规范:DL/T 2413—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [12] 国家电网有限公司科技部.变电站监控信息自动验收技术规范:Q/GDW 12060—2020[S].
- [13] 吴杰,姜振超.智能变电站保护与控制障碍在线诊断与预测方法研究[J].电测与仪表,2019,56(5):70-76.

作者简介:

韩睿(1986),男,硕士,高级工程师,从事继电保护及自动化技术研究工作;

姜振超(1981),男,硕士,正高级工程师,从事电力系统继电保护、智能变电站新技术研究工作;

李小鹏(1987),男,博士,正高级工程师,从事交直流混联电网控制保护技术研究工作。

(收稿日期:2024-05-21)

基于变电站雷电安全运行年的避雷线塔 空气击距简化计算方法

邢毅, 骆玲, 丁晓飞, 李良霄, 唐紫嫣

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:针对规范中对避雷线塔与保护设备间的空气击距取值要求不明确,在实际变电工程中存在裕度过大的问题,提出了一种空气击距简化计算方法。首先,在分析避雷线塔的冲击接地电阻影响因素和避雷线的雷电分流效应的基础上,采用基于变电站雷电安全运行年数的概率法,根据变电站的具体布置尺寸,对比变电站实际每年遭受雷击的概率,确定避雷线塔空气击距的临界雷击的概率;然后,通过雷电流的概率分布,求得对应临界雷电流的幅值,并根据雷击避雷塔暂态电位简化模型和雷电冲击穿场强,获得避雷线塔与被保护设备间空气击距的简化计算方法;最后,结合实际变电站案例,进行了基于变电站雷电安全运行年数的避雷线塔空气击距计算,类比规范计算方法提出相应的简化计算公式,并分析了空气净距取值对变电站电气布置的影响。

关键词:避雷线塔;雷电安全运行年;暂态电位升;临界雷电流幅值;空气击距;简化计算方法

中图分类号:TM 862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0092-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250214

Simplified Calculation Method for Air Striking Distance of Lightning Protection Towers Based on Lightning Safe Operation Years in Substation

XING Yi, LUO Ling, DING Xiaofei, LI Liangxiao, TANG Zhiqiang

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering
Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Due to the unclear value requirements for air striking distance between lightning protection towers and protected equipment in the regulations, there is often excessive margin in the actual power transformation projects. Firstly, based on the analysis of the factors affecting impulse grounding resistance and the lightning diversion effect of lightning protection lines, the probability method based on lightning safe operation years in substation is adopted, and according to the layout of substations, the actual annual lightning stroke probability is compared to determine the critical lightning stroke probability of air striking distance of lightning protection towers. Secondly, the amplitude of the corresponding critical lightning current is obtained through the probability distribution, and based on the simplified transient potential model of lightning protection towers and breakdown field, a simplified calculation method for determining the air striking distance between lightning protection towers and protected equipment is obtained. Finally, based on actual substation cases, the calculation is carried out, the corresponding simplified calculation formula is proposed and the influence of air clearance on the electrical layout of substations is analyzed.

Key words: lightning protection tower; lightning safe operation year; transient potential rise; critical lightning current amplitude; air striking distance; simplified calculation method

0 引言

变电站和换流站采用的直击雷保护装置有避雷

针和避雷线两种。当采用避雷线防护方式时,在站内须设置若干独立或者构架的避雷线塔,在避雷线塔间架设避雷线对电气设备进行防雷保护。相比于避雷针保护,避雷线在遭受雷击时存在分流作用,流

经单个避雷线塔的雷电流较小^[1-2]。相比于多榀构架避雷线塔,独立避雷线塔无架构间的雷电分流作用,遭受雷击时引起的暂态电位升较高,塔身对设备最近位置为易发生雷电反击的关键位置。独立避雷针和避雷线与被保护设备的空气击距在GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》^[3]中有规定,但对避雷线塔的空气击距未做明确规定。在实际工程中,避雷线塔的空气击距多按该规范建议值5 m选取,以较大的裕度涵盖变电站内各影响因素,或参照独立避雷针的击距公式进行校核。该规范中空气击距校验公式基于150 kA雷电流幅值,而实际变电站的雷电安全运行年数、校验雷电流幅值、避雷线塔间雷电分流、变电站布置尺寸、被保护设备运行电压等因素,均对避雷线塔与被保护设备的空气击距有影响。根据这些因素确定避雷线塔与被保护设备的空气击距的差异化取值,可在保证雷电安全运行的前提下,对变电站电气平面布置做合理优化。

为准确确定雷击避雷线塔暂态电位分布,可采用基于电磁场的数值计算法^[4],但工程应用该方法步骤繁琐。下面基于变电站雷电安全运行年数,采用简化的杆塔计算模型,提出了适用于工程应用的独立避雷线塔空气击距简化计算方法,为避雷线塔布置优化提供了依据。

1 雷击暂态电位升基本原理

由于杆塔电感和接地电阻的存在,雷击避雷线时,避雷线塔的暂态电位显著升高。为正确计算雷击时避雷线塔上的电位升,需要合理地建立避雷线塔暂态模型,根据空气雷电击穿场强,获得避雷线塔对应校验位置的空气击距。

1.1 杆塔计算模型

参考目前国内外输电线路杆塔防雷计算模型,通常采用集中电感、单波阻抗、多波阻抗3种模型^[5]。集中电感模型忽略杆塔上的波过程,杆塔采用等值电感值模拟;单波阻抗模型考虑了雷电波从塔顶传导到地面需要的时间,采用单一波阻抗模拟;多波阻抗模型还考虑了杆塔不同位置的雷电响应差异,采用不同波阻抗模拟。中国现行防雷规范均采用集中电感模型,这里对避雷线塔亦采用此模型。

避雷线塔校验高度 $h_x(x=1,2,3,\dots)$ 处的暂态

电位升按式(1)计算。

$$U = iR_i + L_0 h_x di/dt \quad (1)$$

式中: U 为避雷线塔校验高度的暂态电位升,kV; i 为流经避雷线塔的雷电流幅值,kA; R_i 为避雷线塔接地装置的冲击接地电阻, Ω ; L_0 为避雷线塔单位长度的等值电感, $\mu\text{H}/\text{m}$; t 为雷电流持续时间, μs 。

1.2 避雷线分流系数选取

雷击变电站内避雷线防雷系统见图1,假设为4根避雷线塔防护系统。

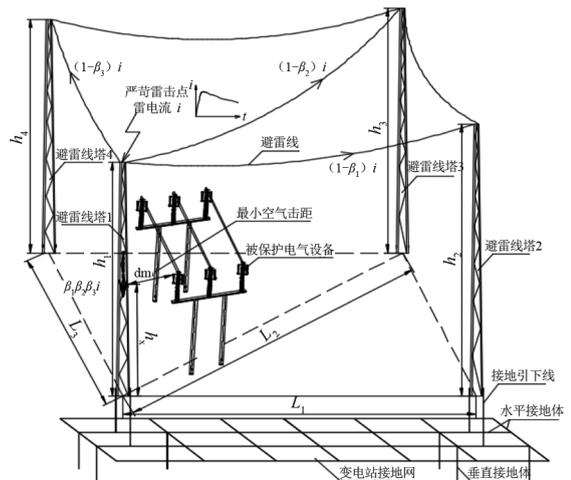


图1 雷击变电站内避雷线防雷系统

避雷线塔1、塔2的高度分别为 h_1 、 h_2 ,避雷线塔1与塔2的距离为 L_1 。实际避雷线塔的接地装置型式相同且与主地网连接冲击电阻较小,对雷电流分流的影响远不及雷电流流经避雷线和杆塔的电感。工程计算近似认为避雷线塔的分流系数主要与雷电流的路径有关,与GB/T 50064—2014中的空气击距校验点在避雷线跨中的分流系数计算原理相同。偏严苛考虑,选取雷击点位于需校验的避雷线塔顶部,其余避雷线分流作用最小。避雷线塔2对于避雷线塔1的分流系数 β_1 选取为

$$\beta_1 = \frac{L_1 + h_2 + R_i \tau_i / 2L_0}{L_1 + h_2 + h_1 + R_i \tau_i / L_0} \approx \frac{L_1 + h_2}{L_1 + h_1 + h_2} \quad (2)$$

式中, τ_i 为雷电流波头时间, μs 。

同理,可求得避雷线塔3、塔4对避雷线塔1的分流系数 β_2 、 β_3 ,实际流过避雷线塔1的雷电流为 $\beta_1 \beta_2 \beta_3 i$,分流系数取值可在该计算值基础上考虑适当的安全系数。

1.3 避雷线塔冲击接地电阻选取

避雷线塔一般采用接地引下线与主接地网相连,并在连接处设置垂直接地体,以便雷电流散流。

变电站内主接地网为网格状布置,以水平接地体连接垂直接地体,避雷线塔的工频接地电阻 R_g 按照 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》^[6] 确定,杆塔接地系统的冲击系数 α 选取^[7] 为

$$\alpha = \alpha_i R_g / \eta_i \quad (3)$$

式中: α_i 为接地导体的冲击接地系数,偏保守可取 1; η_i 为计及接地体相互影响的冲击利用系数,可取 0.65。

根据雷击杆塔散流特性和大型接地网的雷电冲击暂态特性^[8-9],避雷线塔有效散流区域集中在避雷线塔附近的局部地网区域,可按照周边 15 m 范围内接地体布置确定的冲击接地电阻。

2 基于安全运行年数求取雷电击距

2.1 安全运行年数雷击概率

雷击实际是概率事件,按照目前变电站的避雷针和避雷线的防雷保护范围计算方法,变电站在安全运行年数内是安全。按照 GB/T 50064—2014 的规定,330 kV 和 500 kV 变电站的雷电安全运行年数分别不小于 600 年和 800 年,实际设计可取 1.2 安全系数。

在标准雷电波形和给定的避雷线防雷系统下,决定避雷线塔和被保护设备空气击距大小的因素为雷电流的幅值。出现足够大电流雷击将导致避雷线塔与保护设备间的空气间隙击穿,将该雷击电流称为临界雷电流。临界雷电流出现的平均间隔年限,须大于变电站设计雷电安全运行年数。

假设变电站设计雷电安全运行年数为 N , 平均每年遭受该大电流雷击的次数为 $1/N$ 。对应出现临界雷电流的地闪密度为

$$e_m = \frac{10^6}{0.015k(a + 10h)(b + 10h)N} \quad (4)$$

式中: e_m 为临界雷电流地闪密度,次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); a 、 b 、 h 分别为变电站的长度、宽度、高度, m; k 为选择性雷击系数,一般地区取 1,对有水的山谷、土壤电阻率突变的区域,可适当增大。

2.2 临界雷电流幅值

通过站址范围内所有雷击的地闪密度和临界雷电流的地闪密度之比,可得临界雷电流出现的概率 P_m 为

$$P_m = e_m / e_a \quad (5)$$

式中, e_a 为站址所有雷击地闪密度,次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。参考 GB/T 50064—2014 中雷击杆塔的电流幅值概率公式,可推得临界雷电流幅值。一般地区,临界雷电流的幅值 i_m 为

$$i_m = -88 \lg P_m \quad (6)$$

2.3 避雷线塔空气击距

电气设备运行电压为工频 50 Hz 时,工作电压变化远慢于雷击避雷线塔暂态电位升。在雷击避雷线塔引起暂态电位升的时刻,可认为电气设备的工作电压是保持不变的,须考虑避雷线塔暂态电位升与工作电压反向的严苛工况。

将临界雷电流幅值 i_m 代入式(1),考虑被保护电气设备工作电压和雷电冲击空气击穿场强,获得避雷线塔的空气击距 d_m 为

$$d_m = \frac{i_m R_i + L_0 h_x di_m / dt + \sqrt{2/3} U_{em}}{E_a} \quad (7)$$

式中: U_{em} 为被保护电气设备最高系统工作线电压, kV; E_a 为空气的雷电冲击击穿场强,近似取 750 kV/m。雷电波采用 2.6/50 μs 的标准双斜角波,波头对雷电冲击的暂态过程的影响比波尾更明显,工程可近似选取 di_m / dt 为雷电流波头的陡度。参照 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[10] 的规定,避雷线塔的等值电感 L_0 可取 0.5 $\mu\text{H}/\text{m}$ 。

按此方法计算避雷线塔的空气击距,充分考虑了变电站设计雷电安全运行年数和变电站的布置特点,适宜工程实际应用。

3 实际算例分析

3.1 变电站避雷线塔空气击距计算

某敞开式 500 kV 变电站,按照图 1 布置的 4 避雷线塔系统为例,计算 220 kV 和 500 kV 区域避雷线塔距离被保护设备的空气击距。

变电站的长度、宽度、高度(最高避雷线塔)分别为 380 m、240 m、50 m。避雷线塔的接地装置与主地网连接,主地网采用扁钢,埋深 0.8 m 网格 15 m \times 15 m 布置,水平接地体等效直径为 0.04 m,避雷线塔的集中垂直接地体采用 3 根长度 2.5 m、直径 20 mm 的钢棒,土壤电阻率为 800 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

变电站设计雷电安全运行年数为 960 年,站址位于一般地区,雷电地闪密度为 7.98 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。

避雷线塔1、塔2、塔3、塔4的高度分别为35 m、35 m、50 m、50 m;避雷线塔1距离避雷线塔2、塔3、塔4的距离分别为55 m、110 m、95 m;避雷线塔1、塔3(对应220 kV和500 kV区域)校验设备高度分别为8 m、10 m。

按照前述方法计算避雷线塔1、塔3的空气击距相关结果见表1所示。

表1 避雷线塔空气击距计算结果

项目	避雷线塔1	避雷线塔3
避雷线塔冲击接地电阻 R_i/Ω	14.56	14.56
被保护电气设备最高运行电压 U_{em}/kV	252	550
避雷线塔分流系数 β	0.733	0.547
临界雷击电流幅值 i_m/kA	164.9	164.9
接地电阻决定距离系数 (i_m/E_a)/($m \cdot \Omega^{-1}$)	0.22	0.22
杆塔电感决定距离系数 $\frac{L_0 di_m/dt}{E_a}$	0.042	0.042
避雷线塔校验高度 h_x/m	8	10
避雷线塔空气击距 d_m/m	2.82	2.54

3.2 击距计算结果分析

实际工程中若按照独立避雷针的空气击距公式计算,220 kV和500 kV避雷线塔对应高度的空气击距值分别为3.72 m和3.92 m,GB/T 50064—2014建议的5.00 m取值显然裕度较大。

根据上述算例分析,考虑变电站雷电安全运行年、避雷线塔间雷电流、电气设备运行电压、变电站布置尺寸等多重因素后,220 kV和500 kV侧避雷线塔距离被保护设备的空气击距要求为2.82 m和2.54 m。

所提计算方法的优化主要体现在以下3个方面:

1)雷电流取值。通过设计雷电安全运行年数和变电站布置尺寸,选取校验临界雷电流幅值为164.9 kA,大于规范中空气击距校验公式选取的150 kA固定雷电流幅值。

2)分流系数选取。考虑1.15安全系数,若只计算避雷线塔2对校验避雷线塔1的分流,其分流系数 $\beta_1=0.828$,计算避雷线塔2、塔3、塔4对校验避雷线塔1的总分流系数 $\beta_1\beta_2\beta_3=0.733$,可见多避雷线塔的分流效应叠加后,校验避雷线塔分流系数降低显著。

3)保护设备工作电压。雷击避雷线塔时刻,避雷线塔与电气设备间的空气间隙受杆塔暂态电位叠加设备工作电压的影响。按前述严苛工况,电气设备工作电压越高,对空气击距的影响越大。

为便于与规范对比,将该算例总结为基于雷电安全运行年数的避雷线塔空气击距 S_a ,其计算公式为

$$S_a = \beta(0.22R_i + 0.042h_x) + 1.09 \times 10^{-3}U_{em} \quad (8)$$

计算方法基于变电站雷电安全运行年,并考虑了多重影响因素,可对算例站内各位置避雷线塔的空气击距进行差异化计算,使避雷线塔空气击距校验计算更安全合理。

实际工程中避雷线塔与被保护设备的距离需要满足空气击距和带电距离的较大值。由上述算例分析可知,500 kV侧配电装置对避雷线塔的带电距离要求为3.8 m,避雷线塔对10 m高设备的空气击距仅为2.54 m。而220 kV侧配电装置对避雷线塔的带电距离要求仅为1.8 m,避雷线塔对8 m高设备的空气击距达到2.82 m。避雷线塔的空气击距可决定220 kV及以下电气设备与避雷线塔间净距的取值,进而影响该配电装置的布置。

4 结 论

采用基于变电站雷电安全运行年数的概率法,对决定避雷线塔空气击距的临界雷电流进行求取,进而获得避雷线塔的空气击距简化计算方法,便于工程应用。主要结论如下:

1)避雷线塔与被保护物空气间隙雷电击穿概率按变电站设计雷电安全运行年数确定。基于变电站布置尺寸和站址地闪密度,求取临界雷击电流出现的概率和电流幅值,进而根据雷击避雷塔暂态电位简化模型和避雷线塔分流计算公式,获得避雷线塔空气击距的简化计算公式。

2)以某500 kV变电站为例,计算得到220 kV和500 kV区域避雷线塔空气击距的准确控制值和类比规范的避雷线塔空气击距计算公式;分析了所提方法的主要优化内容,避雷线塔间分流对空气击距计算影响显著。结合配电装置考虑,220 kV及以下配电装置区域避雷线塔的空气击距更影响电气设备布置。

参考文献

[1] 张纬钺,何金良,曾嵘.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2000:126-129.

(下转第102页)

永磁同步电机无位置传感器全速域控制方法

廖宗毅¹, 孙睿哲¹, 冉韵早¹, 刘鑫东², 赵尧麟¹, 郑国鑫¹

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610031;

2. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 401320)

摘要:为提高永磁同步电机在全速域无位置传感器控制的精度,设计了一种高频方波信号注入和基于转子磁链的改进滑模观测器相结合的复合控制方法。首先,在零、低速段采用脉振高频方波信号注入,通过简单的代数运算分离高频电流信号和基波电流信号,避免了在提取转子位置信息过程中使用滤波器,提高了转子位置观测的精度;然后,中、高速段采用改进的滑模观测器法,在滑模观测器中引入基于转子转速的自适应反馈增益,再利用转子磁链来提取转子位置信息,进一步提升了电机运行稳定性和控制精度;最后,采用加权函数对零、低速和中、高速的控制策略进行切换,从而构建全速域控制算法,该算法分别在带载启动、全速域运行和带速重投工况下进行仿真验证。仿真结果表明,所设计的全速域控制算法在不同工况下均能实现电机稳定高效的全速域运行,具有较好的动态性能和稳定性。

关键词:高频方波注入;滑模观测器;加权切换;全速域

中图分类号:TM 351 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2025)02-0096-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250215

Sensorless Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor in Full Speed Domain

LIAO Zongyi¹, SUN Ruizhe¹, RAN Yunzao¹, LIU Xindong², ZHAO Yaolin¹, ZHENG Guoxin¹

(1. Skill Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610031,

Sichuan, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 401320, China)

Abstract: In order to improve the precision of sensorless control of permanent magnet synchronous motor in full speed domain, a composite control method combining high-frequency square wave signal injection and improved sliding mode observer based on rotor flux is designed. Firstly, the high-frequency square wave signal of pulse vibration is injected in zero and low speed sections, and the high-frequency current signal and fundamental current signal are separated by simple algebraic operation, which avoids the use of filter in the process of extracting the rotor position information, and improves the accuracy of rotor position observation. Secondly, the improved sliding mode observer method is used in medium and high speed sections with the introduction of adaptive feedback gain based on rotor speed, and then the rotor flux is used to extract the rotor position information, which further improves the running stability and control accuracy of the motor. Finally, the weighted function is used to switch the control strategies of zero, low speed and medium, high speed, so as to construct the full speed domain control algorithm. This algorithm is simulated and verified under the loaded startup, full speed domain running and restart at coasting condition respectively. The simulation results show that the designed full speed domain control algorithm can achieve the stable and efficient full speed domain running of motor under different working conditions, which has good dynamic performance and stability.

Key words: high-frequency square wave injection; sliding mode observer; weighted switching; full speed domain

0 引言

永磁同步电机运行在某些恶劣工况下,可能会损坏位置传感器,这将危及到整个系统的稳定性。高精度、响应快的位置传感器会增加电机的成本,而且位置传感器的安装会加大电机的体积。相比之下,先进的无位置传感器电机能够在结构上更具紧凑性和牢固性,其不仅体积更小、安装更方便,而且在恶劣条件下运行更稳定,还增强了电机的使用寿命。针对无位置传感器电机带来的优势,研究一种稳定、可靠、精度高、响应快的全速域控制算法显得尤为重要。

目前国内外学者提出了众多无传感器控制方法,主要包括滑模观测器法^[1-2]、扩展卡尔曼滤波法^[3-4]、磁链估计法^[5]、模型参考自适应法^[6-7],以及基于凸极效应的高频信号注入法^[8-9]等。文献[10]引用高频方波信号注入检测永磁同步电机初始位置,提出无滤波器信号分离策略,加快了位置观测策略收敛时间。文献[11-12]采用具有自适应性的扩展卡尔曼滤波器对系统进行实时控制,但是其运算量极大,在工程中很少应用。文献[13]提出一种新型自适应滑模观测器算法,在提高系统动态响应速度的同时进一步抑制了系统抖振,但其基于反电势和转子转速设计的自适应滑模增益,只能在中、高速达到较好的控制效果。

下面通过研究滑模观测器和高频方波信号注入法,将一种基于转子磁链的改进滑模观测器结合高频信号注入法来实现永磁同步电机全速域范围无位置传感器控制。

1 永磁同步电机数学模型

为更好地使用数学模型对电机的控制进行分析,假设三相永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)为理想电机,在 d - q 坐标下的定子电压方程可以表示为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_d \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为 d 、 q 轴电压, V; i_d 和 i_q 分别为 d 、 q 轴电流, A; R 为电机定子电阻, Ω ; ω_e 为电机的

电角速度, rad/s; L_d 和 L_q 分别为 d 、 q 轴的电感, H; ψ_f 为转子永磁体的磁链, Wb。

2 零低速无位置传感器控制算法

滑模观测器、扩展卡尔曼滤波、模型参考自适应等方法都有一个共同的缺点:电机处于零速或者低速时,电机的反电势很低,很难从反电势中提取转子的位置信息,这会导致对转子位置和速度的检测失效。为了解决这一工程问题,高频信号注入法是一个有效方法。该方法通过额外加入一种信号,并以一定的频率和幅值叠加到电机的基波信号中。目前,常用的高频信号注入都是正弦信号,结合滤波器来对基波和低频信号进行分离。为了达到精确追踪零速和低速段速度,选用一种新的高频方波电压信号注入法来实现这一目的。

2.1 高频方波信号注入法原理

高频方波注入法是向观测的 d 轴注入高频方波电压信号,通过检测转子凸极性导致的高频电流响应,解耦位置误差信号。采用高频方波电压信号注入法,能够注入更高的电压频率,并利用简单的代数运算省去传统分离信号方法中使用的滤波器,计算更简单,并能进一步提高无位置传感器控制系统的动态性能。

2.2 高频方波注入无传感器设计

将式(1)转换成 d - q 坐标下数学模型。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{dL_d}{dt} & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

通常,高频注入信号的频率远高于电机基波频率 ω_e ,因此忽略定子电阻压降和反电势影响,有

$$\begin{bmatrix} u_{dh} \\ u_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dL_d}{dt} & 0 \\ 0 & \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:下标 h 表示高频量; u_{dh} 、 u_{qh} 分别为 d 、 q 轴下电压分量; i_{dh} 、 i_{qh} 分别为 d 、 q 轴下电流分量。

为了减小转矩脉动,一般向观测的转子 d 轴注入高频方波电压信号。

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{dh} \\ \dot{u}_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： \hat{u}_{dh} 、 \hat{u}_{qh} 分别为注入的高频电压 d 、 q 轴分量； u_h 为注入方波电压信号幅值。

将式(3)、式(4)变换到 α - β 静止坐标系下,可得高频响应电流为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{u_h}{\omega_h L_d L_q} \begin{bmatrix} L_{\text{avg}} \cos \hat{\theta}_e - L_{\text{dif}} \cos(\theta_e + \Delta\theta_e) \\ L_{\text{avg}} \sin \hat{\theta}_e - L_{\text{dif}} \sin(\theta_e + \Delta\theta_e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $i_{\alpha h}$ 、 $i_{\beta h}$ 分别为轴高频响应电流 α 、 β 轴；分量； ω_h 为注入方波电压信号频率； $L_{\text{avg}} = (L_d + L_q)/2$, 为平均电感； $L_{\text{dif}} = (L_d - L_q)/2$, 为半差电感； $\Delta\theta_e = \theta_e - \hat{\theta}_e$, 为位置偏差； θ_e 、 $\hat{\theta}_e$ 分别为转子位置信息和其观测值。可以看出, $i_{\alpha h}$ 、 $i_{\beta h}$ 中包含转子位置信息, 但前提是电机存在凸极效应 ($L_d \neq L_q$)。

2.3 无滤波器载波信号分离策略

图 1 为注入方波信号频率与 PWM 载波频率相等时, d - q 坐标下注入高频电压信号和响应电流信号时序图。高频响应电流可表示为

$$\begin{cases} i_{dqs}(k-1) = i_{dqf}(k-1) + i_{dqh}(k-1) \\ i_{dqs}(k) = i_{dqf}(k) - i_{dqh}(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中： i_{dqh} 为高频响应矢量； i_{dqs} 为采样电流矢量； i_{dqf} 为基波电流矢量； k 为采样周期。

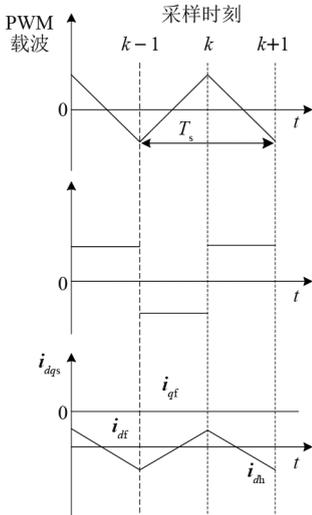


图 1 信号时序

通过代数运算分离基波电流和高频电流, 其原理如图 2 所示, 电流关系为

$$\begin{cases} i_{dqf}(k) = \frac{i_{dqs}(k) + i_{dqs}(k-1)}{2} \\ i_{dqh}(k) = \frac{i_{dqs}(k) - i_{dqs}(k-1)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

此种高频信号和基频信号分离方法不使用滤波器

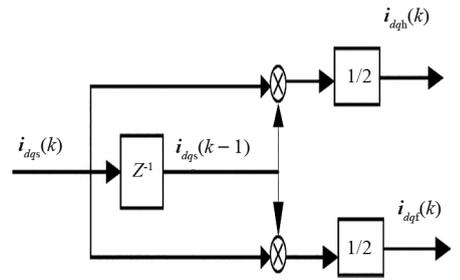


图 2 信号分离原理

因而系统简单, 减少了因滤波器导致的信号延迟, 使估算信息更加精确, 且在 α - β 静止坐标系同样适用, 即

$$\begin{cases} i_{\alpha f}(k) = \frac{i_{\alpha\beta s}(k) + i_{\alpha\beta s}(k-1)}{2} \\ i_{\beta f}(k) = \frac{i_{\alpha\beta s}(k) - i_{\alpha\beta s}(k-1)}{2} \end{cases} \quad (8)$$

2.4 零、低速转子位置估计

当位置跟踪器收敛至真实值时, 即 $\Delta\theta_e = 0$ 时, 有

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{u_h (L_{\text{avg}} - L_{\text{dif}})}{\omega_h L_d L_q} \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}_e \\ \sin \hat{\theta}_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此可以通过提取 $i_{\alpha h}$ 和 $i_{\beta h}$ 后, 直接采用反正切函数计算 $\hat{\theta}_e$, 跟踪转子位置信息。

$$\hat{\theta}_e = \arctan \frac{i_{\beta h}}{i_{\alpha h}} \quad (10)$$

然而反正切函数的转子位置估计方法对 $i_{\alpha h}$ 、 $i_{\beta h}$ 噪声比较敏感, 会造成较大的角度误差, 采用锁相环来提取转子的位置信息。图 3 为零、低速锁相环控制框图, 图中 K_p 、 K_i 分别为比例增益和积分增益。

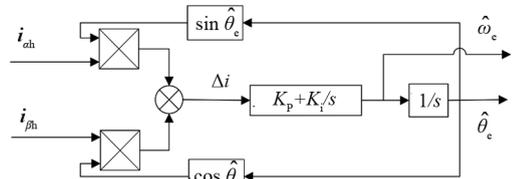


图 3 零、低速锁相环控制

3 中、高速改进滑模观测器设计

3.1 改进滑模观测器设计

针对传统滑模观测器使用低通滤波器引起的系统相位延迟以及固定滑模增益引起的电机抖振等一系列问题, 模型中引入了基于转子转速的自适应反馈增益来调整滑模观测器输出的估计反电势, 并采

用零点连续的 sigmoid 作为滑模面函数来削弱反电势中高频谐波的产生,进一步减弱电机运行过程中的抖振,提升电机控制精度和运行稳定性。设计改进的滑模观测器控制框图如图4所示,其中: $\hat{\theta}$ 为估计转子位置; $\hat{\omega}_e$ 为估计转子速度。

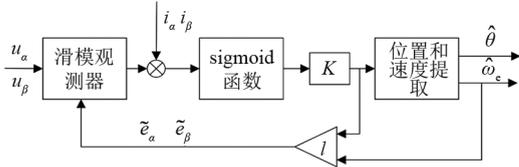


图4 改进滑模观测器控制

改进的滑模观测器中,定义自适应反馈增益为

$$\varepsilon = |\omega_e| + \xi \quad (11)$$

式中: ξ 为防止电机在零速时反馈增益; ε 为较小常数。

α - β 静止坐标系下的永磁同步电机数学模型为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{dL_d}{dt} & \omega_e(L_d - L_q) \\ -\omega_e(L_d - L_q) & R + \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: u_α 、 u_β 为定子电压 α 、 β 轴分量; i_α 、 i_β 为定子电流 α 、 β 轴分量; e_α 、 e_β 为扩展反电势 α 、 β 轴分量,且满足

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_d - L_q)(\omega_e i_d - \frac{di_q}{dt}) + \omega_e \psi_f \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

对于表贴式三相PMSM($L_d=L_q=L_s$),式(13)将被简化为仅与电机的转速有关的变量,这里为了简化模型,设定观测器中 $L_q=L_s$,结合式(12)基于sigmoid方程的滑模观测器表示为

$$\begin{cases} L_s \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = u_\alpha - R\hat{i}_\alpha - \varepsilon KF(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ L_s \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = u_\beta - R\hat{i}_\beta - \varepsilon KF(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (14)$$

反电势观测值为

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (|\omega_e| + \xi)KF(S_\alpha) \\ (|\omega_e| + \xi)KF(S_\beta) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: \hat{i}_α 、 \hat{i}_β 为定子电流观测值 α 、 β 轴分量; K 为滑模增益; $F(s)$ 为sigmoid函数, $F(s) = \{2/[1+\exp(-as)]\} - 1$,其中 a 为正常数,它的大小影响函数的收敛特性;

$$S_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha, S_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$$

为了证明观测器的稳定性,定义李雅普诺夫

(Lyapunov)函数为

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (16)$$

式中, $S = [S_\alpha \ S_\beta]^T$,对 V 求导:

$$\begin{aligned} \dot{V} = S^T \dot{S} = & -\frac{R_s}{L_s}(S_\alpha^2 + S_\beta^2) + \frac{1}{L_s}[e_\alpha - \varepsilon KF(S_\alpha)] + \\ & \frac{1}{L_s}[e_\beta - \varepsilon KF(S_\beta)] \end{aligned} \quad (17)$$

为保证设计滑模观测器稳定,即 $\dot{V} \leq 0$, $K \geq \max(|u_\alpha|, |u_\beta|)/F(S_{\alpha\beta})$, $\max(|u_\alpha|, |u_\beta|) = |\omega_e| \psi_f$,结合式(17),当 $K \geq \psi_f$ 时,改进滑模观测器渐进稳定。从而得到幅值恒定的估计值 F_{eq} 来提取转子位置信息。

$$F_{eq} = \frac{1}{(|\omega_e| + \xi)} e_{\alpha\beta} = \frac{1}{(|\omega_e| + \xi)} \omega_e \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (18)$$

若 ξ 值足够小,则输出估计 F_{eq} 为

$$F_{eq} = \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (19)$$

从式(19)可以看出,新的估计值 F_{eq} 采用恒定的转子磁链作为幅值,去除了传统滑模观测器中转子转速变化造成估计反电势不稳定的影响,提升了滑模观测器的稳定性。

3.2 中、高速转子位置和转速估计

考虑到滑模观测器观测值中的噪声污染会影响转子位置和转速估算的精度,因此,采用锁相环对转子的位置和转速进行估计,图5为中、高速锁相环控制框图。

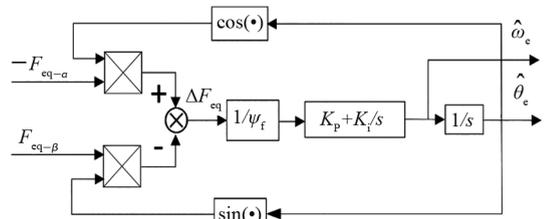


图5 中、高速锁相环控制框图

其中,假设 $k = (L_d - L_q)(\omega_e i_d - \frac{di_q}{dt}) + \omega_e \psi_f$,当 $|\hat{\theta}_e - \theta_e| < \pi/6$ 时,认为 $\sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) = \theta_e - \hat{\theta}_e$ 成立,根据图5可得:

$$\begin{aligned} \Delta F_{eq} = & -F_{eq-\alpha} \cos \hat{\theta}_e - F_{eq-\beta} \sin \hat{\theta}_e = \\ & k \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \approx k(\theta_e - \hat{\theta}_e) \end{aligned} \quad (20)$$

此时,图 5 的等效框图如图 6 所示。

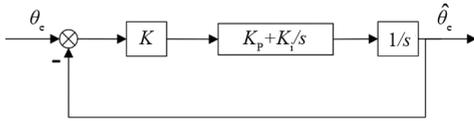


图 6 中、高速锁相环控制等效框图

根据图 6 可获得由 $\hat{\theta}_e$ 到 θ_e 的传递函数。

$$G(s) = \frac{\hat{\theta}_e}{\theta_e} = \frac{kK_p s + kK_i}{s^2 + kK_p s + kK_i} \quad (21)$$

4 加权函数速度切换器设计

由于零、低速和中、高速采用两种不同的控制算法,需要使用相较传统开关函数更加平滑的加权函数来实现低速段到高速段的平滑切换,如图 7 所示。

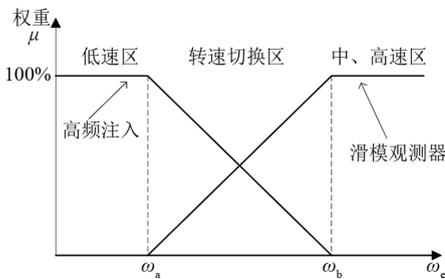


图 7 加权控制函数

函数公式为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_e = \mu \hat{\theta}_1 + (1 - \mu) \hat{\theta}_2 \\ \hat{\omega}_e = \mu \hat{\omega}_1 + (1 - \mu) \hat{\omega}_2 \end{cases} \quad (22)$$

权重关系为

$$\mu = \begin{cases} 1 & 0 < \hat{\omega}_e < \omega_a \\ \omega_b - \hat{\omega}_e & \omega_a < \hat{\omega}_e < \omega_b \\ 1 & \hat{\omega}_e > \omega_b \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\hat{\theta}_1$ 为高频注入估计角度; $\hat{\theta}_2$ 为滑模估计角度; μ 为权重; $\hat{\omega}_e$ 为当前估计转速; ω_a 和 ω_b 为电机切换观测器的转速区间。

图 8 为加权算法原理图。

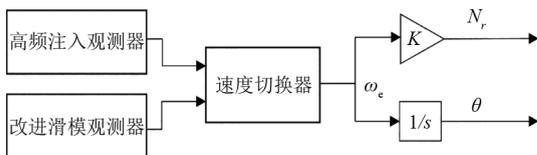


图 8 加权算法原理

5 仿真分析

为验证所设计的永磁同步电机全速域无位置传

感器控制算法的可行性,在 Matlab/Simulink 平台搭建永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统,逆变器开关频率为 10 kHz,注入频率为 4 kHz、幅值为 80 V 的方波高频信号,系统结构如图 9 所示。仿真模型采用的电机参数和实际电机参数一致,主要参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机主要参数

参数	数值
额定电压/V	311
额定转矩/Nm	10
额定转速/(r · min ⁻¹)	1500
磁极对数	4
定子电阻 R _s /Ω	0.958
q 轴电感/mH	12
d 轴电感/mH	5.25
永磁磁链 ψ _f /Wb	0.182 7
转动惯量/(kg · m ²)	0.03
阻尼系数/(Nm · s)	0.008

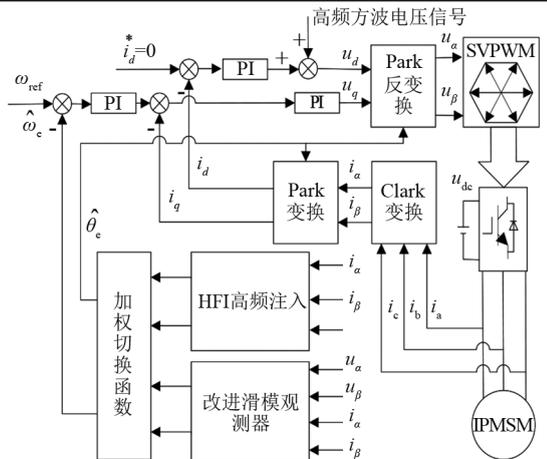


图 9 永磁同步电机全速域无位置传感器控制原理

5.1 带载启动、全速域运行仿真分析

设计永磁同步电机带载 5 Nm(50%额定转矩)启动,低速运行转速设计为 75 r/min(5%额定转速,运行频率 5 Hz),高速运行转速设计为 1200 r/min(80%额定转速,运行频率 80 Hz),加权函数作用转速区间为 350~800 r,切换时间为 1.74~2.14 s,模型整体仿真时间为 4 s,转速波形如图 10 所示。

由图 10 可知,电机能满足全速域运行的要求。永磁同步电机低速稳定运行区间(0.4~1.4 s)、高速稳定运行区间(3~4 s)的转速误差如图 11 所示,转子位置及误差如图 12 所示。

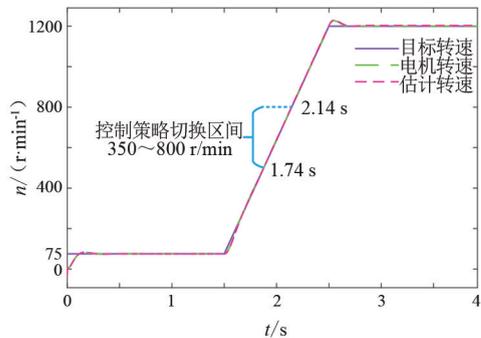


图 10 全速域无位置传感器转速仿真

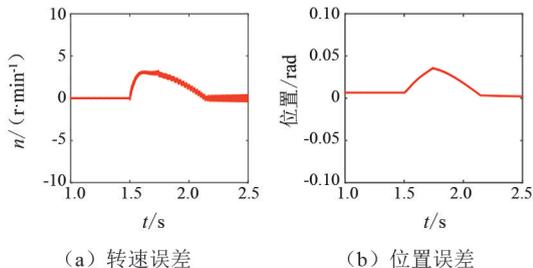


图 13 控制策略切换区间误差

5.2 全速域运行、突加载仿真分析

为了验证电机带速重投的动态性能,设计在 3.3 s 时,对电机突加负载 5 Nm,其运行转速如图 14 所示,突加负载时转速误差和转子位置误差如图 15 所示。

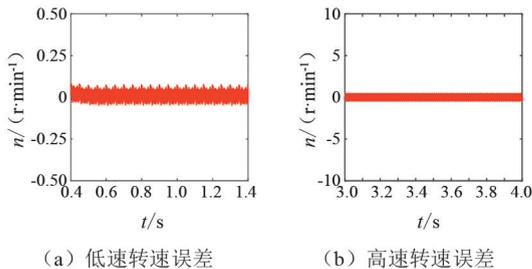


图 11 转速误差

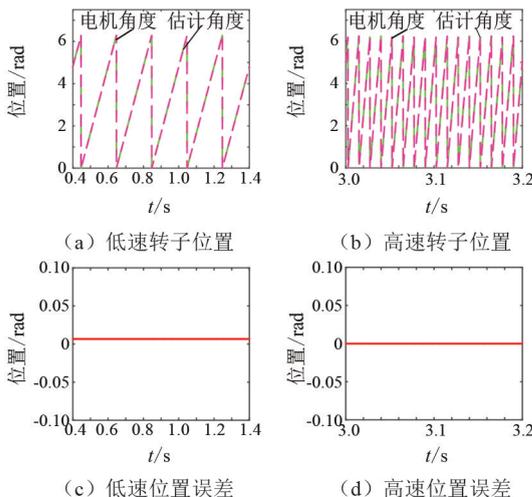


图 12 转子位置与位置误差

由图 11 可知,电机在低速运行时的转速误差仅为 0.1 r/min 左右,高速运行时的转速误差为 0.4 r/min 左右。由图 12 可知,电机低速运行时转子位置误差仅为 0.01 rad 左右,高速运行时转子位置误差几乎为 0,具有相当高的控制精度。

永磁同步电机控制策略切换区间(1.74~2.14 s)转速误差和转子位置误差如图 13 所示。

由图 13 可知,在控制策略切换的瞬间,电机转速最大误差仅为 3.8 r/min,转子位置最大误差仅为 0.04 rad,并随着转速提升的同时,转速误差与转子位置误差在快速减小;经过 0.4 s,电机转速误差和转子位置误差几乎为 0,验证了切换策略的有效性,整体控制算法具有较强的鲁棒性。

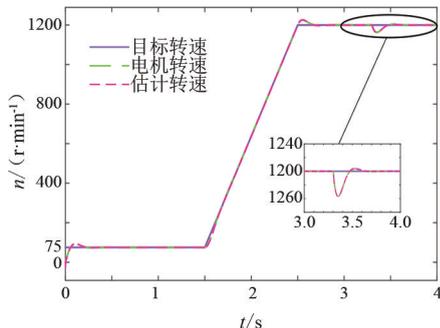


图 14 带载全速域仿真

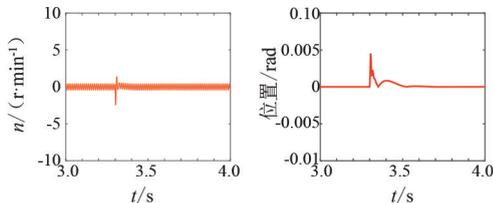


图 15 转速与位置误差

由图 14 可知,电机能满足全速域运行的要求,突加载时,电机转速扰动在 55 r/min(运行转速的 4%)左右,经过 0.1 s 克服扰动后,恢复原运行转速。由图 15 可知,在扰动瞬间电机转速与估计转速误差最大仅为 2.5 r/min,位置误差仅为 0.005 rad,控制算法能够快速克服扰动并恢复正常,具有较高的稳态运行精度和鲁棒性。

6 结 论

上面设计了一种基于无滤波器高频方波信号注入的全速域无传感器混合矢量控制方法。在零速和低速时通过注入高频方波电压信号,并采用无滤波器的信号分离方法。中、高速则采用基于转子磁链的改进滑模观测器,设计与转速相关的自适应反馈增益,降低了恒定增益导致的电机抖振现象。区别

于传统滑模从反电势中提取位置和转速信息,改进滑模观测器利用转子磁链来提取相关信息,无需低通滤波和位置补偿,拓宽了传统滑模转速稳定运行区间,并采用加权函数切换方法将两种观测器平滑地从低速段过渡到高速段。由仿真结果可知,所设计的方法在带载启动、运行和带速重投时,能够在全速范围内准确获得转速和转子位置,做到精确控制,系统整体具有较高鲁棒性。

参考文献

- [1] 璩晶磊,李少波,陈金坤. 基于质量数据融合及规则挖掘的离散制造过程监控方法[J]. 计算机集成制造系, 2017,23(9):1962-1971.
- [2] LIU K B, HUANG S. Integration of Data Fusion Methodology and Degradation Modeling Process to Improve Prognostics[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1):344-354.
- [3] GRASSO M, COLOSIMO B M, PACELLA M. Profile monitoring via sensor fusion: the use of PCA methods for multi-channel data [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(20):6110-6135.
- [4] 刘建康,郝尚华,王树华,等. 数据驱动的数控加工生产线实时监控与优化控制技术框架[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8):1875-1884.
- [5] LIU J M, ZHU Z Q. Rotor position estimation for dual-three-phase permanent magnet synchronous machine based on third harmonic back-EMF [C]//2015 IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), June 7-8, 2015, Sydney, Australia. IEEE, 2015:1-8.
- [6] 张洪师,王平,韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(12):1889-1896.

- [7] HAMED H A, ELBARBARY Z M, MOURSIS M S, et al. A new δ -MRAS method for motor speed estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(3):1903-1906.
- [8] 杜思宸,全力,朱孝勇,等. 基于高频注入的永磁同步电机零低速下位置传感器失效故障容错控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):3038-3047.
- [9] LIU J M, ZHU Z Q. Novel sensorless control strategy with injection of high-frequency pulsating carrier signal into stationary reference frame [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2574-2583.
- [10] 张国强,王高林,徐殿国. 基于无滤波器方波信号注入的永磁同步电机初始位置检测方法[J]. 电工技术学报,2017,32(13):162-168.
- [11] 毕峰,贾晓芬. 基于 EKF 的 PMSM 无传感器控制仿真分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021,39(1):64-68.
- [12] TERMIZI M S, LAZI J M, IBRAHIM Z, et al. Sensorless PMSM drives using Extended Kalman Filter (EKF) [C]//2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), October 30-31, 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE, 2017.
- [13] 程亚楠,刁俊,苏子华,等. 基于新型滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022,(12):89-93.

作者简介:

廖宗毅(1996),男,硕士,工程师,从事电力营销、新能源规划与优化运行工作;

孙睿哲(1997),男,硕士,工程师,从事电气设备检修与新能源并网控制工作;

冉韵早(1998),女,硕士,工程师,从事电力营销与综合能源规划调度工作;

刘鑫东(1995),男,硕士,研究方向为电机驱动控制。

(收稿日期:2024-05-11)

(上接第 95 页)

- [2] 中国机械工业联合会. 建筑物防雷设计规范: GB 50057—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
- [3] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [4] 张波,薛惠中,金祖山,等. 遭受雷击时输电杆塔及其接地装置的暂态电位分布[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):393-398.
- [5] 张永记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006,32(7):93-97.
- [6] 中国电力企业联合会标准化管理中心. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[7] 中国电力工程顾问集团有限公司. 电气工程设计手册 变电站设计[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

[8] 李冠华,金鑫,赵义松. 大型变电站接地网雷电冲击暂态特性的仿真[J]. 电瓷避雷器, 2019,6(3):92-97.

[9] 曹晓斌,高竹青,马御棠,等. 雷击下 500 kV 杆塔接地装置的散流有效性[J]. 高电压技术, 2017,43(5):1596-1601.

[10] 电力工业部绝缘配合标准化技术委员会. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 北京:中国电力出版社,1997.

作者简介:

邢毅(1983),男,硕士研究生,高级工程师,从事变电站、换流站设计及技术管理工作。

(收稿日期:2024-04-19)

单相多电平并网级联逆变器调制技术的研究

郑嘉龙, 陈开宇, 杨 鸽

(四川水利职业技术学院电力工程学院, 四川 成都 611231)

摘要:为简化单相多电平并网级联逆变器控制复杂度,设计了一种H桥模块独立控制的LCL型单相多电平并网逆变器。首先,在单相LCL型并网逆变器基础上设计了单相多电平并网级联逆变器的主电路和控制电路;其次,基于单极倍频正弦脉冲宽度调制控制方法提出了两种多电平调制策略,并且分析了它们在开环控制和闭环控制中的特性;然后,根据所提逆变器特点推导了LCL滤波器参数计算公式;最后,在仿真平台上验证所提理论的有效性。仿真实验结果表明:两种调制策略均会受到并网逆变器闭环控制策略和调制比的影响,导致正弦调制信号跟随载波信号而发生变化;两种策略均能保障所提单相级联逆变器实现多电平输出;从并网电流总谐波畸变率指标来看,基于三角载波同相移动的策略1的调制效果更好。

关键词:单相级联逆变器;多电平;单极倍频SPWM;调制技术;LCL滤波器

中图分类号:TM 862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)02-0103-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250216

Research on Modulation Technology of Single-phase Multilevel Grid-connected Cascaded Inverter

ZHENG Jialong, CHEN Kaiyu, YANG Ge

(School of Electric Power Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College,
Chengdu 611231, Sichuan, China)

Abstract:In order to simplify control complexity of single-phase multilevel grid-connected cascaded inverters, a single-phase multilevel grid-connected inverter with LCL filter is designed with independent control. Firstly, the main circuit and control circuit of single-phase multilevel grid-connected cascaded inverter based on single-phase grid-connected inverter with LCL filter are designed. Secondly, two multilevel modulation strategies are proposed based on unipolar frequency doubling SPWM control method, and their characteristics in open-loop control and closed-loop control are analyzed. Then, based on the characteristics of the proposed inverter, a formula for calculating the parameters of LCL filter is derived. Finally, the effectiveness of the proposed theory is verified on a simulation platform. The simulation experiment results show that both modulation strategies are affected by the closed-loop control strategy and the modulation ratio of grid-connected inverter, resulting in the sinusoidal modulation signal changing with the carrier signal. And both strategies can ensure the proposed cascaded inverters to achieve multilevel output. From the perspective of the total harmonic distortion index of grid-connected current, the modulation effect of the first strategy based on triangular carrier phase shift is better.

Key words: single-phase cascaded inverter; multilevel; unipolar frequency doubling SPWM; modulation technology; LCL filter

0 引言

大力发展清洁能源是实现“双碳”目标的有效途径,光伏发电和风力发电的装机容量增长迅速且还有很大的拓展空间。接入配电网是微电网的主要并网方式,建设微电网有利于电能就地消纳,缓解电网压力^[1]。随着分布式光伏发电系统容量的增加,需要更高等级电压满足并网需求。单相多电平级联逆变器正适合这类场景的应用,如大容量屋顶光伏发电系统^[2]。虽然单相光伏级联多电平逆变器还有一些技术问题有待进一步解决^[3],例如漏电流抑制和功率均衡控制问题,但这些并不影响其光明的应用前景。级联逆变器作为最早出现的一种多电平逆变器已经取得了广泛应用。

实现逆变器多电平输出的关键在于调制技术。正弦脉冲宽度调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)是脉冲宽度调制技术之一,它根据载波波形在二维坐标中移动方向的不同,可分为载波移相 SPWM(phase shifted SPWM, PS-SPWM)和载波层叠 SPWM(level shifted SPWM, LS-SPWM)。PS-SPWM 也被称为载波移相正弦脉宽调制技术^[4],它作为主流标准调制技术应用在级联 H 桥型 STATCOM 等无功补偿设备控制中^[5-6]。根据层叠调制波相位的不同,LS-SPWM 技术还可以细分为同相层叠 SPWM、反向层叠 SPWM 和交替反向层叠 SPWM(alternative phase opposition disposition SPWM, APOD-SPWM)^[7]。单极倍频 SPWM 控制方法是并网逆变器的基本控制策略之一,在实现逆变器多电平输出中得到了应用^[8-9]。文献[10]采用单极倍频调制技术对同相层叠调制策略进行优化,解决了多载波调制策略存在的不足。调制波幅值和载波幅值之比称为调制比,它是调制技术的关键参数。相关研究表明,不同调制比将影响逆变器并网电压总谐波畸变率^[11]。在调制比参数整定研究方面,文献[12]给出了单相级联 H 桥(H-bridge, HB)的光伏并网逆变器控制原理图,该图显示调制比由直流母线电压、输出功率、功角等诸多参数根据控制策略计算得到。该方法的优势在于调制波与载波可以采用标准正弦波和标准三角波,调制过程控制简单,但其劣势在于获取调制比时计算困难,还须克服模块

间通信问题。文献[13]还提出将单相级联 HB 光伏并网逆变器并网节点反馈的电参量输入单个调节控制器后,再进行电力电子开关元件驱动信号调制。该控制电路结构简单,减少了不同 HB 模块的控制冗余度,有利于 HB 模块级联数量较多的应用场景。针对该型并网逆变器输出可能出现的功率平衡问题,文献[14]提出工作范围功率自适应控制策略,依然采用传统的调制方法。

为了简化单相级联 HB 光伏并网逆变器控制复杂度并减轻对 HB 模块间通信的依赖程度,基于单台 LCL 型单相并网逆变器工作原理^[15],提出采用 HB 模块独立控制的 LCL 型单相多电平级联并网逆变器应用于 HB 级联数量较少的场景。采用定调制比单极倍频 APOD-SPWM 技术实现多电平输出,进一步研究单极倍频 SPWM 多电平调制技术在多电平单相并网级联逆变器方面的应用。该调制策略的创新点在于:选择合理的调制比后,电力电子器件的控制信号受到调制波动态反馈控制;合理设计 LCL 滤波器参数确保并网电流满足要求。最后通过 Matlab/Simulink 软件开展仿真实验验证所提方案的可行性。

1 电路设计

1.1 电路拓扑

主电路拓扑结构见图 1,图中虚线框表示级联逆变器最小单元 HB,每个 HB 模块包含 4 个电力电子开关(如模块 1 的 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14}),各 HB 采用串联的方法级联; L_1 、 L_2 和 C 构成逆变器的输出滤波器; $U_{dc1...n}$ 为逆变器直流侧电压; U_g 为逆变器接入的电网电压。控制策略方面,由图 1 可以看出每个 HB 模块都采用相同的参考电流 i_{2ref} 、控制函数 $G_i(s)$ 、电容支路反馈系数(有源阻尼系数) H_{i1} 和电网电流反馈系数 H_{i2} ,采用单极倍频 SPWM 控制 HB 模块。 $G_i(s)$ 的表达式为

$$G_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

1.2 调制技术

APOD-SPWM 波的整个周期都同时存在正负反相的三角载波,这一特点与单极倍频 SPWM 控制原

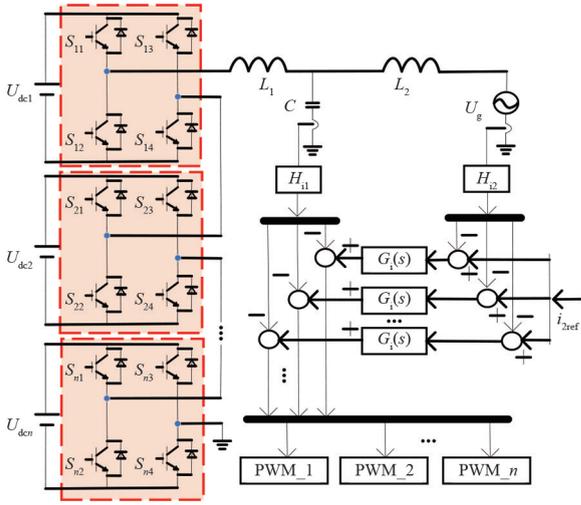


图 1 主电路拓扑

理的波形特点极其相似。因此,提出单极倍频 APOD-SPWM 调制技术,其原理见图 2,图中: v_M 为调制信号; v_{tri1} 和 $-v_{tri1}$ 为 HB 模块 1 的载波信号; v_{tri2} 和 $-v_{tri2}$ 为 HB 模块 2 的载波信号。图 2 中展示了两种策略,每种策略正弦调制波形一直保持不变。策略 1 是将两组三角载波同向移动;策略 2 是将两组三角载波反向移动。调制信号的幅值没有改变,而载波信号的幅值发生了变化,这就意味着调制比发生了变化。载波信号上移的幅度 ΔH 将直接影响该 HB 模块的输出波形,进而影响级联逆变器的输出波形。上述两种策略载波移动的 ΔH 相同,可将移动不同 ΔH 的策略定义为上述策略的变种策略。策略 2 的变种策略还可以是 v_{tri2} 和 $-v_{tri2}$ 调换移动方向。为了减少讨论的复杂度,下面重点分析图 2(b)、(c) 这两种情况。由上述内容可以推知, ΔH 的取值将影响调制效果,应该综合考虑输出滤波器的要求,合理选择载波信号向上平移的幅度, ΔH 取值范围为

$$0 < \Delta H < 2V_{tri} \quad (2)$$

双傅里叶变换是分析调制波频谱最常用方法^[16],但该方法表达式比较复杂,因此采用波形图分析法对所提调制技术进行阐述,以期获得更加直观的表达效果。以两个 HB 模块级联为例说明策略 1 的具体实现过程。由于调制信号为正弦信号,正负周期的调制结果只需要将相位取反。因此,只给出策略 1 调制信号正半周的调制原理,见图 3。HB 模块 2 的载波信号相对 HB 模块 1 的载波信号整体上移 $0.5V_{tri}$ 。当 S_{11} 和 S_{14} 同时打开时,HB 模块 1 的输出波形为 v_{A1B1} ;当 S_{21} 和 S_{24} 同时打开时,HB 模

块 2 的输出波形为 v_{A2B2} 。两个 HB 模块在调制信号正半周输出波形为 v_{inv2} 。由 v_{inv2} 的波形可以推知,策略 1 可以实现两个 HB 模块级联逆变器五电平输出。HB 模块 2 的载波整体向上平移而正弦调制信号位置不变。

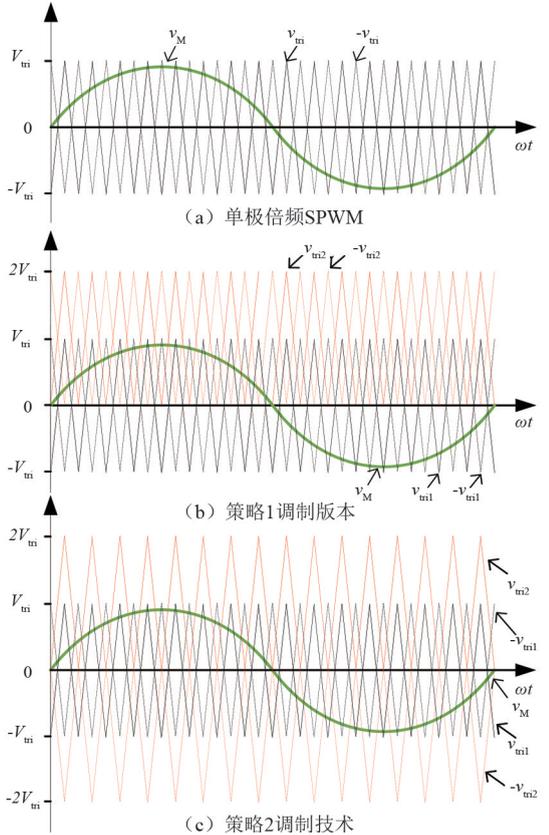


图 2 调制原理

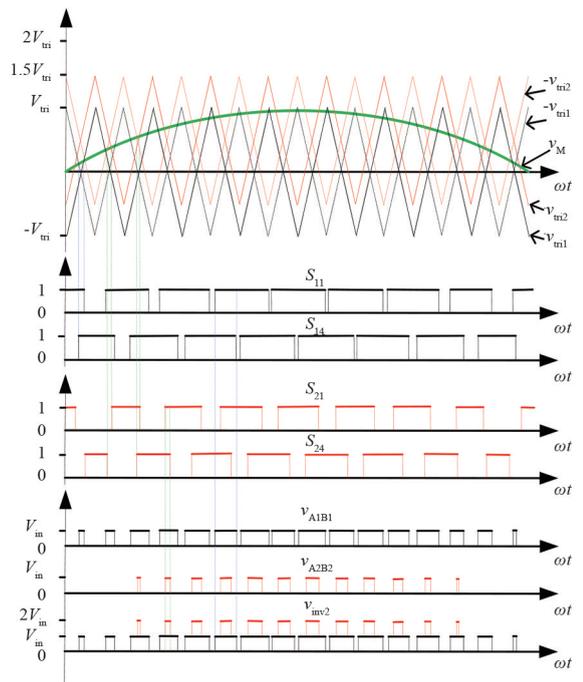


图 3 策略 1 示例

以上讨论适用于开环控制的情况,并没有考虑并网逆变器控制策略(控制闭环)给调制策略带来的影响。设计 HB 模块参数算例如表 1 所示。仿真移动 $0.5V_{in}$ 后得到单台并网逆变器采用策略 1 和策略 2 的调制波形如图 4 和图 5 所示。受到定调制比条件的约束,两图中的正弦调制信号最大值跟随载波的变化而变化:图 4 的波形显示正弦调制信号与载波同相移动相同单位数值;图 5 的波形显示正弦调制信号自动跟踪正负两个三角载波的变化。由图 1 可知,所提多电平单相并网级联逆变器各个 HB 模块的调制信号相同。在其中任何一个 HB 模块采用策略 1 或策略 2 后,即使其他 HB 模块载波保持不变也将出现正弦调制信号和载波型号发生位置偏移的情况。换言之,执行上述策略的 HB 模块的调制比保持不变,导致了级联逆变器中其他 HB 模块的调制比发生了变化。虽然,图 4 中电力电子

开关没有像图 5 那样出现连续低电平或高电平,但 HB 模块级联后仍将输出多电平电压波形。

表 1 HB 模块参数

参数	值	参数	值
HB 母线电压 U_{dc}/V	360	基波频率 f_o/Hz	50
电网电压 U_g/V	220	开关频率 f_s/kHz	10
HB 输出功率 P_o/kW	6	载波幅值 V_{in}/V	3
电容支路反馈系数 H_{i1}	0.10	比例系数 K_p	0.45
并网电流反馈系数 H_{i2}	0.15	积分系数 K_i	2200

1.3 滤波器设计及调制技术性能分析

降低滤波器要求是级联逆变器的突出优点之一。如何设计单相级联逆变器 LCL 滤波器参数的研究成果还较为鲜见。为了适应级联逆变器的特点,将文献[17]所提 LCL 滤波器设计参数的两个电压参数进行修正后得到单相级联逆变器 LCL 滤波器参数设计表达式,如式(3)所示。

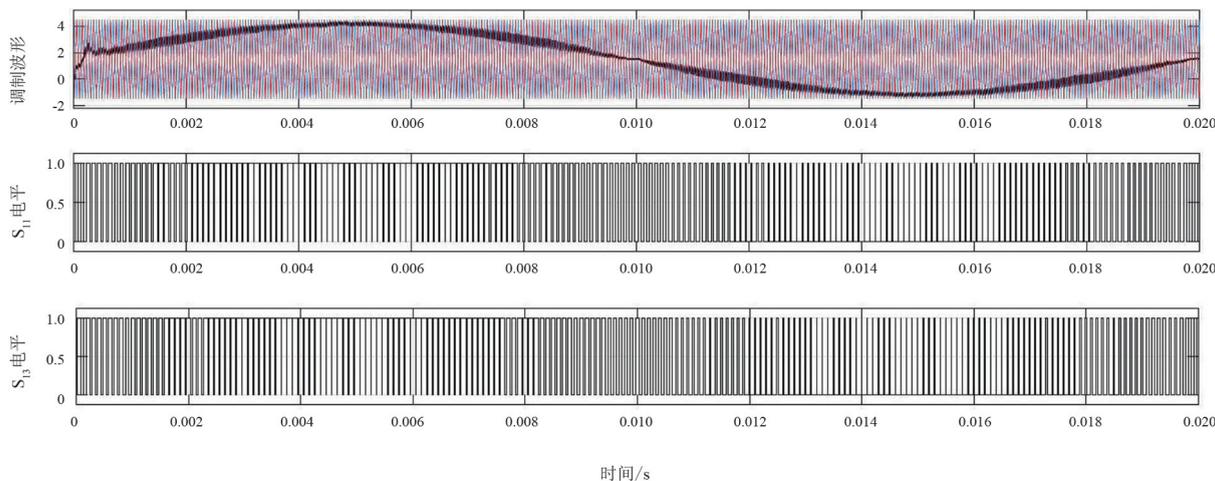


图 4 单台并网逆变器策略 1 调制波形

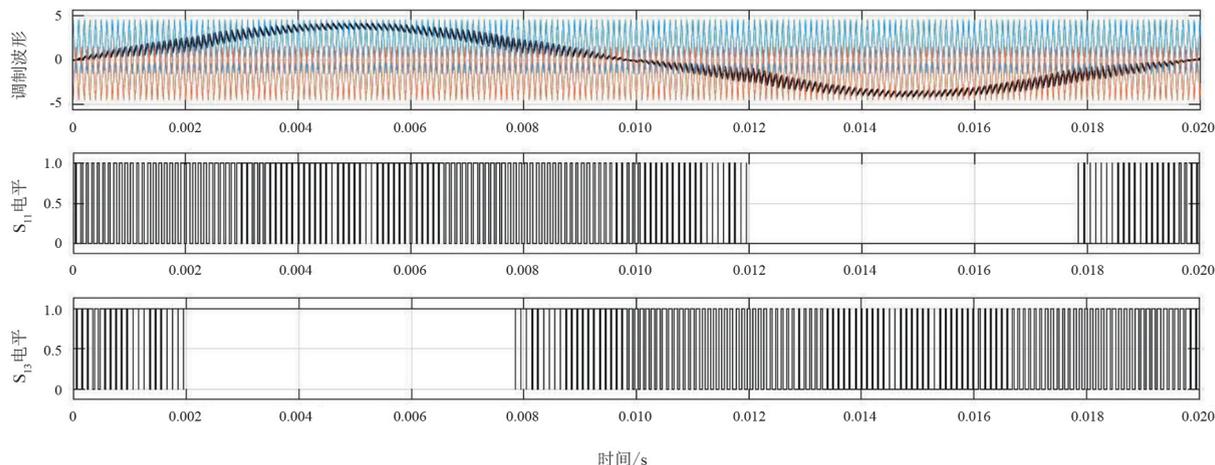


图 5 单台并网逆变器策略 2 调制波形

$$\begin{cases} \frac{nV_{inHB}T_{SW}}{8\lambda_{CLI}I_1} \leq L_1 \leq \frac{\lambda_{vL1}nV_{gHB}}{\omega_0 I_1} \\ C = \lambda_C \frac{nP_o}{\omega_0(nV_{gHB})^2} = \lambda_C \frac{P_o}{\omega_0 nV_{gHB}^2} \\ L_2 = \frac{1}{L_1 C \omega_h^2 - 1} \left(L_1 + \frac{|nV_{invHB}(j\omega_h)|}{\omega_h \lambda_h I_2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 为 HB 模块的级联个数; V_{inHB} 为单个 HB 模块下桥臂输出电压; T_{SW} 为载波周期; λ_{CLI} 为波纹系数, 一般取值 20%~30%; I_1 为额定输出电流时逆变器侧电感电流的基波有效值; λ_{vL1} 为电感 L_1 两端基波电压降的有效值与滤波电容电压有效值之比; V_{gHB} 为单个 HB 模块下的电网电压有效值; ω_0 为调制波的角频率; λ_C 为滤波电容 C 引入的无功功率与并网逆变器输出额定有功功率之比, 一般取值 5% 左右; P_o 为单个 HB 模块输出额定有功功率; ω_h 为 HB 模块桥臂输出电压确定主要谐波的角频率; $V_{invHB}(j\omega_h)$ 为桥臂 h 次谐波输出电压; λ_h 为并网电流在主要谐波频率处的谐波占额定并网电流的比例; I_2 为额定并网电流的有效值。

控制函数相同的前提下, 图 1 所示电路的控制框图如图 6 所示, 进而得到系统环路增益 $T_A(s)$ 如式(4)所示, 式中 K_{PWM} 为 HB 模块输入电压与三角载波幅值的比值。在理想并网条件下, 不考虑并网连接点电压引起的扰动, 只考虑指令电流的影响, 可得并网电流与指令电流的传递函数如式(5)所示。说明无论上述何种调制技术都是通过调制比对级联逆变器产生影响的。提高每个 HB 模块工作稳定性有利于级联逆变器稳定并网。

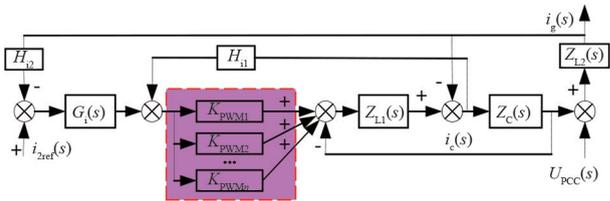


图 6 控制框图

$$\begin{cases} T_A(s) = \frac{H_{12}G_i(s)Z_C(s)}{Z_{L1}(s)Z_{L2}(s) + [Z_{L1}(s) + Z_{L2}(s)]Z_C(s)} + H_{11}Z_{L2}(s) \\ K_{PWM} = K_{PWM1} + K_{PWM2} + \dots + K_{PWMn} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{i_2(s)}{i_{2ref}(s)} = \frac{T_A(s)}{[1 + T_A(s)]H_{12}} \quad (5)$$

2 仿真研究与分析

2.1 算例

基于 Matlab/Simulink 的两个 HB 模块级联仿真平台案例原理图和设计需求参数列表分别见图 7 和表 1。根据第 1.3 节所述的 LCL 滤波器参数设计方法, 结合表 1 所列参数计算 LCL 滤波器参数取值, 如表 2 所示。仿真过程中, 将调制策略应用在 HB 模块 2, 始终保持 HB 模块 1 调制策略不变(始终载波不变)。

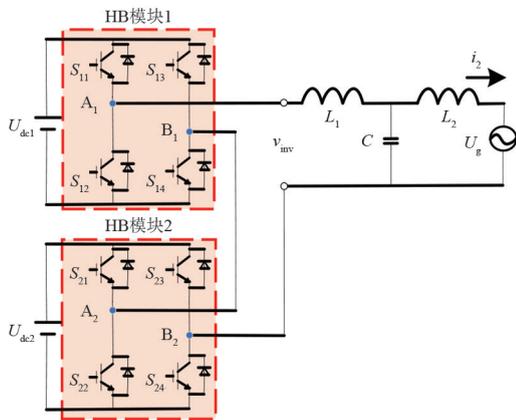


图 7 两个 HB 模块级联原理

表 2 滤波器计算参数

参数	数值
逆变器侧电感 L_1 /mH	1.2
滤波电容 C /μF	5
网侧电感 L_2 /mH	0.3

2.2 仿真结果分析

当 $\Delta H = 1.5V_{tri}$ 时, 策略 1 和策略 2 的调制波形分别见图 8(a)、(c)。对比两图可知, 两种策略下 HB 模块 1 和 HB 模块 2 的正弦调制波形都能保持一致。将 v_{tri2} 向上平移 $\Delta H = 1.5V_{tri}$ 、 $-v_{tri2}$ 向上平移 $\Delta H = 0.5V_{tri}$ 的调制策略定义为策略 1 变种 1, 得到调制波形见图 8(b)。将 v_{tri2} 向上平移 $\Delta H = 1.5V_{tri}$ 、 $-v_{tri2}$ 向下平移 $\Delta H = 0.5V_{tri}$ 的调制策略定义为策略 2 变种 1, 得到调制波形见图 8(d)。对比图 8(a)、(b), 策略 1 及其变种 1 的正弦调制波的波形振幅基本相同。两图中的正弦调制波正负半周的幅值基本相

同,整个正弦波出现向上平移的现象。这说明该策略下,正弦调制波的振幅将跟随向上平移数值较大的三角载波变化而变化。对比图 8(c)、(d),策略 2 及其变种 1 的正弦调制波的波形振幅在正半周基本相同,而在负半周策略 2 的正弦调制波形振幅比其变种 1 要大一些。两图中的正弦调制波并没有出现向上或向下平移的现象,但是正负周期的幅值出现了不相等的情况。上述实验结果验证了并网级联逆变器的正弦调制信号同时受到调制比和控制闭环双重条件约束的推测。策略 1 和策略 2 实现级联逆变

器多电平输出波形见图 9(a)、(b)。对比两图虚线框内的波形可推知,虽然两种策略都实现了多电平输出,但是最终并网效果不会相同。所提多电平单相并网级联逆变器经 LCL 滤波器后并网电流和并网电压波形见图 10 和图 11。两种策略下都能保证功率因数等于 1,从并网电流波形图中可以看出策略 1 并网电流的正弦曲线更加理想,验证了上述推测。

为了研究不同 ΔH 对两种策略的影响,分别做了 6 组仿真实验。当 ΔH 分别取值 0.5、0.8、1.0、1.3、

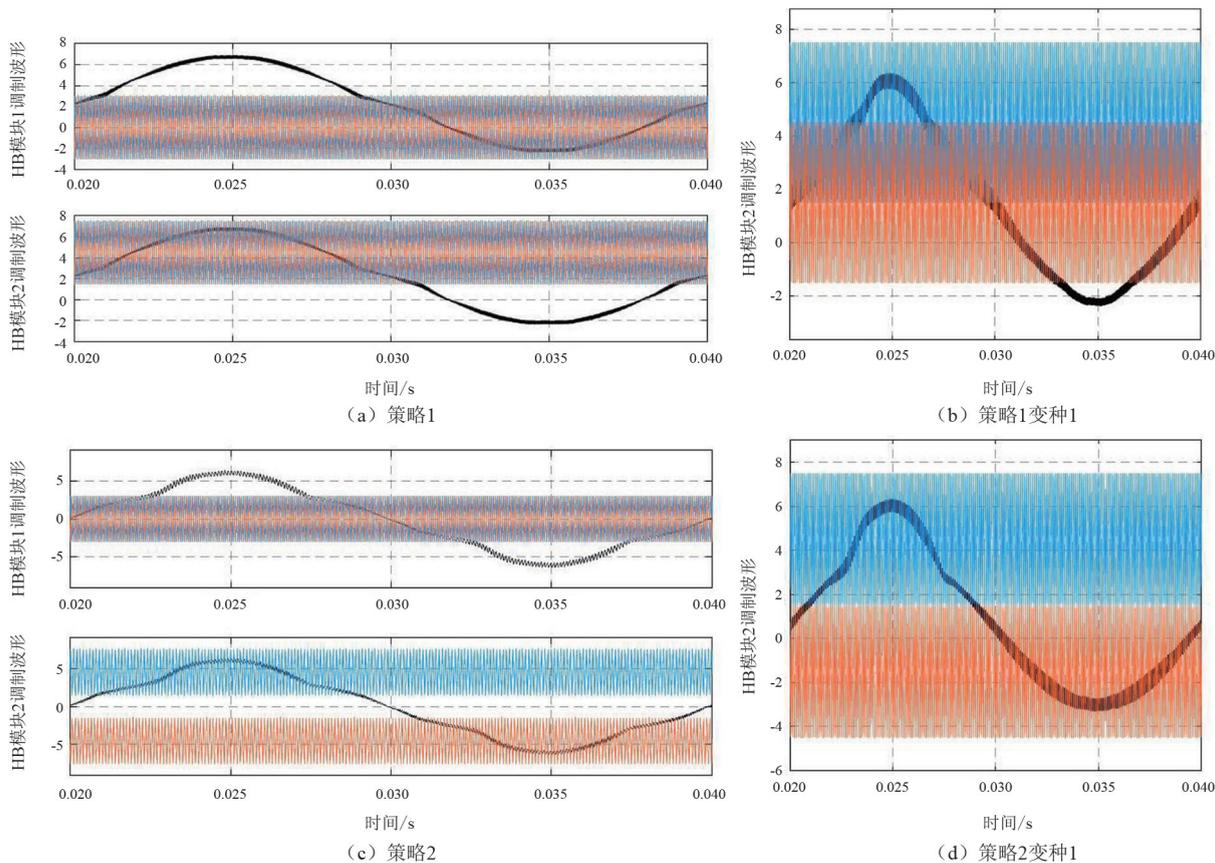


图 8 调制波形

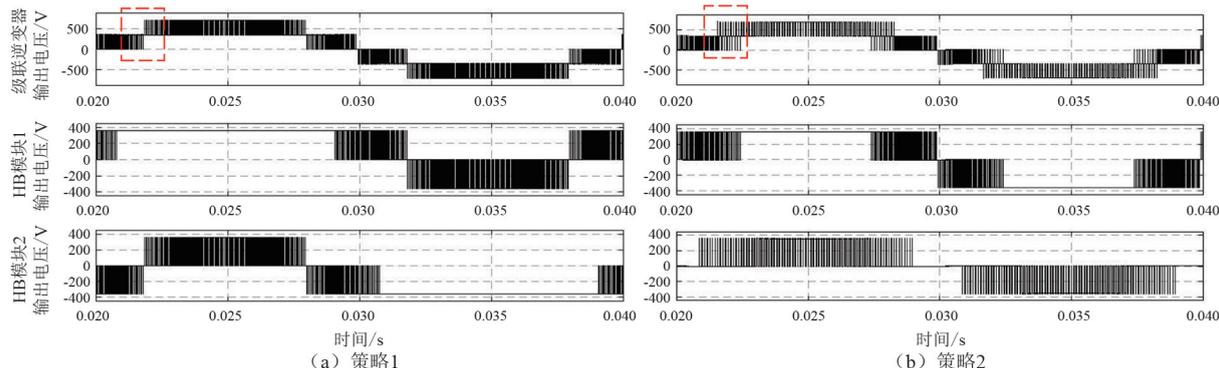


图 9 级联逆变器输出波形

1.5、1.8 时,仿真实验所得并网电流总谐波畸变率统计结果见图 12。策略 1 中随着 ΔH 增大,总谐波畸变率出现先增加后减小的情况,而策略 2 则是一直增大。在相同 ΔH 情况下,策略 1 的总谐波畸变率要比策略 2 小一些。说明策略 1 在仿真实验约束

条件下的调制效果比策略 2 要好一些,并且 ΔH 取值不应过大。图 13 为 ΔH 为 0.5 时策略 1 的并网电流幅频特性。从图中可以看出低频奇次倍的谐波幅值都相对较大,这也符合单极倍频 SPWM 调制的特征。图 14 中 G0、G1 和 G2 分别为策略 1 调制技术下, ΔH 取值为 0、0.5 和 1.0 时,根据式(5)得到的阶跃响应曲线。该图说明 ΔH 取值 0.5 时,控制系统的抗干扰能力也是较优的。

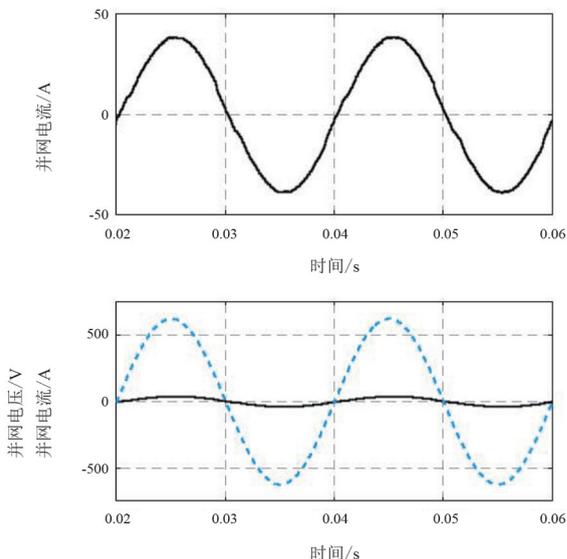


图 10 策略 1 并网电流和电压波形

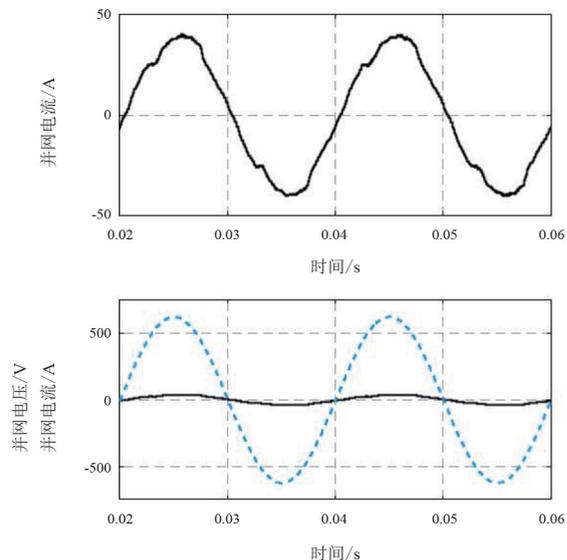


图 11 策略 2 并网电流和电压波形

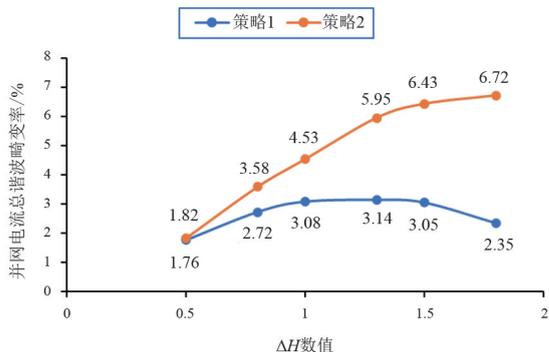


图 12 并网电流总谐波畸变率

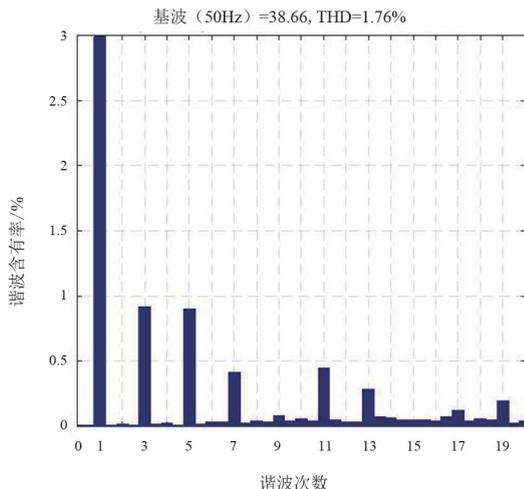


图 13 并网电流幅频特性

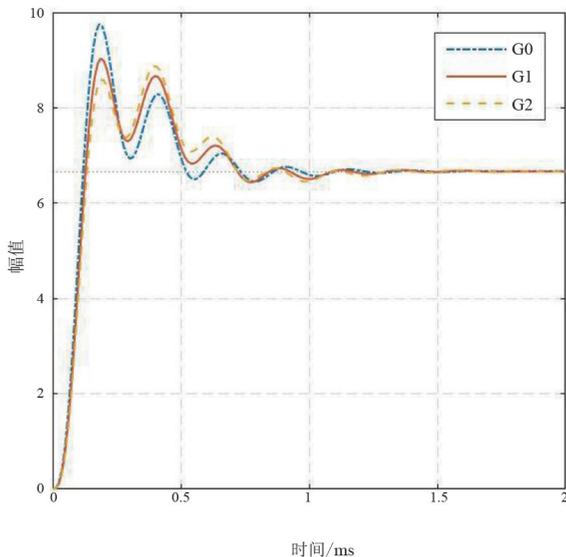


图 14 阶跃响应曲线

3 结 论

上面提出了一种新型多电平单相并网级联逆变器,并且基于单极倍频 SPWM 控制为其设计了两种不同的多电平调制策略。所提调制策略最终输出结果可以受到调制比和调制信号两方面的控制,增加

了调制策略的控制维度。为了适应所提级联逆变器的并网需求,优化推导了 LCL 滤波器的设计公式。通过仿真实验可以得出如下结论:

1) 所提新型多电平单相并网级联逆变器在仿真实验条件下可以正常工作,符合设计预期。

2) 单极倍频 APOD-SPWM 调制技术可以有多种不同调制策略,调制效果与载波移动距离紧密相关。在开环控制下,未执行单极倍频 APOD-SPWM 调制技术的 HB 模块调制比不变,执行该调制技术的 HB 模块调制比将发生变化;在闭环控制时,则是未执行该调制技术的 HB 模块调制比发生了变化。

3) 在并网逆变器闭环控制中,单极倍频 APOD-SPWM 调制技术的正弦调制信号将跟随载波变化而变化。初步认为这种情况与并网逆变器控制策略和调制比策略有关,但是其数学模型分析机理还不完全清楚。例如,调制信号为什么跟随执行策略的 HB 模块载波信号发生变化,而没有受到未执行策略的 HB 模块载波信号的影响等,这些还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 郑嘉龙,杨鸽,陈开宇,等.LCL 型多逆变器并网系统谐振研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):177-186.
- [2] ZHAO T, CHEN D L. A power adaptive control strategy for further extending the operation range of single-phase cascaded H-bridge multilevel PV Inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2):1509-1520.
- [3] 张兴,吴孟泽,王明达,等.单相光伏级联多电平逆变器漏电流抑制与功率均衡控制综述[J].电力系统自动化,2023,47(9):202-215.
- [4] 张国荣,颜丽花.单极倍频 CPS-SPWM 传输带宽的研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):1-8.
- [5] 戴珂,徐晨,丁玉峰,等.载波轮换调制在级联 H 桥型 STATCOM 中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(12):99-106.
- [6] 李佩滋,程晓绚,孙伟,等.基于 ARM 与 FPGA 的电流扰动发生器[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(3):71-77.

- [7] 程竟陵.改进 SHEPWM 技术及其在大功率并网逆变器的应用[D].杭州:浙江大学,2021:8-9.
- [8] JAMMALA V, YELLASIRI S, PANDA A K. Development of a new hybrid multilevel Inverter using modified carrier SPWM switching strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(10):8192-8197.
- [9] LI J Y, CHEN J, GONG C Y. An optimized reactive power compensation strategy to extend the working range of CHB multilevel grid-tied Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023,38(4):5500-5512.
- [10] 叶满园,康力璇,陈乐,等.级联多电平逆变器优化调制策略[J].高电压技术,2019,45(11):3612-3619.
- [11] 章勇高,熊健.级联多电平 H 桥逆变器的同相层叠型 SPWM 脉冲分配方法[J].电力自动化设备,2017,37(7):148-154.
- [12] WU M Z, ZHANG X, WANG M D, et al. A matching scheduling control strategy based on modulation wave reconstruction for the single-phase photovoltaic cascaded multilevel inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023,11(4):3899-3909.
- [13] 杨思为,张兴,毛旺,等.弱电网下级联 H 桥光伏并网逆变器稳定性分析[J].太阳能学报,2022,43(1):398-405.
- [14] WANG M D, ZHANG X, ZHAO T, et al. Harmonic Compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge PV inverter under unbalanced power conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12):1047-1048.
- [15] 郑嘉龙.基于非线性规划遗传算法的并网逆变器 LCL 滤波器参数优化研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(5):146-150.
- [16] 单庆晓,李永东,潘孟春.级联型逆变器的新进展[J].电工技术学报,2004(2):1-9.
- [17] 阮新波,王学华,潘冬华,等.LCL 型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.

作者简介:

郑嘉龙(1987),男,硕士,高级实验师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用与实验技术。

(收稿日期:2024-04-27)

“水风光多能互补优化运行” 专栏征稿启事

随着全球能源转型的加速推进，中国正积极构建新能源体系，水风光等可再生能源的开发利用进入了规模化、高效化的全新阶段。水风光跨时空多能互补优化运行成为提升能源结构清洁度、保障电力供应安全的关键路径。然而，随着风光新能源快速开发与接入，如何实现水风光多能系统的安全高效优化运行，成为当前新型电力系统建设面临的重大挑战。一方面，水、风、光能源特性各异，特别是风光出力的间歇性和波动性，给系统的供需平衡、稳定控制带来了巨大挑战。如何精准进行水风光出力预测、优化资源配置，进而实现不同时间、空间尺度下多能互补协调运行，成为提升系统整体效能的关键。另一方面，随着大规模风光新能源并网，其不确定性给系统的灵活调节能力和故障应对能力提出了更高要求。如何提升系统调节能力，在保障系统安全稳定运行的前提下，最大化利用可再生能源，减少弃风、弃光和弃水现象，是当前亟需解决的技术难题。

为了推动水风光多能互补优化运行相关技术的创新与发展，集中呈现和交流研究成果，《四川电力技术》特邀国网四川省电力公司电力科学研究院正高级工程师陈刚、清华四川能源互联网研究院副研究员罗彬和四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室副研究员陈仕军作为特约主编，主持“水风光多能互补优化运行”专栏，希望与作者和广大读者一起探讨水风光多能互补优化运行领域存在的关键技术问题。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

1. 专栏征稿范围（包括但不限于）：

- (1) 水、风、光多能源系统气象分析与预测方法
- (2) 水风光多能互补系统灵活组网与优化配置技术
- (3) 水风光多能互补系统联合控制与优化调度技术
- (4) 水风光多能互补接入系统稳定性分析与控制方法
- (5) 储能（含抽水蓄能）优化配置与运行技术
- (6) 含高比例水风光可再生能源的电力系统灵活调节技术

2. 截止时间

2025年7月15日截稿，并在《四川电力技术》择期刊出。

3. 投稿要求

- (1) 所投稿件须是未公开发表的原创性论文，未一稿多投，不涉及署名争议，具有较强的理论性、前瞻性和技术性；作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2) 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进行总体介绍。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。
- (3) 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8000字(包括图表)、正文部分6~8页为宜。
- (4) 结论部分应概括文章研究工作，给出具有创新性、指导性的结论。
- (5) 来稿请用Word排版，格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页的论文模板。

4. 投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站<https://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home>进行作者注册后在线投稿，投稿栏目请选择“水风光多能互补优化运行”专题。

5. 投稿联系人

陈老师：15308040901

程老师：028-69995169

罗老师：028-69995168

公益

低碳环保 节能减排

