四川电力技术 SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊(光盘版)》、《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刊源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》入选期刊

第2期

2022年4月20日

《四川电力技术》	
编辑委员会	日次
<b>主任委员</b> 胡海舰 <b>副主任委员</b> 刘俊勇 <b>委</b> 员(按姓氏笔画笔形为序) 马芳平 王 卓 王渝红 司马文震 年 珩 朱 康 何正友 余 熙 吴广宁 张安安 冬 晏 李富祥 李镇义 尚近勇 苏少春 邹见效 陈 峰 胡朝华 唐万斌 梅生伟 黄 琦	<ul> <li>·新型电力系统 ·</li> <li>抽水蓄能在四川电网的应用前景展望</li> <li></li></ul>
重秀成 将兴良 韩晓言       廖学静       秘     书 李世平       程文婷	500 kV 线路避雷器保护失效分析及改进措施研究 
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	基于击牙间原与可受电阻的配电网弧尤接地战障建模分析 
CN 51-1315/TM 2022 年第 45 卷第 2 期(总 278 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	<ul> <li>基丁调匹式捐弧线圈的虚幻接地解决捐施</li> <li></li></ul>
<ul> <li>主 编:李富祥</li> <li>副 主 编:裡文婷</li> <li>编辑出版:《四川电力技术》编辑部</li> <li>发 行:四川电力科学研究院</li> <li>地 址:成都市锦晖西二街 16 号</li> <li>邮政编码:610041</li> <li>빠凭 (202) 60005160 / 5165</li> </ul>	城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响的分析 魏铭池,魏 巍,刘 畅,徐 琳(61) 含 P2G 的多能源网优化调度研究 樊国旗,霍 超,李小腾,刘 斌,樊国伟,程 林,王志远,潘伟东(67) 基于复杂网络属性的电网灾难性事件综合风险评估 张 輝(74)
<ul> <li>电话:(028)69995169/5168/5165</li> <li>邮箱:cdscdljs@163.com</li> <li>印 刷:四川科锐得实业集团有限公司 文化传播分公司</li> <li>封面设计:四川科锐得实业集团有限公司 文化传播分公司</li> <li>国内定价:每册 12.00 元</li> </ul>	基于组合式变换器的川藏铁路贯通供电方案电气性能仿真分析 
[期刊基本参数]CN 51-1315/TM * 1978 * b * A4 * 94 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 17 * 2022-04	·····································

本期责任编辑 洪 洁 编辑 程文婷 洪 洁 罗 锦

# **CONTENTS**

#### · New Power System ·

Investigation into Application Prospects of Pumped Storage in Sichuan Power Grid
CHEN Gang, DING Lijie, HAN Xiaoyan, WANG Liang, LI Gan, SHI Huabo(1) Optimization Configuration of Distributed Energy Storage System Based on Branch Flow Model Constraints
Research on Renewable Energy Accommodation under Highly-resilient Power Grid
HUANG Jian, FAN Guoqi, JI Keqin, CHEN Zihan, ZHENG Qing, HU Jiheng, JIANG Yicheng, PAN Weidong(12) Research and Application of Grid-related Functions of Governor System in Biomass Power Generating Unit
GAO Jian, LAN Ligang, WANG Hongli, LI Gan(17)
Research on Harmonic Suppression Strategy of Centralized Photovoltaic Power Station Based on Impedance Reshaping
· High Voltage Technology ·
Analysis on Protection Failure and Research on Improvement Measures of 500 kV Line Arrester
LIU Shoubao, HOU Yucheng, SHENG Mingjun, FANG Yuan, TONG Li, WEI Changwei(28)
Research on Insulation Characteristics of SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> Gas Mixture JIA Chengqian, XIA Yalong, NI Yuan, XIE Shijun, ZHANG Chenmeng(33)
Modeling and Analysis of Arc Grounding Fault in Distribution Network Based on Breakdown Gap and Variable Resistance
LI Shilong, ZHANG Hua, LONG Cheng, GAO Yiwen, SU Xueneng(38)
Research on Impulse Induced Voltage of Metal Sheath of 500 kV AC Submarine Cable
WU Gaobo, YUE Hao, LI Jian, LUO Chujun, WU Qinghua(43)
Solutions for Virtual Grounding Based on Turn-adjustable Arc Suppression Coil
······ YUAN Mingzhe, MA Yani, WANG Qihang, ZOU Jingxin, CAO Ke(48)
Molecular Dynamics Research on Interfacial Compatibility of Cross-linked Healing Agent/Epoxy Resin
· Power System Technology ·
EAnalysis on Integration Effect of DC Traction Power Supply System for Urban Rail Transit on Grid Power Quality
WEI Mingchi, WEI Wei, LIU Chang, XU Lin(61) Research on Optimal Dispatch of Multi-energy Grid Considering P2G
FAN Guoqi, HUO Chao, LI Xianteng, LIU Bin, FAN Guowei, CHENG Lin, WANG Zhiyuan, PAN Weidong(67)
Comprehensive Risk Assessment of Catastrophic Accident in Power System Based on Complex Network
ZHANG Xian(74)
Electrical Performance Simulation Analysis of Through Power Supply Scheme for Sichuan-Tibet Railway Based on Combined Converters
XIA Yankun, REN Junjie(82)
Electric Power Design Optimization
Design of Rotary Interconnected Double Moving Contact Contact System for Circuit Breaker
LI Qihui, WU Jinsong, WANG Shuyue, CHEN Tianxiang(87)
Failure Simulation and Structure Optimization of Aluminum Alloy Terminal Board in Substation
CHEN Jiahui, FENG Jie, LAN Guitian, ZHAO Xinghong, PENG Qian, WANG Fangqiang, ZHAO Lihua, WU Longwen(90)

## SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

2022 Vol.45 No.2 (Ser.No.278) Bimonthly,Started in 1978 Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan, China Postcode:610041

#### Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering Sichuan Electric Power Research Institute Editor in chief:LI Fuxiang Editor & Publisher: Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

# 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望

陈  $M^1$ ,丁理杰<sup>1</sup>,韩晓言<sup>2</sup>,王 亮<sup>1</sup>,李 甘<sup>2</sup>,史华勃<sup>1</sup>

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;2. 国网四川省电力公司,四川成都 610041)

摘 要:随着适应高比例新能源接入新型电力系统加快构建,系统对储能等灵活调节电源的需要愈发迫切。作为目前技术最成熟、应用最为广泛、寿命周期最长、容量最大的一种储能技术,抽水蓄能进入了发展的快车道。文中介绍了 抽水蓄能的基本原理和发展现状,总结了抽水蓄能最新发展趋势;分析了四川电源特性和存在的问题,以及抽水蓄能 在四川电网的应用前景,并提出了适合四川电网实际的抽水蓄能的应用场景和模式。

关键词:抽水蓄能;新能源;四川电网

中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0001-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220201

# Investigation into Application Prospects of Pumped Storage in Sichuan Power Grid

CHEN Gang<sup>1</sup>, DING Lijie<sup>1</sup>, HAN Xiaoyan<sup>2</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, LI Gan<sup>2</sup>, SHI Huabo<sup>1</sup>

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

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

Abstract: With the accelerated construction of new power system for high proportion of new energy access, the needs for power supply with flexible adjustment such as energy storage are more and more urgent. Pumped storage, as one of the most mature and the most widely-used energy storage technology with the longest life cycle and the largest capacity, has entered into a fast track of development. The basic principle and development status of pumped storage are introduced, and the latest development trend of pumped storage is summarized. The characteristics and existing problems of power supply are analyzed as well as the application prospect of pumped storage in Sichuan power grid. At last, the application scenes and modes suitable for the practical needs of pumped storage in Sichuan power grid are proposed.

Key words: pumped storage; renewable energy; Sichuan power grid

0 引 言

近年来能源短缺、环境恶化、气候变暖,以化石 能源为主的传统能源结构不可持续,构建清洁低碳、 安全高效的新型能源体系势在必行。

过去5年,风电、光伏等新能源装机容量快速增长,2020年年底,全国风电和光伏总装机容量已达 534 GW,预计2030年将超过1200 GW<sup>[1]</sup>。但新能

基金项目:国家重点研发计划项目"分布式光伏与梯级小水电互补 联合发电技术研究及应用示范"(2018YFB0905200) 源发电天然具有的随机波动性,给系统的电力电量 平衡、调控运行、安全控制等诸多方面带来了巨大的 挑战和不利影响,限制了新能源的有效利用。为此, 引入储能增加系统灵活性、提升系统安全运行水平 和新能源消纳能力成为行业共识<sup>[2-4]</sup>。

抽水蓄能是目前技术最成熟、应用最广泛、寿命 周期最长、容量最大的大规模物理储能方式<sup>[5]</sup>。根 据中关村储能产业技术联盟统计<sup>[6]</sup>,截止 2020年, 全球抽水蓄能装机容量为 178 GW,占全球储能总装 机容量的 90.3%;中国抽水蓄能的装机容量规模达 到 31.79 GW,占中国储能总量的 89.3%。大规模开 发抽水蓄能电站已成为支撑新型电力系统建设的重 要措施,国家陆续出台多项政策支持抽水蓄能发展。

四川省是全国最大的水电清洁能源基地,截止 2020年,水电装机容量突破7892kW,预计2023年 年末水电装机容量将超过100GW;但其中径流式水 电站约占50%,水电整体调节性能较差。在四川发 展抽水蓄能,提升系统调节能力成为需求迫切。此 外,四川新能源将迎来快速发展,预计"十四五"末 风电和光伏装机容量将超过20GW,进一步为抽水 蓄能的发展提供了应用场景和需求。

下面调研了抽水蓄能的发展现状,总结了发展 趋势,结合四川电网的实际情况,分析了抽水蓄能在 四川电网的应用前景,并提出了适合四川电网实际 的抽水蓄能的应用模式。

## 1 抽水蓄能发展现状

抽水蓄能是利用负荷低谷电能或无法正常消纳 的新能源弃电电能抽水至上水库,在负荷高峰或需要 时再放水至下水库发电的水电站,是电力系统中最为 优质的灵活调节电源,具有削峰、填谷、调频、调相、事 故备用、黑启动等多种功能<sup>[4,7-8]</sup>,是电网安全稳定的 重要保障和大规模新能源并网消纳的关键支撑。

### 1.1 抽水蓄能的分类

1.1.1 按转速是否变化分类

按照转速是否变化,可分为定速抽蓄机组和可 变速抽蓄机组。

 1)定速抽蓄机组:转速不可调,发电功率可通 过导叶调节(与常规水电机组一致),抽水功率不可 调,目前在建的大型抽水蓄能基本都是定速机组。

2)可变速抽蓄机组:转速可调,发电工况下功 率可同时通过变导叶或变转速进行调节,调节范围 更广<sup>[9]</sup>;抽水工况下一般具有一定的功率调节能 力,可根据水头等运行工况变化调整最优转速,提高 抽水和发电效率,响应速度更快。又分为变转速和 变极调速两种方式,根据变转速原理不同,又可分为 双馈式和全功率式。

1.1.2 按有无天然径流分类

按照有无天然径流,可分为纯抽水蓄能电站和 混合式抽水蓄能电站<sup>[10]</sup>。

1) 纯抽水蓄能电站: 专为电网调节修建的, 无 法独立承担径流发电任务。其上水库没有径流或来 水量很小,水在上水库、下水库循环使用。一般用于 调峰、调频,不能作为独立电源存在。

2)混合式抽水蓄能电站<sup>[11]</sup>:其上水库有一定的 天然来水,电站同时安装常规水电机组和抽水蓄能 机组。

1.1.3 按水库调节性能分类[10]

按照水库调节性能,可分为日调节、周调节和季 调节抽水蓄能电站。

1)日调节抽水蓄能电站:水库调节能力仅满足 在日内循环。每日低谷负荷抽水,高峰负荷期发电, 水库的库容量按每日调峰的发电量决定。

2)周调节抽水蓄能电站:水库调节能力满足在周内循环。工作日负荷较高,每天的发电用水量大于抽水量;周末负荷较低,利用多余电能进行大量蓄水。

3)季调节抽水蓄能电站<sup>[12]</sup>:一般在年或多年调 节水电站中加装抽水泵,丰水期利用弃水电量抽水, 充分利用水库库容的跨季节调节能力,在枯水期放 水发电。

1.1.4 按机组类型分类

按照机组类型,可分为四机式(分置式)、三机 式(串联式)和两机式(可逆式)抽水蓄能机组。

1)四机式(分置式)机组:采用单独工作的抽水 机组和发电机组,抽水和发电各自独立运行。

2) 三机式(串联式) 机组:将发电机和电动机合 并为一体,与水泵、水轮机在一起而形成一种组合式 机组。

3)两机式机组:将水泵和水轮机合并为一体的可 逆式水泵水轮机,为现代抽水蓄能电站的主要机型。

1.1.5 其他分类

按水头高低,可分为低水头(100 m 以下)、中水头(100~700 m)、高水头(700 m 以上)。

按厂房布置特点,可分为地面式、地下式、半地 下式。

按照利用水的性质,可分为淡水抽水蓄能、 海水抽水蓄能<sup>[13]</sup>。

#### 1.2 抽水蓄能的发展现状

1882年,世界首座抽水蓄能电站在瑞士诞 生<sup>[14]</sup>。受限于社会经济发展滞后,中国抽水蓄能电 站的发展相对较慢。1968年,中国首台11 MW 抽 水蓄能机组在河北岗南电站投产<sup>[15]</sup>。1992年,河 北潘家口水电站先后投运3台90 MW 抽水蓄能机 组,中国抽水蓄能建设由此步入快车道<sup>[16]</sup>,数座抽 水蓄能电站在负荷中心城市建设以满足日益增长的 调峰要求。中国历年抽水蓄能装机容量增长情况如 图 1 所示。2017 年 5 月 19 日,中国装机容量突破 27.73 GW,正式超越日本成为世界上抽水蓄能装机 容量最大的国家。截止 2021 年 8 月,中国在运抽水 蓄能装机容量为 32.49 GW,在建规模为 54.93 GW。



## 2 抽水蓄能最新发展趋势

为适应新型电力系统建设和大规模高比例新能 源发展需要,助力实现碳达峰、碳中和目标,国家陆 续出台政策支持抽水蓄能发展。2021年5月7日, 国家发改委发布《关于进一步完善抽水蓄能价格形 成机制的意见》(发改价格[2021]633号),明确将 容量电价纳入输配电价回收,为抽水蓄能电站提供 了市场和政策环境。

#### 2.1 大型抽水蓄能电站加快建设

2021年8月6日,国家能源局发布《抽水蓄能 中长期发展规划(2021—2035年)》(征求意见稿) (下称《征求意见稿》)中,提出到2025年投产总规 模62 GW、到2030年投产200 GW、到2035年投产 总规模300 GW的发展目标,并明确提出了"十四 五""十五五""十六五"重点实施项目。虽然在9月 9日发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》(下称《规划》)中,将到2030年抽水蓄能投产 总规模较《征求意见稿》的200 GW降低到120 GW 左右。但是《征求意见稿》的200 GW降低到120 GW 左右。但是《征求意见稿》中提到的重点实施项目 依然可以视为经过初步选点的抽水蓄能规划发展重 点,可以基于此分析抽水蓄能的发展趋势。

对《征求意见稿》进行统计,得到各容量装机情况,如图 2 和图 3 所示。可以看到,已建成的抽水蓄能电站中,小型电站(装机容量小于 600 MW)数量超过 20%;随着大中型抽水蓄能电站建设技术水平

提高和电网调节需求增加,在建的抽水蓄能电站全部为大中型抽水蓄能电站,从"十四五"至"十六五",装机容量在1800 MW以上的大型抽水蓄能电站数量和装机容量均快速增加。

目前,中国在建单机容量最大的抽水蓄能电站为广东阳江抽水蓄能电站,单机容量400 MW<sup>[17]</sup>;总装机最大为河北丰宁抽水蓄能电站,装机容量为3600 MW<sup>[18]</sup>。



■装机容量 < 600 MW ■ 600 MW <装机容量 < 1800 MW ■装机容量 >1800 MW

图 2 各容量装机抽水蓄能电站数量发展趋势



图 3 各容量装机抽水蓄能电站总装机发展趋势

#### 2.2 抽水蓄能电站建设从负荷侧向电源侧转移

对已建、在建以及《征求意见稿》中明确的重点 实施项目进行统计,如图4所示。可以看到,已建抽 水蓄能主要集中在中东部负荷中心,西部地区仅有 内蒙古和西藏各有一座。在建的抽水蓄能电站中, 东部负荷中心依然占据 50%以上,而在"十四五" "十五五"规划重点项目中,东部地区比例急剧减 少,西部地区明显增强。主要有三方面原因:1)抽 水蓄能电站最初始的功能是对负荷进行削峰填谷, 因此负荷中心对抽水蓄能电站的需求最为迫切,优 先规划建设;2)随着社会经济发展,西部部分区域 中心负荷增长迅速,且电源空心化问题突出,迫切需 要抽水蓄能电站进行调节;3)在建设新型电力系统 中,西部地区大量新能源并网后,对抽水蓄能电站等 大容量储能有了更迫切的需求。



#### 图 4 各地区抽水蓄能电站总装机容量发展趋势

#### 2.3 变速抽水蓄能电站将快速发展

变速抽水蓄能技术是抽水蓄能发展的重要方向,是最具代表性的国际前沿技术之一<sup>[5]</sup>,尚属卡 脖子技术。目前,中国正在建设的河北丰宁抽水蓄 能电站<sup>[19]</sup>主要引进国外机组,采用双馈式变速模 式,得益于变速机组具有的快速响应、宽调节范围、 无功支撑等优点,非常适合与新能源进行互补联合 发电,特别是补偿新能源快速功率波动<sup>[20-22]</sup>。

为突破变速抽水蓄能关键技术,国家重点研发 计划"十三五"智能电网技术与装备重点专项安排 了两个项目进行技术攻关:1)由中国南方电网有限 责任公司承担的"海水抽水蓄能电站前瞻技术研 究"项目,该项目研发了 10 MW 双馈式变速抽水蓄 能机组样机,并开发试验平台<sup>[23-26]</sup>;2)由国网四川 省电力公司牵头的"分布式光伏与梯级小水电互补 联合发电技术研究及应用示范"项目,该项目将研 发国内首台全功率变速恒频抽水蓄能机组,并在 220 kV 春厂坝电站扩建 5 MW 全功率变速抽水蓄 能示范电站<sup>[27-30]</sup>。

研究表明,为保证系统灵活性和经济性,抽水蓄 能应占系统总装机容量的10%~15%,其中,变速抽 水蓄能机组容量应占抽水蓄能机组装机容量的 25%以上<sup>[5]</sup>。在未来新能源快速增长的形势下,随 着中国装备技术的突破,变速抽水蓄能必将迎来快 速发展。

## 2.4 基于常规梯级水电改/扩建抽水蓄能电站成为 快速发展模式之一

由于常规大型抽水蓄能电站建设周期长,一般 需要 6~8年,短期内很难满足新能源爆发式增长的 需要。为了尽量满足新能源并网需求,可通过对常 规梯级水电进行改/扩建,利用原有的引水系统和上 下水库,可大幅节约投资成本,且建设期一般在2年 以内,有以下两种模式: 1)通过对梯级水电进行改造,在年调节及多年 调节水电站中增加抽水泵或者扩建抽水蓄能机组, 形成具有季调节能力的大型抽水蓄能电站,实现跨 季节的削峰填谷,减少弃水,提高枯水期发电能力, 同时增强系统的灵活调节能力。这是短期内增强系统调节能力的重要手段之一。

2)随着电力电子设备成本下降,以全功率变速 恒频抽水蓄能机组技术为基础,对常规梯级小水电 进行改/扩建,形成中小型变速抽水蓄能电站。作为 一种优质的储能资源,其具有建设周期短、响应速度 快、调节范围广、运行效率高、无功支撑能力强等优 点<sup>[31]</sup>,非常适合与新能源进行互补联合发电,是未 来抽水蓄能发展的重要方向之一<sup>[32]</sup>。

## 3 四川电网应用抽水蓄能前景分析

#### 3.1 四川电网电源情况

四川水电资源丰富,技术可开发量为 148 GW, 经济可开发量为 145 GW。截止 2020 年年底,四川 电网统调装机 101.05 GW,其中水电占主导地位,装 机容量 78.92 GW,占 78.1%;新能源装机比例较小, 仅为 6.17 GW,占 6.11%,如图 5 所示。随着双碳目 标的提出,四川新能源也迎来爆发式增长,根据 规划,到"十四五"末,四川风电、光伏均将达到 10 GW,新能源装机容量比例达到 13.25%;到 2030 年,新能源装机容量将超过 40 GW,比例超过 20%。 虽然总体而言,四川新能源装机容量比例不高,但是 由于四川新能源资源主要集中在川西地区(如图 6 所示),特别是在河流、峡谷地带,风、光资源丰富, 使得四川在川西局部地区新能源比例高,给局部电 网安全运行带来极大挑战。



图 5 四川电网能源结构及增长趋势



#### 图 6 四川电网河流及光照资源分布

### 3.2 四川电网面临的主要问题

1)水电丰枯期特性差异明显、调节能力不足

四川水电站以无调节和日调节的径流式水电站 为主,如图7所示,图中外环表示各类型电站数量占 比,内环表示各类型电站装机容量比例。可以看到, 从装机容量看,径流式水电比例约50%,季调节水 电比例为25%,具有年及多年调节能力的不超过 30%,整体调节性能较差。由于河流天然来水的丰 枯差异大,四川电网水电枯水期发电能力仅为丰水 期的1/4~1/3 左右,水电发电量明显不足。



图 7 四川电网水电站主要调节性能比例

2) 丰水期少弃水和保外送的联合作用下, 调峰 能力不足

四川电网丰水期(6月—10月)水电发电能力 富裕,需要大规模外送消纳,截止2020年年底四川 水电外送能力34 GW,跨省外送能力全国第一。一 方面,径流式水电站丰水期都具备满发的能力,参与 调峰必然弃水,一般承担基荷;另一方面,为了减轻 受端电网的调峰压力,水电跨省外送曲线应避免出 现"反调峰"特性。因此,在少弃水和保外送的联合 作用下四川电网丰水期存在调峰能力不足的问题。

3)负荷中心电源空心化,高峰时段供电能力不足

随着川西大量新增水电投产,并经过梯格型网 架接力式送出,成都、川南负荷中心穿越潮流加重。 在"双碳"政策背景下,负荷中心新建常规能源难度 极大,呈现"电源空心化"特点,导致重负荷、大外送 方式下电压调节困难,电压稳定水平不足。

随着社会经济发展,成渝中心城市带负荷增长迅速,城市配电网建设速度无法满足高峰负荷供电需求。以成都为例,2020年,最高负荷达到15.026 GW,较2019年增长12.6%,但最大负荷超过14 GW 仅2 天,最大负荷超过12 GW 只有21 天,单纯依靠新增电网投资满足高峰负荷用的需求会造成大量的投资 浪费。

### 3.3 四川电网抽水蓄能的应用分析

### 3.3.1 四川抽水蓄能电站现状

1993年1月13日,中国第一座自行设计、制造的混流可逆式抽水蓄能电站——寸塘口抽水蓄能电 站,在四川省蓬溪县建成投产,发电装机容量为 2000 kW,抽水容量为2500 kW<sup>[33]</sup>。该电站已停止 运行,当前四川电网没有在运的抽水蓄能电站。

作为国家重点研发计划项目的示范工程,四川 正在建设春厂坝变速抽水蓄能电站,电站位于阿坝 州小金县,春厂坝原常规机组装机容量 54 MW,利 用原春厂坝电站引水管道扩建 1 台 5 MW 全功率变 速抽蓄机组,如图 8 所示。



图 8 春厂坝常规水电扩建抽水蓄能机组

电站建成后,将与木坡、赞拉、猛固桥三座梯级 小水电以及美兴光伏电站互补运行,构成梯级水光 蓄互补联合发电系统,为支撑大规模新能源并网,助 力实现"双碳"目标建立工程样板,示范工程如图 9 所示。

3.3.2 四川抽水蓄能电站应用场景

根据《征求意见稿》中提到的重点实施项目,四 川规划抽水蓄能电站装机容量总计约10.10 GW,主



### 图 9 梯级水光蓄互补联合发电示范工程

要分布在甘孜、成都、阿坝和绵阳等地区。结合四川 电网特点,未来抽水蓄能电站将在电源侧和电网侧 发挥重要作用。

1)电源侧:通过建设抽水蓄能电站与规模化新 能源进行互补,四川新能源比例虽然不高,但大多分 布在"三州一市"的川西地区,与水力资源在地理上 存在天然的互补性,在风电、光伏等新能源出力高峰 时段进行抽水,并通过抽水蓄能的快速响应特性补 偿新能源的快速功率波动,解决新能源大规模接入 带来的间歇性和波动性问题,提升新能源并网友好 性。并且,由于抽水蓄能作为一种大容量、长周期储 能,可通过共享储能等辅助服务模式解决新能源并 网对储能的需求。此外,还可以建设季调节抽水蓄 能电站,实现天然来水的季节性转移,提高梯级水电 站群枯水期的发电量。

2)电网侧:通过在成都、绵阳等负荷中心新建 抽水蓄能电站,可以在负荷低谷时段抽水、高峰时段 发电,达到削峰填谷的作用,可有效延缓输配电网投 资。能够提高电网调峰能力,减少调峰弃水电量,保 证水电外送曲线符合受端电网需求。更重要的是, 作为负荷中心具有快速响应能力的优质电源,抽水 蓄能电站具有调频、调相功能,可对负荷中心起到无 功电压支撑、紧急事故备用、黑启动等作用,确保负 荷中心安全稳定供电。

## 4 结 论

上面对抽水蓄能发展现状进行总结,重点分析 了抽水蓄能的发展趋势,指出电源侧、大容量、可变 速、梯级水电融合改造将是抽水蓄能未来发展的重 点方向。分析了四川电网电源装机容量特点和存在 的问题,结合抽水蓄能的发展趋势,提出了四川应用 抽水蓄能的主要场景和模式。通过在电源侧、电网 侧建设抽水蓄能电站,将有助于解决四川电网面临 的水电调节能力不足、少弃水和保外送矛盾、高峰时 段供电能力不足以及电源空心化等问题。随着"双 碳"目标的提出和新型电力系统的加快构建,抽水 蓄能迎来更为广阔的发展天地。

### 参考文献

- [1] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征
   程——在气候雄心峰会上的讲话[N].人民日报,2020
   -12-13(2).
- [2] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能 源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,48(7): 19-25.
- [3] 全国工商联新能源商会储能专业委员会.储能产业研 究白皮书 2011[EB/OL].(2011-01-28)[2021-09-14].http//www.esresearch.com.cn/#/resReport/Rdetail.
- [4] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应 用[J]. 电网技术, 2008, 32(7):1-9.
- [5] 高苏杰.抽水蓄能的责任[J].水电自动化与大坝监测, 2015(3):1-6.
- [6] 中国能源研究会储能专委会,中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书 2021[EB/OL].(2021-04-13)[2021-09-14].http//www.esresearch.com.cn/#/reReport/Rdetail.
- [7] S M Schoenung, C Burns. Utility energy storage applications studies
   [J].IEEE Tranactions on Energy Conversion, 1996, 11(3):658–665.
- [8] Ning Lu, J H Chow, A A Desrochers, Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market [J]. IEEE Tractions on Power System, 2004, 19 (2):834-841.
- [9] 贺儒飞.定速与变速抽水蓄能机组功率特性分析对 比[J].水电与抽水蓄能,2021,7(4):51-55.
- [10] 周学志,徐玉杰,谭雅倩,等.小型抽水蓄能技术发展现 状及应用前景[J].中外能源, 2017,22(8):87-93.
- [11] 梁国艳,梁中华,许晓峰.蓄能电站在电力系统的应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2006(4): 333-335.
- [12] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源
   电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自
   动化,2020,44(19):194-207. (下转第 37 页)

# 基于支路潮流模型约束的分布式 储能系统优化配置方法

### 谢 波<sup>1</sup>,戴博伟<sup>2</sup>,郝文斌<sup>1</sup>,胡俊阳<sup>3</sup>,杨彩虹<sup>2</sup>,李宁宁<sup>2</sup>

(1.国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041;2.西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;3.四川大学计算机学院,四川 成都 610065)

摘 要:为实现"双碳"目标及整县光伏战略规划,针对平抑配电网负荷以及分布式新能源出力波动性的分布式储能 选址定容问题,文中考虑系统收益与成本,在对电力系统约束条件进行相角松弛及二阶锥松弛的基础上结合电池储 能的运行特性,提出了一种基于支路潮流模型约束的分布式储能优化配置模型;在满足约束条件的基础上求解储能 配置方案及日前调度策略。算例通过与启发式算法——粒子群算法进行对比,验证了所提算法的有效性及收敛性。 关键词:优化配置:选址定容:支路流模型:储能配置

中图分类号:TM 715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0007-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220202

# Optimization Configuration of Distributed Energy Storage System Based on Branch Flow Model Constraints

XIE Bo<sup>1</sup>, DAI Bowei<sup>2</sup>, HAO Wenbin<sup>1</sup>, HU Junyang<sup>3</sup>, YANG Caihong<sup>2</sup>, LI Ningning<sup>2</sup>

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 3. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to achieve carbon peak and neutrality goals as well as the implement planning of "whole county photovoltaic (PV) "strategy, aiming at the allocation problem of distributed energy storage that stabilizes the volatility of distributed load and new energy output, and on basis of phase angle and second-order cone relaxation of power system constraints combined with the operating characteristics of battery energy storage, an optimization model for the configuration and day-ahead scheduling strategy of distributed energy storage is proposed based on the branch flow model constraints and considering the system benefits and costs. The calculation results verify the effectiveness and convergence of the proposed algorithm by comparing with the heuristic algorithm-particle swarm algorithm.

Key words: optimization configuration; siting and sizing; branch flow model; energy storage allocation

0 引 言

随着"碳达峰、碳中和"目标提出,针对中国作 为能源消费及生产大国目前主要依赖以燃煤为主的 化石能源进行发电的现状,提升清洁能源装机比例 是实现绿色可持续发展的必由之路。为贯彻落实 "双碳目标",2021年9月8日国家能源部综合司将 全国 676个县(市、区)作为"整县光伏"开发试点区 域提高配电网侧分布式能源装机量<sup>[1]</sup>。光伏能源 出力的随机性与波动性为新型电力系统消纳可再生 能源的能力及自身稳定性带来了新的挑战<sup>[2-3]</sup>,储 能系统具有的双向功率特性可以较好地平抑新能源 波动并提升配电网电能质量<sup>[4-6]</sup>。

目前,国内外学者针对配电网储能系统配置已 经做了大量的研究。文献[7-8]采用遗传算法分别 针对配电网时段性、局部性设备重过载负荷平衡需 求和高光伏渗透率状态下改善电网电压波动指标, 建立分布式储能选址定容的优化模型,并通过算例 验证了算法的可靠性,提升了配电网资产整体利用 率。文献[9]通过基于信息熵的场景提取方法生成 典型运行场景,通过改进粒子群算法最终求解光伏 及储能规划方案。文献[10]以降低网损和电压偏 移指标为目标,通过改进多目标灰狼算法求解超级 电容及蓄电池储能配置方案并通过算例验证其仿真 结果。以上文献采用了不同的启发式算法以求解储 能配置最优化问题,由于传统电力系统潮流约束具 有非线性特性,由其构成的优化问题具有非凸特性, 采用启发式算法对模型进行求解将有很大概率陷入 局部最优情景。

下面对电力系统功率约束进行基于支路潮流模型的凸松弛变换,通过相角松弛和二阶锥松弛两阶段松弛处理后,得到等效松弛为紧的支路潮流凸松弛模型;并结合储能系统约束条件,建立最小化储能投资成本的储能系统选址定容优化模型。最终,通过 IEEE 14 配电网节点系统进行仿真分析,得到了最小化投资成本的分布式储能系统选址定容方案和日内 调度策略,该方案有效减少了配电网净负荷峰谷差和功率波动,与大规模种群及迭代次数的粒子群算法计算结果相同。

## 1 基于支路潮流模型的凸松弛

传统电力潮流约束聚焦于电力系统节点,使得 含有 N 个节点的电力系统运行期间,节点 i 满足节 点电压方程及节点功率方程。

$$\dot{I} = \sum_{j=1}^{N} Y_{ij} \dot{U}_j \tag{1}$$

$$S = U_i I_i^* \tag{2}$$

式中: $U \setminus I \setminus \tilde{S} \setminus Y$ 分别为该节点的电压、电流、复功率和 对应节点导纳矩阵值;i,j表示系统对应的节点编号。

将式(2)带入式(1)中左侧节点电流 *İ*<sub>i</sub>即可得 到注入功率的潮流方程。

$$\begin{cases} P_i = \dot{U}_i \sum_{j=1} \left[ \dot{U}_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \right] \\ Q_i = U_i \sum_{j=1} \left[ \dot{U}_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \right] \end{cases}$$
(3)

式中,*G<sub>ij</sub>、B<sub>ij</sub>*分别为节点*i*与节点*j*之间的电导和电 纳。显然由于节点电压 *Ü<sub>i</sub>、Ü<sub>j</sub>*和节点间相角 δ<sub>ij</sub>均 为未知量,这就使加入注入功率的潮流方程约束条 件的电力系统优化问题难以求解。

支路潮流模型(branch flow model, BFM)由 Steven H Low 教授于 2013 年提出并证明模型应用 于辐射状网络的计算准确性<sup>[11-12]</sup>。其模型聚焦于 两节点之间的支路潮流信息,其模型如图1所示。



图1 支路潮流模型

流出节点 i 与流入节点 j 满足欧姆定律。

$$\dot{U}_i - \dot{U}_j = z_{ij} I_{ij}$$

$$z_{ij} = r_{ij} + j x_{ij}$$

$$(4)$$

流过支路的复功率满足

$$\tilde{S}_{ij} = \dot{U}_i I_{ij}^* \tag{5}$$

式中:*z<sub>ij</sub>、r<sub>ij</sub>、x<sub>ij</sub>*分别为支路潮流模型中节点*i*与节点 *j*之间的阻抗及对应的电阻、电抗;*I<sub>ij</sub>*为节点*i*,*j*之间 流过的电流。

将两节点支路潮流模型扩展到整个电力系统, 即有功率平衡方程为

$$\sum_{\substack{k:j \to k}} S_{jk} - \sum_{i:i \to j} (S_{ij} - z_{ij} |I_{ij}|^2) = s_j, \forall j$$
(6)

式中, $j \rightarrow k$  表示在生成树中,由节点j指向节点 $k_{\circ}$ 

在支路功率平衡的基础上进行相角松弛和二阶 锥松弛即可得到电力系统线性二阶锥潮流松弛条 件,如图2所示。



#### 图 2 基于支路潮流模型的凸松驰步骤

### 1.1 基于支路潮流模型的相角松弛

将式(5)带入式(4)中消去电流项可得

$$\dot{U}_{j} = \dot{U}_{i} - z_{ij} \frac{S_{ij}^{*}}{\dot{U}_{i}^{*}}$$
(7)

将式(7)乘以该式的共轭后可得节点电压模的 平方和支路电流模的平方的关系为

$$U_{j}^{2} = U_{i}^{2} - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})I_{ij}^{2}$$
(8)

令 *u* 表示 *U*<sup>2</sup>, *l* 表示 *I*<sup>2</sup>, 分离式(6) 有功功率及 无功功率可得经相角松弛后约束条件为

$$u_{j} = u_{i} - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})l_{ij}$$
(9)

$$\sum_{k:j \to k} Q_{jk} - \sum_{i:i \to j} (Q_{ij} - x_{ij} l_{ij}) = q_j, \forall j$$
 (10)

$$\sum_{k:j \to k} P_{jk} - \sum_{i:i \to j} (P_{ij} - r_{ij}l_{ij}) = p_j, \forall j$$
(11)

$$u_i l_{ij} = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \tag{12}$$

至此,除式(10)视在功率表达式外,功率约束 条件均完成线性化。此时模型经松弛后仍为非线性 非凸模型。

#### 1.2 基于支路潮流模型的二阶锥松弛

将式(10)松弛为旋转的二阶锥约束即可得

$$u_i l_{ij} \ge P_{ij}^2 + Q_{ij}^2$$
 (13)

进一步将该式改写为标准二阶锥约束形式即可 得到<sup>[13]</sup>

$$\begin{array}{c|c}
2P_{ij} \\
2Q_{ij} \\
l_{ij} - u_i \\
\end{array} \leq l_{ij} + u_i \quad (14)$$

经过上述松弛步骤,原潮流约束即转化为二阶锥 优化约束,结合其他约束条件和目标函数即可构建 对应的优化问题,此类问题可以通过 Cplex、Gurobi 等商业优化求解器进行快速求解。

## 2 分布式储能选址定容模型

#### 2.1 目标函数

现阶段储能系统建设成本仍然相对较高,从配 电网运行规划角度出发,储能选址定容配置问题将 以综合建设成本最小化为目标建立目标函数。

min  $C = C_{invest} + C_{main} + C_{loss} - D_{delay}$  (15) 式中:C 为总运行成本; $C_{invest}$ 为投资建设成本; $C_{main}$ 为运行维护成本; $C_{loss}$ 为网损成本; $D_{delay}$ 为延缓线路 升级收益。

1) 投资建设成本

$$C_{\text{invest}} = (C_{\text{p}}P_{\text{es}} + C_{e}E_{\text{es}}) \frac{i_{0} \cdot (1 + i_{0})^{n}}{(1 + i_{0})^{n} - 1} \quad (16)$$

式中: $C_p$ 为储能单位功率成本; $P_{es}$ 为储能系统额定功率; $C_e$ 为储能系统单位容量成本; $E_{es}$ 为储能系统额定容量;n为储能系统寿命年限; $i_0$ 为预期收益率。

2)运行维护成本

$$C_{\text{main}} = 365 \cdot M \cdot \sum_{t=1}^{T} P_{t,e} \Delta t \qquad (17)$$

式中:M为储能系统单位放电电量的运行维护成本;P<sub>t.e</sub>为t时刻储能系统的充放电功率。

3) 网损成本

$$C_{\rm loss} = \sum_{t=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} \sum_{i:i \to j} r_{ij} l_{ij} \Delta t$$
 (18)

式中,r<sub>ij</sub>l<sub>ij</sub>为支路潮流模型下流经线路的有功损耗。 4) 延缓线路升级收益

$$D_{\text{delay}} = (P_{\text{con,max}-} P_{\text{con,es,max}}) (1 - \frac{1}{e^{i_o \cdot \Delta n}}) \lambda_g \quad (19)$$

式中: $P_{con,max}$ 为无储能系统时配电网联络线峰值负荷; $P_{con,max}$ 为加入储能系统后配电网联络线峰值负荷; $\Delta n$ 为储能系统延缓配电网升级改造的年限,由式(20)计算得到; $\lambda_a$ 为配电网升级扩建成本。

$$\Delta n = \frac{\lg(1+\gamma)}{\lg(1+\beta)} \tag{20}$$

式中:γ为储能系统的削峰率;β为负荷年增长率。

#### 2.2 约束条件

1) 电力系统潮流约束

式(9)—式(11)和式(14)即为基于支路潮流模型的电力系统潮流功率平衡约束。

2)节点电压约束

$$u_{i,\min} \le u_i \le u_{i,\max} \tag{21}$$

式中, $u_{i,\min}$ , $u_{i,\max}$ 分别为相角松弛处理后节点i电压模值平方的上、下限。

3) 支路电流约束

$$l_{ij} \le l_{ij,\max} \tag{22}$$

式中,*l<sub>ij,max</sub>*为相角松弛处理后支路*ij*电流模值平方的上限。

4) 电池储能系统能量转换状态约束

在充放电过程中由于存在损耗,储能系统在能 量转换过程中会消耗一定量能量,使得能量转换效 率无法达到 100%,因此需要考虑电池储能系统能 量转换效率 η 对储能系统运行过程产生的影响。

$$\begin{cases} E_{t+1,e} = E_{t,e} - P_{t,e} \sqrt{\eta} \Delta t, P_{t,e} < 0 \\ E_{t+1,e} = E_{t,e} - \frac{P_{t,e}}{\sqrt{\eta}} \Delta t, P_{t,e} > 0 \\ E_{t+1,e} = E_{t,e}, P_{t,e} = 0 \end{cases}$$
(23)

式中, $P_{t,e}$ 、 $E_{t,e}$ 分别为t时刻状态下储能系统的充放 电功率和系统容量。

5)储能系统荷电状态约束

储能系统在运行过程中为了保证运行安全和系 统寿命,电池荷电状态不允许过充或过放以减少对 电池的损害,因此进行日内调控时,储能系统荷电状态应满足以下约束。

$$S_{\text{OC,min}} < S_{\text{OC,min}}$$
 (24)  
6)储能系统总容量约束

$$0 \le E_{\rm es} < E_{\rm e,max} \tag{25}$$

式中, $E_{e,max}$ 为储能系统容量上限。

7)储能系统总功率约束

 $\max | (P_{t,e}, t \in T) | \leq P_{es,max}$ (26) 式中,  $P_{es,max}$ 为储能系统最大允许的充放电功率。

3 算例分析

选取改进的 IEEE 14 配电网节点系统,该系统的网络拓扑结构如图 3 所示。



图 3 IEEE 14 配电系统拓扑结构

该配电网系统额定电压等级为 10 kV,分别在 节点 3 和节点 13 处接入 5 MW 分布式光伏系统,其 光伏功率出力曲线可以由历史采样数据进行聚类分 析后得到,原始出力采样数据如图 4 所示。配电网 负荷由固有负荷、公共建筑负荷、工商业负荷、居民 负荷 4 种负荷构成,其典型出力曲线可由相同聚类 方法产生,最终得出的配电网节点系统标幺化曲 线如图 5 所示。系统总最大净负荷为 26.66 MW+ j24.94 Mvar,选取其中一个节点作为储能的接入节 点,储能系统及启发式算法模型参数如表 1 所示。

表	1	模型	参数

	数值
储能单位容量成本 $C_{e}/(\overline{\pi} \cdot kWh^{-1})$	1570
储能单位功率成本 $C_{p}/($ 元・k $W^{-1}$ )	400
负荷年增长率β/%	1.5
预期年收益率 i。/%	8
$[S_{ m OC,min}, S_{ m OC,max}]$	[0.2,0.95]
储能系统能量转换效率 $\eta$	0.9
粒子群算法种群规模	100
粒子群算法迭代次数	200



经过求解,两种算法最终求解结果和求解时间 如表2所示,两种算法最终求得的储能选址定容策 略是一致的,但是粒子群算法为了确保取得全局最 优结果,其大规模种群数和迭代次数导致了求解时 间极大增加。

表 2 两种算法求解结果及求解时间

算法	接入节点 位置	接入容量/ MWh	接入功率/ kW	求解时间/s
粒子群算法	2	2	800	1 382.31
BFM 松弛算法	2	2	800	167.43

经过优化计算,目标函数各项计算结果如表 3 所示,配电网储能系统充放电功率和荷电状态联络 线功率净负荷及分别如图 6—图 7 所示。由图 7 对比 分析可得出加入储能系统后,配电网峰谷处功率波动 均有明显的改善,削峰率最终计算结果为2.96%,表

表 3 储能系统接入前后成本 单位:万元

目标函数	无储能	接入储能
投资建设成本	0	60.209
运行维护成本	0	1.089
网损成本	145.95	145.936
延缓线路升级收益	0	91.976
总成本	145.95	115.258

明储能系统具有一定的调峰效果,提高了延缓配电 网升级的收益。同时生命周期内建设成本小于延缓 线路升级收益,可以为电网带来一定经济效益。



图 6 储能系统充放电功率及荷电状态日内调控曲线



图 7 加入储能系统前后日内净负荷曲线

## 4 结 论

采用基于支路潮流模型松弛方法研究了配电网 系统储能选址定容调度问题,经过算例仿真的计算 结果,得到的主要结论如下:

 1)计算所得的储能系统调度模型可以有效平 抑配电网功率波动,减少配电网负荷、新能源出力波 动对主网的影响,可为配电网规划、设计、调度提供 参考;

2)使用基于支路潮流模型的松弛算法在保证 算法有效性的同时显著减少了迭代次数,避免了启 发式算法导致计算结果局部最优;

3)除储能规划调度问题外,基于支路潮流模型 的凸优化松弛可以应用于大部分辐射状配电网规 划、优化问题中,具有广阔的应用场景。

#### 参考文献

[1] 国家能源局.国家能源局综合司关于公布整县(市、 区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL]. (2021-09-08) [2021-10-28].http://zfxxgk.nea.gov. cn/2021-09/08/c\_1310186582.htm.

- [2] Xuewei Shi, Xuefang Shi, Wenqi Dong, et al. Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility[C].2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Chengdu, China: IEEE,2020:464-468.
- [3] A lireza Zare, C Y Chung, Junpeng Zhan, et al. A Distributionally Robust Chance-Constrained MILP Model for Multistage Distribution System Planning With Uncertain Renewables and Loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5248-5262.
- [4] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等.利用储能系统提升电
   网电能质量研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(8):15-24.
- [5] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等.用于缓解电网调峰压力的 储能系统规划方法综述[J].电力自动化设备,2017, 37(8):3-11.
- [6] 金晨,任大伟,肖晋宇,等.支撑碳中和目标的电力系统 源-网-储灵活性资源优化规划[J].中国电力,2021, 54(8):164-174.
- [7] 程瑜,黄森,刘瑞丰.面向配电网设备利用率提升的分布 式储能优化配置[J]. 智慧电力,2021,49(8):8-14.
- [8] 陶琼,桑丙玉,叶季蕾,等.高光伏渗透率配电网中分布 式储能系统的优化配置方法[J].高电压技术,2016,42
   (7):2158-2165.
- [9] 赵立军,张秀路,韩丽维,等.基于多场景的配电网分布 式光伏及储能规划[J/OL]现代电力:1-9[2021-11-19].DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0257.
- [10] 毛志宇,蒋叶,李培强,等.基于改进灰狼算法的配电 网储能优化配置[J/OL].电力系统及其自动化学报: 1-10[2021-12-03].DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa. 000890.
- [11] Masoud Farivar, Steven H Low. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part I [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2554-2564.
- [12] Masoud Farivar, Steven H Low. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part II [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2565-2572.
- [13] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe. Convex Optimization[M].Cambridge:Cambridge University Press, 2004. 作者简介:

谢 波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统规划及调度运行研究;

戴博伟(1995),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 规划及优化;

郝文斌(1976),男,博士,教授级高级工程师,从事电力 系统规划及调度运行研究。

(收稿日期:2021-12-14)

# 高弹性电网下新能源消纳研究

簧 健',樊国旗',季克勤',陈梓翰',郑 庆',胡济恒',蒋轶澄',潘伟东'

(1.国网金华供电公司,浙江金华 321001;2.国网浙江省电力公司,浙江杭州 310007)

摘 要:为制定新能源合理性发展战略,文中提出了一种高弹性电网下新能源消纳方法。首先,分析了新能源并网影响;然后,构建了高弹性电网下新能源消纳框架,通过电源、电网和负荷方面协调调度,提升新能源消纳能力,并提出多种新能源消纳项目;最后,通过案例仿真采用"移动变压器"和退役电池接入方案减小等效负荷峰谷差,提高系统调节能力,通过移动变压器灵敏性分析得到退役电池最佳配置容量,结果证明了所提方法对新能源消纳的促进作用。 关键词:高弹性电网;新能源消纳;移动变压器

中图分类号:TM 615 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0012-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220203

# Research on Renewable Energy Accommodation under Highly-resilient Power Grid

HUANG Jian<sup>1</sup>, FAN Guoqi<sup>1</sup>, JI Keqin<sup>1</sup>, CHEN Zihan<sup>1</sup>, ZHENG Qing<sup>1</sup>, HU Jiheng<sup>1</sup>,

JIANG Yicheng<sup>2</sup>, PAN Weidong<sup>1</sup>

(1.State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

Abstract: In order to formulate the rational development strategy of renewable energy, a method of renewable energy accommodation under highly-resilient power grid is proposed. Firstly, the impact of renewable energy integration is analyzed, and then a framework for renewable energy accommodation under highly-resilient power grid is established. The capacity of renewable energy accommodation is improved by the coordinated dispatch of power supply, grid and load, and a variety of renewable energy accommodation projects are proposed. Finally, the "mobile transformer" and the retired battery access program are adopted to reduce the equivalent load peak-valley difference and to improve the ability of system adjustment. The optimal configuration capacity of the retired battery is obtained through the sensitivity analysis of mobile transformer, and the actual calculation examples show that the proposed method can promote the renewable energy accommodation.

Key words: highly-resilient power grid; renewable energy accommodation; mobile transformer

0 引 言

新能源是引导未来经济社会发展的重要力 量<sup>[1-3]</sup>,但是由于新能源间歇性、随机性特点也对电 力系统带来巨大调峰压力<sup>[4-5]</sup>。

由于目前新能源功率预测误差较大,不能满足 实际工程需要,因此不能制定出可靠的发电计划,而 且系统需要增加备用来平抑新能源波动性和解决功 率预测精度低的问题。发电、用电需要保持实时平 衡,即需要保证总发电功率和负荷用电功率相等;而 新能源不具备随电网波动的自适应调频能力,因此 需要保留较大规模的常规电源来保持发用电功率实 时平衡。原有电网潮流一般呈辐射状,电压沿潮流 方向降低。随着新能源的接入,原有线路出现功率 减轻甚至潮流反向现象,导致电压抬升甚至出现电 压超标问题,因此需要安装无功补偿装置并需按照线 路功率采取不同的控制策略。高弹性电网具有高承

基金项目:国家电网有限公司科技项目"超高占比新能源电网发电 控制系统与运行控制策略研究"(XT71-18-041)

载、高互动、高效能等特点,能够解决能源协调调度、 能源生产和消费、能源供应和使用的时空转换问题。

文献[6]构建高弹性电网评价体系,缓解电网 建设中保障安全、追求低碳和降低成本的三角矛盾。 文献[7]研究高弹性电网应用场景,为实际电网应 用提供指导价值。文献[8]通过需求侧响应提高高 弹性电网建设能力。文献[9]提出退役电池综合利 用方法,通过能量管理系统并解决了退役电池存在 的容量和功率不相同问题,增加退役电池梯次利用 效益,推动高弹性电网建设发展。

然而,上述文献多关注于高弹性电网框架或评价 体系,没有或者单一对实际高弹性电网案例进行研究。 因此,下面建立了源-网-荷协调调度消纳框架多方面 促进新能源消纳,提出多个新能源消纳模式,并通过实 际算例验证所提高弹性电网新能源消纳的有效性。

## 1 高弹性电网新能源消纳框架

"源随荷动"的平衡原则可以适应负荷预测较 为准确的传统电网;随着新能源大规模并网,需要建 设高弹性电网通过"源荷互动"的平衡原则适应 "源荷"双端不确定性。不同于传统电网仅改变火 电机组出力应对不确定性的方式,高弹性电网采用 源-网-荷协调调度,应对电网源荷不确定性。



#### 图 1 传统电网与高弹性电网区别

"源"为电源侧,通过提高电源调节能力应对新 能源不确定性影响。采用火电机组灵活性改造降低 最小技术出力、自备电厂调峰及水电站库容优化调 度,增加新能源消纳空间;改造火电机组灵活性,可 以提高爬坡能力,应对新能源功率快速波动,减少新 能源限电。

"网"为电网侧,通过补强网架结构或者优化运 行方式提高电网传输能力,促进新能源消纳。主要 通过跨区通道建设提高电网互济能力;补强薄弱线 路提高电力输送能力;优化电网运行方式提高断面 传输功率。

"荷"为负荷侧,通过需求侧响应应对新能源波 动性。需求侧响应主要通过长时间尺度峰谷电价改 变用户用电行为间接改变负荷大小,成本较低;通过 短时间尺度直接控制可控负荷改变负荷大小,成本 较高。

## 2 高弹性电网新能源消纳模式

### 2.1 退役电池梯次利用储能

负荷低谷时为退役电池充电储能,相当于"填谷"负荷,增大电网低谷最小负荷,获取"填谷"收益;负荷高峰时退役电池放电,相当于"削峰"负荷, 减小电网高峰最大负荷,获得"削峰"收益。

退役电池梯次利用储能主要分为分布式退役电 池储能和集中式退役电池储能<sup>[10]</sup>。集中式退役电 池储能分为电源侧退役电池储能、电网侧退役电池 储能和负荷侧退役电池储能,其中:电源侧退役电池 储能为新能源与储能结合,提高新能源预测功率,平 滑新能源出力,减少新能源接入对系统峰谷特性影 响;电网侧退役电池储能主要作用为削峰填谷,提高 电网调节能力,减少电网投资,促进新能源消纳利 用;负荷侧退役电池储能主要分布在楼宇和工业园 区以及供电能力薄弱点,可以减轻用户用电费用,并 提高供电能力。分布式退役电池储能选取电价差较 大的工业用户,在电价低谷时退役电池存储电量,电 价高峰时退役电池放电减少电网用电,从而降低用 户电费支出。

### 2.2 新型综合能源站

新型综合能源站在原来变电站的基础上,升级 建设成为构建能源互联网基础的多功能枢纽型综合 能源站,包含变电站、电力数据中心站、储能站、天然 气分布式能源站、充电站<sup>[11]</sup>。

变电站仍然为电压转换和电能分配的功能。 电力数据中心站包含:Ⅰ类,为面向电网数据,包括调 度、通信、电网运行及管理、营业服务数据以及储能 站、充电站等数据;Ⅱ类,为衍生数据,面向电网和用 户;Ⅲ类,为分布式存储和运算中心的数据,面向地 区政府和行业。储能站主要应用有 3 个方面:1)作 为电力数据中心备用电源,当数据中心供电中断时, 替代不间断电源UPS为数据中心设备提供电能; 2)参与"削峰填谷",利用峰谷电价降低数据中心支 出电费,同时为电网提供调峰功能,提高供电能力和 供电可靠性;3)作为事故备用容量,当发生故障时,作 为应急电源供电。天然气分布式能源站以天然气为 燃料,通过冷热电联供等方式提高能源利用率,在负 荷中心就近实现现代能源供应方式,具有清洁、环保、 灵活布置、利用效率高等优点。充电桩利用分时电 价、储能电价等价格引导电动汽车用户有序充电,并 为电网提供调峰、储能等辅助服务,既可以增强电网 安全性和稳定性,又可以降低车主用车费用。

#### 2.3 多能互补协调调度园区

多能互补协调调度园区主要建立在工业园区和 产业园区,结合分布式能源、火电机组及其他能源装 置,满足用户冷、热、电、气多种需求,解决原有系统 资源利用率和自愈能力差、系统整体稳定性低和缺 少协调性的问题<sup>[12]</sup>,同时可以抑制新能源的波动性 和间歇性,提高新能源利用率。

多能互补协调调度园区主要由供电子模块、供 热子模块、供冷子模块、供气子模块构成,典型多能 互补协调调度园区如图2所示。当新能源发电功率 较大时,多余电能用于制氢、制冷和制热;当新能源 功率较小时,增大供热子模块发电功率并利用供气 子模块发电。



图 2 典型多能互补协调调度园区

## 3 案例仿真

#### 3.1 案例模型

某旅游景点专线用户,其供电所变压器参数 3000 kVA×2,原有间隔如图 3 所示。目前,最大负 荷为 5800 kW,近年来负荷增长迅速,预计最大负荷 将达到 7600 kW,其预测典型负荷序列如图 4 所示。 按照原有电网发展规划,需要扩建供电所,其所需成本巨大,且需审批和建设时间较长。这里通过高弹性电网规划方案,在供电所原有间隔基础上,通过在10 kV待用间隔1接入"移动变压器",并在10 kV待用间隔1低压380 V接入退役电池及新能源光伏,光伏组容量为12 kVA,拟接入100组(其典型功率序列如图4所示)增加电能供给,减少负荷增长对电网带来的巨大压力。



#### 3.2 约束条件

原规划方案供电功率平衡约束为

$$P_{\bar{y}_{\bar{y}_{t},t}} + P_{\bar{y}_{\bar{y}_{t},t}} = P_{1,t}$$
(1)

式中: $P_{g_{\overline{y}_{t}}}$ 为原供电所变压器功率; $P_{\overline{y}_{\overline{y}_{t}}}$ 为扩建供电所变压器功率; $P_{1,t}$ 为负荷功率。

高弹性电网规划方案供电功率平衡约束为

 $P_{\text{FF},t}$  +  $\sigma P_{\text{FF},t}$  +  $P_{\text{N},t}$  =  $P_{1,t}$  +  $\varepsilon P_{\text{B},C(\text{F}),t}$  (2) 式中: $P_{\text{FF},t}$ 为移动变压器功率; $R_{\text{N},t}$ 为新能源功率;  $P_{\text{B},C(\text{F}),t}$ 为退役电池充(放)电功率,充电功率记 为正,放电功率记为负; $\sigma$ 为配置移动变压器系 数; $\varepsilon$  为配置退役电池系数。退役电池充(放)电 功率约束为

$$\left| P_{\mathbb{B}\mathfrak{A}, \mathbb{C}(\mathbb{F})}^{\min} \right| \leq \left| P_{\mathbb{B}\mathfrak{A}, \mathbb{C}(\mathbb{F}), \iota} \right| \leq \left| P_{\mathbb{B}\mathfrak{A}, \mathbb{C}(\mathbb{F})}^{\max} \right| \quad (3)$$

式中, $P_{\mathbb{B}\mathcal{H},C(F)}^{\min}$ 和 $P_{\mathbb{B}\mathcal{H},C(F)}^{\max}$ 分别为退役电池充(放)电最大、最小功率。

退役电池电量 E<sub>退役</sub>,约束为

$$E_{\mathbb{B}\mathcal{X}}^{\min} \leqslant E_{\mathbb{B}\mathcal{X},\iota} \leqslant E_{\mathbb{B}\mathcal{X}}^{\max} \tag{4}$$

式中, *E*<sub>退役</sub>和 *E*<sub>退役</sub>分别为退役电池充(放)电最大、 最小电量, 分别为 0.1 和 0.9 倍退役电池容量。

退役电池电量状态为

 $E_{S,t+1} = E_{S,t} + \eta_{C} \cdot P_{S,S,C,t} - \eta_{F} \cdot P_{S,S,F,t} \quad (5)$ 式中: $\eta_{C}$  和  $\eta_{F}$  分别为退役电池充放电能系数,均取 0.95。

等效负荷 P<sub>1,等效,</sub>为负荷减去新能源的值,如果 该系统中接入退役电池,则负荷为通过退役电池充 (放)电优化后的负荷。

$$P_{1, \#_{\mathcal{W}, t}} = P_{1, t} + P_{\mathbb{B}_{\mathcal{U}, C(F), t}} - P_{N, t}$$
(6)  
等效负荷峰谷差为

$$P_{1,\$\&,v} = P_{1,\$\&,\max} - P_{1,\$\&,\min}$$
(7)

式中: $P_{1, \text{\style by}, v}$ 为等效负荷峰谷差; $P_{1, \text{\style by}, \text{max}}$ 为最大等 效负荷; $P_{1, \text{\style by}, \text{min}}$ 为最小等效负荷。

### 3.3 仿真计算

按照原规划方案,需扩建变压器参数为2000 kVA, 此时供电解决方案如图 5 所示。



图 5 原规划方案供电解决方案

按照高弹性电网规划方案,选移动变压器参数 分别为 500 kVA 和 1000 kVA,结合退役电池供电, 选取移动变压器参数分别为 500 kVA 和 1000 kVA 时的退役电池,如图 6 所示。



由图 6 可知,选取移动变压器参数量分别为 500 kVA 和 1000 kVA 时的退役电池放电最大功率

为1100 kW 和600 kW,放电电量分别为1727 kWh 和228 kWh,则对应退役电池容量至少为1818 kVA 和240 kVA,此时对应退役电池可以选取1150 kW/ 2300 kWh,和650 kW/1300 kWh。

采用原规划方案扩建 2000 kVA 变压器和采用 高弹性电网规划方案选取 500 kVA 和 1000 kVA 时 接入光伏后等效负荷如图 7 所示。



由图 7 可知,采用 3 种不同接入方案下最大等 效负荷分别为 7249 kW、6330 kW 和 6449 kW,最小 等效负荷分别为 1202 kW、1557 kW 和 1448 kW;等 效负荷峰谷差为 6047 kW、4773 kW 和 5051 kW。采 用高弹性电网规划方案,可减小等效负荷峰谷差,接 入 500 kVA 和 1000 kVA 移动变压器方案可以分别减 小 1274 kW 和 996 kW,其中接入 500 kVA 移动变压 器方案减小等效负荷峰谷差更多,多减小 278 kW。

高弹性电网规划方案不仅主要体现在其调峰能力上,在建设方面将"移动变压器"作为"能源插座"可以解决之前规划不能满足当前电力增长过快的需求也体现出成本优势。该"能源插座"通过电网接入安全评估和调试即可投入运行,避免新建变压器审批和土建时间过长问题。以节约审批和土建时间2个月为例,该地区负荷损失成本按照负荷参与需求侧响应4元/kWh计算,则该段时间内损失可达68.2万元;按照浙江省1 kWh产生GDP为13.37元计算,则可减少损失228.02万元。如果每千瓦时产生的GDP更高,带来的经济损失更大。

### 3.4 移动变压器接入参数灵敏性分析

选取接入不同参数移动变压器,退役电池对应 的放电电量和放电最大功率如图 8 所示。

由图 8 可知,随着接入不同参数移动变压器,退 役电池放电电量和最大放电功率不断降低,放电电 量降低更快。

由于原供电能力为 6000 kW,需要解决负荷增 长后功率大于 6000 kW 的部分,因此统计负荷功率





## 图 8 接入不同参数移动变压器的退役电池 对应的放电电量和最大放电功率对比



## 图 9 负荷大于 6000 kW 持续负荷功率和 负荷功率概率分布

由图 9 可知,负荷功率主要分布在 6000~6800 kW 区间,因此随着移动变压器在该区间接入功率增加,需 要配合移动变压器供电的退役电池放电电量降低更 快;此外由持续负荷功率和负荷功率概率分布可知, 在负荷分布集中区间采用移动变压器供电,在负荷 分布较少区间采用退役电池供电,可以更好地解决 电量问题,进而验证了所提高弹性电网方法采用移 动变压器和退役电池共同供电的有效性。

退役电池容量和额定放电功率处于 2:1 的数量 关系,则对应的退役电池容量、移动变压器参数和退 役电池所需的最大放电功率如图 10 所示。





由图 10 可知,退役电池容量和额定功率数值符 合 2:1 关系且接近所需最大放电功率的移动变压器 选取容量为 300~500 kVA。选取移动变压器参数分 别为 300 kVA、400 kVA、500 kVA 时退役电池选取 1800 kW/3600 kVA、1350 kW/2700 kVA 和 1150 kW/ 2300 kVA,其中退役电池选取 1350 kW/2700 kVA 时, 所需最大放电功率为 1300 kW,最接近最大放电功率。

## 4 结 论

新能源的发展有助于"碳中和"目标的实现,但 是新能源并网会对电网的调峰和电压两方面带来影 响。上面针对新能源对电网带来的挑战,提出高弹 性电网下"源-网-荷"新能源消纳框架,并结合地区 实际特点,提出退役电池梯次利用、靠近用能大户和 新型综合能源站等方案,促进新能源消纳的同时,促 进"碳中和"目标实现。

通过实际算例,利用高弹性电网规划方案,避免 了传统规划方案建造费用高、审批和建设时间长的 缺点。通过在待用间隔接入"移动变压器"和退役 电池,可以实现电网模块化建设和"即插即用"功 能,并可以减少等效负荷峰谷差。

#### 参考文献

- [1] 叶强,胥威汀,汪伟,等."碳中和"愿景下的四川电力 减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [2] 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,等.大规模虚拟储能模式平 抑新能源功率预测误差研究[J].四川电力技术,2021, 44(2):19-23.
- [3] 张家军,陈杰,常喜强,等.基于 EMD 与模型预测控制算法的风电功率平抑[J].四川电力技术,2021, 44(2):38-42.
- [4] 任景,薛晨,马晓伟,等.源荷联动调峰辅助服务市场两 阶段模型[J].电力系统自动化,2021,45(18):94-102.
- [5] 贺海磊,张彦涛,孙骁强,等.考虑频率安全约束的西北 电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J].中国电 机工程学报,2021,41(14):4753-4762.
- [6] 尹积军,夏清.能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J].中国电机工程学报,2021, 41(2):486-497.
- [7] 周兵凯,杨晓峰,李继成,等.多元融合高弹性电网关键 技术综述[J].浙江电力,2020,39(12):35-43.

(下转第60页)

# 生物质发电机组调速系统涉网功能研究及应用

### 高 剑<sup>1</sup>,兰立刚<sup>2</sup>,王鸿砾<sup>2</sup>,李 甘<sup>1</sup>

(1.国网四川省电力公司,四川成都 610041;2.国网四川综合能源服务有限公司,四川成都 610072)

摘 要:针对生物质发电机组调速系统的涉网功能安全风险和性能缺陷,提出了一套完整改造方案。方案包括三方 面内容:数字电液控制系统由低压透平油纯电调改造为高压抗燃油纯电调;涉网保护-超速保护控制逻辑及定值适应 电网要求重新整定;一次调频控制策略按试验导则要求重新设计并与超速保护控制动作相结合。该方案既能满足电 网安全稳定运行要求,又能满足电厂安全运行要求,对加强生物质发电机组的涉网安全管理工作有着重要的借鉴和 推广意义。

关键词:数字电液控制系统;超速保护控制;一次调频

中图分类号:TM 611 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0017-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220204

# Research and Application of Grid-related Functions of Governor System in Biomass Power Generating Unit

GAO Jian<sup>1</sup>, LAN Ligang<sup>2</sup>, WANG Hongli<sup>2</sup>, LI Gan<sup>1</sup>

(1.State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;2.State Grid Sichuan Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: In order to eliminate risks and enhance performance of grid-related functions of the governor system in biomass power generating unit, a complete transformation scheme is proposed. The scheme includes three aspects: firstly, the digital electrohydraulic control system (DEH) is transformed from a low-pressure turbine oil pure electronic regulation to a high-pressure fire-resistant oil pure electronic regulation; secondly, the grid-related protection over-speed protection control (OPC) logic and settings is reset according to the requirements of power grid, and thirdly, the primary frequency control (PFC) strategy is redesigned according to the test guideline and combined with the over-speed protection control (OPC) action logic. The proposed solution not only meets the requirements of the safe and stable operation of power grid, but also meets the requirements of the safe operation of thermal power plants, so that it has important reference values and promotion significance for the grid-related safety management of biomass power plants.

Key words: digital electro-hydraulic control system ; over-speed protection control; primary frequency control

0 引 言

2019年6月,渝鄂背靠背柔性直流联网工程正 式投运以来,由川、渝、藏三省电网组成的西南电网 与华中—华北电网组成的两华电网交流解耦,正式 进入异步联网运行。西南电网在异步联网后,交流 同步电网规模仅为原两华电网的 1/6,电网转动惯 量显著减小,频率调节能力弱,频率稳定问题突出, "小电网大外送"的特征使得西南电网频率越限的 风险较异步联网前剧增。异步联网后,在发生多直 流同时换相失败或者闭锁、损失大型电源或大容量 送电通道等严重故障时,维持西南电网的频率稳定 将更为困难<sup>[1-3]</sup>。

另一方面,西南电网水电装机容量占到全网总装机容量的70%左右。在国家"碳达峰、碳中和"总体目标下,火电机组装机容量增长空间和装机容量比例在"十四五"期间将进一步压缩。由于水电机

组在 0.1 Hz 以下频段表现为负阻尼特性,西南电网的超低频振荡风险突出。为此,西南电网调整了网内主力水电机组调速系统 PID 参数,大幅放慢了水电机组出力调节速度,从而抑制全网超低频振荡风险,但同时这也导致水电机组的一次调频性能严重削弱<sup>[4-6]</sup>。因此,充分发挥火电机组的一次调频能力,对于西南电网的频率稳定就具有更重要的意义。

随着生物质发电的不断发展壮大,生物质发电 机组总装机容量仅在四川就已突破1000 MW,其对 电网频率稳定的作用应予以重视。由于四川电网内 生物质机组单机容量小、台数众多、管理粗放,较长 时间以来对发电机组涉网功能和性能缺乏重视,存 在较高的涉网安全风险。因此,针对西南电网的网 源协调工作特殊性,亟需开展生物质机组调速系统 涉网安全功能改造完善。

## 1 汽轮机数字电液控制系统

汽轮机数字电液控制系统(digital electrohydraulic control system, DEH)主要分为低压透平 油纯电调 DEH 和高压抗燃油纯电调 DEH。为节省 投资,生物质发电机组调速系统大都采用低压透平 油 DEH。DEH 发出的阀位指令信号,经伺服放大器 后,直接驱动式伺服阀(direct drive valve, DDV)将电 信号转换成脉动控制油压信号控制动态进油,直接控 制油动机带动调节汽阀以改变机组的转速或功率,如 图 1 所示。低压透平油 DEH 有着系统简洁、制造成 本低、运行维护费用低和抗污染能力强等特点。



图 1 低压透平油电液伺服系统原理

西南电网异步运行以来,频率稳定问题成为电

网安全稳定运行的主要问题之一,这对并网机组一次调频响应特性和动态性能提出了更高要求。低压透平油 DEH 在实际运行中存在阀门调节迟缓率大和非线性问题,影响机组一次调频性能;另一方面,低压透平油 DEH 阀门开关动作特性不一致,在机组保护动作快关调节汽门(以下简称调门)时关闭缓慢,易造成机组超速,影响机组和电网安全运行。

随着电力工业的发展进步,高压抗燃油 DEH 在 大中型火电机组中已有广泛、成熟的应用。高压抗 燃油 DEH 具有控制精度高、系统迟缓率小、汽机保 护动作阀门关闭快速安全,能有效防止机组超速等 优点,因此特别适用于当前电网快速发展,以及对机 组一次调频性能要求高的场景<sup>[7-9]</sup>。

目前,四川新投运的采用高压抗燃油 DEH 的生物质机组均无一次调频性能不合格的情况,而部分采用低压透平油 DEH 的生物质机组则因调速系统性能不佳造成一次调频性能指标不满足试验导则要求。因此,建议新投运生物质机组应采用技术成熟、优点突出、使用广泛的高压抗燃油 DEH。

## 2 涉网保护功能

按照四川电网高周切机要求,汽轮机超速保护 控制(over-speed protection control,OPC)功能应与频 率相关的涉网保护定值相匹配,并网火电机组在频率 上升至51.5 Hz时,机组正常运行时间应不低于3s, 并确保 OPC 动作后机组保持并网运行,避免机组在 电网频率异常时频繁、无序动作<sup>[10-13]</sup>。据此对生物 质机组 OPC 功能做了完善和改进,如图2所示。



图 2 OPC 动作逻辑原理 1) 为满足电网稳定运行要求,设计有并网机组频

率高于 51.5 Hz(汽轮机转速 3090 r/min)延时 3 s OPC 动作逻辑,而在机组未并网时,仍沿用原逻辑即 频率高于 51.5 Hz 立即动作逻辑;

2)为防止 OPC 动作后,汽轮机总阀位指令清 零,机组所有调门关闭,导致发电机逆功率保护动 作,设计逻辑保证:机组并网运行,OPC 动作复位 后,汽轮机控制方式均切换为阀控方式,并将总阀位 指令保持在 OPC 动作之前的值,以便电网高频故障 消失机组能够快速接带负荷。

3)为避免电网频率异常时机组 OPC 保护频繁 动作,引起电网频率大幅波动,设计逻辑如下:机 组并网运行时,OPC 保护在动作后至转速恢复正 常1 min内闭锁再次动作,同时在此期间开放一次 调频幅度下限(但不突破机组最小技术出力)。 这一设计确保 OPC 保护在网频异常时不会反复 动作,且如电网因线路故障网频持续偏高时,利 用开放下限的一次调频指令,直接叠加到总阀位 指令,使调门开度维持在合理范围,防止网频持 续升高。

4)为满足电网稳定运行要求,机组并网运行时,如 OPC 保护包含汽轮机转速加速度保护,屏蔽 加速度保护,以防止汽轮机转速加速度保护误动引 起 OPC 保护动作。

5)为防止机组并网时对侧变电站故障造成机 组带部分地区负荷孤网运行而出现频率飞升,在并 网机组频率51.5 Hz 延时3 s OPC 动作基础上,增加 频率52 Hz(汽轮机转速3120 r/min)第二道 OPC 保 护,防止机组在孤网运行时汽轮机转速在3 s 内飞 升过快<sup>[14]</sup>。

3 一次调频控制策略优化

按照火电机组一次调频试验导则要求,设计一次调频逻辑如下<sup>[15]</sup>:

1)设置机组一次调频正常范围为机组最小技术出力至 106% P<sub>e</sub>(P<sub>e</sub>为机组额定功率);根据记忆的一次调频动作前的机组负荷,与调频上、下限比较确定裕量,通过调频裕量限制调频动作幅度。一方面,当机组负荷小于最小技术出力时,开放增负荷方向调频、闭锁减负荷方向调频;负荷大于 106% P<sub>e</sub>时开放减负荷方向调频、闭锁增负荷方向调频,以确保

一次调频动作始终处于机组的有效调节范围及安全运行区间。另一方面,当 OPC 超速限制动作时,开放一次调频下限至-100%*P*。,但仍受机组最小技术出力限制,确保 OPC 动作复位后,机组负荷不低于最小技术出力,在系统频率恢复正常后,能够快速接待负荷。如图 3 所示。



图 3 一次调频负荷目标设备

2)为克服调速系统迟缓率对小频差一次调频 影响,在一次调频不等率函数中,设置考虑调节系统 迟缓率的一次调频不等率函数。通过阶跃量克服系 统迟缓率以响应小频差扰动,确保一次调频动作的 有效性,使实际调频负荷指令满足"两个细则"考核 指标要求,并能克服系统迟缓率造成实际一次调频 动作积分贡献电量的不足<sup>[16]</sup>。

3) DEH 一次调频采用增量前馈与功控闭环相 结合的方式,一次调频流量前馈根据不等率函数转 换为汽机流量前馈,并采用主汽压力函数修正,以确 保一次调频在不同压力下动作的持续性和准确性, 如图 4 所示。



图 4 一次调频功能典型原理

## 4 应用效果

2020年年末,西南电网某火电机组正常运行时,电网发生瞬时故障,汽轮机加速度限制保护误动作,触发 OPC 超速保护动作,全关闭所有汽轮机调门,总阀位指令归0。随后电网故障消除,OPC 动作复位,总阀位指令仍保持0,最终触发发电机逆功率保护动作,机组非计划停运。该火电机组采用所述涉网保护控制策略对调速系统进行改造,成功消除了异常脱网的风险。

某 15 MW 生物质发电机组,采用机组出厂涉网 保护控制策略,进行汽轮机转速大于 3090 r/min(即 网频大于 51.5 Hz) OPC 超速保护仿真。仿真结果 如图 5 所示:转速大于 3090 r/min 后,立即触发 OPC 超速保护动作,总阀位指令和调门快关置 0,实 际功率为 0,其后转速虽恢复正常转速 3000 r/min, 总阀位指令仍保持 0,在无运行人员手动干预的情 况下,汽轮机出现逆功率后逆功率保护延时 1 min 动作,最终引起汽轮机 ETS 保护动作,机组全停。



图 5 涉网保护控制改造前机组 OPC 仿真曲线

该机组应用所述涉网保护控制策略后,进行转 速大于 3090 r/min OPC 超速保护仿真。仿真结果 如图 6 所示:机组功率 15 MW、转速超过 3090 r/min 时,首先,一次调频作用使机组功率下降 10%(最大 正常调频幅度),3 s 后 OPC 超速保护动作触发,调 门快关(阀位反馈置 0),总阀位指令仍保持不变, OPC 动作 2 s 后自动复位,调门恢复开启;在 OPC 动作开放一次调频下限及大于机组最小技术出力限 制下,调门恢复开启至机组功率大于最小技术出力, 避免发电机逆功率保护动作。

随着转速恢复至 3000 r/min(即网频恢复 50 Hz), 调门在一次调频作用下恢复开启至达到总阀位指令, 满足电网故障消除后机组接带负荷要求;随后若电网 再次发生故障,转速再次升高到 3090 r/min(1 min 内),此时 OPC 保护不动作,依靠一次调频开放下限 功能关小调门,降低机组出力,避免网频短时大幅度 波动时,OPC 保护反复动作/复位,调门反复开启/ 快关,满足汽轮机安全运行要求。



图 6 涉网保护控制改造后 OPC 与一次调频仿真曲线

## 5 结 论

随着西南电网生物质机组总装机容量不断增长, 生物质发电对城市供电安全和垃圾废物处理都发挥 着不可替代的作用,对电网频率稳定的支撑作用也愈 发重要。针对生物质机组调速系统的涉网功能和性 能存在的缺陷,从汽轮机数字电液控制系统改造、涉 网保护整定和一次调频策略优化三方面提出了一套 完整改造方案,对加强生物质机组的涉网安全管理 工作有着重要的借鉴价值和推广意义。

#### 参考文献

- [1] 陈刚,丁理杰,李旻,等.异步联网后西南电网安全稳定特 性分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(7):76-82.
- [2] 屠竞哲,张健,王建明,等.大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5492-5499.

(下转第54页)

# 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究

### 郑 鑫1,王若瀚2

(1. 重庆高速工程顾问有限公司,重庆 401147;2. 国网重庆市电力公司,重庆 404100)

摘 要:受线路的阻抗以及各级变压器阻抗存在的影响,电网与集中式电站间往往会因此产生负面的交互作用,很可能导致系统的稳态性能降低,主要体现为入网电流的谐波问题。针对集中式光伏电站输出电流传输过程中的谐波放 大问题,以阻抗重塑为设计思路,通过串并联虚拟阻抗,在控制策略中引入网侧电压前馈与输出电流反馈补偿环节, 仿真结果显示,该策略能有效改善集中式光伏电站输出电流因受系统各阻抗影响导致的谐波问题。

关键词:集中式光伏电站;阻抗模型;阻抗重塑

中图分类号:TM 615 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0021-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220205

# **Research on Harmonic Suppression Strategy of Centralized Photovoltaic Power Station Based on Impedance Reshaping**

### ZHENG Xin<sup>1</sup>, WANG Ruohan<sup>2</sup>

(1.Chongqing Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 401147, China;2.State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404100, China)

Abstract: Affected by the impedance of the line and the impedance of various transformers, the negative interactions will be often generated between the power grid and the centralized power station, and it may cause a reduction in steady-state performance of the system, which is mainly reflected in the harmonic problem of grid current. Aiming at the problem about harmonic amplification in the transmission process of output current in the centralized photovoltaic power station, and taking the impedance reshaping as the design idea, the grid-side voltage feedforward and output current feedback compensation links is introduced in the control strategy through series and parallel virtual impedance. The simulation results show that the proposed strategy can effectively improve the harmonic problem caused by the influence of various impedance of the system on the output current of centralized photovoltaic power station.

Key words: centralized photovoltaic power station; impedance model; impedance reshaping

0 引 言

受中国能源分布的影响,集中式光伏电站主要 分布在西北地区,如新疆、西藏、甘肃等地<sup>[1]</sup>。偏远 的地理环境会使得集中式光伏电站需要通过较长距 离的输电线路才能上网,源侧与网侧之间又会有各 级变压器进行升压。目前的集中式光伏电站依靠由 大量非线性的电力电子器件组成的光伏逆变器汇流 输出,而光伏逆变器往往是在理想条件下设计的,其 原有设计忽略了网侧、源侧间的结构,此时的并网系 统阻抗结构是稳定的,输出谐波也在规定的范围内。 但是,输电线路的阻抗以及各级变压器的存在将会 改变原有并网系统的阻抗结构,这很可能会导致系 统的稳态性能劣化,电站输出出现严重的谐波问题。

从实现途径看,对抑制策略的研究可分为系统 控制策略改进与外接设备两类,但实质都是实现系 统阻抗的匹配从而增强并网系统的稳定性。

在控制层面上:1)在系统阻抗网路中引入补偿 环节,如文献[2]在电流环前向通道引入补偿环节, 补偿开环传递函数的相位裕度,亦可在并网点电压 前向通道处添加补偿环节,等效为重塑逆变器输出 阻抗<sup>[3-6]</sup>;2)改进系统原有控制策略,即在设计逆变 器时就将各类阻抗考虑在内,通过修改控制器参数 或者采用极点配置等方法,实现零极点对消来增强 逆变器稳定性<sup>[7-9]</sup>。上述研究均是针对单台或少量 逆变器并网系统,并未充分考虑光伏电站的电气结 构所带来的影响。

在外界设备层面上:文献[10-13]设计了一种 混合有源电力滤波器接在电站母线处,可有效改善 分布式电站输出电流的谐波问题,但是对于大型集 中式光伏电站,电力滤波器的容量设计和成本又是 不可忽视的问题。

根据上述研究现状,下面将充分考虑集中式光 伏电站统一控制、集中管理的特点,提出一种基于阻 抗重塑的谐波抑制策略,通过引入网侧电压前馈与 输出电流反馈补偿环节以改善并网系统的阻抗特 性,抑制谐波电流传输过程中的放大问题。

1 并网系统的谐波放大问题分析

研究对象为 50 MVA 容量的集中式电站,单台 发电单元由光伏电池阵列、500 kW 单极式三相 LCL 型并网逆变器以及 0.27 kV/35 kV 箱式变压器(以 下简称箱变)组成,站内 35 kV 母线汇流发电单元输 出,经站内主升压变压器(以下简称主升压变)送至 110 kV 电压等级电网。电气结构如图 1 所示。



#### 图 1 集中式光伏电站电气结构

对于谐波问题的研究,首先应进行并网系统的 阻抗建模。图 2 是从图 1 中抽象等值后的具体阻抗 模型,将源侧等效为诺顿等效电流源,网侧等效为戴 维南等效电压源,变压器进行 τ 型等值,输电线路进 行 π 型等值。

图2可经过电路变换进行简化,得到如图3所

示的典型的诺顿等效电源与戴维南等效电源的互联 阻抗模型。



#### 图 2 光伏发电系统具体阻抗模型



图 3 光伏发电系统简化阻抗模型

图 2 与图 3 中各符号及含义如表 1 所示。

表1 电路各参数含义

参数	含义
$Z_{\rm S}$	逆变器等效输出阻抗
$Y_{\rm S}$	逆变器等效输出导纳
$G_{ m S}$	诺顿等效电流源系数
$i_{ m ref}$	诺顿等效电流源参考电流
Z <sub>0.27</sub>	箱式变压器短路阻抗
Z <sub>0.27M</sub>	箱式变压器励磁阻抗
$\mu_{ m o}$ , $i_{ m o}$	发电单元输出电压,电流
$Z_{35}$	主变压器等效电路短路阻抗
$Z_{35M}$	主变压器等效电路励磁阻抗
$Z_{ m L}$	线路等效电路阻抗
$Y_{\rm P}$	线路等效电路导纳
$Z_{ m g}$	电网阻抗
$U_{\rm g}$	电网电压
$i_{g}$	入网电流
$G_{ m eq}$	等效诺顿电路电流源系数
$Y_{\mathrm{eq}}$	等效诺顿电路电流源导纳
$Z_{ m g-eq}$	等效戴维南电路阻抗
$G_{\rm g^-eq}$	等效戴维南电路电压源系数
·	$\pm - k + 4 + \pm - 4$

注:下标 1,…, n 表示第 i 台发电单元, i=1,…, n。

表1中逆变器的输出阻抗 Z。和诺顿等效电流

源系数 G<sub>s</sub>与控制环节有关,图 4 为所研究的集中式 光伏电站中光伏逆变器的电流环控制框图。



#### 图 4 逆变器电流环

*Z*<sub>s</sub>为该并网点电压 *u*<sub>pcc</sub>与输出电流 *i*<sub>2</sub>的传递函数, 等效电流源系数即为输出电流 *i*<sub>2</sub>与 *i*<sub>nc</sub>的传递函数。

下面以电压 U<sub>a</sub>为节点列写节点电压方程,此时考虑 n 台发电单元运行。节点电压方程如式(1)所示。

$$\sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i} U_{o} + Y_{g-eq} U_{o} =$$

$$\sum_{i=1}^{n} G_{eq,i} I_{ref,i} + Y_{g-eq} G_{g-eq} U_{g}$$
(1)

式中, Y<sub>g-eq</sub>为等效戴维南电路导纳。又因为并联系 统中任一台电单元(以第*j*台表示)诺顿等效电源满 足式(2)。

$$I_{o,j} = G_{eq,j} - Y_{eq,j}U_o$$
(2)

通过消去节点电压 U<sub>o</sub>,可以得到第 j 台发电单 元输出电流 I<sub>o</sub>;的表达式为

$$I_{o,j} = \left( G_{eq,j} - \frac{Y_{eq,j}}{\sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,j} - \left( \frac{Y_{eq,j} \sum_{i=1}^{n} G_{eq,i}}{\sum_{i\neq j}^{n} \sum_{i\neq j}^{n} Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,i} - \left( \frac{G_{g-eq} Y_{eq,j} Y_{g-eq}}{\sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) U_{g}$$
(3)

所研究集中式光伏电站入网电流的谐波问题,对发电单元间的电流没进行深入研究,因此对式(3)的 *I*<sub>si</sub>进行求和,求得入网电流 *I*<sub>s</sub>为

$$I_{g} = \frac{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^{n} G_{eq,i} I_{ref,i}}{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i}} - \left(\frac{G_{g-eq} Y_{g-eq} \sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^{n} Y_{eq,i}}\right) U_{g}$$
(4)

假设各发电单元完全一致,则式(4)可简化为 式(5)。

$$I_{\rm g} = \frac{Y_{\rm g-eq} n G_{\rm eq,i}}{Y_{\rm g-eq} + n Y_{\rm eq}} I_{\rm ref} - \frac{G_{\rm g-eq} n Y_{\rm eq} Y_{\rm g-eq}}{Y_{\rm g-eq}} U_{\rm g} \quad (5)$$

式(5)与式(2)均可看作典型诺顿等效电源关系式  $I_g = GU_{ref} - YU_g$ 的形式,这里将系数 G称为集中

式电站等效电源系数;系数 Y 称为电站与电网等效 耦合导纳。可以看出,在电站容量确定时,系数 G 和 Y 只与系统阻抗有关。

利用 Matlab 对前面已建立的集中式光伏电站 并网发电系统的等效阻抗模型进行频域分析。图 5 为系数 *G* 和 *Y* 随输电线路长度变化的幅频响应图。





图 5 系数 G 和 Y 随输电线路长度变化的 幅频响应

从图 5 中可以看出,由于各级变压器阻抗及线 路阻抗的存在,系统阻抗模型中出现了谐振尖峰,并 且尖峰会随线路长度增加而逐渐向低频端移动, 图 4 也说明,谐波电流的各谐波频次会受到不同程 度的放大影响。

## 2 谐波抑制策略对阻抗模型的影响

前面已经分析得知,抽象等效得出的如图 3 所示 的系统阻抗模型存在着谐振尖峰,该尖峰会使得谐 波电流传输过程中受到影响。因此,下面考虑在阻 抗模型中引入新的阻抗来实现对系统的阻抗重塑。

在逆变器等效电流源输出端串联阻抗,该串联 阻抗具备基波阻抗低、谐波阻抗高的特性,其作用是 调节网侧谐波阻抗。同时在等效电流源输出端并联 阻抗,该并联阻抗具备基波阻抗高、谐波阻抗低的特 性,其作用是不影响入网基波电流,为谐波电流提供 通路。图 6 为添加串并联阻抗后的并网发电系统阻 抗模型。



#### 图 6 串并联阻抗后的并网系统阻抗模型及简化

图 6 中  $Z_{p_v}$ 为并联阻抗, $Z_{s_v}$ 为串联阻抗,此时 引入串并联阻抗后的源侧等效导纳  $Y_{s_{eq}}$ 与等效电 流源系数  $G_{s_{eq}}$ ,如式(6)、式(7)所示。

$$Y_{s-eq} = \frac{(Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}) + Z_{0.27} + Z_{0.27M}}{[(Z_s \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}) + Z_{0.27}] \cdot Z_{0.27M}}$$
(6)

$$G_{s-eq} = \frac{Z_{s} \parallel Z_{p-v}}{Z_{s} \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v}} \cdot G_{s} \cdot \frac{(Z_{s} \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v})}{Z_{s} \parallel Z_{p-v} + Z_{s-v} + Z_{0.27}}$$
(7)

由于 $Z_{p,v}$ 与 $Z_{s,v}$ 具备相反的阻抗特性,利用二阶 陷波器来构造串并联阻抗。该陷波器的传递函数  $G_{Nf}(s)$ 如式(8)所示。

$$G_{\rm Nf}(s) = \frac{s^2 + (2\pi f_{\rm o})^2}{s^2 + 4\pi f_{\rm o}s + (2\pi f_{\rm o})^2}$$
(8)

式中:s为复频域变量;f。为陷波器谐振点。

将 $f_{o}$ 设置到 50 Hz,设计串联阻抗  $Z_{s_v} = r_s G_{Nf}$ ,设 计并联阻抗  $Z_{p_v} = r_p / G_{Nf}$ ,其中  $r_s , r_p$ 为相应的串联、并 联比例系数。图 7 为  $Z_{s_v} = Z_p$ ,的幅频响应伯德图。

从图 7 所示的幅频特性可以看出,引入的串并 联阻抗能满足前面阻抗重塑所需的阻抗需求。按照 式(6)、式(7)建立的数学模型,将原系统式(5)中的电 流源系数 G<sub>eq</sub>与输出导纳 Y<sub>eq</sub>替换为式(6)、式(7)引入 串并联阻抗后的等效电流源系数 G<sub>s\_eq</sub>与等效输出导纳 Y<sub>s\_eq</sub>。对此时系统电站等效电源系数 G、电站与电网 耦合导纳 Y 进行幅频响应分析。如图 8、图 9 所示。



图 7 串并联阻抗的伯德图



图 8 引入串并联阻抗后的等效电源系数 G 幅频响应



图 9 引入串并联阻抗后的耦合导纳 Y 幅频响应

对比图 5 与图 8、图 9 可以看出,引入了串并联 的阻抗后,经校正的系统其入网电流的等效系数 G 与耦合导纳 Y 的幅值尖峰得到了有效抑制,G 呈现 一种接近理想电流源的特性,电站与电网耦合导纳 Y 的幅值也很低。这说明该策略可实现对系统的阻 抗重塑,起到抑制谐波电流传输过程中受到放大影 响的作用。

## 3 补偿环节设计

从控制层面来实现串并联阻抗的引入,通过在 逆变器控制策略中添加补偿环节来等效实现在源侧 输出端串并联虚拟的阻抗。

等效电流源输出端串并联阻抗后,可再次进行诺顿等效得到此时的发电单元阻抗模型,如图 10 所示。

图 10 中: G' 为引入串并联阻抗后的等效电流

源系数;Y<sub>3</sub>为引入串并联阻抗后的等效输出导纳, 如式(9)所示。



#### 图 10 引入串并联阻抗后的源侧电路等效

$$\begin{cases} G'_{s} = \frac{\frac{1}{Y_{s}} \| Z_{p-v}}{(\frac{1}{Y_{s}} \| Z_{p-v}) + Z_{s-v}} \cdot G_{s} \\ Y'_{s} = \frac{1}{(\frac{1}{Y_{s}} \| Z_{p-v}) + Z_{s-v}} \end{cases}$$
(9)

对于补偿支路的选择,由于逆变器的输出阻抗 由并联点电压 u<sub>pee</sub>与输出电流 i<sub>2</sub>的传递函数定义,因 此与逆变器输出阻抗并联的虚拟阻抗可以通过引入 电压 u<sub>pee</sub>前馈支路来实现,同时在输出电流反馈支 路上增加补偿环节以实现串联虚拟阻抗。

原有电流环采用网侧电流反馈与电容电流阻尼 控制,在引入并联点电压 u<sub>pee</sub>前馈支路与输出电流反 馈补偿支路后,新的电流环控制框图如图 11 所示。

图 11 中,  $H_1$ 与  $H_2$ 均为需要设计的补偿环节。 从图 11 中可化简出输出电流  $i_2$ 与参考电流  $i_{ref}$ 的传 递函数  $G_{sv}(s)$ , 如式(10)所示。同时利用梅森公式 化简出输出电流  $i_2$ 与并网点电压  $u_{pee}$ 的比值  $Y_{sv}(s)$ , 即为逆变器输出导纳, 如式(11)所示。



$$Y_{\rm sv} = \frac{l_2}{u_{\rm pee}} = \frac{G_2 + G_1 G_2 k_{\rm pwm} k_{\rm e} + G_1 G_2 G_{\rm Cf} + H_2 G_1 G_2 G_{\rm Cf} k_{\rm pwm} k_{\rm e}}{1 + G_1 G_{\rm Cf} + G_2 G_{\rm Cf} + G_1 k_{\rm pwm} k_{\rm e} + H_1 G_2 G_{\rm Cf} k_{\rm pwm} k_{\rm e} G_{\rm e}}$$

为进行阻抗重塑,实现抑制幅值尖峰的目的,式 (10)和式(11)应与式(9)中的等效电流源系数 *G*'<sub>s</sub> 与等效输出导纳 *Y*'<sub>s</sub>相等。联立式(9)与式(10)、式 (11),可以求解出补偿环节 *H*<sub>1</sub>与 *H*<sub>2</sub>的表达式如式 (12)所示。

$$\begin{cases} H_{1} = Z_{p_{-v}}Z_{s_{-v}} \cdot A + Z_{p_{-v}} \cdot B + \frac{Z_{s_{-v}}}{Z_{p_{-v}}} \cdot C \\ H_{2} = \left(\frac{(Z_{p_{-v}} \cdot A - C) \cdot D}{(Z_{s_{-v}} + Z_{p_{-v}}) \cdot C - Z_{p_{-v}}Z_{s_{-v}} \cdot A} - A\right) \cdot \frac{G_{c}}{B} \end{cases}$$
(12)

式中的各多项式系数在式(13)中给出。

$$\begin{cases} A = G_2 + G_1 G_2 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} \\ B = G_1 G_2 G_{Cf} G_c k_{pwm} k_c \\ C = 1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + B \\ D = 1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + H_1 \cdot B \end{cases}$$
(13)

理论上,引入式(12)所示的补偿环节后,可等 效为在原逆变侧系统阻抗模型中引入串并联虚拟阻 抗。下面在图 12 所示的仿真模型中引入电压前馈 补偿环节与输出电流反馈补偿环节,以进行谐波抑 制效果验证。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数	数值
开关频率 $f_s$	5 kHz
直流电压 $U_{de}$	557 V
升压箱变	0.27 kV/35 kV,接法 yn-D11
主升压变	35 kV/110 kV,接法 Yn-d11
馈线(110 kV/LGJ-185)	电抗 $x_o = 0.402 \ \Omega/\text{km}$ , 电阻 $r_o = 0.17 \ \Omega/\text{km}$ , 电纳 $b_o = 2.78 \times 10^{-6} \text{ S/km}$
LCL 滤波器参数	$L_1 = 0.24 \text{ mH}, L_2 = 0.08 \text{ mH}$ $C_f = 220 \mu \text{F}$
直流稳压电容	5100 µF
电流环 PI 控制器参数	$k_{\rm p} = 0.2, k_{\rm I} = 50$
电压环 PI 控制器参数	$k_{\rm p} = 2, k_{\rm I} = 10$
串并联系数	$r_{\rm s} = 10, r_{\rm p} = 5$



(11)



图 12 集中式光伏并网发电系统仿真模型结构



(b)引入虚拟阻抗时,60km架空线路条件下入网电流波形

## 图 13 引入虚拟阻抗前后入网电流波形对比 (架空线路长度 60 km)

对图 13 进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析,结果见图 14。





图 15 为架空线路长度为 80 km 时,引入串并联 阻抗前后入网电流波形对比。



(架空线路长度 80 km)

从上面结果对比中可以看出,引入串并联虚拟 阻抗后,60 km 架空线路长度情况下入网电流总谐 波畸变率由4.95%降至1.84%;80 km 架空线路条 件下,入网电流总谐波畸变率含量从7.74%降至 4.42%。入网电流波形畸变均有所改善,基波幅值 均有所回升。结果说明,所设计的电压前馈与输出 电流反馈补偿环节相当于在阻抗模型中引入串并联 虚拟阻抗,可实现对系统阻抗的阻抗重塑,能有效地 改善入网电流的谐波问题。

## 4 结 论

以 50 MVA 的集中式光伏电站为研究对象,针 对谐波电流在系统阻抗模型传输过程中会受到放大 影响的问题,对谐波抑制策略进行研究,提出基于阻 抗重塑的谐波抑制策略。该策略在逆变器原有控制 策略中引入电压前馈与输出电流反馈补偿环节,相 当于在系统原有阻抗模型基础上引入串并联虚拟阻 抗,结果表明该策略可实现对系统的阻抗重塑,可有 效抑制等效电源系数 *C* 和等效耦合导纳 *Y* 的幅值 尖峰,起到改善谐波电流在传输过程中放大问题的 作用。

值得注意的是,基于阻抗重塑的谐波抑制策略 是建立在集中式光伏电站统一控制的特性上,倘若 考虑站内线路距离、逆变器间差异,或者是分布式电 站,该策略是否有效需进一步研究。同时所建立的 集中式光伏并网发电系统模型,只考虑了网源侧以 及之间的无源器件,系统谐波仅源自电站内部各发 电单元,因此对于考虑系统其他负载谐波源以及电 网背景谐波的情况,所提出的抑制策略的有效性还 需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
- [2] JIA Yaoqin, ZHAO Jiqian, FU Xiaowei. Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3):1532-1541.
- YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition [J].
   IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [4] 杨东升,阮新波,吴恒.提高 LCL 型并网逆变器对弱电

网适应能力的虚拟阻抗方法[J].中国电机工程学报, 2014,34(15):2327-2335.

- [5] 徐飞,汤雨,谷伟.弱电网条件下 LCL 型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J].中国电机工程学报,2016,36 (18):4970-4979.
- [6] Céspedes M, Sun J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements
   [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,5(2): 516-523.
- [7] 周林,张密,杨明,等.考虑电网阻抗影响的 LCL 型并
   网逆变器控制策略[J].太阳能学报,2015,36(9):
   2146-2151.
- [8] 严干贵,李龙,黄亚峰,等.弱电网下联网光伏逆变系统
   稳定性分析及控制参数整定[J].太阳能学报,2013,34
   (11):1853-1859.
- [9] Lin Zhou, Mi Zhang.Modeling and stability of large-scale PV plants due to grid impedance [C].IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699274.
- [10] 陈智勇.离网及并网型分布式发电系统谐振分析与控制技术[D].长沙:湖南大学,2016.
- [11] Zhiyong Chen, An Luo, Huimin Kuang, et al. Harmonic resonance characteristics of large-scale distributed power plant in wideband frequency domain [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143:53-65.
- [12] An Luo, Shuangjian Peng, Chuanping Wu, et al. Power Electronic Hybrid System for Load Balancing Compensation and Frequency-Selective Harmonic Suppression [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2):723-732.
- [13] Au Luo, Xiangyong Xu, Fang Lu, et al. Feedback-Feedforward PI-Type Iterative Learning Control Strategy for Hybrid Active Power Filter With Injection Circuit[J].
   IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3767-3779.

作者简介:

郑 鑫(1974),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为 高速公路工程;

王若瀚 (1997),男,硕士,研究方向为光伏发电系统稳 定性问题。

(收稿日期:2021-10-12)

# 500 kV 线路避雷器保护失效分析及改进措施研究

#### 刘守豹,侯玉成,盛明珺,方 圆,童 理,韦昌伟

(大唐水电科学技术研究院有限公司,广西南宁 530007)

摘 要:线路避雷器是防止输电线路雷击跳闸的有效手段,随着高电压等级线路避雷器的使用,出现了因安装方式导致的线路避雷器保护失效问题。针对某 500 kV 输电线路发生的线路避雷器在大幅值雷电流反击下对绝缘子串保护失效的问题,采用电磁暂态分析软件 ATP-EMTP 建立了仿真分析模型,分别对雷电流绕击和反击情况下绝缘子串和线路避雷器两端承受的电压进行了量化,得出了导致反击情况下线路避雷器保护失效的原因;提出了对现有 500 kV 线路避雷器安装方式的改进方案,并对改进方案下反击雷电流导致的绝缘子串和线路避雷器两端电压波形进行了比较,验证了改进措施的有效性。所研究成果对于 500 kV 及以上电压等级线路避雷器的使用具有重要参考价值。

关键词:输电线路;线路避雷器;绕击;反击;保护失效

中图分类号:TM 723 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0028-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220206

# Analysis on Protection Failure and Research on Improvement Measures of 500 kV Line Arrester

LIU Shoubao, HOU Yucheng, SHENG Mingjun, FANG Yuan, TONG Li, WEI Changwei

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

Abstract: The line arrester is an effective means to prevent the transmission line from lightning trip-out. With the use of line arresters with higher voltage class, the protection failure of line arrester caused by the installation mode appears. Taking the failure of line arrester in a 500 kV transmission line under the counterattack of large lightning current as a research case, the simulation model is established by using the electromagnetic transient analysis software ATP-EMTP, the voltage of insulator string and line arrester under shielding failure and counterattack is respectively qualified, and the reasons for protection failure of line arrester is proposed, and the voltage waveforms of insulator string and line arrester caused by lightning current under their mprovement plan are compared, which verifies the effectiveness of the proposed improvement plan. The research results have an important reference value for the use of line arresters with 500 kV and higher voltage class.

Key words: transmission line; line arrester; shielding failure; counterattack; protection failure

0 引 言

雷击是输电线路跳闸的主要原因<sup>[1-4]</sup>,线路避 雷器是进行架空输电线路防雷治理的重要设备,由 于其工作原理清楚、防雷效果可查、运行维护简单、 可靠性较高,在线路防雷工作中被广泛采用<sup>[5-8]</sup>。

当雷击输电线路时,被保护绝缘子串和线路避 雷器同时承受过电压,理想情况下二者承受电压相同, 但线路避雷器动作电压低于绝缘子串击穿电压,因此 线路避雷器起到保护绝缘子串的作用<sup>[9-10]</sup>。但实际运 行中,由于避雷器安装方式不同,会出现雷击下线路避 雷器未动作而绝缘子串闪络的故障。500 kV 线路 避雷器由于长度较大,安装方式与低电压等级线路 避雷器不同,存在安装不当导致保护失效的问题。

下面针对某已安装线路避雷器的 500 kV 杆塔发 生的雷击跳闸故障,采用 ATP-EMTP 建立电磁暂态仿 真分析模型,对雷电反击情况下杆塔电位分布情况进 行计算,得出导致绝缘子闪络而避雷器未动作的原 因,提出避免 500 kV 避雷器保护失效的改进措施。

#### 线路跳闸情况 1

某 500 kV 线路在雷雨天气中发生跳闸,重合闸 成功,两侧行波测距均显示故障点位于该线路52号 杆塔处,跳闸相位为A相(右相),如图1所示。通 过查询雷电定位系统显示故障时刻该杆塔附近出现 幅值为 176 kA 的雷电流, 杆塔接地电阻为 12  $\Omega$ , 因 此确认此次跳闸为大幅值雷电流反击导致。



#### 图1 故障杆塔全貌

从图1可知,故障杆塔左右两相均安装有线路 避雷器,由此可知线路避雷器在此次雷击故障中并 没有发挥其防雷功效,出现了线路避雷器对线路雷 击防护失效的问题。

为了对此次 500 kV 线路避雷器保护失效进行 研究,将各电压等级线路避雷器安装方式进行展示, 见图 2。

从图2可知,在电压等级较低时,线路避雷器 一般采用与绝缘子串并联安装的方式,见图 2(a)— 图 2(b),即避雷器的零电位点与绝缘子串的零电位点 处于同一水平位置。随着电压等级升高,线路避雷器 长度增加,安装方式也随之变化,避雷器的零电位点转 移至绝缘子串零电位点的下方,见图 2(c)-图 2(f)。

对于工频电压而言,导体上传播路径十几米甚 至几十米的差异不会造成明显的电压差异,而雷电 行波的波头时间是微秒级,零电位点较小的空间差 异将造成巨大的电位差异。因此,对于 500 kV 及以 上电压等级线路避雷器,均存在因安装原因导致的 避雷器保护失效问题。



(a) 110 kV线路用支撑串联 间隙复合外套避雷器



(c) 500 kV线路用支撑串联 间隙复合外套避雷器





(b) 220 kV线路用纯空气间 隙复合外套避雷器



(d) 500 kV同塔双回交流线 路座式安装



(e) ±500 kV单回直流线路 立塔式安装 图 2 不同电压等级线路避雷器安装方式

(f) +800 kV 直流线路复合 绝缘子斜拉式安装

#### 仿真模型介绍 2

以 500 kV 某线路 52 号杆塔为分析对象,在 ATP-EMTP 中建立对应的杆塔多段波阻抗模型<sup>[11]</sup>, 如图3所示。为方便观测雷电波传播过程中在杆塔 内各部位的电压波形,从上至下设置6个电压观测 点,将杆塔塔身进一步细分为长度相同的三段,其中 将避雷器零电位点设置于观测点4。

典型的 500 kV 线路避雷器安装方式(也是 52 号杆塔线路避雷器安装方式)如图4所示,线路避 雷器类型为 YH20CX1-396/1050,其中避雷器的接 地点为计数器安装点。

建立仿真模型如图 5 所示,其中雷电流由双指 数波模拟,波形为1.2/50 µs,绝缘子串干弧距离为 4.3 m,线路避雷器复合支撑件干弧距离为1.5 m,对 应的伏秒特性曲线根据参考文献[12-13]中的公式





(b) 多段波阻抗模型

图 3 杆塔及其波阻抗模型



图 4 典型 500 kV 线路避雷器安装方式

进行模拟,其中避雷器伏秒特性曲线为复合支撑件 干弧距离伏秒特性曲线与线路避雷器直流 1 mA 参 考电压(561 kV)相加<sup>[14-15]</sup>,线路避雷器和绝缘子串 的伏秒特性曲线如图 6 所示。

根据参考文献[16-17]避雷器要有效保护绝缘 子串,其冲击放电电压必须低于绝缘子冲击放电电压 的 85%。由图 7 所示线路避雷器与绝缘子串的伏秒 特性曲线之比,可知在冲击电压作用下,线路避雷动 作电压最大也只有绝缘子串的 65%,且当波头越陡时 该型号的 500 kV 线路避雷器对绝缘子串的保护性能 越好,即雷电波达到最大值的上升时间越短则一定是







3 避雷器防护有效性分析

在 10 kA 雷电流绕击杆塔 A 相导线时,绝缘子 串和线路避雷器两端的电压波形如图 8 所示。

从图 8 可知,绕击情况下线路避雷器和绝缘子 串承受的电压波形几乎没有差别,由于线路避雷器 动作电压低于绝缘子串冲击放电电压,所以线路避 雷器将能够有效防止绝缘子串绕击闪络。



图 8 绕击情况下线路避雷器和绝缘子串承受的电压波形

采用 100 kA 雷电波反击塔头(观测点 1),得到 各个观测点电压波形如图 9 所示。

从图 9 可知:1)过电压达到峰值的时间为 0.3 μs, 而雷电流达到峰值的时间为 1.2 μs,雷电波从杆塔塔 顶入地的传播时间为 0.14 μs,因此在接地电阻较小的情况下雷电反击导致的过电压最大幅值不是出现 在雷电流的峰值;2)观测点过电压起始值从上至下 依次过零,是雷电波在杆塔内部传播的体现;3)各 观测点电位从上至下依次递减,反映了地电位对杆 塔电位的钳制作用。





在典型的 500 kV 线路避雷器安装方式下,绝 缘子串两端电压实际上是导线和观测点 2 之间的电 位差,线路避雷器两端电压实际上是导线和观测点 4 之间的电位差,波形如图 10 所示。其中线路避雷 器和绝缘子串承受过电压峰值的比值为 0.54,即线 路避雷器承受的最大电压只有绝缘子串承受最大电 压的 54%。对应图 10 中峰值出现时刻,线路避雷器



绝缘子串承受的电压波形

雷击放电电压约为绝缘子串雷击放电电压的55%(见 图7)。因此,线路如果采用典型安装方式,反击雷电 流作用下线路避雷器动作概率和绝缘子串击穿概率 大致相同,线路避雷器将不能有效保护绝缘子串。

## 4 改进的 500 kV 线路避雷器安装方式

从第3章的分析可知,导致线路避雷器在雷电 反击情况下保护失效的原因是避雷器参考电位点 (计数器安装位置)与绝缘子串参考电位点(杆塔横 担)不同,为了保证反击情况下线路避雷器对绝缘 子串保护的有效性,提出了改进的避雷器安装方式, 如图11所示。



图 11 改进的 500 kV 线路避雷器安装方案



图 11 中计数器至避雷器的铜绞线长度为 16 m,

100 kA 雷电流反击情况下线路避雷器和绝缘子串两端电压波形如图 12 所示,从图中可知改进安装方式后反击条件下线路避雷器两端承受电压将与绝缘子两端电压基本相等,在大幅值雷电流反击时线路避雷器一定能有效保护绝缘子串。

## 5 结 论

1)对于 500 kV 及以上电压等级线路避雷器,由 于其长度较大,避雷器零电位点位于绝缘子串零电 位点下方,容易造成大幅值雷电流反击下的绝缘子 串承受电压低于线路避雷器承受电压,出现避雷器 保护失效问题。

2)对于已经安装的线路避雷器,可以采用将钢丝 拉绳更换为绝缘子,将零电位点上移至与被保护绝缘 子串悬挂点同等水平高度的位置,使得反击雷电流 作用下线路避雷器承受电压与绝缘子串基本相同。

3)所提方案是对 500 kV 线路避雷器防雷保护 有效性的研究,对更高电压等级线路避雷器,由于其 安装方式与 500 kV 线路避雷器类似,也可以采用与 所提方案类似的方式对其进行改造。

#### 参考文献

- [1] 廖民传,蔡汉生,吴小可,等.多重雷击对线路避雷器的 冲击影响研究[J].电瓷避雷器,2019(3):153-158.
- [2] 曹伟,万帅,谷山强,等.高海拔地区±400 kV 直流线路 型避雷器设计[J].电网技术,2020,44(1):347-353.
- [3] 廖磊.桂林电网 110~220 kV 输电线路综合防雷措施研 究[D].南宁:广西大学,2017.
- [4] 李凌燕,杜志叶,阮江军,等.基于数值仿真计算的
   220kV 线路避雷器相间干扰研究[J].高压电器,2017,
   53(2):26-31.
- [5] 陈忠明,廖文龙,刘守豹,等.220 kV 线路避雷器雷 电绕击保护范围及优化应用研究[J].电瓷避雷器, 2018(3):106-110.
- [6] 廖文龙,刘守豹,许安,等.220 kV带纯空气间隙线路 避雷器绕击耐受容量及避雷器轻型化潜力研究[J].电 瓷避雷器,2017(1):100-105.
- [7] 季坤,严波,操松元,等.220 kV 同塔双回输电线路避雷器防护配置研究[J].电瓷避雷器,2018(4):128-132.
- [8] 曹飞,王阳,杨剑.装配避雷器的同塔混压四回输电线 路反击防雷性能分析[J].电工电气,2019(1):30-33.

(下转第86页)

# $SF_6/N_2$ 混合气体绝缘特性实验研究

#### 贾程乾<sup>1</sup>,夏亚 $z^2$ ,倪 $\bar{\mu}^1$ ,谢施君<sup>2</sup>,张晨萌<sup>2</sup>

(1. 重庆大学电气工程学院,重庆 400044;2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:通过安托万方程和拉乌尔定律,研究了不同混合方案下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的液化温度,结合混合气体全球变暖 潜能值(GWP)研究结果,分析混合气体的理化特性。文中搭建混合气体绝缘特性试验平台,测试不同混合方案下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的工频击穿电压和直流击穿电压,分析了混合气体中 SF<sub>6</sub>含量对混合气体绝缘性能和理化性能的影 响规律。研究表明,在气压为 0.5 MPa、SF<sub>6</sub>含量为 30%时,液化温度为-59.8  $\mathbb{C}$ ,比纯 SF<sub>6</sub>气体下降了 30  $\mathbb{C}$ ,GWP 下降 了 31%,混合气体的绝缘性能基本达到相同压强下纯 SF<sub>6</sub>的 80%,在一些严寒地区可替代纯 SF<sub>6</sub>气体在气体绝缘输电 线路(GIL)中使用。

关键词:SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体;液化温度;GWP;绝缘特性

中图分类号:TM 855 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0033-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220207

## Research on Insulation Characteristics of $SF_6 / N_2$ Gas Mixture

JIA Chengqian<sup>1</sup>, XIA Yalong<sup>2</sup>, NI Yuan<sup>1</sup>, XIE Shijun<sup>2</sup>, ZHANG Chenmeng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Based on Antoine equation and Raoult's law, the liquefaction temperature of  $SF_6/N_2$  gas mixture under different mixing schemes is studied, and combined with the research results of global warming potential (GWP) of the gas mixture, its physical and chemical properties are analyzed. The power frequency breakdown voltage and DC breakdown voltage of  $SF_6/N_2$  gas mixture under different mixing schemes are tested, and the influence of  $SF_6$  content on the insulation performance and physicochemical properties of  $SF_6/N_2$  gas mixture is analyzed. The results show that when the gas pressure is 0.5 MPa and  $SF_6$  accounts for 30%, the liquefaction temperature is -59.8 °C, GWP decreases by 30%, and the insulation performance of the mixed gas reaches 80% of pure  $SF_6$  under the same pressure. In some cold regions, it can replace pure  $SF_6$  in gas insulated line (GIL).

Key words:  $SF_6/N_2$  gas mixture; liquefaction temperature; global warming potential (GWP); insulation characteristics

0 引 言

SF<sub>6</sub>由于绝缘性能好、灭弧能力强、化学性质稳 定等优点被广泛地应用于电气工业,如断路器、气体 绝缘输电线路(gas insulated line,GIL)、气体绝缘金 属封闭开关设备(gas insulated switchgear,GIS)、开 关柜等<sup>[1-3]</sup>。但 SF<sub>6</sub>同时也是强温室效应气体,它的 全球变暖潜能值(global warming potential,GWP)为 CO<sub>2</sub>的 23 900 倍,即向大气中排放 1 kg 的 SF<sub>6</sub>相当 于排放了 23.9 t 的 CO<sub>2</sub>,在 1997 年的《京都议定书》 中,SF<sub>6</sub>被列为管制排放的气体<sup>[4-7]</sup>。不仅如此,SF<sub>6</sub> 在电弧或大电场作用下会放电分解产生 F<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等有 毒有害气体,可能会产生不良的影响。随着"30 · 60" 双碳目标的提出,中国应对气候变化的路径也进一 步清晰化:二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰 值、2060 年前实现碳中和。国家电网公司也积极响 应号召寻找 SF<sub>6</sub>替代气体,减少 SF<sub>6</sub>的排放。

目前,研究人员还没有发现某种一元气体可以 从绝缘、灭弧和环保等方面完全替代 SF<sub>6</sub>,在这种情 况下, SF<sub>6</sub>混合气体就成为了比较理想的替代方 案<sup>[8-9]</sup>。SF<sub>6</sub>混合气体的相关研究开始于 20 世纪 70 年代,比较常见的缓冲气体为 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等。在这些缓 冲气体中,N<sub>2</sub>因其无毒、无污染、生产成本低等优势 使得 SF<sub>6</sub>与 N<sub>2</sub>组成的混合气体拥有很好的应用前 景。如果要在 GIL 与 GIS 中替代 SF<sub>6</sub>的使用,就必 须要研究替代气体的工频以及直流耐压特性,所以 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的工频和直流耐压特性就有很高的 研究价值和意义。

下面在均匀场下,研究不同 SF<sub>6</sub>体积分数下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的工频和直流耐压特性,分析了体 积分数对混合气体绝缘性能的影响趋势,这对于 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体在 GIL 等气体绝缘设备中的使用有 重要的参考价值和实际工程意义。

1 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体理化特性

#### 1.1 液化温度

作为 SF<sub>6</sub>的潜在替代气体, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体的 液化温度是衡量其替代可行性的重要参考依据之 一, 尤其当利用 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体制造的设备被应用 于比较寒冷的地区时, 混合气体由于低温液化将是 电力设备面临的重大挑战之一<sup>[10]</sup>。因此计算 SF<sub>6</sub>/ N<sub>2</sub>混合气体的液化温度数据对于工程实际应用具 有重要的意义。下面计算了混合比为 20%、30%、 40%条件下的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体在 0.1~0.5 MPa 气压下的液化温度。使用的方法是安托万方程 (Antoine equation)和拉乌尔定律相结合的方式<sup>[11]</sup>。

首先,可以利用安托万方程写出 SF<sub>6</sub>与 N<sub>2</sub>的饱 和蒸汽压与温度满足的方程关系为

$$\begin{cases} \lg p_1 = A_1 - \frac{B_1}{t + C_1} \\ \lg p_2 = A_2 - \frac{B_2}{t + C} \end{cases}$$
(1)

拉乌尔定律用方程可以表述为

$$\begin{cases} p_1 x = py \\ p_2 (1 - x) = p(1 - y) \end{cases}$$
(2)

将式(1)、式(2)联立化简后得

$$\frac{py}{10^{A_1 - B_1 / (t + C_1)}} + \frac{p(1 - y)}{10^{A_2 - B_2 / (t + C_2)}} = 1$$
(3)

式中: $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 分别为组分1的特性常数; $A_2$ 、 $B_2$ 、  $C_2$ 分别为组分2的特性常数; $p_1$ 、 $p_2$ 分别为组分1 和组分2的饱和蒸汽压,p为混合气体的饱和蒸汽 压,mmHg(注:1 mmHg=133.32 Pa);y为组分1所 占气相的摩尔分数;x为组分2所占气相的摩尔分 数;t为混合气体的液化温度。 应用时,将气压单位换算为 mmHg,代入式(3) 即可求得该气压下的液化温度。SF<sub>6</sub>与 N<sub>2</sub>的安托万 方程如表1所示<sup>[11]</sup>。

表 1 SF<sub>6</sub>、N<sub>2</sub>的安托万方程常数

气体	Α	В	С
$SF_6$	7.227	883.316	272.114
$N_2$	6.866	308.365	273.200

根据公式可以求得混合比为 20%、30%、40%的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体在压强为 0.1~0.5 MPa 时的液化 温度, 如表 2 和图 1 所示。

表 2 不同压强和混合方案下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体液化温度 单位:℃

混合比	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
20%	-96.8	-85.6	-78.3	-72.8	-68.3
30%	-90.4	-78.4	-70.6	-64.7	-59.8
40%	-85.6	-72.9	-64.7	-58.4	-53.2
100%	-68.6	-53.5	-43 5	-35.9	-29.6





#### 1.2 全球变暖潜能值

除了液化温度之外,GWP 值同样也是关注的重要指标之一,它代表了混合气体的环保性能。根据2006 年 5 月 17 日发布的欧洲议会和理事会法规 EC 842/2006《关于某些氟化温室气体》提到对混合 气体的 GWP 值的计算方法<sup>[12]</sup>:

 $G_{z} = x_{1} \cdot G_{1} + x_{2} \cdot G_{2} + \dots + x_{n} \cdot G_{n}$ (4) 式中,  $x_{1}$ ,  $x_{2}$ ,  $\dots$ ,  $x_{n}$  为组分 1, 2,  $\dots$  n 的质量分数;  $G_{1}$ ,  $G_{2}$ ,  $\dots$ ,  $G_{n}$  为组分 1, 2,  $\dots$ , n 的 GWP 值。

SF<sub>6</sub>的 GWP 值为 23 900, N<sub>2</sub>的 GWP 值为 0。 将数据代入式(4)可以求得混合比为 20%、30%、 40%的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的 GWP 值分别为 13 524、 16 511、18 561,分别是纯 SF<sub>6</sub> 气体的 56%、69%、 78%。可以看出使用 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体来替代纯 SF<sub>6</sub> 气体可以显著减少对环境的影响。
## 2 实验平台与方法

根据实验需求搭建了 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 工频和直流绝缘 实验平台,实验电路如图 2 所示。



图 2 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体交直流实验平台电路

实验所用的交直流升压变压器内部装有用于整 流的硅堆,可以通过一根控制棒对升压变压器产生的 电压进行控制。将控制棒插入即可使硅堆短路,此 时升压变压器产生工频交流电;将控制棒取出则硅 堆开始正常工作,通过整流将产生的工频交流电整 流成为直流电压。该升压变压器的低压为 200 V, 高压为 100 kV,完全可以满足实验需求。

电极选用球-球电极来模拟均匀电场,球电极的半径为25 mm。

实验时,先将腔体抽真空,再充入 SF<sub>6</sub>、N<sub>2</sub> 气体。 根据道尔顿分压定律可知,在同一容器中各组分气 体的分压力就代表该组分气体在容器中的量<sup>[13-14]</sup>。 所以充入的 SF<sub>6</sub>和 N<sub>2</sub> 压力之比应为混合比,为保证 充入气体量的准确性,应先充入比例较小的气体,后 充入比例较大的气体,充完气体之后静置 24 h 以保 证气体混合均匀。加压时先快速增加到预估击穿电 压的 70%,然后以每秒 3%的预估击穿电压的速率 上升直至试品被击穿。记录此时的击穿电压,重复 20 次求平均值,每次实验间隔 5 min 以保证混合气 体完全恢复绝缘强度。直流实验方式与工频类似。

### 3 实验结果与分析

SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体工频绝缘实验结果如表 3 所示, 折线图如图 3 所示。

可以看出随着混合气体中 SF<sub>6</sub>比例增加,混合 气体的绝缘能力在上升,在 SF<sub>6</sub>占 20%时,混合气体 的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF<sub>6</sub>的 62.6%~73.9%;继续增加 SF<sub>6</sub> 的含量至 SF<sub>6</sub> 达到混合 气体的 30%时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF<sub>6</sub> 的 82.0%~85.0% 当 SF<sub>6</sub> 气体 在;混合气体中的比例达到 40%,此时混合气体 的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 时分别达到了纯 SF<sub>6</sub> 的 88.5%~92.4%。可以看出,在提高 SF<sub>6</sub> 在混合 气体中比例时,气体绝缘能力的提升出现了比较明 显的饱和现象,在比例达到 30%之前,提升 SF<sub>6</sub> 含量 对于混合气体的绝缘能力有比较好的提升,在达到 30%之后继续提升可以看出气体的绝缘能力虽然在 增加,但增加的效果变得不如之前明显,而且在 SF<sub>6</sub> 比例达到 30%以后,混合气体的绝缘强度已经达到 了纯 SF<sub>6</sub> 气体的 80%左右。综合考虑混合气体的绝 缘强度和成本以及环保性能等,取混合气体中 SF<sub>6</sub> 比例为 30%是比较好的选择。

表 3 不同压强和混合比下  $SF_6/N_2$  混合气体

工频击

ホー	正士苏佐	** /
牙巴	压有双阻	里1½・kV

					1 12.1
混合比	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
100%	15.50	29.59	42.19	54.77	65.45
20%	9.70	19.43	29.76	40.44	48.38
30%	12.72	24.24	35.90	46.37	54.25
40%	14.59	26.36	38.55	49.81	58.05





SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体直流负极性绝缘实验结果如表 4 所示, 折线图如图 4 所示。

表 4 不同压强和混合比下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体

古法名切州=

	0	-	
上立由	Ē		出た

	且机贝似在山牙屯压 平位:K				平应:KV
混合比	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
100%	-23.0	-37.1	-52.8	-68.4	-82.7
20%	-14.3	-25.4	-36.1	-49.7	-56.4
30%	-17.9	-30.3	-42.1	-55.2	-68.3
40%	-19.1	-32.8	-44.3	-58.1	-71.3



可以看出与工频绝缘特性类似,随着混合气体中 SF<sub>6</sub>比例增加,混合气体的绝缘能力在上升,在SF<sub>6</sub>占 20%时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到 了纯 SF<sub>6</sub> 的 62.2% ~ 72.3%;继续增加 SF<sub>6</sub> 的含量至 30%时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到 了纯 SF<sub>6</sub> 的 77.8%~82.6%; 当 SF<sub>6</sub> 气体含量达到 40%, 此时混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 时分别达到 了纯 SF<sub>6</sub> 的 83%~88.4%。可以看出,与工频绝缘特性 类似,在提高 SF<sub>6</sub> 比例时,气体绝缘能力的提升出现了 比较明显的饱和现象,在 30%之前,提升 SF。含量对于 混合气体的绝缘能力有比较好的提升,在达到 30%之 后继续提升可以看出气体的绝缘能力虽然在增加,但 增加的效果变得不如之前明显。而且在 SF<sub>6</sub> 比例达到 30%以后,混合气体的绝缘强度已经达到了纯 SF。气体 的80%左右。综合考虑混合气体的绝缘强度和成本以 及环保性能等,取混合气体中 SF<sub>6</sub> 比例为 30%是比较 好的选择。

将纯 SF<sub>6</sub> 气体与混合比为 30%的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合 气体的工频击穿电压幅值与直流负极性击穿电压进 行对比,如图 5 所示。可以看出,直流负极性电压下 气体的绝缘能力比工频电压下气体的绝缘能力要



强。这是由于在工频电压条件下,气体间隙一般在更容易击穿的半周内击穿。在所搭建的的实验条件下, 气隙更容易在交流电压的正半周击穿,负半周的耐压 能力更强,所以直流负极性的击穿电压会高于工频击 穿电压的幅值。

## 4 结 论

前面通过实验对不同混合比下的 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的工频绝缘特性和直流负极性绝缘特性进行了测定,通过控制变量法对比分析了在不同混合比、不同外加电压情况下混合气体的绝缘特性,得到了如下结论:

1)工频耐压试验与直流负极性耐压试验中,混 合气体的击穿电压都随混合比的增加而增加,但混合 比增加到 30%左右时击穿电压增加的速度开始减缓, 此时混合气体的绝缘能力大约为纯 SF<sub>6</sub> 气体的 80%。

2)在其他条件相同的球-球电极条件下,SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的直流负极性绝缘特性强于工频绝缘特性。

3) SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体具有良好的绝缘性能,在部分 应用场合具有替代 SF<sub>6</sub> 气体的潜力;混合比为 30%, 气压为 0.5 MPa,混合气体的液化温度为-59.8 ℃, GWP 值相较于纯 SF<sub>6</sub> 气体下降了 31%,绝缘能力可 以达到纯 SF<sub>6</sub> 的 80%左右,可以在一些严寒地区的 GIL 中替代纯 SF<sub>6</sub> 气体的使用。

#### 参考文献

- [1] 侯志强,郭若琛,李军浩.直流电压下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体沿面局部放电特性[J].电工技术学报,2020,35(14): 3087-3096.
- [2] 朱娟,沈梦甜,余后霞,等.SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的工频击 穿特性研究[J].湖南电力,2019,39(6):20-22.
- [3] 钟建英,王志刚,张博,等.热态 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体击穿
   特性研究[J].高压电器,2020,56(7):8-14.
- [4] 李兴文,赵虎.SF<sub>6</sub> 替代气体的研究进展综述[J].高电 压技术,2016,42(6):1695-1701.
- [5] 周文俊,郑宇,杨帅,等.替代 SF<sub>6</sub>的环保型绝缘气体研 究进展与趋势[J].高压电器,2016,52(12):8-14.
- [6] 白玮,贺永明,王刚,等.SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体 GIS 隔离接地 开关绝缘及压力承受水平的设计分析[J].绝缘材料, 2020,53(5):97-100.
- [7] 赵国涛,钱国明,王盛."双碳"目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J].华电技术,2021,43(6):11-20.

37

- [8] 程诗敏.SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体介质条件下 GIL 内绝缘特性 研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [9] 孙鹏程,王帮田,洪文芳,等.SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体绝缘特性的实验研究[J].中国电力,2012,45(12):71-75.
- [10] 覃兆宇,郑宇,卫李静,等.低温下 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的 雷电冲击绝缘特性[J].高电压技术,2017,43(12): 3907-3913.
- [11] 李鸿鹏,丰驰尧,李宝锋,等.SF<sub>6</sub> 混合气体的液化特 性研究[J].电气技术,2020,21(11):57-60.
- [12] 张震,林莘,余伟成,等.C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>和 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/N<sub>2</sub>混
- (上接第6页)

- [13] 谭雅倩,周学志,徐玉杰,等.海水抽水蓄能技术发展
   现状及应用前景[J].储能科学与技术,2017,6(1):
   35-42.
- [14] Wikipedlia. Pumped-Storage Hydroelectricity [EB/OL]. (2016-04-16) [2021-09-14]. https://en.wikipedia. org/wiki/Pumped-storage\_hydroelectricity.
- [15] 林铭山.抽水蓄能发展与技术应用综述[J].水电与抽水蓄能,2018,4(1):1-4.
- [16] 王楠.中国抽水蓄能电站发展现状与前景分析[J].电 力技术经济,2008,20(2):18-20.
- [17] 国内单机容量最大抽蓄电站定子吊装并下闸蓄 水[J]. 云南电力技术,2021,49(4):39.
- [18] 世界最大在建抽水蓄能电站复工[J].中国产经,2020 (3):64.
- [19] 费万堂,衣传宝,杨梅,等.河北丰宁抽水蓄能电站交 流励磁变速机组工程设计与认识[J].水电与抽水蓄 能,2020,6(4):12-18.
- [20] 李偲,郗文康,张德隆,等.柔性直流系统中变速抽蓄 机组与风电的协调控制策略研究[J].天津理工大学 学报,2020,36(4):16-21.
- [21] 陈超,刘海滨,葛景,等.双馈变速抽蓄机组参与平抑风 电功率波动研究[J].发电技术,2020,41(4):452-460.
- [22] Minxiao Han, Girmaw Teshager Bitew, Sifrash Amogne Mekonnen, et al. Wind Power Fluctuation Compensation by Variable Speed Pumped Storage Plants in Grid Integrated System: Frequency spectrum analysis [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(2):381-395.
- [23] 吴秋芳,林文婧,陈志伟,等.海岛抽水蓄能电站枢纽 布置研究——以大万山岛为例[J].广东水利水电, 2020(8):61-67.
- [24] 贺儒飞,王方,张豪.海水可变速抽水蓄能机组技术 路线及关键参数选择[J].水利水电技术,2020,51 (增刊2):184-189.

合气体热力学物性参数计算[J].高电压技术,2020, 46(1):250-256.

- [13] 唐念,姜旭,黎晓淀,等.均匀电场中 SF<sub>6</sub> 及其替代
   气体雷电冲击特性实验研究[J].高压电器,2021,
   57(3):6-10.
- [14] 李丽,郭泽,邹庄磊,等.SF<sub>6</sub> 替代气体的饱和蒸气压特 性研究[J].西安交通大学学报,2019,53(3):157-163.

作者简介:

贾程乾(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为高电 压与绝缘技术。 (收稿日期:2021-09-30)

- [25] 张韬,高彦明.可变速抽水蓄能机组水泵水轮机能量
   特性及效益优势浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,
   6(4):32-35.
- [26] 刘宇,王建刚,乔照威,等.海水抽水蓄能变速发电电动机设计与计算[J].大电机技术,2021(2):13-18.
- [27] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机
   组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,
   2022,46(4):162-169.
- [28] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发 电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020, 35(13):2711-2722.
- [29] 周修宁,江军.基于改进 NSGA-Ⅱ算法的水-光-蓄发电系统多目标规划方法[J].四川电力技术, 2021,44(2):8-15.
- [30] 李涛,胡维昊,陈刚,等.多场景下梯级水-光-蓄容 量配置与优化运行研究[J].四川电力技术,2021, 44(2):1-7.
- [31] 衣传宝,杨梅,梁廷婷,等.全功率变频抽水蓄能机组技 术应用浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):56-61.
- [32] 畅欣.FSC 可变速抽水蓄能机组功率调节特性研 究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [33] 周鸿汉.四川省第一座抽水蓄能电站——寸塘口抽水 蓄能电站简介[J].水电站设计,1992(4):81-82.

作者简介:

陈 刚(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统分析与控制;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大 电网安全稳定分析与控制;

韩晓言(1965),男,博士,正高级工程师,从事电力系统 稳定与控制工作。

(收稿日期:2021-09-16)

# 基于击穿间隙与可变电阻的配电网 弧光接地故障建模分析

#### 李世龙,张 华,龙 呈,高艺文,苏学能

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:配电网弧光接地故障易引发森林火灾及人身触电等事故,弧光接地属时变、非线性故障,准确刻画弧光接地 故障特征有利于提升配电网接地故障研究与模拟能力。针对传统的故障模型未考虑故障发展全过程,提出了基于击 穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障模型,考虑不同接地介质下弧光电压与电阻的发展过程,建立了击穿间隙 与可变电阻解析方程。PSCAD/EMTDC 仿真环境下验证表明,该弧光故障模型电流零休特征明显,电压具有显著的非 线性畸变特点,反映了故障的发展特性。在 10 kV 配电网真型试验场进行弧光接地故障现场试验,并将现场试验数据 与仿真数据进行对比分析,发现试验数据与模型数据拟合程度高,能真实刻画弧光接地故障特征,为配电网故障消 弧、定位、选线奠定了基础,具有较强的实用价值。

关键词:接地故障;建模;电弧;击穿间隙;电阻

中图分类号:TM 86 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0038-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220208

# Modeling and Analysis of Arc Grounding Fault in Distribution Network Based on Breakdown Gap and Variable Resistance

LI Shilong, ZHANG Hua, LONG Cheng, GAO Yiwen, SU Xueneng

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

Abstract: Arc grounding faults in distribution network are very harmful, Which may cause equipment explosions, fires and other accidents, and arc grounding is a time-varying and non-linear fault. Accurately characterizing arc grounding faults is beneficial to improve the research and simulation capabilities of grounding faults in distribution network. Aiming at the traditional fault model that does not consider the whole process of fault development, an arc grounding fault model of distribution network based on breakdown gap and variable resistance is proposed. Considering the dynamic development process of arc voltage and resistance under different grounding media, the breakdown gap and variable resistance equation is established. The verification under the PSCAD/EMTDC simulation environment shows that the arc fault model has obvious zero-off characteristics. At the same time, the field test data and the simulation data are compared and analyzed, and it is found that the model can truly describe the arc ground fault characteristics. It lays the foundation for the arc suppression, location, and line selection of distribution network, which has a strong practical value.

Key words: grounding fault; modeling; arc; breakdown gap; resistance

# 0 引 言

配电网故障类型多样,其中单相接地故障发生 概率大。接地故障发生时接地点将流过短路电流, 电流越大空气介质的损伤越厉害,一旦空气被击穿, 将在故障点产生电弧,又由于故障电流包含多频段 正弦波,因此电弧将不断熄灭并重燃,在此过程中积 累的能量若得不到有效释放,将导致电弧不断燃烧。 电缆线路发生弧光接地故障时,非故障相过电压最 高可至正常相电压的几十倍,最终损坏线路绝缘,引 起森林火灾、电站爆炸等危险事故<sup>[1-2]</sup>。因此有必 要展开对配电网接地故障模型的研究,进一步掌握 接地故障特征,有利于配电网线路的选线、消弧,减

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52037001);国网四川省电力公司科技项目(52199720002T)

少人身触电、森林火灾等事故发生概率,增强配电网 供电可靠性<sup>[3-4]</sup>。

文献[5-6]在高压绝缘领域分别提出了基于热 平衡的 Cassie 和 Mayr 电弧模型,但是这两种模型均 难以全面体现电弧的电阻特性。文献[7-8]通过建 立 Cassie- Mayr 组合模型, 解决了两种模型动态分 配问题,具有较好的零休效应,较精确地描绘了燃 弧、熄弧时刻的电弧电压、电流特征。Hochrainer 首 先提出了控制论模型,将模型参数由稳态转为动 态<sup>[9]</sup>,国内的学者提出了改进的控制论模型,研究 了弧长、风速等因素与电弧的关系,分析了电弧稳 态、暂态特性<sup>[10-11]</sup>。为解决基于热平衡的 Cassie、 Mavr 模型以及改进控制论模型不能准确表示接地 故障电阻的问题,文献[12-14]提出了对数电弧模 型,较准确地模拟了弧光高阻接地故障熄弧-重燃 的故障特征。但是上述的故障模型一方面未考虑高 阻接地无电弧情况,另一方面其电弧模型虽考虑了 故障的动态过程但均未考虑故障的发展过程,而弧 光接地故障在某些情况具有发展过程,因此传统的 接地故障模型无法全面刻画接地故障特征[15-16]。

为解决上述接地故障模型存在的缺点,下面分 析了短间隙的电击穿理论与接地故障发展过程,提 出了基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故 障模型,全面刻画接地故障特征,通过 PSCAD/EMT-DC 仿真软件与传统的电弧模型进行对比分析,并进 行现场试验验证了模型的正确性。

# 基于击穿间隙与可变电阻的配电网 弧光接地故障模型

配电网弧光间隙为短间隙,通常采用介质强度 恢复理论进行分析,介质强度恢复理论认为交流电 弧本质上是间隙在电场作用下形成的电子崩,即交 流电弧是间隙被击穿导致的。同时介质强度恢复理 论认为发生弧光接地时,间隙存在互不影响的电压 恢复过程与介质强度恢复过程,两者之间的博弈决 定了电弧是否会重燃。电弧不会重燃的条件是介质 强度一直大于恢复电压;电弧发生重燃的条件是某 时刻恢复电压大于介质强度,使间隙再次被击穿。 在传统故障建模中,一般认为电弧与大地非有效接 触产生的电阻为不变电阻<sup>[12]</sup>。然而如果接触的是 湿树枝等物体,弧光会导致其碳化,改变介质电阻 率,因此配电网线路发生弧光接地故障时,接地故障 支路可看作如图1所示的间隙被击穿后产生的击穿 间隙电弧与可变电阻的串接组合。可变电阻阻值受 故障点介质密度、温度等因素的影响。



故障点电压公式可以用式(1)表示。

$$u_{\rm f}(t) = u_{\rm j}(t) + i_{\rm f} \cdot r_{\rm f}(t) \tag{1}$$

式中: $u_j(t)$ 为弧光电压; $i_f$ 为接地故障支路电流; $r_f(t)$ 为可变电阻。

下面将对可变电阻模型与击穿间隙电弧模型进行分析,分别建立可变电阻与击穿间隙的故障模型 解析式。

### 2 可变电阻模型

发生单相接地故障后,接地故障电流向接地介 质周围扩散,距离接地点越远,扩散电流越小。因此 在离接地点较远时,电位接近零电位。接地故障电 流分布如图2所示。





离接地点半径为 R 时,可认为地电位为 0,则接 地电阻为

$$r_{\rm f} = \int_{R}^{\infty} \frac{\rho I}{2\pi x^2} \mathrm{d}x = -\frac{\rho}{2\pi x} \bigg|_{R}^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi R}$$
(2)

式中: *ρ* 为电阻率; *R* 为接地点到零电位距离; *I* 为接地点扩散电流。

经大量实验验证,各类型介质典型的电阻率范

围如表1所示<sup>[18]</sup>。

类型	条件	电阻率/(Ω・m)
	放在水中	40~50
混凝土	其他	100~1000
共工	较湿	100~200
東土	较干	250
Tub	较湿	250~1000
W	较干	1000~2500
水	含不同离子	1~10 000

常用电阻率范围

表 1

弧光高阻接地故障通常具有一定的发展性,比 如经树枝接地,弧光高温导致树枝碳化或烧断,使弧 光高阻接地故障发展成经电阻接地或无故障。因此 还需要考虑故障的发展过程,故障发展所需时间可 通过试验测得。

根据上述分析,可以将接地电阻模型修正为可 变电阻模型。

$$\begin{cases} r_{\rm f} = \frac{\rho}{2\pi R} e^{-nt} = r_0 e^{-nt}, t \leq T_1 \\ r_{\rm f} = \frac{\rho}{2\pi R} e^{-nT_1} = r_0 e^{-nT_1}, t > T_1 \end{cases}$$
(3)

式中:r<sub>0</sub>为初始电阻;n为不同介质电阻衰减指数; T<sub>1</sub>为经不同介质接地时电阻不再发生变化时间, 与介质材料、温度密切相关。

# 3 击穿间隙电弧模型

根据大量实验,汤森德气体放电理论在 20 世纪 初被提出,该理论适用于短间隙的气体放电。初始 的自由电子在运动过程中不断造成撞击电离,到达 末端的电子数为 e<sup>ad</sup>个,当 ad 达到自持放电条件,也 就是气体被击穿<sup>[19]</sup>。

$$ad \ge \ln(1 + 1/\gamma) \tag{4}$$

式中:a 为碰撞电离系数;d 为气隙长度;γ 为平均自 由行程。

同时,支路故障电流为

$$i_{\rm f} = I_{\rm S} {\rm e}^{ad} \tag{5}$$

式中,*I*s为外因素引起的饱和电流。

又因为 a 和 E 在空气中呈近似正比,因此有

$$\begin{cases} a = kE\\ u_i = Ed \end{cases}$$
(6)

式中,*E*为空气中电场强度。联立式(5)、式(6),电 弧电压可以用式(7)表示<sup>[13]</sup>。

$$u_{j} = \operatorname{sgn}(i_{f})(1/k) \cdot \ln(\frac{|i_{f}|}{I_{s}} + 1)$$
 (7)

式中:sgn 为符号函数,此处即为取 $i_{f}$ 参数的正负;  $u_{j}$ 为电弧电压;1/k与 $I_{s}$ 为一常数,1/k一般选取为 线路电压的10%, $I_{s}$ 依据线路参量确定。

当故障发展为无电弧后,电弧电压 u<sub>j</sub>=0,因此, 击穿间隙电弧模型可表示为

$$\begin{cases} u_{j} = \operatorname{sgn}(i_{0}) (1/k) \cdot \ln(\frac{|i_{0}|}{I_{s}} + 1), t \leq T_{2} \\ u_{j} = 0, t > T_{2} \end{cases}$$
(8)

式中,*T*<sub>2</sub>为不同介质从弧光接地故障发展为经电阻 接地故障或无故障等无电弧情况时间。

上面针对配电网接地故障特征,提出了基于可 变电阻与击穿间隙电弧的接地故障模型,与现有模 型相比,考虑了接地故障的发展过程,能够适应各种 接地故障类型。

# 4 配电网接地故障模型仿真试验分析

#### 4.1 仿真分析

使用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建仿真模 型如图 3 所示,配电线路模型中包含 2 条电缆线路、 1 条架空线路。线路的具体参数见表 2,消弧线圈的 补偿度取 8%,L1、L2、L3 分别代表 3 条线路的负载。 为了对比各电弧模型的特征,分别采用基于热平衡 的 Mayr 电弧模型、Cassie 电弧模型以及基于击穿间 隙与可变电阻的电弧模型模拟高阻弧光接地故障。

故障点采用 Mayr 电弧模型得到的电流波形如 图 4 所示,从波形可以看出,由于接地电阻设置为 500 Ω,属于高阻接地,故障电流呈现小幅度的畸 变,零休特性表现不明显。由此可知,采用基于热平 衡的 Mayr 方程描述高阻接地故障时,由于电流幅值 较小,能量易平衡,存在较大误差。

表 2 架空线和电缆线参数

线路类型	$R_1/(\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$L_1/(\mathrm{mH}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{km}^{-1})$	$C_1/(\mu \mathbf{F} \cdot \mathbf{km}^{-1})$	$R_0/(\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$L_0/(\mathrm{mH}\cdot\mathrm{km}^{-1})$	$C_0/(\mu \mathbf{F} \cdot \mathbf{km}^{-1})$
架空线	0.180 0	1.209 6	0.009 7	0.230 0	5.474 9	0.006 0
电缆线	0.270 0	0.255 0	0.339 0	2.700 0	1.019 0	0.280 0

第 45 卷



故障点采用 Cassie 电弧模型得到的仿真波形 如图 5 所示,从波形可以看出,相比于 Mayr 电弧模 型,借助 Cassie 电弧模型得到的弧光高阻接地故障 电流能够看出电弧的零休特性,但依旧忽略了接地 电阻的发展过程。



故障点采用基于击穿间隙电弧与可变电阻的故障模型,分别模拟故障电阻不变的弧光接地故障和故障电阻非线性变化的弧光接地故障,得到的仿真波形如图 6-图 9 所示。

从图中可以看出,基于击穿间隙电弧与可变电 阻的接地故障模型电流波形表现出非常明显的零休 特性,弧光高阻故障具有明显的间歇性特征,电流零 休时间较长,同时弧光高阻接地故障的电压、电流波 形发生了明显的非线性畸变,充分反映了故障的发 展过程。该仿真结果能够较好地反映高阻接地故障 的特征,证明所研究的基于击穿间隙电弧与可变电 阻的配电网弧光接地故障模型比基于热平衡的故障 模型更适合于精确描述配电网高阻接地故障。



#### 4.2 试验分析

为验证所提出模型,在配电网真型试验场模拟 真实10 kV 变电站经不同介质接地故障实验,采用 真实电缆模拟短间隙放电环境。实验采用嵌入式电 力故障录波分析装置,采样频率可达 20 kHz。 设置配电网接地运行方式为中性点不接地方式,电容电流为10A,三相电压基本平衡,分别模拟 10kV母线A相线路经干草地、鹅卵石接地场景,现 场接地故障设置情况如图10所示。



图 10 经干草地、鹅卵石接地场景

经鹅卵石接地故障电流、故障电阻如图 11、 图 12 所示。





从图可知,经鹅卵石接地故障电阻变化小,此时可以用 $r_0$  = 3900  $\Omega_n = 0_T_1 = \infty_T_2 = \infty$ 表示故障电阻,实测电流与仿真电流波形较一致。

经干草地接地故障电流、故障电阻如图 13、 图 14 所示。由图可知,经干草地接地故障电阻变 化大,此时可用 $r_0$ =4900  $\Omega$ 、n=4.7、 $T_1$ =0.15、 $T_2$ =∞ 模拟接地电阻,接地故障模型在 0.25 s 前符合实际 接地情况,满足故障消弧、选线要求。0.25 s 之后, 由于干草地试验故障电流非线性畸变大,故障模型 能有效模拟这一特征。

经过仿真和试验分析,所提出的基于击穿间隙 电弧与可变电阻的配电网接地故障模型能充分反映 高阻接地故障特征,具有较强的实用性。





# 5 结 论

针对以往接地故障模型不能反应故障发展全过 程的问题,上面通过汤森德理论描述击穿间隙,考虑 了接地介质变化而导致的故障的发展过程,提出了 基于击穿间隙电弧与可变电阻的配电网电缆高阻接 地故障模型。PSCAD/EMTDC 仿真表明,该模型具 有明显的零休特征且能够刻画故障的发展过程,同 时在配电网真型试验场进行现场试验,试验数据验 证了模型的正确性,为后续电弧及其引发的森林火 灾预防提供了研究理论思路。针对接地故障介质类 型多样,后续将对各种介质的介质电阻衰减常数与 故障发展时间进行量化分析。

#### 参考文献

- [1] 刘科研,盛万兴,董伟杰.配电网弧光接地故障建模仿真
   与实验研究综述[J].高电压技术,2021,47(1):12-22.
- [2] 李建南,张慧媛,王鲜花,等.中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究[J].电力系统保护与控制,2016,44
   (24):105-109.
- [3] 王宾,崔鑫,董新洲.配电线路弧光高阻故障检测技术 综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):96-107.

(下转第73页)

# 500 kV 交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究

#### 吴高波,岳 浩,李 健,罗楚军,吴庆华

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘 要:金属护层冲击感应电压是高电压、大长度海底电缆安全运行的重要控制条件。采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,建立了海底电缆金属护层冲击感应电压仿真模型,对电缆长度、侵入波波形、电缆结构参数等对护层 冲击感应电压的影响进行了计算分析,并研究分析了金属护层与铠装层分段短接和采用半导电外护套两种方式对限 制金属护层冲击感应电压的作用,研究表明:电缆长度、侵入波波形和电缆结构参数对金属护层冲击感应电压有较大 的影响;金属护层冲击感应电压随着分段短接点的个数和外护套电导率的增加而减小。

关键词:海底电缆;金属护层;铠装层;冲击感应电压;分段短接;半导电外护套 中图分类号:TM 757 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0043-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220209

# Research on Impulse Induced Voltage of Metal Sheath of 500 kV AC Submarine Cable

WU Gaobo, YUE Hao, LI Jian, LUO Chujun, WU Qinghua

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: The impulse induced voltage between sheath and armour is the control condition to verify the safe operation of submarine cable with high voltage and large length. The simulation models for impulse induced voltage are built in PSCAD/EMTP. The influence of cable length, intruding surge waveform and cable structure parameters on the induced voltage between sheath and armour are calculated and analyzed. The effects of bondings at intervals between sheath and armour and using a semiconductive oversheath on limiting the induced voltage are analyzed. The research results show that the cable length, intruding surge waveform and cable structure parameters have an apparent influence on the induced voltage between sheath and armour, and the induced voltage decreases with the increase of the number of bondings and the increase of the conductivity of semiconductive oversheath.

Key words: submarine cable; metal sheath; armour; impulse induced voltage; bondings at intervals; semiconductive oversheath

0 引 言

随着中国经济发展和海洋战略的全面实施,海 底电缆输电工程呈现快速发展的趋势,高电压、大长 度海底电缆是研究的重要方向之一<sup>[1-7]</sup>。目前,中 国已建成投运海南联网 500 kV 海底电缆工程(电缆 长度约 30 km)和镇海—舟山 500 kV 海底电缆工程 (电缆长度约 17 km)。

在海底电缆结构中,主绝缘层外通常设置有金

属护层和铠装层(有时统称为金属护层),以及两者 之间的外护套。由于海底电缆一般较长且敷设于海 底,无法像陆地电缆一样采取分段交叉互联的接地 方式。为了限制金属护层的感应电压,海底电缆通 常都采用金属护层两端直接接地的方式<sup>[6]</sup>。但对 于大长度的海底电缆,仍需对金属护层的感应电压 进行计算研究,以确保金属护层在不同工况下的工 频和冲击感应电压满足限值要求。

目前,对陆地电缆金属护层感应电压的研究较 多<sup>[8-15]</sup>,海底电缆的相关研究还较少。文献[16]提 出了半无限长海底电缆线芯承受阶跃型过电压侵入 波时,随距离变化的金属护层感应电压计算公式,即 工程中常用的电容耦合法公式[17]。文献[18]研究 表明,在金属护层两端直接接地方式下,金属护层工 频感应电压一般较小,易满足限值要求;冲击感应电 压则可能超过外护套的绝缘耐受水平,是海底电缆 安全运行的控制因素。需采用电容耦合法进行验 算,必要时采取金属护层与铠装层分段短接或采用 半导电护套的方式以降低金属护层的冲击感应电 压。电容耦合法虽然应用较为方便,但由于其是基 于半无限长海缆推导的,计算结果偏于保守,且无法 考虑侵入波波形等因素的影响<sup>[19]</sup>。文献[20]应用 PSCAD/EMTDC 软件,对 500 kV 交联聚乙烯(cross linked polyethyene, XLPE)海底电缆在短路、操作和 雷击工况下的主绝缘暂态过电压及护层感应电压进 行了计算,并分析了中间短接点对护层感应电压的 影响,但暂未对护层冲击感应电压进行系统分析。

下面采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC, 对 500 kV 交流海底电缆金属护层冲击感应电压进 行仿真计算,对冲击感应电压的影响因素进行分析, 并对感应电压限值措施进行研究,结果可为海底电 缆工程的设计提供参考。

1 金属护层冲击感应电压计算

#### 1.1 电缆模型

镇海—舟山 500 kV 输电线路由海底电缆线路和两侧的架空线路组成,其中海底电缆线路长度约 17 km,两侧架空线路长度分别约 2.5 km 和 33 km。架空线路采用 4 mm<sup>2</sup>×300 mm<sup>2</sup>截面导线,海底电缆 采用单芯 1800 mm<sup>2</sup>截面 XLPE。海底电缆两侧终端 处均安装线路避雷器(Y20W-444/1106),金属护层 和铠装层采用两端互联直接接地方式。

镇海—舟山 500 kV 输电线路海底电缆的产品 结构如图 1 所示。



图 1 500 kV 交联海底电缆结构 电缆模型各层结构参数如表 1 所示。

表1 电缆模型各层结构参数			
序号	层名称	外径/mm	
1	导体(铜)	50.2	
2	绝缘(XLPE)	120.4	
3	金属护层(铅套)	134.6	
4	外护套(PE 护层)	157.8	
5	铠装(铜丝)	169.8	
6	外被层	180.0	

### 1.2 冲击电压侵入波

对于架空线—海底电缆混合系统,海底电缆主 绝缘的冲击过电压幅值与系统参数、架空线/海底电 缆长度、故障类型或雷击位置、避雷器保护水平等有 关。为了便于分析,进行金属护层冲击感应电压计 算时,侵入波幅值可取避雷器残压值<sup>[12]</sup>。而在工程 设计时,为了偏严格考虑,可将侵入波幅值取为电缆 主绝缘冲击耐受电压值的 0.85 倍<sup>[18]</sup>。仿真时参考 工程设计习惯,采用 1.2 μs/50 μs 的标准雷电冲击 波,幅值取为 1550×0.85=1318 kV。此外,在分析侵 入波波形的影响时,亦对 250 μs/2500 μs 的标准操 作冲击波进行仿真计算。

#### 1.3 金属护层冲击感应电压计算

镇海—舟山 500 kV 线路工程海底电缆长度约 17 km, 雷电侵入波沿架空线侵入电缆导体, 计算得 到海底电缆沿线距首端(即雷电波侵入端)不同距 离处的金属护层冲击感应电压如图 2 所示。



由图 2 可以看出,由于海底电缆金属护层两端 直接接地,其冲击感应电压最大值出现在距首端约 13 km 处,幅值为 9.96 kV。

# 2 冲击感应电压的影响因素分析

### 2.1 电缆长度

电缆长度是海底电缆输电工程的重要参数之

一。保持其他条件不变,改变电缆长度,对海底电缆 沿线的金属护层冲击感应电压最大值进行仿真计 算。同时,亦采用电容耦合法进行计算,计算公式为

$$U_{23} = U_{\rm tr} \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}} [1 - e^{(-\beta x)}]$$

$$\beta = vR_{\rm s}(C_{12} + C_{23})/2 \tag{1}$$

式中: $U_{23}$ 为金属护层与铠装层间的电压; $U_{u}$ 为过电 压侵入波的幅值; $C_{12}$ 为导体对金属护层的电容; $C_{23}$ 为金属护层对铠装层的电容;x为电缆长度;v为过 电压侵入波的波速; $R_s$ 为金属护层的电阻。

计算结果如表2所示。

表 2 不同长度海底电缆金属护层冲击感应电压

中继长座/1	金属护层冲击感应电压/kV			
电缆下度/km —	仿真计算	电容耦合法计算		
10	5.1	27.3		
15	8.6	39.7		
20	11.9	51.3		
25	15.0	62.1		
30	17.8	72.3		

可见,随着电缆长度的增加,金属护层冲击感应 电压增大。此外,电容耦合法的计算结果明显大于 仿真计算结果。这主要是因为电容耦合法计算时认 为波的传播距离即为电缆总长度,感应电压随电缆 长度增加而增大;而仿真计算时海底电缆金属护层 两端直接接地,感应电压受到接地点的限制且感应 产生的电磁波会在电缆末端发生反射。

对于 500 kV 海底电缆,绝缘护套的冲击耐受电 压若取 72.5 kV<sup>[21]</sup>,并考虑 1.4 的安全系数<sup>[22]</sup>,则要求 金属护层冲击感应电压不应大于 51.7 kV。显然,若按 电容耦合法的计算结果,当电缆长度达到 20 km 时,金 属护层冲击感应电压已十分接近限值。而仿真计算 结果表明,电缆长度为 30 km 时仍有较大的裕度。

### 2.2 侵入波波形

由于电容耦合法不能考虑侵入波波形的影响, 工程中一般认为金属护层冲击感应电压由幅值较高 的雷电侵入波控制。为了研究侵入波波形的影响, 对标准操作冲击波进行仿真计算,计算时幅值与雷电 冲击波取值一致(即1318 kV),电缆长度亦取17 km, 计算结果如图3所示。

由图3可以看出,在相同的侵入波幅值和电缆长度下,金属护层操作冲击感应电压的最大值为7.7 kV,小于雷电冲击感应电压,且最大值出现在距电缆首

端约9km处。可见,侵入波波形对金属护层冲击感应电压的波形和幅值均有影响。操作冲击侵入波的 陡度较小,其护层冲击感应电压也较小。



图 3 海底电缆金属护层操作冲击感应电压

#### 2.3 电缆结构参数

目前,中国投运的 500 kV 海底电缆工程主要有 海南联网工程和镇海—舟山工程。其中,前者采用 充油海底电缆,后者采用 XLPE 海底电缆。为了研 究不同电缆结构参数对护层冲击感应电压的影响, 采用海南联网工程的电缆结构(如表 3 所示),电缆 长度亦取 17 km,仿真得到海底电缆沿线的金属护 层冲击感应电压,如图 4 所示。

表 3 电缆模型各层结构参数

			_
序号	层名称	外径/mm	
1	油道	30.00	
2	导体(铜)	44.60	
3	绝缘(牛皮纸)	104.50	
4	金属护层(合金铅)	113.30	
5	外护套(PE)	125.18	
6	铠装(铜)	130.70	
7	外被层	138.70	



对比图 4 和图 2 可以看出,在长度相同的情况

下,采用海南联网工程的电缆参数,其金属护层冲击 感应明显增大,最大值出现在距首端约 14 km 处,幅 值为 34.4 kV。可见,电缆结构对金属护层冲击感应 电压的影响较为显著。在工程设计时,应根据实际 电缆结构参数和长度进行计算,以确定其金属护层 冲击感应电压是否超过限值要求。

# 3 冲击感应电压限制措施

与陆地电缆不同,当海底电缆长度较长,金属护 层感应电压超过限值要求时,通常需在产品生产时 即采取必要的措施,主要有金属护层与铠装层分段 短接和采用半导电外护套两种方式。

#### 3.1 金属护层与铠装层分段短接

金属护层与铠装层分段短接是指在海底电缆中间,每隔一定距离将金属护层与铠装层短接一次。 为了研究分段短接对护层冲击感应电压的影响,计 算时,电缆总长度取 30 km,各短接段按等长考虑, 即设置1个短接点时,位于15 km 处;设置2个短接 点时,分别位于10 km、20 km 处,以此类推。

当设置1个短接点时,海底电缆沿线的金属护 层冲击感应电压如图5所示。



图 5 短接 1 次时金属护层冲击感应电压

由图 5 可以看出,当在海缆中部(15 km 处)设置 一个短接点时,金属护层冲击感应电压最大值出现在 第一个短接段内,距首端约 11 km 处,幅值为 8.6 kV, 明显小于无短接点时的 17.8 kV。

进一步对不同短接次数下的护层冲击感应电压 进行计算,结果如表4所示。

由表4可以看出,随着短接次数的增加,海底电缆金属护层冲击感应电压降低,但幅度逐渐减小。 由于金属护层和铠装层的短接对海底电缆制造工艺 要求较高,短接点增多会增加海底电缆长期运行的 风险,因此工程中应尽量减少短接次数。

表 4 不同短接次数下金属护层冲击感应电压

短接次数	分段长度/km	金属护层冲击感应电压/kV
0	30.0	17.8
1	15.0	8.6
2	10.0	5.1
3	7.5	3.2

#### 3.2 采用半导电外护套

半导电外护套即在金属护层外采用半导电材料 的外护套(可通过在原绝缘外护套材料中添加具有 导电特性的炭黑等实现),以降低金属护层与铠装 层之间的电压差。通过在电缆模型的金属护层及铠 装层之间设置并联电阻的方式来等效半导电外护 套,对半导电外护套采用不同电阻率时的金属护层 冲击感应电压进行计算,结果如表 5 所示。

表 5 不同外护套电阻率下金属护层冲击感应电压

外护套电阻率/(Ω・m)	金属护层冲击感应电压/kV
1×10 <sup>16</sup> (PE 绝缘)	17.8
$1 \times 10^{7}$	14.4
$1 \times 10^{6}$	5.3
1×10 <sup>5</sup>	0.8

由表 5 可以看出,随着外护套电阻率的降低,金属护层冲击感应电压减小。当外护套电阻率为1×10<sup>5</sup> Ω·m时,金属护层冲击感应电压仅0.8 kV。 但是,外护套电阻率较低时,正常工作时外护套中流 过的电流将较大,需考虑外护套的电流腐蚀。因此, 在实际工程中,应综合考虑金属护层感应电压,外护 套泄漏电流和材料的耐受特性,合理选择外护套的 电阻率。

# 4 结 论

采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,对冲 击电压沿架空线侵入导体时,海底电缆金属护层的 冲击感应电压及其影响因素进行了仿真分析,并对 感应过电压限制措施进行了研究,主要结论如下:

1)海底电缆通常采用金属护层两端直接接地的方式,其护层冲击感应电压最大值一般出现在电缆后半段。电容耦合法计算时认为波的传播距离为电缆总长度,未考虑金属护层末端接地的情况,计算结果偏于保守。

2) 电缆长度、侵入波波形和电缆结构参数对海

底电缆金属护层冲击感应电压的影响较大。护层冲 击感应电压随着电缆长度的增加而增大;操作冲击 侵入波陡度较小,其护层冲击感应电压小于雷电冲 击侵入波;电缆结构参数对金属护层冲击感应电压 的影响显著,工程设计时应予以关注。

3)采用金属护层与铠装层分段短接方式可以 有效降低金属护层冲击感应电压。设置短接点后, 金属护层冲击感应电压一般出现在第一个短接段 内;随着短接点的增加,护层冲击感应电压降低,但 降幅逐渐减小。

4)采用半导电外护套同样可以有效降低金属护 层的冲击感应电压。当外护套电阻率由 1×10<sup>7</sup> Ω · m 减小至 1×10<sup>5</sup> Ω · m 时,金属护层冲击感应电压快 速降低。在实际工程中,应综合考虑金属护层感应 电压,外护套泄漏电流和材料的耐受特性,合理选择 外护套的电阻率。

#### 参考文献

- [1] 刘骥,张明泽,张振鹏,等.外部振动对 500 kV 交联
   聚乙烯电缆敷设条件的影响[J].高电压技术,2017,
   43(2):673-681.
- [2] 张畅生,刘龙春,陈隽.110 kV 海底电缆接地方式对载流 量和环流的影响[J].广东电力,2017,30(8):124-127.
- [3] 陈凌云,朱熙樵,李泰军.海南联网工程海底电缆的选择[J].高电压技术,2006,32(7):39-42.
- [4] 杜兆斌,杨泽民,谌军,等.超高压海底电缆护套环流和 理论计算新方法[J].华南理工大学学报(自然科学 版),2013,41(12):63-69.
- [5] 王晓彤,林集明,陈葛松,等.广东—海南 500 kV 海底
   电缆输电系统电磁暂态研究[J].电网技术,2008, 32(12):6-11.
- [6] 周路遥,刘黎,蒋愉宽,等.光纤分布式传感技术在海底电缆状态监测中的应用[J].浙江电力,2018,37(2):6-10.
- [7] 郭宜果,魏鑫,于秋雨,等.220 kV 光纤复合三芯海底
   电缆线路电气参数的计算[J].山东电力技术,2020,
   47(11):28-33.
- [8] 中国电力企业联合会.海底电力电缆输电工程设计规范: GB/T 51190—2016[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [9] 陈平,薛强,罗彦,等.单芯电力电缆护层过电压保护[J].高电压技术,2004,30(126):6-7.
- [10] 高俊国,于平澜,李紫云,等.基于有限元法的电缆
   金属护套感应电压仿真分析[J].高电压技术,2014,
   40(3):714-720.
- [11] 郭兴军,牛海清,王晓兵,等.高压单芯电缆护套操

作过电压计算及冲击试验[J].高电压技术,2007, 33(10):147-150.

- [12] 牛海清,王晓兵,刘毅刚,等.高压单芯电缆金属护套
   雷电过电压仿真和参数分析[J].高电压技术,2009, 35(4):784-789.
- [13] L Marti. Simulation of transient in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988,3(3):1099-1110.
- [14] Tingchung Yu, J R Marti. A robust phase coordinates frequency-dependent underground cable model (zcable) for the EMTP[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2003,18(1):189-194.
- [15] 罗俊华,周作春,李春华,等.单芯电力电缆金属护
   层过电压保护器参数设计[J].高电压技术,2008, 34(2):355-358.
- S Rusck, E Uhlman. Transient voltage between the lead sheath and armouring of long submarine cables [J].
   Direct Current, 1962, 7:225-227.
- [17] 能源行业电网设计标准化技术委员会.500 kV 交流 海底电缆线路设计技术规程:DL/T 5490—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [18] 邱昊,郑志源,王婧倩.交流单芯海底电缆金属护层接 地方式研究[J].南方电网技术,2014,8(6):62-67.
- [19] B Gustavsen, J Sletbak.Transient sheath overvoltages in armoured power cables [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1594-1600.
- [20] 周自强,刘学忠,王少华,等.500 kV XLPE 海底电缆
   绝缘及护套暂态电压仿真计算[J].高电压技术,
   2018,44(8):2725-2731.
- [21] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆外护层 第1 部分:总则:GB/T 2952.1—2008[S].北京:中国标准 出版社,2009.
- [22] 中国电力企业联合会标准化管理中心.电力工程电缆 设计标准:GB 50217—2018[S].北京:中国计划出版 社,2008.

作者简介:

吴高波(1986),男,博士,高级工程师,从事输电线路设 计工作;

岳 浩(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作;

李 健(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路设 计及技术管理工作;

罗楚军(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作; 吴庆华(1962),男,教授级高级工程师,从事输电线路 设计及技术管理工作。

(收稿日期:2021-09-15)

# 基于调匝式消弧线圈的虚幻接地解决措施

#### 袁明哲<sup>1</sup>,马娅妮<sup>2</sup>,汪祺航<sup>1</sup>,邹经鑫<sup>1</sup>,曹 柯<sup>1</sup>

(1.国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041;2.四川大学电气工程学院,四川成都 610065)

**摘** 要:针对调匝式消弧线圈系统频繁出现虚幻接地的现实情况,考虑消弧线圈设备参数及结构设置对其补偿算法 的影响,对虚幻接地产生的原因进行了研究。在对消弧线圈控制原理进行理论分析的基础上,模拟实际运行情况,设 计并完成了触发实验和调挡实验;进而深入分析并验证了消弧线圈自身装置对虚幻接地的影响,提出了消弧线圈触 发装置升级改造的优化结构,并为消弧线圈投运前触发功能检测提供了阈值实验方案。同时考虑多台消弧线圈并列 运行的安排策略,有助于保证消弧线圈能够精准补偿系统容流,避免产生虚幻接地,对减少电力调度工作中接地误判 有一定的积极作用。

关键词:调匝式消弧线圈;虚幻接地;容流补偿算法;触发装置优化 中图分类号:TM 855 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)02-0048-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220210

# Solutions for Virtual Grounding Based on Turn-adjustable Arc Suppression Coil

YUAN Mingzhe<sup>1</sup>, MA Yani<sup>2</sup>, WANG Qihang<sup>1</sup>, ZOU Jingxin<sup>1</sup>, CAO Ke<sup>1</sup>

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

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

Abstract: In view of the reality that virtual grounding frequently occurs in turn-adjustable arc suppression coil system, the causes of virtual grounding are studied considering the influence of equipment parameters and structure settings of arc-suppression coil on its compensation algorithm. Based on the theoretical analysis of arc-suppression coil control principle, the actual operation is simulated, the trigger experiment and shift experiment are designed and completed, and then the influence of arc-suppression coil device on the occurrence of virtual grounding is deeply analyzed and verified, and the optimized structure of trigger device of arc-suppression coil after upgrading is proposed. The threshold test scheme is provided for triggering function detection of arc-suppression coil before being put into operation, and the arrangement strategy of parallel operation of multiple arc-suppression coils is considered, which is helpful to ensure that arc-suppression coil can accurately compensate system capacity flow, avoid virtual grounding, and play a certain positive role in reducing grounding misjudgment in power dispatching.

Key words: turn-adjustable arc suppression coil; virtual grounding; compensation algorithm of capacity flow; optimization of trigger device

# 0 引 言

随着城市电缆的应用量逐渐增多<sup>[1]</sup>,电力系统 中电容电流的影响愈发不可小觑。为降低电容电流 在单相接地时引发弧光接地的风险,10 kV配电网

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(3500586260)

线路大多配备消弧线圈,以补偿容性电流<sup>[2-4]</sup>。然 而,消弧线圈的应用带来了一定的"副作用",即虚 幻接地的产生。

虚幻接地顾名思义为类似于单相接地的一种不 平衡状态,即 10 kV 母线相电压一相降低,两相升 高,中性点电压略高<sup>[5]</sup>。其往往是因为系统中发生 全补偿,造成串联谐振,致使中性点电压骤升。虚幻 接地发生后,电网监控系统会报出接地信号,并自动 启动选线系统,但实际巡线后会发现所选线路并未 发生接地故障。这对调度判断系统运行状态、运维 人员现场巡视等造成困扰,并且对虚幻接地的相应 处理可能会对用户侧造成短时停电,影响稳定供电。

文献[6]以消弧线圈自身参数为切入点,通过 对电网正常运行及接地故障下改变消弧线圈参数的 测试,指出消弧线圈自动调谐装置参数设置不合理 会引起虚幻接地,并配合实例计算结果,提出了增大 脱谐度、增大阻尼电阻以应对虚幻接地的解决措施: 但并未考虑阻尼电阻增大是否有不利影响。文献 [7]研究了一起虚幻接地的案例,提出消弧线圈会 放大电网不平衡电压:从而导致中性点电压升高并 引起虚幻接地的观点,并结合大数据系统查找出不 平衡的高压用户,避免了运行人员现场逐一检查,缩 小了排查范围。文献[8]分析了消弧线圈放大不平 衡电压形成位移电压的原理,提出了采用阻尼措施 抑制位移电压的方法;但仅是针对位移电压,对引起 虚幻接地的其他原因并不适用。文献[9]通过空充 母线时出现的虚幻接地案例,解释了由于变电站母 线电压互感器铁芯饱和造成铁磁谐振,从而引发虚 幻接地,指出了系统发生铁磁谐振的危害,并给出了 投入空载线路以破坏谐振条件的解决措施:但仅是 依托空充母线的个例进行分析,并未考虑引发虚幻 接地的普遍性情况。文献[10]分析了引起虚幻接 地的各种现场情况,针对传递过电压提出了在高压 侧避免采用熔断器、尽量避免高压断路器不同期操 作等措施,以减少在高压侧出现零序电压的可能性; 但所提措施仅作为现场运行的操作建议,并未对消 弧线圈设备本身进行改进。文献[11]先是分析了 消弧线圈控制算法,然后通过计算不同不平衡度下 位移电压的方式,得出了三相负荷不平衡会造成虚 幻接地的结论,提出以不平衡电压为参考制定触发 电压门槛值的措施。文献[12]针对电压互感器铁 芯饱和引起虚幻接地进行了详细分析,提出了采用 电容式互感器或在中性点加装电压互感器的措施: 但并未对其所提措施进一步验证其适用于其他虚幻 接地情况的可行性。

综上所述,目前针对虚幻接地的研究大多是对 生产实践中零散出现的事故进行特定探讨,对其产 生原因分析过于单一、不够全面深入,并且所提抑制 措施也皆是基于现场故障处理,未能提供可以保证 常态化电网运行维护以及针对消弧装置自身根本性的解决措施。因此,下面围绕 10 kV 配电网调匝式 消弧线圈装置展开研究,从装置控制原理及补偿算 法入手,分析了消弧线圈致使虚幻接地产生的原因 以及在现场运行中可采取的有效解决措施,旨在减 少接地故障误报,降低虚幻接地对故障选线造成困 难的不良影响,进一步保障电网安全稳定运行。

### 1 调匝式消弧线圈的结构及原理

#### 1.1 装置结构

调匝式消弧线圈属于预调式,即在正常运行时 已经计算出了系统所需补偿的电感电流,在发生单 相接地时,由短接开关控制短接阻尼电阻,使得消弧 线圈充分补偿系统容性电流<sup>[13]</sup>。如图1所示,调匝 式消弧线圈成套装置由接地变压器TM、有载消弧 线圈LP及阻尼电阻 R 构成<sup>[14]</sup>。



消弧线圈需要装设在电力系统的中性点位置, 以便在系统单相接地时与对地电容构成接地回路。 而变电站变压器大多为 Y/△型接线<sup>[15]</sup>,低压侧没 有中性点。因此,为了人为地构造一个连接消弧线 圈的中性点,在 10 kV 母线上连接一台 Z 型接线接 地变压器<sup>[16]</sup>。Z 型变压器由于其绕线特殊使得零 序阻抗很小,空载损耗低,变压器容量可以利用 90%以上<sup>[17]</sup>。而普通变压器零序阻抗大很多,相应 的容量利用率低。而消弧线圈容量一般不应超过变 压器容量的 20%,因此,零序阻抗越小,消弧线圈可 利用的容量越大,所补偿的电感电流也就越大。阻 尼电阻两端的保护单元指的是短接开关,由可控硅 并联压敏电阻构成,可控硅控制阻尼电阻的短接,压 敏电阻用以保护可控硅。

#### 1.2 补偿算法分析

首先,计算出系统中的对地电容值,然后进行残 流限值标准比对,再依照分接头开关挡位选择线圈 电感值,随后得到应提供的电感电流,从而对电容电 流进行补偿。因此,补偿算法的关键是电容的计算。 现场装置大多采用幅值相位法<sup>[18-19]</sup>,该方法是在谐 振点附近,两次调挡测得中性点电流及其相位差。 通过两次测量便可得到图 2 的阻抗三角形,接着借 助三角关系得出容抗大小<sup>[20]</sup>。如图 2 所示,阻抗三 角形是根据正常运行情况下,阻尼电阻、消弧线圈及 对地电容构成的串联回路所得出的。



幅值相位法选择在谐振点附近测量的原因:1)中 性点电流谐振曲线类似于正态分布,峰值点恰好在 谐振点,即在谐振点附近中性点电流变化平缓,较为 稳定,便于测量;2)中性点电压谐振曲线与中性点 电流曲线相似,幅值相位法所利用的两次阻抗三角 关系的前提是中性点电压不变,而在接近于谐振 点处,中性点电压达到峰值,相对于峰值前后的升 降更为平稳,因此容抗的计算误差更小;3)在接近 于谐振点时,串联回路中感抗和容抗近似抵消,因此 电抗值仅为阻尼电阻,此时中性点电流较大,测量误 差更小。

# 2 调匝式消弧线圈导致虚幻接地的原因分析

#### 2.1 理论分析

现场运行实践经验表明,在不配置消弧线圈的 配电网线路,虚幻接地现象基本消失。因此,究其根 本原因还是消弧线圈装置自身的一些问题。现分析 可能引发虚幻接地的原因如下:

1) 触发电压的设置: 若触发电压设置过小, 当

系统因某种原因其不平衡电压较大时,会使得阻尼 电阻压降达到触发电压,阻尼电阻会在系统没有接 地的情况下被短接,致使串联电路阻尼率下降,中性 点电流升高,导致虚幻接地;若触发电压设置过大, 会导致一些非金属性接地不能被识别并触发,致使 消弧线圈未能发挥补偿作用,除此,会使得阻尼电阻 承受过高压降却迟迟不被短接,导致阻尼电阻过载 被烧毁,失去抑制不平衡电压的作用,致使未接地状 态下发生串联谐振,也会导致虚幻接地。在实际运 行中,因可控硅的触发电压是一定的,对于不同挡位 的消弧线圈,触发情况会有所差异。因为在低挡位 时,消弧线圈提供的电感电流小,阻尼电阻两侧的电 压也自然较小,相似地,在高挡位时,阻尼电阻两侧 电压较大。因此存在低挡位不易触发、高挡位易触 发的现象,这种不稳定性造成引发虚幻接地的概率 增大。

2)触发阈值的设置:在消弧线圈触发设置中, 存在一个参数"阈值"作为消弧线圈重新调挡的条 件判据。当电力系统中由于运行方式或其他原因造 成电容电流发生变化时,消弧线圈控制系统会检测 到中性点电压发生了一定的变化,对此,设定常规阈 值 0.04 V 和突变阈值 0.07 V:若中性点电压的变动 差值超过 0.04 V,且变动持续时长超过 3 min,消弧线 圈会自动计算新的电容电流,进而重新调挡;若中性 点电压的变动差值超过 0.07 V,持续时长超过 1 min 后,也会重新计算容流。因此,阈值的设置关系到触 发动作的准确性,如果阈值设定有误,会造成未接地 时阻尼电阻被短接,进而导致虚幻接地。

3)阻尼电阻的取值:为了抑制系统串联谐振过 电压,在消弧线圈接地回路中串入阻尼电阻。由消 弧线圈串联回路可知,中性点电压 U,为

$$U_{\rm n} = K_{\rm c} U_{\rm n} / \sqrt{\left(d^2 + \varepsilon^2\right)} \tag{1}$$

式中: $K_c$ 为系统不对称度; $U_{\varphi}$ 为系统相电压;d为系统阻尼率; $\varepsilon$ 为脱谐度。

根据中性点电压不可超过 15% 系统相电压的 要求,可得阻尼电阻取值为

$$R > (U_{\varphi} \times K_{\rm C}) / I_{\rm Lmin} \times 15\%$$
(2)  
式中, $I_{\rm Lmin}$ 为消弧线圈最小挡补偿电流。

由式(2)可知,如果阻尼电阻过小,会使得中性 点电压较高,不能达到15%相电压的要求。且如果 阻尼电阻过大,会导致中性点电流过小,考虑到调匝 式消弧线圈控制器在计算补偿电流时采用的是幅值 相位法,中性点电流过小会导致测量误差增大,进而 使得电容电流计算不准确,在补偿过程中容易造成 全补偿,导致虚幻接地。

4)忽略其他电阻的影响:幅值相位法中所用电 阻仅考虑了阻尼电阻的作用,忽略了消弧线圈损耗 电阻和线路对地泄露电阻,与实际运行情况存在一 定偏差。这也会一定程度上导致电容电流计算方法 的误差较大,使得消弧线圈不能精准补偿,在系统接 地时致使残流过大烧毁可控硅元件或者发生全补 偿,导致虚幻接地。

5) 消弧线圈容量的配置:随着电缆的大规模应 用,系统中电容电流愈增,原有的一些消弧线圈容量 不足以提供相应的电感电流,使得消弧线圈运行在 欠补偿状态下;当线路运行方式调整时,电容电流的 变化可能会造成全补偿,导致虚幻接地。

6)调节开关动作的影响:调匝式消弧线圈控制 系统在容抗计算时,需要调整挡位测得中性点电流。 因此当系统对地电容发生变化,控制系统便要重新 计算容抗。每一次计算均需要调挡两次,因此在系 统运行不平稳时,消弧线圈调挡频繁会使得调节开 关使用寿命下降,对其动作情况有一定的负面作用。 且两次调挡时间间隔会受调节开关固有动作时间影 响,有较长的测量周期,使得计算中假定不变的不平 衡电压有可能发生变化,对容抗的计算产生一定的 误差。因此,有可能导致补偿的电感电流不足进而 发生全补偿,引发虚幻接地。

#### 2.2 实验分析

1) 触发实验

选取某 110 kV 变电站的消弧线圈做实验,因该 站处于未投运状态,为实验提供了便利条件。消弧 线圈设备参数如表1所示。

表1 消弧线圈参数

参数名称	数值
类型	预调式/调匝式
容量/kVA	1000
挡位数	25
补偿范围/A	50~165
阻尼电阻/Ω	16
触发电压/V	2388

在中性点侧加电压,设置电压从0缓慢上升至 6kV,再从6kV缓慢下降至0。因控制屏采集数据 是间歇性采集,实验中采集了4组数据,每组5个周 期,每个周期是20 ms,将4组数据绘制于一张图中。 实验波形如图3所示,a、b、c、d是4组数据的节点, 纵坐标没有标注数值是因为控制屏所采集的数据为 模拟量,数值是非真实的,仅可代表数值变化趋势。

由图 3 可以看出,触发电流在触发前很小,随着 中性点电压的上升,触发电流逐步增大,在 a 时刻后 持续呈尖峰脉冲状,即表明可控硅被触发,此时控制 屏上显示的中性点电压为 39.43 V,一次侧值即为 2390 V,与其触发电压门限值对应。随着中性点电 压在到达 6 kV 后逐步降低,即代表"接地消失",触 发电流逐步减小,恢复非导通状态的正弦波。图中, 由 b 到 c 再到 d,触发电流渐变至很小的数值,恢复 到触发前的状态。





分析触发实验可知,在可控硅导通前,阻尼电阻 承受功率随着中性点电压的增大也逐步增大,触发 电压越高,阻尼电阻承受功率和能量越大。因此,触 发电压不可一味提高。除此,触发电压若设置过低, 会造成频繁虚幻接地,引起调度人员误判。结合现 场工作经验及资料参考<sup>[16]</sup>,非金属性接地中性点电 压约为 2000 V。因此,实验设备的触发电压设置合 理,满足运行要求。

2) 跟踪调挡实验

在中性点处加入 50 V 电压源,即代替正常运行 情况下串联回路中的不平衡电压,为消弧线圈补偿提 供电流。回路中分次串联不同大小的电容,观察消弧 线圈控制屏能否跟踪电容电流的变化相应地改变补 偿电流值。设置电容分别为 8 μF、16 μF、30 μF、 40 μF、65 μF、80 μF、90 μF,实验结果如表 2 所示。

由表2可以看出,在电容值为8 μF、16 μF、90 μF 时,由于电容电流没有达到消弧线圈的最低调节值 50 A 或是超过最高调节值 165 A,挡位始终运行在 极限挡,并且控制系统报出"容量越限"的告警信 号,此时计算误差较大。在电容值为 30~80 μF 时, 消弧线圈控制系统均可正常调挡补偿容流,虽存在 一定的计算误差,但均满足残流 5~10 A 的要求。

对跟踪调挡时有载开关的动作时间进行统计, 从1挡调至25挡用时296 s,调挡次数为24次,平

表 2 跟踪调挡实验结果

<b>空</b> 砕中 穷估/…₽		控制	削屏显示参数			计算参数	
头迎电谷恒/μr	电容值/μF	电容电流/A	中性点电压/V	中性点电流/A	挡位	理论计算容流/A	误差/%
8	15.6	0.30	0.147	越限	1	15.2	2.6
16	30.2	0.99	0.477	越限	1	30.4	0.7
30	56.3	2.14	1.323	65.2	4	57.0	1.2
40	75.2	1.83	1.443	84.5	8	76.0	1.1
65	121.0	1.08	1.276	132.0	18	123.5	2.0
80	156.8	0.98	1.173	162.5	24	161.5	2.9
90	165.5	0.91	1.102	越限	25	171.0	3.2

均每次调挡用时约 12~13 s。可以看出,有载调压 开关动作时间较长,对补偿电流的计算误差存在一 定的影响,验证了前面所述的原因分析。

3 针对虚幻接地的改进措施

关于所提出的导致虚幻接地的原因,结合现场 实际运行,提出以下抑制措施:

1)针对不同挡位触发电压存在差异的情况,提 出一种"自适应"触发装置,设置触发电阻 *R*<sub>1</sub> 和 *R*<sub>2</sub>, 使得可控硅能够灵活应对不同挡位有效触发,避免 高挡位容易触发引发虚幻接地。原理如图 4 所示, 图中:*R*<sub>1</sub>、*R*<sub>2</sub> 为触发电阻;*R* 为阻尼电阻;K 为反向并 联可控硅,有双向导通的作用,适用于大电流回路。



图 4 "自适应"触发装置原理

常规触发装置中,当中性点电压升高,阻尼电阻 两侧电压达到触发电压值,即触发可控硅短接阻尼 电阻。在原有阻尼电阻两侧加入串联的触发电阻, 使得当阻尼电阻连同一个触发电阻两侧电压达到触 发电压值时,触发动作。已知中性点电压为交流正 弦波,当其在正半波时,触发通路如图中红色线标 注;当其在负半波时,触发通路如图中蓝色线标注。 在挡位较低时,消弧线圈提供的电感电流小,若电压 为正,a 侧为低电位,则 $R_2$  两侧的电压较小,即( $U_n - U_{R_2}$ )较大,能够容易达到触发电压;若电压为负,b侧为低电位,则 $R_1$  两侧的电压较小,即( $U_n - U_{R_1}$ )较 大,同样能够容易达到触发电压。在挡位高时,消弧 线圈提供的电感电流大,类似地, $R_1$ 、 $R_2$  两侧的电压 较大,即( $U_n - U_{R_2}$ )和( $U_n - U_{R_1}$ )较小,能够避免高挡 位易触发的弊端。

因此,触发装置中触发电阻的存在,可有效降低 不同挡位触发难易不同造成虚幻接地的风险,为消 弧线圈触发机构的设置提供新的思路。其参数整定 方法可参考文献[21],但需依照具体消弧线圈参数 计算。

 2)关于所述触发阈值影响补偿准确性的问题, 提供了一种实验方法用于检测阈值设置的正确性, 可消除阈值对系统出现虚幻接地的不良影响。

与前述调挡实验类似,在中性点侧加一定的电 压,分次串入不同大小的电容,观察消弧线圈控制系 统的变化。

消弧线圈在重新调挡时,前提条件是容性电流的 变化大于设备每一级挡位间的级差电流,否则会维持 原有挡位继续运行。因此,实验选取的两次电容差值 应与级差电流对应。以触发实验所用设备为例,设备 的级差电流为 4.8 V,对应电容差值应为 2.5 μF。

除此,实验选取的电容应大于消弧线圈调整下 限值 50 A 对应的电容值,即 26.3 µF。实验可安排选 取 27 µF 和 29.5 µF 的两个电容,分别串入消弧线圈 回路中,若消弧线圈控制系统在电容变为 29.5 µF 后,及时重新计算容性电流且正确升一挡,则阈值设 定正确;若消弧线圈控制屏参数始终未发生变化,则 阈值设定过高,不能有效应对容性电流的微小变化, 计算不够准确。

阈值的设置也不能过低,否则使得系统中过于 微小的容性电流变化均会引起重新计算。而如前所 述,容性电流的每次计算均需要调挡,频繁计算导致 频繁调挡,对消弧线圈有载开关的寿命会造成一定 的影响。

3)在同一个变电站存在多台消弧线圈并列运 行时,涉及到消弧线圈通信配合及容量承受两方面 问题。

以某 110 kV 变电站为例,其接线方式如图 5 所示,有 3 台消弧线圈分别连接在不同段的母线上。正常运行方式是 901、902、904、903 断路器为合位,912、934 断路器为分位,3 台消弧线圈各自独立运行。





若3台变压器任一台故障时,为合理分配负荷, 使得剩余两台变压器各带两段母线负荷,导致1号 消弧线圈单独运行,2、3号消弧线圈并列运行。因 此,需要考虑1号消弧线圈容量是否满足对应的I、II 段母线上对地电容电流要求,能否在容性电流很大 时提供相应的补偿电流。除此,还需考虑2、3号消 弧线圈主从设置,保证及时供应电感电流。

若3台变压器任两台变压器故障时,剩余一台 变压器需带全站负荷,此时,则需考虑3台消弧线圈 同时并列运行的问题。一般情况下,设定两台消弧 线圈为主机,另一台为从机。对于主机定挡在哪个 挡位以及从机满挡后另两台主机怎么再次分配,都 会影响到对容性电流的补偿是否准确。

综上所述,针对多台消弧线圈运行的问题,提出 了在投运前需根据不同运行方式,设定消弧线圈的 运行策略,避免消弧线圈因运行方式改变导致其容 量不能承受变化后的容性电流,进而补偿不准确,引 发虚幻接地。

# 4 结 论

通过对消弧线圈控制原理的分析及消弧线圈内 部各参数设置的探讨,归纳总结了生产实践当中引 发虚幻接地的众多原因,并通过实验进一步深入分 析上述原因的影响。针对触发电压存在的现实问 题,创新性地提出了触发结构的改造升级,可有效抑 制虚幻接地的产生,并对触发阈值的检验及消弧线 圈并列运行策略的制定提供了参考方案,具有一定 的工程实践意义。

#### 参考文献

- [1] 王宾,崔鑫.中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接 地故障非线性建模及故障解析分析[J].中国电机工程 学报,2021,41(11):3864-3873.
- [2] 贾晨曦,杨龙月,杜贵府.全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):145-154.
- [3] 付余民,姜涛,姜禹谦,等.消弧线圈接地系统继线故障电压异常分析[J].山东电力技术,2019,46(3):37-40.
- [4] 吴文晓,许燕,杨学君,等.配电网消弧线圈优化控制策略[J].浙江电力,2018,37(3),48-52.
- [5] 束洪春.谐振接地系统虚幻接地的辨识和综合选线方法[J].电力自动化设备,2016,36(6):122-129.
- [6] 王恒山,杨文陵,王门鸿,等.中性点经消弧线圈接地系 统虚幻接地故障分析[J].供用电,2012,29(5):49-51.
- [7] 钱学成,陈宇超,尹燕霖,等.不平衡用户引起配网虚幻 接地的探讨及处理[J].农村电气化,2021(1):41-42.
- [8] 顾精彩.消弧线圈系统位移过电压的危害及其限制措施[C]//全国电网中性点接地方式与接地技术研讨会论文集.杭州:中国电机工程学会,2005:57-58.
- [9] 徐炜彬,温涌泉,修孟懿.66 kV 空母线铁磁谐振造成
   "虚幻接地"现象的分析[J].中国电业(技术版),
   2011(5):13-17.
- [10] 王晓玲,王红梅,李广华.电网几种"虚幻接地"情况的分析[J].科技创新导报,2011(19):68-70.
- [11] 黄驾驾,刘东红.中性点经消弧线圈接地系统虚假接 地的原因浅析[J].浙江电力,2013,32(1):14-16.
- [12] 杨晟,张剑彪,杨凯.中性点非直接接地系统的虚幻接 地现象探讨[J].山西电力,2013(6):18-21.
- [13] 卢成楠,邹经鑫,何振宇,等.预调式消弧线圈自动 控制装置的现场调试方法[J].四川电力技术,2019, 42(6):71-77.

- [14] 牛卓博.消弧线圈在保定电网的应用研究[D].保定: 华北电力大学,2012.
- [15] 于化鹏,陈水明,余宏桥,等.110 kV变压器中性点 过电压的计算及其保护策略[J].电网技术,2011, 35(3):152-158.
- [16] 李啸骢,龙军.供配电技术[M]. 重庆:重庆大学出版 社, 2017.
- [17] 张姗.我国大型城市 10 kV 配电网中性点接地方式的 适应性及对策[D].保定:华北电力大学,2019.
- [18] 彭俊桦.信号注入法测量中压配电网对地电容电流的研究[D].西安:西安科技大学,2020.
- [19] 刘宝稳,李晓波.跟踪补偿消弧装置变参调谐通用方法[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(9):1-6.
- [20] 田丽鸿,许小军,刘勤,等.电路分析[M]. 南京:南京 东南大学出版社, 2016.

(上接第20页)

- [3] 陈湘,刘兵,任大江,等.交直流混联系统直流功率转 移对交流电压的影响[J].电网技术,2016,40(7): 1957-1961.
- [4] 刘春晓,张俊峰,陈亦平,等.异步联网方式下云南电网 超低频振荡的机理分析与仿真[J].南方电网技术, 2016,10(7):29-34.
- [5] 付超,柳勇军,涂亮,等.云南电网与南方电网主网 异步联网系统实验分析[J].南方电网技术,2016, 10(7):1-5.
- [6] 丁国强.西南电网超低频振荡关键机组识别和控制研 究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [7] 闫兴国,毛大彬.100 MW 汽轮机低压透平油纯电调改造[J].甘肃科技,2004,20(11):34-35.
- [8] 胡忠国,万忠明,等.低压透平油纯电调的改造[J].自动化博览,2004,21(4):95-98.
- [9] 史玲玲,万文军,张曦,等.超超临界 1000 MW 机组给 水泵汽轮机 2 种纯电液调节系统的对比研究[J].热力 发电,2011,40(9):5-8.
- [10] 国网四川省电力公司.国网四川省电力公司关于印发 2015年电网高周切机方案的通知[Z].成都:川电调 控,2015.
- [11] 张志强,袁荣湘,徐友平,等.适应多回特高压直流的
   四川电网高频切机优化[J].电力系统自动化,2016,
   40(2):141-146.
- [12] 杨琦,唐晓骏,苏寅生,等.机组涉网保护与高频切机措施优化配置方案[J].电力系统自动化,2013, 37(20):127-131.

[19] 杨小强,陈邦栋,董增平,等.具有限制串联谐振过电压 功能的消弧线圈:CN00216020.X [P]. 2000-11-15.

作者简介:

袁明哲(1985),男,高级工程师,国网四川省电力公司 研究生工作站企业导师,研究方向为电力系统继电保护及信 号处理在电力系统中的应用;

马娅妮(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故 障特性及消弧线圈在系统中的应用;

汪祺航(1985),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

邹经鑫(1988),男,博士,研究方向为油纸绝缘故障与 老化诊断及二次系统运行状态评估;

曹 柯(1985),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2021-12-07)

- [13] 周智行,石立宝,陈义宣,等.异步联网下云南电网 高频切机优化配置方案[J].电力系统自动化,2020, 44(20):86-102.
- [14] 吴琛,李文云,杨强,等.云南电网"西电东送"1600 MW 高周问题与火电机组 OPC 功能协调配合研究[C]// 云南电力技术论坛论文集:中国电机工程学会,昆明 云南省电机工程学会.2005:475-481.
- [15] 全国电站过程监控及信息标准化技术委员会.火力发电机组一次调频试验及性能验收导则: GB/T 30370—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [16] 国家能源局华中监管局.关于印发《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》的通知:华中监能市场[2020]
   153号[A/OL].(2020-09-07)[2021-09-08]. http://hzj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent. do?pk=AEB05CC013339FBDE050A8C0C1C86959B

作者简介:

高 剑(1975),男,硕士,高级工程师,从事电网安全稳 定管理工作;

兰立刚(1981),男,硕士,高级工程师,从事电厂热工自动控制技术研究与应用工作;

王鸿砾(1989),男,硕士,工程师,从事电厂热工自动控制技术研究与应用工作;

李 甘(1983),男,博士,高级工程师,从事网源协调管 理工作。

(收稿日期:2021-11-20)

# 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究

#### 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆 舟,夏亚龙

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:为从分子水平分析紫外光固化过程中愈合剂修复环氧树脂基复合材料断裂面的微观机制,采用分子动力学 方法研究了交联愈合剂/环氧树脂界面相的微观结构、相互作用能、力学性能和分子间径向分布函数。结果说明:交联 愈合剂/环氧树脂的界面相厚度、相互作用能、拉伸模量z分量分别约为环氧树脂/环氧树脂的 88.5%、85%和 80%,表 明交联愈合剂和环氧树脂基体相容性较好,其原因在于交联愈合剂 H 原子与环氧树脂基体 O 原子间的强氢键相互作 用以及交联愈合剂 C、O 原子与环氧树脂基体 C、O 原子间的强范德华力相互作用。

关键词:紫外光固化;愈合剂;界面相;分子动力学

中图分类号:TQ 323.5 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0055-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220211

# Molecular Dynamics Research on Interfacial Compatibility of Cross-linked Healing Agent/Epoxy Resin

SHAO Qianqiu, FAN Songhai, ZHANG Yu, LUO Donghui, MU Zhou, XIA Yalong (State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract**: In order to analyze the micro mechanism of healing agent repairing the fracture surface of epoxy resin matrix composites during ultraviolet(UV) curing at the molecular level, the microstructure, interaction energy, mechanical properties and intermolecular radial distribution function of the interfacial phase of cross-linked healing agent/epoxy resin are studied by molecular dynamics method. The results show that the interfacial phase thickness, interaction energy and tensile modulus *z* components of the cross-linked healing agent/epoxy resin are about 88.5%, 85% and 80% of that of the epoxy resin/epoxy resin, respectively, which indicates that the cross-linked healing agent healing agent agent agent agent agent and O atoms of epoxy resin matrix, and the strong hydrogen bond interaction between C and O atoms of cross-linked healing agent and C and O atoms of epoxy resin matrix.

Key words: UV curing; healing agent; interfacial phase; molecular dynamics

# 0 引 言

由于环氧树脂重量轻、加工灵活性高、电气绝缘 性好,截止到 2020 年,电子行业对环氧树脂的需求 量已超过 800 000 t<sup>[1-2]</sup>。然而,环氧基复合材料具 有高脆性,其一旦遭受机械损伤,就无法修复或溶 解,高成本的掺杂填料也难以循环利用,导致大量电 子废弃物和资源浪费<sup>[3-4]</sup>。因此,需要赋予环氧基 复合材料以自愈功能,使其能够自动修复机械损伤, 从而显著延长其使用寿命。 微米级微胶囊由于能够在不干扰基体原有化学 结构的情况下自主修复损伤而被广泛应用于自愈合 复合材料中。大量实验结果表明,微胶囊内释放的 愈合剂填充于复合材料相邻断裂面间,其在低剂量 紫外光、热等外部刺激下发生聚合反应,在固化过程 中逐渐粘合断裂面并在不加速环氧基体老化的情况 下修复损伤<sup>[5-8]</sup>。合适的外部刺激对于复合材料的 有效自愈和电子器件的稳定运行至关重要。在众多 种类的外部刺激物中,具有清洁和远程控制优点的 紫外光能在不干扰电子设备运行的情况下有效触发 愈合剂的固化反应。 通常地,紫外光固化愈合剂主要由预聚物、活性 稀释剂和光引发剂组成,研究其光聚合动力学行为 对阐释复合材料的自愈过程和机制具有重要意 义<sup>[9-10]</sup>。学者们已通过傅里叶变换红外光谱法、光 固化差示扫描量热法等方法研究了引发剂浓度、环 境温度、紫外光照强度等因素对愈合剂光聚合动力 学行为的影响规律<sup>[11-12]</sup>,并指出固化愈合剂和环氧 树脂基体间的粘接状况是影响复合材料自愈后力学 和电气性能的关键因素<sup>[13]</sup>。然而,现有研究尚未从 分子水平分析紫外光固化过程中愈合剂修复环氧树 脂基复合材料断裂面的微观机制,难以揭示愈合剂 恢复断裂面完整性和机械强度的物理本质。

下面,首先在分子尺度上建立了交联愈合剂/环 氧树脂界面模型;然后,计算了界面相的局部质量密 度分布、相互作用能、力学性能和分子间径向分布函 数,从微观角度评估了交联愈合剂和环氧树脂基体 的相互作用,以期对分析紫外光诱导的自愈合过程 和机制提供一定参考意见。

### 1 界面模型构建方法

传统分析测试手段尚不能有效表征复合材料自愈后的界面相微观结构与性能,故亟需一种能够在 分子层面分析物质构象变化的模拟手段。本章采用 分子动力学模拟技术研究交联愈合剂/环氧树脂界 面相的微观结构和性能参数。

#### 1.1 交联愈合剂模型构建方法

在实际工程中,通常选用双酚 A 环氧甘油醚 (BAEA)作为预聚物、己二醇二丙烯酸酯(HDDA) 作为活性稀释剂、1-羟基环已基苯基酮(Irgacure 184)作为光引发剂,其质量比为 50:50:4。愈合剂体 系的光引发自由基聚合反应如式(1)—式(3)所示, 其属于典型的丙烯酸酯聚合机理<sup>[14-15]</sup>。



依据上述聚合反应机理,采用 perl 脚本自动构 建了交联愈合剂模型,其详细步骤如下:

1)构建 BAEA、HDDA、P1 和 P2 分子(P1 和 P2 是 Irgacure 184 在紫外线照射后分解形成的自由基部分),然后利用 Forcite 模块对上述分子进行几何优化,如图1 所示。

2)使用 Amorphous 模块,利用步骤 1 中得到的
 16个 DGEBA 分子、34个 HDDA 分子和 3 对自由基
 组分 P1 和 P2 分子构建无定型晶胞,其初始密度值
 为 0.5 g/cm<sup>3</sup>。

3) 使用 perl 脚本,依据式(1)—式(3) 所示的反 应机理模拟分子间的交联固化过程,具体过程如图 2所示:①假设反应基团(BAEA 或 HDDA 分子双 键)的形状为球形,见图 2(a)。②当反应基团间距 在临界反应半径(6Å)范围内时<sup>[16]</sup>,活化的自由基 与反应基团相连,见图 2(b)。③活化中心转移到反 应基团,并将其作为下一个链式反应的中心,见图2 (c)。④当反应基团不存在于临界反应半径内时, 反应半径按 0.5 A 的步长逐步递增,并同时搜索新 反应半径范围内的反应基团:反应半径取值范围 (设定为 6~15 Å<sup>[17]</sup>)内的反应基团;若活性基团存 在于最大半径范围内,链式反应将继续进行;当反应 产物交联度(定义为连接双键数量与初始双键数量 的比率)达到85%时终止反应,并将所有位点用氢 原子饱和,得到初始交联愈合剂模型,见图 2(d)-图 2(f)。

4) 对步骤 3 得到的初始交联模型依次进行几 何优化、退火、分子动力学模拟后(模拟参数设置如 表1所示),其最终构型如图 3 所示。其中交联愈合 剂模型密度平均值为 1.12 g/cm<sup>3</sup>,接近固化愈合剂 的实际密度(1.05~1.15 g/cm<sup>3</sup>)。



图 1 几何优化后的 BAEA、HDDA、自由基 组分 P1 和 P2 分子结构



图 2 愈合剂交联过程模拟



图 3 交联愈合剂模型最终结构

表1几何优化、退火、分子动力学模拟计算参数设置

设置结果
COMPASS II
Forcefield assigned
Atom based
12.5
Ewald
$1 \times 10^{-3}$
10 000
0.001
0.5

#### 1.2 环氧树脂模型构建方法

基于 perl 脚本自动构建了环氧树脂分子动力学 模型,其详细步骤如下:

1) 构建聚合度为0的固化双酚A环氧树脂 (DGEBA)分子,然后进行几何优化<sup>[18]</sup>,如图4(a)所示。

2)构建一个由 20 个 DGEBA 分子组成的周期 性无定型晶胞,初始密度为 0.5 g/cm<sup>3</sup>。

3) 对步骤 2 得到的无定型晶胞依次进行几何优 化、退火、分子动力学模拟后(模拟参数设置同表 1),其 最终构型如图 4(b)所示。其中环氧树脂模型的平均 密度为 1.13 g/cm<sup>3</sup>,与实际环氧树脂的密度相似<sup>[19]</sup>。 1.3 交联愈合剂/环氧树脂界面模型构建方法

将第1.1节和第1.2节中获得的交联愈合剂模型 和环氧树脂模型叠加以建立两者的界面模型,并添加 厚度为30Å的真空层以避免原子与其周期图像之间 相互作用造成的误差;然后,在298K和1atm下对初 始界面模型进行几何优化和500ps等温等体积 (NVT)分子动力学模拟,得到的交联愈合剂/环氧 树脂界面模型最终结构如图5(a)所示。

为比较界面相性能,同时构建了环氧树脂/环氧 树脂界面模型,其最终结构如图 5(b)所示。



# 2 结果与讨论

对交联愈合剂/环氧树脂界面相的局部质量密 度分布、相互作用能、力学性能和分子间径向分布函 数进行了分析,并与环氧树脂/环氧树脂界面相的相 应参数进行了对比。

#### 2.1 界面相厚度分析

从交联愈合剂/环氧树脂界面模型最终结构 (图 5(a)所示)可以看出,交联愈合剂和环氧树脂 紧密堆积,其界面相无明显分层。为量化界面相厚 度,分析计算了图 5 所示两个模型垂直于界面方向 的局部质量密度分布,如图 6 所示。可以看出,对于 交联愈合剂/环氧树脂界面模型,其界面相位于 32.2 Å 和 43.0 Å,界面相厚度约为 10.8 Å;对于环氧树脂/环 氧树脂界面模型,其界面相位于 32.1~44.3 Å,界面相厚 度约为 12.2 Å。前者的界面相厚度约为后者的 88.5%, 表明交联愈合剂和环氧树脂间相容性较好。



图 6 不同界面模型在垂直于界面方向的质量密度分布

#### 2.2 界面相的相互作用能和拉伸模量

交联愈合剂和环氧树脂之间的相互作用能 E<sub>i</sub> 是表征界面相性能的另一个重要参数,由式(4)计 算<sup>[20]</sup>。

$$E_{\rm i} = E_{\rm t} - (E_{\rm e} + E_{\rm h})$$
 (4)

式中: $E_t$ 为整个界面模型的势能; $E_e$ 、 $E_h$ 分别为环氧 树脂和交联愈合剂的势能。

交联愈合剂/环氧树脂界面相和环氧树脂/环氧 树脂界面相的相互作用能如表 2 所示。显然,界面 相的相互作用能主要由范德华能构成,分别占交联 愈合剂/环氧树脂界面相和环氧树脂/环氧树脂界面 相相互作用能的 90.4%和 83.1%。并且,交联愈合 剂/环氧树脂界面相的相互作用能为环氧树脂/环氧 树脂界面相的 85%,这意味着交联愈合剂与环氧树 脂基体间具有良好的相容性,确保了良好的界面粘 结强度。

表 2 界面相的相互作用能和拉伸模量 z 分量

界面相参数	交联愈合剂/环氧 树脂界面相	环氧树脂/环氧 树脂界面相
范德华能/(kcal・mol <sup>-1</sup> )	-191.55±6.12	$-206.93 \pm 7.55$
静电能/(kcal・mol <sup>-1</sup> )	$-20.24 \pm 3.82$	-42.13±7.14
相互作用能/(kcal・mol <sup>-1</sup> )	$-211.79\pm6.12$	$-249.05 \pm 16.05$
拉伸模量 z 分量/GPa	0.110 6	0.138 3

此外,拉伸模量通常用于评估材料抵抗弹性变 形的能力。从表 2 中给出的结果可以看出,交联愈 合剂/环氧树脂界面相的拉伸模量 z 分量为环氧树 脂/环氧树脂界面相的 80%,这意味着愈合剂在固 化过程中对断裂表面具有良好的粘结效果,可使机 械损伤后的复合材料良好自愈合。

#### 2.3 界面相分子间径向分布函数分析

径向分布函数 g(r)为描述某个原子邻域内其 他原子分布状况的物理量,可有效描述聚合物本征 结构,其数值与分子链堆砌密度呈正相关。为进一 步揭示交联愈合剂与环氧树脂相互作用的微观机 制,采用 g(r)来表征界面相特征,其值通过式(5)计 算<sup>[21]</sup>。

$$g(r) = \frac{\sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{N_{AB}} \Delta N_{AB}(r \to r + \delta_r)}{4\pi \rho_{AB} r^2 N_{AB} K}$$
(5)

式中: $N_{AB}$ 为原子总数;K为时间步数; $\delta$ ,为距离间 隔; $\Delta N_{AB}$ 为距离 B(或 A)原子  $r+\delta$ ,范围内的 A(或 B)原子数; $\rho_{AB}$ 为密度。

在本节中,考虑了 4 个原子对( $H_h - O_e \ O_h - O_e$ 、 C<sub>h</sub>-C<sub>e</sub>和 C<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>),其中 H<sub>h</sub>、O<sub>h</sub>和 C<sub>h</sub>分别表示交联愈 合剂中的 H、O、C 原子,O<sub>e</sub>和 C<sub>e</sub>分别表示环氧树脂 中的 O、C 原子。图 7 显示了不同原子对的 g(r)曲 线,其横坐标表示各原子之间的距离。 分子间相互作用包括氢键和范德华力。通常, 强氢键和强范德华力作用的距离范围分别为 1.1~ 3.1 Å 和 3.1~5.0 Å;若距离大于 5.0 Å,则强范德华 力相互作用可以忽略<sup>[22]</sup>。如图 7(a)所示,H<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子 对在 2.75 Å 处存在一个尖锐的峰,表明交联愈合剂和 环氧树脂间存在强氢键作用。如图 7(b)—图 7(d)所 示,O<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>、C<sub>h</sub>-C<sub>e</sub>和 C<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子对分别在 4.81 Å,4.75 Å 和 4.69 Å 处存在一个较强的峰,表明交联愈合剂和 环氧树脂间存在强范德华力作用。

综上所述,通过对交联愈合剂/环氧树脂界面相 径向分布函数的分析表明,由于 H<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子对之间 的强氢键作用以及 O<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>、C<sub>h</sub>-C<sub>e</sub>和 C<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子对之 间的强范德华力作用,交联愈合剂与环氧树脂基体 间具有良好的化学相容性,保证了两者间较强的界 面粘结作用。



- 图 7 交联愈合剂/环氧树脂界面相径向分布函数曲线
- 3 结 论

通过对交联愈合剂/环氧树脂和环氧树脂/环氧 树脂界面相互作用的分子动力学模拟分析,得到主 要结论如下:

1)交联愈合剂/环氧树脂界面相和环氧树脂/ 环氧树脂界面相厚度分别约为10.8 Å和12.2 Å,前 者数值约为后者的88.5%,表明交联愈合剂和环氧 树脂基体相容性较好;

2)交联愈合剂/环氧树脂界面相的相互作用能 和拉伸模量 z 分量分别为环氧树脂/环氧树脂界面 相的 85%和 80%,表明交联愈合剂与环氧树脂基体 间具有良好的相容性,确保了较强的界面粘结强度;

3) H<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子对之间的强氢键作用以及 O<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>、 C<sub>h</sub>-C<sub>e</sub>和 C<sub>h</sub>-O<sub>e</sub>原子对之间的强范德华力作用是保 证交联愈合剂与环氧树脂基体间具有良好化学相容 性的本质原因。

#### 参考文献

- [1] Jie Ren, Siyao Guo, Jie Su, et al. A novel TiO<sub>2</sub>/epoxy resin composited geopolymer with great durability in wetting-drying and phosphoric acid solution [J].Journal of Cleaner Production, 2019, 227:849–860.
- [2] Youhao Zhang, Li Yuan, Guozheng Liang, et al. Developing Reversible Self-Healing and Malleable Epoxy Resins With High Performance and Fast Recycling Through Building Cross-linked Network with New Disulfide-Containing Hardener [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57:12397-12406.
- [3] Huichun Yu, Yuting Zhang, Mingjia Wang, et al. Dispersion of Poly(urea-formaldehyde)-Based Microcapsules for Self-Healing and Anticorrosion Applications [J]. Langmuir, 2019, 35(24):7871 - 7878.
- [4] Paulo R Souza, Cátia S Nunes, Adonilson R Freitas, et al. Sub-and supercritical D-limonene technology as a green process to recover glass fibres from glass fibre-reinforced polyester composites [J].Journal of Cleaner Production, 2020, 254:119984.
- [5] Dingshu Xiao, Minzhi Rong, Mingqiu Zhang. A novel method for preparing epoxy-containing microcapsules via UV irradiation-induced interfacial copolymerization in emulsions [J]. Polymer, 2007, 48(16):4765-4776.
- [6] Rui Qin, Guoyue Xu, Li Guo, et al. Preparation and characterization of a novel poly (urea-formaldehyde) microcapsules with similar reflectance spectrum to leaves in the UV-Vis-NIR region of 300-2500 nm [J].Materials Chemistry and Physics, 2012,136(2-3):737-743.
- [7] Dawei Sun, Yongbing Chong, Ke Chen, et al. Chemically and thermally stable isocyanate microcapsules having good self-healing and self-lubricating performances [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 346:289-297.

第45卷

- [8] Zhenglong He, Shuai Jiang, Na An, et al. Self-healing isocyanate microcapsules for efficient restoration of fracture damage of polyurethane and epoxy resins [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54:8262-8275.
- [9] 王雪梅,车晓刚,李勇迪,等.超疏水防紫外双功能水性
   织物涂层的制备及性能研究 [J].涂料工业,2019,
   49(9):1-6.
- [10] Lenyang Lv, Peiyan Guo, Gang Liu, et al. Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive[J].Cement & Concrete Composites, 2020, 105:103445.
- [11] Donggyu Kim, Hee Jung Park, Kee Yoon Lee.Study on curing behaviors of epoxy acrylates by UV with and without aromatic component [J]. Macromolecular Research, 2015, 23(10): 944-951.
- [12] Fengze Jiang, Dietmar Drummer. Curing Kinetic Analysis of Acrylate Photopolymer for Additive Manufacturing by Photo-DSC [J]. Polymers, 2020, 12(5):1080.
- [13] 刘春,赵昱,谢五喜,等.GAP/Al复合体系界面相互作用的分子动力学模拟研究[J].化工新型材料,2018,46(2):186-189.
- [14] Tran Chien Dong, Manh Hung Ha, Truc Vy Do, et al. Crosslinking process, mechanical and antibacterial properties of UV-curable acrylate/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Ag nanocomposite coating [J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 139: 105325.
- Ye Chan Kim, Sungyong Hong, Hanna Sun, et al. UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials [J]. European Polymer Journal, 2017,93:140-147.
- [16] Pingan Zhang, Jianmin Yuan, Aimin Pang, et al. A novel UV-curing liner for NEPE propellant: Insight from

(上接第16页)

- [8] 陈吉奂,刘强,李磊,等.国网浙江电力高弹性电网需求响应的探索和实践[J].电力需求侧管理,2020, 22(6):75-79.
- [9] 樊国旗,吕盼,樊国伟,等.退役电池梯次利用对新能源 消纳影响的研究[J].浙江电力,2021,40(3):121-126.
- [10] 许欣慧,舒征宇,李世春.基于退役电池在多储能场景下梯级利用的经济运行研究[J].智慧电力,2020,48(12):58-64.

molecular simulations [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 195:108087.

- [17] MaSanori Koyama, Masamitsu Shirai, Hiroaki Kawata, et al.Computational study on UV curing characteristics in nanoimprint lithography: Stochastic simulation [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56 (6S1): 06GL03.
- [18] Hao Wen, Xiaoxing Zhang, Rong Xia, et al. Decomposition Characteristics of SF<sub>6</sub> under Flashover Discharge on the Epoxy Resin Surface [J].Materials, 2019, 12(9):1408.
- [19] Abolfazl Alizadeh Sahraei, Abdol Hadi Mokarizadeh, Daniel George, et al. Insights into interphase thickness characterization for graphene/epoxy nanocomposites: A molecular dynamics simulation [J].Physical Chemistry Chemical Physics, 2019, 21(36):19890-19903.
- [20] Afshin Golzar, Hamid Modarress, Sepideh Amjad-Iranagh. Separation of gases by using pristine, composite and nanocomposite polymeric membranes: A molecular dynamics simulation study [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 539:238-256.
- [21] Zhonglin Luo, Jianwen Jiang. Molecular dynamics and dissipative particle dynamics simulations for the miscibility of poly (ethylene oxide)/poly (vinyl chloride) blends [J]. Polymer, 2019, 51:291-299.
- [22] Ting Sun, Jijun Xiao, Qiang Liu, et al. Comparative study on structure, energetic and mechanical properties of a ε-CL-20/HMX cocrystal and its composite with molecular dynamics simulation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014,2(34):13898-13904.

作者简介:

邵千秋(1991),男,博士,研究方向为电工新材料。

(收稿日期:2021-09-26)

- [11] 谢哲,汤红卫,韩新阳,等.基于 Stackelberg 多站融
   合双寡头利润分配机制研究[J].电网技术,2021,
   45(10):4009-4015.
- [12] 渠敬涛.基于多能互补的综合能源系统规划案例分 析[J].电工技术,2020(24):43-46.

#### 作者简介:

黄 健(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统 及其自动化;

樊国旗(1993),男,硕士,研究方向为电力系统调度及 新能源消纳。 (收稿日期:2021-08-06)

# 城市轨道交通直流牵引供电系统接入 对电网电能质量影响的分析

#### 魏铭池<sup>1</sup>,魏 巍<sup>2</sup>,刘 畅<sup>2</sup>,徐 琳<sup>2</sup>

(1.西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031;2.国网四川省 电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘 要:文中首先建立了城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型;然后,阐述了电能质量评估指标,提 出了结合城轨机车工况、数量组合两个维度的仿真场景设置方案;最后,以成都市轨道交通为例,仿真分析了接入点 的电压偏差、谐波电压和谐波电流。

关键词:城市轨道交通;牵引供电系统;电网;电能质量

中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0061-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220212

# Analysis on Integration Effect of DC Traction Power Supply System for Urban Rail Transit on Grid Power Quality

WEI Mingchi<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, XU Lin<sup>2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract**: The simulation model of DC traction power supply system for urban rail transit connected to power grid is established. And then the evaluation index of power quality is expounded, and a simulation scenario setting scheme is proposed based on two dimensions of urban rail locomotive working condition and quantity combination. At last, taking Chengdu rail transit for example, the voltage deviation, harmonic voltage and harmonic current of access point are simulated and analyzed. **Key words**: urban rail transit; traction power supply system; power grid; power quality

0 引 言

近年来,随着城市轨道交通的飞速发展,城市轨道 交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量的影响越 来越引人关注<sup>[1-4]</sup>。城市轨道交通负荷具有冲击性和 非线性,其接入电网后将会对电网的电能质量造成严 重的负面影响<sup>[5-7]</sup>。因此,对城市轨道交通直流牵引供 电系统接入电网引起的电能质量问题展开全面分析和 详细建模评估有助于将技术监督关口前移,及时发 现相应风险,从而维护电网的安全稳定运行。

国内学者已逐步开展对城市轨道交通直流牵引 供电系统接入电网引起的电能质量问题的研究工 作。目前,国内对城市轨道交通直流牵引供电系统 接入电网的研究大多集中于 24 脉波整流机组<sup>[8-10]</sup> 与城轨机车负荷特性<sup>[11-12]</sup>,并评估牵引供电系统带 单辆城轨机车时对电网电能质量的影响<sup>[13-14]</sup>。

在实际生活中,城轨机车有不同工况、不同数量 组合的可能性,但是大部分文献<sup>[11-14]</sup>仅研究了牵引 供电系统带单辆城轨机车时对电网电能质量的影 响,没有进行全面分析。

对此,基于 Matlab/Simulink 平台,首先,建立了 城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模 型,主要包括 24 脉波整流机组、牵引网、中压电缆、 城轨机车;然后,提出结合城轨机车工况、数量组合 两个维度的仿真场景设置方案;最后,以成都市轨道 交通为例,仿真分析了接入点的电压偏差、谐波电压 和谐波电流。

# 城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网仿真模型搭建

城市轨道交通直流牵引供电系统由 110 kV 电 网接入,经主变电所降压为 35 kV 电压等级后,向牵 引变电所输送电能。牵引变电所再次降压,然后整 流为 1500 V 直流电传输至接触网,为城轨机车供 电,最后经钢轨回流。主变电所向牵引变电所供电 的接线形式为双边集中供电形式,通过牵引变电所 的输电线路都经过中压母线(35 kV)连接,增加了 供电可靠性。图1 为城市轨道交通直流牵引供电系 统示意图。

![](_page_63_Figure_4.jpeg)

图 1 城市轨道交通直流牵引供电系统

基于 Matlab/Simulink 平台建立了城市轨道交 通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型,下面介 绍此模型中最主要的 4 个部分:24 脉波整流机组、 牵引网、中压电缆、城轨机车。

#### 1.1 24 脉波整流机组

当前中国城市轨道交通直流牵引供电系统大多 采用 24 脉波整流机组<sup>[8-10]</sup>。

图 2 为 24 脉波整流机组主电路原理图。24 脉 波整流机组由 2 台等容量的 12 脉波整流机组构成。 每台 12 脉波整流机组 DC 侧绕组依次为 Y 和△接 法,从而形成相位差为 30°的线电压; AC 侧是延边 三角形接线,依次移相±7.5°,以此构成的2台等容量

![](_page_63_Figure_10.jpeg)

图 2 24 脉波整流机组主电路原理

变压器的 4 套 DC 侧绕组的线电压相位互差 15°,依次全波整流之后,并联运行于 DC 侧,最终输出 24 脉动直流电。

由图 2 搭建的 24 脉波整流机组仿真模型如 图 3 所示。

利用2台移相变压器依次移相±7.5°之后分别 接入2台三相三绕组变压器,接线方式为D11-Y/ D11-D11,每台变压器连接2个6脉波桥式整流器, 从而并联形成12脉波整流机组,2台12脉波整流 机组并联形成24脉波整流机组。

![](_page_63_Figure_15.jpeg)

图 3 24 脉波整流机组仿真模型

#### 1.2 牵引网

牵引网是城市轨道交通直流牵引供电系统向城 轨机车输送电能的直接环节,它由馈电线、接触网、 钢轨以及回流线组成<sup>[14-15]</sup>。

牵引网等值电路如图 4 所示,牵引网仿真模型 如图 5 所示,牵引网参数如表 1 所示。

![](_page_63_Figure_20.jpeg)

图 5 牵引网仿真模型

表 1 牵引网参数	
类型	参数
接触网电阻 $R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.02
钢轨并联电阻 $R_2/(\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	0.019
钢轨并联过渡电阻 $R_3, R_4/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	3.00
接触网电感 $L_1/(\mathrm{mH}\cdot\mathrm{km}^{-1})$	1.07
钢轨并联电感 $L_2/(mH \cdot km^{-1})$	0.65
接触网対地电容 $C_1$ , $C_2$ (nF・km <sup>-1</sup> )	6.02
钢轨对地电容 $C_3$ , $C_4/(nF \cdot km^{-1})$	26.5
接触网对钢轨电容 C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> /(nF・km <sup>-1</sup> )	7.07

#### 1.3 中压电缆

城市轨道交通直流牵引供电系统中压网络电缆 线路(35 kV)等值电路如图 6 所示。

![](_page_64_Figure_5.jpeg)

由于中压电缆表面有屏蔽层,相间电容可忽略, 因此直接组合3个"PI Section Line"模块对三相中 压电缆建模,如图7所示。中压电缆参数取值如 表2所示。

![](_page_64_Figure_7.jpeg)

类型	参数
电阻 r/(Ω・km <sup>-1</sup> )	0.075
电感 L⁄ ( mH・km <sup>-1</sup> )	0.39
电容 C/(µF・km <sup>-1</sup> )	0.18

#### 1.4 城轨机车

城轨机车是城市轨道交通直流牵引供电系统的 主要负荷,也是功率的主要消耗源,因此仿真建模时 需对城轨机车的功率特性进行充分的体现。

1) 当城轨机车运行于启动工况、额定工况、中 功率工况、低功率工况时,采用负荷表征城轨机车功 率特性,利用 Matlab/Simulink 平台的"Series RLC Load"元件可实现依据实际工况设置城轨机车的功 率参数,如图8所示。

#### 1 $\langle 2 \rangle$ 图 8 城轨机车仿真模型(负荷表征功率特性)

2) 当城轨机车运行于制动工况时,城轨机车上 的牵引电机处于发电机状态,将城轨机车的动能转 换成电能反向流至直流牵引网。由于禁止直流牵引 网上的电能通过 DC/AC 变换返回交流电网,再生电 能除部分被其他处于牵引工况的车辆吸收利用外, 还有一部分剩余再生电能会导致网压升高。此时, 城轨机车按电流源建立模型,利用 Matlab/Simulink 的"controlled current source"模块建立模型,如图9 所示。

![](_page_64_Figure_14.jpeg)

城轨机车仿真模型(制动工况)

#### 电能质量评估指标 2

城市轨道交通负荷具有非线性和冲击性,其接 入会给电网带来电压偏差、谐波等电能质量问题。 下面对城市轨道交通直流牵引供电系统接入点处的 电压偏差、电压总畸变率、特征次谐波电压含有率、 特征次谐波电流含量等电能质量指标进行全面详细 的分析评估。

#### 2.1 电压偏差

电力系统中的用电负荷时时刻刻都在发生变化, 其有功功率与无功功率一直是动态平衡的状态,电压 也在不断变动,实际电压对标准电压偏差的百分比即 为电压偏差。电压偏差超出国家标准限值后会恶化 电气设备的工作效能,降低使用寿命,甚至损坏<sup>[16]</sup>。 因此,对城市轨道交通直流牵引供电系统接入点的 电压偏差进行全面详细的分析评估。

GB/T 12325-2008《电能质量供电电压偏差》 规定.35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和 不超过标称电压的 10%[17]。城市轨道交通直流牵 引供电系统接入点的标称电压值为 110 kV.其供电 电压正、负偏差绝对值之和不应超过11 kV。

#### 2.2 谐波

整流机组既是城市轨道交通直流牵引供电系统 的重要设备,也是谐波的主要来源。目前,中国城市 轨道交通直流牵引供电系统普遍采用的 24 脉波整

流机组会向电网注入 24k±1(k=1,2,3,…)次谐波, 以 23 次、25 次为主。谐波会导致电压与电流波形 发生畸变,会对电气设备产生负面影响<sup>[18]</sup>。

为了及时发现潜在的谐波超标风险,需对城市 轨道交通直流牵引供电系统接入点的电压总谐波畸 变率、特征次谐波电压含有率、特征次谐波电流含量 进行全面详细的分析评估。

2.2.1 谐波电压

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》 规定:电网标称电压为 110 kV 时,电压总谐波畸变 率限值为 2.0%,奇次谐波电压含有率限值为 1.6%, 偶次谐波电压含有率限值为 0.8%<sup>[19]</sup>。

2.2.2 谐波电流

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》规 定:标准电压为 110 kV,基准短路容量为 750 MVA 时,23 次谐波电流允许值为 2.1 A,25 次谐波电流允 许值为 1.9 A<sup>[19]</sup>。这里 110 kV 三相电源短路容量取 值为 1000 MVA,由式(1)可求得谐波电流允许值。

$$I_{h} = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp}$$
(1)

式中: $I_h$  为短路容量为 $S_{k1}$ 时的第h 次谐波电流允许 值; $S_{k1}$ 为公共连接点的最小短路容量,MVA; $S_{k2}$ 为基 准短路容量,MVA; $I_{hp}$ 为短路容量为基准短路容量 时的第h次谐波电流允许值,A。

由式(1)求得的 23 次谐波电流允许值为 2.8 A, 25 次谐波电流允许值为 2.53 A。

### 3 仿真场景设置

由于目前大部分文献<sup>[11-14]</sup>只对城市轨道交通 直流牵引供电系统带单辆城轨机车进行仿真建模, 但在实际生活中,城轨机车有不同工况、不同数量组 合的可能性。因此,以成都市轨道交通为例,设置了 不同的仿真场景,较为全面地分析城市轨道交通直 流牵引供电系统接入对电网的电能质量影响。

1)城轨机车工况。典型工况包含以下 5 种:启 动工况、高功率工况、中功率工况、低功率工况和制 动工况。城轨机车运行时额定工况定义为高功率工 况,启动工况的功率约为 1.5 倍额定功率,城轨机车 在制动时向系统倒送功率,倒送功率值约为 0.5 倍 额定功率。由于城轨机车的功率越高,其对电网电 能质量影响越大,因此取启动工况、额定工况、制动 工况进行仿真建模分析。

2)城轨机车数量组合。实际运行时,存在高峰 期城轨机车紧密运行及非高峰期城轨机车松散运行 两种情况。非高峰期城轨机车松散运行时,每个牵 引站均带一辆城轨机车,或是两相邻牵引站间均带 一辆城轨机车。高峰期城轨机车紧密运行时,除每 个牵引站均带一辆城轨机车以外,两相邻牵引站间 均带一辆城轨机车。

3) 城轨机车车型。所研究的城轨机车车型为 成都市轨道交通 1 号线车辆。由文献[15,20] 可知 成都市轨道交通 1 号线车辆采用 B 型车,4 动 2 拖 (4M2T),6 辆固定编组,列车最高速度 80 km/h,供 电电压为 DC 1500 V,额定功率为 2880 kW,启动功 率为 4320 kW,制动倒送功率为 1440 kW。

取成都市轨道交通 4 个典型场景进行仿真建模 分析,基于 Matlab/Simulink 搭建的非高峰期城轨机 车松散运行仿真模型与高峰期城轨机车紧密运行仿 真模型分别如图 10、图 11 所示。

![](_page_65_Figure_18.jpeg)

图 10 非高峰期城轨机车松散运行仿真模型

![](_page_66_Figure_1.jpeg)

图 11 高峰期城轨机车紧密运行仿真模型

场景1:非高峰期城轨机车松散运行,每个牵引 站均带一辆处于启动工况的城轨机车。

场景2:非高峰期城轨机车松散运行,两相邻牵 引站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

场景3:高峰期城轨机车紧密运行,每个牵引站 均带一辆处于启动工况的城轨机车,且两相邻牵引 站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

场景4:高峰期城轨机车紧密运行,每个牵引站 均带一辆处于制动工况的城轨机车,且两相邻牵引 站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

# 4 实例分析

#### 4.1 电压偏差

不同仿真场景下,城市轨道交通直流牵引供电 系统接入点电压偏差值如表3所示。

表 3 不同仿真场景下接入点电压偏差值

仿真场景	电压偏差/%
场景1	-0.67
场景 2	-0.35
场景 3	-1.17
场景 4	-0.12

由表 3 可知:1) 当城轨机车处于启动工况、高 功率工况时,城轨机车从电网吸收功率,导致接入点 电压偏差为负,电压降低,且功率越大电压偏差越 大;2) 当城轨机车处于制动工况时,城轨机车向电 网倒送功率,导致接入点电压偏差值为正,电压升 高;3) 不同仿真场景下接入点电压正负偏差绝对值 之和均未超过标称电压的 10%,符合 GB/T 12325— 2008《电能质量供电电压偏差》国家标准。

#### 4.2 谐波电压

不同仿真场景下,接入点电压总谐波畸变率以及 23 次、25 次谐波电压含有率如表 4 所示。

由表4可知:1)不同仿真场景下接入点电压

总谐波畸变率、23次谐波电压含有率、25次谐波电 压含有率均未超过国家标准限值,符合国家标准; 2)谐波电压含有率与城轨机车功率成正比,即城轨 机车功率越大,谐波电压含有率越高;3)仿真场景3 的电压总谐波畸变率为1.71%,25次谐波电压含有 率为1.456%,十分逼近国家标准限值,倘若城轨机 车功率继续增大、数量继续增加,存在谐波电压超标 风险,需要对其进行治理。

表 4 不同仿真场景下接入点电压总谐波畸变率

:9	ç	2	2	;		(	•				;	:	:		;	;	;	;	•	•	;		:	;	;	:	:		:	:	:	:				:	:	;	;	;	;	;	;	;	;	;	;	•	•		;	;	;	;	;						f	ĺ	ļ	1	Ī	Ļ	1		1	Ê	Ì	Ē	1					:	ŝ	ŕ	é	2	Ī	J	1	•	ì	2	î	ŀ	-	J	ļ	2	Ę	Ĺ	2	5	į	1	'	í		i	ĺ	•		ĺ	Ī	)	,	i,	Ì	,	
	: '	:'	: 4	:'	:'	: '	:	:	:	:	•	;	;										;	•	•	;																																			f	ĺ	ļ	1	Ī	Ļ	1		1	Ê	Ì	Ē	1					:	ŝ	ŕ	é	2	Ī	J	1	•	ì	2	î	ŀ	-	J	ļ	2	Ę	Ĺ	2	5	į	1	'	í		i	ĺ	•		ĺ	Ī	)	,	i,	Ì	,	

指标	场景1	场景 2	场景 3	场景 4	限值
总谐波畸变率	1.43	1.24	1.71	1.17	2.0
23次谐波电压含有率	0.975 3	0.574 8	0.901 2	0.885 6	1.6
25 次谐波电压含有率	1.051 0	1.103 0	1.456 0	0.925 5	1.6

#### 4.3 谐波电流

不同仿真场景下,接入点 23 次、25 次谐波电流 含量如表 5 所示。

表 5 不同仿真场景下接入点 23 次、25 次谐波电流含量

指标	场景1	场景 2	场景3	场景 4	限值
23次谐波电流/A	2.211	1.997	2.049	1.310	2.80
25 次谐波电流/A	2.192	1.920	3.045	2.312	2.53

由表 5 可知:1) 仿真场景 3 的 25 次谐波电流含 量超出国家标准限值,需要对其采取相应的限制或 治理措施;2) 其余仿真场景的 23 次、25 次谐波电流 尚未超出国家标准限值,符合国家标准;3) 倘若城 轨机车功率继续增大、数量继续增加,存在谐波电流 超标的风险,需要对其进行治理。

综上所述:1)仿真场景 3 对电网风险最高。非 高峰期乘客数量较少时,可以通过合理的城轨机车 调度来消弭;高峰期乘客数量较多时,无法通过合理 的城轨机车调度来消弭,需要采取相应的治理措施。 2)接入点的电压偏差、谐波电流以及谐波电压 3 个指 标是城轨机车工况、城轨机车数量组合以及城轨机车 车型3个因素共同作用的结果。相对而言,城轨机车 数量组合的影响最大,城轨机车工况次之。

# 5 结 论

基于 Matlab/Simulink 平台建立了城市轨道交 通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型,以成都 市轨道交通为例,基于实际情况,考虑城轨机车工 况、数量组合,设置了不同的仿真场景,分析评估了 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质 量的影响,结论如下:

1)电压偏差:不同仿真场景下接入点的电压偏 差值均在国家标准限值内,仿真场景3的电压偏差 值最大,为-1.17%。

2)谐波电压:不同仿真场景下接入点的谐波电 压含量均在国家标准限值内,仿真场景 3 的谐波电 压含量最高,且十分逼近国家标准限值,存在谐波电 压含量超标风险。

3)谐波电流:仿真场景3的25次谐波电流含量 超出国家标准限值,需要对其采取相应的治理措施, 其余仿真场景的谐波电流尚未超出国家标准限值。

#### 参考文献

- [1] 文春雷,刘建军,詹宏,等.城市轻轨供电系统对公共电
   网电能质量的影响研究[J].电力建设,2011,32(8):
   5-10.
- [2] 胡斌,徐明清,陶骞.城市轨道交通对电网能质量的影响[J].湖北电力,2012,36(4):4-5.
- [3] 李扬,胡文平,任建文.城市轨道交通牵引供电系统对 电网的影响[J].河北电力技术,2013,32(5):36-37.
- [4] 王宇飞,徐琳.地铁牵引供电系统接入对电网电能质量 影响分析[J].四川电力技术,2019,42(1):33-36.
- [5] 李建民,孙建设.城市轨道交通供电系统谐波分布研究[J].电测与仪表,2008,45(2):1-6.
- [6] 王俊,余建平.城市轨道交通供电主变电站接线模式分

析及其谐波影响的研究[J].华东电力,2009,37(12): 2059-2063.

- [7] 金照盈.城市轨道交通供电系统谐波分析及对配网的 影响研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [8] 李良威,李群湛,刘炜.24 脉波整流器外特性仿真及其 在城市轨道交通中的应用[J].城市轨道交通研究, 2007,10(10):52-55.
- [9] 董海燕,田铭兴,杜斌祥,等.地铁 24 脉波整流机组的仿真 及谐波电流分析[J].电源技术,2011,35(5):593-594.
- [10] 全恒立,刘志刚,张钢,等.地铁 24 脉波整流器空载直 流侧谐波特性分析[J].铁道学报,2012,34(3):28-33.
- [11] 唐飞龙.地铁车辆电传动系统的主电路仿真[J].电力 机车与城轨车辆,2008,31(6):12-14.
- [12] 林文立.地铁动车牵引传动系统分析、建模及优化[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [13] 杜芳.地铁机车建模及直流牵引供电系统故障分析[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [14] 魏光耀.地铁牵引供电系统建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2017.
- [15] 张俊婷.基于 MATLAB/Simulink 的城市轨道交通交 直流供电系统建模仿真[D].北京:北京交通大学, 2017.
- [16] 林海雪.电能质量国家标准系列讲座 第1讲供电电 压偏差标准[J].建筑电气,2011,30(4):3-9.
- [17] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会.电能质 量供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S].北京:中国 标准出版社,2009.
- [18] 林海雪.电能质量国家标准系列讲座 第 3 讲 公用电 网谐波标准[J].建筑电气,2011,30(6):3-8.
- [19] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会.电能质量公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].北京:中国标准出版社,1994.
- [20] 陈英,陈燕.成都地铁1号线车辆电气牵引系统[J]. 铁道机车车辆,2009,29(5):52-55.

作者简介:

魏铭池(1996),男,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统理论、电能质量评估。 (收稿日期:2021-09-21)

欢迎投稿

欢迎订阅

# 含 P2G 的多能源网优化调度研究

樊国旗¹,霍 超²,李小腾³,刘 斌⁴,樊国伟⁵,程 林²,王志远⁵,潘伟东¹

(1. 国网金华供电公司,浙江金华 321001;2. 国家电网公司西北分部,陕西西安 710048;

3. 国网陕西省电力公司科学研究院,陕西西安 710010;4. 西安交通大学电气工程

学院,陕西西安 710049;5. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:针对联络线功率约束导致的弃风和供电缺口问题,文中提出一种含电转气(P2G)的多能源网优化调度方法, 新建燃气轮机解决供电缺口问题,新建 P2G 设备解决弃风问题。首先,分析不同地区弃风和供电缺口原因;然后,建 立 P2G 设备、燃气轮机和多能源网调度模型,通过某地区实际算例验证所提调度方法的有效性。此外对 P2G 设备和 燃气轮机功率的灵敏度进行分析,并通过原弃风功率概率分布和原供电缺口概率分布分析其灵敏性特性的原因。 关键词:P2G;供电缺口;新能源消纳;概率分布;敏感性分析

中图分类号:TM 734 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0067-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220213

# Research on Optimal Dispatch of Multi-energy Grid Considering P2G

FAN Guoqi<sup>1</sup>, HUO Chao<sup>2</sup>, LI Xiaoteng<sup>3</sup>, LIU Bin<sup>4</sup>, FAN Guowei<sup>5</sup>, CHENG Lin<sup>2</sup>, WANG Zhiyuan<sup>5</sup>, PAN Weidong<sup>1</sup>

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;

2. Northwest Branch of Stated Grid Cooperation of China, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710010, Shaanxi, China;

4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

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

**Abstract**: Aiming at the problems about wind abandonment and power supply gap caused by transmission limit, an optimal dispatch method of multi-energy grid considering power to gas(P2G) is proposed. Gas turbine is built to solve the power supply gap problem, and P2G equipment is built to solve the wind abandonment problem. Firstly, the reasons for wind abandonment and power supply gap in different regions are analyzed, and then the models of P2G equipment, gas turbine and multi-energy grid dispatch are established. The effectiveness of the proposed dispatch method is verified by a practical example in a certain area. Furthermore, power sensitivity of P2G equipment and gas turbine is analyzed, and the reasons for their sensitivity characteristics is analyzed by the probability distribution of the original wind abandonment and the original power supply gap. **Key words**: P2G; power supply gap; new energy consumption; probability distribution; sensitivity analysis

0 引 言

电网互联可以提高不同地区之间的互济能力<sup>[1]</sup>。随着新能源的大规模接入和负荷的快速增长,受到电网传输能力等因素约束,系统不能满足调峰需要,出现弃风和供电缺口问题<sup>[2-4]</sup>。

针对此类问题,文献[5]利用能量流角度在电-热系统中引入电转气(power to gas,P2G)设备,促进 风电消纳,减少系统成本;文献[6]通过场景法表征 风电不确定特性,利用 P2G 装置实现电气互联和能 量耦合调度,提高风电利用率;文献[7]构建含 P2G 多能量网络模型,利用不同季节典型日负荷及风电 预测曲线检验模型的有效性和经济性;文献[8]利 用多能量耦合特性优化调度,减少弃风弃光;文献 [9-10]利用跨区电网和气网互联调度,减小系统峰

基金项目:国家重点研发计划项目"面向跨境互联的多能互补新型 能源系统关键技术研究"(2018YFE0208400)

谷差,实现资源优化配置,增强系统互济能力。

上述文献多通过 P2G 设备实现多能源网络优 化调度或者跨区互联,较少能针对夏季负荷和风电 特性,解决不同地区能源不平衡问题。因此,下面提 出一种含 P2G 的多能源网优化调度方法,利用 P2G 技术解决风电与负荷不匹配导致弃风问题,并通过 燃机实现冷电联合调度解决电网供电能力不足问 题;通过对燃气轮机消耗天然气和 P2G 设备产生天 然气平衡进行控制,减少对天然气流影响;通过某跨 区电网实际算例验证所提方法的有效性。

# 1 弃风与供电缺口问题分析

由于输电通道(地区和主网之间)传输功率约 束,负荷高峰时段出现供电缺口,调峰能力不足,只 能采取限负荷的方法。在风电大发的高峰时段,本 地电网消纳能力不足,调峰能力受限,且外送通道限 制,会导致弃风。为分析地区1风电消纳能力不足、 地区2供电能力不足的电网特性,将该地区电网简 化如图1所示:G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>分别表示地区1、地区2发电 机组;L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>分别表示地区1、地区2负荷。

![](_page_69_Figure_6.jpeg)

风电消纳空间如式(1)表示。

 $P_{\text{wind},r,t} = P_{\text{L},t} + P_{\text{trans},t} - P_{\text{f},\text{min}}$  (1) 式中:  $P_{\text{wind},r,t}$  为风电消纳空间;  $P_{\text{L},t}$  为负荷功率;  $P_{\text{trans},t}$  为联络线传输功率;  $P_{\text{f},\text{min}}$  为火电机组最小技 术出力。

弃风功率如式(2)所示,弃风电量 *W*<sub>wind,a</sub> 如式 (3)所示,弃风率计算如式(4)所示。

$$P_{\text{wind},a,t} = \max(P_{\text{wind},t} - P_{\text{wind},r,t}, 0)$$
(2)

$$W_{\text{wind,a}} = \sum_{t=1}^{1} P_{\text{wind,a},t}$$
(3)

$$\sigma = \frac{\sum_{t=1}^{r} P_{\text{wind},a,t}}{\sum_{t=1}^{T} P_{\text{wind},t}} \times 100\%$$
(4)

式中: $\sigma$ 为弃风率; $P_{wind,a,t}$ 为风电限电功率; $P_{wind,t}$ 为风电理论功率;T为风电限电总时间。

最大供电能力  $P_{\text{TSC}}$  (total supply capability, TSC)为机组最大技术出力加上联络线通道传输功率,如式(5)表示。

$$P_{\text{TSC}} = P_{\text{f,max}} + P_{\text{trans},t}$$
(5)

式中, P<sub>f,max</sub> 为机组可用最大技术出力。

供电缺口功率 $P_{L,a,t}$ 如式(6)所示,供电缺口电量 $W_{L,a}$ 如式(7)所示。

$$P_{L,a,t} = \max(P_{L,t} - P_{TSC}, 0)$$
 (6)

$$W_{\rm L,a} = \sum_{t=1}^{1} P_{\rm L,a,t}$$
 (7)

式中, $T_1$ 为供电缺口总时间。供电不满足要求的时段(即出现供电缺口时段)记为1,供电满足要求时段记为0。供电缺口状态 $\sigma_i$ 判断如式(8)所示,结合文献[11]安全域提出供电缺口率 $\gamma_i$ 如式(9)所示。

$$\sigma_{t} = \begin{cases} 1, & P_{1,a,t} > 0\\ 0, & P_{1,a,t} = 0 \end{cases}$$
(8)

$$\gamma_{t} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{T_{1}} \sigma_{t} \times 100\%$$
 (9)

式中,N为供电时段总数。

# 2 含 P2G 的多能源网优化调度

#### 2.1 含 P2G 的多能源网框架

含 P2G 的多能源网如图 2 所示,地区 1 包括火 电机组、风电机组和 P2G 设备,地区 2 包括火电机 组、燃气轮机、电制冷机及蓄冷器。P2G 装置主要包 括两个功能:地区 1 风电消纳能力不足时,电转气促 进风电消纳;地区 2 供电能力不足时,通过电-气-电 途径解决,天然气流和电力流在图中用箭头表示。

![](_page_69_Figure_27.jpeg)

图 2 含 P2G 的多能源网

#### 2.2 电气耦合框架

电气耦合元件包括燃气轮机和 P2G,燃气轮机 将天然气转化为电能, P2G 将电转化为氢气,然后 甲烷化得到燃气。

2.2.1 气冷电能源模型

气冷电能源模型中包括燃气轮机和电制冷机, 燃气轮机能量转化如式(10)所示。

$$f_{\rm MT,t} = \frac{P_{\rm MT,t}}{\eta_{\rm MT,e} \times H_{\rm G}}$$
(10)

式中: $f_{MT,t}$ 为燃气轮机天然气消耗流量; $P_{MT,t}$ 为燃 气轮机电功率; $\eta_{MT,e}$ 为燃气轮机发电效率; $H_{C}$ 为天 然气热值。

燃气轮机发电成本 
$$C_{MT}$$
 如式(11)所示。  
 $C_{MT} = a \left( P_{MT,t} + \gamma D_{MT,t} \right)^2 + b \left( P_{MT,t} + \gamma D_{MT,t} \right) + c$ 
(11)

式中:a、b、c为机组能耗系数; $\gamma$ 为冷电功率变化相 对量; $P_{MT,t}$ 、 $D_{MT,t}$ 分别为微型燃气轮机电、冷功率。

燃气轮机发电功率和制冷功率关系  $K_{MT}$  如式 (12)所示,燃气轮机机组电(热)爬坡功率  $R_{P(D)MT,t}$ 约束和电(热)功率上下限  $P(D)_{MT,t}$  约束如 式(13)—式(14)所示,燃气轮机功率运行区域如 图 3 所示。

$$K_{\rm MT} = \frac{D_{\rm MT,t}}{P_{\rm MT,t} \times 3600}$$
(12)

$$R_{P(D) \text{ MT,min}} \leqslant R_{P(D) \text{ MT},\iota} \leqslant R_{P(D) \text{ MT,max}}$$
(13)

 $P(D)_{MT,min} \leq P(D)_{MT,t} \leq P(D)_{MT,max}$  (14) 式中:  $R_{P(D)MT,max}$ 、 $R_{P(D)MT,min}$ 分别为燃气轮机电 (冷)最大、最小爬坡功率;  $P(D)_{MT,min}$ 、 $P(D)_{MT,max}$ 分别为燃气轮机电(冷)最大、最小功率。

![](_page_70_Figure_13.jpeg)

#### 图 3 燃气轮机功率运行区域

冷负荷功率由燃气轮机冷负荷和电制冷机负荷 组成,如式(15)所示。

$$P_{\mathrm{L,c},t} = P_{\mathrm{L,c,e},t} + D_{\mathrm{MT},t}$$
(15)

式中: *P*<sub>L,e,t</sub> 为总冷负荷; *P*<sub>L,e,e,t</sub> 为电制冷机冷负荷。 2.2.2 P2G 设备-电气能源模型

P2G转化化学方程式如式(16)所示,能量转化

如式(17)所示。

$$\begin{cases} 2H_2O \xrightarrow{e} 2H_2 + O_2 \\ 4H_2 + CO_2 = 2H_2O + CH_4 \end{cases}$$
(16)

$$F_{\text{P2G},t} = \frac{P_{\text{P2G},t} \times \eta_{\text{P2G}}}{H_{\text{G}}}$$
(17)

式中:  $F_{P2G,t}$  为 P2G 设备产生天然气产量;  $\eta_{P2G}$  为 P2G 能量转化效率;  $P_{P2G,t}$  为 P2G 设备功率。

P2G设备产生天然气需要同时满足地区1和地区2需要,因此

$$P_{\text{P2G},t} = \max(P_{\text{P2G},1,t}, P_{\text{P2G},2,t})$$
(18)

式中, P<sub>P2G,1,t</sub> 和 P<sub>P2G,2,t</sub> 分别为地区 1 和地区 2 的 P2G 设备所需功率。地区 1 的 P2G 设备所需功率 等于减少弃风功率;地区 2 的 P2G 设备所需功率等 于供电缺口减少功率。

P2G设备功率约束如式(19)所示。

 $P_{P2G,min} \leq P_{P2G,t} \leq P_{P2G,max}$  (19) 式中,  $P_{P2G,min}$ 、 $P_{P2G,max}$ 分别为 P2G 设备最小、最大 技术出力。

# 3 分层优化调度模型

#### 3.1 调度目标

电网调度任务为保障电网安全运行,减少供电 缺口;支撑新能源消纳,减少新能源限电;实现电网 经济高效运行,减少运行成本。为解决地区1出现 的新能源弃风问题和地区2的供电缺口问题,通过 新建 P2G装置,将地区1弃风时段电量转化为天然 气通过天然气管网在地区2消纳。通过新建燃气轮 机,提高供电能力支撑减少供电缺口,提高冷负荷减 少电负荷间接减少供电缺口。

调度目标为系统成本最小。

$$C_{\pm} = C_{\text{wind,a}} + C_{\text{L,a}} + C_{\text{MT}} + C_{\text{P2G}} + C_{\text{f}} + C_{\pm \overline{r}}$$
(20)

式中:  $C_{wind,a}$  为弃风成本;  $C_{L,a}$  为供电缺口成本;  $C_{MT}$  为燃气轮机成本;  $C_{P2G}$  为调用 P2G 装置增加成本;  $C_{f}$  为火电机组运行成本;  $C_{\pm T}$  为主网下网成本。

$$C_{\text{wind,a}} = \sum_{t=1}^{T} P_{\text{wind,a},t} \times c_{\text{wind,a}}$$
(21)

$$C_{\rm L,a} = \sum_{t=1}^{r_1} P_{\rm L,a,t} \times c_{\rm L,a}$$
(22)

$$C_{\rm P2G} = \sum_{t=1}^{12} P_{P2G,t} \times c_{\rm P2G}$$
(23)

$$C_{\rm f} = \sum_{i=1}^{T_3} \sum_{i=1}^{N} \left( d_i \times P_{{\rm f},i}^2 + e_i \times P_{{\rm f},i} + \varepsilon_i \right) \quad (24)$$

$$C_{\pm \overline{F}} = \sum_{i=1}^{I} P_{\pm \overline{F},i} \times c_{\pm \overline{F}}$$
(25)

式中: $c_{\text{wind},a}$ 、 $c_{\text{L},a}$ 、 $c_{\text{P2G}}$ 、 $c_{\pm \overline{r}}$ 分别为弃风、供电缺 口、调用 P2G 设备和主网下网功率的单位成本; $T_2$ 、  $T_3$ 和  $T_4$ 分别为 P2G 设备运行总时间、火电机组运 行总时间和主网下网总时间; $d_i$ 、 $e_i$ 、 $\varepsilon_i$ 分别为火电 机组成本系数; $P_{\pm \overline{r}_i}$ 为主网下网功率。

#### 3.2 约束条件

约束条件包括:地区 1 和地区 2 电功率平衡约 束,见式(26)—式(27);天然气流量平衡约束,见式 (28);联络线功率约束,见式(29);火电机组爬坡约 束,见式(30);火电机组功率约束,见式(31)。

$$\sum_{i=1}^{N} P_{f,t,i} + P_{wind,t} + P_{trans,t} - P_{P2G,t} = P_{L,t} + P_{wind,a,t}$$
(26)

$$\sum_{i=1}^{N} P_{f,t,i} + P_{MT,t} + P_{trans,t} = P_{L,t} + P_{1,a,t} \quad (27)$$

$$F_{\text{P2G},t} = f_{\text{MT}} \tag{28}$$

$$-P_{\text{trans},k,\max} \leq P_{\text{trans},k,t} \leq P_{\text{trans},k,\max}, \ k = 1,2$$
(29)

$$R_{\mathrm{f},i,\min} \leqslant R_{\mathrm{f},i,t} \leqslant R_{\mathrm{f},i,\max} \tag{30}$$

$$P_{\rm f,i,min} \le P_{\rm f,i,t} \le P_{\rm f,i,max} \tag{31}$$

式中: $F_{P2G,t}$ 为 P2G 量设备天然气制造量; $P_{trans,k,max}$ 为地区 k 与主网联络线最大传输功率,结合图 2,地区 1 电力流上网为正方向,地区 2 电力流下网为正方向; $R_{f,i,min}$ 和 $R_{f,i,max}$ 分别为第i台火电机组最小、最大爬坡功率; $P_{f,i,min}$ 和 $P_{f,i,max}$ 分别为第i台火电机组最小、组最小、最大技术出力。

## 4 算例分析

#### 4.1 地区情况

地区 1、地区 2 负荷和风电如图 4、图 5 所示。 燃气轮机冷电功率变化相对量为 0.15;发电功率和 制冷功率关系为 0.75;发电效率为 0.33;机组能耗成 本系数 a、b、c 分别为 0.053 2、90.12、7 175.4;最大、最 小电功率分别为 60 MW 和 10 MW;最大、最小冷功率 分别为 60 MW 和 0;最大电(冷)爬坡功率为 45 MW。 地区 1 与主网最大传输功率为 200 MW,地区 2 与主 网最大传输功率为 700 MW。火电机组成本系数 d、 e、 c 分别为 0.078 42、139.3、9 604.4;最大、最小功率 分别为 300 MW 和 150 MW;最大电(冷)爬坡功率为 110 MW。弃风成本为 600 元/MWh;限负荷成本 为 4000 元/MWh(参考负荷参与需求侧响应单价); 主网下网功率成本为 250 元/MWh;P2G 设备功率为 140 MW,P2G 设备调用功率成本为 200 元/MWh。

![](_page_71_Figure_18.jpeg)

#### 4.2 仿真验证

所研究问题为非线性规划模型问题,调度时间 粒度为5 min,采用 LINGO11 求解。地区1最大等 效负荷(地区1负荷与风电差值)为856 MW,地区1 最大传输功率为200 MW,因此地区1火电机组最 大供电能力需要大于656 MW,则地区1火电机组 300 MW 开机3台,最大开机功率为900 MW,地区1 原调度情况和图4相同。地区1调用P2G设备前 后弃风对比如图6所示。

由图 6 计算可知, P2G 设备参与调度后弃风电量为 86.6 MWh;弃风率为 1.06%,满足国家弃风率小于 5%要求,弃风率降低了 90.6%;最大弃风功率为 35.2 MW,相对原最大弃风功率降低 79.9%。

地区1的P2G设备参与调度前后联络线功率 不变;P2G设备参与调度会增加地区1火电机组功 率,因此地区1火电机组功率在P2G设备参与调度 前后会发生变化。地区1联络线功率和P2G设备 参与调度火电机组功率如图7所示。
#### 樊国旗,等:含 P2G 的多能源网优化调度研究



地区2最大负荷为2411.2 MW,地区2最大传输 功率为700 MW,因此地区2火电机组最大供电能力 需要大于1711.2 MW,则地区2火电机组300 MW应 开机6台,由于地区2火电机组只有5台,最大开机 功率为1500 MW,地区2原调度情况和图5相同。 调用燃气轮机前后原供电缺口、现供电缺口对比和 地区1火电机组为 P2G 设备制造天然气转化为地 区2电+热能力如图8所示。



由图 5 计算可知,地区 2 供电缺口功率最大为 211.17 MW,供电缺口电量为 541.5 MWh,相比总用 电量 45 676.3 MWh,缺口电量只占 1.9%,但供电缺 口率为 26.7%。由图 8 计算可知,调用燃气轮机后地 区 2 缺口功率最大为 124.2 MW,供电缺口电量为 230.4 MWh,缺口电量占 0.4%,供电缺口率为 15.3%, 供电缺口率减少43.1%;地区1火电机组为P2G设备制造天然气转化为地区2电+热能力和地区2原供电缺口存在重叠,因此燃气轮机解决供电缺口会受到地区1火电机组为P2G设备制造天然气影响。 地区2联络线原、现功率和P2G设备参与调度火电机组原、现功率如图9所示。



图 9 地区 2 联络线功率和火电机组功率变化

P2G 设备和燃气轮机调用功率如图 10 所示。



图 10 调用 P2G 设备和燃气轮机功率

由图 4 计算可知,地区 1 弃风最大功率达 175.3 MW,弃风电量为 918.9 MWh,弃风率为 11.35%,弃风率较高,不符合国家弃风率低于 5%的要求。由图 10 计算可知,P2G 设备调用 1 340.5 MWh,燃气轮机电+冷负荷调用 833 MWh,减少 弃风 832.7 MWh,减少供电缺口电量 311.1 MWh。

原方法中,地区1火电机组、地区1弃风、地区2火电机组、地区2供电缺口、主网下网成本、总成本分别为301.8、55.1、687.5、216.6、161.8和1422.8万元;现方法中,地区1火电机组、地区1 弃风、地区2火电机组、地区2供电缺口、P2G设备、燃气轮机和主网下网成本分别为310.5、5.2、680.3、92.2、159.1、26.8、24、1298.1万元。所提方法相比原方法节约成本124.7万元。

## 4.3 参数敏感性分析

P2G设备功率和弃风电量与弃风率关系如图 11 所示。



图 11 P2G 设备功率和弃风电量与弃风率关系

由图 11 可知,弃风电量与弃风率随 P2G 设备功 率增大而减少, P2G 设备功率为 80 MW 时,弃风率 为 4.67%,符合国家弃风率小于 5%要求;最大弃风功 率为 95.2 MW,相对原最大弃风功率降低 45.7%。

弃风电量与弃风率与 P2G 设备功率呈现近似 线性关系,为探究其近似线性关系原因,统计原弃风 功率概率分布,如图 12 所示。



由图 12 可知,原弃风功率分布数量大部分近似 相等,主要分布在风电功率大发期间的风电功率上 升和下降阶段;弃风功率分布数量较大时段主要位 于风电峰值时间段。

燃气轮机电+冷能综合利用率约为 62%,因此 P2G 最大功率为 140 MW 时,转化为燃气轮机电+冷 能最大功率约为 87 MW,因此燃气轮机产生能量从而 减少供电缺口和燃气轮机最大电+冷功率直接相关; 燃气轮机最大电+冷功率与供电缺口电量、供电缺口 最大功率和供电缺口比例关系如图 13 所示。

由图 13 可知,供电缺口电量随着燃气轮机最大 电+冷功率增大其降低速度逐渐变缓。供电缺口最大 功率下降呈线性关系。供电缺口比例与燃气轮机最 大电+冷功率呈现先迅速降低,后缓慢降低关系。供 电缺口和燃气轮机最大电+冷功率相关,且由图 8 可 知其与地区 1 P2G 设备产生天然气相关,为探究其相 互之间关系,其供电缺口功率分布统计如图 14 所示。





图 14 供电缺口功率分布

由图 14 可知,原供电缺口在 40~70 MW 之间 分布虽然较多,但受到地区 1 P2G 设备制造天然气 影响,不能有效解决该区间供电缺口问题。原供电 缺口在 120~140 MW 及 160~190 MW 之间分布较 多,但地区 1 P2G 设备制造天然气转化为燃气轮机 电+热能最大功率为 124 MW,不能有效解决该区间 供电缺口问题。原供电缺口在 0~30 MW 之间分布 解决较好,同时验证图 13 之间关系的正确性。

## 5 结 论

针对输电通道传输功率约束导致不同地区负荷 高峰时段供电缺口和风电高峰时段弃风问题,通过 新建燃气轮机解决供电缺口问题;通过 P2G 解决弃 风问题;通过对燃气轮机消耗天然气和 P2G 设备产 生天然气平衡进行控制,减少对天然气流影响。该 方法能够有效解决弃风和供电缺口问题,弃风(供 电缺口)随着 P2G 设备(燃气轮机)功率的增大减 少速度会放缓。 由于负荷同时率特性,地区1通过P2G设备为 地区2供应天然气会受到限制,会影响燃气轮机解决 地区2供电缺口问题;此外由于燃气轮机受到地区1 P2G设备制造天然气影响,不适宜投资功率过大的 P2G设备,在后续研究中将通过其他不受设备和负荷 同时率限制的设备参与调度,解决供电缺口问题。

#### 参考文献

- [1] 黄国栋,许丹,崔晖,等.互联电网安全约束经济调度场 景构建方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(8): 136-143.
- [2] 杨悦,陈仕军,杨博宇,等.基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究[J].四川电力技术,2021,44(2):24-27.
- [3] 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,等.大规模虚拟储能模式平 抑新能源功率预测误差研究[J].四川电力技术,2021, 44(2):19-23.
- [4] 林从城,方万煜.含风电场的水火电力系统的多目标优 化调度[J].山东电力技术,2019,46(10):7-12.
- [5] 施泉生,丁建勇,晏伟,等.基于能量流含 P2G 电-热系 统风电消纳优化运行[J].太阳能学报,2021,42(5): 394-400.

#### 

(上接第42页)

- [4] 耿建昭,王宾,董新洲,等.中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J].电力系统自动化,2013, 37(16):85-91.
- [5] Cassie A M.Arc rupture and circuit severity: A new theory [R].Paris, France: CIGRE Report No.102, 1939:1-16.
- [6] Mayr O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens [J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1943,37(12):588-608.
- [7] 杨明波,龙毅,樊三军,等.基于组合 Mayr 和 Cassie 电 弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J].电测与仪表, 2019,56(10):8-13.
- [8] 曾晗,王利娜,林文萱,等.新型动态变弧长模型在接地弧 光中的应用研究[J].计算机仿真,2021,38(6):315-320.
- [9] A Hochrainer, A Grütz. Study of arcs in breakers with the help of a cybernetic model [J]. CIGRE Report No. 13 – 10, Part A, 1972:1–14.
- [10] 俞小勇,秦丽文,欧阳健娜.间歇性电弧接地故障建模 分析[J].南方电网技术,2019,13(12):67-73.
- [11] 许晔,郭谋发,陈彬,等.配电网单相接地电弧建模
  及仿真分析研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(7):57-64.
- [12] 王宾,耿建昭,董新洲.基于介质击穿原理的配电线路

- [6] 殷作洋,赵银波,杨景茜,等.基于场景分析的含 P2G 装置电气能源系统协同优化[J].电力建设,2021,42(3):1-9.
- [7] 卢炳文,魏震波,魏平桉,等.考虑消纳风电的区域综合 能源系统电转气与储能设备优化配置[J].智慧电力, 2021,49(5):7-14.
- [8] 王世萱,朱武.含冰蓄冷空调的 CCHP 微电网优化 调度[J].上海电力大学学报,2021,37(1):37-43.
- [9] 魏震波,魏平桉,郭毅,等.考虑跨区能流交互计划的多 区域电-气综合能源系统分散调度方法[J].电力建 设,2020,41(12):66-79.
- [10] 曾方迪,李更丰,别朝红,等.考虑跨区联络线交易计 划的多区域互联系统分散调度方法[J].电力系统自 动化,2018,42(16):32-40.
- [11] 肖峻,秋泽楷,李航,等.基于安全边界几何观测的配
  电网改造规划实用方法[J].电力自动化设备,2021,
  41(8):1-7.

## 作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,主要研究方向电力系统调度 及新能源消纳。

(收稿日期:2021-08-05)

高阻接地故障精确建模[J].电力系统自动化,2014, 38(12):62-66.

- [13] 孙月琴,倪江,王宾,等.应用于输电线路单端测距的 高阻接地故障电弧模型分析[J].电力系统自动化, 2016,40(22):86-92.
- [14] 邵庆祝,崔鑫,谢民,等.弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J].电力系统自动化,2021,45(11): 120-125.
- [15] 许颖.对消弧线圈"消除弧光接地过电压"的异议[J]. 电网技术,2002,26(10):75-77.
- [16] 邱进,崔鑫,田野,等.小电流接地配电线路弧光高阻 接地故障电压特征分析[J].电力系统保护与控制, 2019,47(16):115-121.
- [17] 郭霖徽. 配电网线路故障类型辨识方法研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [18] 祝应宏,段伟强.电力勘察中土壤电阻率测试分析研 究[J].工程勘察,2011,39(12):82-85.
- [19] 沈其工,方瑜,周泽存,等.高电压技术[M].北京:中 国电力出版社,2012.

#### 作者简介:

李世龙(1989),男,博士,高级工程师,主要研究方向为 智能配电网、电力系统继电保护。

# 基于复杂网络属性的电网灾难性事件 综合风险评估

### 张 灦

(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:宏观上网络的结构属性与微观上设备的电气特性塑造电网灾难性事件的风险。电网灾难性事件作为具有动态时序的事件,需同时评估发生的直接风险和隐含的潜在风险。潜在风险会随着故障的发展,在电网结构中的薄弱环节传播潜藏。当初始故障在电网中开始传播时,直接风险和潜在风险也根据电网固有属性的节点度和节点聚类影响着灾难性事件风险的扩散机制。文中基于不确定风险分析理论和联系数理论,综合考虑故障传播的直接风险和潜 在风险,通过节点度和节点聚类系数定量评估故障引发的直接风险与潜在风险之间不确定的关联系数;最终得出故障的综合风险,改进了传统的电网灾难性事件动态风险评估方法。同时兼顾电网具有小世界效应和无标度拓扑的属性,建立兼具两者属性的阿波罗尼电网,通过对人工阿波罗尼电网进行灾难性事件风险评估,验证了所提方法的有效 性和可行性,并用西部某地区实际电网验证其合理性。结果证明,所得结果符合工程实际,更完整地刻画了电网灾难 性事件的综合风险。

关键词:灾难性事件;直接风险;潜在风险;联系度;综合风险;阿波罗尼网;节点度;聚类系数 中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0074-08 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220214

# Comprehensive Risk Assessment of Catastrophic Accident in Power System Based on Complex Network

#### ZHANG Xian

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

Abstract: Structural properties of the grid on a macro level and electrical characteristics of the components on a micro level together determine the risk of catastrophic failures. As a dynamic development process, the catastrophic failure not only needs to consider its direct risk but also the potential risks. Unlike the direct exposure of direct risk, potential risks are spread and hidden along with the inherent properties of network connection. When the risk spreads, the inherent properties of the grid affects the diffusion mechanism of catastrophic failure. Based on uncertainty risk analysis theory and contact number theory, and considering direct risk and potential risk comprehensively, the uncertain correlation coefficient between direct risk and potential risk is quantitatively characterized by degree and clustering coefficient of node. Taking the grid contains small-world effect and scale-free topology into account, the Apollonius power grid is established to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method, and to verify its rationality by a real power grid in western region. The results prove that the proposed method can meet the practical needs of engineering and describe the comprehensive risk of catastrophic accident in power system more completely.

Key words: catastrophic accident; direct risk; potential risk; degree of connection; comprehensive risk; Aollonius power grid; node degree; clustering coefficient

## 0 引 言

结构决定功能,功能进化结构。电网故障传播 的动力学行为兼受网架结构和潮流参数的影响。因 此,在评估电网安全时,国内外学者已注意到结构量 与电气量之间复杂的耦合关系对电网安全具有深层 次的影响。

文献[1-3]从运行状态量的角度研究了故障传 播机制。文献[4-6]研究发现实际电网与小世界网 络具有高度相似性,即较小的拓扑平均距离和较大 的聚类系数,并发现美国西部、中国北方、华东电网 均属于小世界网络。至此,科研人员开始关注电网 架构中的复杂网络结构属性对灾难性事件的影响。 不久, A Barabási、R Albert 等学者发现很多真实的 大型网络中节点的度分布都服从无标度幂律分 布<sup>[7]</sup>,发现并证明了北美电力系统属于无标度网 络<sup>[8-9]</sup>,并开始利用无标度网络模型研究北美电网。 综上可见,虽然研究关注的电网范围和地区不同,但 电网的复杂网络结构属性往往兼具小世界网络和无 标度网络属性。由于不同网络属性的网架结构在应 对灾难性事件时又表现出不同的动力学行为,而现 有研究暂未在兼具两种网络结构属性的电网领域开 展<sup>[10-11]</sup>,故构建既具有无标度效应又具有小世界效 应的复杂网络来研究实际电网的灾难性事件[12,18] 传播发展机制是十分必要的。

从电网电气量角度出发,现有研究构建了各类 电气量评估指标,但归根结底设备故障造成的电气 量影响还是负荷损失。故障不仅会对电网造成直接 的负荷损失(即直接风险),而且由于电网元件对故 障扰动的耐受能力具有区间性使得部分风险并未立 即释放出来,即还会造成潜在的负荷损失(潜在风 险)在电网架构上不断累积。因而需要同时刻画上 述两种风险,才能准确评估电网灾难性事件的风险。 文献[12]基于不确定风险理论<sup>[13-14]</sup>和联系数理 论<sup>[15]</sup>建立了电网连锁故障的综合风险指标,但在反 映直接风险和潜在风险关联关系的联系数确定上, 仅考虑了极端情况,并未得出具有普适性的数学定 量刻画方法。

下面基于电网中结构状态和运行状态之间高度 耦合这一实际,考虑到电网常常兼具小世界效应和 无标度效应,采用更符合实际电网网络属性的阿波 罗尼网对电网进行分析评估;通过应用刻画节点的 邻居节点之间联系紧密程度的聚类系数,定量刻画 了故障传播过程中直接风险和潜在风险之间关联关 系的联系度。最后,通过对人工阿波罗尼电网和西 部某地区电网仿真分析,证明了所提方法的正确性。

## 1 复杂网络属性

复杂网络属性中著名的小世界效应指网络中较 小的平均距离和较大的聚类系数,无标度效应则指 网络中节点度分布呈幂律分布。而在实际的电网建 设中,节点母线往往是兼具较小的平均距离和较大 聚类系数以及幂律分布。如能构造兼具小世界效应 和无标度效应的复杂网络来分析评估电网,更能反 映真实电网的属性特征。

## 1.1 阿波罗尼网络

2005年国际著名期刊《Phyical Review Letters》 发表了一篇根据著名阿波罗尼填充(Apollonian Packing)问题构造的新型复杂网络,故将其称为阿 波罗尼网络<sup>[16]</sup>。文献[16-17]研究发现该网络具有 幂律分布、较高的聚类系数以及较小的平均距离,即 该网络是兼具小世界效应和无标度效应的复杂网络。

阿波罗尼网络由古希腊数学家阿波罗尼提出的 阿波罗尼填充问题构造得来,如图1所示。初始状态是3个相切的圆,其空隙构成一个曲线三角形,第 1步填充将一个正好与曲线三角形的三条边相切的 圆填入空隙。由于此圆的填入,则产生3个更小的 空隙;在第2步迭代中,将3个合适的圆填入新产生 的空隙中,依旧使得新放入的圆与所填充的曲线三 角形相切。此过程不断地重复下去,当迭代步数趋 向于无穷时便得到了阿波罗尼填充。由阿波罗尼填 充问题得到的网络规则是:将每个圆当作网络中的 一个节点,若圆与圆之间存在相切关系,则在网络



中对应的节点之间存在联接关系,这便得到阿波罗尼网络,图2显示了阿波罗尼网络构造的过程。



1.2 阿波罗尼网络的复杂网络属性

1.2.1 度分布

度分布是复杂网络中三大重要统计特征之一, 它表示节点度的概率分布函数 P(k),即指随机选取 网络中某一节点有 k 条边的概率。文献[16]已证 明  $P(k) \propto k^{1-\gamma}$ ,其中  $\gamma = 1 + \frac{\ln 3}{\ln 2} \approx 2.585$ ,可知阿 波罗尼网络的节点度分布服从幂律分布。

1.2.2 平均最短距离

网络中任意两节点之间的最短距离是指从其中 一个节点出发到达另外一个节点所要经过的最少边 数目。将网络中所有节点对组合的距离进行平均即 可得到网络的平均最短距离。可见其刻画的是网络 整体的连通性。文献[17]研究得出,阿波罗尼网络 的平均最短距离为  $D_{iam}(S(d,t)) \sim \frac{2t}{d+1}$ , d 为维 数,t 为迭代步数。

1.2.3 聚类系数

聚类系数定义为复杂网络某节点所有相邻节点 也具有相连边的数目占最大可能相连边数目的百分 比,即该节点的邻居节点之间的联系紧密程度。网络 的聚类系数为所有节点聚类的平均值。文献[17]研 究得出,阿波罗尼网络的聚类系数为 *C* ≈ 0.828 4,可 见阿波罗尼网络具有较高的聚类系数。

## 2 基于复杂网络属性的电网故障综合风险

#### 2.1 综合风险评估

电网宏观上固有的复杂结构属性和微观上元件

的耐受水平区间性都决定了故障后,既会释放出一部分风险,又会存储一部分未释放的风险在电网之中。前者表现为直接的负荷损失以及因电气量越限映射出的负荷损失;后者表现为电气量越限映射出的故障若发生后再导致剩余元件电气量越限映射出的负荷损失。故将前者称为直接风险,后者称为潜在风险<sup>[12]</sup>。直接风险的表达式如式(1)所示。

$$R_{\_\text{dec}_i} = C_{r_i} \times \left\{ L_{\text{os}_i} + \sum_{j \in n} \left( \frac{C_{r_{ij}}}{\sum_{j \in n} C_{r_{ij}}} \times L_{\text{os}_{ij}} \right) \right\} \quad (1)$$

式中: $C_{r_i}$ 为设备 i 故障的可信性测度,当设备的耐受 区间为初始耐受区间时,根据文献[18]的式(7)可 得到,在后续仿真中,当设置设备的耐受区间系数  $\lambda$ 为1.1 倍、1.2 倍时,通过相应倍增文献[18]式(5) 中设备运行状态量的极限值来求取  $L_{os_i}$ 代表设备 i故障造成的负荷损失;n 为设备 i 故障后造成参数 越限的设备数; $C_{r_i}$ 为设备 i 故障后造成设备 j 故障 的可信性测度; $L_{os_i}$ 为因设备 i 故障与致设备 j 故障 而引发的负荷损失,这里为了考虑最严重的情况,将 由设备 i 故障导致了不同设备 j 故障的严重性值视 为最大,直接将其相加。

潜在风险的表达式如式(2)所示。

$$R_{\_\text{pot}_{i}} = \sum_{j \in n} \left\{ (C_{r_{i}} \times C_{r_{ij}}) \times \left( \frac{C_{r_{ijr}}}{\sum_{r \in m} C_{r_{ijr}}} \times L_{\text{os}_{ijr}} \right) \right\}$$
(2)

式中:m 为因设备 i 故障引起设备 j 故障后所有运行 超限的设备数; C<sub>rij</sub>和 L<sub>osij</sub>为设备 i 故障导致设备 j 故障后设备 r 故障的可信性测度和负荷损失。同式 (1),这里考虑了最严重的情况,即将这些设备 j 故 障的严重性直接相加。

由式(2)可见,直接风险作为刻画故障在下一 层设备中引发的负荷损失期望测度,潜在风险作为 刻画故障在再下一层设备中引发的负荷损失期望测 度,两者之间存在必然的数学关联关系。而在故障 传播中,两者之间的数学关联关系则是由网络的固 有结构属性导致,当网络结构一旦确定,上下两层故 障之间的关联关系也就自然确定。这种关联性随着 故障风险传播的路径不同而不同,故不能直接采用 代数和等简单方式处理,因而可利用联系数思想<sup>[14]</sup> 建立包含不确定关联关系的综合风险指标。

$$R_{\_tot_i} = R_{\_dec_i} + \mu \cdot R_{\_pot_i}$$
(3)

式中: $R_{tot_i}$ 为设备 i 的综合风险; $R_{dec_i}$ 为设备 i 的直接风险; $R_{pot_i}$ 为设备 i 的潜在风险; $\mu$  为不确定数。

## 2.2 基于节点度和聚类系数的不确定数确定

当故障处于初期的累积效应阶段时,如果网络 中两节点的度较高,即这两节点联系着较多的元件, 则设备开断导致的高风险可由更多路径、更均匀地 "分担"出去[19]。更进一步,当风险从故障元件两端 的节点上传播出去后,若这两个节点有较高聚类系 数,即与这两个节点相连的邻居节点之间有较紧密 的联系,则传播出去的风险会在这个联系紧密的集 团区域内部较好地消化掉<sup>[20]</sup>,从而抑制了故障风险 进一步向下传播。而随着故障的发展,当故障已发 展到不可逆转的连锁效应阶段时,即网络中元件已 普遍累积了较高的故障风险,较高的节点度数和较 高的聚类系数则会使分担出去的故障风险在更大范 围内的元件运行状态上产生严重影响,导致更大的 故障风险发生。可见,在连锁故障发展的不同阶段, 结构固有属性中的节点度和节点聚类系数深刻影响 着故障后故障风险继续向下一层故障发展的行为. 即节点度和节点聚类系数直接映射故障直接风险和 潜在风险的关联度。节点度刻画的是风险能被分担 出去的途径,节点的聚类系数刻画的是已分担出去 的风险在被波及的区域内部的分布情况,两者对故 障风险的影响是独立的。综上所述,当故障处于累 积效应阶段时,较高的节点度和较高的节点聚类系 数有助于抑制故障风险,故直接风险与潜在风险 之间的关联度µ<sub>ini</sub>与节点度和聚类系数呈反比,即  $\mu_{ini} \propto \frac{1}{D}, \mu_{ini} \propto \frac{1}{C}$ ,故网络中最小的节点度和最小 的聚类系数对应着最严重的情况;而当故障处于连 锁效应阶段时,关联度 $\mu_{irr}$ 与节点度和聚类系数呈 正比,即 $\mu_{irr} \propto D$ , $\mu_{irr} \propto C$ ,故网络中最大的节点度 和最大的聚类系数对应着最严重的情况,归一化后 可得累积效应阶段的 $\mu_{ini}$ 和连锁效应阶段的 $\mu_{irr}$ 如 式(4)、式(5)所示。

$$\mu_{\rm ini} = \frac{C_{\rm min} \cdot D_{\rm min}}{C \cdot D} \tag{4}$$

$$\mu_{\_\rm irr} = \frac{C \cdot D}{C_{\rm max} \cdot D_{\rm max}} \tag{5}$$

式中:  $C_{min}$  为网络中节点聚类系数最小的节点的聚 类系数;  $D_{min}$  为网络中节点度最小的节点的度值;  $C_{max}$  为网络中节点聚类系数最大的节点的聚类系 数;  $D_{max}$  为网络中节点度最大的节点的度值; C 为故 障元件两端的节点的聚类系数的平均值; D 为故障 元件两端的节点的度的平均值。

进一步可得故障累积效应阶段和连锁效应阶段 的综合风险分别如式(6)、式(7)所示。

$$R_{\_tot_i} = R_{\_dec_i} + \left(\frac{C_{\min} \cdot D_{\min}}{C \cdot D}\right) \cdot R_{\_pot_i}$$
(6)

$$R_{\_\text{tot}_{i}} = R_{\_\text{dec}_{i}} + \left(\frac{C \cdot D}{C_{\max} \cdot D_{\max}}\right) \cdot R_{\_\text{pot}_{i}}$$
(7)

### 2.3 故障传播的累积效应阶段和连锁效应阶段

根据《美国和加拿大关于 2003 年 8 月 14 日大 停电事故总结报告:原因和建议》<sup>[21]</sup>以及文献[22] 的研究都发现,电网灾难性事故的发展可分为累积 效应和连锁效应两个阶段。美加大停电是在经历过 较慢的 N-4 故障过程后才转化为灾难性事件。可 见,灾难性事件需经历一个累积阶段后,当电网元件 普遍累计的风险饱和之后,累积的风险才雪崩式地 释放。国内外学者的研究也发现.复杂电网固有的 动力学特性赋予了电网应对设备故障的鲁棒性,但 也为电网累积潜在的故障风险提供了温床。电网设 备故障导致的风险,又会传递出下一层元件的故障, 进而产生下一层故障事件风险,随着故障的发展,将 电网的运行状态逐渐转入临界状态,如果此时电网 仍未能及时阻断故障,电网运行状态就会进入不可 逆的连锁性故障阶段。因此,根据电网灾难性事件 的物理属性,可通过分析累积效应阶段和连锁效应 阶段的综合风险指标来估计电网风险。下面提出了 一种定量刻画这两个过程的方法,可从数学上准确 判定累积效应过程和连锁效应过程。

#### 2.3.1 累积效应阶段风险

电网的宏观网络属性和微观元件属性都使得电 网应对故障时既会释放部分运行风险,又会通过潮 流转移累积潜在风险,从而致使剩余电网元件越限。 若故障前电网结构中的潜在风险小于故障后的综合 风险,表明此故障发展阶段的电网仍能较好地消纳 故障引发的风险。电网运行于故障风险的累积效应 阶段,其显著特征可描述为本层故障潜在风险小于 其触发的下一层故障的综合风险,同时本层故障引 发的综合风险大于其诱发的下一层故障的综合风 险。这种故障风险逐渐递减的趋势,表明网架结构 能把故障事件阻断在风险累积阶段,如式(8)、式 (9),此阶段的综合风险指标应为式(6)所示。

$$R_{\_pot_i} < R_{\_tot_{ii}} \tag{8}$$

$$R_{\_tot_i} > R_{\_tot_{ii}} \tag{9}$$

式中, R\_\_tot;j为因设备 i 故障给下一层设备 j 故障带来的综合风险。

2.3.2 连锁效应阶段风险

网架结构的复杂性在赋予电网对抗故障鲁棒性 的同时也为电网发生连锁故障提供了温床<sup>[22]</sup>。如 果故障使电网不断累积风险,当电网中风险累积已 趋于饱和时,即便很小的故障也可能成为压垮电网 的"最后一根稻草",导致之前累积的故障风险呈现 雪崩式崩溃,电网故障传播进入难以阻断的连锁效 应阶段。因此可见,随着故障事件在累积效应阶段 的不断蔓延传播,当电网运行状态达到临界点后,如 果电网仍未能阻断故障传播,网架结构中已累积的 高风险势必会释放出来,电网进入连锁效应阶段。 其显著特征可描述为本层故障直接风险小于引发 的下一层故障直接风险,且本层故障引发的综合 风险小于其诱发的下一层故障综合风险。这种故 障风险传递呈递增趋势,势必引发连锁性故障,电 网故障传播将进入难以阻断的连锁效应阶段,风 险指标如式(10)、式(11),此阶段的综合风险指 标应为式(7)所示。

$$R_{\_\text{dec}_i} < R_{\_\text{dec}_{ii}} \tag{10}$$

$$R_{\_tot_i} < R_{\_tot_{ij}} \tag{11}$$

## 3 电网灾难性事故评估

#### 3.1 评估模型

电网灾难性事件预警决策系统是评估电网连锁 故障风险<sup>[23]</sup>的核心模块。预警决策系统通过风险 计算模拟构建灾难性事件序列的数据库。当电网实 际发生故障时,该系统即可通过匹配识别及时预测 出后续的连锁故障事件,以便对电网设备采取有效 的控制策略来及时阻断连锁故障。

电网灾难性事件总是由偶然的初始故障引发,

电网中某一设备发生故障后就会诱发电网运行状态 的连贯变化,即引发后续的连锁故障。故障发展的 初始阶段,电网运行状态处于风险累积效应阶段,当 电网中堆积的风险到达濒临崩溃的边缘时,如果电 网故障继续产生风险,堆积的故障风险就会快速地、 难以逆转地释放出来,故障传播进入连锁效应阶段。 正由于释放的过程难以逆转,所以在累积的过程中 就要做好充分的准备,将风险限制在缓慢的累积过 程中。因而,超前预警故障传播的累积效应阶段和 连锁效应阶段是预警电网灾难性事件的关键点。评 估算法通过遍历电网中任一设备故障作为初始事 件,综合评估故障产生的全部风险来刻画故障传播 机理。通过定量对比本层故障引发的风险值与诱发 的下一层故障风险值,将电网故障蔓延事件分为累 积效应阶段和连锁效应阶段。在故障传播过程中将 风险最严重的 10 组事件作为下一层故障的诱发原 因,若当该层故障引起电网运行潮流数据不收敛时, 或是电网切除的负荷超过 20%时<sup>[24]</sup>判定发生灾难 性事件。

### 3.2 评估算法

基于上述评估算法模型,首先对人工小世界电 网、人工阿波罗尼电网和人工无标度电网进行灾难 性事件动态综合风险评估,流程具体步骤如下:

 1)建立具有相同节点数的人工小世界和阿波 罗尼电网、无标度电网,依据文献[11]中方法对3种 人工电网的电气参数初始化。再进行初始潮流计 算,得出元件承受扰动的初始耐受区间。

2)分别在元件耐受区间的 100%、110%、120% 时,以 N-1 故障作为初始事件对电网元件进行随机 攻击,按照式(6)计算各故障事件的综合风险,并统 计每次事件后累积的综合风险与故障元件比例之间 映射关系。

3)按 N-1 故障事件综合风险的降序排序结果, 筛选出其中综合风险最高的前 10 组故障事件,逐一 剖析各故障触发暴露出的下一层风险设备。

4)分析残存的网架结构是否已是孤岛,若 "是",则分区域计算电网运行潮流;若"否",则直接 计算故障后的运行潮流。根据潮流结果按式(1)计 算元件故障的直接风险,通过式(2)计算元件故障引 发的潜在风险,并按式(6)计算出综合风险指标。 5)定量分析本层元件故障的风险数值和上 一层元件故障的风险数值,若式(10)、式(11)成 立,则根据式(7)计算故障事件的综合风险,按照 风险数值递减规律,将故障排序到连锁效应阶段;若 式(8)、式(9)成立,则根据式(6)评估元件故障的综 合风险,再根据风险数值递减的规律,将故障排序到 累积效应阶段。然后,在本层故障中排序出综合风 险最高的前10组事件,计算其平均的综合风险值, 累积到相应的上一层故障事件中。统计每次事件后 累积的综合风险与故障元件比例之间的映射关系。

6)判断所有网络元件的故障可信性测度是否 都小于一个较小的正值δ,若"是",则终止计算;若 "否",则判断是否已到达最大故障层数,或是潮流 计算结果已不收敛,若"是"则终止计算,若"否"转 入步骤4。

在第4.2节中对实际某地电网进行灾难性评估时,也按以上算法仿真,不同的是其不需要仿真耐受 区间为110%、120%的情况,不需要统计故障元件比 例与累积综合风险值,而仅需筛选出最严重的前10 组故障事件进行风险排序。

## 4 仿真分析

#### 4.1 人工电网的灾难性事件评估

基于阿波罗尼网络,建立节点数 n = 124、支路 数 l = 366 的人工阿波罗尼电网,并同时建立具有相 同节点数和支路数的人工小世界电网和人工无标度 电网对灾难性事件进行仿真分析。通过随机对网络 中的某一节点攻击来模拟连锁开断过程,并累计每 次故障后的综合风险,得到故障节点数与累积的综 合风险之间关系如图 3—图 5 所示。定义元件的耐 受区间系数 λ 来表示元件的耐受区间与初始耐受 区间的倍数,分别令 λ 为 1.0、1.1、1.2 时,对 3 种人 工网络进行灾难性事件仿真。

由仿真分析可知,随着 λ 从 1.0 增加至 1.2, 3 种人工电网发生灾难性事件后累积的综合风险值 都有减小,但减小幅度都非常有限,小世界电网减小 3%,无标度电网减小 3.5%,阿波罗尼电网减小 3%。 可见,对于网络固有的缺陷,通过提高线路的耐受区 间等一系列提高电气冗余的方法,不能从根本上改 变网络的固有缺陷,并不能有效地消除网络对于灾 难性事件的脆弱性。同时发现:



图 3 λ=1.0 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络 和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较



图 4 λ=1.1 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络 和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较



图 5 λ=1.2 时,人工阿波罗尼网络、人工小世界网络 和人工无标度网络灾难性事件评估的累积风险比较

当λ=1.0时,阿波罗尼电网的累积风险值位
 于小世界电网和无标度电网的累积风险值之间。这

是由于阿波罗尼电网具有的较大聚类系数而在电网 元件电气冗余 λ 并不足够大的情况下,较大聚类系 数对于故障风险的扩散起着助推的作用,从而使得 阿波罗尼电网累积的风险值位于无标度电网之上。 与此同时,阿波罗尼电网节点度的幂律分布,又使得 其不至于发生如小世界电网那样整体规模的大停 电,故其累积的风险值位于小世界电网之下。

2)当λ从1.0 增加到1.1 时,由于阿波罗尼电 网中元件电气冗余的提高,此时较大的聚类系数发 挥出对连锁故障良好的抑制效应。故障元件附近具 有较大聚类系数的节点如同故障风险的"蓄水池", 使得阿波罗尼网在灾难性事件初期,网络中的故障 风险可以较平稳地累积在这个"蓄水池"之中。其 数学形式表现为电网灾难性事件的累积效应阶段可 以更好地分担消纳故障风险,故此阶段的累积风险 明显减小。因而在累积效应阶段,阿波罗尼电网的 累积风险值小于无标度电网的累积风险值。而当故 障发生到一定阶段,"蓄水池"已经装满后,即电网 中累计的风险趋于饱和后,阿波罗尼电网中较大的 聚类系数使得即便是轻微的故障风险传播都会引起 更大范围的故障风险暴露出来,从而使得故障可以 更广范围地传播。故此阶段阿波罗尼电网累积的风 险显著扩散上升,其超过无标度电网累积的风险值。

3)当λ从1.1 增加到1.2,元件具有较大的冗余 时,阿波罗尼电网较大的聚类系数使得其在故障发 生初期具有良好风险消纳能力。且随着 λ 从 1.1 增 加到1.2,阿波罗尼电网中较大的聚类系数对抑制电 网灾难性事件从起正面作用转为起负面作用,即阿 波罗尼电网与无标度电网的交点往后推延。但当网 络中累积的风险饱和后,较大的聚类系数仍然会展 现出对电网不利的一面,导致网络故障风险广泛扩 散上升,最终仍位于小世界电网和无标度电网累积 的风险之间。可见,网络较大的聚类系数并不是一 味地对电网安全不利。节点较大的聚类系数,使得 在其附近形成了一个类似暂存风险的"蓄水池",而 "蓄水池"的容积与元件的电气冗余正相关。这种 由网络结构固有属性产生的故障风险"蓄水池"有 助于推延故障事件进入连锁效应阶段的时间点,但 并不能削弱最终崩溃后的影响。

综上,式(6)、式(7)中建立的节点聚类系数和

节点度数在故障传播的不同阶段对电网运行风险的 不同映射关系在本节仿真中得以证明,验证了所提 式(6)、式(7)的正确性和合理性。

## 4.2 西部某地区电网灾难性事件评估

根据西部某地区实际电网建模,将110 kV 等级 及以上的变电站等效为母线节点,如图 6 所示。对 网络结构属性进行统计,等效后网络共有 40 个节 点、56 条边,平均度数为 2.8,节点的度分布区间在 [1,12]内,其节点度分布如图 7 所示,该地区电网 节点度分布具有较明显的幂律分布规律。统计该地 区电网的其他网络属性,并与具有相同节点数和平 均度数的随机网络相比,发现其聚类系数比随机网 络大,其平均最短距离比随机网络小,可见其具有小 世界效应。综上,该地区电网属于兼具小世界效应 和无标度拓扑的阿波罗尼构造网络。



分别采用所提方法以及文献[12]中确定μ的方法,对该地区电网进行灾难性评估,其累积效应阶段和连锁效应阶段所得结果分别如表1—表2所示。

#### 表1 某地电网累积效应阶段灾难性事件排序

层数	传统λ=1方法	所提方法
1	$L_{2-12}$ , $L_{32-38}$ , $L_{12-38}$ ,	$L_{12-15}$ , $L_{2-4}$ , $L_{37-38}$ , $L_{1-2}$ ,
	$L_{32-40}$ , $L_{12-15}$ , $L_{37-38}$ ,	$L_{2-12}$ , $L_{2-8}$ , $L_{12-38}$ , $L_{2-32}$ ,
	$L_{2-8}$ , $L_{37-38}$ , $L_{12-16}$ , $L_{2-4}$	L <sub>32-38</sub> , L <sub>12-16</sub>
2	$(L_{1-2}, L_{2-8}), (L_{1-2}, L_{2-4})$	(I I ) (I I )
	$(L_{2-8}, L_{2-4}), (L_{12-15}, L_{12-16})$	$(L_{12-15}, L_{12-38}), (L_{12-16}, L_{12-38})$
	$(L_{2-3}, L_{12-3}), (L_{2-3}, L_{37-3})$	$(L_{1-2}, L_{2-8}), (L_{1-2}, L_{2-4})$
	$(L_{2,-\infty}, L_{1,2-\infty}), (L_{1,2-1,5}, L_{1,2-\infty})$	$(L_{2-12}, L_{12-15}), (L_{2-12}, L_{12-38})$
	$(L_{12-16}, L_{12-28}), (L_{22-40}, L_{22-28})$	$(L_{2-12}, L_{12-16}), (L_{2-4}, L_{2-8})$
	$(L_{1-2}, L_{2-12})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}), (L_{12-38}, L_{37-38})$
	$(L_{1-2},\!L_{2-4},\!L_{2-8})$	$(L_{12-15}, L_{12-38}, L_{37-38})$
	$(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38})$
	$(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{2-4})$
	$(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{37-38})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{1-2})$
2	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-15})$	$(L_{12-16}, L_{2-12}, L_{12-38})$
3	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-16})$	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8})$
	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{2-8})$	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-38})$
	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{2-4})$	$(L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$
	$(L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-15})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38})$
	$(L_{32-38}, L_{37-38}, L_{12-38})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{1-2})$

表 2 某地电网连锁效应阶段灾难性事件排序

层数	传统λ=1方法	所提方法
4	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-32})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38})$
	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-12})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{12-16})$
	$(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-15})$	$(L_{12-15}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$
	$(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{12-38}, L_{12-16})$	$(L_{1-2}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$
	$(L_{32-40}, L_{32-38}, L_{37-38}, L_{12-38})$	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38})$
	$(L_{12-15}, L_{12-38}, L_{37-38}, L_{32-38})$	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-15})$
	$(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{37-38})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{37-38})$
	$(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-38}, L_{32-38})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{32-38})$
5	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-12}, L_{12-15})$	$(L_{\rm 12-15},\!L_{\rm 12-16},\!L_{\rm 12-38},\!L_{\rm 32-38},\!L_{\rm 37-38})$
	$(L_{1-2}, L_{2-4}, L_{2-8}, L_{2-32}, L_{32-38})$	$(L_{12^{-}\mathfrak{B}}, L_{2^{-}\mathfrak{L}}, L_{\mathfrak{P}^{-}\mathfrak{B}}, L_{\mathfrak{P}^{-}\mathfrak{B}}, L_{\mathfrak{P}^{-}\mathfrak{B}})$
	$(L_{\mathfrak{D}-40}, L_{\mathfrak{D}-38}, L_{\mathfrak{D}-38}, L_{\mathfrak{D}-15}, L_{\mathfrak{D}-16})$	$(L_{\rm I\!-2},L_{\rm 2-4},L_{\rm 2-2},L_{\rm 2-3},L_{\rm 2-3})$
	$(L_{12-15}, L_{12-16}, L_{12-3}, L_{32-3}, L_{37-38})$	$(L_{\rm 1-2}, L_{\rm 2-12}, L_{\rm 12-38}, L_{\rm 32-38}, \ L_{\rm 37-38})$
	$(L_{\rm 12-15}, L_{\rm 12-16}, L_{\rm 12-38}, L_{\rm 12-38}, L_{\rm 12-38})$	$(L_{2^{-4}}, L_{2^{-}\underline{\nu}}, L_{\underline{\nu}-\underline{\vartheta}}, L_{\underline{\eta}-\underline{\vartheta}}, L_{\underline{\eta}-\underline{\vartheta}})$
	$(L_{\mathfrak{D}-40},\!L_{\mathfrak{D}-\mathfrak{B}},\!L_{\mathfrak{D}-\mathfrak{B}},\!L_{\mathfrak{D}-\mathfrak{B}},\!L_{\mathfrak{D}-\mathfrak{B}})$	$(L_{2-4}, L_{2-12}, L_{12-38}, L_{22-38}, L_{22-40})$

由仿真结果分析,在累积效应阶段传统方法和 所提方法虽然筛选出的故障事件序列具有较大的相 似度,但综合风险排序的结果有明显不同。以累积 效应阶段的 N-1 故障为例,传统方法令 µ=1,故而 放大了潜在风险在累积效应阶段的影响,故在传统 方法 N-1 排序中,将一些实际负载量并不大的联络 元件 L<sub>2-12</sub>、L<sub>32-38</sub>、L<sub>12-38</sub>等排到了最前,而所提方法 较好地兼顾了直接风险和潜在风险对电网的综合影 响,将 L<sub>12-15</sub>、L<sub>2-4</sub>、L<sub>37-38</sub>等自身既有较大负载量,又与 联络元件有连接关系的关键元件排在了最前面。可 见,所提方法在灾难性事件评估的累积效应阶段没有 像传统方法那样放大潜在风险的危害,准确合理地评 估了事件直接风险和潜在风险对电网的真实影响。 再以连锁效应阶段中故障传播到第5层为例, 此时的电网状态已经非常脆弱,电网中已累积了较 多的风险,此时隐藏在电网中的潜在风险随时都会 发生"雪崩"。故而在此状态下,传统的固定系数方 法又轻视了潜在风险的影响,而所提方法通过建立 网络参数中的节点聚类系数和节点度数在故障发展 的不同阶段的影响映射,达到了既未放大也未缩小 潜在风险对电网的影响。故,所提方法将(*L*<sub>12-15</sub>, *L*<sub>12-16</sub>, *L*<sub>12-38</sub>, *L*<sub>32-38</sub>, *L*<sub>37-38</sub>)、(*L*<sub>12-15</sub>, *L*<sub>2-12</sub>, *L*<sub>12-38</sub>, *L*<sub>37-38</sub>, *L*<sub>32-38</sub>)等既使电网丢失较大负荷又将电网分 割为一系列孤岛的故障序列排在最前列。可见,所 提方法得出的结果去除了传统方法中过于乐观或过 于保守的成分。

## 5 结 论

1)对3种人工电网的灾难性事件评估结果来 看,提高网络中元件的电气冗余,对于减小灾难性事 件最终造成的后果都没有明显的改变。可见网络结 构一旦形成之后,其自身固有的脆弱性并不能通过 改善元件级别的电气冗余来得以弥补。并且仿真结 果验证了所提出的不同故障传播阶段节点聚类系数 和节点度数对故障风险的不同映射关系的正确性。

2)从实际工程角度的仿真结果验证了所提出 的具体刻画联系度μ方法的合理性,方法通过去除 传统方法评估结果过于乐观和过于保守的不足,更 准确地评估出故障事件的真实影响,评估结果更符 合工程实际认识。

3)但需警惕的是,通过提高电气冗余不能祛除 电网固有缺陷,只能推迟灾难性事件的发生,而不能 消除灾难性事件的发生。所以,运行调度人员应该 充分利用故障风险累积阶段中阿波罗尼网络较大的 聚类系数抑制故障的扩散、推迟进入连锁效应阶段 的灾变点等有利条件,防止电网进入不可逆转连锁 效应阶段。

#### 参考文献

- [1] 曹一家,郭剑波,梅生伟,等.大电网安全性评估的系统 复杂性理论[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [2] T J Overbye, C L De Marco.Voltage security enhancement using energy based sensitivities [J].IEEE Transaction on Power Systems, 1991, 6(3):1196-1202.

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院."十三五"国家信息化规划
  [R/OL].(2016-12-27)[2021-04-07].http//www.gov. cn/zhengce/zhengceke/2016-12/27/content\_5153411.htm.
- [2] 李群湛,连级三,高仕斌.高速铁路电气化工程[M].成都:西南交通大学出版社,2006.
- [3] 于坤山,周胜军,王同勋.电气化铁路供电与电能 质量[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [4] 万庆祝.牵引供电系统负序问题研究[D].北京:清华 大学,2008.
- [5] 李海军.神朔电铁 SVC 静止补偿装置实例研究[D].北 京:清华大学,2006.
- [6] 李群湛.中国高速铁路牵引供电系统发展的若干关键 技术问题[J].铁道学报,2010,32(4):119-124.
- [7] 李群湛. 论干线铁路与城市轨道统一牵引供电方式[J].中国科学:技术科学,2018,48(11):1179-1189.
- [8] 李群湛,张进思,贺威俊.适于重载电力牵引的新型供 电系统的研究[J].铁道学报,1988,10(4):23-33.
- [9] 黄小红,赵艺,李群湛,等.电气化铁路同相储能供电技 术[J].西南交通大学学报,2020,55(4):856-864.
- [10] SHU Zeliang, XIE Shaofeng, LI Qunzhan. Development and Implementation of a Prototype for Co-phase Traction Power Supply System [C].2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2010:1-4.
- [11] DAI Ningyi, HUANG Mincong, LAO Kengweng, et al. Modelling and control of a railway power conditioner in co-phase traction power system under partial compensation [J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5): 1044-1054.
- (上接第32页)
- [9] 万帅,张伟,陈家宏,等.特高压±800 kV 直流输电线路 用避雷器的研制[J].高压电器,2017,53(5):48-55.
- [10] 万帅,曹伟,陈家宏,等.银东线雷电防护线路避雷器开 发与应用[J].高电压技术,2018,44(5):1612-1618.
- [11] 李云阁.ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [12] 阮耀萱.高海拔地区 110 kV 绝缘子雷击闪络特性及 闪络判据研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [13] 唐力,韩永霞,郝艳捧,等.高海拔地区特高压直流线 路绝缘子的正极性先导发展法闪络判据[J].高电压 技术,2016,42(6):1900-1906.
- [14] S Furukawa, O Usuda, T Isozaki, et al. Development and applications of lightning arresters for transmission

- [12] 郭尽朝.同相供电技术在神朔铁路的应用前景研 究[J].机车电传动,2013(4):47-50.
- [13] 黄小红,李群湛.基于模块化多电平变流器和组合式 变压器的高速铁路同相牵引供电系统[J].高电压技 术,2016,42(1):97-104.
- [14] 夏焰坤,李群湛,解绍锋.电气化铁道贯通同相供电变 电所控制策略研究[J].铁道学报,2014,36(8):25-31.
- [15] 刘飞,解绍锋,侯东光,等.基于器件结温的同相补 偿变流器可靠性评估[J].电力自动化设备,2018, 38(1):149-155.
- [16] 张恒,王辉,李群湛,等.采用自耦变压器供电的重载 铁路牵引电缆贯通供电系统供电方案[J].电力自动 化设备,2021,41(1):204-210.
- [17] 张宇,王辉,李群湛,等.基于 Dd 匹配变和 SVG 的牵引变电所群贯通供电系统负序治理方案及控制策略
  [J].高电压技术,2021,47(1):150-158.
- [18] 张丽艳,梁世文,李鑫,等.新型电缆贯通供电系
  统运行特性分析[J].中国电机工程学报,2020,
  40(16):5529-5239.
- [19] 常非,冯金博,赵丽平.同相贯通牵引供电系统综合潮 流控制器设计[J].电力系统及其自动化学报,2012, 24(1):54-58.
- [20] 张睿.贯通式同相供电系统电能变换器的研究[J]. 电气化铁道,2012,23(4):19-22.
- [21] 张丽艳,梁世文,李鑫,等. 新型电缆贯通供电系统 载流机制研究[J].西南交通大学学报,2021,56(3): 650-658.

### 作者简介:

夏焰坤(1984),男,博士,副教授,研究方向为电力系统 分析、电能质量分析与控制技术。

## (收稿日期:2021-09-24)

## 

lines[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2121-2129.

- [15] K Ishida, K Dokai, T Tsozaki, et al. Development of a 500 kV transmission line arrester and its characteristics [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1265-1274.
- [16] 邹建章,张宇,胡京,等.220 kV 带串联间隙线路避雷器 保护性能研究[J].高压电器,2016,52(10):148-152.
- [17] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会.
  绝缘配合 第 2 部分:使用导则:GB/T 311.2—2013
  [S].北京:中国标准出版社,2013.

## 作者简介:

刘守豹(1983),男,博士,正高级工程师,主要研究方向 为电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期:2021-08-08)

# 断路器的旋转式互联双动触头接触系统设计

## 李启辉<sup>1</sup>,吴锦松<sup>1</sup>,王叔悦<sup>2</sup>,陈天翔<sup>2</sup>

(1.厦门安达兴电气集团有限公司,福建厦门 361100;2.成都理工大学核技术与 自动化工程学院,四川成都 610059)

摘 要:文中设计了一种断路器的旋转式互联双动触头接触系统,包括可转的安装在底座上的主动触头组件和从动 触头组件,主动触头组件和从动触头组件构造成驱动连接。主动触头组件在外力作用下带动从动触头组件分别沿彼 此相向方向转动,以使其触头彼此接触;主动触头组件和从动触头组件在其各自复位件的作用下同时沿彼此相反方 向转动,以使其触头分开。所设计的旋转式互联双动触头机构闭合和断开速度快,有利于快速灭弧、耐压能力提高,具 有广泛的应用前景。

关键词:断路器;旋转式;互联双动触头;系统设计 中图分类号:TM 61 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0087-03 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220216

## Design of Rotary Interconnected Double Moving Contact Contact System for Circuit Breaker

 LI Qihui<sup>1</sup>, WU Jinsong<sup>1</sup>, WANG Shuyue<sup>2</sup>, CHEN Tianxiang<sup>2</sup>
 (1.Xiamen Andaxing Electric Group Co., Ltd., Xiamen 361100, Fujian, China; 2.College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: A rotary interconnected double moving contact contact system of circuit breaker is designed, including a driving contact assembly and a driven contact assembly rotatably mounted on a base, and the driving contact assembly and the driven contact assembly are configured to be driven and connected. Under the action of external force, the driving contact assembly drives the driven contact assembly to rotate in the opposite direction to make the contacts contact each other, while the driving contact assembly and the driven contact assembly rotate in the opposite direction to separate the contacts under the action of their respective reset parts. The designed rotary interconnected double moving contact mechanism has a fast closing and breaking speed, which is conducive to rapid arc extinguishing and improvement of voltage withstand capacity, and has a wide application prospect.

Key words: circuit breaker; rotary type; interconnected double moving contacts; system design

0 引 言

目前,现有断路器的动静触头接触系统由可转 动的动触头和静触头组成,只有通过动触头转动来 实现其与静触头的接合和断开<sup>[1-2]</sup>。这种动静触头 接触系统存在以下问题:

1)由于其开距和开断速度有限,因此,其耐压

等级和短路分断能力都无法进一步提高[3-4]:

2)由于其只有一个动触头旋转运动,开断电路 动作时间偏长,灭弧时间长,对触头烧损大,降低了 触头的寿命<sup>[5-6]</sup>;

3)由于其断开时,引起的电弧是小角度的弧线,电弧直径较大,不利于灭弧,限制了其开断大载荷的能力<sup>[7-9]</sup>。

所以设计了一种断路器的旋转式互联双动 触头接触系统,以解决上述动静触头接触系统存 在的问题。

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U19A2080)

## 1 设计方案

所设计的旋转式互联双动触头机构,适用于 3 kV 及以下电压等级的低压断路器产品中,具体设计 技术方案如下:

1)采用旋转式互联双动触头机构,包括可转动 的安装在底座上的主动触头组件和从动触头组件, 两者构造成驱动连接<sup>[10-11]</sup>。主动触头组件在外力 作用下带动从动触头组件分别沿彼此相向方向转 动,以使其触头彼此接触,主动触头组件和从动触头 组件在其各自复位件的作用下同时沿彼此相反方向 转动,以使其触头分开。

2)在底座定位两个转轴,分别是主动触头转轴 和从动触头转轴,主动触头组件可转动地安装于主 动触头转轴,从动触头组件可转动地安装于从动触 头转轴。主动触头组件具有位于转轴下方的第一下 驱动主动臂和主动触头,从动触头组件具有位于从 动触头转轴上方的第二上驱动从动臂和位于动触头 转轴下方的第二下触头臂,其上设置从动触头。第 一下驱动主动臂与第二上驱动从动臂驱动连接,主 动触头组件在外力作用下,第一下驱动主动臂带动 第二上驱动从动臂而使所述主动触头组件的主动触 头和所述从动触头组件的从动触头沿彼此相向方向 转动,以使二者彼此接触。

3) 主动触头组件还包括主动触头支架、主动触 头支架复位扭簧和主动触头超程扭簧。触头和支架 彼此交错地可转动地安装在所述转轴上。支架复位 扭簧安装在所述底座的主动触头支架锁扣支点上, 并且其扭簧臂卡接在触头支架上,用作主动触头组 件的复位件。主动触头超程扭簧安装在所述转轴 上,其两个扭簧臂分别卡接在主动触头和主动触头 支架上。

4)从动触头组件还包括绝缘从动触头支架和 从动触头复位扭簧。从动触头支架可转动地安装在 从动触头转轴上并分为第二上驱动从动臂和第二下 触头臂。从动触头复位弹簧安装在转轴上并且其两 个扭簧臂分别卡接在第二下触头臂和底座上,用作 从动触头组件的复位件。

## 2 断路器的旋转式互联双动触头接触 系统设计

2.1 设计结构

所设计结构如图1所示。



动触头支架锁扣支点

图 1 断路器结构(断开状态)

注:1—底座;2—主动触头软连接线;3—主动触头支架反力扭簧; 4—主动触头支架(导体);5—主动触头(导体);6—主动触头超程扭 簧;7—主动触头转轴;8—从动触头支架(绝缘件);9—从动触头扭簧; 10—从动触头软连接线;11—从动触头转轴;12—从动触头(导体)。

双动触头联动接触系统由固定在底座1上的主动触头组件和从动触头组件组成。主动触头组件由 主动触头软连接线2、主动触头支架反力扭簧3、主动触头支架(导体)4、主动触头(导体)5、主动触头 超程扭簧6和主动触头转轴7组成。从动触头组件 由从动触头支架(绝缘件)8、从动触头扭簧9、从动 触头软连接线10、从动触头转轴11和从动触头(导体)12组成。

## 2.2 工作原理

#### 2.2.1 闭合过程

主动触头组件在外力(旋转力)作用下,相对主 动触头组件支点7(主动触头转轴)逆时针方向旋转 运动。主动触头组件下臂也逆时针方向旋转运动, 同时带动主动触头组件与被动触头组件之间的连杆 向右运动。连杆推动从动触头组件绕从动触头转轴 11顺时针方向旋转运动,使得主动触头5和从动触 头12相向快速接触。在此旋转运动过程中,主动触 头支架反力扭簧3和从动触头扭簧9储备了足够的 扭力。由于主动触头5和主动触头支架4之间设置 了超程扭簧6,当主动触头5和从动触头12接触 后,主动触头支架4会继续旋转,并越过动作机构的 死点。此时主动触头5继续绕主动触头转轴7逆时 针方向旋转移动,压缩了主动触头扭簧6,使主动触 头5对从动触头12产生压力,保证接触可靠。闭合 过程如图1所示。

2.2.2 断开过程

当人为手动操作开断或短路、过载保护装置启 动使得开关动作机构断开时,主动触头组件在主动 触头支架反力扭簧3作用下顺时针方向旋转运动, 同时从动触头支架8在从动触头扭簧9的作用下逆 时针方向旋转运动,断开电路。由于主动触头5和 从动触头12断开时同时反方向运动,所以动作速度 是现有动静触头系统动作速度的2倍,两触头的空 间距离快速加大,电弧直径急速变小,灭弧变得更加 容易。断开过程如图2所示。



图 2 断路器闭合状态

注:1-底座;2-主动触头软连接线;3-主动触头支架反力扭簧; 4-主动触头支架(导体);5-主动触头(导体);6-主动触头超程扭 簧;7-主动触头转轴;8-从动触头支架(绝缘件);9-从动触头扭簧; 10-从动触头软连接线;11-从动触头转轴;12-从动触头(导体)。

## 3 设计效果

设计的有益效果如下:

1) 触头在开断带载电路时,两个动触头彼此相反 转动,得以快速分离,开断速度加快1倍,有利于急速 灭弧,因此触头寿命得到极大的提高,产品的载荷能 力和开断短路电流的能力也得到了很大的提高。

2) 触头在闭合带载电路时,两个动触头彼此相向 转动,得以快速闭合,闭合速度加快1倍,其快要闭合 时所产生的电弧对触头的烧损时间减少一半,因此触 头寿命得到极大的提高;银石墨平面结构的主动触 头与银镍弧面结构的从动触头相配合,也减少了电 弧的烧损,其闭合带载能力也得到了很大的提高。 3) 触头之间的超大开距得以实现,大约为现有 技术的2倍,耐压等级倍增。

## 4 结 论

1)所提设计与现有的动静触头接触系统相比, 实现了电器开关、断路器触头间的超大开距和急速 开断。

2)所设计的互联双动触头在开断电路时,两个 动触头同时反方向旋转运动,开断速度加快1倍,有 利于急速灭弧,灭弧能力得到了极大的提高。

3)互联双动触头接触系统带载断开时,其产生的电弧弧线角度相对原有动静触头接触系统增加了 1倍,电弧直径明显变小,灭弧时间大大缩短,从而 很大程度地提高了其灭弧能力和触头的使用寿命。

#### 参考文献

- [1] 孙文瑶,赵毅,于文波,等.电力开关断路器绝缘性能状态试验研究[J].山东工业技术,2017(12):184.
- [2] 胡连清.一起双动触头断路器导电回路电阻超标故障 分析[J].通讯世界,2014(5):95-96.
- [3] 刘路辉,庄劲武,江壮贤,等.混合型直流真空断路器触头技术——现状与发展[J].中国电机工程学报,2014, 34(21):3504-3511.
- [4] 丁璨,原浠超,李志兵,等.SF<sub>6</sub>断路器弧触头的关合侵 蚀特性[J].高电压技术,2014,40(10):3228-3234.
- [5] 范敏,陈功,蓝磊,等.SF<sub>6</sub>断路器弧触头电烧蚀试验及状态诊断[J].高压电器,2016,52(6):141-146.
- [6] 姚翠平.小型断路器触头动态仿真及分析[D].天津: 河北工业大学,2012.
- [7] 骆虎,戴冬云,殷晓刚,等.一种基于触头受力监测实现 断路器断口判定的方法[J].高压电器,2015,51(9): 116-122.
- [8] 傅中,陈维江,李志兵,等.电容器组用 SF。断路器弧触头 关合磨损特性[J].高电压技术,2018,44(9):2953-2962.
- [9] 李建鹏, 王伟, 李龙江, 等. 合闸涌流对无功用断路器触 头寿命影响[J]. 山东电力技术, 2019, 46(9): 29-33.
- [10] 徐玉涛.基于图像处理的断路器动触头运动参数识别 方法研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [11] 任山波,李惠敏,卜浩民.万能式断路器动触头防回弹 技术研究[J].电器与能效管理技术,2018(14):27-32.

作者简介:

李启辉(1967),男,工程师,主要从事低压电力电器的 研制及生产应用工作;

王叔悦(1996),女,硕士研究生,主要研究方向为高电 压与绝缘检测技术。

(收稿日期:2021-09-18)

# 变电站铝合金接线板的失效仿真与结构优化

陈家慧<sup>1</sup>,冯 杰<sup>1</sup>,兰贵天<sup>2</sup>,赵兴虹<sup>3</sup>,彭 倩<sup>1</sup>,王方强<sup>1</sup>,赵莉华<sup>2</sup>,吴隆文<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;2. 四川大学电气工程学院,

四川 成都 610065;3. 四川蜀能电力有限公司高新分公司,四川 成都 610041)

摘 要:某变电站铝合金接线板在服役中出现断裂现象,文中结合现场状况对其进行失效仿真和结构优化。采用有 限元仿真软件对接线板受力状况进行分析,推断其失效与底板腐蚀减薄造成应力集中和形变有关。据此对接线板的 结构进行优化,研究倒角处理、螺栓孔数量和布局对接线板受力和形变的影响。结果发现,合理的倒角处理、螺栓孔数 量和布局可以有效降低接线板断裂处的应力和形变。综合倒角和螺栓孔布局的优势,可以实现应力和形变的双重抑 制,实现结构最优。

关键词:接线板;失效;有限元仿真;结构优化 中图分类号:TG 27 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)02-0090-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220217

# Failure Simulation and Structure Optimization of Aluminum Alloy Terminal Board in Substation

CHEN Jiahui<sup>1</sup>, FENG Jie<sup>1</sup>, LAN Guitian<sup>2</sup>, ZHAO Xinghong<sup>3</sup>, PENG Qian<sup>1</sup>, WANG Fangqiang<sup>1</sup>, ZHAO Lihua<sup>2</sup>, WU Longwen<sup>2</sup>

(1.State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2.College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichaun, China; 3.Gaoxin District Branch of Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sicuan, China)

Abstract: The aluminum alloy terminal board in a substation cracked during the service. The failure simulation and structure optimization are carried out combined with the on-site conditions in this work. The finite element simulation software is used to analyze the stress status of terminal board, and it is inferred that its failure is related to the stress concentration and deformation caused by the corrosion and thinning of the bottom plate. On this basis, the structure of terminal board is optimized, and the influence of chamfering treatment and the number and layout of bolt holes on the load and deformation of terminal board are investigated. The results show that the reasonable chamfering treatment and the reasonable number and layout of bolt hole can effectively reduce the stress and deformation at the breaking point of terminal board. Optimal structure can be achieved by integrating the advantages of chamfering with bolt hole layout in terms of dual suppression of stress and deformation. Key words: terminal board; failure; finite element simulation; structure optimizationn

## 0 引 言

铝合金接线板作为变电站内部连接导线和电气 设备的重要金具,具有导电性良好、质量轻、相对强 度高的特点<sup>[1-4]</sup>。不仅作为电网电路中的一部分, 也是支撑导线稳固结构的一部分,对配电网的安全 运行、电网结构的稳定起着重要的辅助作用<sup>[5-6]</sup>。 由于铝合金接线板在服役期间长时间暴露在空气 中,易出现腐蚀现象<sup>[7-9]</sup>;接线板连接导线具有较大 应力,长期服役可能导致接线板断裂,存在很大潜在 的隐患。因此,研究改善接线板的结构性能,降低其 断裂的概率可提高电网的稳定性和安全性。

下面通过有限元仿真分析接线板受力与形变,

分析铝合金接线板失效原因并对其进行结构优化。 首先,根据实际断裂现场初步分析接线板断裂的可 能原因,再采用有限元分析软件,对接线板进行模型 建立;然后,通过对应力、形变的计算,深入分析断裂 原因;最后,据此从多个角度入手改进接线板结构, 包括倒角处理、螺栓孔的合理排布,选择断裂处最大 应力和接线板最大形变程度作为参数,进行优化对 比,为铝合金接线板的优化提供理论依据。

## 1 铝合金接线板失效案例

图1为某变电站的铝合金接线板发生断裂的实物照片。断裂位置为接线板底板两侧,且导致螺栓周围出现裂纹,但接线板上部分无明显的断裂;同时断裂位置下方出现大量的片状白色物质,而在螺母固定处下方无白色物质。前期分析检测结果<sup>[10]</sup>表明,白色物质为接线板底部因腐蚀所生成的蓬松状氧化铝类产物。推断接线板断裂原因为接线板在服役过程中,雨水渗入底板造成底板逐渐腐蚀减薄,最终无法承受应力而导致断裂失效,这里采用仿真进行验证。



图 1 铝合金接线板断裂

## 2 铝合金接线板断裂主要原因分析

图 2 为根据失效铝合金接线板建立的简化几何 模型。以样品底板中心作为原点,底面为 x-z 平面。 模型所用铝合金材料参数为:杨氏模量为 72 GPa, 泊松比为 0.33,合金密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>。结合接 线板实际过程中受力大小和方向,设定作用总力为 2×10<sup>5</sup> N。从接线板的应力分布和形变两方面进行 分析。图 3 为未腐蚀的原始接线板模型的仿真结 果,其中标号"1"处为实际断裂处,标号"2"处为受 最大应力处。



图 3 接线板受力分布

虽然图 3 中的标号"2"处应力最大,但是该处 位于外侧,实际情况中未发生严重的腐蚀现象,也并 未断裂。断裂处为图 3 中的标号"1"处,此处应力 也较为集中,而且该处位于倒角处,在铸造过程中比 较容易产生缺陷,同时由于底板受力变形,雨水进入 接线板和变压器出线端钢板的接缝处可造成腐蚀。 据此,后续仿真选取的应力和形变分析区域如图 4 所示,其中图 4(a)中蓝色区域为样品的应力分析区 域,选取该区域的最大应力作为对比,图 4(b)中红 线为底板形变的分析区域,选择该区域最大的位移 进行比较。



图 4 仿真分析区域

此外,该处的背面(与变压器出线端钢板贴合面)有腐蚀的现象,螺栓固定处腐蚀产物较少,而中间部分腐蚀产物较多。由于腐蚀产物为氧化铝类物质,已从接线板上脱落,对接线板的结构不再有支持

作用,仿真过程中采用底板减薄的方式进行模拟。 如图 5 所示, d 表示切割厚度,用来模拟接线板不同 的腐蚀程度。



图 5 腐蚀仿真模型

分别选取 d 为 0、2 mm、4 mm、6 mm、8 mm 来模 拟接线板在服役过程中逐渐腐蚀的情况,如图 6 所 示。随着腐蚀程度的加剧,断裂处的应力逐渐增大, 最终超出原最大应力处的应力值,此外接线板的形 变也随着腐蚀程度增加而增加。



推断接线板断裂的主要原因为接线板底板发生 形变导致在服役过程中雨水渗入底板造成腐蚀,进 而导致接线板底板腐蚀减薄,最终在应力的作用下导 致其断裂。为降低其断裂的可能性,从减小断裂处应 力和减少底板腐蚀两方面对接线板结构进行优化。

## 3 接线板的结构优化

结合接线板实际几何结构以及前面仿真分析结

果,从倒角处理、螺栓孔布局两方面对结构进行优化。

## 3.1 倒角处理

倒圆角可以起到减小应力集中的作用<sup>[11]</sup>,在初 始模型基础上,对断裂处倒角位置进行倒圆角处理, 如图 7 所示。为避免出现更多的倒角,选择的倒角 半径为 33 mm(与模型正面倒角半径一致),仿真结 果为工件断裂处最大应力为 2.55 MPa,减小到未改 进前的 1/4(未改进时约为 10.6 MPa),大幅度减弱 了应力集中问题。底板最大位移也从未改进时的 1.354×10<sup>-2</sup> mm减小到 9.99×10<sup>-3</sup> mm,减少 1/4,降 低实际服役过程中接线板底部被腐蚀的可能性。 因此,倒角处理可有效提升接线板的服役性能。



图 7 倒角模型

## 3.2 螺栓孔布局

3.2.1 增加螺栓孔数量

为降低接线板的腐蚀,需尽可能减小底板与下 方钢板的缝隙,以避免水分的进入,也就是说需要减 小接线板底板的形变。减小形变可以通过增加螺栓 孔数量,即增加底板的固定约束实现。在初始模型 基础上从4个螺栓孔增加到6个,仿真结构如图8 所示。在加装螺母后接线板底板几乎不发生形变。 对比发现,接线板断裂处所受最大应力为9.71 MPa, 相比原始模型有一定减少。值得注意的是,底板的 最大位移减小到了4.45×10<sup>-4</sup> mm,缩小了96.7%。 改进后的接线板在受力情况和形变程度上都有较大 的改善。

### 3.2.2 改变螺栓孔位置

为探寻螺栓孔位置对接线板的应力和形变的影响,在初始模型基础上,以接线板中心为原点,以接 线板长边方向为横坐标,短边方向为纵坐标建立坐 标系,如图1中所示,底板被分成4个区域,每个螺 栓孔关于原点对称分布。选择其中一个区域,通过 改变其横坐标、纵坐标以改变螺栓孔位置。不同布 局螺栓孔仿真结果如图9所示。



图 9 螺栓孔位置变化仿真结果

由图 9 可知,随着螺栓孔横坐标的增大,底板最 大形变也随之增加,断裂处的最大应力变化无明显 的变化规律,但变化相对不大。螺栓孔的纵坐标增 大,其底板最大形变随之减小,断裂处的应力变化也 无明显的变化规律。说明造成形变明显变化的原因 是固定约束的位置与接线板易形变位置的距离变 远。由于导致接线板断裂原因是腐蚀,单纯减小形 变对减弱接线板断裂问题仍具有重要意义。

## 3.3 综合优化

螺栓孔位置改变的同时进行倒角处理,倒角半 径随着横坐标或者纵坐标的变化而变化。处理过程 中需要考虑螺栓孔位置与倒角半径是否冲突,仿真 结果如图 10。

由图 10 可知,在进行倒角与螺孔位置协同优化 后,可以降低接线板的最大位移和最大应力,其减小 程度比单一方式大。改变横坐标时最大形变与断裂 处的最大应力为负相关,不能同时达到使最大位移 或最大应力大幅度下降的效果,在实际中需要综合 考虑;改变纵坐标时最大形变与断裂处的最大应力 大体上出现正相关,在一定程度上可以同时降低接 线板的最大位移和最大应力,据此针对螺纹孔位置 的调整对接线板的结构调整具有一定的积极作用。



## 4 结 论

上面针对变电站铝合金接线板断裂问题,结合 实际失效状况进行分析,建立了仿真模型,提供了一 种对接线板结构的优化思路,可以有效改进接线板 的服役状态,减低断裂可能性。主要结论如下:

1)结合铝合金接线板断裂实际情况和仿真分析,推断失效的主要原因是底板腐蚀减薄后在导线的拉力作用下断裂。

2)倒角处理、增加螺栓孔数目、螺栓孔位置的 合理布局均能有效改善接线板的受力和形变情况, 而且综合采用倒角与螺孔位置的优化方法更有效。

3)螺栓孔位置的合理布局对形变的抑制有较 好的效果,但对应力的改善较小;综合优化方案可以 综合倒角和螺栓孔布局的优势,实现对应力和形变 的双重抑制。虽然效果不及增加螺孔数目,但是不 破坏变压器出线结构,可实现性更高,实际可根据经 济性和现场情况选择最适合的方案。

## 参考文献

- [1] 卢加林.500kV CVT 接线板放电故障排查及处理[J]. 机电信息,2020(9):37-39.
- 韩纪层,何建,林德源,等.某变电站电容式电压互感器 [2] 附件 L 型接线板的断裂原因 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 98-102.
- [3] 徐贤,吴国忠,包艳蓉,等.变电站铝设备线夹断裂事故 分析[J].热加工工艺, 2012,41(7):191-192.
- [4] 罗宏建,龚卓,王炯耿,等.铝合金设备线夹失效分 析[J].云南师范大学学报(自然科学版), 2018, 38(5):44-48.
- [5] 董芝春,何凤生,张春雷.输电线路耐张线夹的结构优 化[J].广东电力,2013,26(12):60-63.
- [6] 王飞龙.某 220 kV 电流互感器接线板发热缺陷处理与

+ • + • + • + • + • + • + • + •

- (上接第81页)
- [3] Ian Dobson I, Benjamin A Carreras, Vickie E Lynch, et al. Estimating failure propagation in models of cascading blackouts [J].Probability in engineering and informational sciences, 2005, 19(4): 475-488.
- [4] 孟仲伟,鲁宗相,宋靖雁.中美电网的小世界拓扑模型 比较分析[J].电力系统自动化,2004,28(15):21-24.
- [5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性 评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.
- [6] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性 评估算法[J].电力系统自动化,2006,30(8):7-10.
- [7] Albert-László Barabási, Réka Albert. Emergence of scaling in random networds [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [8] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the North American power grid [J]. Physical Review E, 2004.69(2):1-6.
- David P Chassin, Christian Posse. Evaluating North [9] American electric grid reliability using the Barabúsi-Albert network model [ J ]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Application, 2005, 355(2-4):667-677.
- 刘润然.复杂网络上的几种动力学过程研究[D].合 [10] 肥:中国科技大学,2011.
- 丁理杰,曹一家,刘美君,复杂电力网络的连锁故障 [11] 动态模型与分析[J].浙江大学学报(工学版),2008, 42(4):641-646.
- 崔振,肖先勇,冯岗,等.基于综合风险的电网灾难性 [12] 事件预警评估[J].华东电力,2012,40(9):1507-1511.
- 刘宝碇,彭锦.不确定性理论教程[M].北京:清华大 [13] 学出版社,2005.
- [14] Liu Baoding, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010. http://orsc.edu.cn/liu.

改进方案[J].黑龙江电力,2020,42(1):74-78.

- [7] 陈云,杨丙坤,郝文魁,等.两种铝合金接线板耐蚀性能的 研究[J].腐蚀科学与防护技术,2019,31(6):583-589.
- 王天鹏,李宏强,孙明成,等.沿海变电站 66 kV HGIS [8] 套管接线板镀银层腐蚀剥落原因分析[J].腐蚀科学与 防护技术,2019,31(2):159-164.
- [9] 黄丰,肖凯,李鹏云,等.变压器接线板失效分析[J].铸 造技术,2013,34(1):48-50.
- [10] 陈家慧,刘曦,冯杰,等.变电站铝合金接线板失效分 析[J].腐蚀与防护,2020,41(12):70-74.
- [11] 王森.折棱管吸能构件模具的优化及有限元分析[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2019.

## 作者简介:

陈家慧(1991),女,博士,工程师,研究方向为电网设备 金属失效分析及新材料研究。 (收稿日期:2021-09-05)

[15] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学 技术出版社,2007.

- José S Andrade, Hans J Herrmann, Roberto F S Andrade, [16] et al. Apollonian Networks: Simultaneously Scale-Free, Small World, Euclidean, Space Filling, and with Matching Graphs [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(1):018702.
- [17] 章忠志,荣莉莉.具有无尺度拓扑和小世界效应的 Sierpinski 网络[J].系统工程学报,2007,22(4): 337-343.
- [18] 崔振,肖先勇,马超,等.基于电网剖分与不确定性测 度的电网灾难性事件评估[J].电力系统保护与控制, 2011,39(20):30-37.
- [19] 宁宣熙.堵塞流理论及其应用[M].北京:科学出版 社,2005.
- [20] 白晓明,张伯明.大型互联电网在线运行可靠性评估、预 警和决策支持系统[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [21] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [R]. https://www.ewh.ieee.org/r6/san\_francisco/pes/pes\_ pdf/Northeast\_Blackout\_Final.pdf.
- [22] 丁道齐.复杂大电网安全性分析——智能电网的概念 与实现[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [23] 田世明,陈希,朱朝阳,等.电力应急管理平台研 究[J].电网技术,2008,32(1):26-30.
- Jagabondhu Hazra, Avinash K Sinha. Identification of [24] Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 378-387.

### 作者简介:

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

(收稿日期:2021-10-07)