

《四川电力技术》  
编辑委员会

主任委员 刘 勇  
副主任委员 王 平  
刘俊勇  
委 员(按姓氏笔画笔形为序)  
丁理杰 邓亚军 甘德刚  
田立峰 李镇义 朱国俊  
朱 康 刘天琪 苏少春  
杨子辛 肖 红 吴广宁  
余 熙 邹见效 陈 纓  
胡 灿 袁邦亮 徐 波  
董秀成 韩晓言 曾嘉志  
秘 书 李世平  
程文婷

目 次

· 国家重点研发计划 ·  
多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究  
…… 李 涛,胡维昊,陈 刚,丁理杰,韩晓言,王 胜,鲜喜敏,巫里尔沙,唐 炯(1)  
基于改进 NSGA-II 算法的水-光-蓄发电系统多目标规划方法  
…… 周修宁,江 军(8)  
基于马尔科夫链模型的小金川河流域径流形势预估分析  
…… 陈仕军,王 亮,陈 刚,韩晓言(16)  
大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究  
…… 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,王志远,赵普志,卫 瑞,印 欣,曾林俊(19)  
· 碳达峰、碳中和 ·  
基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究  
…… 杨 悦,陈仕军,杨博宇,杨承军(24)  
“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想  
…… 叶 强,胥威汀,汪 伟,王海燕,刘 阳,李 旻,唐 权(28)  
基于多因子考虑的地区电网电采暖负荷预测分析  
…… 胡志豪,姚锦松,龚立娇,孙开宁,樊 茂,张鹏飞,常喜强(33)  
基于 EMD 与模型预测控制算法的风电功率平抑  
…… 张家军,陈 杰,常喜强,李 霞,毛吾兰·买买提依明,徐 鹏,杨艳磊(38)  
考虑风电场储能容量配置的风电功率预测误差估计算法对比研究  
…… 蒋艾町,李小雨,夏 雪,李嘉逸(43)  
· 电网技术 ·  
复杂电网级联事故下的重要线路辨识  
…… 曾阳阳,关翔友,徐昆,刘闻博,姜婷菡,范珺阳(48)  
基于二阶带通滤波器的单相锁相环技术研究…… 荆世博,辛超山,薛静杰,张增强(54)  
风吹雪地区变电站电气设备选型与布置方案优化 …… 谈东林(58)  
· 电力运检技术 ·  
地区电网重构降损案例分析…… 靳 旦,鲜其军,贺星棋,唐 伟(62)  
智能变电站二次安全措施危险点分析  
…… 黄忠胜,廖小君,刘 娟,王婷婷,冯先正,张 里(66)  
一起 252 kV GIS 断路器异常发热缺陷分析  
…… 邱 炜,刘军军,马锡良,徐清鹏,周 波,罗 杨(70)  
旁路作业技术在配电网工程中的研究与应用  
…… 王武双,李 杰,陈 效,陈显忠,刘德锋(73)  
· 电力经济技术 ·  
基于年费用法的输电电缆选型研究  
…… 向 宇,罗楚军,李 健,岳 浩,刘文勋,刘 鹏(79)  
基于国外现货市场与四川实际的现货市场建设分析  
…… 李健华,刘继春,付 浩,白智丹(83)  
基于 DMAIC 的电网企业项目精益化管理效率 …… 李建平,黄燕珠(89)

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003-6954  
CN 51-1315/TM

2021年第44卷第2期(总272期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会  
四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 纓

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖二街16号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得实业集团有限公司  
文化传播分公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数]CN 51-1315/TM\*1978\*  
h\*A4\*94\*zh\*P\*¥6.00\*3000\*19\*  
2021-4

# CONTENTS

<b>· The National Key Research and Development Program of China ·</b>	
Research on Capacity Allocation and Optimized Operation of Cascaded Hydropower – photovoltaic – pumped Hydro Storage Hybrid System Under Multi – scenario .....	Li Tao, Hu Weihao, Chen Gang, Ding Lijie, Han Xiaoyan, Wang Sheng, Xian Ximin, Wu Liersha, Tang Jiong(1)
Optimization of Hydropower – photovoltaic – pumped Hydro Storage Complementary Generation System Based on Improved NSGA – II Algorithm .....	Zhou Xiuning, Jiang Jun(8)
Prediction and Analysis of Runoff Situation in Xiaojinchuan River Basin Based on Markov Chain Model .....	Chen Shijun, Wang Liang, Chen Gang, Han Xiaoyan(16)
Research on Large – scale Virtual Energy Storage Mode for Stabilizing New Energy Power Prediction Error .....	Fan Guoqi, Liu Guilong, Fan Guowei, Wang Zhiyuan, Zhao Puzhi, Wei Rui, Yin Xin, Zeng Linjun(19)
<b>· Carbon Emissions Peaking and Carbon Neutrality ·</b>	
Research on Power Supply Structure Optimization Based on Environment and Economy Constraints .....	Yang Yue, Chen Shijun, Yang Boyu, Yang Chengjun(24)
Path Design of Carbon Emission Reduction of Sichuan Power System for Carbon Neutrality .....	Ye Qiang, Xu Weiting, Wang Wei, Wang Haiyan, Liu Yang, Li Ming, Tang Quan(28)
Load Forecasting and Analysis of Electric Heating of Regional Power Grid Based on Multi – factor Consideration .....	Hu Zhihao, Yao Jinsong, Gong Lijiao, Sun Kaining, Fan Mao, Zhang Pengfei, Chang Xiqiang(33)
Wind Power Fluctuation Stabilization Based on EMD and Model Predictive Control Algorithm .....	Zhang Jiajun, Chen Jie, Chang Xiqiang, Li Xia, Maowulan Maimaitiyiming, Xu Peng, Yang Yanlei(38)
Research and Comparative Study on Wind Power Forecast Error Estimation Algorithms Considering Wind Farm Energy Storage Capacity Configuration .....	Jiang Aiting, Li Xiaoyu, Xia Xue, Li Jiayi(43)
<b>· Power System Technology ·</b>	
Identification of Important Lines under Complex Grid Cascading Accidents .....	Zeng Yangyang, Guan Xiangyou, Xu Kun, Liu Wenbo, Jiang Tinghan, Fan Junyang(48)
Research on Single – phase Phase Locked Loop Technology Based on Second – order Bandpass Filter .....	Jing Shibo, Xin Chaoshan, Xue Jngjie, Zhang Zengqiang(54)
Type Selection of Electrical Equipment and Optimization of Layout Plan for Substations in Wind – blown Snow Areas .....	Tan Donglin(58)
<b>· Operation and Maintenance Technology ·</b>	
Operation and Maintenance Technology Case Analysis for Loss Reduction of Regional Power Grid Reconfiguration .....	Jin Dan, Xian Qijun, He Xiangqi, Tang Wei(62)
Analysis on Dangerous Points of Secondary Safety Measures in Smart Substation .....	Huang Zhongsheng, Liao Xiaojun, Liu Juan, Wang Tingting, Feng Xianzheng, Zhang Li(66)
Analysis of Abnormal Heating Defect of 252 kV GIS Circuit – breaker .....	Qiu Wei, Liu Junjun, Ma Xiliang, Xu Qingpeng, Zhou Bo, Luo Yang(70)
Research and Application about Usage of Bypass Working in Distribution Network Reconstruction .....	Wang Wushuang, Li Jie, Chen Xiao, Chen Xianzhong, Liu Defeng(73)
<b>· Electricity Economics Technology ·</b>	
Study on Transmission Cable Selection Based on Annual Cost Method .....	Xiang Yu, Luo Chujun, Li Jian, Yue Hao, Liu Wenxun, Liu Peng(79)
Analysis of Spot Market Construction Based on Foreign Spot Market and Sichuan Current Situation .....	Li Jianhua, Liu Jichun, Fu hao, Bai Zhidan(83)
Research on Efficiency Improvement of Project Lean Management Based on DMAIC .....	Li Jianping, Huang Yanzhu(89)

SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY

2021 Vol. 44 No. 2

(Ser. No. 272)

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: Chen Ying

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY

# 多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究

李涛<sup>1</sup>, 胡维昊<sup>1</sup>, 陈刚<sup>2</sup>, 丁理杰<sup>2</sup>, 韩晓言<sup>3</sup>, 王胜<sup>4</sup>, 鲜喜敏<sup>4</sup>, 巫里尔沙<sup>4</sup>, 唐炯<sup>4</sup>

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 4. 中电建水电开发集团有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**四川省小金县地势东北高、西南低,且光照、水资源丰富,有利于修建梯级水-光-蓄互补电站,但是水-光-蓄的容量配置将极大地影响系统经济性。计及光伏分钟级尺度下出力波动性强,提出了在分钟级多场景下新的梯级水-光-蓄容量规划方法。从提高互补电站的经济效益与外送稳定性等角度,首先,建立投资最小与外送波动最小的梯级水-光-蓄互补电站容量配置与优化运行双层规划数学模型;其次,详细描述了基于粒子群与序列二次规划算法的双层规划算法模型求解方法与执行步骤;最后,在多场景下对双层规划模型的准确性和合理性进行了分析。分析表明,配置5 MW抽水蓄能机组能够使得梯级水-光-蓄互补系统具有最大投资效益比,且缓解外送功率波动高达11.7%。

**关键词:**梯级水-光-蓄;多场景;容量配置与优化运行;粒子群算法

中图分类号:TM761 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)02-0001-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210201

## Research on Capacity Allocation and Optimized Operation of Cascaded Hydropower - Photovoltaic - Pumped Hydro Storage Hybrid System Under Multi - scenario

Li Tao<sup>1</sup>, Hu Weihao<sup>1</sup>, Chen Gang<sup>2</sup>, Ding Lijie<sup>2</sup>, Han Xiaoyan<sup>3</sup>, Wang Sheng<sup>4</sup>,  
Xian Ximin<sup>4</sup>, Wu Liersha<sup>4</sup>, Tang Jiong<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. PowerChina Hydropower Development Group Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Xiaojin county in Sichuan province is high in the northeast and low in the southwest, and is rich in light and water resource, which is conducive to the construction of a cascaded hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage (HP - PV - PHS) complementary power plant. However, the HP - PV - PHS capacity ratio greatly affects the complementary benefits. Because PV output fluctuates frequently and the time scale is small, the multi - scenario cascaded HP - PV - PHS capacity allocation and optimized operation under the minutes time scale is proposed. From the view of improving the economic benefits and delivery stability of the complementary system, firstly, a bi - level mathematical model for capacity allocation and optimized operation of a cascaded HP - PV - PHS with minimal investment cost and minimal power fluctuation in delivery is established. Secondly, the method and execution steps of the bi - level programming model based on particle swarm optimization and sequential quadratic programming algorithm (PSO - SQP) are described in detail. Finally, the accuracy and reasonability of the bi - level programming model is analyzed in multiple scenarios. The case study reveals that 5 MW PHS can make the cascaded HP - PV - PHS complementary system have a maximum investment benefit ratio and mitigate the power fluctuation on tie - line by up to 11.7%.

**Key words:** cascaded HP - PV - PHS; multi - scenario; capacity allocation and optimized operation; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

“全面推进分布式光伏发电建设,推动多能互补、协同优化的新能源电力综合开发”是中国电力发展“十三五”规划的重点任务之一<sup>[1-2]</sup>。储能技术的发展为大规模消纳新能源提供了保障<sup>[3]</sup>。在中国西南地区小水电广泛分布的河流流域内,也拥有着较为丰富的太阳能资源;梯级小水电可以为抽水蓄能电站的建设运行提供便利,而抽水蓄能电站的运行也改善了梯级小水电和光伏电站的出力状况<sup>[4]</sup>;具备快速调节功能<sup>[5-6]</sup>的抽水蓄能电站与调节能力有限<sup>[7]</sup>的梯级小水电联合互补,可以优化调节光伏发电的随机波动性、间歇性<sup>[8-10]</sup>等出力缺陷;这些均对发展水-光-蓄互补发电提供了有利条件。但目前还没有针对性地对水-光-蓄资源特性进行容量配置,导致新能源利用率低、系统外送的稳定性较差、经济效益不高。因此,根据期望的目标合理地优化水-光-蓄的容量配置能极大地提高整个互补发电系统经济效益与外送可靠性。

近年来,发电系统的容量配置引发了大量学者的关注,因研究背景不同,其优化目标侧重点也不尽相同:1)文献[11-13]均以年运行维护费用最小为目标,但文献[11]还考虑到了风能损失成本和社会成本,而文献[13]还考虑了储能容量和设备安装等成本等。文献[12]针对鸭型曲线问题提出了以火电机启动成本和发电成本最小化为目标的混合系统的优化配置模型。2)文献[14-15]以收益最大为目标。文献[14]以在规划期内净现值最大为目标建立含分布式光伏与储能的容量优化模型,利用枚举法求解最优的分布式光伏储能容量。文献[15]以储能系统投入前后等效成本(电网调频成本和储能系统投资成本之和)的差值作为等效收益,并以等效收益最大为目标函数建立容量优化配置模型。3)文献[16-19]以系统输出波动最小为目标。文献[16]建立了以梯级水电、光伏联合发电系统总发电量最大以及剩余负荷曲线最平滑为多目标的优化模型。文献[17]考虑水-光互补系统发电量与出力波动,研究了其互补系统的短期经济调度问题。类似的,文献[18]考虑光伏并网的波动性与抽水蓄能的经济性,运用深度强化学习算法研究了光伏-

抽水蓄能的实时经济调度。文献[19]以风电、光伏、抽水蓄能电站联合出力特性跟随电力系统负荷特性为目标来建立联合优化运行模型,并分别在常规情景下(风光出力均按照典型周实际出力数据)和极端场景(风光出力一周内每日均出现严重的反调峰特性)进行了运行优化,优化结果均能实现风光友好消纳。

目前涉及到互补发电系统容量优化配置的研究中,对各类优化目标均有了较为详细的考虑,但仍存在一定不足。具体而言,他们大都是只针对光、水中一种发电要素的某种特性展开研究,研究规划相对孤立,考虑因素不够全面。包含梯级水电站、光伏电站、抽水蓄能电站的多种清洁能源联合互补发电系统,目前研究中对其各种发电要素的互补性研究、容量配比规划、联合优化运行、协同调度策略等关键问题研究较少。

下面以梯级水-光-蓄容量优化配置为研究对象,考虑到光伏出力波动频繁且时间尺度小,提出以互补电站收益最大为外层目标和外送波动最小优化目标为内层目标的双层优化模型。对具有强耦合、非凸以及非线性特性双层规划问题,采用改进型粒子群(PSO)算法求解上层的非凸规划问题;而下层的运行优化问题,将非线性潮流约束进行松弛后通过调用Cplex优化软件内置的二阶锥规划方法,保证计算的快速性和优化的准确性。最后,在分钟时间尺度的不同场景下,对所建立优化配置模型的正确性和可行性进行了分析。

## 1 容量配置双层优化模型

考虑将水-光-蓄互补系统的容量优化配置分解为由收益层和运行层构成的双层优化模型以准确描述容量配置问题。由于抽水蓄能电站和水电站的长期规划与短期运行方案相互联系,形成相互耦合的规划层与运行层,双层优化模型为

$$\begin{cases} \min C = C(x^{\text{rev}}, w) \\ \text{s. t. } R(x^{\text{rev}}) \leq 0 \\ \quad H(x^{\text{rev}}) = 0 \\ \max w = c(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) \\ \text{s. t. } r(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) \leq 0 \\ \quad h(x^{\text{rev}}, x_t^{\text{ope}}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C(\cdot)$ 和 $c(\cdot)$ 分别为上、下层目标函数; $w$ 为下层最优值; $R(\cdot)$ 和 $H(\cdot)$ 分别为上层等式、不等式约束; $r(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 分别为下层等式、不等式约束; $x^{\text{rev}}$ 和 $x^{\text{opc}}$ 分别为上层和下层决策变量<sup>[20]</sup>。

### 1.1 上层优化目标函数

定义水-光-蓄互补系统收益为上层目标函数,该目标由其实际卖电产生的收益减去系统的投资成本。投资成本采用全寿命周期净现值计算<sup>[21]</sup>,代表水-光-蓄系统在整个寿命周期内的净费用,其值的大小可以体现系统的经济性,可以用系统整个寿命周期内所产生的成本和收入的差值表示。其中,系统成本包含初始化投资、运行维护、设备的更新费用;系统收入即为设备残余价值。其表达式为

$$f_1(x) = \sum_{k=1}^k \frac{C(k)}{(1+r)^k} + \beta \cdot k_{\text{ch}} \quad (2)$$

式中: $k$ 为系统工程寿命,元/a; $r$ 为折旧率; $C(k)$ 为第 $k$ 年系统成本,元/a; $k_{\text{ch}}$ 为联络线上最大功率波动率,%; $\beta$ 为联络线功率波动惩罚系数,%/元。

$C(k)$ 的计算表达式为

$$C(k) = C_1 + C_R(k) + C_M(k) \quad (3)$$

式中: $C_1$ 为系统建设成本; $C_R(k)$ 为第 $k$ 年设备更新费用; $C_M(k)$ 为第 $k$ 年的设备维护费用。各变量的具体计算如式(4)。

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Ihydro}}^i + C_{\text{IPV}} + C_{\text{IPHs}} \\ C_R(k) = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Rhydro}}^i(k) + C_{\text{RPV}}(k) + C_{\text{RPHs}}(k) \\ C_M(k) = \sum_{i=1}^3 C_{\text{Mhydro}}^i(k) + C_{\text{MPV}}(k) + C_{\text{MPHs}}(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{Ihydro}}^i$ 为第 $i$ 级水电站建设成本; $C_{\text{IPV}}$ 和 $C_{\text{IPHs}}$ 分别为光伏和抽水蓄能电站的建设成本; $C_{\text{Rhydro}}^i$ 为第 $i$ 级水电站设备更新费用; $C_{\text{RPV}}$ 和 $C_{\text{RPHs}}$ 分别为光伏和抽水蓄能电站的设备更新费用; $C_{\text{Mhydro}}^i$ 为第 $i$ 级水电站维护费用; $C_{\text{MPV}}$ 和 $C_{\text{MPHs}}$ 分别为光伏和抽水蓄能电站维护费用。

### 1.2 约束条件

考虑受到地理环境影响,水-光-蓄各主体的装机容量约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{hydro}}^i \leq P_{\text{hydro}}^{i,\text{max}} \\ 0 < P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}} \\ 0 < P_{\text{PHs}} \leq P_{\text{PHs}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{hydro}}^i$ 为第 $i$ ( $i=1,2,3$ )级水电站的装机容量; $P_{\text{hydro}}^{i,\text{max}}$ 为第 $i$ 级水电站最大允许装机容量;其余项分别表示光伏电站装机容量以及抽水蓄能电站上游水库容量和装机容量。

### 1.3 下层优化目标函数

下层优化目标主要为运行优化,由于光伏出力波动频繁且时间尺度小,小时级时间尺度下得到的容量配置结果难以满足实际应用,为此提出考虑分钟时间尺度下的优化运行建模。

利用梯级水电站的优化调度和抽水蓄能电站的灵活抽水/发电特性,采用分钟级控制模型实现对波动性的调控。提高系统出力的互补性能,减小系统外送功率的波动性。

$$\min F = \min k_{\text{ch}} \quad (6)$$

式中, $k_{\text{ch}}$ 为联络线上最大功率波动率。

$$k_{\text{ch}} = \frac{\max |P_{\text{ch}}^{t+1} - P_{\text{ch}}^t|}{P_{\text{ch}}^{\text{average}}} \times 100\%, t=1,2,\dots,T-1 \quad (7)$$

式中, $P_{\text{ch}}^t$ 为 $t$ 时刻联络线上的交互功率,MW; $P_{\text{ch}}^{\text{average}}$ 为运行周期内联络线流过的平均功率,MW; $T$ 为运行时长, $T=1440$ 。

$$P_{\text{ch}}^t = \sum_{i=1}^{n_{\text{hyd}}} P_{\text{hydro},i}^t + \sum_{j=1}^{n_{\text{pv}}} P_{\text{pv},j}^t + \sum_{k=1}^{n_{\text{phs}}} P_{\text{phs},k}^t - P_{\text{L}}^t \quad (8)$$

式中: $n_{\text{hyd}}$ 、 $n_{\text{pv}}$ 、 $n_{\text{phs}}$ 分别为水电站、分布式光伏电站和抽水蓄能电站总数; $P_{\text{L}}^t$ 为 $t$ 时刻的本地负荷。

## 2 优化算法

在考虑水-光-蓄系统的投资成本前提下,通过水电和抽水蓄能的运行方式来降低联络线上的波动,从而提升水-光-蓄系统外送能力,降低水-光-蓄系统对主网的不利影响。但是系统收益与联络线上的波动性是两个博弈的目标,且投资成本可以看成是一个规划问题,波动性可以看成是一个运行问题,二者相互关联、相互影响。可将这两个不同性质的优化问题描述为一个双层规划问题,采用双层规划结构,如图1所示。即在上层模型中,以水-光-蓄的投资成本为目标函数优化其容量配置,并将其规划方案传入下层模型;在下层模型中考虑水-光-蓄互补系统外送功率波动情况,对其进行优化运行,然后将外送功率波动罚金返回到上层模型,从而构成双层模型的目标函数。基于上述循环过程不断迭代,直至获得上层目标函数最小值,然后,输出

配置结果与优化运行策略。

双层规划是双层决策的分层优化问题<sup>[22]</sup>。通过中间变量将模型中上、下层中各自优化目标与约束条件进行耦合联系,并实现双层问题的分层求解。

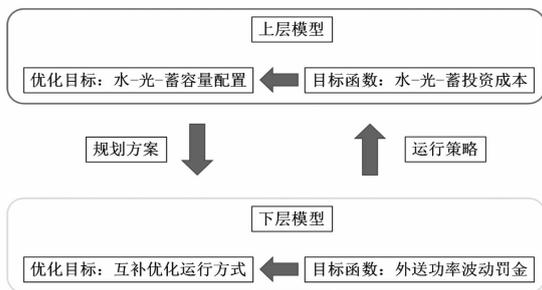


图 1 双层规划结构

上层容量配置中,目前相关文献多使用启发式算法<sup>[23]</sup>求解。其中,粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法具有基于整体优化搜索特性,且算法结构简单、容易实现,具有良好的工程应用价值。考虑到电站建设的工程性质,其装机容量多为整数,因此,应用整数型 PSO 算法求解上层模型中容量配置问题。所谓整数型 PSO,是在标准 PSO 算法的基础上,对其迭代过程中的位置与速度均限制为整数,从而得到整数优化结果。PSO 算法的速度与位置更新公式见文献[23],这里将不在赘述。此外,在所建立的梯级水-光-蓄互补系统的容量配置与优化运行双层模型中,上层容量配置方案中具体参数为:梯级水电站装机容量、光伏电站装机容量以及抽水蓄能电站装机容量。

下层优化问题主要以 100% 消纳光伏为前提,考虑梯级水电站和抽水蓄能电站的最优运行策略,并将非线性潮流约束进行松弛后,通过调用 Cplex 优化软件内置的二阶锥规划方法对其进行快速求解,然后将下层运行结果反馈至上层目标函数中。这种上层问题采用启发式算法与下层问题使用经典的线性算法相结合的方式,保证了双层模型求解的时间效率。双层优化的流程如图 2 所示。详细执行步骤如下:

1) 初始化参数。设定最大迭代次数  $N_{\max}$  和粒子个数;给定粒子位置向量  $x_0 = [P_{\text{hydro}}^i, P_{\text{PV}}, P_{\text{PHS}}]^T$  的初始值和初始迭代次数  $\text{iteration} = 0$ 。

2) 计算粒子适应度值。计算上层目标函数值,并基于 SQP 算法求解下层运行优化模型;然后返回到上层,由公式(2) 计算粒子适应度值。

3) 搜索全局最优适应度值。

4) 判断是否满足迭代退出条件。若满足,则输

出容量配置与优化运行结果并结束;反之,则继续。

5) 更新粒子的速度与位置。基于当前粒子的全局最优与局部最优值,更新粒子速度与位置。

6) 更新粒子适应度值。基于新的位置再次调用下层模型并返回外送功率波动罚金。

7) 迭代次数加一。

8) 重复步骤 3 至步骤 7。

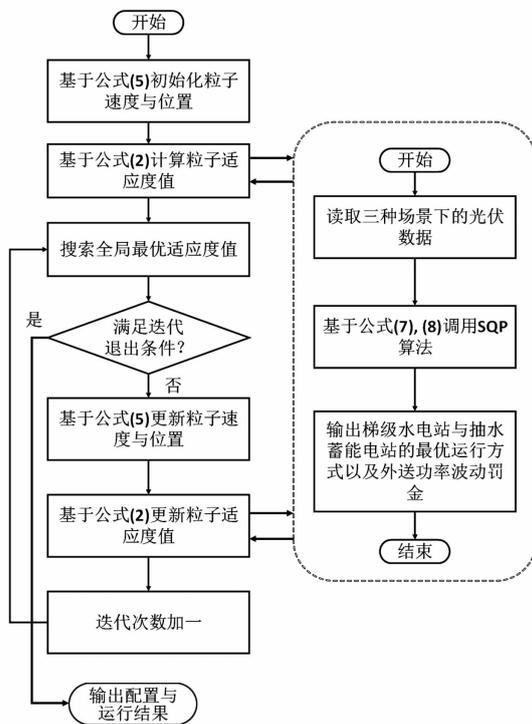


图 2 基于 PSO-SQP 算法的双层优化流程

## 3 算例分析

### 3.1 算例说明

梯级水电站在实际运行中,具有不可频繁进行调控的特性;在下层优化运行问题中,由于水电装机容量相对于抽水蓄能较大,但抽水蓄能电站具备快速正反转能力;因此,在抑制联络线上功率波动时,对水电站和抽水蓄能电站进行分级优化控制,即水电站参与一次调节抑制低频大功率波动,抽水蓄能电站参与二次调节抑制高频尖峰功率波动。定义抽水蓄能电站的发电功率为正,抽水功率为负。梯级水电站相互间存在一定的时延。

为提高下层模型优化效率,对规划区域收集到的历史数据进行了聚类分析<sup>[24]</sup>,并提炼出典型的 3 类运行场景进行对比分析,场景定义见表 1。

表 1 场景定义

分类名称	分类情况
场景 1	雨天
场景 2	阴天
场景 3	晴天

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 水-光-蓄上层容量配置结果

在处理器为 Inter(R) Core(TM) i9-9820X CPU @ 3.30 GHz 的硬件平台上,根据第 1 章所定义的优化目标,利用 PYTHON/Cplex 工具包编程实现了第 2 章中给出的算法流程图及执行步骤;经过迭代寻优得到了水-光-蓄的最优容量配置结果见表 2。

表 2 最优容量配置结果

电站名称	装机容量/MW	备注
水电站	45	第 1 级
	60	第 2 级
	36	第 3 级
光伏电站	100	—
抽水蓄能	5	—

#### 3.2.2 水-光-蓄下层最优运行结果

由图 3 可以看出,不同场景的光伏出力在分钟级下其波动非常频繁,而本地负荷在一天中变化较为缓慢<sup>[25]</sup>。因此,在水-光-蓄互补系统满足本地负荷需求之外,联络线上的外送功率必然存在波动现象。不过,电厂所定义的下层优化运行策略,梯级水电站参与缓解了小部分的功率波动,即实现对外送功率波动的一次调节。

在最优容量配置的基础上,抽水蓄能电站作为一种柔性负荷能够灵活受控并工作在抽水和发电两种状态,能更好地缓解波动性。由图 4 可知,本地负荷在夜间处于低谷且光伏发电量为 0,因此抽水蓄能电站工作在抽水模式以消纳联络线上多余的外送功率;而在白天光伏电站出力波动较为剧烈时,抽水蓄能电站在抽水和发电两种模式切换以保证外送功率平滑。

图 5 分析了不同场景下优化前后联络线功率波动情况,对比 3 种场景可知:联络线外送功率波动的主要成因是光伏出力的波动引起的;场景 1 即雨天光伏电站出力较小,即便抽水蓄能电站不参与调节,外送功率波动也不超过  $\pm 15$  MW/min;外送功率波动最严的场景为晴天,由于云朵随机移动引起光伏电站出力间歇性波动,无抽水蓄能电站参与调节时

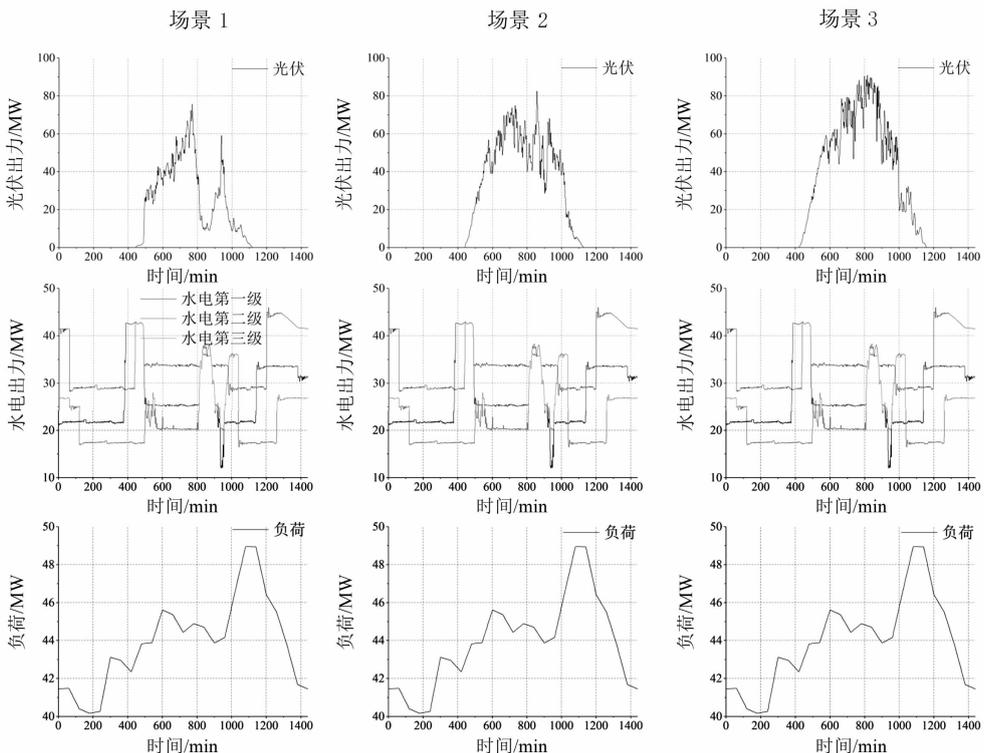


图 3 不同场景下水电站参与一次调节的出力曲线

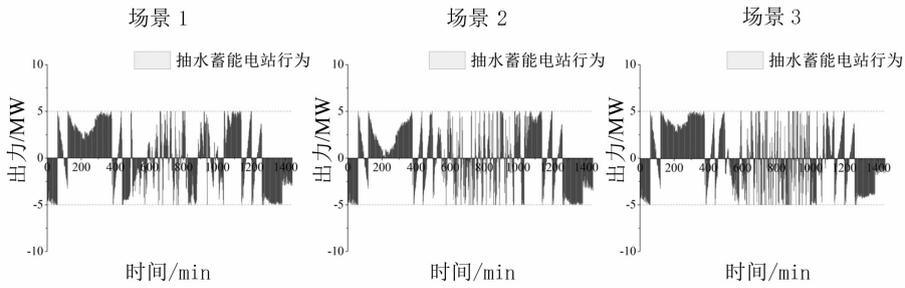


图4 不同场景下抽水蓄能电站的运行行为

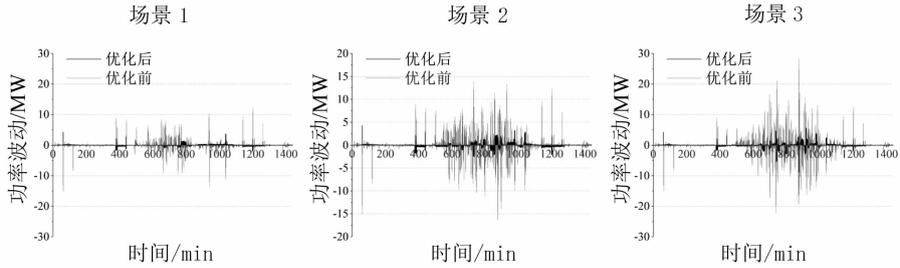


图5 不同场景下优化前后联络线功率波动

导致联络线最大功率波动接近 30 MW/min。但是,通过优化调度抽水蓄能电站的运行后,使得 3 种场景下联络线外送功率波动均被限制在  $\pm 5$  MW/min 之内;提高了水-光-蓄互补系统外送能力。

### 3.3 对比分析

表 3 对比分析了抽水蓄能电站在不同装机容量下,联络线外送功率波动率与抽水蓄能电站投资成本的变化趋势。由对比结果可知,随着装机容量的增加,联络线功率波动率几乎呈现指数趋势下降,但是,随着抽水蓄能电站装机容量的增加,其投资成本必然变高。

表 3 不同抽水蓄能电站装机容量下波动率与投资成本的对比分析

装机容量/ MW	波动率/%			投资成本/ 万元
	场景 1	场景 2	场景 3	
0	15.3	15.5	19.5	0
3	8.7	9.0	13.3	1854
5	4.7	4.8	7.8	3090
7	1.9	2.1	5.0	4326

表 4 抽水蓄能电站不同装机容量范围的投资效益

装机容量 变化范围/MW	波动率最大 下降量/%	投资效益/ (%/万元)
0~3	6.6	0.003 6
>3~5	5.5	0.004 4
>5~7	2.8	0.002 3

引入容量配置效益量化指标投资效益,其定义为:3 种场景中波动率下降最大值与抽水蓄能投资成本增加值之比。表 4 给出了抽水蓄能不同装机容量变化范围内,3 种场景中波动率最大下降量以及抽水蓄能的投资效益。随着抽水蓄能装机容量的增加,并网点功率波动率下降量逐渐减缓;此外,可清晰地看到 3~5 MW 变化范围下的投资效益为 0.004 4%/万元,均高于 0~3 MW 和 5~7 MW 时的投资效益,即配置 5 MW 抽水蓄能电站的投资效益最高,且能够将所有场景下外送功率波动限制在 8% 以内。上述分析验证了所提出的多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行的准确性与合理性。

## 4 结 语

针对梯级水-光-蓄互补系统,从互补系统容量配置与优化运行等角度出发,研究了多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行的双层规划问题。算例分析表明:

1) 在三级水电站总装机容量 141 MW 和光伏装机容量 100 MW 条件下,晴天仅靠水电站参与调节光伏功率波动时,互补系统外送功率每分钟波动量高达 20% 左右。

2) 水电站参与一次调节、抽水蓄能参与二次调节,可使得 3 种场景下联络线外送功率波动均被限

制在  $\pm 5 \text{ MW/min}$  之内,互补系统最大外送功率波动率仅为 7.8%。

3)通过投资效益分析,突出了互补系统配置 5 MW 抽水蓄能电站的优越性,验证了互补系统容量配置与优化运行的准确性与合理性。

### 参考文献

- [1] 谢建. 太阳能光伏发电工程实用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [2] 陈汉雄. 四川电力发展对新能源建设规模影响分析[J]. 四川电力技术,2018,41(2):46-50.
- [3] 李勇,刘俊勇,胡灿. 超导储能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 四川电力技术,2009,32(增刊1):33-37.
- [4] 黄汉云. 太阳能光伏发电应用原理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [5] 高苏杰,娄素华. 抽水蓄能综合效益评估综述[J]. 水电自动化与大坝监测,2008,32(1):11-15.
- [6] 张立锋,徐潜,何志强,等. 阿里电网经济可靠运行相关问题研究[J]. 四川电力技术,2019,42(3):29-33.
- [7] Chalmers S. M.; Hitt M. M. The Effect of Photovoltaic Power Generation on Utility Operation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1985,104(3):524-530.
- [8] 王亮,陈刚,苗树敏,等. 梯级水光联合发电系统短期优化调度模型[J]. 水力发电,2020,46(3):94-98.
- [9] 杨清,袁越,王敏,等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):37-44.
- [10] Li J, Wang S, Ye L, et al. A Coordinated Dispatch Method With Pumped-storage and Battery-storage for Compensating the Variation of Wind Power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2018,3(1):1-14.
- [11] Hozouri M A, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. On the Use of Pumped Storage for Wind Energy Maximization in Transmission-constrained Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(2):1017-1025.
- [12] Howlader H O R, Sediqi M M, Ibrahimi A M, et al. Optimal Thermal Unit Commitment for Solving Duck Curve Problem by Introducing CSP, PSH and Demand Response[J]. IEEE Access,2018,6:4834-4844.
- [13] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):63-69.
- [14] 温正楠,刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术,2019,43(7):2449-2460.
- [15] 丁磊,刘俊勇,刘友波,等. 考虑分布式发电商投资的区域配电网光伏储能容量配置[J]. 可再生能源,2017,35(03):374-383.
- [16] 付爱慧,张峰,张利,等. 考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):53-61.
- [17] 朱燕梅,陈仕军,马光文,等. 计及发电量和出力波动的水光互补短期调度[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2769-2779.
- [18] 李涛,胡维昊,李坚,等. 基于深度强化学习算法的光伏-抽蓄互补系统智能调度[J]. 电工技术学报,2020,35(13):2757-2768.
- [19] 陈文伯,李灿,姚李孝. 梯级水电站与光伏电站的联合优化运行[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):113-117.
- [20] 田录林,张欣,侯彤晖,等. 含风电接入的配电网储能系统优化配置[J]. 西北水电,2018(5):1-7.
- [21] 刘鹏越. 独立风/光/柴/储微网系统容量优化配置研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [22] 张欣. 二阶锥优化在含风电接入的配电网储能规划双层模型中的应用[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [23] Li T, Hu W H, Xu X, et al. Optimized Operation of Hybrid System Integrated With MHP, PV and PHS Considering Generation/Load Similarity[J]. IEEE Access,2019,7:107793-107804.
- [24] 杨晶显,刘俊勇,韩晓言,等. 基于深度嵌入聚类的水光荷不确定性源场景生成方法[J]. 中国电机工程学报,40(22):7296-7305.
- [25] 杨博宇,陈仕军. 电力负荷预测研究综述及预测分析[J]. 四川电力技术,2018,41(3):56-60.

### 作者简介:

李涛(1994),男,硕士研究生,研究方向为可再生能源系统运行与控制;

胡维昊(1982),男,教授,博士生导师,研究方向为人工智能在电力系统中的应用、可再生能源发电技术。

(收稿日期:2020-09-28)

# 基于改进 NSGA - II 算法的水 - 光 - 蓄发电系统多目标规划方法

周修宁<sup>1</sup>, 江 军<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;  
2. 中电建水电开发集团有限公司, 四川 成都 610095)

**摘要:**水-光-蓄联合发电系统是指利用水电和光伏发电互补性,用水电弥补光伏发电间歇性,并配备一定容量的抽水蓄能电站,利用储能手段平抑光伏出力波动性,同时提高光伏电能消纳能力的联合发电系统。水-光-蓄联合发电系统是一种有效的新能源开发利用新形势,而对联合系统的分布式光伏电站的选址定容以及抽水蓄能电站的容量配置问题是一个高维、非线性的规划问题。首先,构建了水-光-蓄联合发电系统的数学模型;其次,针对规划问题的多目标性,利用了改进的 NSGA - II 算法得到帕累托最优解集;最后,通过 TOPSIS 法完成了规划方案决策,并结合算例验证了方法的合理性。

**关键词:**水-光-蓄联合运行;分布式光伏选址定容;多目标规划

**中图分类号:** TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2021)02 - 0008 - 08

**DOI:** 10. 16527/j. issn. 1003 - 6954. 20210202

## Optimization of Hydropower - photovoltaic - pumped Hydro Storage Complementary Generation System Based on Improved NSGA - II Algorithm

Zhou Xiuning<sup>1</sup>, Jiang Jun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion(Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Shanghai 200240, China; 2. PowerChina Hydropower Development Group Co., Ltd., Chengdu 610095, Sichuan, China)

**Abstract:** A hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage complementary generation system is proposed to solve the challenge of high uncertainty of photovoltaic. The complementary generation system takes the use of the complementarity between hydropower and photovoltaic power generation to compensate for intermittent characteristics of photovoltaic power generation. And a pumped - storage power station is equipped to stabilize the photovoltaic output fluctuation, and to improve photovoltaic energy consumption at the same time. NSGA - II is used to solve the problems of multi - objective optimization of distributed photovoltaic power generation site selection and capacity of pumped storage power station. In the end, the TOPSIS algorithm is used to screen out the optimal solution. The analysis of the optimal solution proves that this planning process is practical.

**Key words:** hydropower - photovoltaic - pumped hydro storage complementary power generation system; distributed photovoltaic power generation site selection; multi - objective optimization

## 0 引言

随着传统能源资源日益紧张,且环境污染问题愈发严重,利用清洁可再生的新能源来改善能源结构已

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905200)

经成为世界范围内的共识和战略选择<sup>[1-2]</sup>。太阳能作为一种典型的清洁能源,已在各领域大量地运用。然而,受制于自然资源的随机性、波动性以及间歇性,可再生能源的并网带来消纳以及运行调度问题。使用水电作为光伏系统的补偿是解决光伏系统的间歇性和不可靠性的思路之一。水能作为一种利

用历史较久的清洁能源,水力发电模式发展成熟,具有较高的可靠性。储能系统具有良好的充放电功率调节能力和供电蓄电能力,能在一定程度上弥补光伏系统出力在日周期内波动大的缺陷。抽水蓄能具有功率大、容量大的特点,成本低,技术上易于实施。对于水-光伏互补系统,其地理位置具有建立抽水蓄能电站的基础。将抽水蓄能电站与水-光伏混合发电系统相结合,可以提高光能利用率,有效减少弃能现象。

对于类似的联合发电系统,已有较多的新型研究。文献[3]提出了一种利用局部可用水源的新型小型离网发电系统,利用光伏发电、抽水蓄能、太阳能水泵等组成元件之间的互补性,使系统的输出功率完全不受太阳辐射变化的影响,实现连续发电;但该联合系统容量小且不具备分布式光伏特性,具有一定的局限性。文献[4]利用了 $\varepsilon$ 约束法,解决了以供电概率损失最低、总成本最低、总能量损失最低为目标的含风、光、电池、氢气罐在内的多能源系统多目标规划问题;在求解帕累托最优解之后没有进一步提出筛选最优解的方法。文献[5]建立了基于光伏、风力和抽水蓄能联合运行模型的仿真工具,通过仿真工具研究了混合系统对系统特性的影响;仿真情况下没有考虑到经济运行以及设备成本等实际工程问题,缺乏工程应用价值。

针对以上问题,基于实际工程出发,考虑了规划成本、运行规划等实际问题,给出了多目标规划的水-光-蓄抽水规划问题的求解方法,利用改进后的 NSGA-II 算法对问题进行了求解,并结合 TOPSIS 方法对规划方案集进行最优决策。结合实际工程算例对所提方法进行了验证。

## 1 水-光-蓄发电系统多目标规划模型

### 1.1 联合发电系统建模

#### 1.1.1 各机组出力特性分析

##### 1) 光伏发电系统

光伏发电系统出力受温度和辐射强度影响明显,外界天气的变化会直接导致系统输出的变化。受天气影响明显,阴雨天气其出力峰值降低情况明显,如图1所示。

光伏出力同时具有波动性和不确定性,其典型日分钟级出力曲线见图2。在微小时间尺度上,光

伏输出曲线是锯齿分布,波动明显,在短时间内功率变化率可以达到20%以上。

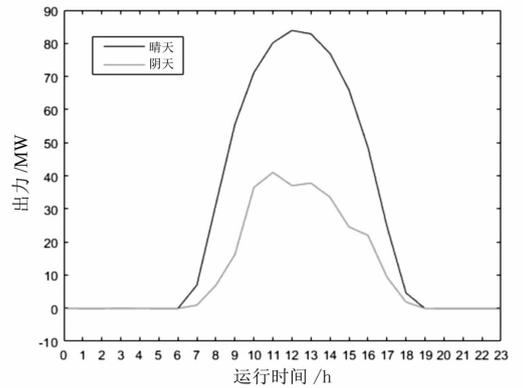


图1 晴雨天天气光伏日时间尺度出力对比

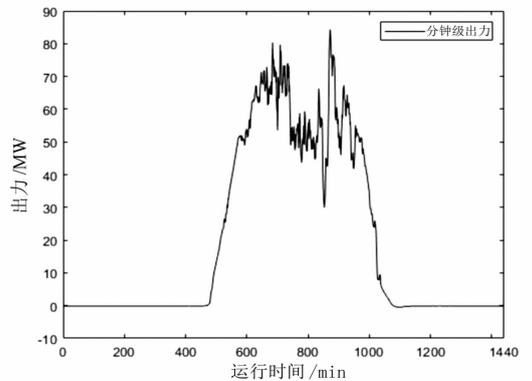


图2 光伏分钟尺度日出力典型曲线

##### 2) 水力发电系统

水力发电系统具有运行灵活、启停机迅速、运行可靠性高等特点,可以补偿光伏系统的输出,保证系统稳定性。但同时水电站出力受来水量影响较大,由于气候和地理环境因素,电站一年中的来水量大致可以分为丰水期、平水期、枯水期3个时期。丰水期水库来水量大,水电机组能做到满发输出;平水期较丰水期而言来水量较小,其机组输出变低;而枯水期来水量极少,水电机组出力受到很大的限制,通常只为装机容量的30%~50%左右,如图3所示。

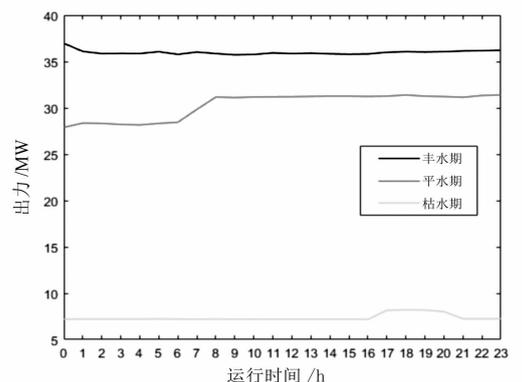


图3 不同水季水电站典型日出力曲线

### 3) 抽水蓄能系统

抽水蓄能电站的核心设备是用于发电的水轮机和用于抽水的水泵。随着技术的发展,如今,抽水蓄能电站通常配备可逆式涡轮机组,可实现抽水蓄能和排水发电的双重运行。然而,由于工艺和设计限制,效率通常比单独的涡轮机和泵的效率差。抽水蓄能电站在能量储存和提取过程中往往会有一部分的能量损耗。

抽水蓄能的发电模型满足:

$$P_t^{pg} P_t^{pp} = 0 \quad (1)$$

$$\sum_t^T P_t^{pg} - \frac{P_t^{pp}}{\eta} = 0 \quad (2)$$

式中: $P_t^{pg}$ 为抽水蓄能电站工作在放水发电状态的输出功率; $P_t^{pp}$ 为抽水蓄能电站工作在抽水蓄能状态下的输出功率; $\eta$ 为水泵抽水效率和水轮机工况效率之比; $T$ 为抽水蓄能电站的调度周期。式(1)表示抽水蓄能电站一个时间点只能工作在一种工作状态中;式(2)表示抽水蓄能电站在一个调度周期内水库水量平衡。

#### 1.1.2 联合发电系统运行策略

光伏发电和水力发电的出力具有互补性,同时应该意识到水电站和抽水蓄能系统的建立都是在创建经济效益的同时平抑光伏出力的波动性,更好地消纳新能源。于是,联合发电系统的运行策略总结为以下3点:

1) 由于光伏出力的不可控性和波动性,在日间光照条件良好的环境下,优先调用光伏发电出力。

2) 水力作为光伏出力的补偿性电源,在光伏出力不足以满足负荷要求时,水电机组投运。

3) 抽水蓄能电站在低电价时间段抽水储能,在高电价时间段放水发电,创造经济效益,并提供调峰调频和事故备用的功能。在联合发电系统中,抽水蓄能的主要设计目标和作用是平抑光伏新能源并网带来的波动性和间歇性,将运行策略调整为在输出低谷期放水发电输出,输出高峰期抽水储能,以求尽量减小联合发电系统的波动性。

## 1.2 规划模型确立

### 1.2.1 规划目标

1) 规划投资成本最小:对于投资者而言,项目的投资成本是一个影响决策的考察重点,也是工程实践中需要考虑的第一要素。项目投资的成本自然是越小越好,由于电站规划和建设的时间较长,往往

时间跨度以年为单位,所以引入经济上的净现值概念,将投资建设成本和各年度联合运行的运行成本折算到经济现值,其定义为

$$\min F_1 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} (1+i_t)^{-y} \frac{i_t(1+i_t)^K}{(1+i_t)^K - 1} C_{pl} + \sum_y^{n_y} (1+i_t)^{-y} C_{op} \right\} \quad (3)$$

式中: $n_y$ 为总规划年; $i_t$ 为贴现率; $C_{op}$ 、 $C_{pl}$ 为梯级水光蓄系统的年运行和规划费用; $k$ 为机组运行年限;第一项为动态投资费用,一般为机组容量的线性函数;第二项为联合系统运行成本,包括购电成本、运行成本等。

2) 对电网波动最小:联合发电系统建设的初衷就是为了克服光伏发电的间歇性和波动性,从这个角度出发,联合发电系统整体与电网的交互功率的波动越小越好,其定义为

$$\min F_2 = \min \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T} (P_{jh,t} - \overline{P_{jh}})^2 \right\} \quad (4)$$

式中: $P_{jh,t}$ 为某一时刻联合发电系统与电网交互功率,交互功率表达了联合发电系统与负荷之间的差值; $\overline{P_{jh}}$ 为调度周期内交互功率的平均值,交互功率与平均值的差值的欧氏距离能反映系统对电网波动性的大小。

3) 弃水量最小:联合发电系统应该充分利用电站流域的水力资源,将弃水量最小作为规划的目标之一是具有合理性的。

$$\min F_3 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} \sum_{t_1}^T P_{hy,t_1}^{\max} - P_{hy,t_1}^{\text{real}} \right\} \quad (5)$$

式中: $P_{hy,t_1}^{\max}$ 为 $t_1$ 时刻水电站理论最大出力; $P_{hy,t_1}^{\text{real}}$ 为水电站实际并网出力。

4) 弃光量最小:弃光量是衡量新能源发电系统新能源消纳能力的重要指标,弃光量越小,则对新能源的消纳能力越大。

$$\min F_3 = \min \left\{ \sum_y^{n_y} \sum_{t_1}^T P_{pv,t_1}^{\max} - P_{pv,t_1}^{\text{real}} \right\} \quad (6)$$

式中: $P_{pv,t_1}^{\max}$ 为 $t_1$ 时刻光伏电站理论最大出力; $P_{pv,t_1}^{\text{real}}$ 为光伏电站实际并网出力。

### 1.2.2 规划约束

1) 功率平衡约束:各时刻联合系统输出功率与电网交互功率之和应该等于负荷大小。

$$P_{pv,t} + P_{hy,t} + P_{pm,t} + P_{buy,t} = P_{load,t} \quad (7)$$

式中: $P_{pv,t}$ 为光伏输出功率; $P_{hy,t}$ 为水力输出功率;

$P_{pm,t}$  为抽水蓄能输出功率(当工作在抽水蓄能状态时,其值为  $-P_t^{pp}$ ;当工作在放水发电状态时,其值为  $P_t^{pg}$ ); $P_{buy,t}$  为向电网购电补偿功率; $P_{load,t}$  为负荷功率。

2) 各机组机容量约束:机组出力值不大于其容量最大值。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{hy,t} \leq P_{hy,max} \\ 0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,max} \\ 0 \leq P_t^{pp} \leq P_{max}^{pp} \\ 0 \leq P_t^{pg} \leq P_{max}^{pg} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_t^{pp}$  为抽水蓄能电站工作在抽水状态时的出力; $P_t^{pg}$  为抽水蓄能电站工作在放水发电状态时的出力。

3) 线路潮流约束:节点上的功率应该在潮流稳定范围内。

$$P_{j,min} \leq P_{j,t} \leq P_{j,max} \quad (9)$$

式中: $P_{j,t}$  为某时刻  $j$  节点的功率值; $P_{j,max}$  和  $P_{j,min}$  分别为节点潮流稳定功率值的最大值和最小值。

4) 节点电压约束:节点电压应在节点电压稳定范围内。

$$V_{j,min} \leq V_{j,t} \leq V_{j,max} \quad (10)$$

式中: $V_{j,t}$  为某时刻  $i$  节点的电压大小; $V_{j,max}$  和  $V_{j,min}$  分别为  $i$  节点电压稳定范围的最大值和最小值。

5) 水量平衡约束:在抽水蓄能调度周期内电站的抽水量和放水量应该保持平衡,这里取调度周期为一日。

$$\sum_t n_k P_t^{pg} - n_k \frac{P_t^{pp}}{\eta} = 0 \quad (11)$$

式中: $\eta$  为抽水蓄能电站抽水状态对比放水状态的效率之比; $n_k$  为水量和电量的转换系数。

## 2 改进的 NSGA-II 算法

### 2.1 NSGA-II 法求解约束问题

NSGA-II 算法是由 Deb 提出的求解多目标优化问题的智能算法,其采用了快速非支配的排序算法,引入了精英保留策略和拥挤度的概念,确保了多目标帕累托解的均匀性和多样性<sup>[6]</sup>,其算法的基本步骤如下:

- 1) 快速非支配排序,得到所有解的帕累托等级。
- 2) 计算拥挤度,确保解的多样性。
- 3) 帕累托等级和拥挤度作为适应度算子,计算支配关系。

4) 进行选择交叉,将父辈和子代精英个体选入下一代,重复步骤 1 至步骤 3 过程。

在处理带约束条件的问题时,为了避免罚函数带来的主观性和调整难度高的问题,采用改进的适应度比较算子来处理约束条件<sup>[7]</sup>。

首先,定义个体的约束违反度  $n_v$ ,其反映的是个体违反约束程度的大小。需要注意的是,各个约束的量纲和数量级不同,不能进行直接的约束度相加计算,应该对数据进行归一化处理之后再行约束违反度的计算。

对所有的种群个体分别计算不等式和等式约束的违反值储存后,进行数据的归一化处理来消除量纲的影响,得到归一化后的约束违反值,再用欧式距离的定义来得到约束违反度  $n_v$ ,计算公式为

$$n_v = \sqrt{\sum_{i=1}^p v'_{g,i}{}^2 + \sum_{j=1}^q v'_{h,j}{}^2} \quad (12)$$

式中, $v'_{g,i}$  和  $v'_{h,j}$  分别为归一化后的不等式、等式约束违反值,其值为 0 与约束违反值中最大值的归一结果。

对于没有违反约束的可行解,其约束违反度为 0,而不可行解的约束违反度越大说明其违反约束的程度越高。其支配规则定义为:可行解支配不可行解;约束违反度  $n_v$  小的不可行解支配较大的不可行解。

这种对于约束的处理方式是可行解的优先性绝对大于非可行解的,严格保证了筛选出的解的可行性。但是部分非可行解可能含有优秀的基因特征,将它们排除在搜索空间外可能会降低算法搜索的收敛性。为了处理这一问题,采用了将种群保持一定比例高质量不可行解的方法,即:先以约束支配条件保留种群大部分的精英,再在不可行解中选择一定数目的非可行解加入种群。

### 2.2 改进后的 NSGA-II 算法

#### 1) 自适应变异策略

在遗传算法中引入变异算子是为了提高全局解空间中解的搜索能力。自适应变异是一种在种群进化过程中变异概率随之改变的变异算法,其算法的思想是:在算法的初步阶段,将变异概率设置得大一些,以便解在全局范围上的搜索,在开始阶段进行广泛搜索可以保持种群的多样性;在算法的中后期,缩小变异概率并进行详细搜索以防止最优解的优良特征信息被破坏。普通的自适应变异是根据进化代数的增加来进行变异概率的收缩,这种自适应方法只考虑了进化代数,并没有将种群特征信息加入考虑。考虑种群特征的自适应变异应该将种群的多样性信

息加入自适应的计算过程,在种群多样性较差时变异概率降低,多样性良好时变异概率上升。引入粒子离散度的概念<sup>[8]</sup>,其计算公式为

$$\delta = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{f(x_i^t) - f_{avg}^t}{f_{max}^t - f_{min}^t} \right| \quad (13)$$

式中,  $f_{avg}^t$ 、 $f_{max}^t$ 、 $f_{min}^t$  分别为第  $t$  代粒子适应度的平均值、最大值和最小值。

需要注意的是, NSGA-II 算法中有多个目标,其适应度无法通过简单的目标函数来替代,里采用的是多目标函数归一化后用欧氏距离来表示的等效适应度函数。

个体的离散度反映的是个体的适应度与总体平均适应度的偏差,其值越大,则粒子离散程度越大,说明个体的多样性好,变异概率应该设置得越高。设计变异概率计算式为

$$p_m^t = \delta p_m^0 \quad (14)$$

式中:  $p_m^0$  为初始变异率;  $p_m^t$  为第  $t$  代粒子的变异效率。

## 2) 多种群协同进化

遗传算法依赖于个体在解空间内的搜索来进行寻优,其种群数越大,则在解空间域的分布就越广,搜索能力越强。但是种群数目变大也会带来算法复杂度提高、运算速率慢的问题。为了提高遗传算法的全局搜索能力,引入多种群协同进化的改进算法。在算法中设置一个主群和多个子群,各种群的初始化、选择、交叉、变异均独立进行,但子群最优解会进入主群,并替代排序值最低的个体。通过这种种群间的协同进化手段能加大种群的全局搜索能力,防止算法陷入局部最优。

以上两种机制的引入的确可以改善 NSGA-II 算法的收敛性和局部最优搜索能力,但是在实践中发现,由于水-光-蓄联合发电系统规划问题的决策空间维度很高,算法搜索帕累托前沿的效果仍然难以达到令人满意的地步。为了解决这个问题,考虑将水-光-蓄联合发电系统规划问题进行分解,通过分步来求解模型问题,达到将问题降维的目的,具体的过程将在下一章中详细描述。

# 3 算例

## 3.1 算例参数设置

结合实际工程算例,设定工程已有 150 MW 水电装机容量,完成对水-光-蓄联合发电系统中的光伏电站和抽水蓄能电站进行选址定容问题的求解。

由于水-光-蓄联合系统的规划涉及到规划年内电站的出力调度优化,而已有的水电站均为日调度电站,联系前面所提到的水电的季节特性和光伏在阴雨天气和晴朗天气出力不同的情况,考虑设计具有代表性的典型日场景集来综合代替年调度场景,以达到将场景缩减和将问题降维的目的。

采用 k-means++ 算法对数据先行处理。根据上面的分析,水电站受水文环境的影响,一年按来水量可分为丰水、平水、枯水 3 个时期,将水电站按照其来水量划分为丰水期出力、平水期出力、枯水期出力 3 个典型场景。而光伏受辐射强度影响,可以分为辐射强度高(代表晴朗天气)、辐射强度低(代表阴雨天气)两种典型场景。将数据时间尺度统一到分钟级尺度,考虑到水电站数据集中有异常停机或检修的场景,设置水电数据聚类数为 4,光伏聚类数为 2。算例结果如图 4 和图 5 所示。图中带标识的粗线为各场景的聚类中心,即各场景的典型出力值,浅色的细线为各聚类场景的数据集。

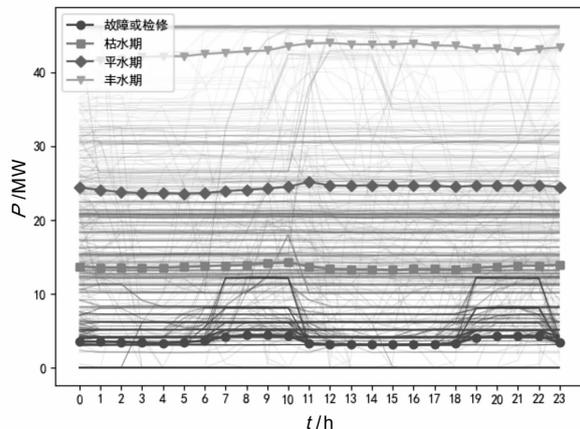


图 4 水电站出力聚类结果

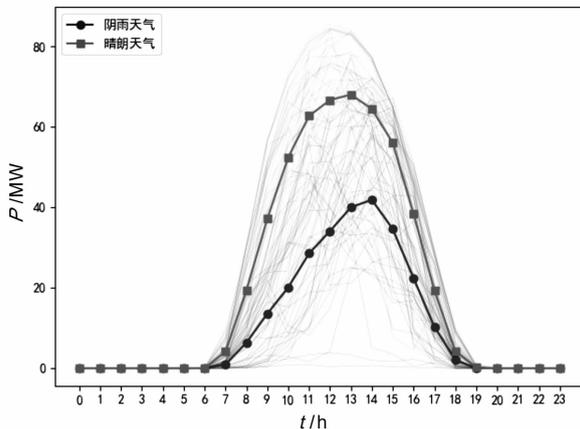


图 5 光伏电站出力聚类结果

综合水电站 3 种和光伏电站 2 种典型场景,得到 6 种典型场景,其在规划年内的时期占比如表 1 所示。

表 1 典型日场景数比例

场景类型	比例/%
丰水期晴天	22.7
丰水期阴天	17.3
平水期晴天	11.5
平水期阴天	8.5
枯水期晴天	22.7
枯水期阴天	17.3

已有的典型日负荷数据较少,对于负荷的预测效果较差,考虑规划年的负荷增长用负荷增长系数来求取。当前的负荷典型日曲线见图 6。

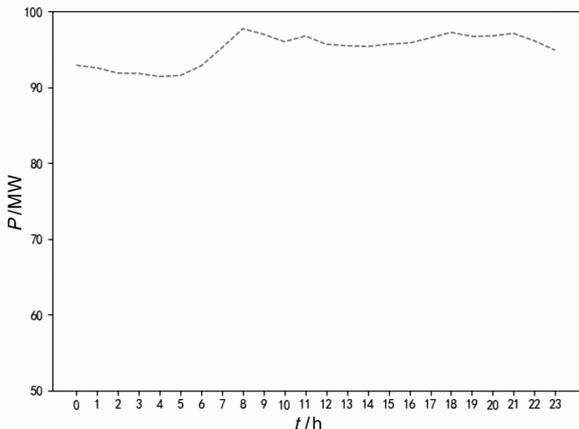


图 6 负荷典型日曲线

由于抽水蓄能的建设选址需要考虑地理水文环境因素,在数据不足且结合工程实际的情况下,假定其位置固定,只需规划容量。光伏的出力受光照和温度的影响,为了简化计算,选取了 5 个光伏电站待选点,规划算例网络示意如图 7 所示。

设置总规划年为未来 5 年,贴现率为 6%,负荷增长率为 10%。考虑到水-光-蓄联合发电系统在枯水期夜晚出力不足,不能满足负荷需求,设置水-光-蓄联合发电系统与主网间存在购电功率交互行为,如表 2 所示。表 3 为各待选机组的详细参数。5 个光伏待选位置单位容量光伏电站输出见图 8。

表 2 分时电价

时间段	(0:00—7:00) 谷时	(7:00—9:00, 12:00—17:00, 22:00—24:00) 平时	(9:00—12:00, 17:00—22:00) 峰时
电价/ (元/kWh)	0.47	0.88	1.1

表 3 待选机组参数

类型	投资费用/ (10 <sup>6</sup> 元/MW)	机组运行 年限/年	效率/ %
光伏	8.0	20	0.90
抽水蓄能	7.5	20	0.75

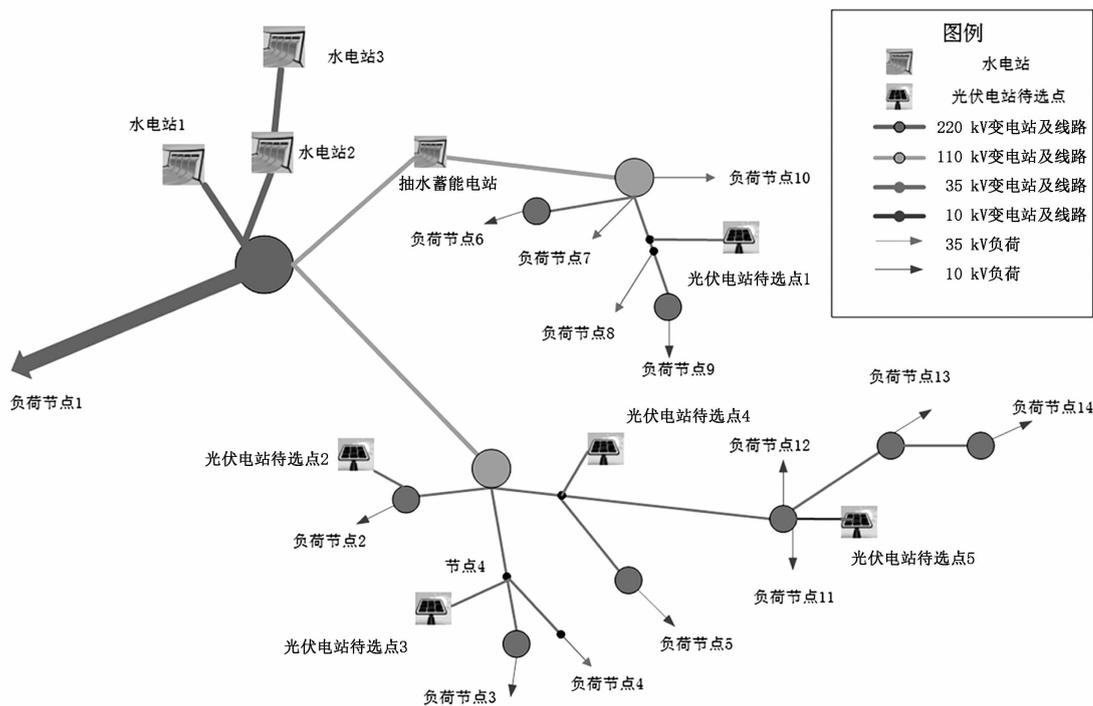


图 7 算例网架接线

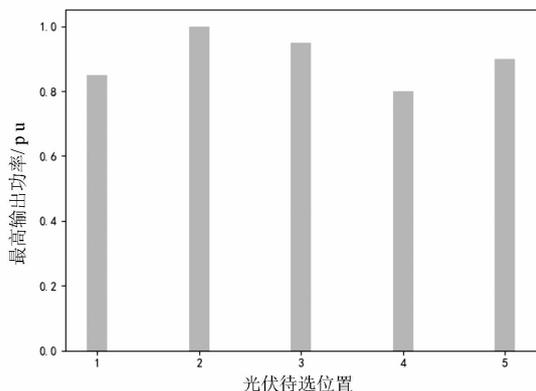


图 8 光伏待选位置单位容量光伏电站输出

### 3.2 模型求解

考虑到 NSGA - II 算法在面对高维问题时表现出的容易陷入局部最优和早熟收敛的现象,将水 - 光 - 蓄联合发电系统的规划问题转化成规划和优化运行两个层面的问题进行研究。首先,用 NSGA - II 算法求得规划方案,再在相应的规划方案下求取每个规划年每个典型场景下的出力调度优化,实现问题的降维处理,简化计算过程。

#### 1) 规划模型求解

规划模型确定各规划年在不同待选位置上建设的光伏电站容量以及抽水蓄能电站新增容量,规划方案确定了投资模型中的投资费用,同时影响到运行优化,是一个非线性的优化问题。采用 NSGA - II 算法进行规划模型的求解,运行成本、弃光率、弃水率等目标由优化运行系统模型确定,每个个体执行一次水 - 光 - 蓄联合发电模型的优化程序,时间成本较高。

#### 2) 水 - 光 - 蓄联合发电系统优化运行模型求解

水光蓄联合发电系统的运行影响到运行成本、弃光率、弃水率等多项影响目标函数,原则上是一个多目标优化的问题。但是考虑到时间成本上的问题,同时对于一个确定的规划模型而言,显然其机组运行的策略是确定且唯一的,将其作为多目标优化模型来处理是不合适的。从工程实际出发,往往机组运行的目标是在确保电网运行稳定的前提下尽量减少运行成本,于是将水 - 光 - 蓄联合发电系统优化问题转化为运行成本最低的单目标规划。

同时考虑到所强调的是水光之间的互补性,在水电站的容量已经确定的情况下,应该尽可能地消纳新建的光伏电站输出。因此在光资源和水资源同

样充足的情况下,优先考虑将光伏并网,水电资源弃置或留作备用,这也是符合实际运行原则的。

在算法的实现层面,为了保证光伏发电并网的优先度高于水电,设置水电运行成本为一个很小的值,而光伏发电成本设置为 0。同时抽水蓄能运行过程存在非线性约束式(11),引入新的布尔变量后将约束线性化后,将优化运行问题转换成易于求解的线性规划问题,提高算法效率。

求解得到一系列的帕累托最优解,由于将光伏输出优先并入电网,所有的最优解弃光率目标均为 0,另外 3 个目标在目标空间的分布如图 9 所示。

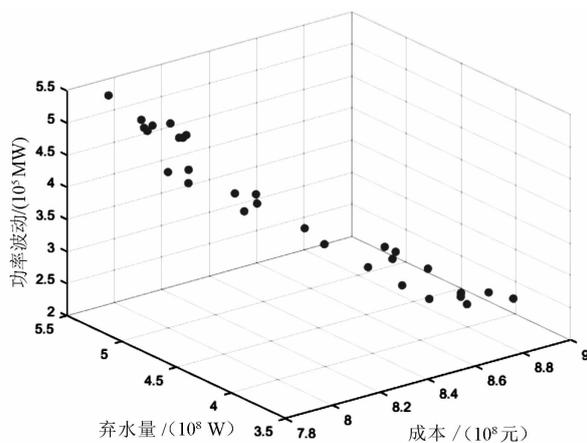


图 9 帕累托解在三维目标空间中的分布

对得到的帕累托最优解集通过 TOPSIS 算法进行排序,就能得到最优解。TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序办法,通过检测评价对象与理想解和负理想解的距离来进行排序<sup>[9]</sup>,限于篇幅原因不再展开。

(1) 假设各规划目标指标权重相同,均为 0.25,则可得到最优规划方案 1,其规划结果见表 4,规划目标值见表 5。

表 4 最优规划方案 1

规划年份	抽水蓄能电站新建容量/MW	光伏电站新建容量/MW				
		待选点 1	待选点 2	待选点 3	待选点 4	待选点 5
第 1 年	5	6	5	7	10	5
第 2 年	5	5	2	5	10	2
第 3 年	2	5	2	7	8	3
第 4 年	0	10	9	1	6	10
第 5 年	4	4	9	7	6	6
合计	16	30	27	27	40	26

表5 最优规划方案1 电网规划目标值

交互功率波动/ MW <sup>2</sup>	规划成本/ 10 <sup>6</sup> 元	弃水量/ MWh	弃光量/ MWh
1 331.14	801.91	523 871	0

(2) 考虑到经济性指标和波动性指标对于综合电站的建设和运行影响程度较大,考虑将这两个指标权重调高,设置权重向量为 $[0.3, 0.3, 0.2, 0.2]$ ,得到规划方案2,规划结果见表6,规划目标见表7。

表6 最优规划方案2

规划 年份	抽水蓄能 电站新建 容量/MW	光伏电站新建容量/MW				
		待选 点1	待选 点2	待选 点3	待选 点4	待选 点5
第1年	5	6	5	8	4	5
第2年	5	10	1	7	7	7
第3年	5	4	10	4	8	3
第4年	1	10	9	10	2	3
第5年	4	1	7	9	6	8
合计	20	31	32	38	27	26

表7 最优规划方案2 电网规划目标值

交互功率波动/ MW <sup>2</sup>	规划成本/ 10 <sup>6</sup> 元	弃水量/ MWh	弃光量/ MWh
1 491.62	790.46	534 508	0

对比分析规划方案1和规划方案2,发现规划方案2比方案1建设的光伏容量更大,光伏的加入虽然增加了建设成本,但减小了联合发电系统的外购电量和运行成本,使得经济性效益提高,但同时也引起了系统交互功率波动变高、同时弃水量升高。另外方案2建设抽水蓄能电站的容量也更大,其在经济方面的有益作用也是明显的,且更大抽水蓄能容量的加入能提高系统的稳定裕度。

## 4 结 语

上面设计了一种联合了水力发电和分布式光伏以及抽水蓄能电站联合运行的发电系统,借此来解决光伏电能消纳困难的问题。同时针对水-光-蓄联合发电系统的多目标规划问题,联合了改进的NSGA-II算法和TOPSIS算法给出了最优解的求解方法。通过设置不同的权重,可以得到不同的规划结果,以适应不同的优化目标。

## 参考文献

- [1] Liu Y, Tan S, Jiang C. Interval Optimal Scheduling of Hydro - PV - Wind Hybrid System Considering Firm Generation Coordination[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 11(1): 63 - 72.
- [2] Parastegari M, Hooshmand R A, Khodabakhshian A, et al. Joint Operation of Wind Farm, Photovoltaic, Pump - storage and Energy Storage Devices in Energy and Reserve Markets[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 275 - 284.
- [3] Pali B S, Vadhera S. A Novel Solar Photovoltaic System With Pumped - water Storage for Continuous Power at Constant Voltage [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 133 - 142.
- [4] Bakhtiari H, Naghizadeh R A. Multi - criteria Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems Including wind, Photovoltaic, Battery, and Hydrogen Storage with  $\epsilon$  - constraint Method [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(8): 883 - 892.
- [5] Notton G, Mistrushi D, Stoyanov L, et al. Operation of A Photovoltaic - wind Plant with A Hydro Pumping - storage for Electricity Peak - shaving in an Island Context [J]. Solar Energy, 2017, 157: 20 - 34.
- [6] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm; NSGA - II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [7] Seshadri A. Multi - objective Optimization Using Evolutionary Algorithms (MOEA) [J/OL]. Matlab Website: [Http://www. Mathworks. com/matlabcentral/fileexchange/10429](http://www. Mathworks. com/matlabcentral/fileexchange/10429), by, 2006, 19.
- [8] 黄松, 田娜, 纪志成. 基于自适应变异概率粒子群优化算法的研究 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 874 - 879.
- [9] Lai Y J, Liu T Y, Hwang C L. Topsis for MODM [J]. European Journal of Operational Research, 1994, 76(3): 486 - 500.

## 作者简介:

周修宁 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源、电力市场、电力系统优化。

(收稿日期: 2020 - 09 - 28)

# 基于马尔科夫链模型的小金川河流域径流形势预估分析

陈仕军<sup>1</sup>,王亮<sup>2</sup>,陈刚<sup>2</sup>,韩晓言<sup>3</sup>

(1. 四川大学水利水电学院,四川成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;

3. 国网四川省电力公司,四川成都 610041)

**摘要:**为了分析小金川河流域中长期径流形势,尝试利用马尔科夫链模型进行年径流形势预估,结合历史径流的丰枯变化,计算丰水年、平水年、枯水年相互转变的马尔科夫转移概率,在此基础上,可根据当年来水情况实现对木坡电站下一年径流形势的预估分析。以2018年木坡水电站的丰枯形势预估进行实例分析,经验证,该径流形势预估分析方法具有较强的实用性,为径流形势预估分析提供了一种切实可行的思路和方法。

**关键词:**马尔科夫链模型;小金川河流域;径流形势预估分析;转移概率表

**中图分类号:**TV72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0016-03

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210203

## Prediction and Analysis of Runoff Situation in Xiaoinchuan River Basin Based on Markov Chain Model

Chen Shijun<sup>1</sup>, Wang Liang<sup>2</sup>, Chen Gang<sup>2</sup>, Han Xiaoyan<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065,

Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,

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

Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to analyze the runoff situation of Xiaojinchuan river basin, Markov chain model is used to predict the annual runoff situation. Combined with the changes of historical inflow, by calculating the Markov transition probability of the mutual transformation of abundant, normal and dry in history, the runoff situation of Mupo hydropower station in the next year is predicted according to the inflow situation of that year. Taking the situation prediction of Mupo hydropower station in 2018 for example, the case analysis is carried out. The results show that the prediction results are consistent with the actual results, and the runoff situation prediction analysis method has strong practicability, which provides a practical idea and method for runoff situation prediction analysis.

**Key words:** Markov chain model; Xiaojinchuan river basin; runoff situation prediction analysis; transfer probability table

## 0 引言

径流预估一直是水文水资源利用研究领域的难点,准确可靠的径流预测是水资源规划调配、防洪减灾、防涝抗旱等重大决策的数据基础<sup>[1]</sup>。因此,研究一种精度较高且适用性强的径流形势预估方法具

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFB0905200)

有重要的理论意义和实际意义。目前中长期径流预测的方法较多,传统的统计模型包括时间序列分析模型<sup>[2]</sup>、小波分析模型<sup>[3]</sup>、多元线性回归模型<sup>[4]</sup>等。由于大数据挖掘、人工智能的兴起,一些新的机器学习方法在径流预测中得到广泛的应用,主要包括人工神经网络模型<sup>[5-7]</sup>、支持向量机模型<sup>[8-10]</sup>、最近邻抽样回归模型<sup>[11-12]</sup>等。然而,这些方法对于研究区域的历史资料系列长度要求较高,在实际应用中往往受制于资料系列问题难以推广应用,因此希望通过

运用水文领域经典的马尔科夫链模型对小金川河径流形势预估分析提供一种切实可行的思路和方法。

## 1 马尔科夫链模型基本原理

马尔科夫过程<sup>[13]</sup>的主要思路:当过程在时刻 $t_0$ 所处的状态为已知时,过程在 $t(>t_0)$ 所处的状态与过程 $t_0$ 时刻之前的状态无关,这种特性称为无后效性。用分布函数描述就是:如果对时间 $t$ 的任意 $n$ 个数值 $t_1 < t_2 < \dots < t_n, n \geq 3$ ,在条件 $X(t_i) = x_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ 下, $X(t_n)$ 的分布函数恰好等于在条件 $X(t_{n-1}) = x_{n-1}$ 下 $X(t_n)$ 的分布函数,即

$$F(x_n; t_n | x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1; t_{n-1}, t_{n-2}, \dots, t_1) = F(x_n; t_n | x_{n-1}; t_{n-1}) \quad (1)$$

式中, $n=3, 4, \dots$ ,则称 $X(t)$ 为马尔科夫过程或简称马氏过程。式(1)右端的条件分布函数为 $F(x; t_n | x'; t') = P(X(t) \leq x | X(t') = x'), t > t'$ ,称为马氏过程的转移概率。

式(1)等价于

$$f(x_n; t_n | x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, t_1) = f(x_n; t_n | x_{n-1}; t_{n-1}) \quad (2)$$

式中, $n=3, 4, \dots$ 。并由此证明 $X(t)$ 的 $n$ 维概率密度为

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = f_n(x_1; t_1) \prod_{k=1}^{n-1} f(x_{k+1}; t_{k+1} | x_k; t_k) \quad (3)$$

式中, $n=1, 2, \dots$ 。当取 $t_1$ 为初始时刻, $f(x_1; t_1)$ 为初始分布(密度)。式(3)表明马氏过程的统计特性由它的初始分布和转移概率所确定。

最简单的马氏过程是马氏链,即状态和时间参数都是离散的马氏过程。把状态转移时刻记为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,在 $t_n$ 时刻发生的转移称为第 $n$ 次转移;并假设在每一个时刻 $t_n (n=1, 2, \dots)$ , $X_n = X(t_n)$ 所可能取的状态(即可能值)为 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 。这时,相应于式(1)有

$$P\{X_n = a_{i_n} | X_{n-1} = a_{i_{n-1}}, \dots, X_1 = a_{i_1}\} = P\{X_n = a_{i_n} | X_{n-1} = a_{i_{n-1}}\} \quad (4)$$

如果进一步假设“在 $X_{n-1} = a_i$ 的条件下,第 $n$ 次转移出现 $a_j$ ,即 $X_n = a_j$ 成立”的概率与 $n$ 无关,那么可以把这个概率记为 $p_{ij}$ ,即

$$p_{ij} = P\{X_n = a_j | X_{n-1} = a_i\} \quad (5)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N; n = 1, 2, \dots$

并称其为马氏链的(一步)转移概率,它具有如下性

质: $p_{ij} \geq 0 (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 和 $\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

由转移概率 $p_{ij}$ 构成的矩阵,即

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

称其为马氏链的转移概率矩阵。该矩阵决定了 $X_1, X_2, \dots$ 状态转移过程的概率法则。

## 2 径流形势预估实例研究

### 2.1 研究区域概况

小金川河是大渡河的一级支流,流域面积5275 km<sup>2</sup>,北源为抚边河,在猛固桥处与东源沃日河汇合后,始称小金川河。猛固桥往下,河谷逐渐拓宽,水流趋缓,水量增大。两岸集镇、耕地、人口增多。小金川河总长60.8 km,落差472.6 m,平均比降7.8‰,流经小金县、丹巴县。

小金川流域共规划了13级电站。支流抚边河上有5级,分别为焦家、美卧、木坡、杨家湾、猛固桥水电站,其中美卧为龙头水库;支流沃日河上有4级,分别为日尔、中马厂、官寨、春厂坝水电站;小金川干流上有4级,分别为马桑寨、小金、三叉、太平水电站。结合小金川河流域水电站建设和地理位置情况,选取木坡水电站进行径流形势预估分析的实例研究。

### 2.2 流域径流特性分析

小金川流域径流在年内的变化与降雨基本相应。每年4月起径流随降水的增加而逐渐增加,6、7两月水量最充沛,9月次之,11月以后由于降水量的降低,径流开始以地下水补充为主,稳定退水至次年3月。径流年内分配极不均匀,主要集中于汛期。

木坡水电站丰水期(5月至10月)流量约占年径流量的85.0%,多年平均流量为60.2 m<sup>3</sup>/s,其中最丰的6、7两个月多年平均流量为84.3 m<sup>3</sup>/s,约占年径流量的39.4%。枯水期(11月至第2年4月)流量约占年径流量的15.0%,多年平均流量为10.9 m<sup>3</sup>/s,最枯段(1月至3月)多年平均流量为7.62 m<sup>3</sup>/s,约占年径流量的5.3%,最枯的2月份,多年平均流量为7.18 m<sup>3</sup>/s。年最大流量出现在5月下旬至7月,实测最大流量261 m<sup>3</sup>/s(1964年6月30日)。年最小流量一般出现在2、3月,最小月平均流量5.82 m<sup>3</sup>/s(1968年2月)。

木坡水电站多年平均流量及其年内分配如表 1 所示。径流年际间变化不大。木坡水电站最大年平均流量为  $48.2 \text{ m}^3/\text{s}$  (1965 年), 最小年平均流量为  $29.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (1967 年), 分别为多年平均流量的 1.35 倍和 0.83 倍, 最大与最小之比是 1.62。

表 1 木坡水电站月平均流量统计

月 份	多年平均流 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	年径流量 比例/%	月 份	多年平均流 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	年径流量 比例/%
1	8.28	1.97	7	80.60	19.20
2	7.18	1.54	8	52.80	12.60
3	7.37	1.68	9	58.80	13.50
4	12.50	2.88	10	39.20	9.32
5	42.70	10.20	11	18.50	4.12
6	88.10	20.30	12	11.30	2.69

### 2.3 径流形势预估及结果分析

根据马尔科夫链原理, 对小金川流域径流形势进行预估的具体步骤如下:

1) 排频分析: 对历史资料中木坡水电站 1959—2016 年的年平均流量按照从大到小的顺序进行排列, 并计算对应的频率, 确定木坡水电站年平均流量的频率曲线。

2) 丰平枯水电划分: 在木坡水电站年平均流量的频率曲线, 以频率 30% 及 70% 为界 (木坡水电站  $Q_{70\%} = 30.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{30\%} = 36.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 将长系列径流过程划分成 3 种情况, 确定每年的径流丰枯情况。其中,  $Q > Q_{30\%}$  为丰水年,  $Q < Q_{70\%}$  为枯水年,  $Q_{70\%} \leq Q \leq Q_{30\%}$  为平水年。

3) 流量丰枯变化统计: 按照年份从小到大的顺序, 分别统计上一年为丰水年且下一年为丰水年、平水年、枯水年的年数, 上一年为平水年且下一年为丰水年、平水年、枯水年的年数, 上一年为枯水年且下一年为丰水年、平水年、枯水年的年数。

4) 丰枯转换概率计算: 计算出木坡水电站历史径流系列中丰水年、平水年、枯水年相互转变的马尔科夫一步转移概率, 如表 2 所示。

5) 根据表 2 中的木坡水电站年平均流量转移概率表, 可以结合当年来水丰枯情况, 对木坡水电站下一年来水丰枯形势进行预估。

以 2018 年木坡水电站的丰枯形势预估为例, 2017 年木坡水电站的平均流量为  $37.91 \text{ m}^3/\text{s}$ , 属丰水年, 根据木坡站年平均流量转移概率表, 2018 年为平水年的概率最大, 为 0.555 6; 2018 年实测年平均流量为  $36.01 \text{ m}^3/\text{s}$ , 为平水年, 与预测结果一致。由此可见, 所建立的木坡水电站年平均流量转移概率表可用于指导小金川流域的径流形势预估。

表 2 木坡水电站年平均流量转移概率 单位: %

丰平枯级别	转丰水年	转平水年	转枯水平
丰水年	40.74	55.56	3.70
平水年	52.17	34.78	13.05
枯水年	57.14	14.29	28.57

备注: 丰水年来水保证率小于 30%, 流量大于  $36.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 平水年来水保证率介于 30% ~ 70% 之间, 流量介于  $30.5 \text{ m}^3/\text{s}$  ~  $36.8 \text{ m}^3/\text{s}$  之间; 枯水年来水保证率大于 70%, 流量小于  $30.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 3 结 语

基于马尔科夫链模型进行年径流形势预估, 建立了小金川河流域木坡水电站年平均径流丰枯转换的马尔科夫一步转移概率表, 并以 2018 年木坡水电站的丰枯形势预估为例进行实例分析, 验证了运用马尔科夫链模型预测小金川河流域径流形势的可行性, 该方法可为径流形势预估分析提供一种切实可行的思路和方法。

### 参考文献

- [1] 于国荣, 夏自强. 混沌时间序列支持向量机模型及其在径流预测中应用[J]. 水科学进展, 2008(1): 116-122.
- [2] 王勇, 顾海燕, 徐文科. 基于 ARMA 模型的河川年径流量预测[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2011, 27(3): 320-323.
- [3] 郭慧芳. 基于小波分析的径流中长期预报模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [4] 刘军号, 雷鸣, 程铁杰. 基于多元统计的河流年度径流预报及误差分析[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(17): 111-113.
- [5] 崔东文. 多隐层 BP 神经网络模型在径流预测中的应用[J]. 水文, 2013, 33(1): 68-73.
- [6] 王福振. 神经网络结合 SWAT 模型在河道径流量预测中的应用[J]. 水资源开发与管理, 2017(8): 67-70.
- [7] 丁晶, 邓育仁, 安雪松. 人工神经网络(BP)网络模型用作过渡期径流预测的探索[J]. 水电站设计, 1997(2): 70-75.
- [8] 林剑艺, 程春田. 支持向量机在中长期径流预报中的应用[J]. 水利学报, 2006(6): 681-686.
- [9] 廖杰, 王文圣, 李跃清, 等. 支持向量机及其在径流预测中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006(6): 24-28.
- [10] 张楠, 夏自强, 江红. 基于多因子量化指标的支持向量机径流预测[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1318-1324.

(下转第 23 页)

# 大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究

樊国旗<sup>1</sup>,刘桂龙<sup>2</sup>,樊国伟<sup>3</sup>,王志远<sup>3</sup>,赵普志<sup>3</sup>,卫瑞<sup>4</sup>,印欣<sup>3</sup>,曾林俊<sup>5</sup>

- (1. 国网金华供电公司,浙江 金华 321017; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司,上海 200031;  
3. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 西安西电避雷器有限责任公司,陕西 西安 710200;  
5. 湖南大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**新能源预测误差使系统调节能力不足导致新能源限电。为提高新能源消纳,结合自备电厂虚拟储能特点,提出大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法。首先分析新能源功率预测误差分布特点,然后将新能源预测功率按照一定置信度纳入发电计划,进而建立大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差调度模型。通过某地区实际数据验证所提模型的经济性和有效性,并针对关键因素灵敏度分析验证该模型的有效性。

**关键词:**新能源消纳;新能源预测误差;虚拟储能

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)02-0019-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210204

## Research on Large-scale Virtual Energy Storage Mode for Stabilizing New Energy Power Prediction Error

Fan Guoqi<sup>1</sup>, Liu Guilong<sup>2</sup>, Fan Guowei<sup>3</sup>, Wang Zhiyuan<sup>3</sup>, Zhao Puzhi<sup>3</sup>, Wei Rui<sup>4</sup>, Yin Xin<sup>3</sup>, Zeng Linjun<sup>5</sup>

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321017, Sichuan, China;

2. China Haisum Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200031, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

4. Xi'an XD Arrester Co., Ltd., Xi'an 710200, Shaanxi, China;

5. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** New energy prediction errors cause insufficient regulation of the system, resulting in new energy abandonment. In order to improve the new energy consumption, combined with the characteristics of virtual energy storage of self-owned power plants, an optimal dispatch method is proposed for the prediction error of new energy power stabilized by a large-scale virtual energy storage. Firstly, the distribution characteristics of new energy power prediction errors are analyzed, and the new energy prediction power is incorporated into the power generation plan according to a certain degree of confidence, and then a dispatching model for new energy power prediction error stabilized by a large-scale virtual energy storage is established. The economics and effectiveness of the proposed model is verified through actual data examples in a certain area, and aiming at the sensitivity analysis of key factors, the availability of the proposed model is verified too.

**Key words:** new energy consumption; new energy prediction error; virtual energy storage

## 0 引言

新能源可再生特点在促进经济可持续发展中发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>,但是新能源功率预测误

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)

差对电力系统调节能力带来巨大的压力<sup>[2]</sup>,导致新能源功率预测误差造成新能源限电。

目前主要通过电源侧、负荷侧及电力市场建设来促进新能源消纳<sup>[3-6]</sup>。文献[7-8]利用需求侧响应平衡新能源功率预测误差,促进新能源消纳。文献[9]通过电热综合系统联合调度应对风电功率预测不确定性,减少弃风。文献[10]利用储能减少

风电预测误差。文献[11]首先利用高斯分布拟合风电预测功率,然后利用源荷互动促进风电消纳。文献[12]将风电预测值和实际值聚类成多目标场景,然后利用风电-水电联合调度验证其优良调峰能力和经济效果。

某地区含有大量自备电厂,通过大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差,可促进新能源消纳。下面提出大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法,针对新能源预测功率误差问题,采取自备电厂虚拟平抑预测误差,并对比不含虚拟储能调度方法的系统成本及新能源限电情况,通过对某地区实际电网进行算例仿真,验证所提调度方法的可行性;并分析虚拟储能参与比例、新能源功率预测准确率和新能源预测功率纳入率等关键因素对新能源限电的影响。

## 1 新能源功率预测误差及其平抑调度方法

### 1.1 新能源功率预测误差分布

日前新能源预测功率基于输入风速、光照强度等拟合得到超短期新能源功率预测数据,预测误差较大。根据历史数据得到预测的置信度  $A_{\text{pos}}$ 。

$$A_{\text{pos}} = \left| 1 - \frac{|P_{n,f} - P_n|}{P_{n,f}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P_{n,f}$ 为新能源预测功率; $P_n$ 为新能源实际功率。

置信度  $A_{\text{pos}}$  为 95% 时,新能源功率预测准确性如图 1 所示。

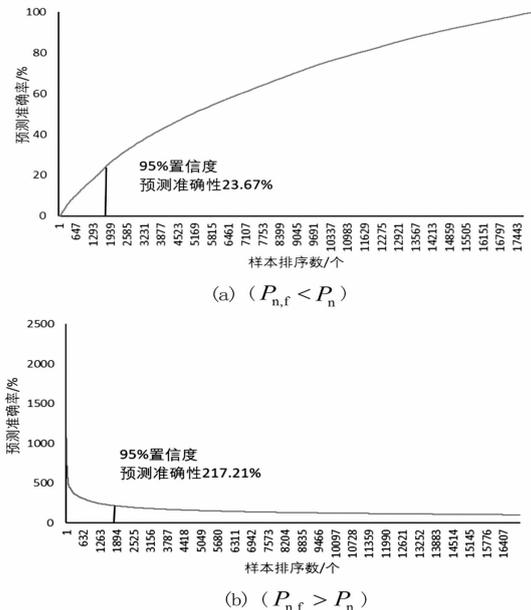


图 1 置信度 95% 时新能源功率预测准确性

由图 1 可知 95% 置信度时新能源预测准确率分别为 0.236 7 ( $P_{n,f} < P_n$ ) 和 2.172 1 ( $P_{n,f} > P_n$ )。

### 1.2 新能源纳入发电计划方法

由于新能源比例不断增高,因此需要将新能源纳入发电计划中。如果将新能源完全纳入发电计划,则可能因预测功率高于实际功率过大产生新能源限电,或者因预测功率低于实际功率过多导致失负荷。电网目标为可靠、安全、经济、高效和环境友好,其首要目标为可靠和安全,其次为经济和高效。因此为了电网可靠安全,将新能源按照一定置信度预测准确率纳入发电计划,尽量避免失负荷导致电网安全可靠问题。

首先,按照 95% 置信度的新能源预测准确率纳入发电计划;其次,将预测非自备负荷与纳入新能源预测功率拟合,得到考虑新能源预测准确率的预测非自备等效负荷  $P_{L,g,e,n}$ ,由于负荷预测准确率较高,因此用实际非自备负荷代替预测非自备负荷。

$$P_{n,n} = P_{n,f} \cdot A_{\text{pos}}^* \quad (2)$$

式中: $P_{n,n}$ 为纳入新能源预测功率; $A_{\text{pos}}^*$ 为所要求的置信度。

$$P_{L,g,e,n} = P_{L,g} - P_{n,n} \quad (3)$$

式中, $P_{L,g}$ 为非自备负荷。

由于自备企业负荷由自备电厂机组供电,因此需要独立考虑。自备负荷和非自备负荷组成系统负荷为

$$P_L = P_{L,g} + P_{L,z} \quad (4)$$

式中, $P_{L,z}$ 为自备负荷。

### 1.3 考虑虚拟储能平抑新能源误差调度方法

自备企业通过调整自备电厂机组出力参与大规模虚拟储能,平抑新能源预测功率误差。当新能源预测功率大于实际功率时,首先减少火电机组出力,当仍不能满足要求时,降低自备电厂机组出力;如果仍然不能满足要求,则将该部分新能源采取限电处理。当新能源预测功率小于实际功率时,首先增加火电机组出力;当仍不能满足要求时,增加自备电厂机组出力,此时如果仍然不能满足要求,则对该部分负荷采取失负荷处理。

## 2 调度计划

### 2.1 目标函数

调度目标:新能源限电量最小。

$$\min(\sum_{t=1}^T P_{n,a} \cdot t) \quad (5)$$

式中,  $P_{n,a}$  为新能源限电功率。

新能源限电及虚拟储能调用总成本  $C_e$  为

$$C_e = C_{n,a} + C_x \quad (6)$$

式中:  $C_{n,a}$  为新能源限电成本;  $C_x$  为虚拟储能调用成本。

系统总成本  $C_s$  为

$$C_s = C_e + C_f \quad (7)$$

式中,  $C_f$  为火电(自备)机组运行成本。

参与虚拟储能自备电厂同为火电机组,因此火电(自备)机组运行成本统一表示为

$$C_{f(z)} = \sum_{i=1}^{T_1} \sum_{i=1}^{N_1} [a_i \cdot (P_{f(z),i} \cdot t)^2 + b_i \cdot P_{f(z),i} \cdot t + c_i] \quad (8)$$

式中:  $T_1$  为火电(自备)机组运行总时间;  $N_1$  为火电(自备)机组数量;  $P_{f(z),i}$  为第  $i$  台火电(自备)机组的功率大小;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为火电发电二次、一次和常数成本系数。

新能源限电成本为

$$C_{n,a} = \sum_{t=1}^{T_2} P_{n,a} \cdot c_{n,a} \cdot t \quad (9)$$

式中:  $c_{n,a}$  为新能源限电单位限电成本;  $T_2$  为新能源限电时间。

虚拟储能调用成本为

$$C_x = \sum_{t=1}^{T_3} P_x \cdot c_x \cdot t \quad (10)$$

式中:  $P_x$  为虚拟储能调用功率;  $c_x$  为虚拟储能调用单位成本;  $T_3$  为虚拟储能调用时间。

## 2.2 约束条件

### 1) 系统功率平衡约束

日前功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^N P_{f,i} + P_{n,n} + P_x = P_{L,g} - P_{n,a} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i} - P_x = P_{L,z} \quad (12)$$

日内功率平衡约束为:

$$P_F + P_x + P_n = P_{L,g} - P_{n,a} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i} - P_x = P_{L,z} \quad (14)$$

式中,  $\sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i}$  为火电(自备)机组总功率。式(11)、式(13)为非自备负荷功率平衡;式(12)、式(14)为自备负荷功率平衡。

### 2) 火电机组约束

火电(自备)机组出力  $P_{f(z),i}$  约束为

$$P_{f(z),i}^{\min} \leq P_{f(z),i} \leq P_{f(z),i}^{\max} \quad (15)$$

式中:  $P_{f(z),i}^{\min}$  为第  $i$  台火电(自备)机组最小功率;  $P_{f(z),i}^{\max}$  为第  $i$  台火电(自备)机组最大功率。

爬坡约束为

$$\frac{dT}{dt} P_{f(z),i} \leq R^{\max} \quad (16)$$

式中:  $\frac{dT}{dt} P_{f(z),i}$  为火电(自备)机组爬坡速率;  $R^{\max}$  为机组最大爬坡速率。

### 3) 虚拟储能调用约束

$$P_x \leq \sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i} - \sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i}^{\min} \quad (17)$$

式中,  $\sum_{i=1}^{N_1} P_{f(z),i}^{\min}$  为总自备负荷最小功率。

## 3 算例分析

### 3.1 地区情况

某地区新能源短期预测功率、新能源实际功率、非自备负荷和自备负荷如图 2 所示,设虚拟储能调用成本为 50 元/MWh,新能源限电成本为 500 元/MWh。

火电(自备)机组参数见表 1。

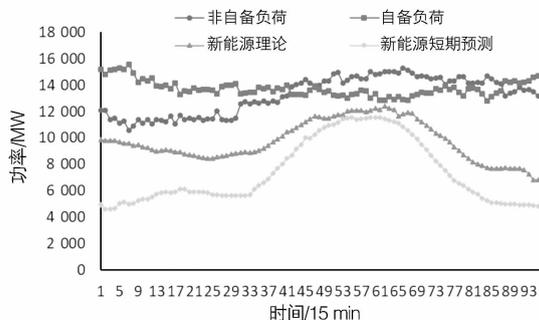


图 2 负荷和新能源曲线

表 1 火电(自备)机组参数

$P_{f(z)}^{\min}/MW$	$P_{f(z)}^{\max}/MW$	$R^{\max}/MW$	$a_i/元$	$b_i/元$	$c_i/元$
300	600	200	0.017 3	150	2250

### 3.2 效益评估

两种调度方法均以新能源限电量最小为原则,由于是混合整数非线性规划问题,这里采用 lingo12 进行计算,日前计划主要考虑电网安全。最大负荷与开机数量如表 2 所示。

表 2 火电(自备)机组开机数量

负荷	最大负荷/MW	开机/台
$P_{L,z}$	15 575.6	26
$P_{L,g,e,n}$	13 476.2	23

日前调度无虚拟储能参与新能源消纳和新能源消纳空间如图 3 所示;日前调度虚拟储能参与新能源消纳和新能源消纳空间如图 4 所示。

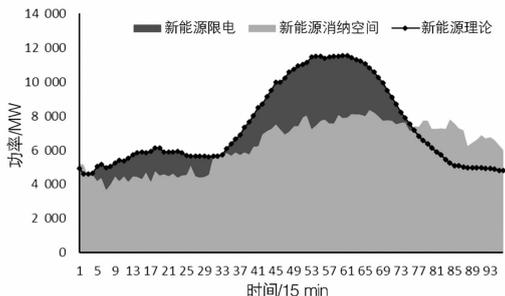


图 3 无虚拟储能日前新能源消纳

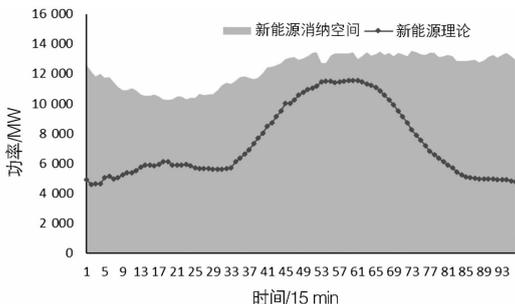


图 4 含虚拟储能日前新能源消纳

无虚拟储能日前新能源限电 33 613.4 MWh, 新能源限电率 19%;调用虚拟储能电量与新能源限电量相同。

日内调度无虚拟储能参与新能源消纳空间和新能源限电如图 5 所示。

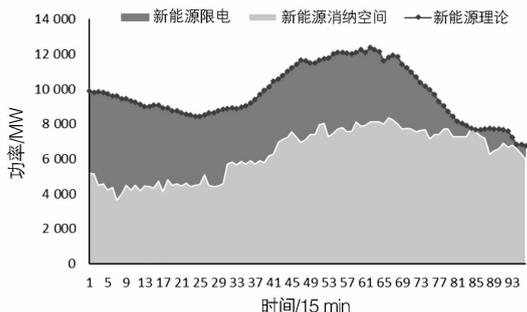


图 5 无虚拟储能日内新能源消纳

日内调度虚拟储能参与新能源消纳和新能源消纳空间如图 6 所示。

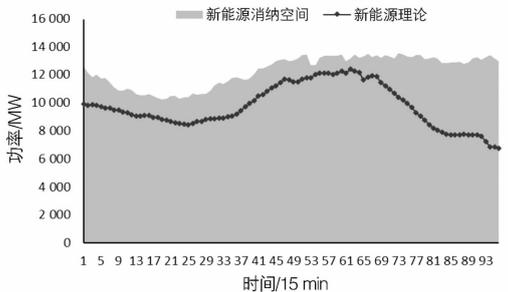


图 6 含虚拟储能日内新能源消纳

无虚拟储能日内新能源限电 81 807.3 MWh, 新能源限电率 35%;调用虚拟储能电量与新能源限电量相同。

不同调度方法下成本对比如表 3 所示。

表 3 调度成本对比

调度方法	$C_{n,a}$ /万元	$C_x$ /万元	$C_{f(x)}$ /万元	$C_s$ /万元
日前无虚拟储能	1 680.7	0	9 110.3	10 791.0
日前含虚拟储能	0	168.1	8 476.0	8 644.1
日内无虚拟储能	4 090.2	0	8 086.8	12 177.0
日内含虚拟储能	0	409.0	6 731.7	7 140.7

由表 3 可知,日前调度采用大规模虚拟储能模式,成本可减少 2 146.9 万元;日内调度采用大规模虚拟储能模式,成本可减少 5 036.3 万元。

### 3.3 关键影响因素的灵敏度分析

#### 1) 虚拟储能参与比例影响

虚拟储能参与比例与新能源限电率关系如图 7 所示。

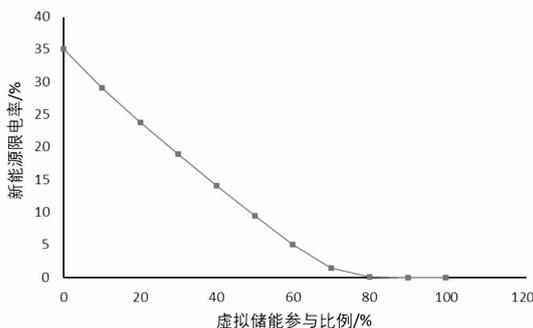


图 7 虚拟储能参与比例与新能源限电率关系

由图 7 可知,虚拟储能参与比例为 0 时,新能源限电率为 34.9%;虚拟储能参与比例为 80% 时,新能源限电率为 0。该新能源出力状况下,虚拟储能参与调度可实现全部消纳新能源。

#### 2) 新能源功率预测准确率影响

新能源功率预测准确率与满足无新能源限电时虚拟储能参与比例关系如图 8 所示。

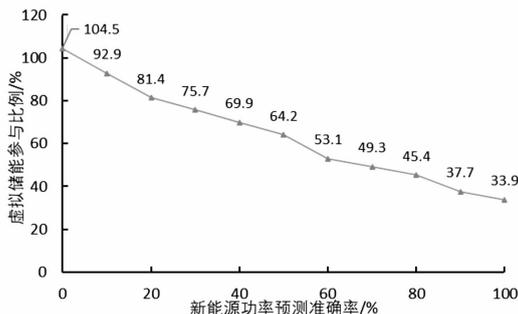


图 8 新能源功率预测准确率与虚拟储能参与比例关系

当新能源功率预测准确率达到 100% 时,虚拟储能参与比例为 33.9% 时不发生新能源限电。当新能

源功率预测准确率为0时,所需虚拟储能参与比例需达到104.5%,新能源才不会被限电,即当虚拟储能全部参与比例为100%时,仍会有102.3 MWh 新能源被限,限电率为0.04%。

### 3) 新能源预测功率纳入率影响

新能源功率预测功率纳入率与满足无新能源限电时虚拟储能参与比例关系如图9所示。

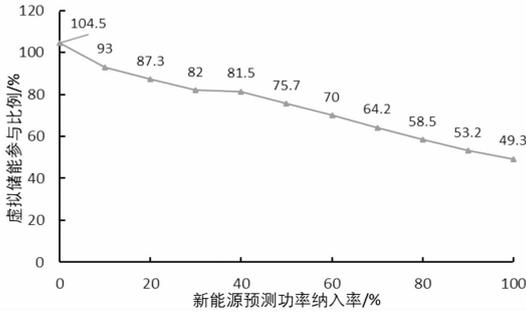


图9 新能源预测功率纳入率与虚拟储能参与比例关系

当新能源预测功率纳入率为100%时,虚拟储能参与比例为49.3%时不发生新能源限电。当新能源预测功率纳入率为0时,所需虚拟储能参与比例需为104%才不会发生新能源限电,即当虚拟储能参与比例为100%时,仍会有409.1 MWh 新能源被限,此时新能源限电率为0.1%。

## 4 结 语

1) 新能源功率预测准确率不高会导致系统调节能力不足,进而导致新能源限电;大规模虚拟储能可以平抑新能源功率预测误差,减少新能源限电。

2) 大规模虚拟储能参与比例提高可减少新能源限电率,因此需要提高虚拟储能参与比例,促进新能源消纳。

3) 新能源功率预测准确率越高、新能源预测功率纳入率越高,所需参与的虚拟储能越低;因此需要提高新能源功率预测准确率,间接提高新能源预测功率纳入率。

## 参考文献

- [1] 陈国平,梁志峰,董昱,基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(2):369-379.
- [2] 张振宇,王文倬,张钢,等. 基于非时序模型的新能源消纳能力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019,43(20):24-32.
- [3] 安天瑜,卓峻峰,杨宁,等. 风电实时调度系统设计与实现[J]. 电气自动化, 2019,38(4):25-27.
- [4] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等. 基于改进的电力现货交易下调度研究[J]. 四川电力技术, 2020,43(4):15-19.
- [5] 黄润,戴晓娟,赖晓文,等. 云南电力现货市场建设的关键问题探究[J]. 云南电力技术, 2020,48(6):42-47.
- [6] Y. Jiang, J. Hou, Z. Lin et al. Optimal under UoNthly Pre-listing BaLancing Mechanism in Actual Sctual Energy Dual-market in China[J]. IEEE AcCess, 2019, 7:70986-70998.
- [7] 李春燕,陈骁,张鹏,等. 计及风电功率预测误差的需求响应多时间尺度优化调度[J]. 电网技术, 2018,42(2):487-494.
- [8] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(14):3714-3723
- [9] 税月,刘俊勇,高红均,等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. 电力系统自动化, 2018,42(13):43-50.
- [10] 文本颖,李靖,宾雪,等. 风电场储能对于风电功率预测误差的影响及优化分析[J]. 能源与环境, 2020(2):103-105.
- [11] 易明月,童晓阳. 考虑风荷预测误差不确定性的动态经济调度[J]. 电网技术, 2019,43(11):4050-4057.
- [12] 苗树敏,滕子非,罗彬,等. 计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J]. 四川电力技术, 2020, 43(2):1-6.

### 作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,主要研究方向为电力系统调度与新能源消纳。 (收稿日期:2020-12-10)

### 作者简介:

陈仕军(1989),男,博士,助理研究员,研究方向为流域水电及新能源互补运行管理;

王亮(1990),男,硕士,工程师,研究方向电网及水电站经济运行;

陈刚(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制;

韩晓言(1965),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制。 (收稿日期:2021-01-20)

(上接第18页)

[11] 李红霞,何清燕,彭辉,等. 基于耦合相似指标的最近邻法在年径流预测中的应用[J]. 水科学进展, 2015, 26(2):161-168.

[12] 叶灏麟,王文圣,袁满. 不同相似指标下最近邻抽样回归模型在径流中长期预测中的应用比较[J]. 水电能源科学, 2017,35(12):14-17.

[13] 彭军. 基于马尔科夫链模型对河流径流量预测探析[J]. 水资源开发与管理, 2018(3):62-64.

# 基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究

杨悦<sup>1</sup>,陈仕军<sup>1</sup>,杨博宇<sup>1,2</sup>,杨承军<sup>3</sup>

(1. 四川大学水利水电学院,四川成都 610065;2. 国网四川省电力公司信息通信公司,四川成都 610041;  
3. 国网四川省电力公司,四川成都 610041)

**摘要:**电力工业对国民经济的发展起着先导和支撑作用,是能源发展的战略中心。同时,电力工业在中国节能减排和能源结构转型升级中担任重要角色。首先,结合“十三五规划”对能源发展的新要求,运用目标规划理论建立兼顾环境和经济目标的电源结构优化模型,研究电源资源的可持续发展问题;再以四川省电源结构资料为例进行仿真计算,利用碳价格系数,寻求经济与环境双重利好下的电源结构目标,验证所建模型的合理性和可行性,为电源结构优化问题研究提供一种新的思路和途径。

**关键词:**环境最优;经济最优;碳排放;碳价格系数;电源结构;目标规划

**中图分类号:**TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0024-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210205

## Research on Power Supply Structure Optimization Based on Environment and Economy Constraints

Yang Yue<sup>1</sup>, Chen Shijun<sup>1</sup>, Yang Boyu<sup>1,2</sup>, Yang Chengjun<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;  
2. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Electric power industry is the strategic center of energy development, which plays a leading and supporting role in the development of national economy. At the same time, the electric power industry plays an important role in energy conservation and emission reduction as well as energy structure transformation and upgrading. Based on the new requirements of the 13th Five-Year Plan for energy development, the target planning theory is used to establish a power supply structure optimization model that gives attention to the environmental and economic objectives, and the sustainable development of power resources is studied. And then, taking the data of power supply structure in Sichuan province for example, the simulation calculation is carried out, the carbon price coefficient is used to seek the target of power supply structure under the double benefits of economy and environment, and the rationality and feasibility of the proposed model are verified, which provides a new idea for the research of power supply structure optimization.

**Key words:** environmental optimization; economic optimization; carbon emission; carbon price coefficient; power supply structure; target planning

## 0 引言

中国共产党的第十八届五中全会审议通过了“十三五”规划纲要,首次提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”五大理念,“十三五”期间是全国电力转

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2016YFC0402205);四川大学“大学生创新创业训练计划”项目(C20191106658)

变发展方式、优化电源结构与布局的重要时机。电力作为最主要的二次能源,电力供应和安全事关国家安全战略和经济社会发展全局,在中国能源消费和生产中占有举足轻重的地位,其结构调整也是经济结构调整的重要组成部分。近年来,随着中国经济发展和人民生活水平进一步提高,用电需求快速增长。同时,电源结构逐渐向清洁可再生能源转变,用电需求与电源资源的时空分布不协调、区域性过

剩和发展不平衡的矛盾逐渐凸显。如何在满足国民经济发展和人民生活需要的前提下,降低用电成本,充分挖掘可再生电源资源,减少污染物排放,实现绿色电能,是当前面临的一个重要课题。

目前,国内外学者围绕电源规划模型进行了一定的探索,研究内容上主要围绕如何协调能源、环境、经济三者之间的关系。文献[1]建立了基于环境约束的电源结构优化模型。文献[2]建立了考虑系统调峰约束的水平年低碳电源规划模型,把碳排放量以碳成本的方式计入求总成本最低的目标函数。文献[3]基于目标规划理论,建立了考虑刚性需求、柔性需求的目标规划模型。文献[4]探讨了改进的遗传算法在电源规划中的应用,提出了环境友好系数的概念,建立了机组的环境效益模型,反映了发电机组在环境方面的特点。文献[5]通过微分进化算法求解电源规划模型,用改进熵权-物元可拓模型求解清洁能源的电源接入配电网对电网可靠性影响的显著指标。文献[6]介绍了目标规划理论的原理、特点、研究现状以及建模方法,建立了投资决策模型和电源规划的生产模型,并通过多阶段单纯形解法和遗传算法进行求解。

上述研究主要侧重于考虑某一方面目标的电源规划模型,鲜有综合考虑环境和经济约束的电源规划模型。下面将运用目标规划的理论,建立以经济最优和环境最优为目标函数,考虑资源约束、技术条件和政策约束等约束条件的电源结构优化模型,采用“抱团式”的规划思路<sup>[7]</sup>求解电源结构优化问题。最后,以四川省电源结构为例,开展实例研究,并与单目标模型进行对比分析,验证所建电源结构优化模型的合理性和可行性,以期为电源规划决策和调整提供科学的依据,助力能源供给侧结构性改革。

## 1 电源结构优化模型

### 1.1 目标函数

兼顾经济 and 环境的电源结构优化模型的目标函数主要包括总发电成本最小和碳排放总量最小两个方面的目标,分别如式(1)和式(2)所示。

$$\min C = \left( \sum_{m \in \Omega_m} X_{m,0} H_m c_{m,0} + \sum_{m \in \Omega_m} X_{m,t} H_m c_{m,t} \right) / 10^4 \quad (1)$$

式中: $C$ 为系统的总成本,亿元; $\Omega_m$ 为待规划电源类型的集合,包含火电、水电、风电、光伏发电等其他电

源; $X_{m,0}$ 为第 $m$ 类电源的初始装机量, $10^7$  W; $X_{m,t}$ 为第 $m$ 类电源在 $t$ 年的新增装机量,W; $c_{m,0}$ 为第 $m$ 类电源的标杆电价,元/kWh; $c_{m,t}$ 为第 $m$ 类电源在 $t$ 年的边际电价,元/kWh; $H_m$ 为第 $m$ 类电源的利用小时,h。

$$\min E = \sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) H_m e_m / 10^4 \quad (2)$$

式中: $E$ 为系统的总碳排放量, $10^8$  g; $e_m$ 为第 $m$ 类电源的碳排放量,g。

### 1.2 约束条件

电源结构优化模型还需满足以下约束条件:

#### 1) 电量需求约束

电量需求约束即所有电源的发电量必须满足全社会用电,包含省内电量需求和外送电量需求。其约束条件为

$$\sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) H_m / 10^4 \geq D_{in,t} + D_{ex,t} \quad (3)$$

式中: $D_{in,t}$ 为 $t$ 年的省内需求电量; $D_{ex,t}$ 为 $t$ 年的外送电量。

#### 2) 可靠性约束

经济和社会对电力的需求还包括持续、可靠的供电。电力供应的安全性,主要在于一次能源资源供给的可靠程度,风电、光伏发电等可再生能源由于间歇性和不可控性,对负荷供电的可靠性较传统电源效果差。因此电力系统需要一定的备用容量以保证系统的供电可靠性和电源性能,即系统在目标年全部可用装机容量应大于或等于省内和省外的最大负荷与必要的备用容量之和。其约束条件为

$$\sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) \eta_m \geq L_{in,t}^{\max} (1+r) + L_{ex,t} \quad (4)$$

式中: $\eta_m$ 为各类电源的可利用率; $L_{in,t}^{\max}$ 为 $t$ 年的省内最大负荷需求; $r$ 为电力备用率; $L_{ex,t}$ 为 $t$ 年的外送需求。

#### 3) 最大装机容量约束

对于各类电源,由于受可开发的资源量、设备生产供应能力等的限制,其扩展容量存在上限。其约束条件为

$$X_{m,t} \leq X_{m,t}^{\max} \quad \forall m \quad (5)$$

式中: $X_{m,t}^{\max}$ 为第 $m$ 类电源在 $t$ 年的最大扩展容量。

#### 4) 电源结构约束

各类电源的发电装机比例应该小于目标年份该地区的非化石能源发电装机比例目标。其约束条件为

$$1 - (X_{h,0} + X_{h,t}) / \sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) \geq P_t \quad (6)$$

式中: $X_{h,0}$ 为火电的初始装机量; $X_{h,t}$ 为 $t$ 年的火电扩展装机量; $P_t$ 为 $t$ 年的非化石能源装机比例。

表 1 四川省电源装机基本参数

电源类型	现有装机/ 10 <sup>4</sup> kW	利用小时/h	可利用率/%	标杆电价/ (元/kWh)	2025 年边际电价/ (元/kWh)	2030 年边际电价/ (元/kWh)	碳排放量/ (g/kWh)
水电	7564	4000	0.95	0.308 0	0.601	0.694	4.8
火电	1662	4000	1.00	0.401 2	0.591	0.591	270.0
风电	210	2200	0.15	0.570 0	0.480	0.480	33.7
光伏	135	1400	0.15	0.750 0	0.550	0.500	34.3

## 2 实例分析

### 2.1 基础数据

为了验证上述模型的合理性和可行性,以作为全国优质清洁能源基地和国家清洁能源示范省的四川省为例开展模型验证研究。四川省的电源结构以水电、风电、太阳能发电等非化石能源发电为主,同时还包含燃气机组、燃煤机组等多种类型的发电资源。四川省能源资源呈现“水多、气丰、煤少、油缺”的特点,风光资源不多,且主要集中于“三州一市”地区。为便于计算,结合四川省电源结构特点,只考虑水电、火电、风电和光伏 4 种电源类型。经资料查询和整理,参考《四川省电力需求预测研究报告》<sup>[8]</sup>中负荷水平数据,得到四川省电源装机基本参数如表 1 所示,四川省电力需求预测情况如表 2 所示。

表 2 四川省电力需求预测情况

水平年	全社会用电/ 10 <sup>8</sup> kWh	外送规模/ 10 <sup>7</sup> kW	外送利用 小时/h	最大负荷 需求/10 <sup>4</sup> kW
2025	3500	4060	4000	6730
2030	4180	4060	4000	8030

根据《四川省“十三五”能源发展规划》<sup>[9]</sup>,到 2020 年全省非化石能源发电装机比例为 83.5%。2025 年风电和光伏的装机量分别要达到 10 GW、5 GW;2030 年分别达到 14 GW、7.5 GW。结合不同开发时序下各水平年四川水电装机规模情况,2025 年、2030 年水电装机容量上限分别为 108.39 GW、124.95 GW。火电包含燃煤机组、燃气机组、生物质机组和余热余压机组,这里以燃煤火电机组为优化对象。根据四川省的实际情况,燃煤火电机组装机容量的下限取 16 GW、上限取 20 GW,生物质、天然气和余热余压的总装机容量在 2025 年和 2030 年分别取 4.56 GW 和 5.06 GW。

将上述数据代入电源结构优化模型,所建模型为线性模型,可输入 LINGO 软件进行求解。同时,为便于分析兼顾经济和环境最优的电源结构优化模型的效果,分别将以经济最优为目标和以环境最优

为目标的电源结构优化模型的计算结果,与双重目标下的计算结果进行对比。

### 2.2 计算结果

由于两个目标函数都需要兼顾,两者的重要性难以准确判断,若直接选取权重系数将其转换为单目标函数的话,得到的结果受主观因素影响较大,不尽合理。为了在两组含义不同的数据中间找到平衡,考虑通过碳排放成本对碳排放总量数据进行转换,加以比较综合经济与环境指标得出较优的组合。

为实现减排目标,中国于 2017 年年底,启动了全国碳排放交易系统(emission trading scheme, ETS)。在 ETS 中,碳价格是决定减排目标能否实现的关键因素,最优碳价格是实现减排目标的最小边际减排成本。目前,中国碳价格太低,无法在地区排放交易机制中实现 2030 年的排放强度目标,因此需提高碳价格。最新的一项研究通过模拟中国 ETS 不同行业的边际减排成本曲线,计算了不同行业覆盖情景下的最优碳价格,其中电力部门承担着最大的减排任务<sup>[10]</sup>。研究表明,边际减排成本随着行业参与度的增加而降低,为实现到 2030 年将碳强度从 2015 年水平降低 42%~50% 的目标,该文献提出了以下可能性:如果中国 ETS 只覆盖电力行业,碳价格至少 1140 元/t;如果覆盖 3 个行业,碳价格至少 680 元/t;如果覆盖 8 个行业,碳价格至少 345 元/t。这里以 345 元/t 为碳价格进行数据的转换比较,得到表 3 的电源结构优化结果。

按照上述基础资料,分别将经济最优和环境最优的单目标优化结果整理如表 4 所示。

### 2.3 结果分析

由表 3 可知,采用的规划模型不同,规划后的经济指标和环境指标有较大差别。以经济最优的优化模型中只考虑经济成本没有考虑环境效益,虽然水电的标杆电价比火电小,但其开发阶段投资成本高,边际电价高于火电,所以在只考虑经济的目标函数下火力发电占很大优势,火电的装机容量直接受到清洁能源比例和火电装机容量上限的影响。以环境

表3 兼顾经济与环境最优的电源结构优化结果

项目	2025年		2030年	
	装机容量/ 10 <sup>4</sup> kW	比例/%	装机容量/ 10 <sup>4</sup> kW	比例/%
水电	10 029	73.82	10 971	70.21
火电	2056	15.13	2506	16.04
风电	1000	7.36	1400	8.96
光伏	500	3.68	750	4.80
清洁能源 比例/%	84.87		83.96	
总用电 成本/亿元	2 036.3		2 554.5	
碳排放 总量/10 <sup>10</sup> kg	2.51		3.06	

表4 单目标下电源结构优化结果

项目	2025年		2030年	
	经济最优	环境最优	经济最优	环境最优
装机容量/ 10 <sup>4</sup> kW	水电 9844	10 029	10 971	11 371
	火电 2241	2056	2506	2106
	风电 1000	1000	1400	1400
	光伏 500	500	750	750
清洁能源比例/%	83.50	84.87	83.96	86.52
总用电成本/亿元	2 035.6	2 036.3	2 554.5	2 571.0
碳排放总量/10 <sup>10</sup> kg	2.71	2.51	3.06	2.63

最优的优化模型中只考虑环境效益,因水电的碳排放量远小于火电,所以水电的装机容量上升,火电装机容量减少。此外,由不同水平年对比可知,由于水电、风电、光伏等可再生能源有较好的环境效益,能够削减发电的碳排放量,降低环境成本,进而减少总投资。

由表3、表4可知,考虑了碳排放成本后,2025年的兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化结果与环境最优的单目标优化结果相同,这说明为了实现我国节能减排目标而设定的最优碳价格下,身负重任的电力行业将尽量以环境最优为第一优先级考虑电源结构的优化。2030年的优化结果则与经济最优的单目标优化结果相同,这表明在水电开发日益饱和,未来投资的边际成本越来越高的情况下,一味想着增加水电装机并不是最明智的选择,应该大力发展风电、光伏等清洁能源,同时也应当运用超越临界技术适量发展火电。由此可见,所建立的兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化模型的结果更加符合四川省电源的实际情况,更加科学合理,能够更好地为四川电力行业发展方向提供科学指导。

### 3 结 语

上面建立了兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化模型,并以四川省电源结构优化为例进行实例分析,以碳价格系数为桥梁进行多目标优化求解,得到了经济与环境双重利好下的电源结构优化结果。将其与经济最优和环境最优的单目标优化结果进行对比,验证了所建电源结构优化模型的合理性和可行性,该模型可为电源结构优化和电源规划提供一种科学有效的工具。

#### 参考文献

- [1] 施应玲,刘媛媛. 基于环境约束的电源结构优化研究[J]. 中国电力,2009,42(9):16-19.
- [2] 罗金山,路畅,孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):47-52.
- [3] 尚美美,董福贵. 含清洁能源的电源结构协调优化[J]. 电力科学与工程,2016,32(8):27-31.
- [4] 袁建党,袁铁江,晁勤,等. 电力市场环境下的大规模风电并网系统电源规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):22-26.
- [5] 刘姣. 含清洁能源的多种电源结构协调优化问题的研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [6] 魏本宁. 基于目标规划理论的电源规划方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
- [7] 田鑫,孙彦龙,牛新生,等. 促进负荷中心实现低碳发展的送电模式[J]. 电网技术,2015,39(3):663-668.
- [8] 国网四川省电力公司经济技术研究院. 四川省电力需求预测研究报告[R]. 2018.
- [9] 四川省发展和改革委员会,四川省能源局. 四川省“十三五”能源发展规划[R]. 2016.
- [10] Tang B J, Ji C J, Hu Y J, et al. Optimal Carbon Allowance Price in China's Carbon Emission Trading System: Perspective from the Multi-sectoral Marginal Abatement Cost [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253:119945.

#### 作者简介:

杨悦(1998),女,本科,研究方向为水文与水资源工程;  
陈仕军(1989),男,博士,助理研究员,研究方向为水电能源系统优化配置等;

杨博宇(1990),男,博士,工程师,研究方向为水电运行管理及电力市场;

杨承军(1964),男,高级统计师,研究方向为电网投资与计划管理。

(收稿日期:2020-07-23)

# “碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想

叶强,胥威汀,汪伟,王海燕,刘阳,李旻,唐权  
(国网四川省电力公司经济技术研究院,四川成都 610041)

**摘要:**中国提出力争2030年前实现碳达峰,争取2060年前实现碳中和,为中长期中国应对气候变化指明了方向,将对中国的能源和经济系统产生深远的影响。为支撑全国“碳中和”目标的实现,首先,分析了“碳中和”的目的和意义、国内外“碳中和”措施和政策;然后,提出了四川电力系统减碳的路径构想,并提出了需提前准备应对大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求;最后,经初步估算,该路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。

**关键词:**碳中和;电力;减碳;发展战略

**中图分类号:**TK01 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0028-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210206

## Path Design of Carbon Emission Reduction of Sichuan Power System for Carbon Neutrality

Ye Qiang, Xu Weiting, Wang Wei, Wang Haiyan, Liu Yang, Li Ming, Tang Quan  
(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** China will achieve the goal of peak carbon dioxide emissions in 2030 and carbon neutrality in 2060, which will have a profound impact on China's energy and economic system. Firstly, the purpose and meaning of carbon neutrality, and the policies and measures at home and abroad for carbon neutrality are analyzed. Secondly, the path design of carbon emission reduction of Sichuan power system for carbon neutrality is proposed. Finally, the suggestions for integration of large-scale renewable energy, flexible resource allocation, stability of large system with low inertia, high elasticity of power grid are proposed. According to the preliminary estimation, carbon emission reduction in Sichuan will occupy about 3% of the goal of national carbon neutrality.

**Key words:** carbon neutrality; power system; carbon emission reduction; development strategy

## 0 引言

中国国家主席习近平2020年9月22日在第七十五届联合国大会宣布:中国将提高自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现“碳中和”。这是中国首次向全球明确实现“碳中和”的时间点,也是迄今为止各国中做出的最大减少全球变暖预期的气候承诺。2020年12月12日习近平主席在气候雄心峰会上进一步宣布:到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,森林蓄积量将比2005年增加 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,

风电、太阳能发电总装机容量将达到1200 GW以上。

四川是中国最大清洁能源基地,为支撑全国“碳中和”目标的实现,下面分析了“碳中和”的目的和意义、国内外“碳中和”措施和政策。根据新形势下的变化分析了四川电力减碳的路径构想,并提出了需提前准备应对大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求。经初步估算,该战略路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。

## 1 “碳中和”的目的和意义

“碳中和”是指在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形

式,以抵消自身产生的二氧化碳排放量,实现二氧化碳“零排放”。“碳中和”涉及政府行为、企业行为、个人行为,需要全民族的共识和全社会的行动。

“碳中和”旨在减少碳排放,控制温室效应。为应对气候变化所造成的影响,各国政府于2015年达成的《巴黎协定》提出要将全球平均气温相比于工业革命前的升幅控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 以内,并努力控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以下。根据最新评估模型和情景研究,若要将温升控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 范围内,中国需要在2080年左右实现“碳中和”;若要将温升控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 范围内,需要在2060年左右实现“碳中和”。

实现“碳中和”有利于能源经济和生态文明良性发展。对内有利于经济结构、能源结构、产业结构转型升级;有利于生态文明建设和生态环境保护、生态环境质量持续改善;有利于国内大循环为主体、国内国际双循环发展格局的形成。对外有利于中国国际政治形象提升和国际影响力的增强;有利于生态文明和美丽地球建设;有利于全球“碳中和”目标的尽早实现。

## 2 “碳中和”国内外现状

“碳中和”是世界各国应对气候变化的重要手段,根据《巴黎协定》中各国碳排放承诺目标,全球各国均根据本国发展情况制定相关支持政策<sup>[1]</sup>。

欧盟及日本等发达经济体采取较为积极支持政策,稳步推进主要碳排放部门减排。欧盟委员会于2018年年底发布了2050年零净碳排放量计划,计划到2050年实现“碳中和”,即将净碳排放量降至0;日本于2019年制定了《巴黎协定下的长期战略》,其中提出到2030年温室气体较2013年减排26%,2050年减排80%,到本世纪下半叶尽早实现温室气体排放中和的目标。德国2019年可再生能源发电比例达到46%,创历史新高,计划到2050年实现总发电量中可再生能源占80%以上。法国计划到2050年全国电力全部来自清洁能源。瑞典、奥地利已于2020年关闭了所有燃煤电厂。法国、英国分别宣布到2021年、2025年关闭所有燃煤电厂。芬兰计划更为彻底,到2030年将全面禁止使用煤炭。此外,挪威计划到2025年禁售全部燃油汽车;丹麦、荷兰、爱尔兰计划到2030年实现燃油车禁售;法国、西班牙、英国、葡萄牙计划到2040年实现此目标。减碳措施总体而言:能

源供应方面,提高可再生能源装机及应用比例,减少煤炭利用;交通运输方面,推广电动汽车应用,降低燃油汽车排放标准;工业生产方面,促进碳排放与工业生产脱钩,降低钢铁、水泥等行业碳排放量;建筑物排放方面,提高建筑物及设备能效标准,并要求新建房屋“零能耗”。美国、印度等国,在“碳中和”目标实现上政策较为保守甚至出现倒退。

中国采取有力措施应对气候变化。2013年制定了《国家适应气候变化战略》,出台了行业适应气候变化政策。2015年向联合国提交了国家贡献目标;二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达到峰值。2016年在《能源生产和消费革命战略2016—2030》制定出各阶段目标,综合运用调整产业结构和能源结构、节约能源和提高能效、增加森林碳汇和制度创新等多种手段,大幅度降低了能源消耗强度和二氧化碳排放强度,有效地控制了温室气体排放。2019年碳排放强度比2005年降低48.1%,提前完成2020年控制温室气体排放目标,据转了二氧化碳排放快速增长的局面。

世界主要国家二氧化碳逐年排放量及2019年碳排放比例分别如图1和图2所示。

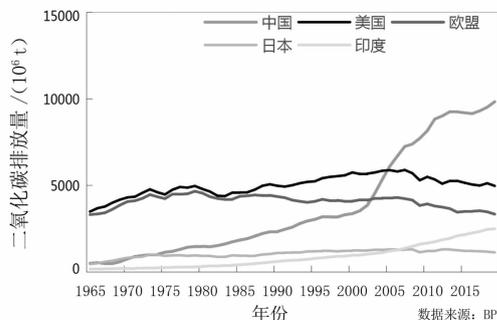


图1 世界主要国家二氧化碳逐年排放量

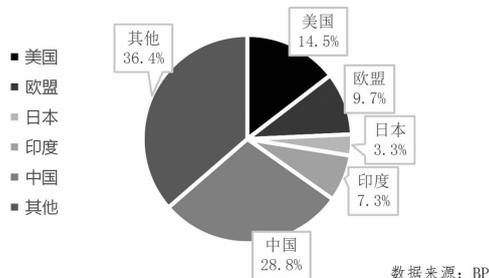


图2 2019年世界主要国家二氧化碳排放比例

## 3 四川电力减碳路径构想

### 3.1 四川碳排放现状

四川碳排放已阶段性达到峰值。四川在有效的环

保减排政策和“清洁替代、电能替代”等一系列举措下,通过调整能源结构、提高节能技术、优化产业结构等措施,节能减排成效显著,单位 GDP 能耗呈下降态势,“十一五”和“十二五”分别降低了 20.3% 和 25.2%,“十三五”以来降低了 16.0%。二氧化碳排放总量在 2013 年阶段性达到峰值  $3.42 \times 10^8$  t,此后开始逐年下降,2019 年已降至  $3.04 \times 10^8$  t。相比于发达国家和东部发达地区,四川经济基础较为薄弱,人均 GDP、城镇化率均低于全国平均水平,持续推进工业化、城镇化和农业现代化对碳排放仍有刚性需求。伴随着成渝地区双城经济圈的建设,碳排放极有可能出现新的峰值。四川逐年二氧化碳排放量和单位产值能耗见图 3。

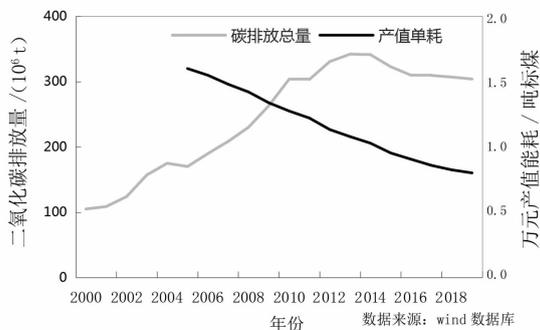


图 3 四川逐年二氧化碳排放量和单位产值能耗

四川为减少碳排放作出了巨大贡献。2019 年四川可再生能源发电量 341 500 GWh,占全部发电量的 87.5%,高于全国平均水平 56.4 个百分点,相当于减排二氧化碳  $2.86 \times 10^8$  t。碳排放强度为 0.65 t/万元,仅全国平均水平的 66%,居全国 22 位,是中西部最低省份之一,仅高于西藏。

四川可率先实现“碳中和”。作为全国最大的清洁能源基地,四川省碳排放总量和人均排放均处于较低水平。2019 年四川碳排放占全国 3%,居全国第 12 位,而 GDP 占全国 4.7%,居全国第六;人均碳排放约 36 300 t/a,仅为全国平均水平的 50%,是除西藏外人均碳排放最低的省份。清洁能源是四川目前保持较低碳排水平的重要原因。依托清洁能源优势,四川可提前实现省内“碳中和”,并可向省外输出净碳减排量。四川省碳排放总量和人均排放均还处于较低水平。

### 3.2 电力减碳的必要性

电力系统降低碳排放是实现“碳中和”的必然要求。自 2005 年起,中国已成为世界第一碳排放国,2019 年全球二氧化碳排放总量为  $3.3 \times 10^{10}$  t 左

右,其中中国二氧化碳排放量达到 28.8%,见图 1 和图 2。能源生产,主要是电力和热力生产是中国最大的二氧化碳排放行业,2018 年电力和热力生产行业二氧化碳排放量占总排放量比例已超过 50%<sup>[3]</sup>,详见图 4。可见,电力系统降低碳排放是“碳中和”中至关重要的一环,电力减碳是实现“碳中和”的重要路径和手段。

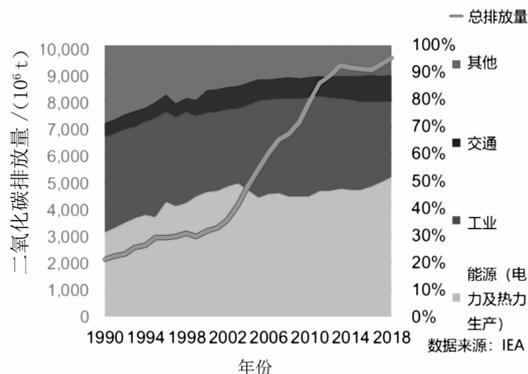


图 4 1990—2018 年中国主要排放行业二氧化碳排放量

### 3.3 减碳路径

通过推动能源生产低碳化、能源消费电气化及电网降损等措施,可大大降低二氧化碳排放量。以 2060 年实现以上减碳总量为目标,努力实现全国“碳中和”。

#### 3.3.1 加速推进能源生产低碳化

持续开发水力发电,适度发展天然气发电,大力发展风力和光伏发电<sup>[4]</sup>,适时发展生物质发电,安全高效发展核电,严控煤电规模并有序退出<sup>[5]</sup>。预计 2060 年清洁能源每年可发 998 400 GWh 电量,减排  $9.294 8 \times 10^8$  t 二氧化碳。相对 2019 年减排  $6.211 7 \times 10^8$  t。

1) 持续开发水力发电。水力发电效率高,不产生碳排放,绿色环保,具有较高的技术成熟度、能源密度以及较优的经济性,长期在中国电力低碳转型中发挥着战略性作用。四川境内河流众多,水力资源丰富,技术可开发量 148 GW,年发电量 676.4 TWh,位居全国第一;经济可开发量 145 GW,年发电量 659.4 TWh。水电是四川最具优势的清洁能源,目前已累计外送电量超过 1000 TWh,为减排做出了巨大贡献。2019 年年底,四川水电装机 78 460 MW,开发率仅五成,后续开发空间依然较大。

2) 适度发展天然气发电。相比煤电,气电碳排放低,每千瓦时的发电量的二氧化碳排放约为煤电的 44%;相比风电光伏,气电更加稳定、灵活,有优秀的

调峰性能,建设一定比例的气电,有利于维持电网安全稳定运行。目前制约气电发展的因素主要有天然气对外依存度高、上网电价高以及燃气发电核心技术尚未完全掌握。随着国内燃机、页岩气开采技术的提升,气电的发展空间巨大。四川天然气资源丰富,是全国三大气田之一,根据全国第二次油气资源评价结果,四川盆地天然气总资源量为  $7.1851 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,约占全国天然气资源总量的 19%。

### 3) 严控煤电规模并有序退出

煤电在中国的发电结构中占有主导地位,约占发电量 50% 以上。要实现“碳中和”,必须严控煤电规模并有序退出,煤电的发电量由可再生能源来替代,这是实现电力减碳的重点所在。四川省煤炭资源贫乏,煤炭资源保有储量约  $1.227 \times 10^{10} \text{ t}$ ,探明储量仅占全国总储量的 1% 左右,电煤主要依靠本地煤炭及铁路运输供给本地煤电机组。宜按“先小后大”的原则有序退出煤电装机,同时在电力系统中发展电化学储能,提高电网运行灵活性。

4) 安全高效发展核电。核电是一种清洁能源,不排放二氧化碳和烟尘,具有经济性、高效性和安全性的特点,发展核电是电力减碳的有效途径。目前中国核电规模较小,发展潜力巨大。目前已完全掌握以华龙一号、AP1000 为代表的三代核电技术,并具有完全自主知识产权,部分领域已达到了国际领先水平,并在积极开展小堆、四代堆、热核聚变等新一代核电技术的研发。四川铀矿资源丰富、地质稳定、河流众多,同时拥有中国核动力研究院、核工业西南物理研究院、中国工程物理研究院等核技术研发单位,有东方电气等核电设备制造单位,发展核电具有得天独厚的优势。

5) 快速提升风电和光伏发电装机。新能源分布广,具备可再生特性,可供永续使用,不产生碳排放。四川省风能资源集中在川西高原和盆周山地,其中以德昌为中心的安宁河谷、茂县为中心的岷江河谷、丹巴为中心的大渡河谷资源较好,盆周地区也具有潜在

开发价值。初步估算目前全省离地 50 m 高的风能理论储量为 88 350 MW,潜在开发量 15 000 MW。

川西高原太阳能相对富集,是四川省乃至中国太阳能的主要分布区,年总辐射量在  $5000 \text{ MJ/m}^2$  以上。全省太阳能理论蕴藏量每年约  $8.0 \times 10^5 \text{ t}$  标准煤,其中三州一市约占全省的 72%。

6) 适时发展生物质发电。生物质属于清洁的可再生能源,燃烧后的二氧化碳排放属于自然界的碳循环,利用生物质发电可大限度降低环境污染问题,也可降低化石能源消耗。四川生物质能源比较丰富,每年有可待开发利用的人畜粪便  $3.149 \times 10^7 \text{ t}$ ,薪柴  $1.189 \times 10^7 \text{ t}$ ,秸秆  $4.212 \times 10^7 \text{ t}$ ,沼气约  $1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。适时建设一定规模的生物质发电,可减少二氧化碳的排放。

综合考虑了四川能源资源禀赋、发电技术约束及电力电量平衡等因素,清洁能源装机规模建议详见表 1。

### 3.3.2 持续推动终端用能电气化

加快电能替代,推动电能工业、建筑、交通等领域以电代煤、以电代油、以电代气、以电代柴的广泛应用,形成以电能为主的能源消费格局,将大幅提高中国能效水平,降低二氧化碳排放强度<sup>[6]</sup>。预计 2060 年汽车保有量约 3000 万辆,全部实现电动化,用电量为  $4.5 \times 10^{10} \text{ kWh}$ ,节约替代燃油超过  $6.96 \times 10^7 \text{ t}$ ,减少二氧化碳排放超过  $1.166 \times 10^8 \text{ t}$ 。相对 2019 年减排  $1.1648 \times 10^8 \text{ t}$ 。

### 3.3.3 提高电网传输效率

1) 电网技术设备低碳更新:增强科研力量重点研究 SF<sub>6</sub> 泄露监测技术和回收再利用技术<sup>[7]</sup>,加强 SF<sub>6</sub> 气体回收工作,最大限度减少 SF<sub>6</sub> 的排放。据测算,国网四川省电力公司每年回收 SF<sub>6</sub> 气体约 3.5 t,相当于年降低碳排放  $8.3 \times 10^4 \text{ t}$ ,净化再生气体回用至设备,可节约新气购置费约 50 万元,低碳和经济效益可观。

2) 电网低碳调度控制<sup>[8]</sup>:充分利用四川省内的

表 1 2019—2060 年四川省清洁能源装机构成

单位:MW

年份	水电	风电	太阳能	气电	生物质	核电	合计
2019	78 460	3030	1880	820	530	0	84 730
2025	112 340	10 000	10 000	4000	1420	0	13 770
2030	133 190	1400	20 000	4000	1520	0	172 720
2035	139 400	1700	30 000	4000	1600	0	192 000
2060	145 000	70 000	5 0000	4000	3000	15 000	287 000

清洁能源发电资源和储能技术,开展水风光储协调的低碳调度,在煤电退出以前通过对各类发电机组按能耗排序联合经济调度,以优化电网潮流与清洁能源的利用和消纳。

3) 电网节能降损:通过合理规划电网结构、调整运行方式、加强管理等手段来降低电网的能量损耗。网损在电能传输过程中并未直接导致碳排放,但其源端的化石燃料燃烧发电因这部分损耗产生了实际的碳排放。2019年,国网四川省电力公司综合线损率为7.65%,损失电量为 $1.807 \times 10^{10}$  kWh,若分摊至火电,相当于 $2.39 \times 10^6$  t的二氧化碳排放。这意味着在其他条件不发生变化的情况下,当前四川电网线损率每降低1个百分点,折合减排二氧化碳约 $3.35 \times 10^5$  t。考虑化石能源发电规模变化,能够得到逐年减排规模。

经初步估算:预计2030年,四川电力每年可贡献二氧化碳减排量 $6.17 \times 10^8$  t,相对于2019年减排 $3.08 \times 10^8$  t;预计2060年,四川电力每年可贡献二氧化碳减排量 $1.046 \times 10^9$  t,相对于2019年减排 $7.38 \times 10^8$  t。四川电力贡献减碳量估算见图5和表2。

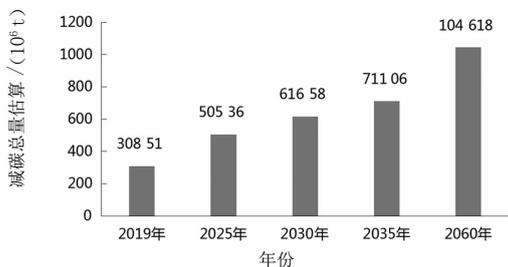


图5 四川电力减碳总量估算

四川电力减碳路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。根据以上路径分析,若能按期实现减碳目标,则到2030年,四川电力能为全国贡献 $3.08 \times 10^8$  t碳减排量;2030—2060年,四川电力能通过源、网、荷多个维度的路径,实现 $4.29 \times 10^8$  t碳减排量(含电动汽车接入),为全国

减碳目标做出约3%的贡献值。

按照规划,四川将在现有的“四直六交”跨省跨区外送通道的基础上规划新增雅中—江西、白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江以及金上—湖北共四回 $\pm 800$  kV特高压直流工程,建成后年外送电量达 $3.0 \times 10^{11}$  kWh,相当于为外省提供 $2.67 \times 10^8$  t碳减排量。

## 4 建议

要实现以上减碳战略,四川电网将面临大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求。为适应“碳中和”图景下的新形势,建议提前采取以下举措,实现电网的迭代升级,力争在万象更新的未来保持科学发展和创新引领。

1) 大力推进大渡河、雅砻江、金沙江上游水电开发,全面支撑甘孜、阿坝、攀西新能源基地建设及其接入送出,积极论证四川天然气和核电规划布局,到2060年水电装机容量至少达到140 GW,新能源装机容量至少达到约120 GW,天然气、核电、生物质及其他清洁能源装机容量至少达到20 GW;统筹火电灵活性改造、需求侧响应、电化学储能等灵活性资源的配置,确保电网调节友好和系统备用。

2) 推进电能替代,提升电能在终端能源消费占比。提前布局,科学合理规划充换电网络,满足大规模电动汽车接入电网的需求。密切跟踪研究电动汽车市场发展动态,对具有经济开发潜力的点位提前做好项目前期和储备工作,提高市场应对速度;配合政府主管部门做好电动汽车充换电设施规划工作,同时做好与电网规划的对接工作,引导充换电设施有序建设,避免电网配套工程重复或滞后建设,确保社会资本投资建设的充电设施无障碍接入电网,为

表2 四川电力各环节减碳总量估算

单位:10<sup>4</sup> t

年份	水电	风电	太阳能	气电	生物质	核电	发电小计	电网	电动汽车	合计
2019	29 513	634	251	103	330	0	30 831	8	12	30 851
2025	45 492	2225	1335	499	885	0	50 436	48	52	50 536
2030	53 935	3115	2670	499	947	0	61 166	48	444	61 658
2035	56 450	3783	4005	499	1017	0	65 754	28	5324	71 106
2060	58 718	15 575	6675	499	1869	9612	92 948	10	11 660	104 618

(下转第42页)

# 基于多因子考虑的地区电网电采暖负荷预测分析

胡志豪<sup>1</sup>,姚锦松<sup>1</sup>,龚立娇<sup>1</sup>,孙开宁<sup>2</sup>,樊茂<sup>2</sup>,张鹏飞<sup>1</sup>,常喜强<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学机械电气工程学院,新疆 石河子 832003;

2. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**冬季电采暖可以有效促进新能源的消纳,减少弃风、弃光现象。然而,大规模电采暖设备产生的谐波会影响电网质量,因此有必要对电采暖负荷进行分析和预测,以利于电网调度及安全运行,缓解电力系统负荷调峰和调频压力。为预测电采暖负荷,以某地区电采暖实际负荷为例,分析了影响电采暖负荷变动的4个因子即稳定负荷因子、气象敏感因子、随机负荷因子、日期类型因子,得出电采暖负荷变动主要影响因子为日期类型因子和气象敏感因子。因此,建立考虑日期类型的分别基于平均温度和基于人体舒适度的最小二乘法拟合预测模型。预测结果表明,两种模型都获得了较高的预测精度,可以用于地区负荷预测。

**关键词:**负荷预测;影响因子;电采暖;最小二乘法

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)02-0033-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210207

## Load Forecasting and Analysis of Electric Heating of Regional Power Grid Based on Multi-factor Consideration

Hu Zhihao<sup>1</sup>, Yao Jinsong<sup>1</sup>, Gong Lijiao<sup>1</sup>, Sun Kaining<sup>2</sup>, Fan Mao<sup>2</sup>, Zhang Pengfei<sup>1</sup>, Chang Xiqiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Electric heating in winter can effectively promote the consumption of new energy and reduce wind and solar abandonment. However, the harmonics generated by large-scale electric heating equipment will affect the quality of power grid. Therefore, it is necessary to analyze and predict the electric heating load in order to alleviate the stress of grid dispatching, and relieve the load peak and frequency regulation pressure of power system. In order to predict the electric heating load, taking the actual electric heating load in a certain area for example, the four factors that affect the changes of electric heating load are analyzed, that is, stable load factor, weather sensitive factor, random load factor and date type factor. Finally, it is concluded that the main influencing factors of electric heating load changes are date type factors and weather sensitive factors. Therefore, a prediction model is established which considers the date type and is based on the average temperature and the least squares method of human comfort. The prediction results show that both models have obtained a high prediction accuracy, and both can be used for regional load forecasting.

**Key words:** load forecasting; impact factor; electric heating; least squares

## 0 引言

2016年国家能源局发布《关于电能替代的指导意见》,意见指出,在居民采暖领域要逐步推进煤改电工程,促使电能替代燃煤采暖,并根据替代方式的技术经济特点,因地制宜,分类推进<sup>[1]</sup>。事实上,冬季采用电采暖方式既可以供暖,又可以有效促进新

能源的消纳,减少弃风、弃光现象,响应国家政策。同时还可以减少冬季因传统燃煤供暖而造成的空气污染问题,降低雾霾天气出现频率<sup>[2]</sup>。近年来,电采暖负荷每年以递增的速度接入电网,大规模的电采暖设备向电网注入谐波分量,并在启动过程中造成电压暂降,直接影响电网设备的运行和增加线路损耗等<sup>[3-5]</sup>。因此,研究电采暖负荷特性,建立有效的预测模型,变得尤为重要。

电采暖负荷受多种因素共同影响,包括经济因素、气象因素、日期类型因素、随机因素、政治因素、季节因素等。这里主要研究气象因素和日期类型因素。人体舒适度和平均温度是气象因素中重要的衡量指标,可以很好地反映气象条件对电采暖负荷的影响;不同的日期类型,如休息日和工作日也会造成电采暖负荷的波动。

负荷预测有多种方法,如回归分析法、时间序列法、BP 神经网络算法、卷积神经网络算法、支持向量机等。相较于上述算法,最小二乘法(least squares, LS)拟合简单,理论成熟且通用性强,因此选取最小二乘法拟合作为所提研究的预测方法。

下面研究某地区电采暖负荷特性,利用历史数据,考虑日期类型,分别建立基于平均温度和基于人体舒适度的 LS 预测模型。实际算例结果表明,这两种方法的预测精度较高,都可以用于地区负荷预测。

## 1 电采暖负荷模型构建分析

电采暖负荷变化与当地经济发展状况、气象条件、随机事件、节假日等因素有关。基于此,将电采暖负荷增量分为稳定负荷增量、气象敏感负荷增量、随机负荷增量、日期类型负荷增量 4 个部分<sup>[6-7]</sup>,即:

$$\begin{cases} P = (\lambda_s + \lambda_w + \lambda_r + \lambda_d)P \\ \lambda_s + \lambda_w + \lambda_r + \lambda_d = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$  为电采暖负荷变化量; $\lambda_s$  为稳定负荷因子; $\lambda_w$  为气象敏感因子; $\lambda_r$  为随机负荷因子; $\lambda_d$  为日期类型因子。

## 2 影响因子分析

### 2.1 稳定负荷因子 $\lambda_s$ 分析

$\lambda_s$  为稳定负荷因子,它与当地经济发展水平息息相关,即地区的电采暖负荷特性变动与地区经济、用电结构变动相关<sup>[8]</sup>。从中短期看,地区经济对电采暖负荷变动影响较小。研究的时间跨度不大,故认为  $\lambda_s$  对电采暖负荷变化影响权重较小。

### 2.2 气象敏感因子 $\lambda_w$ 分析

$\lambda_w$  为气象敏感因子,此类因子与天气情况、降雨、气温、空气湿度、风速等密切相关。

图 1 为某地区 2019 年 10 月至 12 月电采暖负荷与气温关系图。总体上电采暖负荷随着时间推

移而递增,这与严冬时节来临,气温逐步下降有关。当气温从  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,电采暖负荷从  $12\ 000\ \text{MVA}$  上升到约  $16\ 000\ \text{MVA}$ ,负荷增量较大。由此可得, $\lambda_w$  对电采暖负荷变动影响权重较大。

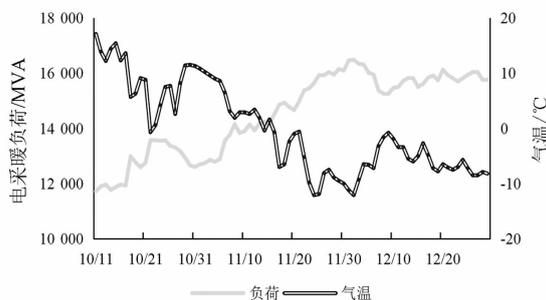


图 1 2019 年 10 月至 12 月电采暖负荷与气温

气象因子对电采暖负荷的影响主要包括室外温度、空气湿度、太阳辐射、风向和风速、降雨(雪)等,其变化规律无法掌握<sup>[9]</sup>。从单一气象因子看,温度是影响电采暖负荷的最大因素,占 60% 以上;空气湿度和太阳辐射的影响较小,约占 1% ~ 5%<sup>[10]</sup>。

同时,现在的研究表明,单一气象因子对负荷预测的精度易产生偏差。因此,越来越多的研究普遍考虑综合气象因子对电采暖负荷的影响。综合气象因子由数个单一气象因子耦合而成,主要有实感温度、温湿指数、寒湿指数及人体舒适度等指标<sup>[11]</sup>。文献[12-13]基于人体舒适度进行负荷预测,预测结果符合预期,反映了人体舒适度和电采暖负荷的高相关性。

人体舒适度是指在不采取任何防寒或防暑措施的情况下,人体在自然环境中的舒适程度<sup>[14]</sup>,它的计算公式<sup>[11]</sup>为:

$$S_D = 1.8T + 0.55(1 - R_h) - 3.2\sqrt{v} + 32 \quad (2)$$

式中: $S_D$  为人体舒适度指数; $T$  为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_h$  为相对湿度,% ;  $v$  为风速, $\text{m/s}$ 。

综上,选取平均温度、人体舒适度两个指标来预测负荷。

### 2.3 随机负荷因子 $\lambda_r$ 分析

$\lambda_r$  为随机负荷因子,往往由突发事件引起。由于突发事件不可预测,无法用公式衡量,同时它对整个负荷变动贡献相对较小,因此认为  $\lambda_r = 0$ <sup>[15]</sup>。

### 2.4 日期类型因子 $\lambda_d$ 分析

$\lambda_d$  为日期类型因子,它与负荷一样具有周周期性。负荷的周周期性是指一周 7 天负荷变化所体现的规律<sup>[16]</sup>。一般情况下,星期六、星期日属于休息

日,电采暖负荷较轻;而星期一至星期五为工作日,人们需要进行生产活动,电采暖负荷较高<sup>[17-18]</sup>。

图2为某地区电采暖负荷星期一至星期日电采暖平均负荷趋势图。数据采集时间为2019年10月11日至2019年12月26日,共计77天,11周。研究图2可得,工作日的日均负荷为14 499 MVA,休息日的日均负荷为14 361 MVA,前者比后者多138 MVA。可知 $\lambda_d$ 对电采暖负荷变动影响权重较大。

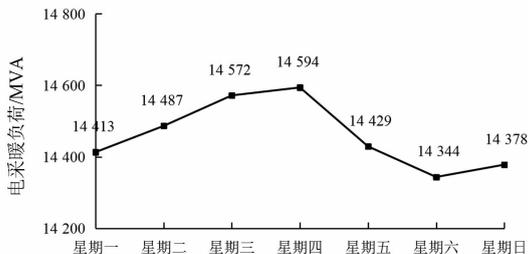


图2 星期一至星期日电采暖平均负荷变化

综上分析,在中短期内,日期类型因子 $\lambda_d$ 、气象敏感因子 $\lambda_w$ 会显著影响电采暖负荷变化,而随机负荷因子 $\lambda_r$ 、稳定负荷因子 $\lambda_s$ 对负荷变化影响较小。因此,电采暖负荷预测主要考虑 $\lambda_w$ 和 $\lambda_d$ 这两个因素。

## 3 负荷预测模型构建

### 3.1 样本数据预处理

通常情况下,负荷预测是基于历史数据的。但是由于传感器精度等原因导致负荷预测所采用的历史数据不一定准确。与此同时,突发事件也会影响负荷的大小<sup>[19]</sup>。为避免预测结果的偏差,将对异常数据进行处理,选取其前2日及后2日负荷平均值作为新数据:

$$x_n = (x_{n-2} + x_{n-1} + x_{n+1} + x_{n+2})/4 \quad (3)$$

式中: $x_n$ 为异常电采暖负荷; $x_{n-2}$ 、 $x_{n-1}$ 、 $x_{n+1}$ 、 $x_{n+2}$ 分别为异常负荷前2日、前1日、后1日、后2日的电采暖负荷数据。

### 3.2 预测模型方法

采用最小二乘法对电采暖数据进行线性拟合。最小二乘法是一种数学优化建模方法。它运用逼近原则寻求数据,让实测数据与估计数据平方和最小,即距离和最小,来寻测和匹配最佳的函数数据,从而拟合函数曲线<sup>[20]</sup>。

最小二乘法是由勒让德在19世纪发现的,形式为

$$\text{目标函数} = \sum (\text{观测值} - \text{理论值})^2 \quad (4)$$

观测值为数据样本,理论值就是所假定的拟合函数。目标函数即是机器学习中的损失函数,最终目的是得到使目标函数最小化时的拟合函数的模型。样本 $h_\theta(x)$ 为 $n$ 次的多项式拟合,公式为

$$h_\theta(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \theta_3 x^3 + \dots + \theta_n x^n \quad (5)$$

式中, $\theta_0$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_n$ 为参数。最小二乘法就是求:

$$\min \sum_{i=1}^n (h_\theta(x_i) - y_i)^2 \quad (6)$$

式中, $y_i$ 为电采暖实际负荷。

### 3.3 预测模型的建立

采用最小二乘法线性拟合进行负荷预测流程具体如下:

1)对输入的历史负荷数据进行预处理,选取 $N$ 组样本数据,对异常数据平均化处理。

2)区分日期类型,分别选取平均温度和人体舒适度两个指标,对电采暖负荷数据采用最小二乘法线性拟合获得预测模型。

3)进行负荷预测,并将实际负荷与预测负荷进行误差比较。平均绝对百分比误差(MAPE)是一种衡量预测误差的一个指标,其计算公式为<sup>[20]</sup>

$$E_{\text{map}} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - P_i'|}{P_i} \quad (7)$$

式中: $E_{\text{map}}$ 为平均绝对百分比误差; $P_i$ 为第 $i$ 个实际电采暖负荷值; $P_i'$ 为第 $i$ 个预测点的电采暖负荷值。

## 4 实际算例

所使用的每日电采暖负荷数据集来自某电力公司,气象数据集来自于天气网站 <http://www.meteomanz.com>,其包含以下气象因素:日最高温度、日最低温度、日平均温度、每日风向及平均风速、每日平均相对湿度等。

样本数据选取某地区2019年10月11日至2019年12月10日共计61日的电采暖负荷及天气数据。区分日期类型,分别采取平均温度和人体舒适度两个指标与电采暖负荷线性拟合建模。

### 4.1 基于平均温度分析

考虑日期类型,将电采暖负荷数据与平均温度线性拟合,分别得到两者之间的拟合关系,如图3、图4所示。式(8)、式(9)分别为基于平均温度的工作日电采暖负荷预测模型和基于平均温度的休息日

电采暖负荷预测模型。

$$P_1 = -173T_{av} + 14\ 472 \quad (8)$$

$$P_2 = -162T_{av} + 14\ 246 \quad (9)$$

式中： $T_{av}$ 为平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $P_1$ 、 $P_2$ 分别为基于平均温度的工作日和休息日的电采暖预测负荷，MVA。

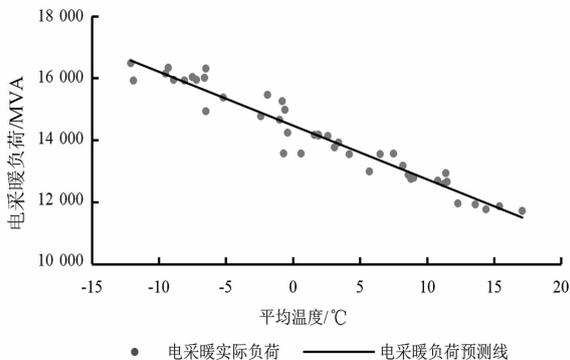


图 3 基于平均温度的工作日电采暖负荷预测

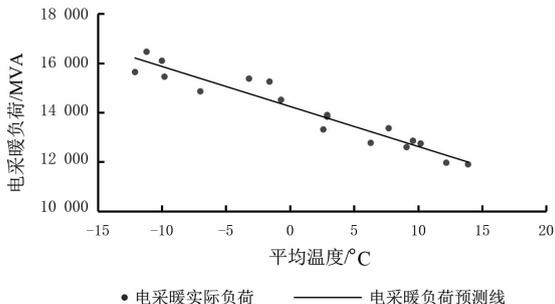


图 4 基于平均温度的休息日电采暖负荷预测

#### 4.2 基于人体舒适度分析

考虑日期类型，将电采暖负荷数据与人体舒适度线性拟合，分别得到两者之间的拟合关系，如图 5、图 6 所示。式(10)、式(11)分别为基于人体舒适度的工作日电采暖负荷预测模型和基于人体舒适度的休息日电采暖负荷预测模型。

$$P_3 = -98S_D + 17\ 216 \quad (10)$$

$$P_4 = -90S_D + 16\ 754 \quad (11)$$

式中： $S_D$ 为人体舒适度指数； $P_3$ 、 $P_4$ 分别为基于人体舒适度的工作日和休息日的电采暖预测负荷，MVA。

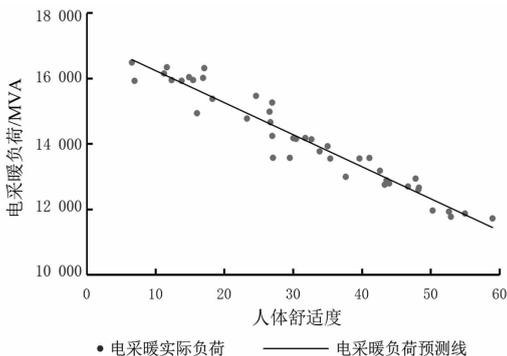


图 5 基于人体舒适度的工作日电采暖负荷预测

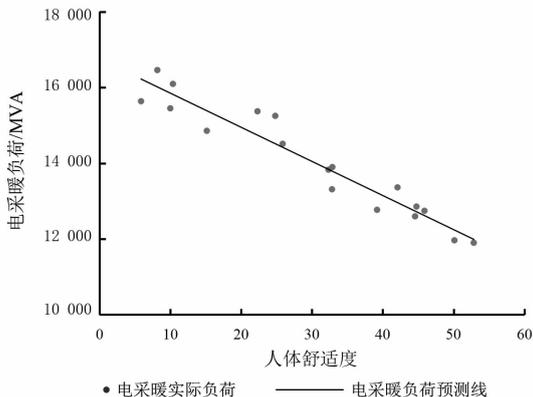


图 6 基于人体舒适度的休息日电采暖负荷预测

图 3 至图 6 描述了平均温度、人体舒适度与电采暖实际负荷的关系。随着平均气温、人体舒适度提高，电采暖负荷总体上呈下降趋势，下降趋势可近似看作一条直线。图 3 至图 6 中的直线是依据模型建立的电采暖负荷预测线，可用于负荷预测。

#### 4.3 预测结果

表 1 为 2019 年 12 月 11 日至 2019 年 12 月 29 日负荷预测结果。表 2 为两种预测方法的 MAPE，两种预测模型的 MAPE 相近，且都小于 2%，达到了良好的预测效果。

表 1 电采暖负荷预测结果

日期	星期	实际负荷/ MVA	预测负荷 1/ MVA	预测负荷 2/ MVA
2019-12-11	星期三	15 504	15 262	15 269
2019-12-12	星期四	18 772	15 262	15 238
2019-12-13	星期五	15 822	15 626	15 525
2019-12-14	星期六	15 807	15 418	15 333
2019-12-15	星期日	15 503	15 056	14 978
2019-12-16	星期一	15 613	15 140	15 123
2019-12-17	星期二	15 839	15 505	15 491
2019-12-18	星期三	15 912	15 921	15 949
2019-12-19	星期四	15 741	16 025	16 021
2019-12-20	星期五	16 125	15 799	15 852
2019-12-21	星期六	15 927	15 397	15 412
2019-12-22	星期日	15 812	15 462	15 414
2019-12-23	星期一	15 698	15 886	15 880
2019-12-24	星期二	15 817	15 661	15 744
2019-12-25	星期三	15 939	15 921	15 939
2019-12-26	星期四	16 037	16 146	16 168
2019-12-27	星期五	16 036	16 146	16 132
2019-12-28	星期六	15 758	15 526	15 440
2019-12-29	星期日	15 769	15 575	15 454

注：预测负荷 1 为基于平均温度的电采暖负荷预测结果；预测负荷 2 为基于人体舒适度的电采暖负荷预测结果。

表2 负荷预测平均绝对百分比误差

预测方法	基于平均温度 预测/%	基于人体舒适度 预测/%
预测结果	1.38	1.59

## 5 结 语

前面对影响电采暖负荷变化的多个因子进行分析发现,日期类型因子 $\lambda_d$ 、气象敏感因子 $\lambda_w$ 会显著影响电采暖负荷变化,而随机负荷因子 $\lambda_r$ 、稳定负荷因子 $\lambda_s$ 对负荷变化影响较小。

因此,建立了考虑日期类型的基于平均温度的LS预测模型和考虑日期类型的基于人体舒适度的LS预测模型。由预测结果知,所提出的两种预测模型都能够准确反映实际负荷的变化趋势,精度较高,可应用于地区电采暖负荷预测。

### 参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局,财政部,等.关于推进电能替代的指导意见[J].核工业勘察院,2016(2):37-40.
- [2] 李香龙,张宝群,马龙飞,等.基于隐含数据信息挖掘的贝叶斯电采暖负荷预测[J].电测与仪表,2018,55(24):88-93.
- [3] 张宇泽,安瑞,全新宇,等.电采暖负荷接入对配电线路线损影响研究[J].电气技术与经济,2020(1):70-75.
- [4] 袁泽,宝海龙,周鹿鸣,等.规模化电采暖设备对配电网电能质量的影响分析[J].电测与仪表,2019,56(1):60-68.
- [5] 李伟,张帆,张磊,等.计及电采暖类型差异的“煤改电”工程谐波分析与评估[J].电网与清洁能源,2016,32(10):34-41.
- [6] 林扬宇,易弢,陈彬,等.考虑气象因素和日期类型的短期负荷预测[J].计算机仿真,2014,31(3):109-112.
- [7] 苏宜靖,谷炜,赵依,等.考虑气象因子的区域电网梅雨期负荷预测[J].浙江电力,2019,38(12):1-7.
- [8] 王宝,叶彬,石雪梅,等.基于用电结构变动的省级电网长期负荷特性预测[J].现代电力,2015,32(3):54-59.
- [9] 白珊,王硕,张丽娜,等.气象因素对供热系统采暖热负荷的影响分析[J].节能,2019,38(7):34-36.
- [10] 刘鹏飞,付波.基于遗传算法优化BP神经网络的短期热负荷预测方法研究[J].区域供热,2019(1):43-48.

- [11] 王惠中,刘轲,周佳.基于综合气象指数和日期类型的电力系统负荷预测[J].电网与清洁能源,2015,31(9):67-71.
- [12] 张伟.基于人体舒适度指数的配电网短期负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):74-79.
- [13] 秦海超,王玮,周晖,等.人体舒适度指数在短期电力负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):63-66.
- [14] 郑贤,唐伍斌,贝宇,等.桂林电网日负荷与气象因素的关系及其预测[J].气象,2008(10):96-101.
- [15] 林扬宇,易弢,陈彬,等.考虑气象因素和日期类型的短期负荷预测[J].计算机仿真,2014,31(3):109-112.
- [16] 王凌谊,王志敏,钱纹,等.融合日期类型的改进线性回归短期负荷预测模型[J].广东电力,2019,32(5):43-50.
- [17] 马立新,李渊.区间电力负荷特征提取及预测方法[J].控制工程,2015,22(4):645-648.
- [18] 苏适,周立栋,万筱钟,等.计及气象因素的用电负荷短期分时分类预测模型与方法[J].电力建设,2017,38(10):76-83.
- [19] 吴小伟.最小二乘法在地质测量中的应用[J].微处理机,2020,41(1):52-56.
- [20] 周巍,陈秋红,肖晶,等.人体舒适度指数对用电负荷的影响[J].电力需求侧管理,2004(3):54-56.

### 作者简介:

胡志豪(1995),男,硕士研究生,主要研究方向为清洁能源替代;

姚锦松(1994),男,硕士研究生,主要研究方向为泛在电力物联网及清洁能源替代;

龚立娇(1978),女,教授,博士生导师,主要从事能量采集、电能无线传输的研究;

孙开宁(1982),男,高级工程师,主要从事电力系统稳定控制、电力大数据研究工作;

樊茂(1985),男,高级工程师,主要从事电力运维、电力应急以及电力大数据分析工作;

张鹏飞(1998),男,硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输;

常喜强(1976),男,教授级高级工程师,主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期:2020-11-26)

# 基于 EMD 与模型预测控制算法的风电功率平抑

张家军<sup>1</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 李霞<sup>1</sup>, 毛吾兰·买买提依明<sup>1</sup>, 徐鹏<sup>1</sup>, 杨艳磊<sup>1</sup>

(1. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**随着能源短缺问题日益突出, 可再生能源得到了广泛开发和利用。风、光等可再生能源受自然环境非均匀性和非稳态性影响, 其输出功率也呈现很强的时变性, 并入电网后会产生系统的电压和频率波动等一系列电能质量问题。储能系统可以作为能量缓冲装置, 平抑可再生能源输出功率, 以达到并网标准。提出用混合储能系统平抑可再生能源发电波动的方法, 并给出了能量分配方式及储能充放电控制方法。最后, 用某风电场的实际数据为例, 以蓄电池和超级电容储能构成的混合储能系统平抑风电波动, 仿真结果证明, 所提方法的技术合理性和经济实用性。

**关键词:**混合储能; 模型预测; 经验模态分解; 风功率平抑; 风电消纳

**中图分类号:** TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0038-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210208

## Wind Power Fluctuation Stabilization Based on EMD and Model Predictive Control Algorithm

Zhang Jiajun<sup>1</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>, Chang Xiqiang<sup>2</sup>, Li Xia<sup>1</sup>, Maowulan Maimaitiyiming<sup>1</sup>, Xu Peng<sup>1</sup>, Yang Yanlei<sup>1</sup>

(1. State Grid Urumqi Electric Power Supply Company, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, Xinjiang, China)

**Abstract:** With the increasingly prominent problem of energy shortage, renewable energy has been widely developed and utilized. Renewable energy such as wind and light is affected by the non-uniformity and instability of natural environment, and its output power also presents a strong time-varying nature. After being integrated into the power grid, it will cause a series of power quality problems such as the fluctuation of system voltage and frequency. The energy storage system can be used as an energy buffer device to stabilize the output power of renewable energy to meet the grid-connected standards. A method of using a hybrid energy storage system to stabilize the fluctuation of renewable energy generation is proposed, and the energy distribution method and the control method of energy storage charge and discharge are given. Finally, tanking the actual data of a wind farm for example, the hybrid energy storage system composed of battery-supercapacitor energy storage stabilizes wind power fluctuations. The simulation results prove the technical rationality and economic practicability of the proposed method.

**Key words:** hybrid energy storage; model prediction; empirical mode decomposition (EMD); wind power stabilization; wind power consumption

## 0 引言

开发利用可再生能源是应对能源问题的有效手段。而可再生能源的消纳是制约可再生能源发展的关键因素之一<sup>[1-2]</sup>。风能、太阳能等可再生能源会实时地受到气候、季节、地形、区域等诸多因素的影响, 故其输出往往伴随着随机、不稳定、间歇性等特点, 当一定规模的可再生能源发电并网后对电网的电能质量带来了不利影响<sup>[3-4]</sup>。研究增强可再生能

源发电输出功率稳定性的方法及减小可再生能源发电对电网电能质量的影响, 对发展可再生能源战略具有重要意义<sup>[5]</sup>。

储能技术可将电能储存起来, 在需要时释放, 以平抑可再生能源发电的功率, 保证电能的持续稳定输出, 增加电网对可再生能源发电的接纳能力。文献[6-7]将蓄电池和超级电容同时引入到发电系统中构成混合储能系统, 用能量密度较高的蓄电池储能平抑能量高、变化慢的低频波动, 用功率密度大的超级电容储能平抑能量低、变化快的高频波动。

目前,已有多种平抑风电输出功率波动平抑的控制策略。文献[8]采用低滤波器的控制方法,并且用储能的实时荷电状态(state of charge, SOC)来计算滤波的时间常数,以输出功率波动为控制目标,在利用模糊控制对储能的功率进行分配;但是以低滤波器为基础的控制算法对功率波动的平抑效果不佳。文献[9]利用小波包分解将输出功率分解出低频部分和低频部分信号,然后结合统计分析和支持向量机辨别出功率波动的超限部分,控制风氢混合储能系统;但上述的小波分解、卡尔曼滤波、一阶滤波等平抑算法在实时控制方面存在局限性。文献[10]利用超级电容和储能电池的能量密度和功率密度的特点,根据储能电池的荷电状态,将控制过程分为优化控制层和协调控制层来保证储能系统的整体充放能力。模型预测控制(model predictive control, MPC)算法具有提前预测、优先控制等特点,且实时性较好<sup>[11]</sup>。

以上文献充分说明储能技术能够平抑风电场的输出功率。下面构造以经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法为基础对储能能量进行分配,用能量密度高但功率密度低的蓄电池储能平抑低频功率波动,用能量密度低但功率密度高的超级电容平抑高频功率波动。以 MPC 算法作为平抑控制策略,以储能使用量最小为控制目标,对混合储能系统的充放电进行分配和控制,以达到在储能功率约束、储能系统荷电状态约束以及并网功率波动约束下,平抑风电场的并网功率,减小并网功率冲击。最后,用某风电场一天的实际输出功率数据验证所提方法的可行性和有效性。

## 1 混合储能平抑风电波动模型构建

利用混合储能技术对风电功率波动平抑是一种有效手段<sup>[12-14]</sup>。风电混合储能发电系统包括双馈风力发电机组、混合储能系统和混合储能发电系统。风电混合储能系统结构如图 1 所示。

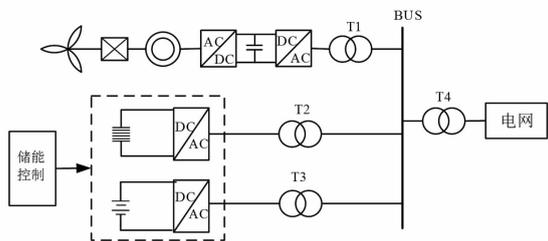


图 1 混合储能平抑风电、波动系统结构

当电网消纳不了风电时,可将富余的电能分配给储能系统用于储能。系统由风力发电系统、混合储能系统、功率分配控制器及连接线组成。当风电过剩时,能量由母线流向混合储能系统;当风电不足时,能量由混合储能系统流向母线并供给电网。混合储能系统由蓄电池储能和超级电容储能构成。蓄电池储能响应速度较慢,但其可储存容量大,蓄电池储能承担低频的功率波动。而超级电容储能响应速度快,适用于频繁充放电,超级电容承担高频的功率波动。储能系统能对风电的输出功率达到“削峰填谷”的效果,使其输入电网的功率更加平滑。

## 2 混合储能平抑风电波动优化控制策略

### 2.1 经验模态分解原理

经验模态分解是一种无须选择基函数就能够自适应地将原始信号分解成一组固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的线性组合,分解后的信号能够突显出原始信号的局部特征。

在 EMD 分解中,所有的模态函数均满足两个条件:1)在整个数据序列中,极值点数和过零点数相等或者相差为 1;2)在整个数据序列中,信号的局部极大值和局部极小值构成的包络线关于时间轴对称,即其均值为 0。

EMD 分解的流程如下:

1)寻找信号的所有极大值点和极小值点,对极大值点做插值形成上包络线,对极小值点做插值形成下包络线。

2)计算出上、下包络线的均值  $m$ ,用原始信号  $s(t)$  减去  $m$ ,求出中间信号  $h(t)$ 。

$$h(t) = s(t) - m \quad (1)$$

3)然后判断  $h(t)$  是否满足 IMF 的条件,如不满足,则对  $h(t)$  重复步骤 1、步骤 2,直到满足 IMF 的条件,就得到第 1 个 IMF 信号  $c_1(t)$ 。

$$c_1(t) = h(t) \quad (2)$$

4)用原始信号减去第 1 个 IMF 分量,得到第 1 个剩余信号  $r_1(t)$ 。

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将  $r_1(t)$  作为新的原始信号,重复步骤 1 至步骤 4,然后分解出剩下的模态分量  $c_2, c_3, \dots$ ,直至剩余信号呈现为单调时完成分解,并将其记为剩余分量  $r(t)$ 。

综上,经验模态分解可把信号  $s(t)$  分解为一组

模态函数  $c_i(t)$  和一个剩余分量  $r(t)$  的线性组合, 表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (4)$$

式中:  $c_i(t)$  为信号中各振荡模态分量;  $r(t)$  为信号中的剩余分量。

## 2.2 优化控制及其约束

模型预测控制 (MPC) 算法能够根据历史信息和现有输入来提前对输出作出预测, 能够实现提前预测、优先控制。该方法具有较好的实时性, 因此将其作为功率平抑控制方法。MPC 主要由状态空间模型和滚动时域策略两部分组成<sup>[15]</sup>。

风电并网功率与风电场输出功率、储能功率的关系为

$$P_g(k) = P_{es}(k) + P_w(k) \quad (5)$$

式中:  $P_g(k)$  为在  $k$  时刻的并网功率;  $P_{es}(k)$  为在  $k$  时刻的储能功率;  $P_w(k)$  为在  $k$  时刻的风电发出功率。

则在  $k+1$  时刻储能系统的荷电状态为

$$S_{es}(k) = S_{es}(k) - \frac{T_c P_{es}(k)}{C_{es}} \quad (6)$$

式中:  $S_{es}(k)$  为  $k$  时刻的荷电状态;  $C_{es}$  为储能容量;  $T_c$  为控制周期。

1) 状态空间模型: 将并网功率  $P_g$  和荷电状态  $S_{es}$  作为状态变量  $x_1$  和  $x_2$ ; 储能功率  $P_{es}$  作为控制量  $u$ ; 风电实际发出  $P_w$  作为扰动量  $r$ ; 下一时刻的并网功率  $P_g$  和荷电状态  $S_{es}$  作为输出  $y_1$  和  $y_2$ 。构建状态空间表达式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -T_c \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r(k) \\ \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

2) 滚动时域策略: 首先, 利用式(7)的状态空间模型对  $k+M$  ( $M=1, 2, 3, \dots$ ) 时刻的输出  $P_g$  和  $S_{es}$  进行预测, 再结合二次规划对每个控制时域的输出结果进行优化, 即可得到相应的功率控制指令。然后将其转化为优化模型求解。其中, 以各优化周期内储能使用量最少作为优化的目标函数, 如式(8)所示。

$$J = \min \left( \sum_{m=k}^{k+M} P_{es}^2(m) \right) \quad (8)$$

并且同时需要满足储能功率约束、对风电并网功率波动率  $\gamma$  的限制和储能荷电状态约束, 即约束

条件为

$$\begin{cases} P_{es\_min} \leq P_{es}(m) \leq P_{es\_max} \\ \frac{P_{g\_max}(m) - P_{g\_min}(m)}{P_{rated}} \leq \gamma \\ 0.1 \leq S_{es}(m) \leq 0.9 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{es\_max}$  和  $P_{es\_min}$  分别为储能功率能达到的上下限;  $P_{g\_min}$  和  $P_{g\_max}$  分别为并网功率的最小值和最大值;  $P_{rated}$  为风电的装机额定功率。

## 3 算例分析

选取某风电场一日的实际功率数据为研究对象, 采样时长为 1440 min, 采样率为 1 min, 装机容量为 200 MW。图 2 为某风电场实际输出功率的波形图。

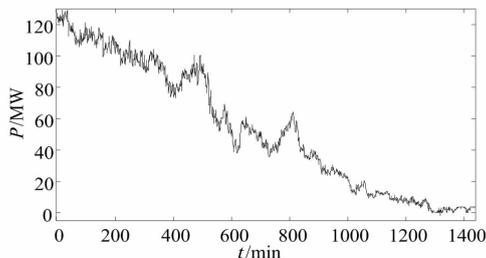


图2 风电实际输出功率

### 3.1 平抑策略

根据式(9)的约束条件, 以 1 min 波动率  $\leq 2\%$  和 30 min 波动率  $\leq 7\%$  作为风电并网波动率限制, 储能功率约束  $P_{es}$  取 9 MW, 储能 SOC 范围为 0.1 ~ 0.9, 采用模型预测控制算法对该风电功率曲线进行平抑, 平抑后的风电功率如图 3 所示。

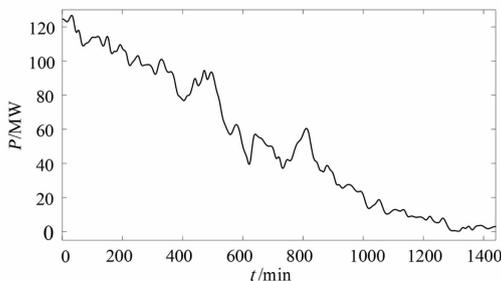


图3 平抑后的风电输出功率

可以看出, 平抑后的风电功率波动较为平滑, 平抑后的 1 min 和 30 min 的波动率分别如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, 平抑后的波动率大幅度降低, 平抑后的 1 min 的最大波动率为 1.19%, 30 min 的最大波动率为 6.17%。满足并网要求的平抑后

1 min 波动率 $\leq 2\%$ , 30 min 波动率 $\leq 7\%$ 。

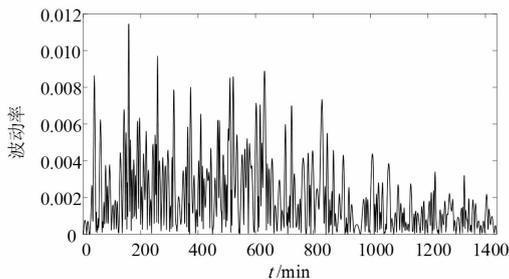


图4 平抑后 1 min 的波动率

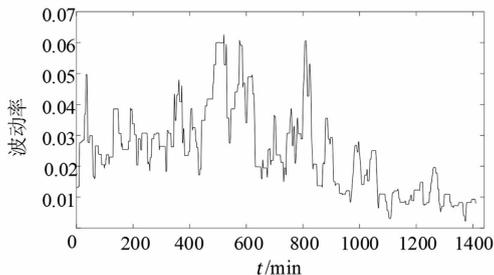


图5 平抑后 30 min 的波动率

### 3.2 能量分配

蓄电池储能可储存容量大,充放电响应较慢,承担了波动的低频功率指令;而超级电容充放电响应时间在数毫秒到几十分钟,承担了波动频繁的高频功率指令。算例结果也符合蓄电池储能和超级电容的性能特点,储能的能量分配如图6、图7所示。

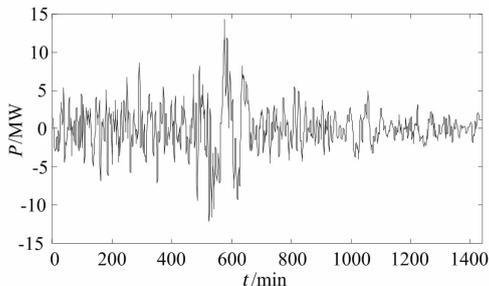


图6 蓄电池储能承担的功率

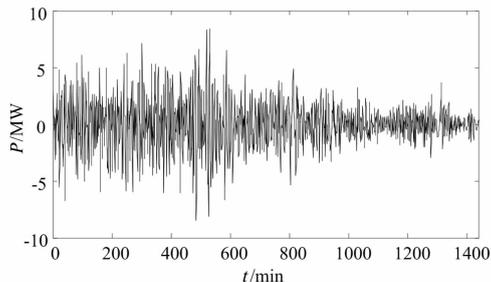


图7 超级电容储能承担的功率

## 4 结语

风电具有的随机性与波动性,使其在并网时给

大电网在电压、频率的稳定性及可靠性上带来了巨大的挑战。储能系统可以作为能量缓冲装置,能够弥补风电等可再生能源发电的波动性和间歇性,使其输出更容易调度和可控,减小对电网电能质量的影响。前面构造的以EMD算法来对功率做预处理,将其分解为低频部分和高频部分,然后结合实时性较好的模型预测控制算法控制功率指令,对风电功率进行平抑。对实际风电场数据的仿真结果论证了该方法可以有效平抑风电场输出功率,明显提升风力发电的稳定性,减小对电网的冲击,为可再生能源的大规模开发利用提供了技术支持。

### 参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017, 37(1): 1-9.
- [2] 盛四清,邱昊,张文朝,等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10): 51-56.
- [3] Jiang Quanyuan, Hong Haisheng. Wavelet-based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing out Wind Power Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [4] Zhang Y X, Dong Z Y, Luo F J, et al. Optimal Allocation of Battery Energy Storage Systems in Distribution Networks with High Wind Power Penetration[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1105-1113.
- [5] 吴杰,丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
- [6] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.
- [7] 张国驹,唐西胜,齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [8] Basit A, Hansen A D, Altin M, et al. Compensation Active Power Imbalances in Power System with Large-scale Wind Power Penetration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 229-237.
- [9] 陈洁,詹仲强. 高阶统计量与小波包分解在风氢混合储能系统中的应用[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3286-3294.
- [10] 邹见效,戴碧蓉,彭超,等. 基于荷电状态分级优化的

混合储能风电功率平抑方法[J]. 电力系统自动化, 2013,37(24):1-5.

[11] 孙玉树,张国伟,唐西胜,等. 基于风电波动平抑的储能配置影响因素[J]. 高电压技术,2018,44(10):3407-3416.

[12] 王战栋,赵丰刚. 基于 PLC 的风力发电混合储能系统控制方法研究[J]. 四川电力技术,2019,42(3):18-21.

[13] 丁明,吴杰,张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报,2019,40(3):593-599.

[14] 江全元,龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术,2015,39(12):3360-3368.

[15] 孙玉树,李星,唐西胜,等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略[J]. 高电压技术,2017,43(1):181-188.

作者简介:

张家军(1993),男,硕士,主要从事输电线路运行检修工作;

陈杰(1991),男,工程师,主要从事输电线路运行检修工作;

常喜强(1976),男,教授级高级工程师,主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期:2020-11-18)

=====

(上接第 32 页)

建设资源节约型、环境友好型社会,推动绿色发展、高质量发展贡献电网力量。

3)超前规划,加快特高压电网建设,打造多元融合高弹性四川电网,充分发挥大电网的优化配置资源的平台作用,统筹电源负荷两端,提高用能效率,以承载大规模可再生能源接入和用电负荷的不断增长。一方面,推进建设“新三直”和金上一湖北±800 kV 特高压直流工程,加快论证攀西等新能源富集地区网架加强和外送方案,围绕甘孜、阿坝水电富集区和成都等负荷中心构建阿坝—成都东—天府南—甘孜 1000 kV 交流特高压环网,并建设天府南—重庆双回 1000 kV 线路向重庆电网延伸;另一方面,利用“大云物移智链”等技术手段赋能电网,挖掘设备能力,释放电网潜力,丰富调剂手段,引导“源网荷储”多能互联、柔性互动、弹性平衡,积极建设完备的市场机制,疏导灵活性资源建设,在提高电网安全水平的同时大幅提升运行效率。

4)深入开展大规模新能源并网、高比例电动汽车接入对电力系统影响机理、源端水风光储和终端分布式储能协同、低惯量系统稳定性、弹性电网探索应用和电网安全、经济、高效运行等研究。通过技术和管理手段,保障电力系统在新能源、电动汽车、储能配置、交直流协同等灵活性资源及不确定性影响下的安全经济运行。

6 结 语

能源低碳转型的关键是电力转型,电力是能源系统碳减排的主力,对中国实现碳排放目标起决定性作用。四川电力可通过推动能源生产低碳化、能

源消费电气化及电网降损等措施,为四川及全国实现“碳中和”贡献力量。同时,随着大规模清洁能源和新型用电设施广泛接入,电力系统的规划、运行将面临全新挑战,需要从技术与经济、市场与政策等方面开展研究。

参考文献

[1] 国网能源院. 全球能源分析与展望[M]. 北京:中国电力出版社,2020.

[2] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国能源革命进展报告(2020)[M]. 北京:石油工业出版社.

[3] 彭博新能源财经. 中国 2060 碳中和目标初步解读:漫长路、塑全球[OL]. <http://www.es.cn.com/news/show-1104320.html>.

[4] 黄碧斌,张运洲,王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力,2020,53(1):1-9.

[5] Ferrari N, Mancuso L, Burnard K, et al. Effects of Plant Location on Cost of CO<sub>2</sub> Capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2019,90:102783.

[6] 张运洲,鲁刚,王芑,等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析[J]. 中国电力,2020,53(2):1-8.

[7] 李依风,李树德,倪逸林. 电网六氟化硫温室气体减排参与碳市场策略[J]. 资源节约与环保,2016(11):121-122.

[8] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):85-91.

作者简介:

叶强(1982),男,硕士,高级工程师,从事能源电力规划、电力市场、能源经济等领域研究。

(收稿日期:2021-01-25)

# 考虑风电场储能容量配置的风电功率预测误差 估计算法对比研究

蒋艾町,李小雨,夏雪,李嘉逸

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

**摘要:**针对风电功率预测误差估计方法中混合高斯分布拟合法和特征值提取估计法这两种适用范围较广的风电功率预测误差估计方法,详细介绍其原理和误差估计流程,利用实际风电场数据对两种方法进行算例验证,并根据计算结果,针对两种方法下的估计区间对储能容量配置的影响进行对比研究,为工程应用时的方法选取提供参考。同时,为了兼顾误差估计区间的有效性和经济性,有效指导风电场储能系统的容量配置,在高斯混合模型的基础上对风电功率预测误差进行状态划分,结合马尔可夫模型,提出一种MM-GMM优化预测误差区间估计算法并对其进行算例验证。

**关键词:**风电功率预测误差估计;储能容量配置;混合高斯分布;特征值提取;马尔可夫模型

**中图分类号:**TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0043-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210209

## Research and Comparative Study on Wind Power Forecast Error Estimation Algorithms Considering Wind Farm Energy Storage Capacity Configuration

Jiang Aiting, Li Xiaoyu, Xia Xue, Li Jiayi

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

**Abstract:** Aiming at two common wind power forecast error estimation methods, that is, the Gaussian mixture distribution fitting method and the eigenvalue extraction method, the principle and process of these two methods are introduced in detail. Moreover, these two methods are verified by the actual wind farm data, and the estimation intervals of two methods are compared according to the impact on energy storage capacity configuration. In order to give consideration to the accuracy and validity of error estimation interval and guide the configuration of energy storage system effectively, based on Gaussian mixture model (GMM) and combined with Markov model (MM), an MM-GMM based optimized forecast error interval estimation algorithm is proposed and verified.

**Key words:** wind power forecast error estimation; energy storage capacity configuration; Gaussian mixture distribution; eigenvalue extraction; Markov model

## 0 引言

随着化石能源等不可再生能源的不断消耗,资源紧张、环境污染和气候变化等问题日益加剧。风力发电以其清洁安全、可持续、技术成熟、开发价值高等优势,迅速在各国的能源战略中占据重要位置<sup>[1-3]</sup>。但由于风力资源固有的随机和波动特性,不论采用何种风电功率预测方法,风功率预测都具有

一定的不确定性,对风电系统的电网调度、弃风限电、备用容量配置以及安全运行都会产生影响<sup>[4-5]</sup>,因此,中国各省陆续推出风电功率预测误差考核政策。储能作为改善风电功率预测误差的一种有效手段在工程中被广泛应用,有效估计风电功率预测误差,不仅能为风电并网系统的调度和运行提供参考,还能对风电场储能系统容量的合理配置进行指导,因此有必要对风电功率预测误差估计方法进行研究。

目前国内研究最为广泛的是采用概率分布拟合的方法对风电功率预测误差进行估计计算。该方法通过统计风电功率预测误差历史数据,对统计数据进行拟合,建立其概率密度分布模型,进而求取预测误差的估计区间<sup>[6-13]</sup>。文献[6]利用混合高斯分布对风电功率预测误差进行拟合研究分析,结果表明不同预测方法下产生的功率预测误差的分布特性不同,但混合高斯分布对于应用不同预测方法的风电功率预测误差均具有高精度的适应性。文献[7-8]基于贝塔分布对风电场实际风电功率进行分析,得到其贝塔分布的概率密度函数,然后建立相应的最优解模型,求取风功率预测误差的最小概率区间。文献[9-12]采用非参数概率区间估计方法,不对总体分布进行先验假设,通过滑动分块百分位数 Bootstrap 法、核密度估计等方法直接求取预测误差的置信区间。文献[13]首先采用聚类算法将预测误差采样数据进行分类,然后针对每类数据计算其概率密度函数,求取分布模型,进而得到风电预测误差估计区间。

此外,特征值提取法也经常用于风功率预测误差估计模型的建立<sup>[14-18]</sup>。文献[14-16]根据风电场的历史运行数据和日前预测数据提取数据中的有效特征值,如当日功率波动、近期功率波动及预测方法精度等,通过多元线性回归法建立回归方程,进而求取预测误差的估计区间。文献[17-18]在直接提取数据特征值的基础上,加入小波分析、粗糙集理论及字典学习等算法,对风电功率预测数据进行处理后采用多元线性回归方程,建立风电功率预测误差的估计模型。然而,这些方法虽然能够改善预测误差估计效果,但增加了算法的复杂程度,工程实用性较低。

综上所述,下面选取适用范围较广的基于混合高斯分布拟合法和特征值提取法的风电功率预测误差估计算法,针对这两种方法进行了详细的对比研究。同时提出了一种结合高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)和马尔可夫模型(Markov model, MM)的 MM-GMM 优化预测误差区间估计算法并验证其有效性。

## 1 混合高斯分布拟合法

基于混合高斯分布拟合法的风电功率预测误差估计方法首先假设误差数据的概率密度函数符合混

合高斯分布,然后通过对历史风电功率预测误差数据的统计分析,进行数据拟合,得到样本数据的混合高斯模型,进而设置合理的置信水平求得预测误差的估计区间。该方法适用范围广、精度高<sup>[6]</sup>。

一维混合高斯分布模型由多个正态分布线性组成,其概率密度函数表达式为

$$f(x; \mu_1, \dots, \mu_N, \sigma_1, \dots, \sigma_k) = a_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{1}{2\sigma_1^2}(x-\mu_1)^2} + \dots + a_k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} e^{-\frac{1}{2\sigma_k^2}(x-\mu_k)^2} \quad (1)$$

式中: $k$  为正态分布的个数; $a_i (1 \leq i \leq k)$  为各正态分布的权值; $\mu_i$  为各正态分布的均值; $\sigma_i$  为各正态分布的标准差。

根据风电场历史误差数据,利用期望最大化(expectation maximization, EM)算法对混合高斯模型进行参数估计,求解式(1)中的  $a_i$ 、 $\mu_i$  和  $\sigma_i$ <sup>[6,19]</sup>。

设  $\theta_j = (a_j, \mu_j, \sigma_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, k$  为 GMM 中各正态分布模型的参数,  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$  为 GMM 中的所有参数。EM 算法主要包含以下两个步骤:

1) 计算样本数据  $X$  的对数似然函数的最大似然估计值,其对数似然函数如式(2)。

$$L(X | \Theta^{(q)}) = \sum_{i=1}^T \ln \sum_{j=1}^k a_j f_j(X_i; \mu_j, \sigma_j) \quad (2)$$

式中: $T$  为样本总数; $k$  为正态分布的个数; $\Theta^{(q)}$  为第  $q$  次迭代时计算得到的参数的最大似然估计值。

2) 最大化上一步得到的最大似然估计值,求解参数。

$$\Theta^{(q+1)} = \arg \max L(\Theta^{(q)}) \quad (3)$$

重复迭代上述步骤至  $\Theta^{(q+1)}$  和  $\Theta^{(q)}$  之间的差值无穷小,即收敛时,则为最优的模型参数。

根据上述步骤建立基于混合高斯分布拟合法的风电功率预测误差估计模型,然后设置合理的置信水平,即可求得风电功率预测误差估计区间。

## 2 特征值提取法

基于特征值提取法的风电功率预测误差估计是通过分析与预测误差相关的特征值,将这些特征值与风电功率预测误差联合建立多元线性回归方程,进而求取预测误差的估计区间。

获得风电场的历史运行数据,包括历史预测功率和实际功率以及风电场日前预测功率,从统计学角度出发,利用各种统计学参数提炼出与预测误差

相关的特征值,如日前预测功率波动性、近期风电功率波动性、风功率幅值及预测方法的预测精度等,进行相关性分析<sup>[14-15]</sup>。选取相关性较强的特征值,利用多元线性回归方程建立预测误差估计模型。其中,相关性计算使用卡尔·皮尔逊对相关系数 $r$ 的表述如式(4)所示<sup>[14,17]</sup>。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 为研究相关性的两组样本数据; $n$ 为样本总数; $X_i$ 为样本 $X$ 中的样本数据; $\bar{X}$ 为样本 $X$ 的平均值; $Y_i$ 为样本 $Y$ 中的样本数据; $\bar{Y}$ 为样本 $Y$ 的平均值。 $r$ 的取值范围为 $[-1, 1]$ , $|r|$ 越大,两者相关性越强。当 $|r|=1$ 时, $X$ 和 $Y$ 线性相关; $r=0$ 时, $X$ 和 $Y$ 不相关。

风电功率预测误差估计模型为

$$E = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n \quad (5)$$

式中: $E$ 为当日风电功率的平均绝对误差; $x_1, \dots, x_n$ 为与 $E$ 强相关的各个特征值; $b_0, \dots, b_n$ 为估计模型的回归系数。

通常来讲,与风电预测功率的平均绝对误差相关性较强的因素有当日风电功率波动、当日风电功率水平和预测方法的预测精度等<sup>[14-16]</sup>。其中,当日风电功率波动和当日风电功率水平对预测误差的影响较大<sup>[13]</sup>。

用当日的日前预测风电功率的标准方差 $S_T$ 表示当日风电功率波动, $S_T$ 越大,表明当日风电功率波动越大,风电功率预测难度增加,预测精度下降,风电功率预测误差则会增大<sup>[14-16]</sup>。 $S_T$ 的具体表达式为<sup>[14-16]</sup>

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} (P_{pt} - \bar{P}_{pt})^2} \quad (6)$$

式中: $P_{pt}$ 为每一时刻的预测功率; $\bar{P}_{pt}$ 为当日预测功率的平均值; $N_1$ 为当日预测时刻数,通常风电预测系统15 min预测一次,故 $N_1=96$ 。

用当日预测功率平均值表示当日风电功率水平 $P_{ave}$ ,若当日风电功率水平较大,则风电功率容易变化,增大风电功率预测误差<sup>[14-16]</sup>。当日风电功率水平 $P_{ave}$ 如式(7)所示<sup>[14-16]</sup>。

$$P_{ave} = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} P_{pt} \quad (7)$$

同样地,若风电功率预测系统的预测精度较低,

风电功率预测误差也会较大<sup>[14-16]</sup>。风电功率近期预测精度 $P_{re}$ 如式(8)所示<sup>[14]</sup>。

$$P_{re} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} |P_{mt} - P_{pt}| \quad (8)$$

式中: $P_{mt}$ 为每一时刻的实际功率; $N_2$ 表示近几日预测时刻数,取96的正整数倍。

根据风电场历史运行数据计算得到 $S_T$ 、 $P_{ave}$ 和 $P_{re}$ ,并利用式(4)计算各特征值与平均绝对误差的相关性,选取相关性强的因素和平均绝对误差带入式(5),利用Matlab进行求解,即可得到风电功率预测误差估计模型并求解误差估计区间。

### 3 算例分析

为了验证评估上述两种方法的有效性,利用西北地区某风电场2018年6月1日至2018年7月30日的风电预测功率数据和实际功率数据,根据前50日的数据样本,分别采用两种方法对2018年7月21日至2018年7月30日进行风电功率预测误差估计。

#### 3.1 混合高斯分布拟合法

基于得到的风电场功率数据,对风电场的功率预测误差数据进行归一化,利用Matlab软件,根据第1节的误差估计模型建立步骤,对预测误差进行混合高斯分布拟合,分别建立二权值和三权值的混合高斯模型,得到的结果如表1所示。

表1 二权值和三权值的混合高斯模型参数值

参数	二权值	三权值
$a$	$a_1 = 0.933\ 1$	$a_1 = 0.683\ 0$
	$a_2 = 0.066\ 9$	$a_2 = 0.066\ 5$
		$a_3 = 0.250\ 5$
$\mu$	$\mu_1 = -0.104\ 1$	$\mu_1 = -0.096\ 3$
	$\mu_2 = 0.469\ 8$	$\mu_2 = -0.464\ 1$
		$\mu_3 = 0.123\ 6$
$\sigma$	$\sigma_1 = 0.164\ 5$	$\sigma_1 = 0.092\ 2$
	$\sigma_2 = 0.164\ 9$	$\sigma_2 = 0.098\ 7$
		$\sigma_3 = 0.289\ 6$

根据表1分别绘制二权值和三权值的混合高斯模型曲线,对比其概率密度分布图(如图1所示)。可以看出,对于该风电场的功率预测误差分布,较二权值混合高斯模型而言,三权值混合高斯模型拟合的概率分布曲线更加准确。

因此,风电功率预测误差模型采用三权值的混合高斯模型,设置95%的置信水平,得到风电功率预测误差估计区间为 $[-25.235\ 1, 24.507\ 5]$ ,其与实际风电运行数据的对比如图2所示。

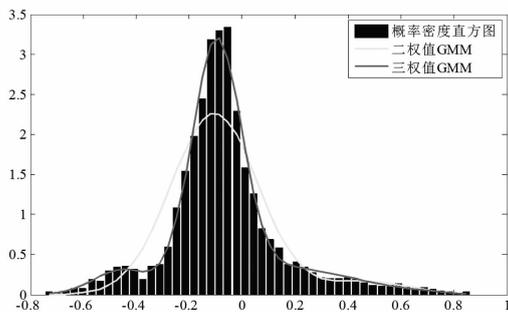
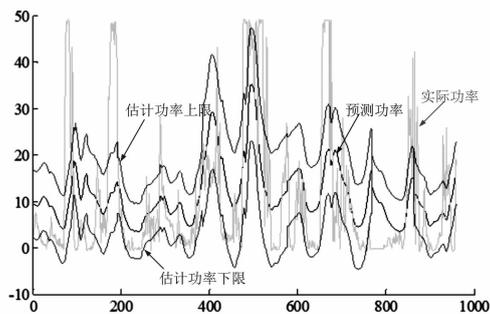
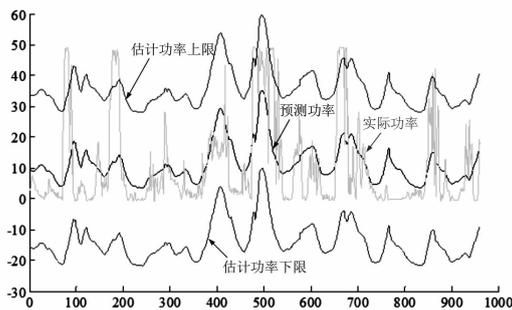


图 1 不同权值混合高斯模型分布拟合图

图 3 基于特征值提取的风电功率预测  
误差区间估计结果图 2 基于混合高斯分布拟合法的  
风电功率预测误差区间估计结果

### 3.3 误差估计区间评价

风电功率预测误差估计区间是决定风电场储能容量配置的关键。利用两个指标对得到的误差估计区间进行评估: 区间覆盖率  $R_{PICP}$  和区间平均带宽  $R_{PINAW}$ , 这两个指标的数学表达式如式(9)<sup>[9,12]</sup>所示。

$$\begin{cases} R_{PICP} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N k_t \\ R_{PINAW} = \frac{1}{NR} \sum_{t=1}^N [U_t(x_t) - L_t(x_t)] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $N$  为样本总数;  $k_t$  为布尔量, 当  $t$  时刻的误差值位于误差估计区间内,  $k_t$  为 1, 否则为 0;  $R$  为实际值的变化范围;  $U_t(x_t)$  为  $t$  时刻误差估计区间的上限;  $L_t(x_t)$  为  $t$  时刻误差估计区间的下限。

可以看出, 对于风电场储能的容量配置,  $R_{PICP}$  决定了容量配置的有效性,  $R_{PINAW}$  决定了容量配置的经济性。对于一个理想的误差估计区间,  $R_{PICP}$  越大, 覆盖率越高, 储能容量配置则越有效;  $R_{PINAW}$  越小, 区间精度越高, 储能容量配置则越经济。根据前两个小节的分析计算, 两种方法的误差估计区间的  $R_{PICP}$  和  $R_{PINAW}$  如表 3 所示。

表 3 两种方法的误差估计区间的指标结果

估计方法	$R_{PICP}/\%$	$R_{PINAW}/\%$
混合高斯分布拟合法	92.08	80.37
特征值提取法	58.85	25.43

由表 3 可知, 基于特征值提取法的风电功率预测区间估计的区间覆盖率和基于混合高斯分布拟合方法的风电功率预测区间估计的区间覆盖率分别为 58.85% 和 92.08%, 后者的区间覆盖率远高于前者。但是基于混合高斯分布拟合方法得到的估计区间的带宽较大, 为 80.37%, 因此根据该区间配置储能容量的经济性较差, 而基于特征值提取法得到的

### 3.2 特征值提取法

同样地, 基于得到的风电场功率数据, 根据式(6)、式(7)、式(8)分别计算得到特征值  $S_T$ 、 $P_{ave}$  和  $P_{re}$ , 通过式(4)计算得到 3 个特征值与日平均绝对误差  $E$  的相关性有:  $r_{S_T-E} = 0.5169$ 、 $r_{P_{ave}-E} = 0.7850$ 、 $r_{P_{re}-E} = 0.1264$ 。

可以看出, 对于该风电场, 当日风电功率波动  $S_T$  和当日风功率幅值  $P_{ave}$  与误差的相关性较高。因此, 以当日风电功率波动和当日风功率幅值两个特征值作为线性回归方程的自变量来建立如式(5)所示的风电功率预测误差估计模型。

基于以上分析, 利用 Matlab 软件, 计算得到风电功率预测误差估计模型的线性回归系数及其 95% 的置信区间, 如表 2 所示。

表 2 基于特征值提取的风电功率预测  
误差估计模型回归系数

系数	$b_0$	$b_1$	$b_2$
取值	1.953 8	0.062 6	0.519 1
95% 置信 区间	[1.798 6 2.109 0]	[0.028 6 0.096 5]	[0.504 8 0.533 4]

根据表 2 和式(5), 求得风电场 2018 年 7 月 21 日至 2018 年 7 月 30 日这 10 天的风电功率预测误差估计区间, 结果如图 3 所示。

估计区间的  $R_{PINAW}$  则较小,为 25.43%。

### 3.4 MM - GMM 优化预测误差区间估计算法

根据前面的分析可以看出,若根据混合高斯分布拟合得到的误差估计区间进行风电场储能容量配置,其有效性较高但经济性较差;若根据特征值提取法得到的误差估计区间进行储能容量配置,其经济性较好但有效性较低。为了解决上述问题,兼顾储能容量配置时的有效性和经济性,基于混合高斯模型,结合马尔可夫模型,提出了一种 MM - GMM 优化预测误差区间估计算法。

由于风本身固有的随机性和波动性,风电功率预测误差也具有较强的不确定性,风电功率预测通常只与相邻时段有关,而与过去所处的状态无关,因此,考虑在风电预测误差区间估计中引入马尔可夫模型。

若随机过程具有“无后效性”,即在已知现在状态的前提下,其未来的状态与过去的状态无关,则称其为马尔可夫过程<sup>[20-21]</sup>。

定义  $P$  为马尔可夫过程的一步状态转移概率矩阵, $P_{ij}$  为状态转移矩阵  $P$  中由状态  $S_i$  一步转移到状态  $S_j$  的概率,根据其无后效性有<sup>[20-21]</sup>:

$$P_{ij}(t) = P\{S(t+1) = j | S(t) = i\} \quad (10)$$

式中: $S(t) = i$  表示  $t$  时刻的状态为  $i$ ;  $S(t+1) = j$  表示  $t+1$  时刻的状态为  $j$ 。

根据上述分析,结合第 1 节的混合高斯模型的求解过程,MM - GMM 优化预测误差区间估计算法的具体步骤如下:

- 1) 利用 EM 算法求出样本数据中每个时刻的功率预测误差处于混合高斯分布中的具体分布及其均值和标准差;
- 2) 根据计算得到的每个时刻误差所处的分布状态,计算马尔可夫过程的一阶状态转移矩阵  $P_E$ ;
- 3) 根据最近时刻所处的状态,利用计算得到的一阶状态转移矩阵  $P_E$ ,预测未来一天各时刻误差所处的分布状态;
- 4) 设置置信水平,计算预测状态所处分布的对应置信区间即为该时刻的预测误差估计区间。

对所提的优化算法进行算例验证,同样地,利用西北地区某风电场的的数据样本,采用所提的优化算法对 2018 年 7 月 21 日至 2018 年 7 月 30 日进行风电功率预测误差估计。每个状态采用 95% 的置信区间,得到的结果如图 4 所示。

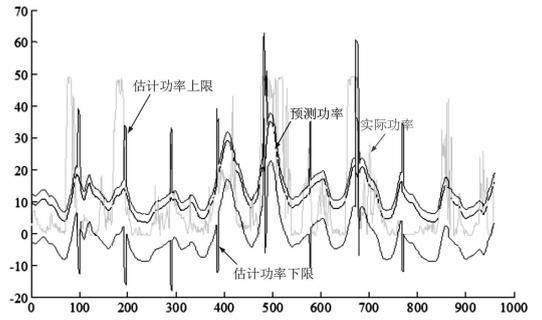


图 4 MM - GMM 优化预测误差区间估计算法的区间估计结果

根据如图 4 所示的估计区间,计算该区间  $R_{PICP}$  为 71.56%,  $R_{PINAW}$  为 26.01%。3 种方法的误差估计区间指标结果的对比如表 4 所示。可以看出,与前两种方法相比,所提的优化算法不仅有效性较高,且区间较窄,能够为风电场的储能容量配置提供有效的指导信息,经济性较好。

表 4 3 种方法的误差估计区间的指标结果

估计方法	$R_{PICP}/\%$	$R_{PINAW}/\%$
混合高斯分布拟合法	92.08	80.37
特征值提取法	58.85	25.43
MM - GMM 优化估计算法	71.56	26.01

## 4 结 语

对混合高斯分布拟合法和特征值提取法这两种典型的风电功率预测误差估计算法进行的详细研究表明:基于混合高斯分布拟合的误差估计方法得到的误差估计区间进行储能容量配置的有效性高但经济性较差;基于特征值提取的误差估计方法得到的误差估计区间进行储能容量配置的经济性好但有效性较低。

为了有效估计风电功率预测误差,上面给出对于风电场储能配置具有指导意义的预测误差估计区间,在混合高斯模型的基础上,对风电功率预测误差进行状态划分,结合马尔可夫模型,提出了一种 MM - GMM 优化误差区间估计算法并进行了算例验证。结果表明,基于所提的优化算法得到的估计区间不仅覆盖率较高,而且带宽较小,兼顾了风电场储能容量配置时的有效性和经济性,具有较好的综合性能,能够为改善风电功率预测误差的储能系统容量配置提供理论依据。

(下转第 94 页)

# 复杂电网级联事故下的重要线路辨识

曾阳阳<sup>1</sup>, 关翔友<sup>2</sup>, 徐 昆<sup>2</sup>, 刘闻博<sup>2</sup>, 姜婷茵<sup>2</sup>, 范珺阳<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘要:** 实现电网级联事故中的关键输电线路准确辨识, 对大范围的电力供应中断事故的预防及控制有着重要意义。首先, 运用能量函数, 结合直接法的建模思路, 将事故过程中的潮流转移、电压波动等诸多复杂电气量变化统一至能量函数框架内, 准确量化线路之间的能量关联关系, 构造出适用于级联事故分析的复杂网络模型; 然后, 在 PTDF 网络能力的启发下, 以上述复杂网络模型为执行环境, 提出线路能量流量的概念, 用于评估网络线路在级联事故发生过程中的关键程度; 最后, 通过改进 OPA 模型在 IEEE-39 节点系统进行级联事故仿真, 并求取 Pearson 相关系数, 验证了线路重要度指标的有效性, 为电网安全运行和稳定性控制提出合理化建议。

**关键词:** 能量函数; 级联事故; 线路能量流量; 改进 OPA 模型

**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0048-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210210

## Identification of Important Lines under Complex Grid Cascading Accidents

Zeng Yangyang<sup>1</sup>, Guan Xiangyou<sup>2</sup>, Xu Kun<sup>2</sup>, Liu Wenbo<sup>2</sup>, Jiang Tinghan<sup>2</sup>, Fan Junyang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Harbin Electric Power Supply Company, Harbin 150036, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Accurate identification of key transmission lines in power grid cascading accidents is of great significance for the prevention and control of large-scale power supply interruption accidents. Firstly, using the energy function and combined with the modeling method of direct method, the changes of complex electric quantities such as power flow transfer and voltage fluctuation in the accident process are unified into the framework of energy function, and the energy correlation relationship between the lines is accurately quantified. The complex network model of cascading accident analysis is constructed, and then, inspired by the PTDF network capability, the above-mentioned complex network model is used as the execution environment, and the concept of line energy flow is proposed to evaluate the critical degree of network lines in the process of cascading accidents. Finally, the improved OPA model is used to simulate the cascading accident in IEEE-39 node system, and the Pearson correlation coefficient is obtained to verify the validity of the line importance index, which provides reasonable suggestions for security operation and stability control of power grid.

**Key words:** energy function; cascading accident; line energy flow; improved OPA model

## 0 引言

近年来, 世界范围内频繁发生的由级联事故造成的大范围电力供应中断事件, 给全社会造成了巨大的经济损失甚至人员伤亡, 也给网络安全研究人员敲响了警钟<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 级联事故往往是由电网中某一元件故障引起系统中其他元件连锁失效

造成的。例如在 2003 年发生的美国和加拿大地区的大停电事故, 其触发因素是树枝意外与一回高压线路接触后造成线路接地短路后断开, 潮流转移引起的诸多突发事故造成连锁效应累积后的大范围停电。文献[3-5]中均指出, 电网中存在重要元件(节点或线路), 其故障后引起电网潮流大范围重新分配和诸多电气量的振荡变化, 在级联事故的发生和扩散过程中起到关键作用。因此, 准确识别电

力网络中退出运行后能造成大范围级联事故的线路,并按照其造成事故危害程度对线路重要度进行排序,对电力系统级联事故控制有着重要意义。

基于此,全世界研究学者围绕电力系统关键线路识别展开了相关研究,当前主要研究方法可分为两大类<sup>[6]</sup>。第一类研究是基于还原论和电网动态特性等传统方法,以潮流计算和系统暂态稳定分析等为主要手段,通过级联事故仿真推演出系统状态的发展趋势,有针对性地进行电力系统状态评估和脆弱性辨识;第二类研究应用复杂网络理论,以电网拓扑结构为研究对象,借助节点(或线路)的度和介数等指标,对电网元件的重要程度进行评估。

电网是内部包含大量动态原件构成的复杂非线性动力学系统,电网级联事故扩散过程中往往伴随着功率振荡、潮流转移和电压波动等诸多复杂现象。但是在第一类研究方法中大多选取上述电气量中单方面因素作为扩散依据,例如经典 OPA 模型<sup>[7-8]</sup>仅以线路有功潮流转移越限为级联事故扩散依据,忽略了电压和功角等诸多关键电气量的振荡波动,过于片面,其仿真结果与电网事故扩散特征有较大差别。基于此,文献[9]在分析电网级联事故脆弱性时,将潮流转移、电压波动和电压相角等诸多电气量变化在能量函数计算表达式中统一表达,即实现了电网级联扩散关键驱动力的同一性建模。由于其全面性和有效性,能量函数在电网级联事故的分析当中得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。第二类研究方法中,若仅从电网拓扑结构角度对网络元件的重要度进行评估,即其结果在网络任何运行方式下重要线路辨识结果一致。这类方法只在意系统中的内在结构短板,却忽略了外在运行风险。而在运用能量函数构造出的复杂网络模型中,除运行状态外,网络拓扑结构也对网络元件间能量关系起到关键作用。即该模型综合考虑了电力系统级联事故扩散过程中各类电气量之间的关联方式和电网本身的拓扑结构特性。

综上,运用能量函数和直接法的建模思想,全面量化网络线路之间的关联关系,构造出以线路为基本结构单元、以线路间能量关联关系为权重的适用于电网级联事故分析的复杂网络模型;然后,对复杂网络理论中的网络能力(net-ability, NT)指标进行适应性改良,在所提的复杂网络模型环境内,提出线路重要度评估指标;最后,通过基于 OPA 模型的电网级联事故仿真对所提出的指标有效性进行了验

证,并结合试验结果为电网级联事故预防及控制提出新的研究思路和意见。

## 1 基于能量函数的复杂网络模型

### 1.1 能量转移冲击

对于稳定运行中的电网,短路、断线等大扰动除了会严重威胁其暂态稳定性以外,还会进一步触发连锁效应造成大范围停电事故。潮流重新分配可能会出现有功功率越限且伴随诸多电气量的波动振荡现象。电网调度人员会通过多类技术手段保证电网各项电气指标不越限,维持电力系统可靠运行。一般情况下,通过直流优化计算来表述上述调整过程,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in G} c_i p_i + \sum_{j \in D} T_j (P_{dj} - P_j) \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^n P_i = 0 \\ & P_{dj} \leq P_j \leq 0, \quad j \in D \\ & P_{gl}^{\min} \leq P_l \leq P_{gl}^{\max}, \quad i \in G \\ & -F_l^{\max} \leq F_l \leq F_l^{\max}, \quad l \in L \end{aligned} \quad (1)$$

式中:目标函数为当系统受到大扰动后调度部门改变发电机出力并且切负荷措施造成的经济损失之和最小; $p_i$ 为电网中所有节点的注入有功功率; $D$ 和 $G$ 分别为电网中负荷节点和发电机节点的集合; $c_i$ 和 $p_i$ 分别为调整后发电机产生单位出力的所需费用和调整后发电机的有功出力; $P_{dj}$ 为节点 $j$ 的负荷需求; $P_j$ 为调整后节点 $j$ 的实际负荷; $T_j$ 为切除单位负荷对系统造成的经济损失,一般情况下要求 $T_j \gg c_i$ ;最后3个约束是为保证调整措施执行后节点负荷不超过实际负荷需求的上限,各发电机出力和各线路潮流不超越其上下限。该模型求解为混合整数规划问题(mixed integer linear programming),需利用 Cplex 求解。

在稳定运行状态下,电网支路 $k$ (其首末端节点为 $i$ 和 $j$ )的初始有功潮流和无功潮流分别为 $P_{ij,s}$ 、 $Q_{ij,s}$ 。电力网络拓扑结构改变引起支路上的电气量发生变化,系统中可能某些线路受能量冲击过大,系统安全受到威胁。采用直接法的建模方式<sup>[13-14]</sup>,若线路 $l$ 断开,经直流潮流优化过程处理后,导致线路 $k$ 所受能量冲击为

$$E_{l \rightarrow k} = \int_{(\delta_{ij}^*, U_{ij}^*)}^{(\delta_{ij}, U_{ij})} [f_{P_{ij}} f_{Q_{ij}}] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_{ij} \\ dU_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $f_{p_{ij}}$  和  $f_{q_{ij}}$  为线路  $l$  断开后, 经过直流优化过程后的线路  $k$  上的有功潮流和无功潮流的变化量。根据线路之间的有功和无功功率传输关系可知:

$$f_{p_{ij}} = P_{ij} - P_{ij,s} = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij,s} \quad (3)$$

$$f_{q_{ij}} = \frac{Q_{ij} - Q_{ij,s}}{U_{ij}} \cdot (U_{ij})^{-1} \cdot$$

$$[-U_{ij}^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij,s}] \quad (4)$$

将式(3)、式(4)带入式(2)中, 得出线路  $l$  断开后, 线路  $k$  所受能量转移冲击为

$$E_{l \rightarrow k} = \int_{\delta_{ij,s}}^{\delta_{ij}} [U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij}) (B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij,s}] d\delta_{ij} + \int_{U_{ij,s}}^{U_{ij}} [U_i^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij}) (G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij,s}] / U_{ij} dU_{ij} \quad (5)$$

式(3)至式(5)中:  $\delta_i$  和  $\delta_j$  是对应端点电压的相角,  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ;  $U_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间电压幅值差,  $U_{ij} = U_i - U_j$ ; 下标  $s$  代表初始值。

$E_{l \rightarrow k}$  的物理意义为线路  $l$  断开后线路  $k$  上各类电气量变化, 电气量偏离初始值越大, 支路  $k$  所受到的能量冲击越大。

## 1.2 线路间能量关联关系

线路意外断开导致其他线路电气量改变, 形成能量冲击; 但另一方面, 若受冲击线路承载能量冲击极限足够大, 该线路也不会因为过载而级联断开。综合上述两个因素, 线路  $l(k)$  断开对线路  $k(l)$  运行稳定性的影响可定量描述为  $R_{l \rightarrow k}$  ( $R_{k \rightarrow l}$ )。由此, 定义线路间能量关联关系为:

$$R_{lk} = R_{kl} = \frac{R_{l \rightarrow k} - R_{k \rightarrow l}}{2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} R_{l \rightarrow k} = \frac{E_k^{\max} - E_{l \rightarrow k}}{E_k^{\max}} \\ R_{k \rightarrow l} = \frac{E_l^{\max} - E_{k \rightarrow l}}{E_l^{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $E_k^{\max}$  为线路  $k$  (其首末端节点为  $i$  和  $j$ ) 的能量冲击承载极限。在电网中:

$$E_{ij}^{\max} = E_{p_{ij}}^{\max} + E_{q_{ij}}^{\max} \quad (8)$$

其中:

$$E_{p_{ij}}^{\max} = \int_{\delta_{ij}^{\min}}^{\delta_{ij}^{\max}} (P_{ij}^{\max} - P_{ij,s}) d\delta_{ij} \quad (9)$$

$$E_{q_{ij}}^{\max} = \int_{U_{ij}^{\min}}^{U_{ij}^{\max}} \frac{Q_{ij}^{\max} - Q_{ij,s}}{U_{ij}} dU_{ij} \quad (10)$$

式中:  $i, j$  为线路  $k$  两端点的节点编号;  $\delta_{ij}^{\max}$ 、 $\delta_{ij}^{\min}$  和

$U_{ij}^{\max}$ 、 $U_{ij}^{\min}$  为  $i, j$  节点电压相角幅值差的上限和下限。

如式(6)所示, 当线路  $l$  意外断开对线路  $k$  的能量作用越接近线路  $k$  的承载极限, 则线路  $l$  所发生事故对线路  $k$  造成的影响越大, 该式函数值越小, 从级联效应来说, 两者关联作用影响越大。以线路之间的相对能量传递作用关系  $R_{lk}$  为关联关系权重, 可构造出以线路为基本结构单元的加权无向的复杂网络模型。该模型的状态关联矩阵是由  $R_{lk}$  为元素组成的“复杂网络系统作用关系相对矩阵” $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & R_{12} & \cdots & R_{1k} & \cdots & R_{1M} \\ R_{21} & 0 & \cdots & R_{2k} & \cdots & R_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{k1} & R_{k2} & \cdots & 0 & \cdots & R_{kM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \cdots & R_{Mk} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, 矩阵为对称矩阵,  $R_{lk} = R_{kl}$ , 对角线元素为 0。在该矩阵的基础上, 可构建出线路为基本结构单元、线路之间能量关联关系为权重的加权无向网络模型, 为线路重要度指标提取提供执行环境。

## 2 线路重要度指标

### 2.1 网络能力

为量化描述电力网络中每条线路在潮流输送中的贡献, 文献[15-16]定义了功率传输分布因子 (power transmission distribution factors, PTDF) 矩阵  $\mathbf{F}$ , 反映了网络潮流对一对发电机节点和负载节点之间传输功率变化的灵敏度。对于确定的网络结构, 可由矩阵  $\mathbf{F}$  推导出的网络能力 (net-ability, NT) 指标从网架拓扑结构的角度量化网络整体性能。若一条线路断开后网络 NT 值下降的幅值越大, 从结构上讲, 这条线路对电网运行越重要。为实现网络能力对电网运行影响的评估, 在综合考虑电网内在结构短板和外部运行风险后, 文献[17-18]结合了通信网络中流量和有效性能的概念, 定义了适用于电网状态分析的网络能力。

$$P_Y = \frac{1}{N_g N_l} \sum_{g \in S_g} \sum_{l \in S_l} T_{gl} \frac{1}{Z_{gl, \text{equ}}} \quad (12)$$

式中:  $N_g$  和  $N_l$  分别为电力系统中发电和负荷节点的数目;  $S_g$  和  $S_l$  分别为发电机和负荷节点的集合;  $T_{gl}$  为节点  $g$  和  $l$  之间的有功传输极限;  $Z_{gl, \text{equ}}$  为节点  $g$  和  $l$  之间的电气距离。数值上:

$$Z_{gl, equ} = (Z_{gg} - Z_{gl}) - (Z_{gl} - Z_{ll}) \quad (13)$$

式中,  $Z_{gg}$ 、 $Z_{gl}$ 、 $Z_{ll}$  为网络节点阻抗矩阵中对应位置元素。

由此,给出电网中节点流量概念,用以评估网络中节点重要程度,其物理意义为节点  $i$  故障移除后,网络能力下降越多,节点在电网稳定运行中越关键。

$$F_i = \frac{P_Y - P_{Y-i}}{P_Y} \quad (14)$$

式中,  $P_Y$  和  $P_{Y-i}$  分别为电网正常运行和节点  $i$  故障移除后的网络能力大小。

## 2.2 线路重要度指标

如前所述,在以线路为基本结构单元、线路之间能量传输关系为权重的复杂网络的执行环境内,对网络能力进行适应性改良,提出网络能量传输能力  $C_Y$  概念,用以评估网络整体性能。

$$C_Y = \frac{1}{L_m L_n} \sum_{l \in S_m} \sum_{k \in S_o} \frac{E_n^{\max}}{Z_{mn}} \quad (15)$$

式中:  $L_m$  为网络中可主动断开线路数目,为遍历网络中所有线路,  $L_m$  取电网线路总数;  $L_n$  为线路  $l$  断开后受到能量冲击的线路数目;  $S_m$  为网络线路集合;  $S_o$  为线路  $m$  断开后,受能量冲击线路集合;  $E_n^{\max}$  为受冲击线路  $n$  的能量冲击承载极限;  $Z_{mn}$  为线路  $m$ 、 $n$  之间的电气距离。在上述以能量关联关系为权重的复杂网络模型,该指标从整体性角度量化网络线路之间的能量传输性能,  $C_Y$  值越大,网络运行性能越好。

关于权重,根据网络结构单元之间关联关系赋予方式和物理意义的不同可分为两大类:1)相似权,其特征为权重越大则结构单元之间的关联越紧密;2)相异权,其特征为权重值越大则结构单元之间关联越弱,例如线路阻抗、节点之间距离等。根据网络能量关联关系定义可知,  $R_{mn}$  值越小,表征线路  $m$ 、 $n$  之间关联关系越强,属相异权。由文献[19]可知,式(12)中电气距离同属相异权。因此,从关联关系角度,线路间能量关联  $R$  矩阵中元素与线路阻抗有相同物理意义。因此,在所定义的复杂网络模型下,线路  $m$ 、 $n$  之间的电气距离定义为

$$Z_{mn} = R_{mn} \quad (16)$$

基于此,将线路移除后,将电网能量传输能力变化量定义为输电线路的重要度指标判据,网络线路能量流量  $L_i$  计算公式为

$$L_i = \frac{C_Y - C_{Y-i}}{C_Y} \quad (17)$$

式中:  $C_Y$  为电网  $Y$  正常运行时的网络能量传输能力;  $C_{Y-i}$  是电网  $Y$  移除线路  $i$  后网络能量传输能力。  $L_i$  值越大,表示线路  $i$  在电网运行中的地位越关键。

## 3 算例

### 3.1 构造复杂网络模型

以 matpower 数据包中的 IEEE-39 系统作为算例执行环境,系统中共有 39 个节点,共有线路 46 条,将储存线路数据的 mpc.branch 矩阵中线路所在行数作为网络中线路序号,如图 1 所示。

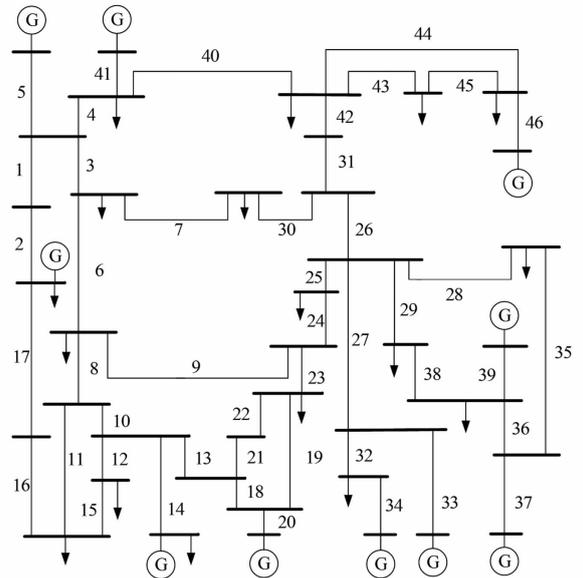


图1 IEEE-39节点电力系统拓扑分布

依次断开网络中所有线路,并求取该线路断开后受冲击线路的冲击能量大小,并按照式(6)至式(10)计算两线路之间的能量关联关系。由此求取线路之间作用关系相对矩阵,矩阵元素分布如图2所示。

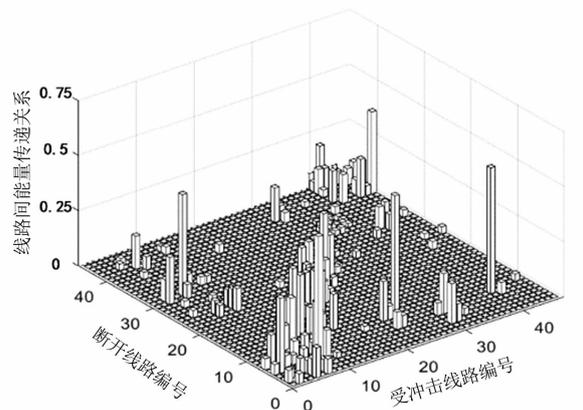


图2 线路间能量传输分布

可见,矩阵中元素主要集中在对角线,表示线路断开对邻近线路的能量冲击最大,并以断开线路为

中心向外逐渐减弱。说明能量函数能够很好表示实际线路之间的能量关联关系,且能定量描述拓扑关系上距离较远的线路间能量关系。由此,可构建出以线路为基本结构单元、线路之间能量关联关系为权重的加权无向网络模型。

### 3.2 线路能量流量指标提取

首先,计算出电网初始运行状态下网络能量传输能力  $C_V$ 。依次断开网络中线路,计算线路  $i$  断开后网络的能量传输能力  $C_{V-1}$ 。由式(17)计算每条线路的能量流量  $L_i$  结果,如表 1 所示,所有数据保留 3 位小数。

表 1 各线路的能量流量

线路	$L_i$	线路	$L_i$	线路	$L_i$
2	0.596	43	0.383	12	0.193
14	0.577	29	0.379	27	0.175
1	0.571	11	0.373	42	0.134
9	0.560	22	0.365	28	0.120
8	0.554	21	0.365	25	0.011
5	0.552	13	0.355	10	0.010
7	0.516	36	0.353	45	0.010
3	0.507	31	0.344	33	0.002
6	0.499	40	0.338	23	0.001
32	0.477	26	0.306	46	0.001
17	0.447	18	0.305	39	0.001
44	0.446	19	0.299	37	0.001
16	0.415	4	0.296	34	0.001
30	0.394	38	0.266	35	0.000
20	0.393	41	0.213		
15	0.390	24	0.212		

按上述线路重要度指标物理意义可知,该指标数值越大,其故障后引起的级联事故范围越大。以级联事故结束后网络中的负荷损失百分比作为级联事故规模的评估指标,遍历各线路断线后的电网级联事故规模,并通过求取与各线路重要度指标的相关系数,验证重要度指标的有效性。

### 3.3 重要度指标有效性验证

2002 年, D. E. Newman 和 Dobson I 等人<sup>[7]</sup>建立了 OPA 模型,用于仿真电网级联事故,推演事故扩散规律,并已得到广泛应用。该模型包含两个时间维度:外层是慢动态过程,用于仿真电网中负荷需求不断增加和电网的升级改造;内层为快动态过程,用于模拟电网级联事故的扩散过程。然而,如前文所述,OPA 原模型存在不足,以基于能量函数的能量转移冲击作用为判据,结合直流优化模型,通过更改级联事故驱动因素对 OPA 模型进行适应性改进,具体操作流程如图 3 所示。

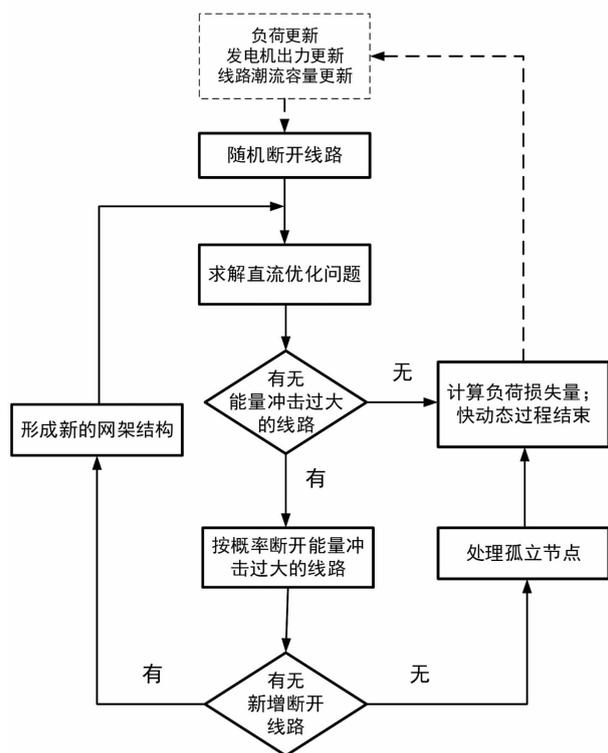


图 3 改进 OPA 模型流程

仿真过程中,线路过冲阈值  $\alpha$  设置为 0.75,断线概率  $p$  取 0.7,即当  $E_{l-k} \geq E_k^{\max}$  时, $k$  线路以 0.7 的概率断开。采用负荷损失百分比作为电网级联事故规模评估指标。在 IEEE-39 节点系统中依次断开线路,制造初始故障。按照改进 OPA 模型,对每条线路断开后进行 1000 次级联事故仿真,求取每条线路断线后的平均事故规模,记录数据并求取拟合直线,如图 4 所示,并计算皮尔逊(Pearson)相关系数。

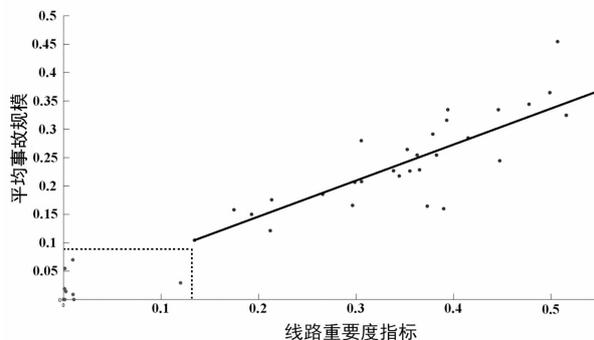


图 4 线路重要度指标与平均事故规模的拟合直线

图中虚框内的点为重要度指标很小的线路在其断线后所造成的级联事故规模,可见这些线路造成的负荷损失很小。对能造成一定规模级联事故的线路,求取其平均事故规模与其能量流量的相关系数为 0.872 7,属强正相关。因此,线路能量流量可有效量化线路在级联事故发生过程中的关键程度。

## 4 结 语

以能量函数为基本数学工具,结合直接法建模方式,准确量化网络线路之间的能量传输关系后,建立了以线路为基本结构单元的复杂网络模型;在PTDF网络能力的启发下,在上述复杂网络模型的执行环境下,提出线路能量流量的概念,用于评估网络线路在级联事故发生过程中的关键程度;最后,在IEEE-39节点系统内进行的级联事故仿真证明了所提的线路关键指标的有效性,对电网级联事故的预防分析与控制有积极意义。

### 参考文献

- [1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North - Eastern Region on 31st July 2012 [R/OL]. New Delhi, 2012. [http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID\\_ENQ\\_REP\\_16\\_8\\_12.pdf](http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf).
- [2] US-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendation [R/OL]. Canada, 2004. <http://reports.energy.gov/>.
- [3] 韦晓广,高仕斌,李多,等.基于连锁故障网络图和不同攻击方式的输电线路脆弱性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(2):465-474.
- [4] Liu K, Dong X, Wang B, et al. Research on the Process of Power Flow Transferring and Its Identification method [C]// International Conference on Advanced Power System Automation & Protection, IEEE, 2012.
- [5] 王羽佳,李华强,刘沛清,等.基于改进DEAHP模型的支路综合脆弱性评估方法[J].电网技术,2016,40(4):1249-1256.
- [6] 曾凯文,文劲宇,程时杰,等.复杂电网连锁故障下的关键线路辨识[J].中国电机工程学报,2014,34(7):1103-1112.
- [7] Dobson I, B. A. Carreras, Lynch V E, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts [C]// Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE Computer Society, 2001.
- [8] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Initial Evidence for Self-organized Criticality in Electric Power System Blackouts [C]// Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2000.
- [9] Zhou Q, Davidson J, Fouad A A. Application of Artificial Neural Networks in Power System Security and Vulnerability Assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 525-532.
- [10] 刘群英,刘俊勇,刘起方.基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J].电力系统自动化,2008,32(10):6-11.
- [11] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等.基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J].电网技术,2013,37(10):2754-2761.
- [12] 苟竞,刘俊勇,魏震波,等.基于多尺度熵的电力能量流复杂性分析[J].物理学报,2014,63(20):347-354.
- [13] 余一平,闵勇,陈磊,等.基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J].电力系统自动化,2010,34(5):1-6.
- [14] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等.基于发电机对暂态势能集的电力系统暂态稳定快速评估[J].电网技术,2015,39(2):464-471.
- [15] Arianos S, Bompard E, Carbone A, et al. Power Grid Vulnerabilities: A Complex Network Approach [J]. Chaos, 2009, 19(1): 013119.
- [16] Bompard E, Napoli R, Xue F. Analysis of Structural Vulnerabilities in Power Transmission Grids [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1): 5-12.
- [17] 刘文颖,蔡万通,张宁,等.基于加权网络拓扑熵的电网自组织临界状态演化[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5740-5748.
- [18] Zhu Y, Yan J, Sun Y, et al. Revealing Cascading Failure Vulnerability in Power Grids Using Risk-Graph [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12): 3274-3284.
- [19] 倪向萍,阮前途,梅生伟,等.基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J].电网技术,2007,31(9):6-12.

### 作者简介:

曾阳阳(1999),女,学士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

关翔友(1994),男,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制;

徐 昆(1990),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全稳定分析与控制。

(收稿日期:2020-11-16)

# 基于二阶带通滤波器的单相锁相环技术研究

荆世博<sup>1</sup>, 辛超山<sup>1</sup>, 薛静杰<sup>1</sup>, 张增强<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 国网新疆电力有限公司综合能源服务公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 并网系统中, 由于存在大量电力电子器件, 导致并网逆变器输出的电压中存在直流分量和高频谐波, 传统锁相环的环路滤波器难以完全滤除输入信号的谐波, 将在锁相环输出信号中产生相位偏移。针对这一现象, 首先, 构造了一个二阶带通滤波器(Biquad filter, BF)来有效抑制输入电压信号中直流分量和高频谐波, 锁相环中的正交信号通过构造二阶广义积分器(SOGI)来获得; 然后, 对二阶带通滤波器特性进行分析, 设计了二阶带通滤波器参数; 最后, 通过 Matlab/Simulink 软件对包含直流分量、高频分量、畸变、跳变等情况的电压信号进行仿真。仿真结果表明, 基于二阶带通滤波器的锁相环能够很好抑制直流分量和高频分量, 有效消除因参数设置不合理产生的相位偏移。

**关键词:** 二阶滤波; 直流分量; 高频分量; 相位偏移

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2021)02-0054-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210211

## Research on Single-phase Phase Locked Loop Technology Based on Second-order Bandpass Filter

Jing Shibo<sup>1</sup>, Xin Chaoshan<sup>1</sup>, Xue Jingjie<sup>1</sup>, Zhang Zengqiang<sup>2</sup>

(1. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Comprehensive Energy Service Company, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** In the grid-connected system, due to the existence of a large number of power electronic devices, there are DC components and high-frequency components in voltage output by the grid-connected inverter. The loop filter of the traditional phase-locked loop is difficult to completely filter the harmonics of input signal, and a phase shift occurs in output signal of the phase-locked loop. In response to this phenomenon, a second-order bandpass filter is constructed to effectively suppress the DC component and high-frequency harmonics in input voltage signal. The quadrature signal in the phase-locked loop is obtained by constructing a second-order generalized integrator (SOGI). The characteristics of second-order bandpass filter are analyzed, and its parameters are designed. Finally, through the Matlab/Simulink software, the simulation for the conditions including DC components, high-frequency components, distortion, jumps etc. are carried out. The simulation results show that the phase-locked loop based on second-order bandpass filter can well suppress the DC component and high-frequency component, and effectively eliminate the phase shift caused by unreasonable parameter settings.

**Key words:** second-order filtering; DC component; high-frequency component; phase shift

## 0 引言

单相并网逆变器作为分布式电源并网的关键, 其性能将直接影响整个系统的性能, 在并网的过程中, 单相锁相环的精度将决定并网效果<sup>[1-3]</sup>。对于单相并网系统, 最简单的锁相方法是通过过零检测来获得输入信号周期和相位信息; 但该方法在每个

工频周期只能进行一次调整, 且谐波的叠加将影响检测精度, 甚至导致锁相失败。在单相并网锁相系统中, 由于不存在静止的三维坐标系, 无法借助 Clark 变换来产生正交坐标系, 需要通过积分变换生成正交信号。

针对单相锁相环的以上问题, 文献[4]提出采用二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)的方法构建正交信号实现锁相, 且该方

法对高频分量有较好的滤波作用,但对直流分量抑制效果较差。文献[5]通过对输入电压信号延时  $T/4$  周期,来构造虚拟正交信号达到锁相目的;但这种方法从原理上就存在动态响应慢的问题,且在电网频率偏离其额定值或存在谐波时,输出信号将不再正交。文献[6]将解耦双同步坐标系(DDSRF-PLL)应用于单相系统,但 DDSRF-PLL 同样无法消除谐波的影响。文献[7]利用相邻时刻采样数据构造鉴相器,从而生产正交分量,并通过双滤波器来滤除高频分量;但该方法结构复杂,且输入信号中含有谐波将影响锁相性能。文献[8]采用输入信号与二次微分信号累加来滤除由于移相造成的二倍频谐波,并得出鉴相器输出信号;但该方法只分析了鉴相器对二倍频谐波的滤除作用,未考虑高频分量。文献[9]利用带有滤波特性的微分环节,来构建正交信号,此方法在系统增加两个二阶滤波器,能有效滤除高频分量但对直流分量抑制能力不足。

下面提出一种基于双二阶带通滤波器环节的锁相环。该方法充分利用二阶带通滤波器对直流分量和高频谐波的滤波作用,通过设计滤波器带宽,抑制和消除直流分量和高频谐波,保证特定频率的信号正常通过二阶带通滤波器,能有效抑制传统锁相环因谐波造成的输出信号相位偏移问题,实现快速和准确锁相。

## 1 并网点电压信号直流分量和高频谐波分析

并网点电压为标准正弦波形时,可通过过零检测、虚拟乘法器、虚拟两相等多种控制方法实现对电网电压的跟踪和锁相。实际情况中并网点电网往往含有直流和直流分量,造成锁相困难或难以锁相。

当并网点电压在某一时刻叠加直流分量,即

$$u = \begin{cases} 0 & t=0^- \\ U & t=0^+ \end{cases}, t=0^+ \text{ 时刻,输入信号的直流分量由}$$

于压控振荡器(voltage controlled oscillator, VOC)的积分作用,产生偏差信号,将导致锁相失败;若并网点电压中含有 2、3、……等高频谐波,即  $u_s = U_1 \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ ,由于环路滤波器(loop filter, LF)难以完全消除高频谐波和压控振荡器的积分放大特性,将导致锁相的相位产生偏差<sup>[10]</sup>。

## 2 二阶带通滤波器的滤波特性

二阶带通滤波器的传递函数如式(1)所示。

$$G(s) = \frac{A(\omega_0) \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: $\omega_0$ 为二阶带通滤波器中心频率; $Q$ 为品质因数; $\omega_0/Q$ 为系统带宽,用  $B_w$  表示。

带宽决定着滤波器分离信号中相邻频率成分的能力——频率分辨力。可通过求解上下截止频率(通常取  $-3$  dB 对应的频率)来得到滤波器的通带带宽。将  $s = j\omega$  带入二阶带通滤波器的传递函数中,可得  $G(s) = \frac{jA(\omega_0) B_w \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + jB_w \omega}$ ,令滤波器幅值  $A(\omega) = 0.707$ ,求得上下截止频率,可得二阶带通滤波器带宽  $B_w$ 。

根据式(1)可知,当二阶带通滤波器品质因数  $Q$  不变,增大中心频率可缩小二阶带通滤波器带宽,有效滤除直流分量和高频谐波。图 1 为二阶带通滤波器品质因数  $Q$  不变,中心频率  $\omega_0$  增大时系统伯德图。

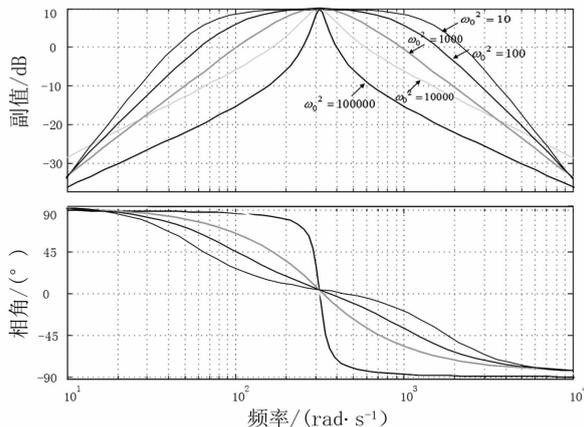


图 1  $Q$  不变,  $\omega_0$  不同取值的伯德图

## 3 基于二阶带通滤波器的锁相环结构及参数设计

### 3.1 锁相环结构

三相软件锁相环基于三相电压  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  经 Clark 变换,从静止坐标转换为两相正交向量  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  的方法来实现锁相。单相并网锁相系统中,不存在静止的坐标系下的三相电压,无法经 Clark 变换生

成含有相角的正交向量,故采用二阶广义积分器来实现 Clark 和 park 变换的作用,生成含有相角的正交分量。二阶广义积分器原理如图 2 所示。图中: $v$  为输入电网信号; $k$  为影响系统带宽的增益; $\omega$  为固定不变频率; $v'$  和  $v_q$  为输入信号  $v$  经变换后生成的正交向量<sup>[4]</sup>。

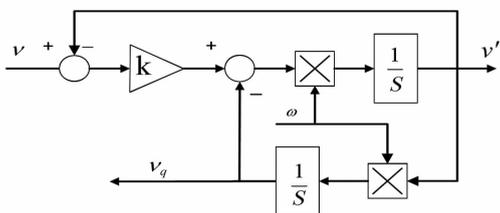


图2 二阶广义积分器

以  $v$  为输入信号,以  $v'$  和  $v_q$  为输出信号,可得图 2 中 SOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} \frac{v'}{V}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \\ \frac{v_q}{v}(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \end{cases} \quad (2)$$

基于二阶广义积分器可构造出如图 3 所示的含有二阶带通滤波器的单相锁相环(single-phase-locked loop, SPLL),图中  $G_1(s)$  为二阶带通滤波器; $G_2(s)$  为 SOGI。

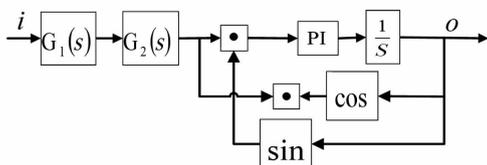


图3 含有二阶带通滤波器的单相锁相环结构

### 3.2 二阶带通滤波器参数要求

式(1)并网电压频率中  $\omega_0$  为 50 Hz;为尽可能滤除其他频次电网谐波,带通滤波器的带宽定为 1 Hz;增益系统  $A(\omega)$  定为 3;令  $s = j\omega$ ,二阶带通滤波器幅频和相频特性伯德图如图 4 所示。

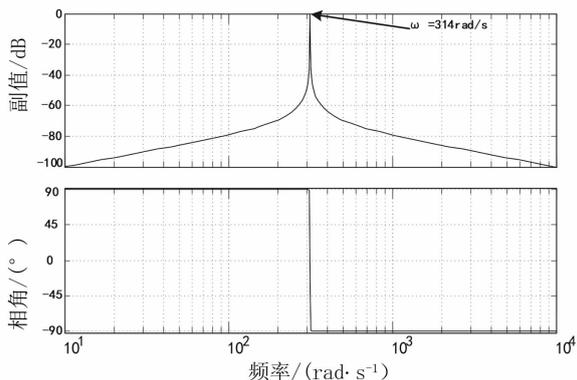


图4 二阶带通滤波器伯德图

### 3) 锁相环的 PI 控制器设计

图 3 中 PI 控制器环节可以表示为图 5 的控制图,图 5 中忽略了系统反馈的延时环节, $\omega_0$  为并网电压频率,即  $\omega_0 = 50$  Hz; $k_p$  为比例积分控制器比例系数; $k_i$  为比例积分控制器积分系数。

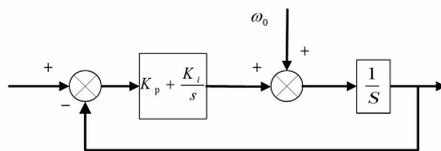


图5 SPLL 中 PI 控制器框

PI 控制器的闭环传递函数为

$$H(s) = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (3)$$

对式(3)进行频域分析,取  $k_p$  为 10.08,  $k_i$  为 10.24,系统伯德图如图 6 所示。

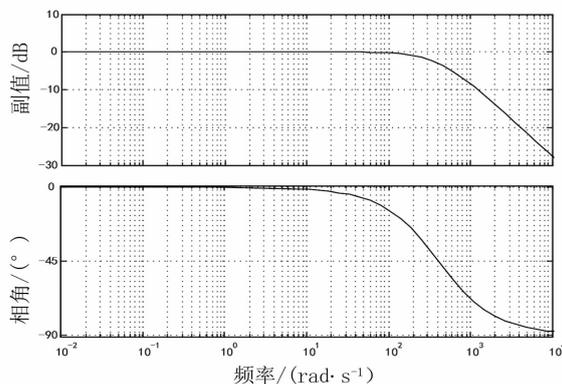


图6 PI 控制器伯德图

通过图 6 锁相环的 PI 控制器的伯德图,可以看出单相锁相环的系统是稳定的,分析伯德图的幅频特性曲线,PI 控制器具有低频滤波特性,在输入信号频率大于  $\omega_0$  时,输出信号幅值将小于 0 dB,说明该传递函数具有低通特性,对高频具有抑制作用<sup>[11]</sup>。

## 4 仿真实验

通过仿真,验证所提出的基于二阶带通滤波器对输入信号的滤波作用和单相锁相的锁相效果。在 Matlab/Simulink 中搭建了基于二阶带通滤波器的仿真模型,完成了输入信号中含有高频谐波和直流分量情况以及幅值、相位和频率在  $T = 4.9$  s 时突变和谐波畸变等不同工况下的仿真。

取输入信号幅值为 1,并网电压频率为 50 Hz,采用步长  $h = 1 \times 10^{-5}$  s 来进行仿真。

### 1) 输入信号含有直流分量和谐波

图 7 波形为输入信号中含有直流分量和谐波的

仿真结果图。图中并网电压为理想状态下并网点电压波形;输入波形为含有直流分量和谐波信号的畸变信号;输出相角和波形为输入信号经二阶带通滤波器和锁相后得到的输出信号。

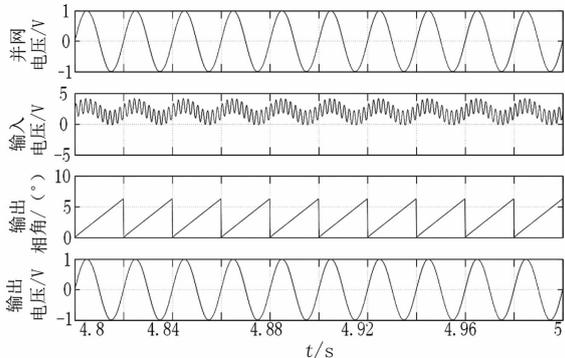


图 7 含直流分量和谐波仿真

从图 7 中可以看出,基于二阶带通滤波器的锁相环具有较好的稳态性能,能够有效滤除高频谐波和直流分量。

2) 输入信号发生幅值、相位和频率突变波形

图 8、图 9、图 10 分别为并网点电压发生幅值、相位和频率突变时,锁相环在 Matlab/Simulink 中的仿真图。从图中可以看出在并网电压波形发生幅值、相位和频率突变时,基于二阶带通滤波器的单相锁相环都能够很短时间内跟踪并锁定并网电压信号,且对输入信号中的直流分量有很好的抑制作用。

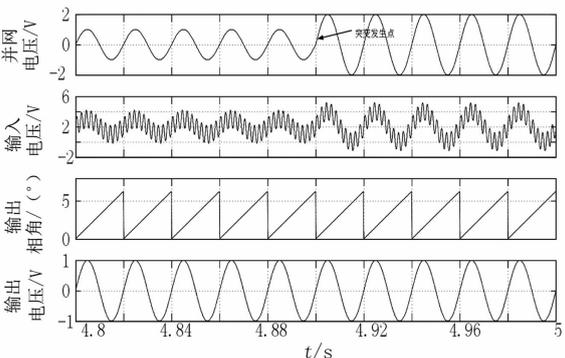


图 8 输入信号幅值突变仿真

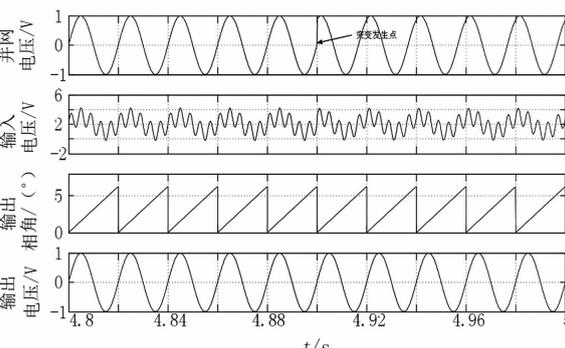


图 9 输入信号相位突变仿真

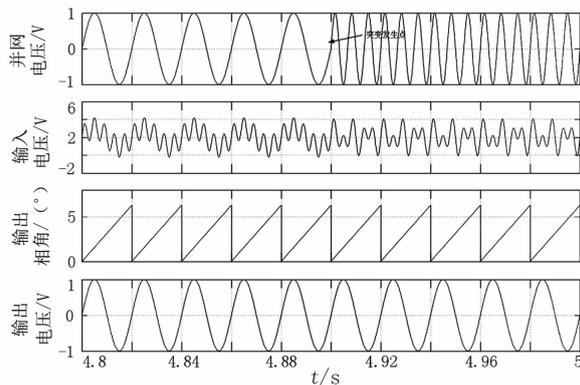


图 10 输入信号频率突变仿真

如图 11 所示,含有直流分量和高频谐波的电压波形,在传统锁相环系统中,初始 1~2 s 时间内,能够快速且准确地跟踪电压波形,但受限于环路滤波器参数设计的优劣和压控振荡器积分放大作用,传统的锁相环并不能很好地持续跟踪和准确地锁相,随着系统运行时间的延续,锁相环输出的电压波形将发生相位偏移,且随着时间的延长,相位的偏移将逐渐扩大。图 12 为输入信号经二阶带通滤波器处理后,锁相环输出电压仿真波形,在并网电压信号进入锁相环系统之前,基于二阶带通滤波器的锁相环对电压信号进行预处理,有效抑制电压信号中叠加的直流分量和高频谐波,提高锁相的精度,通过仿真验证了所提方法的准确性。

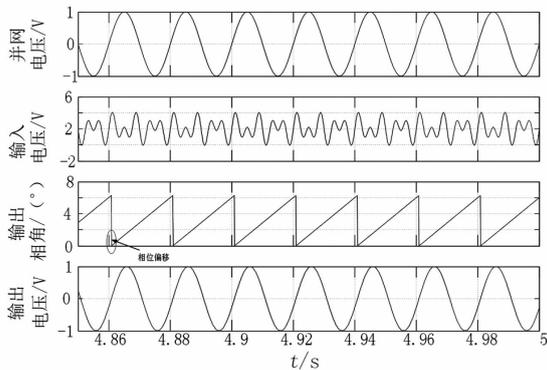


图 11 无二阶带通滤波器输入信号仿真

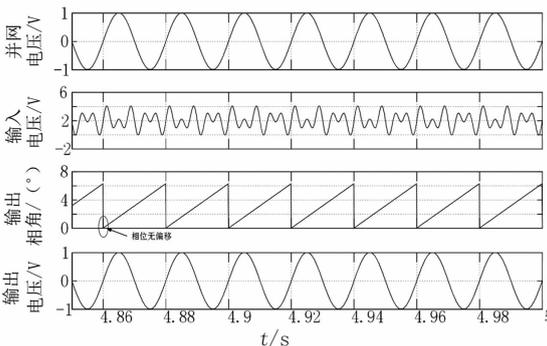


图 12 基于二阶带通滤波器输入信号仿真

# 风吹雪地区变电站电气设备选型与布置方案优化

谈东林

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

**摘要:**在冬季风吹雪严重时期,常有电气设备被积雪掩埋,对变电站的安全运行造成了比较严重的影响。通过对风吹雪地区变电站电气设备选型与配电装置布置方案进行分析,采用户外 AIS 断路器方案及电气设备布置优化可避免电气设备被积雪掩埋,并有利于机械车辆清扫积雪。

**关键词:**变电站;风吹雪;电气设备选型;布置方案

**中图分类号:**TM63 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0058-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210212

## Type Selection of Electrical Equipment and Optimization of Layout Plan for Substations in Wind-blown Snow Areas

Tan Donglin

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

**Abstract:** During the severe wind-blown snow in winter, electrical equipment is often buried by snow, which has a serious impact on the safe operation of substations. By analyzing the type selection of electrical equipment and the layout of power distribution devices in substations in wind-blown snow areas, the use of outdoor AIS circuit-breakers and the optimization of electrical equipment layout can prevent electrical equipment from being buried by snow, and help mechanical vehicles to clear snow.

**Key words:** substation; wind-blown snow; type selection of electrical equipment; layout plan

### 0 引言

风吹雪是一种由气流挟带起分散的雪粒在近地面运行的多相流的天气现象,俗称白毛风。风吹雪的过程必须具备3个条件:大量的雪、障碍物和能使雪粒运行的风。冬季,在空旷的草原或戈壁滩上,大雪过后,大风卷起戈壁上的积雪,遇到障碍物后,积雪发生大面积堆积的过程就是风吹雪<sup>[1]</sup>。风吹雪给新疆北疆部分地区的变电站及风电场的安全运行造成了比较严重的影响。风吹雪发生时,狂风吹来大量雪粒,形成0.5~3 m的雪堆,导致带电电气设备对雪堆的安全距离不满足要求,给电网运行带来安全隐患,严重时雪堆直接将低矮的电气设备如站用变压器、低压并联电容器组、低压并联电抗器掩埋,使其被迫停运<sup>[2]</sup>。

目前,对风吹雪的研究及应用主要集中于公路及铁路方面,其他行业尚无系统性的研究,对变电站的风吹雪防治研究极少。在公路防治风吹雪上,主要采用防雪林、下导风板、挡雪墙、防雪栅等措施<sup>[3]</sup>。但公路狭窄细长,风吹雪防治只要防治住十几米宽度的路面即可。而大型变电站如750 kV变电站长宽达到三四百米,目前暂无法对风吹雪的风速、积雪厚度、雪粒直径、积雪密度、地面粗糙度与挡雪墙的高度和防护范围的关系进行理论计算,只能根据工程实际需要,结合部分风电场的防治经验<sup>[2]</sup>,在变电站前期规划时选择风吹雪灾害较低的站址。另外,也采取在围墙外的冬季主导风向侧设置防雪格栅及种植防雪树林相结合的方式阻挡一部分风吹雪,但防雪格栅及防雪树林无法完全阻挡风吹雪的影响。

下面,以位于风吹雪地区的新疆某750 kV变电站为例,从电气设备选型与电气设备布置两个方面

分析论述提高设备抵御风吹雪危害的能力并进行设计优化。

## 1 优化电气设备选型提高设备抵御风吹雪危害的能力

某 750 kV 变电站工程规划 3 台 1500 MVA 主变压器;750 kV 配电装置采用 3/2 断路器接线,规划 7 回出线 and 3 回进线,每回出线均预留高压并联电抗器;220 kV 配电装置采用双母线双分段接线,规划 18 回出线;66 kV 配电装置采用以主变压器为单元的单母线接线,装设总断路器。

根据公路风吹雪防治的相关经验及部分厂站风吹雪防治措施判断,变电站风吹雪堆积最严重的区域是站前区、高压电抗器场地、主变压器区域,而对安全运行影响最大的区域则是设备布置较低的站用变压器、低压并联电抗器、低压并联电容器区域。主变压器、高压并联电抗器及 66 kV 设备可选型式不多,根据通用设计 750 kV 主变压器选用户外单相油浸式变压器,高压并联电抗器采用单相铁芯油浸式电抗器;66 kV 断路器采用瓷柱式断路器,66 kV 并联电抗器采用常规户外干式空芯电抗器,66 kV 并联电容器组采用常规户外框架式电容器组。而 750 kV 及 220 kV 配电装置电气设备可选型式有户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案、户外 GIS 方案及户内 GIS 方案,以下对这 3 种方案分别进行分析。

### 1) 户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案

750 kV 及 220 kV 配电装置设备区域会设置大量联合构架,断路器、隔离开关、电压互感器、避雷器及支柱绝缘子等电气设备的支架也较高,750 kV 设备支架达到 5~6 m,220 kV 设备支架也在 2.5 m 以上,同时带电的管母及导线对地距离在 5.5 m 以上,因此风吹雪在大量构架、支架阻挡后减弱,少量的积雪堆积不会对 750 kV 及 220 kV 配电装置设备的安全运行造成影响。同时采用户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案,其设备间隔距离大,有利于机械清雪作业。

### 2) 户外 GIS 设备方案

由于户外 GIS 设备占地面积小,具有总的积雪量和清雪工作量较小的优点;但户外 GIS 设备外型低矮,仅约 3 m 左右,且没有像罐式/瓷柱式断路器

方案的配电装置中存在的大量构架、支架对风吹雪的阻挡,因此户外 GIS 设备很容易被风吹雪堆积掩埋。同时,户外 GIS 设备分支管道众多,机械清雪作业安全隐患较大。

### 3) 户内 GIS 设备方案

GIS 主设备布置在 GIS 建筑室内,抵御风吹雪能力较高,但由于户内 GIS 方案投资较高,以所述工程终期规模为例,户内 GIS 方案费用较户外罐式/瓷柱式断路器方案高约 21 000 万元。且站区积雪最严重的区域是高压电抗器、主变压器及低压无功装置等区域,因此户内 GIS 设备方案仅能提高 GIS 主设备抗风吹雪能力,但对提高全站整体抵御风吹雪能力作用不突出,经济性也较差。

综上所述,750 kV 及 220 kV 户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案中存在大量构架、支架阻挡风吹雪,且 750 kV 及 220 kV 电气设备布置较高,风吹雪的堆积不会对变电站的安全运行造成影响,同时工程投资较户内 GIS 低,因此,750 kV 配电装置采用户外 AIS 罐式断路器、220 kV 配电装置采用户外 AIS 瓷柱式断路器方案更适合风吹雪地区。

## 2 优化电气设备布置提高设备抵御风吹雪危害的能力

前面所述的 750 kV 及 220 kV 配电装置采用户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案提高了 750 kV 及 220 kV 设备抵御风吹雪灾害的能力,但主变压器、高压电抗器由于外形尺寸高大,而底部与地面基本齐平,是变电站内风吹雪堆积最严重的区域之一,另外 66 kV 电容器、电抗器、站用变压器常规的低位布置方式也极易被风吹雪掩埋,因此在电气设备布置上也需要采取优化措施来减少风吹雪的堆积以及方便机械清扫积雪。

### 2.1 750 kV 及 220 kV 高压电气设备布置优化

根据该 750 kV 变电站站址附近气象站风向频率统计结果,站址区域冬季风吹雪时主要风向为南向。根据工程电气主接线和线路出线方向,750 kV 变电站可行性研究阶段电气总平面布置方案图参考通用设计<sup>[4]</sup>,将主变压器与 750 kV 配电装置及高压电抗器平行布置,主变压器低架横穿,从东方向进线,出线向南北两侧出线,如图 1 所示。

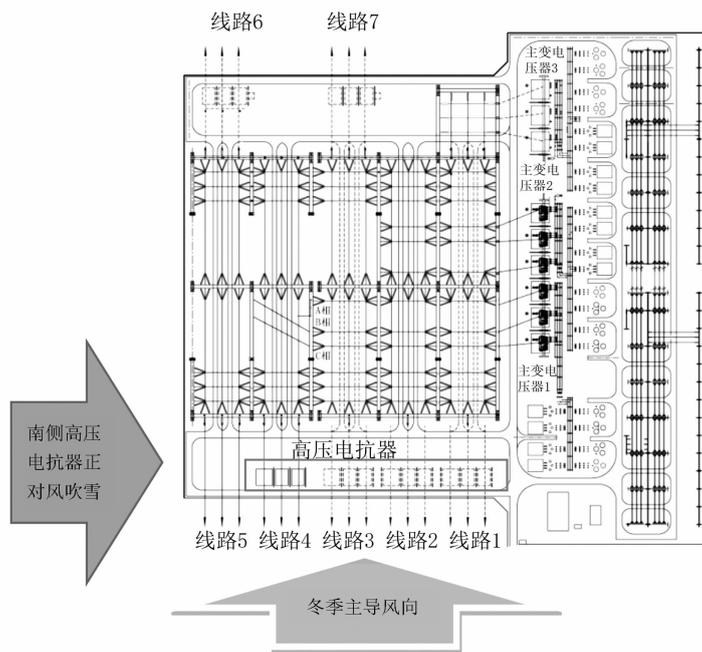


图 1 某 750 kV 变电站可研阶段电气总平面布置

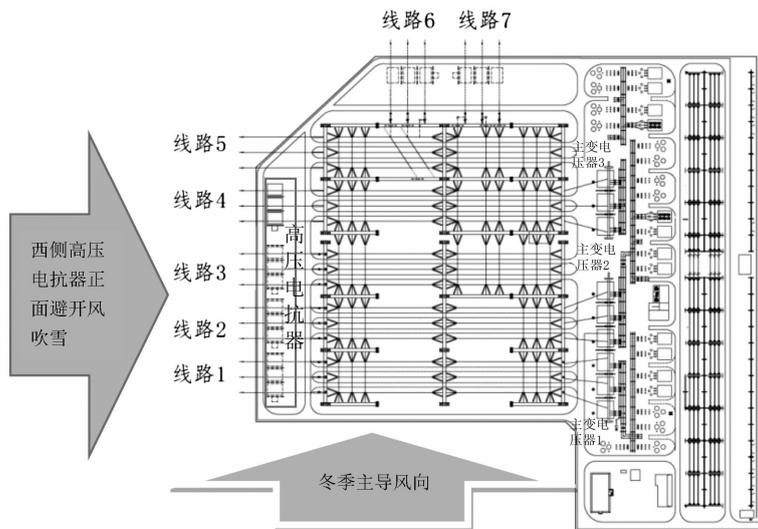


图 2 某 750 kV 变电站优化之后的电气总平面布置

### 1) 调整设备布置走向

如前所述可知,750 kV 及 220 kV 配电装置采用户外 AIS 罐式/瓷柱式断路器方案时存在大量构架、支架阻挡风吹雪,且 750 kV 及 220 kV 配电装置电气设备布置较高,抵御风吹雪能力较高,主变压器正面也未正对风吹雪方向。但布置在 750 kV 配电装置区域南侧的高压电抗器正面直接面对冬季风吹雪方向,由于高压电抗器正面无法设置防火墙阻挡风吹雪,否则会使高压电抗器无法检修,因此风吹雪的堆积会对南侧的高压电抗器造成严重威胁。

针对可研方案不足之处,优化设计将 750 kV 配电装置及高压电抗器在可研设计布置基础上顺时针

旋转 90°,主变压器及 220 kV 配电装置区域布置不变。调整后主变压器与 750 kV 配电装置及高压电抗器垂直布置,750 kV 出线向西和北方向出线,原南侧高压电抗器调整到西侧,使高压电抗器正面基本避开冬季风吹雪主导风向,如图 2 所示。

### 2) 增设防火墙

主变压器及优化后的西侧高压电抗器正面未直接面对风吹雪方向,但其侧面仍然直接面对风吹雪风向,为此在主变压器、高压电抗器侧面各增设一面防火墙。按防火规范要求,主变压器、高压电抗器端部不需设置防火墙的,所以增设的防火墙面对风吹雪方向,其主要作用为阻挡和降低风吹雪的危害。

另外,将主变压器、高压电抗器场地采用局部硬化处理可减少风吹雪堆积,也便于后期机械积雪清理。图3为远期主变压器增设防火墙图。

## 2.2 66 kV 低压电气设备布置优化

通用设计中66 kV断路器常规方案即采用瓷柱式断路器,而66kV瓷柱式断路器设备支架高度至少2.5 m以上,因此设备抵御风吹雪能力较高。但66 kV站用变压器、66 kV 低压并联电抗器、66 kV 低压并联电容器组采用低位布置并加装围栏方案,在风吹雪严重地区低位布置的设备极易被积雪掩埋,而围栏处更是有大量积雪。因此根据 DL/T 5352—2018《高压配电装置设计规范》中“电气设备外绝缘底部距地面大于或等于2.5 m时可不设置围栏”,为提高设备抵御风吹雪能力,采取了如图4所示的优化设计:将站用变压器采用高位基础布置安装,设备套管距地2.5 m以上;低压并联电抗器采用2.5 m高度的玻璃钢支柱安装;低压并联电容器组采用2.5 m高钢管支架安装;均取消围栏。

设备高位布置安装且取消围栏后提高了抵御风吹雪能力,避免了围栏处大量积雪,同时在每两组电容器或电抗器之间设置了一条3 m宽小道,便于清雪机械车辆进出及时清扫积雪,如图3所示。

## 3 结语

上面以新疆地区某750 kV变电站为例,为降低风吹雪对变电站的危害,对电气设备选型及布置优化进行了论述。通过电气设备选型分析确定风吹雪地区选择户外AIS罐式断路器/瓷柱式断路器方案;电气设备布置优化方面,使高压并联电抗器正面避开了直接面对风吹雪方向,主变压器、高压并联电抗器侧面增设防火墙保护,站用变压器、低压并联电抗器、低压电容器组采取高位布置并取消围栏。采用以上优化措施后,可避免在冬季风吹雪时电气设备被积雪掩埋,有利于机械车辆清扫积雪,增强了变电

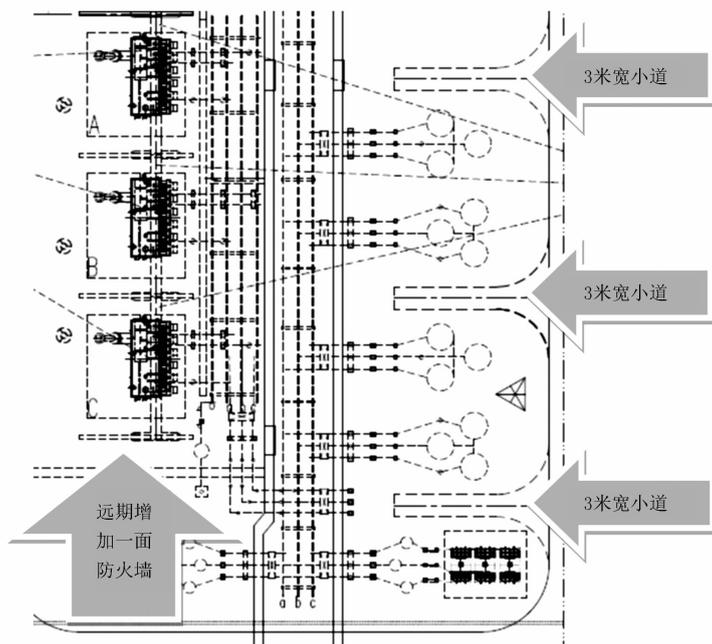


图3 远期1号主变压器区域平面布置



图4 站用变压器、低压电容器和电抗器采用高位布置

# 地区电网重构降损案例分析

靳 旦<sup>1</sup>, 鲜其军<sup>2</sup>, 贺星棋<sup>2</sup>, 唐 伟<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:**网络重构在供电恢复、提升新能源渗透率和运行降损等方面有较广泛的应用。为提升地区电网长期运行的经济性,计算了地区电网在两种不同运行方式下的日有功损耗。在不同负荷情况下,计算了地区电网不同运行方式下的有功损耗,为地区电网长期运行方式的固化提供了基础。最后,计算了地区电网在运行方式固化后,即网络重构后运行的月降损电量,证实了在不影响电网运行安全性和供电可靠性的前提下,通过网络重构即可实现地区电网长期经济运行。

**关键词:**网络重构;运行方式;降损;经济运行

中图分类号:TM63 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2021)02-0062-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210213

## Case Analysis for Loss Reduction of Regional Power Grid Reconfiguration

Jin Dan<sup>1</sup>, Xian Qijun<sup>2</sup>, He Xingqi<sup>2</sup>, Tang Wei<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:** Network reconfiguration is widely applied in power grid for service restoration, renewables penetration promotion and power loss reduction. In order to realize the economic operation of region power grid, the daily active power losses of region power grid under two different operation modes are calculated. Under different loading conditions, the active power losses of region power grid under different operation modes are calculated, which provides a foundation for the consolidation of regional power grid in long-term operation. Finally, the monthly loss reduction of regional power grid is calculated after the operation mode is solidified, that is, after the network reconfiguration. It is verified that under the demands of safety operation and reliability of power supply, the long-term economic operation of regional power grid can be realized through network reconfiguration.

**Key words:** network reconfiguration; operation mode; loss reduction; economic operation

## 0 引 言

挖掘电网降损潜力、提升电网运行经济性是提高电力公司经营效益的重要途径。目前,电网的降损措施可分为技术降损措施和管理降损措施。管理线损是指由于计量、抄表、窃电及其他管理不善而造成的电能损失,可通过规范业务管理能力降低电网损耗。

技术降损是指潮流经过电网设施所产生的损耗,通过一系列措施改善电网潮流分布达到降损效

果。技术降损的主要措施有经济调度<sup>[1]</sup>、电压无功优化<sup>[2]</sup>、网络重构<sup>[3]</sup>、三相不平衡治理等。文献[1]研究了采用经济调度降损的问题,考虑了负荷和新能源的实时波动性,提出了基于鲁棒优化的电网动态经济调度模型;为快速求解所提动态经济调度模型的最优解,提出了一种基于可行域投影的方法,将原模型转换为一个单层线性规划模型来快速求解。文献[2]通过控制无功和电压设备来降低配电网运行损耗,提出了配电网双时间尺度协调的多目标电压无功优化模型。通过协调控制电网传统无功设备

(并联电容器组和变压器分接头)以及新能源机组无功出力以实现在新能源和电动汽车渗透下配电网多时段的最优经济运行。文献[3]研究了一种以降损和载荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法,并将其初步应用到地区电网中。在电力系统中,合理的技术降损措施在不影响系统安全可靠运行的前提下,能有效提升电网运行经济性。

网络重构,即供电路径优化,通过改变断路器状态投切线路,以达到消除线路过载、故障后供电恢复、降低系统网损等目的。目前,网络重构在电网降损、恢复供电、提高新能源渗透率、阻塞管理等方面均有学者展开研究。下面首先对网络重构的研究现状进行了综述,总结了网络重构研究中的数学模型及相应的求解方法;在此基础上,以某地区电网为实例,分析了通过重构实现地区电网降损的结果,计算了不同负荷下,地区电网重构前后的有功损耗;在不影响地区电网供电可靠性的前提下,给出了地区电网在不同负荷下的最优运行方式建议,为地区电网经济运行和降本增效提供了基础。

## 1 网络重构数学模型

随着配电网中不断接入分布式电源和储能装置,配电网从单一的辐射状网络向运行方式较复杂的多运行状态转换。网络重构在配电网供电恢复、阻塞管理、提高新能源渗透率、降损等方面有较多的应用。

配电网故障发生后采取网络重构措施,通过协调分布式电源、储能和柔性负荷可以进行负荷恢复。文献[4]建立了主动配电网多时间段的故障动态恢复模型,目标函数为甩负荷成本、断路器操作成本、分布式电源和变电站的出力成本最小;约束条件包括配电网潮流方程约束、线路热极限约束、节点电压约束、辐射状与连通性约束、检修策略约束、储能系统约束和甩负荷约束,以 PG&E 69 系统对模型有效性进行了验证。文献[5]中通过网络重构对配电网多时段的负荷进行恢复,模型的目标为最大化负荷恢复量,以改进的 IEEE 33 节点算例验证了负荷恢复方法在多种故障场景下的有效性。

文献[6]研究了基于网络重构和智能软开关协调控制的交直流混合高压配电网阻塞管理模型,智能软开关是由背靠背电压源型换流器控制的一种新型电力电子设备,优化的目标函数为最小化有功功率减载成本和重新调度输电网电源点或发电机组有功功率的成本。文献[7]构建了配电网重构下的需

求侧响应和智能软开关模型,建立了以最小化网损、弃风弃光、智能软开关损耗和断路器费用之和的目标函数。文献[8]以柔性开关出力、常规断路器的通断为优化变量,建立了网络重构和柔性断路器调控的双层规划问题,优化的目标为网络损耗、常规断路器动作次数、最大的电压偏差和馈线负载均衡度。

文献[9]提出了一种最大化接纳分布式电源有功出力的配电网重构模型,提出并研究了配电网对于新能源的最大可传输能力(available delivery capability, ADC)。文献[10]研究日前最小化操作次数的配电网重构模型,通过最小的断路器动作次数来解决因新能源高渗透造成的线路热极限越限问题。网络重构的数学模型总结如表1所示。

表1 网络重构数学模型汇总

文献编号	控制设备	优化目标
文献[4]	断路器	甩负荷成本、断路器操作成本、DG 和变电站出力成本
文献[5]	断路器,可控分布式电源、储能	负荷恢复量
文献[6]	断路器,智能软开关	有功减载成本、上一电压等级重新调度成本
文献[7]	断路器、智能软开关、储能	网损、弃风、弃光、断路器费用,智能软开关损耗
文献[8]	多状态断路器出力、断路器通断	网损、常规断路器动作次数、电压偏差、馈线负载均衡度
文献[9]	断路器	分布式电源出力
文献[10]	断路器	常规断路器动作次数

## 2 网络重构求解方法

网络重构是断路器通断状态的优化过程,断路器状态是一个二元变量,因此网络重构是一个混合整数非线性规划问题。目前,此类问题没有一个公认的通用性强且求解效率高的工具。而且,随着电网支路的增加,断路器组合数目指数性增加,网络重构求解存在组合爆炸问题。目前,现有文献对网络重构的求解方法主要分为两类:利用商业软件求解<sup>[4-7]</sup>和智能算法求解<sup>[8-10]</sup>。

现有文献中,文献[4-7]采用商业软件求解所提出的网络重构问题,将所建立的网络重构模型利用二阶锥松弛方法转换成混合整数二阶锥规划模型,采用 YALMIP、Cplex、Gurobi 等商业软件组合即可对混合整数二阶锥规划模型进行求解。

利用智能算法求解网络重构问题也有较多的学者

展开研究,文献[8]采用强化帕累托进化算法求解多目标网络重构的帕累托最优解集,文献[9-10]采用基于二进制粒子群优化算法求解配电网的最优结构。

### 3 地区网络重构降损案例分析

#### 3.1 地区网络重构降损案例 1

某地区局部电网如图 1 所示,A 和 B 是由两回 220 kV 线路连接的两座 220 kV 变电站;C 和 D 是两座 110 kV 变电站。原运行方式中,C 变电站由 A 变电站 110 kV 出线供电,D 变电站由 B 变电站 110 kV 出线供电,B 变电站 110 kV 与 C 变电站之间的 110 kV 线路断路器、C 和 D 变电站之间的 110 kV 线路断路器为断开状态。

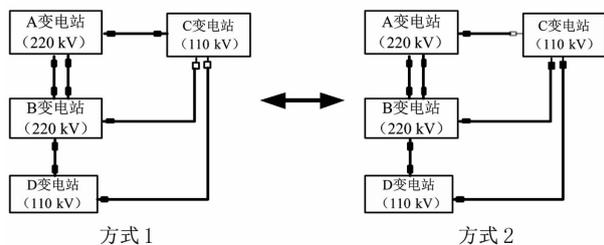


图 1 地区电网局部运行方式

供电方式优化后,将 A 变电站 110 kV 与 C 变电站之间的线路断路器断开,将 B 变电站 110 kV 与 C 变电站之间的线路断路器闭合、D 和 C 变电站之间的线路断路器闭合,C 变电站由 A 变电站供电改为由 B 变电站供电,同时 C 和 D 变电站线路闭合,提高供电可靠性。

在代表日当天,该地区电网在方式 1 和方式 2 两种供电方式下的有功损耗对比如图 2 所示,其中图 2 的有功损耗为地区电网 220~35 kV 的总损耗,不包括 10 kV 及以下电网损耗。地区电网在方式 1 运行时日总损耗为 676.34 MWh,在方式 2 运行时日总损耗为 660.62 MWh。代表日当天,将地区电网网络从方式一转为方式二运行,减少电网损耗 15.72 MWh,损耗降低 2.32%。从图 2 可看出,地区电网局部网络重构前后有较好的降损效果。

为探究方式 1 和方式 2 在不同负荷情况下的运行经济性,将 C 和 D 变电站总负荷从 0 逐渐增加到 2 倍基础负荷大小,方式 1 和方式 2 在不同负荷大小下的系统网损对比如图 3 所示。可看出,随着负荷增大,方式 1 和方式 2 之间的损耗差距逐渐增大,方式 2 的运行经济性更强。

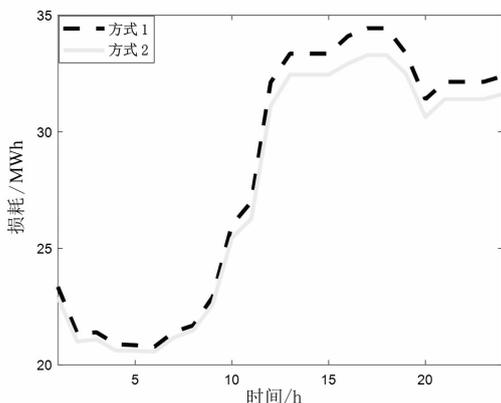


图 2 供电方式转换后有功损耗对比(降损案例 1)

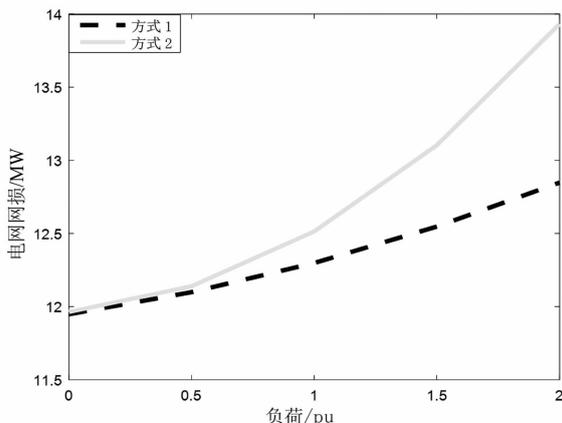


图 3 在不同负荷大小下两种方式损耗对比(降损案例 1)

调度通过实测计算在网络重构降损案例 1 中,电网由方式 1 转换为方式 2,方式 2 运行共计 117 天后,相比于方式 1 运行,累计降损电量 737.1 MWh,方式 1 的运行模式具有长期经济性。

#### 3.2 地区网络重构降损案例 2

地区电网局部运行方式如图 4 所示,A、B 分别为两座 220 kV 变电站。C、D、E 为 110 kV 变电站,在方式 1 中,D 变电站由 A 变电站供电,C、E 变电站由 B 变电站供电,C 变电站与 A、D 变电站线路断开;供电方式优化后,方式 2 中,C、D 变电站由 A 变电站供电,E 变电站由 B 变电站供电。

在代表日当天,为提升电网运行经济性,将地区局部电网由方式 1 调整至方式 2。代表日当天,电网在两种运行方式下的有功损耗对比如图 5 所示。地区 220~35 kV 电网在方式 1 运行情况下,总损耗为 230.22 MWh,在方式 2 的运行情况下,总损耗为 227.83 MWh。代表日当天将方式 1 调为方式 2 运行,日降损 2.39 MWh,降损比例为 1.04%。在不影响电网运行安全性和供电可靠性的前提下,不增加任何操作成本就有较好的降损效果,提升了地区电网运行经济性。

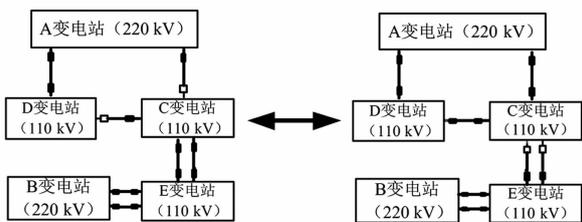


图 4 地区电网局部运行方式

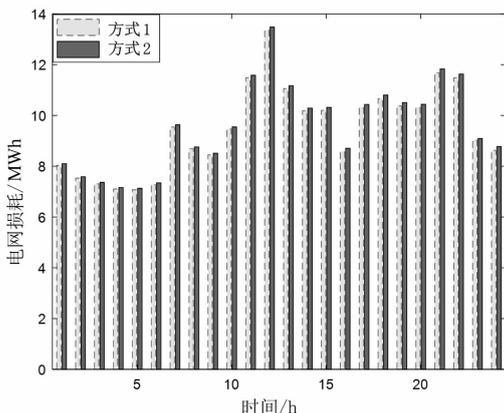


图 5 供电方式转换后有功损耗对比(降损案例 2)

为探究两种方式的临界经济负荷,将变电站 C、D、E 总负荷从 0 逐渐增加至 2 倍基础负荷大小,方式 1 和方式 2 在不同的负荷大小下,系统网损对比如图 6 所示。可看出,在 0.5 倍的基础负荷上,随着负荷逐渐增加,两种方式的运行损耗逐渐增大,大负荷情况下方式 2 运行更经济。

通过实测数据仿真降损案例 2 在某月重构后的降损情况,方式 2 相比于方式 1 月降低损耗 78.23 MWh,方式 1 运行模式具有长期经济性。

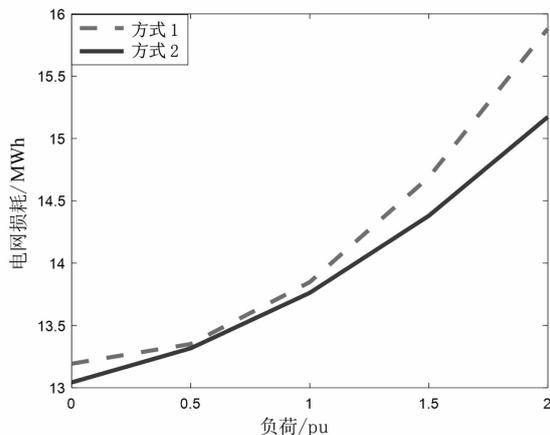


图 6 在不同负荷大小下两种方式损耗对比(降损案例 2)

## 4 结 语

首先,对网络重构的数学模型和求解方法进行

了简单综述,分析了地区电网通过网络局部重构降低电网有功损耗两个案例。计算了地区电网在不同负荷情况下,不同运行方式的有功损耗,为地区电网长期经济运行的方式选择提供了基础。最后,通过调度实测数据证明了网络重构对电网长期运行具有较好的降损作用。

## 参考文献

- [1] Liu Y, Wu L, Li J. A Fast LP - based Approach for Roust Dynamic Economic Dispatch Problem: A Feasible Region Projection Method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5) :4116 - 4119.
- [2] Jin D, Chiang H D, Li P. Two - Timescale Multi - objective Coordinated Volt/Var Optimization for Active Distribution Networks[ J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6) :4418 - 4428.
- [3] 汲国强,吴文传,张伯明,等. 以降损和载荷均衡为目标地区电网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11) :172 - 178.
- [4] 汤一达,吴志,顾伟. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7) :2731 - 2740.
- [5] 于浩,刘家恺,宋关羽,等. 基于二阶锥规划的有源配电网多时段负荷恢复方法[J]. 天津大学学报, 2019, 52(12) :1303 - 1311.
- [6] 黄强,袁晓冬,张曦,等. 基于网络重构与 SNOP 协调控制的交直流混合高压配电网阻塞管控模型[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2) :55 - 62.
- [7] 章博,刘晟源,林振智,等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J/OL]. 电力系统自动化, doi. org/10. 7500/AEPS 20190930004.
- [8] 张今,耿光超,江全元,等. 含柔性多状态开关的配电网多目标随机运行优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(10) :3140 - 3148.
- [9] J. Liu, H. Chiang. Maximizing Available Delivery Capability of Unbalanced Distribution Networks for High Penetration of Distributed Generators[ J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3) :1196 - 1202.
- [10] Y. Fu, H. Chiang. Toward Optimal Multi - period Network reconfiguration for Increasing the Hosting Capacity of Distribution networks[ C]. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, 2017:1 - 5.

## 作者简介:

靳 旦(1995),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电网经济运行和新能源消纳相关技术。

(收稿日期:2020 - 11 - 10)

# 智能变电站二次安全措施危险点分析

黄忠胜<sup>1</sup>, 廖小君<sup>1</sup>, 刘娟<sup>2</sup>, 王婷婷<sup>1</sup>, 冯先正<sup>1</sup>, 张里<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610081)

**摘要:**为保证智能变电站继电保护和安全自动装置现场安全作业,主要采用投入检修态硬压板,退出保护装置软压板、智能终端出口硬压板以及断开物理光纤等安全隔离措施。以线路停电检修为例,从设备之间的电流电压采样、跳合闸(包括远跳)、启动失灵等信息联系出发,重点分析影响运行设备的危险点及可能导致的结果。根据各种危险点分析总结出适用的二次安全措施,完成检修装置与运行装置的可靠隔离,对运行维护人员提炼总结二次安全措施具有参考意义。

**关键词:**智能变电站; 安全隔离; 危险点; 二次安全措施

**中图分类号:** TM764 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0066-04

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210214

## Analysis on Dangerous Points of Secondary Safety Measures in Smart Substation

Huang Zhongsheng<sup>1</sup>, Liao Xiaojun<sup>1</sup>, Liu Juan<sup>2</sup>, Wang Tingting<sup>1</sup>, Feng Xianzheng<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 610072, Sichuan, China;

2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety operation of relay protection and automatic safety device in smart substation, safety isolation measures are mainly adopted, such as putting into maintenance pressing plate, exiting device soft pressing plate, outlet hard pressing plate and disconnecting optical fiber between devices. Taking line outage maintenance for example, starting from the information connection between equipment such as voltage and current sampling, tripping (including remote tripping), starting failure etc., it focuses on the analysis of the dangerous points affecting the operation equipment and the possible results. The applicable secondary safety measures are summarized according to various dangerous points, and the reliable isolation between the maintenance devices and the operation devices are completed, which provides valuable references for the operation and maintenance personnel.

**Key words:** smart substation; safety isolation; dangerous points; secondary safety measures

## 0 引言

智能变电站继电保护交流回路采样被光纤网络取代,其二次安全措施的重点主要包括 SV 采样输入回路及跳合闸、启动失灵等开出回路等。常规变电站开出回路安全措施的实施,一直要求有危险点的回路都应设置明显的断开点,即在跳合闸、断路器启动失灵等开出回路都接入了可投退的硬压板。而智能变电站的继电保护二次回路安全措施主要是依靠数字软压板和检修状态硬压板的投退<sup>[1]</sup>,使得停

电设备和运行设备隔离过程中的危险点较为隐蔽。探讨停电检修时影响运行设备的危险点及可能导致的结果,有助于运行维护人员适应智能变电站二次安全措施新模式的变化。

## 1 智能变电站二次回路特点

智能变电站由于采用电子式互感器、智能终端以及信号传输方式的变化,较常规变电站而言其二次回路具有如下特点:

1) 智能变电站采用电子式互感器。电子式互

传感器从一次采集单元到二次侧的合并单元全部采用光纤,彻底解决了常规 CT 开路和 PT 短路给二次设备带来的诸多问题。由于电子式互感器稳定性的原因,经历前期运维实践后,后期新建的智能变电站普遍采样常规互感器+模拟式合并单元的结构。

2)智能变电站普遍采用智能终端。智能终端就地安装在一次断路器附件的户外柜中,与断路器、隔离开关之间的连接电缆很短,极大地降低了直流控制回路发生接地故障的可能性。而且智能终端是智能电力监测装置,能够对出口跳闸、断路器及隔离开关位置等回路状态进行监视,进一步提高二次短电缆连接的可靠性。

3)智能变电站二次装置的连接方式,由光纤回路替代了常规变电站的电缆二次回路,模拟信号传输方式转变为 GOOSE、SV、MMS 数字报文传输,要实现有效的隔离措施,不能仅是直接在物理传输回路设置断开点,还得对装置进行软压板和检修状态的设置,才能避免误跳运行设备情况的发生。

## 2 二次安全措施的隔离技术

针对智能变电站继电保护二次安全措施的规范并结合生产现场实际工作,提出了保证二次回路安全工作主要采用以下隔离技术。

### 2.1 软压板的投退

智能变电站保护装置增加了很多软压板,替代常规保护部分硬压板功能,如“GOOSE 发送软压板”“间隔投退软压板”“失灵启动 GOOSE 发送软压板”“GOOSE 接收软压板”,软压板的投退为二次安全措施提供了逻辑断开点。新的标准化设计规范对智能变电站继电保护设备的软压板名称和功能进行了统一定义<sup>[2-3]</sup>,从而保证不同厂家之间产品的通用性,降低了检修人员在设备调试及检验前安全措施的难度,这对保证智能变电站二次设备运行维护有重要意义。

### 2.2 “投检修态”硬压板的投退

“投检修态”压板的投入将使装置当中的报文“test”位置为“1”,目的为告知其他设备本装置正处于检修状态,收到这个信息的其他装置如果“投检修态”压板也是投入的状态,即两者检修状态一致,信号进行处理或动作;如果两者检修状态不一致时,则报文视为无效,不参与逻辑运算。

智能变电站保护装置、智能终端及合并单元的

的检修机制如表 1 所示。

表 1 智能变电站各装置检修机制

状态	智能终端 不检修	智能终端 检修	合并单元 不检修	合并单元 检修
保护装置 检修	检修异常, 不执行	正常执行	检修异常, 闭锁保护	正常执行
保护装置 不检修	正常执行	检修异常, 不执行	正常执行	检修异常, 闭锁保护

从表 1 可以看出智能变电站与常规变电站的“检修”硬压板功能差异较大,“投检修态”是智能变电站二次安全措施当中的关键步骤。在实施过程中,“投检修态”在整个二次安全措施中与软压板的配合和所处步骤顺序很重要。未考虑“投检修态”硬压板执行的先后顺序,可能造成误闭锁运行的保护装置如母线保护,一般在退出相应软压板后,再考虑投入检修硬压板。

### 2.3 拔除光纤形成硬隔离措施

反复拔除装置间光纤,容易导致光纤接口使用寿命缩减、试验功能不完整等问题<sup>[4]</sup>。利用发送侧和接收侧两侧装置的软压板,可以形成数字逻辑断开点,隔离虚回路,所以检修作业不宜采用拔除光纤的措施<sup>[5]</sup>。但在不影响运行设备的前提下,下列情况可以考虑拔除光纤:1)必须断开的链路,装置之间没有设置发送/接收软压板;2)新投运装置的软压板和检修硬压板还没有现场验证。

## 3 二次安全措施实例分析

### 3.1 线路间隔停电检修二次安全措施思路

目前,按照国家电网有限公司关于智能变电站的相关技术规范<sup>[6]</sup>,继电保护功能的实现基本都是要求直接采样和直接跳闸,即保护装置的采样和跳闸都经光纤直连传输,不经过交换机转发,其余测控等功能的 SV 和 GOOSE 报文交互都是经过程层网络传输,因此如图 1 所示,智能变电站线路保护间隔的光纤通信采用的是点对点 and 组网相结合的方式。

以常见的采用传统互感器+合并单元的模式为例,线路间隔停电检修,线路保护二次安全措施涉及到母线保护和该间隔保护两部分。其中母线保护需要对 SV 接收软压板(或该间隔投入软压板)、GOOSE 启动失灵接收软压板等采取对应的安全措施;该间隔保护需要对启动失灵 GOOSE 发送软压板、检修硬压板等采取对应的安全措施。此外,有电流差动



全措施发生了较大的变化,合理有序地利用数字软压板形成通信链路上的“断开点”,利用“投检修态”硬压板形成检修机制上的“断开点”,以上措施皆不是常规变电站安全措施概念上的“明显断开点”,不直观,易遗漏。前面从危险点分析的角度,重点分析停电检修装置对运行装置的影响,以线路保护停电检修为例,结合二次系统的结构特点,明确每一步安全隔离措施针对的危险点,有助于运行维护人员对智能变电站二次安全措施的理解,对智能变电站二次安全措施的实施具有一定参考价值。

### 参考文献

- [1] 曹萌,周海娟,孙嘉翼,等. 智能变电站继电保护二次安全措施的规范化管理[J]. 科技与企业,2015(3):185.
- [2] 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1161—2014[S],2014.

- [3] 变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1175—2013[S],2013.
- [4] 贺春,李鑫. 智能变电站继电保护安全措施研究[J]. 电工技术,2019(5):99-100.
- [5] 丁宣文,王平. 500 kV 智能变电站二次设备改造方案研究[J]. 四川电力技术,2016,39(6):59-64.
- [6] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范 Q/GDW 441—2010 [S]. 北京: 国家电网公司企业标准,2010.

### 作者简介:

黄忠胜(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护和智能变电站技术;

廖小君(1974),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统继电保护及信息系统;

刘娟(1984),女,高级经济师,研究方向为智能供电技术。

(收稿日期:2020-08-14)

(上接第57页)

## 5 结语

基于二阶带通滤波器的锁相环结构简单,且能够快速实现输入波形跟踪和锁相,在输入电压信号幅值、相位和频率发生突变时,所提方法同样能够达到快速锁相的效果。针对传统锁相环在长时间运行中由于谐波造成的相位偏移,通过合理设计二阶带通滤波器的中心频率、品质因数等参数,结合二阶广义积分器和环路滤波器的低通滤波特性,可有效抑制输入信号的直流分量和高频谐波,消除锁相环输出信号中的相位偏移问题。并通过仿真验证了所提基于二阶带通滤波器的锁相环优良的滤波特性和锁相功能。

### 参考文献

- [1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-16.
- [2] 吴军,程尹曼,程启明,等. 基于 SOGI 和级联 DSC 的正负序分量分离及其在不平衡 PWM 整流器中的应用[J]. 上海电力学院学报,2018,34(4):356-360.
- [3] 瞿殿桂,曹以龙. 基于双 d-q 旋转轴的三相电压锁相环分析及仿真[J]. 上海电力学院学报,2017,33(1):49-54.
- [4] 陈艳艳,沈旦立,皇森森,等. 基于二阶广义积分器的

单相并网锁相环的研究[J]. 电力电子技术,2013,47(5):46-47.

- [5] 唐建宇,徐万良,刘永丽,等. 基于同步旋转变换的改进型单相锁相环研究[J]. 控制与信息技术,2019(2):26-31.
- [6] 文武松,张颖超,王璐,等. 解耦双同步坐标系下单相锁相技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):114-120.
- [7] 陈四雄,易龙强,黄文俊,等. 基于构造非正交向量的单相锁相技术研究[J]. 电工技术学报,2019,34(2):398-408.
- [8] 张苏捷,杨旭红,张云飞,等. 基于二次微分的电力单相锁相环技术研究[J]. 上海电力大学学报,2020,36(3):271-274.
- [9] 关清心,张宇,李民英,等. 基于微分环节的单相锁相环方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5318-5325.
- [10] 袁庆庆,戴鹏,符晓,等. 单相电力锁相环技术综述[J]. 变频器世界,2010(7):43-46.
- [11] 龚锦霞,解大,张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报,2009,24(10):94-99.

### 作者简介:

荆世博(1989),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为可再生能源并网技术;

辛超山(1989),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电网规划技术和新能源并网;

薛静杰(1989),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电网规划技术和新能源并网;

张增强(1979),男,高级工程师,从事电力系统规划和并网研究。

(收稿日期:2020-12-17)

# 一起 252 kV GIS 断路器异常发热缺陷分析

邱 炜,刘军军,马锡良,徐清鹏,周 波,罗 杨  
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

**摘要:**针对一起 220 kV GIS 设备断路器壳体发热缺陷进行了详细分析,利用红外热像图谱、X 射线诊断技术、回路电阻测试等试验手段判断了缺陷性质,结合设备结构特点,进行分段测试后准确定位出缺陷位置并分析了故障原因,并通过解体检测验证了诊断结论,为 GIS 断路器类似故障诊断分析提供了科学依据,并对 GIS 断路器的运行维护提出了建议。

**关键词:**GIS 断路器;发热缺陷;回路电阻

**中图分类号:**TM561 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2021)02-0070-03

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210215

## Analysis of Abnormal Heating Defect of 252 kV GIS Circuit - breaker

Qiu Wei, Liu Junjun, Ma Xiliang, Xu Qingpeng, Zhou Bo, Luo Yang  
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** A heating defect of 220 kV GIS circuit - breaker is analyzed in detail. The nature of defects is judged by infrared thermography, X - ray diagnosis technology, loop resistance test and other test methods. Combined with the structural characteristics of the equipment, the defect is accurately located and the heating reason is analyzed. The diagnosis conclusion is verified by disassembly detection, which provides a scientific basis for similar fault diagnosis and analysis, and puts forward some suggestions for operation and maintenance of GIS.

**Key words:** GIS circuit - breaker; heating defect; loop resistance

## 0 引 言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)将断路器、隔离开关、接地开关、母线、CT等部件密封在金属腔体内,具有占地空间小、运行可靠性高、维护量小等优点,在电力系统得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。近年来,GIS设备发热故障屡见不鲜,已造成多起设备停运事故。因此,加强GIS设备发热缺陷故障的检测与分析具有重要意义<sup>[4-9]</sup>。

下面介绍一起 252 kV GIS 断路器罐体异常发热缺陷,分析了该处缺陷的主要原因,提出了诊断GIS断路器异常发热缺陷的方法措施,并给出设备运行维护建议。

## 1 故障概况

2020年4月11日16时11分,某220 kV变电站运行人员发现220 kV 263断路器A相GIS壳体异常发热,热点温度达40℃,B、C相及环境温度为22℃,红外图谱见图1。

该设备型号为ZF11-252(L),为三相分体设备,由新东北电气集团高压开关有限公司生产,于2013年12月投运。

发生缺陷时,该变电站运行方式为220 kV分列运行,263、265、201断路器运行于I母,266、264、202断路器运行于II母。

历史操作信息:263断路器近5年共动作12次,最近一次操作为2019年4月25日合闸。

历史缺陷信息:2019年11月10日,263断路器

本体 A 相温度较其他两相略微偏高(2 ℃),检修人员于 2019 年 11 月 12 日开展超声波、特高频测试,均未发现异常,三相气压表正常。

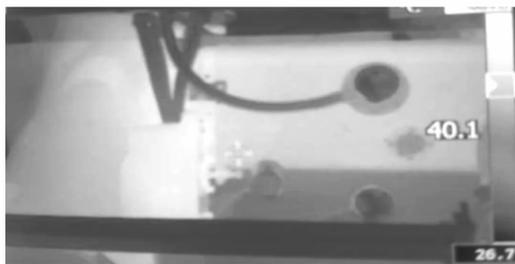


图 1 263 断路器 A 相红外图谱

## 2 试验诊断

在接到缺陷信息后,检修人员开展了现场检查,发现该断路器 A、B、C 三相气室气压不平衡,A 相气压为 0.65 MPa,B、C 相气压为 0.63 MPa,测量数据见表 1。负荷电流三相平衡无异常。

19:10,对该断路器开展了精确红外测温,发现 A 相壳体最高温度升至 50 ℃,气压上升至 0.69 MPa,而此时负荷与当日下午并无明显变化。263 断路器气室 GIS 外壳(热点)温度测量数据见表 2。

表 1 263 断路器气室气压测量数据 单位:MPa

检测时间	A 相	B 相	C 相
17:10	0.65	0.63	0.63
19:10	0.69	0.63	0.63

表 2 263 断路器气室 GIS 外壳(热点)温度 单位:℃

检测时间	A 相	B 相	C 相	热点温差
16:11	40	22	22	18
19:10	50	23	23	27

由于该缺陷属于红外发热缺陷,且红外图谱在 GIS 罐体上有明显温度梯度,具有局部热点特征,故判断为内部连接出现异常导致了发热情况。

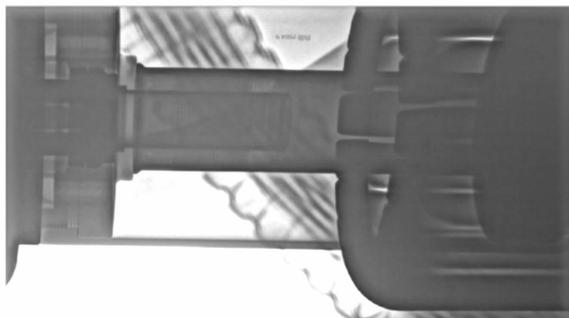
考虑到设备内部缺陷有明显的发展趋势,当日 21:00 对设备进行了紧急停电,并开展了停电诊断工作。

### 2.1 X 射线诊断

对 263 断路器开展了 X 射线成像检测,检测图谱如图 2 所示,未发现 A 相动静触头接触处明显合闸不到位情况,动静触头螺栓及紧固件无明显松动。A、C 相对比无明显异常。初步判定动静触头无合闸不到位现象,无明显螺栓松动。



(a) 263 断路器 A 相触头接触情况



(b) 263 断路器 C 相触头接触情况

图 2 263 断路器动静触头 X 射线检测图谱

### 2.2 气体检测

对 263 断路器 A 相相关气室进行 SF<sub>6</sub> 分解产物检测,检测数据见表 3,各项指标符合规程要求,未发现异常。

### 2.3 回路电阻测试

从 26330、26340 接地开关处测量 263 断路器回路电阻,测量回路如图 3、图 4 所示,数据结果见表 4,可以看出 A 相回路电阻远远大于 B、C 两相,数据异常。

表 3 263 断路器气室气体检测结果

项目	A 相气室	B 相气室	C 相气室
压力/MPa	0.69	0.63	0.63
SO <sub>2</sub> /SOF <sub>2</sub> /( μL · L <sup>-1</sup> )	0	0	0
H <sub>2</sub> S/( μL · L <sup>-1</sup> )	0	0	0
CO/( μL · L <sup>-1</sup> )	48	36.2	37.5
HF/( μL · L <sup>-1</sup> )	0	0	0
水分(20 ℃)/( μL · L <sup>-1</sup> )	56.2	28.5	19.6
纯度/%	99.9	99.9	99.9
结论	合格	合格	合格

表 4 263 GIS 断路器部分回路电阻测试结果

相别	回路电阻/μΩ	结论
A 相	5400	异常
B 相	55	合格
C 相	58	合格

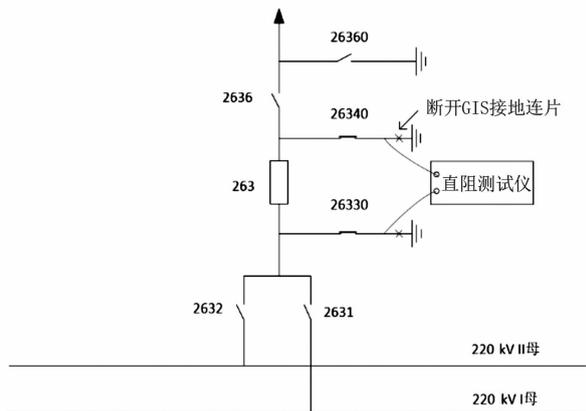


图 3 263 GIS 断路器部分回路电阻测试

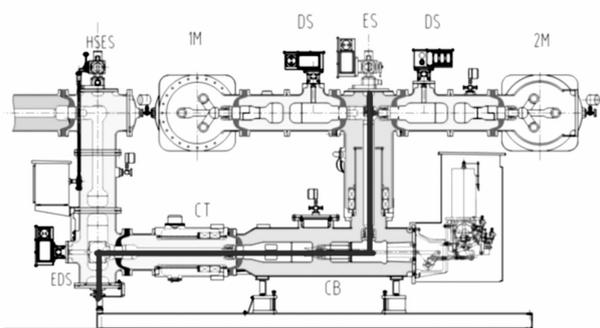


图 4 263 GIS 断路器部分回路结构

## 2.4 缺陷定位

在回路电阻测出异常后,由于所测回路电阻为 26330 接地开关到 26340 接地开关之间部分,所含元器件较多。为进一步减小测试范围,精确定位缺陷位置,在回收气体后,打开断路器动静触头处手孔,脱开拐臂锁销后,将断路器处于半分半合状态(见图 5),分段测量回路电阻。

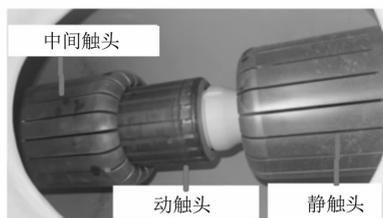


图 5 手孔打开位置结构

分段测试数据见表 5,可以确定接触不良部位为中间触头与 T 型导体之间,设备内部位置如图 6 所示。

表 5 263 GIS 断路器部分回路电阻分段测试结果

分段位置	回路电阻/ $\mu\Omega$	结果
中间触头—26330 接地开关	4600	异常
T 型侧导体—26330 接地开关	55	正常
中间触头—T 型侧导体	4400	异常
静触头—26340 接地开关	56	正常

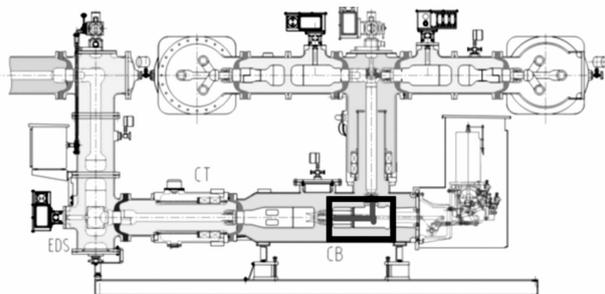


图 6 263 GIS A 相断路器接触不良部分

## 2.5 开罐解体检查

故障断路器为三相分箱式,解体发现 A 相气室内部遗留大量粉尘。中间触头与 T 型导体交界处有严重烧蚀痕迹,且在缝隙中有凹凸不平黑色金属物,如图 7 所示。从颜色来看,A 相中间触头相较 B、C 相颜色暗淡,且 T 型导体与中间触头交界处颜色最为暗淡。从烧损程度来看,T 型导体与中间触头交界处最为严重,缝隙内有黑色金属物,有凹凸不平缺口。灰色粉末堆积形状与气体回流口位置相对应,如图 8 所示。

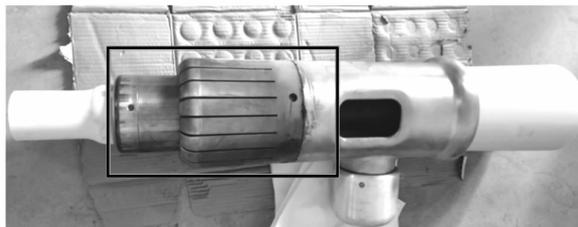


图 7 263 断路器 A 相解体

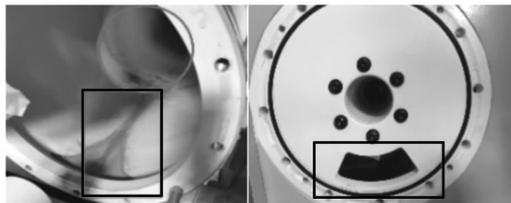


图 8 263 断路器 A 相罐体内粉尘及气体回流口

对 T 型导体与中间触头交界处缝隙宽度进行了测量,发现 A 相较较大,数值达 1.1 mm, B、C 相为 0.2 mm, A 相连接处存在松动、紧固不到位的情况。

## 3 故障原因分析

GIS 断路器内部发热缺陷,是一个逐渐劣化的过程。该缺陷设备近 1 年内无分合操作,室内 GIS 并未遭受恶劣环境影响,同时该设备并未遭受过电压且所有保护装置及系统无异常。由此判断,本次故障的原因属产品或装配质量问题。

(下转第 88 页)

# 旁路作业技术在配电网工程中的研究与应用

王武双,李杰,陈效,陈显忠,刘德锋

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

**摘要:** 配电不停电作业技术是提高供电可靠性的重要手段,已不断受到国内供电企业重视。其中的旁路作业技术作为不停电解决配电网大型检修和改造工程的有效方式,一直被业内归类为配电不停电作业技术中最复杂的作业项目。按照传统作业方式,旁路作业的开展将依托柔性电缆和旁路开关等设备形成较为复杂的旁路系统,以实现负荷转移,作业过程牵涉多班组和多专业配合,准备工作多,需投入较多的人力、物力,且现场安全风险管控难度较大。对传统旁路作业现场组织管理流程进行总结,提出了一种多班组、多专业作业现场组织管理模式和一种新的旁路作业技术。经多次现场实践,证明该方法在配电网检修和改造中是有效且实用的。

**关键词:** 不停电作业;旁路作业;配电网检修;配电网改造

中图分类号:TM73 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2021)02-0073-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210216

## Research and Application about Usage of Bypassr in Distribution Network Reconstruction

Wang Wushuang, Li Jie, Chen Xiao, Chen Xianzhong, Liu Defeng

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

**Abstract:** Live working technology is an important means to improve the reliability of power supply, which has been constantly attached importance by the domestic power supply enterprises. As an effective way to solve the large-scale maintenance and reconstruction project of distribution network, the bypass working technology is classified as the most complex live working. According to the traditional methods, bypass working should rely on flexible cables, bypass switches and other special equipments to form a complex bypass system to achieve load transfer. The operation process involves multiple professional departments, and requires more worker and equipment. The traditional bypass working process is summarized. A multi-departments, multi-fields organization and management idea is proposed, and a new bypass working technology is put forward. It is proved that the proposed method is effective and practical in the maintenance and reconstruction of distribution network.

**Key words:** live working; bypass working; distribution network maintenance; distribution network reconstruction

## 0 引言

随着用电客户优质服务和维权意识不断增强,供电可靠性要求不断提高,供电企业一直在不断探索新技术和新方法以更好地为客户提供优质的电力供应。不停电作业是以实现用户不停电或短时停电为目的,采用多种方式对设备进行检修的技术,其作业方式包括了带电和停电检修<sup>[1]</sup>。而旁路作业则是通过旁路设备接入,将配电网中的负荷转移至旁

路系统,实现待检修设备停电检修的作业方式<sup>[2]</sup>。长期以来,配电不停电作业技术作为减少停电、提高供电可靠性的有效技术手段不断得到重视和强化,在国内配电检修和改造工作中大放异彩,为供电企业优质服务和供电可靠性提升提供了坚实的技术支撑<sup>[3-5]</sup>。在国家电网公司和南方电网公司,根据作业方式方法和难易程度,常见配电不停电作业项目可分为四类,其中一、二类为简单项目,三、四类为复杂项目<sup>[1-6]</sup>。作为第四类复杂类型的旁路作业项目因其可减少甚至避免因大型施工现场的配电网检修

或改造导致的客户停电而备受重视。但也因为该项技术的应用往往涉及旁路柔性电缆及其附件、旁路负荷开关和中间对接头的应用,作业现场布局较大。此外,作业现场还通常涉及带电作业、运行操作、检修和调度等多专业、多班组配合。该类项目现场综合性强,管控难度较大,一定程度上制约了该项技术在各供电企业全面推广<sup>[7]</sup>。目前国内相关研究主要集中在基于柔性电缆的旁路作业技术应用探讨<sup>[8-11]</sup>,少有对作业组织流程和现场安全风险管控的研究。文献[12]提出了一种新的旁路作业方式,但多专业协同作业过程的风险点把控尚无详细阐述。因此,能在满足安全管理规定的框架下,结合既有的带电作业、配电网调度、运行操作和检修业务流转模式,探索出旁路作业现场各专业、各班组间高效、规范的组织管理模式,对推广旁路作业在各供电部门的普遍应用具有重要意义。

下面在对现有相关配电专业间工作流转机制进行总结的基础上,提出了一种可行的旁路作业组织管理新模式。同时,结合配电线路改造工程的特点,在充分利用改造后网络设备资源的条件下,采用旁路作业法实施不停电作业,极大地减少了柔性电缆敷设,节省了人力成本,压缩了工作时长,提升了工作效率。通过配电网改造和检修现场的实际应用,证明所提方法可行、实用。

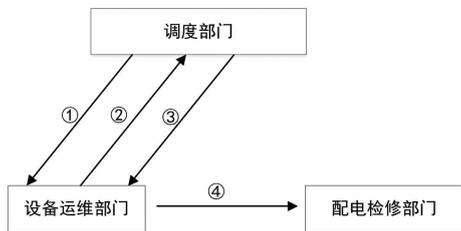
## 1 作业现场组织管理分析

按照配电作业安全管理相关规定,无论是运行维护、停电检修,还是带电作业,都需要履行保障安全的组织措施<sup>[13]</sup>,严格执行包括工作票制度、工作许可制度和终结制度在内的各项措施。文献[13]对停电检修和带电作业的技术适用范围,相应的配电第一、第二种工作票和配电带电作业工作票的使用条件都做了严格规定。各类现场作业都涉及作业前的许可和作业后的汇报终结环节,并且对于某作业项目的许可和终结必须一一对应。下面就停电检修、常规带电作业和旁路作业的现场组织管理模式进行分析。

### 1.1 停电检修组织管理

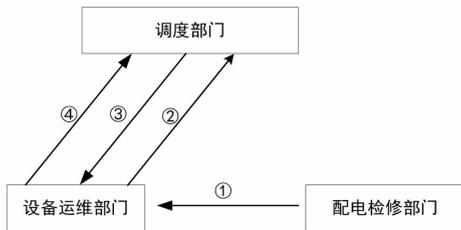
对于计划性配电网停电检修工作,按照现有管

理规定,工作的全过程通常涉及调度、运行操作和检修 3 个专业班组(部门)<sup>[13]</sup>。根据当日停电计划,调度部门向设备运维部门下达倒闸操作指令,由运行操作人员按照调度指令对设备进行逐项操作,将待检修线路由运行状态转换至检修状态。当倒闸操作完毕后,运行操作人员向调度汇报操作完毕及线路已处于停电检修状态。接下来,再由调度下达检修工作许可,同意检修人员进入停电线路开展工作。若检修现场复杂,涉及多个作业点位,多个检修班组同时作业,中间还可设两级许可。在线路由运行状态转至检修后,由调度部门向设备运维管理部门下达一级许可,再由设备运维管理部门向各检修施工单位(班组)分别下达二级许可。现场工作管理流程如图 1 所示。与此类似,当各检修单位完成线路检修后,即可按原有许可路径向许可人终结工作任务。最后,当所有检修工作都汇报终结后,由调度部门向运行操作人员下达倒闸操作指令,将线路由检修状态转至运行状态,恢复线路供电。现场工作管理流程如图 2 所示。



1. 调度下达倒闸操作指令
2. 运维部门操作完毕后汇报调度, 线路转检修状态
3. 调度向运维部门许可检修工作开工(一般许可)
4. 运维部门向检修部门下达检修许可(二级许可)

图 1 停电检修工作流程(停电环节)



1. 检修部门向运维部门汇报检修工作结束
2. 运维部门向调度汇报检修结束, 线路具备送电条件
3. 调度向运维部门下达倒闸操作指令
4. 倒闸操作结束后运维部门汇报调度线路恢复运行状态

图 2 停电检修工作流程(恢复供电环节)

### 1.2 带电作业组织管理

#### 1.2.1 常规带电作业组织管理

作为常规项目的一、二、三类带电作业因其作业

现场通常不涉及配电检修和运维操作专业的配合,不存在工作界面交叉,职责界面清晰,现场工作流程一般在调度部门和带电作业部门间流转。作业前通常由带电作业班向调度发起作业申请,由调度下达许可并根据情况退出线路重合闸后即可开展工作。也可由带电作业班向设备运维部门发起作业申请,再由运维部门向调度申请开工并根据情况退出重合闸<sup>[13]</sup>。作业现场流转过程如图 3 所示。

变压器和 3 号箱式变压器负荷进行转供。再通过柔性电缆将 10 kV 1 号环网柜待用间隔 984,10 kV 3 号箱式变压器环网柜待用间隔 985 连接形成旁路,实现对线路后端负荷转供。待负荷成功转移后,即可断开 10 kV 1 号箱式变压器环网柜 982 间隔和 10 kV 3 号箱式变压器环网柜 981 间隔,实现对 10 kV 2 号环网柜停电,为改造工作创造停电条件。

在上述复杂类旁路作业现场,作业部门直接涉及到调度、带电作业、运维和检修 4 个专业部门(班组)。多班组的现场组织和安全管控要求较高,通常应设置现场总工作负责人,负责多班组(作业小组)协调<sup>[1-2]</sup>。因该类型作业通常归类于带电作业项目,参与该项工作的作业人员及地面辅助人员须取得经省公司级培训基地进行不停电作业专项理论培训、考试合格后,持证上岗<sup>[1]</sup>。因此,作业现场通常由带电作业班统一组织协调和指挥。作业前由带电作业班总工作负责人向调度发起工作申请,作业中由总工作负责人根据既定作业方案分别向带电作业、运维操作和检修班组下达工作许可。工作流程如图 5、图 6 所示。该类流转方式主要是将作业现场由一名带电作业人员担任总工作负责人。但实际上,由于带电作业(或设备运维单位)的工作人员难以全盘掌握带电作业、运维操作和检修 3 个专业的工作方式和特点,也无法做到对所有在场人员技能水平的掌控,现场管控难度较大,存在较大安全管理漏洞。

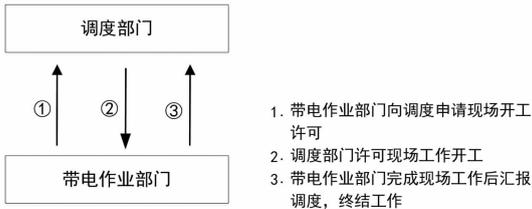


图 3 带电作业现场工作流程

1.2.2 旁路作业组织管理

作为四类作业项目的旁路不停电作业,相对于另外三类项目,其通常用于某些较大型的配电网检修、改造工程。工作内容综合性强,往往可能涉及到配电网电缆施放、环网柜吊装、杆塔组立、断路器和配电变压器等柱上设备安装等多种配电专业工作。上述类型工作已远远超出了带电作业这一工种的技术范畴,现场的顺利实施必须依赖于多工种、多专业的配合。并且,诸如电缆施放、环网柜和配电变压器安装及调试属于传统的配电检修专业领域,必须由检修人员负责实施。因此,其作业现场管控相对复杂。

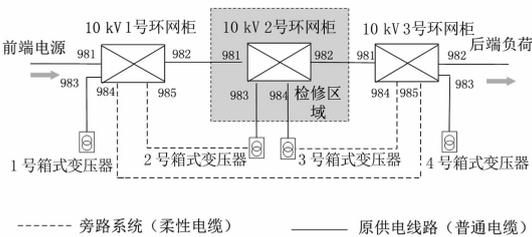
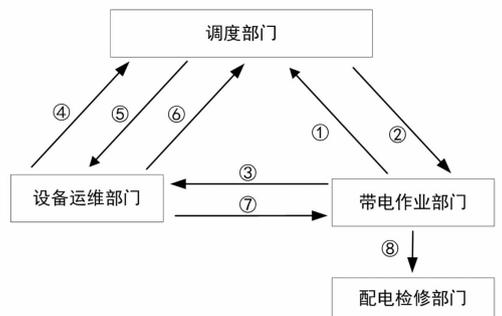


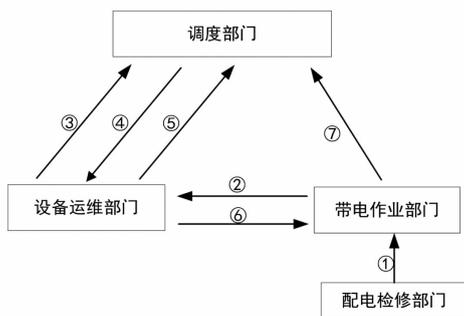
图 4 某典型旁路作业现场接线

一个典型的旁路作业现场如图 4 所示。供电部门计划对某一配电线路的 10 kV 2 号环网柜进行配电自动化改造,若按照传统停电检修方式,则需要将该环网柜及后端负荷停电,这难以满足日益严格的优质服务 and 供电可靠性要求。若采用旁路作业方式实施,则需通过 10 kV 1 号环网柜待用间隔 985,10 kV 3 号环网柜待用间隔 984 敷设柔性电缆,分别将 2 号箱式



1. 带电作业部门向调度部门申请许可可开工
2. 调度下达带电作业许可
3. 带电班组织人员完成旁路系统搭建,并告知设备运维部门
4. 运维部门向调度申请倒闸操作许可
5. 调度部门向设备运维单位下达倒闸操作指令
6. 运维部门完成倒闸操作,旁路系统投运,拟检修回路转至检修状态,完成后向调度汇报操作结束
7. 运维部门向带电作业部门通报倒闸操作结束
8. 带电作业部门向检修部门下达检修许可

图 5 旁路作业工作流程(开工环节)

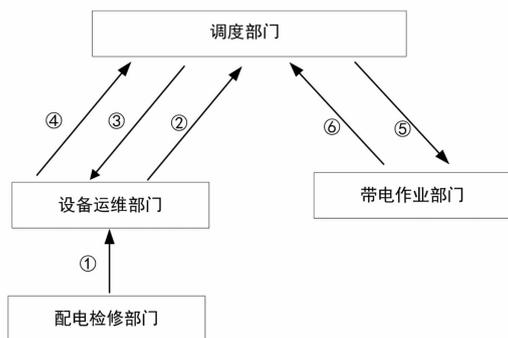


1. 检修工作结束, 检修部门向带电作业部门汇报工作终结
2. 带电作业班向运维部门通报检修结束
3. 设备运维单位向调度申请倒闸操作指令
4. 调度部门向设备运维单位下达倒闸操作指令
5. 操作完毕后向调度汇报检修设备已转运行状态
6. 运维部门向带电作业部门通报倒闸操作结束
7. 带电作业部门完成现场工作并汇报调度, 终结工作

图 6 旁路作业工作流程(终结环节)

### 1.3 改进后的旁路作业现场组织管理

通过分析各类型作业现场工作流转模式,可以发现,调度部门在常规的倒闸操作、配电网检修和带电作业工作中都发挥了调度指挥角色,运行操作、检修和带电作业班组都会向调度申请许可,汇报终结工作。因此,在旁路作业这样涉及到调度、运行操作、检修和带电作业的大型复杂作业现场,可充分发挥调度部门的指挥中枢职能,构建全新、可靠和高效的现场管控新模式。将旁路作业分解为带电作业、停电检修和倒闸操作等常规作业类型,实施模块化组合。在该模式下,带电作业、运行操作和配电检修仍然按照原有的作业流转程序向许可人发起工作申请(1.1节和1.2.1条),作业完成后汇报终结,如图7、图8所示。



1. 检修工作结束, 检修班向运维部门汇报终结工作
2. 运维部门向调度汇报检修结束
3. 调度部门向设备运维单位下达倒闸操作指令
4. 操作完毕后向调度汇报检修设备已转运行状态
5. 调度部门向带电作业班下达工作许可, 退出旁路系统
6. 带电作业班工作结束后汇报调度, 终结工作

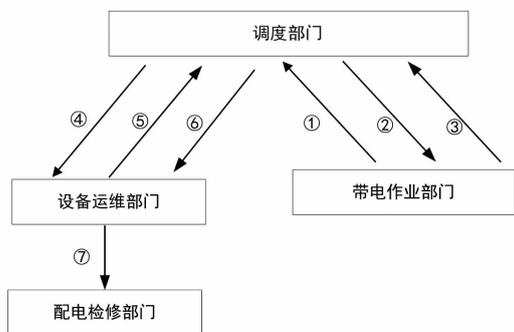
图 8 改进后的旁路作业工作流程(终结环节)

通过该模式,调度、运行操作、带电作业和配电网检修班组人员仍然可沿用原来熟悉的作业流转方式开展工作(1.1节和1.2.1条),无需学习新的流转方式,减少了学习成本和协调工作。各专业工种仍可按原有方式组织管控,既满足安全管理规程和技术标准的要求,也不涉及大量的人员资质问题,便于旁路作业普遍推广。此外,作业现场还可通过在各带电作业和设备运维部门各设置一名协调人,参与现场辅助协调,这样可有效避免旁路作业发生操作失误风险,进一步为该类型的复杂作业现场提供安全保障。

## 2 新型旁路作业技术

### 2.1 原有作业方式

旁路作业原理即利用柔性电缆搭建临时旁路系统,对原有供电线路形成旁路,再通过倒闸操作(带电作业)等手段,实现将负荷临时转移至旁路系统,然后再对待检修或改造线路进行停电隔离,为检修人员进入检修区域创造安全的无电环境<sup>[1-2]</sup>,如图9所示。对于设备间距离相对较小的电缆网系统,该方式敷设柔性电缆相对较少,实用性较强。但对于架空线路工作,因架空线路通常较长,采用该类作业方式需使用大量的旁路作业装备,通常有旁路电缆施放车、柔性电缆、旁路负荷开关和电缆保护槽盒等<sup>[1]</sup>。而由于柔性电缆的自身特性,敷设工艺要求



1. 带电作业班向调度部门申请许可开工
2. 调度许可带电班工作
3. 带电班组织人员完成旁路系统搭建,完成后汇报调度系统搭建完成
4. 调度部门向设备运维单位下达倒闸操作指令
5. 运维部门完成倒闸操作,旁路系统投运,拟检修回路转至检修状态,完成后向调度汇报操作结束
6. 调度部门下达检修许可(一级许可可由运维部门接收)
7. 运维部门向检修部门下达检修许可(二级许可)

图 7 改进后的旁路作业工作流程(开工环节)

高,不可与地面直接摩擦<sup>[1]</sup>,且为了便于施放和回收,单节电缆长度一般不超过50 m(单芯),敷设工作较为耗时。以图9(a)所示的10 kV某线架空线路迁改工程为例,按照原有作业方式,若要采用旁路作业法完成9—19号杆线路迁改,则需在8—20号杆间敷设柔性电缆,搭建旁路系统,以实现负荷转移。该工程待迁改部分架空线路达到500 m,若仍采用该方式则将使用30根柔性电缆、27支柔性电缆专用中间直接头和1台旁路负荷开关。作业现场不仅布置复杂,需投入较多的人力和装备,影响施工效率,而且仅适用于负荷电流不大于200 A的线路<sup>[1-2]</sup>。

### 2.2 新作业方式

通常来讲,配电网线路迁改或改造工程往往涉及新的线路敷设,以将原线路通道腾出,完成配合市政改造等任务。在采用旁路作业法实施该类工程时,若充分利用新建部分线路(架空线路或者电缆网),首先,通过带电作业方式完成新建部分两端带电搭火;再通过新装柱上隔离开关(或断路器)实现新建部分并入系统带电运行,即可与原线路形成旁路;最后,通过带电作业方式对待迁改部分线路进行解头断电,并配合检修部门完成杆塔和导线拆除工作。作业示意图如图9(b)所示。

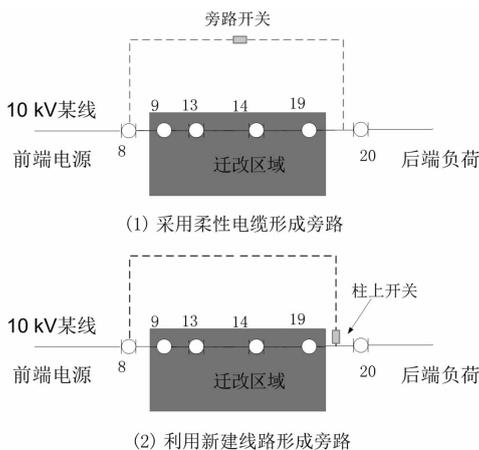


图9 某10 kV架空线路迁改工程

### 3 实际应用

某供电公司接政府部门通知,10 kV某黄线部分线路所在区域将进行土地整顿,以顺利推进某重

点市政民生工程,如图10所示。地块中的10 kV架空线路需通过配套电力线路迁改工程完成通道迁移。因工期较紧,需尽快予以实施,因此供电部门计划通过旁路作业方式完成该项工程,以缓解优质服务和供电可靠性压力。

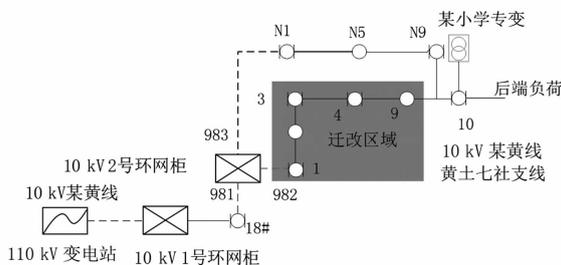


图10 某电力迁改工程示意

按施工设计方案,该迁改工程将在10 kV 2号环网柜983待用间隔新出一回电缆,并在N1号杆处上杆,经N9号杆后在原10 kV某黄线黄土七社支线10号杆搭火。因此,旁路作业时充分利用新建线路对计划迁改的部分形成旁路,实现负荷转移。作业时,按照1.3节改进后的旁路作业组织管理模式,由调度部门作为带电、运维操作和检修专业的工作流转中枢,对作业环节进行全闭环管控。主要工作内容及步骤信息如表1所示。

表1 主要作业步骤信息

步骤	工作内容	工作班组	工作票/操作票类型	许可人
1	新建线路架设	检修	第二种工作票	—
2	10号杆带电搭火	带电	带电作业票	调度
3	核相并依次合上10 kV 2号环网柜983断路器,拉开2号环网柜982断路器	运维	倒闸操作票	调度
4	断开10号杆原架空线路	带电	带电作业票	调度
5	拆除迁改区域配电线路	检修	第一种工作票	调度

按照新的组织管理模式,将相对复杂的旁路作业项目分解为带电、运维操作和检修3个专业模块,细分为各专业常见的普通工作类型,各专业可利用原有的组织方式开展工作。作业过程中的工作申请和终结环环相扣,都通过调度部门进行流转,避免了新增流程可能出现的安全漏洞。按照新的旁路作业

方法,充分利用改造工程将新建线路这一有利条件,首先,由检修部门提前完成电缆敷设、架空线路架设、柱上设备安装等工作;然后,再由带电作业部门在 10 号杆完成新架线路搭火;接下来再由设备运行部门倒闸操作完成新建线路通电,形成旁路。在运行部门完成倒闸操作使待迁改线路负荷退出后,带电作业部门在 10 号杆完成原有线路的解头断电,为检修部门最终拆除原线路创造停电条件。新旧流程与方法特点对比如表 2 所示。

表 2 新旧流程与方法对比

对比项目	新流程与方法	原流程与方法
柔性电缆需求	0 m	450 m
辅助工人数	0 人	10 人
旁路作业工作时长	2 h	6 h
信息中枢	调度	带电、调度
现场风险控制难易度	较易	难
额定电流	与原线路相同	200 A

## 4 结 语

通过对供电部门日常检修和带电作业流程进行分析,针对复杂类作业项目中的旁路不停电作业提出了一种新的作业现场组织管理方法。该方法将旁路作业现场工作按照专业分解为带电、运维操作和检修 3 个模块。每一部分仍按照各专业已有的成熟流程进行流转,将调度部门作为工作流转中枢。该流程既不增加新的管控方式,利于现场工作人员理解和掌握,也使得职责界面清晰,现场风险易于管控。同时,还针对配电网改造工程提出了一种新的旁路作业技术方法,该方法的旁路系统充分利用了新建线路,实现了负荷转移。通过成都地区供电部门多次现场实施,该方法简易可行、风险易控,具有实用意义。

### 参考文献

- [1] 国家电网公司. 运检三〔2016〕94 号 国网运检部关于印发 10 kV 配网不停电作业规范(试行)的通知[Z]. 2016.
- [2] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 配电线路旁路作业技术导则:GB/T 34577—2017

[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

- [3] 国家电网公司. 设备配电〔2019〕77 号 国网设备部关于全面加强配网不停电作业管理工作的通知[Z]. 2019.
- [4] 魏俊雨. 基于层次分析法的惠州电网供电可靠性评价研究[D]. 广州:广东工业大学,2019.
- [5] 国家电网公司. 国家电网设备〔2018〕1012 号 国家电网有限公司关于印发城市配电网供电可靠性提升工程工作方案的通知[Z]. 2018.
- [6] 中国南方电网有限责任公司. 10 kV 配电线路带电作业指南[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 郭锐. 旁路带电作业法在配电线路检修中的应用[J]. 电力设备,2018(14):41-43.
- [8] 韩亮,陈俊龙. 基于 10 kV 旁路不停电作业技术在配网实践应用的研究[J]. 东北电力技术,2015,36(9):8-11.
- [9] 刘聪汉. 多种旁路作业方法在配网不停电作业中的应用[J]. 广西电力,2018,41(6):59-61.
- [10] 叶克书. 浅谈电缆不停电技术在配网带电作业中的应用[C]//中国电机工程学会带电作业专业委员会. 带电作业技术会议论文集,2015:296-302.
- [11] 曾华,欧阳光,张斌等. 配电网不停电作业提高供电可靠性分析[J]. 电力传动自动化,2019,41(1):51-53.
- [12] 张效刚,周保民. 浅谈旁路作业在配电线路迁移综合应用[C]//中国电力企业联合会. 供电企业带电作业技术研讨会论文集,2012:160-164.
- [13] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程(配电部分)(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 配电线路带电作业技术导则:GB/T 18857—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.

### 作者简介:

王武双(1985),男,工程师,硕士,从事配电运检技术与带电作业技术实践和研究;

李 杰(1966),男,高级工程师,硕士,从事配电运检技术与带电作业技术管理和研究;

陈 效(1981),男,高级技师,从事配电运检技术与带电作业技术实践和研究;

陈显忠(1974),男,技师,从事配电运检技术与带电作业技术实践和研究;

刘德锋(1976),男,高级技师,从事配电运检技术和带电作业技术实践和研究。

(收稿日期:2020-11-24)

# 基于年费用法的输电电缆选型研究

向宇<sup>1</sup>, 罗楚军<sup>1</sup>, 李健<sup>1</sup>, 岳浩<sup>1</sup>, 刘文勋<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**输电电缆具有不受自然条件影响、利于城市美观、输电安全性高、维护成本小等优点,逐渐成为替代城市架空线路的优选方案。然而,在电缆规划选型时,传统规划仅考虑电缆的初始投资成本,对电缆运行期间通风散热费用的考虑较少。针对这一研究不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法,对降低电缆工程的综合成本具有重要意义。

**关键词:**输电电缆;通风散热;电缆选型;年费用法

**中图分类号:** TM751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0079-04

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210217

## Study on Transmission Cable Selection Based on Annual Cost Method

Xiang Yu<sup>1</sup>, Luo Chujun<sup>1</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Yue Hao<sup>1</sup>, Liu Wenxun<sup>1</sup>, Liu Peng<sup>2</sup>

(1. Central Southern Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group Corporation, Wuhan 430071, Hubei, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** Transmission cables, which are not affected by natural conditions and good for urban aesthetics, high transmission safety and low maintenance cost, etc., have gradually become the preferred alternative to urban overhead lines. However, traditional planning only considers the initial cost of the cable while selecting cables, less work have taken the cost of ventilation and heat dissipation during the cable operation into account. Aming at this lack of study, the selection method of transmission cable considering the annual investment operation cost is proposed, which is of great significance to reduce the comprehensive cost of cable engineering.

**Key words:** transmission cable; ventilation and heat dispersion; cable selection; annual cost method

## 0 引言

随着国民经济的快速发展和电力基础设施建设的提速,在城市电网中,电力电缆的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。

与架空导线相比,输电电缆具有以下优点: 1) 节约地上空间,可以敷设在多种复杂地下环境中,便于缩短线路走廊长度; 2) 输电安全性高,人身触电的可能性较小; 3) 因外界扰动引起的相间短路和事故率较低; 4) 利于高电压深入负荷中心,提高

电压质量,减少电能损耗; 5) 电抗值仅为架空裸导线的三分之一,有助于提高功率因素,增大输送容量; 6) 维护工作量小,无需频繁检修。因此输电电缆受到了人们的普遍青睐,逐渐成为替代城市架空线路的优选方案<sup>[2-3]</sup>。

输电电缆在正常运行环境中的寿命为30年左右。然而,由于电力电缆敷设环境不尽相同,有电缆沟、排管以及隧道等型式,其使用状态会对电缆寿命造成较大影响。电缆投入运行后,虽然正常运行状态下温度的影响不大,但在非正常的过热状态下,电缆绝缘老化的速度非常快<sup>[4-6]</sup>。由于实际输配电负

荷并不恒定,负荷会不断地调整变化,一旦电缆发生过负荷非正常运行,将会导致导体温度的急剧上升,加速其绝缘老化,甚至发生热击穿。输电电缆一旦发生故障,故障定位十分困难,不仅会浪费大量的人力物力,还会引起较大的间接损失。如果故障得不到及时排除,将会造成严重的经济和社会影响。研究表明,当电缆的运行温度超过其允许值的 8% 时,其寿命将减半;如果超过 15%,电缆寿命仅为设计寿命的 25% [7]。

随着电缆在输配电领域中的广泛应用,如何保证电缆隧道的可靠通风,提高输电电缆的可靠性和运行寿命,同时降低电缆工程的综合成本,已经成为输电电缆研究的重点方向之一。因此,下面针对电力行业电缆运行期间通风散热费用的研究不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法,对降低电缆工程的综合成本具有重要意义。

## 1 通风散热对电缆载流量的影响

电缆隧道内的通风情况对电缆隧道温度分布和电缆载流量有较大影响。为研究通风速度对电缆导体温度的影响规律,选取典型矩形明挖隧道 2.6 m (宽) × 2.9 m (高),隧道内敷设 6 回电缆,底层为 500 kV 电缆(截面 2500 mm<sup>2</sup>),中间层 220 kV 电缆(截面 2000 mm<sup>2</sup>),顶层 110 kV 电缆(截面 1000 mm<sup>2</sup>)。电缆隧道长度为 1000 m,进风口温度为 30 °C。在隧道入口分别通入 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 和 10 m/s 的风速,得出不同风速下沿导体轴向的温度分布曲线如图 1 至图 3 所示,电缆载流量随风速的变化规律如图 4 所示。

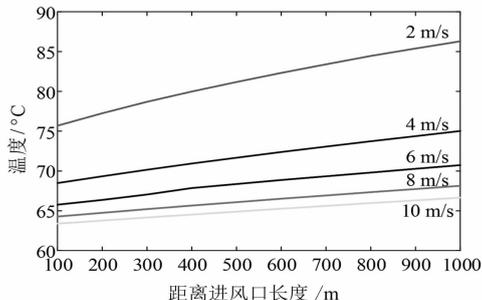


图 1 不同风速下 110 kV 导体纵向温度分布

由图 1 至图 3 导体温度分布结果可知,在电缆隧道通风情况下,离进风口越远,导体的温度越高。随着风速的增加,导体的温度逐渐下降,且开始下降速度较快,然后下降速度变缓。

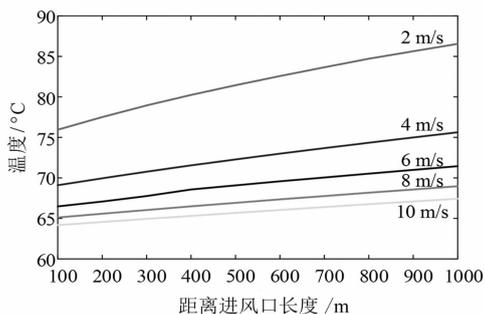


图 2 不同风速下 220 kV 导体纵向温度分布

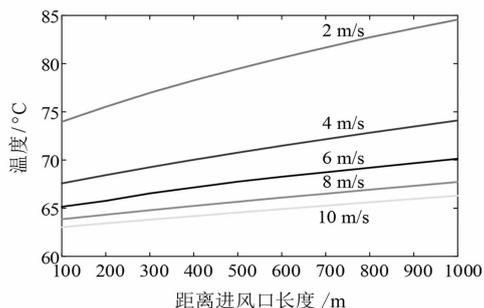


图 3 不同风速下 500 kV 导体纵向温度分布

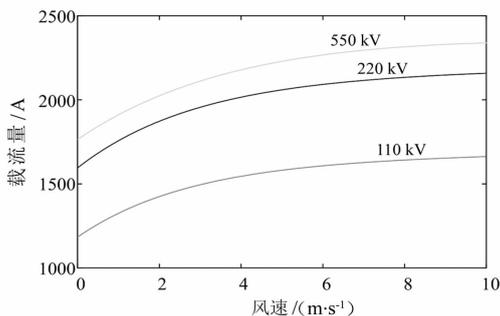


图 4 不同风速下电缆载流量

由图 4 电缆载流量仿真结果可知,随着风速的增加,电缆载流量逐渐升高,但当风速超过一定值时,电缆载流量的变化趋于平稳。当风速为 10 m/s 时,相比静止状态下 110 kV、220 kV、500 kV 电缆载流量分别提升了 467.05 A、549.18 A、573.4 A。由此可知,提高通风风速对电缆载流量有一定提高,但是风速越大,提升效果越不明显。因此,控制风速在 10 m/s 范围内较为合适,风速大于 10 m/s 后,对载流量的提升很微弱。

由上述结果分析可知,通风散热对降低电缆导体温度和提高电缆载流量具有重要意义。因此,在对电缆工程进行投资选择时,必须充分考虑电缆运行期间通风散热费用对整体项目经济性的影响。

## 2 年均投资运行维护成本计算方法

年费用法作为一种常用的审计投资效益的方

法,能反映工程投资的合理性和经济性。在对项目方案进行审计时,主要是通过计算和分析投资项目的年均成本,实现对投资经济效益的比较评价。收入一定的情况下,投资方案的年均成本越低,该方案的经济效益就越好。电缆项目的年均成本主要包括年均投资成本、年运行维护成本、年电能损耗成本。年均成本的计算方法如下:

$$F_a = \lambda(Z + U) + C_w \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \quad (2)$$

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t(1+r_0)^{m+1-t} \quad (3)$$

$$U = \left[ \sum_{t=1}^m u_t(1+r_0)^{m+1-t} + \sum_{t=m+1}^{m+n} \frac{u_t}{(1+r_0)^{t-m-1}} \right] \quad (4)$$

式中: $F_a$ 为年均费用(平均分布在从 $m+1$ 到 $m+n$ 期间的几年内); $\lambda$ 为数列求和系数; $Z$ 为工程总投资; $U$ 为运行总费用; $C_w$ 为年电能损耗费用; $Z_t$ 为折算到 $t$ 年的工程投资; $r_0$ 为电力工业投资回收率或称电力工业投资利用率; $m$ 为施工年数; $n$ 为工程使用年限; $u_t$ 为折算到 $t$ 年的运行费用; $t$ 为从工程开工这一年起年份; $t'$ 为工程部分投产的年份。

电缆工程运行期间的费用主要包括电能损耗费用和运行维护费用。电能损耗费用 $C_w$ 主要包括电缆总损耗(含导体损耗、护套损耗和绝缘介质损耗)费用和风机通风散热运行费用。在计算允许范围内,电缆工程的设备运行维护费用可以认为是一个定值。按照线路工程的一般评价方法,年运行维护费用 $\lambda U$ 可按照工程总投资 $Z$ 乘以一定的运行维护费率进行计算。运行维护费率一般取1.4%~1.5%,若取1.4%,则年运行维护费用计算式为

$$\lambda U = 0.14 \times Z \quad (5)$$

### 3 典型截面电缆经济性对比分析

#### 3.1 一次性投资成本对比

选取典型圆形电缆隧道,隧道内径3 m,隧道通风长度400 m;隧道内敷设220 kV电缆,三相电缆成品字形布置。选取4组不同的电缆截面+通风风速方案组合,进行经济性比选。方案1电缆截面为2500 mm<sup>2</sup>,风速为2.0 m/s;方案2电缆截面为2000 mm<sup>2</sup>,风速为4.0 m/s;方案3电缆截面为1800 mm<sup>2</sup>,风速为5.5 m/s;方案4电缆截面为1600 mm<sup>2</sup>风速为10.0 m/s。比选方案相关参数如表1所示。

表1 比选方案相关参数

方案参数	方案1	方案2	方案3	方案4
电缆截面/mm <sup>2</sup>	2500	2000	1800	1600
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	2.0	4.0	5.5	10.0
进风温度/℃	40.0	40.0	40.0	40.0
出风温度/℃	46.6	43.7	43.0	41.6
风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	50 894	101 788	139 958	254 469
载流量/A	1 980.6	1 979.0	1 980.8	1 979.0
单机风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	14 000	28 000	38 000	44 060
单机功率/kW	2.0	4.0	4.0	4.0
风机数量/台	4	4	4	6

在隧道规模已经确定的情况下,对比不同方案的一次性投资情况,主要包括电缆本体和风机价格。将方案1(电缆截面为2500 mm<sup>2</sup>、隧道风速为2 m/s)作为基准,4组比选方案的一次性投资差额对比如表2所示。

表2 一次性投资差额对比

对比参数	方案1	方案2	方案3	方案4
电缆截面/mm <sup>2</sup>	2500	2000	1800	1600
隧道风速/(m·s <sup>-1</sup> )	2	4	5.5	10
通风长度/m	400	400	400	400
单机风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	14 000	28 000	38 000	44 060
单机功率/kW	2.0	4.0	4.0	4.0
风机数量/台	4	4	4	6
投资差额/万元	0	-39.71	-19.85	-6.41

由表2的对比结果可知,在载流量相近的情况下,电缆截面为2500 mm<sup>2</sup>方案的一次性投资最大,这主要是由电缆本体造价的差异引起的。而在4种方案中,电缆截面为2000 mm<sup>2</sup>方案的一次性投资最小。电缆截面为1800 mm<sup>2</sup>和1600 mm<sup>2</sup>方案虽然电缆本体造价相对较低,但为了满足载流量要求,隧道的通风风速更大,所需的风机规格更高,因此一次性投资也就随之增加。

#### 3.2 比选方案年均成本对比

为对比不同方案的优劣,在多种电价和最大负荷利用小时情况下,计算比选方案的年均投资运行维护成本。以折现率8%为例,比选方案的年均投资运行维护成本对比结果如表3所示。

由表3不同方案对比结果可知:方案4,即电缆截面为1600 mm<sup>2</sup>和隧道风速为10 m/s的组合方案仅在最大负荷利用小时数 $\tau$ 为2500 h,且电价为0.3元/kWh时年费用最低;其他情况下经济性最优的均为方案3,即电缆截面为1800 mm<sup>2</sup>和隧道风速为5.5 m/s的组合方案,随着电价的提高和年最大负荷利用小时的增加,该优势越来越明显。

表 3 比选方案的年均投资运行维护成本对比

最大负荷利用小时/h	电价/(元/kWh)	年均投资运行维护成本/万元			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
2500	0.3	27.78	24.18	21.88	21.75
	0.4	29.22	25.88	23.55	23.62
	0.5	30.66	27.59	25.22	25.48
	0.6	32.10	29.29	26.89	27.35
3000	0.3	28.99	25.61	23.28	23.32
	0.4	30.83	27.79	25.42	25.71
	0.5	32.67	29.97	27.56	28.09
	0.6	37.27	35.43	32.91	34.06
3500	0.3	30.37	27.25	24.89	25.11
	0.4	32.67	29.97	27.56	28.09
	0.5	34.97	32.7	30.23	31.08
	0.6	37.27	35.43	32.91	34.06
4000	0.3	31.75	28.88	26.49	26.9
	0.4	34.51	32.15	29.7	30.48
	0.5	37.27	35.43	32.91	34.06
	0.6	40.03	38.7	36.11	37.64
4500	0.3	33.48	30.93	28.5	29.14
	0.39	36.81	34.88	32.37	33.46
	0.5	40.15	38.83	36.25	37.79
	0.6	43.48	42.79	40.12	42.11

### 4 结 语

上面针对电缆规划时未考虑运行期间通风散热费用研究的不足,提出了考虑年均投资运行维护成本的输电电缆选型方法。在此基础上,对 4 种电缆截面和通风风速组合方案进行了经济性比选,得出如下结论:

1) 由于不同截面电缆本体造价的不同以及风机价格的影响,电缆截面为 2500 mm<sup>2</sup> 方案的一次性投资最大,电缆截面为 2000 mm<sup>2</sup> 方案的一次性投资最小。

2) 在最大负荷利用小时为 2500 h、电价 0.3

(上接第 61 页)

站的安全运行条件,提高了变电站所在地区电网系统的稳定性。

#### 参考文献

[1] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,2001.

[2] 申加峰,樊晓牧,李论涛,等. 变电站风吹雪灾害的研究与防治[J]. 电力勘测设计,2018,9(2):43-53.

元/kWh、电缆截面为 1600 mm<sup>2</sup> 和隧道风速为 10 m/s 组合方案的经济性较好,其他情况均为电缆截面为 1800 mm<sup>2</sup> 和隧道风速为 5.5 m/s 组合方案经济性最好。

3) 对于 220 kV 电缆隧道工程,每回输送容量为 680 MVA(载流量约为 1980 A)时,推荐采用经济性更好的电缆截面为 1800 mm<sup>2</sup> 和隧道风速为 5.5 m/s 组合设计方案。

#### 参考文献

[1] 梁永春,王忠杰,刘建业,等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术,2010,36(3):763-768.

[2] 杨永明,程鹏,陈俊,等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):50-54.

[3] 李攀峰,李春筱,冯炳. 排管敷设电缆的载流量计算与优化排列[J]. 浙江电力,2015,34(12):19-23.

[4] 孙仲民,何正友,戴铭. 基于灰色预测的电力电缆老化过程预警仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):55-60.

[5] 刘刚,张高言,周凡. 基于等温松弛法的 110 kV 高压电缆老化状况评估[J]. 高电压技术,2014,40(2):497-504.

[6] 刘刚,金尚儿,梁子鹏,等. 基于等温松弛电流法和活化能法的 110 kV XLPE 电缆老化状态评估[J]. 高电压技术,2016,42(8):2531-2540.

[7] 程博. XLPE 绝缘电缆可靠性与寿命预测算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

#### 作者简介:

向 宇(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作;  
 罗楚军(1988),男,硕士,工程师,从事输电线路设计工作;  
 李 健(1980),男,硕士,高级工程师,从事输电线路设计及技术管理工作。

(收稿日期:2020-10-28)

[3] 武鹤,朱光耀,魏建军,等. 防雪栅在公路风吹雪雪害防治中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报,2008,22(1):23-25.

[4] 国家电网公司. 330~750 kV 智能变电站通用设计(2018年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

#### 作者简介:

谈东林(1980),男,工程师,主要从事电力设计工作。

(收稿日期:2020-11-12)

# 基于国外现货市场与四川实际的现货市场建设分析

李健华<sup>1</sup>,刘继春<sup>2</sup>,付浩<sup>1</sup>,白智丹<sup>1</sup>

(1.西南电力设计院有限公司,四川成都 610021;2.四川大学电气工程学院,四川成都 610065)

**摘要:**现货市场是电力市场建设的关键环节,同时对推进国家电力体制改革、打破电力行业垄断、实现电力资源市场化的合理配置具有重大意义。基于分析国外电力现货市场建设经验,结合四川水电清洁能源大省、电网结构复杂的特点,从市场模式、市场主体、交易品种、电价机制、结算机制以及弃水量大、阻塞断面较多、弃水期与非弃水期市场差异化较大等问题出发,对四川电力现货市场建设进行了思考与分析,为建设具有四川特色的电力现货市场方案提供建议。

**关键词:**现货市场;四川特色;交易品种;电价机制

**中图分类号:**TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0083-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210218

## Analysis of Spot Market Construction Based on Foreign Spot Market and Sichuan Current Situation

Li Jianhua<sup>1</sup>, Liu Jichun<sup>2</sup>, Fu hao<sup>1</sup>, Bai Zhidan<sup>1</sup>

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

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** The spot market is the key link of power market construction, and it is of great significance to promote the reform of national power system, break the monopoly of power industry and realize the rational allocation of power resources. Based on the construction experiences of foreign electric power spot market, and combined with the characteristics of Sichuan clean energy and complex power grid structure, starting from such problems as market model, market subject, trade variety, electricity price mechanism, settlement mechanism, large amount of abandoned water, more obstruction sections and the big differences between the abandoned water market and the non-abandoned water market, etc, the construction of Sichuan electric power spot market is analyzed, which can provide the suggestions for building a electric power spot market with Sichuan characteristics.

**Key words:** spot market; sichuan characteristics; trade category; electricity price mechanism

## 0 引言

自从2020年国家提出电力体制改“打破垄断,引入竞争,提高效率,优化资源配置,构建政府监管下健康发展的电力市场”以来,电力行业已经突破了传统的垄断机制,从根本上改变了计划体制和厂网不分等问题,电力市场多主体竞争的格局初步形成。但同时,电力行业的发展还存在一些尚未解决的难题,主要有以下几点:一是交易机制不完善,资

源利用效率有待提高。售电侧没有引入有效的竞争机制,发电侧和用户侧之间的市场交易量受到限制,市场难以发挥对资源的配置作用。二是电价机制尚未明确,市场主导的定价机制尚未完全形成,现行电价仍以政府定价为主,难以反映市场实时供需状况。三是机制发展不健全,新能源和可再生能源开发利用面临困难,弃风、弃光、弃水现象仍大量存在。

2015年中国开启了新一轮电力改革,新电改总体思路是管住中间,放开两头,在发电侧与用户侧引入竞争,从而解决解决上述资源利用率低、新能源渗

透率低等一系列相关问题<sup>[1-2]</sup>。中国在 2020 年全面开启电力现货市场交易,而国外电力现货市场建设已经相对成熟,这对中国研究电力现货市场建设具有重要意义。四川作为电力现货市场建设的 8 个试点之一,借鉴国外电力现货市场建设经验并结合四川实际情况不断完善现货方案,对建设具有四川特色的电力现货市场是尤为重要的<sup>[3]</sup>。

## 1 国外现货市场分析

### 1.1 美国 PJM 电力现货市场

PJM 是经美国联邦能源管制委员会审批通过的一个独立系统运营商(ISO),目前负责了美国最大、最为复杂的电力市场运营。PJM 现货市场采用全电量模式、日前市场和实时市场组成<sup>[4]</sup>。在日前市场,所有的发电机组按各自意愿参与竞价,并申报机组的全部发电量,用户侧需要申报所有的用电需求,市场需要对发用双方申报的曲线进行匹配。美国电力网络较为复杂且存在的阻塞较多,所以采用节点边际电价对日前市场进行结算。实时市场其实是对机组剩余发电能力与实时用电需求重新进行匹配,因此日前市场的交易信息对实时市场的开启尤为重要,但实时市场需要按照实时市场的节点边际电价进行结算。

### 1.2 英国电力现货市场

英国电力市场以中长期市场为主,采取双边交易的方式,中长期交易电量物理执行。由于其电网结构坚强,网络中的阻塞较少,所以现货市场建设较为简单,由日前交易和实时平衡机制组成。日前市场的交易由发用电双方共同参与报价,市场出清不考虑电力网络中的潮流约束和机组的物理参数,日前市场中所有交易电量按照边际成本价格进行结算<sup>[5]</sup>。实时平衡机制是对日前交易的补充,在实时运行阶段,调度中心为了电网的安全,需要考虑真实的网络约束,计算网络中的阻塞,同时需要发电企业申报机组的实际运行参数。在实时平衡机制阶段是按照市场主体的报价(pay as bid, PAB)方法进行结算,即结算价格为发电企业的竞价和用户报价。

### 1.3 北欧电力现货市场

北欧电力市场成员国拥有挪威、瑞典、芬兰、丹麦,4 个国家的电网已经实现互联。挪威基本全部依靠水力发电,瑞典水电、火电和核电的装机容量相对均衡,芬兰和丹麦火电机组占比较大,各个国家在电源

结构上存在一定的互补性。北欧的大部分电量是在中长期市场实行场外双边交易,且均为物理执行。现货市场则是由日前市场、日内市场和平衡市场组成<sup>[6]</sup>,实现双边交易之外的电量交易,这部分电量主要集中于日前市场。北欧电力市场被划成多个分区,主要是因为地理因素和各区域之间存在较多阻塞。日前市场分为区内交易和跨区交易,进行出清计算时,分区内部不考虑网络约束,跨区交易需考虑各个分区之间线路的传输能力。日前市场结算时,分区内部采用系统电价进行结算,分区之间进行无约束出清,发现阻塞时则计算各个分区的边际电价对该部分电量进行结算。日前市场结束之后,各个分区线路之间可能会存在剩余的传输能力,则通过日内市场进行交易,日内市场采取撮合定价的电价机制。平衡市场由各国输电运行机构负责,此时需要考虑各自所属区域的真实网络约束和发电机组运行参数。各国输电运行机构在平衡市场阶段则根据机组申报的上调出力、下调出力和对应的报价,分别进行排序,在满足网络约束的条件下,以经济性最优的原则进行调度,按区域内的边际价格进行结算。

### 1.4 巴西电力现货市场

巴西电力市场主要包括管制交易市场、自由交易市场和短期市场,电力调度中心负责全网集中调度,交易中心负责自由交易。管制交易市场是确保满足普通居民的用电需求,多为中长期交易,约为 70%。自由交易主要以大用户交易为主,约为 25%。短期交易市场作为前两个市场补充,以现货合约为主,保障电力供需平衡,市场份额约 5%。

交易中心将中长期交易合同和短期市场相互关联起来,预测电量与各公司购电合同和售电合同相比较,差额部分在短期交易市场进行平衡。在管制及自由交易市场,清算和结算由买卖双方直接处理。在短期交易市场中,进行多边交易和结算,且引入金融机构担保等多种方式,提高短期交易市场的结算保障能力。

### 1.5 各国电力现货市场对比分析

英国电网结构坚强,电能资源充足,且电网阻塞程度相对较轻。因此,英国电力现货市场只是为市场成员提供了一个集中式的交易平台,市场规则较为简单。四川电力现货市场处于起步阶段,可以先采用较为简单的市场规则,可参考英国,利用中长期物理执行+现货集中竞价模式。北欧电力市场,水电装机比例较大,电能资源相对充足,电网阻塞主要

存在于部分区域之间的输电断面上,其主要目的在于为北欧各国提供了一个高效便捷的能源输送平台,实现资源的优化配置<sup>[7]</sup>。四川与北欧较为相近,同样是水电装机规模比较大,北欧电力市场的交易品种和交易模式存在较多值得借鉴的地方。美国PJM市场电网阻塞较为严重,美国引入了金融输电权等多种机制,后期四川现货市场较为成熟后,可逐步建立金融机制。巴西建立了多种电力市场分别满足不同的用户,四川可借鉴建立分类互补的电力市场,通过用户需求引导发电计划,提高匹配程度。

## 2 四川现货市场建设特点

四川电源以水电为主,其资源分布特性使电网资源配置、电源和负荷呈现出逆向分布的特点,系统负荷需求主要分布在经济较为发达地区,而电源则主要分布在较为偏远的地区<sup>[8]</sup>。四川电网凸显出市场供求关系失衡、电价体系繁多复杂、径流式水电多、调节能力差等特点,加之发电主体成员多、市场成熟度较低,给市场交易组织带来了诸多困难和挑战。

### 2.1 水火矛盾突出

四川是水电装机大省,水电装机接近80%,火电装机只有17%左右,风电、光伏清洁能源占比较小,如图1所示。同时在经济性方面,龙头水电站与径流式水电站成本差异大,火电机组成本远高于水电机组<sup>[9]</sup>。水电企业弃水期弃水量较大,火电企业发电成本高、利用小时数较低,经营困难。以上问题都为现货市场的建设带来了较大的困难。

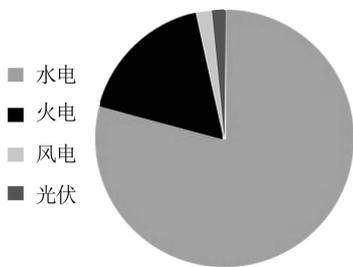


图1 四川电源结构

### 2.2 季节性供需矛盾突出

“十二五”以来,四川发电装机年均增长为13.2%,而用电增长为5.21%,在装机快速增长和用电需求趋缓的双重压力下,发电企业弃水期弃水严重,参与市场意愿强烈,但枯期动力不足。这与用电侧市场交易意愿无法匹配,导致市场主体利益诉求差异明显,

市场化方案制定困难。

### 2.3 电价体系繁多复杂

由于历史原因,四川电价体系十分复杂,不同发电企业上网批复电价差异巨大,现有33个电价标准,最低为0.218元/kWh,最高为0.4901元/kWh,加之发电两侧丰枯、峰谷电价浮动和负荷结构的巨大差异,进一步加大了交易的组织难度<sup>[10]</sup>。

### 2.4 电网结构薄弱

四川电网是以500kV网架为骨干、覆盖全省各市州、全电压等级的电力网络。其通过锦苏、复奉、宾金、德宝直流和川渝、川藏交流通道分别与华东、西北、重庆和西藏昌都电网相联,电网地理覆盖范围广泛。鉴于上述四川存在的较多问题,四川电力现货市场建设要结合四川的实际情况,按照积极稳妥、市场主导、安全可靠、有效监督的基本原则进行。

### 2.5 建设难点分析

根据上述建设特点,四川电力现货市场主要存在以下难点:

1)弃水量大。四川每年的弃水电量较大,通过开设双边新增电量竞争市场,对新增电量需求且带曲线电力的用户以及国家鼓励发展的新兴行业开放。新兴用户的准入条件可由政府设置,例如水电企业在日前竞价过后,可以针对区间突然来水与新增电量用户再次进行报价,减少弃水量。

2)水电资源跨省、跨区配置。从各送出通道情况来看,三大特高压以及川渝通道已基本排满,德宝直流通道年度已落实的外送计划约5112GWh,通道利用率仅60%,尚有较大拓展空间。

3)中长期电量与优先电量分解。采用部分电量交易的现货市场模式,要在保证电网安全的前提下,进行中长期电量与优先电量分解,并在公平的前提下,确保该电量的执行。这是一个较为复杂的问题<sup>[11]</sup>,建议中长期电量由交易中心分解,优先电量可由调度中心分解。中长期和优先电量分解考虑按日滚动,当月末几天分解的中长期和优先电量高于日前预测负荷时,中长期电量的占比可以在当月的最后几天进行调整,即现货市场竞价空间可以浮动,以确保中长期与优先部分执行。

4)梯级水电不同业主竞价。四川普遍存在一条梯级流域中的上、下游电站隶属不同主体的现象。各电站独立参与现货市场竞价时,上游电站的竞价结果以及水流的滞时时间会对下游水电站造成影响,导致下游电站竞价困难,面临竞价电量与实发电

量匹配失衡的问题,致使交易结果难以执行,不利于市场稳定和水电资源利用<sup>[12]</sup>。针对上述情况,可以采取以下措施:

(1)水电站可以按时间块进行竞价。降低电站竞价的时间尺度要求,只需要在规定的时块之内执行中标电量即可。

(2)龙头水电站竞价。没有调节性能的径流式水电站不参与竞价,考虑水流滞时时间及水能-电能转换关系,即可计算出径流式水电站在各个时段的出力,并进行全额收购。但结算时,径流式水电的电价要按照龙头水电站的竞价进行打折。

(3)龙头水电站、径流式水电站信息共享下的协调竞价。各个电站之间实行信息共享,可以提升来水预测的准确性,进一步确定各个时段水电机组的出力能力。

### 3 四川电力现货市场建设建议

四川电力现货市场处于起步阶段,所以建设初期主要设置日前市场、实时平衡市场、部分辅助服务市场。同时,需针对四川弃水期弃水量较大、阻塞断面较多、梯级水电站不同主体竞价等问题进行具体分析。

四川是水电装机大省,市场具有明显的季节性特征,所以电力现货市场的建设可分为弃水期与非弃水期两种电力现货市场建设方案。由于在非弃水期,水电资源较少,区间来水难以预测,又考虑到非弃水期不能弃水的刚性要求,火电机组基本处于满发状态,仍需从省外购电才能满足省内用电,所以建议在非弃水期保留现有的清洁能源优先消纳的电网调度运行模式。下面重点探讨弃水期电力现货市场的建设。

#### 3.1 市场模式

从国外电力现货市场分析来看,电力现货市场主要存在两种模式:1)中长期交易采用物理双边合约,剩余部分电量参与现货交易,如英国、北欧普遍采用该模式。该模式较为简单,但不能很好地反映市场价格随供需的变化。2)中长期交易采用双边差价合约,发电企业全部电量均参与现货交易,如美国 PJM 市场模式。该模式的特点是价格能够更加及时地反映市场供求变化,资源配置效率更高,但市场规则复杂,对电网安全运行和用户用电安全等存在较大风险。

四川电力市场建设处于起步阶段,电力交易以计划为主,存在大量的中长期交易品种,现货市场技术支持系统仍不完善,市场成熟度低。建议从现有中长期交易中分出一定比例来进行现货交易,采用发电侧单边开放部分电量模式,将更有利于与现有中长期模式衔接,降低现货市场建设的风险,实现现货市场的稳步推进<sup>[13]</sup>。待市场较为成熟后,可以采用全电量优化模式,避免中长期电量分解的难题。

#### 3.2 交易品种

日前市场即是提前一天开展的电力现货市场,是中长期市场的重要衔接。四川现货市场起步阶段,建议建设发电企业单边开放的日前市场,由电网企业进行负荷预测,同时扣除优先电量、留川电量、外送电量及中长期电量后,发布日前市场竞价空间。所有的水电、火电企业均参与竞价,风电、光伏等清洁能源不参与竞价,全额收购。实时平衡市场是提前 1 h 组织开展的市场,是为了平衡日前市场与实时负荷两者之间的偏差<sup>[14]</sup>。为简化市场复杂程度,减轻调度人员压力,建议在日前市场之后,组织市场主体参与实时市场的报价,机组申报上调出力、下调出力及相应的价格,在日前进行封存。在实际运行过程中,考虑到径流式水电站区间突然来水或机组可能出现的一些意外状况,在实时平衡市场开启的 1 h 之前,发电企业可以修改上下调出力,但是不改变价格,所以报价曲线应该是两部分,一部分是输出功率的增加,一部分是输出功率的减少。

在市场起步阶段,建议采取强制型辅助服务市场,第二阶段再建立辅助服务市场,可以只开设调频和备用,市场成熟度逐渐加深之后,可增设无功、黑启动等。同时建议火电机组作为辅助服务市场的主要参与者。

#### 3.3 电价机制

根据电力生产和使用的过程,电价具体可以细分为上网电价、输电电价、配电电价和销售电价<sup>[15]</sup>。在电力行业垄断阶段的销售电价为

$$\lambda = \frac{C(1+r)}{Q} \quad (1)$$

式中: $C$ 为电力生产成本; $r$ 为利润率; $Q$ 为总电量。

各个国家在建立电力市场之后,通过市场竞争定价,现在主要有 3 种较为成熟的基于边际成本原理的定价方式:边际成本电价、节点边际电价、分区边际电价。

边际成本电价,利用传统经济调度模型求得:

$$\min w = \sum_{i \in N_g} C_i(P_{gi}) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in N_g} P_{gi} = \sum_{j \in N_d} P_{dj} \quad (3)$$

式中: $C_i(P_{gi})$ 为发电机组*i*的生产成本; $P_{gi}$ 为发电机组*i*的出力; $P_{dj}$ 为用户*j*的需求。

$$\rho = \frac{\partial C_i(P_{gi})}{\partial P_{gi}} \quad (4)$$

式中, $\rho$ 为使系统有功平衡的价格,即边际成本价格。

节点边际电价是在考虑电网阻塞、网损和发电机组边际成本的条件下制定的电价。节点边际电价可由优化模型得出,通用模型为:

$$\max(S_c + S_p) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } G(X, P, Q) = 0 \quad (6)$$

$$H(X, P, Q) \leq 0 \quad (7)$$

式中: $S_c$ 为生生产者剩余; $S_p$ 消费者剩余; $X$ 为系统其他参数约束; $P$ 、 $Q$ 分别为节点有功功率和无功功率。式(5)表示社会福利最大化,式(6)表示所有等式约束,式(7)表示所有不等式约束。该模型的最优解即是节点边际电价。

分区电价的提出,是因为电网在运行的过程中阻塞并不是存在于所有地区,而是频繁地出现在部分重要断面上,所以将具有相同或相近边际成本的节点集合,根据分区的结果和分区定价模型,确定各个区域的电价。

四川地区水电资源大部分分布在攀西、康甘等地区,该地区负荷用电量小,水电难以消纳,尤其在弃水期,水电基本处于满发状态。四川电网架构虽然整体较为坚强,但较康甘和攀西地区阻塞较多,导致水电外送困难,不同区域电力供需差异较大,四川电力市场现状与北欧较为相似,所以建议采取分区边际电价进行各个分区交易电量的结算。或者采用较为简单的方式,实行按阻塞断面分区出清与省级出清的两级出清方式,先省级出清,没有成交的剩余部分下放到分区虚拟出清,省级结算按省级的统一出清价格进行结算,分区出清价格与省级出清价格挂钩并下浮一定的比例。关于阻塞问题的处理,也可待市场较为成熟之后,引入金融输电权的方式进行解决。

### 3.4 结算机制

现货市场的结算机制是现货市场运营的重要内容,合理的结算机制是现货市场平稳发展的根本保障。四川日前市场和实时市场的结算可以采用差价合同的方式进行,即日前市场结算基准曲线与中

期市场结算基准曲线之间的偏差,按日前市场出清价,实行“差价合约”结算。实时市场结算基准曲线与日前市场结算基准曲线之间的偏差,按实时市场出清价,实行“差价合约”结算。发电企业差价合约收入可以表示为

$$S = \sum_{t=1}^T \lambda_t P_{\lambda,t} + \sum_{t=1}^T (\lambda_c - \lambda_t) P_{c,t} \quad (8)$$

式中: $P_{\lambda,t}$ 、 $P_{c,t}$ 分别为实际履行电量和合同电量; $\lambda_t$ 、 $\lambda_c$ 分别为*t*时段现货价格和合同价格。

实时平衡市场采取单边报价,不满足安全校核的机组上下调报价自动退出。具体的结算方式为:发电侧上调电量部分按上调现货价格结算;下调电量部分按(日前价格-下调价格)的差价进行结算。上调现货价格为机组增发发电量的交易电价;下调价格则是机组为实现功率平衡而少发的部分电量的交易价格。

辅助服务市场中,备用机组在报价时需要申报上下旋转备用,自动发电控制(automatic generation control, AGC)和实时平衡市场同步报价、分别出清,采用PAB电价机制。

## 4 结 语

四川作为清洁能源和电力外送大省,弃水期与非弃水期电力供需关系差异化大、水火基础成本差异化大、径流式水电站较多、区间来水难以预测、弃水期弃水量较大等问题均表明了四川电力现货市场建设是十分复杂的。上面通过借鉴国外电力现货市场并从四川实际出发,认为四川电力现货市场建设正处于起步阶段,市场规则不宜复杂,建议在弃水期和非弃水期采取不同的建设方案,建设具有四川特色的电力现货市场。

### 参考文献

- [1] 白杨,谢乐,夏清,等.中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J].电力系统自动化,2015,39(14):1-7.
- [2] 戴洁芬,陈沪伟.新能源参与电力现货市场的过渡机制研究[J].浙江电力,2020,39(12):78-84.
- [3] 葛睿,陈龙翔,王铁禹.中国电力市场建设路径优选及设计[J].电力系统自动化,2017,41(24):10-15.
- [4] 朱继忠.美国电力市场的发展和实现方法分析[J].南方电网技术,2016,10(5):22-28.
- [5] 文安,刘年,黄维芳.英国电力市场的价格机制分析[J].南方电网技术,2015,9(1):1-6.

- [6] 宋永华,孙静. 欧洲的电力市场发展及对中国的启发[J]. 能源技术经济,2008,20(3):1-6.
- [7] 邹鹏,陈启鑫,夏清. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):18-27.
- [8] 张宏亮.“十三五”期间四川电力发展面临的问题和几点思考[J]. 四川水利,2017,38(6):71-74.
- [9] 杨卫,吴宏宇. 试论新形势下四川水电市场营销策略[J]. 四川水力发电,2020,39(1):132-134.
- [10] 宋嗣博,郭红霞,杨苹. 基于节点边际电价的电力市场分区策略研究[J]. 电力建设,2017,38(9):132-138.
- [11] 陈雨果,王一,李嘉龙. 双边交易合约电量的分解模型与结果评估[J]. 南方电网技术,2015,9(8):32-37.

- [12] 张粒子,刘方,许通. 多运营主体梯级水电站参与的日前市场出清模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(16):104-110.
- [13] 刘治理. 四川上网侧分时电价政策实施效果分析[J]. 中国电力企业管理,2015(17):47-49.
- [14] 刘妍,谭建成. 南方区域大用户参与电力市场交易的现状及展望[J]. 南方电网技术,2017,11(11):68-74.
- [15] 宋嗣博,杨苹,许志荣,等. 基于日前电价预测的机组报价策略[J]. 南方电网技术,2017,11(2):57-62.

#### 作者简介:

李健华(1994),男,硕士研究生,研究方向为电力市场;  
刘继春(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统经济性分析与电力市场。 (收稿日期:2020-10-26)

(上接第 72 页)

根据现场解体检查状况及结构分析,造成回路电阻超标、罐体发热的原因因为压气缸外侧的中间触头与连接的铸铝导体接触不良。在通过负荷电流时局部发热,在对流、热辐射作用下,最终导致 A 相断路器罐体及相通气室的上 CT 罐体温度升高。

该断路器中间触头与铸铝导体为螺纹紧固连接,装配过程中中间主触头紧固不到位,在断路器分合闸操作振动及电动力的作用下,导致中间触头松动,触头连接部位接触不良,造成回路电阻增大。

GIS 罐体内大量灰色粉尘可能来源有两种,一是由于局部接触不良,在接触部位产生了局部放电,将铸铝导体和铜触头烧蚀,高温的铜、铝颗粒与 SF<sub>6</sub> 气体在局部放电作用下产生了罐体内部的灰色粉末;二是导电体表面涂的润滑膏为有机物,在高温作用下与 SF<sub>6</sub> 产生反应,生成的碳化或氟化物。

检修人员对该中间触头进行更换处理后,设备回路电阻测试合格;投运后,红外测试无异常。

## 4 结 语

通过对一起 220 kV 断路器 GIS 壳体发热缺陷的分析处理,详细阐述了该类缺陷的诊断测试及故障分析的流程及方法,对今后该类缺陷的处理具有借鉴意义。同时,对 GIS 设备的运行维护提出以下几点建议:

1) 加强 GIS 设备红外巡视工作。GIS 设备虽无法通过红外测温直接测到内部温度,但是外壳温度在一定程度上可反映内部状况。通常情况下,GIS 设备发热时,内部真实温度远高于外壳显示温度,因此对 GIS 设备红外巡视工作具有重要价值。

2) 断路器作为重要的电力系统设备,当检测到其发热时,必须查明原因,避免设备缺陷发展为电网事故。

3) 加强设备安装工艺质量管控,避免设备存在隐形缺陷。

#### 参考文献

- [1] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS 中局部放电特高频信号与放电严重程度的关联分析[J]. 高压电器,2014,50(9):6-9.
- [2] 邱炜,刘石. GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析[J]. 四川电力技术,2016,39(5):67-70.
- [3] 邵进,胡武炎,贾凤鸣. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2013,49(1):126-129.
- [4] 徐国政. 高压电器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [5] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发生热故障中的应用[J]. 高压电器,2011,47(5):92-95.
- [6] 赵明,李靖翔,赖浩. 气体绝缘全封闭组合电器环流发热原因分析及改进措施研究[J]. 电工技术,2020,41(5):109-112.
- [7] 段辉,颜廷立,王伟. 一起 110 kV GIS 电流互感器气室内部发热故障分析[J]. 山东电力技术,2019,46(7):78-80.
- [8] 范敏,郭文笔,朱文彬. SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室发热缺陷分析[J]. 湖南电力,2017,37(6):58-60.
- [9] 杨明昆,马宏明,何顺,等. 发热缺陷下 GIS 内部温度分布数值分析[J]. 云南电力技术,2020,48(1):58-63.

#### 作者简介:

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

刘军军(1990),男,硕士,工程师,主要从事变电设备检修、电气试验工作。 (收稿日期:2020-09-27)

# 基于 DMAIC 的项目精益化管理效率提升研究

李建平,黄燕珠

(南方电网超高压输电公司南宁局,广西 南宁 530000)

**摘要:**电网工程项目落地实施周期长不仅给电网运行带来安全隐患,也大大增加了人、财、物的冗余,实施工程项目精益化管理有助于提高企业管理效率。采用基于 DMAIC 的精益管理方法,组织开展生产项目管理优化研究,提出生产项目管理优化方案及提升方法,通过上述措施提高了生产项目管理效率及工作质量,发挥了投资效益,保障电网安全生产。

**关键词:**精益化;DMAIC;项目管理;效率提升;关键绩效指标

**中图分类号:**F224.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0089-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20210219

## Research on Efficiency Improvement of Project Lean Management Based on DMAIC

Li Jianping, Huang Yanzhu

(Nanning Bureau of China Southern Power Grid EHV Transmission Company,  
Nanning 530000, Guangxi, China)

**Abstract:** The long implementation period of power grid engineering projects not only brings safety hazards to the operation of power grid, but also greatly increases the redundancy and waste of people, finances and materials. The implementation of lean management for engineering projects as the main means of power grid enterprise management improvement is imminent. Based on lean management method with DMAIC, the research of production project management optimization is organized and carried out, and the production project management optimization scheme and promotion method are put forward, which makes the investment benefits be brought into play and ensure the safety production of power grid.

**Key words:** lean; DMAIC; project management; efficiency improvement; key performance indicator (KPI)

## 0 引言

随着电力体制改革不断推进以及电网企业自身发展的需要,精益化管理已经成为电网企业管理提升的抓手<sup>[1-2]</sup>。以南方电网超高压输电公司(以下简称A公司)为例,将精益管理提升至公司战略高度,形成通过标杆管理推进精益管理的工作思路。该企业认为实现精益管理的主要路径是管理上的专业化和技术上的标准化。同时该公司的管理和决策层面将“全面预算管理”“全面风险管理”“综合计划管理(企业级决策支持系统)”“三重一大决策管理”作为实现管理精益的管理工具和重要抓手,操作和执行层面在推行全方位、各领域专业化的同时,实现了管理精益的努力方向,提升了工作质量,消除管理

精益的障碍<sup>[3]</sup>,预达到“消除浪费、创造价值、持续改善、精益求精”的目标。

下面以南方电网A公司企业管理现状为例,分析了电网企业在生产管理过程中存在的问题,结合DMAIC精益管理方法的应用<sup>[4]</sup>,提出了有关管理理念并应用到实际生产管理中<sup>[5]</sup>取得了良好的效果。

## 1 现状分析

一直以来,电网企业生产项目全过程管理涉及专业面广、业务领域多,包括生产项目规划、工程造价、物资管理、招投标管理、合同管理、监察审计、财务管理、档案管理等。以南方电网A公司近两年来生产项目管理一体化制度为例,生产项目管理涉及该公司系统制度及业务指导书共计95个,各制度相

对独立,涉及的不同层级多、部门责任主体多。由于缺乏有效的横向衔接及协同规范,大大增加了生产项目管理成本,影响着生产项目实施效率,也制约着生产项目管理水平提升。以南方电网 A 公司为例,在实际生产管理过程中存在的问题主要表现在 6 个方面,如图 1 所示。

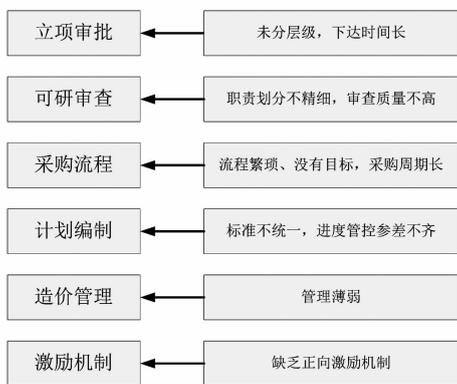


图 1 项目管理中存在的普遍问题

根据项目审核批复级别不同,项目批复的周期一般在 3~6 个月不等,项目批复时间长,是整个管理过程效率提升的重要影响方面。经过数据统计分析显示,批复后项目存在较高变更率。以 A 公司为例,2016 年的项目变更率高达 36%,而在采购环节,又需要经过 3~6 个月的采购周期,进一步降低了项目管理效率。

综上,普通项目在极为顺利的情况下,从批复到实施至少需要 6 个月时间,而最长则可以长达 15 个月。A 公司作为生产企业,一方面项目落地实施的周期长给电网运行带来隐患;另一方面也大大增加了人、财、物的冗余和浪费,生产项目管理的效率提升迫在眉睫。

## 2 精益化 DMAIC 管理原理

DMAIC 包括定义 (define)、测量 (measure)、分析 (analyze)、改进 (improve)、控制 (control) 5 个环节<sup>[6-8]</sup>。DMAIC 强调结构性思考,用于有逻辑的严密的推进项目,有利于整体把控项目进度,由表及里、系统性全盘考虑影响项目目标的每个环节、每个因素,并对问题进行深入思考<sup>[9-11]</sup>,如图 2 所示。

1) 定义: 确定生产项目的管理效率指标。

2) 测量: 确认需要改进的所有影响环节,进行大数据收集,然后对找出的问题测出影响质量的关键因素。一般包括项目指标的分解、指标管理现状分析、指标管理的改善措施、指标数据的收集、物资

采购能力分析。

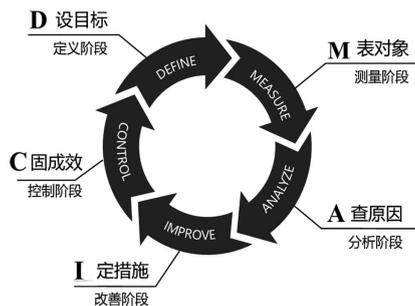


图 2 精益化 DMAIC 管理基本原理

3) 分析: 确认立项审批流程、计划编制流程、招标采购流程、生产实施流程、验收结算流程等环节存在的主要问题。

4) 改进: 在确定了关键质量达不到期望值的基础上,着手改进整个流程,针对关键因素找出解决办法,确立最佳改进方案。包括改善对策、改善计划、改善案例、阶段总结。

5) 控制: 将关键变量控制在新的操作极限内,包括实施风险分析、控制计划建立、效果确认等。确保团队的监测流程、测量结果以及对新的问题重新定义和新流程的管控,控制每一过程都考虑“PDCA 循环——计划 (plan)、实施 (do)、检查 (check)、行动 (act)。”

下面介绍该电网企业采用 DMAIC 管理,形成科学的、规范的、容易理解的、可操作性强的步骤和方法。

## 3 DMAIC 方法在项目管理中的应用

### 3.1 确立项目的范围及目标——定义

由于很多生产项目投资大、周期长,每年设备部都对相关的生产项目工作进行详细的核准,形成当年的投资计划,所以投资计划的完成率就是整个生产项目的管理效率指标,如式(1)所示。

$$Y = \frac{P}{Q} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $Y$  为年度计划完成率;  $P$  为当年实际完成投资额;  $Q$  为年度计划投资额。

### 3.2 确立项目的指标及数据收集——测量

测量阶段内容主要包括:项目指标分解、指标管理现状分析、指标管理的改善措施、指标数据的收集、物资采购及各单位生产能力分析 6 个部分,如图 3 所示。

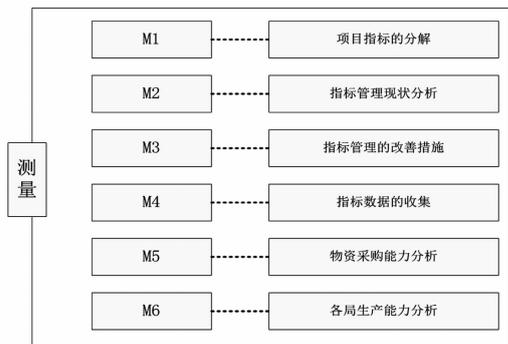


图 3 测量阶段实施结构

3.2.1 项目指标分解及管理措施

在假定可研立项和计划编制下达都按期进行的前提下,将年度投资计划完成率 Y 分解为关联的招标采购的按计划完成率 Y1、生产施工的按计划完成率 Y2 和验收结算的按计划完成率 Y3,最终落实到各单位项目的这三项指标,如图 4 所示。

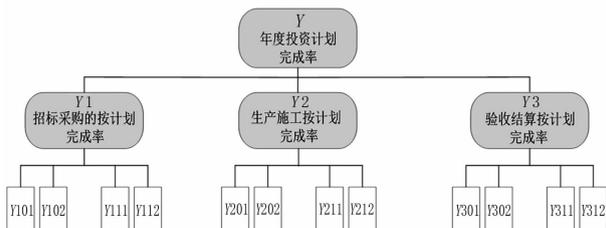


图 4 项目指标分解结构

调查各单位项目的上述三项指标时发现公司层面对一些职能部门和地市局的关键指标关注不足,如:采购的按计划完成率;部门之间未针对生产项目管理建立有效协同机制;项目管理人员频繁更换,造成各局内部管理“不稳定、不规范”;缺乏项目管理考核机制等。

鉴于这三项关键指标处于这样的管理状态,提出了以下改善措施:完善“投资计划管理系统”“项目管理系统”等与生产项目有关的信息系统;完善 A 公司的关键绩效指标 (key performance indicator, KPI) 管理体系,具体如表 1 所示。

表 1 A 公司的 KPI 管理体系

指 标	公司 KPI	部门 KPI	各基层单位 KPI	基层部门 KPI
Y:投资计划完成率	√	√	√	√
Y1:按时采购完成率	√	√	√	×
Y2:按时施工完成率	×	√	√	√
Y3:按时结算完成率	×	×	√	√

3.2.2 指标数据收集

在相关的管理改善措施执行之前,统计相关的指标,发现以下问题:

- 1) A 公司采购平台没有采购周期承诺、没有按计划完成率的 KPI,采购周期无法控制;
- 2) A1—A12 单位反馈项目受招标采购环节影响大;
- 3) 设备部项目管理人力有限,难以对所有项目进行充分的过程管控,与采购部门、财务部等相关部门的沟通协调也不充分。

在相关的管理改善措施执行之前,各基层单位基本上能统计出来相关的指标,如表 2 所示,但存在如下问题:

- 1) 在统计年度指标结果时,不关注月度计划节点,只关注按年终 12 月考核阶段评估工程是否完成;
- 2) 从调查来看,各单位项目过程管理参差不齐,只关注结果指标,不关注过程管理,未建立统一有效的进度管控机制。

表 2 各基层单位 KPI 管理现状

区分	Y/%	Y1/%	Y2/%	Y3/%
A1	63.78	70.12	79.35	83.66
A2	87.79	88.01	89.32	90.89
A3	80.63	83.11	85.38	86.69
A4	91.73	85.75	80.36	92.85
A5	83.24	85.79	87.56	88.69
A6	83.24	80.56	82.27	85.09
A7	83.46	80.56	83.69	85.74
A8	78.14	80.29	84.33	83.58
A9	82.73	87.69	85.21	88.98
A10	82.73	87.73	89.04	86.22
A11	91.55	90.11	91.59	95.36
A12	65.74	61.33	75.36	77.33

注:A1—A12 表示 A 公司下属的 12 个基层单位。

3.2.3 物资采购能力分析

根据物流中心对采购业务的分析,A 公司未开展采购周期及采购按计划完成率方面的指标管理,无法进行更详细的采购效率分析。

另外,采购部门提出招标采购中的两个核心环节决策时间无法管控,无法为其他部门承诺采购周期。A 公司层面缺少采购周期及采购按计划完成率 Y1 方面的考核指标,如表 3 所示。

表 3 各基层单位物资采购现状

分类	采购承诺周期	按计划完成率 Y1
技术服务采购	无	无
物资采购	无	无
XX 类物资采购	无	无
XX 类其他采购	无	无

3.2.4 各基层单位生产能力分析

图 5 所示为各基层单位生产能力情况。

投资计划完成率 Y1: 2016 年投资计划完成 85%, 但距离行业标杆 100% 的水平还有很大差距。

招标采购的按计划完成率 Y11: 物流中心负责信通中心项目的合同会办和签订信通中心无法控制; 缺乏统一的采购周期标准。

生产施工按计划完成率 Y21: 项目施工计划受停电计划制约, 导致生产施工计划未达到预期完成时间。

验收结算按计划完成率 Y31: 部分项目未按计划节点开展验收结算工作, 项目验收结算效率低。

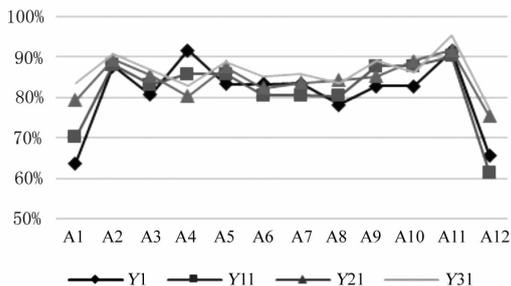


图 5 A1—A12 单位生产能力情况

3.3 梳理项目管理过程中各项流程——分析

生产项目全过程管理涉及专业面广、业务领域多, 包括生产项目立项、计划下达、技术规范书、采购管理、项目实施管控、项目管理信息系统、财务管理、人力资源配置等, 如图 6 所示。

3.4 项目管理改进流程——改进

1) 问题导向

基于公司调研情况, 针对项目管理存在问题, 深入分析原因, 以解决问题为导向, 以持续改进为思路, 着力解决管理难点、症结。

2) 精益管理

基于生产项目管理涉及专业面广、业务领域多, 过程管理环节多、链条长的特点, 实施项目全过程“精细、规范”管理, 实现公司项目管理规范、统一, 促进管理效益提升。

3) 精准管控

通过优化管理流程、精简管理环节, 注重管理实

效, 实施生产项目精准管控, 实现生产项目投资决策、进度、质量、廉洁防控等关键环节管必到位、风险可控。

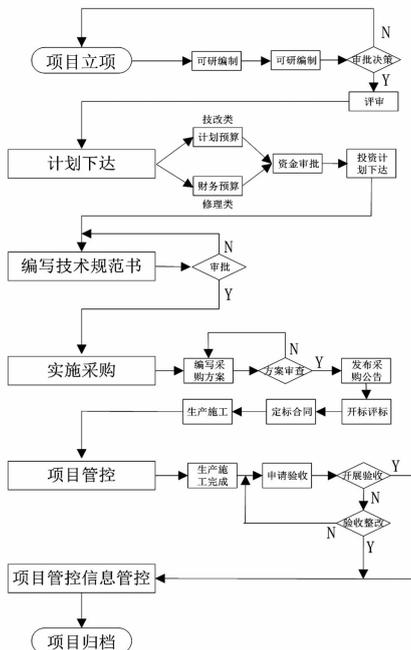


图 6 生产项目全过程管理

措施 1: 针对超高压有《生产管理项目细则》, 没有承接网公司的原则, 还停留在一体化的“统一标准, 统一流程, 分级管理”问题。修编超高压《细则》, 重点突出承接, 体现原则, 设计好流程制度和标准。

措施 2: 针对生产设备部门不够重视生产项目管理; 企业内部的干部流动没有考虑到项目管理经验; 公司的管理标准和技术标准体系需要完善等问题。一是生产设备部将生产项目的管理列为部门的重点任务; 二是对公司和各设备部主任和主管进行项目管理的轮训; 三是对生产设备领域的管理标准和技术标准体系进行梳理、补充和完善。

措施 3: 针对公司以前不重视效率, 很少谈及时效约束; 流程设计只考虑本部门的方便性; 技术文件体系中缺少类似 QC 工程图的一览表等问题。要求所有流程的业务指导书都要明确基本的时效约束; 所有流程的设计都要考虑对其他流程的承诺, 整理相关流程的时效要求与承诺一览表。

3.5 项目管理控制流程——控制

1) 实施风险分析, 如表 4 所示。包含人的认识不同、其他部门的配合程度、紧急事项处理、第三方单位、公司项目管理政策等。

2) 控制计划建立, 如表 5 所示。包含可研编制、评审实施等各个流程节点。规范并精简流

表 4 实施风险分析

风险源	风险分析	风险等级	应对策略
人的认识	各节点负责人的执行力、责任心差异导致工作延后。	高	通过流程制度、监督考核规范工作行为。
其他部门的配合	其他部门的工作效率、资料完整性及准确性影响生产项目完成率。	中	将管理要求明确,严肃管理规定。
紧急事项	政府事项,自然灾害等紧急突发事件对项目计划及实施进度的影响。	低	严格执行项目实施计划,做好防范准备工作。
第三方单位	没有管控制度约束第三方,导致没有按计划交付内容,或者交付内容不合格,造成时间浪费和不必要的等待。	中	做好对第三方的条件审查,选择有实力、有能力的第三方,或者进行战略合作。
公司项目管理政策	公司立项审批,计划编制,招标采购,工程实施及验收结算各环节管理政策调整。	低	提前做好各环节的规划方案,及时应对公司政策,灵活处理问题。

表 5 控制计划建立

流程点	控制内容	控制手段	监控人员	监控措施
可研编制	可行性研究报告	可研立项审查会评审	项目专责	通报
可研评审和审批	可行性研究报告	可研立项审查会评审	项目专责	通报
各局编制项目实施方案	项目实施方案	项目实施方案审查会	项目专责	通报
技术规范书编制	技术规范书	技术规范书审查	专业专责	通报
局采购方案	采购方案	方案审查	招标办专责	通报
需求计划响应	物资需求计划	物资采购及时性考核指标建立	设备部	通报及考核
采购周期	物资到货及时性	物资采购及时性考核指标建立	设备部	通报及考核
设计施工及监理采购	设计施工及监理招标及时性	采购方案审查会	招标专责	通报
物资采购	物资采购及时性	物资采购及时性考核指标建立	设备部	通报及考核
工程实施	工程实施计划	进度管控考核机制	项目专责	考核
开展验收	验收计划	进度管控考核机制	项目专责	考核

程,提高效率。改变目前所有招标采购技术规范书由 A 公司统一审查但效率低下、审查质量不高的现状。

通过实施精益化项目管控,A 公司投资完成率显著提升,生产项目投资完成率由 2015 年的 69% 提升到 2019 年的 99.7%。如图 7 所示。

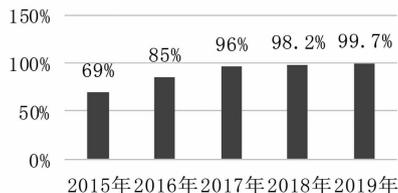


图 7 A 公司生产项目完成率提升情况

## 4 结 语

通过生产项目实施 DMAIC 管理,A 公司建立了

本地化生产项目管理制度标准,提高了生产项目管理效率。全面促进了生产项目管理要素(规范性、进度、质量、安全、造价)专业水平提升,造价管理全面加强,依法经营水平稳步提升,有效保障了安全生产,提升了投资效益。同时建立了高效、简洁的项目管理制度体系,为生产项目管理实施提供了精细化业务指引,促进了生产项目高效实施。

### 参考文献

[1] 国家电网公司. 国家电网公司安全设施标准: Q/GDW 434—2010 [S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[2] 蔡秀芬. 电网运行基于精细化管理的方式探讨[J]. 科技与企业,2013,22(19):53.

[3] 韩之俊. 论当代先进管理模式——六西格玛管理[J]. 南京理工大学学报(社会科学版),2003,8(41):41-45.

[4] 顾平. 现代质量管理学[M]. 北京:科学出版社,2004.

- [5] 郎志正. 关于 6SIGMA 法若干问题的研讨(下)[J]. 上海质量, 2004(8): 23-25.
- [6] 段斌, 雷永杰, 刘蓉, 等. 基于 DMAIC 模型的起锚机离合器故障问题研究[J]. 工业工程, 2017, 20(3): 75-81.
- [7] 张敏, 何桢, 赵小松. 国内外著名企业成功实施六西格玛管理的经验及启示[J]. 未来与发展, 2008, 29(5): 48-51.
- [8] 陈永清. 我国企业实施六西格玛管理的主要障碍[J]. 商业研究, 2010(11): 57-62.
- [9] 陈士将. 精益六西格玛在 M 公司生产管理中的应用研

究[D]. 南京: 南京大学, 2016.

- [10] 黄品国. 六西格玛管理在中国企业中的应用[J]. 上海电机学院学报, 2006, 79(6): 30-33.
- [11] 熊晶晶, 杨克, 江涛. 六西格玛管理在中小企业应用中的局限性[J]. 企业经济, 2007(7): 66-68.

#### 作者简介:

李建平(1986), 男, 高级工程师, 主要从事变电安全管理工作;

黄燕珠(1967), 男, 高级工程师, 主要从事变电安全管理工作。  
(收稿日期: 2020-10-08)

(上接第 47 页)

#### 参考文献

- [1] 黄海龙, 胡志良, 代万宝, 等. 海上风电发展现状及发展趋势[J]. 能源与节能, 2020(6): 51-53.
- [2] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [3] Christoph Brunner, Gerda Deac, Sebastian Braun, et al. The Future Need for Flexibility and the Impact of Fluctuating Renewable Power Generation[J]. Renewable Energy, 2020, 149: 1314-1324.
- [4] 杨茂, 代博祉, 刘蕾. 风电功率概率预测研究综述[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(2): 1-6.
- [5] 张瀚超. 基于神经网络组合模型的风电场短期功率预测方法研究[D]. 长沙: 湖南工业大学, 2019.
- [6] 杨茂, 董骏城. 基于混合高斯分布的风电功率实时预测误差分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1594-1602.
- [7] 杨宏, 苑津莎, 张铁峰. 一种基于 Beta 分布的风电功率预测误差最小概率区间的模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2135-2142.
- [8] 杨宏, 闫玉杰, 王瑜. Beta 分布在风电预测误差模型中的适用性[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 37-41.
- [9] 杨锡运, 张璜, 关文渊, 等. 基于滑动分块百分位数 Bootstrap 法的风电功率概率区间预测[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 430-437.
- [10] 张晓英, 张晓敏, 廖顺, 等. 基于聚类与非参数核密度估计的风电功率预测误差分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3594-3604.
- [11] 叶瑞丽, 刘建楠, 苗峰显, 等. 风电场风电功率预测误差分析及置信区间估计研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 21-25.
- [12] 郎伟明, 麻向津, 周博文, 等. 基于 LSTM 和非参数核密度估计的风电功率概率区间预测[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 31-37.
- [13] 黄坡, 朱小帆, 查晓明, 等. 基于波动过程聚类的风电

功率预测极大误差估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 130-136.

- [14] 张凯锋, 杨国强, 陈汉一, 等. 基于数据特征提取的风电功率预测误差估计方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 22-27.
- [15] 吴晓刚, 鲁宗相, 乔颖. 基于功率预测误差修正的日前风电出力分布估计[J]. 云南电力技术, 2019, 47(3): 13-18.
- [16] 丁明, 张超, 王勃, 等. 基于功率波动过程的风电功率短期预测及误差修正[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 2-12.
- [17] 封佳池. 风电预测与预测误差估计的混合储能动态配置[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [18] Han Li, Li Mingze, Wang Xuesong, et al. Real-time Wind Power Forecast Error Estimation Based on Eigenvalue Extraction by Dictionary Learning[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(2): 349-356.
- [19] 余爱华. 基于 EM 算法的高斯混合模型参数估计[J]. 现代计算机(专业版), 2011(17): 3-7.
- [20] 周封, 金丽斯, 刘健, 等. 基于多状态空间混合 Markov 链的风电功率概率预测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 29-33.
- [21] 周玮, 钟佳成, 孙辉, 等. 基于隐马尔可夫模型的日内风电功率预测误差区间滚动估计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 90-95.

#### 作者简介:

蒋艾町(1994), 女, 硕士, 助理工程师, 从事智能电网技术、综合能源系统的研究工作;

李小雨(1989), 男, 硕士, 工程师, 主要工作方向为电力系统规划设计;

夏雪(1981), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电气一次、综合能源系统的研究工作;

李嘉逸(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护、综合能源系统的研究工作。

(收稿日期: 2020-10-14)