

《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 陈缨
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

· 电力泛在物联网 ·
基于卫星共视技术的泛在电力物联网时间同步网
..... 段翔兮,冯世林,李小鹏,吴杰,高艺文,龙呈(1)
多能优化调度在智慧能源管控平台中的应用..... 张舵,马超,李嘉逸(5)
考虑自恢复能力的电力-通信网可靠性与经济性分析
..... 罗紫航,关翔友,魏震波(10)
基于电力计量大数据的电源规划研究..... 蔡高雷,刘桂龙(17)
· 新能源技术 ·
新能源配电网多运行指标协同的灵敏性分析方法
..... 张庆晖,吴长元,吴杰康,吴帆,唐惠玲,陈灵敏(24)
平滑风电出力的风储联合系统能量管理协调控制研究..... 詹仲强,付菊霞(29)
使用卡尔曼滤波修正蒙特卡洛算法的电动汽车充电负荷预测研究
..... 李小雨,肖汉,李嘉逸(37)
· 电网技术 ·
基于逻辑回归的双Y型外熔丝电容器故障诊断技术研究
..... 滕予非,唐嘉忆,段翔兮,宋梁,李世龙(41)
智能变电站便携式接口回路测试仪的研制
..... 龚华麟,张择策,曾祥力,李官宇,令狐静波,曾雪(46)
基于绝缘横担的配电网综合防雷系统配置与实施方案..... 林礼健(51)
提升金沙江二期特高压直流外输电举措..... 陈汉雄,李晓明(56)
变电站序列控制远方操作安全风险防治与管控
..... 邹沛恒,代宇涵,郭果,郑永康(61)
水平荷载对支盘桩受压承载力的影响分析
..... 王红,彭社琴,郑卫锋,孙珍茂(67)
服务于电网运行的监控信息事件化关联分析方法研究
..... 代宇涵,邹沛恒,张凤西,黄华伟,孙永超,罗荣森(72)
· 高电压技术 ·
高海拔500kV交流输电线路绝缘子片数选择研究
..... 唐巍,梁明,盛道伟,霍锋,刘从法(77)
非正常回路中感应电流引起电容式电压互感器发热的研究
..... 郭世晓,艾飞,胡巍,洪丽,林楠,张如宏(82)
基于超高压变电设备缺陷特征的状态检修提升策略..... 汪鑫,王紫鉴,魏阳(86)
主变压器低压侧三相空载电压不平衡分析
..... 王能进,周子洋,李飞,覃春阳,王哲(92)

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2019年第42卷第5期(总263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:陈缨
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:成都市锦晖西二街16号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印刷:四川科锐得文化传播有限公司

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]CN51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*18*

2019-10

CONTENTS

· Ubiquitous Power Internet of Things ·

- Time Synchronization Network in UPIoT Based on Satellite Common-view Technology
..... Duan Xiangxi, Feng Shilin, Li Xiaopeng, Wu Jie, Gao Yiwen, Long Cheng(1)
- Application of Multi-energy Scheduling Optimization to Smart Energy Control Platform Zhang Duo, Ma Chao, Li Jiayi(5)
- Reliability and Economy Analysis of Cyber Physical Power Systems Considering Self-recovery Ability ... Luo Zihang, Guan Xiangyou, Wei Zhenbo(10)
- Research on Generation Planning Based on Big Data of Electricity Metering Cai Gaolei, Liu Guilong(17)

· Renewable Energy Technology ·

- Sensitivity Analysis Method for Multiple Operational Index Coordination of Distribution Network with Renewable Energy
..... Zhang Qinghui, Wu Changyuan, Wu Jiekang, Wu Fan, Tang Huiling, Chen Lingmin(24)
- Research on Energy Management and Coordination Control for Combined System of Wind Power and Energy Storage to Smooth Wind Power Output
..... Zhan Zhongqiang, Fu Juxia(29)
- Research on Load Forecasting for Electric Vehicle Charging Using Monte Carlo Method Modified by Kalman Filter ... Li Xiaoyu, Xiao Han, Li Jiayi(37)

· Power System Technology ·

- Logical Regression Based Fault Diagnosis for External-fusing Double-Star Power Capacitor
..... Teng Yufei, Tang Jiayi, Duan Xiangxi, Song Liang, Li Shilong(41)
- Development of Portable Interface Circuit Tester for Smart Substation
..... Gong Hualin, Zhang Zeze, Zeng Xiangli, Li Guanyu, Linghu Jingbo, Zeng Xue(46)
- Configuration and Implementation Scheme for Integrated Lightning Protection System of Distribution Network Based on Insulated Crossarm
..... Lin Lijian(51)
- Measures for Improving UHVDC Delivery Output in Second Phase of Jinsha River Project Chen Hanxiong, Li Xiaoming(56)
- Prevention and Control of Safety Risk in Remote Operation of Substation Sequence Control Zou Peiheng, Dai Yuhan, Guo Guo, Zheng Yongkang(61)
- Analysis on Influence of Horizontal Load on Bearing Capacity of Branch Pole Wang Hong, Peng Sheqin, Zheng Weifeng, Sun Zhenmao(67)
- Research on Event-based Correlation Analysis Method for Monitoring Information Serving Power Grid Operation
..... Dai Yuhan, Zou Peiheng, Zhang Fengxi, Huang Huawei, Sun Yongchao, Luo Rongseng(72)

· High Voltage Technology ·

- Research on Selection for Number of Insulators of 500 kV AC Transmission Line in High Altitude Area
..... Tang Wei, Liang Ming, Sheng Daowei, Huo Feng, Liu Congfa(77)
- Research on Overheating of Capacitive Voltage Transformer Caused by Induced Current in Abnormal Circuit
..... Guo Shixiao, Ai Fei, Hu Wei, Hong Li, Lin Nan, Zhang Ruhong(82)
- Promotion Strategy of Condition Based Maintenance Based on Flaw Characterization of Extra-high Voltage Substation Equipment
..... Wang Xin, Wang Zijian, Wei Yang(86)
- Unbalance Analysis Of Three-phase No-load Voltage in Low Voltage Side of Main Transformer
..... Wang Nengjin, Zhou Ziyang, Li Fei, Qin Chunyang, Wang Zhe(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2019 Vol. 42 No. 5
(Ser. No. 263)

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

基于卫星共视技术的泛在电力物联网时间同步网

段翔兮,冯世林,李小鹏,吴杰,高艺文,龙呈

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:为了实现泛在电力物联网下调控中心之间、调控中心与变电站、变电站之间的高准确度跨区域时间同步,研究了基于卫星共视技术的天基时间同步网实现方法,研制了卫星共视授时装置,搭建了天基时间同步网实验系统。基于卫星共视的天基时间同步网,不仅消除卫星钟差、星历误差等影响因素而提高了时间同步的准确度,而且解决了标准量值传递的溯源问题。

关键词:泛在电力物联网;卫星共视;时间同步网;共视授时装置

中图分类号:TN927 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2019)05-0001-04

Time Synchronization Network in UPIoT Based on Satellite Common-view Technology

Duan Xiangxi, Feng Shilin, Li Xiaopeng, Wu Jie, Gao Yiwen, Long Cheng

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

Abstract: In order to achieve high accuracy and cross-regional time synchronization between the control centers, between the control center and the substation, and between the substations in ubiquitous power internet of things (UPIoT), the realization method of space-based time synchronization network based on satellite common-view technology is studied. The satellite common-view timing device is developed and a space-based time synchronization network experiment system is built. The space-based time synchronization network based on satellite common-view not only eliminates the influence factors such as satellite clock error, ephemeris error and so on, but also improves the accuracy of time synchronization, and solves the problem of traceability of scalar value transmission.

Key words: ubiquitous power internet of things (UPIoT); satellite common-view; time synchronization network; common-view timing device

0 引言

随着泛在电力物联网建设的稳步推进,作为枢纽型、平台型和开放型的电力物联网将不止融合电网相关信息,还会实现用户信息、外部信息等多源信息接入、融合。而统一的时间基准、精确的时间标注是高效融合应用上述信息并保障数据质量的重要要求,为平台层和应用层的建设、数据的变现业务打下坚实基础。同时,电力系统的测控、保护不只局限于就地,而是跨区域的广域测量和广域保护,支撑智能电网的各种高级应用都需要整个电网的断面数据作为应用基础,这就要求相关的一次设备对应的数据采集时间是精确同步的^[1-2]。

目前,电力系统常规使用的对时方式是在调控中心、变电站、发电厂各自部署时间同步系统来保证各自区域内的设备所使用的时间是同步的,所用时间来源均为北斗或GPS单向授时,不可溯源,其可信度取决于时间传递各个环节的正确性,时间同步精度不达标甚至时间错误等问题往往是在后期数据分析中才被发现。

基于卫星共视技术实现的卫星共视授时装置可以经济、高效、便捷地实现远距离高准确度时间同步。而利用卫星共视授时装置组建的天基时间同步网,可以快捷地实现调控中心与变电站、调控中心之间、变电站之间的高准确度跨区域时间同步,并能够解决标准量值传递的溯源问题。

1 卫星共视的基本原理

所谓“共视”就是2个不同位置的观测者,在同一时刻观测同一颗卫星。也就是在一颗卫星的视角内,地球上任何2个地点的时钟可以利用同时收到的同一颗卫星的时间信号进行时间、频率的对比和同步^[3]。

两地时钟之间的时间差可通过式(1)、式(2)和式(3)求得,式(1)中 Δt_{ASV} 为A地时钟时间 t_A 减去卫星时间 t_{SV} ,再减去路径延时 d_A ,式(2)中 Δt_{BSV} 同理。式(3)中 Δt_{AB} 为两地时钟之间的时间差,由式(1)减去式(2)得到。

$$\Delta t_{ASV} = t_A - t_{SV} - d_A \quad (1)$$

$$\Delta t_{BSV} = t_B - t_{SV} - d_B \quad (2)$$

$$\Delta t_{AB} = (t_A - t_B) - (d_A - d_B) \quad (3)$$

通过式(3),降低了2个观测点所共有的误差,但不能消除传输中的星历误差,通过估算卫星的位置将星历误差减到最小。

式(4)为校频的基本公式。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{\Delta t_{i+\tau} - \Delta t_i}{\tau} \quad (4)$$

式中: $\Delta f/f$ 为相对频偏; τ 为校频的时间间隔^[4]。

假设A为主站,B为子站,通过式(4)得出的频率差调整子站的铷钟(频标源)的频率,使得与主站的频率差小于某一阈值,同时调整子站的秒沿起点,最终使子站时间溯源到主站,实现两站的时间同步^[3]。

如图1所示,通过对卫星和用户之间的伪距和时差进行分析,以缩小星历误差、对流层和电离层的延时误差。

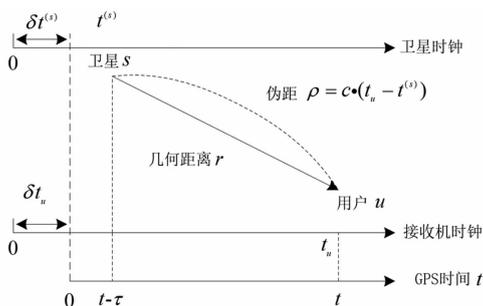


图1 时差及伪距的测量

鉴于GPS时间与接收机时钟产生的时间不同,以 $\delta t_u(t)$ 表示接收机的时钟钟差,对应于信号接收时间 t_u 的GPS时间为 t ,将GPS时间为 t 的接收机时钟 t_u 记为 $t_u(t)$ ^[5],则

$$t_u(t) = t + \delta t_u(t) \quad (5)$$

因为各个卫星时钟与GPS时间并不是严格同步。GPS时间 t 与卫星时钟 $t^{(s)}(t)$ 存在以下关系:

$$t^{(s)}(t) = t + \delta t^{(s)}(t) \quad (6)$$

式中, $\delta t^{(s)}(t)$ 为卫星时钟钟差。

为了确保卫星的时钟与GPS时间同步,卫星时钟在GPS时间为 t 时的卫星钟差 $\Delta t^{(s)}$ 描述成一个二次式:

$$\Delta t^{(s)} = a_{t0} + a_{t1}(t - t_{oc}) + a_{t2}(t - t_{oc})^2 \quad (7)$$

式中, a_{t0} 、 a_{t1} 、 a_{t2} 和 t_{oc} 均由卫星导航电文的第一数据块给出。

卫星时钟的校正量还应该包括相对论相应的校正量 Δt_r 。

$$\Delta t_r = F \cdot e_s \sqrt{a_s} \sin E_k \quad (8)$$

式中: e_s 为卫星导轨偏心率; a_s 为导轨长半径; E_k 为偏近点角; F 为常数。

单频接收机还应该考虑群波延时校正量 T_{GD} ,它由卫星导航电文的第一数据块给出。因此,对于L1单频接收机卫星时钟总的钟差值 $\delta t^{(s)}$ 为

$$\delta t^{(s)} = \Delta t^{(s)} + \Delta t_r - T_{GD} \quad (9)$$

设GPS信号到接收机的传播时间为 τ ,GPS时间与卫星时钟在信号发射时刻 $(t - \tau)$ 时的关系可表达为

$$t^{(s)}(t - \tau) = t - \tau + \delta t^{(s)}(t - \tau) \quad (10)$$

伪距 $\rho(t)$ 为

$$\rho(t) = c[t_u(t) - t^{(s)}(t - \tau)] \quad (11)$$

在大气折射效应的作用下,信号的实际传播由以真空光速 c 穿过两点之间的几何距离 r 所需的时间和大气折射造成的传播延时两部分组成,大气折射造成的延时被分解成对流层延时 $T(t)$ 和电离层延时 $I(t)$ 两部分,即:

$$\tau = \frac{r(t - \tau, t)}{c} + I(t) + T(t) \quad (12)$$

将式(5)、式(10)和式(12)代入式(11),得^[6]

$$\rho(t) = r(t - \tau, \tau) + c[\delta t_u(t) - \delta t^{(s)}(t - \tau)] + cI(t) + cT(t) + \varepsilon_p(t) \quad (13)$$

式中,引入了一个值未知的伪距测量噪声量 $\varepsilon_p(t)$ 。

2 卫星共视授时装置

2.1 卫星共视授时装置原理

图2给出了主站(国家授时中心)与子站通过

卫星共视对比方法实现时间同步的原理示意图。

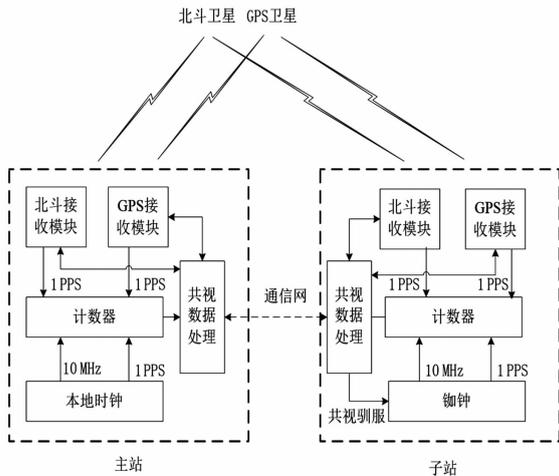


图2 卫星共视方法实现时间同步的原理

在主站和子站分别设置卫星共视授时装置接收北斗卫星和GPS卫星的相关信息,每秒提取1个脉冲(1PPS),计数器每秒输出一个时差值以实现时间溯源同步于国家授时中的协调世界时(UTC)^[7-8]。

2.2 卫星共视授时装置功能

1) 高精度授时、高稳定度守时

共视授时准确度优于10 ns,守时性能优于50 ns/h、1.5 μs/d。

2) 灵活的授时工作模式

装置可工作于3种授时模式:共视授时模式、单向授时模式和内部守时模式,授时模式可以根据工作条件自适应切换,也可以固定某一种授时模式。

3) 多元化的共视数据链路选择

共视数据链路可以选择GPRS、网络或串口。

4) 时间基准输入通道延迟补偿可调

各时间基准源(无线或有线)输入分通道延迟补偿可调,保证输入基准源切换时内部时间基准平滑一致。

5) 输出时间信号通道延迟补偿可调

输出时间信号分通道延迟补偿可调,保证各被授时设备的时间精确同步。

6) 便捷的状态及日志查询

便捷查询告警接点、各输入/输出时间信号、网口、串口、卫星(北斗和GPS)、GPRS等装置接口状态,提供多达1000条装置日志查询,准确了解装置的运行状态。

7) 支持后台系统远程管理

通过后台管理系统可对设备进行远程管理,如状态监控、参数设置、日志读取等。

3 天基时间同步网

3.1 天基时间同步网架构

电力系统天基时间同步网是利用卫星共视授时装置,以调控中心为主站实现的调控中心之间、调控中心与变电站、变电站之间的一主多从的时间同步网。

以省级时间同步网为例,如图3所示。通过卫星共视,省调时间同步系统时钟溯源(同步)于中国国家授时中心(位于陕西临潼),两台卫星共视授时装置分别部署两地,装置之间通过公共链路(如GPRS)交换数据。各省属地调、变电站的时间同步系统的时钟溯源(同步)于省调时间同步系统,位于地调、变电站的卫星共视授时装置通过SDH传输网(电力调度数据专网)与省调卫星共视授时装置实现数据交换。

图3中,实现了省级时间同步网的时间同步于北京时间(源于中国国家授时中心),如果将虚框去掉,则可以实现以省调时间同步系统为基准源的区域时间同步网。

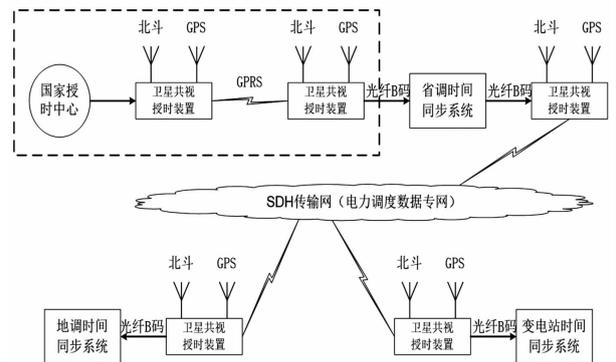


图3 基于共视原理的天基时间同步网

由于在调度中心、变电站运行的计算机系统、二次设备的信息交互都是在内网中完成,而国家授时中心与电网公司没有内网连接,只能通过公网(GPRS)交互信息,因此,为满足安全防护要求,卫星共视授时装置与省调时间同步系统采用光纤IRIG-B(DC)码时间信号传递时间。

采用卫星共视原理实现时间同步,特别适合于不同区域的个别变电站与省调时钟同步,即实现各孤立节点的时间同步。比如,在广域保护中,为实现广域保护所涉及的变电站间的时间同步,通过卫星

共视的手段最便捷。也就是说,在特高压互联的坚强电网中,卫星共视是目前最理想的实现跨地域的时间同步的方法。

3.2 天基时间同步网管理系统

天基时间同步网管理系统是通过网管的方式,对网内的卫星共视授时装置、时间同步装置等设备进行参数、状态、日志等信息进行远程管理。系统可远程配置被管理设备各项参数,并对其工况、功能、性能、日志等汇总信息进行统计分析处理,并进行数据存储。

管理系统与现有调度自动化主站软件采用一体化设计,作为主站软件的一个功能模块运行,通信规约采用符合现有运动通信规约的方式。管理系统应具备强大的统计分析功能,支持横向比对和纵向比对。可对设备的本地时间、GPS时间、北斗时间、地面时间进行统计分析和趋势图绘制。通过对设备状态的监控,运行管理人员能及时发现问题解决问题,从而提高时间同步网内设备功能的正确性、稳定性,最大限度保证设备正常运行。

4 结 语

通过对卫星共视技术基本原理的分析,给出了卫星共视授时装置的模型,并基于该模型搭建了基于卫星共视的天基时间同步网试验系统,其授时精度优于10 ns,满足电网系统的时间与国家授时中心的授时允许误差,满足电网跨区域时间同步应用需求。采用一体化设计的管理系统软件可对管理区域内的卫星共视授时装置、时间同步装置等设备进行故障率、故障类型、性能统计,从而提高时间同步网内设备功能的正确性、稳定性,最大限度保证设备正常运行。

参考文献

- [1] 杨挺,翟峰,赵英杰,盆海波. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13):9-20.
- [2] 李易. 泛在电力物联网在电力系统中应用的展望[J]. 科技创新与应用, 2019(22):175-176.
- [3] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4):757-763.
- [4] 赵莎. 基于卫星共视法的电网时频测量及同步技术[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(12):49-52.
- [5] 李东新,杨伟才,常青,等. 伪卫星共视法时间同步模型及其精度分析[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(4):39-47.
- [6] Yi H, Wang H, Zhang S, et al. Research on Time and Frequency Transfer Based on BeiDou Common View[C]// 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, 2015:553-556.
- [7] 赵当丽,翟慧生,胡永辉,等. 利用卫星共视比对系统实现电网的时间同步[J]. 现代电力, 2010, 27(2):70-73.
- [8] Kong Y, Yang X, Chang H, et al. Method of Precise Common-Viewfrequency Transfer Based on BeiDou GEO Satellite[C]. Frequency Control Symposium IEEE, 2014:1-4.

作者简介:

段翔兮(1991), 硕士, 主要从事电力系统自动化技术研究;
冯世林(1971), 高级工程师, 主要从事变电站自动化技术研究;
李小鹏(1987), 博士, 主要从事特高压直流输电、电网设备监控研究工作;
吴杰(1986), 硕士, 主要从事变电站新技术研究;
高艺文(1989), 硕士, 主要从事配电网自动化技术研究;
龙呈(1987), 博士, 主要从事变电站自动化技术研究。

(收稿日期:2019-06-04)

欢迎投稿 欢迎订阅

投稿邮箱:cdscdljs@163.com

多能优化调度在智慧能源管控平台中的应用

张舵¹, 马超¹, 李嘉逸²

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

2. 中国电力工程顾问集团智能电网技术中心, 四川 成都 610021)

摘要:综合能源系统对于提高能源利用效率、节能减排、加强能源安全、优化能源结构方面起到积极作用。结合新型智慧能源运营公司配用售一体化管理以及综合能源管控的实际业务需求,分析区域智慧能源管控平台的物理架构、功能需求,并指出平台开发中所应用的关键技术。在考虑智慧园区多能平衡、多样化用户需求和多变场景的基础上,介绍面向智慧园区的综合能源能量管理系统架构及功能,并且建立了智慧园区日前经济优化调度模型,给出了最优调度运行结果。

关键词:综合能源系统;多能优化调度;实时调度;能源服务;智能运维

中图分类号:TM315 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2019)05-0005-05

Application of Multi-energy Scheduling Optimization to Smart Energy Control Platform

Zhang Duo¹, Ma Chao¹, Li Jiayi²

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

2. Research & Development Center for Smart Grid, CPECC, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Integrated energy system plays an active role in improving energy efficiency, energy saving and emission reduction, strengthening energy security and optimizing energy structure. The physical architecture and functional requirements of the regional intelligent energy management and control platform are analyzed, and the key technologies used in the platform development are pointed out. Finally, considering the multi-energy balance in diversified user needs and changeable scenarios, the integrated energy management system and its functions are introduced. A 24-hour economic optimization model has been established to demonstrate the most economic way of energy dispatching.

Key words: integrated energy system; multi-energy scheduling optimization; real-time scheduling; energy service; intelligent operation and maintenance

0 引言

国家电网公司在2019年工作会议中指出,要聚焦建设世界一流能源互联网企业,推动公司转型升级,打造“三型”(枢纽型、平台型、共享型)企业,建设运营“两网”(坚强智能电网、泛在电力物联网)^[1],并将综合能源服务作为主营业务,积极推进综合能源服务业务发展。

综合能源系统利用化石燃料(以天然气为主),通过微型燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉和制冷装置,实现发电、制冷、供热,使得能源多级利用并以此

提高能源利用效率,综合能源利用效率在90%以上,明显优于传统集中式发电厂效率。综合能源系统的核心问题包括对终端能源单元系统的管理以及其如何处理与传统社会供能系统的协调配合^[2]。

1 智慧能源系统的实现形式

在能源互联网能量管理系统的研究和建设方面,美国FREEDM中心、普渡大学和加州大学伯克利分校^[3]提出能源互联网的体系结构。该理论以骨干大电网、局域网等网络关联为研究对象,强调借鉴互联网开放的思想及理念提出了新型的能源网。

德国提出的“E - Energy”^[4]计划强调将信息网络定位为能源互联网的支持决策网,在现有电力能量管理系统的基础上增加通信宽带以及信息收集、分析和决策,从而指导能源网络的运行调度。日本提出“intenergy”^[5]的概念,强调互联网技术和能源网络的深度融合,采用集中式和分布式耦合的分层递阶的能量管理系统。在中国,目前清华大学能源互联网研究院提出融合了信息网和能源网的能源互联网架构,并采用能量路由器作为其核心单元^[6]。“energy hub”是瑞士联邦理工学院研究团队基于计算机科学中集线器的概念,用以刻画多能耦合单元的关系模型。在该模型中能量耦合单元被称为能源集线器,负责能源的耦合与转换(冷、热、电),它是对现有各类综合能源单元方案的一种高度的抽象化。

2 智慧能源综合管控平台

随着多能源互联程度的不断提高以及配电业务市场次第放开,多能源的联合供给将成为未来能源服务商(拥有配电网资产的售电公司)抢夺终端用户的主要竞争手段。如何实现多种能源供应、用户需求管理、设备运维、生产调度等多种功能需求的一体化管控,将是未来售电公司急需解决的问题。

相比于电网公司、发电公司、设备厂家,电力设计院除具有包括电源、电网、技经、系统、通信、计算机等完备的专业体系以及涵盖电力系统整体与分项工程从规划、设计、施工、运营、调控的工程经验之外,还与电力系统各利益相关方(政府、发电企业、电网企业、售电公司、交易中心、调度中心、科研院所)都具有良好关系,位置中立,经常与各方合作,既熟悉政策又明白各方需求,同时还有一定的科研开发能力,具备开发一套发供配用售营一体化综合管控平台的基础条件。

2.1 系统架构

智慧能源管控平台是提供以需求为导向的数据挖掘与精准服务应用,通过开发相关工具与产品,提升与客户的互动参与度,为项目提供从规划设计到调度运维的全生命周期增值服务的大数据平台。平台可支持统计分析、数据挖掘、机器学习、边缘计算等技术,为平台用户提供用能预测、潜在客户分析、设备故障感知与预警、能效提升、风光储新能源消纳评估以及需求侧响应柔性负荷评估等多元化的综合

能源服务。

智慧能源综合管控平台是基于大数据平台技术,由多个分布式子站系统集成的综合能源大数据处理云平台,图1展示了智慧能用管控平台的功能架构,该平台由数据仓库模块、算法引擎模块、功能组件模块、应用方案以及应用业务组成,可提供智慧能源大容量的数据存储、查询、分析、应用等功能。

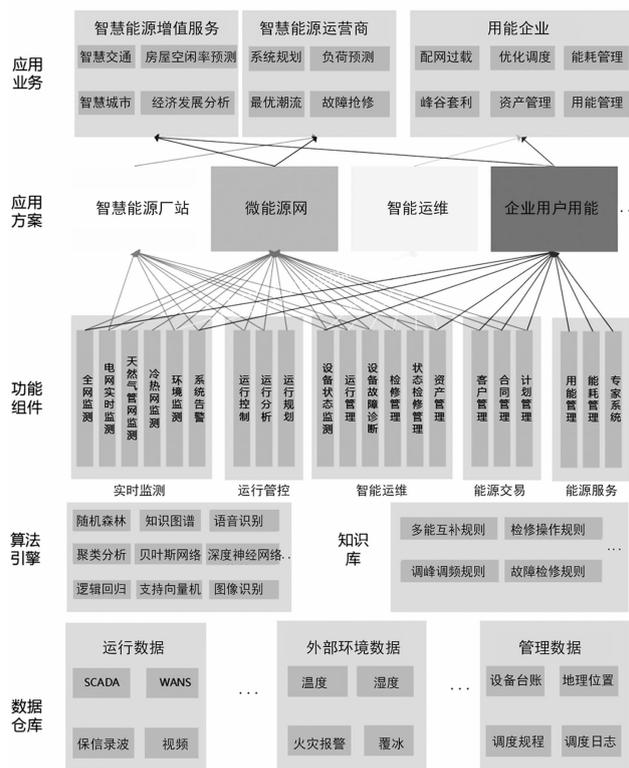


图1 智慧能源管控平台功能架构

通过“数据 + 规则”的训练方式实现对历史数据的学习和规则的理解,模拟政府、智慧能源发输配售企业、用户等的思维决策,提供负荷预测、新能源出力预测、多能优化互补、能耗分析等服务。平台可实现的功能如下:

1)多能流信息可监控。将电、水、气、热多能信息统一采集处理;光伏、储能等多能源系统深度耦合;能源生产使用消费统一管控,实现能源生产和使用的友好互动。

2)全生命周期可管理。从项目的长期经济利益出发,全面考虑项目的规划、设计、建设、运行、检修、更新或改造。

3)多源数据可挖掘。通过深度学习等大数据挖掘手段对智慧能源系统进行诊断、优化和预测。

4)根据用户需求,平台主要功能及业务模块可

定制,可自由组合,可集成,也可分散。

2.2 功能组件

主要功能组件如下^[6]：

1)多能流实时监测。平台能对所监控园区内多个分布式能源厂站如光伏发电、风力发电、冷热电三联供厂站、储能站、电动汽车充(换)电站等场景,以保证供电(冷热)安全性、经济性为目标,可提高电站发电(供热)效益,最大限度提高厂站监控、运维水平。

2)多能优化调度。平台将所得到的能源系统数据进行动态模拟,优化调度运行,合理安排调度计划,促进多能耦合及转化能力,实现多能互补和能源综合利用。

3)能源销售一体化管理。系统打通传统业务相互隔离的信息壁垒,通过数据集成及信息融合,实现发配用一体化管理。

4)智能运维。通过科学合理的安排检修工作,以最少的资源保持设备的安全、经济、可靠的运行能力。

5)智慧能源增值服务。能够利用其大规模存储、数据分析以及可视化展示等相关技术从海量数据中获取有价值的信息,更好地支撑智慧能源的建设。

3 多能优化调度策略

运行管控策略可分为启发式调度策略和优化调度策略两种类型,其中优化策略又可分为混合目标优化和日前经济调度优化。启发式调度策略以事先拟定的设备启停优先级制定运行规则,该优先级不随系统的运行环境发生改变;其中,日前优化策略以经济性最优为目标,通过日前调度区域内各供能设备(光伏、燃气轮机、燃气锅炉、溴化锂制冷机、蓄热蓄冷设备)的运行方式和出力,可以降低系统的日运行费用并保持区域内的排放最优。

1)启发式调度模式

作为综合能源系统中最常见的两种调度策略,“以电定热”和“以热定电”模式在应用场景和研究对象的差别较大。文献[7]将提升能源利用效率为目标,将集成边界(IPC)为约束,通过楼宇型冷热电三联供系统证明了控制策略的可行性。文献[8]以热电联供系统为研究对象,不同热电比下系统运行

状态,并找出了最优热电平衡点下的最大经济和节能效益。

2)日前优化模式

要保证冷热电混合能源系统能够高效地正常运行,必须对系统控制中心下发日前调度运行计划,该计划类似电网日前发电计划。在日前调度运行计划中,以日前经济优化调度的研究最多。文献[9]面向商务楼宇型冷热电混合能源系统,以系统的日运行费用最小为优化目标建立了系统的日前优化调度模型,结果表明通过应用所提调度策略,该商务楼宇系统可节约11%的年运行费用,同时减少8%的年碳排放量。

4 多能优化调度模型

园区智慧能源系统包括热、电和气3种能源形式,具有负荷种类多样、供能设备丰富的特点。下面在MATLAB环境下对多种供能设备(含电储能)进行建模,采用CPLEX求解混合整数规划问题,并建立智慧能源系统日前经济优化调度模型。

基于某工业园区分布式能源站工程的系统供能架构及边界条件,建立智慧园区系统日前经济优化调度模型,模型的输入包括热电联产机组、燃气锅炉、蓄电池、光伏、风力发电机设备型号及容量,还包括购电价格、电热负荷、风速和光照强度,如图2所示。

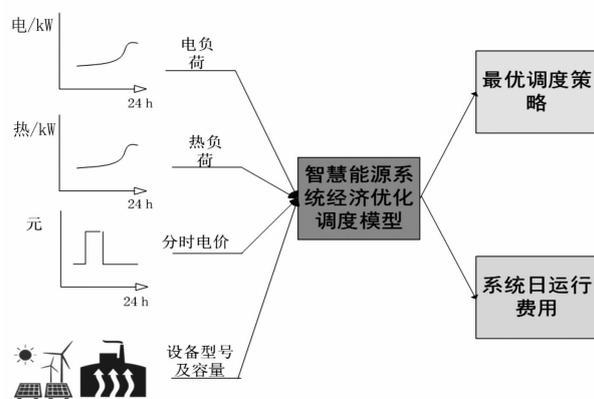


图2 日前经济优化调度运行模型框架

在建立多种设备数学模型的基础上,考虑购电电价影响,建立系统的经济性优化目标函数,通过求解经济优化模型,达到合理制定运行策略的目的。假设系统的设备出力是连续变量,并且在优化运行期间无故障导致设备停运。

4.1 目标及约束

1) 目标函数

使智慧能源系统日运行费用最小的目标函数为

$$\min C_{\text{ost}} = \min(C_{\text{grid}} + C_{\text{fuel}}) \quad (1)$$

式中： C_{grid} 为与电网交互的功率费用； C_{fuel} 为燃料费用。

2) 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、设备容量约束及设备运行约束。

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{CHP}}} P_i^l + \sum_{i=1}^{n_{\text{distri}}} P_{\text{distri}}^l + P_{\text{Grid}}^l + P_{\text{stor}}^l = P_{\text{Load}}^l \quad (2)$$

式中： P_i^l 为第*i*个微型燃气轮机的发电功率； P_{distri}^l 为分布式发电设备功率； P_{Grid}^l 为与购电的功率； P_{stor}^l 为储能电池的功率； P_{Load}^l 为电负荷。

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{CHP}}} Q_i^l + \sum_{i=1}^{n_{\text{boiler}}} Q_{\text{boiler}}^l = Q_{\text{load}}^l \quad (3)$$

式中： Q_i^l 为第*i*个微型燃气轮机通过余热锅炉回收的热值； Q_{boiler}^l 为第*i*个燃气锅炉的产热值； Q_{load}^l 为热负荷。

对于微型燃气轮机：

$$P_i^{\min} \leq P_i^l \leq P_i^{\max}, i \in n_{\text{CHP}} \quad (4)$$

对于燃气锅炉：

$$0 \leq H_{\text{boiler}}^l \leq H_{\text{boiler}}^{\max}, i \in n_{\text{boiler}} \quad (5)$$

对于蓄电池：

$$S_{\text{stor}}^{\min} \leq S_{\text{stor}}^l \leq S_{\text{stor}}^{\max} \quad (6)$$

式中， S_{stor}^l 为蓄电池的荷电状态。

4.2 算例场景及边界条件设定

系统采用自发自用，并网不上网原则。主要设备有燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、蓄电池、分布式光伏发电系统及分布式光伏发电系统。该系统通过一个公共并网点和电网交换电力，在电力系统供应不足时向国网购电，在系统电力富余时向储能系统充电，储能电池选用磷酸铁锂电池组。

按照当前电价，设定容量电价和功率电价为0，电度电价采用分时电价。丰枯季节、峰谷时段划分，即丰水期为6至10月，枯水期为1至4月、12月，平水期为5月、11月。销售侧丰枯电价调整为枯水期电价上浮5%，丰水期电价下浮5%。峰谷分时浮动电价继续按高峰时段在丰枯浮动基础上上浮50%，低谷时段在丰枯浮动基础上下浮50%。该地区天然气价和不同季节、不同时段的电价如表1所示。

算例中的相关参数如表2、表3所示。

4.3 仿真与结果

通过求解经济优化调度模型，得到该智慧能源系统各类供能及储能设备的调度计划和各类负荷平衡曲线，见图3。

表1 园区购电电价(丰、枯、平期)

| 价格类型 | 价格/(元/kWh) | 时间段 |
|---------|----------------------|----------------------------|
| 容量电价 | 0 | |
| 功率电价 | 0 | |
| 电度电价(丰) | 0.374 6 | 23:00 - 7:00 |
| | 0.749 2 | 11:00 - 19:00 |
| | 1.123 8 | 7:00 - 11:00、19:00 - 23:00 |
| 电度电价(枯) | 0.410 2 | 23:00 - 7:00 |
| | 0.820 3 | 11:00 - 19:00 |
| | 1.230 5 | 7:00 - 11:00、19:00 - 23:00 |
| 电度电价(平) | 0.394 3 | 23:00 - 7:00 |
| | 0.788 6 | 11:00 - 19:00 |
| | 1.182 9 | 7:00 - 11:00、19:00 - 23:00 |
| 天然气 | 1.8元/Nm ³ | |

表2 功能设备参数

| 设备 | 机组数量/台 | 参数 | 功率/MW |
|-------------|--------|----------|-------|
| 燃气轮机 + 余热锅炉 | 2台 | 额定发电(供热) | 14.4 |
| | | 最小发电(供热) | 3.9 |
| 燃气锅炉 | 2 | 额定供热 | 14 |
| | | 最小供热 | 4.2 |
| 光伏 | | 额定发电 | 3 |
| 风电 | | 额定发电 | 0.3 |
| 储能 | | 额定 | 2 |

表3 储能设备参数

| 可用容量/kW | 最大充电功率/kW | 充放电成本/(次/元) | DOD | 初始荷能状态 |
|---------|-----------|-------------|-----|--------|
| 2857 | 500 | 1300 | 0.7 | 0.3 |

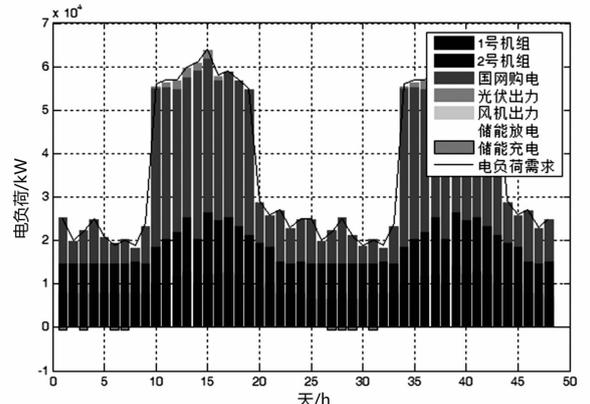


图3 电负荷平衡日前优化调度设备出力曲线

由图3可知,系统在电价较低时段0:00-7:00启动储能系统充电,同时燃气轮机组开始工作,以满足系统的电负荷需求;光伏在10:00-17:00进入可发电时刻,光伏按照预测出力满发,以减少系统内的电力供应需求。在0:00-24:00向国网购电以弥补系统发电不足,其中在7:00-20:00由于受燃气轮机最大出力限制,此时段外购电量约占全天的70%,同时储能系统在此时向系统放电,以赚取峰谷价差。

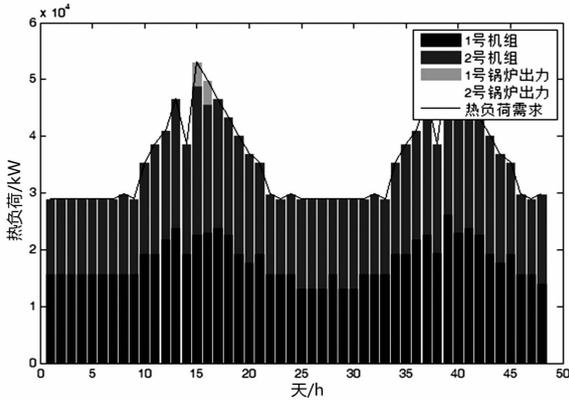


图4 热负荷平衡日前优化调度设备出力曲线

由图4可知,系统的蒸汽热负荷需求由余热锅炉及燃气锅炉提供,在0:00-7:00时,燃气轮机处于低负载率运行,在8:00-21:00时,燃气轮机处于高负载率运行,同时为了满足高峰负荷需求,在16:00-18:00时1号燃气锅炉开启。

综上,优化后的供能方案可以满足智慧园区能源系统的全部能源需求,系统未出现弃风、光和弃热现象。表4给出了系统优化前后的日运行费用对比。

表4 不同调度策略下系统日运行费用

| 控制策略 | 日运行费用/元 |
|---------------------|------------|
| 优化后 | 220 947.21 |
| 未优化(仅采用燃气轮机+燃气锅炉供能) | 328 562.84 |

其中,优化后的系统采用所提的调度策略,日运行费用为220 947.21元;未优化是指系统的电负荷全部由公共电网接入,热负荷由燃气机组和燃气锅炉提供,日运行费用为328 562.84元。系统在使用了优化调度策略后可以使运行费用降低32.7%,因此通过智慧能源系统内各供能设备的运行方式和出力,可以显著降低系统的日运行费用,实现智慧能源系统的经济优化运行。

5 结语

由仿真结论得知,多能优化调度功能可显著降低系统日运行费用。多能优化调度作为智慧能源系统的核心功能,可有效提高系统的能源利用效率、促进资源的优化配置以及提高运行经济性。

智慧能源管控平台的建设,首先应搭建多能互补的智慧能源基础设施网络,监测并上传智慧能源系统的运行、环境及基础数据,实现数据集成与数据传输;之后建立广泛参与的“泛在能源物联网”;最后通过培养多样化的能源商业新模式,实现业务与方案的统一。

参考文献

- [1] 李征.“三型两网”建设需打破创新瓶颈[EB/OL]. 中国电力新闻网,2019-03-04. http://www.cpnw.com.cn/cpnw_zt/2019-1h/lhft/201903/t20190308_1124638.html.
- [2] 王成山,王守相.分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
- [3] Vermesan O, Blystad L C, Zafalon R, et al. Internet of Energy - connecting Energy Anywhere Anytime [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011:33-48.
- [4] Boyd J. An Internet - inspired Electricity Grid[J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1):12-14.
- [5] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014(6),714-727.
- [6] 刘长运,王庆平,李博.区域能源综合管控系统的研究与设计[J].新技术新工艺,2017(9):26-30.
- [7] Geidl M, Klockl B, Koeppl G, et al. Energy Hubs for the Futures [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1):24-30.
- [8] 任洪波,吴琼,任建兴.基于需求侧视角的天然气分布式热电联产系统节能效益研究[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4430-4438.
- [9] Fang Wang. A Novel Optimal Operational Strategy for the CCHP System Based on Two Operating Modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):1032-1041.

作者简介:

张 舵(1988),硕士,工程师,研究方向为智能电网技术、电力系统继电保护等。

(收稿日期:2019-04-11)

考虑自恢复能力的电力-通信网可靠性 与经济性分析

罗紫航, 关翔友, 魏震波

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610041)

摘要:随着泛在电力物联网的建设, 电力网与通信网耦合程度加深, 对新型发展趋势下的电力物理信息系统可靠性与经济性的研究具有十分重要的理论价值和实际意义。首先, 系统性阐述了泛在电力物联网中感知层与网络层的运行特点及其对电力网与通信网耦合关系的影响; 然后, 运用相互依存网络理论建立了完全一一对应的电力 CPS 相依网络模型, 并介绍了网络攻击方式以及通信节点的自恢复能力; 最后, 通过电力通信系统的网络攻击算例仿真, 分析并对比 4 种攻击方式和恢复方式组合下的电力网可靠性和通信网经济性, 由此为泛在电力物联网初期建设提出合理性建议。

关键词:泛在电力物联网; 网络攻击; 自恢复能力; 可靠性; 经济性

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0010-07

Reliability and Economy Analysis of Cyber Physical Power Systems Considering Self-recovery Ability

Luo Zihang, Guan Xiangyou, Wei Zhenbo

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the development of ubiquitous power internet of things (UPIoT), the power network and communication network are deeply coupled, and it is of great theoretical value and practical significance to study the reliability and economy of cyber physical power systems (CPPS) in new growing trend. Firstly, the running characteristics of perception layer and network layer of UPIoT and its influence on the coupling between power network and communication network are systematically described. Secondly, a completely one-to-one model of CPPS interdependent network is established based on the theory of interdependent networks, and the cyber-attack mode and self-recovery ability of communication nodes are introduced. Finally, the reliability of power network and the economy of communication network under the combination of four attack-recovery modes are analyzed and compared by cyber-attack simulation in CPPS. Therefore, some reasonable suggestions on the preliminary development of UPIoT are put forward.

Key words: ubiquitous power internet of things (UPIoT); cyber-attack; self-recovery ability; reliability; economy

0 引言

近年来, 国外和国内发生的多次大规模的电力供应中断事故, 不少与电力-通信网发生的意外故障和网络攻击等相关。如 2003 年美国 and 加拿大“8·14”大停电中, 电网自动风险扫描报警系统被意外闭锁, 继而其主系统和后备系统服务器停机^[1]; 2015 年乌克兰停电事件中黑客采用多种网络手段攻击了乌克兰国家电网^[2]等国外停电事故。又如 2008 年湖南

冰灾事件中架空光纤大量损毁, 严重影响电网调度控制决策^[3]等国内停电事故。现阶段中国致力于建设泛在电力物联网, 旨在促进电力网络与通信网络的深度融合。因此, 对电力-通信网络可靠性深入分析, 同时考虑其经济性, 对电力-通信网络的安全稳定运行有积极意义。

当前, 电力系统安全稳定分析方法主要分为两类。一是基于传统还原论, 通过事故仿真与暂态稳定性分析等手段, 试图推演出事故的发展趋势; 然而在当今电网大规模互联发展趋势下, 其计算量过大,

且方法本身存在重视模型忽略结构的缺陷,因而不适用。二是以复杂网络理论^[4-5]为核心,不但在一定程度上弥补了基于还原论方法的不足,且也可实现电力-通信系统可靠性分析。

作为复杂网络理论的延伸之一,相互依存网络^[6]的研究在诸多领域得到应用,如生态系统^[7]、硬件软件系统^[8]等,同时在电力信息物理系统(cyber physical systems, CPS)^[9]的脆弱性分析中也得到广泛应用。例如,文献[10]研究了低度数节点加边和分配策略对电力 CPS 相互依存网络的脆弱性的影响并仿真证明了其有效性。文献[11]在脆弱性分析中设定了3种攻击模式:随机节点攻击模式、高度数节点攻击模式和高介数节点攻击模式。文献[12]介绍了复杂网络抗毁性评价指标、级联失效模型和攻击方式,并扩展至相互依存网络,然后以电力系统为例介绍了相互依存网络的具体应用。

综上所述,考虑以电力网和通信网连接边的拓扑结构为出发点,采用完全一一对应的相依网络模型,建立两网耦合关系,研究通信网的多个节点在一次性遭受不同形式的网络攻击时(如随机节点攻击和高度数节点攻击),其与电力网的耦合关系对电力网的可靠性的影响;同时考虑在多个节点具有不同形式的自恢复能力(如随机节点恢复和高度数节点恢复)的情况下,对电力网的可靠性和通信网的经济性进行分析。

1 泛在电力物联网的建设

从技术视角看,泛在电力物联网包含了感知层、网络层、平台层和应用层。其中感知层用于感知和采集物理世界中的事件和数据;网络层作为感知层和平台层的枢纽,起数据传输的作用;平台层实现采集数据的“一次采集,处处使用”;应用层接收并处理信息,做出业务决策。

电力物联网发展初期的重心在基础设施的建设上,即采用自下而上的发展思路,其主要任务是电力网络状态信息的采集、传输过程的加强和完善。所以感知层和网络层的建设显得尤为重要。现以感知层和网络层为例,分析泛在电力物联网在建设初期的2个特点。

1.1 传感器的两极效应

在电力系统各个环节,如输电网、配电网等层

面,各种传感设备实现了电力系统的物物相联,同时采集大量的信息。一方面,传感器提高了所采集信息的丰富性和冗余性,为调度自动化系统提供更详细和更可靠的信息支持;另一方面,传感器难以保证信息的安全性,网络攻击者可借助传感器等泛在电力物联网的底层设备,对通信网络进行破坏性网络攻击。该类故障会通过两网耦合边界渗透到电力网中,导致调度系统失去对电力网的可观性和可控性,若此时电网发生大规模级联事故,会造成系统难以估量的损失。

1.2 5G 通讯技术的应用

先进通信技术的应用提高了通信网对电力网的可观性和可控性。5G 技术因其高带宽、低延迟的特性得以快速发展,也将成为泛在电力物联网的主要通信形式。同时 5G 技术可能在无线通信技术中出现类似于不停电电源(uninterrupted power supply, UPS)相似功能的不停传递信源^[13],即在一种形式下的通信网络(如光纤通信)中断,可以短时间内建设另一条无线通信网络(如 5G 通信),以保证数据传输的实时性和可靠性,这种特性可以称为自适应通信技术或者自恢复通信技术^[14]。自恢复通信技术的使用虽然能够提高电力系统的可靠性,但是受到通信网络的经济性制约。

2 电力 CPS 相依网络模型及分析

相互依存网络起源于复杂网络理论,也被称为网络的网络(networks of networks, NON)^[15]、耦合网络(coupled networks)^[16]或多层网络(multiplex/multilayer networks)^[17]。

基于电力网和通信网的拓扑结构,将其分别表示为一个无权无向图 G_p 和 G_c , 每个网络可以表示为边和节点的集合 $G = (V, E)$, $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示网络的节点集合, $E = \{e_{ij}\}$ 表示网络的边集合; $A = (a_{ij}) \subset \mathbf{R}^{N \times N}$, 为网络的邻接矩阵,且 $a_{ij} = 1 \Leftrightarrow e_{ij} = (i, j) \subset E$, 否则, $a_{ij} = 0$ 。

与复杂网络相比,相互依存网络存在2种边^[18]:1)连接边(connectivity link),表示通信线路或者电力线路;2)依存边(dependency link),表示电力网和通信网耦合节点间的信息和能量交互。依存边包括以下2种:1)单向依存边,用“ \rightarrow ”表示;2)双向依存边,用“ \leftrightarrow ”表示。网络间的依存边集合 E_D

包括了电力网和通信网之间的能量依存和信息依存。 $E_D = \{E_{C-P}, E_{P-C}\}$, 式中 E_{C-P} 为通信网依存于电力网的依存边矩阵。 $E_{C-P}(u, v) = 1 \Leftrightarrow V_P(v) \rightarrow V_C(u)$, 表示通信节点 u 的正常运行需要电力节点 v 的支持, 否则 $E_{C-P}(u, v) = 0, E_{P-C}$ 同理。

将会使用的复杂网络基本概念如下:

- 1) 节点数 N : 电力网或者通信网中站点数。
- 2) 边数 M : 输电线路或者通信线路的数目。
- 3) 度数 k : 站点连接的连接边的边数。
- 4) 平均度数 $\langle k \rangle$: 每个站点连接边数的平均值。

$$\langle k \rangle = \frac{2M}{N} \quad (1)$$

作为电力 CPS 领域研究方法的分支之一, 电力 CPS 的节点和边的保护策略, 对电力网和通信网的耦合关系下的电网可靠性有一定的改善。

2.1 建立电力网和通信网模型

在输电系统中, 通过光纤线路连接的通信网包括采集设备和计算设备等; 通过输电线路连接的电力网包括发电机组、变压器、综合负荷等。对于通信网来说, 网络攻击者发动的网络攻击导致与发电厂或者变电站远程终端设备 (remote terminal unit, RTU) (通信节点) 相连接的所有光纤线路 (通信连接边) 失效; 同时定义其为通信网失联节点, 失联节点的度为 0, 由于调度中心的遥控和遥调命令无法下达给该通信节点, 从而失去对对应的电力节点的可观性和可控性。对于电力网来说, 如果发电厂和变电站 (电力节点) 无法调节发电机出力或者切除部分综合负荷, 那么变电站相连的输电线路 (电力连接边) 可能会出现过负荷情况, 结果导致继电保护装置动作, 使输电线路断开, 潮流可能发生大规模转移。

按照现行的规程规章, 光纤通信网络常常随输电线路铺设, 在变电站就地安装 RTU 等装置, 因此电力网和通信网在地理位置上具有高度的拓扑相似性。同时, 电力网和通信网在拓扑结构上具有网状网络结构, 且都具有无标度特性, 即节点的度服从幂律分布特性^[19]。

$$P(k) = ck^{-\lambda} \quad (2)$$

式中: $P(k)$ 表示网络中节点度数为 k 的节点所占的比例; c 为系数; λ 为幂律值。

2.2 建立电力 CPS 相依网络模型

电力 CPS 是电力网和通信网两网耦合而成的

相互依存网络。两网耦合中的 RTU 的遥控、遥调、遥测和通信等实现电力网依存于通信网, 为调度系统完成监视控制 and 数据采集 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 以及高级应用功能奠定基础, 同时 RTU 等设备接收来自电力网的电力支持, 实现通信网依存于电力网, 即通过网间节点的耦合关系实现信息和能量的传递。

但是考虑到通信节点装有备用柴油发电机组或者不停电电源 (UPS) 等应急供电设备, 因此通信节点足以应付数小时的短期停电, 所以在相互依存关系中不考虑能量的传递, 即依存边考虑为单向依边, 电力网依存于通信网。

对电力网和通信网采用完全一一对应的相依网络模型: 电力网和通信网的节点数分别设为 N_P, N_C , 且 $N_P = N_C$, 并且一个电力节点只与地理位置重合的一个通信节点通过单向依存边连接。

在通信线路中, 传输信息误码率极低的前提下, 只要通信节点不发生故障, 对应的电力节点在理论上也不会发生故障, 所以电力 CPS 只考虑监测控制, 不考虑数据采集, 即采集和传输的信息正确率为 100%。

电力节点对应的通信节点发生网络攻击时, 该通信节点的所有连接边将会断开, 而与电力节点连接的单向依存边不会失效。如果该通信节点处于未失联状态, 那么则可以认为该电力节点具有可观性和可控性, 不会发生过负荷等故障; 如果该通信节点处于失联状态, 那么则可以认为该电力节点不具有可观性和可控性, 有一定概率会出现一条连接边断开的情况, 从而导致电力网的大停电事故概率增加。图 1 为电力信息 - 物理相互依存网络。

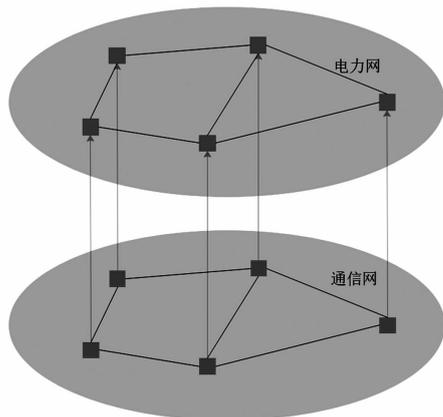


图 1 电力信息 - 物理相互依存网络

如图 1 所示, 电力 CPS 相依网络模型考虑如下:

1) 在输电网层面,将电力系统变电站及其通信系统分别认为是电力节点和通信节点,电力节点注入功率,通信节点注入信息;

2) 电力系统的输电网络认为是电力网的连接边,通信系统的传输网络认为是通信网的连接边;

3) 不考虑电力网和通信网的连接边的自环和重边;

4) 不考虑通信网设备和线路的容量,认为电力网设备和线路的容量有限;

5) 相互依存关系考虑为单向依存,即使用单向边“→”表示,由通信节点指向对应的电力节点。

2.3 建立攻击方式和自恢复方式

网络攻击(cyberattack)是指任何一种破坏网络“保密性”“完整性”和“可用性”安全目标的恶意攻击行为^[20]。在电力CPS中的网络攻击是以破坏或降低电力CPS功能为目的,在未经许可情况下对通信系统和控制系统行为进行追踪,利用电力信息通信网络存在的漏洞和安全缺陷对系统本身或资源进行攻击^[21]。

泛在电力物联网的建设,如果通过无线网络(如5G通信技术实现)使部分通信节点具有自恢复能力,即如果通信节点转变为失联节点,通过自恢复能力使其与另一些具有自恢复能力的通信节点之间建立新的连接边。其本质上是一种通过实时的加边策略改变通信网自身的拓扑结构,使之处于一种动态的过程,从而改变电力网的可靠性,即具有自恢复能力的通信节点数量与受网络攻击通信节点数量的平衡。下面主要讨论各种攻击方式和自恢复方式的形式。

2.3.1 攻击方式

来自感知层外的网络攻击者一次攻击 n_A 个通信节点($n_A \leq N_C$), n_A 由通信节点个数 N_C 及攻击百分比 $a\%$ 决定,即

$$n_A = N_C \times a\% \quad (3)$$

攻击方式主要有2种:1)随机节点攻击,每一个通信节点被攻击的概率是均匀的;2)高度数节点攻击,度数较高的通信节点会被优先攻击,即按照度数从大到小排列,优先选择度数较大的通信节点攻击。同时认为网络攻击具有明确性和破坏性,即不可能两次或多次攻击同一个通信节点,且网络攻击成功率为100%。定义电力节点 i 与相邻度数最大节点 j (若存在两个及以上,也只选择其中的一个)

之间的连接边失效概率为 P ,失效概率由该电力节点相连的节点的度作为衡量指标,其值越大,则失效概率越大。

$$P = \frac{D_{ij}}{D_{i\Sigma}} \quad (4)$$

式中: D_{ij} 为与节点 i 相连的节点 j 的度; $D_{i\Sigma}$ 为与节点 i 相连的所有节点的度之和。

以攻击通信节点触发电力-通信网故障开始,考虑事件发生顺序如下:

1)来自互联网的网络攻击者一次攻击 n_A 个通信节点,导致 n_A 个通信节点的所有连接边失效;

2)网络攻击导致所有失联通信节点通过单向依存边使对应的电力网的电力节点的一条连接边可能失效;

3)网络攻击结束。

2.3.2 自恢复方式

通信节点中的自恢复节点为 n_R 个, $n_R \leq N_C$, n_R 由通信节点个数 N_C 及恢复百分比 $r\%$ 决定,即

$$n_R = N_C \times r\% \quad (5)$$

自恢复节点具有性质如下:在网络攻击发生后,自恢复节点识别出通信网络遭受网络攻击,通过自恢复能力使其与具有自恢复能力的其他通信节点建立新的连接边,在一定程度上,改善了通信网遭受网络攻击后的拓扑结构。自恢复方式有随机节点恢复和高度数节点恢复两种恢复方式。随机节点恢复是指随机选择 n_R 个通信节点作为自恢复节点,自恢复节点之间建立连接边。高度数节点恢复是指优先选定攻击前度数较高的 n_R 个通信节点作为自恢复节点,自恢复节点之间建立连接边,即按照攻击前度数从大到小排列,优先选择度数较大的通信节点恢复。

以攻击通信节点触发电力-通信网故障开始,考虑事件发生顺序如下:

1)来自互联网的网络攻击者一次攻击 n_A 个通信节点,导致 n_A 个通信节点的所有连接边失效;

2)选择 n_R 个通信节点作为自恢复节点,使自恢复节点间建立连接边;

3)网络攻击导致所有失联通信节点通过单向依存边使对应的电力网的电力节点的一条连接边可能失效;

4)网络攻击结束。

同时,考虑以下4种攻击方式和恢复方式的组合:1)随机节点攻击,随机节点恢复;2)随机节点攻

击,高度数节点恢复;3)高度数节点攻击,随机节点恢复;4)高度数节点攻击,高度数节点恢复。

2.4 可靠性和经济性分析

电力网的可靠性在这里定义为通信网遭受攻击后的电力网的潮流交换能力。定义 P_R 为通信网遭受网络攻击结束后的电力网连接边占攻击开始前的电力网连接边的百分数。

$$P_R = \frac{E_{P2}}{E_{P1}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: E_{P1} 为网络攻击开始前电力网连接边条数; E_{P2} 为网络攻击结束后电力网连接边条数。

通信网的经济性在这里定义为保证电力网的可靠性不小于 95% 时,通信网的恢复百分比 $r\%$ 的大小,其值越小则其经济性就越好。

3 算例仿真

生成一个初始节点数为 5 的随机网络,经过网络演化,生成节点数为 200 的无标度网络,其系数 c 为 0.698 8、幂律值 λ 为 2.267,如图 2 所示,节点的度 k 服从幂律分布特性, $P(k)$ 表示网络中节点度数为 k 的节点所占的比例。

$$P(k) = 0.6988k^{-2.267} \quad (7)$$

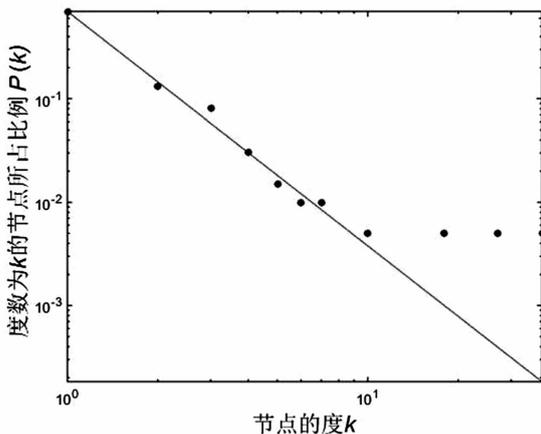


图 2 无标度网络的幂律分布特性

将该无标度网络同时作为电力网和通信网,并建立完全一一对应关系的相互依存网络模型。

3.1 随机节点和高度数节点攻击

图 3 为随机节点和高度数节点攻击下的电力网可靠性图。

如图 3 所示,随着网络攻击者对通信网的网络攻击范围扩大,通信网中失联节点数目也会增加,电

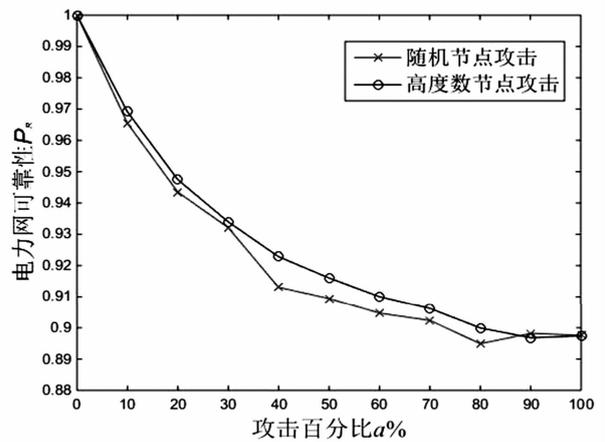


图 3 随机节点和高度数节点攻击下的电力网可靠性
力网中的连接边的断开数量呈现增加的状况,因此,电力网的可靠性指标 P_R 呈现下降的趋势。在攻击百分比 $a\% = 0$ 的情况下,电力网可靠性指标 $P_R = 1$;在攻击百分比 $a\% = 100\%$ 的情况下,随机节点攻击和高度数节点攻击基本上不存在区别,电力网可靠性指标 P_R 介于 0.89 ~ 0.9。在攻击百分比 $a\%$ 超过 30% 以后,电力网中的连接边断开数量增加的趋势下降,电力网可靠性指标 P_R 趋于收敛。

同时由图 3 可知,在攻击百分比 $a\%$ 较小或较大时,通信网节点攻击类型对电力网的可靠性的影响基本相同,而在攻击百分比 $a\%$ 在 50% 左右时对电力网的可靠性的影响有较明显的区别。随机节点攻击相比于高度数节点攻击对电力网可靠性威胁更大,即从通信网的网络边缘发起的网络攻击对电力网的线路故障具有更明显的作用,因为高度数节点在通信网中得到有效的保护,在发生网络攻击时,该电力节点的输电线路因过负荷断开而失效的概率较其他边缘节点低。

总之,在通信网高度数节点得到有效保护的情况下,也要注重对通信网中的边缘节点的保护,采取有效措施如加边策略、节点保护策略等,可以有效地提高电力网的可靠性。

3.2 随机节点恢复

随机节点恢复是指随机选择 n_R 个通信节点作为自恢复节点,自恢复节点之间建立连接边。对于随机节点攻击和高度数节点攻击分别使用随机节点恢复,以攻击百分比 $a\%$ 为参变量,恢复百分比 $r\%$ 为自变量,分析电力网的可靠性和通信网的经济性,其仿真结果如图 4 和图 5 所示。

如图 4 和图 5 所示,随着自恢复节点数目增加,

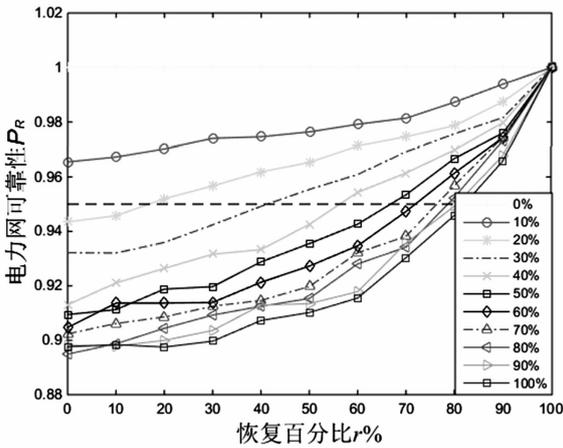


图4 随机节点攻击后随机节点恢复的电网可靠性

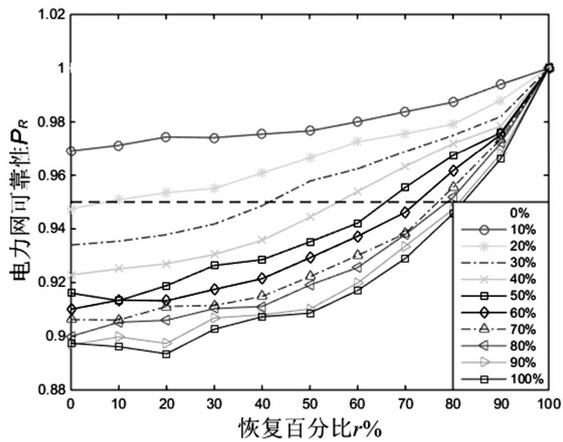


图5 高度数节点攻击后随机节点恢复的电网可靠性

通信网的网络攻击范围不变的情况下,通信网中失联节点数目将可能会减少,电网中的连接边的断开数量呈现下降的状况,因此,电网的可靠性指标 P_R 呈现增加的趋势。

在恢复百分比 $r\% = 0$ 的情况下,电网可靠性指标与图3中随机节点攻击和高度数节点攻击下的电网可靠性相一致;在恢复百分比 $r\% = 100\%$ 的情况下,任何类型和任何程度的网络攻击都对电网的可靠性无影响,因此,电网可靠性指标 P_R 趋于收敛于1。在受到随机节点攻击和高度数节点攻击后采取随机节点恢复的大体趋势相一致。

由图4和图5可以获得关于经济性的指标,图中虚线为 $P_R = 0.95$ 。在受到网络攻击,攻击百分比 $a\% \geq 20\%$ 时,电网的可靠性指标 P_R 下降至95%以下。为保证电网在受到网络攻击后的可靠性,现讨论自恢复设备投入量,即自恢复节点比例 $r\%$ 。

在保证电网的可靠性的前提下,最小 $r\%$ 如表1所示。对于小规模的网络攻击 ($a\% < 30\%$),随机节点恢复对高度数节点攻击较随机节点攻击更为经济;对于中等规模和大规模的网络攻击 ($a\% \geq 30\%$) 时,随机节点恢复对两种攻击方式的经济性较为一致。

表1 随机节点恢复下 $P_R \geq 95\%$ 的最小 $r\%$

| 攻击百分比/% | 最小恢复百分比/% | |
|---------|-----------|---------|
| | 随机节点攻击 | 高度数节点攻击 |
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 20 | 16.8 | 7.3 |
| 30 | 41.2 | 41.5 |
| 40 | 56.2 | 55.9 |
| 50 | 66.8 | 65.8 |
| 60 | 71.9 | 72.4 |
| 70 | 76.3 | 76.8 |
| 80 | 78.6 | 78.8 |
| 90 | 80.5 | 81.2 |
| 100 | 82.1 | 82.0 |

总之,在保证电网可靠性的前提下,为了经济性上的考虑,可以采用在通信网的边缘节点安装自恢复设备,以防御高度数节点的网络攻击。

3.3 高度数节点恢复

高度数节点恢复是指优先选定度数较高的 n_r 个通信节点作为自恢复节点,自恢复节点之间建立连接边。对于随机节点攻击和高度数节点攻击分别使用高度数节点恢复,以攻击百分比 $a\%$ 为参变量,恢复百分比 $r\%$ 为自变量,分析电网的可靠性和通信网的经济性,仿真结果如图6、图7所示。

如图6和图7所示,随着自恢复节点数目增加,通信网的网络攻击范围不变的情况下,通信网中失联节点数目将可能会减少,电网中的连接边的断开数量呈现下降的状况,因此,电网的可靠性指标 P_R 呈现增加的趋势,直到稳定在 $P_R = 1$ 。

在恢复百分比 $r\% = 0$ 的情况下,电网可靠性指标与图3中随机节点攻击和高度数节点攻击下的电网可靠性相一致;在恢复百分比 $r\% = 100\%$ 的情况下,任何类型和任何程度的网络攻击都对电网的可靠性无影响,因此,电网可靠性指标 P_R 趋于收敛于1。特别是在高度数节点攻击后,采取高

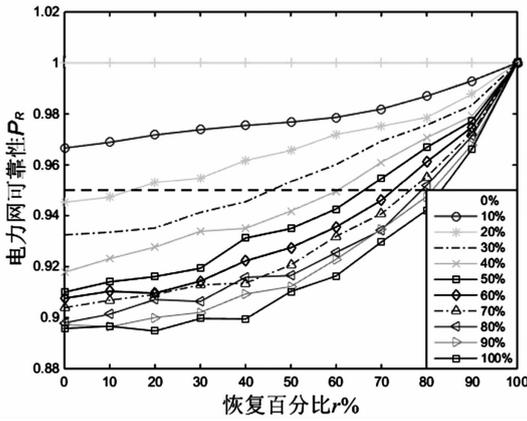


图6 随机节点攻击后高度数节点恢复的
电力网可靠性

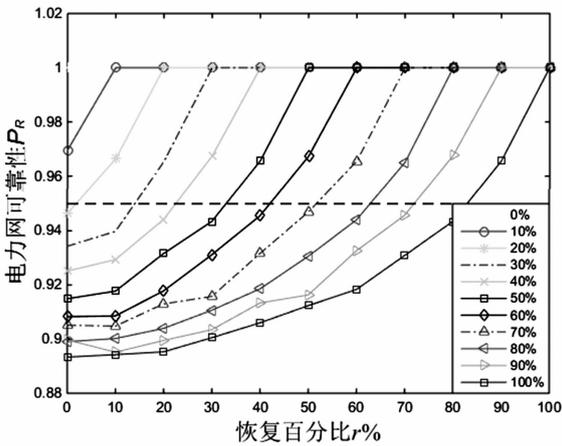


图7 高度数节点攻击后高度数节点恢复的
电力网可靠性

高度数节点恢复具有明显的效果,在恢复百分比 $r% < 100%$ 的情况下也能保证电力网的可靠性 $P_R = 1$; 在随机节点攻击后,采取高度数节点恢复的效果与随机恢复相近。

由图6和图7也可以获得关于经济性的指标,图中虚线为 $P_R = 0.95$,在受到网络攻击时,攻击百分比 $a% \geq 20%$ 时,电力网络的可靠性指标 P_R 下降至95%以下,为保证电力网在受到网络攻击后的可靠性,现讨论自恢复设备投入量,即自恢复节点比例 $r%$ 。

在保证电力网的可靠性的前提下,最小 $r%$ 如表2所示,对于所有规模的网络攻击,高度数节点恢复对高度数节点攻击较随机节点攻击更为经济,特别是对于小规模和中等规模的网络攻击 ($a% \leq 70%$) 时,高度数节点恢复对高度数节点攻击的经济性显而易见。

总之,在保证电力网可靠性的前提下,为了经济性上的考虑,可以采用在通信网的高度数节点优先安装自恢复设备,以防御高度数节点的网络攻击。

表2 高度数节点恢复下 $P_R \geq 95%$ 的最小 $r%$

| 攻击百分比/% | 最小恢复百分比/% | |
|---------|-----------|---------|
| | 随机节点攻击 | 高度数节点攻击 |
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 |
| 20 | 14.7 | 1.8 |
| 30 | 45.6 | 14.0 |
| 40 | 60.5 | 22.5 |
| 50 | 66.2 | 32.9 |
| 60 | 72.6 | 42.0 |
| 70 | 76.4 | 51.6 |
| 80 | 78.9 | 62.8 |
| 90 | 81.2 | 71.9 |
| 100 | 83.2 | 82.9 |

综上所述, P_R 是受网络攻击通信节点数目 n_A 、攻击方式(随机节点攻击、高度数节点攻击)、恢复方式(随机节点恢复、高度数节点恢复)、自恢复节点数目 n_R 的影响。如果网络攻击通信节点数目 n_A 越多, P_R 越小,电力网越不可靠。如果自恢复节点数目越多, P_R 越大,电力网越可靠。被攻击通信节点 n_A 越多,那么自恢复节点 n_R 的需求也就越多,找到网络攻击通信节点 n_A 与自恢复节点 n_R 的平衡,使 P_R 满足一定的要求。

4 结 语

通过相依网络下的电力网和通信网的两网耦合模型,分析了两种网络攻击方式和两种恢复方式下的通信网通过耦合作用对电力网的可靠性的影响,并分析了电力网的可靠性与通信网的经济性。在面对随机节点攻击和高度数节点攻击时,随机节点攻击的威胁显得稍大。在电力系统通信网的安全防护中,除了注意高度数节点,如枢纽变电站、大型发电厂等,还需注意处于网络边缘的低度数节点,即在泛在电力物联网建设时期,边缘节点的保护显出一定的必要性。同时,高度数节点恢复在面临高度数节点攻击时,具有较好的经济性,即使面对随机攻击,在攻击范围很小时,也具有经济上的优越性。

(下转第55页)

基于电力计量大数据的电源规划研究

蔡高雷¹, 刘桂龙²

(1. 上海两吉新能源投资有限公司, 上海 200245; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031)

摘要:传统的电源规划方法已经难以满足大型风电并网系统对安全稳定性的要求。针对这一问题,运用大数据技术对风电出力信息充分挖掘,实现对并网风电波动风险的定量分析。在此基础上,建立以风电穿透功率最大和并网风险最小为目标的大型风电基地电源规划数学模型,并应用讨价还价博弈理论算法对该双目标模型进行求解。最后以某含风电地区电力系统为算例,验证提出的基于电力计量大数据的电源规划方法的正确性。

关键词:电力计量;大数据;风电;电源规划

中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0017-07

Research on Generation Planning Based on Big Data of Electricity Metering

Cai Gaolei¹, Liu Guilong²

(1. Shanghai Liangji New Energy Investment Co., Ltd., Shanghai 200245, China;

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

Abstract: It has been difficult for the traditional power grid planning to meet the requirements of the safety for large-scale wind power system. To solve this problem, the information of wind power output is fully exploited using big data technology, and the quantitative analysis of wind power fluctuation risk is achieved. On this basis, the source-network-load coordinated planning model is established taking maximum wind power penetration and minimum grid-connected risk as the object, and game theory is applied to the twin goals of bargaining to solve it. Finally, taking a power system with wind power in the north-west region for example, the correctness of the proposed coordinated generation planning method based on big data of electricity metering is verified.

Key words: electricity metering; big data; wind power; generation planning

0 引言

风电在成为人类破解能源危机和环境污染难题的一项必然选择的同时,其出力波动性、间歇性和反调峰特性也给电力系统安全经济运行带来了诸多挑战^[1-7]。切实保障含风电场电力系统安全运行,提升风电消纳能力成为亟待解决的问题。供电关口计量数据类型多、体量大,含有巨大的隐性信息可供挖掘^[8]。对上述数据进行深度挖掘并在此基础上开展大规模风电基地电源规划,对提升电网风电消纳能力,破解风电长久“绿色”发展瓶颈具有重要而深远的意义。

文献[1]将协调规划期划分为多个阶段,分场

景模拟未来负荷需求、发输电成本等变量的变化趋势,建立多阶段电源与电网协调规划模型。文献[2]在进行了电源规划,确定调节机组配置基础上,将调节机组选址问题与电网规划问题相结合,建立了针对风电并网问题的电源电网协调规划模型。文献[3]提出了考虑需求侧响应的含风电场的输电系统两层规划模型,并采用粒子群算法和原对偶内点法相结合的混合算法对所构造的优化模型进行了求解。文献[4]分别将电力需求侧的能效电厂也纳入电力规划统筹考虑,提出了源网荷协同规划的概念与模型。但是上述研究未对电力计量大数据这一重要条件加以充分重视,且对于风电穿透功率的关注明显不足。

下面借助电力计量大数据,对风电带来的波动

风险进行初步定量分析,建立了双目标的电源规划模型并借助博弈算法求解。

1 基于电力计量大数据的风险评估

风资源具有间歇性和波动性,直接导致风电出力具有波动特性。风电上述特性显著增加了电网调峰难度和调频压力,威胁电网安全稳定运行。判据如表1所示。

表1 风电场有功功率变化限值 单位:MW

| 风电场装机容量 | 10 min 最大有功功率变化限值 | 1 min 最大有功功率变化限值 |
|---------|-------------------|------------------|
| <30 | 10 | 3 |
| 30~150 | 装机容量/3 | 装机容量/10 |
| >150 | 50 | 15 |

对于给定装机容量的风电场或集群(如99 MW),借助数字动态实时仿真软件(digital dynamic real-time simulator, DDRTS)等分析软件可以采集到给定时间尺度(如10 min)内逐渐递增(或递减)加入不同的出力波动量 ΔP_1 、 ΔP_2 、 $\Delta P_i \dots \Delta P_n$ (如10 MW、30 MW...70 MW)下电网各监测点的电压波动曲线和系统频率波动曲线,并可从波动曲线中看出当风电波动量大于等于 ΔP_i 时,系统频率波动大于某个要求的频率变化幅值 Δf ,则可以确定该时间尺度下对应风电的波动限值为

$$\lambda_{\max} = \Delta P_i \quad (1)$$

电力计量大数据是指电力计量设备收集得到的系统内各环节各类型的参数集合,具备电力大数据的“3V3E”特征。为获取某特定地区最大风电波动系数,需尽可能多地获取该地分钟级别风电出力情况。

以新疆某地区为例,结合前面明确的风电波动风险定义可获取该地区最大风电波动系数为0.31,记为 δ 。

2 大规模风电基地电源规划建模

2.1 电源规划体系构建

如图1所示,通过本地负荷消耗、建立特高压直流外送通道及寻求、扩大平衡区域等手段,规划多元电源联运系统,其目的在于保证电力系统安全稳定运行,并兼顾最大限度的提升风、光等新能源极限穿

透功率,以此降低传统的以消耗化石能源为代价的火电等机组的出力,从网侧减少弃风,提升风光的环境效益价值。其中,源端联运系统应该在通盘考虑本地风速资源、本地负荷状况、本地现有电源结构、特高压直流外送受端情况等因素的前提下,统筹规划多元电源的装机容量、特高压直流外送容量及联络线传输容量;而受端系统及平衡区域2在保证本地电力系统安全稳定运行的前提下,应尽可能多地消纳源端电力。

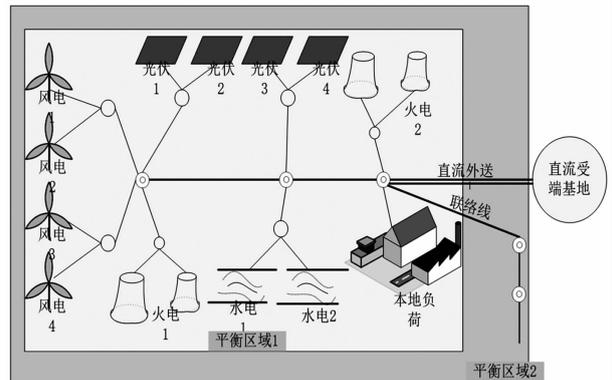


图1 风-火-水多元电源联运系统

图2为大型新能源基地电源规划体系三维空间耦合关系。总体思路为尽可能大地提高风电极限穿透功率并消除因风电并网带来的风险(风电消纳品质)。在这个体系下,提高风电消纳品质的途径包括建立特高压直流外送通道、本地可中断负荷及本地负荷等。按照这个总体思路,综合考虑不同的消纳途径对提高新能源消纳品质的影响和不同空间尺度广域互联风光电系统对提高风电消纳品质的影响。

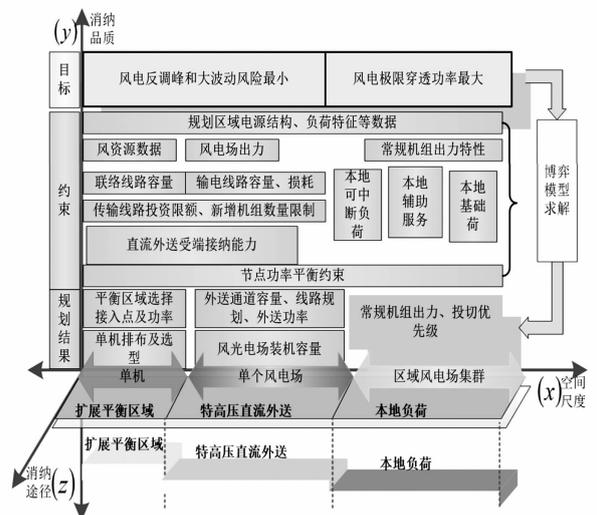


图2 提高风电消纳品质的风电基地电源规划体系

这里提出的电源规划体系空间是由空间尺度 - 消纳途径类型 - 消纳品质 3 个维度构成,在这个空间里,提升风电消纳品质的广域尺度大规模电源规划体系包括:

1) 风电消纳品质是指风电极限穿透功率和风电并网风险。构建的提升风电消纳品质的广域尺度大规模电源规划体系,以风电并网风险最小并兼顾风电极限穿透功率最大为目标,以规划区域现有电源结构和负荷特征、特高压直流输电线路电压和功率、联络线路、规划区域节点功率平衡等为约束。根据博弈论思想,寻找“风电极限穿透功率”和“风电并网风险”两参与人的纳什均衡区域对该体系模型进行求解,最终的规划结果为风电场风机排布方式、风电场装机容量、常规机组(水电、火电)出力优先级、联络线功率以及特高压直流外送线路容量。

2) 扩展平衡区域、特高压直流外送与单机至风电场集群交叉区域:经预处理的风速等数据资源确定风电场单机排布、选型,进而根据风出力特性确定基于尾流效应的单个风电场的有功出力 P_w 。然而,风电场的大规模并网势必会造成其并网系统电压和频率的波动或畸变。一方面可以通过具有电压灵活调节能力的特高压直流输电来消弭前面所述电压的波动风险;另一方面可以通过扩大、寻找新的平衡区域或特高压直流输电等消纳途径实现电能的空间转移。当然,扩大、寻找新的平衡区域或建设特高压直流输电通道要受制于送端电网配套电源状况、电压水平以及受端电网负荷情况。特别说明的是用于提升风电消纳品质的手段要满足但不限于保持现有电网坚强程度。

3) 本地负荷与单个风电场至风电场集群交叉区域:区域内,新能源电源与本地常规机组协调出力,传统火电、水电机组在保证本地基荷需求的前提下,与区域风电场集群联运、互济,在常规机组出力特性、本地负荷等约束条件下,最大化提高风电极限穿透功率。考虑到中国负荷能源分布不对称的现状,即风电等新能源在“三北”地区极为丰富,而负荷多集中于中东部地区,一方面造成了大量的弃风限电;另一方面却要以牺牲环境成本为代价依赖常规化石燃料机组,造成极为矛盾局面。为从根本上缓解这种局面,有效提高资源丰富地区风能的消纳能力,将区域资源优势转化为经济优势,开发大规模电力外送输电走廊尤为必要。

2.2 目标函数

在保证系统安全的前提下提升风电消纳能力是所提源 - 网 - 荷协调规划的目的所在,以系统运行风险最低和风电穿透功率最大为目标建立多目标优化模型。

1) 风电并网系统风险最小

$$\min R = \frac{\delta P_W - P_A}{\lambda_Z P_Z + \lambda_F P_F} \quad (2)$$

式中: R 表示系统风电波动风险, R 越小表示系统风险越小; P_W 为风电装机总容量, $P_W = P_{W0} + P_{WN}$, P_{W0} 为已存在风电装机容量, P_{WN} 为计划新建风电装机容量; λ_Z 为直流外送通道的可调节系数, MW/\min ; λ_F 为火电机组爬坡率; P_Z 为直流外送通道基准容量; P_F 为火电机组基准容量, $P_F = P_{F0} + P_{FN}$, P_{F0} 为已存在火电机组容量, P_{FN} 为新建设火电机组容量; δ 为风电分钟级波动系数,由大数据分析获得; P_A 为风电 1 min 允许最大波动量, MW 。

2) 风电穿透功率最大

风电极限穿透功率定义尚存在一定的争议,此处定义为系统能够接受的最大风电装机容量与系统总装机容量之比。

$$\max F = \frac{P_W}{P_W + P_F} \quad (3)$$

2.3 约束条件

风电的随机性等特性决定了在大规模风电并网规划中必须考虑负荷约束、外送通道容量约束、常规机组约束(常规机组容量约束及爬坡速率约束)、风力装机约束、安全运行约束。

1) 负荷约束

$$\alpha(P_{W0} + P_{WN}) + \beta(P_{F0} + P_{FN}) \geq P_{Zmax} + P_{Lmax} \quad (4)$$

2) 外送通道容量约束

$$P_{Zmin} < P_Z < P_{Zmax} \quad (5)$$

3) 常规机组约束

$$P_{Fmin} < P_F < P_{Fmax} \quad (6)$$

$$-\lambda_{FDOWN} < \lambda < \lambda_{FUP} \quad (7)$$

4) 风电装机容量约束:

$$P_{Wmin} < P_W < P_{Wmax} \quad (8)$$

5) 安全性约束

$$\lambda_Z P_Z + \lambda_F P_F \geq 2(\delta P_W - P_A) \quad (9)$$

式中: α 为风电容量可信度; β 为火电机组常规运行时占额定容量比例; P_Z 为外送通道输送容量; P_{Zmin}

和 $P_{Z_{\max}}$ 分别为外送通道输送容量的下限和上限; $P_{L_{\max}}$ 为本地负荷最大值; $P_{F_{\max}}$ 和 $P_{F_{\min}}$ 分别为火电出力上限和下限; $-\lambda_{F_{\text{DOWN}}}$ 为火电机组降出力速率最大值; $\lambda_{F_{\text{UP}}}$ 为火电机组爬坡速率最大值; $P_{W_{\max}}$ 和 $P_{W_{\min}}$ 分别为风电出力上限和下限。

3 基于 NBI 的博弈论求解

3.1 算法简介

博弈论以收益最大化为目的,主要研究对象是已经公式化了的激励结构间存在的相互作用。多目标优化和博弈论本质都属于一个大的优化领域,二者存在结合可能性。

对于风电穿透功率和系统安全性这两个目标,采用讨价还价问题模型求解纳什均衡解。而针对此类讨价还价问题,纳什提出了4条公理,即帕累托有效性、对称性、等价收益不变性及无关选择独立性用以获得博弈双方的均衡解。由其中的帕累托有效性可知均衡点一定存在于双目标优化问题的帕累托前沿上。至此,迫切的任务是获得该双目标优化问题的帕累托前沿。

3.2 求解过程

为简化操作突出思路,选择利用基于几何投影的 NBI 法获取问题的若干非劣解,再通过置换度指标的优劣来甄选出解集内最优解。NBI 获取非劣解分3步进行:

1) 坐标变换,以实现2个不同量纲目标的规范化,便于后续计算。

以单目标求解出2个极限值,用直线把这2个端点进行连接,将此直线称为乌托邦线。作为目标的风电穿透功率和系统运行风险显然具有不同量纲,采用文献[9]的方法对帕累托前沿的各点进行量纲规范化:

$$\begin{cases} f_{1b}(P_w) = \frac{f_1(P_w) - f_1(P_{w.1})}{f_1(P_{w.2}) - f_1(P_{w.1})} \\ f_{2b}(P_w) = \frac{f_2(P_w) - f_2(P_{w.1})}{f_2(P_{w.2}) - f_2(P_{w.1})} \end{cases} \quad (10)$$

明显地,对于此处帕累托曲线的2个端点,经过上述方法规范化后的坐标分别为(0,0)、(1,1),且此问题乌托邦线的斜率等于1。

2) 法向量投影

乌托邦线上的点同相应帕累托曲面上的点一一

对应,所以可对乌托邦线进行等分,再把每一个等分点通过乌托邦线的垂线映射到帕累托曲面上,如图3所示。

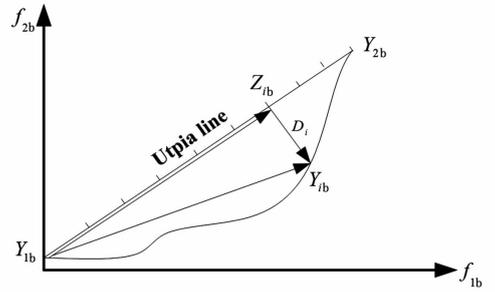


图3 NBI法求解

假设以 n 为乌托邦曲线的等分点数,在建立的单位坐标系下, Y_{ib} 的坐标可表示为

$$[f_{1b}(P_w), f_{2b}(P_w)] = \left(\frac{i}{n}, \frac{i}{n}\right) + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right) D_i \quad (11)$$

式中: $(i/n, i/n)$ 为第 i 个等分点的坐标; $(\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$ 为乌托邦线垂线方向的单位矢量坐标; D_i 为垂线在乌托邦线与帕累托曲面之间的截距。求解乌托邦线上每一个等分点在帕累托曲线上的投影,即可均匀地生成帕累托前沿解集。

3) 截距优化

根据帕累托最优性条件可以证明,若 Y_{ib} 为帕累托前沿上的点,则 D_i 必然最大。因此,在给定的等分点 i 下,风电穿透功率和系统风险的多目标优化问题可转换为下面的单目标问题并进行求解:

$$\begin{cases} \max D_i \\ d_1(\lambda, D_i) = 0 \\ d_2(P_w, D_i) = 0 \\ \text{s. t. (4) ~ (9)} \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$d_1(\lambda, D_i) = \frac{\lambda - f_2(P_{w.1})}{f_2(P_{w.2}) - f_2(P_{w.1})} - \frac{i}{n} - \frac{\sqrt{2}}{2} D_i \quad (13)$$

$$d_2(P_w, D_i) = \frac{c^T P_w - f_1(P_{w.1})}{f_1(P_{w.2}) - f_1(P_{w.1})} - \frac{i}{n} + \frac{\sqrt{2}}{2} D_i \quad (14)$$

$$\max(R = \lambda) \quad (15)$$

$$\max(F = C^T P_w) \quad (16)$$

获得若干非劣解后,还需要结合置换度指标来对解集内各解进行考察。置换度体现的是牺牲一个

单位的 A 可以换回多少单位 B, 是评价一个方案合理与否的重要依据。

4 算例验证

4.1 算例简介

为了对上述建立的计算模型和求解算法进行检验, 选取中国西北某含风电场的地区进行计算及分析。该地区 2017—2020 年的负荷结果如表 2 所示。

表 2 西北某地 4 年负荷情况

| 年份 | 负荷/MW | 年增长率/% |
|------|--------|--------|
| 2017 | 9900 | 14.30 |
| 2018 | 11 200 | 14.30 |
| 2019 | 12 500 | 14.30 |
| 2020 | 13 850 | 14.30 |

采取目标年的方式对该区域 2017 年进行规划。2017 年本地负荷需求为 9900 MW, 且到时已建成 ±1100 kV 特高压直流输电工程, 容量为 12 000 MW, 可迅速从额定功率进行调节系数为 0.8~1.0 的功率调节(此处考虑向上或向下调节的空间问题, 故将调节能力取一个中间值为 0.1)。系统中原有风电装机容量 887.5 MW, 火电装机容量 10 880 MW。

4.2 算例计算

通过上面计算可知该地区风电波动风险系数为 0.31, 容量可信度为 40%^[10]。将这 2 个参数带入, 并集合原有风电、火电装机情况作为已知条件带入到前面约束式中。经数据带入化简后, 原约束条件可以整理为

$$\begin{cases} 0.4P_W + 0.95P_F \geq 14280 \\ 0 \leq P_W \leq 5000 \\ 0 \leq P_F \leq 13200 \\ 3940 + 0.03P_F \geq 0.35P_W \end{cases} \quad (17)$$

首先, 以风电穿透功率最大为单目标进行新增风电装机和火电装机的定容计算。

借助 Lingo 进行计算, 风电最大穿透功率为 0.239, 此时的新增风电装机容量为 4485 MW, 新增火电机组容量为 11 668 MW。以同样约束, 求取风电穿透功率最小的情况为 0.07, 此时新增风电装机容量为 805 MW, 新增火电装机容量则为 13 200 MW;

再对系统风险最小进行求解, 方法同上。求取的结果刚好与上述结果相吻合, 即新增风电装机容量

量为 4485 MW、新增火电机组容量为 11 668 MW 时风险最大, 此时的风险系数 $(\delta P_W - P_A)/(\alpha P_Z + \beta P_F)$ 为 0.504, 而当新增风电装机容量只有 805 MW、新增火电装机容量为 13 200 MW 时风险降到最低水平, 风险系数仅为 0.156。通过上述结果可以确定乌托邦线如图 4 所示。

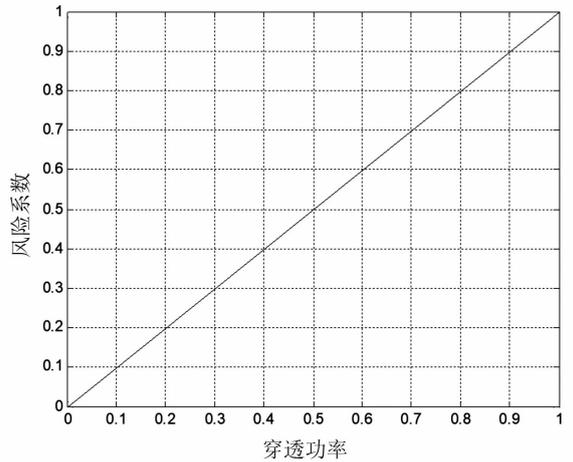


图 4 穿透功率 - 风险相关性乌托邦直线

获取乌托邦线后, 通过前面所述步骤采取等 NBI 方法, 插入 20 个等分点, 获取等间隔的帕累托前沿上一系列非劣解, 如图 5 所示。

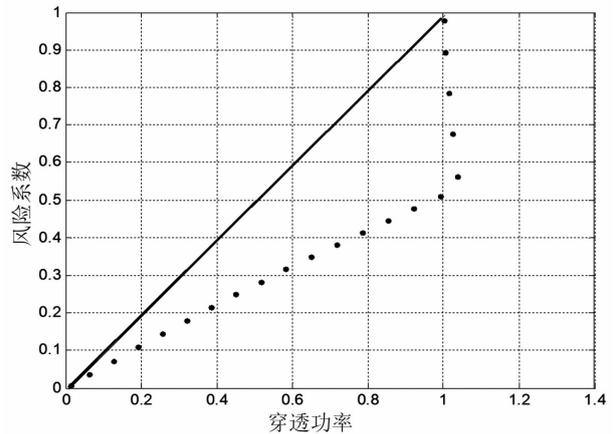


图 5 帕累托前沿

但仅凭此仍不足以确定哪一个才是规划最优点, 此时需要辅以置换度指标作为决策依据。将置换度定义为每增加一个单位的风电穿透功率需要付出的风险代价。采用文献[9]提出的方法, 求出每个帕累托最优点对应的置换度散点分布如图 6 所示。

结合定义, 置换度最低点为最优规划点。需要说明的是, 图像椭圆区域内 4 个点已经出现置换度为负数的情况, 其物理含义为随着风电穿透功率的增加, 风险反而下降, 已经超出合理范围, 故不加以考虑。该问题的最优解存在于该区域内, 进一步将

该区域放大进行寻优,其图像如图7所示。

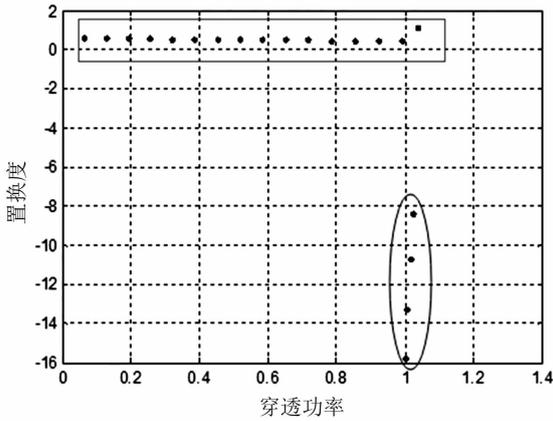


图6 置换度分布

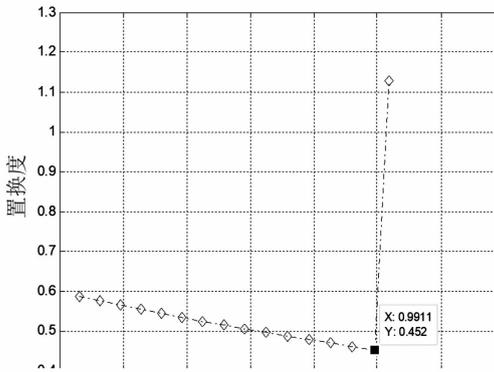


图7 最佳置换度

通过对比可以确定最佳置换度为0.45195,其对应的帕累托前沿曲线上的点即为博弈解的最优解,为新增风电4385MW、新增火电13200MW。最优解对应的风电穿透功率为0.220,风险系数为0.486。将此双目标协调规划结果与单目标优化结果进行对比,具体结果见表3。

表3 单/双目标规划结果对比

| 目标函数 | 新增风电量/MW | 新增火电量/MW | 风电穿透功率 | 风险系数 |
|--------|----------|----------|--------|-------|
| 并网风险最低 | 805 | 13200 | 0.07 | 0.156 |
| 穿透功率最高 | 4485 | 11668 | 0.239 | 0.504 |
| 双目标 | 4385 | 13200 | 0.220 | 0.486 |

由上面结果对比可知,与单目标规划方法比较,所获得的结果在提升风电穿透功率和确保较低风险方面均取得了较好的效果。

4.3 敏感性分析

1) 风电装机容量随新能源极限穿透率及其并网风险的敏感性

基于上述理论,固定新增火电装机容量12618.7MW和特高压直流输电容量12000MW的数值不变,改变风电装机容量,计算新能源极限穿透率和新能源并网风险的敏感性。由图8可知,新能源极限穿透率和新能源并网风险随着风电装机容量的增加而增大,一定程度上说明了在规划新增风电场时应兼顾新能源风险等因素对电网安全稳定性的影响。

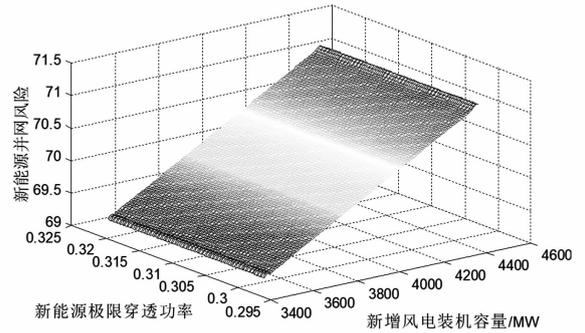


图8 风电装机容量随风电极限穿透率/并网风险的敏感性

2) 火电装机容量随新能源极限穿透率及其并网风险的敏感性

同理,此时固定新增风电装机容量4167.6MW和特高压直流输电容量12000MW的数值不变,改变新增火电装机容量,计算新能源极限穿透率和新能源并网风险的敏感性。由图9可知:新能源极限穿透率和新能源并网风险随着火电装机容量的增加而减小,而且风险比穿透功率以较快的速度减小,一定程度上说明了在规划新增或者扩容火电站时,不能只看到其对生态环境的破坏性,更多的要兼顾其对电力系统安全稳定性的重要作用。

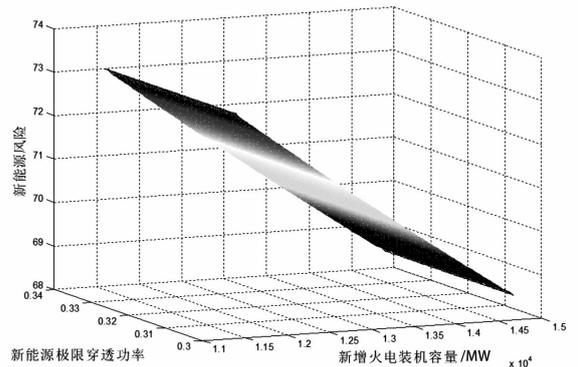


图9 火电装机容量随新能源极限穿透率/并网风险的敏感性

3) 特高压直流输电通道容量随新能源极限穿

透功率和并网风险的敏感性。

同理,此时固定新增风电装机容量4 167.6 MW、新增火电装机容量12 618.7 MW的数值不变,改变特高压直流外送通道的实际输送容量,计算新能源极限穿透功率和新能源并网风险的敏感性。由图10可知,考虑到准东—皖南±1100 kV特高压直流输电实际输送能力,设定其变化范围为(9600 MW, 12 000 MW),随着特高压直流外送输电通道实际输送能力的增大,新能源风险逐渐减小,而与此同时,新能源极限穿透功率却不断增大,这说明由于特高压直流外送通道的建设,使得送端基地在增加新能源消纳水平的同时兼顾了由于新能源并网对系统安全稳定性的影响,这一结论也一定程度上说明了建设UHVDC的正确性、必要性和重要性。

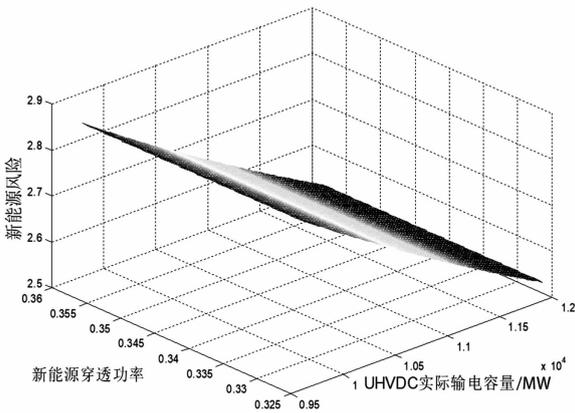


图10 特高压直流输电容量随风电极限穿透功率/并网风险的敏感性

5 结语

迫于环境压力及传统化石能源的日益枯竭以及随着技术的逐步进步与成熟,以风、光为代表的大规模新能源开发与并网成为必然趋势。对电力计量大数据进行充分数据挖掘,实现了对风电出力波动风险的评估分析。以此为基础,建立了大型新能源电源规划模型。算例表明,所提出的规划模型能够确保电源建设和电网线路建设的协调匹配,在全局角度制定最优方案,实现在较低系统风险的前提下尽可能多地消纳风电。

迄今为止,特高压直流外送是突破源-荷地理位置限制的有效方法之一。然而,查阅相关研究的公开报道,国内外对±1100 kV及以上的特高压直流输电的研究较少,对特高压直流输电对送、受端电

网的影响研究鲜见,因此特高压直流输电任重而道远。前面主要对耦合特高压直流输电通道的大型新能源基地电源体系规划展开了研究,还存在一下问题需要进一步研究:

- 1) 考虑电网平衡区域扩展的UHVDC配套电源体系规划;
- 2) 计及成本约束的UHVDC配套电源体系规划模型。

参考文献

- [1] 高赐威,吴天婴,何叶,等. 考虑风电接入的电源电网协调规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22):30-35.
- [2] 张运洲,白建华,辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(1):1-6.
- [3] 魏磊,张琳,姜宁,等. 包含风电的电力系统调峰能力计算方法探讨[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(8):59-63.
- [4] Nguyen D, Pham T, Bacha S, et al. Optimal Operation for A Wind - hydro Power Plant to Participate to System - services[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE, 2009.
- [5] 李建林. 大规模储能技术对风电规模化发展举足轻重[J]. 变频器世界, 2010(6):65-68.
- [6] 张立军. 风电场建模及电源扩展规划研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.
- [7] 高赐威,何叶. 考虑风力发电接入的电网规划[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4):19-24.
- [8] Billinton R, Wangdee W. Reliability - Based Transmission Reinforcement Planning Associated with Large - Scale Wind Farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):0-41.
- [9] 熊宁,程浩忠,马则良,等. 发电机出力成本与负荷裕度置换度指标的NBI求解方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5):34-38.
- [10] 王海超,鲁宗相,周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10):103-106.

作者简介:

蔡高雷(1989),硕士,从事电力系统安全稳定运行与控制研究;

刘桂龙(1979),硕士,工程师,从事电力系统配电设计研究。

(收稿日期:2019-07-19)

新能源配电网多运行指标协同的灵敏性分析方法

张庆晖¹, 吴长元^{2,3}, 吴杰康², 吴帆⁴, 唐惠玲², 陈灵敏²

- (1. 广东省城乡规划设计研究院, 广东 广州 510290; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006;
3. 广东电网有限责任公司韶关供电局, 广东 韶关 512028;
4. 广西博阳电力勘察设计有限公司, 广西 南宁 530028)

摘要:配电网电压和网损指标协同控制一直受到高度重视。在新能源环境下,配电网电压和网损指标协同控制的难度更大并更具挑战性。根据配电网中各个物理量之间的变化关系与交互作用特性,将物理量分为独立参数变量、状态变量和控制变量3种类型,建立配电网在新能源环境下电压和网损运行指标,构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵。以局部电压稳定指标作为分布式电源接入电网后电压和无功分布的技术指标,以分布式电源的投资和运行维护成本作为经济指标,分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响。以IEEE 30系统为实例,通过仿真计算对所建的模型和算法进行了验证。

关键词:配电网;新能源;多运行指标协同;分布式电源;无功补偿装置

中图分类号:TM73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2019)05-0024-05

Sensitivity Analysis Method for Multiple Operational Index Coordination of Distribution Network with Renewable Energy

Zhang Qinghui¹, Wu Changyuan^{2,3}, Wu Jiekang², Wu Fan⁴, Tang Huiling², Chen Lingmin²

- (1. Guangdong Institute of Urban and Rural Planning and Design, Guangzhou 510290, Guangdong, China;
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
3. Shaoguang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Shaoguan 512028, Guangdong, China;
4. Guangxi Bo Yang Electric Power Survey and Design Co., Ltd., Nanning 530028, Guangxi, China)

Abstract: Collaborative control of voltage and loss indices in distribution network has always been an important work and has been highly valued. In the renewable energy environment, the coordinated control of voltage and loss index in distribution network is more difficult and challenging. According to the changing relationship and interaction characteristics of each physical quantity in distribution network, physical quantity are divided into three types: independent parameter variable, state variable and control variable, voltage and loss operation index of distribution network under new energy environment is established, and the sensitivity matrix for power flow distribution, node voltage and loss of distribution network is constructed for distributed generation and traditional reactive power compensation devices. Taking the local voltage stability index as the technical index, and the investment and operation and maintenance cost of the distributed generation as the economic index, the impact of large-scale distributed generation on the voltage and power loss is analyzed. The simulation results of an example of the IEEE 30 system verify the applicability and feasibility of the proposed method.

Key words: distribution network; renewable energy; multiple operational index collaboration; distributed generation; reactive power compensation device

0 引言

电压和网损是电力系统运行指标,电压质量水

平的高低直接反映电网的无功平衡,网损的大小直接反映电力系统节能降耗水平。无功控制和优化的结果影响电力系统无功功率的平衡,进而影响电压质量水平和网损。

对于无功优化问题,国内外许多专家学者近几十年来进行了大量的研究工作,取得了丰富的研究

基金项目:国家自然科学基金项目(51567002,50767001);广东省公益研究与能力建设专项资金项目(2014A010106026);广东自然科学基金项目(S2013010012431,2014A030313509)

成果,比如线性规划方法^[1-3]、非线性规划方法^[4-5]、混合整数规划方法^[6-8]、动态规划方法^[9-11]。线性规划方法通过对优化模型和离散变量进行了线性化和连续化处理,往往导致计算结果与实际值误差较大。非线性规划方法模型直观、精度较高,但计算量较大。混合整数规划方法是一种两步优化方法,问题模型维数增加容易削弱整体最优性,大大增加了计算时间。动态规划方法的数学模型很难与实际问题相匹配,并且随着状态变量数目的增加,动态规划方法的数学模型也变得越来越复杂。

人工智能算法是在一些直观研究的基础上建立起来的一种算法。近年来,由于智能算法能够较好地处理离散变量和非线性问题,因此受到自然有效类比的启发,在电力系统无功优化领域得到了广泛的应用。典型的算法主要有神经网络算法^[12]、粒子群优化^[13-14]、遗传算法^[15-17]、模拟退火算法^[18-20]。人工智能算法不需要限制性假设来搜索空间。它随机产生初始种群,并根据概率转移原理,采用适当的启发式方法搜索最优解。该算法具有全局优化能力,弥补了传统数学规划方法的不足。对于不同的人工智能算法,由于不同的优化算法和策略,它们具有不同的优化特性。在深入研究每一种人工智能算法的独特优化特性的基础上,通常采用不同算法组合而成的混合智能算法。

下面针对分布式电源接入对配电网电压和网损的影响,通过建立配电网在新能源环境下电压和网损运行指标,构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵,分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响^[21]。

1 灵敏度分析方法

1.1 灵敏性指标

在电力系统分析时,通过灵敏度分析方法,分析物理系统中影响电压、网损的变量变化态势和互动、制约关系,进而分析电压和网损对这些变量的敏感程度。按照控制理论,从电压和网损控制的角度看,有控制变量、状态变量和输出变量3种变量。电源有功功率和无功功率、负荷有功功率和无功功率等影响电网的电压和网损,这些控制变量在不同运行

方式下总会有微小或大幅的变化,从而导致电网一些相关的状态变量和输出变量也发生微小或大幅的变化。利用灵敏度分析的方法,构建电压和网损对于电源及负荷的有功功率和无功功率等变化的灵敏度指标,通过在不同运行方式下对这些灵敏度指标的计算,可以确定电压和网损的变化情况^[21-24]。

假设,线路电导、电纳分别为 G, B , 节点电压的幅值、相角分别为 V_i, θ_i , 发电机机端电压的幅值、相角分别为 V_G, θ_G , 平衡节点电压的幅值、相角分别为 V_S, θ_S , 传统发电机组有功和无功功率分别为 P_G, Q_G , 分布式电源有功和无功功率分别为 P_{DG}, Q_{DG} , 并联电容器无功功率为 Q_C 。那么, $\frac{dV_i}{dP_D}$ 和 $\frac{dV_i}{dQ_D}$ 是节点电压对于负荷变化的灵敏度指标, $\frac{dQ_G}{dP_D}$ 和 $\frac{dQ_G}{dQ_D}$ 是发电机无功功率对于负荷功率变化的灵敏度指标, $\frac{dP_{loss}}{dP_D}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_D}$ 是网络损耗对于负荷功率变化的灵敏度指标; $\frac{dP_{loss}}{dP_G}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_G}$ 或 $\frac{dP_{loss}}{dP_{DG}}$ 和 $\frac{dP_{loss}}{dQ_{DG}}$ 是网络损耗对于发电机组出力或分布式电源出力变化的灵敏度指标等^[21-33]。

1.2 灵敏度矩阵

电力系统在某一运行条件下可由 n 个非线性网络方程表示,其紧凑形式可表示为

$$f(x, u) = 0 \tag{1}$$

式中: x 为状态变量; u 为控制变量。当系统处于稳态运行状态时,式(1)可变为

$$f(x_0, u_0) = 0 \tag{2}$$

式中, x_0 和 u_0 分别为系统稳态运行时的状态变量和控制变量。当系统运行状态变化后,系统稳态平衡方程变为

$$f(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) = 0 \tag{3}$$

式中, Δx 和 Δu 分别为系统运行状态变化后,状态变量和控制变量的偏差。

利用泰勒级数分析方法,在点 x_0 和 u_0 处展开式(3),得

$$f(x_0, u_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = 0 \tag{4}$$

从而得到针对状态变量和控制变量的灵敏度方程^[22-33]:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = 0 \quad (5)$$

$\frac{\partial f}{\partial x}$ 反映函数或变量对状态变量的灵敏度关系,

$\frac{\partial f}{\partial u}$ 反映函数或变量对控制变量的灵敏度关系,从而可以构造控制、状态变量与雅可比矩阵, $\frac{\partial f}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial f}{\partial u}$ 的线性关系^[22-33]为

$$\Delta x = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = S \Delta u \quad (6)$$

$$S = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \quad (7)$$

式中, S 即为灵敏度矩阵。

1.3 潮流的灵敏度矩阵

计及分布式电源的节点功率方程为

$$\Delta P_i = P_{Gi} + P_{DG_i} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} + Q_{DG_i} + Q_{Ci} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (9)$$

式中: P_i 和 Q_i 、 P_{Gi} 和 Q_{Gi} 、 P_{DG_i} 和 Q_{DG_i} 、 P_{Di} 和 Q_{Di} 分别为节点 i 注入的有功功率与无功功率、传统发电机组的有功功率与无功出力、分布式电源输出的有功功率与无功功率、负荷的有功功率与无功功率; Q_{Ci} 为节点 i 并联电容器输出的无功功率; V_i 、 V_j 、 θ_{ij} 分别为电网节点 i 、 j 电压大小及两个节点之间电压的相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 为电网支路 ij 的电导和电纳。

设 p 为扰动变量,则扰动变量、控制变量以及状态变量可表示为: $p_i = [P_{Di}, Q_{Di}]^T$, $u_i = [P_{Gi}, Q_{Gi}]^T$, $x_i = [\theta_i, V_i]^T$ 。因此,假设雅可比矩阵为 J_x ,潮流的灵敏度方程^[22-33]可表示为

$$J_x \Delta x + J_u \Delta u + J_p \Delta p = 0 \quad (10)$$

$$\text{式中: } J_{x(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ K_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix};$$

$$J_{u(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial P_{Gj}} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_{Gj}} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial P_{Gj}} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial Q_{Gj}} \end{bmatrix};$$

$$J_{p(i,j)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial P_{Dj}} & \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_{Dj}} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial P_{Dj}} & \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial Q_{Dj}} \end{bmatrix}。$$

由式(9)可得状态变量的偏移量:

$$\Delta x = J_x^{-1} (J_u \Delta u + J_p \Delta p) = S_{xu} \Delta u + S_{xp} \Delta p \quad (11)$$

式中: S_{xu} 为状态变量 $x_i = [\theta_i, V_i]^T$ 随着控制变量 $u_i = [P_{Gi}, Q_{Gi}]^T$ 的变化而发生响应的矩阵; S_{xp} 为状态变量 $x_i = [\theta_i, V_i]^T$ 随着系统中负荷的扰动 $p_i = [P_{Di}, Q_{Di}]^T$ 变化程度的矩阵。

1.4 节点电压灵敏度矩阵

考虑分布式电源及无功补偿装置,节点注入功率表达式为

$$P_i = P_{Gi} + P_{DG_i} - P_{Di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_i = Q_{Gi} + Q_{DG_i} + Q_{Ci} - Q_{Di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

节点电压对节点负荷有功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i P_{Di}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial P_{Di}} \right] = \left[\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (14)$$

节点电压对节点负荷无功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{Di}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{Di}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (15)$$

节点电压对节点分布式电源有功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i P_{DG_i}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial P_{DG_i}} \right] = \left[\frac{\partial P_{DG_i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (16)$$

节点电压对节点分布式电源无功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{DG_i}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{DG_i}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{DG_i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (17)$$

节点电压对节点无功补偿无功功率的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{V_i Q_{Ci}} = \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_{Ci}} \right] = \left[\frac{\partial Q_{Ci}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (18)$$

1.5 网损灵敏度矩阵

系统有功网损可表示为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (k_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2k_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (19)$$

式中, k_{ij} 为节点 i 和节点 j 间支路变压器变比,若该支路无变压器,则 $k_{ij} = 1$ 。

系统网损对无功补偿的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}Q_i} = \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \right]$$

$$= \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right]^{-1} + \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \right] \left[\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (20)$$

系统网损对节点分布式电源有功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}P_{\text{DG}i}} = \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{\text{DG}i}} \right]$$

$$= \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial P_{\text{DG}i}}{\partial \theta_i} \right]^{-1} + \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \right] \left[\frac{\partial P_{\text{DG}i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (21)$$

系统网损对节点分布式电源无功出力的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}Q_{\text{DG}i}} = \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_{\text{DG}i}} \right]$$

$$= \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial Q_{\text{DG}i}}{\partial \theta_i} \right]^{-1} + \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \right] \left[\frac{\partial Q_{\text{DG}i}}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (22)$$

系统网损对节点注入有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 的灵敏度矩阵^[22-33]可表示为

$$S_{P_{\text{loss}}P_i} = \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \right]$$

$$= \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \right]^{-1} + \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \right] \left[\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (23)$$

$$S_{P_{\text{loss}}Q_i} = \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \right]$$

$$= \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \right] \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \right]^{-1} + \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \right] \left[\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right]^{-1} \quad (24)$$

式(23)和式(24)可写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} S_{P_{\text{loss}}P_i} \\ S_{P_{\text{loss}}Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} & \frac{\partial V_i}{\partial P_i} \cdot \frac{1}{V_i} \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_i} & \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \cdot \frac{1}{V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \cdot V_i \end{bmatrix}$$

$$= [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \cdot V_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} = -2V_i \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (26)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} V_i = 2V_i \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (27)$$

式中, J 为牛顿-拉夫逊潮流计算的雅克比矩阵。

2 实例计算与分析

以图1所示的 IEEE 30 系统为例,分析分布式

电源接入电网后对节点电压和网损的影响。考虑 DG 有功出力分别为 20 MW、40 MW 和 60 MW,接入节点 15,对系统节点电压的影响如图2所示,对节点电压偏差的影响如图3所示。由图2和图3可看出,接入分布式电源后,对节点电压的提升作用随着 DG 出力的增大而增大,而且对接入节点的电压提升作用更明显。

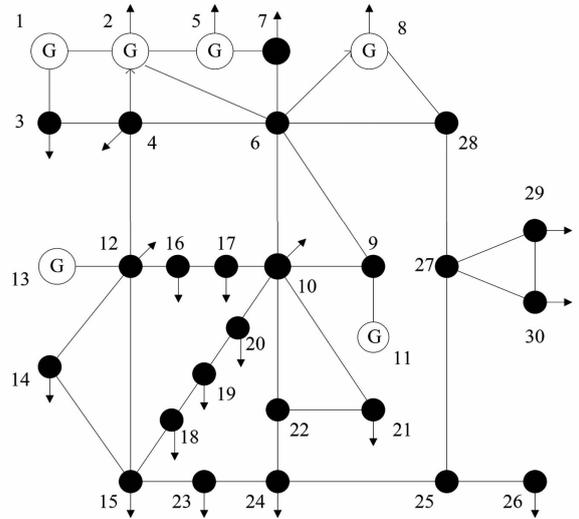


图1 IEEE 30 配电系统

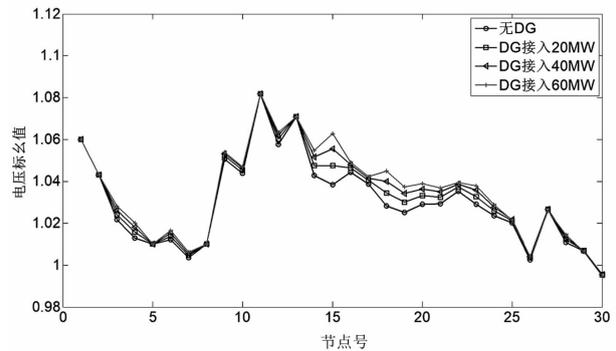


图2 分布式电源出力对节点电压的影响

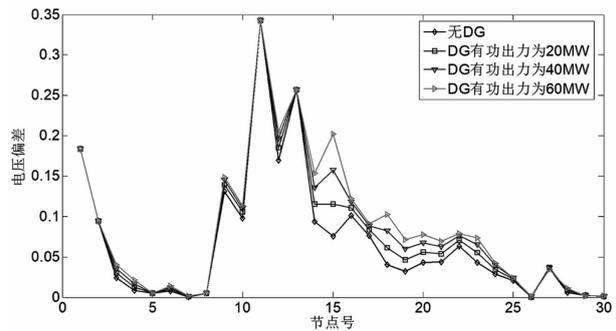


图3 分布式电源出力对节点电压偏移的影响

分布式电源接入电网后对支路有功网损的影响如图4所示。随着 DG 出力的增加部分支路的有功网损降低,如支路1、2、3、4等;部分支路有功网损增

加,如支路22和支路30。分布式电源接入电网后可能增大也可能减小系统网损,这取决于分布式电源接入的位置、其与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。因此,分布式电源接入电网前必须要根据系统结构和负荷情况,确定最佳接入位置和接入容量。

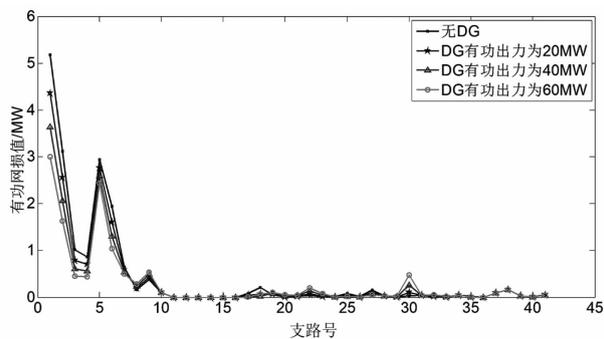


图4 分布式电源出力对网损的影响

3 结论

前面建立了配电网在新能源环境下电压和网损运行指标,构建针对分布式电源和传统无功补偿装置的配电网潮流分布、节点电压和网损的灵敏度矩阵,分析分布式电源大规模接入电网后对电压和网损造成的影响。通过实例仿真计算,结果表明:

1) 配电网电压和网损等指标随着运行方式而变化,在新能源环境下这种变化更具复杂性和不确定性。因此,电压和网损等运行指标协同需要针对不同的配网拓扑结构,并考虑技术和经济的目标要求。受不同的技术和经济指标的制约,电压和网损等指标受到极大的影响。

2) 配电网电压在传统无功补偿装置输出无功功率和分布式电源输出有功和无功功率的共同作用下具有较大的灵敏性。要保证电压合格率,需要在不同负荷需求水平下对传统无功补偿装置输出无功功率和分布式电源输出有功和无功功率进行动态协同。

3) 在新能源环境下,配电网网损对分布式电源接入位置及有功和无功功率具有较大的灵敏性,分布式电源接入的位置可能增大也可能减小系统网损。

参考文献

[1] 刘明波,陈学军,程劲晖. 三种无功优化线性规划建模方法的比较[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(2):33-38.

[2] Farivar M, Neal R, Clarke C, et al. Optimal Inverter VAR Control in Distribution Systems With high PV Penetration [C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA;2012:1-7.

[3] Xu Y, Dong Z Y, Wong K P, et al. Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(4):4072-4079.

[4] 柳进,常修猛,柳焯. 内点法在偶对潮流优化中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(5):29-33.

[5] 刘明波,程莹,林声宏. 求解无功优化的内点线性 and 内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化,2002,1(1):22-26.

[6] 汪隆君,郭俊宏,王钢,等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报,2016,31(15):136-146.

[7] 赵晋泉,刘绪,林昌年,等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):13-18.

[8] 孙田,邹鹏,杨知方,等. 动态无功优化的多阶段求解方法[J]. 电网技术,2016,40(6):1804-1810.

[9] 郑爱霞,陈星莺,余昆,等. 基于关联矩阵和动态规划法的地区电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):128-134.

[10] 黄伟,戎荣. 动态规划法在供电系统无功优化中的应用[J]. 广东电力,2010,23(10):14-17.

[11] 张鹏,刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(4):49-53.

[12] Dai C H, Chen W R, Zhu Y F, et al. Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1218-1231.

[13] 岑文辉,李国有,孔慧. 应用人工神经网络进行无功/电压控制[J]. 中国电机工程学报,1992,12(3):62-67.

[14] 李娟,杨琳,刘金龙,等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):26-31.

[15] 赵波,郭创新,张鹏翔,等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):4-10.

[16] 蒋平,梁乐. 基于内点法和遗传算法相结合的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术,2015,41(3):724-729.

[17] 崔挺,孙元章,徐箭,等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):43-50.

(下转第36页)

平滑风电出力的风储联合系统 能量管理协调控制研究

詹仲强¹, 付菊霞²

- (1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:为实现风电友好并网,采用混合储能系统平滑风电有功出力波动。首先,针对风功率的随机波动特性,采用滑动平均滤波算法与自适应小波包分解方法分别得到目标并网功率,结合风电并网波动率要求,比较不同目标功率获取方法的优劣。其次,对于并网功率缺额和盈余部分,由蓄电池-超级电容构成的混合储能系统进行补偿和消纳,并根据各储能设备不同性能,按照频率分配各储能设备的功率指令。然后,结合储能设备荷电状态和出力的限值约束,提出一种风储联合系统协调控制策略,实现储能设备间的能量互补,延长储能设备的使用寿命。最后,基于历史风电数据的仿真分析,验证所提方法的有效性。

关键词:风电;储能;滑动平均;自适应小波包;协调控制

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0029-08

Research on Energy Management and Coordination Control for Combined System of Wind Power and Energy Storage to Smooth Wind Power Output

Zhan Zhongqiang¹, Fu Juxia²

- (1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract: In order to realize wind power integration with the grid friendly, hybrid energy storage system is adopted to mitigate wind power fluctuation. Firstly, according to the random fluctuation characteristics of wind power, the moving average filtering algorithm and adaptive wavelet packet decomposition method are used to obtain the grid-connected power, and the advantages and disadvantages of different methods are analyzed according to the fluctuation requirements of wind power integration with the grid. Secondly, for the power vacancies and surpluses of grid-connected power, the hybrid energy storage system composed of battery and supercapacitor is adopted to carry out the compensation and absorption, and the power instructions of each energy storage equipment are allocated according to the different response frequency of energy storage equipment because of the different performances. Then, combined with the state of charge (SOC) of energy storage equipment and output limit constraints, a coordinated control strategy of the combined system of wind power and energy storage is proposed to achieve energy complementarity and prolong the service life of energy storage equipment. Finally, based on simulation analysis of historical wind power data, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: wind power; energy storage; moving average; adaptive wavelet packet; coordinated control

0 引言

风能有别于化石能源,具有清洁、可再生等特

科技项目:新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU20181005)

点,受到各国的广泛关注^[1],已成为中国电力发展的主要方向。但风能发电具有随机波动特性,严重影响大规模风电友好并网^[2],因此有必要采用储能系统维持电力系统的安全稳定运行^[3]。

储能系统的主要功能是弥补能量的过剩与不

足。目前,单一储能形式已不能在风能发电应用中同时满足储存容量大、响应速度快的要求^[4-5]。基于此,结合蓄电池能量密度大和超级电容功率密度高的特点,采用蓄电池-超级电容构成的混合储能系统平抑风电功率波动,使两者优势互补,达到最优平抑效果。

文献[6-7]通过低通滤波方法获得目标并网功率和储能系统功率指令,但风速随机变化,使得低通滤波时间常数难以确定,可能存在频率混叠现象,不能精确提取风功率信号特征。文献[8-9]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法和集合经验模态分解(ensemble EMD, EEMD)方法平滑风电出力,但这两种方法存在边界效应和模态混叠问题。虽然EEMD方法对模态混叠现象有所改善,但却不能完全避免。文献[10-11]采用小波包方法对风功率进行分解,但分解过程中需要指定分解层数,分解结果随分解层数的不同而改变,存在主观因素影响。

文献[12]提出一种基于规则的混合储能系统功率分配策略,在不考虑功率容量限制的情况下,该策略在经济性和动态特性方面具有很好的合理性。文献[13]提出一种混合储能系统模糊滑模控制策略,采用模糊控制器消除滑模控制器的高频抖振现象,具备平抑风电出力和提高系统抗扰性能的双重作用。文献[14]设计一种分层控制策略,包括装置层和系统层。采用前馈控制器及模糊优化的思想,进行补偿风电场出口的功率波动,实现风电可靠并网。文献[15]提出了一种基于模糊经验模态分解的蓄电池储能系统控制策略。该方案储能形式单一,但在缓解风电波动以及减少集成电池储能系统的过充/放电操作方面有所改进。

上述文献表明,采用合理的功率分解方法和有效的控制策略可以缓解风电功率波动对电网的冲击。采用滑动平均滤波算法和自适应小波包分解方法获得目标并网功率,以正常运行下风电场接入电网的双时间尺度有功功率变化最大限值为标准,进行对比分析,说明自适应小波包分解方法的分解效果更好。再从时频角度进行分析,根据蓄电池和超级电容充放电响应频率不同进行初次功率分配;再结合储能设备荷电状态(state of charge, SOC)和充放电功率需求,设计一种风储联合系统协调控制策略,保证蓄电池和超级电容工作在规定的出力区间,

同时其SOC维持在合理范围。

1 目标并网功率获取方法

1.1 风储联合系统结构

在风电场并网侧加入储能系统可有效平抑风电并网功率波动,图1为风储联合系统结构图。

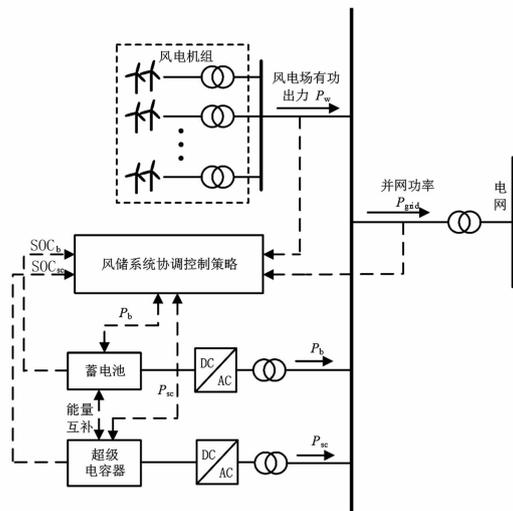


图1 风储联合系统结构

针对风电场有功出力 P_w ,首先分别采用滑动平均滤波方法和自适应小波包分解方法,获取风电并网功率 P_{grid} ,比较两种方法的优劣,选择合适的功率分解方法。再由混合储能系统的输出功率 P_h 补偿或消纳风电场并网功率缺额和盈余部分。最后,通过风储联合系统协调控制策略调节蓄电池输出功率 P_b 和超级电容输出功率 P_{sc} ,实现两种储能设备间的能量流动,其中, P_b 、 P_{sc} 大于0表示充电,小于0表示放电。根据图1的功率流向可得

$$\begin{cases} P_{grid} = P_w + P_h \\ P_h = P_b + P_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 基于滑动平均滤波方法的风功率分解

采用滑动平均算法,对于 M 个非平稳风电功率采样数据,通过选择合适的滑动时间窗,对窗口内的风功率采样值做算术平均,然后将得到的平均值作为目标并网功率值,进而得到储能系统功率指令,如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{grid}(i) = \left\{ P_w[i - (N/2 - 1)] + P_w[i - (N/2 - 2)] + \dots + P_w(i) + \dots + P_w(i + N/2) \right\} / N \\ P_h(i) = P_w(i) - P_{grid}(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i = N/2, N/2 + 1, \dots, M - N/2$; $P_w(i)$ 为第 i

个采样风电功率数据; N 为滑动时间窗的窗口长度偶数; $P_{grid}(i)$ 为第 i 个目标并网分量数据; $P_h(i)$ 为第 i 个混合储能系统功率指令。

滑动时间窗的窗口长度 N 的选取直接影响风电功率的平抑效果, 窗口长度 N 选取越大, 得到的平抑效果越明显, 同时储能系统吸收与消纳的能量就越多, 导致储能系统的容量过大, 设备成本也就相应提高; 若窗口长度 N 选取较小时, 并网功率分量的波动幅度增大, 不能满足风电并网标准, 影响电力系统的安全稳定运行。通过历史风电数据进行滑动时间窗窗口长度 N 的选择, 以风电并网标准为约束条件, 对 N 值进行校正, 进而选择合适的 N 值。

根据 GB/T 19963 - 2011《风电场接入电力系统技术规定》可知, 当风电场装机容量在 30 ~ 150 MW 之间时, 其 1 分钟级波动标准为风电有功功率变化量不超过总装机容量的 1/10, 10 分钟级波动标准为风电有功功率变化量不超过总装机容量的 1/3。式 (3) 为 t 时刻, 风电输出功率 1 min 及 10 min 最大功率波动量计算公式。

$$\begin{cases} \Delta P_{grid, 1min}(t) = \max_{l \in [1, 6]} P_{grid}[t - (l-1) \cdot \Delta t] - \min_{l \in [1, 6]} P_{grid}[t - (l-1) \cdot \Delta t] \\ \Delta P_{grid, 10min}(t) = \max_{l \in [1, 60]} P_{grid}[t - (l-1) \cdot \Delta t] - \min_{l \in [1, 60]} P_{grid}(t - (l-1) \cdot \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: l 表示 1 min 或 10 min 内的采样个数; Δt 表示风电功率数据采样间隔; $\Delta P_{grid, 1min}(t)$ 表示 t 时刻 1 分钟功率波动量; $\Delta P_{grid, 10min}(t)$ 表示 t 时刻 10 分钟功率波动量。

图 2 为滑动时间窗 N 值的校正流程图。首先要确定 N 的初值 N_0 , 然后对风功率数据做算术平均, 将得到的平均值根据式 (3) 计算并网波动量, 并与并网标准限值作比较, 判断出是否同时满足双时间尺度并网标准; 若不满足, N 值增加 2, 继续进行判断, 直至满足并网标准为止。

1.3 基于自适应小波包方法的风功率分解

对于非平稳、突变的风功率信号, 相对于小波分解方法, 小波包分解方法更具有应用价值, 不仅可以实现信号低频部分的分解, 也可以对信号的高频部分进行分解, 最终的分解结果是将原始信号映射到 2^n (n 为分解层数) 个小波包子空间中, 在结构上以二叉树的形式体现, 是一种更加精细的信号处理方法, 可以提高时频分辨率^[10]。

采用 DB6 小波^[16] 对风电功率数据进行 n 层分

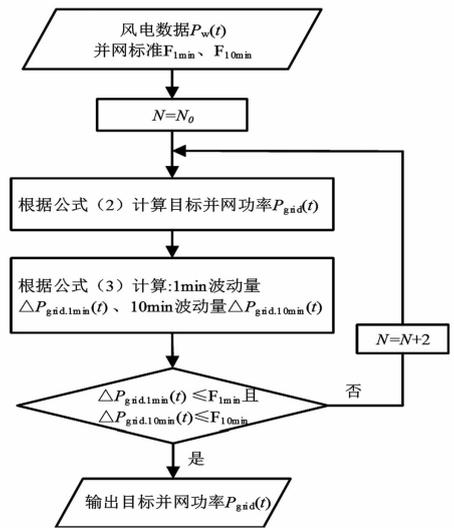


图 2 滑动时间窗 N 值的校正流程

解, 得到其低频部分 $a_{n,0}$ 和 高频部分 $a_{n,j}$ (其中 $j=1, 2, \dots, 2^n-1$) 的功率指令。低频部分 $a_{n,0}$ 作为并网功率指令, 高频部分 $a_{n,j}$ 作为混合储能系统的功率指令, 如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} P_{grid} = a_{n,0} \\ P_h = \sum_{j=1}^{2^n-1} a_{n,j} \end{cases} \quad (4)$$

图 3 为满足 1 分钟级并网标准自适应小波包分解流程图。首先判断风电功率是否满足风电并网 1 分钟级波动标准, 若满足标准条件, 则直接进行并网; 若不满足条件, 进行小波包分解, 给分解层数 n 设一个初值, 将分解结果与并网标准进行比较, 满足即并入电网, 不满足条件时, n 值增加 1, 继续上述操作, 直到满足并网标准为止。同理, 10 分钟级并网标准与上述方法一致。

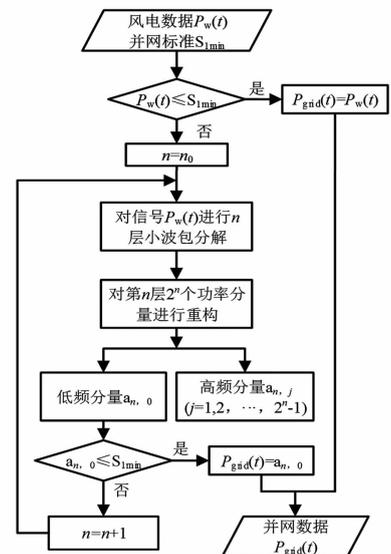


图 3 满足 1 分钟级并网标准自适应小波包分解流程

1.4 分解结果比较分析

基于 Matlab/Simulink 仿真平台,采用新疆某风电场日有功出力数据进行验证分析。其中,该风电场总装机容量为 49.5 MW,采样间隔 Δt 为 10 s。图 4 为原始风电场有功出力曲线。

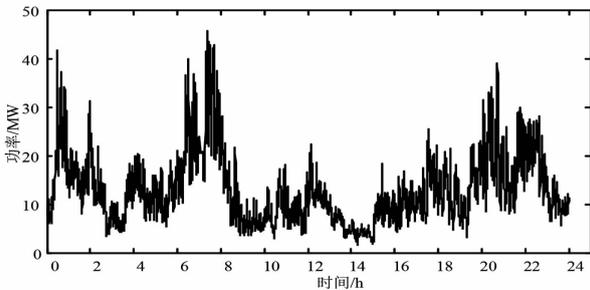


图 4 原始风电场有功出力曲线

根据上述风电并网标准,装机容量为 49.5 MW 的风电场 1 min 和 10 min 的有功功率波动限值分别为

$$1 \text{ min}: 49.5/10 = 4.95 \text{ MW}$$

$$10 \text{ min}: 49.5/3 = 16.5 \text{ MW}$$

表 1 为滑动滤波算法数据统计,表 2 为小波包分解法数据统计。从表 1 中可以看出,时间窗 N 的选取直接影响风电的平抑效果。当 N 取 24 时,并网功率 1 min 最大波动量为 4.70 MW,1 分钟最大波动率为 9.49%,满足了风电并网 1 分钟级波动标准,但却远远超过了 10 分钟级波动标准。所以需对 N 值继续增加,当 N 值为 46 时,同时满足双时间尺度并网标准。

表 1 滑动滤波算法数据统计

| 时间窗 N | 1 min | | 10 min | |
|---------|----------|---------|----------|---------|
| | 最大波动量/MW | 最大波动率/% | 最大波动量/MW | 最大波动率/% |
| 22 | 5.04 | 10.19 | 22.42 | 45.29 |
| 24 | 4.70 | 9.49 | 22.05 | 44.55 |
| 26 | 4.30 | 8.69 | 21.91 | 44.27 |
| ... | | | | |
| 44 | 3.17 | 6.41 | 17.15 | 34.64 |
| 46 | 2.95 | 5.96 | 16.13 | 32.58 |

表 2 小波包分解法数据统计

| 分解层数 n | 1 min | | 10 min | |
|----------|----------|---------|----------|---------|
| | 最大波动量/MW | 最大波动率/% | 最大波动量/MW | 最大波动率/% |
| 4 | 6.59 | 13.31 | 25.15 | 50.81 |
| 5 | 3.63 | 7.33 | 16.58 | 33.50 |
| 6 | 1.29 | 2.60 | 11.19 | 22.60 |

从表 2 可以看出,当同时满足 1 分钟级和 10 分

钟级并网标准时,优分解层数 n 为 6。比较表 1、表 2 可以看出,在同时满足并网标准的条件下,采用小波包分解方法得到的目标并网功率更加平滑。图 5 为采用不同平抑方法得到的目标并网功率。

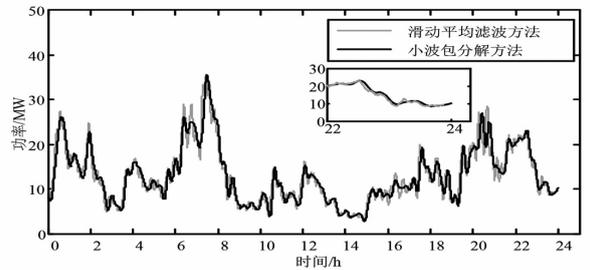


图 5 目标并网功率

从图 5 可以看出,在 22 ~ 24 h 之间时,采用滑动平均滤波方法获得的目标并网功率存在时间延迟,主要原因是由于滑动时间窗的选取,当滑动时间窗 N 值选取越大时,延迟时间越长,反之越小。综合上述分析,采用小波包分解方法获得目标并网功率和储能系统功率指令更具可靠性。

2 混合储能系统协调控制策略

由文献[17]可知,蓄电池充放电响应时间范围为数分钟到数小时,而超级电容充放电响应时间范围在数毫秒到数分钟之间,因此,选取 1 min 作为蓄电池和超级电容的充放电响应分界时间,对应响应频率为 $1.67 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 。即由蓄电池吸收频率小于 $1.67 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 的功率分量,超级电容吸收频率大于 $1.67 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 的功率分量。图 6 为混合储能系统功率指令频谱图,频率小于 $5.00 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ 的能量已并入电网,大于 $1.67 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 以上的部分幅值很小,所以选取 $1.67 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 为蓄电池和超级电容器的分界频率是合理的。

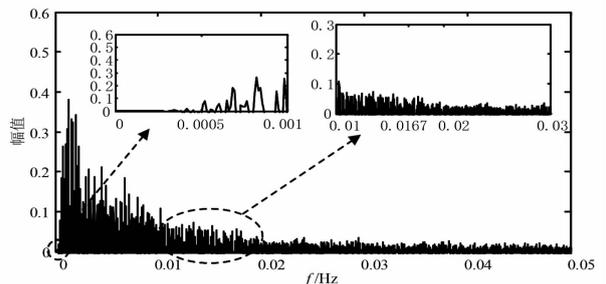


图 6 混合储能系统功率指令频谱

通过对小波包分解结果进行重构,各储能设备的功率指令计算公式为

$$\begin{cases} P_{b_ref} = a1 + a2 + \dots + a14 \\ P_{sc_ref} = a15 + a16 + a17 + \dots + a62 + a63 \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_{b_ref} 为蓄电池的参考功率指令； P_{sc_ref} 为超级电容的参考功率指令。

由于超级电容充放电次数达几十万次，使用寿命长，在对储能系统进行协调控制时，以超级电容优先充放电为主，对蓄电池充放电功率进行限幅处理，达到延长蓄电池使用寿命的目的。

蓄电池和超级电容工作在正常SOC范围（蓄电池为0.2~0.8；超级电容为0.1~0.9），风储联合系统协调控制策略如表3所示。其中： SOC_b 、 SOC_{sc} 分别为蓄电池和超级电容的SOC； P_{b_a} 、 P_{sc_a} 分别为协调控制后蓄电池和超级电容的充放电功率； P_{b_min} 、 P_{b_max} 分别为蓄电池最小、最大功率限值，均大于0。

表3共有60种工作模式，模式之间相互切换，下面说明几种典型的工作模式：

模式1：当蓄电池功率指令为充电状态，充电功率在0到 P_{b_min} 之间，且SOC小于0.8时，采用最小充电功率 P_{b_min} 对蓄电池进行充电，此时，当超级电容荷电状态在0.1~0.9之间时，不管是充电状态还是放电状态，均对蓄电池缺额功率进行补偿。当蓄

电池荷电状态达到0.8时，切换至模式6。

模式12：当蓄电池功率指令为充电状态，充电功率在 $P_{b_min} \sim P_{b_max}$ 之间，且荷电状态小于0.8时，采用 P_{b_ref} 对蓄电池进行充电，此时，当超级电容荷电状态大于等于0.9时，且处于充电状态，超级电容充电功率为0。当蓄电池荷电状态达到0.8时，切换至模式17。

模式55：当蓄电池功率指令为放电状态，放电功率大于 P_{b_max} ，且荷电状态小于等于0.2时，蓄电池放电功率为0，此时，当超级电容荷电状态小于等于0.1，且处于放电状态，超级电容放电功率为0。当蓄电池荷电状态大于0.2时，切换至模式60。

3 算例分析

仿真中，蓄电池和超级电容SOC初始值和期望值均设置为50%，额定充放电功率均为5MW。

图7为采用小波包分解方法得到的各储能设备的功率指令，图8为采用协调控制方法得到的储能设备功率指令。从图7和图8可以看出，未对蓄电池进行功率限幅控制前，功率幅值可能出现超过蓄电池额定充放电功率的情况，会对蓄电池的使用寿命

表3 风储联合系统协调控制策略表

| 运行模式 | P_{b_ref} | SOC_b | P_{sc_ref} | | SOC_{sc} | P_{b_a} | P_{sc_a} | |
|------|------------------------------|---------|---------------|----|--------------|---------------|---|---|
| | | | 充电 | 放电 | | | | |
| 1 | $0 \sim P_{b_min}$ | < 0.8 | √ | √ | $(0.1, 0.9)$ | P_{b_min} | $P_{b_ref} - P_{b_min} + P_{sc_ref}$ | |
| 2 | | | √ | | ≥ 0.9 | | $P_{b_ref} - P_{b_min}$ | |
| 3 | | | | √ | | | | $P_{b_ref} - P_{b_min} + P_{sc_ref}$ |
| 4 | | | √ | | ≤ 0.1 | | P_{sc_ref} | |
| 5 | | | | | √ | | | 0 |
| 6 | | | √ | √ | $(0.1, 0.9)$ | | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ | |
| 7 | | | √ | | | | 0 | |
| 8 | | | √ | | ≥ 0.9 | | 0 | P_{sc_ref} |
| 9 | | | | | √ | | | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 10 | | | | | | | ≤ 0.1 | P_{b_ref} |
| 11 | $P_{b_min} \sim P_{b_max}$ | < 0.8 | √ | √ | $(0.1, 0.9)$ | P_{sc_ref} | P_{sc_ref} | |
| 12 | | | √ | | ≥ 0.9 | | 0 | |
| 13 | | | | √ | | | | P_{sc_ref} |
| 14 | | | √ | | ≤ 0.1 | | P_{sc_ref} | |
| 15 | | | | | √ | | | 0 |
| 16 | | | √ | √ | $(0.1, 0.9)$ | | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ | |
| 17 | | | √ | | | | 0 | |
| 18 | | | √ | | ≥ 0.9 | | 0 | P_{sc_ref} |
| 19 | | | | | √ | | | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 20 | | | | | | | ≤ 0.1 | P_{b_ref} |

(续表)

| 运行模式 | P_{b_ref} | SOC _b | P_{sc_ref} | | SOC _{sc} | P_{b_a} | P_{sc_a} | |
|------|--------------------------------|------------------|---------------|------------|-------------------|---------------|---|--|
| | | | 充电 | 放电 | | | | |
| 21 | $> P_{b_max}$ | < 0.8 | ✓ | ✓ | (0.1, 0.9) | P_{b_max} | $P_{b_ref} - P_{b_max} + P_{sc_ref}$ | |
| 22 | | | ✓ | | ≥ 0.9 | | 0 | |
| 23 | | | | ✓ | | | ≤ 0.1 | P_{sc_ref} |
| 24 | | | ✓ | | | | | $P_{b_ref} - P_{b_max} + P_{sc_ref}$ |
| 25 | | | | | ✓ | | | $P_{b_ref} - P_{b_max}$ |
| 26 | | | ✓ | | ✓ | | (0.1, 0.9) | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 27 | | | ✓ | | | | ≥ 0.9 | 0 |
| 28 | | | | ≥ 0.8 | ✓ | | | P_{sc_ref} |
| 29 | | | ✓ | | | | ≤ 0.1 | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 30 | | | | | ✓ | | | P_{b_ref} |
| 31 | $-P_{b_min} \sim 0$ | ≤ 0.2 | ✓ | ✓ | (0.1, 0.9) | 0 | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ | |
| 32 | | | ✓ | | ≥ 0.9 | | P_{b_ref} | |
| 33 | | | | ✓ | | | ≤ 0.1 | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 34 | | | ✓ | | | | | P_{sc_ref} |
| 35 | | | | | ✓ | | | 0 |
| 36 | | | ✓ | | ✓ | | (0.1, 0.9) | $-P_{b_ref} - P_{b_min} + P_{sc_ref}$ |
| 37 | | | ✓ | | | | ≥ 0.9 | $-P_{b_ref} - P_{b_min}$ |
| 38 | | | | > 0.2 | ✓ | | | $-P_{b_ref} - P_{b_min} + P_{sc_ref}$ |
| 39 | | | ✓ | | | | ≤ 0.1 | P_{sc_ref} |
| 40 | | | | | ✓ | | | 0 |
| 41 | $-P_{b_min} \sim -P_{b_max}$ | > 0.2 | ✓ | ✓ | (0.1, 0.9) | P_{b_ref} | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ | |
| 42 | | | ✓ | | ≥ 0.9 | | P_{b_ref} | |
| 43 | | | | ✓ | | | ≤ 0.1 | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 44 | | | ✓ | | | | | P_{sc_ref} |
| 45 | | | | | ✓ | | | 0 |
| 46 | | | ✓ | | ✓ | | (0.1, 0.9) | P_{sc_ref} |
| 47 | | | ✓ | | | | ≥ 0.9 | 0 |
| 48 | | | | > 0.2 | ✓ | | | P_{sc_ref} |
| 49 | | | ✓ | | | | ≤ 0.1 | P_{sc_ref} |
| 50 | | | | | ✓ | | | 0 |
| 51 | $< -P_{b_max} \sim 0$ | > 0.2 | ✓ | ✓ | (0.1, 0.9) | $-P_{b_max}$ | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ | |
| 52 | | | ✓ | | ≥ 0.9 | | P_{b_ref} | |
| 53 | | | | ✓ | | | ≤ 0.1 | $P_{b_ref} + P_{sc_ref}$ |
| 54 | | | ✓ | | | | | P_{sc_ref} |
| 55 | | | | | ✓ | | | 0 |
| 56 | | | ✓ | | ✓ | | (0.1, 0.9) | $P_{b_ref} + P_{b_max} + P_{sc_ref}$ |
| 57 | | | ✓ | | | | ≥ 0.9 | $-P_{b_ref} + P_{b_max}$ |
| 58 | | | | > 0.2 | ✓ | | | $P_{b_ref} + P_{b_max} + P_{sc_ref}$ |
| 59 | | | ✓ | | | | ≤ 0.1 | P_{sc_ref} |
| 60 | | | | | ✓ | | | 0 |

命产生影响。经过对蓄电池进行限功率操作和实现储能设备间的功率流动之后,可以看出蓄电池承担大部分储能工作,具备能量型器件的特征。

图9为采用小波包分解方法得到的蓄电池和超级电容SOC曲线,图10为采用所提控制方法后得到的蓄电池和超级电容SOC。比较图9、图10

可以看出,在同样的储能设备容量配置下,采用小波包分解方法按频率划分得到储能设备的充放电功率指令,其蓄电池SOC曲线出现超过上限0.8的时刻,而超级电容的SOC出现接近于1的时刻。在采用所提控制策略后,可有效改善两种储能设备的荷电状态,避免其出现过充过放现象,进而延

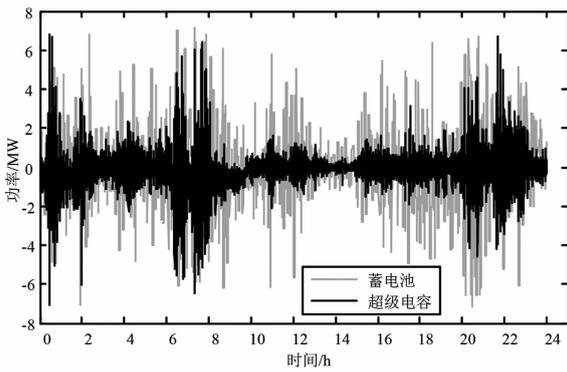


图7 采用小波包分解方法得到储能设备功率指令

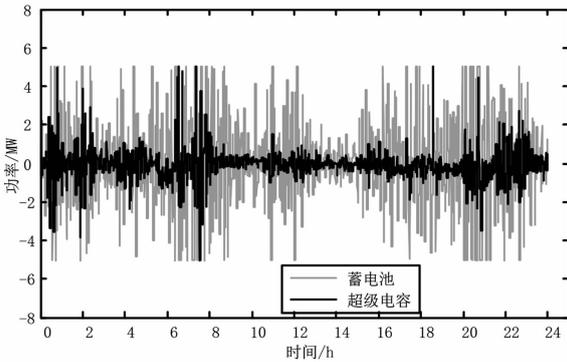


图8 采用协调控制方法得到储能设备功率指令

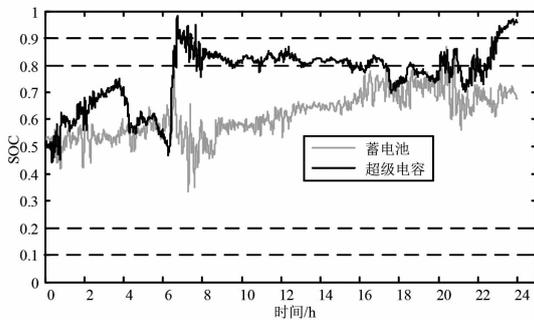


图9 小波包分解方法

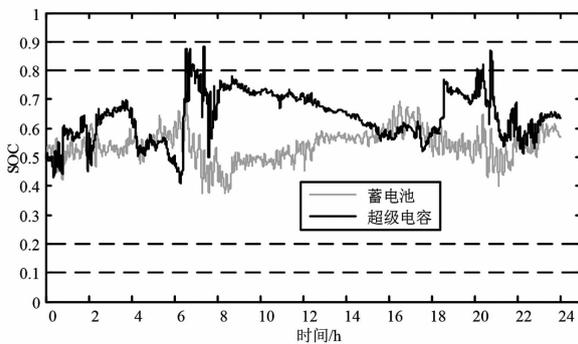


图10 协调控制方法

长其使用寿命。

4 结语

通过搭建风储联合系统数学模型,采用蓄电池

- 超级电容组成的混合储能系统平抑风电功率波动,可得出以下结论:

1)通过比较滑动平均滤波方法和自适应小波包分解方法对风电功率信号的平抑效果,得到自适应小波包分解方法更具有优势,目标并网功率更加平滑,也可避免滑动平均滤波方法出现的延迟现象。通过仿真结果表明,自适应小波包分解方法可以避免通过主观设定分解层数所带来的局限性,不仅对风电平滑效果好,同时也兼具了储能设备的容量配置最优。

2)设计一种风储联合系统协调控制策略,对经过频域分析得到的蓄电池和超级电容的功率指令进行储能设备间能量的再分配。这样,可以同时综合储能设备的频率和出力两方面的需求,使能量流动于不同储能设备之间,发挥各自储能设备的不同优势。

参考文献

- [1] OmPrakash Mahela, Abdul Gafoor Shaik. Comprehensive Overview of Grid Interfaced Wind Energy Generation Systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 260 - 281.
- [2] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3470 - 3479.
- [3] F. J. Vivas, A. De las Heras, F. Segura, et al. A Review of Energy Management Strategies for Renewable Hybrid Energy Systems with Hydrogen Backup [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 126 - 155.
- [4] Chauhan A, Saini RP. A Review on Integrated Renewable Energy System Based Power Generation for Stand-alone Applications: Configurations, Storage Options, Sizing Methodologies and Control [J]. Renew Sustain Energy Reviews, 2014, 38: 99 - 120.
- [5] 王绍丞. 储能技术在光伏电站并网中的应用分析[J]. 电工技术, 2018(17): 19 - 21.
- [6] 桑丙玉,王德顺,杨波,等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700 - 3706.
- [7] 谢俊文,陆继明,毛承雄,等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96 - 102.
- [8] 杨锡运,曹超,李相俊,等. 基于模糊经验模态分解的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J]. 电力建设,

2016,37(8):134-140.

[9] 付菊霞,陈洁,滕扬新,等. 基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略[J/OL]. 电工技术学报;1-8[2019-03-29]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181729>.

[10] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):8-13.

[11] 卢芸,徐骏. 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(11):149-154.

[12] Yujie Wang, Zhendong Sun, Zonghai Chen. Development of Energy Management System Based on a Rule-based Power Distribution Strategy for Hybrid Power Sources [J/OL]. Energy (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.155>.

[13] 吴冠男,张明理,徐建源,等. 考虑抗扰性能的风电混合储能系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(22):164-169.

[14] 雷勇,林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术,2019,45(3):983-992.

[15] Xiyun Yang, Hong Yue, Jie Ren. Fuzzy Empirical Mode Decomposition for Smoothing Wind Power with Battery Energy Storage System[J]. IFAC Papers OnLine, 2017, 50(1):8769-8774.

[16] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):45-48.

[17] Chen H, Cong T N, Yang W, et al. Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3):291-312.

作者简介:

詹仲强(1987), 硕士研究生, 主要从事新能源并网技术研究;

付菊霞(1993), 在读硕士研究生, 研究方向为清洁能源发电、储能技术。

(收稿日期:2019-04-08)

=====
(上接第28页)

[18] 黄俊辉,汪惟源,王海潜,等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(10):37-43.

[19] 刘科研,盛万兴,李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术,2007,31(3):13-18.

[20] 蔡昌春,丁晓群,王斌. 混沌模拟退火算法在无功优化中的应用[J]. 高电压技术,2008,34(3):578-582.

[21] 郭清元,吴杰康,莫超,等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报,2017,38(5):1385-1396.

[22] 陈曦. 基于灵敏度方法的电网安全校正策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.

[23] 段献忠,袁骏,何仰赞,等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化,1997,21(4):9-12.

[24] 袁骏,段献忠,何仰赞,等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术,1997,21(9):7-10.

[25] 陈曦,任建文,杨玉坤,等. 基于灵敏度方法的电压越限分析[J]. 陕西电力,2010,21(9):77-80.

[26] 蒋贤强,徐青山. 考虑需求响应的交直流配网调度研究[J]. 电力需求侧管理,2019,21(2):19-23.

[27] 白晓燕,苏毅,成煜. 基于仿射特性的约束灵敏度分析及应用综述[J]. 电网与清洁能源,2014,30(8):20-26.

[28] 王晓丰. 基于模糊机会约束模型的负荷恢复过程中风场有功出力调度[J]. 自动化应用,2019(2):94-98.

[29] 张云菊,何晔,李秀萍,等. 基于数据挖掘的电压无功灵敏度分析及应用[J]. 自动化与仪器仪表,2018(5):211-214.

[30] 赵兴迪. 基于量测数据的配电网线损计算方法[J]. 电工技术,2018(12):7-9.

[31] 李国武,李艳琼,刘娇扬,等. 考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):1-10.

[32] 李晏君,张章煌,陈玮,等. 兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(4):1-8.

[33] 孟波,孟现岭,靳玉凯,等. 灵敏度分析法在静态电压稳定中的应用[J]. 技术与市场,2014,47(4):1-8.

作者简介:

张庆晖(1969), 高级工程师, 研究方向为电力系统规划等;
吴长元(1991), 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制等;

吴杰康(1965), 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、智能电网等;

吴帆(1990), 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制等;

唐惠玲(1975), 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制等;

陈灵敏(1981), 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2019-06-05)

使用卡尔曼滤波修正蒙特卡洛算法的电动汽车充电负荷预测研究

李小雨,肖 汉,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:电动汽车将在未来迎来大规模的推广和应用,并对电网运行产生深远影响。而电动汽车充电负荷预测将是分析电动汽车对电网运行产生影响的基础。传统的电动汽车负荷预测方法仅仅通过对电动汽车运行行为特征进行分析,预测结果也仅仅是一种预期,即便考虑了多种典型场景,也难以准确描述随机性较大的电动汽车充电情况及充电功率大小。通过对电动汽车充电设施设置充电功率采样观测点,使用测量值对蒙特卡洛预测结果进行卡尔曼滤波修正,计算出较为符合系统状态的预测结果,并使用某行政区进行了算例演示,所提计算方法为研究电动汽车充电负荷精确预测和有序充电提供了新的方法探究和思路。

关键词:电动汽车充电;负荷预测;蒙特卡洛算法;卡尔曼滤波

中图分类号:TM769 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0037-04

Research on Load Forecasting for Electric Vehicle Charging Using Monte Carlo Method Modified by Kalman Filter

Li Xiaoyu, Xiao Han, Li Jiayi

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

Abstract: Electric vehicles (EV) are to be widely promoted and utilized, and will have great impact on power system. The load forecasting of electric vehicles is an element task for analyzing the impact. The existing Monte Carlo method is based on EV operation characteristics, whose output is merely an expectation value, far from accurate depicts on the actual situation. Within sampling real-time measurement, a Kalman filter is proposed to modify Monte Carlo method, and the method is applied in a district. This method can provide a new theoretical strategy and generate certain ideas for EV load forecasting and orderly charging.

Key words: electric vehicle charging; load forecasting; Monte Carlo method; Kalman filter

0 引言

电动汽车将在未来迎来大规模的推广和应用,发展电动汽车是落实国家能源战略、大气污染防治计划和节能减排政策的重大战略举措,是中国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。未来,高渗透大规模接入的电动汽车将对电力系统造成深远的影响,而电动汽车充电负荷预测将是分析电动汽车对电网运行产生影响的基础。

蒙特卡洛算法几乎是目前唯一有效、具备应用价值和可操作性的电动汽车负荷预测方法。但蒙特

卡洛算法基于电动汽车运行特征分析,即便设置多种场景,也难以准确和较完全地反映电动汽车充电随机性。其预测结果从根本上来说是一种预期,可以为电网增容改造计划、调峰能力建设、长期调度运行策略等提供依据和参考,却无法在较小时间尺度模拟大规模电动汽车某一日不同状态下随机性的充电负荷行为。特别是在所模拟的系统出现一些特殊外界影响因素(重大集会、自然灾害、停电等)时,预测结果将与实际情况发生明显的偏离。

下面通过对电动汽车充电设施设置充电功率采样观测点,使用实时测量值对蒙特卡洛预测结果进行实时的卡尔曼滤波修正,计算出较为符合系统状态的预测结果,并以某行政区进行了算例演示。

1 电动汽车充电负荷预测的数学模型

对于电力供应网络来说,电动汽车充电负荷和普通电负荷一样,都是某个时间点接入电网用电的设备容量总和,总负荷为

$$P = \sum_{n=1}^N P_n \quad (1)$$

式中: P 为电动汽车总充电功率; P_n 为网内第 n 辆电动汽车充电功率; N 为电动汽车总量。

另一方面,从时间尺度上来说,每辆电动汽车受限于充电设施功率控制和自身使用情况,有其对应于时间充电特征曲线,将所有电动汽车充电特征曲线累加,可得到电动汽车负荷总充电负荷曲线,即:

$$P_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i}, i = 1, 2, 3, \dots, 1440 \quad (2)$$

式中: P_i 代表 i 时刻电动汽车充电功率; $P_{n,i}$ 为第 n 辆电动汽车 i 时刻充电功率。

2 基于蒙特卡洛的充电负荷预测及其评价

2.1 蒙特卡洛算法及充电负荷预测

1777年,法国数学家蒲丰提出用大量投针的方法求圆周率,被广泛认为是蒙特卡洛算法的起源;第二次世界大战中“曼哈顿计划”的成员乌拉姆和冯·诺伊曼正式提出了蒙特卡洛算法,用于研制原子弹;后期随着计算机科学的发展,蒙特卡洛算法被广泛应用于宏观经济学、理论物理学、金融学等领域。简单概括该算法的特点就是,基于大数定律,通过随机采样计算模拟近似结果,并且采样越多,得到正确结果的概率逐渐加大。

国内外的居民出行习惯调查研究也证明,家用车辆日内使用结束时间、使用里程都基本满足正态分布。如依据美国国家用车辆调查(national household travel survey, NHTS)的数据,家用车辆日内最后一次出行结束时刻可以表示为^[1-2]

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}), \mu_i-12 \leq t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(t+24-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}), 0 \leq t \leq \mu_i-12 \end{cases} \quad (3)$$

式中:时间采用24小时制; $\mu_i = 17.6$; $\sigma_i = 3.4$ 。

汽车用户日行驶里程的概率分布为^[2-3]

$$g(D) = \frac{1}{D \sqrt{2\pi\sigma_D^2}} \exp(-\frac{(\ln D - u_D)^2}{2\sigma_D^2}), D > 0 \quad (4)$$

式中: $u_D = 3.47$, $\sigma = 0.88$ 。这种正态分布的特性,让蒙特卡洛算法成为预测电动汽车负荷的有力工具,通过构造某个随机变量的数学期望,反映出采样模拟对象的群体特征和规律,并将其作为问题的近似解。而事实上,蒙特卡洛算法几乎也是预测电动汽车负荷的唯一有效方法。

2.2 蒙特卡洛算法预测充电负荷的缺陷

使用蒙特卡洛算法时,充电负荷预测结果很大程度上受随机数的真实随机性影响,这也是妨碍蒙特卡洛算法精确度的重要因素。目前主流的商用软件生成的随机数大都是在底层通过一定算法生成,数据间事实上存在一定的逻辑关系,形成部分伪随机数。这些伪随机数将可能导致预测结果与真实情况存在较大偏离。即便通过一定算法改良能获得接近“真实”随机的数据,由于模拟对象行为的随机性,在一定规模内也难以较为精确地对对象行为结果进行预测。因此有必要采取一定的修正措施,使预测结果更加精确。

其次,蒙特卡洛算法是基于概率统计理论的一种求解期望值的算法,对于一些突发状况、不可抗力等外界重大影响因素(如重大集会、自然灾害、局部停电等事件)对电动汽车充电运行特征的短期影响,几乎无法跟踪和模拟,预测结果将与实际情况发生明显的偏离。

3 使用卡尔曼滤波修正蒙特卡洛算法的电动汽车充电负荷预测

3.1 卡尔曼滤波应用

1960年,美国科学家卡尔曼(Rudolf Emil Kalman)提出了线性卡尔曼滤波器^[4],然而大多数工程实践(如控制、信号处理、通讯工程、电力系统)都是非线性系统,于是在线性卡尔曼滤波器的基础上,陆续发展出了多种非线性滤波的方法,并对其方法的精确性、有效性进行了大量研究。卡尔曼滤波器在电力系统中的应用主要包括负荷预测、电能质量分析、设备状态估计、继电保护、风力发电风速预测等^[5-8]。

3.2 数学模型

假设电动汽车充电观测系统以及估计系统均为

线性离散系统,可以认为一天中任意时刻,全网电动汽车充电负荷存在如下关系:

$$P(T) = \sum_{i=1}^n b_i(T)P(T-i) + u(T) \quad (5)$$

式中: $P(T)$ 为系统 T 时刻电动汽车充电负荷; $b_i(T)$ 为系统参数,不全为0,表达 T 时刻以前负荷对 T 时刻的影响; $u(T)$ 为系统噪声。

而对于系统观测量,存在如下关系:

$$y(T) = P(T) + v(T) \quad (6)$$

式中: $y(T)$ 为对电动汽车充电负荷的直接观测量; $v(T)$ 为在观测过程中产生的噪声。

式(5)、式(6)可使用卡尔曼滤波状态空间方程表达为^[9-10]

$$\begin{cases} \mathbf{x}(T) = \mathbf{A}(T, T-1)\mathbf{x}(T-1) + \mathbf{B}u(T-1) + w(T) \\ y(T) = \mathbf{C}\mathbf{x}(T) + v(T) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}(T) = [P(T), \dots, P(T-n+1)]^T$; 转移矩阵 \mathbf{A} 为时变矩阵,即状态空间中的状态方程,

$$\mathbf{A}(T, T-1) = \begin{bmatrix} b_1(T) & \dots & b_{n-1}(T) & b_n(T) \\ 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

\mathbf{B} 为列矩阵,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 1};$$

\mathbf{C} 为行矩阵,

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times n}.$$

此时,假设系统状态为 T ,可以根据系统的上一个状态预测出现在的状态:

$$x(T, T-1) = \mathbf{A}x(T-1, T-1) + \mathbf{B}u(T) \quad (8)$$

式中: $x(T, T-1)$ 是利用上一状态预测出的现在状态的结果; $x(T-1, T-1)$ 是上一状态最优的结果; $u(T)$ 是现在状态的控制量,如果没有控制量,可以为0。即可以通过上一时刻电动汽车负荷预测的最优结果不断参与迭代本时刻的预测。在这个基础上,本时刻预测结果 $x(T, T-1)$ 对应的协方差可以更新为

$$P(T, T-1) = \mathbf{A}P(T-1, T-1)\mathbf{A}^T + Q \quad (9)$$

式中, Q 为系统过程的协方差。然后根据上一状态最优值得到的现在状态的预测值和现在状态重新测量的测量值,可以得到现在状态 T 时最优化估算值为

$$x(T, T) = x(T, T-1) + K(T)[y(T) - cx(T, T-1)] \quad (10)$$

式中, $K(T)$ 为卡尔曼增益。

$$K(T) = \frac{P(T, T-1)\mathbf{c}^T}{\mathbf{c}P(T, T-1)\mathbf{c}^T + R} \quad (11)$$

其中, R 为测量噪声 $v(T)$ 的协方差。

此时便得到了系统状态 T 时的最优值 $x(T, T)$,其协方差还存在关系:

$$P(T, T) = (1 - K(T)\mathbf{c})P(T, T-1) \quad (12)$$

这样便可继续往下递推 $T+1$ 状态下的系统最优值。

在电动汽车充电负荷预测的实践中,在任意 T 时刻,都可以通过蒙特卡洛算法得到 $x(T)$ 作为初始值。同时,通过测量值 $y(T)$ 对 $x(T)$ 进行卡尔曼滤波修正,得到 $T+1$ 时刻系统充电功率估算的最优值。其工作原理如图1所示。

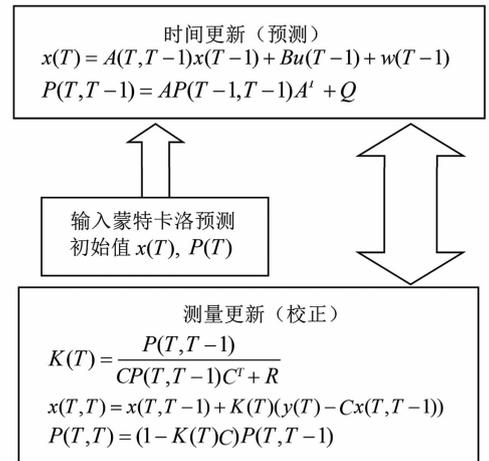


图1 卡尔曼滤波工作原理

4 算例与分析

4.1 蒙特卡洛算法预测结果

以某行政区为例,具体分析出行方式、出行目的、出行时间、出行空间分布等居民出行特征,及以公共交通、私家车、出租车为主要分类的交通运行特征后,采用蒙特卡洛算法对该行政区一天中电动汽车充电总功率进行预测。根据相关规划文件中的调查统计数据,此区目前大约有电动汽车1301辆。蒙特卡洛算法设置条件为:模拟次数100次,总共约1301辆电动汽车,所有车辆容量约为30 kWh,专用、家用慢充约为7 kW/桩,商场、公共停车场快充、公共快充约为45 kW/桩,充电桩主要充电起始时段集中在8:00、12:00、18:00、19:00,起始时间标

准差约为1~2 h。模拟结果图2所示,一天中充电高峰时段主要在20:00左右,低谷时段主要在凌晨5:00左右。

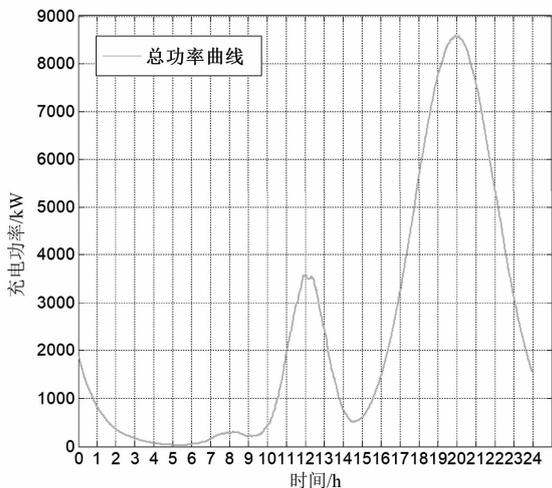


图2 某行政区电动汽车一天内充电功率总需求

4.2 卡尔曼滤波后的预测结果

该行政区目前共有电动汽车充电设施合计约2024个,其中公交、市政、物流等专用充电桩674个;城市及景点公共充电桩430个;机场公共充电桩230个;政府公务、网约车、电动租赁及其他分散自用充电桩合计约690个。

在某一日在各个电动汽车充电设施分布区域设置观测点,统计电动汽车实时充电总功率,由于难以做到对每个充电设施实行实时监控,故采用片区采样加权平均值的办法进行统计,主要观测点统计结果如表1所示。

表1 某行政区电动汽车实时充电观测点统计结果

| 观测类型 | 观测结果计算负荷/kW | |
|--------|-------------|------|
| | 高峰时段 | 低谷时段 |
| 专用充电设施 | 1239 | 0 |
| 公共充电设施 | 1652 | 90 |
| 自用充电设施 | 5370 | 147 |
| 合计 | 8262 | 237 |

在一天中的 T 时刻,以对 $T+1$ 时刻的蒙特卡洛模拟结果为初始值,结合测量结果,启动卡尔曼滤波修正,得到 T 时刻经卡尔曼滤波的初次修正值,即为对 $T+1$ 时刻的优化预测值。进入 $T+1$ 时刻后, T 时刻完成的对 $T+1$ 时刻的优化结果又成为了对 $T+2$ 时刻进行预测的初始值。这时,结合对 $T+2$ 时刻的蒙特卡洛模拟结果和测量值,再次启动卡尔曼滤波修正,得到对 $T+2$ 时刻的优化预测结果,并依照此规则对一天中所有的时刻进行预测,结果如图3所示。

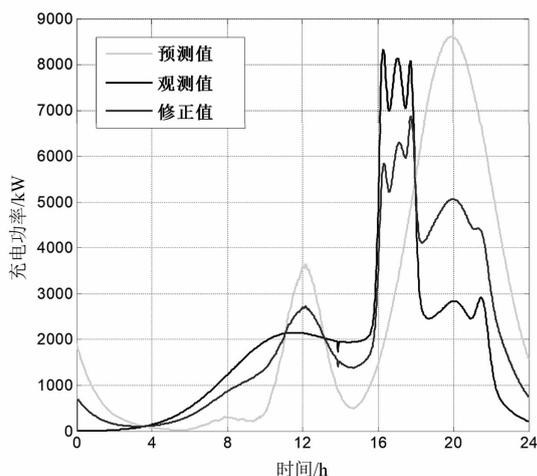


图3 使用卡尔曼滤波修正的充电功率总需求

5 结语

蒙特卡洛算法几乎是目前电动汽车充电负荷预测的唯一有效且可操作性强的方法,但是总的来说其预测结果仍然是一种具有一定误差的预期,且由于电动汽车实际运行的随机性,无法做到较为精确的实时、短期充电负荷预测。通过对蒙特卡洛算法预测电动汽车充电总功率的传统方法进行分析,提出了结合实时测量值使用卡尔曼滤波对蒙特卡洛预测结果进行修正的方法,对电动汽车充电负荷进行较为精确的实时统计、短期预测。

所提出的方法目前可用于电动汽车实时、短期充电负荷规模预测,并为电网调峰能力建设、电网设施增容改造计划提供参考。远期来看,随着能源互联网的建设,包括电网在内的能源供应网络设备信息共享互通增强,将能通过统一的电动汽车充电设施运行监控平台,实时关注区域全社会电动汽车充电负荷。单纯的电动汽车实时、短期负荷预测的重要性将大大削弱,但是伴随着能源互联网建设的配套政策如实时电价、电力现货市场的进一步实践,精确的电动汽车实时、短期负荷预测将仍能为高渗透率下电动汽车有序充电、电力市场交易、能源互联网经济运行调度发挥重要作用。

参考文献

- [1] Taylor J, Maitra A, Alexander M, et al. Evaluation of the Impact of Plug-in Electric Vehicle Loading on Distribution System Operations [C]//Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009:1-6.

(下转第50页)

基于逻辑回归的双Y型外熔丝电容器故障诊断技术研究

滕予非¹, 唐嘉忆², 段翔兮¹, 宋梁³, 李世龙¹

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要:为提高双Y型外熔丝电容器故障诊断精度,克服传统的中性线不平衡电流受初始不平衡量影响灵敏度较低的问题,提出了将母线电压值、三相电流有效值与中性线电流有效值信息融合,利用逻辑回归进行故障诊断的方法。该方法首先利用随机样本生成学习样本,利用仿真计算方法得到母线电压值、三相电流有效值与中性线电流的计算结果,并计算得到规则化特征指标;其次,基于上述学习样本利用逻辑回归学习得到决策函数;最后将现场实测数据代入决策函数,最终实现故障诊断判别。仿真结果表明,与传统的单纯依赖中性线电流进行故障判断相比,该方法有效提升了故障诊断灵敏度。同时该方法简单易实现,在工程上具有较强的推广性。

关键词:逻辑回归;双Y型外熔丝电容;故障诊断;机器学习

中图分类号:TM53 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0041-05

Logical Regression Based Fault Diagnosis for External – fusing Double – Star Power Capacitor

Teng Yufei¹, Tang Jiayi², Duan Xiangxi¹, Song Liang³, Li Shilong¹

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to increase the accuracy of fault diagnosis of external – fusing double – star power capacitor, a logical regression based fault diagnosis method is proposed. The RMS of voltage on the bus, the RMS of three – phase current and the RMS of current in the neutral line are all utilized in this method to overcome the problem that the initial unbalance rate may reduce the sensitivity of the diagnosis method only based on neutral line current. At first, the study set is generated by random sample method, and then the characteristic indexes could be calculated. Then according to the study set, determine function can be obtained by logical regression. Finally, based on the measure value of voltage and current, the fault probability of the capacitors can be obtained by the determine function. Simulation results show that the sensibility of the proposed method is much higher than the conventional one, which only uses natural line current.

Key words: logical regression; external – fusing double – star power capacitor; fault diagnosis; machine learning

0 引言

低压电容器是电力系统中重要的无功补偿设备,起着补偿系统感性无功、支撑系统电压和降低电网损耗等作用^[1-3]。因此,电容器的运行状况对于保障电网安全稳定运行起着重要的作用。

双Y型外熔丝电容器组是电力系统中常见的一种电容器结构,它采用两组三相Y型连接的电容器并联的方式布置,其中性线电流与两组电容器组电容量的变化有着较强的灵敏度。同时,采用外熔丝与其中小电容串联的方式,当小电容出现击穿故障后,与之串联的外熔丝可以快速熔断,保障其余电容器组继续正常运行^[4-5]。

电力系统双Y型电容器组大多采用中性线不平衡保护的方式实现电容器组的故障诊断^[6]。然而,由于电容器组初始状态的不平衡,各相间电容量也有2%左右的差异,中性线电流在正常运行时也难以在0附近,导致故障判断灵敏度较低^[7-8]。同时,由于电容器组中各个小电容的电容量均随着气温变化而变化^[9],中性线电流也是时间变量,这进一步加大了整定的难度。

为了防止中性线电流不平衡保护出现误动,在整定时需确保躲过所有正常运行工况。这就导致不平衡保护需在多个熔丝熔断的情况下方能发出告警,而对于单一熔丝熔断的工况难以精确反应。

此外,目前有大量学者利用支持向量机^[10]、神经网络^[11]的方法对电容器故障进行诊断,上述方法大多采用现场数据进行学习,样本数量较少,对于电容器不平衡程度的学习不够充分,在实际使用时可能出现精度降低的情况。

为了解决电容器组不平衡程度随温度等外部因素变化导致故障诊断精度较低的问题,提出了一种基于逻辑回归的电容器组故障诊断方法。该方法综合利用母线电压值、三相电流有效值与中性线电流有效值等信息,有效提升故障诊断的准确性。其次,该方法基于大量仿真数据作为学习样本,保障了学习效果和精度。该方法只需采用变电站现有的可采集的物理量作为诊断特征,简单易实现,在工程上具有较强的推广性。

1 双Y型外熔丝电容器结构

典型的双Y型外熔丝电容器结构如图1所示。

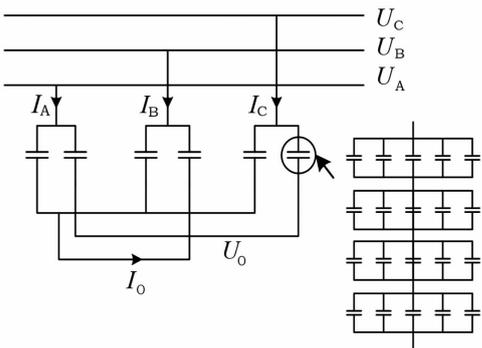


图1 双Y型外熔丝电容器结构

由图1可知,双Y型电容器将每相电容器组分为两个桥臂,在两个桥臂中性点的连线上装设有电

流互感器进行电流测量。

同时,电容器每个桥臂其实是多个电容器组先并联后串联组合而成。其中一个典型的结构中,每个桥臂包含有20个小电容,通过5并4串的方式连接而成。每个小电容外部串联了一个熔丝,当该小电容出现短路时,与之串联的熔丝会在并联电容放电电流的作用下熔断,实现故障隔离,保障整体电容器安全稳定工作。

2 电容器故障诊断特征选取

2.1 特征量选取基本思想

由于双Y型外熔丝电容器中某一个小电容出现短路故障导致外熔丝熔断后,三相电容器之间以及两个桥臂之间的电容器平衡关系发生变化,电容器中性点电压 U_0 以及流经两个桥臂中性点连线的电流 I_0 发生变化。同时,由于中性线电压以及故障相电容发生变化,三相电流 I_A, I_B, I_C 也会较正常时有所区别。

由此,以电容器双桥臂中性点连线电流 I_0 以及三相电流 I_A, I_B, I_C 为基础构建故障诊断特征。

2.2 电流计算方法及特征量构建

对于双Y型外熔丝电容器,利用双桥臂中性点基尔霍夫定律可得

$$(U_A - U_0)C_A + (U_B - U_0)C_B + (U_C - U_0)C_C = 0 \quad (1)$$

式中: U_A, U_B, U_C 分别是母线三相电压相量; U_0 是电容器中性点电压; C_A, C_B, C_C 分别是电容器的三相电容量。

由此,可以得到

$$U_0 = \frac{U_A C_A + U_B C_B + U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (2)$$

因此,三相电流 I_A, I_B, I_C 分别为

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U_A C_B + U_A C_C - U_B C_B - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_A \\ I_B &= \frac{U_B C_A + U_B C_C - U_A C_A - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_B \\ I_C &= \frac{U_C C_A + U_C C_B - U_A C_A - U_B C_B}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_C \end{aligned} \quad (3)$$

此时,中性线电流 I_0 为

$$I_0 = \frac{U_A C_B + U_A C_C - U_B C_B - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{A1} +$$

$$\frac{U_B C_A + U_B C_C - U_A C_A - U_C C_C}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{B1} + \frac{U_C C_A + U_C C_B - U_A C_A - U_B C_B}{C_A + C_B + C_C} j\omega C_{C1} \quad (4)$$

式中: C_{A1} 、 C_{B1} 、 C_{C1} 分别是电容器左桥臂的三相电容值。

假设母线三相电压平衡,即不存在负序分量,此时

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 \\ U_B &= \alpha^2 U_1 \\ U_C &= \alpha U_1 \end{aligned} \quad (5)$$

在此工况下,三相电流以及中性线电流分别为

$$\begin{aligned} I_A &= j\omega U_1 C_A \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \\ I_B &= j\omega U_1 C_B \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \\ I_C &= j\omega U_1 C_C \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} \\ I_0 &= jU_1 \omega \left(\frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{A1} + \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{B1} + \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} C_{C1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

由此可见,电容器组三相电流以及中性线电流不仅与电容器不平衡度有关,同时也与正序电压有关。当正序电压发生变化时,上述电流值也会随之成正比变化。

为了避免电压变化对电流产生影响,进而影响电容器故障诊断精度,选取如下变量作为特征量参与故障诊断:

$$\begin{aligned} G_A &= \left| \frac{I_A}{\omega U_1} \right| = \left| C_A \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_B &= \left| \frac{I_B}{\omega U_1} \right| = \left| C_B \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_C &= \left| \frac{I_C}{\omega U_1} \right| = \left| C_C \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} \right| \\ G_0 &= \left| \frac{I_0}{\omega U_1} \right| = \left| \frac{C_B + C_C - \alpha^2 C_B - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{A1} + \frac{\alpha^2 C_A + \alpha^2 C_C - C_A - \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} C_{B1} + \frac{\alpha C_A + \alpha C_B - C_A - \alpha^2 C_B}{C_A + C_B + C_C} C_{C1} \right| \end{aligned} \quad (7)$$

上述变量与系统正序电压无关,仅反映电容的不平衡程度,对故障诊断有较好的灵敏度。

3 逻辑回归算法

设定电容器运行状态 y 满足泊松分布,即其概率分布函数 $p(y)$ 满足:

$$p(y) = \phi^y (1 - \phi)^{1-y} \quad (8)$$

式中:当电容器正常运行时 $y=1$,电容器故障时 $y=0$; ϕ 是电容器正常时的概率。

根据指数分布族标准表达式:

$$p(y; \phi) = \exp \left[\left(\lg \frac{\phi}{1 - \phi} \right) y + \lg(1 - \phi) \right] \quad (9)$$

根据广义线性模型假设,易得

$$\lg \left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right) = \omega^T x + b \quad (10)$$

因此,可以得到逻辑回归的决策函数为

$$h_\phi = \phi = \frac{1}{1 + e^{\omega^T x + b}} \quad (11)$$

由此可见,逻辑回归算法的意义在于根据学习样本求取参数 ω 和 b ,得到决策函数。并根据实际得到的 x 值,带入求得电容器运行状态的概率,根据以下判据进行状态诊断:

$$y = \begin{cases} 1, & p(y) \geq 0.5 \\ 0, & p(y) < 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

4 双 Y 型外熔丝故障诊断技术

基于逻辑回归的双 Y 型外熔丝故障诊断可通过以下步骤实施。

1) 学习阶段

① 仿真数据收集

以特定双 Y 型外熔丝电容器为基础,通过拉丁超立方抽样的方式,获取母线电压幅值以及电容器组中各电容器的电容值,从而获得 10 万个正常工况以及 10 万个故障工况。在正常工况下,电容器组中每相电容与额定值的频差不超过 5%,各相之间电容量差异不超过 2%。在故障工况下,电容器组中有某个小电容处于断路状态。

通过计算得出以上 20 万个工况下电容器故障诊断特征量。

② 数据预处理

对仿真数据收集得到的故障特征量采用 Z-score 方法进行数据标准化,即:

$$\begin{aligned} G'_A &= \frac{G_A - \mu_A}{\sigma_A} \\ G'_B &= \frac{G_B - \mu_B}{\sigma_B} \\ G'_C &= \frac{G_C - \mu_C}{\sigma_C} \\ G'_0 &= \frac{G_0 - \mu_0}{\sigma_0} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: G'_A 、 G'_B 、 G'_C 、 G'_0 分别为标准化后的特征量; μ_A 、 μ_B 、 μ_C 、 μ_0 分别为样本中特征量 G_A 、 G_B 、 G_C 、 G_0 的均值; σ_A 、 σ_B 、 σ_C 、 σ_0 分别为样本中特征量 G_A 、 G_B 、 G_C 、 G_0 的标准差。

③逻辑回归学习

利用上述 G_A 、 G_B 、 G_C 、 G_0 得到的数据集,通过极大似然法,估计参数 ω 和 b 。其等效于求解如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min L(\beta) \\ \text{s. t.} \end{aligned} \quad (14)$$

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^m [-y_i \beta^T \hat{x}_i + \ln(1 + e^{\beta^T \hat{x}_i})]$$

式中: $\beta = (\omega; b)$; $\hat{x} = (x; 1)$ 。

通过估计得到参数 ω 和 b ,得到决策函数:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\omega_1 G'_A - \omega_2 G'_B - \omega_3 G'_C - \omega_4 G'_0 - b}} \quad (15)$$

2) 在线故障诊断

①物理量测量及特征量计算

在线通过变电站母线 PT、电容器三相 CT 以及双 Y 型中性线 CT,实时测量电容器所在母线正序电压、电容器三相电流以及电容器中性线电流。通过计算得出故障诊断特征量。

②故障诊断

将物理量测量及特征量计算得到的故障诊断特征量带入仿真数据收集进行标准化,并带入逻辑回归的函数表达式中求取 y ,同时依赖判据进行故障诊断。

5 算例验证

5.1 算例介绍

以西南某 500 kV 变电站实际低压电容器组为

例,对算法有效性进行分析。

该电容器组额定电压为 35 kV,额定容量为 30 MVar,采用双 Y 型外熔丝结构,每相共计两支桥臂,每支桥臂均通过 20 个电容器 5 并 4 串而成。

由于该电容器组安装位置处于室外,每个电容的电容值均会随环境温度而变化,同时经过试验表明,由于每个电容的电容值随温度变化形态各不相同,导致整个电容器组的容量和不平衡度也随之发生变化。

通过拉丁超立方抽样,得到 10 万组正常工况以及 10 万组故障工况。

5.2 传统故障诊断方法灵敏度分析

传统电容器故障检测大多依据中性线电流的有效值开展,其整定方法往往是确保整定值大于电容器组正常运行时可能出现的最大中性线电流,并乘以可靠性系数。

将上述 20 万个学习样本中性线电流与电容器运行状态关系描述如图 2 所示。其中纵轴为 1 的点代表运行状态正常,而纵轴为 0 的点代表故障工况。

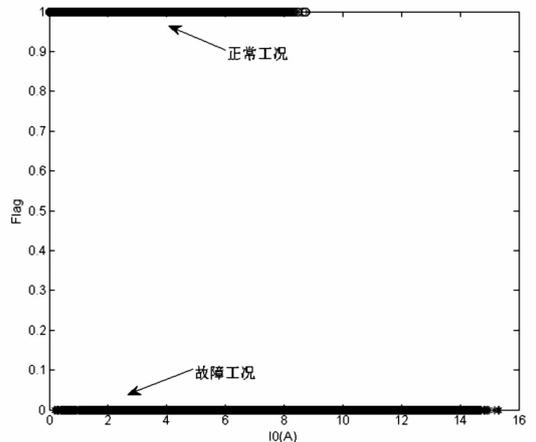


图 2 中性线电流与电容器运行状态关系

由图 2 可知,由于电容器组存在初始不平衡情况,因此即使在电容正常运行的情况下,中性线电流最大依然可以达到 8.746 8 A。而故障情况下,由于某个电容器短路对电容值影响不大,在某些情况下却可能导致三相平衡程度提升,因此故障工况下中性线电流的范围为 0.171 1 ~ 15.335 2 A。

因此,按照躲过正常情况下最大中性线电流的方式对故障诊断进行整定,10 万个故障学习工况中,能够准确辨识的仅有 32 032 个,正确率仅有 32.03%,而 67.97% 的概率可能出现拒动。

由此可以得到传统方法中分类结果混淆矩阵,

如表1所示^[12]。

表1 传统方法分类结果混淆矩阵

| 真实情况 | 预测情况与真实情况比例/% | |
|------|---------------|-------|
| | 正常 | 故障 |
| 正常 | 100 | 0 |
| 故障 | 67.97 | 32.03 |

根据查全率 P 、查准率 R 以及度量指标 F_1 的定义,可以计算得到传统方法的相关指标为: $P = 0.5953, R = 1, F_1 = 0.7463$ 。

由此可见,虽然传统方法通过整定方法保证了分类结果查准率为1,但是由于中性线电流在故障诊断过程中提供的信息过少,导致查全率仅有0.5953。该方法 F_1 度量值仅有0.7463。

5.3 所提方法性能分析

基于所提出的方法,将20万个数据划分为训练集和测试集,其中测试集占全体样本的10%。利用训练集进行逻辑回归训练,得到相应决策函数为

$$y = \frac{1}{1 + e^{-9.40G'_A - 9.66G'_B - 9.44G'_C + 20.18\omega_4G'_0 + 10.04}} \quad (16)$$

可以看出, G'_A, G'_B, G'_C 的物理意义相对对称,因此其系数也基本相等,而 G'_0 对故障最为灵敏,其系数也相应最大。

利用测试集对上述决策函数性能进行检测,得到分类结果混淆矩阵如表2所示。

表2 所提方法分类结果混淆矩阵

| 真实情况 | 预测情况与真实情况比例/% | |
|------|---------------|-------|
| | 正常 | 故障 |
| 正常 | 94.56 | 5.44 |
| 故障 | 5.58 | 94.42 |

同样,根据查全率 P 、查准率 R 以及度量指标 F_1 的定义,可以计算得到所提方法的相关指标为: $P = 0.9422, R = 0.9460, F_1 = 0.9440$ 。

由此可见,由于所提出的方法引入了三相电流作为辅助信息,在判别性能上较传统方法有了明显提升, F_1 度量指标较传统方法提高了26.5%。特别地,对于故障情况下的诊断,正确率提升了194.7%。

需要说明的是,利用所提出的方法存在电容器组正常运行工况下故障诊断装置误报的可能。因此在实际使用时,可以通过增加监测时间,综合告警信号的频率和持续时间加以判断的方法来提高性能。

6 结 语

前面提出了一种基于逻辑回归进行双Y型外

熔丝电容器组故障诊断的方法。该方法综合母线电压有效值、三相电流有效值以及中性线电流有效值等信息,构建了故障诊断4个特征指标,并通过逻辑回归的方式进行故障诊断。

与传统的单纯依赖中性线电流有效值进行故障诊断的方法相比,所提出的方法性能有着明显提升, F_1 度量指标较传统方法提高了26.5%。特别地,对于故障情况下的诊断,正确率提升了194.7%。

所提出的方法判据简单,易于实现,在工程上具有较强的应用前景。

参考文献

- [1] 周晓炯,颜湘莲,刘北阳,等. 基于快速机械开关的10 kV 电容器组选相关合方案[J]. 高电压技术,2019,45(2):533-540.
- [2] 杨庆,张照辉,席世友,等. 相控断路器投切10 kV 并联电容器的应用[J]. 高电压技术,2016,42(6):1739-1745.
- [3] 廖天明,傅晓飞,纪坤华. 基于混合补偿方式的低压配电网台区无功补偿实用策略研究[J]. 电气应用,2018,37(23):58-62.
- [4] 杨昌兴,王敏. 外熔丝保护性能与电容器组接线方式[J]. 浙江电力,2006(6):5-8.
- [5] 杨昌兴,王明毫. 并联电容器装置设计及其应用的若干议题[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(3):1-9.
- [6] 赵启承,王敏,丁岷. 500 kV 变电站35 kV 并联电容器组常用保护方式及其定值的计算研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(6):5-9.
- [7] 盛国钊,林浩,严飞,等. 不对称接线内熔丝高压并联电容器组的不平衡保护计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(6):60-66.
- [8] 黎林. 并联电容器组不平衡保护整定值的确定[J]. 电力电容器与无功补偿,2010,31(6):4-7.
- [9] 张建军,孙红华,肖寒,等. 环境温度对运行中高压并联电容器影响的分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(1):6-10.
- [10] 谢天宝,鲁云鹏,张颖茵. 基于改进的杜鹃搜索算法优化支持向量机的10 kV 并联电容器组故障诊断和预警研究[J]. 自动化技术与应用,2019,38(4):24-28.
- [11] 黄予春,曹成涛,顾海. 基于云计算和深度学习的电力电容器故障诊断和识别[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(4):71-75.
- [12] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社,2016.

作者简介:

滕予非(1984),博士,高级工程师,研究方向为电力系统数据科学和交直流电网安全稳定分析;

唐嘉忆(1994),硕士,助理工程师,主要从事配电网规划工作。

(收稿日期:2019-08-27)

智能变电站便携式接口回路测试仪的研制

龚华麟, 张择策, 曾祥力, 李官宇, 令狐静波, 曾 雪

(国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 泛在电力物联网, 是具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活的智慧服务系统。坚强的智能电网是建设泛在电力物联网的重点, 而作为智能电网重要组成部分的智能变电站, 其应用正越来越广泛。研制了一种专用的智能变电站便携式接口回路测试仪, 为了保证 GOOSE 报文的原始性不会被任何测试设备更改, 设计了一个将实际的二次设备出口报文进行抓取并储存的功能, 并且可以在离线和非实时情况下, 发送所捕获并储存的报文对其他二次设备进行测试。最后, 通过在成都供区内的数个智能变电站进行实地测试, 验证了所提方法的正确性和智能变电站便携式接口回路测试仪的可用性。

关键词: 泛在电力物联网; 接口回路; 智能测试仪

中图分类号: TM934 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0046-05

Development of Portable Interface Circuit Tester for Smart Substation

Gong Hualin, Zhang Zece, Zeng Xiangli, Li Guanyu, Linghu Jingbo, Zeng Xue
(State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Ubiquitous power internet of things (UPIoT) is a smart service system with comprehensive state awareness, efficient information processing, convenient and flexible application. Strong smart grid and ubiquitous power internet of things complement each other. As an important part of smart grid, smart substation is being used more and more widely. A special portable interface circuit tester for smart substation is proposed. In order to ensure the primitiveness of GOOSE message and not be changed by any test equipment, a function of capturing and storing the actual message is designed, and the captured and stored message can be sent off-line and non-real-time to test other equipment. Finally, the validity of the proposed method and the usability of portable interface circuit tester in smart substation is verified by field tests in several substations in Chengdu area.

Key words: ubiquitous power internet of things; interface circuit; intelligent tester

0 引言

泛在电力物联网, 是在电力系统的各个环节中, 充分应用移动互联、人工智能^[1-4]、大数据^[5-10]等现代信息技术、先进通信技术, 实现在电力系统中的众多环节里人机交互、万物互联的智慧服务系统。

坚强的智能电网是建设泛在电力物联网的重点, 而作为智能电网重要组成部分的智能变电站, 其应用正越来越广泛。但智能变电站的接口回路测试工作不能再通过测量电位实现, 测试十分复杂和不直观, 往往为了保证试验的可靠性和完整性, 需要陪

停相关设备, 扩大停电范围。

在目前的接口回路测试工作中, 主要有以下几点困难:

1) 采用传统的继电保护测试仪进行模拟测试时, 无法保证测试过程中报文不被其他设备所更改。据统计, 报文准确率只能达到 90%。

2) 采用继电保护测试仪进行单个接口回路的测试时, 单次作业时间较长, 进行一次接口回路测试的平均时间为 40 min, 效率非常低。

3) 智能变电站数量激增, 以成都地区为例, 2018 年智能变电站的数量是 2015 年的 2.5 倍。同样的期限内所需进行的接口回路测试的工作量也会

同比增长,而班组的试验人员逐年减少。试验人员紧缺与工作量剧增之间形成了不可调和的矛盾。

为了解决这样的矛盾,有两种主流的方法可以实现。一是采用建立标准化作业指导库的模式,该方法只需要将已有的经验编制成册即可,但仍然难以覆盖所有种类的测试或者新类型的接口回路测试,因此后期维护和升级不够方便。此外,这种方案无法保证传输的 GOOSE 报文不被其他设备篡改,即本质上与普通的试验方法没有区别,实用性也不够强。

二是研制专用的接口回路测试仪,它能从原理上解决报文准确率的问题,保证了 GOOSE 报文的可靠性,此外如果能制作成便捷式的,可以更为方便地使用和推广。

鉴于两种技术的优缺点,研制了一种智能变电站专用的便携式的接口回路测试仪,该仪器能在满足所有指标要求的基础上实现对接口回路进行可靠而高效的测试。

1 硬件设计

1.1 电源模块

使用了 MP2636 电源管理模块作为电源的解决方案。锂电池是一种方便而常见的电源解决方案。该方案中亟待解决的两个技术难点就是充电与升压。如果按照传统的方式,将充电部分和升压部分独立执行,会使得所搭建的电路十分繁琐。而作为一种小体积的“升压/充电”综合模块,MP2636 电源管理模块可以一次性满足以上两个功能。MP2636 电源管理模块如图 1 所示。

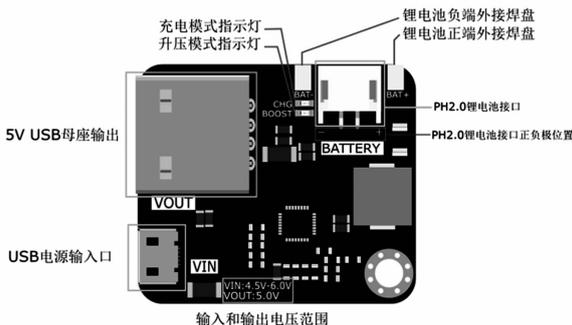


图 1 MP2636 电源管理模块

1.2 主机模块

主机模块采用了可以运行完整版 Windows 10 操作系统的 LattePanda 开发板。板载一颗英特尔 4

核处理器,最高 1.92 GHz 运行频率,内置 LPDDR3 4G 内存、eMMC 64G 固态硬盘、蓝牙 4.1 和 WiFi 模组,支持 USB 3.0 接口、HDMI 视频输出接口、3.5 mm 音频接口,1000 Mbps/100 Mbps/10 Mbps 自适应以太网口,以及额外的 MicroSD 扩展卡槽。此外,开发板还集成一块 Arduino Leonardo 单片机,可以外拓各种传感器模块,如图 2 所示。

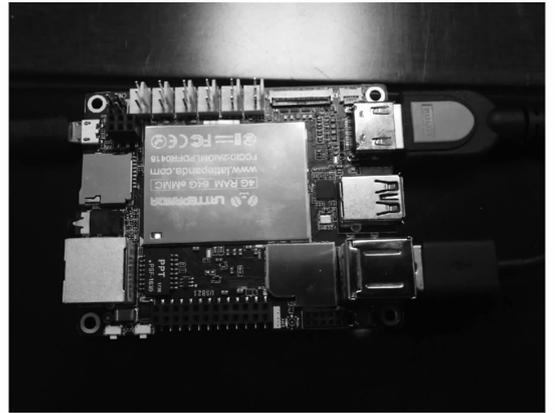


图 2 CPU 板外观

1.3 交互模块

显示器模块采用了一款树莓派 7 寸 LCD 触控一体显示屏,拥有 1024 × 600 分辨率,支持 HDMI 高清输出。该模块带有一个支持多点触控的电容式触摸面板可同时识别五个手指。USB 触摸采用 DFRobot 免驱动设计,无需安装特殊驱动,可以直接插在主机模块上进行触摸操作。屏幕支持 Windows 操作系统,可以直接配合 Raspberry Pi, LattePanda 及其他带有 HDMI 输出的设备使用。交互模块如图 3 所示。

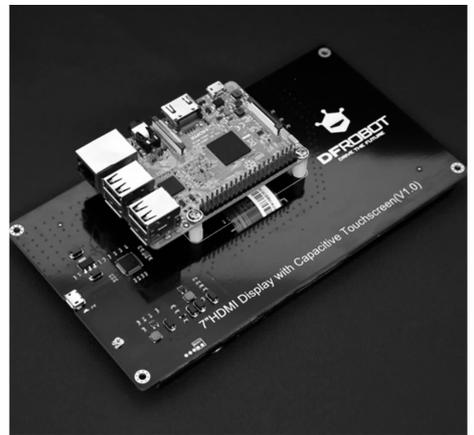


图 3 显示模块背面

1.4 通讯模块

通讯模块采用较为成熟的 CXL-6011STSUB-2KM,可使用 USB 接口供电,工作电流小,功耗低,支持多模光纤,采用 ST 光纤接口,工作波长 1310 nm,具

备 10M/100M 带宽自适应能力,支持全双工/半双工工作模式。通讯模块如图 4 所示。

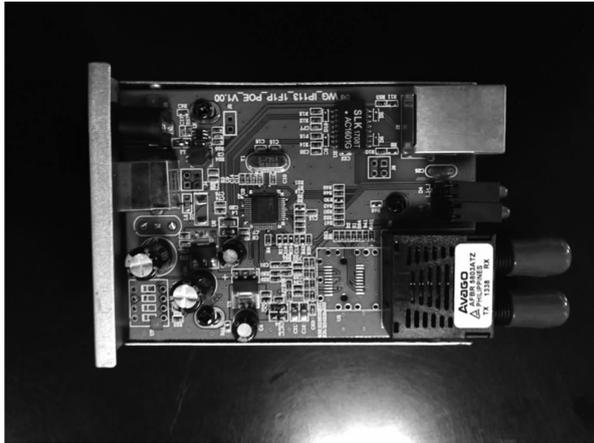


图 4 通讯模块

1.5 外壳设计

为了使研制出的测试仪方便携带以及外形美观,经过技术分析和比较后拟采用 3D 打印技术制作测试仪的外壳,并将相互连接各模块放入其中。3D 打印外壳图见图 5,内部结构图见图 6。



图 5 3D 打印外壳

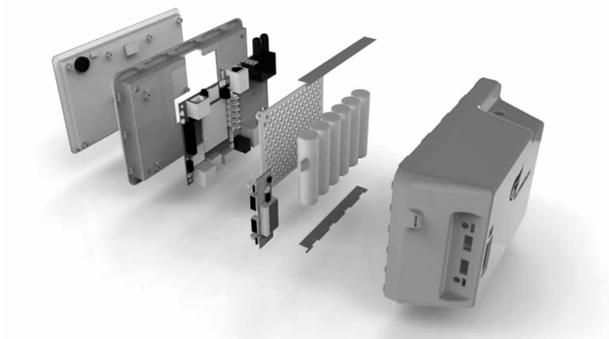


图 6 内部结构

2 软件设计

2.1 基于特征码匹配的报文关键词段筛选

系统软件设计的关键是基于特征码匹配的

GOOSE 报文关键词段筛选。二次设备接口的 GOOSE 报文通常数据较多,而在 GOOSE 报文的捕获阶段不带有筛选功能,因此需要设计一种方法筛选出测试所需要的报文。由于 GOOSE 报文内部各类信息可以用对应关键词段进行区分,所以采用了基于特征串树的报文特征码匹配进行 GOOSE 报文关键词段的筛选。

宏汇编代码中报文特征串匹配的执行过程为:读取文件内容,然后采用 cmpsb 串比较指令扫描并查找是否含有报文特征码。用这种匹配法检测目标报文虽然较为准确,但与报文特征串的匹配是否精确强相关,且无法处理那些含有通配符的特征串。所研制测试仪在分析已有报文特征码的精确和模糊模式匹配算法的基础上,面向对象进行程序设计,实现了一个基于报文特征串树的匹配算法,该方法可以用于含通配符特征串的模糊匹配,还能准确地更新报文特征库。

2.2 特征串树的建立算法

特征串树的建立算法是建立一棵报文特征串树,它由已知的报文特征构成,从“树根”到任何给定节点的路径标志了与该节点有关的报文特征串^[7]。匹配停止的条件是,从起始位置到固定位置再到当前位置的输入流模式和任何一个报文特征完全吻合。下面以实际程序为例进行说明。算法中主要用到了一个 node * traverse 函数,该函数返回一个指针,若为非空指针,就令从节点 n 开始的部分特征匹配输入流;若为空指针,就令从节点 n 开始的部分特征不匹配输入流。该算法并非寻找和列举输入文件中所有的报文,而是仅对是否含有目标报文作出回答。简要流程图如图 7 所示。

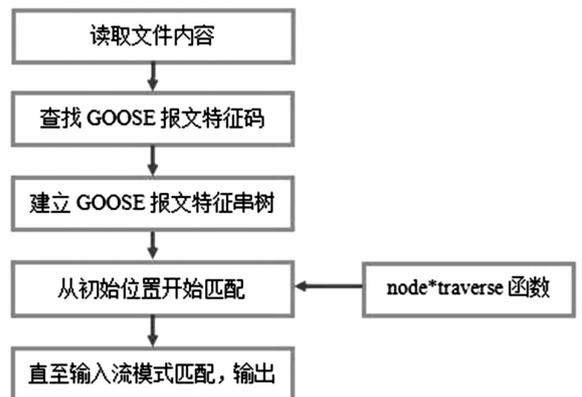


图 7 算法简要流程

3 实施情况

3.1 软硬件联调

为了保证 GOOSE 报文的原始性不会被任何测试设备更改,设计了一个将实际的二次设备出口报文进行抓取并储存的功能,并且可以在离线和非实时情况下,发送所捕获并储存的报文对其他二次设备进行测试。

目前云端共享的概念已经深入到各类科技创新当中,旨在应用虚拟化技术,集搜索、下载、使用、管理、备份等多个功能为一体,以搭建软件资源、软件及硬件协调应用和服务平台,使资源获取更加简单流畅、方便快捷。所提设计可以将所抓取并储存的报文上传到云端进行共享。方便任一收取端进行接收,可以便捷地对其他二次设备进行测试。

除了接口回路测试,所研制仪器还能对 GOOSE 报文进行更详细的分析。它可以将抓取并储存的报文提供给云端进行云计算。即基于互联网的相关服务的增加、使用和交互模式,通过互联网或局域网来提供动态易扩展的虚拟化资源,进入可配置的计算资源共享池。在引入云端共享和计算分析的框架之后,能扩展的功能将会越来越多。

3.2 测试效果分析

为了验证智能变电站便携式接口回路测试仪的实际效果,希望能将单次测试平均时长缩短到 8 min 以内。使用变电站便携式接口回路测试仪分别对 8 个变电站内的接口回路进行了测试,取其单次测试平均值,具体的测试结果如表 1 所示,测试结果对比见图 8。

表 1 测试结果统计表

| 实验序号 | 变电站名称 | 测控装置总数/台 | 校验总计用时/min | 单台平均用时/min |
|------|-------|----------|------------|------------|
| 1 | 腾飞 | 12 | 90 | 7.5 |
| 2 | 锦悦 | 14 | 104 | 7.4 |
| 3 | 驾青桥 | 10 | 78 | 7.8 |
| 4 | 罗家店 | 10 | 79 | 7.9 |
| 5 | 新川 | 14 | 109 | 7.8 |
| 6 | 沱源 | 12 | 95 | 7.9 |
| 7 | 新津 | 16 | 122 | 7.6 |
| 8 | 解林 | 14 | 109 | 7.8 |

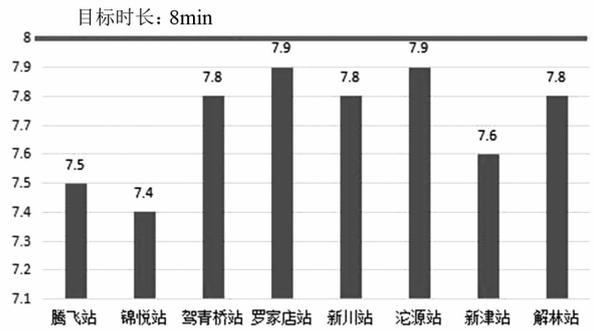


图 8 测试结果对比

统计了 8 个变电站共 102 次接口回路测试用时,计算出单次接口回路测试平均用时为 7.71 min。因此,采用自主研发的智能变电站便携式接口回路测试仪后,单次接口回路测试平均用时低于 8 min,目标达成。

3.3 经济效益分析

随着智能变电站应用越来越广泛,截止 2018 年成电地区智能变电站的数量是 2015 年 2.5 倍。按照班组现有设备和人数配备情况,一个 220 kV 变电站的全站接口回路测试,平均需要 38 次独立测试,需 5 台传统继电保护测试仪、10 人连续工作 2 h 才能完成全站接口回路测试工作。1 台传统测试仪成本约为 30 万元,5 台购置成本为 150 万元。

而采用智能变电站便携式接口回路测试仪可由 2 人在 2 h 完成全站接口回路测试工作。一个智能变电站便携式接口回路测试仪成本为 3 万元,2 台购置成本为 6 万元。

显然,采用便携式接口回路测试仪,不管是在人力成本还是设计购置成本上都远低于采用传统的继电保护测试仪。

4 结 语

研制了一种专用的智能变电站便携式接口回路测试仪,主要创新点如下:

1) 实现了 GOOSE 报文的捕获与共享。为了保证 GOOSE 报文的原始性,不会被任何测试设备更改,设计了一个将实际的二次设备出口报文进行抓取并储存的功能。并且可以在离线和非实时情况下,发送所捕获并储存的报文对其他二次设备进行测试。

2) 高效完成 GOOSE 报文的关键语段筛选。基于特征码匹配的 GOOSE 报文关键语段筛选,将已

知报文特征构成一颗报文特征串树。该方法可以用于含通配符特征串的模糊匹配,还能准确地更新报文特征库。

3) 基于3D打印的轻便式外壳设计。为了使研制出的测试仪方便携带以及外型美观,经过技术分析和比较后采用3D打印技术制作测试仪的外壳,并将相互连接的各模块放入其中。

4) 泛在电力物联网应用的有益探索。智能变电站便携式接口回路测试仪的研制,是在大力推进电力物联网建设的大背景下实施的。所设计的智能变电站便携式接口回路测试仪对GOOSE报文的捕获和共享以及其内部智能算法对GOOSE报文关键语段的筛选,都体现着泛在电力物联网“移动互联、人机交互、信息高效处理、应用便捷灵活”的智慧服务系统的本质。

虽然成功研制出了智能变电站便携式接口回路测试仪,但更深层次的报文分析机制并没有进步。下一步将基于大数据理论深度挖掘GOOSE报文的传输机制和常见的故障模式,研制一种专用于GOOSE报文的快速分析仪,助力高效实施智能站年检及改造工作。

参考文献

[1] 戴彦,王刘旺,李媛,等. 新一代人工智能在智能电网中

(上接第40页)

[2] 苗世洪,徐浩,钱甜甜,等. 扩展时间尺度下的电动汽车有序充电策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):5959-5967.

[3] Qian K J,Zhou C K,Allan M, et al. Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011 26(2):802-810.

[4] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering,1960,82(Series D):35-45.

[5] 谢开,汪峰,于尔铿,等. 应用Kalman滤波方法的超短期负荷预报[J]. 中国电机工程学报,1996,16(4):245-249.

[6] 贾嵘,杨可,原丽,等. 基于卡尔曼滤波和加窗插值谐波分析法的介损测量方法[J]. 电网技术,2007,29(31):52-55.

[7] 潘迪夫,刘辉,李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J]. 电网技术,

的应用研究综述[J]. 电力建设,2018,39(10):1-11.

[2] 葛磊蛟. 含分布式电源的智能配用电云平台关键技术及评估方法[D]. 天津:天津大学,2016.

[3] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设,2015,36(1):16-25.

[4] 邱剑. 电力中文文本数据挖掘技术及其在可靠性中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.

[5] 刘晓放,黄育松,姬源. 大数据分析在电力行业自动化系统故障预测中的应用[J]. 信息与电脑(理论版),2017(23):151-152.

[6] 宋康. 基于“大数据”的调度自动化云平台研究[J]. 通讯世界,2016(22):47-48.

[7] 钟向宇. 电力自动化系统在大数据背景下的数据处理分析[J]. 科技传播,2016,8(18):113-114.

[8] 唐健. 电力自动化系统在大数据背景下的数据处理分析[J]. 硅谷,2014,7(22):4-4.

[9] 江秀臣,盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术,2018,44(4):1041-1050.

[10] 严英杰,盛戈皞,陈玉峰,等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1):52-59.

作者简介:

龚华麟(1985),主要从事继电保护研究与检修工作;
张择策(1992),主要从事继电保护检修工作。

(收稿日期:2019-05-04)

2008,32(7):82-86.

[8] 李江,王义伟,魏超,等. 卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(6):135-144.

[9] 张民,鲍海,晏玲,等. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究[J]. 电网技术,2003,27(10):39-42.

[10] 马静波,杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术,2005,29(1):75-79.

作者简介:

李小雨(1989),硕士研究生,工程师,主要从事电力系统规划设计工作;
肖汉(1975),硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计;
李嘉逸(1975),硕士研究生,高级工程师,研究方向为智能电网技术、电力系统保护等。

(收稿日期:2019-05-08)

基于绝缘横担的配电网综合防雷系统配置与实施方案

林礼健

(国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

摘要:配电网由于设计规范限制,绝缘水平低,自身雷电防护能力较弱。随着复合绝缘材料在10 kV配电网上的应用推广,绝缘横担通过与常规防雷措施特点对比,其优异的防雷击闪络和防工频续流能力,可实现大幅提升10 kV输电线路雷击防护能力。为进一步降低10 kV配电网雷击跳闸或断线事故的发生,提出了基于绝缘横担并结合常规防雷措施组成的区段式配电网综合防雷系统,实现多层次、立体化的防雷。

关键词:配电网;绝缘横担;防雷措施;综合防雷

中图分类号:TM863 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0051-05

Configuration and Implementation Scheme for Integrated Lightning Protection System of Distribution Network Based on Insulated Crossarm

Lin Lijian

(State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: Due to the limitations of design specification, the distribution network has low insulation level and weak lightning protection ability. With the application and promotion of composite insulation materials in 10 kV distribution network, through the comparison of the characteristics of insulation crossarm and conventional lightning protection measures, the excellent protection ability against lightning flashover and power frequency continuous current of insulated crossarm can be realized to significantly improve the lightning protection ability of 10 kV transmission line. In order to further reduce the occurrence of lightning tripping or wire breaking accidents in 10 kV distribution network, a comprehensive lightning protection system of section distribution network based on insulated crossarm and combined with conventional lightning protection measures is proposed to realize multi-level and three-dimensional lightning protection system.

Key words: distribution network; insulated crossarm; lightning protection measures; integrated lightning protection

稳定工频续流是配电网防雷研究重点。

0 引言

配电网直接面向用户,其可靠性直接影响供用电区域内用户的用电质量,因此对配电网供电可靠性要求越来越高。统计资料表明,用户停电原因80%以上由配电网引起。对于配电网架空输电线路,有一半以上跳闸事故都是由雷击事故引起的^[1]。

配电网输电线路雷击事故主要是雷电击中输电线路杆塔或导线形成雷击过电压,当过电压超过了绝缘子冲击电压耐受水平时造成绝缘子雷击闪络,工频电流会沿着原有闪络通道形成稳定的工频续流,进而造成跳闸^[2]。

因此解决配电网输电线路雷击闪络或防止形成

1 常规防雷措施分析

10 kV配电网输电线路防雷措施通常由主电网移植而来,主要有避雷针、避雷器、并联间隙和增加绝缘子片数等。无论哪种防雷措施,其核心同样是解决雷击闪络或防止形成稳定工频续流^[3]。输电线路防雷措施从功能上区分为疏通型和阻塞型。其中避雷针、避雷器和并联间隙为疏通型,增加绝缘子片数为阻塞型。

避雷针可将雷电流接闪并疏通至大地,其雷电接闪性能具备将杆塔附近绕击雷转变成反击雷的功能。在相同雷电强度下,反击雷过电压远低于绕击

雷过电压,因此避雷针可降低雷击过电压导致绝缘子闪络的概率。但配电网不具备主电网绝缘水平,反击雷过电压同样极易造成绝缘子闪络,避雷针在配电网应用效果不明显。

避雷器由于其优异的非线性材料特性,当雷击过电压形成时,内部阻抗迅速降低,将雷电流通过避雷器疏通至大地后迅速恢复至高阻抗状态,从而阻碍了工频续流的形成。但通常10 kV配电网避雷器结构尺寸较小,雷电能量吸收能力有限,较大雷电流易造成避雷器雷击损坏,且长期在线运行,其内部阀片容易老化造成短路事故^[4]。

绝缘子作为阻塞型防雷措施,通过增加线路绝缘水平提升防雷击闪络能力,同时降低工频续流形成概率。但配电网塔架尺寸较小,不能大幅度增加绝缘子片数,否则易造成导线对地悬垂过低,增加安全隐患。

综上所述,常规防雷疏通型措施虽具备一定的防护性能,但其缺陷较难弥补,类似增加绝缘子片数这种阻塞型措施会受限于线路结构空间,而采用绝缘横担替换原有铁质横担,可在有限的空间内大幅提升10 kV线路的绝缘水平^[5]。

因此,合理地设计绝缘横担绝缘距离,实现电气性能与雷电强度匹配是配电网绝缘横担设计重点。

2 配电网绝缘横担的研制

2.1 防闪络能力分析

根据电力行业标准 DL/T 5220 - 2005《10 kV以下架空配电线路设计技术规程》的规定,10 kV输电线路常规直线杆塔采用1片绝缘子。1片绝缘子的干弧绝缘距离为150 mm,耐受过电压不超过200 kV。

绝缘横担的设计使用,摒弃了金属横担配绝缘子的方式,而是将横担与绝缘子一体化,在有限空间里大幅度提升线路的绝缘水平^[6]。

10 kV配电网输电线路塔架高度较低,和周围物体对比不突出,因此雷电对地闪络往往不容易直接击中线路本身。但由于配电线路绝缘水平较低,雷击线路附近在线路上感应产生的过电压同样容易造成闪络跳闸事故。统计发现配电线路雷击事故大多由感应雷造成,而感应雷在配电网线路上形成的过电压通常不会超过400 kV。

若将绝缘横担设定为干弧绝缘距离750 mm,通过试验其雷电耐受过电压大于400 kV,若将绝缘横

担设定为干弧绝缘距离600 mm,通过试验其雷电耐受过电压大于350 kV,因此绝缘横担可以很好地防护感应雷对10 kV配网线路的危害。

2.2 防工频续流能力分析

根据 GB/T 50064 - 2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》的规定,雷击跳闸率计算式为

$$N = N_L \eta (g P_1 + P_\alpha P_2) \quad (3)$$

式中: N_L 为100 km每年雷击次数; η 为建弧率; g 为击杆率; P_α 为绕击率; P_1 为超过杆塔耐雷水平雷电流概率; P_2 为超过绕击导线时耐雷水平的雷电流概率; η 为建弧率,可以采用式(4)计算:

$$\eta = 0.01 (4.5E^{0.75} - 14) \quad (4)$$

式中, E 为绝缘子的平均运行电压梯度,kV/m。

如果10 kV配电系统为中性点绝缘,则有:

$$E = \frac{U_n}{2l_i} \quad (5)$$

对于有效接地系统则有:

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}l_i} \quad (6)$$

式中: U_n 为线路额定电压,kV; l_i 为绝缘子的放电距离,m。

由于 U_n 为额定电压,那么建弧率主要由绝缘横担的干弧绝缘距离来决定。若将绝缘横担干弧绝缘距离设定为750 mm,对于有效接地系统的10 kV线路,可将建弧率由54%降低为4%;若将绝缘横担干弧绝缘距离设定为950 mm,可将常规10 kV输电线路的建弧率由54%降低为0。

通过增加配电网绝缘距离,即便雷击过电压造成绝缘横担闪络,但难以形成稳定的工频续流,从而阻止了线路雷击跳闸事故。

2.3 配电线路跳闸率分析

根据相关统计,10 kV配电线路由于雷击附近大地或大地上的物体产生的某一感应过电压引起的雷击跳闸次数占到总跳闸次数80%以上。

这里简述规程法计算方法,取感应过电压系数为32.1^[7]。设雷击点与配电线路的距离为 S ,若在50 m以内时雷电会直击线路, $S > 50$ m时导线上的感应过电压幅值为

$$U_i = 32.1 \times \frac{I_m h_i}{S} \quad (7)$$

式中: h_i 为导线对地平均高度,取10 m; I_m 为雷电流幅值,kA。

给定 S 和绝缘子闪络电压, 可以算出引起绝缘子闪络的最小雷电流为

$$I_{\min} = \frac{U_{50\%} S}{32.1 h_i} \quad (8)$$

与配电线路相距 S , 幅值超过 I_{\min} 的雷电流击于此位置均会导致绝缘子闪络。闪络概率为

$$R_T(I_{\min}) = 10^{-\frac{I_{\min}}{88}} = 10^{-\frac{U_{50\%} S}{2824.8 h_i}} \quad (9)$$

地面落雷密度 γ 按照过电压保护规程取值, 取雷电日 T_d 为 40, 落雷密度为 0.07。每百公里每年因感应过电压引起的绝缘子闪络次数为

$$N_s = 2 \int_{50}^{S_{\max}} 0.1 \gamma T_d P_T(I_{\min}) dS \\ = 0.2 \gamma T_d \int_{50}^{S_{\max}} 10^{-\frac{U_{50\%} S}{2824.8 h_i}} dS \quad (10)$$

式中: $S_{\max} = 32.1 h_d I_{\max} / U_{50\%}$; I_{\max} 为最大雷电流幅值。

计算得到不同 $U_{50\%}$ 绝缘子雷击跳闸次数, 见表 1。

表 1 不同 $U_{50\%}$ 绝缘子对应的雷击跳闸率

| 绝缘子 50% 放电电压/kV | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|--|-----|------|------|------|------|------|
| 雷击跳闸率 / (次 · (100 km · 40 雷电日) ⁻¹) | 7.0 | 3.53 | 1.51 | 0.52 | 0.19 | 0.07 |

其中 10 kV 配电网常规绝缘子对应 150 kV 一列, 复合绝缘横担对应 400 kV 一列, 可以看出理论上采用复合绝缘横担雷击跳闸率约为采用常规绝缘子雷击跳闸率的 1%, 可使配电网雷击跳闸率的大幅度降低。

3 配电网防雷绝缘横担综合防雷系统

目前输电线路防雷措施提倡差异化防雷, 即针对输电线路特点进行针对性的防雷设计和改造, 实现经济性和有效性的最大匹配, 而不是盲目进行全线防雷改造^[8]。

通过上述分析可知配电网绝缘横担作为阻塞型配电网防雷措施, 通过在有限空间内大幅度提升绝缘水平, 解决了阻塞型防雷措施在配电网应用的缺陷, 可达到较好的防雷效果。但雷电流难以通过绝缘横担闪络疏通泄放, 必然会沿线路传播直到找

到泄放薄弱点, 形成对未改造杆塔或变电站的危害隐患。因此, 为了使绝缘横担的应用实践性更科学合理, 结合经济性和有效性, 设计一种基于绝缘横担的综合防雷系统。

3.1 配电网绝缘横担综合防雷系统思路

在进行综合防雷设计时, 通过对线路历史雷击数据和地理气候对杆塔雷击影响等因素进行统计分析, 选出易遭雷击危害的线路区段。将上述区段作为综合防雷整治的区段, 在选定区段中, 将所有杆塔进行绝缘横担改造, 并配合区段端头杆塔加装避雷器作为雷电流侵入区段外之前的泄放通道。如区段内杆塔在历史数据中曾遭受大电流雷击危害, 应加装塔顶式避雷波阻器, 在雷电流侵入输电线路前削减其雷电流幅值, 减轻雷电对绝缘横担的冲击。实现区段内雷击能量综合处理, 输电线路不续流、不跳闸, 同时也不影响区段外的线路或变电站。

以 10 基杆塔的区段为例, 综合防雷系统配置方式如表 2。

3.2 配电网绝缘横担综合防雷系统设计方法

10 kV 绝缘横担综合防雷系统具体设计方式如图 1。

3.2.1 绝缘横担选择

绝缘横担采用圆形实心玻璃纤维棒作为基材, 两端压接金具。金具具备紧固和挂线功能, 外层采用抗紫外线硅橡胶包覆工艺。

具体结构参数如下:

- 1) 芯棒截面直径为 50 ~ 60 mm;
- 2) 硅橡胶厚度 ≥ 3.5 mm;
- 3) 干弧绝缘距离为 450 ~ 950 mm。

其中, 当干弧绝缘距离为 450 ~ 550 mm 时, 芯棒截面直径采用 50 mm; 当干弧绝缘距离为 550 ~ 650 mm 时, 芯棒截面直径采用 55 mm; 当干弧绝缘距离大于 650 mm 时, 芯棒截面直径采用 60 mm。

3.2.2 区段绝缘配合

绝缘横担的干弧绝缘距离是区段防雷效果的关键, 为了实现经济性和有效性的最大匹配, 区段内绝缘横担的干弧绝缘距离可根据配电线路重要性和跳闸率允许值进行配置。配置方案见表 3。

表 2 10 基杆塔区段配网绝缘横担综合防雷系统配置方式

| 塔号 | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 | 5号 | 6号 | 7号 | 8号 | 9号 | 10号 |
|------|------------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|------------|
| 杆塔分类 | 端头塔 | 普通塔 | 普通塔 | 普通塔 | 易遭大电流雷击塔 | 普通塔 | 普通塔 | 普通塔 | 普通塔 | 端头塔 |
| 设备配置 | 避雷器 + 绝缘横担 | 绝缘横担 | 绝缘横担 | 绝缘横担 | 避雷波阻器 + 绝缘横担 | 绝缘横担 | 绝缘横担 | 绝缘横担 | 绝缘横担 | 避雷器 + 绝缘横担 |

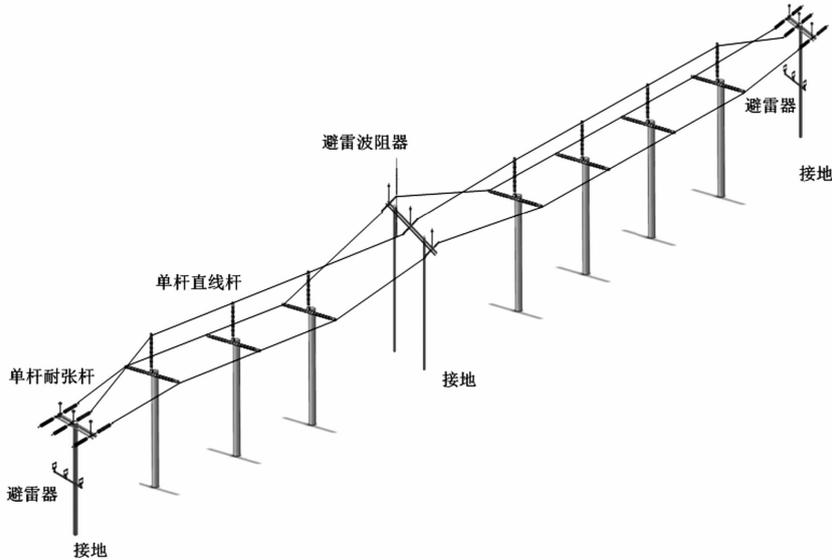


图1 10 kV 绝缘横担综合防雷系统

表3 区段绝缘横担绝缘强度配置方案表

| 线路类别 | 重要线路 | 次重要线路 | 常规线路 |
|--|------|---------|---------|
| 跳闸率允许值/ (次·(100 km·a) ⁻¹) | 0 | ≤0.5 | ≤2 |
| 跳闸率理论值/ (次·(100 km·a) ⁻¹) | 0 | 0.1~0.5 | 0.5~2 |
| 雷电冲击耐受 电压/kV | 550 | 400~350 | 300~250 |
| 绝缘横担干弧绝缘 距离/mm | 950 | 750~600 | 550~450 |

对拟改造配电线路的重要性进行评估,确定其重要等级。如为重要线路,跳闸率允许值为0,则绝缘横担的干弧绝缘距离需950 mm以上,对于10 kV配电网线路可将建弧率控制为0,则雷击时不会建立起稳定工频续流。如为次重要线路或常规线路,则根据线路历史雷击危害程度,在表3范围内选择相应干弧绝缘距离的绝缘横担进行配置。

3.2.3 区段端头避雷器

在区段端头杆塔加装线路避雷器作为雷电泄放通道,进一步保证区段内雷电流不会对区段外线路造成危害。

避雷器采用带间隙氧化锌避雷器,避免避雷器阀片老化造成短路事故,主要参数如下:

- 1) 额定电压为17 kV;
- 2) 标称放电电流为5 kA;
- 3) 最大雷电冲击残压(8/20 μs)为50 kV。

由于配电网避雷器雷电吸收能量有限,为防止雷电冲击损坏避雷器,将避雷器设计在区段两端,当雷击区段内输电线路时,一方面区段内的绝缘横担

防止雷击闪络或续流;另一方面雷电流在线路传播过程中,导线的固有电阻以及雷电流的电磁辐射效应因素使雷电流不断衰减,可降低因通流量的限制造成避雷器损坏的风险。

3.2.4 避雷波阻器

避雷波阻器作为一种塔顶式针式防雷设备,遵循雷击先导形成原理,安装方式灵活,通常选择历史数据统计中易遭受大电流直击雷危害的杆塔安装,将雷电接闪至装置。由于杆塔进行了强绝缘改造并具有良好的接地泄放通道,可避免接闪的雷电对线路造成危害。

避雷波阻器将杆塔周围雷击吸引至针体,并提供良好的接地通道,同时利用避雷波阻器针体内部多阶滤波装置的滤波作用,降低雷电波前沿陡度,从而降低雷击过电压,进而降低大电流雷电对绝缘横担的冲击和雷击闪络风险。

4 结 语

上面分析了10 kV配电网输电线路雷电防护性能,总结了配电线路防雷重点,结合常规防雷措施特点和绝缘横担雷电防护机理,提出以绝缘横担为基础的综合防雷系统实施技术方案,分析了绝缘横担的应用对于提升10 kV配电线路雷电防护性能的有效性。

参考文献

[1] 范明天. 中国配电网面临的新形势及其发展思路[J].

供用电,2013(1):1-5.

[2] 李景祿,吴维宁,杨廷方,等. 配电网防雷保护的分析和研究[J]. 高电压技术,2004,30(4):58-59.

[3] 段绪金,齐飞,叶会生,等. 配网防雷现状与治理措施研究[J]. 电气应用,2015(S1):17-20.

[4] 黄清社,徐奔,彭利强,等. 10 kV 架空绝缘导线防雷保护的措施研究[J]. 高压电器,2010,46(12):32-35.

[5] 帅玲,毕涛,李荣兵. 有机材料在 10KV 绝缘横担上的应用与发展[J]. 山东工业技术,2014(14):93-93.

[6] 戴波涛,方向,田维. 10 kV 配电线路绝缘横担防雷实

践研究[J]. 湖南电力,2017,37(S2):102-105.

[7] 何金良,曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京:清华大学出版社,2013:160-161.

[8] 韩晋平,王晓丰,马心良,等. 10 kV 架空绝缘导线雷电过电压与防雷综合措施研究[J]. 高电压技术,2008,34(11):2395-2399.

作者简介:

林礼健(1971),硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力与新能源。

(收稿日期:2019-06-10)

(上接第 16 页)

参考文献

[1] 苏盛,吴长江,马钧,等. 基于攻击方视角的电力 CPS 网络攻击模式分析[J]. 电网技术,2014,38(11):3115-3120.

[2] 童晓阳,王晓茹. 乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J]. 电力系统自动化,2016,40(7):144-148.

[3] 陆佳政,张红先,方针,等. 湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(12):99-105.

[4] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-world Networks[J]. Nature,1998,393(6684):440-442.

[5] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science,1999,286(5439):509-512.

[6] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks[J]. Nature,2010,464(7291):1025-1028.

[7] Albrecht J, Berens D G, Jaroszewicz B, et al. Correlated Loss of Ecosystem Services in Coupled Mutualistic Networks[J]. Nature Communications,2014,5:3810.

[8] 孟令中,陆民燕,黄百乔,等. 网络控制系统的连锁失效影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(3):353-356.

[9] Sridhar S, Hahn A, Govindarasu M. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid[J]. Proceedings of the IEEE,2012,100(1):210-224.

[10] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术,2016,40(6):1867-1873.

[11] 冀星沛. 基于相互依存网络理论的电力信息-物理系统结构脆弱性研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.

[12] 董政呈,方彦军,田猛. 相互依存网络抗毁性研究综

述[J]. 复杂系统与复杂性科学,2017,14(3):30-44.

[13] 王亚非,胡四全,马力. 基于 GPRS 网络的调度备用通道[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):80-83.

[14] 郭伟. 抗干扰、自适应、自组织、自恢复通信网技术[J]. 电子科技大学学报,1996,25(S3):304-308.

[15] Gao J, Li D, Havlin S. From A Single Network to A Network of Networks[J]. National Science Review,2014,1(3):346-356.

[16] Parshani R, Rozenblat C, Ietri D, et al. Inter-similarity between Coupled Networks[J]. EPL,2010,92(6):68002.

[17] Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The Structure and Dynamics of Multilayer Networks[J]. Physical Reports,2014,544(1):1-122.

[18] Bashan A, Parshani R, Havlin S. Percolation in Networks Composed of Connectivity and Dependency Links[J]. Physical Review E,2011,83(5):05112.

[19] 胡海波,王林. 幂律分布研究简史[J]. 物理,2005(12):889-896.

[20] National Institute for Standards and Technology(NIST). Guidelines for Smart Grid Cyber Security:Vol.3,Supportive Analyses and References;NISTIR 7628[S],2010.

[21] 汤奕,陈倩,李梦雅,等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):59-69.

作者简介:

罗紫航(1997),本科生,研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析;

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

魏震波(1978),博士,副教授,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及电力市场。

(收稿日期:2019-07-09)

提升金沙江二期特高压直流外输电举措

陈汉雄, 李晓明

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要:为实现金沙江下游白鹤滩水电站电能东送区外电网负荷中心, 国网“十四五”期规划建设金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电工程。根据白鹤滩水电站水电出力特性、“十四五”期四川电网大量富余清洁能源可供外送的电力发展状况, 结合金沙江二期2回特高压直流输电工程本身的特点与优势等, 提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的电力举措: 丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行, 金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(丰水期季节性水电与平枯期新能源电量), 研究表明: 所提电力举措, 2025年丰水期可实现减少四川电网弃水约5000 GW·h, 同时亦可增加金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电线路年利用小时数约470 h。

关键词:电力系统; 金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流; 白鹤滩水电站; 弃水电量; 新能源

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0056-05

Measures for Improving UHVDC Delivery Output in Second Phase of Jinsha River Project

Chen Hanxiong, Li Xiaoming

(Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, Sichuan, China)

Abstract: Double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission project in the second phase of Jinsha River project of State Grid are planned and constructed in the year of 2021~2025. According to the hydrologic output characteristics of Baihetan hydropower station and the substantial surplus of Sichuan green clear energy in the year of 2021~2025, and combined with the characteristics and advantages of double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission project in the second phase of Jinsha River project, the measures for improving UHVDC delivery output in the second phase of Jinsha River project are proposed. The research results show that: by taking the measures, the quantity of abandoning energy in high flow period of Sichuan power grid can be decreased about 5000 GW·h and the annual utilization hours of double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission lines in the second phase of Jinsha River project can be increased about 470 hours.

Key words: power system; double-circuit ± 800 kV UHVDC transmission lines in the second phase of Jinsha River project; Baihetan hydropower station; abandoning energy; renewable energy

0 引言

2021—2023年地处金沙江下游白鹤滩水电站(装机总容量为16 GW)将规划建设投运,为实现白鹤滩水电站电能更大范围内实现资源优化配置,将同步配套规划建设金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电工程^[1](即金沙江二期特高压直流,直流额定容量均为8 GW)。

根据金沙江二期2回特高压直流输电工程本身的特点与优势、白鹤滩水电站出力特性、四川电网

“十四五”期大量富余清洁能源的电力发展状况以及丰水期调峰弃水问题等,借助金沙江二期2回 ± 800 kV特高压直流输电通道的送电能力并发挥白鹤滩水电站良好的调节性能,提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的电力举措:丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(丰水期季节性水电与平枯期新能源电量)。通过该优化电力举措,既实现减少四川电网丰期大量弃水电量;同时借助金沙江二期2回特高压直流输电平台,四川电网亦实现全年更多富余清洁能源

外送。从而提高金沙江二期2回±800 kV特高压直流输电线路利用小时数(提高其建设运行经济性)。

1 四川清洁能源(水电/新能源)规划及川电东输外送交直流电网

1.1 四川清洁能源(水电/新能源)规划

1.1.1 水电

四川作为全国重要清洁能源基地,“十三”期及以后,每年均规划建设有大量清洁能源(水电、风电、光伏电站)。根据四川电网全口径电源规划,到2025年四川全省水电装机总容量达到约为128.9 GW(其中包括金沙江二期白鹤滩水电站16 GW)。四川水电及水能资源主要集中在四川西部的甘孜、阿坝、凉山州境内的金沙江、雅砻江、大渡河等三大江流域。

四川现有及规划新建的各大中小型水电站所发电量,主要为兼顾满足四川省内与区外电网两个电力负荷需求市场,其中区外电网为重庆、华东、华中以及西北电网。

1.1.2 新能源

2025年四川全省初步规划风电总装机容量约11 GW(其中约85%风电集中在四川凉山州境内);太阳能光伏电站规模达到约为5 GW。

另截至2025年四川火电装机总容量达到16.6 GW。

1.2 川电外送交直流电网通道建设及规划

截止2018年,四川电网通过“4直+6交”的多回交直流输电线路与区外电网(重庆、华东、华中、华中、西北)实现电力交换,其中4回直流为3回±800 kV特高压直流工程(向家坝—上海、锦屏—苏南、溪洛渡左—浙西,丰水期外送电力总输电规模为21.6 GW)、1回德阳—宝鸡±500 kV直流工程(丰水期可实现最大送电规模为3GW);6回500 kV交流线路为2回黄岩—万县、2回资阳—思源、2回洪沟—板桥。“十三五”期该6回交流线路丰水期大方式下可实现最大外送电力为6 GW。

到2020年四川电网与区外电网交换的川电出口交直流输电线路在现有电网基础上发展为“5直”(增加1回雅中—江西±800 kV特高压直流,额定送电容量8 GW^[2]);到2025年,四川与区外电网实现电力交换的川电出口交直流输电线路增加至“7直+6交”(增加2回白鹤滩—区外电网2回±800 kV特高压直流,额定送电容量均为8 GW)。

2 白鹤滩水电站及金沙江二期特高压直流工程

2.1 白鹤滩水电站

白鹤滩水电站为金沙江下游四个水电梯级——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝中的第二个梯级(其中乌东德、白鹤滩为金沙江二期水电站);白鹤滩水电站总装机容量为16 GW,电站具有年调节能力;电站左、右岸各8台单机容量1 GW机组,机组计划投产时间为于2021年至2023年。白鹤滩水电站16 GW投产按单独运行的情景考虑,水电出力特性如表1所示。

根据白鹤滩水电站出力特性:1)具有年调节性能的白鹤滩水电站调节性能优良;2)白鹤滩水电站平水年总发电量约61.11 TW·h,电站年利用小时数3818 h;枯水年总发电量约47.8 TW·h,电站年利用小时数2986 h。白鹤滩水电站年利用小时数相较于四川全口径水电机组近2年来的平均水平(约4240 h)还略低^[3-4]约400 h。

表1 白鹤滩水电站出力特性

| 月份 | 平水年出力/10 ⁴ kW | | | 枯水年出力/10 ⁴ kW | | |
|----|--------------------------|------|-----|--------------------------|-----|-----|
| | 预想 | 平均 | 强迫 | 预想 | 平均 | 强迫 |
| 1 | 1600 | 508 | 0 | 1592 | 465 | 0 |
| 2 | 1600 | 508 | 0 | 1600 | 423 | 0 |
| 3 | 1600 | 508 | 74 | 1494 | 465 | 69 |
| 4 | 1489 | 552 | 213 | 1326 | 465 | 202 |
| 5 | 1261 | 549 | 197 | 1220 | 423 | 191 |
| 6 | 1203 | 485 | 189 | 1240 | 508 | 191 |
| 7 | 1300 | 1123 | 198 | 1359 | 695 | 201 |
| 8 | 1438 | 1154 | 200 | 1535 | 601 | 205 |
| 9 | 1600 | 908 | 75 | 1600 | 807 | 75 |
| 10 | 1600 | 932 | 0 | 1600 | 672 | 0 |
| 11 | 1600 | 610 | 0 | 1600 | 508 | 0 |
| 12 | 1600 | 508 | 0 | 1600 | 508 | 0 |

2.2 金沙江二期特高压直流输电工程

作为金沙江二期水电站之一的白鹤滩水电站总装机容量巨大,为实现白鹤滩水电站电能在更大范围内实现资源优化配置,2021年左右川西南将同步配套规划建设金沙江二期2回(白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江)±800 kV特高压直流输电工程(即金沙

江二期特高压直流,直流额定容量均为8 GW)^[1]。该直流工程送端侧地处川西,受端均暂考虑为华东电网。

金沙江二期2回特高压直流工程目前功能定位为:全年输送电能,主要为对应金沙江二期白鹤滩水电站本身所发电量,其工程设计年(平水年)利用小时数约为3900 h,若枯水年工程利用小时数则更低约3000 h。

金沙江二期2回特高压直流(白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江)送端白鹤滩换流站侧接入四川电网的推荐方案为:两回直流送端换流站推荐采用布置在布拖县先锋站址的“一站”方案,布拖换流站分一、二期两步实施,其中一期为白鹤滩—江苏送端换流站(与500 kV布拖变电站合建),二期为白鹤滩—浙江送端换流站。金沙江二期2回特高压直流送端换流站侧接入四川电网的方案如图1所示。金沙江二期2回特高压直流送端侧换流站地处川西清洁能源富集汇集送出地。



图1 金沙江二期特高压直流送端换流站接入系统方案

3 提升金沙江二期特高压直流外送电举措

3.1 四川电网丰水期弃水问题

3.1.1 现四川电网调峰弃水问题

根据电力规划,到2020/2025年底四川电网水电总装机将分别达到约80.46 GW/128.9 GW,整个“十三五”期间四川水电装机总量约占全省总装机的80%。一方面水电占四川电网比重大,但大部分水电站调节性能不理想;另一方面,四川电网日负荷峰谷差较大,日最小负荷率仅约为0.55。这种水电出力特性和四川电网负荷特性的较大不匹配,决定了整个丰水季节(主要是6—10月)四川电网始终存在较大的水电调峰弃水及四川电网运行经济性不

理想。此外,根据计算,未来随着四川电网“十三五”中后期一大批具有相当容量规模的新能源(太阳能与风电)上网,若四川调度仍维持现在优先消纳本省上网新能源,则丰水期四川全省的大量弃水电量问题将会进一步增加。

近几年四川调度通过一系列优化整个四川电网运行方式的举措,减少了部分四川电网丰期弃水问题,但丰期四川电网调峰弃水问题依然存在,且弃水电量的数值仍相当可观。2016、2017年四川电网实际全年弃水电量均高达约14.0 TW·h^[3];2018年四川电网全年弃水电量有所降低,但仍达到约12.2 TW·h。

3.1.2 2025年四川电网弃水电量

根据四川电网规划,2025年四川电网全口径的需电量和最高负荷需求预测分别达到350.0 TW·h和59 GW;2025年四川电网总电源规模(现有与规划水电、火电、新能源)达到约163.5 GW(其中包括金沙江二期白鹤滩水电站16 GW);2025年川电通过“7直+6交”的交直流外输通道总外送电规模达到54.6 GW。

四川电网是以水电为主、火电为辅、新能源为补充的混合电源结构系统。“十三五”期及以后,四川全网电源开机已充分兼顾考虑了多方面因素:1)合理与优先消纳四川的清洁能源(水电/风电/太阳能光伏)且同时避免丰水期较多的弃水弃能问题;2)满足四川省保安电源开机、电网运行安全的最小火电开机。

若金沙江二期2回特高压直流输送电量仅为对应送端侧白鹤滩水电站本身所发电量,不考虑白鹤滩水电站参与四川全网丰水期调峰运行(即无优化电力举措),此条件下2025年四川电网电量平衡计算结果如表2所示(其中包括金沙江二期2回特高压直流经济性的年利用小时数)。

2025年四川全网电力电量平衡计算结果表明:1)四川全网2025年全网调峰弃水电量高达约41.0 TW·h;2)金沙江二期2回特高压直流的年利用小时数约为3900 h(平水年)。

3.1.3 金沙江二期2回特高压直流工程及相关电网条件特点分析

针对四川电网近年来一直存在的丰水期较大弃水电量问题,相关文献提出了降低四川电网丰水期弃水电量与提高川电外送电的优化电网运行措施方案^[5-7]。相较于文献[5-6]中所研究项目内容与

电网研究背景条件,作为金沙江二期2回特高压直流送端侧白鹤滩水电站,其“十四五”期规划建设更具自身特点,主要有:1)白鹤滩水电站总装机容量更大(总装机容量16 GW)且全年水电站调节性能相对更优(年调节),但水电站本身年利用小时数相对不高(平水年3818 h);2)金沙江二期2回特高压直流总输电容量大(16 GW)且送端侧两换流站电气距离相对较近,作为白鹤滩水电站电力外送的配套电网工程年利用小时数(平水年约3900 h)存在可提升空间;3)“十四五”期四川全网丰期弃水电

表2 2025年四川电网电量平衡计算

| 项目 | 无优化 电力举措 (6—10月) | 电力举措 | |
|--|------------------------|------------------|------------------|
| | | 电力举措1 (6—10月) | 电力举措2 (11—5月) |
| 1. 系统需要电量 (本省负荷+外送) /(10 ⁸ kW·h) | 5613 | 5663 | 5688 |
| ①负荷电量 | 3050 | 3050 | 3050 |
| ②外送电量 | 2563 | 2613 | 2638 |
| 2. 水电可发电量 (水电装机总量 128.9 GW)/ (10 ⁸ kW·h) | 5 482.6 | 5 472.6 | 5 472.6 |
| ①水电发电量 | 5 061.4 | 5 111.4 | 5 111.4 |
| ②弃水电量 | 411.2 | 361.2 | 361.2 |
| 3. 风电发电量 (风电装机总量 11 GW)/(10 ⁸ kW·h) | 200.5 | 200.5 | 222.6 |
| 4. 光伏发电量 (光电装机5 GW) /(10 ⁸ kW·h) | 60 | 60.0 | 63.0 |
| 5. 火电发电量 (火电装机 总量16.6 GW) /(10 ⁸ kW·h) | 291.3 | 291.2 | 291.0 |
| 6. 电源全年利用 小时/h | | | |
| ①水电 | 3927 | 3966 | 3966 |
| ②风电 | 1823 | 1823 | 2023 |
| ③光伏 | 1200 | 1200 | 1260 |
| ④火电 | 1755 | 1754 | 1753 |
| 7. 特高压直流工程 年利用小时/h | | | |
| ①白鹤滩—江苏 | 3900 | 4212 | 4370 |
| ②白鹤滩—浙江 | 3900 | 4212 | 4370 |

量更为突出,经计算弃水电量更高达约41.12 TW·h(详见表2);4)“十四五”期四川全网规划新能源总量亦达到约16 GW,新能源的电能消纳在省内市场趋于饱和。

3.2 增加金沙江二期特高压直流外送电的技术理论分析

1)一方面,从满足四川富余清洁能源外输角度分析考察。如前所述,若金沙江二期2回±800 kV特高压直流输电工程功能定位仅为全年输送金沙江二期白鹤滩水电站本身所发电量,其全年直流工程年利用小时并不高(平水年利用小时约为3900 h,枯水年工程利用小时则更低约3000 h);但金沙江2回特高压直流输电工程送端侧换流站均处于整个川西南清洁能源(水电、风电、太阳能)富余送出通道电网节点上,而四川电网本身全年均有较多富余清洁能源没有被充分利用,四川电网2025年全年清洁能源(水电与新能源)均有不同程度的弃能(弃水、弃风、弃光)问题,具体为:2025年四川电网丰水期(6—10月)弃水电量高达约41 TW·h(如表2所示);2025年四川电网平枯水期(11月至次年5月)新能源电力所发电量不能充分消纳。

因此,在不增加川西南500 kV主干电网通道建设投资条件下,可考虑把四川电网全年富余清洁能源就近经金沙江二期2回特高压直流输电平台实现外送,有效补充该2回特高压直流工程的全年外送清洁能源电量。显然,部分四川电网全年富余清洁能源借助金沙江二期2回特高压直流输电平台实现外送后,既减少四川电网丰水期水电弃水并增加新能源平枯期电能消纳,同时亦对应增加金沙江二期2回特高压直流输电工程年利用小时数。

2)另一方面,从水电站水电调节性能与丰小调峰电网运行角度考察。如前所述,金沙江二期白鹤滩水电站具有年调节的优良水电调节性能(如表1所示),全年无论是丰水期(6—10月)还是平枯期(11月至次年2月)电站预想出力数值较大而电站平均出力数值不高,且预想出力与平均出力差值相对较大,均说明水电站在本身所发电量确定条件下有较好水电调节性能。

因此在丰水期为减少四川全网丰腰及丰小方式下较大调峰弃水电力电量,此时可考虑适当安排白鹤滩水电站部分水电机组(2~6台)参与全网丰腰、丰小调峰运行方式进行配合(具体为丰腰、丰小方

式部分水电机组压出力或停机,但因电站本身理想水库调节性能,全天电站本身并不损失所发电量)。此时,送端换流站近区 500 kV 电网接纳川西南富余清洁电能再经金沙江二期直流输电平台实现外送。在平枯期,水电站本身所发电量相对更有限且川西南电网输送潮流较丰期明显降低,此时再接纳附近电网转送的富余新能源实现外输没有问题。

3.3 提升金沙江二期特高压直流外送电举措

充分利用四川电网规划建设金沙江二期 2 回特高压直流输电平台的强大送电能力以及白鹤滩电站良好的年调节性能,在保证电网安全稳定运行条件下,合理与适当补充接收四川电网富余清洁能源(包括丰水期季节性水电与平枯期新能源所发电量),具体电网运行的电力举措如下:

1) 电力举措 1: 丰水期(6—10 月),白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台接收四川电网部分富余季节性水电(弃水电量),金沙江二期 2 回特高压直流均按照全天 24 h 近直线满负荷送电。通过调整增加金沙江二期 2 回特高压直流在丰期外送电量,以部分减少“十四五”期及以后四川电网存在的季节性水电电能(弃水电量),从而亦增加了金沙江二期 2 回特高压直流工程的年利用小时数。

从表 2 可见,通过电力举措 1,2025 年四川电网丰水期弃水电量可减少约 5000 GW·h,对应可增加金沙江二期 2 回特高压直流工程的年利用小时数约 312 h。

2) 电力举措 2: 平枯水期(11 月至次年 5 月),金沙江二期特高压直流输电平台接收四川电网部分富余新能源(风电场与太阳能光伏)所发电量,从而增加金沙江二期 2 回特高压直流在平枯期外送电量。

从表 2 可见,通过电力举措 2,2025 年四川电网平枯期可再增加新能源(风电场与太阳能光伏电站)外送电共约 2500 GW·h,对应可再增加金沙江二期 2 回特高压直流工程的年利用小时数约 158 h。

综上所述,若 2025 年四川电网全年电网运行方式下丰水期(6—10 月)采取电力举措 1,平枯水期(11 月至次年 5 月)采取电力举措 2,则全年可增加金沙江二期 2 回特高压直流工程的年利用小时数共约 470 h,发挥工程的经济效益相当可观;同时亦有利于进一步减少四川弃水电量,在更大范围内实现资源优化配置。

4 川西南电网运行适应性分析

金沙江二期 2 回特高压直流送端侧两换流站地处四川西南的凉山州布拖县境内,两换流站与布拖站合建。送端侧两换流站接入四川交流系统方案为就近接入川西南 500 kV 电网,且均为整个川西南(凉山州、攀枝花、甘南)富余清洁能源外送四川 500 kV 主干电网的送电通道上(详见图 1)。

鉴于整个川西南境内(包括凉山州、攀枝花、甘孜南部)本即为四川最主要清洁能源(大中型水电站、风电以及太阳能光伏)资源的富集地,为满足该地区电力送出的配套 500 kV 及以上交直流输电线路现已投运及规划建设项目较多。“十四五”期间川西南共有 4 回特高压直流项目(1 回锦屏—苏南、1 回雅中直流、2 回金沙江二期直流)相继建成投运,川西南更多富余清洁能源大部分将直接通过该 4 回特高压直流项目外送华东电网,仅剩余部分富余电能通过川西南 500 kV 交流线路外送四川主干电网。

经电网潮流稳定计算校核,整个“十四五”期丰水季期间,川西南外送四川主干电网的丰大方式下的最大送电能力为电网安全稳定运行的控制方式。

1) 在满足电网安全稳定(热稳及暂稳)运行条件下,“十四五”期规划的川西南电网网架能够适应与满足丰水期白鹤滩电站调峰运行方式下的电网安全稳定运行条件。

2025 年电网丰小调峰运行方式下,若考虑白鹤滩水电站安排 6 台机组停机以配合金沙江二期平台接纳更多富余季节性电能外输,即金沙江二期两特高压直流送端侧换流站需接纳川西南及近期电网富余清洁能源 6 GW),此时,与白鹤滩左岸、右岸换流站一级、二级相连 500 kV 电网(近区电网接线方案示意图如图 1 所示)相关线路输送潮流分别约为:

① 橄榄—布拖(白鹤滩左岸换流站)1 回 500 kV 输送潮流约为 690 MW;

② 橄榄—普提 1 回 500 kV 输送潮流约为 1130 MW;

③ 盐源—普提 1 回 500 kV 输送潮流约为 1236 MW;

④ 月城—布拖(白鹤滩左岸换流站)2 回 500 kV 输送潮流约为 2×900 MW;

⑤ 普提—白鹤滩右岸换流站 3 回 500 kV 输送

(下转第 66 页)

变电站序列控制远方操作安全风险防治与管控

邹沛恒¹, 代宇涵², 郭果³, 郑永康²

(1. 国网乐山供电公司, 四川 乐山 614000; 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:通过对变电站序列控制远方操作关键环节进行解析,梳理了顺序控制远方操作过程中的安全风险,同时从不同角度提出对应安全防护措施,着重阐述远方操作各环节安全风险以及防控措施。对强化顺序控制远方操作的流程风险与安全防护,保证变电站顺序控制的安全稳定执行,大幅缩短变电站操作占用时间,同时减少相关经济损失与社会影响有着重要意义。

关键词:序列控制;智能操作;风险管控;预演校验;网络安全

中图分类号:TM63 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2019)05-0061-06

Prevention and Control of Safety Risk in Remote Operation of Substation Sequence Control

Zou Peiheng¹, Dai Yuhan², Guo Guo³, Zheng Yongkang²

(1. State Grid Sichuan Leshan Power Supply Company, Leshan 614000, 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:Through the analysis of the key links of remote operation of substation sequence control, the safety risks in the process of remote operation of sequence control are investigated, and the corresponding safety protection measures are put forward from different angles. The focus is on the safety risks and prevention and control measures in each link of remote operation. If the process risk and safety control of remote operation of sequential control are strengthened, it is of great significance to ensure the safe and stable execution of substation sequential control, greatly shorten the operation time of substations, and reduce the related economic losses and social impact.

Key words:sequential control; intelligent operation; risk management and control; preview check; network security

0 引言

近年来随着调控一体化和变电站无人值守的推进,传统电网自动化、智能化程度的逐步提高,需要在调度主站、监控中心、变电站实现运行状态的快速转换。序列控制作为系统控制指令的序列处理方式,以一定时序及闭锁逻辑逐条发出校验指令,自动执行完成全部控制指令。将该技术运用在变电站设备倒闸操作中,可实现操作任务一键启动、操作步骤顺序执行、防误联锁智能校核、设备状态自动判别,从而实现变电站状态的一键转换。变电站序列控制

(或称为变电站顺序控制或一键顺控)对于减少人工手动操作量,降低人员误操作概率,防止电网大面积停电事故,保障坚强智能电网的稳定运行有着重大意义。

依据国家电网公司运检部关于印发变电站一键顺控改造技术规范(试行)的通知,部分省份进行了变电站顺序控制试点,形成了一定的成功应用经验^[3-5]。上述成功经验,大多是陈述顺序控制操作的具体实施方案和实际应用效果,少有涉及顺序控制远方操作全过程风险分析防治与管控的专项研究。

下面从顺序控制远方操作具体过程入手,对各

个环节进行对应的安全分析,以调端与站端通讯主流的 IEC104 通信规约为研究对象^[6-8],分析了目前顺序控制远方操作主要面临的安全风险和应对措施。其中操作环节安全风险,主要包括以下3方面:1)调控主站与顺控场站在顺序控制远方操作交互过程中顺控配合失调,造成的操作失效甚至操作错误的风险;2)主站在对单条线路连接的多端场站进行综合顺序控制时,命令有序执行的配合风险;3)顺控场站遇到多个调控主站并发顺序控制远方命令时不当处理,造成操作异常中断甚至误操作的风险。针对上述远方操作安全风险,提出基于顺序控制操作命令展宽时间配合设定方法和调控主站命令并发预防与闭锁防范机制。

1 顺序控制技术架构简介及操作流程分析

智能电网调度控制系统顺序控制功能涉及调控主站、变电站监控系统以及数据传输等,技术架构如图1所示。

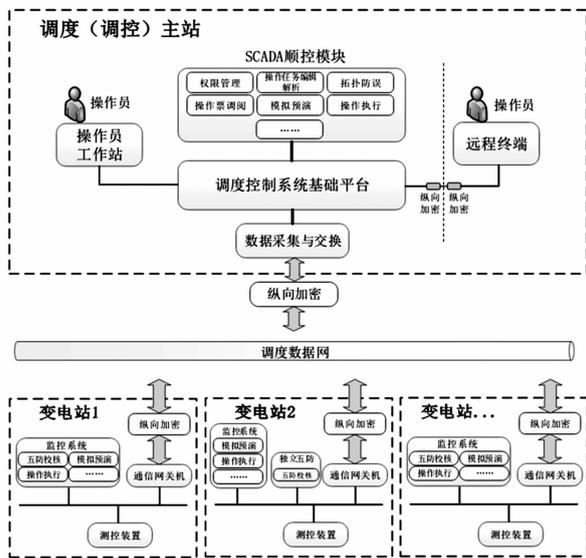


图1 智能电网调度控制系统顺序控制功能技术架构

调控主站基于智能电网调度控制系统基础平台,实现 SCADA 顺序控制功能,主要包括权限管理、操作任务编辑解析、拓扑防误、操作票调阅、模拟预演、操作执行等功能。在操作员工作站或经过纵向加密网络延伸的远程终端上,发起顺序控制操作。操作命令在调控主站和变电站监控系统间进行交互,途经主站服务器、变电站通信网关机、变电站监控后台、智能五防系统等。借由变电站监控系统中

的一键顺控功能模块,与独立五防系统、间隔测控装置配合完成顺序控制的预演、校验与执行。

1) 系统通讯方式

调度主站 SCADA 系统有 OPEN3000 系统与 D5000 系统 2 种,在此以 OPEN3000 系统为例进行分析。一键顺控在启动、调票、预演、校验、执行各阶段皆需要调度主站 OPEN3000 系统、智能五防系统及变电站后台监控进行信息交互。考虑到工程实施的规范性与通用性,建议与调度自动化 OPEN3000 系统之间接口可采用扩展了转发遥控功能的 DL/T 634. 5104 规约通信,与智能五防主机建议使用 DL/T 634. 5104 规约通信,若厂家相同可使用私有协议。

2) 一键顺控流程

一键顺控功能实现需要 OPEN3000 系统、变电站后台监控系统以及智能五防主机之间的顺控数据交互,从而实现 OPEN3000 系统与变电站顺控命令的传送与防误校验。顺控运动信号、遥控命令、防误校验信息交互流程如图2所示。

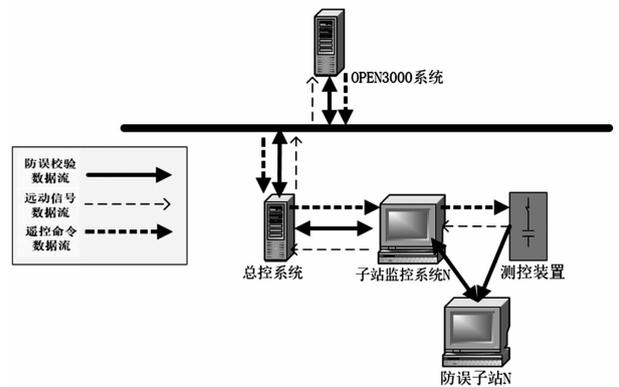


图2 顺控信息交互流程

一键顺控功能包括顺控票管理和一键顺控操作执行两大部分,顺控操作先进行操作票固化,后开展操作对象的一键顺控操作。正常情况下,顺控过程中操作序列如果发生控制顺序错误,智能五防在校验后闭锁并否定返校。若遇到变电站端返回超时、通道短时间中断恢复等情况时,则启用操作指令的重发机制。重发次数可人工设置,若重发次数超出阈值且仍未收到变电站返回信息时,应终止操作流程并主动提示。调控主站、变电站监控系统均应配置上述重发、终止机制,保证顺序控制中的超时、中断情况的正确处置,及时重新发送操作指令或中止发送自动返回到正确状态,保证顺序控制全过程安全稳定。

2 顺序控制远方操作安全风险及防控分析

根据网络安全风险评估办法并结合国家电网公司运检部关于印发变电站一键顺控改造技术规范(试行)的通知与国家电网调度中心关于印发智能电网调度控制系统顺序控制功能规范的通知,具体对顺序控制功能远方操作系统构架与流程来进行风险辨识及评估,顺序控制远方操作主要考虑以下三大类安全需求,即网络信息安全、管理安全及操作流程安全。如表1所示。

表1 顺序控制远方操作安全需求

| 安全类型 | 薄弱环节 | 危险点描述 |
|--------|----------|-------------------------|
| 网络信息安全 | 隔离、加密装置 | 网络信息截取、窃听、篡改风险 |
| 管理安全 | 权限管理 | 操作人员权限管理等导致的误操作风险 |
| 操作流程安全 | 主、子站顺控模块 | 主子站命令接收展宽配合失调导致的拒动、误动风险 |

2.1 网络信息安全

从网络通讯信息安全理论分析^[9]可知,网络环境中的安全攻击分为主动攻击与被动攻击两种。主动攻击主要是通过篡改信息、伪造或采用DOS攻击达到欺骗用户、破坏网络、违规获取特权达到破坏目的。被动攻击相比于主动攻击不对数据信息做任何修改,主要是通过截取/窃听、破解数据流的方式在未经用户同意和认可的情况下获得相关信息与数据。通常情况下,可能同时遭受主动与被动方式相结合的混合攻击。

网络环境下主要通过网络隔离、防火墙加固、数据加密、双因子认证、强制访问控制及三权分立等措施防御攻击。国家电网公司规定电力网络中的信息按照安全需求应采用业务网络分区与信息多维防护等措施来提升网络安全水平。结合顺序控制远方操作信息传输环节,主要应在横向隔离、纵向加密、发起控制等方面采取针对性的安全措施,具体措施如下:

1)纵向加密运用非对称加密算法对在生产大区中传输的主子站顺序控制交互信息进行非对称算法加密与解密,在通信通道上完成信息的密文传输,保证信息的安全性与保密性,预防信息被截取或窃听后恶意利用;

2)横向隔离运用在顺序控制信息涉及的不同网络区域间,通过隔离装置的横向阻隔作用,保证网络中跨区域的信息交互和数据访问都经过了授权与管控,避免出现非法的流程连接与访问;

3)发起控制在调度主站和场站监控上进行功能部署,只允许具备权限的用户调用符合既定规则的顺序操作票,不符合上述规则的请求不允许发起命令与执行。发起控制从命令发起源上避免了无权限的用户的非法控制和有权用户的违规操作。

2.2 管理安全

针对管理风险,通过对此类风险进行风险识别,防范非法用户登录操作或操作流程不规范等风险。主要采用人员多重认证、权限管理机制、双人双机监护等措施。其中:

1)人员多重认证。提供基于调度数字证书、用户和密码、指纹、人脸识别等鉴别技术的两种或两种以上组合方式对用户身份进行鉴定。通过对操作人员的多重认证,保证实际操作人员操作权限的合法性。

2)权限管理机制。支持完善的权限管理机制,按照省地县操作权限,只允许各层级单位授权用户登录维护操作。并对操作用户进行双重鉴别与精细化管理,确保操作的安全可靠。

3)双人双机监护。按照双重监护、多重验证的要求,人员必须经过可靠验证后才可执行操作。操作发起前应核对监护信息涵盖的操作场站、操作设备、设备源态和目标态等信息,并落实操作、监护分离核实制度,避免单独操作导致的误操作。建设系统监护信息场站、设备、源态、目标态的核实纠错功能,让系统记录每一项操作工作对应的操作、监护人员,保证顺控操作具有可追溯与逆向分析功能。

2.3 操作流程安全

顺序控制远方操作包括设备“运行”、“热备用”、“冷备用”3种状态转换,由于受到网络攻击后可能产生状态的错误转换或非完全转换,对于运行的电力系统是非常严重的事故,严重威胁电网整体的稳定安全。分别从调控主站发起的顺序控制操作包含的两种不同模式(综合控制和分步控制模式)进行操作流程安全分析。综合控制模式下,站端会对调度综合控制指令进行解析,利用下发的预置指令包含原始调度操作指令这一特点,采用操作执行或撤销复验操作预置返校信息的方式确保流程安全。分步控制模式下对操作过

程环节关键信息进行校验,并加入人工确认与执行步骤,采用主动校验调度下令信息与变电站端反馈信息一致性的方式确保流程安全,并增加异常操作终止与错误主动提示机制。

3 顺控操作流程风险分析及应对措施

顺控操作流程风险主要是主子站顺控配合、单主站多场站操作并发、多主站单场站操作存在的风险。

1) 主子站顺控配合失调风险

分析顺序操作流程,错误的操作序列可通过操作预演与五防闭锁进行识别和中止。操作异常延时或响应可通过操作命令重发或重发次数阈值机制以降低网络延时影响与操作中中断复启动。在这样的操作模式下,调控主站的命令重发总时长与子站网关机、顺序主机设置的命令接收展宽时长的配合尤其重要。

当调控主站设置的命令重发总时长与子站网关机、顺控主机设置的命令接收展宽不匹配时,远方操作就有可能发生误动作,如图3所示。

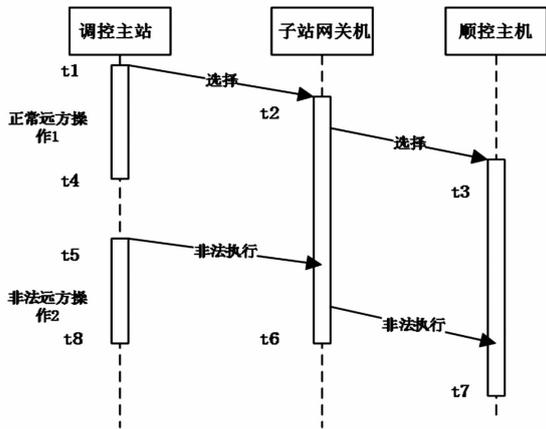


图3 主子站顺控配合失调导致误操作风险分析

①预置命令:主站按照实际顺控操作情况需要对变电站内某间隔进行状态转换操作,在 t1 时刻启动正常流程的顺控命令,子站网关机在 t2 时刻接受命令,顺控主机 t3 时刻正确接收命令经过模拟预演后上送操作预置返校结果,等待主站下发执行命令。

②执行超时:在网络异常情况下,调控主站程序未正常下发执行命令或者网络原因导致命令未如期到达,按照正常流程全启动操作指令的重发机制。若重发次数超出阈值仍未收到返回信息,调控主站的远方操作应在在 t4 时刻超时退出,所以正常情况

下子站网关机接收展宽(t2 - t6)与顺控主机的执行展宽(t3 - t7)只应略大于调控主站的命令启动、重发时长(t1 - t4),从而达到执行超时情况下自动终止命令执行。

③误操作:若子站网关机命令接收展宽与顺控主机命令执行展宽设置过长,由于网络拥堵造成在 t5 - t8 时段顺控命令重发或因受到攻击造成非法的执行命令发送,同时子站网关机接收展宽(t2 - t6)与顺控主机执行命令展宽(t3 - t7)设置过长,导致本该中止的命令被顺控主机下发执行,此时就产生了误操作。

同理,如果子站接受、执行命令展宽设置比主站发送命令展宽短,有可能产生正常顺控命令无法执行或执行成功率低的情况。因此针对主子站顺控配合失调的问题,调控主站、子站网关机、顺序主机三者设置的命令展宽应该是合理的逐级递增。

2) 单主站多场站操作并发风险

某些特殊情况下,线路运行状态的转换涉及电能收发两端的场站的顺序控制配合,当线路存在 T 接时还会有更多场站的配合。针对多场站协调顺序操作风险,应按照顺序控制操作规则检验多站顺控票的安全性、合理性,预先向涉及场站下发顺控预置锁定命令,避免相关变电站接收其他主站顺控命令或同主站的其他顺控命令。同时严格预演、校验、执行、回复机制,每执行下一步操作时都应校验先前执行步骤是否已到位,利用全步骤、全流程校验机制保证顺控命令执行的安全性、可靠性。

3) 多主站单场站操作风险

场站应设置多主站顺序控制防范机制,同一时刻只允许单个调控主站进行顺序操作,其他调控主站的操作指令应被闭锁或进入排队机制。为进一步防范多主站操作风险,变电站在接收到主站的顺序操作启动命令后,应锁定命令接收方,若中途接收到其他主站的顺序控制信号应丢弃错误操作指令,继续锁定、执行原主站操作流程。

4 工程试点情况

针对上述流程安全分析情况,为了验证相关技术安全措施的有效性,理顺顺控研发思路,检验操作校验原则,在四川攀枝花 220 kV 禹王宫变电站、110 kV 平地变电站与眉山 110 kV 龙亭变电站、110 kV 铝

城变电站进行顺控试点工程实践,以 220 kV 禹王宫变电站(该站为智能变电站,监控系统为南瑞科技 NS3000,全站 2 台主变压器、4 把中性点接地开关、220 kV 侧为双母单分段运行、4 个出线间隔,110 kV 侧为双母运行、6 个出线间隔,35 kV 侧为双母运行、10 组电容器,2 个站用变压器为例,对该站 110 kV 母联 112 断路器进行现场顺控操作实验。

1) 网络信息安全情况

根据顺控网络安全要求,发起控制命令前需预先检查命令发起者身份,同时兼具密码、调度证书双重认证。为了验证顺控系统是否符合网络信息安全要求,我们用不具有控制权的用户发起 220 kV 禹王宫站 110 kV 母联 112 开关冷备用转热备用顺控命令,系统提示“收到的系统报错 - 命令 - 条件 - 不满足”,命令中止。接着我们在未安装证书的主站端发起同样的顺控命令,系统提示“收到的系统报错 - 命令 - 条件 - 不满足”,命令中止。

2) 管理安全情况

根据顺序控制远方操作流程,结合现场实际情况,制定了《智能电网调度控制系统顺序控制远方操作业务指导书》《智能电网调度控制系统顺序控制远方操作流程规范》《智能电网调度控制系统顺序控制远方操作监护管理规则》等规则、规范,强化变电站序列控制远方操作流程的规范性与安全性。

3) 操作流程风险管控

顺控操作利用操作票预置、校验以及多主站操作互斥等安全技术手段保护远方操作流程规范性和安全性。以检验顺序操作票预置与校验机制为例,在 220 kV 禹王宫变电站 110 kV 母联 112 断路器 I 母隔离开关合、II 母隔离开关分的状态下,顺控主站端发起错误的 110 kV 母联 112 断路器冷备用转热备用操作命令,提示“收到的防误系统报错 - 第 2 步 - 条件 - 不满足”,命令中止。以检验多主站操作互斥为例,在主调与备调以 1 s 的时差发起 220 kV 禹王宫变电站 110 kV 母联 112 断路器冷备用转热备用,备调提示“收到的系统报错 - 命令 - 条件 - 不满足”,备调操作中止,主调顺控操作正常执行。可以证明顺控命令发送至监控系统顺控模块后命令读写、执行流程可有效预防操作流程风险,具体流程如图 4 所示。

四川主子站顺序控制试点期间,上述变电站现场运行稳定,顺序控制命令发起、操作票调阅、操作

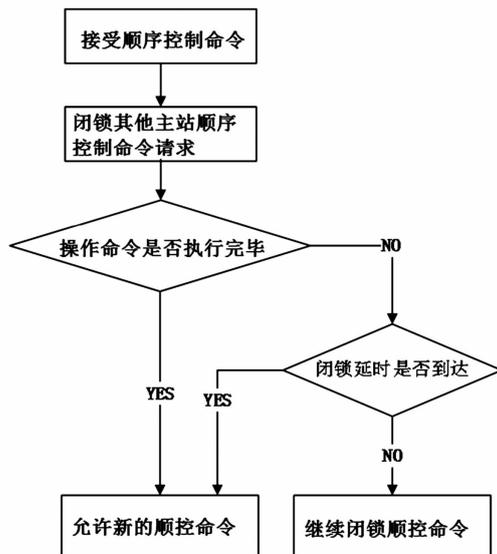


图 4 监控系统顺控模块读写顺控命令流程图

预演、五防校验、命令执行等功能正常,相关风险防控措施经测试验证安全有效。表明所提相关安全分析与风险防控措施正确、合理、有效、可推广,为远方顺序控制操作安全风险防控提供了部分理论基础和实践经验。

5 结 语

目前变电站序列控制改造正在全国大规模的推广,顺序控制的远方操作与安全风险防控值得深入研究。通过对顺序控制远方操作重要环节进行多维度分析,多角度阐述面临的流程、管理、操作风险并逐一提出对应的安全防护措施。保证顺序控制远方操作实际应用的安全与稳定,对实现变电站系统运行状态的快速转换,全面提升运行操作效率有着非常重要的意义。所研究成果应用在攀枝花 220 kV 禹王宫变电站、110 kV 平地变电站与眉山 110 kV 龙亭变电站、110 kV 铝城变电站顺序控制改造工程中,试点结果满足试点工作技术路线各项要求,变电站系统状态转换安全稳定。

参考文献

- [1] 毛志强,熊倩,李彬,等.智能变电站顺序控制技术应用研究[J].山东电力技术,2016(12):25-28.
- [2] 韦会琪.电力网络中的安全问题与防范对策思考[J].中国新技术新产品,2016(23):186-187.
- [3] 言艳辉,刘坚.变电站顺序控制的应用探究[J].电工技术,2018(8):48-49.

[4] 皮志勇,李勇,吴继雄,等. 变电站顺序控制的管理及技术研究[J]. 科技创新导报,2017(19):13-15.

[5] 陈达文,李佳. 智能变电站顺序控制在站端的应用[J]. 中国新技术新产品,2016(20):29-30.

[6] 王雷,史金伟. IEC 104 规约中程序化控制的扩展应用[J]. 供用电,2012,29(4):52-53.

[7] 李国杰. IEC104 协议在变电站系统的应用与测试[J]. 电力系统保护与控制,2004,32(1):43-45.

[8] 高雪飞. 基于 104 规约的运动网络通信可靠性原理探讨[J]. 无线互联科技,2016(19):9-10.

[9] 郭国林. 基于网络通讯中信息安全的保障研究分析[J]. 中国新通信,2017(6):15-16.

作者简介:

邹沛恒(1985),本科,从事电力系统继电保护工作;
代宇涵(1989),硕士,从事电力系统调度自动化技术工作。

(收稿日期:2019-05-28)

(上接第 60 页)

潮流约为 3×1000 MW;

⑥白鹤滩左岸电站—布拖(左岸换流站)4回500 kV 输送潮流约为 4×1250 MW;

⑦白鹤滩右岸电站—右岸换流站4回500 kV 输送潮流约为 4×1250 MW;

⑧普提—洪沟3回500 kV 输送潮流约为 3×360 MW。

上述500 kV 输电线路导线截面为 4×400 mm²/ 4×500 mm²/ 4×720 mm²(分别对应夏季热稳极限分别约为2 GW/3 GW/3.9 GW)。因此,白鹤滩送端换流站丰小调峰运行方式下,近期西南电网完全可满足电网的热稳安全运行且有相当裕度。

2)平枯水期随着水电出力的逐渐下降,整个川西南多回交直流外送通道输电容量整体亦随之降低,川西南外送输电能力裕度相对更大,因此平枯期部分增加新能源(风电与太阳能)所发电量不会增加送电通道的输电压力,其所发电能完全可就近接入川西南220 kV及以上主干电网逐级汇集升压后,再经金沙江二期的2回特高压直流输电平台外输区外电网。

总之,现有及规划川西南500 kV及以上交直流电网能适应丰期调峰运行及平枯期川西南更多富余清洁能源经2回金沙江二期直流输电平台外输区外电网。

5 结 语

上面根据金沙江二期2回特高压直流输电工程本身的特点与优势,结合白鹤滩水电站水电出力特性、“十四五”期新能源及四川电网电力规划发展状况等,提出了提升金沙江二期特高压直流外输电的

电力举措:丰水期白鹤滩水电站参与四川电网调峰运行,金沙江二期特高压直流输电平台全年差异化接收四川电网部分富余清洁能源(季节性水电与新能源电量)。所提举措在既实现减少四川电网丰期大量弃水电量的同时,亦实现四川电网全年更多富余清洁能源外送,提高了金沙江二期2回±800 kV特高压直流输电线路利用小时数。通过计算表明2025年丰水期可实现减少四川电网弃水约5000 GW·h,可增加金沙江二期2回±800 kV特高压直流输电线路年利用小时数约470 h。

参考文献

[1] 国网经济技术研究院有限公司. 白鹤滩—江苏特高压直流输电工程预可行性研究[R]. 北京:国网经济技术研究院有限公司,2018.

[2] 国网四川省电力公司. 四川“十三五”电网发展规划总报告[R]. 成都:国网四川省电力公司,2015.

[3] 国网四川省电力公司. 2018年四川电网运行方式[R]. 成都:四川省电力公司,2018.

[4] 国网四川省电力公司. 2019年四川电网运行方式[R]. 成都:四川省电力公司,2019.

[5] 陈汉雄. 四川电网季节性电能外送曲线优化[J]. 中国电力,2013,46(12):144-150.

[6] 陈汉雄. 水风互补四川清洁能源外送优化[J]. 中国电力,2017,50(9):37-43.

[7] 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.

作者简介:

陈汉雄(1971),硕士,教授级高级工程师,从事电力系统规划设计及直流输电系统控制研究工作;

李晓明(1972),高级工程师,从事电网勘测设计。

(收稿日期:2019-05-24)

水平荷载对支盘桩受压承载力的影响分析

王 红^{1,2}, 彭社琴^{1,2}, 郑卫锋³, 孙珍茂⁴

- (1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
4. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610059)

摘要:针对单独竖向受压荷载作用和受压+水平组合荷载作用两种情况,采用数值分析,对支盘桩的沉降特征、桩身轴力分布、支盘阻力、竖向承载力等承载性能进行系统地分析,进一步确定了支盘桩受压承载力的大小。研究表明:桩身轴力随深度增加而减小,在支盘上下处明显降低;在支盘荷载量级较小时,相比于单独受压荷载作用下,受压+水平组合荷载作用下的桩顶沉降较大。水平荷载的存在会对支盘桩的受压承载力产生一定程度的影响,会使受压承载力略有增加,但总体上影响不太大。

关键词:支盘桩;竖向受压承载力;水平荷载;数值模拟

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0067-05

Analysis on Influence of Horizontal Load on Bearing Capacity of Branch Pile

Wang Hong^{1,2}, Peng Sheqin^{1,2}, Zheng Weifeng³, Sun Zhenmao⁴

- (1. State Key Laboratory of GeoHazard Prevention and GeoEnvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: For the two cases, that is, individual vertical compressive load and combined horizontal compressive load, the numerical analysis method is adopted to systematically study the bearing behaviors of branch pile, including settlement, distribution of shaft axial force and branches' friction etc. The magnitude of vertical bearing capacity of branch pile is further obtained. The research shows that the axial force of pile decreases with the increase of depth, and decreases obviously at the upper and lower sides of the branches. Compared with individual compressive load, when the load is less, the settlement is greater at the top of the pile which is borne combined load. The existence of horizontal load has an effect on bearing capacity of branch pile, which makes bearing capacity of branch pile increase slightly, but not too large.

Key words: branch pile; vertical bearing capacity; horizontal loading; numerical analysis

0 引言

支盘桩作为一种新型桩,具有承载力高、变形沉降小等优点,因而具有良好的经济效益。国内外学者对支盘桩承载力性状在近年来做了较多的研究,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41272333)

但目前大部分研究主要是针对单独荷载作用下支盘桩的受压承载力,支盘桩一般主要设计用来承担竖向(受压)荷载,如文献[1-4]通过静载试验对支盘桩的受力性状进行了研究。文献[5]还结合有限元模拟分析法(finite element method, FEM)系统地分析了支盘桩的承载机理和荷载传递性状,探索了支盘桩高承载力和低沉降量的内涵。文献[6-17]均对竖向

受压荷载作用下支盘桩的承载性能进行了研究。

然而,由于工程结构在其施工和使用过程中受荷的情况复杂多变,支盘桩在其受竖向受压荷载作用为主的情况下,水平力也可能同时存在。为探讨水平荷载对支盘桩承载力的影响,分别讨论了在单独竖向受压荷载作用下和在受压+水平组合荷载作用下支盘桩的受压承载力的大小,分析可能出现的水平荷载对支盘桩受压承载力的影响。

1 计算方案

以数值模拟作为计算方法,在数值模拟结果的基础上,先对竖向受压荷载作用下支盘桩的承载性能进行研究分析;再对受压+水平组合荷载作用下支盘桩的承载性能进行研究分析。对选取的桩型通过分级加载(竖向受压、竖向受压+水平联合作用),模拟支盘桩的静载荷试验过程,通过获取荷载-沉降关系($Q-s$)曲线用以确定单桩承载力。进一步对比单独竖向受压荷载作用下与竖向受压+水平荷载作用下受压承载力的异同,分析得出水平荷载的存在对支盘桩受压承载力的具体影响。

1.1 数值模拟计算模型

计算模型主要包括桩体和桩周土体两大部分。

1) 支盘桩

在广泛收集已有挤扩支盘桩常用尺寸参数的基础上,拟定本次数值计算桩的参数见表1,其示意图见图1、图2。

表1 支盘桩参数

| 桩径 /m | 桩长 /m | 支盘直径 /m | 支盘数 /个 | 支盘角度 /(°) |
|----------|----------|------------|-----------|--------------|
| 0.7 | 20 | 1.4 | 3 | 45 |

注:上盘中心位于距桩顶5倍桩径处,下支盘中心位于距桩底1倍桩径处,3个支盘等间距布置。

支盘桩桩身材料为C30混凝土,计算中考虑桩基为弹性材料,计算参数见表2。

表2 桩计算参数

| Γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | C /kPa | φ /(°) | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ |
|--|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
| 25 | 1000 | 50 | 3×10^4 | 0.25 |

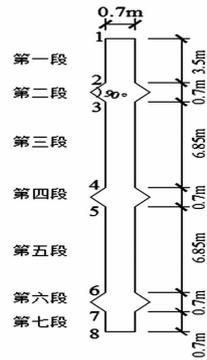


图1 桩模型

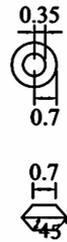


图2 支盘平剖面(上:平面;下:立面)

2) 桩周土

对于桩周及桩端土体考虑为均质土,土体的承载力特征值为160~180 kPa左右。这类土体强度中等,具有该特征的土在四川、湖南、浙江、安徽等地区均有分布。据此,所研究成果的推广和应用具有一定的广泛性。桩周土的物理力学指标参数取值见表3。

表3 桩周土物理力学参数取值表

| 粘聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|-----------|
| 30 | 12 | 18 | 0.4 |

1.2 加载情况

数值分析过程中采用逐级加载的形式模拟外荷载的施加过程,每级荷载达到相对稳定后,施加下一级荷载。

1.3 边界条件及模型离散化

根据实际受力情况,底部边界设水平和竖向约束,侧向边界设水平约束,考虑自重应力产生的侧向应力作用;顶部边界为自由边界。桩、土采用实体单元,桩土间设置接触面单元。模型底部边界取距桩底10倍桩径高度,桩基前后左右边界长度取10倍桩径,其中取桩径为0.7 m。模型单元划分根据研究重点,靠近桩基单元剖分较细,建好的三维实体模型见图3。

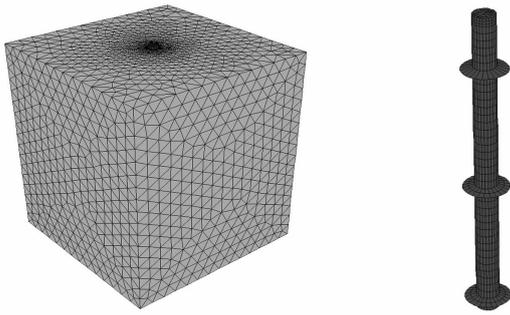


图3 数值分析模型

2 受压荷载作用下支盘桩承载性能

2.1 桩顶荷载 - 沉降特征

桩顶向下压荷载加载等级为 100 kN、500 kN、1000 kN、2000 kN、3000 kN、4000 kN、5000 kN 直到加载至停止加载标准。试桩达到停载标准为:某级荷载作用下,桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的 5 倍。

图 4 为支盘桩竖向荷载分级加载下的桩顶 Q - s 曲线。从图 4 可以看出,随着荷载增加,沉降加速增大,当桩顶荷载小于 3000 kN 时,沉降较小,竖向荷载每增加 500 kN,桩顶下沉约 0.005 m,荷载在 3000 ~ 4000 kN 时,竖向荷载每增加 500 kN,桩顶下沉 0.01 m。

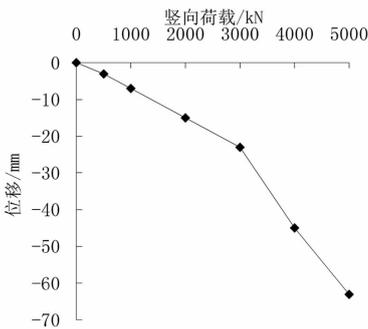


图4 桩顶竖向位移 - 荷载曲线

曲线总体呈缓变型,无明显的比例极限和极限荷载,但在 3000 ~ 4000 kN 荷载下,沉降速率明显加大。由此可推断该桩的承载力应该在 3000 ~ 4000 kN。桩顶沉降为 40 mm 时,对应的荷载约为 3800 kN,此值可作为该支盘桩的承载力。

2.2 荷载传递特征

荷载传递特征是研究支盘桩承载机理的基础。以下通过不同荷载量级作用下桩身轴力的变化,对支盘桩的荷载传递特征进行深入分析。

1) 桩身轴力分布特征

支盘桩的桩身轴力随深度变化曲线见图 5。在荷载量级较小时 (< 1000 kN),桩身轴力随深度增加而略有减小,曲线在支盘部位变化不明显,即支盘部位曲线的台阶状变化特征不明显。

在 2000 kN 荷载量级下,支盘作用已有所显现,桩身轴力在支盘处有较明显转折。随荷载的进一步增大,曲线在支盘部位的台阶状减小越显著。

支盘桩的荷载传递曲线有其独特的形态:轴力分布曲线在支盘上下发生台阶状降低,轴力的突变量无疑由支盘作用引起。从上至下经过支盘后轴力的减小量应是由支盘承担该部分荷载并将其转移到支盘底部的土层上,从而使支盘底部桩身轴力迅速降低,最终使传递到桩端的荷载明显减小。单桩承载力大幅度提高。

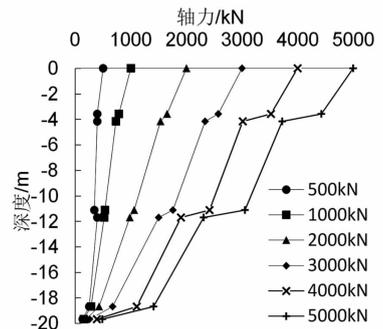


图5 桩身轴力

2) 支盘阻力

如图 5 所示,桩身轴力在支盘上下的台阶减小量实质上就是支盘阻力。通过计算不同荷载量级下不同位置的支盘阻力,获得各级荷载下不同位置支盘作用力,各个支盘承担荷载百分比的变化情况见图 6。

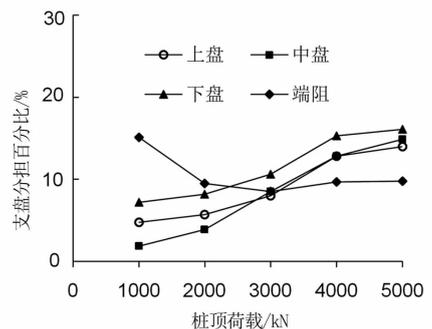


图6 支盘荷载分担比

在荷载量级相对较小时,各支盘作用从大到小排序为下支盘、上支盘、中支盘。在荷载超过 3000 kN

时,上、中支盘作用基本达到一致,下支盘作用始终更为明显。支盘的总体作用也进一步增大,在达到桩的极限承载力时,3个支盘的总承载量约为40%。上中下支盘承担荷载的比例约为0.8:0.8:1.0。

2.3 支盘桩的受压承载力

根据 $Q-s$ 曲线确定:在挤扩支盘桩数值模拟中获得了不同加载量级下的桩顶沉降位移,即 $Q-s$ 曲线(参见图4)。

从前述可知, $Q-s$ 曲线总体呈缓变型,无明显的比例极限和极限荷载点,但可以看出在3000~4000 kN 荷载下,沉降速率明显加大。可推断该桩的承载力应该在3000~4000 kN 之间。参照《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106-2014),对于缓变型的 $Q-s$ 曲线,承载力由位移控制,取 $s=40$ mm 所对应的荷载值,即3800 kN 为挤扩支盘桩极限承载力。

3 竖向(受压)+水平组合荷载作用下支盘桩承载性能分析

3.1 桩顶荷载-沉降特征

竖向受压+水平组合荷载下桩顶沉降曲线(上)和桩顶水平位移曲线(下)如图7、图8所示。

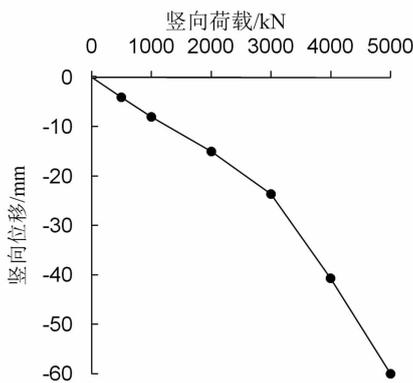


图7 受压+水平组合荷载-桩顶竖向位移

从图中可以看出:在受压和水平组合荷载作用下,当竖向荷载从0~3000 kN(对应水平荷载从0~450 kN,即水平荷载取竖向荷载的15%施加),桩顶竖向位移随荷载量级增加而增大;当受压荷载达到3000 kN时,位移量约为23.6 mm;受压荷载超过3000 kN(对应水平荷载450 kN)时桩顶沉降速率增大;受压荷载到4000 kN(对应水平荷载600 kN)时,位移量已达到40.7 mm,超过规范规定的破坏极限

沉降量40 mm;在竖向位移为40 mm时,对应的竖向荷载约为3959 kN。

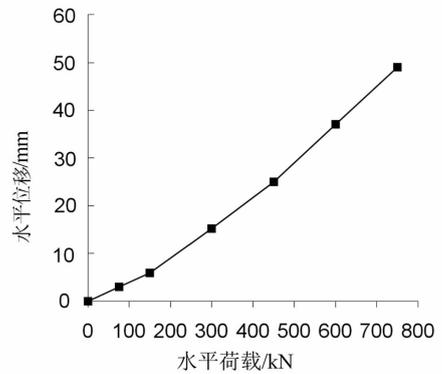


图8 受压+水平组合荷载-桩顶水平位移

水平位移亦随水平荷载增加,在水平位移达到10 mm时,桩顶的水平荷载值约为229 kN(对应竖向荷载约为1526 kN)。可见,在竖向受压和水平荷载共同作用时,水平荷载率先达到限值。

当受竖向荷载控制时,考虑竖向位移达到40 mm时的组合荷载值结果为受压荷载3959 kN+水平荷载597 kN,比单纯受竖向荷载时达到40 mm的受压荷载量(3800 kN)稍大,说明在有水平荷载作用的情况时,由位移控制的支盘桩的竖向承载力并未降低。

3.2 荷载传递特征

1) 桩身轴力分布特征

受压+水平荷载下桩身轴力随深度变化曲线如图9所示。轴力总体上随深度减小,且桩身轴力在支盘上下发生台阶状降低,支盘承担该部分荷载并将其转移到支盘底部的土层上,从而迅速降低支盘底部桩身轴力。

此外桩顶荷载量级越大,支盘对轴力的减小作用越明显,支盘的承载能力越大。

2) 支盘阻力

支盘桩受到荷载时,主要承载的部分是支盘、桩侧摩阻力和桩端阻力。绘制各组合荷载下各支盘分担荷载占比曲线如图10。

支盘作用从上支盘开始显现,在荷载量级相对较小时,各支盘作用为下支盘>上支盘≈中支盘。在荷载超过3000 kN时,上中下三支盘作用基本达到一致。在整个加载过程中,上盘承担的荷载比例随着荷载的增大而增大,但承担的荷载所占总荷载的百分比变化不大,从0增加到约17%;中盘承担

的荷载比例也随着荷载的增大而增大,从0增加到约19%;下盘所承担的荷载比例随着荷载的增大从7%增长至20%;从总体上看,在竖向荷载超过1000 kN后,支盘分担荷载不断增加,到后期达到了55.1%。

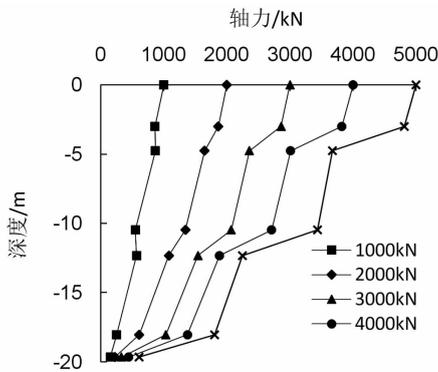


图9 桩身轴力

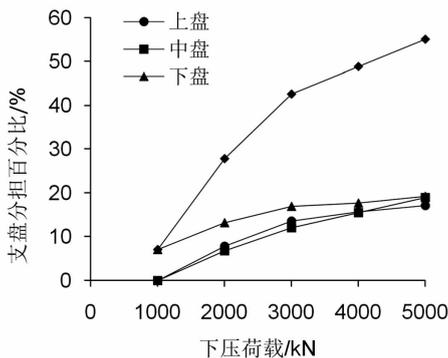


图10 支盘荷载分担比

3.3 挤扩支盘桩承载力

因规范中暂缺竖向受压+水平荷载下桩承载力的计算公式,故由《建筑基桩检测技术规范》中所规定的竖直方向极限位移40 mm,水平方向极限位移10 mm来进行推算。

竖向受压+水平荷载下,水平位移先达到《建筑基桩检测技术规范》所规定的极限位移10 mm,竖向受压+水平荷载下的承载力则由水平位移控制,据图8组合荷载-桩顶水平位移图,取 $s=10$ mm时的荷载值,即水平承载力229 kN为此时桩的极限承载力。由水平力控制的桩其水平承载力受竖向受压荷载的影响不大;由竖向力控制的桩的承载力受水平荷载的影响也不大。

4 水平荷载对竖向承载力的影响

根据图4、图7可知,竖向受压+水平组合荷载

的 $Q-s$ 曲线的总体规律与单独的竖直(受压)荷载作用下 $Q-s$ 曲线类似。竖直沉降量都随着竖向荷载的增加而增加,随着桩径的增加而减小。但具体量值可能存在差异,为此可得组合荷载作用下的沉降量与单独竖向荷载作用下沉降量的差异对比,见表4。

表4 支盘桩两种荷载类型沉降量对比

| 荷载类型 | 荷载值/kN | 沉降量/mm |
|--------|-----------|--------|
| 竖直 | 1000 | 6.3 |
| 竖直(水平) | 1000(150) | 7.1 |
| 竖直 | 4000 | 42.4 |
| 竖直(水平) | 4000(600) | 40.7 |

从表4可以看出,在荷载较小时(如1000 kN),组合荷载和单独竖向荷载沉降量均较小,而组合荷载下的位移量整体上较单独竖向荷载下的位移量稍大。当荷载较大时(如4000 kN,超过极限承载力),组合荷载下的竖向位移量较单独竖向荷载下的位移量稍小。

因此,水平荷载的存在会使桩顶沉降有所增加,在此称之为“附加沉降量”。“附加沉降量”总体不大,并且随荷载量级增大(达到极限承载力)时,这一附加沉降量可能由正变为负的。

竖向受压+水平组合荷载下的受压承载力与单独竖向受压荷载下的受压承载力对比见表5。

表5 支盘桩两种荷载类型受压承载力对比

| 竖向受压荷载/kN | 受压+水平荷载/kN | 差值/kN | 相差比率/% |
|-----------|------------|-------|--------|
| 3800 | 3830 | +30 | +0.8 |

如表5所示,水平荷载的存在可能会对竖向受压承载力产生一定的影响:会使竖向承载力略有增加。但总体上影响不太大,增减变动范围在 $\pm 1\%$ 左右。

5 结语

1)分析了竖向(受压)荷载下桩顶荷载的传递规律,发现竖向荷载随着桩身传递降低,在支盘处轴力出现“台阶式”急剧下降,这种变化随桩顶荷载的增大而越发明显。支盘的存在使得原本由摩阻力承担的桩顶竖向荷载转而成为由类似桩端的端承力承担了桩顶荷载,由此支盘桩承载力相对直桩能大幅提高。

(下转第91页)

服务于电网运行的监控信息事件化关联分析方法研究

代宇涵¹, 邹沛恒², 张凤西³, 黄华伟⁴, 孙永超¹, 罗荣森¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网乐山供电公司, 四川 乐山 614000; 3. 国网甘孜供电公司, 四川 康定 626000;

4. 国网南充供电公司, 四川 南充 637000)

摘要: 电网中故障触发的告警信号数量众多, 特别是发生电网事故时, 短时期会触发大量监控信息, 监控人员短时间内快速分辨出对应事件存在难度。中国范围内调控主站信息量巨大, 分析信息事件耗费大量人力与资源。通过研究电网监控信息与事件的对应关系, 形成监控信息自动推演事件经验, 提出一种基于信息-事件推演逻辑的电网运行监控信息事件化关联分析方法。

关键词: 推演逻辑; 关联信息; 判别规则; 信息事件化; 信号集

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0072-05

Research on Event – based Correlation Analysis Method for Monitoring Information Serving Power Grid Operation

Dai Yuhan¹, Zou Peiheng², Zhang Fengxi³, Huang Huawei⁴, Sun Yongchao¹, Luo Rongsen¹

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

2. State Grid Leshan Electric Power Supply Company, Leshan 614000, Sichuan, China;

3. State Grid Ganzi Electric Power Supply Company, Kangding 626000, Sichuan, China;

4. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: There are many alarm signals triggered by faults in power grid. Especially in the case of power grid accidents, a large number of monitoring information will be triggered in a short period of time. It is difficult for supervisors to quickly identify the corresponding events in a short time. There is a huge amount of information in regulating and controlling the main station nationwide, and it consumes a lot of manpower and resources to analyze information events. By studying the corresponding relationship between monitoring information and events, the experiences of automatic event deduction for monitoring information are formed, and an event – based correlation analysis method is proposed for monitoring information of power grid operation based on information – event deduction logic.

Key words: deduction logic; associated information; discriminant rules; information eventalization; signal set

0 引言

电网中发生各项事件必然会伴随一定电网监控信号。出现大面积电网事件时, 短期内会触发大规模监控信号, 信号无序且杂乱, 这些信号按时间先后顺序刷屏, 给监控人员辨识事件、分清事件的重要级别和决策带来干扰, 增加了监控人员开展监控运行的难度^[1]。

通过研究事件与关联信号的内在逻辑关系, 提取信息事件关联规则, 定义信息-事件关联规则库,

将监控信号集群进行智能拆分归纳, 根据信息事件推演逻辑对电网事件进行智能判断。同时还可根据电网事件及信息事件关联规则定义反向推断监控信息的准确性和完整性, 通过对特定信息事件的出现频次等特点分析, 进一步完成电网事件预测, 为电网稳定运行提供预警。

1 监控信息与事件模型

监控信息与事件存在必然联系是设计信息事件

规则库的前提。监控信息的产生来源于事件,事件的产生必然伴随监控信息的上报。监控信息事件规则库通过识别事件源信息,辅以判别规则,对事件的性质、等级进行准确判断,从而达到通过信息识别事件的目的。同时,还可通过设计启发式学习机制,利用历史事件及标准化监控信息,完善事件-信息对应关系,达到利用事件判别监控信息漏项、错项的目的^[2]。

1)事件源识别规则:将事件源分为保护动作事件、操作控制事件两类。这里主要针对保护动作事件开展规则研究工作。保护动作事件源的识别可根据“保护出口”“跳闸出口”“重合闸出口”等信号进行判别。若带检修标识字段,可暂不识别。

定义事件源特征:

Sjy1 = “保护出口 动作”;

Sjy2 = “跳闸出口 动作”;

Sjy3 = “重合闸出口 动作”;

...

2)事件相关信息提取规则:由事件源信息初步判断可能出现了特定电网事件,根据事件源信息的特征在海量监控信息中提取相关关联信息,为事件识别及判断提供依据。以500 kV线路保护动作(单跳单重成功,如图1所示)为例列举事件源信息提取规则。

根据事件源(以Sjy1为例)提取监控信息的事件特征信息:

提取“所属厂站/所属间隔”域,存为特征量(Sta/Bay)1、(Sta/Bay)2、...、(Sta/Bay)m、...、(Sta/Bay)n。

提取“事件发生时刻”域,存为特征量Tim1、Tim2、...

3)监控信息筛选方法:以事件发生时间段为搜索展宽,筛查事件核心信号。

根据提取的Tim1、Tim2、...确定事件时间窗的边界,并默认向前或向后展宽5 s(展宽时间可设置,默认5 s,最大10 min),作为事件时间窗监控信息的搜索边界。新建事件信号集并将搜索边界内所有监

控信号存入该事件信号集。

根据特征量(Sta/Bay) x 搜索全部相关监控信息,在该事件信号集内按照时间先后顺序排列。

4)事件辅助判别规则:确认或辨识某一事件仅依据事件源还不够,事件源信息表明了事件出现或开始,要辨识事件的发展过程及结果需要增加事件辅助判别规则。以500 kV线路保护动作(单跳单重成功,图1所示)为例分别采集线路本侧第一、第二套保护出口,对侧第一、第二套保护出口,本侧中、边开关动作,对侧中、边开关动作预定义规则组合(规则组合可编辑),表明事件识别成功,确认事件“(线路间隔)发生单相瞬时性故障,重合成功”。

5)间隔相关性判断规则:复杂电网故障时,监控信息涉及多厂站、多间隔,监控信号纷繁复杂,所研究的目标是在海量的监控信号中分离辨识出以事件为单位的监控信息,需要定义各种事件涉及的关联间隔,排除无关信号的干扰^[3]。

以事件“500 kV线路保护单相瞬时性故障,重合成功!”为例进行说明:

①根据事件源所在监控信息条目,确认事件源产生间隔,如“XX站/500 kV XX一线”;

②根据线路间隔名称查找线路两端的站点名称,记为Sta_1、Sta_2;

③根据线路间隔名称查找关联的断路器编号,对于3/2接线,每侧关联2个断路器间隔。

通过步骤①至步骤③可查找出与本次事件相关的2个站点、2个线路间隔、4个断路器间隔。

2 信息事件化算法

信息事件化主要按照等待告警中断^[4]、提取核查事件源、新建事件信号集、定义时间窗、筛选关联信号存入事件信号集、核心规则判断,事件展示推送与监控人员确认等步骤有机构成。信息事件化逻辑如图2所示。

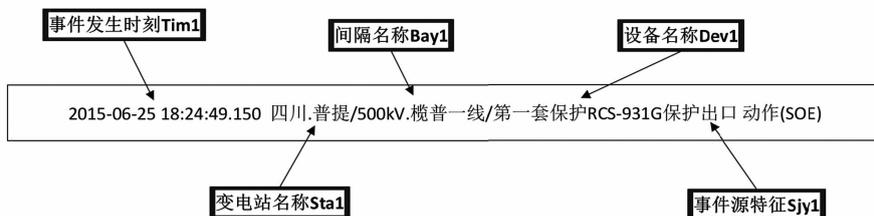


图1 事件源监控信息特征提取

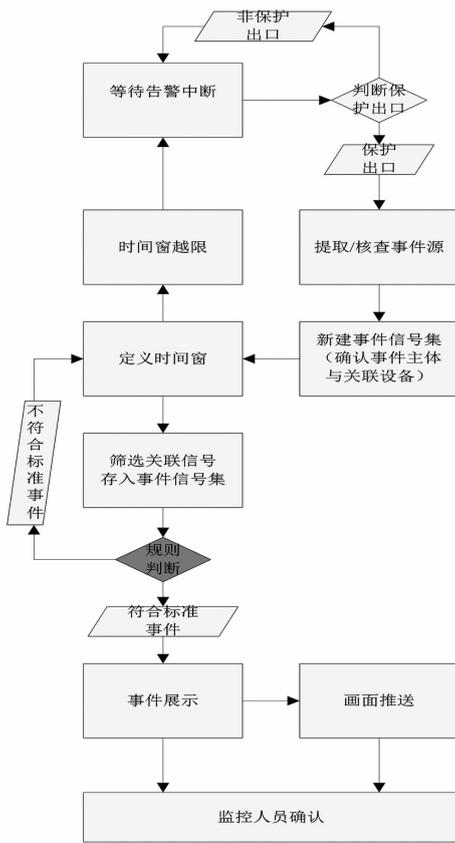


图2 信息事件化逻辑

2.1 等待告警中断

等待中断并解析第一类告警信号“内容”域。排除检修与调试信号后,在内容域中搜索“保护出口动作”字段,若无保护出口返回则等待下次中断;如果内容域中出现“保护出口动作”字段,则进入事件源提取。

2.2 提取/核查事件源

提取包含“保护出口动作”字段的本条告警信息“所属厂站”域,存为变量 Substation_val1;提取“所属间隔”域,存为变量 Bay_val1;提取本条告警信息内容主体(电压等级与“/”标志间)存为 Main_val。

下面以线路事件为例,若 Main_val 以“线”字结尾,则将值赋给变量 ACLine_val。在交流线段表中核查 ACLine_val 对应的 StaSta 与 EndSta 域值,应至少有一个与 Substation_val1 是否一致。

2.3 新建事件信号集(确认事件主体与关联设备)

以传统调度自动化系统 EMS 库为例,可通过节点号查找与事件源关联的交流线段 x1、交流线端点 x2、厂站 x2、断路器 x4。

1) 厂站查询原则

在交流线段表中查找 ACLine_val 对应的 StaSta

与 EndSta 域值,将与 Substation_val1 不一致的存为 Substation_val2。

2) 交流线端点查询原则

在交流线端点表中查找与“所属交流线段”域一致的两个交流线端点名(存为 ACLineDot_val1 与 ACLineDot_val2)以及节点号(存为 Node1 与 Node2)。

3) 断路器查询原则

在断路器表中查找(Inode == Node1 or Jnode == Node1) and Substation == Substation_val1 的断路器,缓存为 Breaker_val1_1 与 Breaker_val1_2。查找(Inode == Node2 or Jnode == Node2) and Substation == Substation_val2 的断路器,缓存为 Breaker_val2_1 与 Breaker_val2_2。

将核查后的交流线段 ACLine_val 存为事件主体。将与之关联的一次设备(交流线段 x1、交流线端点 x2、厂站 x2、断路器 x4)存为关联设备。每一个事件主体出现都需要新建对应的事件信号集(事件信号集编号+1),如表1所示。

2.4 定义时间窗

自定义参数 buffer_time 为时间窗口。buffer_time 取值默认为 -5 ~ +10 s,前后取值均可编辑。对于同一个事件信号集的重复访问,buffer_time 前后扩展 1 s(扩展增量应可编辑),buffer_time 达到上限阈值后重置并返回“等待告警中断”。

2.5 筛选关联信号存入事件信号集

对于每一个事件主体,指定时间窗内搜索所有包含表2中关联设备“内容”域的告警信号,存入事件主体所属的事件信号集。

2.6 核心规则判断

一旦符合一个标准事件判断逻辑时,进入下一步“事件展示”,关闭当前事件信号集。仍然不符合任何一个标准事件的判断逻辑,则返回“定义时间窗”,扩展监控信号采集的时间窗,补充当前事件信号集中的信号数量后,进行下一次对比与判断。如果时间窗越限,仍不符合标准事件的判断逻辑,则判断为非标准事故,发出复杂事故告警。

2.7 事件展示/画面推送

标准事件逻辑判断成功后,将每个事件信号集所匹配的标准事件用列表形式弹窗展示;每一个标准事件结果显示后,需要推送该事件所有关联设备的可视化判据(例如设备所在厂站图)。

表1 事件信号集

| 关联设备 | 变量名 | 所属事件信号集 | 内容 | 备注 |
|--------|----------------|---------|-------------------------|----|
| 交流线段 | ACLine_val | 3 | 四川. 模型一线 | |
| 交流线端点1 | ACLineDot_val1 | 3 | 四川. 本侧/500 kV. 模型一线 | |
| 交流线端点2 | ACLineDot_val2 | 3 | 四川. 对侧/500 kV. 模型一线 | |
| 断路器1-1 | Breaker_val1_1 | 3 | 四川. 本侧/500 kV. 5053 断路器 | |
| 断路器1-2 | Breaker_val1_2 | 3 | 四川. 本侧/500 kV. 5052 断路器 | |
| 断路器2-1 | Breaker_val2_1 | 3 | 四川. 对侧/500 kV. 5053 断路器 | |
| 断路器2-2 | Breaker_val2_2 | 3 | 四川. 对侧/500 kV. 5052 断路器 | |

表2 事件关联设备集

| 变量名 | 所属事故信号集 | 内容 | 备注 |
|--------|---------|-------------------------|----|
| 交流线段 | 1号 | 四川. 榄普一线 | |
| 厂站1 | 1号 | 四川. 普提 | |
| 厂站2 | 1号 | 四川. 橄榄 | |
| 交流线端点1 | 1号 | 四川. 橄榄/500 kV. 榄普一线 | |
| 交流线端点2 | 1号 | 四川. 普提/500 kV. 榄普一线 | |
| 断路器1-1 | 1号 | 四川. 橄榄/500 kV. 5053 断路器 | |
| 断路器1-2 | 1号 | 四川. 橄榄/500 kV. 5052 断路器 | |
| 断路器2-1 | 1号 | 四川. 普提/500 kV. 5053 断路器 | |
| 断路器2-2 | 1号 | 四川. 普提/500 kV. 5052 断路器 | |

2.8 监控人员确认

监控人员依据事件展示与推送画面确认该电网事件。

3 应用算例

3.1 信号筛选

依照监控事件提取判别流程,在“开始”状态时收到如下告警:

xxxx-xx-xx 18:24:49.150 四川. 普提/500 kV. 榄普一线/第一套保护 RCS-931G 保护出口 动作 (SOE) (接收时间 xxxx 年 xx 月 xx 日 18 时 25 分 11 秒)。

因为该条告警包含“保护出口”字段,则归类为保护动作事件,提取“四川. 橄榄/500 kV. 榄普一线保护出口”作为事件源 S_{jy1},将“四川. 榄普一线”赋值给 ACLine_val。以线路为事件主体的事件,依照查询原则去找出该线路直接关联的交流线段 x₁、交流线端点 x₂、厂站 x₂、断路器 x₄,并新建事件信号集(1号事件信号集)与事件关联设备集如表2所示。

在预定义的-5~+10 s的时间窗内,依据关联设备的内容域,可以在事故源信号前后 15 s,从 3272 条上窗告警信号中提取出 50 条第 1 类告警信

号与 4 条第 4 类告警信号,存入 1 号事件信号集作为辅助判据。

3.2 规则判断

用已定义的标准信号与 1 号事件信号集内的所有信号分别比对,得出 1 号事件信号集中所有标准信号的标志位,如表 3 所示(比对成功则置 1,比对失败则置 0)。

表3 1号事件信号集标准信号置位

| 标准信号 | 标志位 |
|---------|-----|
| FZPJ1 | 1 |
| FZPJ2 | 1 |
| FZPJ3 | 1 |
| FZPJ4 | 1 |
| FZPJ5 | 1 |
| FZPJ6 | 1 |
| FZPJ7 | 1 |
| FZPJ8 | 1 |
| FZPJ9_A | 1 |
| FZPJ9_B | 0 |
| | |

通过 1 号事件信号集标准信号(带标志位)与预定义逻辑框图来计算各类标准事件的逻辑 Boolean 值。计算得出的 Boolean 值为 1,则说明“该线路瞬时单相接地故障(单跳重合成功)”事件成立。

3.3 事件展示/画面推送

由参数 ACLine_val 已经被赋值为“四川. 榄普一线”,所以最终事件展示为“榄普一线线路瞬时单相接地故障(单跳重合成功)”。

事件展示界面如表4所示。

点击事件信号集域中的“1号事件信号集”可以显示预定义时间窗内用于判断该事件的信号;点击关联设备域中的“四川. 橄榄/500 kV. 5053 断路器”可以推送该断路器所在间隔图,用于双确认断路器分合位与光字牌信息。

3.4 案例推广

选取某年内发生线路故障的500 kV 康定、丹巴、普提、橄榄、九龙、石棉变电站及其间500 kV 联络线:丹康一线、丹康二线、榄普一线、榄普二线、九石一线、九石二线为典型研究厂站(线路),如表5所示。

试点厂站(线路)在近6个月内发生的9次线路单相瞬时接地故障,采用上面描述的设备关联原则与信号筛选提取方法,如果能在预定义的(-5~+10 s)时间窗内正确提取出关联信号,并成功导入新建事件信号集,严格依照预定义逻辑框图,其中8

次线路单相瞬时接地故障可以被成功判断。

一次无法正确判断的单相瞬时故障均是线路某侧断路器保护出口信号命名不规范引起。如需提高正确判断率,需提高监控信号规范,防止监控信息点表漏点误点。也可以对预定于逻辑框图的判断严密性作出下调(例如去除断路器保护出口的逻辑与关系,仅保留断路器机构跳闸出口),即可确保单相瞬时接地故障事件在试点厂站(线路)更高的判断率。

4 结 语

前面对电力系统电网事件产生的监控信息常见规律进行整理分析,建立起基础监控信息规则库是信息事件化的基础。对关联规则进行算法描述,形成可执行规则脚本库启动信息事件化流程。进一步建立信息-事件关联引擎,研究序列信息关联事件方法,形成信息-事件匹配规则。持续研发信息-事件关联规则库逻辑编辑模块,建立逻辑自检机制。研究事件检测机制,建立起规则库通用接口,从而形成完整构建维护及应用链条。

表4 事件展示界面预演示

| 时间 | 电网事件 | 事件信号集 | 关联设备1 | 关联设备2 | 关联设备3 | 关联设备4 |
|------------------------|------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2015-06-25 18:24:49 | 榄普一线线路瞬时单相接地故障(单跳重合成功) | 1号事件信号集 2号事件信号集 3号事件信号集 | 四川. 橄榄/ 500 kV. 5053 断路器 | 四川. 橄榄/ 500 kV. 5052 断路器 | 四川. 普提/ 500 kV. 5053 断路器 | 四川. 普提/ 500 kV. 5052 断路器 |

表5 典型单相瞬时接地故障

| 时间 | 甲厂站 | 乙厂站 | 线路名称 | 事件 | 结果判断 |
|----------------|-------|-------|------|----------|------|
| 09-04 21:10:14 | 康定变电站 | 丹巴变电站 | 丹康一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 09-04 21:10:13 | 康定变电站 | 丹巴变电站 | 丹康一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 06-25 18:25:01 | 橄榄变电站 | 普提变电站 | 榄普一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 06-17 19:24:51 | 九龙变电站 | 石棉变电站 | 九石二线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 05-21 02:37:48 | 九龙变电站 | 石棉变电站 | 九石一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 05-12 17:03:05 | 九龙变电站 | 石棉变电站 | 九石二线 | 单相瞬时接地故障 | 0 |
| 03-10 18:53:44 | 九龙变电站 | 石棉变电站 | 九石二线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 03-08 14:19:15 | 康定变电站 | 丹巴变电站 | 丹康一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 02-04 20:34:44 | 康定变电站 | 丹巴变电站 | 丹康一线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |
| 01-03 11:48:41 | 橄榄变电站 | 普提变电站 | 榄普二线 | 单相瞬时接地故障 | 1 |

(下转第81页)

高海拔 500 kV 交流输电线路绝缘子片数选择研究

唐 巍¹, 梁 明¹, 盛道伟¹, 霍 锋², 刘从法¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 2. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430070)

摘要:国内外在海拔 2000 m 以下高海拔地区已建设投运多回 500 kV 输电线路, 具有丰富的设计、运维经验。但在海拔 2000 m 以上的高海拔地区, 500 kV 线路绝缘配置经验及运行数据相对欠缺。伴随澜沧江、怒江、雅鲁藏布江流域水电资源的规划开发以及西藏、川西等高原地区骨干电力网架的规划建设, 海拔 2000 m 以上的高海拔区域将陆续建设多条 500 kV 线路。依据国网电科院模拟高海拔条件下的低气压进行的全尺寸人工污秽闪络特性试验成果, 对污秽条件下绝缘子选择的爬电比距法与污耐压法进行了对比, 对双伞、三伞、钟罩等绝缘子的污耐压性能进行比较, 探讨了低气压对绝缘子污闪特性的影响及污秽绝缘子海拔修正方法, 推荐了高海拔地区 500 kV 线路绝缘配置方案。

关键词:500 kV 交流; 输电线路; 绝缘子片数; 选择; 超高海拔

中图分类号:TM853 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0077-05

Research on Selection for Number of Insulators of 500 kV AC Transmission Line in High Altitude Area

Tang Wei¹, Liang Ming¹, Sheng Daowei¹, Huo Feng², Liu Congfa¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: There are many 500 kV transmission lines running in high altitude area below 2000 metres above sea level, which has accumulated rich experiences in design, operation and maintenance. However, in the areas over 2000 metres above sea level, there is a lack of experiences in insulation configuration and running data of 500 kV AC transmission lines. With the planning and development of hydropower resources in Lancang river, Nujiang river and Yarlung Zangbo river basin, and the planning and construction of backbone power grid in Tibet or western Sichua, many 500 kV transmission lines will be constructed in high altitude area above 2000 metres above sea level. According to the experiment results of artificial pollution flashover performance executed in low atmospheric pressure under imitated condition of high altitude by State Grid Electric Power Research Institute, the creepage distance method and the pollution withstand voltage method are compared which are often used to choose the insulators under pollution condition, and the pollution flashover performance of double-shed, triple-shed and anti-fog insulators are also compared. The influence of low atmospheric pressure on the pollution flashover performance of insulators and the altitude correction methods for flashover performance contaminative insulator are discussed, and the insulation configurations for 500 kV AC transmission line in high altitude areas are recommended.

Key words: 500 kV AC; transmission line; number of insulators; selection; ultra high altitude

0 前 言

伴随澜沧江、怒江、雅鲁藏布江流域水电资源的规划开发以及西藏、滇西北、川西等高原地区骨干电力网架的规划建设, 海拔 2000 m 以上的高海拔区域将陆续建设多条 500 kV 线路。国内外在海拔 2000 m 以下高海拔地区已建设投运多回 500 kV

输电线路, 具有丰富的设计、运维经验, 但海拔 2000 m 以上投运线路相对较少, 尤其是海拔 3000 m 以上高海拔地区截止目前投入运行的仅有建塘—太安及川藏、藏中联网 500 kV 线路工程, 设计、运维经验相对欠缺。而海拔越高空气更加稀薄, 气压更低, 对电气设备外绝缘影响更大。

目前国内超高压输电线路绝缘配合设计惯用的爬电比距法具有简单、便于计算的优点, 在低海拔、

一般高海拔地区亦经历了大量工程实践的检验,能满足线路安全稳定运行的要求,但在更高海拔地区试验成果、运维数据相对缺乏,设计经验相对不足。

因此结合已建线路绝缘配合研究成果,通过模拟低气压状态下进行全尺寸绝缘子串人工污秽试验,对高海拔地区 500 kV 线路绝缘配合进行研究,合理选择高海拔地区线路绝缘子片数,对降低线路投资、保证线路长期安全可靠运行意义重大^[1]。

1 国内外研究现状

目前国内外研究普遍认为,随着海拔升高,气压降低,染污绝缘的直流和交流闪络电压都会降低^[2-10],污闪电压与气压 P 之间呈非线性关系,可以表示为

$$U = U_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (1)$$

式中: U_0 为常压 P_0 下的污闪电压; U 表示气压为 P 时的污闪电压; n 为气象影响特征指数。

虽然国内外对高海拔条件下绝缘放电特性进行了大量试验研究,但试验大多数是建立在模型或短串绝缘子的试验条件上,得到的试验成果差别也非常大。因此有必要对高海拔低气压环境下绝缘闪络特性进行长串绝缘子或是全电压、全尺寸试验研究。

2 绝缘子片数选择

目前 500 kV 输电线路采用的绝缘子型式主要分为玻璃、瓷、合成 3 种型式,考虑到高海拔地区多为人烟稀少、工业不发达地区,污秽不重,污秽等级多在 C 级及以下,因此选择采用盘型绝缘子。目前绝缘子片数选择有两种方法:一是根据运行经验按爬电比距计算绝缘子片数;二是通过人工污秽的闪络特性及污耐压法计算绝缘子片数。前者按绝缘子几何泄漏距离计算,该方法在理论上虽不够严密(未考虑绝缘子造型差异对泄漏距离有效性的影响),但简单易行^[11-12];后者需要通过试验得到绝缘子闪络特性,但容易受上下裙边污秽分布的均匀性、污秽成分等因素影响,该方法比较复杂。这里应用人工污秽试验数据,采用污耐压法确定绝缘子串的片数。

2.1 人工污秽试验方法

依托建塘—太安 500 kV 线路工程,对高海拔(海拔 2000 m、3000 m、4000 m)低气压下染污绝缘子污闪特性进行了全尺寸(32 片)人工污秽闪络特性试验研究。试验在国网特高压实验基地人工气候实验室进行,试验罐体净空尺寸为直径 20 m,高 25 m;高压穿墙套管额定工频电压 800 kV 电源;罐体内最低气压可达 0.05 MPa(模拟海拔 5500 m),最低气温可降至 $-19\text{ }^\circ\text{C}$;再配合实验室辅助设施可进行模拟高海拔条件下的低气压人工污秽试验研究。试验采用人工污秽试验的固体涂层法,不溶物采用硅藻土,导电物质选用 NaCl。试验采用恒压升降法。试验试品选用 160 kN 悬式绝缘子,试验绝缘子参数见表 2。

表 2 试验绝缘子参数

| 型号 | 强度 /kN | 结构高度 /mm | 盘径 /mm | 爬距 /mm | 备注 |
|-----------------------|--------|----------|--------|--------|-----|
| XWP ₂ -160 | 160 | 155 | 300 | 450 | 双伞型 |
| CA872-EZ | 160 | 155 | 325 | 545 | 三伞型 |
| FC-160P/155 | 160 | 155 | 330 | 550 | 钟罩型 |

2.2 单片绝缘子最大耐受电压的确定

2.2.1 通过 $U_{50\%}$ 计算

绝缘子串污秽闪络电压服从标准正态函数分布,当分布幅度取 3σ 时,线路闪络概率约为 0.14%,其可靠度认为是可以接受的,则绝缘子污秽情况耐受电压下可按式(2)计算。

$$U_w = U_{50\%} (1 - 3\sigma) \quad (2)$$

式中: U_w 为污秽绝缘子耐受电压,kV; $U_{50\%}$ 为污秽绝缘子串 50% 闪络电压,kV; σ 为标准偏差,取 7%。

通过试验得到的不同型式绝缘子的 50% 污秽闪络电压,50% 污秽耐受电压与绝缘子片数基本呈线性关系,因此依据式(2)求得标准大气压下单片绝缘子最大耐受电压如表 3 所示。

表 3 单片绝缘子最大耐受电压 U_{max1}

| 污秽等级 | 等值盐密/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 最大耐受电压/kV | | |
|------|---|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 6.94 | 7.65 | 8.08 |

注:试验灰密(NSDD)取 2.0 mg/cm^2 。

2.2.2 不均匀积污校正

经过对投运的交直流线路取样测试,自然积污时绝缘子上下表面存在不均匀性^[13-15],对不同型式绝缘子进行上下表面不均匀积污,校正系数可按式

(3) 进行计算^[16]。

$$K_0 = \frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}} = 1 - N \times \ln\left(\frac{T}{D}\right) \quad (3)$$

式中： K_0 为绝缘子不均匀积污修正系数； $U_{\max 2}$ 为不均匀积污时绝缘子的耐受电压； $U_{\max 1}$ 为均匀积污时绝缘子的耐受电压； N 为修正常数，通过试验得到； T/D 为上下表面不均匀积污比。

这里对绝缘子的上下表面不均匀积污比按以往工程经验取1:3，则可求得不均匀积污系数，见表4。进行不均匀积污校正后所得 $U_{\max 2}$ 见表5。

表4 不同型式绝缘子不均匀积污系数

| 绝缘子类型 | 修正常数 N | 上下不均匀积污修正系数 K_0 |
|-----------------------|--------|-------------------|
| XWP ₂ -160 | 0.16 | 1.176 |
| CA872-EZ | 0.13 | 1.143 |
| FC-160P/155 | 0.08 | 1.088 |

表5 积污校正后单片绝缘子最大耐受电压 $U_{\max 2}$

| 污秽等级 | 等值盐密/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 最大耐受电压/kV | | |
|------|---|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 8.16 | 8.75 | 8.79 |

2.2.3 灰密校正

研究表明在相同盐密条件下随着灰密(non soluble deposit density, NSDD)的增加，绝缘子耐受电压水平呈下降趋势。通过人污秽试验得到3种盐密(salt deposit density, SDD)下NSDD对绝缘子耐受电压的校正关系(见图1)，将试验结果校正到NSDD为0.5 mg/cm^2 (灰盐比为5)，单片绝缘子最大耐受电压见表6。

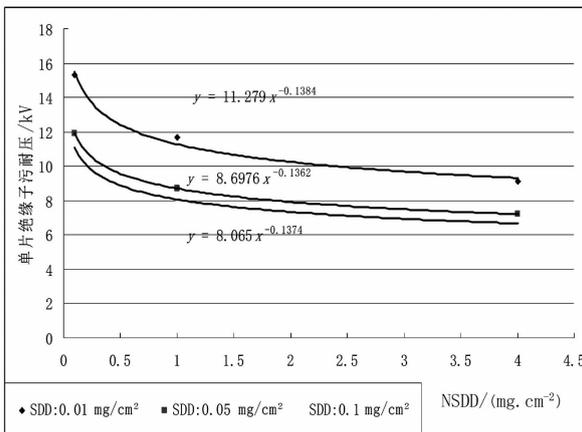


图1 绝缘子(XWP₂-160)不同NSDD下的污耐压曲线
表6 灰密校正后单片绝缘子最大耐受电压

| 污秽等级 | 等值盐密/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) | 最大耐受电压/kV | | |
|------|---|-----------------------|----------|-------------|
| | | XWP ₂ -160 | CA872-EZ | FC-160P/155 |
| C | 0.1 | 11.96 | 12.34 | 11.87 |

2.2.4 高海拔校正

通过试验得到了3种盘型绝缘子交流闪络电压与气压的关系见图2至图4。

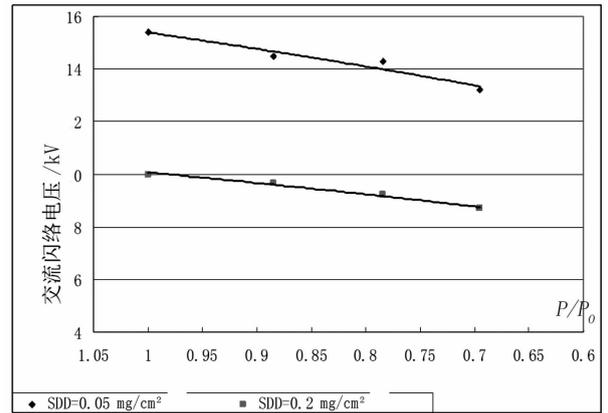


图2 绝缘子(XWP₂-160)交流闪络电压与气压的关系

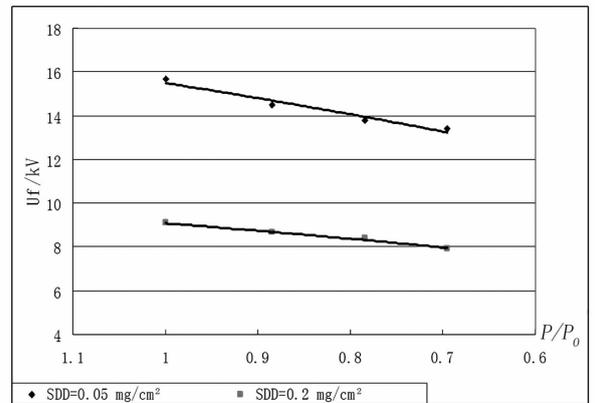


图3 绝缘子(CA872-EZ)交流闪络电压与气压的关系

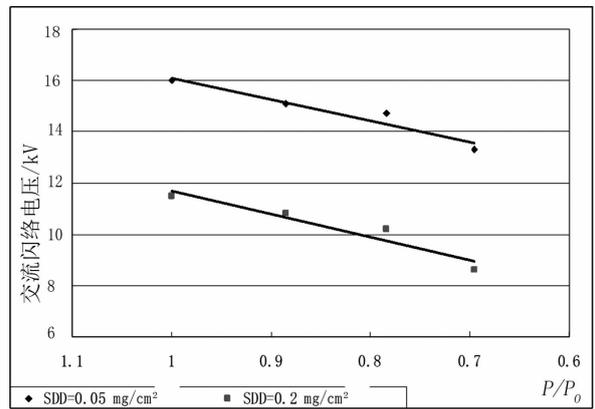


图4 绝缘子(FC-160P/155)交流闪络电压与气压的关系

由图2至图4可拟合出在2种盐密下的气象影响特征指数 n 及其平均值见表7。

表7 3种盘形悬式绝缘子的n值

| 试品 | n | | 平均值 |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|------|
| | SDD = 0.05 mg/cm ² | SDD = 0.2 mg/cm ² | |
| XWP ₂ -160 | 0.42 | 0.34 | 0.38 |
| CA872-EZ | 0.22 | 0.40 | 0.31 |
| FC-160P/155 | 0.45 | 0.59 | 0.52 |

根据式(1)及表7对单片绝缘子耐受电压进行海拔校正,修正结果见表8。

表8 高海拔下单片绝缘子最大耐受电压U_{max5}

| 海拔 /m | 污秽 等级 | ESDD/ (mg·cm ⁻²) | 最大耐受电压/kV | | |
|----------|----------|---------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872 -EZ | FC -160P/155 |
| 2000 | C | 0.1 | 10.90 | 11.44 | 10.46 |
| 3000 | C | 0.1 | 10.42 | 11.02 | 9.82 |
| 4000 | C | 0.1 | 9.90 | 10.58 | 9.16 |

2.3 绝缘子片数选择结果

对500 kV输电线路最大工频相电压有效值U_{smax} = 550/1.732 = 317.5 kV;依据表8得出的高海拔下单片绝缘子最大耐受电压,在高海拔下污秽条件下需要的绝缘子片数见表9。

表9 高海拔下污秽绝缘子片数选择结论

| 海拔 /m | 污秽 等级 | ESDD/ (mg·cm ⁻²) | 绝缘子片数/片 | | |
|----------|----------|---------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872 -EZ | FC -160P/155 |
| 2000 | C | 0.1 | 30 | 28 | 31 |
| 3000 | C | 0.1 | 31 | 29 | 33 |
| 4000 | C | 0.1 | 32 | 30 | 35 |

3 污耐压法与爬电比距法选择结果对比

根据GB 50545-2010《110 kV-750 kV架空输电线路设计规范》的规定,采用爬电比距法绝缘子片数应按式(4)计算。

$$N_1 \geq \frac{\lambda U}{K_e L_{ol}} \quad (4)$$

式中:N₁为海拔1000 m时每串绝缘子所需片数;λ为爬电比距,cm/kV;U为系统标称电压,kV;L_{ol}为单片悬式绝缘子的几何爬电距离,cm;K_e为绝缘子爬电距离的有效系数,根据DL/T 1122-2009《架空输电线路外绝缘配置技术导则》,双伞型、三伞型绝缘子K_e值取1,钟罩防污型绝缘子在C级污区K_e值取0.9。

按式(4)计算并进行海拔修正后,高海拔污秽

条件下绝缘子片数见表10。

表10 按爬电比距法绝缘子片数选择结果

| 海拔 /m | 污秽 等级 | 统一爬 电比距/ (mm·kV ⁻¹) | 绝缘子片数/片 | | |
|----------|----------|---------------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|
| | | | XWP ₂ -160 | CA872 -EZ | FC -160P/155 |
| 2000 | C | 39.4 | 30 | 24 | 27 |
| 3000 | C | 39.4 | 31 | 25 | 29 |
| 4000 | C | 39.4 | 33 | 26 | 31 |

通过对表9、表10中的数据进行对比分析,可以发现XWP₂-160绝缘子采用两种方法计算得的结论基本一致,而对于CA872-EZ、FC-160P/155两种绝缘子虽然通过伞型结构优化显著提高了绝缘子的爬电距离,但由于伞间或棱间距离较近,在电弧发展过程中容易在相邻伞间或棱间短接,从而降低了其有效爬电距离,按爬电比距法得到的绝缘子片数较污耐压法减少约15%。因此在采用爬电比距法计算绝缘子片数时,对于大爬距防污绝缘子,确定合适的爬电距离的有效系数K_e是非常重要的^[19]。

4 结 语

通过全尺寸(32片)绝缘子串在低气压下人工污秽闪络特性试验,对高海拔环境下输电线路绝缘配合进行了研究,并通过对污耐压、爬电比距法选择绝缘子片数进行对比,得出以下结论:

1)防污绝缘子通过伞型结构优化显著提高了绝缘子的爬电距离,但牺牲了伞间或棱间距离,在电弧发展过程中容易在相邻伞间或棱间短接,从而降低了其有效爬电距离。按爬电比距法得到的绝缘子片数较污耐压法减少约15%。因此采用爬电比距法配置绝缘,确定合适的爬电距离有效系数是非常关键的。

2)双伞型、三伞型绝缘子的污耐压性能明显高于钟罩型绝缘子,其污闪电压随海拔高度的升高下降程度也明显小于后者,海拔每增加1000 m可较后者少增加约一片绝缘子。

3)依据在人工环境气候实验室模拟高海拔条件下的低气压进行的人工污秽闪络特性试验结果,计算推导出高海拔条件下的绝缘子片数,详见表9。

根据已投运直流线路盐密测试结果及自然积污站观测数据,外伞型绝缘子表面等值盐密远小于钟罩型绝缘子。因此对500 kV输电线路各类绝缘子

积污特性进行对比分析研究,进一步优化绝缘子片数,降低线路投资是今后 500 kV 输电线路绝缘配合研究应重点关注的方面。

参考文献

[1] 廖永力,张福增,李锐海,等. 特高压直流输电线路外绝缘设计若干问题研究[J]. 南方电网技术,2013,7(1):39-43.

[2] 张搏宇,殷禹,张翠霞,等. 高海拔线路避雷器的绝缘配合研究[J]. 电磁避雷器,2017(4):23-27.

[3] 罗强,王强,罗鸣,等. 高海拔 500 kV 输电线路绝缘子污闪特性试验研究[J]. 四川电力技术,2018,41(3):25-30.

[4] 唐巍,梁明. 重冰区 ±800 kV 特高压直流线路绝缘配合研究[J]. 新型工业化,2016,6(11):93-99.

[5] 张福增,李锐海,王国利,等. 高海拔特高压线路绝缘子的直流污闪特性[J]. 南方电网技术,2011,5(1):29-32.

[6] 周刚,李字明. 高海拔地区架空输电线路的绝缘配置[J]. 高电压技术,2007,33(12):205-207.

[7] 周安春,李字明,何长华. 高海拔地区架空输电线路外绝缘和塔头空气间隙计算[J]. 电力建设,2011,32(1):38-40.

[8] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):115-120.

[9] 周军,关志成,王黎明,等. 高海拔条件下大吨位线路绝缘子污闪特性研究[J]. 高电压技术,2004,30(6):1-3.

[10] Raji Sundararajan, Robert W Nowlin. Effect of Altitude on the Flashover Voltage of Contaminated Insulators [C]. Proceedings of CEIDP, San Francisco, USA; University of

California at San Francisco, 1996:433-436.

[11] 张福增,赵锋,杨皓麟,等. 高海拔地区直流输电线路外绝缘特性研究[J]. 高电压技术,2008,34(10):2113-2117.

[12] 吴光亚,蔡炜,卢燕龙,等. 交流输电线路绝缘子串片数的选择[J]. 高电压技术,2002,28(2):21-23.

[13] 南敬,徐涛,万小东,等. 人工模拟自然横风条件下绝缘子快速积污特性[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3323-3330.

[14] 吕玉坤,赵伟萍,庞广陆,等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. 电工技术学报,2017,33(1):209-216.

[15] 杨帅,周文俊,李涵,等. ±800 kV 楚穗特高压直流线路复合绝缘子自然积污特性[J]. 高电压技术,2018,44(3):952-958.

[16] 张志劲,刘小欢,蒋兴良,等. 污秽不均匀度对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2013,39(2):280-286.

作者简介:

唐巍(1979),高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

梁明(1973),教授级高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

盛道伟(1982),硕士,高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作;

霍锋(1979),博士,高级工程师,从事超高压输变电外绝缘技术、高压试验技术的研究工作;

刘从法(1979),硕士,高级工程师,从事架空输电线路设计和研究工作。

(收稿日期:2019-06-12)

(上接第 76 页)

充分利用主站监控系统信号,分析存储历史数据规律,多维数据相互印证,更大程度发掘系统组合分析优势,将本侧、对侧信号相结合,形成发散型信息关联,将局域信息转化成为广域事件,逐步完善信息-事件匹配规程,提高信息事件推演准确性。

实践证明,通过监控信息事件化可以帮助监控人员第一时间判断出电网故障情况并给出事件预警,部署该功能只需采集现有的监控信息,结合核心算法推演出事件,便于监控人员实时掌握现场情况,极大方便电网事件监视与分析,提高电网安全运行水平。

参考文献

[1] 李田. 数据挖掘技术及其在电力行业过程监控中的应用[J]. 科技与创新,2019(2):144-145.

[2] 许振飞,邵明锋,张梅,等. 对电力信息通信系统监控模型设计及应用的探讨[J]. 电子世界,2018(24):177-178.

[3] 张金荣,刘孝旭,虞国元,等. 变电站后台监控信息的分层分类监视[J]. 农村电气化,2011(6):44-45.

[4] 李海燕. 电力系统调度监控一体化运行探究[J]. 通信电源技术,2018,35(10):271-272.

作者简介:

代宇涵(1989),硕士研究生,现从事调度自动化技术支持工作。

(收稿日期:2019-04-08)

非正常回路中感应电流引起电容式电压互感器发热的研究

郭世晓,艾飞,胡巍,洪丽,林楠,张如宏

(国网浙江省电力公司杭州供电公司,浙江 杭州 310009)

摘要:电容式电压互感器对遥测、继电保护等二次设备的正常运行和电网的安全稳定起着重要作用,运行中的电容式电压互感器如出现异常情况,应立即查明原因并及时处理,这要基于有效的故障检测、诊断和处理技术。根据一起带电检测发现的110 kV电容式电压互感器家族性缺陷,给出了缺陷现象、查找过程和最终处理措施,并从理论上分析了此家族性缺陷形成的原因,锁定了具体的发热点,确定了缺陷是由厂家安装工艺不合格造成的,理清了此类缺陷的排查和处理方法。最后,结合日常巡视、红外测温、电气试验及工作经验,对运行电容式电压互感器的故障诊断和运行维护提出了建议。

关键词:电容式电压互感器;发热缺陷;故障诊断;红外测温

中图分类号:TM451 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)05-0082-04

Research on Overheating of Capacitive Voltage Transformer Caused by Induced Current in Abnormal Circuit

Guo Shixiao, Ai Fei, Hu Wei, Hong Li, Lin Nan, Zhang Ruhong

(Hangzhou Power Supply Corporation, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310009, Zhejiang, China)

Abstract: The capacitive voltage transformer (CVT) is significant for the normal operation of secondary electrical equipment and reliable power systems, so it is necessary to identify the cause and maintenance timely if the running CVTs have unusual situations, which depends on effective techniques of fault detection, fault diagnosis and fault maintenance. Based on the familial fault of a 110 kV CVT which has been detected recently, the fault phenomenon, diagnosis process and final handling measures are provided, the formation reasons of the familial fault are theoretically analyzed, and then the specific heat spot is locked out. It is determined that the cause is failure of factory installation process, thus the investigating and handling methods of the similar fault are sorted out. Finally, combined with routine inspections, infrared temperature measurement, electrical test and work experiences, the references and suggestions for fault diagnosis, operation and maintenance of CVT are proposed.

Key words: capacitive voltage transformer; heat fault; fault diagnosis; infrared temperature measurement

0 引言

电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)是利用串联电容分压原理实现电压变换的,与传统电磁式电压互感器相比,具有输出容量大、瞬变响应速度快、经济成本低、安全可靠、可兼作耦合电容器等优点。因此,中国35 kV及以上电力系统的电压测量一般采用CVT设备,电磁式电压互感器主要应用于110 kV以下的小电流接地系

统^[1-3]。电力系统采用CVT输出二次侧电压,供测量、计量和继电保护装置采样,故运行中的CVT如有缺陷,不仅会影响测量、计量的准确度,甚至可能导致保护装置误动、拒动,会严重影响电网的安全稳定运行^[4-5]。

国网杭州供电公司运行维护人员在220 kV变电站带电检测过程中发现某变电站4号主变压器110 kV CVT的A相油箱存在严重点状发热现象,在停电更换同批次备品后,发现新更换CVT的相同部位仍发热,初步判断为家族性缺陷。国网杭州供电

公司目前有上百台该厂家同类型 CVT 在运行使用,因此对此类型 CVT 进行全面红外测温排查,又发现一台有相同缺陷的运行 CVT。下面从理论上分析了此 CVT 发热的原因,给出了此类缺陷的处理措施,为变电运行维护人员和变电检修人员提供参考,避免发生同类缺陷时盲目停电,并结合实际工作经验提出了相关建议及防范措施,预防此类缺陷再次发生,确保电力系统安全稳定运行。

1 缺陷发现过程

某日,天气晴,环境温度约 10 °C 左右。运行维护人员在对某 220 kV 变电站进行全站带电检测时,发现 4 号主变压器 110 kV 侧 A 相 CVT 的电磁单元油箱局部发热,达到了 24.4 °C,比 B 相和 C 相 CVT 的相同部位(12.2 °C)高出 12.2 K。根据规程 DL/T 664-2008《带电设备红外测温诊断应用规范》^[6]可知,电压互感器发热现象一般为电压致热型缺陷,相对温差超过 2 K 即可构成重要缺陷。现场红外测温图谱显示的发热点位于 CVT 电磁单元处,红外测温图谱如图 1 所示。



图 1 红外测温

次日,检修人员对该 CVT 进行红外复测,测试结果和运行人员所测数据接近。DL/T 664-2008《带电设备红外测温诊断应用规范》关于电压致热型设备缺陷的诊断判据规定为:温差为 2~3 K 即建议进行介损、油色谱及油中含水量测量^[6]。由于该 CVT 温差已达到 12.2 K,可判定为重要缺陷以上,因该 220 kV 变电站恰在进行 110 kV 老旧 AIS 设备改造,故检修人员决定结合该站的改造计划进行紧急处理。检修人员对留存的同型号备品 CVT

进行电气试验,各项电气试验合格。临时停役该站 4 号主变压器,更换了该缺陷 CVT,但运行 6 h 后红外测温发现,新更换 CVT 的相同部位仍发热,经查询该 CVT 与缺陷 CVT 为同批次产品,可能存在家族缺陷,后续的全面红外测温排查证实了这一点。

2 CVT 的基本原理和基本结构

CVT 的电气原理接线如图 2 所示。

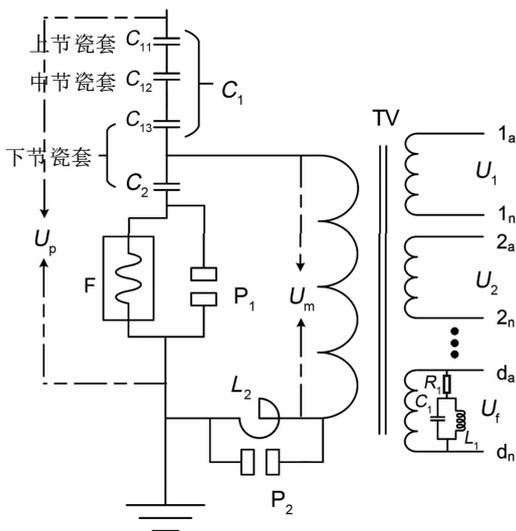


图 2 CVT 电气原理接线

CVT 由电容分压器(又分为高压电容 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} ,中压电容 C_2)、电磁单元(包括中间变压器和补偿电抗器)和辅助设施(包括阻尼器、保护装置等)组成。其中电容分压器将电力系统一次的高压(35 kV 及以上)降为中压(一般为 10~20 kV),电磁单元实现一、二次电气隔离与电压二次变换(中间变压器将中压变换为标准二次侧电压 $100/\sqrt{3}$ V 或 100 V)。从外观看, CVT 一般由 3 节瓷套和 1 个电磁单元油箱构成,高压电容 C_{11} 和 C_{12} 分别位于上、中节瓷套,高压电容 C_{13} 和中压电容 C_2 位均在下节瓷套;电磁单元和辅助设备则安装在下部电磁单元油箱中,下节瓷套和电磁单元油箱通过法兰连接^[5,7-8]。

图 2 中: C_1 为高压电容,由 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} 组成; F 为结合滤波器; P_1 、 P_2 为保护装置; L_2 为补偿电抗器; Z 为阻尼器; TV 为中间变压器; $1a-1n$ 、 $2a-2n$ 等为中间变压器二次绕组,其输出的二次电压 U_1 、 U_2 等供给保护、计量及测量装置; $da-dn$ 为剩余绕组。

根据电容器分压原理,中压 U_m 与高压 U_p 的关系式为

$$U_m = U_p C_1 / (C_1 + C_2) \quad (1)$$

由电路基础知,式(1)只有在中压侧开路或接有高阻抗负载(如静电电压表等)时才成立,即要求运行 CVT 的二次回路带有很大负荷。对于二次回路,电容分压器相当于电压源,其内阻越小,带负载能力越高,故设计在 CVT 电容分压器中串联一电感(即补偿电抗器 L_2),理想情况下可实现全补偿,即补偿电抗器的阻抗 Z_{L_2} 等于电容分压器感抗的内阻 Z_c 。

$$Z_{L_2} = Z_c = 1/\omega(C_1 + C_2) \quad (2)$$

实际情况需考虑角差,一般设计为过补偿,即 Z_{L_2} 稍大于 Z_c 。这样的设计造成 CVT 结构中同时存在电容元件和电感元件,电力系统发生扰动产生的电冲击或过电压可能导致 CVT 出现铁磁谐振现象,故 CVT 二次侧的剩余绕组均装设有阻尼器,就是利用电感 L_1 和电容 C_1 构成工频下的并联谐振回路,并与电阻 R_1 串联,吸收多次谐波的能量。

3 缺陷原因分析

该缺陷 CVT 于 2005 年 3 月生产,并于 2006 年 3 月投运,运行超 10 年。型号为 WVB2110-20H,生产编号为 133790,额定电压比为 $(110/\sqrt{3}) : (0.1/\sqrt{3}) : (0.1/\sqrt{3}) : 0.1$,绝缘介质为油浸纸,上节电容量为 28 000 pF,下节电容量为 67 000 pF。

因外观检查未发现缺陷 CVT 的其他部位存在异常,为查明该家庭性缺陷引起 CVT 电磁单元油箱发热的原因,防止同类缺陷再次发生,对更换下来的缺陷 CVT 进行了一系列的电气试验和解体分析。

绝缘电阻试验、介损及电容量试验和阻尼电阻试验均未发现异常情况。结合 CVT 红外测温检查现象及电气试验看,该缺陷 CVT 的电容部分完好(含分压电容),因此推断故障发热点位于电压互感器电磁单元。吊起电容分压器单元后,检查油箱内油位正常,油的微水测试和油色谱分析均正常,待油箱内油全部吸干后,发现电磁单元油箱内下部一只阻尼电阻的穿心螺杆与油箱内壁非正常接触,如图 3 所示。对照红外图谱,发热点的中心部位与该非正常接触部位吻合。

根据该缺陷 CVT 发热部位和电磁单元接线原理图,再结合 CVT 箱体结构图,得知穿过阻尼器速饱和电抗铁芯的安装支架与箱体之间形成了一个非

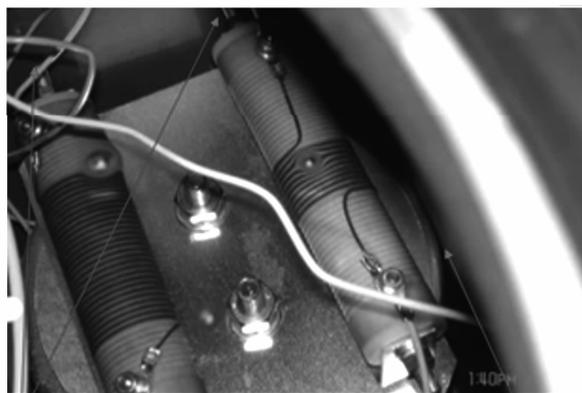


图 3 电磁单元油箱解体

正常的闭合回路。阻尼器的额定工作电压为 CVT 的二次剩余绕组输出电压,即交流 100 V。根据电磁感应定律可知,电磁单元阻尼线圈中存在变化的电磁场,此非正常回路因电磁感应产生了感应电流,示意如图 4 所示。因阻尼电阻穿心螺杆与油箱内壁的接触部位电阻大,感应电流在此非正常接触点引起点状发热,原理类似于变压器铁芯多点接地造成

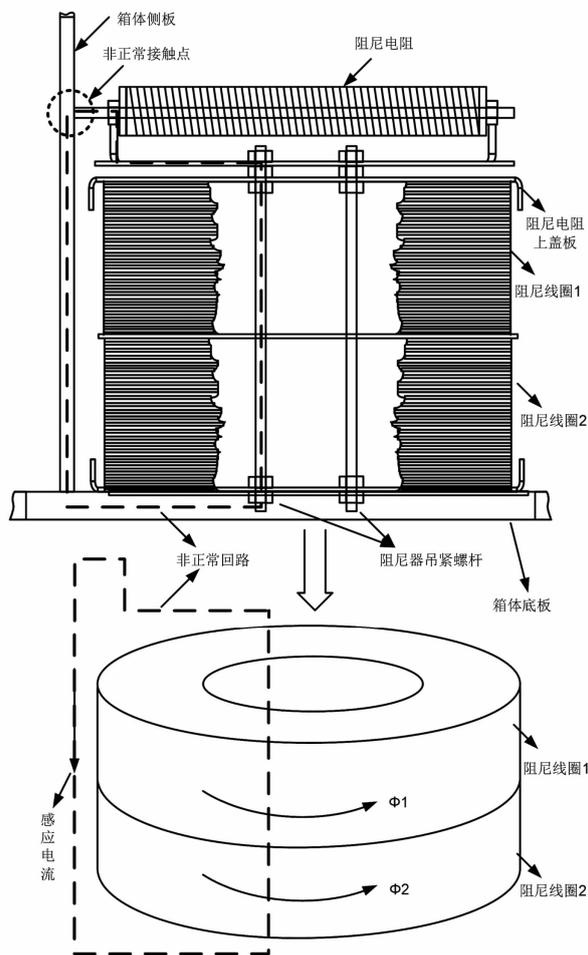


图 4 感应电流产生

的环流发热^[9]。

4 缺陷处理

由上节原因分析可知,该 CVT 发热是非正常回路中感应电流引起的,属于电流致热型缺陷。根据 DL/T 664 - 2008《带电设备红外测温诊断应用规范》,电流致热型缺陷的温差不超过 15 K 均属于一般缺陷。又构成非正常回路的是螺栓、外壳等非主要元件,且经厂家试验验证,已更换下的缺陷 CVT 的输出电压、阻尼器抑制铁磁谐振的功能均正常,即该缺陷不影响 CVT 的正常运行,故暂时不再安排该 220 kV 变电站 4 号主变压器 110 kV A 相 CVT 的停电处理工作。

对已更换下的缺陷 CVT 进行维修,调整其阻尼器与电磁单元油箱内壁之间的间隙,同时在油箱内壁和阻尼器之间增加电工绝缘纸,确保运行中不出现发热。对新更换上去的备品 CVT 在停电处理前需每周对其进行红外测温跟踪,并对二次电压进行监视,发现缺陷有发展趋势或其他异常情况要及时上报。

对在运行的 2005 年及以前生产的同类 CVT,进行了全面红外测温普查并统计温度异常情况,共发现 3 台有相同缺陷的 CVT,后结合停电计划安排了现场维修。

5 结语

目前, CVT 设备的在线监测技术和带电测试技术还不太成熟,一般通过综合采取多种方法,如利用红外测温、局部放电测试、绝缘电阻测试、介损及电容测量、油样试验等各种手段发现和分析诊断 CVT 的异常情况,确定故障原因,在 CVT 缺陷发展成为事故之前及时发现并消除,确保电网完全稳定运行。

针对 CVT 设备的运行维护,结合实际工作经验,给出以下建议:

1) 为避免 CVT 的材料、备件质量及生产、装配工艺不合格导致的缺陷,电力公司应完善对电力设备厂家的评价体系,并加强对 CVT 设备厂家设计、制造阶段的全过程管控,严把设备全过程技术

监督关。

2) 加强对 CVT 二次电压及遥测数据的监视,当相关装置的测量、计量数据出现异常时,运行人员应及时发现并初步判断二次电压异常的原因,以便检修人员迅速作出应急反应,选择合适的诊断方法最终判断具体原因。

3) 积极开展运行 CVT 带电检测技术应用,如红外线测温诊断设备故障具有准确、实时、快速的特征^[10]。运行人员应通过定期对 CVT 进行红外线测温巡视,在无需停电的情况下及早发现 CVT 设备缺陷,排除事故隐患。

参考文献

- [1] 乐健,柳永妍,李琼林,等. 电容式电压互感器谐波测量误差试验技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(8): 108 - 113.
- [2] 彭庆华,陈龙,康文斌,等. 电容式电压互感器谐波测量误差分析[J]. 高电压技术,2015,3(41):956 - 962.
- [3] 冯宇,王晓琪,陈晓明,等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4968 - 4975.
- [4] 姚建光,邹逸云,冯伟,等. 电容式电压互感器的暂态特性及其对微机继电保护装置影响的研究[J]. 高压电器,2009,45(4):34 - 36.
- [5] 咸日常. 电容式电压互感器常见故障分析处理方法和预防措施[J]. 变压器,2002,39(5):38 - 41.
- [6] 带电设备红外测温诊断应用规范:DL/T 664 - 2008[S],2008.
- [7] 王德忠,王季梅. 电容式电压互感器误差特性的研究[J]. 高压电器,2001,37(1):5 - 9.
- [8] 陈玉峰,李永宁,尹奎龙,等. 电容式电压互感器油箱过热故障分析[J]. 高压电器,2008,44(5):486 - 488.
- [9] 王胜辉,律方成,李楠,等. 变压器铁心接地在线监测及限流装置[J]. 高压电器,2008,44(2):156 - 164.
- [10] 何子东,付炜平,霍春燕. 红外监测诊断电容式电压互感器故障分析[J]. 高电压技术,2008,34(6):1310 - 1312.

作者简介:

郭世晓(1990),硕士研究生,工程师、技师,从事变电设备的运行与维护工作,研究方向为电网安全运行与突发事件控制。

(收稿日期:2019-05-06)

基于超高压变电设备缺陷特征的状态检修提升策略

汪鑫¹, 王紫鉴¹, 魏阳²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610031;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:在提倡清洁能源、水电消纳的背景下,结合四川电网的独特性,阐述了四川状态检修开展情况、带电检测发展现状,指出状态评价中存在的问题。基于近3年带电检测结果,通过分析缺陷与地形、负荷、雷击分布、设备运行年限、设备类型的特征关系,提出变电设备状态检修策略提升的建议,分别从数据应用、检修检测、设计采购、设备运维几方面进行了阐述。

关键词:超高压;缺陷;状态检修;策略

中图分类号:TM63 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2019)05-0086-06

Promotion Strategy of Condition Based Maintenance Based on Flaw Characterization of Extra-high Voltage Substation Equipment

Wang Xin¹, Wang Zijian¹, Wei Yang²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Maintenance Company, Chengdu 610031, Sichuan, China;

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

Abstract:In the context of promoting clean energy and hydropower consumption, the development status of condition based maintenance and charged detection in Sichuan is described combined with the uniqueness of Sichuan power grid. The problems in equipment condition evaluation are also pointed out. According to the achievements of charged detection in last three years, the suggestions of promotion strategy are proposed for condition based maintenance through the analysis of the defects characteristic relation between defects and terrain, load, lightning stroke, operation life and equipment type. These suggestions include data application, maintenance, inspection, design purchase and equipment maintenance operation.

Key words:extra-high voltage; defects; condition based maintenance; strategy

0 引言

随着四川电网规模的扩展和藏电外送工程的建设,相当大比例的输电线路和变电站建在了地质条件恶劣的地区。长期的重载运行、频发的地质灾害、恶劣的气候环境以及相对分散的站址给输变电设备的运维和检修工作带来巨大压力。受电网运行方式、生产效益、人员结构、气候环境和设备工况等多因素制约,四川电网状态检修发展不充分,停电相对难、运行时间增长、气候环境影响、不良工况使故障频发。

状态评价体系在实践中仍存在几方面问题:一

是部分基础数据更新不及时、不齐全,导致生产管理系统台账和业务数据录入与实际有偏差;二是评价仍依赖于人工处理,但人员素质结构性差异明显;三是对运行状态下状态量采集不足,会出现“事后评价”,状态评价准确性有待提高;四是带电检测数据未能有效对接评价体系,设备缺陷数据尚未有效利用^[3-8]。

为寻求新策略从源头提升状态检修质效,在一定程度上降低设备故障率,基于四川500 kV变电站的带电检测工作成果,总结带电检测发现的缺陷与海拔高度、负荷分布、雷击分布、运行年限、设备类型等变量因素的特征关系,提出状态检修质效提升策略。从系统数据的应用、变电站设计环节、设备运行

维护、设备检测检修方面提出建议^[1-2]。

1 缺陷的区域影响规律

四川 500 kV 及以上变电站地域分布广泛, 面临环境各异, 因此变电站在设计类型、负荷分布、运行环境方面存在较大差异。下面将从地形、地貌、负荷分布、雷击分布、海拔、气候等特点进行缺陷的区域性规律阐述。

1.1 地形分布特性的影响

将带电检测发现的缺陷与所处海拔建立联系, 缺陷的分布有以下特征, 如表 1 所示。

表 1 缺陷与变电站海拔关系

| 类别 | 缺陷数量 | | | |
|------|---------|----------------|----------------|---------|
| | >3000 m | >2000 ~ 3000 m | >1000 ~ 2000 m | ≤1000 m |
| 局部放电 | 5 | 8 | 20 | 27 |
| 红外检零 | 0 | 14 | 31 | 44 |
| 紫外电晕 | 6 | 19 | 84 | 421 |

缺陷数量随海拔升高而递减, 但因变电站数量也有锐减趋势, 仅从数量上不能完全说明二者关系, 因此通过站均缺陷数量来分析二者关系, 如图 1。

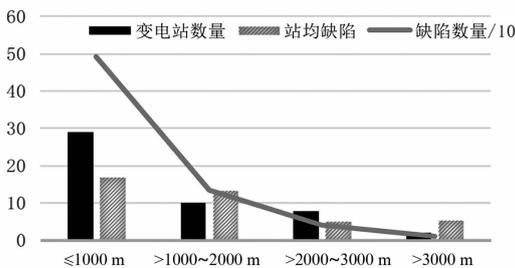


图 1 缺陷与海拔趋势关系

缺陷发生的数量随着海拔上升而呈现递减趋势。分析认为在站均缺陷数量随着海拔上升而递减的趋势背后, 高海拔变电站站均缺陷率低与设备类型有一定关系。变电站在规划设计阶段由于充分考虑了地形因素, AIS 变电站主要应用于四川中部和东部地区, HGIS 和 GIS 应用于川西等高原地区。因此高海拔变电站主要采用的是 GIS 和 HGIS 设备, 避免了其他复杂因素的影响, 一定程度降低了缺陷数量。

1.2 负荷分布特性的影响

四川水电资源集中在四川西部和南部地区, 而负荷集中在盆地中部的成都平原地区, 如图 2 所示。

缺陷统计显示, 负荷集中区域缺陷占比 65%, 水电集中区域缺陷占比 35%。对于以水电送出为主的变电站, 负荷率较重的时间区段集中在丰水期; 对于以负荷供电为主的变电站, 则负荷率较重的时间段集中在夏季高温和冬季低温时。因此在制定带电检测计划时, 需在丰水期前对西部变电站实施带电检测, 在高峰负荷来临前进行中东部变电站带电检测工作。

1.3 雷击分布特性的影响

线路遭受雷击时会产生雷击过电压, 可能导致开关动作。这将对站内设备造成冲击, 当设备状态不好时, 会造成设备击穿。因此须考虑雷击对设备造成的影响, 针对雷击跳闸频繁的变电站, 尽量保证在雷雨季节到来之前开展带电检测工作。

四川电网雷害严重程度在电力系统中排名前三, 凉山州、乐山、宜宾、雅安等地是输电线路雷击灾害高发区域, 山区复杂地形及高电阻率土壤给防雷工作造成了很大困难。为避免雷击造成设备损坏, 应在雷电季节到来之前, 对雷击跳闸高发的变电站进行带电检测, 确保设备运行状态良好。

统计四川省超高压线路近 4 年雷击跳闸次数, 如图 3 所示, 雷击跳闸从 3 月持续到 10 月, 6—8 月份最为集中, 雷击的地域分布特性如图 4 所示。因此在制定带电检测策略时, 攀西、甘孜等地区变电站的带电检测工作尽量在雷雨季节之前开展, 以保证设备的健康状态。

2 设备运行状态的影响规律

2.1 设备的运行年限影响

电力设备长期运行中, 缺陷会随着服役时间而增多, 这与设备的运行年限有密切联系, 各站运行年限统计如表 2 所示。

表 2 500 kV 及以上变电站运行年限统计

| 运行年限 | 变电站数/座 |
|-----------|--------|
| 1 年内 | 2 |
| 1 ~ 5 年 | 10 |
| 6 ~ 10 年 | 20 |
| 11 ~ 15 年 | 12 |
| 15 年以上 | 6 |

输变电设备的故障分布与设备的运行年限符合

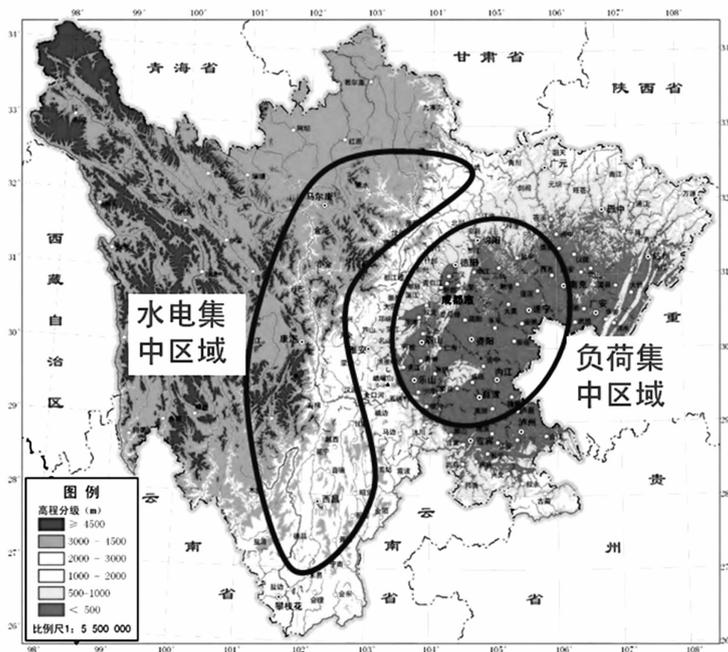


图2 四川地形差异及负荷分布

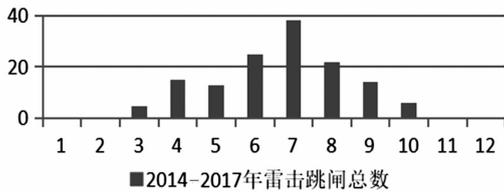


图3 每月累计雷击跳闸次数

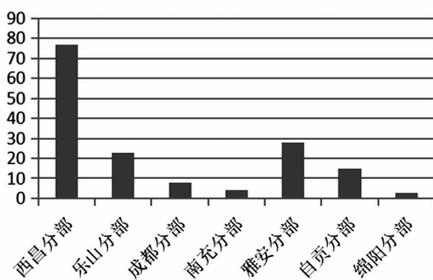


图4 近4年雷击跳闸总数

“浴盆曲线”规律,如图5,曲线分3个阶段:早期失效期、偶然失效期以及损耗失效期。

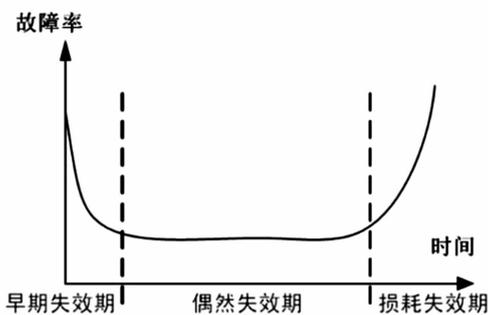


图5 浴盆曲线

新投设备由于设计、材料、部件磨合及安装工艺等原因,运行不稳定、故障的概率相对较高,这一阶段称作为早期失效;设备运行趋于稳定、故障率基本恒定,该阶段为设备的偶然失效期;设备长时间运行带来的老化使其故障率上升,进入损耗失效期。

统计西昌分部、雅安分部17座变电站近3年的所有缺陷数据,其与运行年限的特征如图6所示。整体上变电设备的缺陷率随着变电站运行年限的增长呈上升趋势,运行时间在3年以内的变电站处于早期失效期,缺陷率反而存在较高情况;运行在5—10年间的变电站设备相对稳定,存在缺陷率相对较低的情况;运行在15年以上的变电站,处于设备老化的损耗失效期,此时缺陷率整体较高,潜在故障风险大。

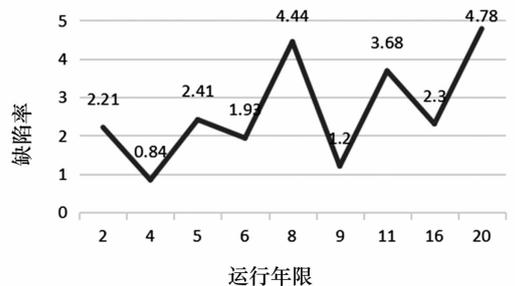


图6 设备运行年限与缺陷率关系

可根据运行年限和缺陷的特征关系,针对性地开展维护和检修工作。状态检修含A、B、C、D 4种类别,其中C类检修是设备的常规性检查、维护和试验;D类检修是不停电状态下的带电测试、外观检

查和维修。应加大 C、D 类检修力度,同时根据变电站年限规律深化 D 类检修工作。

2.2 设备的类型影响

从对各缺陷的处理及原因分析角度观察,以 GIS 类局部放电缺陷为例,涉及内部结构设计合理性的缺陷仅有 4.4%,剩余缺陷多为生产及安装工艺不良所致。设备厂家的工艺工序成为评价设备质量和性能的重要因素。因此,设备选型上更应结合生产厂家,重点考虑设备质量和性能,尽量选择设备综合性能好、抵御环境风险能力强且适宜于四川地域环境的生产厂家和设备型号。

3 状态检修提升策略

从两个方面提升状态检修策略:一是将主要变电设备带电检测项目补充至现有评价系统,缺陷以视图方式参与到状态评价过程;二是基于分析结果从缺陷管理、检修检测、设计采购、设备运维方面提出状态检修提升建议。

3.1 缺陷数据库的视图化

放电类型、放电幅值、放电图谱是缺陷的诊断依据,发展趋势图谱更是故障诊断的重要参考,因此局部放电类状态量选取要进一步细化。建议将带电检测按试验数据和缺陷视图引入评价系统,其流程如图 7 所示。

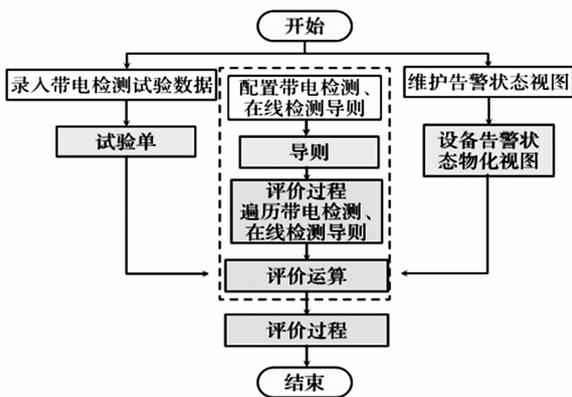


图 7 带电检测的评价流程

缺陷数据库的视图化:一是将缺陷的状态量特征图谱与设备准确关联;二是将时间和状态量结合形成趋势图谱数据库,在评价过程中对数据和图谱同时调用。带电检测模块的评价流程更大程度实现了设备台账信息、缺陷记录、检修记录等评价数据的深度整合,更有利于对设备状态做出准确判断及合

理安排检修时间,为识别投运设备故障的识别参数提供数据支撑。

3.2 检修检测方面提升策略

基于设备运行年限与缺陷特征间的关系,对不同变电站检测周期可以做相应调整,如表 3 所示。

带电检测计划编制时考虑以下几点:

1)在周期内按运行年限分批次地对变电站绝缘子进行检测、划分,结合“保电”“迎峰度夏”“迎峰度冬”合理安排检测的变电站顺序、区分检测项目周期。

2)优先平原地区,将变电站检测安排在对应的高负荷期间。

3)加大红外精确测温力度、GIS 局部放电检测频次。重点关注 GIS 局部放电检测、红外精确测温及紫外检测;高频局部放电检测可适当减少或不做,高频受外界干扰影响大效果不好。变压器电抗器以油色谱在线监测及红外测温为主,高频局部放电为辅;周期内按运行年限分批次对绝缘子进行检测。

检修方面,要重点关注运行时间在 2 年以下和 15 年以上的变电站,加强 GIS 专业巡视,在对一次设备进行检修时,可重点对表 4 中项目进行排查和检修。

3.3 设计及采购方面的选择

变电站设计环节包括水文、地质、测量、土建、电力等多方面内容。抛开其他因素,地区的电力输送需求是建站的初衷。在选址设计环节,建议考虑海拔、雷击分布性、负荷分布、设备类型的影响。变电站本身是为了解决电力输送问题,负荷的问题就无法规避,并不能够通过降低负荷来减少设备缺陷数量,且负荷也是动态过程。因此在可选址的片区范围,尽量选择海拔较高位置,避开雷击高发区域,优先采用室内 GIS 设备,采购成套生产且在运行中故障率、缺陷率较低的产品。

3.4 设备运维方面提升策略

根据变电站运行年限进行层级划分,分别按 5 年以下、5—15 年、15 年以上划分 3 个级别。缺陷率随时间而递增,中间存在相对稳定的运行期,因此要重点巡视 5 年以下、15 年以上变电站设备,加强跟踪缺陷情况及消缺力度。

除按正常巡视规程要求外,应增加或细化充气类设备气体压力、泄漏,瓷瓶类设备外观、充油类设备渗漏、金属接触类设备的发热、变压器类设备的声

表3 变电站检测周期调整

| 变电站年限 | 缺陷严重程度 | 检修策略 |
|------------------|--------|------------------------|
| 5年以内 (早期失效期) | 正常 | 按负荷、工况、气候等增加检测频次 |
| | 一般 | 增加跟踪次数,利用带电检测或在线监测掌握动态 |
| | 严重 | 跟踪复测,尽快处理 |
| | 危急 | 立即处理 |
| 5—10年 (偶然失效期) | 正常 | 调整周期不小于1年,不大于基准周期2倍 |
| | 一般 | 跟踪检测把握趋势,确认稳定后检测时间间隔延长 |
| | 严重 | 跟踪复测,确认后尽快停电处理 |
| | 危急 | 立即安排处理 |
| 15年以上 (损耗失效期) | 正常 | 检修检测不大于基准周期 |
| | 一般 | 密切跟踪关注,及时处理 |
| | 严重 | 立即处理 |
| | 危急 | 立即处理 |

表4 重点关注的几种设备及缺陷位置

| 设备 | 缺陷 | 位置 | 原因 |
|------|----------------|--------------|-------------------|
| GIS | 自由颗粒放电 异常震动 | 母线气室 PT气室 | 安装过程中掉落 磁致伸缩引起 |
| 隔离开关 | 异常发热 | 断口处、金属连接部位 | 接触电阻过大 |
| 套管 | 异常发热 | 金属连接板 | 接触电阻过大 |
| 线夹 | 异常发热 | 金属与金属连接 | 接触电阻过大 |
| 绝缘子 | 低/零值绝缘子 | 前5片 | 老化使绝缘下降 |
| 均压环 | 电晕放电 | 均压环表面 | 毛刺、脏污或松动引起放电 |

级和震动的巡视;加入红外精确测温、紫外电晕检测、声级检测、震动检测等先进手段,及时掌握设备的状态情况,获得更多评价状态量;利用好油色谱、局部放电的在线监测,竭尽所能覆盖设备各项指标。

将运行维护与试验有效对接,使运行维护过程中带电检测、在线监测的数据与试验数据互通,及时更新设备状态。试验专业做好数据收集、分析、诊断工作,及时将异常反馈给运行维护专业;加强线上带电检测缺陷的闭环管理,包括常规一二次缺陷、带电检测发现缺陷及状态检测案例编制等。从运行维护方面获取更多状态评价参考量,增加带电检测评分权重,将图谱、数据均纳入缺陷管理环节。

4 结 语

1)带电检测发现的缺陷数量随海拔上升而下

降,负荷集中区缺陷比例较大,缺陷率随着变电站运行时间增长而升高,但存在中间的稳定运行期,选择厂家设备时技术上应有考虑。

2)将带电检测按试验数据和缺陷视图引入状态评价系统,形成带电检测数据评价流程。

3)检修检测周期根据变电站运行年限调整。针对缺陷位置制定高效的解体处理方案,缩小处理范围。

4)变电站的选址在可选范围内尽量选择海拔较高位置,避开雷击高发区域,优先采用室内GIS设备,采购成套生产且在运行中故障率、缺陷率较低的产品。

5)变电运维方面,将变电站按年限划分为3类,有针对性提出巡视重点,运行维护中引入先进带电巡检手段,增加设备评价状态量及评分权重,将运行维护与试验专业深入结合,使设备状态评价更准确。

参考文献

[1] 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): 50-54.

[2] 吕伟业, 吴云, 曾德文. 中通道“西电东送”规划研究概论[J]. 电力建设, 2002, 23(11): 37-50.

[3] 杨荷娟. 输变电设备状态评价及可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[4] 郇嘉嘉. 电网设备状态检修策略的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[5] 盛鹏飞. 变电设备状态检修系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[6] 张永祥. 电力设备综合评价指标分析[J]. 青海电力, 2013, 32(1): 1-3.

[7] 杨贤, 饶章权, 柯春俊, 等. 广东电网输变电设备带电检测技术应用现状及提升策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 68-74.

[8] 付兆远, 孙英涛, 王宁, 等. 基于带电检测和在线监测的变电设备状态评价管理[J]. 山东电力技术, 2015, 42(7): 6-9.

作者简介:

汪鑫(1987), 硕士, 工程师, 中级工, 研究方向为高压与技术监督。

(收稿日期: 2019-06-09)

(上接第71页)

2) 探讨了水平 + 受压组合荷载的桩顶荷载 - 沉降的总体规律。与单独竖向(受压)荷载类似, 呈现出桩顶竖向位移随荷载增加而增加的特征, 水平荷载的存在会使桩顶沉降有所增加。但其增加值总体不大, 并且随荷载量级增大(达到极限承载力)时, 这一附加沉降量可能由正变负。

3) 探讨了水平荷载对支盘桩竖向受压承载力的影响。水平荷载的存在会使竖向承载力略有增加, 但总体上影响不太大。

参考文献

[1] 王东坡, 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(s1): 4645-4648.

[2] 巨玉文, 梁仁旺, 赵明伟. 挤扩支盘桩的荷载传递法及数值模拟[J]. 建筑技术, 2004, 35(3): 204-205.

[3] 肖琦, 王德宏, 徐晶. 输电线路挤扩支盘桩受力特性的试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(1): 124-130.

[4] 王有凯, 丰晓灿, 张敏霞. 挤扩支盘灌注桩承载性状的试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 799-803.

[5] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 371-375.

[6] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 实验力学, 2015, 30(s2): 159-162.

[7] 高笑娟, 朱向荣. 支盘桩理论研究及工程应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2010.

[8] 巨玉文, 梁仁旺, 赵明伟, 等. 竖向荷载作用下挤扩支

盘桩的试验研究及设计分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 308-311.

[9] 卢成原, 王志军, 孟凡丽. 不同土质中模型支盘桩在重复荷载作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(s1): 3141-3147.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[11] 苏晴晴, 夏红兵. 新型扩挤支盘桩竖向承载特征 FLAC^{3D} 数值分析[J]. 水利与建筑工程学报(自然科学版), 2017, 37(6): 71-75.

[12] 王成武, 龚成中. 支盘桩竖向承载性状模型试验研究及数值模拟[J]. 建筑科学, 2015, 31(7): 80-83.

[13] 王成武, 龚成中. 支盘桩桩周土位移场试验研究[J]. 建筑科学, 2015, 46(6): 511-513.

[14] 苏晴晴, 夏红兵. 支盘间距、数量、直径对新型支盘桩承载力的影响[J]. 安徽建筑大学学报, 2018, 26(4): 18-21.

[15] 蔡雨阳, 于东波. 挤扩支盘桩单桩竖向极限承载力分析方法研究[J]. 山西建筑, 2017, 43(24): 75-76.

[16] Zhang M X, Xu P, Cui W J, et al. Bearing Behavior and Failure Mechanism of Squeezed Branch Piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 935-946.

[17] Shi D, Xiao J, Yang C, et al. Research on the Plate Cavity Geometry of the Squeezed Branch Pile[J]. Procedia Engineering, 2014(73): 29-34.

作者简介:

王红(1993), 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。

(收稿日期: 2019-04-08)

主变压器低压侧三相空载电压不平衡分析

王能进, 周子洋, 李飞, 覃春阳, 王哲
(锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615000)

摘要:主变压器空载试验经常发生于各发电厂以及变电站, 由于设备出厂参数的差异一定程度上导致空载状态下主变压器低压侧三相电压不平衡。通过向量分析以及等效电路的方法, 分析了三相电压不平衡的原因, 同时对不同机组进行参数实测、运用数据计算, 为主变压器空载状态下主变压器低压侧三相电压不平衡分析提供可靠依据。

关键词:主变压器空载; 主变压器低压侧; 三相电压不平衡

中图分类号: TM403 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2019)05-0092-03

Unbalance Analysis of Three-phase No-load Voltage in Low Voltage Side of Main Transformer

Wang Nengjin, Zhou Ziyang, Li Fei, Qin Chunyang, Wang Zhe
(Jinping Hydropower Station, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: The no-load test of main transformer often occurs in power plants and substations, due to differences in factory parameters of equipment, there is three-phase voltage unbalance in low voltage side of main transformer under no-load condition. Through vector analysis and equivalent circuit method, the reasons for three-phase voltage unbalance are analyzed, and the parameters of different units are measured. The data computation provides a reliable basis for three-phase voltage unbalance in low voltage side of main transformer under no-load condition.

Key words: main transformer with empty load; low voltage side of main transformer; three-phase voltage unbalance

0 引言

三相电压不平衡作为电力系统最为常见的异常现象, 会对电力系统和用户造成一系列的危害, 将会引起旋转电动机的附加发热和振动、发电机容量利用率下降、绕组寿命缩短等一系列严重后果。主变压器低压侧三相电压作为发电厂重要机组参数, 直接关乎发电厂机组正常运转。

1 异常主变压器简介

某电厂1号主变压器低压侧共设3组单相手车式电压互感器柜(以下简称PT), 额定电压20 kV, 额定电压比 $(20/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/3)$ kV, 出线端子标志1a-1n, 2a-2n, da-dn, 准确级及其对应的额定输出分别为: 0.1级, 15 VA;

0.2级, 20 VA; 3P, 100 VA。

该电厂主变压器为单相油浸式、水冷双圈铜绕组升压电力变压器组, 三相组合容量为702 MVA。变压器高压侧采用油/SF₆套管与550 kV GIS相连; 低压侧采用油/空气套管与IPB相连; 高压侧中性点采用油/空气套管引出。低压绕组采用A柱和X柱两部分并联结构, 均为双层圆筒式, 上部出线。主接线如图1所示。

2 事件描述

2.1 事件现象

1号主变压器进行合闸充电试验(主变压器空载试验), 当主变压器空载状态后, 运行人员在主变压器低压侧PT端子箱上检查, 发现1BYH C相PT二次侧电压显示偏小, 此时故障录波波形如图2所示。从图中可看出主变压器三相电压不平衡, 低压

侧二次电压 A、B、C 三相分别为 58.358 V、58.282 V、56.757 V, C 相较 A、B 相低 1.5 V 左右。

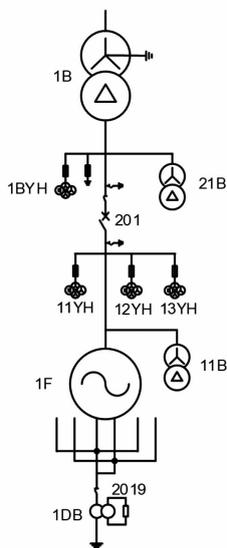


图1 主接线

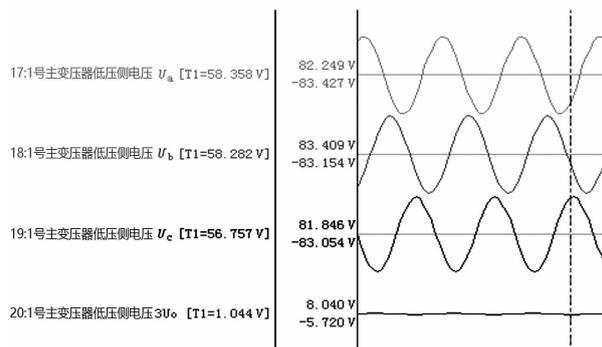


图2 1号主变压器空载状态故障录波波形

2.2 现场检查情况

对主变压器保护装置和故障录波装置中主变压器低压侧电压采样值进行检查,结果与 PT 端子箱电压表显示一致,初步判断为一次回路存在异常。对 1BYH C 相 PT 进行变比测试,变比误差满足要求。测试 1BYH C 相 PT 一次侧高压熔断器阻值为 14 Ω 左右,熔断器阻值正常。接着进行 PT 3 倍频感应耐压试验测试,通过用万用表测量 PT 二次绕组实际输入值与保护班在 PT 端子箱 PT 二次绕组上实测值进行对比分析,两者数值一致。再进行 PT 高压尾端与地导通情况测试,测得接地电阻值都为 0.02 Ω ,根据 DL/T 475-2017《接地装置特性参数测量导则》判断中性点接地状况良好。最后对 PT 进行直流电阻测试,分别将三相 PT 小车推入工作位置时测得直流电阻值均为 392.7 m Ω 左右(推入工作位置时,直流电阻实际测试值为 PT 一次回路

直流电阻与厂用高压变压器高压绕组、主变压器低压侧绕组直流电阻三者并联值),直流电阻平衡;将 PT 小车拉至检修位置,测试 PT 本体一次回路直流电阻值均为 1.17 k Ω 左右,直流电阻平衡。

待 1BYH C 相所有试验均正常后,将 1BYH C 相 PT 与 1BYH B 相 PT 本体进行对调,再次对主变压器进行充电,1BYH C 相 PT 二次绕组电压偏低现象仍未消失,此时可排除现象由 PT 本体原因所造成。再次检查确认一次设备无故障后,发电机出口断路器系统(GCB)合闸进行并网试验,该现象消除。

3 事件分析

3.1 向量图分析

通过查询 1 号机组故障录波历史数据发现,1 号机组检修前空载状态下即会出现主变压器低压侧三相电压不平衡现象,GCB 合闸瞬间主变压器低压侧三相电压即平衡。初步判断此现象一直存在,与机组的参数三相不平衡有关。

对于不接地系统而言,电压取决于阻抗和容抗,但对于阻抗很大可忽略时就主要取决于容抗。在三相对地电容不平衡时,将会导致中性点漂移,具体漂移的角度及方向取决于三相对地电容不平衡情况。三相对地电压向量图如图 3 所示。某相容抗值越小,即该相对地电容值越大,则中性点向该相电压方向漂移,当某相对地电容相比其他两相越大,则中性点 O' 向该相偏移越严重。

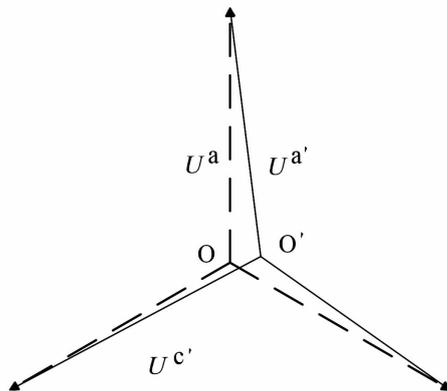


图3 三相对地电压向量

3.2 等效电路图构建

某电厂发电机出口 20 kV 系统属于不接地系统

表1 机组电容实测

| 机组 | 相别 | 低压绕组 对地电容/nF | GCB 主变压器 低压侧电容/nF | GCB 发电机 出口侧电容/nF | 发电机定子绕组 对地电容/nF | 主变压器空载 二次侧电压值/V | 机组并网后 二次侧电压值/V |
|-----|----|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 4号机 | A | 25.0 | 263.9 | 129.3 | 2720 | 58.3 | 58.2 |
| | B | 25.0 | 267.1 | 130.8 | 2700 | 57.9 | 58.1 |
| | C | 24.8 | 266.4 | 130.6 | 2700 | 57.9 | 58.1 |
| 1号机 | A | 25.4 | 271.9 | 135.9 | 2484 | 58.5 | 58.4 |
| | B | 25.9 | 273.6 | 137.3 | 2486 | 58.3 | 58.4 |
| | C | 25.1 | 281.5 | 134.2 | 2488 | 56.8 | 58.4 |
| 2号机 | A | 25.3 | 265.2 | 133.0 | 2480 | 57.8 | 58.2 |
| | B | 25.2 | 266.6 | 130.9 | 2485 | 57.7 | 58.2 |
| | C | 25.4 | 262.5 | 130.7 | 2487 | 57.8 | 58.2 |

且主变压器、厂用高压变压器采用 Y - D11 接线,在交流电压作用下,可以看成是如图 4 的一个纯电容和电阻所组成的等效电路。此时对等效电路图进行分析,由于介质中的绝缘电阻极大,可以忽略不计,因此可以看成是一个纯电容的等效电路。

如图 4 所示,图中 C_{B1} 、 C_{B2} 、 C_{B3} 为主变压器低压侧三相对地电容, C_{g1} 、 C_{g2} 、 C_{g3} 为 G_{CB} 主变压器低压侧三相对地电容, C_{d1} 、 C_{d2} 、 C_{d3} 为 GCB 发电机出口侧三相对地电容, C_{c1} 、 C_{c2} 、 C_{c3} 为发电机定子绕组三相对地电容。

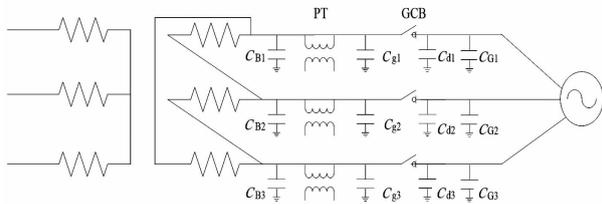


图4 等效电路

当变压器空载时, GCB 处于分闸状态, 此时主变压器低压侧三相对地电容为主变压器对地电容 C_B 和 GCB 主变压器低压侧对地电容 C_g 。当两个并联电容不平衡时, 主变压器低压侧电压中性点可能由 O 点漂移至 O', 从而导致主变压器三相电压不平衡。当机组并网后, GCB 处于合闸状态, 由于发电机对地电容 C_c 远远大于 C_B 、 C_g 和 C_d , 此时 C_B 、 C_g 和 C_d 可以忽略不计, 起决定作用的为发电机对地电容 C_c 。当三相 C_c 对地不平衡时, 将会导致发电机出口电压和主变压器低压侧电压三相电压不平衡。

3.3 实测数据分析

利用机组检修进行主变压器低压绕组对地电容、GCB 主变压器低压侧电容、GCB 发电机出口侧电容、发电机定子绕组对地电容数据实测。以 1 号机组为例, 空载状态时, C 相主变压器低压侧电容为

306.69 nF, A 相主变压器低压侧电容为 297.36 nF, B 相主变压器低压侧电容为 299.56 nF, C 相与 A、B 相间的最大差值较每相总对地电容值占比较大, 达到 2.3% 左右。

当 GCB 合闸后, 主变压器低压侧对地电容需考虑 GCB 发电机出口侧电容以及发电机定子绕组对地电容, 此时 C 相主变压器低压侧电容为 2 928.89 nF, A 相主变压器低压侧电容为 2 917.26 nF, B 相主变压器低压侧电容为 2 922.86 nF, 最大差值占总电容比仅为 0.39%。因此当 GCB 合闸后电容差值较总电容值占比极大降低, 使主变压器低压侧电压差值也降低, 从而三相电压趋于平衡。

4 结 语

对主变压器空载三相电压不平衡的原因进行了分析, 得到如下结论:

当主变压器空载时, 如果三相对地电容不平衡, 将会导致主变压器低压侧三相电压不平衡; 但由于发电机对地电容较大, 且三相基本平衡, 发电机并网后主变压器低压侧三相电压即平衡, 所以主变压器送电后在确认一次熔断器正常的情况下, PT 二次侧电压值略微不平衡属于正常现象。

参考文献

- [1] 付兴文. 变压器空载时三相电压不平衡原因分析[J]. 农村电气化, 2005(5): 18.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

作者简介:

王能进(1991), 助理工程师, 从事发电厂继电保护相关工作。

(收稿日期: 2019-06-04)