

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.39
2016
No.5



成都科星电力电器有限公司



ZBW系列预装式变电站



KYN61-40.5

铠装移开式交流金属封闭开关设备



KYN28A-12(GZS1-12)

铠装移开式交流金属封闭开关设备



KVBI-12户内真空断路器

成都科星电力电器有限公司成立于1996年，注册资本一亿零一百万元，是国网成都供电公司二级产业单位，主要从事40.5 kV以下高、低压成套配电设备和预装式变电设备、充电设备的研发、设计、生产、销售，现有员工300余人，其中工程师及各级各类专业技术人员达100多人。公司由生产中心、技术中心、市场营销中心、物资管理部、安全监察质量部、综合部、财务资产部、稽核部构架组成。

公司拥有现代化生产厂房及进口激光切割机、剪、折、冲等数控设备，工艺技术先进、设备完善、检测手段齐全。目前有高低压成套配电设备类、预装式箱式变电站类、高压元器件类、电子元器件类、充电设备共五大系列产品。公司与施耐德、西门子、ABB等国际先进企业保持紧密合作，联合生产一系列具有国际一流水平的高低压成套配电装置和设备。

公司连续多年被评定为“四川省高新技术企业”、“成都市市级企业技术中心”、“四川省质量信用AAA企业”、“成都市安全生产先进单位”、“成都市百强企业”、“成都制造业100强企业”，公司拥有多年高低压成套设备生产经验，“KEE”品牌被四川省人民政府授予“四川名牌产品”称号，多项产品获得国家外观设计和实用新型专利，并广泛应用于党政机关、大型房地产、电网及用户变电站、工矿企业、城市道路等场所，其性能稳定、质量可靠，获得国内外客户一致好评。

展望未来，前程似锦，科星电器将秉承“卓越品质·服务电网”的发展理念，紧紧围绕电网建设和市场需求，立足做优做精传统产品，追求卓越，努力超越，以一流的产品、一流的服务，与国内外客户携手共进，共创美好未来。



《四川电力技术》
编辑委员会

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邬小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2016 年第 39 卷第 5 期(总 245 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:胡 灿

副 主 编:吴小冬

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:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川经纬印务有限公司

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 * 4300 * 20 *

2016-10

目 次

· 基金项目 ·

稳控切配套火电方案不同对暂稳压升的影响

..... 李自明 姚秀萍 王海云 王维庆 常喜强 王 衡(1)

变电站电力设备红外智能巡检、诊断与高效预警系统的应用研究

..... 徐丽华 张 龙(5)

· 电力系统 ·

含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析

..... 周士琼 王 倩 吕 潇 郝勇奇 刘东霖 倪亚玲(9)

基于 Matlab/Simulink 的光伏电池输出特性仿真分析

..... 张 峰 景 敏 乔 怡(14)

多馈入直流系统短路比和有效短路比研究 李召兄 吴 丽 苗文静(19)

云南电网和主网利用直流输电系统黑启动的策略研究

..... 赵 睿 卢斯煜 王 曦 柳勇军 涂 亮 李保宏(26)

新型三电平拓扑的无功补偿器控制研究 岳 艳 周剑君(32)

基于积分全局滑模控制的双闭环直流调速系统设计

..... 杨代利 刘 霞 苏博妮 鲁仕贵(36)

发电机励磁系统低励限制对进相深度的影响 王 涛 黄 睿 韩爱民(40)

含多微网接入配电网的联合调度及其运行优化 陈 颖(43)

· 电网技术 ·

四川地区变电站高压电气设备锈蚀情况及防腐技术研究

..... 朱 军 赵兴虹 吴 驰 李巍巍 邓元实 马小敏(49)

某 750 kV 主变压器中性点电抗器配置及过电压绝缘配合研究

..... 庄 书 印 欣(54)

500 kV 架空线直击和感应雷暂态过电压计算

..... 李天鹭 陈 谦 王海林 李文帆 冯 肯(58)

绝缘子故障在线监测系统的设计与实现

..... 叶 芳 陈韶瑜 李 田 齐文艳 傅思伟(63)

GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析 邱 炜 刘 石(67)

电气设备在线监测系统动态误差来源分析方法

..... 吴 华 甘德刚 陈 彬 梁 星 龚金龙(71)

高压交流输电工程电磁环境影响探讨 廖 磊 严 青 佟如意(78)

· 应用研究 ·

基于时间戳的时间信号自适应辨识与解析

..... 温丽丽 张国芳 彭 昊 陈 艳(82)

四川电网线损管理中的三率差异性分析

..... 贺星棋 周 桦 鲜其军 戴松灵(86)

基于全景视图的电力企业数据资产价值量化研究

..... 罗晓伊 徐厚东 佟如意(90)

CONTENTS

Influence of Cutting Different Thermal Power on Transient and Steady - state Voltage Rise in Stability Control Schemes	Li Ziming Yao Xiuping Wang Haiyun Wang Weiqing Chang Xiqiang Wang Heng(1)
Application Research on Infrared intelligent Inspection,Diagnosis and Efficient Early Warning System for Electrical Equipment in Substation	Xu Lihua Zhang Long(5)
Analysis on Transient Stability of Power System with Large - scale Wind Farms	Zhou Shiqiong Wang Qian Lv Xiao Hao Yongqi Liu Donglin Ni Yaling(9)
Simulation Research on Output Characteristics of Photovoltaic Cells Based on Matlab/Simulink	Zhang Zheng Jing Min Qiao Yi(14)
Research on Short - circuit Ratio and Effective Short - circuit Ratio in Multi - infeed Direct Current System	Li Zhaoxiong Wu Li Miao Wenjing(19)
Research on Black - start Schemes Using HVDC System in Yunnan Power Grid and Main Southern Power Grid	Zhao Rui Lu Siyu Wang Xi Liu Yongjun Tu Liang Li Baohong(26)
Research of Reactive Power Compensator Control Based on New Type Three - level Topology	Yue Yan Zhou Jianjun(32)
Design of Double Closed - loop DC Speed Control System Based on Integral Global Sliding Mode Control	Yang Daili Liu Xia Su Boni Lu Shigui(36)
Influence of Low Excitation Limit in Excitation System of Generator on Leading Power Factor Depth	Wang Tao Huang Rui Han Aimin(40)
Joint Dispatching for Connecting Multiple Micro - grids to Distribution Network and Its Operation Optimization	Chen Ying(43)
Research on Corrosion and Corrosion Protection of HV Electrical Equipment in Substation of Sichuan Area	Zhu Jun Zhao Xinghong Wu Chi Li Weiwei Deng Yuanshi Ma Xiaomin(49)
Configuration of Neutral Point Reactor of A 750 kV Main Transformer and Research on Overvoltage and Insulation Coordination	Zhuang Shu Yin Xin(54)
Calculation of Transient Overvoltage Induced by Direct Lightning Flash and Lightning Induction along 500 kV Overhead Transmission Lines	Li Tianzhi Chen Qian Wang Hailin Li Wenfan Feng Ken(58)
Design and Implementation of On - line Monitoring System for Insulator Fault	Ye Fang Chen Shaoyu Li Tian Qi Wenyan Fu Siwei(63)
Discharge Fault Location and Analysis of GIS under AC Withstand Voltage Test	Qiu Wei Liu Shi(67)
Dynamic Error Source Analysis Method for On - line Monitoring System of Electrical Equipment	Wu Hua Gang Degang Chen Bin Liang Xing Gong Jinlong(71)
Discussion on Influence of Electromagnetic Environment of HVAC Transmission and Transformation Project	Liao Lei Yan Qing Tong Ruyi(78)
Adaptive Recognition and Analysis of Time Signal Based on Timestamp	Wen Lili Zhang Guofang Peng Hao Chen Yan(82)
Differences Analysis on Three Rates in Line Loss Management of Sichuan Power Grid	He Xingqi Zhou Hua Xian Qijun Dai Songling(86)
Research on Data Asset Value Qualification of Power Company Based on Panoramic View	Luo Xiaoyi Xu Houdong Tong Ruyi(90)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2016 Vol. 39 No. 5

(Ser. No. 245)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 24, Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

稳控切配套火电方案不同对暂稳压升的影响

李自明¹,姚秀萍²,王海云¹,王维庆¹,常喜强²,王 衡²

(1. 新疆大学电气工程学院可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心,新疆 乌鲁木齐 830047;
2. 新疆电力调度控制中心,新疆 乌鲁木齐 830001)

摘 要:随着天中直流输送功率的提升,直流系统发生故障时对新疆电网的冲击逐步增大。结合新疆十三五电网规划目标,针对天中直工程中的双极闭锁故障和风机机端电压变化,研究了天中直流稳控切配套火电方案的不同对暂态/稳态压升的影响。通过 PSASP 仿真可以得出,切机方案中多保留 1 台或者更多机组,对各电压等级暂态压升影响不大,但对 500 kV、750 kV 母线电压稳态压升有抑制作用;对于 220 kV 母线而言,保留火电机组较多时,其母线稳态压升较高,风电机组机端电压稳态压升也会升高。根据这一结论,将对今后进一步减少双极闭锁故障对新疆电网的冲击,提高电网安全稳定运行水平起积极作用。

关键词:天中直流;双极闭锁;机端电压;暂态电压;稳态电压

Abstract: With the improvement of DC transmission power from Hami to Zhengzhou, the impact on Xinjiang power grid gradually increases when a fault occurs in DC system. Combined with the 13th five – year planning objectives in Xinjiang power grid, and aiming at bipolar block faults and wind generator terminal voltage changes in Tian – Zhong HVDC project, the influence of cutting different thermal power on transient and steady – state voltage rise in DC stability control schemes is studied. Through PSASP simulation, it can be obtained that, retaining one or more units in the generator tripping scheme has little influence on transient voltage rise with different voltage level, but it suppresses the steady – state voltage rise of 500 kV and 750 kV bus, and for 220 kV bus, when retaining more thermal power units, the steady – state voltage rise of the bus is higher, and the steady – state voltage in the terminal of wind power unit will also rise. This conclusion makes positive contribution to reduce the impact of bipolar blocking faults on Xinjiang power grid and improve the safe and stable operation level of the grid in the future.

Key words: Tian – Zhong HVDC project; bipolar blocking; terminal voltage; transient voltage; steady – state voltage

中图分类号:TM71 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0001 – 04

0 引 言

新疆电网通过西北新疆 1、2 通道、±800 kV 天中直流将风、光、火、水富裕电力采用打捆交直流混合外送的方式送至西北,实现了大规模传统能源和可再生能源基地外送的国家战略要求。同时天中直流作为目前世界上电压等级最高、额定传输功率最大,首条以送清洁能源为主的直流输电工程,无论从理论研究方面还是运行控制方面国内外可供借鉴的经验和成果较少。并且随着天中直流输送功率的增加,在天中直流闭锁后,潮流转移至交流系统,对送端交流电网的影响越大,对新疆电网的安全稳定运

行造成了很大的影响^[1-3]。
在天中直流闭锁后,潮流转移至交流系统,需保证疆内的切机量在 2 500 MW 以上,新疆电网作为送端电网,其内部电源包括水电、火电常规能源,又包括风电、光伏等新能源,且新能源占比已占疆内总装机容量的 25%。可以看出,新疆电网内部电源构成复杂,从而导致疆内电网潮流多变,运行方式复杂,天中直流闭锁故障情况下,新疆内部可切机组构成成分多变,给天中直流安全稳定控制措施的制定带来了较大的困难。通过对天中直流工程中的双极闭锁故障和风机机端电压变化进行分析,研究天中直流在故障和机端电压变化时暂态以及稳态过程电气量变化特点,分析天中直流稳控切配套火电方案不同对直流运行的影响。

基金项目:国家自然科学基金项目(51267017);国家 863 计划(2013AA050604)

1 直流送出系统的运行方式

随着新疆电网 750 kV 交流 1、2 通道以及 ± 800 kV 天中特高压直流工程投运,新疆电网形成了与西北电网、华中电网的跨省、跨区域的“交直流混联”电网。新疆电网具有的高电压等级以及交、直流混联电网的特点势必造成新疆电网区域稳控系统的日趋复杂,电网运行的安全风险压力也与日俱增。

哈密—郑州 ± 800 kV 直流输电工程是疆电外送第 1 条特高压直流输电工程,也是中国第 1 个风火打捆、直流送出工程。工程额定功率为 8 000 MW,额定电压为 ± 800 kV,额定电流为 5 000 A。工程西起新疆维吾尔自治区哈密地区天山换流站,东至河南省郑州市中州换流站,输电距离约 2 110 km,直流导线截面采用 $6 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 。该工程 2013 年实现双极低端投运,2014 年年中双极投运。西北电网的天山换流站通常为整流站运行,华中电网的中州换流站通常为逆变站运行。天中直流系统简图如图 1 所示。

天中特高压直流投运后,当 750 kV 交流 1、2 通道故障跳闸或天中特高压直流故障闭锁^[4-7]后,系统阻抗增大、潮流加重,电压跌落较大,需要切除新疆电网网内大量机组,保持系统电压稳定^[8]。当天中特高压直流外送功率较大时,南疆电网或将成为送端电网,组织大量电力进行上送。若此时南疆大机组如库车 3 期电厂、盛源电厂、喀发 3 期电厂机组跳闸,则南疆部分地区如台远、金鹿、喀什或将出现低电压问题,需要切除南疆地区部分负荷。

2 稳控切机方案

目前天中直流双极闭锁后,稳控切机原则是切机总量为扣除 1 200 MW 不平衡量后的直流传输功率^[9-10],直流配套火电每个电厂保留 1 台机组,其余依次切除哈密、吐鲁番、达坂城地区风(光)电,不足则切除乌昌电网火电。也就是说国投南湖双机、国网花园 4 机,共 2 个电厂 6 台配套火电投运后,直流传输功率 5 000 MW 时发生闭锁后,实际切机是切除国投南湖单机、国网花园 3 机,其余依次切除哈密、吐鲁番、达坂城地区风(光)电,不足则切除乌昌电网火电。为分析直流配套电源对天中直流运行的影响,根据切除配套火电机组台数的不同采取两种稳控切机方案进行暂态电压^[11-12]与稳态电压的敏感性分析。

方案 1:6 台配套火电投运后,直流传输功率 5 000 MW 时发生直流双极闭锁后,实际切机是切除国投南湖单机、国网花园 3 机,其余依次切除哈密、吐鲁番、达坂城地区风(光)电,不足则切除乌昌电网火电。

方案 2:6 台配套火电投运后,直流传输功率 5 000 MW 时发生直流双极闭锁后,实际切机是切除国投南湖单机、国网花园双机,其余依次切除哈密、吐鲁番、达坂城地区风(光)电,不足则切除乌昌电网火电。

其基础潮流如图 2 所示,其中配套 6 机出力 2 900 MW,直流 5 000 MW,吐哈 520 MW,联变 2 100 MW,哈密风电 2 100 MW,疆电外送 530 MW,敦鱼 3 800 MW。

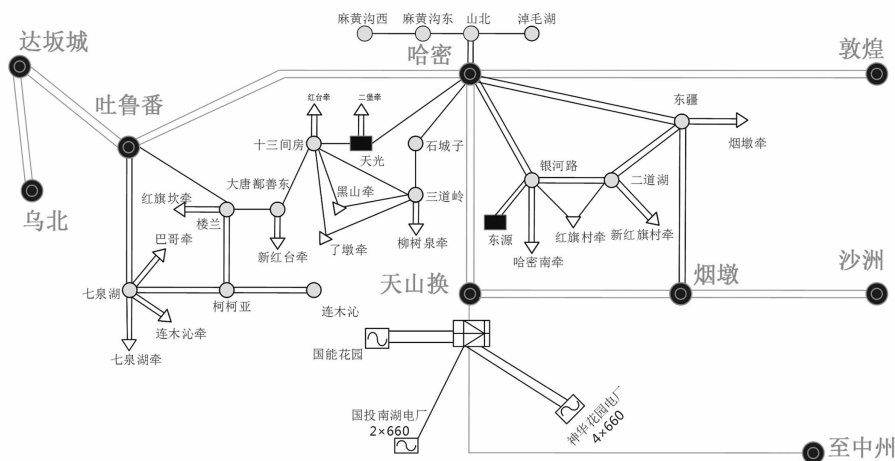


图 1 哈郑直流送受端出线方案

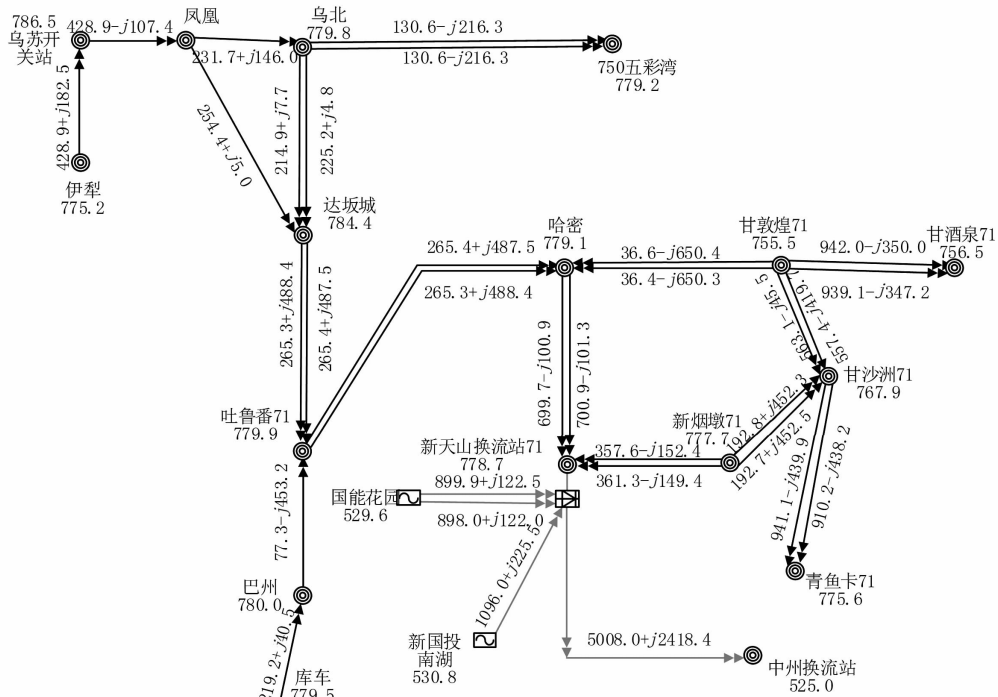


图 2 基础潮流

2.1 双极闭锁故障

稳控切机方案 1:0.3 s 切除直流滤波器 10 组和 3 800 MW 机组(其中直流配套机组 4 台 1 900 MW,哈密地区风电 1 900 MW)。

稳控切机方案 2:0.3 s 切除直流滤波器 10 组和 3 000 MW 机组(其中直流配套机组 3 台 1 450 MW,哈密地区风电 1 550 MW)。

2.1.1 750 kV 电压比较

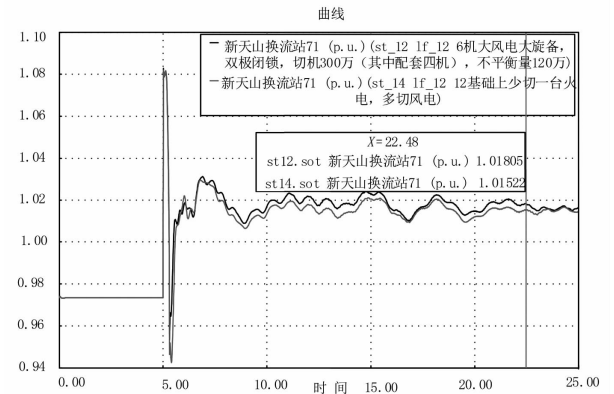


图 3 天山换流站 750 kV 母线电压比较

- 1) 暂态压升:2 种切机方案对 750 kV 母线暂态压升没有影响。
- 2) 稳态压升:保留 3 台机组的切机比保留 2 台机组时,750 kV 母线稳态压升少 3 kV。

2.1.2 500 kV 电压变化

- 1) 暂态压升:2 种切机方案对 500 kV 母线暂态

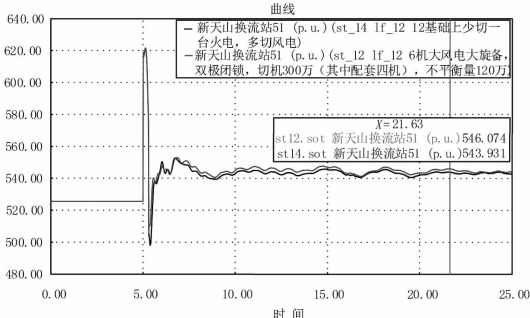


图 4 天山换流站 500 kV 母线电压比较

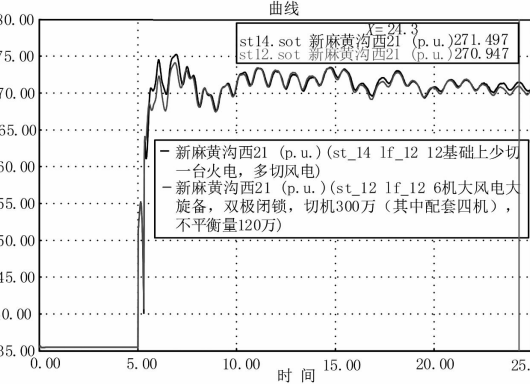


图 5 麻黄沟西 220 kV 母线电压比较

- 压升没有影响。
- 2) 稳态压升:保留 3 台机组的切机比保留 2 台机组时,500 kV 母线稳态压升少 2 kV。

2.1.3 220 kV 电压变化

- 1) 暂态压升:2 种切机方案对 220 kV 母线暂态压升影响不大。

2)稳态压升:保留 3 台机组的切机比保留 2 台机组时,由于切除风电机组较多,哈密地区 220 kV 线路传输功率减轻,220 kV 母线稳态压升略高一些,约 0.5 kV。

2.2 风机机端电压变化

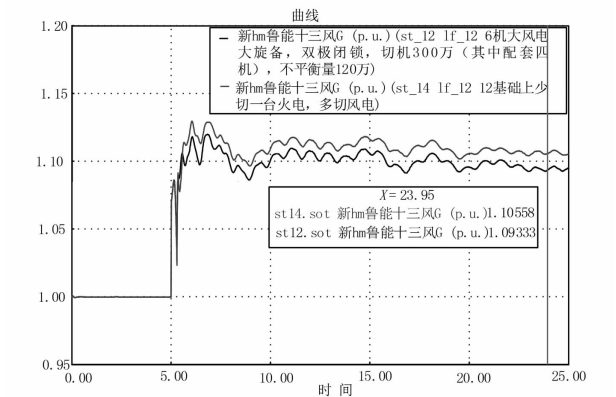


图 6 鲁能十三间房风电场机端电压比较

1)暂态压升:2 种切机方案对 220 kV 母线暂态压升影响不大。

2)稳态压升:保留 3 台机组的切机比保留 2 台机组时,由于切除风电机组较多,哈密地区 220 kV 线路传输功率减轻,风电机组机端电压稳态压升明显增大。

3 结 论

1)当前天中直流双极闭锁故障安全稳定控制措施切机范围广,切机组织措施、切机原则复杂。切机方案中多保留 1 台或者更多机组,对各电压等级暂态压升影响不大,对 500 kV、750 kV 母线电压稳态压升略有抑制作用;但由于少切火电,必然多切风电,引起 750 kV、220 kV 通道传输功率减轻,220 kV 母线电压、风电机组机端电压稳态压升将会继续上升。

2)针对天中直流安全稳定控制措施中存现的风险,通过 PSASP 仿真的结果,提出哈密—郑州直流稳控切配套火电方案:首先切除哈密地区风电机组,不足量送往乌北切除乌昌城网火电机组,剩余量切除西部、北部水电、火电、风电机组。该方案能够从不同方面对风险起到一定的防范作用,从而保证哈郑直流双极闭锁严重故障情况下的西北电网,尤其是新疆电网的正常、稳定运行。

参考文献

[1] Dusonchet L, Massaro F, Telaretti E. Wind Turbine Me-

chanical Characteristics and Grid Parameters Influence on the Transient Voltage Stability of a Fixed Speed Wind Turbine[C]. Universities Power Engineering Conference, 43rd International,2008:1-7.

[2] 王鹏,王清让,任冲. 天中直流工程投产后西北电网运行控制模式研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 70-74.

[3] 魏宏芬,邱晓燕,徐建,等. 通过 SVC 和 TCSC 联合改善异步机风电场暂态电压稳定性研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(4): 20-23.

[4] 于永军,杨琪,侯志远,等. 天中直流工程入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2298-2303.

[5] Singh G, Bala R. Automatic Generation & Voltage Control of Interconnected Thermal Power System Including Load Scheduling Strategy [J]. International Journal of Engineering & Advanced Technology, 2011(2):1-7.

[6] 陈亦平,陈磊,叶骏,等. 云广直流孤岛运行“5·26”双极闭锁原因分析及改进措施[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 129-135.

[7] 李国栋,皮俊波,郑力,等. ±500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877-881.

[8] Dusonchet L, Telaretti E. Effects of Electrical and Mechanical Parameters on the Transient Voltage Stability of a Fixed Speed Wind Turbine[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7):1308-1316.

[9] 陈树勇,朱琳,丁剑,等. 风电场并网对孤岛高频切机的影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 58-64.

[10] 杨振纲,吴国丙,罗向东,等. 粤北电网安全稳定控制策略及切机原则[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 15-17.

[11] 孙全才,程浩忠,张健,等. 提高暂态电压安全水平的动态无功备用优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2718-2725.

[12] 廖国栋,谢欣涛,侯益灵,等. ±800 kV 酒泉特高压直流入湘对湖南电网暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 23-28.

作者简介:

李自明(1989),硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化;

姚秀萍(1961),客座教授、硕士生导师、高级工程师,主要研究方向为电网调度运行、继电保护;

王海云(1973),教授、硕士研究生导师,主要研究方向为可再生能源发电与并网技术;

王维庆(1959),博士生导师,主要研究方向为风力机发电及风电并网技术;

常喜强(1976),高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制;

王 衡(1984),硕士、工程师,研究方向为电力系统生产运行。

(收稿日期:2016-05-21)

变电站电力设备红外智能巡检、诊断与高效 预警系统的应用研究

徐丽华,张 龙

(国网新疆电力公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:针对现阶段变电站手持式红外监测的弊端以及电力系统智能化发展的需求,研究并开发了变电站电力设备红外智能巡检、诊断与高效预警系统。设计了红外智能巡检系统的整体软硬件结构,构建了电力设备温度测量传感器模型,研制出了适合变电站电力设备的红外智能巡检终端。基于智能系统网络通讯技术的研究,提出了电力设备红外智能巡检与多系统多平台横向集成架构,结合智能巡检策略与电力设备温度检测频率,实现了信息系统的集成应用开发。

关键词:变电站;红外;智能;集成;应用

Abstract: An infrared intelligent inspection, diagnosis and efficient early warning system for electrical equipment in substation is developed aiming at the disadvantages of hand – held infrared monitoring in substation and the intellectualization development requirements of power system. The integral structure of software and hardware for the infrared intelligent inspection system is designed, the model of temperature measurement sensor of electrical equipment is constructed, and the terminal of infrared intelligent inspection for electrical equipment in substation is developed. The horizontal integrated structure of multi – platform and infrared intelligent inspection of electrical equipment is put forward based on the research of network communication technology of intelligent system. The integrated application development of information system is realized combined with the intelligent inspection strategy and the temperature detection frequency of electrical equipment.

Key words: substation; infrared; intelligent; integration; application

中图分类号:TP206⁺.3 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0005 – 04

0 引 言

变电站是电力系统的重要组成部分,其运行状态的好坏直接关系到电力系统的安全和效益。随着变电站电压等级提高、运行环境愈加复杂以及变电运检要求的不断提高,使得变电站现场设备的巡视范围和工作量变大,而通常采用的人工巡视方式依赖巡视人员的感官和经验,漏检和错检的情况时有发生,给设备和电网安全运行带来各种隐患。因此,研究开发适应现代自动化水平的变电站智能巡检系统已迫在眉睫^[1]。

长期的运行经验表明:设备的发热现象往往预示着极其严重的故障隐患^[2-3]。红外热成像技术采用非接触式的检测手段,能有效诊断电气设备热故障,在电力系统中得到了广泛应用^[2-9]。传统的便

携式红外检测手段以人工手持检测为主,巡检离散性大、周期长、效率低,监测数据管理复杂,无法对运行设备连续跟踪监测,不利于及时发现设备缺陷和潜伏性故障,已不能满足实际需要。为此,文献[4]介绍了一种机器人辅助人工完成高压变电设备的可见光及红外巡检作业的智能巡检系统,但其成本较高不适合大规模推广;文献[5]提出了一种变电站电气设备红外遥视与安全预警系统,自动循环采集变电站的红外测温与可见光图像,但在图像配准融合以及精确性等方面有待提高;文献[6]提出了适用于高压开关柜内电气设备的红外智能监测系统并得到成功应用。但上述文献只是从理论角度简单论证了红外与可见光成像在变电站设备监测中的应用,对各装置的研发、在变电站中优化布点以及各信息系统的集成开发都没有做深入研究,很难实现变电设备巡检的信息化、规范化和智能化。

对此,研究开发了1套变电站电力设备红外智

基金项目:国家自然科学基金项目(51367018)

能巡检、诊断与高效预警系统。在温度测量传感器模型研究的基础上将红外与可见光摄像头双仓巧妙构建,实现变电站设备红外测温与可见光视频实时全场景同视场智能巡检。在实时数据可靠传输的基础上,巡检策略与电网实时负荷数据联动,巡检频率自适应调整,结合抽象的诊断模型实现电力设备的自动诊断与预警。

1 红外智能巡检、诊断与高效预警系统整体结构设计

变电站红外智能巡检、诊断与高效预警系统是集红外技术、视频压缩技术、数字信息处理技术、低功耗技术、数字通讯技术、抗干扰技术以及计算机技术为一体的高新技术,主要由红外终端、网络传输、远程监控计算机、客户端、移动端和后台管理分析软件等组成,提供实时的监测监控信息传输平台、诊断平台和控制平台,为设备状态评价和检修提供可靠有力支撑,其整体系统拓扑如图 1 所示。

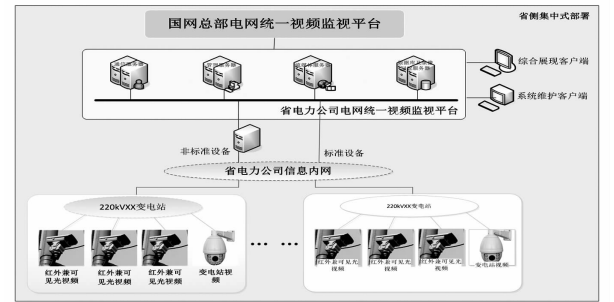


图 1 红外智能系统网络拓扑图

1.1 系统硬件结构设计

红外智能巡检、诊断与高效预警系统以高性能(双通道:红外 + CCD)红外智能终端为基础,内部结构如图 2 所示,以工业微型计算机作为监测核心,结合监测软件强大的后期数据处理功能及基于 TCP/IP 的可靠网络通讯技术,构成了功能强大、操作简便、工作安全可靠的智能监测系统。在设计中充分考虑系统的兼容性、可靠性、美观性等因素,使系统更趋于人性化、智能化,能够广泛应用于实践并加以推广。

1.2 系统软件结构设计

系统软件在 Visual studio 2008 平台上,以 Visual C++ 作为主要开发编程语言,完成界面管理、文件管理、模式管理、报告管理等模块设计,提供给用

户一个良好的人机交互环境,最终实现通道管理、图像编辑、温度分析、系统安全等功能供操作人员分析使用。核心任务是编写红外热成像在线监测智能预警系统软件,实现对热像仪、云台等相关硬件的控制,使其能按照用户设定的模式工作,对采集的温度数据进行智能化的分析;若设备有潜在故障,软件能及时产生报警信号。软件主要分为七大功能模块,其整体功能结构框图如图 3 所示。结合用户的实际需求,软件还具有对历史数据进行查询、分析以及生成关于故障热像的报表等功能。

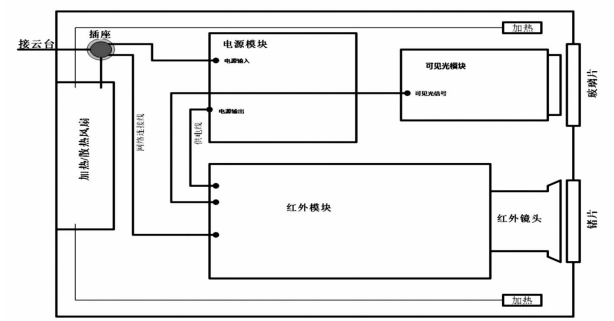


图 2 红外热成像系统内部结构图

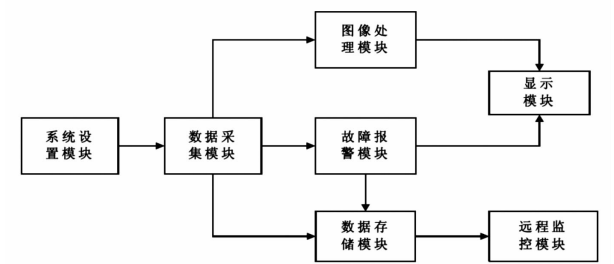


图 3 红外智能系统软件功能模块

2 电力设备温度测量传感器模型研究

对电力设备温度的准确、快速测量是红外智能巡检、诊断与高效预警系统的核心,因此,开发适合的电力设备温度测量传感器就显得至关重要。

2.1 硬件结构的设计

为保证目标设备温度变化的监测精度,采用目前性能最优的非制冷多晶硅微测辐射热计,可提供高达 0.05℃ 的温度分辨率;同时采用了超低噪声偏置等多种校正电路设计(如图 4 所示)并单独封装控制系统,以保证干扰辐射不会过多影响正常目标的辐射。

采用非均匀性校正和盲元补偿技术保证了红外图像的温度一致性和稳定性;通过数字增益调整电

路可以在温度跨度很大的环境中自动将目标调整在合适的动态范围,并通过图像的方式显示出来;帧积分技术则通过若干帧图像的叠加和重组,将噪声剔除。

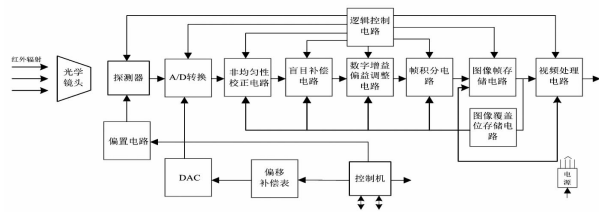


图 4 温度测量过程中的校正电路模型

2.2 温度测量数据的优化算法

2.2.1 基于红外内置参考技术的温度一致性算法

基于红外内置参考源和信号增强技术^[11],可确保在复杂环境中目标红外图像的清晰度和温度测量的准确度。在系统的前端热像仪内设置红外内置参考源,可以消除热像仪内部自身辐射对测温的影响;而且通过对内部参考源的温度监视,可以实时、准确地取得外部目标的温度变化,也就是“温升”。对于电力设备来说,用“温升”来衡量设备劣化的程度,比用“温度”更加准确和可靠。

2.2.2 基于黑体标定的温差测量算法

所研究的系统采用热成像测温是通过测量目标的辐射来测量温度的。对于辐射强度的测量不能作为温度读数的唯一判定,因为辐射在传导过程中有衰减。在所研究的装置中,通过内置可控温的黑体参考源^[12],建立了测温基础坐标系,从而实现了温度的读取。标定所使用的黑体本身,其控温精度达到了 0.05℃,精密温差源的精度更是达到了 0.01℃,保证了测温读数的精度。

2.2.3 基于红外大气衰减模型的远距离测温校正算法

所研究的系统在满足变电站设备尺寸的观察和测温要求(MFOV)的前提下,通过对温度进行距离衰减的补偿^[13],进行大量的实验样本数据的数字化拟合,提供符合测量标准的镜头;并在系统设置中采用了“一经设置,永久可用”的方法,由厂家工程师和生产专工在安装过程中即完成相应的测温设置,以后运行中都能得到正确温度读数。

3 红外智能巡检、诊断与高效预警终端研制

3.1 红外与可见光的双腔构建

红外成像仅有目标设备的温度轮廓,难以辨识物体;加之监测目标在自然环境(如:风、气温)中移动和云台位移,采用单一红外或可见光图像识别算法,可能会导致监测目标识别率降低;因此,可在红外测温的基础上通过可见光图像辅助进行设备识别。由于双视监控器的红外和可见光摄像头不能同轴安装,本装置采用的双视监控器在有限空间内巧妙双腔构建,通过控制室计算机配合带预置位的高精度云台对镜头视场角的物理调整和图像匹配算法,实现红外和可见光图像视场同步(图 5 为现场图像),为目标快速识别和定位提供了基础。



图 5 双视监控器中变压器的现场图像

3.2 电力设备快速准确定位技术研究

为实现变电站主要一次设备的精确定位和全站设备工作温度的实时测量,将红外终端在变电站合理布点,用尽可能少的摄像头覆盖尽可能多的设备,最大化利用资源,降低成本。每个监测点成独立体系,独立运行、互不干扰,所有前端监控点通过光纤接入电力内网,用户通过多级授权即可对整套系统进行观看和操作。在基于文献[14-16]红外图像与可见光图像互补识别技术提高目标识别率的基础上,通过监测设备 360°全景热图拼接技术^[17-18],摆脱被监测对象位置的确定对云台装置的预置位参数及转角参数的依赖,使测量的温度数据能够自动与电力设备快速正确对应,识别误差精度小于 2 个像素点,实现了在线式红外监控系统对设备温度的高精度监测,如图 6 所示为变电站全景拼接图。



图 6 变电站全景拼接图

3.3 电力设备自动诊断和高效预警模型研究

按照《带电设备红外诊断技术应用导则》建立了系统的分析模型作为诊断和预警判定的专家库,同时与数据采集系统集成应用,采用表面温度判断

法、相对温差判断法、同类比较法、热图谱分析法和档案分析法等多种判别方法,实现全站设备故障自动诊断、疑似发热缺陷设备自动准确而快速的定位和设备故障预警,建立设备缺陷库,为设备状态评价提供可靠的数据支撑和重要的决策依据。

3.4 高效的红外智能巡检终端数据传输技术

传统压缩技术多采用将图像流和温度数据流分开压缩和传输,其中视频数据采用普通视频信号的有损压缩传输方式;测温数据的编码、传输采用无损压缩后传输,采样的速度最高能达到 25 帧/s。所研究的系统一方面基于后台分析软件自动有效识别危险行为结果(熟数据)或根据用户需求将数据上传至主站平台;另一方面采用基于哈夫曼编码^[19]、LZW 编码^[20]和 H. 264 编解码算法等高效压缩传输技术进行无损数据传输,解决了传统数字测温传输占用网络带宽过高,容易引起网络堵塞的问题,实现了测温数据和视频数据高效同步压缩,提高了有效数据压缩比,提升了数据传输效率,适合变电站间距远、分布广、带宽有限、通信差的特殊环境,实现巡视数据实时可靠传输,其传输模式如下图 7 所示。

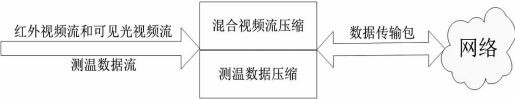


图 7 系统数据压缩的传输模式

4 红外智能系统的集成应用开发

4.1 电力设备温度检测频率技术研究

电力设备热缺陷的诊断需要考虑电力设备的电流、电压、负荷、当前环境温度等信息,实现上述数据与电力设备温度准确对应,对于诊断电力设备发热缺陷等级及种类至关重要;同时,对于设备状态、环境温度、季节等不同情况下,按照国家电网公司设备检修试验规程规定,设备红外检测的周期均不同。因此,所研究的系统基于智能巡检策略、电网实时负荷数据联动技术和快速红外巡视技术,实现巡检频率按季节、环境、电网负荷、故障发热危险程度等条件自适应调整;实现不同工况下正常和(疑似)非正常设备的区别监测;通过后台分析处理系统软件对图像进行自动分析,并允许通过网络实时查看各点温度、图像和分析结果,极大减轻了基层员工工作强度,提高了运检效率。

4.2 各系统集成应用开发

针对目前信息化系统众多、孤岛运行、重复建设等问题,系统采用与国家电网公司一致的 WebService 服务接口模式及结构化数据与国家电电网状态监测系统、PMS 系统的缺陷管理模块及电网统一视频系统等实现横向集成、资源共享。通过后台分析软件仅将辨识得到的危险行为结果上传至主站平台,实现了系统运行费用最优。同时系统具有彩信、声光报警、自由设定重点监控区域、多端监控(手机客户端、PC 客户端)等多种方式,克服了当前视频监控、在线监测装置以及运维人员巡检存在的效率和及时性低的问题;实现了全时无人值守,及时掌握电力设备的热缺陷状态,真正使得运维人员可以做到无时间、无地域限制地操控监管监控系统,提高了工作效率。

变电站电力设备红外智能巡检、诊断与高效预警系统已在工程上得到成功应用。如图 8 为某变电站主变压器高压套管接头过热图像,其套管的最高温度分别为 16.5℃、86.7℃、28.9℃;图 9 为某变压器电站主变高压套管将军帽发热内部发热故障,其最高温度达 60.1℃。

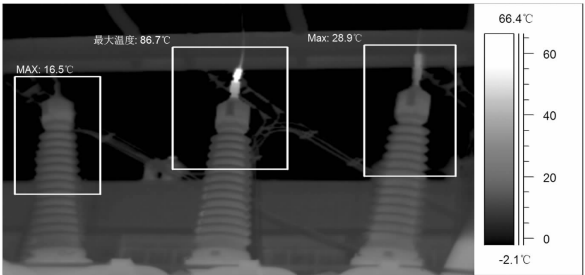


图 8 主变压器高压套管接头过热图像

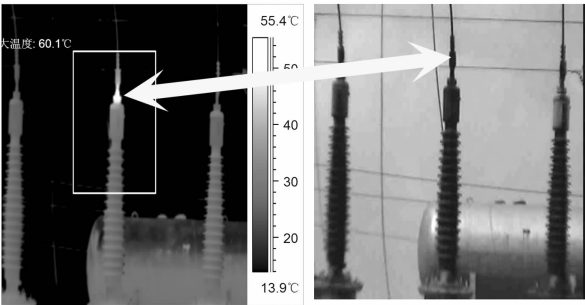


图 9 主变压器高压套管将军帽发热图像

5 结 语

研制出了“变电站电力设备红外智能巡检、诊
(下转第 18 页)

含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析

周士琼¹,王 倩¹,吕 潇¹,郝勇奇¹,刘东霖¹,倪亚玲²

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;2. 电子科技大学,四川 成都 610054)

摘 要:大规模风电场并网将会影响电力系统暂态稳定性。基于直流潮流模型、扩展等面积定则并利用 Matlab/Simulink 仿真分析了不同的电压跌落、故障持续时间以及低电压穿越(LVRT)控制策略对系统暂态稳定性的影响。仿真结果表明:电压跌落越深、故障时间越长,系统暂态稳定性越差,风电场的低电压穿越控制策略能够改善故障期间系统暂态稳定性,但是其能力有限。

关键词:风电场;电力系统;暂态稳定性;低电压穿越

Abstract:The large – scale grid integration of wind farms will affect the transient stability of power system. Based on direct – current load flow model, the extended equal area criteria and Matlab/ Simulink simulation, the impact of different voltage drop, fault duration and LVRT (low voltage ride through) control strategy on system transient stability is analyzed. Simulation results show that the deeper voltage drop and the longer fault time, the worse transient stability. LVRT control strategy of wind farms can improve transient stability during a fault, but its capacity is limited

Key words:wind farm; power system; transient stability; low voltage ride through

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0009 – 05

0 引 言

随着风力发电在电网的渗透率越来越高,影响着电力系统的稳定运行,因而需要研究风电系统对电网的影响^[1]。已有大量学者对风电接入电力系统暂态影响做了研究^[2-13],其中文献[10]分析不同类型的风力发电机组以及参数对电力系统暂态稳定性的影响;文献[11-12]分析风电渗透率对电力系统暂态稳定性影响。文献[13]在故障期间,利用双馈风机外特性来分析风电机组接入对系统暂态稳定性影响。但现代电网对于与其互联的风力发电机组有要求:在其发生故障导致电压跌落时,风力发电系统应该具有低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力,以防止风力发电系统因进行自我保护从而脱网。对具有低电压穿越功能的风电机组,电力系统暂态稳定性变得更加复杂。由于风电机组低电压穿越控制策略的复杂性,分析风电机组低电压穿越过程对电力系统暂态稳定性的影响刚刚起步,还较少有文献对含大规模风电场的电力系统中故障时间、系统电压跌落程度对系统暂态稳定性影响进行分析。

在文献[11]的基础上,研究故障时间、电压跌落程度对含大规模风电场的电力系统暂态稳定性的影响;根据双馈风机的等效外特性以及基于扩展等面积定则,理论分析具有 LVRT 的双馈风电机组的电力系统的暂态稳定性影响;最后通过建立含风电场电力系统的模型进行时域仿真来验证分析的正确性。

1 含风电场的电力系统暂态稳定机理研究

对于含风电场的电力系统,若系统在某时刻发生大扰动时,多机系统往往出现双机失稳模式。这时候多机系统就可以等值为双机系统。双机系统的结构如图 1 所示,系统等值电路如图 2 所示。

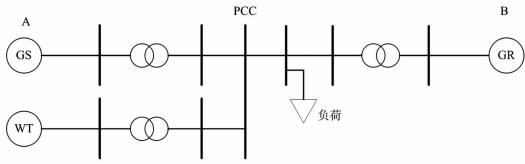


图 1 含风电场双机互联系统结构图
由此,两机互联系统的运动方程为^[14]

$$\frac{M_s}{\omega_0} \frac{d^2\delta_s}{dt^2} = P_{ms} - P_{es} = \sum_{i \in S} P_{mi} - \sum_{i \in S} P_{ei} \tag{1}$$

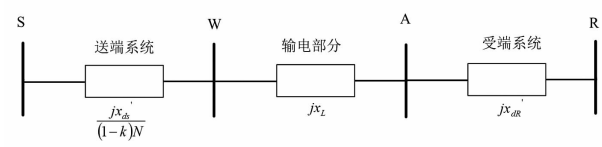


图 2 电力系统的简化等值电路

$$\frac{M_R}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_R}{dt^2} = P_{mR} - P_{eR} = \sum_{i \in R} P_{mj} - \sum_{i \in R} P_{ej} \tag{2}$$

式中： M 为同步发电机组的转动惯量； ω_0 为同步发电机的电角速度； δ 为同步发电机的功角； P_m 为同步发电机轴上机械功率； P_e 为同步发电机的电磁功率；下标 S 和 R 分别表示两种不同的同步发电机群； P_{mi} 、 P_{ei} 为 S 同步发电机群的等值机械功率和等值电磁功率； P_{mj} 、 P_{ej} 为 R 同步发电机群的等值机械功率和等值电磁功率。

两个同步发电机群的功角差可以表示为

$$\delta = \delta_S - \delta_R \tag{3}$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 \left(\frac{P_{mS}}{M_S} - \frac{P_{mR}}{M_R} \right) - \omega_0 \left(\frac{P_{eS}}{M_S} - \frac{P_{eR}}{M_R} \right) \tag{4}$$

可以进一步将两机群系统等值为单机无穷大系统,在同步坐标系下,系统的运动方程为

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e) \tag{5}$$

式中：
$$M = \frac{M_S M_R}{M_S + M_R} \tag{6}$$

$$P_m = \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{mS} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{mR} \tag{7}$$

$$P_e = \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{eS} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{eR} \tag{8}$$

上述分析可知风电机组并入之前,两机群的功角之差为 δ ,考虑接入风机之后,两机群的功角之差变为 δ_w 。利用前后两同步机群功角差值之差来判断风机接入系统后,对原有系统稳定性的影响。令风电机组接入系统后功角的变化量为

$$\Delta \delta = \delta_w - \delta \tag{9}$$

由式(9)可以判断风电机组的接入对原有电力系统同步发电机暂态功角的影响。若功角变化量 $\Delta \delta > 0$,则说明接入风电机组的电力系统暂态稳定性变低了;反之,则可判断风电机组的接入有利于电力系统暂态稳定性的提高。

对式(9)进行二阶微分,可得方程为

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{M_w} (P_{mw} - P_{ew}) - \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e) \tag{10}$$

由式(10)可见,同步发电机组的机械功率与电

磁功率的变化是导致系统功角稳定性关键所在。风电机组的接入将会导致原有系统的机械功率改变,机械功率的变化量由风电机组的机械功率决定,令接入前后系统的机械功率的变化量为 $\Delta P_{m,wt}$ 。同时,也将会引起系统电磁功率的变化,令前后的变化量为 $\Delta P_{e,wt}$ 。

$$\Delta P_{m,wt} = \frac{M_{wt}}{M_S + M_R} P_{m,wt} \tag{11}$$

$$\Delta P_{e,wt} = \frac{M_R}{M_S + M_R} \frac{h P_{wt} U_S}{U_{wt}} \tag{12}$$

式中： M_{wt} 为风电机组的等值转动惯量； $P_{m,wt}$ 为风电机组的机械功率； U_S 、 U_{wt} 分别表示为 S 同步发电机群的等值内电势幅值和风电机组并网点电压幅值； h 为负荷转置系数,在已知系统结构中为实数； $\Delta P_{m,wt}$ 由风电机组的机械功率决定,运行过程中保持不变； $\Delta P_{m,wt}$ 近似与并网点电压 U_{wt} 成正比变化。

以上对含大规模风电场电力系统暂态稳定性的机理研究,都是基于转动物理方程来判断系统的暂态稳定性,然而故障时间的长短对系统暂态稳定性也有一定的影响,故要推导功角与时间的关系。

2 系统直流潮流模型及稳定性分析

由上述转子运动物理方程,可以看出系统的有功出力改变将会影响着系统暂态稳定性。风电机组的接入改变了系统原有的潮流分布,从而影响系统功角的暂态稳定。通过判断某一时段的潮流分布变化趋势,就可以对系统暂态稳定性进行判断。

文献[11]采用了直流潮流模型进行了系统暂态稳定性进行分析,只分析了三相短路故障时候的系统暂态稳定性。在实际应用中,出现电压跌落的情况常有发生;同时,故障时间、电压跌落程度对系统暂态稳定性的影响也较大。这里将在文献[11]基础上做进一步分析研究。含大规模风电场电力系统的直流潮流模型如图 4 所示。

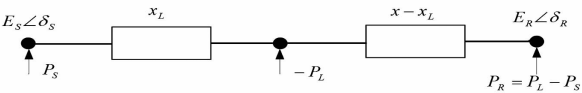


图 3 电力系统直流潮流模型

由图(3)可得,未接入风电机组前,系统稳态时两同步发电机群的功角差可表示为

$$\delta_0 = P_S x - P_L (x - x_L) \tag{13}$$

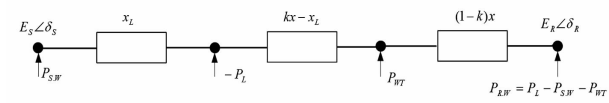


图 4 含风电场电力系统直流潮流模型

式中: x 为 S 同步发电机群的等值内电势节点到 R 同步发电机群的等值内电势节点间的电气距离; x_L 为负荷到 S 同步发电机群的等值内电势节点的电气距离。

风电机组未接入系统的等值机械功率和等值电磁功率可表示为

$$\text{令 } a_M = \frac{M_S}{M_S + M_R} \tag{14}$$

$$P_m = P_S - a_M P_L \tag{15}$$

$$P_e = \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} P_L - a_M P_L \tag{16}$$

由图(4)的风电接入的直流潮流模型,得出系统稳态时的两同步发电机群功角差为

$$\delta_{0w} = P_S - P_L(x - x_L) + P_{wt}(1 - k)x, 0 < k < 1 \tag{17}$$

因此,故障前后同步机群的功角变化量为

$$\Delta \delta_0 = \delta_{0w} - \delta_0 = P_{wt}(1 - k)x \tag{18}$$

根据直流潮流模型也可得出 S 和 R 同步发电机的电磁功率为

$$P_{eS.w} = \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} P_L - (1 - k)P_{wt} \tag{19}$$

$$P_{eR.w} = P_L - P_{wt} - P_{eS.w} \tag{20}$$

由式(7)、式(8),可得出风电机组接入系统的等值机械功率和等值电磁功率为

$$\begin{aligned} P_{mw} &= \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{mS.w} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{mR.w} \\ &= P_{mS.w} - a_M(P_L - P_{wt}) \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned} P_{ew} &= \frac{M_R}{M_S + M_R} P_{eS.w} - \frac{M_S}{M_S + M_R} P_{eR.w} \\ &= \frac{\delta}{x} + \frac{x - x_L}{x} \cdot P_L - (1 - k)P_{wt} \\ &\quad - a_M(P_L - P_{wt}) \end{aligned} \tag{22}$$

所以,故障期间等式(23)成立:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M} [(P_{mw} - P_{ew}) - (P_m - P_e)] \\ &= \frac{\omega_0}{M} (1 - k)P_{wt} \\ &= \frac{\omega_0}{M} (\Delta P_{m.wt} - \Delta P_{e.wt}) \end{aligned} \tag{23}$$

系统故障期间,可通过式(24)、式(25)求解功角与故障时间以及风电机组注入系统的功率的关系。其初值解为

$$\Delta \delta_0 = \delta_{0w} - \delta_0 = P_{wt}(1 - k)x \tag{24}$$

$$\frac{d \Delta \delta_0}{dt} = 0 \tag{25}$$

并可求得式(23)在故障期间,微分方程的解为

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= (1 - k)P_{wt}x + \frac{\omega_0}{2M}(1 - k)P_{wt}(t - t_f)^2 \\ &= (\Delta P_{m.wt} - \Delta P_{e.wt}) [x + \frac{\omega_0}{2M}(t - t_f)^2] \end{aligned} \tag{26}$$

式中, t_f 为故障发生时间。

由式(26)得出,当故障时间一定时,系统电压跌落的程度越深, $\Delta P_{e.wt}$ 的值将越小, $\Delta \delta$ 将会变得越大,系统的暂态稳定性越差;同样,当系统发生相同的故障类型,故障时间越长,系统的暂态稳定性也越差。

3 计及 LVRT 的双馈风电机组对系统暂态稳定性影响分析

低电压穿越就是使风电机组能够在电网发生故障的时刻依旧能够并网运行。风电机组这时刻往往会通过控制有功功率、无功功率的输出来保证不脱网运行,并对电网恢复提供一定的无功能量的支撑。故障期间,电网电压的变化势必会引起系统暂态特性的变化。为此,分析故障最为严重的状况即三相接地短路故障。

根据风电机组的等效外特性^[13],故障期间单端送电系统的等值电路如图 5 所示。

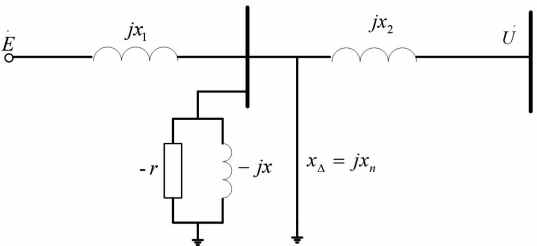


图 5 含风电场电力系统等值电路

$$\text{图 5 中: } r = \frac{u_s^2}{P_s} \tag{27}$$

$$x = \frac{u_s^2}{Q_s} \tag{28}$$

式中: u_s 为风电机组并网点电压; P_s 、 Q_s 分别为风电

机组注入到系统的有功功率和无功功率。

系统的自阻抗 Z_{11} 、互阻抗 Z_{12} 分别表示为

$$Z_{11}=jx_1+\frac{1}{-1/r+(-1/jx)+1/jx_n}$$
$$=\frac{-x_n^2}{\frac{x_n^2P_s}{u_s^2}+(1-\frac{x_nQ_s}{u_s^2})^2}\cdot\frac{u_s}{P_s}+jx_1+j\frac{x_n-\frac{x_n^2Q_s}{u_s^2}}{\frac{x_n^2P_s^2}{u_s^4}+(1-\frac{x_nQ_s}{u_s^2})^2}$$
$$=|Z_{11}|\angle\varphi_{11}\tag{29}$$

$$Z_{12}=jx_1+jx_n+\frac{jx_1x_n}{r// -jx}$$
$$=\frac{x_1x_nP_s}{u_s^2}+j(x_1+x_n-\frac{x_1x_nQ_s}{u_s^2})$$
$$=Z_{12}\angle\varphi_{12}\tag{30}$$

式中, φ_{11} 和 φ_{12} 分别为同步发电机的自阻抗角和互阻抗角。

1) 假定故障期间, 风电场仅向系统注入无功功率

风电机组在低电压穿越过程当中往往会向电网注入一定的无功功率, 假定故障期间, 控制风电机组不向电网注入有功功率, 最大限度地注入无功功率。则同步发电机的互阻抗将发生变化, 这就使得同步发电机的输出功率 $P_e=(EU/Z_{12})\sin\delta$ 随之发生改变。同步发电机输出的功率随着风电机组向系统注入无功功率的增大而增大。由图 6 可知, 同步发电机的功率曲线被拉伸, 系统的加速面积被减小了 S_{ebcf} , 有利于提高系统的暂态稳定性。

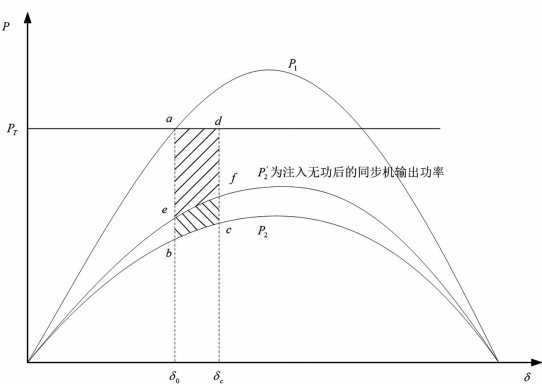


图 6 计及风电场仅无功注入系统功率特性曲线

2) 假定故障期间, 风电场仅向系统注入有功功率

由单机无穷大系统同步发电机输出功率表达式^[15]为

$$P_e=\frac{E^2}{|Z_{11}|}\sin(90-\varphi_{11})+\frac{EU}{|Z_{12}|}\sin(\delta-90+\varphi_{12})\tag{31}$$

式中, δ 为同步发电机内电势与电网电压之间的角度。

故障期间, 风电机组注入系统的无功功率为 0, 仅向系统注入有功功率。由式 (29)、式 (30) 可得出, $\varphi_{11}>90^\circ, \varphi_{12}<90^\circ$ 。功角关系如图 7 所示, 功率曲线向下移动的距离, 右移动 ΔP 的距离为 $(90-\varphi_{12})$, 使得原有系统加速面积增加了 S_{ebcf} , 这不利于系统暂态稳定性的改善。

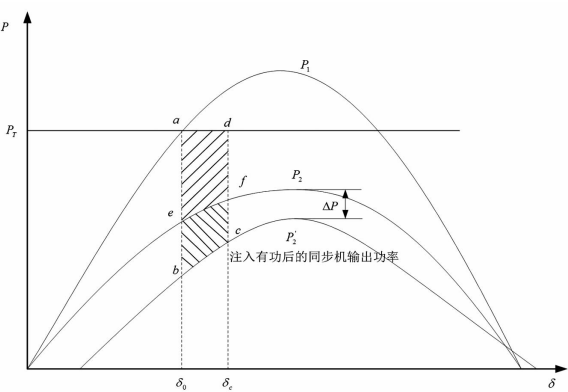
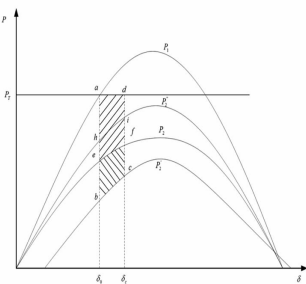


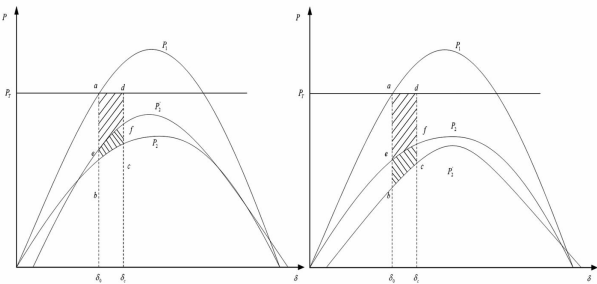
图 7 计及风电场仅有功注入系统功率特性曲线

3) 假定故障期间, 风电机组既向系统注入一定量的有功功率, 又注入一定量的无功功率

这种情况下, 系统暂态功角的变化特性比较复杂。运用图 6、图 7 的功率曲线合成进行定性的分析, 如图 8(a) 所示。若加速面积减速面积 $S_{ebcf}<$ 减速面积 S_{heif} , 在这种控制策略下有利于系统暂态稳定性的提高; 反之, 则对系统暂态功角稳定性产生不利影响, 其功率曲线如图 8(b)、8(c) 所示。



(a) 计及风电场的系统功率特性曲线



(b) 加速面积小于减速面积的系统功率曲线
(c) 加速面积大于减速面积的系统功率曲线

图 8 计及风电场同时向系统注入有功和无功的特性曲线

4 算例仿真分析

在 Matlab/Simulink 搭建文献[13]中的仿真模型,风电场由 40 台额定容量为 1.5 MW 的双馈风力发电机组成,同步发电机采用经典模型,其额定容量为 120 MW。双馈风力发电机正常运行情况下采用恒定功率因素控制方式。不同的故障时间、故障类型以及 LVRT 控制对系统暂态稳定性影响仿真图如图 9 所示。

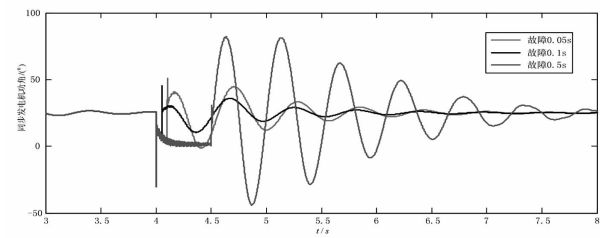


图 9 不同故障时间下系统功角曲线

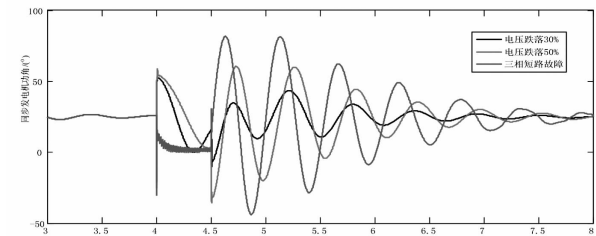


图 10 不同电压跌落下系统功角曲线

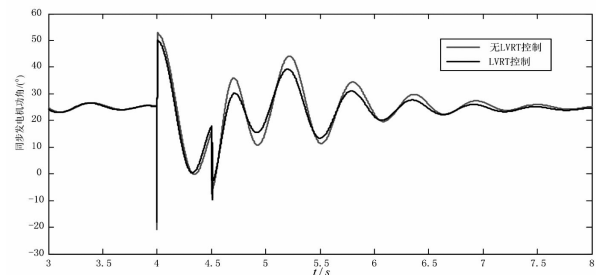


图 11 电压跌落 30% LVRT 控制下系统功角曲线

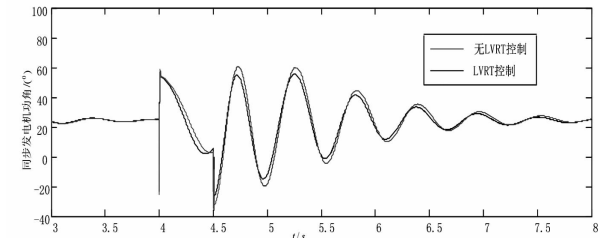
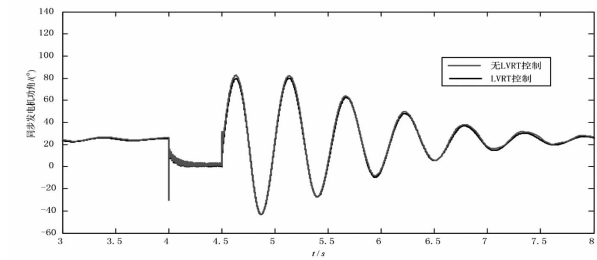


图 12 电压跌落 50% LVRT 控制下系统功角曲线

图 9 中,系统在 4 s 时发生三相接地故障,0.5 s 后恢复正常。不同的故障时间,同步发电机的暂态功角发生较大的变化,随着故障时间的延长,同步发电机转子所积累的能量就越多,故障恢复后,需要释



放更多的能量,将导致功角的变化量增大,功角恢复稳态的时间也越长。图 10 仿真了电压跌落程度对系统暂态稳定性的影响。从仿真图中看出,电压跌落越深,风电场的有功输出限制越大,风电场对系统的暂态稳定性影响越大。

图 11 ~ 图 13 仿真了不同故障情况下,风电机组给予系统最大无功能量的补偿,帮助系统电压的恢复,保证风电机组不脱网运行。在此控制策略下,风电机组对系统暂态稳定性的影响:电压跌落 30% 时,LVRT 控制策略使得系统故障期间的功角摆动减小了 4°,而且也减小故障恢复后系统运行到稳态的时间;电压跌落 50%、三相短路故障时系统的功角分别减小了 1.5°、1°,故障后恢复到稳态的速度也有所加快。由仿真结果可见,随着故障程度的加深,LVRT 控制对改善系统暂态稳定性的能力是有限的。

5 结 语

运用直流潮流模型及扩展等面积定则对不同故障类型、故障时间以及 LVRT 控制策略对含大规模风电场电力系统暂态稳定性的影响进行了理论性的分析并通过仿真分析的验证。三相短路故障、较长的故障时间对系统暂态稳定性影响较大。LVRT 控制策略在一定程度上有利于系统暂态稳定,但随着故障程度的加深,对改善系统暂态稳定性的能力是有限的。

参考文献

[1] 施鹏飞. 中国风电装机容量迅猛增加及存在的问题[J]. 可再生能源, 2007, 25(3): 4-5.
[2] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of Increased Penetration of DFIG – based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2009, 24 (3): 1426-1434.

(下转第 25 页)

基于 Matlab/Simulink 的光伏电池输出特性仿真分析

张 峰¹,景 敏²,乔 怡¹

(1. 中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司,新疆 乌鲁木齐 830002;
2. 中国人民武装警察部队警种学院,北京 102202)

摘 要:随着光伏发电日益广泛的应用,对光伏发电系统的研究得到了越来越多的重视,其中光伏电池输出特性的模拟仿真 是构成光伏发电系统的基础部分。对现有两种普遍应用的光伏仿真模型输出特性进行比较,分析其输出特性的区别,以便对后续光伏发电系统的仿真提供基础依据。利用 Matlab/Simulink 建立光伏发电系统模型,通过该模型分别得到光伏物理仿真模型和数学仿真模型的输出特性,并通过比较分析其输出特性的区别。通过实验可以看出,两种模型在 P/U 输出特性的速率方面仍有所区别,物理仿真模型输出特性与实际输出特性更为接近,得出的结果可以对后续光伏发电系统仿真及其 MPPT 研究给与参考。

关键词:光伏;数学模型;物理模型

Abstract:With the increasingly widespread use of photovoltaic (PV) power generation, the research of photovoltaic power generation system has been attracted more and more attention, and the simulation of output characteristics of photovoltaic cell is the basic parts of photovoltaic power generation system. Two widely used simulation models for PV output characteristics are compared, and the differences between the output characteristics of these two models are analyzed. A model of photovoltaic power generation system is established with Matlab/Simulink. The output characteristics of the photovoltaic physics simulation model and mathematical simulation model are obtained through the established model, and the differences between their output characteristics are compared and analyzed. Through this experiment, there still have some differences between the rates of P/U output characteristics in these two models, and the output characteristics of the physical simulation model is more close to the actual output characteristics, which can give a reference for the subsequent simulation and MPPT research of photovoltaic power generation system.

Key words:photovoltaic; mathematical simulation model; physical simulation model

中图分类号:TM615 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)05-0014-05

0 引 言

随着近几年可再生能源发电的兴起,光伏发电项目也得到了越来越多的重视。中国 2015 年光伏发电系统装机容量已达 43.18 GW。成为全球光伏发电装机容量最大的国家。随着光伏发电技术迅猛发展,光伏发电应用趋于广泛,并将逐渐由补充能源向替代能源过渡^[1]。但是目前发电成本较高、太阳能利用率低是制约光伏发展的一大瓶颈,为此通过有效的控制以提高光伏电池光电转换效率一直是光伏发电领域研究的主要研究方向之一^[2]。其中,光伏电池的 输出特性随着日照强度、环境温度的不同,其端电压将发生变化,其输出功率也会产生非线性变化。

光伏电池输出特性的仿真是研究光伏发电的基础工作,目前普遍采用物理仿真模型与数学仿真模型两种模型,两种模型均可以模拟出光伏电池输出特性,得到最大功率点。利用 Matlab/Simulink,对两种仿真模型进输出特性行比较,研究其输出特性区别,为后续最大功率跟踪研究提供参考依据。

1 光伏电池的 输出特性

由图 1 可见,在标准条件(固定光照和固定温度条件)下,光伏电池的输出功率在 V_m 处达到最高,在电压由 0 处到 V_m 处上升过程中,输出功率也随电压的上升而上升,但是在功率和电压上升的过程中,电流却基本上以缓慢的速度在下降,只是下降的速度比功率和电压上升的速度要慢得多。当电压

达到 V_m 点时,功率达到最高点,也就是我们通常所说的最大功率点。从 V_m 处到 V_{oc} 处,随着电压的上升,电流下降的速度明显加快,功率也随着电流下降开始同步下降。

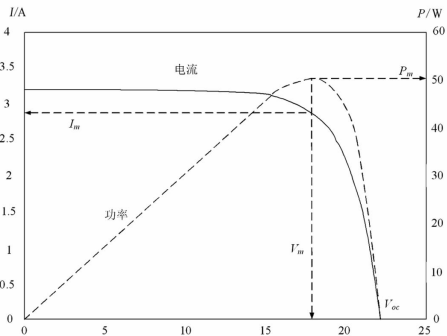


图 1 光伏电池的输出特性曲线

从以上分析可以看出,在标准条件下,只有使光伏电池工作在最大功率点时,其输出功率能够达到最大。在光伏电池光电转换效率比较低的条件下,这条特性对光伏发电来讲非常重要。如何使光伏电池工作在最大功率点处,这就需要研究最大功率点跟踪(maximum power point tracking)。

2 光伏电池物理仿真模型

光伏电池的物理仿真模型是基于光伏电池的等效电路图,对光伏电池的输出特性进行模拟。物理模型及其等效电路图如图 2 所示。

其中: I_{ph} 为光生电流, I_{ph} 值正比于光伏电池的面积和入射光的辐照度,1 cm² 光伏电池的 I_{ph} 值均为 16 ~ 30 mA,环境温度的升高会影响 I_{ph} 值,一般来讲温度每升高 1℃, I_{ph} 值上升 78 uA; I_D 为暗电流,无光照下的硅型光伏电池的基本行为特性就类似于一个普通二极管,暗电流是指光伏电池在无光照时,由外

电压作用下 P - N 结内流过的单向电流,反映出 P - N 结自身所能产生的总扩散电流的变化情况; I_L 为光伏电池输出的负载电流; U_{oc} 为电池的开路电压,是指把光伏电池置于 100 mW/cm² 的光照下,且光伏电池输出两端开路时所测得的输出电压值。光伏电池的开路电压与入射光辐照度的对数成正比,与环境温度成反比,与电池面积的大小无关,温度每上升 1℃, U_{oc} 值约下降 2 ~ 3 mV; R_L 为电池的外负载电阻; R_s 为串联电阻,一般 < 1 Ω,它主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接触电阻和金属导体电阻等组成; R_{sh} 为旁路电阻,一般为几千 Ω,主要由电池表面污浊和半导体晶体缺陷所引起的漏电流所对应的 P - N 结漏泄电阻和电池边缘的漏泄电阻等组成。

对应的 $I - V$ 函数如下:

$$I_D = I_0 \left(\exp \frac{qU_D}{AkT} - 1 \right) \tag{1}$$

$$I_L = I_{ph} - I_D - \frac{U_D}{R_{sh}} \\ = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{U_D}{R_{sh}} \tag{2}$$

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \frac{qU_{oc}}{AkT} - 1 \right) \tag{3}$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \tag{4}$$

式中: I_0 为光伏电池内部等效二极管的 P - N 结反向饱和电流,一般为常数; I_{sc} 为电池的短路电流; U_D 为等效二极管的端电压; q 为电子电荷, 1.6×10^{-19} C; k 为波尔兹曼常量, 0.86×10^{-4} e V/K; T 为绝对温度; A 为 P - N 结的曲线常数。为计算方便,取 $\Lambda = \frac{q}{AkT}$, 则

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left(e^{\Lambda(U_{oc} + I_L R_s)} - 1 \right) - \frac{U_D}{R_{sh}} \tag{5}$$

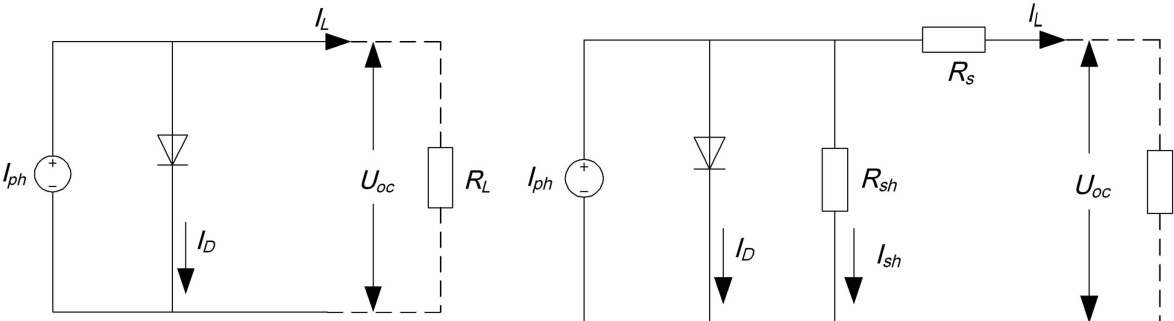


图 2 光伏电池的等效电路图

由于光生电流与光伏电池所受到的瞬间光照强度成正比,当取298K时, I_L 随温度的增高将产生+0.1%的变化,可以得到

$$I_L=5.46\times10^{-3}\times S\times(1+0.001(T-298))\quad(6)$$

依据式(6)可以建立光伏阵列的仿真模型。模型可以由式(7)确定。

受控电流源 I_{sh} 模拟光生电流^[3]:

$$I_{sh}=2\times5.46\times S\times(1+0.001\times(T-T_a))\quad(7)$$

式中: S 为瞬间光照强度, kW/m^2 ; T 为环境温度; T_a 为光伏电池器件温度。

I_d 模拟二极管结电流:

$$I_d=2\times8\times10^{-4}\times(\exp(C\times U)-1)\quad(8)$$

式中: $C=\Lambda$,为常量,由光伏阵列决定。在组件模式中 Λ 取 0.033,比 $\Lambda=\frac{q}{AkT}$ 的计算值小许多^[4]。

由以上公式利用 Matlab/Simulink 建立仿真模型^[5],如图 3 所示。

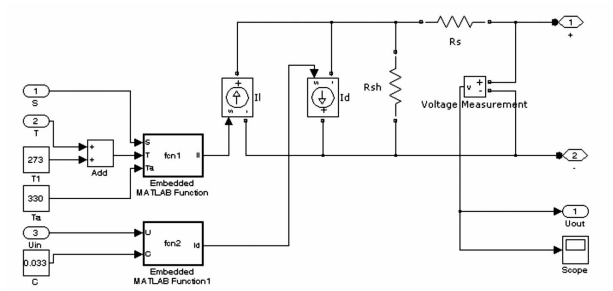


图 3 光伏电池的物理仿真模型

由图 3 可以看出,此模型主要由 2 个受控电流源组成, I_L 模拟的是电路模型中的 I_{ph} , I_d 模拟的是二极管节点流,fcn1 由式(6)给出,fcn2 由式(7)给出。

3 光伏阵列的数学仿真模型

光伏阵列的数学仿真模型^[6]用于模拟光伏模块串并联方式的输出特性^[7]。

在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压。 I_m 、 V_m 为最大功率点电流和电压。则当光伏阵列电压为 V ,其对应点电流为 I 。

其电流输出特性为

$$I=I_{sc}(1-C_1(e^{\frac{V-DV}{C_2V_{oc}}}-1))+DI\quad(9)$$

式中:

$$C_1=(1-I_m/I_{sc})e^{c_2V_{oc}}\quad(10)$$

$$C_2=(V_m/V_{oc}-1)/\ln(1-I_m/I_{sc})\quad(11)$$

$$DI=\alpha\cdot R/R_{ref}\cdot DT+(R/R_{ref}-1)\cdot I_{sc}\quad(12)$$

$$DV=-\beta\cdot DT-R_s\cdot DI\quad(13)$$

$$DT=T_c-T_{ref}\quad(14)$$

式中: R_{ref} 、 T_{ref} 为太阳辐射和光伏电池温度参考值,一般取 $1\text{ kW}/\text{m}^2$, $25\text{ }^\circ\text{C}$; α 、 β 为参考日照下,电流和电压变化温度系数; R_s 为光伏模块的串联电阻。

由此利用 Matlab/Simulink 建立仿真模型如图 4 所示。其中,参考温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,电流温度系数为 0.015,电压温度系数为 0.7,短路电流为 10.65 A,最大功率电流为 10.25 A。

4 光伏电池两种仿真模型的输出特性比较

在普遍的光伏仿真实验中两种模型均有运用,

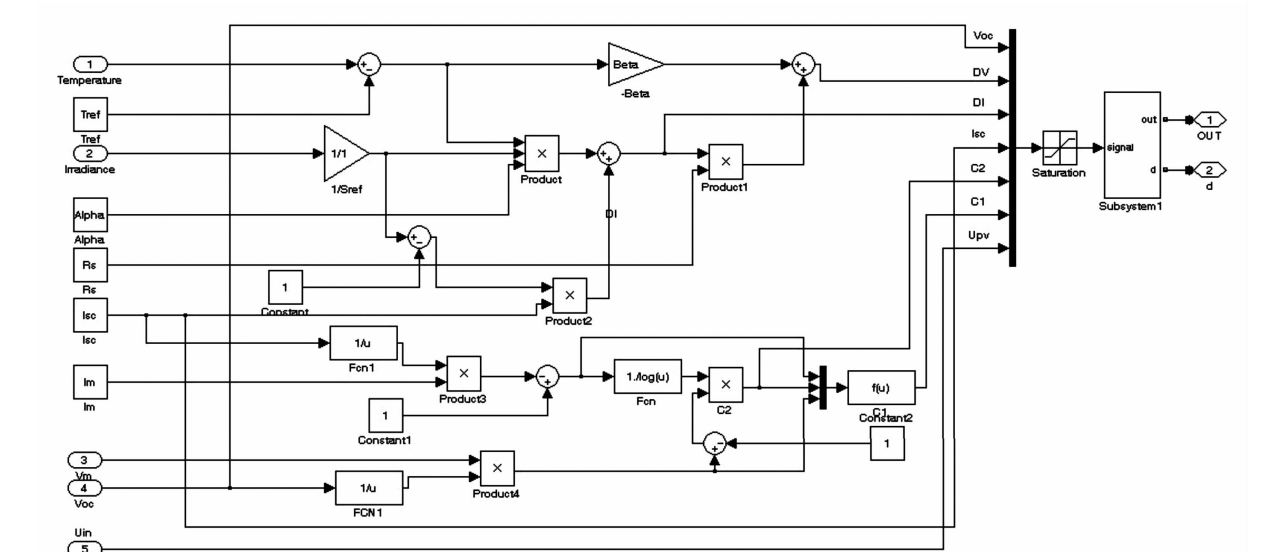


图 4 光伏电池的数学仿真模型

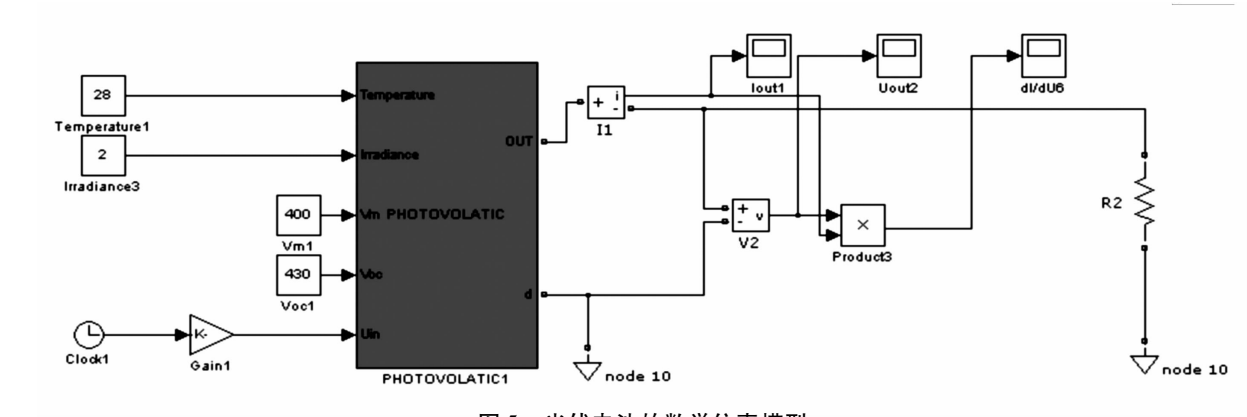


图 5 光伏电池的数学仿真模型

但两种模型的输出特性有何区别目前尚未进行比较,就两种模型输出特性进行仿真分析,并研究其输出特性。图 5 为本次仿真实验模型。

光伏模块分别采用物理仿真模型与数学仿真模型,在电池工作温度为 28℃ 时,太阳辐照度分别为 1 kW/m²、1.2 kW/m²、1.4 kW/m²、1.6 kW/m²、1.8 kW/m² 时两种光伏电池模型的输出特性,R 为 60 Ω,仿真结果如图 6 ~ 图 9 所示。

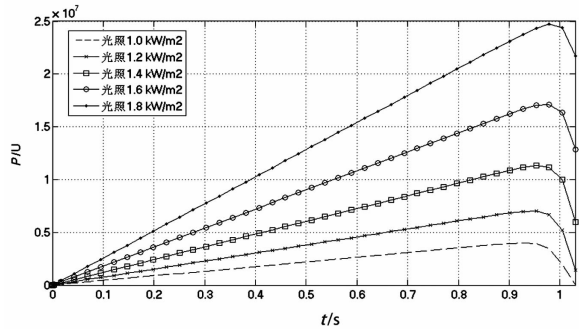


图 6 不同光照条件下数学仿真模型输出特性

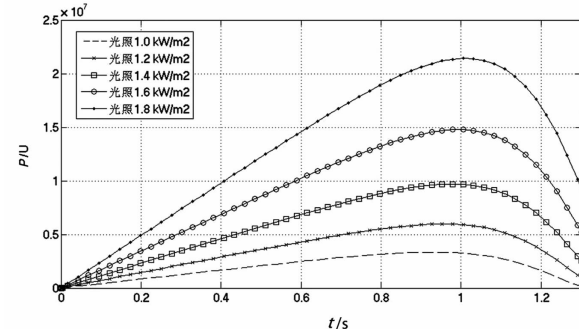


图 7 不同光照条件下物理仿真模型输出特性

通过以上仿真结果可以看出,两种模型均可以模拟出光伏电池的输出特性,得到最大功率点。两种模型的输出特性较为相似,最大功率点位置较为一致。数学仿真模型 P/U 输出特性曲线在上升阶段保持平直,上升速率不变,仅在接近最大功率点时

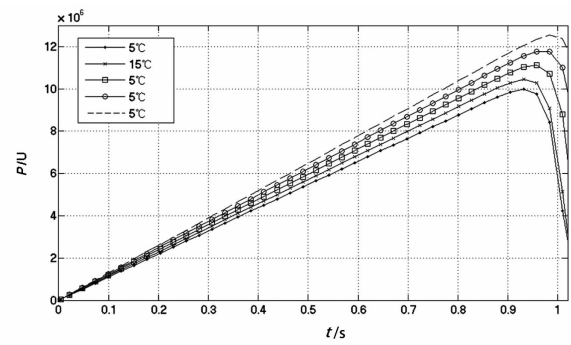


图 8 不同温度条件下数学仿真模型输出特性

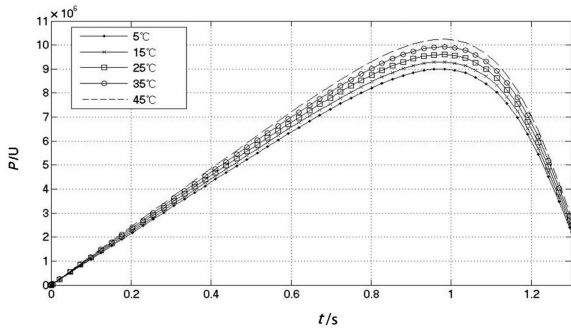


图 9 不同温度条件下物理仿真模型输出特性

变化速率出现较为明显的变化。物理仿真模型 P/U 输出特性曲线相对较为平滑,上升下降速率较为缓慢。

5 结 论

基于 Matlab/Simulink 对光伏电池物理仿真模型和数学仿真模型进行输出特性模拟,分析其输出特性,可以看出两种仿真模型均可以得到光伏电池输出特性,但在 P/U 上升速率方面,两种模型输出特性仍有所区别。在后续进行最大功率点跟踪仿真过程中,这种输出特性的区别可能会在部分仿真实验中影响最大功率点跟踪性能。因此,所研究结果

将对后续最大功率点跟踪仿真实验提供一定的参考依据。

参考文献

[1] 殷忠宁. 独立光伏发电系统最大功率跟踪及能量控制技术的研 究[D]. 重庆:重庆大学,2012; 1-3.

[2] 李丽芳,江冰,吉正洵,等. 光伏发电系统 MPPT 控制仿真模型[J]. 计算机仿真,2015,32(4):116-119.

[3] 禹华军,潘俊民. 光伏电池输出特性与最大功率跟踪的仿真分析[J]. 计算机仿真,2005,22(6):248-252.

[4] H S H Chung, K K Tse, S Y R Hui, et al. A Novel Maximum Power Point Tracker for PV Systems[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, Sixteenth Annual IEEE,2001(1):321-327.

(上接第 8 页)

断与高效预警系统”并实现了工程应用,红外测温精度达到 50 m±2℃,满足《带电设备红外诊断技术应用导则》要求。该系统的建立可对各种危及变电站设备及电网安全运行的隐患进行预警,将会大大增强高压设备故障点的全面检测能力,完善了电力系统的故障检测系统,从而保障变电站设备及整个电网的安全运行;同时在很大程度上降低了生产成本及同类工作的重复劳动强度,具有明显的经济效益和社会效益。

参考文献

[1] 杨启平,徐丹凤,牟雪云,等. 智能电网背景下的电力设备监测和维护技术[J]. 上海电力学院学报,2010,26(6):520-524.

[2] 姜丁尤. 高压设备红外图像自动故障识别方法与试验研究[J]. 企业技术开发,2013,32(7):5-6.

[3] 井金剑,翟春艳,李书臣,等. 基于红外图像识别的电气设备故障诊断[J]. 电子设计工程,2014(12):171-173.

[4] 宋晓明. 变电站智能巡检机器人关键技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

[5] 蔺丽华. 基于红外成像的变电站设备安全预警关键技术研究[D]. 西安:西安科技大学,2014.

[6] 江国威. 基于红外与可见光图像配准的电力设备检测系统研究与应用[D]. 合肥:安徽大学,2014.

[7] 袁辉建. 变电站电力设备红外自动巡检系统的实现[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2013,18(5):40-42.

[8] 井金剑,翟春艳,李书臣,等. 基于红外图像识别的电气设备故障诊断[J]. 电子设计工程,2014(12):171-173.

[5] 冯海峰,马德林,许良军. 单级式光伏并网发电系统的仿真分析[J]. 计算机仿真,2008,25(3):245-250.

[6] Platon Baltas, etc. The Arizona University Photovoltaic Designer Program(ASUPVD)[Z]. Department of Electrical and Computer Engineering, Arizona State University, 1996.

[7] 茆美琴,余世杰,苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1248-1251.

作者简介:

张 峰(1982),硕士、工程师,主要研究方向为电力系统规划及可再生能源在电网中的应用。

(收稿日期:2016-05-24)

[9] 王方,邱道尹,岳艳杰,等. 基于红外技术的变电站温差无线温度监控[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):135-138.

[10] 程玉兰. 红外诊断现场实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002:102-108.

[11] 吴继平. 红外内参考机构[P]. 中国专利:ZL201120064359.7,2011-07-13.

[12] 刘鸿雁,王一平,袁兵,等. 标定红外热像仪的一种新型黑体辐射源[J]. 仪器仪表学报,2006,27(5):533-535.

[13] 王华伟. 基于红外热成像的温度场测量关键技术研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2013.

[14] 冯晓磊,吴炜,李智,等. 利用梯度方向的 Hausdorff 距离配准红外和可见光图像[J]. 电视技术,2015,39(3):5-10.

[15] 张家良. 红外与可见光图像配准及融合技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.

[16] 田阿灵,赵振兵,高强. 基于 SIFT 的电力设备红外/可见光图像配准方法[J]. 电力科学与工程,2008,24(2):13-15.

[17] 朱云芳,叶秀清,顾伟康. 视频序列的全景图拼接技术[J]. 中国图象图形学报,2006,11(8):1150-1155.

[18] 宋延爽. 基于网络摄像机视频流的全景图拼接技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[19] 薛向阳. 基于哈夫曼编码的文本文件压缩分析与研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(23):5779-5781.

[20] 马士强,郑常宝,曾野,等. 基于信号周期相似性和 LZW 编码的数据压缩方法[J]. 电测与仪表,2014,51(6):95-100.

作者简介:

徐丽华(1976),助理工程师,研究方向为电气工程及其自动化、高电压试验技术。

(收稿日期:2016-04-15)

多馈入直流系统短路比和有效短路比研究

李召兄¹, 吴 丽¹, 苗文静²

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;
2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘 要:传统短路比作为评价与直流输电系统相连交流系统相对强弱的重要量化指标,在单馈入直流系统中得到了广泛应用;但是这种短路比定义不适用于多馈入直流系统,所以,给出合理的多馈入短路比定义是十分必要的。目前学术界存在两种多馈入短路比计算方法,即等值阻抗法和影响因子法。在综述两种方法的基础上,证明了两种方法的一致性;同时指出了前人在理解等值阻抗法时的误区。将 BPA 中 3 机 9 节点系统进行改造,得到三馈入直流系统模型。在此模型中,通过计算和仿真,验证了等值阻抗法和影响因子法的统一性;另外,也得到了多馈入短路比小于单馈入短路比的结论。

关键词:多馈入直流系统;多馈入短路比;多馈入有效短路比;多馈入影响因子;等值阻抗法;影响因子法;高压直流输电

Abstract: As a key quantitative indicator for evaluating the relative strength of AC systems in single – infeed direct current systems, the short – circuit ratio is widely used. But it is not applicable to multi – infeed direct current systems any more. Therefore, giving the reasonable definition of the multi – infeed short – circuit ratio is very necessary. At present, there are two calculation methods about multi – infeed short – circuit ratio in academic circle, that is, short – circuit impedance method and multi – infeed interaction factor method. By exploring the origin the theoretical analysis and formula derivation of these two methods are done. On this base, the unity of these two methods are proved, and the understanding mistake in the short – circuit impedance method is pointed out. A three – infeed direct current system model is built by remaking the 3 – machine 9 – node system in BPA. In this model, the simulation analysis is carried out, which proves the consistency of these two methods. In addition, the conclusion is also obtained that the multi – infeed short – circuit ratio is less than the single – infeed short circuit ratio.

Key words: multi – infeed direct current system; multi – infeed short – circuit ratio; multi – infeed effective short – circuit ratio; multi – infeed interaction factor; equivalent impedance method; impact factor method; high – voltage direct current

中图分类号:TM721 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0019 – 07

0 引 言

当多回直流输电系统向同一交流系统输送电能时,输电受端便形成了多馈入直流(multi – infeed direct current, MIDC)系统。近年来,随着电网的建设和高压直流输电技术的发展,在中国出现了 2 个典型的 MIDC 系统。三峡—黄渡、三峡—上海、三峡—常州和葛南高压直流输电工程,形成 4 回直流馈入华东电网的格局。南方电网也有 4 回直流馈入广东,分别是天广、三广、贵广 I 和贵广 II 高压直流输电工程。

对于 MIDC 系统,由于交直流系统之间、直流与直流子系统之间的相互影响,使得其暂态、中期和长期的动态特性,稳定分析和控制协调更为复杂,需要做系统深入的专门研究。研究表明^[1-3],连接到弱交流系统的直流输电系统在运行中可能出现暂态/动态过电压、电压稳定性、谐波谐振、逆变器易发生换相失败且难以恢复等问题。

传统短路比(short circuit ratio, SCR)/有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)作为一种衡量与直流输电系统相连交流系统相对强弱的指标,可以简单、有效地反映出单馈入直流系统(只有一回直流输电系统向交流系统输送电能时,输电受端所

形成的系统)的稳定情况,对设计、规划、运行人员具有指导意义。然而,在 MIDC 系统中,当多个逆变站之间的电气距离不能视为无穷大而必须计及相互间影响时,采用针对单馈入直流系统的计算方法对各个逆变站分别计算 SCR/ESCR,并依此评估交流系统的相对强弱是不恰当的。因此,给出合理的多馈入短路比 (multi - infeed short circuit ratio, MISCR)/多馈入有效短路比 (multi - infeed effective short - circuit Ratio, MIESCR)计算方法具有重要意义。

这里首先综述了学术界存在的两种 MISCR/MIESCR 计算方法(等值阻抗法^[4]和影响因子法^[5]),同时指出前人在理解等值阻抗法时的误区;接着利用 $P - Q$ 分解法证明了等值阻抗法和影响因子法的一致性;最后将 BPA 中 3 机 9 节点系统进行改造,得到了三馈入直流系统模型。利用此模型验证了两种方法的统一性,也得到了多馈入短路比小于相应单馈入短路比的结论。

1 等值阻抗法

1.1 等值阻抗法

将 MIDC 系统在各回直流逆变侧换流母线处进行多端口戴维南等值^[6],可以得到图 1 所示的等值电路。

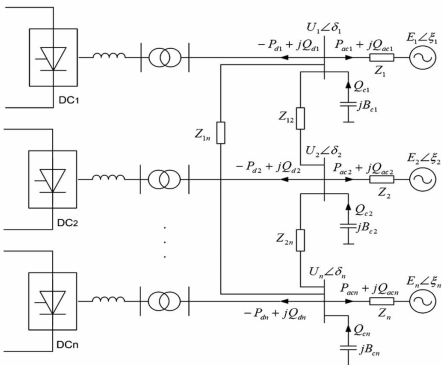


图 1 多馈入直流系统戴维南等值电路

在图 1 中,得到从各回直流逆变侧换流母线处看进去的交流系统等值节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} & \cdots & Z_{eq1n} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} & \cdots & Z_{eq2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{eqn1} & Z_{eqn2} & \cdots & Z_{eqnn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_{eqii} 为第 i 回换流母线的自阻抗; Z_{eqij} 为第 i 和

第 j 回换流母线间的互阻抗($i, j = 1, 2, \cdots, n, j \neq i$)。

从式(1)中可以得到第 j 回直流对第 i 回直流的功率影响 P_{dij} 为

$$P_{dij} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj} \quad (2)$$

式中, P_{dj} 为第 j 回直流的额定直流功率。

考虑所有其他回直流的影响后,可以得到第 i 回直流的 MISCR/MIESCR 为

$$\begin{aligned} MISCR_i &= \frac{S_{SCi}}{P_{dieq}} - \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \\ &= \frac{1}{|Z_{eqii}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$MIESCR_i = \frac{S_{SCi} - Q_{ci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| P_{dj}} \quad (4)$$

式中: S_{SCi} 为第 i 回直流逆变侧换流母线处的三相短路容量; P_{dieq} 为考虑了其他回直流影响后第 i 回直流的等值直流功率; P_{di} 为第 i 回直流的额定功率; Q_{ci} 为第 i 回直流换流母线在额定电压下的无功补偿容量。

1.2 MISCR 与 SCR 的关系

在图 2 所示的两馈入直流系统中,节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} & \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} \\ \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} & \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

文献[4]认为当 $Z_{12} \rightarrow \infty$ 时是两个单馈入直流系统,两馈入短路比分别等于其单馈入短路比。

$$Z_{eq11} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = Z_1 \quad (6)$$

$$Z_{eq12} = Z_{eq21} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = 0 \quad (7)$$

$$Z_{eq22} = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_{12}}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}} = Z_2 \quad (8)$$

$$MISCR_1 = \frac{1}{|Z_1| P_{d1}} = SCR_1 \quad (9)$$

$$MISCR_2 = \frac{1}{|Z_2| P_{d2}} = SCR_2 \quad (10)$$

按这种理解方法,可以得到

$$MISCR_1 = SCR_1 \cdot \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2}} \tag{11}$$

$$MISCR_2 = SCR_2 \cdot \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1|P_{d1} + |Z_1 + Z_{12}|P_{d2}} \tag{12}$$

在式(11)和式(12)中,令

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2}} \\ &= \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1}}{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d1} + |Z_2|P_{d2} - |Z_1|P_{d1}} \end{aligned} \tag{13}$$

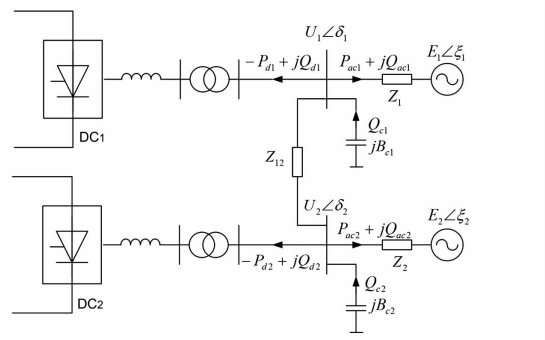


图 2 两馈入直流系统戴维南等值电路

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1|P_{d1} + |Z_1 + Z_{12}|P_{d2}} \\ &= \frac{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2}}{|Z_1 + Z_2 + Z_{12}|P_{d2} + |Z_1|P_{d1} - |Z_2|P_{d2}} \end{aligned} \tag{14}$$

对式(13)和式(14)进行如下分析:

- 1) 若 $SCR_1 < SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} > |Z_2|P_{d2}$, 则 $\alpha_1 > 1, 0 < \alpha_2 < 1$, 从而 $MISCR_1 > SCR_1, MISCR_2 < SCR_2$;
- 2) 若 $SCR_1 = SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} = |Z_2|P_{d2}$, 则 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1$, 从而 $MISCR_1 = SCR_1 = MISCR_2 = SCR_2$;
- 3) 若 $SCR_1 > SCR_2$, 即 $|Z_1|P_{d1} < |Z_2|P_{d2}$, 则 $0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1$, 从而 $MISCR_1 < SCR_1, MISCR_2 > SCR_2$ 。

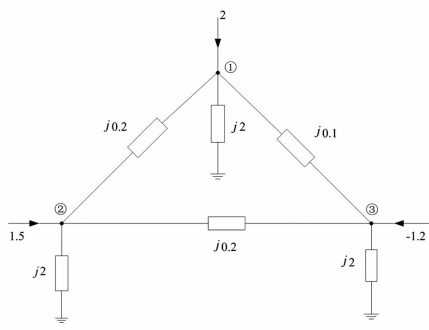
因此, $SCR_1 \neq SCR_2$ 时,单馈入短路比小的直流系统其两馈入短路比增加,而单馈入短路比大的其两馈入短路比减小; $SCR_1 = SCR_2$ 时,同一直流系统的单馈入短路比与两馈入短路比相等。

一般来说,和其单馈入短路比相比,多馈入短路比不可能增加或者不变。以下举例说明正确的理解方法。在图 3(a)所示的三节点电力系统中,以节点①和节点②为端口 a、节点③和地为端口 b 的二端

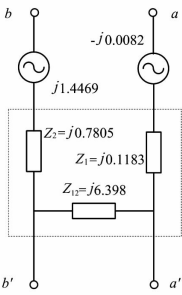
口戴维南等值节点阻抗矩阵为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0.1164 & 0.0127 \\ 0.0127 & 0.6970 \end{bmatrix} \tag{15}$$

可知 $Z_{eq22} = j0.6970$ 。从而可以得到图 3(a)的二端口戴维南等值电路如图 3(b)。再对节点③与地组成的端口作一端口等值,则 $Z = j0.6970$,可见与二端口等值中的 Z_{eq22} 是相等的,而不同于图 3(b)中的 $Z_2 = j0.7805$,所以对 $Z_{12} \rightarrow \infty$ 时多馈入的短路比应理解为



(a) 三节点电力系统



(b) 二端口戴维南等值电路

图 3 二端口等值示例图

$$MISCR_2 = \lim_{Z_{12} \rightarrow \infty} \frac{U_2^2 / |Z_{eq22}|}{P_{d2} + \frac{|Z_{eq21}|}{|Z_{eq22}|} P_{d1}} = \frac{U_2^2 / |Z_{eq22}|}{P_{d2}} \tag{16}$$

由此可见,单馈入短路比是多馈入短路比的一种特例,两者是统一的。另外,还可以看出,直流回路的增加不会改变各个换流母线处的短路容量,考虑了直流之间的相互影响后,多馈入短路比肯定比相应单馈入短路比小。

2 影响因子法

影响因子法的前提是多馈入相互作用因子

(multi - infeed interaction factor, MIIF)。MIIF 定义为:当所考察的直流输电系统以额定直流功率运行时,在其逆变站换流母线上投入一条并联无功功率支路,造成其换流母线约 1% 的电压跌落(用 ΔU_i 表示),检测其他逆变站换流母线电压的下降量 ΔU_j , 则 ΔU_j 与 ΔU_i 的比值即为逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子,记为 $MIIF_{ji}$ 。

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i}$$

(17)

根据 $MIIF_{ji}$ 的定义,在包含 n 回直流的多馈入系统中,可以生成一个 $n \times n$ 阶的 MIIF 矩阵。其非对角元素在 0 ~ 1 之间,该值的大小反映逆变站 i 和 j 之间电气耦合的紧密程度;对角线元素全部为 1。

在定义 MIIF 的基础上,就可以定义 MISCR/MI-ESCR。对于多馈入直流系统中的逆变站 i ,考虑所有其他直流逆变站相互作用后的短路比和有效短路比分别为

$$MISCR_i = \frac{S_{SCi}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (MIIF_{ji} P_{dj})}$$

(18)

$$MISCR_i = \frac{S_{SCi} - Q_{ci}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (MIIF_{ji} P_{dj})}$$

(19)

3 两种短路比的关系

以如图 4 所示的三馈入系统为例,说明前述两种短路比的关系。

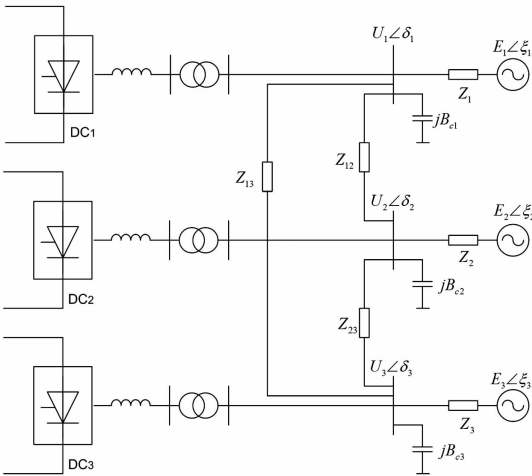


图 4 三馈入直流系统

在图 4 所示系统中,对受端交流系统应用 $P - Q$ 分解法有

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1/U_1 \\ \Delta Q_2/U_2 \\ \Delta Q_3/U_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix}$$

$$= -B \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = -Y_{eq} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix}$$

(20)

其中矩阵 B 由节点导纳矩阵 Y_{eq} 的虚部组成,忽略线路的电阻,矩阵 B 即为节点导纳矩阵 Y_{eq} 。则节点阻抗矩阵 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = B^{-1} = \frac{1}{\det(B)}$$

$$\begin{bmatrix} B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32} & -(B_{12}B_{33} - B_{13}B_{32}) & B_{12}B_{23} - B_{13}B_{22} \\ -(B_{21}B_{33} - B_{23}B_{31}) & B_{11}B_{33} - B_{13}B_{31} & -(B_{11}B_{23} - B_{13}B_{21}) \\ B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31} & -(B_{11}B_{32} - B_{12}B_{31}) & B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} & Z_{eq13} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} & Z_{eq23} \\ Z_{eq31} & Z_{eq32} & Z_{eq33} \end{bmatrix}$$

(21)

为求逆变站 i 对逆变站 j 的相互作用因子 $MIIF_{ji}$,假定 $\Delta Q_j = 0$ 。则 $MIIF_{21}$ 和 $MIIF_{31}$ 可由式 (22) 求得,见式 (23) 和式 (24)。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix}$$

(22)

$$MIIF_{21} = - \frac{B_{21}B_{33} - B_{23}B_{31}}{B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32}} = \left| \frac{Z_{eq12}}{Z_{eq11}} \right|$$

(23)

$$MIIF_{31} = \frac{B_{21}B_{32} - B_{22}B_{31}}{B_{22}B_{33} - B_{23}B_{32}} = \left| \frac{Z_{eq13}}{Z_{eq11}} \right|$$

(24)

所以有式 (25), 同理可得式 (26) 和式 (27)。

$$MISCR_1 = \frac{S_{SC1}}{P_{d1} + \sum_{j=1, j \neq 1}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq1j}}{Z_{eq11}} \right| P_{dj} \right)}$$

$$= \frac{S_{SC1}}{P_{d1} + \sum_{j=1, j \neq 1}^3 (MIIF_{j1} P_{dj})}$$

(25)

$$MISCR_2 = \frac{S_{SC2}}{P_{d2} + \sum_{j=1, j \neq 2}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq2j}}{Z_{eq22}} \right| P_{dj} \right)}$$

$$= \frac{S_{SC2}}{P_{d2} + \sum_{j=1, j \neq 2}^3 (MIIF_{j2} P_{dj})}$$

(26)

$$MISCR_3 = \frac{S_{SC3}}{P_{d3} + \sum_{j=1, j \neq 3}^3 \left(\left| \frac{Z_{eq3j}}{Z_{eq33}} \right| P_{dj} \right)}$$

$$= \frac{S_{SC3}}{P_{d3} + \sum_{j=1, j \neq 3}^3 (MIIF_{j3} P_{dj})}$$

(27)

可见,对于三馈入系统,两种短路比计算得到的结果一样。对于多馈入系统,按上述方法推导,也可得到两种短路比在本质上是是一致的。

4 三馈入算例

将 BPA 中 3 机 9 节点模型进行改造,在 PSCAD/EMTDC 软件中建立如图 5 所示的三馈入直流系统。其中三回直流 DC₁、DC₂ 和 DC₃ 的具体参数见表 1,其控制系统采用 Cigre 标准测试系统模型,整流侧和逆变侧的无功补偿容量分别按额定直流功率的 50% 和 60% 配置。

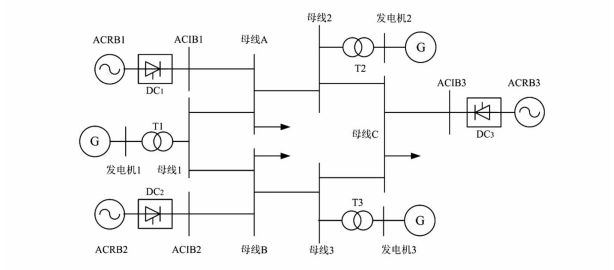


图 5 三馈入直流系统结构图
表 1 直流系统参数

直流回路		DC ₁ 、DC ₃	DC ₂
额定电压		± 250 kV	± 500 kV
额定电流		3 kA	3 kA
额定功率		1 500 MW	3 000 MW
角度	触发角	15°	
	熄弧角	18°	
控制方式	整流侧	定电流	
	逆变侧	定熄弧角	

整流侧和逆变侧交流系统均为 500 kV,送端系统等值为 3 个理想电压源,受端交流系统发电机采用次暂态数学模型;负荷采用恒阻抗模型。

4.1 等值阻抗法

图 5 所示系统三回直流逆变侧换流母线处短路时系统的等值电路如图 6 所示。图中以节点⑦与地、节点⑧与地和节点⑨与地构成三端口,得到的三端口等值阻抗矩阵为

$$Z_{eq} = \begin{bmatrix} 0.000\ 7 + 0.005\ 1i & 0.000\ 7 + 0.001\ 7i & 0.000\ 6 + 0.001\ 7i \\ 0.000\ 7 + 0.001\ 7i & 0.000\ 8 + 0.004\ 1i & 0.000\ 7 + 0.001\ 7i \\ 0.000\ 6 + 0.001\ 7i & 0.000\ 7 + 0.001\ 7i & 0.000\ 7 + 0.005\ 1i \end{bmatrix}$$

(28)

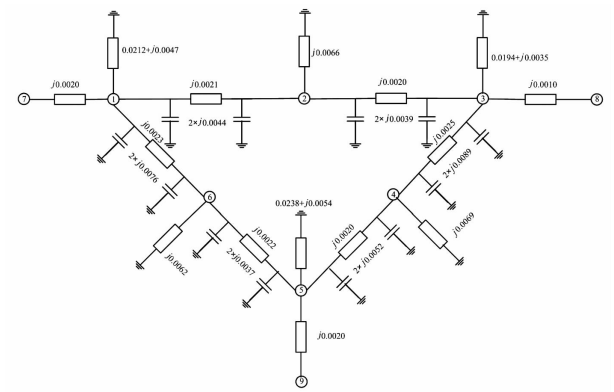


图 6 计算 MISCR 时系统短路图

从而得到 DC₁ 的多馈入短路比和单馈入短路比分别为

$$MISCR_1 = \frac{1}{|Z_{eq11}|P_{d1} + |Z_{eq12}|P_{d2} + |Z_{eq13}|P_{d3}}$$

$$= \frac{1}{0.005\ 1 \times 15 + 0.001\ 8 \times 30 + 0.001\ 8 \times 15}$$

$$= 6.349$$

(29)

$$SCR_1 = \frac{1}{|Z_{eq11}|P_{d1}} = \frac{1}{0.005\ 1 \times 15} = 13.072$$

(30)

同理,得到 DC₂ 的多馈入短路比和单馈入短路比分别为 5.556、7.937;DC3 分别为 6.349、13.072。

图 7(线路对地导纳同图 6)所示为计算 MI-ESCR 时系统短路图,则计算多馈入有效短路比的等值节点阻抗矩阵为

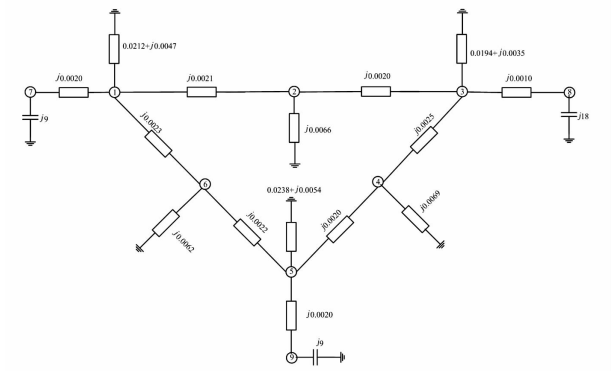


图 7 计算 MIESCR 的系统短路图

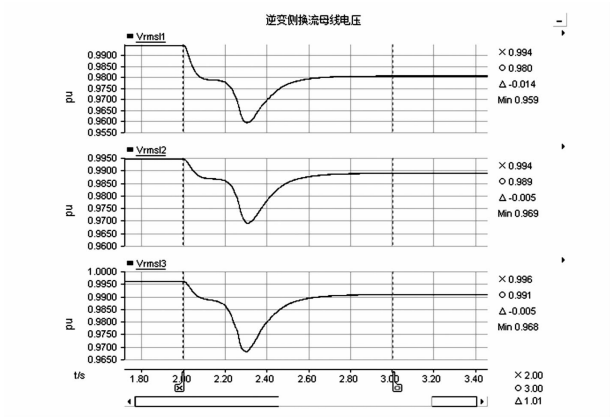
$$Z_{ceq} = \begin{bmatrix} 0.000\ 9 + 0.005\ 4i & 0.000\ 9 + 0.002\ 0i & 0.000\ 8 + 0.001\ 9i \\ 0.000\ 9 + 0.002\ 0i & 0.001\ 0 + 0.004\ 5i & 0.000\ 8 + 0.001\ 9i \\ 0.000\ 8 + 0.001\ 9i & 0.000\ 8 + 0.001\ 9i & 0.000\ 8 + 0.005\ 4i \end{bmatrix}$$

(31)

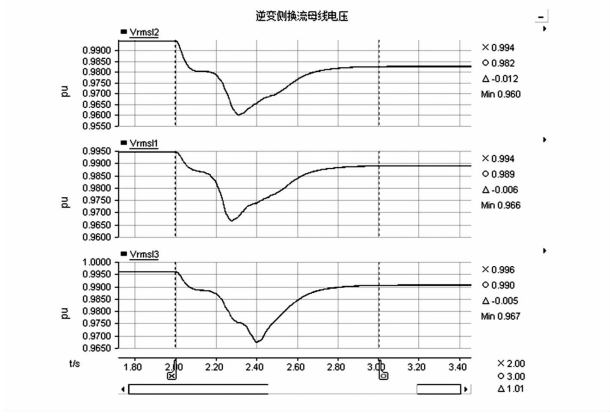
从而得到 DC₁、DC₂ 和 DC₃ 的多馈入有效短路比分别为 5.556、4.938 和 5.650;相应的单馈入有效短路比分别为 12.121、7.246 和 12.121。

4.2 影响因子法

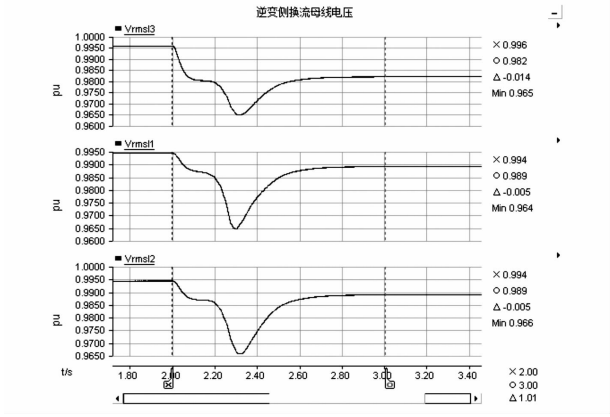
根据 MIIF 的定义,可以得到如图 8 所示的仿真波形。



(a) DC₁ 母线电压波动约 1% 时其他母线波动量



(b) DC₂ 母线电压波动约 1% 时其他母线波动量



(c) DC₃ 母线电压波动约 1% 时其他母线波动量

图 8 MIIF 仿真波形

从中可以得到 MIIF 矩阵为

$$MIIF = \begin{bmatrix} MIIF_{11} & MIIF_{21} & MIIF_{31} \\ MIIF_{12} & MIIF_{22} & MIIF_{32} \\ MIIF_{13} & MIIF_{23} & MIIF_{33} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 1.0 & 0.357 & 0.357 \\ 0.5 & 1.0 & 0.417 \\ 0.357 & 0.357 & 1.0 \end{bmatrix}$$

(32)

因此求得 DC₁ 的 MISCR 和 MIESCR 分别为

$$MISCR_1 = \frac{1/|Z_{eq11}|}{P_{d1} + MIIF_{21}P_{d2} + MIIF_{31}P_{d3}}$$
$$= \frac{1/0.0051}{15 + 0.357 \times 30 + 0.357 \times 15}$$
$$= 6.312$$

(33)

$$MIESCR_1 = \frac{1/|Z_{eq11}|}{P_{d1} + MIIF_{21}P_{d2} + MIIF_{31}P_{d3}}$$
$$= \frac{1/0.0055}{15 + 0.357 \times 30 + 0.357 \times 15}$$
$$= 5.853$$

(34)

同理,得到 DC₂ 的多馈入短路比和多馈入有效短路比分别为 5.442、4.968;DC₃ 分别为 6.312、5.853。

4.3 两种方法比较

将两种方法计算得到的短路比结果列于表 2,可见,抛开计算和仿真误差,可以认为两种方法计算得到的短路比结果相差不多,即两种方法一致。

此外,考虑直流之间的相互影响后,多馈入短路比/有效短路比均比相应的单馈入短路比/有效短路比要小。

表 2 计算结果比较

直流回路	短路比			有效短路比		
	单馈入 短路比	多馈入 短路比		单馈入 有效短 路比	单馈入有 效短路比	
		等值 阻抗法	影响 因子法		等值 阻抗法	影响 因子法
DC ₁	13.072	6.349	6.312	12.121	5.556	5.853
DC ₂	7.937	5.556	5.442	7.246	4.938	4.968
DC ₃	13.072	6.349	6.312	12.121	5.650	5.853

5 结 论

- 1)对多馈入短路比的计算方法进行了理论分析和公式推导,统一了学术界中对多馈入短路比的定义。证明了在这种定义下,传统单馈入短路比是多馈入短路比的一个特例。
- 2)在三馈入直流系统中,通过仿真计算发现短路阻抗法和多馈入影响因子法两种方法在计算多馈入短路比时误差较小,说明两种方法具有统一性。

3)在三馈入直流系统中,通过仿真分析,得到考虑直流之间的相互影响后,多馈入短路比小于单馈入短路比。表明如果采用单馈入短路比去评价多馈入系统中交流系统的强弱,必然导致评价结果过于乐观。

参考文献

[1] Prabha Kundur. Power System Stability and Control[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[2] Gavrilovic A. AC/DC System Strength as Indicated by Short Circuit Ratios[C]. IEEE Conference on AC and DC Power Transmission, London, 1991.

[3] R. S. Thallam. Review of the Design and Performance Features of HVDC Systems Connected to Low Circuit Ratio AC Systems[J]. IEEE Transactions on Power Deliver-

y, 1992, 7(4): 2065 – 2073.

[4] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1 – 8.

[5] 洪潮, 饶红. 多馈入直流系统的量化分析指标及其应用[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 37 – 41.

[6] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

作者简介:

李召兄(1984), 硕士、工程师, 从事电力系统一次规划设计以及电网运行分析工作;

吴 丽(1984), 工程师, 从事电力系统规划及继电保护设计工作;

苗文静(1984), 硕士、工程师, 从事超高压电网继电保护及智能变电站设备运维工作。

(收稿日期: 2016 – 04 – 28)

(上接第 13 页)

[3] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33 – 40.

[4] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8 – 14.

[5] 杨琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042 – 2047.

[6] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105 – 110.

[7] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7 – 11.

[8] 盛超, 曾杰, 郝正航, 等. 含双馈风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 133 – 137.

[9] 陈乾, 沈沉, 刘锋. 端口能量及其在风电系统暂态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 9 – 16.

[10] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学

报, 2012, 24(2): 41 – 46.

[11] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832 – 3842.

[12] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34 – 40.

[13] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399 – 3405.

[14] 韩祯祥. 电力系统分析(第五版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013.

[15] 陈树勇, 陈会员, 唐晓俊, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514 – 519.

作者简介:

周士琼(1991), 硕士研究生, 从事新能源发电与并网技术研究;

王 倩(1962), 硕士、教授, 从事电力系统调度综合自动化研究;

吕 潇(1992), 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究。

(收稿日期: 2016 – 06 – 12)

云南电网和主网利用直流输电系统黑启动的策略研究

赵 睿¹, 卢斯煜¹, 王 曦², 柳勇军¹, 涂 亮¹, 李保宏³

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510000; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:云南与主网异步联网后,启动溪洛渡直流和鲁西背靠背直流参与初期黑启动可加快电网恢复速度。通过对传统直流参与黑启动时的交流系统短路容量、转动惯量要求以及直流系统控制模式选择的研究,确定了传统直流参与交流系统黑启动的技术条件。同时,以柔性直流作为试点研究对象,开展基于模块化多电平换流器(MMC)的新型直流参与交流系统黑启动的启动策略研究,提出分组分时序的负载投入方法。利用 PSCAD 电磁暂态模型进行仿真,结果验证了理论分析的正确性。

关键词:传统直流;柔性直流;黑启动;系统恢复

Abstract: When Yunnan power grid is in asynchronous operation with main Southern Power Grid, Xiluodu and Luxi HVDC can be started at the initial stage of black – start to speed up the recovery of power grid. The control modes of the traditional HVDC and the technical requirements of AC system for involving in the black – start are researched to set its technical conditions. At the same time, a new black – start strategy is researched when HVDC transmission system based on modular multilevel converter (MMC) is used in grid black – start. The simulation results with PSCAD electromagnetic transient model verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: traditional HVDC; HVDC flexible; black – start; system recovery

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003 – 6954(2016)05 – 0026 – 06

0 引 言

南方电网是目前世界上最复杂的交直流混联电网之一。由于大容量远距离送电、多回直流馈入点电气距离较近等原因,南方电网在发生多回直流同时闭锁等严重情况时,存在电网崩溃引发大面积停电事故的风险。一旦发生大面积停电事故,尽快恢复网架和供电是第一要务^[1-2]。

传统直流输电系统输送功率大、启动和调整速度快、可控性强,在黑启动及系统恢复过程中都可发挥较大作用;并且,鲁西背靠背直流存在基于 MMC 的柔性直流单元,这种新型直流系统能够自换相,可以工作在无源逆变方式,不需要外加的换相电压,受端系统可以是无源网络,克服了传统直流输电受端必须是有源网络的根本缺陷,在电网黑启动阶段初期可加快系统的恢复速度^[3-4]。但是,直流输电对电网黑启动和系统恢复的不利影响也很明显,特别是直流启动对交流系统的冲击较大,系统恢复过程

中直流发生闭锁可能导致交流系统崩溃;同时还存在系统严重故障导致直流输电设备损害的风险。另外,鲁西背靠背直流的柔性直流单元属于基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统(MMC – HVDC),用于电网黑启动时,需要重视换流站子模块电容的充电。因此,研究传统和基于 MMC 的新型直流输电系统黑启动的相关问题,对于直流输电系统数量多、容量大的南方电网,有非常重大的意义。

这里基于南方电网 2016 年运行方式中的直调系统网架,主要以传统直流和基于 MMC 的新型直流来开展相应的直流系统黑启动策略研究,提出传统直流启动时交流系统强度要求、启动控制模式,以及 MMC – HVDC 系统换流站黑启动策略。

1 传统直流黑启动条件

1.1 传统直流启动时的交流系统强度要求

直流启动时的滤波器投入是对交流系统的无功冲击,直流功率的迅速提升是对交流系统的有功冲击。如果交流系统无法承受这两种冲击,引起电压和频率大幅变化,将可能导致直流系统保护或交流系统保护动作,使得启动无法成功。此外,如果交流系统过于薄弱,直流输电系统的电流、电压建立过程也将面临困难,造成直流无法达到稳定的运行状态,导致直流启动的失败。因此,交流系统必须具备一定的强度,才能承受直流系统启动造成的冲击,并保证直流系统能够建立平稳的运行状态,即保证启动的成功^[5-7]。

1) 短路容量要求

黑启动时尽快启动直流有利于系统快速恢复,但这对交流系统的最小强度提出要求。一般来说,在黑启动条件下,直流启动过程中暂态工频过电压不超过额定值的 1.4 倍,稳态工频电压值不超过额定值的 1.1 倍。

由于直流以最小功率启动时消耗无功较少,因此直流启动时投入的最小滤波器组会反送无功,造成交流电压升高。直流功率建立时投入最小滤波器组合 2 组,则滤波器向交流系统反送的无功功率为 Q_f 。而在最小启动功率(单极 70% 降压,最小电流 0.1 p. u.)运行时,直流系统吸收的无功功率 $Q_{dci} \approx P_{dci} = 0.07P_{dn}$,其中, P_{dn} 为直流单极额定功率。同时电压升高的幅值可用式(1)进行估算:

$$S_{sc} = \frac{U}{\Delta U}Q \tag{1}$$

式中: U 为滤波器投入启动前的电压; ΔU 为电压升高幅值; S_{sc} 为换流母线的短路容量。

溪洛渡直流工程中整流侧 $P_{dn} = 10Q_f$, 则为满足稳定电压不超过 $1.1U_N$ 的要求,有

$$S_{sc} = \frac{1.0}{0.1}(2Q_f - 0.7Q_f) = 13Q_f \tag{2}$$

即,若投入 2 组滤波器,送端短路容量需要为单组滤波器容量的 13 倍左右。

溪洛渡直流工程中逆变侧 $P_{dn} = 9Q_f$, 则为满足稳定电压不超过 $1.1U_N$ 的要求,有

$$S_{sc} = \frac{1.0}{0.1}(2Q_f - 0.63Q_f) = 13.7Q_f \tag{3}$$

即,若投入 2 组滤波器,受端短路容量需要为单组滤波器容量的 13.7 倍左右。

2) 转动惯量要求

交流系统维持要求频率的能力与其系统转动惯量有关,为衡量黑启动条件下,直流功率与系统转动惯量之间的相对关系,定义了相应的直流系统有效惯性时间常数 H_{dc} 。

$$H_{dc} = \frac{\text{交流系统总转动惯量}}{\text{直流系统当前输送的功率}} \tag{4}$$

在启动过程中,对整流侧,直流功率相当于固定负荷;对逆变侧,直流功率则相当于一台固定出力的机组;因此,直流启动会造成整流侧频率降低,逆变侧频率升高。

负荷的频率效应及调速器的作用共同决定了频率的变化。随着频率的升高和降低,负荷吸收的功率会降低或升高,调速器也会通过加大或减少阀门开度,增加或减少发电机出力,以阻止频率的改变。

设直流功率为 P_d , 机组的总容量为 P_G , 则

$$\frac{P_d}{P_G} = K \frac{\Delta f}{f_n} \tag{5}$$

在南方电网中,取综合频率因子 $K = 3.0$, 将频率变化范围限定在 2.5 Hz, 则机组容量需要为直流输送功率的 6.7 倍,如果送端系统无负荷,受端系统无火电机组,有效惯性时间常数只需要达到 28。

1.2 传统直流启动整流侧控制模式选择

黑启动时选择合适的直流控制模式可以提高系统稳定性^[8]。

对于弱交流系统而言,受端电压稳定是保证直流正常运行的重要因素。由于电压和有功弱耦合而和无功强耦合,因此通过分析直流系统换流器控制模式对逆变侧消耗无功功率的影响可以定性判断电网电压的稳定性。直流运行时逆变侧电压、有功及无功可由式(6)~式(8)表示。

$$\begin{aligned} U_{di} &= U_{doi} \cos \gamma_i - \frac{3BX_i I_{di}}{\pi} \\ &= 1.35E_{LL}BT_i \cos \gamma_i - \frac{3BX_i I_{di}}{\pi} \end{aligned} \tag{6}$$

$$P_{dci} = 1.35E_{LL}BT_i \cos \gamma_i I_{di} - \frac{3BX_i I_{di}^2}{\pi} \tag{7}$$

$$Q_{dci} = P_{dci} \tan \phi \tag{8}$$

式中: P_{dci} 为逆变侧直流外送有功功率; U_{di} 与 I_{di} 为逆变侧直流电压与电流; U_{doi} 为逆变侧理想空载直流电压; γ_i 为逆变侧熄弧角; E_{LL} 为变压器线电压有效值

(一次侧); B 为桥数; X_i 为变压器折算到二次侧的阻抗; T_i 为变压器变比; $\phi = \arccos(U_{di}/U_{doi})$ 。

1) 整流侧定功率逆变侧定电压控制

当直流采用整流侧定电流、逆变侧定电压控制方式时, U_{di} 不变, I_{di} 不变。则逆变侧电压 E_{LL} 下降时, $U_{doi} = 1.35E_{LL}BT_i$ 减小且 U_{di} 不变, $\cos\phi$ 增大, $\tan\phi$ 减小,且 $Q_{dci} = P_{dci}\tan\phi = U_{di}I_{di}\tan\phi$,故 E_{LL} 下降时, P_{dci} 不变, γ_i 减小, Q_{dci} 减小。即在保证直流逆变侧外送有功的同时消耗无功减小,有利于换流母线电压的恢复。

2) 整流侧定电流逆变侧定电压控制

采用整流侧定功率、逆变侧定电压控制方式时, U_{di} 不变, P_{der} 不变。

由于

$$I_{di} = \frac{-U_{di} + \sqrt{U_{di}^2 + 4R_L P_{der}}}{2R_L} \tag{9}$$

$$P_{dci} = U_{di} I_{di} \tag{10}$$

则 P_{dci} 不变。

逆变侧电压 E_{LL} 下降时, U_{doi} 减小, $\tan\phi$ 减小, γ_i 减小, Q_{dci} 减小。直流有功无功变化情况同整流侧定电流、逆变侧定电压控制模式相同,即在保证直流逆变侧外送有功的同时消耗无功减小,有利于换流母线电压的恢复。

2 基于 MMC 的新型直流黑启动策略

对于两端 MMC-HVDC 系统,一端由于故障发生大停电后,另一端换流站也将停运。在这种情况下,停电端没有交流电源对子模块电容充电,因此需要有源端交流电源同时向两端换流站充电,其黑启动策略同样适用于供电无源网络时的换流站启动。这时的充电等效电路如图 1 所示。

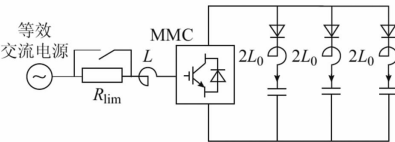


图 1 两端系统中黑启动换流站时的等效电路

此时,无源端上、下桥臂电流大小相等、方向相同,因此 2 个桥臂电容同时充电。若无源侧换流站闭锁全部子模块,则最终的结果是只能使子模块充电到额定电压值的一半,无法完成换流站的启动。

换流站启动步骤如下:

- 1) 启动有源侧换流站的同时闭合直流线路隔离刀闸,同时向无源侧换流站充电;
- 2) 在电容充电过程中,子模块控制器(SMC)的取能采用自取能方式,则在全站闭锁充电至 SMC 达到其工作电压后再进行排序触发,将每相 2 个桥臂 2N 个子模块电容电压以给定的轮换周期 T 进行排序,选出电容电压最小的 N 个子模块闭锁,其余子模块触发 T_2 ;
- 3) 有源侧定直流电压控制阶段;
- 4) 有源侧和无源侧电压建立;
- 5) 接入无源负载,提升功率。

在功率提升阶段,由于无源网络没有独立的交流电源维持系统的频率,因此需要 MMC 对系统的交流电压有效值和频率进行控制,其电压参考值可以采用图 2 的方法产生。其中, u_{rmsref} , u_{rms} 分别为滤波器母线交流电压有效值的指令值和测量值。频率信号 $\omega = 2\pi f$ 。控制器输出参考电压指令 $v_{iref}(i = a, b, c)$ 传送到 PWM 触发单元。ramp 环节使交流电压指令以恒定速度从 0 逐步上升到设定值^[9-10]。

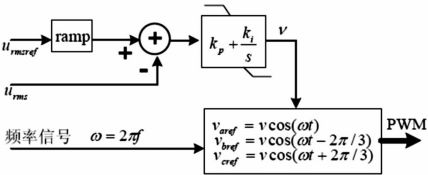


图 2 无源侧交流电压控制器

为避免无源负载投入对交流系统频率和电压造成的冲击,应采用分组分时序的方法投入负载。

3 仿真分析

3.1 黑启动条件下溪洛渡直流逆变侧最小启动条件

溪洛渡直流的整流站位于云南电网内部,云南电网和南方电网异步,两大电网同时发生大停电事故的概率较小,因此,在南方电网主网黑启动时,可以认为溪洛渡直流整流站的交流系统为强系统。

溪洛渡直流单极 70% 降压启动,启动的直流功率为 112 MW(不考虑直流线路的损耗),单组滤波器的容量为 174 Mvar,因此,逆变侧最小启动条件如下:

- 1) 短路容量需超过 $13.7 \times 174 \text{ MVA} = 2\,384$

MVA;

2)考虑参与黑启动的广州蓄能电厂为水电厂,交流系统最小的转动惯量为 $112 \times 28 = 3\ 136\ \text{MW} \cdot \text{s}$;

3)满足以上 2 个条件的同时,也满足了有效短路比 >8 的要求。

表 1 从西换流站黑启动电源

开机组合	短路电流 /kA	短路容量 /MVA	转动惯量 /(MW·s)
广蓄 A 4 台	2.94	2 672	6 040

由上述分析可知,溪洛渡直流逆变侧可满足条件的启动电源为广州蓄能 A 厂 4 台机,如表 1 所示。仿真采用的启动模式为单极 70% 降压启动方式。

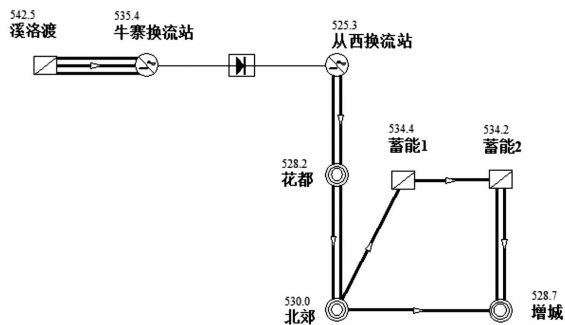


图 3 整流侧和逆变侧电网接线

整流侧和逆变侧均采用实际交流系统,开机方式为溪洛渡电厂 9 台机,广蓄 A 厂 4 台机,接线方式见图 3。整流侧和逆变侧短路容量分别为 12 342 MVA 和 2 672 MVA,转动惯量分别为 33 273 MW·s 和 6 040 MW·s。

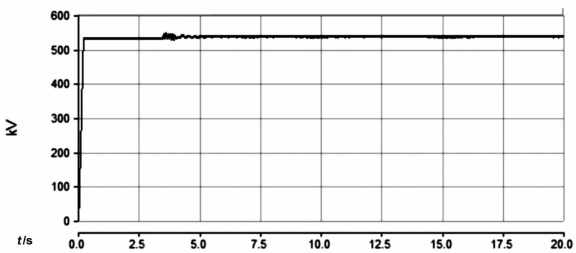
图 4 为仿真结果曲线,曲线从(a)至(e)依次为整流侧换流母线电压(kV)、逆变侧换流母线电压(kV)、直流功率(MW)、整流侧交流频率(Hz)、逆变侧交流频率(Hz)。

从图 4 可知,直流启动过程中系统运行平稳。运行平稳后,逆变侧换流母线电压为 560 kV,逆变侧最大频率偏差为 0.98 Hz。电压和频率值与估算值接近。

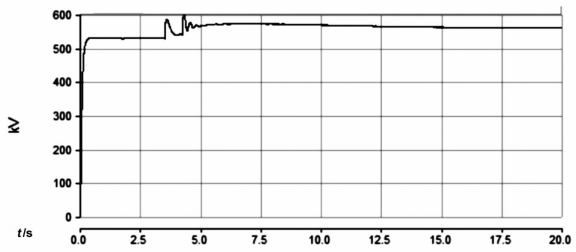
3.2 溪洛渡直流启动整流侧控制模式选择

从理论上分析,交流系统发生接地短路故障后,换流变电站母线电压将降低,因而直流电压也随之下降,定功率控制会使直流电流在瞬间增大。直流电压的下降和直流电流的上升都会使逆变侧关断角迅速减小,从而发生换相失败;定电流控制能够有效

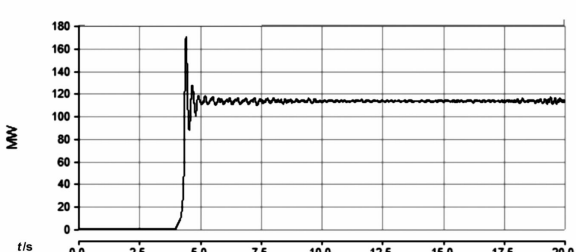
的减小交流系统故障后直流电流的上升,进而减小换相失败的时间,在一定程度上有利于故障的恢复。



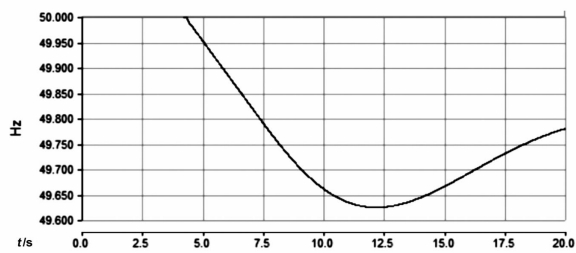
(a) 整流侧换流母线电压



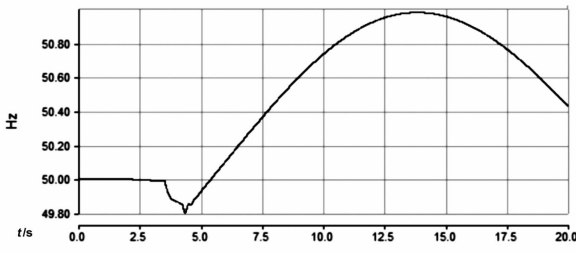
(b) 逆变侧换流母线电压



(c) 直流功率



(d) 整流侧交流系统频率



(e) 逆变侧交流系统频率

图 4 仿真结果

在仿真模型中,整流侧开机方式为溪洛渡电厂 9 台机,逆变侧为等值电源。

逆变侧换流母线发生 0.1 s 的三相短路故障,

逆变侧熄弧角 γ 的仿真结果如图 5 ~ 图 8 所示。

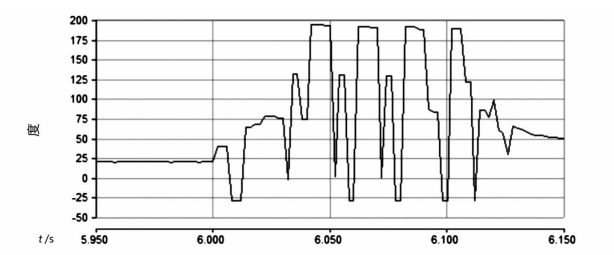


图 5 定功率控制换相失败过程

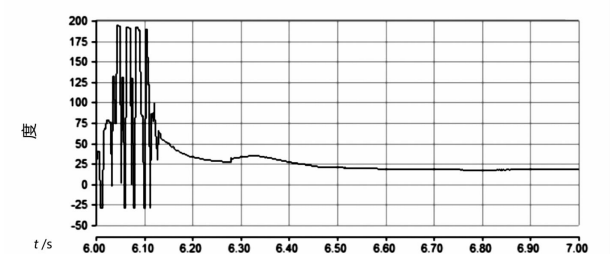


图 6 定功率控制故障恢复过程

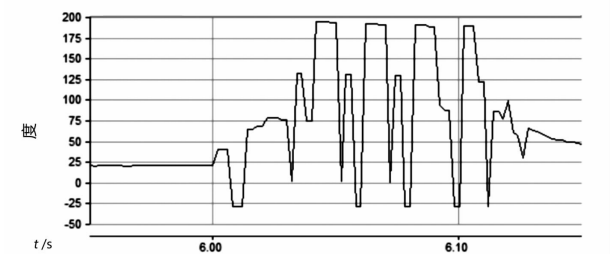


图 7 定电流控制换相失败过程

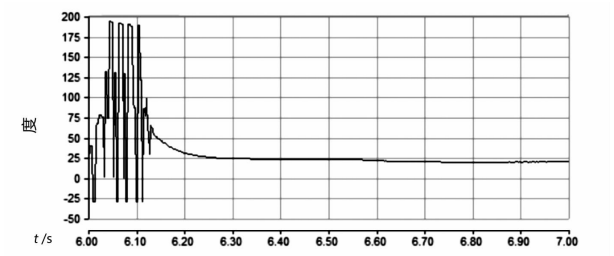


图 8 定电流控制故障恢复过程

表 2 定功率、定电流控制模式比较

控制模式	换相失败时间/ms	故障恢复时间/ms
定功率控制	112	441
定电流控制	112	573

表 2 为定功率、定电流两种控制模式下换相失败及故障恢复时间比较,可以看出故障发生后,两种控制模式的换相失败时间基本一样,都比较短暂,而故障恢复时间相差较多,定功率控制的特性反而优于定电流控制的特性,故障后最大直流电流也相差不多。

通过以上的分析和仿真研究,基于以下两方面

的原因,对于黑启动条件下,直流系统应选择定功率控制模式。

1)交流系统发生短路故障时,虽然定电流控制模式的特性较好,但两者在换相失败时间上相差不多;

2)故障后直流功率的快速恢复对交流系统的稳定会起到非常关键的作用,定功率控制故障后的恢复时间明显快于定电流控制。

3.3 鲁西直流黑启动

鲁西背靠背直流的柔性直流单元,采用可关断的电力电子器件进行换流,没有无功补偿问题和换相失败问题,不需要外加的换相电压,可为无源系统供电。

在云南电网大停电时,鲁西直流柔性直流单元作为黑启动电源实现云南电网黑启动。此时,云南电网负荷侧 $P_{load} = 1\,000\text{ MW}$, $Q_{load} = 294\text{ Mvar}$ 。换流站出口侧串入的限流电阻阻值为 $500\,\Omega$, 0.25 s 切除该电阻,采用分组分时序的方法投入负载,将负载分为 10 组,每 1 组有功功率为 100 MW ,无功功率为 278 Mvar ,从 7 s 开始,每隔 1 s 投入 1 组无源负载。电压、电流、频率、有功功率和无功功率的变化仿真结果如图 9 ~ 图 20 所示。

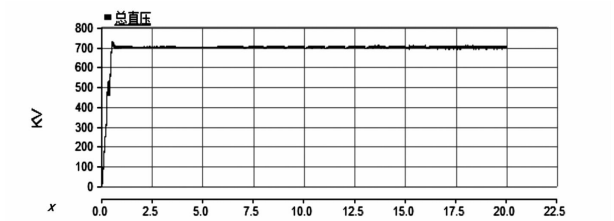


图 9 直流母线电压

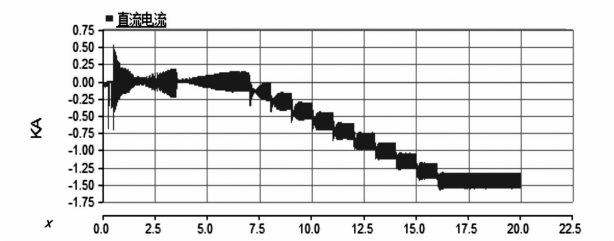


图 10 直流电流

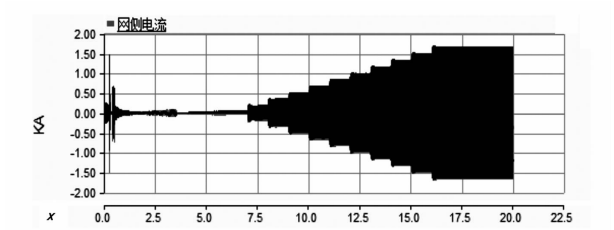


图 11 广西交流侧电流

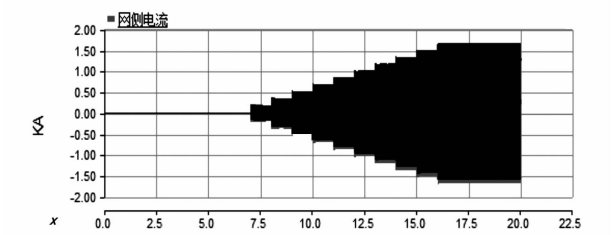


图 12 云南交流侧电流

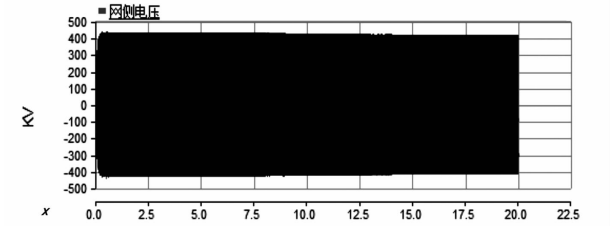


图 13 广西交流侧相电压

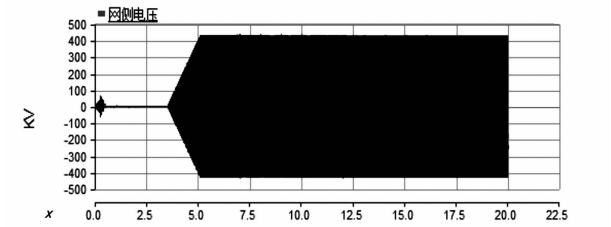


图 14 云南交流侧相电压

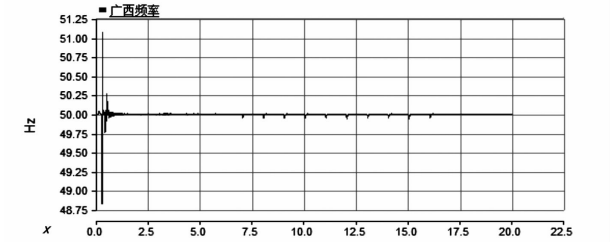


图 15 广西频率

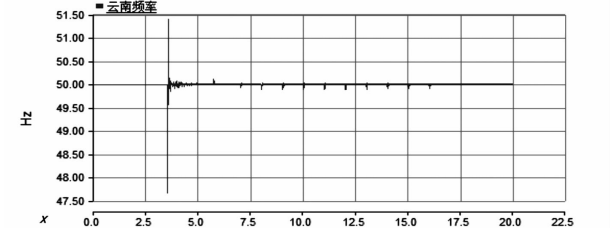


图 16 云南频率

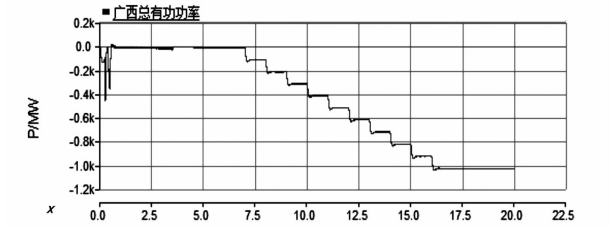


图 17 广西总有功功率

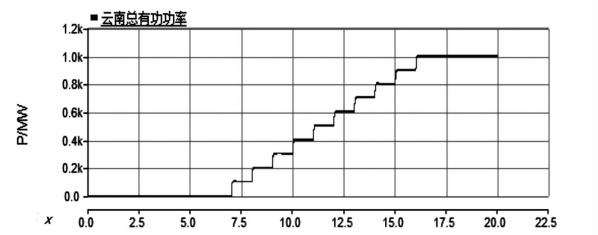


图 18 云南总有功功率

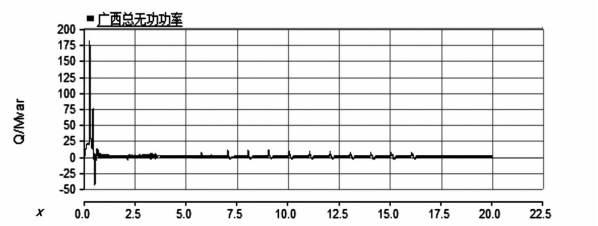


图 19 广西总无功功率

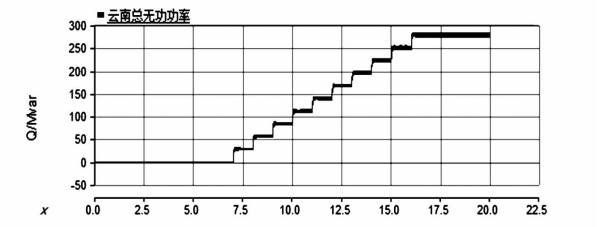


图 20 云南总无功功率

从仿真结果可知,通过典型两阶段启动,广西侧子模块充电至额定值,直流电压也缓慢上升至额定值;同时,云南侧换流站子模块电容与广西侧换流站子模块电容同步充电至额定值。切换至定交流电压控制后,交流电压缓慢上升至额定值,顺利完成换流站的黑启动;并且,采用分组分时序的方法投入负载,有效避免了无源负载投入对交流系统频率和电压造成冲击。

4 结 论

基于南方电网运行方式中的直调系统网架,以溪洛渡直流为例分析传统直流参与交流系统黑启动的技术条件,并选择鲁西背靠背直流为试点研究对象,研究基于 MMC 的新型直流参与交流系统黑启动的启动策略。主要研究结论如下:

- 1)溪洛渡直流参与黑启动时,若其逆变侧投入两组滤波器,受端短路容量需要为单组滤波器容量的 13.7 倍左右;考虑参与黑启动的广州蓄能电厂为水电厂,交流系统最小的转动惯量为 3 136 MW · s;为加快故障后直流功率的恢复,溪洛渡直流系统整流侧应选择定功率控制模式。

(下转第 48 页)

新型三电平拓扑的无功补偿器控制研究

岳 艳,周剑君

(大盛微电科技股份有限公司,河南 许昌 461000)

摘 要:分析了传统二极管箝位型三电平无功补偿器的原理,指出其存在器件耐压水平低、功率等级低的缺点。提出一种新型的 T 型三电平拓扑无功补偿器,通过开关器件的串联提高耐压水平与功率等级。采用电网电压定向的矢量控制策略对有功无功电流进行解耦控制,引入零序电压注入的中点电压控制方案实现正负母线的均压。通过搭建仿真模型验证了所提方案的有效性,实现了无功电流的快速补偿。

关键词:三电平拓扑;无功补偿器;矢量控制;零序电压

Abstract: The principle of traditional diode-clamped three-level reactive power compensator is analyzed, which has the disadvantages of low voltage-withstand level and low power level. A new kind of reactive power compensator based on T-type three-level topology is proposed, which can improve the voltage-withstand level and power rating through the series of switch devices. Grid voltage oriented vector control strategy is adopted for decoupling control of active and reactive current. The neutral-point voltage control scheme which introduces zero sequence voltage injection is used to achieve the voltage-sharing of positive and negative buses. The established simulation model of the reactive power compensator proves the validity of the proposed control strategy, which achieves the fast compensation of reactive current.

Key words: three-level topology; reactive power compensator; vector control; zero sequence voltage

中图分类号:TM761 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)05-0032-04

0 引 言

电力系统配电网的迅速发展带来诸多问题,例如电网电压畸变、三相负载不平衡、谐波含量大等问题。无功补偿器 SVG 是新一代柔性输电装置,可以向电网提供精确、快速的无功补偿,支撑电网电压。国内外多电平 SVG 产品的拓扑结构可分为 3 类:三电平拓扑、飞跨电容多电平拓扑和 H 桥级联拓扑。其中,三电平 H 桥级联拓扑得到广泛应用,飞跨电容拓扑则由于结构复杂应用较少。

目前,三电平拓扑 SVG 主要采用二极管箝位型结构,其特点是依靠二极管对中性点进行箝位,实现三电平的输出,达到改善 PWM 电压正弦度、降低电流谐波的效果。国内对此种拓扑 SVG 的理论研究、产品应用均取得了较多成果。文献[1-2]针对二极管箝位型三电平拓扑 SVG,利用电力电子仿真软件详细研究了有功无功解耦算法、SVPWM 调制算法等,在理论上论证了三电平 SVG 的优越性。文献[3]采用二极管箝位型三电平拓扑,针对 380 V 电网电压,对 SVG 的主回路选型、控制算法等进行详

细设计,并制造出样机对无功补偿效果进行了深入研究。

下面提出一种新型三电平拓扑 SVG,采用了两管 IGBT 串联的 T 型拓扑结构,可提高交流侧耐压等级与功率。在 dq 坐标系下,采用电网电压定向的矢量控制策略,进行电网电压前馈计算,实现有功无功电流的解耦控制。同时,采用 PI 控制器实时计算零序电压对中性点电压进行平衡控制,实现正负母线的均压。

最后,搭建了 690 V 三电平 SVG 的 Matlab 仿真模型,给出主电路、控制系统参数。仿真结果显示,无功电流的响应速度快,输出电流 THD 效果好。

1 三电平 SVG 的电路结构

图 1 中: L 为进线电抗器; u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为电网电压;SVG 输出电压分别为 u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} ;SVG 补偿电流分别为 i_a 、 i_b 、 i_c 。

采用双管 IGBT 串联的 T 型三电平结构,它与二极管箝位三电平结构的差异在于:取消了箝位二极管,将中性点改为 IGBT 开关器件换流,对 IGBT 进

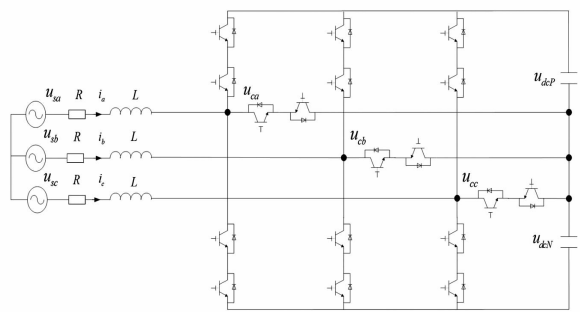


图 1 三电平 SVG 的电路结构图

行控制实时切换;同时,在正负电平中采用两管 IGBT 串联。这种结构的优点是,正负电平环路中每个 IGBT 所承受的正向阻断电压为 1/4 母线电压,提高了器件的耐压能力与交流侧输出电压。

2 三电平 SVG 的控制方案

2.1 SVG 无功电流控制方案

如图 1 所示,三电平 SVG 可等效成三相电压型 PWM 整流器,列出其在三相静坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_{sa} - i_a R - u_{ca} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_{sb} - i_b R - u_{cb} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_{sc} - i_c R - u_{cc} \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行 park 变换,可得其在 dq 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + u_{sd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d + u_{sq} - u_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为 SVG 的交流侧电压分量; u_{sd} 、 u_{sq} 为电网电压分量。

采用电网电压定向的矢量控制策略^[4],即 d 轴定向于电网电压矢量 u_s 的方向上,则 d 轴分量为有功分量,q 轴分量为无功分量。

式(2)可化为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = \omega Li_d + u_{sd} - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = \omega Li_q + u_{sq} - u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中,dq 轴电流的一阶微分方程除受电压分量 u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_d 、 u_q 的影响外,还受电流的交叉耦合项 ωLi_d 、 ωLi_q 的影响。

将式(3)改写为

$$\begin{cases} u_d = -u'_d + \Delta u_d + u_{sd} \\ u_q = -u'_q + \Delta u_q + u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} u'_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u'_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases}, \begin{cases} \Delta u_d = \omega Li_q \\ \Delta u_q = -\omega Li_d \end{cases}$$

根据式(4)可得到 dq 轴电流的一阶微分方程,列出传递函数,设计出电流基波闭环控制方案。 Δu_d 、 Δu_q 是电流交叉耦合的补偿项;电网电压 u_{sd} 、 u_{sq} 可做前馈补偿项; u_d 、 u_q 为基波调制波的 dq 分量。电流外环 d 轴有功指令可通过直流电压闭环控制得到。一般无功电流 q 轴指令的产生方式有多种,可以手动设置 q 轴指令、无功功率闭环产生 q 轴指令、电网电压闭环产生 q 轴指令等。

2.2 中点电压控制方案

由于三电平拓扑采用正负直流母线的特点,正负母线电压 u_{dep} 、 u_{den} 需要进行均压控制。这是因为硬件参数差异、负载波动、算法缺陷等原因会导致 u_{dep} 、 u_{den} 电压的不均衡,即中点电压会发生偏移,并对器件形成损坏隐患。目前,中点电压平衡控制主要有两种方案:一是硬件方案,通过施加中点电压平衡电路实现中点电压的平衡;二是软件算法方案,常见的有平衡因子法、滞环算法、零序电压注入法等^[5]。

考虑到载波脉宽调制(carrier-based pulse width modulation, CBPWM)方案算法结构易于实现,可与 SVPWM 调制等效,于是在 CBPWM 基础上叠加零序电压实现对正负母线的均衡控制效果。以下通过实时采集 u_{dep} 、 u_{den} 、 i_a 、 i_b 、 i_c 变量,采用 PI 调节器计算出零序电压分量注入到基波调制波。

首先,要对中点电压的数学模型、传递函数进行推导计算和理论分析。

假设 SVG 输出的三相基波调制波为 v_{sa} 、 v_{sb} 、 v_{sc} ,输出电流为 i_a 、 i_b 、 i_c 。

$$\begin{cases} v_{sa} = v_m \cos(\alpha) \\ v_{sb} = v_m \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ v_{sc} = v_m \cos(\alpha + 2\pi/3) \end{cases} \begin{cases} i_a = i_m \cos(\alpha - \beta) \\ i_b = i_m \cos(\alpha - 2\pi/3 - \beta) \\ i_c = i_m \cos(\alpha + 2\pi/3 - \beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_m 为三相电压的幅值; i_m 为三相电流的幅值; β 为功率因数角。

对于离散化 CBPWM,通常利用一个载波周期的等效作用效果来计算中点电流。一个 T_r 中,中点电流的公式可写为

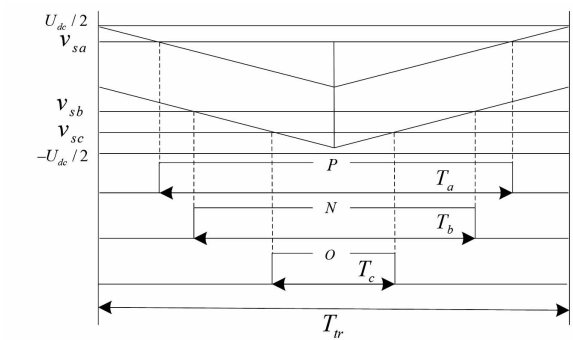


图 2 一个载波周期内电平作用时间

$$i_{z1} = \frac{i_a T_{a0} + i_b T_{b0} + i_c T_{c0}}{T_s}$$
$$= (1 - \frac{|v_{sa}|}{U_{dc}/2}) i_a + (1 - \frac{|v_{sb}|}{U_{dc}/2}) i_b + (1 - \frac{|v_{sc}|}{U_{dc}/2}) i_c$$
 (6)

当注入的零序电压为 v_z 时,则中点电流为

$$i_{z2} = \frac{i_a T'_{a0} + i_b T'_{b0} + i_c T'_{c0}}{T_s} = (1 - \frac{|v_{sa} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_a + (1 - \frac{|v_{sb} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_b + (1 - \frac{|v_{sc} + v_z|}{u_{dc}/2}) i_c$$
 (7)

由于三相星型系统 v_{sa} 、 v_{sb} 、 v_{sc} 与 i_a 、 i_b 、 i_c 之和均为 0,式(8)为

$$\begin{cases} i_{z1} = -\frac{|v_{sa}|}{U_{dc}/2} i_a - \frac{|v_{sb}|}{U_{dc}/2} i_b - \frac{|v_{sc}|}{U_{dc}/2} i_c \\ i_{z2} = i_{z1} - \text{sgn}(v_x) \frac{4v_z i_x}{U_{dc}} \end{cases}$$
 (8)

式中: v_x 为三相调制波中与其他两相符号相反的调制波; i_x 为与 v_x 同相的电流; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

通过式(8)可得中点电流、电压的传递函数框图,如图 3 所示。

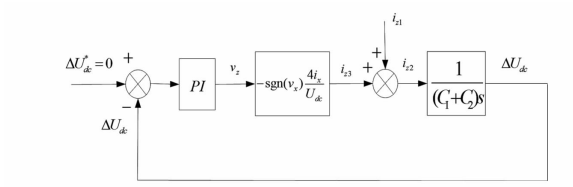


图 3 系统传递函数框图

图 3 中,PI 为所设计的中点电压控制器。结合图 3、公式(8),可得 ΔU_{dc} 、 v_z 的一阶微分公式为

$$v_z = (\frac{U_{dc}}{-\text{sgn}(v_x)4i_x}) (\frac{(C_1 + C_2) d \Delta U_{dc}}{dt} - \frac{i_{z1} U_{dc}}{-\text{sgn}(v_x)4i_x})$$
 (9)

系统的开环传递函数如下:

$$G_z(s) = (\frac{-\text{sgn}(v_x)4i_x}{U_{dc}}) \frac{1}{(C_1 + C_2)s} G_{PI}(s)$$
 (10)

其次要根据系统传递函数,设计合适的 PI 调节器,改善系统的动态、稳态响应效果。

在式(10)中,设:

$$G_{iv}(s) = -\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}} \quad (11)$$

可见, $G_{iv}(s)$ 是一个符号、幅值可变的函数,并且其幅值与功率因数关联。即,当 SVG 运行于容性、感性不同的功率因数时, $-\text{sgn}(v_x) i_x$ 的符号不固定。

因此,设计了一种符号、幅值可动态调节的 PI 调节器,消 $G_{iv}(s)$ 的符号特性,获得稳定的闭环传递函数。

PI 调节器参数如下:

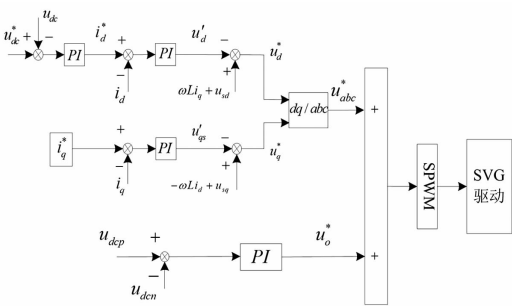
$$\begin{cases} K_p = [-\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}}] k \\ K_i = [-\text{sgn}(v_x) \frac{4i_x}{U_{dc}}] k / \tau \end{cases}$$
 (12)

式中: k 为比例增益; τ 为动态响应时间系数。

通过设计动态参数 PI 调节器,比传统单纯的 P 调节器控制效果平滑,暂态过渡过程缩短,稳态控制精度得到提高。

2.3 整体控制方案

将前面的电流控制、中点电压控制方案综合,可得到 SVG 的整体控制方案,如图 4 所示。



仿真模型。三电平 SVG 的系统参数如下:电网线电压 690 V;频率 50 Hz;进线电抗器 $L=0.8\text{ mH}$;直流母线电容 $C_p=C_n=1\ 200\ \mu\text{F}$;直流电压指令 $U_{dc}^*=1\ 200\text{ V}$;额定电流 $I_e=800\text{ A}$;开关频率 $f_s=2\ 000\text{ Hz}$ 。采用 SPWM 调制。

3.2 仿真结果

采用所提无功电流控制方案,得到无功电流的阶跃响应如图 5 所示。

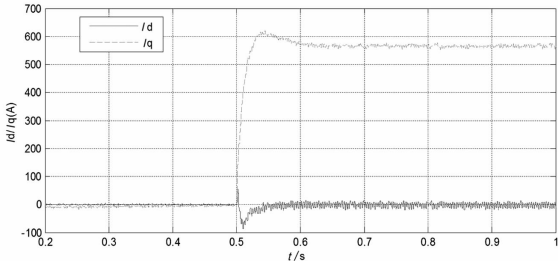


图 5 SVG 的 dq 轴电流响应

图 5 中, $t=0\sim0.5\text{ s}$, 无功电流指令 $I_{q_ref}=0$; $t=0.5\text{ s}$, $I_{q_ref}=565$ 。可见, 无功电流的阶跃响应时间在 20 ms 内, 且稳态后较为平滑; 有功电流最大超调在 50 A 左右, 稳态后保持在 15 A 左右。说明无功电流的响应速度快、收敛性好。

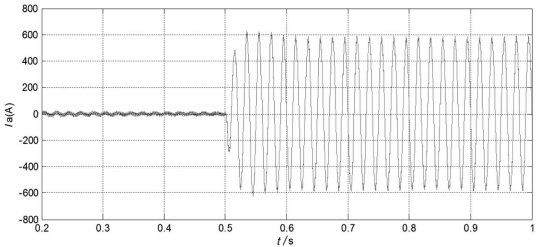


图 6 SVG 输出 a 相电流

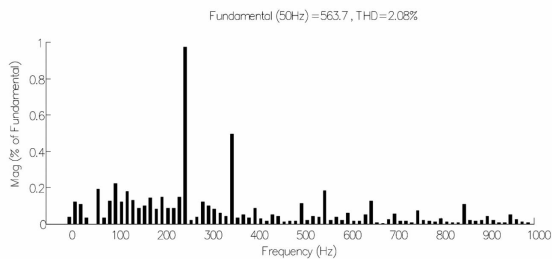


图 7 SVG 输出 a 相电流的 THD

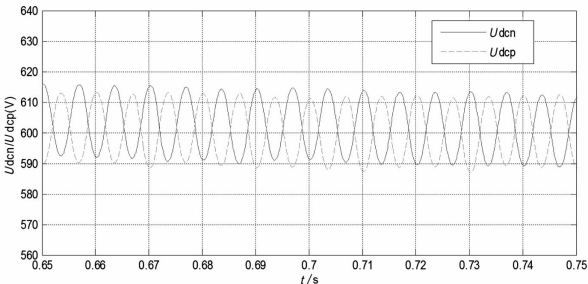


图 8 SVG 的正负母线电压

图 6、图 7 显示, SVG 输出 a 相电流较为平滑, 正弦度较好, 通过 FFT 分析, 得到其 THD = 2.08%。说明控制输出电流的谐波较小。

图 8、图 9 显示, 在发出 565 A 的无功功率后, 正负母线出现 2 倍频波动, 波动峰峰值增大到 45 V 左右, 这是因为无功功率的输出造成了峰值的增大。通过对中点电压的分析, 可见正负母线的中点电压波动在 5% 以内且较为稳定, 满足稳态运行的要求。

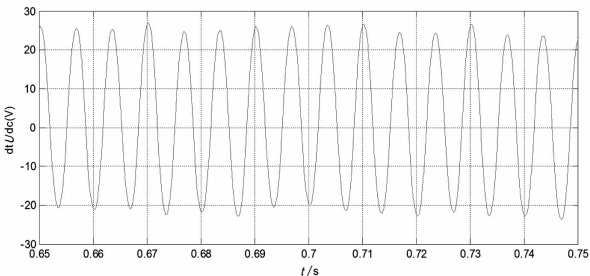


图 9 SVG 正负母线的中点电压

4 结 论

详细分析了 T 型三电平 SVG 的数学模型, 给出了基于电网电压定向的无功电流控制方案; 并针对中点电压波动提出零序电压注入方案, 通过实时采集正负母线电压对中点电压进行控制。最后, 通过 Matlab 模型对无功电流的阶跃响应、正负母线波动进行了仿真分析, 验证了所提控制方案的有效性, 可做为产品设计的指导方案。

参考文献

[1] 张益华, 孙玉坤, 张亮. 一种新型的 NPC 三电平矿用无功补偿器及其解耦控制研究[J]. 电测与仪表, 2015, 51(3): 54-58.

[2] 房立柱, 谢歆. 基于 PSCAD/EMTDC 的三电平电压源型 STATCOM 的仿真研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(22): 147-149.

[3] 王景尊. 基于三电平技术的静止同步无功补偿器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

[4] 郑宏, 陈灵奎, 郭凯. 大容量链式静止同步补偿器的非线性双输出解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 244-248.

[5] 李宁, 王跃, 雷万钧, 等. NPC 三电平变换器中点电压控制方法综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 78-80.

作者简介:

岳 艳(1983), 助理工程师, 研究方向为大功率变流器技术;

周剑君(1975), 工程师, 研究方向为大功率变流器技术。

(收稿日期: 2016-05-11)

基于积分全局滑模控制的双闭环直流调速系统设计

杨代利,刘 霞,苏博妮,鲁仕贵
(四川文理学院计算机学院,四川 达州 635000)

摘 要:针对直流调速系统自身运行参数变化和外界干扰,造成系统性能降低,为了改善系统的跟随能力,采用积分全局滑模控制策略设计直流调速控制系统;为了消除到达阶段和缩短系统响应时间,在切换函数设计中,添加了一个收敛的指数时变因子项;在控制律中,将参考输入和系统误差状态变量纳入其中,使系统能根据外部输入和自身状态快速响应。仿真结果表明,所设计的积分全局滑模控制器对参数摄动和负载转矩干扰具有较强的鲁棒性,且跟随响应快。

关键词:直流调速;积分;全局滑模;时变因子项;鲁棒性

Abstract:According to operating parameter variations and external disturbances of DC speed control system, resulting in reducing the performance of the system, DC speed control system is designed using integral global sliding mode control strategy to improve the following ability of system. In order to eliminate the reaching phase and shorten the response time of system, a convergent exponential time - varying factor is added in the design of switching function. In the control law, the reference input and the system error state variables are included, which enable the system to quickly respond according to the external input and its state. The simulation results show that the designed integral global sliding mode controller has strong robustness for parameter perturbation and torque disturbance and its following response is faster.

Key words:DC speed control; integral; global sliding mode; time - varying factor; robustness

中图分类号:TM351 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2016)05 - 0036 - 04

0 引 言

直流电动机是将电能转换为机械能的设备,直流电动机的调速性能较好,适用于高精度的伺服运动控制,被广泛应用于电力拖动系统和控制系统中^[1]。为了使直流电动机调速系统达到较好的静、动态性能,一般采用转速和电流反馈的双闭环控制方式。其转速控制环常采用积分比例控制;但是,如要求直流调速控制系统具有较快的跟踪能力和无稳态误差,且系统对参数摄动和外部扰动具有较强的抗干扰性,则传统的 PI 控制就很难达到理想效果。因其滑模控制结构简单,对自身运行导致参数摄动的不敏感性,对外界负载转矩干扰的鲁棒性以及响应迅速,而备受关注。且全局滑模消除了到达阶段,使其响应更加迅捷^[2]。文献[3]在双闭环直流调速系统设计中,将改进后的指数趋近率用于滑模控制律中,有效地削弱了系统抖振,提高了系统的跟随能力和对扰动的鲁棒性。文献[4]将积分滑模面应用

到永磁同步电动机控制器设计中。文献[5]设计了一种基于全程滑动模态的控制律,且在控制律中加入变因子项,改善了系统的性能,消除了到达阶段。

然而,滑模控制本身存在的不连续性和开关特性,往往会忽略一些高频部分,进行近似处理以便于建模;但是,正是由于这种忽略的处理,当抖振过大会激发这种高频部分,导致系统往往不能正常运行,所以,消除或减弱滑模控制的颤抖现象,在要求较高的调速系统中,起着非常重要的作用。采用连续化的函数代替继电特性的符号函数并选择适当的参数,可以有效抑制抖动,从而保证系统抖振在合理的范围。

为了改善直流调速系统的转速跟踪能力,在常规切换函数的基础上,将收敛的指数时变因子项引入切换函数中^[7-8];同时,在控制律的设计中,考虑参考输入的作用,且将系统状态误差量添加入切换控制项中,提高了收敛速度。仿真表明,所设计控制器能有效地抑制参数和负载扰动带来的影响,提高了控制系统动态性能,并具有较强的鲁棒性。

1 转速积分全局滑模控制器设计

1.1 直流调速系统数学模型

直流电动机是一个二阶系统,以转速 ω 和电枢电流 i 作为状态变量,电枢电压 u_d 作为控制输入^[6],则系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{k_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: u_d 为直流电动机电枢电压; i 为直流电动机电枢电流; R 为电枢电阻; L 为电枢电感; ω 为转子机械角速度; J 为折算到电机轴上的总转动惯量; k_m 为转矩系数; k_e 为反电动势系数; k_f 为粘滞摩擦; T_L 为折算到电机轴上的总负载转矩。

1.2 直流调速系统的转速误差状态方程

取直流调速系统的误差状态变量为

$$x_1 = \omega_{ref} - \omega \tag{2}$$

式中: ω_{ref} 为转速给定; ω 为实际转速。

将其代入式(1)可得状态方程为

$$\dot{x}_1 = -\frac{k_f}{J}x_1 - \frac{k_m}{J}i + \dot{\omega}_{ref} + \frac{k_f}{J}\omega_{ref} + \frac{T_L}{J} \tag{3}$$

双闭环直流调速控制系统,由电流控制器和转速控制器串联连接而形成的负反馈控制环。电流控制器的输入作用由积分全局滑模转速控制器输出而得,所以令 $u = i$ 。并且假设: $A = \frac{k_f}{J}$; $B = \frac{k_m}{J}$; $C = \frac{k_f}{J}$

$$\omega_{ref}; F = \dot{\omega}_{ref} + \frac{T_L}{J}。$$

整理后,状态方程变为

$$\dot{x}_1 = -Ax_1 - Bu + C + F \tag{4}$$

鉴于参考输入、负载转矩和转动惯量都是变化的,将 F 看成是系统的综合扰动干扰项。

1.3 切换函数的设计

设计积分全局切换函数为

$$s = x_1 + k \int_0^t x_1 dt + \lambda e^{-\alpha t} \tag{5}$$

式中: k 为积分系数,积分项能有效消除系统的静态误差; $\lambda e^{-\alpha t}$ 为指数时变因子项,是全局控制项,选取适当的系数,可以让系统状态初始时刻就处于切换面上,从而消除趋近切换面阶段。

2 控制律的求取和稳定性分析

直流调速系统运行中存在各种干扰因素,考虑系统不确定性,可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & -(A + \Delta A)x_1 - (B + \Delta B)u + (C + \Delta C) \\ & + (F + \Delta F) \end{aligned} \tag{6}$$

式中, ΔA 、 ΔB 、 ΔC 、 ΔF 为系统的不确定项,主要由系统参数 B 、 J 、 k_f 、参考输入 ω_{ref} 和负载转矩 T_L 变化引起。

整理式(6):

$$\dot{x}_1 = -Ax_1 - Bu + C + d \tag{7}$$

式中, $d = -\Delta Ax_1 - \Delta Bu + \Delta C + F + \Delta F$,且 d 有界,即 $|d| \leq D$, D 是一个正整数。

所设计的积分全局切换函数,系统状态一开始就位于其上,则令 $s(x_1(0), t) = 0$ 。

$$\lambda = -x_1(0) \tag{8}$$

系统处在切换面上也有 $\dot{s} = 0$,即

$$\frac{ds}{dt} = \dot{x}_1 + kx_1 - \lambda \alpha e^{-\alpha t} = 0 \tag{9}$$

将状态方程(7)代入式(9)式得

$$\frac{ds}{dt} = -Ax_1 - Bu + C + d + kx_1 - \lambda \alpha e^{-\alpha t} = 0 \tag{10}$$

求解等效控制为

$$u_{eq} = \frac{(k - A)x_1 - \lambda \alpha e^{-\alpha t} + C + d}{B} \tag{11}$$

针对不确定性和外加干扰,确保系统全局鲁棒性,可采用控制率为等效控制加切换控制,即

$$u = u_{es} + u_{ss} \tag{12}$$

式中, $u_{es} = \frac{(k - A)x_1 - \lambda \alpha e^{-\alpha t} + C}{B}。$

切换控制即

$$u_{ss} = \eta |x_1| \operatorname{sgn}(s) \tag{13}$$

切换控制项考虑系统误差状态量,能根据其大小调整切换增益项。直流调速系统启动时,其系统状态量误差较大;这时切换增益也较大,保证了大的控制输入,从而使系统状态快速调节到给定输入。当系统状态变量误差较小时,切换增益项也较小,控制输入就较小,从而避免大的输入引起系统抖动过大。

为了削弱系统颤抖,用连续化的饱和函数 $\operatorname{sat}(s)$ 取代理想滑动模态控制作用中的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 。

$$\operatorname{sat}(s) = \frac{s}{|s| + \varepsilon} \tag{14}$$

式中: ε 是一个小的正因子,通过选择适合的值,可以有效减弱系统抖振。

选择李雅普洛夫函数为 $V = \frac{1}{2}s^2$,对李雅普洛夫函数求导可得

$$\dot{V} = s\dot{s}$$

(15)

为了保证系统满足可达性条件,即使 $\dot{V} < 0$,将式(7)、式(9)和式(13)代入式(15)可得

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s(\dot{x}_1 + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t}) \\ &= s(-Ax_1 - Bu + C + d + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t}) \\ &= s(-B\eta|x_1|\operatorname{sgn}(s) + d) \\ &\leq (D|s| - B\eta|x_1||s|)\end{aligned}$$

(16)

式中, B 、 η 都为 >0 的正数, η 只需满足 $\eta \geq \frac{D}{B}$ 就能使 $\dot{V} < 0$,能保证系统是大范围渐进稳定的。

3 仿真与结论

为了验证所设计的积分全局模滑模转速控制器的可行性,对直流调速系统进行仿真,使用 Matlab/Simulink 软件电气模型库 SimPowerSystems 搭建仿真模型。系统的仿真结构示意图如图 1~图 3 所示。

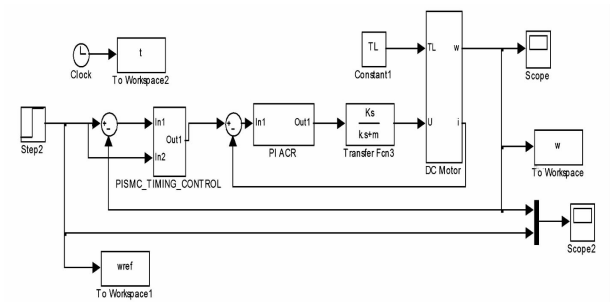


图 1 直流电动机速度控制系统仿真框图

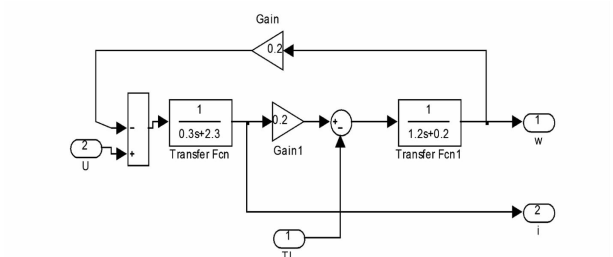


图 2 DC Motor 模型

仿真电动机参数如下: $K_f = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, $L = 0.5 \text{ H}$, $R = 2.0 \Omega$, $J = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $K_m = K_b = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。直流调速系统空载启动时,给定参考转速 ω 为 50 rad/s ,在 $t = 0.3 \text{ s}$,调整为 150 rad/s ,持续 0.3 s 后,转速回落为 50 rad/s 。仿真如图 4 所示。

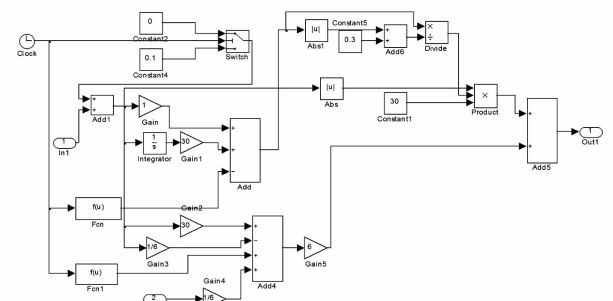


图 3 积分全局滑模控制器

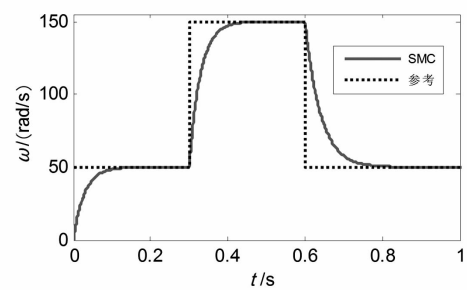


图 4 转速阶跃响应曲线

从图 4 可得,在给定速度变化时,转速响应能准确跟踪给定转速并快速达到稳态;在转速从 50 rad/s 突增到 100 rad/s 又突降到 50 rad/s 的大范围调节时,系统转速也能迅速平稳地调整为给定值,且无稳态误差。由此可见,所设计的积分全局滑模控制器能满足设计要求。

直流调速系统带负载启动时,给定参考转速 $\omega = 200 \text{ rad/s}$,负载转矩为 $T_L = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 且在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时,负载转矩变为 $T_L = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$,并持续时间 0.1 s ,负载干扰取消。如图 5 和图 6 所示。

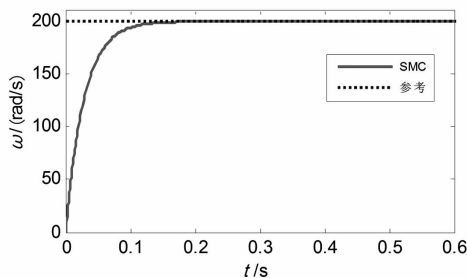


图 5 带载启动以及负载干扰转速响应曲线

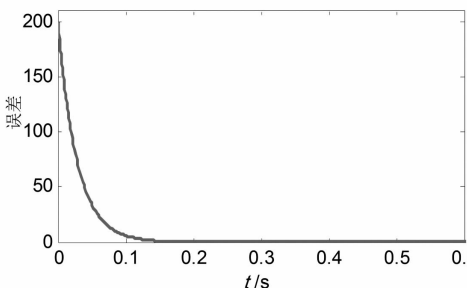


图 6 转速误差曲线

由图 5 和图 6 所示,直流调速系统带负载启动时,系统转速响应能较快跟随给定参考值变化,达到稳态后,系统能够平稳运行,稳态误差为 0;突加负载干扰,转速响应有所下降,但是转速调节速度变化较小,系统转速在合理变化范围,负载干扰撤除后,转速又迅速回到给定参考转速。可见积分全局滑模控制器对负载干扰具有较强的抗干扰能力。

直流调速控制系统给定参考转速 $\omega = 200 \text{ rad/s}$, 由于直流调速系统自身运行导致温度升高或者磁路饱和等情况,考虑直流电机参数变化,即电枢电阻变化 $\Delta R = 0.3$, 绕组电感变化 $\Delta L = 0.2$, 仿真如图 7 和图 8 所示。

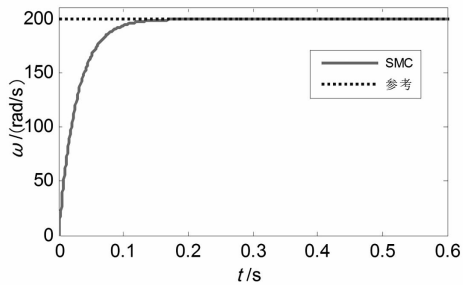


图 7 结构参数变化转速阶跃响应曲线

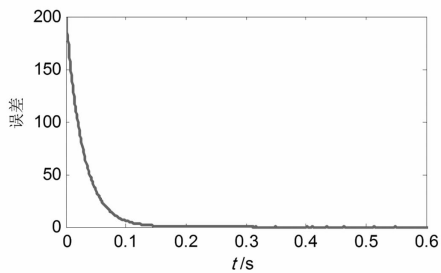


图 8 结构参数变化转速误差曲线

如图 7 所示,直流调速系统由于内部温升或磁路饱和导致结构参数发生变化时,转速响应在也能按照给定输入较快进入稳态运行;由图 8 可知,电动机自身运行导致参数摄动,系统转速响应达到稳态后,其稳态误差几乎为 0。由此可知,所设计的积分全局滑模控制器对电机自运行导致结构参数的变化具有较强的鲁棒性和自适性。

4 结 语

为了改善直流调速系统转速跟随性能,采用积分全局滑模控制理论设计了直流电动机调速系统。在设计切换函数时,添加了指数的时变因子项,确保系统全程的抗干扰能力,消除到达阶段,提高转速响应速度。切换控制项中,考虑误差状态量,根据系统状态误差适时调整切换增益。仿真表明,所设计的积分全局滑模控制器响应迅速,具有较好的静、动态性能和抗干扰能力,达到了预期的设计要求。

参考文献

[1] 李珍国. 交流电机控制基础[M]. 北京: 化学工业出版社,2009.

[2] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社,1995.

[3] 李书舟,容慧. 滑模变结构控制在双闭环调速系统中的应用[J]. 自动化技术与应用,2013,32(12):26-29.

[4] 陈振,耿洁,刘向东. 基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统[J]. 电工技术学报,2011,26(6):56-61.

[5] 张科,周凤歧. 不确定多变量系统的全程滑态变结构控制方案设计[J]. 控制理论与应用,1999,16(2):221-224.

[6] 肖文英,李军红,阳武娇. 基于 MATLAB/SIMULINK 直流电机模糊控制系统的建模与仿真[J]. 家用电器,2006(3):42-43.

[7] 张晓光,赵克,孙力,等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(15):47-52.

[8] 王东旭,王莉,王轩. 动态滑模控制器在感应电动机矢量调速系统中的应用[J]. 微特电机,2010(6):62-64.

作者简介:

杨代利(1985),主要研究领域为物联网工程和滑模控制理论。
(收稿日期:2016-05-05)

欢迎订阅

《四川电力技术》

发电机励磁系统低励限制对进相深度的影响

王 涛^{1,2},黄 睿^{1,2},韩爱民^{1,2}

(1. 四川省电力工业调整试验所,四川 成都 610016;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院电源技术中心,四川 成都 610072)

摘 要:发电机进相试验完成后,根据试验结果需要对励磁系统的低励限制曲线定值进行设置。不同的励磁系统的低励限制曲线设置原理有所不同,导致不同发电机即使进相定值设置相同,而实际运行时进相深度会不同。将讨论 2 种低励限制曲线设置对发电机进相深度的影响。

关键词:发电机;低励磁限制;进相

Abstract:After finishing the leading power factor test of generator, the set points for the low excitation limit curve should be determined according to the test results. But different setting principles cause different leading power factor depth during the actual operation of generators, even if the different generators have the same set points for the leading power factor operation. The influences of two settings for low excitation limit curve on leading power factor depth are discussed.

Key words:generator; low excitation limit; leading power factor operation

中图分类号:TM31 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2016)05-0040-03

0 引 言

随着电力系统超(特)高压、大容量、远距离输电的现代化建设和发展,系统电压过高的问题日益突出,严重影响了电网的安全运行,目前输配电系统降低系统电压常用的方法是改变系统无功负荷进行调压,如采用并联电容器、并联电抗器、串联电抗器、静止补偿器等进行调压^[1];而在电网侧利用发电机进相运行进行无功调节的方法可直接调控系统电压,由于其操作简单、降压效果明显且运行经济,目前在电网调度运行中广为采用。

近年来电网调度机构对并入电网的大中型发电机组都要求进行发电机进相运行试验,以确定机组在实际运行情况下的进相深度。在电厂(站)中,并网发电机在进行完进相试验后,电网调度机构会根据进相试验结果,向电厂(站)下达低励限制定值,电厂(站)根据该定值对励磁系统进行科学化设置。励磁系统低励限制值决定着发电机的进相深度;而由于国内外众多励磁厂家生产的励磁系统中,其低励限制单元的原理和逻辑不尽完全相同,目前针对不同励磁系统的低励限制单元对进相深度的影响这项研究工作开展得较少。下面对两种典型的发电机

励磁系统低励限制环节与实际进相深度的响应进行了研究和对比,得出“不同励磁系统设备低励限制环节的原理程序有所不同,对发电机进相深度具有显著影响”的结论。

1 影响发电机进相深度的因素

1.1 发电机定子电压和厂用电电压

发电机的最低运行电压,应根据稳定运行的要求来确定,发电机定子电压不低于额定值的 90%,厂用电电压不低于额定值的 90%或按机组运行规程执行。

1.2 发电机定子电流

发电机进相运行试验时,其定子电流不得超过额定值。

1.3 定子边段铁心和金属结构件的温度

发电机定子边段铁心温度不得超过 GB/T 7064^[2]、GB/T 7894^[3]中的相关规定。

1.4 系统电压

发电机进相运行时,系统电压不得低于调度给定的运行电压曲线下限值。

1.5 稳定限制

发电机进相试验时不得失去静稳定和动稳定,

并留有一定的裕度^[4]。汽轮发电机功角不大于 70°,水轮发电机静稳定极限功角按照《同步发电机进相试验导则》^[5]中典型曲线,并考虑 15°的裕度。

2 发电机进相试验方法与过程

- 1)发电机与系统并列,带自动励磁调节器,在每种有功功率下做进相试验,从迟相做到进相,直到发电机进相至上述有关限额值之一为止^[6]。
- 2)根据试验结果,提出低励限制整定建议值并进行整定。
- 3)在满负荷下使发电机进相运行,验证发电机调节器低励限制环的静态和动态特性。
- 4)低励限制环节的动态特性检验应在进相无功功率接近整定值时,通过给定电压下阶跃的方法进行检验,对有功功率、无功功率、机端电压、机端电流、转子电压、转子电流等进行录波分析。发电机有功功率不应出现等幅或发散振荡、无功功率波动次数不能大于 5 次^[6]。

3 两台发电机进相试验数据

3.1 两台发电机主要参数

两台发电机的主要参数大致相同,如表 1 所示。

表 1 发电机参数

	A	B
发电机型号	HLA920-LJ-303	SF85-44/9200
额定功率 /MW	80	85
额定功率因数(迟相)	0.85	0.9
额定定子电压 /kV	13.8	13.8
额定定子电流 /A	3 937.6	3 951.3
横轴同步电抗 X_q	0.632	0.681

3.2 两台发电机进相试验结果

A 发电机进相试验结果如表 2 所示。

表 2 A 发电机进相试验结果

有功功率/MW	进相深度/Mvar	限制因素
0	-55	厂用电压低
40	-52	厂用电压低
64	-50	厂用电压低
80	-38	定子过电流

A 发电机在 $P=0$ MW 时,可进相至 $Q=-55$

Mvar 运行,受厂用电电压低的限制;在 $P=40$ MW 时,可进相至 $Q=-52$ Mvar 运行,此时受厂用电电压低的限制;在 $P=64$ MW 时,可进相至 $Q=-50$ Mvar 运行,此时受厂用电电压低的限制;在 $P=80$ MW 时,可进相至 $Q=-38$ Mvar 运行,此时受定子过电流的限制。

B 发电机进相试验结果如表 3 所示。

表 3 B 发电机进相试验结果

有功功率/MW	进相深度/Mvar	限制因素
0	-31	机端电压受限
42.5	-30	机端电压受限
63.75	-28	机端电压受限
85	-16	定子电流受限

B 发电机在 $P=0\% P_n$ 时,可进相至 $Q=-31$ Mvar 运行,受机端电压低的限制;在 $P=50\% P_n$ 时,可进相至 $Q=-30$ Mvar 运行,受机端电压低的限制;在 $P=75\% P_n$ 时,可进相至 $Q=-28$ Mvar 运行,受机端电压低的限制;在 $P=100\% P_n$ 时,可进相至 $Q=-16$ Mvar 运行,受定子电流大的限制。

4 低励限制环的静态及动态特性校验

4.1 A 发电机低励限制环的静态及动态特性校验

A 发电机进相试验完成后,按 $P=0$ MW, $Q=-42$ Mvar; $P=40$ MW, $Q=-40$ Mvar; $P=64$ MW, $Q=-40$ Mvar; $P=0$ MW, $Q=-30$ Mvar 进行整定,并在满负荷下使发电机进相运行,验证发电机励

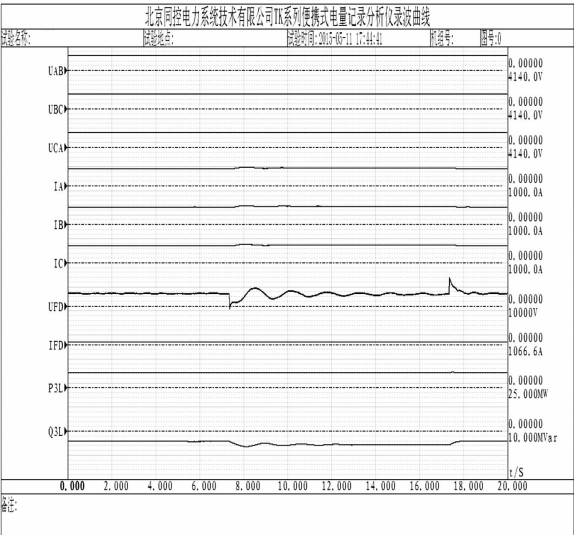


图 1 A 发电机低励限制环动态特性校验录波曲线

磁调节器低励限制环的静态和动态特性。在进相过程中,进相深度达到低励限制曲线时,装置可靠告警,整定值正确,静态特性满足要求。低励限制环节的动态特性检验在进相无功功率接近整定值时,通过给定电压阶跃的方法进行检验,阶跃量为-2%。并用录波仪表对发电机有功功率、无功功率、机端电压、机端电流、转子电压、转子电流等进行录波,录波曲线图如图 1 所示。由图可见,发电机有功功率无等幅或发散振荡,无功功率波动次数不大于 5 次,结果表明此低励限制环节动态特性亦满足要求。

4.2 B 发电机低励限制环的静态及动态特性校验

B 进相试验完成后,按 $P = 0\text{ MW}$, $Q = -27\text{ Mvar}$; $P = 42.5\text{ MW}$, $Q = -27\text{ Mvar}$; $P = 63.75\text{ MW}$, $Q = -25\text{ Mvar}$; $P = 85\text{ MW}$, $Q = -14\text{ Mvar}$ 进行整定,并在满负荷下使发电机进相运行,验证发电机励磁调节器低励限制环的静态和动态特性。由于该发电机励磁系统的固有程序,低励限制定值的实际动作值还受到实际运行工况下的机端电压影响,机端电压越低,低励限制实际动作值越浅,因此当设定 $P = 0\text{ MW}$, $Q = -27\text{ Mvar}$; $P = 42.5\text{ MW}$, $Q = -27\text{ Mvar}$; $P = 63.75\text{ MW}$, $Q = -25\text{ Mvar}$; $P = 85\text{ MW}$, $Q = -14\text{ Mvar}$ 进行整定后,在满负荷进相运行至约 -6.8 Mvar 时,装置告警,静态特性满足要求。低励限制环节的动态特性检验通过给定电压下阶跃的方法进行检验,阶跃量为-2%。并用录波仪表对发电机有功功率、无功功率、机端电压、机端电流、转子电压、转子电流等进行录波。

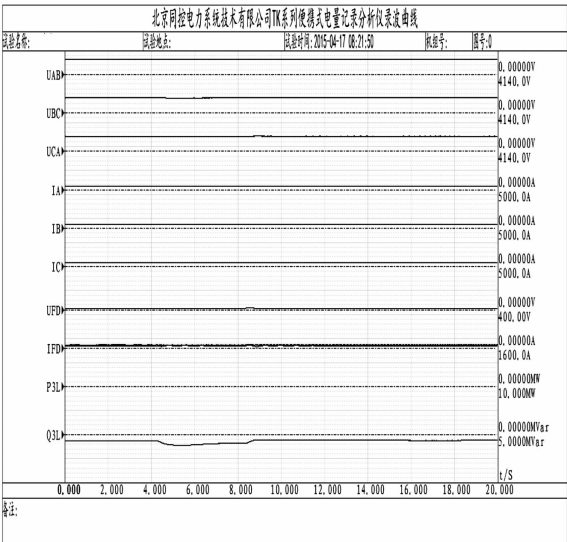


图 2 B 发电机低励限制环动态特性校验录波曲线
录波曲线图如图 2 所示,由图可见,发电机有

功功率无等幅或发散振荡,无功功率波动次数不大于 5 次,结果表明此低励限制环节动态特性亦满足要求。

5 结 论

不同的励磁系统设备,低励限制环节原理程序有所不同,对机组的进相深度具有显著影响。

1) 根据上面两台机低励限制环节动态特性曲线可看出:A 发电机给定电压下阶跃后,励磁电压有明显的突变,突变后经过 4 次振荡衰减趋于稳定;而 B 发电机给定电压下阶跃后,励磁电压没有明显的变化,比较稳定。从而可以看出机端电压突变后,B 发电机的低励限制环节对励磁电压的突变有较好的抑制作用。

2) 在两台机满负荷进相过程中,A 发电机进相深度达到低励限制曲线时,装置告警,低励限制动作;动态特性检验在进相无功功率接近整定值时,通过给定电压阶跃的方法进行检验,动态特性满足要求。而对于 B 发电机,由于该发电机励磁系统的固有程序,低励限制定值的实际动作值还受到实际运行工况下的机端电压影响,机端电压越低,低励限制实际动作值越浅,发电机进相深度未达到低励限制曲线时,装置告警,低励限制动作,这种设置使得发电机在机端电压较低时,就不能进相太深,更加有利于保护发电机和厂用设备的安全运行,更加满足实际运行情况。

参考文献

[1] 王成亮,王宏华. 同步发电机进相研究综述[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):131-135.
[2] GB/T 7064-2008, 隐极同步发电机技术要求[S].
[3] GB/T 7894-2009, 水轮发电机基本技术条件[S].
[4] 严伟,陈俊,沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化,2007,31(2):94-97.
[5] DL/T 1523-2016, 同步发电机进相试验导则[S].
[6] 李建明,朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京:中国电力出版社,2001:523-535.

(收稿日期:2016-04-19)

含多微网接入配电网的联合调度及其运行优化

陈 颖

(四川电力调度控制中心,四川 成都 610041)

摘 要:构建了多微网与电网联合调度优化模式,并针对微网集中控制模式的特点建立双层优化模型。上层目标函数考虑微网的动态出力范围、配电网网损和负荷波动方差,运用 PSO 算法求解上层优化模型。计及微网运行的不确定性随机变量的影响,采用机会约束规划对微网中各微电源运行出力进行第二层优化,并采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群算法求解下层模型。在改进的 IEEE 30 节点算例系统中仿真计算,得到配电网对各微网的日前调度计划和各微网中微电源的能量管控计划。计算结果证明多个微网与电网联合调度优化,可降低可再生能源出力波动对主网的影响,并兼顾微网运行经济性、可靠性。

关键词:多微网;优化模型;配电网;蒙特卡洛模拟;联合调度

Abstract: A joint dispatching optimization model for multiple micro – grids and power grid is constructed, and a new bi – level optimization model is presented aiming at the centralized control of micro – grids. Based on the dynamic output range of micro – grids, the distribution network loss and load fluctuation variance are considered in the upper objective function. Particle swarm optimization (PSO) is applied to solve the upper optimization problem. The reserve constraint of micro – grids is treated as a chance constraint which has considered the effect of uncertain random variables. Monte Carlo simulation particle swarm optimization (MCS – PSO) is applied to solve the lower level problem. A modified IEEE 30 – bus system with 3 micro – grids is employed to calculate the day – ahead dispatching plan of micro – grids and the output plan of micro – grids’ micro power sources. The results demonstrate that the joint dispatching strategy for multiple micro – grids and power grid can smooth the load curve. At the same time, the proposed method improves the utilization rate of renewable energy generation and ensures the economy and reliability of micro – grid operation.

Key words: multiple micro – grids; optimization model; distribution network; Monte Carlo simulation; joint dispatching

中图分类号:TM315 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0043 – 06

0 引 言

微网^[1]若以一定数量接入配电网,势必对配电网的运行产生多方面影响。单个微网能组织自身内部为数众多、形式多样的分布式能源的并网运行,并形成管控协调的自治系统^[2]。基于微网表现为电源特性和负荷特性时均具有不确定性^[3-5],当多个微源配置不同、负荷需求各异的微网接入配电网,如果不对其运行进行合理调度,可能危害电力系统的安全经济运行。故需要研究微网与配电网的功率交互以降低网损,并兼顾电网经济运行。

参照分层分区调度的思想,建立多微网接入配电网的双层优化模型,首先考虑配电网网损和负荷波动建立优化模型^[1];其次,计及不确定性因素,基于微网运行随机变量预测值与及其误差概率分布,

采用机会约束规划(chance constrained programming, CCP)^[4]实现微网经济运行优化,通过微网能量管理单元 MEMS 对所含微源进行管控,使其自身运行达到最优经济效益。

1 多个微网接入配电网的联合调度优化架构

为减小微网对主网的影响,同时提高清洁能源消纳,所提出的多微网与配电网联合调度优化模式如图 1 所示,电网的能量调度机构一体协调常规机组及各微网出力,微网层的运行优化采用集中控制方式^[6],协调自身内部各微源出力。

2 多微网接入配电网的联合调度模型

为最小化微网对配电网的负面影响,根据所述

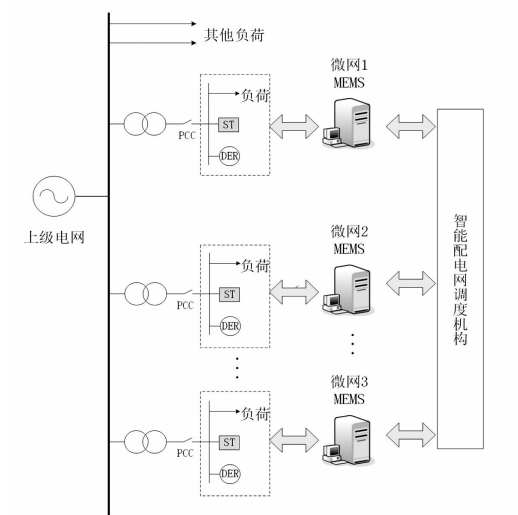


图 1 多微网接入配电网联合调度优化模式

微网与配电网联合调度模式,以系统运行网损最小为目标,并引入负荷曲线波动方差函数^[7],建立联合运行优化模型:

$$f = \min(P_{\text{line}} + \lambda P_g) \tag{1}$$

式中: P_{line} 为系统的网损; P_g 为考虑微网与配电网交互功率后的总负荷方差函数,该方差函数表示负荷波动的惩罚成本,通过优化此方差函数能够降低负荷波动程度; λ 为负荷波动的惩罚参数,单位为 1/MW。

系统网损 P_L 可表示为

$$P_{\text{line}} = \min \int_{t=1}^T \sum_{l=1}^{n_L} R_l \cdot \frac{P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2}{V_{l,t}^2} dt \tag{2}$$

式中: T 为调度周期包含的时段数; n_L 为配电网支路的总数; R_l 为线路 l 的电阻; $P_{l,t}$ 、 $Q_{l,t}$ 、 $V_{l,t}$ 分别为 t 时刻流过线路 l 上的电流的有功功率、无功功率和支路电压。

考虑到积分计算的复杂性,采用离散化方法,将调度周期分解为 24 个时段,并假设在单位时段 $\Delta t = 1$ 内,在上层优化中忽略微网出力随机性及负荷波动,即可将目标函数离散化表示为

$$P_{\text{line}} = \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^{n_L} R_l \cdot \frac{P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2}{V_{l,t}^2} \cdot \Delta t \tag{3}$$

负荷曲线方差函数 P_g 可表示为

$$P_g = \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{Ld},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t}^{\text{MG}} - P_{\text{av}})^2 \tag{4}$$

$$P_{\text{av}} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} P_{\text{d},t} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{Ld},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t}^{\text{MG}}) \tag{5}$$

式中: n 为配电网接入微网的个数; $P_{i,t}^{\text{MG}}$ 为 t 时段第 i 个微网与配电网的交互功率; $P_{\text{Ld},t}$ 为综合考虑了微网接入的系统负荷; $P_{\text{Ld},t}$ 为配电网在 t 时段不加入

微网互动时的总负荷; P_{av} 为负荷曲线调整之前的负荷均值。

把式(3)和式(4)代入式(1),目标函数可表示为

$$f = \min \left[\sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^{n_L} R_l \cdot \frac{P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2}{V_{l,t}^2} \cdot \Delta t + \beta \cdot \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{Ld},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t}^{\text{MG}} - P_{\text{av}})^2 \right] \tag{6}$$

约束条件如下:

1)微网与配电网传输容量约束

考虑含风光储和微型燃气轮机的微网,为提高可再生能源利用率,采用“风光优先”的调度策略,优先使用它们对系统供电。风力、光伏等清洁能源具有随机性、间歇性,故微网出力的范围是一个随时间而波动的可正可负的动态区间。忽略各微源在一个时段 $\Delta t = 1$ 内的出力波动,可表示为

$$\max(P_{i,\min,t}^{\text{MG}}, P_{i,\min}^{\text{line}}) \leq P_{i,t}^{\text{MG}} \leq \min(P_{i,\max,t}^{\text{MG}}, P_{i,\max}^{\text{line}}) \tag{7}$$

$$P_{i,\max,t}^{\text{MG}} = \sum_{j=1}^{N_{ij}^{\text{CG}}} \bar{P}_{ij,t} + E_{i,t}^{\text{PV}} + E_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,\max,t}^{\text{ST}} - E_{i,t}^{\text{L}} \tag{8}$$

$$P_{i,\min,t}^{\text{MG}} = \sum_{j=1}^{N_{ij}^{\text{CG}}} \underline{P}_{ij,t} + E_{i,t}^{\text{PV}} + E_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,\min,t}^{\text{ST}} - E_{i,t}^{\text{L}} \tag{9}$$

式中: $P_{i,t}^{\text{MG}}$ 为微网 t 时段实时出力,基于微网的“源-荷”双重特性, $P_{i,t}^{\text{MG}} > 0$ 表示微网向配电网输送功率,反之 $P_{i,t}^{\text{MG}} < 0$ 表示微网向配电网购买电能; $P_{i,\max,t}^{\text{MG}}$ 、 $P_{i,\min,t}^{\text{MG}}$ 分别为 t 时段第 i 个微网的有功出力上、下限; $P_{i,\max,t}^{\text{line}}$ 、 $P_{i,\min,t}^{\text{line}}$ 分别为第 i 个微网公共连接点 PCC 处容量上、下限; N_{ij}^{CG} 为微网 i 含第 j 类可控 DG 的数量; $E_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $E_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别为 t 时段辐照度预测值、风速预测值所对应的光伏及风机出力预测值期望; $E_{i,t}^{\text{L}}$ 为 t 时段第 i 个微网的内部负荷预测值期望; $\bar{P}_{ij,t}$ 、 $\underline{P}_{ij,t}$ 分别为第 i 个微网的第 j 个微源在 t 时刻的有功出力上、下限; $P_{i,\max,t}^{\text{ST}}$ 、 $P_{i,\min,t}^{\text{ST}}$ 为 t 时段储能装置最大、最小出力,可分别根据 $t - 1$ 时段运行情况动态推导。

$$\bar{P}_{ij,t} = \min \{ P_{ij,t}^{\min}, P_{ij,t-1} + R_{ij}^{\text{up}} \Delta t \} \tag{10}$$

$$\underline{P}_{ij,t} = \min \{ P_{ij,t}^{\max}, P_{ij,t-1} + R_{ij}^{\text{down}} \Delta t \} \tag{11}$$

$$P_{i,\max,t}^{\text{ST}} = [(1 - \delta) \cdot S_{i,t-1}^{\text{ST}} - S_{\text{oc}}^{\min} \cdot S_{i,r}^{\text{ST}}] \cdot S_{i,r}^{\text{ST}} / \eta_{\text{in}} \Delta t \tag{12}$$

$$P_{i,\min,t}^{\text{ST}} = [(1 - \delta) \cdot S_{i,t-1}^{\text{ST}} - S_{\text{oc}}^{\max} \cdot S_{i,r}^{\text{ST}}] \cdot S_{i,r}^{\text{ST}} \cdot \eta_{\text{out}} / \Delta t \tag{13}$$

式中: $P_{ij,t}^{\max}$ 、 $P_{ij,t}^{\min}$ 分别为第 i 个微网中第 j 个微电源在 t 时刻的最大、最小有功出力; R_{ij}^{up} 和 R_{ij}^{down} 分别为微电

源出力的最大上行、下行爬坡率; $S_{i,t}^{\text{ST}}$ 为 t 时刻结束时储能剩余电量; $S_{i,t-1}^{\text{ST}}$ 为 $t-1$ 时刻的储能剩余电量; δ 为蓄电池自放电率; $S_{i,t}^{\text{ST}}$ 为储能额定容量; η_{in} 为充电效率; η_{out} 为放电效率; $S_{\text{oc}}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{oc}}^{\text{min}}$ 分别为最大、最小储能装置剩余电量百分比。

2) 节点电压约束

针对可再生能源接入电网可能引起的电压越限,对微网接入电网的公共节点(PCC)处需引入节点电压约束:

$$V_{\text{imin},t} \leq V_{i,t} \leq V_{\text{imax},t} \quad (14)$$

式中: $V_{\text{imax},t}$ 、 $V_{\text{imin},t}$ 分别为 t 时刻微网 i 所接入节点的电压上、下限; $V_{i,t}$ 为 t 时刻微网 i 接入节点的实际电压。

3 微网经济优化运行模型

通过上层优化确定了电网对微网的调度计划,还需通过下层优化对微网中微电源实施出力管控。假设微网与配电网的能量交互不存在利益博弈,系统中各微网服从电网调度。以微网可控 DG (distributed generation)、储能装置运行维护成本、微网售电收益、购电成本构成的微网综合运行收益 C_i^{MG} 为目标函数:

$$\max C_i^{\text{MG}} = C_i^{\text{g}-} - C_i^{\text{g}+} - C_i^{\text{CG}} - C_i^{\text{ST}} - C_i^{\text{R}} \quad (15)$$

$$C_i^{\text{g}-} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{g}-} P_{i,t}^{\text{MG}-} \quad (16)$$

$$C_i^{\text{g}+} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{g}+} P_{i,t}^{\text{MG}+} \quad (17)$$

$$C_i^{\text{CG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{ij}^{\text{CG}}} (C_j^{\text{fuel}} + C_j^{\text{om}}) \cdot P_{ij,t} \quad (18)$$

$$C_i^{\text{ST}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{ST}}^{\text{om}} (P_t^{\text{ch}} + P_t^{\text{dis}}) + C_t^{\text{dep}} (1 - U_t^{\text{ST}}) U_{t-1}^{\text{ST}} \quad (19)$$

$$C_i^{\text{R}} = c_i^{\text{R}} \cdot R_{i,t}^{\text{g}} \quad (20)$$

$$P_{i,t}^{\text{MG}} = P_{i,t}^{\text{MG}+} + P_{i,t}^{\text{MG}-} \quad (21)$$

式中: $C_i^{\text{g}+}$ 、 $C_i^{\text{g}-}$ 分别为微网 i 购电成本和售电收益; C_i^{CG} 为微网 i 所含可控 DG 运行成本; C_i^{R} 为微网 i 从电网购买备用容量成本; $P_{i,t}^{\text{MG}+}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MG}-}$ 分别为微网购电、售电功率; T 为优化运行周期; N_{ij}^{CG} 为微网 i 含第 j 类可控 DG 的数量; $P_{ij,t}$ 为第 i 个微网中第 j 个微电源的有功出力; C_i^{fuel} 、 C_i^{om} 分别为可控 DG 燃料成本和运行维护成本; $c_t^{\text{g}+}$ 、 $c_t^{\text{g}-}$ 分别为微网购电、售电价

格; $c_{\text{ST}}^{\text{om}}$ 为蓄电池运行维护成本系数; P_t^{ch} 为蓄电池储能 t 时段充电功率; P_t^{dis} 为蓄电池储能 t 时段放电功率; C_t^{dep} 为 t 时段蓄电池储能折旧成本; $R_{i,t}^{\text{g}}$ 为微网 i 在 t 时刻购买的备用容量; c_t^{R} 为 t 时段旋转备用购买价格。

确定性约束如下:

1) 功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{MG}} = \sum_{j=1}^{N_{ij}^{\text{CG}}} P_{ij,t} + E_{i,t}^{\text{PV}} + E_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{ST}} - E_{i,t}^{\text{L}} \quad (22)$$

2) 各微电源的有功出力上下限约束

$$P_{ij,t}^{\text{min}} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,t}^{\text{max}} \quad (23)$$

3) 微电源出力的爬坡率约束

增负荷时,有

$$P_{ij,t} - P_{ij,t-1} \leq R_{ij}^{\text{up}} \quad (24)$$

减负荷时,有

$$P_{ij,t} - P_{ij,t-1} \leq R_{ij}^{\text{down}} \quad (25)$$

4) 储能装置约束

储能装置作为特殊的微电源,其运行相关约束见文献[1],优化需满足文献[1]内的所有约束。由于微网运行中风力、光伏、负荷均存在不确定性,这里采用基于蒙特卡洛模拟的机会约束来描述含不确定性变量的约束条件。机会约束规划(CCP)是随机规划的重要分支,能够应用于应对约束条件内包含不确定性随机变量的情况,且可方便地在测量到随机变量确定值之前得出优化结果。CCP 允许优化结果在极端条件下可不满足约束条件,但该优化结果可使约束条件成立的概率不低于所设定的置信度水平。机会约束规划的形式描述如下:

$$\min \bar{f} \quad (26)$$

$$\text{s. t. } \Pr\{f(x, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \alpha \quad (27)$$

$$\Pr\{g_i(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta \quad (28)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$; x 为优化结果对应的决策向量; ξ 为随机变量对应的随机向量; $f(x, \xi)$ 为目标函数; $g_i(x, \xi)$ 为含随机向量的约束函数; $\Pr\{\cdot\}$ 表示其所含事件成立的概率; α 、 β 为事先设定的、分别对应目标函数和约束条件的置信度; $\bar{f}$ 为目标函数 $f(x, \xi)$ 在置信水平为 β 时所取的最小值。

考虑微网内部“荷-源”均随机的特点,为防止决策过分保守,允许优化结果在一定程度上不满足约束条件,将旋转备用约束描述为一个机会约束:

$$Pr\{ (E_{i,t}^{WT} - P_{i,t}^{WT}) + (E_{i,t}^{PV} - P_{i,t}^{PV}) - (E_{i,t}^L - P_{i,t}^L) \leq R_{i,t}^g + \sum_{j=1}^{NG} \} \geq \beta$$
$$R_{ij,t} = \min \{ R_{ij}^{up} \Delta t, P_{ij,t}^{max} - P_{ij,t} \}$$
$$0 \leq R_{i,t}^g \leq P_{i,max}^{line} - P_{i,t}^{MG}$$

(29)

(30)

(31)

式中,β 为给定的置信度。1 - β 的物理意义可视为微网 i 所能接受的最大失负荷率(loss of load probability, LOLP)^[8]。为了模拟微网实时运行不确定性,在 Matlab 环境下采用蒙特卡洛方法根据风速、辐照度及负荷的预测数据及其各自的概率分布,随机生成满足概率分布的运行数据,即可模拟计算实际运行数据。

4 模型求解

上、下两层模型的整体求解流程如图 2 所示,首先运用基于随机模拟的 PSO 算法求解配电网层的优化调度模型,以形成配电网对微网的最优调度日前计划;随后,将上层结果代入下层模型作为初始条件,再运用基于蒙特卡洛模拟的改进粒子群算法(Monte Carlo simulation based particle swarm optimization,缩写为 MCS - PSO)^[9]求解得出各微网中各微电源运行优化结果。由于下层模型为机会约束规划模型,引入了随机变量,需要采用随机模拟技术,即蒙特卡洛模拟^[10],将问题转化为确定性优化问题并利用 PSO 算法求解。

对于粒子迭代寻优过程中的某一决策向量 x,机会约束模型求解需要如下两步:1) 确定决策向量是否能达到置信度 β;2) 若能满足,则计算决策向量 x 所对应的优化目标值。与确定性规划不同,机会约束规划中包含的随机变量较难处理,需要确定随机优化模型中决策向量是否满足机会约束。所以需要针对 PSO 算法中每一个粒子所对应的一个决策向量 x,采用蒙特卡洛模拟验证机会约束式(27)是否满足。具体方法为:1) 对某一确定时段 t,设初始计数变量 N_m = 0;2) 利用蒙特卡洛模拟基于预测数据随机生成一组微网实时运行的模拟数据(E_{i,t}^{PV}、E_{i,t}^{WT}、E_{i,t}^L),产生一个微网实时运行场景;3) 将上一步生成的模拟数据与决策向量 x 中的决策变量一同代入机会约束式(27)左侧,若 Pr{ · } 内事件成立,则 N_m = N_m + 1;重复上述过程 2) ~ 3) N_M 次;根据大

数定律,当 N_M 足够大,且 N_m/N_M ≥ β 成立时,则视作满足机会约束式(27)。

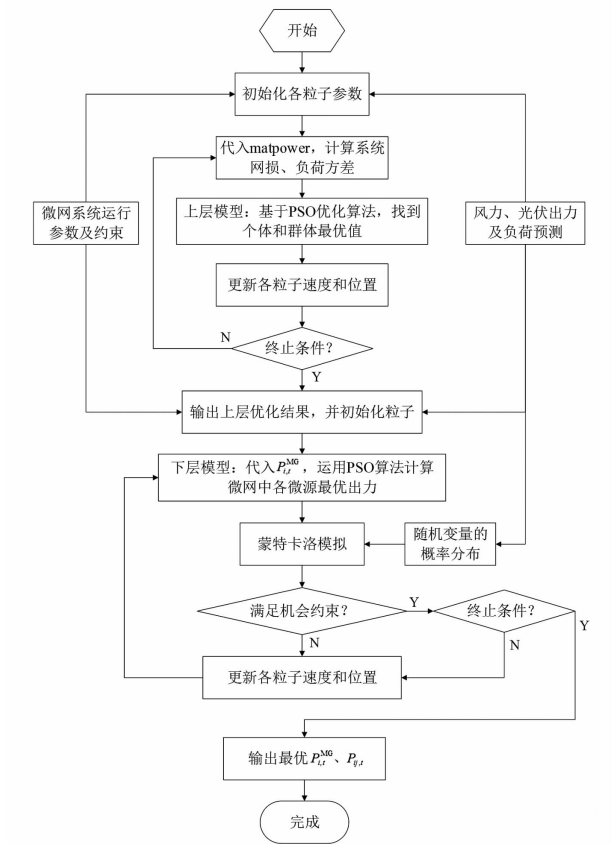


图 2 求解流程

5 算例分析

所提算例仿真采用集中控制模式下的微网简化模型。微网 1、微网 2、微网 3 中储能最大电量分别为 12 MW · h、12 MW · h、11 MW · h,微型燃气轮机额定容量分别为 6 MW、5 MW、7 MW,燃料电池容量均为 7 MW。储能系统初始电量 S_{oc}(0) = 0.1,剩余电量 S_{oc}(t) 变化范围为 [0.1, 0.9]。若已知各微网风、光出力 and 自身负荷预测数据,则可通过计算限定微网 24 h 出力范围,以此设置粒子群寻优的解空间。微网购/售实时电价 c_t^{g+}、c_t^{g-} 采用文献[5]中数据。机会约束优化模型虽已考虑风力发电、光伏发电出力及负荷功率的不确定性,但微网中的可控机组仍存在小概率的强迫停运。所以假设在机组强迫停运等极端条件下,由主网提供紧急备用。

以一个包含 6 机 3 微网的改进 IEEE - 30 节点配电网系统进行仿真,并分别在 10、15、21 号节点接入微网。首先获取接入配电网的微网 1、微网 2 及微网 3 的

1 d 内各时段负荷功率预测值、光伏出力、风力出力预测期望值,详见文献[1]。由于微网规模不同、类型不同,各微网中包含的负荷类别及其占比具有差异性,表现为各微网的总体负荷特性差异较大。

考虑多微网接入配电网,并经过上层优化,该地区全天 24 h 的网损降低了 2.362 MW·h。图 3 所示为配电网对微网 1、微网 2、微网 3 的出力调度计划。其中,若 $P_{i,t}^{MG} > 0$,则微网向电网送电,微网此时等效为虚拟发电厂;若 $P_{i,t}^{MG} < 0$,则电网为微网供电,微网此时等效为虚拟负荷。如图 3 所示,经过多微网与配电网的联合优化,多微网在夜间吸收主网电能整体呈现出负荷特性;多微网在日间电价高峰时段出售电能,分担日间的配电网负荷呈现电源特性。新的系统负荷曲线较未优化和仅进行微网运行优化的系统负荷曲线更加“平滑”,波动更小,实现了负荷的“削峰填谷”。在 00:00 至 06:00 之间,电网向微网输出电能,微网利用自身储能装置吸收系统低谷时段的电能和自身风力发电的富余电能,若加大储能装置和微燃机配置容量,微网将具有更明显的“填谷”能力。

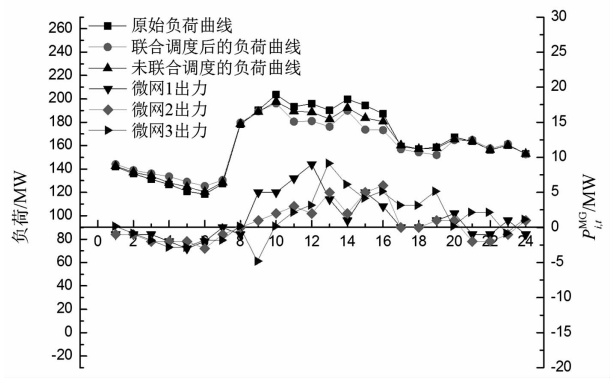


图 3 微网调度计划及系统负荷变化

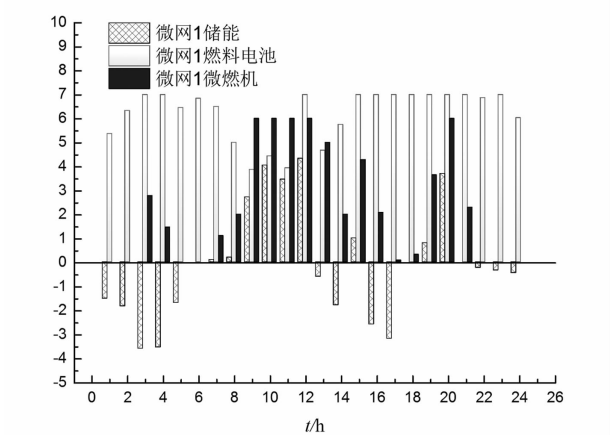


图 4 微网 1 能量管控

图 4 给出在置信度 $\beta = 0.9$ 时微网 1 可控型微电源的出力管控结果。可以看出,通过储能装置的能量转移功能,微网在夜间负荷低谷时段储存大量电能,并在负荷高峰时段释放,实现了能量的“时空互补”。储能装置充分利用了整个优化周期内的峰谷电价差,提高了微网运行经济性。燃料电池由于其较为低廉的发电成本,在整个优化周期内开机运行。微型燃气轮机由于发电运行成本高于燃料电池,则仅在部分电价高峰时段开机运行,且可在其开机的相应时段为微网系统提供旋转备用。

同时,通过对微网运行备用约束置信度不同取值的情况进行计算,可得不同机会约束条件置信度下的配电网内各微网运行收益目标值、微网备用购买方案及其失负荷率 (LOLP)。

表 1 备用容量购买量、目标收益及 LOLP

置信度	微网 1		
	收益目标值/元	备用购买/MW	LOLP
1	5 237.2	25.82	0.001
0.9	6 188.4	14.18	0.099
0.8	6 247.5	9.67	0.198
0.7	6 381.7	5.12	0.298

表 1 以微网 1 为例,展示了微网在不同置信度下的为微网从系统购买备用容量的方案及其收益目标的优化结果值。可以看出,含随机机会约束的优化模型由于考虑了微网运行不确定性随机变量的影响,其旋转备用约束置信度提高会降低微网运行的失负荷率(即提高了微网供电可靠性),但是需要增大微网备用容量的购买。以上仿真结果表明,提高微网的供电可靠性,需要增加购买备用容量的费用,进而增大微网运行成本(或减小微网供电收益),可靠性与经济性两者具有一定矛盾,可能难以同时兼顾。因此,微网的实际能量管控及运行优化,需要根据微网用户对供电可靠性的个性化要求,设置合理的置信度,达到可靠性与经济性的协调。

5 结 语

将微网与电网联合调度优化模式应用于多微网接入配电网运行场景,建立双层优化模型,根据微网的动态出力范围,考虑配电网网损和负荷波动方差建立上层目标函数。为充分发挥微网对内部微源的管控能力,同时计及微网运行的不确定性随机变量

的影响,建立含机会约束的规划模型,采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群算法对微网中各微电源运行出力进行优化。仿真结果显示多个微网与电网联合调度,可充分发挥微网“荷-源”双重特性的调度灵活性,解决可再生能源出力波动性对电网的影响,并兼顾微网运行经济性。同时,算例仿真表明不同备用约束置信度会对优化结果产生影响,实际运行下需权衡微网运行经济性与可靠性。

参考文献

[1] 龚正宇,刘继春,武云霞,等. 含风光储的多微网接入配网的联合调度策略[J]. 可再生能源, 2014, 32(11):1665-1670.

[2] Katiraei F, Iravani R, Hatziaargyriou N, et al. Microgrids Management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.

[3] 丁明,张颖媛,茹美琴,等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.

[4] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术,

(上接第 31 页)

2)在云南电网大停电时,鲁西直流柔性直流单元即可作为黑启动电源实现云南电网黑启动;为避免无源负载投入对交流系统频率和电压造成的冲击,应采用分组分时序的方法投入负载。

所提出的传统和新型直流参与交流系统黑启动的原则,能够为云南电网异步后,溪洛渡直流和鲁西背靠背直流的黑启动试验提供依据。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社, 2010.

[2] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York:McGraw-Hill,1994.

[3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[4] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[5] 廖武诗,姚伟,文劲宇,等. 电力系统恢复后网架重构和负荷恢复的两阶段优化方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(0):1-10.

2009, 33(20): 38-42.

[5] 吴雄,王秀丽,别朝红,等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):1-6.

[6] 丁明,张颖媛,茹美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.

[7] 顾伟,吴志,王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 177-185.

[8] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-9.

[9] Hetzer J, Yu D C, Bhattarai K. An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.

[10] 张伯明,吴文传,郑太一,等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 1-6.

作者简介:

陈 颖(1986),硕士研究生、工程师,从事电网调度运行工作。
(收稿日期:2016-05-08)

[6] 周剑,苏寅生,王新宝. 云广直流在南方电网黑启动及系统恢复过程的作用[J]. 南方电网技术,2010,4(4): 48-51.

[7] 周剑,李建设,苏寅生. 电网黑启动情况下高压直流输电系统启动条件分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):92-96.

[8] 李保宏,刘天琪,许韦华,等. 直流参与受端弱交流系统黑启动的技术条件[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):23-29.

[9] Lindstrom R R. Simulation and Field Tests of the Black Start of a Large Coal-fired Generating Station Utilizing Small Remote Hydro Generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1990,5(1):162-168.

[10] 李探,赵成勇,王朝亮,等. 用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略 [J]. 电力系统自动化, 2013,37(9):117-122.

作者简介:

赵 睿(1986),博士、工程师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;
卢斯煜(1986),博士、工程师,研究方向为电力系统规划、高压直流输电。

(收稿日期:2016-06-22)

四川地区变电站高压电气设备 锈蚀情况及防腐技术研究

朱 军¹,赵兴虹²,吴 驰¹,李巍巍¹,邓元实¹,马小敏¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072;
2. 四川通源电力科技有限公司,四川 成都 610072)

摘 要:变电站高压电气设备的可靠运行关系到输电工程乃至电网的安全稳定,其锈蚀情况及防腐改造直接影响设备本身的运行安全性、可靠性。为了掌握四川地区变电站高压电气设备锈蚀及防腐处理情况,通过对新建及在运行的多个 500 kV 变电站内高压电气设备锈蚀和防腐处理情况进行现场调研,分析了设备常见的腐蚀形式,指出了现场防腐处理的缺陷问题,评估了现有新型防腐技术,并提出了今后防腐改造工作重点。研究表明,变电站多种设备确实存在不同程度、不同类型的锈蚀情况,现场防腐改造并不能有效解决已有的腐蚀,建议今后委托具有专业资质的防腐工程公司采用冷喷防腐技术对变电站进行全覆盖式的防腐改造。

关键词:变电站;电气设备;锈蚀;冷喷防腐

Abstract:The reliable operation of HV electrical equipment in substation is related to the safety and stability of transmission project and power grid. The corrosion and corrosion protection of the electrical equipment directly affect its safe and reliable operation. In order to control the corrosion and corrosion protection of HV electrical equipment in Sichuan area, the corrosion and corrosion protection of HV electrical equipment in the newly – built and being – operated 500 kV substations are investigated. The common corrosion forms of the equipment are analyzed, the defects of field corrosion protection are pointed out, the new anticorrosion technology is evaluated, and the emphasis for the future improvements is put forward. The research shows that there are different degrees and different types of corrosion in substation, and the corrosion protection is not effective in the field. It is suggested that the anticorrosion engineering company with professional qualification in the future can be used to carry out the cold – sprayed anticorrosion for the whole substation.

Key words:substation; electrical equipment; corrosion; cold – sprayed anticorrosion

中图分类号: TG178 文献标志码: B 文章编号: 1003 – 6954(2016)05 – 0049 – 05

0 引 言

输变电工程变电站/换流站作为电网节点,起着变换电压、分配电能的作用,是联结发电厂和电力用户的关键枢纽。站内高压电气设备的可靠运行,直接影响各输电工程乃至电网的安全稳定。由于高压电气设备绝缘等级高、占地大等原因,目前其普遍置于户外。由于设备普遍采用多种金属构件,材料涉及铜材、碳钢、镀锌钢、不锈钢、铝合金等,金属材料的腐蚀失效是较为普遍的现象。四川地区全年多阴雨潮湿天气,且变电站遍及平原、高山、高原及峡谷等多种地形,所处地区全年温差较大、湿度更大,这更加快了站内设备金属构件的锈蚀速度,加剧了设

备锈蚀严重程度。

国内外对变电站/换流站腐蚀问题的研究主要集中在地下接地网^[1-6],已形成了较成熟的地网腐蚀诊断方法、防治措施及安全规范。但是,目前关于站内户外高压电气设备的腐蚀研究相对较少,有关设备锈蚀情况、腐蚀规律、防治措施及维护建议等方面知之甚少。由于四川地区特殊的气候、地理环境特点,新建未投运变电站/换流站内高压电气设备的螺栓等外壳构件在较短时间内就发生锈蚀;投运数年的站内很多设备外壳发生严重锈蚀,甚至是反复锈蚀。

鉴于上述原因,对四川地区新建及在运行的多个 500 kV 变电站内高压电气设备锈蚀和防腐处理情况进行现场调研,分析了设备常见的腐蚀形式,指

出了现场防腐处理的缺陷问题,评估了现有新型防腐技术,并提出了今后防腐改造工作重点,以期找到适合四川地区输变电工程变电站/换流站的防腐方法及措施。

1 500 kV 变电站腐蚀现场调研

为了准确掌握四川地区变电站高压电气设备锈蚀及防腐处理情况,深入成都周边新建、在运的 500 kV 新都、龙王、九江、桃乡变电站进行现场调研,探明了站内 220 kV、500 kV 侧及站用电的高压电气设备锈蚀情况。

1.1 500 kV 龙王变电站

1) 220kV 侧高压电气设备

220 kV 侧母线开关端子箱经现场调研,由于已运行数十年,设备铭牌现已严重锈蚀,无法辨识;箱体底部基座与顶部边角出现反复锈蚀。另外,母线刀闸钢结构部分已严重锈蚀,且存有锈蚀裂解脆弱、断裂的危险;刀闸铭牌严重锈蚀,无法辨识。

2) 站用电侧高压电气设备

35 kV 侧变压器已做防腐处理,但效果不佳,多处位置有反复锈蚀、鼓包、掉漆等现象,且变压器主体与基座之间出现缝隙腐蚀。刀闸操动机构与水泥支柱的连接护壳接触腐蚀严重,水泥支柱上留有锈水痕迹;接地刀闸操作开关端子箱底部发生反复锈蚀,先前防腐处理所用水泥已严重开裂,有腐蚀进一步恶化的趋势。

1.2 500 kV 新都变电站

1) 220 kV 侧高压电气设备

国产 GIS 设备柜体锈蚀相当严重,防爆孔已严重锈蚀,设备外壳多处锈蚀且未做相应的防腐处理;国外西门子 GIS 设备柜体、紧固件等均未锈蚀。

2) 500 kV 侧高压电气设备

变压器已做防腐处理,但现场勘查发现变压器仍有多处发生锈蚀,属缝隙腐蚀,其原因可能为前期防腐处理不彻底或是短期内发生锈蚀;变压器附件螺栓发生锈蚀,且部分螺栓缺失。

1.3 500 kV 九江变电站

1) 220 kV 侧高压电气设备

GIS 设备已做防腐处理,但操作机构柜体有锈蚀,且此情况较为普遍,究其原因可能为前期防腐处理不彻底或是短期内发生锈蚀。

2) 站用电侧高压电气设备

电流互感器紧固螺栓等附件设备发生锈蚀。据现场调研,国外设备螺栓普遍采用热镀锌技术,且采用与柜体相同的防腐漆处理方式,同时在螺栓与柜体接触部位均安装有橡胶垫片,不易发生电化学腐蚀,因此防腐效果较好;国内设备仅做了热镀锌处理,且锌层厚度多未达标,极易发生电化学腐蚀,因此锈蚀较普遍。

1.4 500 kV 桃乡变电站

1) 220 kV 侧高压电气设备

开关端子箱已做防腐处理,且可辨识到明显的喷漆痕迹;但该处理手段较粗犷、简单,仅是对锈蚀处简单打磨和喷漆,效果无法与相关设备生产厂家专业工艺相比。屏柜们边角有锈蚀,据分析为反复锈蚀,且此现象在桃乡变电站中较为普遍。另外, GIS 设备外壳有锈蚀,为反复锈蚀;母线 TV 端子箱门螺栓严重锈蚀,并且基座已发生反复锈蚀;GIS 操作柜、梯子等附件设施的部分位置严重锈蚀,但并不影响 GIS 正常运行。

2) 站用电侧高压电气设备

电容器接地刀闸操动机构已严重锈蚀,为反复锈蚀;由于操动机构高处部分长期处于高压带电状态,所以未做防腐处理,据运维人员介绍,该部分需经常进行倒闸作业,目前分合闸已较为困难,今后可能出现锈蚀断裂情况。66 kV 站用变压器整体防腐处理效果较好,现仅在脱气阀、散热片、发油阀、基座等位置有新增锈蚀点及反复锈蚀情况。电流互感器总体运行情况较好;外部端子箱螺栓等虽做过防腐处理,但仍有反复锈蚀现象。66 kV 侧断路器及支柱绝缘子整体较好;开关柜顶部预先有防雨槽设计,柜体整体情况较好,未出现明显的锈蚀情况;开关柜柜体有明显防腐处理痕迹,未见反复锈蚀;开关柜底部螺栓锈蚀明显,且部分螺栓未安装。

3) 500 kV 侧高压电气设备

桃乡变电站 500 kV 侧变压器整体防腐措施比较到位、效果较好,未出现大面积锈蚀;由于变压器顶部高压部分长期带电运行,无法进行防腐处理,变压器油枕放油阀严重锈蚀;变压器底部放油阀及冷却器端子箱内部出现严重锈蚀情况。另外,支柱表面已做防腐处理,可见明显的喷漆痕迹;支柱接地部分,虽已做防腐处理并可见明显的防锈漆痕迹,但部份位置已部分脱漆,并且脱漆部位均已再次生锈。

2 现场锈蚀及防腐处理缺陷分析

2.1 设备腐蚀分类

针对上述变电站腐蚀现场调研情况,总结出几种变电站金属构件常见的腐蚀形式^[7],并详述其腐蚀机理和解决措施。

1) 缝隙腐蚀

缝隙腐蚀是由于金属表面存有异物或构件结构上形成缝隙,当有雨水积存时发生的电化学局部腐蚀,最易发生在螺栓等连接部位。其腐蚀过程可分为初期和后期 2 个阶段。初期,由于缝隙与雨水的接触,所形成的电解液会在缝内、缝外同时发生阳极金属溶解和阴极氧还原的电化学反应。经过一段时间后,缝隙内溶液中的氧会消耗殆尽,缝隙内外变会形成典型的氧浓差腐蚀电池,进而会引发缝隙腐蚀闭塞电池的自催化过程。该催化作用会大幅提前设备腐蚀时间,且极易发展为严重的局部腐蚀,使构件有效尺寸和截面积减小,力学强度降低,产生安全风险。

由于缝隙腐蚀多为螺栓等连接部位,因此上述各 500 kV 变电站均有此类腐蚀,且发生腐蚀部位种类、数量较多,基本涵盖已发现有锈蚀的全部设备。

对于此类腐蚀,在设备安装过程中应特别注意螺栓等紧固件的连接,确保安装到位,无明显缝隙。如无法避免缝隙,则应以环氧树脂填料或防腐漆将缝隙完全填满。

2) 接触腐蚀

接触腐蚀,又称电偶腐蚀或异种金属腐蚀,是当 2 种不同材质金属相接触时,由于金属电极电位不同,在电解液中形成腐蚀电池。电位较低的金属腐蚀被加速,电位较高的金属受电化学保护,其腐蚀速率较慢。接触腐蚀主要发生在不同金属直接接触部位,而远离接触的部位其腐蚀程度较轻。实际证明,当不同金属接触且存有缝隙时,构件将受到接触腐蚀与缝隙腐蚀的联合作用,会加重腐蚀程度。变电站常用的金属材料主要有碳钢、不锈钢、锌、铜、铝、锡、银等,其中电位最低的金属是锌和碳钢,这 2 种金属与其他金属接触时,将首先被腐蚀。

在所调研的变电站中,大部分设备支柱、开关柜等的螺栓、螺杆部分采用镀锌钢,螺母采用不锈钢。不锈钢的电位最高,受到保护,而与之接触的镀锌钢

则会加快腐蚀速度。在新建未投运变电站(如九江变电站)中,现已发现多处螺栓、螺杆遭锈蚀,甚至是经防腐改造的龙王变电站,所更换的螺栓、螺杆在较短时间内也发生不同程度的腐蚀。

解决接触腐蚀问题的根本办法是使接触的金属构件采用同种材料,特别是变电站常用的镀锌钢螺栓及垫片、不锈钢螺栓及垫片等构件,应统一采用同种金属材料。若无法避免异种金属接触,应用环氧填料、聚四氟乙烯等封闭材料作为中间层缓冲和绝缘,防止 2 种金属直接接触。

3) 镀锌层缺陷腐蚀

变电站大部分碳钢构件均采用热镀锌防腐。由于镀锌层厚度不够,镀层瑕疵,以及运输、安装过程中造成的局部镀锌层破坏,都会使设备最外层原本起电化学保护的镀锌层过早失效,露出下面的铁基体而加速腐蚀。腐蚀将会降低材料力学强度,从而产生安全隐患。

在所调研的变电站中,高压设备如 GIS、高压电抗器等均发现有镀锌层缺陷腐蚀情况。遭破坏部位铁基体均已裸露并发生局部腐蚀。虽已做过相应防腐处理,但并未覆盖全部受损部位,且防腐处理工艺也不到位。

对于杜绝此类腐蚀问题,应从源头入手,在基建阶段加强金属质量监督,防止不合格的镀锌层产品流入电网。对运输、安装过程中造成的局部镀锌层破损,应及时用富锌涂料、冷镀锌涂料等进行修补。

4) 涂层缺陷腐蚀

对于变电站中尺寸较大以及难于进行热镀锌的构件通常采用表面喷砂处理后喷涂防腐涂料的方法来代替,如变压器、设备构架以及后期防腐改造。

涂料防腐主要是依靠武力屏蔽作用隔绝外部腐蚀介质与铁基体的接触,保护效果并不如镀锌层。若防腐涂料局部再次破损,将加快铁腐蚀的速度,并以缺陷为中心扩展。在所调研的变电站中,某些做过防腐改造的设备已发现喷涂涂料部位反复锈蚀情况;尤其是运行数十年的龙王变电站,此类涂层缺陷腐蚀现象更为严重。

对喷漆新设备的运输安装过程中造成的破损,应及时用防腐涂料进行修复;对涂层厚度、附着力等关键指标要进行质量验收。

5) 不锈钢腐蚀

由于不锈钢铁基体中含铬(Cr),在外表面很容

易生成一层薄而致密的钝化保护膜,使腐蚀难以发生。但在某些特殊部位(如螺栓和箱体门轴处),仍有可能发生表面不锈钢腐蚀。其实质上是一种缝隙腐蚀,钝化膜腐蚀产物逐渐填充在缝隙内,虽然未产生铁锈,但会影响构件运转。

在产品选购中,Cr 含量低的不锈钢材质构件往往无法形成表面钝化保护膜,不仅无法起到对不锈钢基体的保护作用,而且钝化膜腐蚀产物也会影响构件运转。因此:一是尽量选用 300 系列不锈钢牌号,并严格检查材质质量;二是应从设计上加大缝隙部位的宽度,减弱缝隙腐蚀的发生。

2.2 现场防腐缺陷分析

2.2.1 国内外设备防腐技术对比

在新建未投运的 500 kV 新都、九江变电站和已投运的 500 kV 桃乡、龙王变电站中,国外设备配件防腐年限均大大高于国内设备,如开关柜体、箱体、螺栓、铆钉等,其主要原因与材料材质、防腐工艺以及防腐材料不同有关。

1) 设备铭牌防腐

国外设备铭牌基本采用不锈钢,且抛光处理很好;国产设备铭牌通常采用铸铁或碳钢,且表面处理较为粗糙。如龙王变电站 1997 年的进口设备 SF₆ 断路器铭牌完全未腐蚀,铭牌各种参数清晰可见;而 1997 年沈阳高压开关厂的开关控制柜铭牌已锈迹斑斑,设备参数无法识别。

2) 设备配件防腐

国内外防腐工艺不同也是导致防腐能力差距大的主要原因之一。防腐过程均是先对基体进行打磨、喷砂或酸洗,再进行防腐材料的涂喷。但不同的是防腐材料涂抹的顺序不同,国外设备是先涂抹防腐漆,再涂抹防腐功能微弱的底漆;国内设备恰好相反,甚至有些厂家为了节约成本,并未对基体进行喷砂酸洗,而直接涂抹一层质量劣质的防腐漆,导致其附着性降低。经防腐调查发现同在 500 kV 新都变电站,西门子的 GIS 设备柜体、紧固件等均未见锈蚀,而新东北电气集团高压开关有限公司的 GIS 设备柜体锈蚀十分严重,几乎所有的防暴孔都已腐蚀。

此外,国外设备紧固件的防腐也要比国内的做得好。在 500 kV 龙王站、500 kV 新都站以及 500 kV 九江站,现场调研发现国外设备的螺丝不仅采用热镀锌,还会与柜体一样进行相同的防腐漆处理,并且在螺栓与柜体接触部位安放橡胶垫片,防止因电

位差发生电化学腐蚀。国内设备的紧固件均为外购件,虽采用热镀锌的螺丝,但锌层厚度估计无法达标,且螺栓通常与箱体直接接触,导致电化学腐蚀,很短时间就已锈蚀严重。

2.2.2 变电站防腐大修现状分析

目前,变电站设备几乎都是室外放置,日晒雨淋,为降低成本多数采用国产设备,在防腐处理上做得不到位,因此设备防腐能力差,防腐寿命短,锈蚀程度相当严重。为提高设备使用年限,因此需对变电站各种已锈蚀的设备进行防腐大修。

1) 大修防腐工艺不规范:据现场运维人员描述,处理过程相对简单,首先是对锈蚀设备或配件进行打磨,然后涂抹一层底漆,最后再涂抹一层防腐漆。

2) 大修后防腐效果差:在调查龙王变电站时,发现刚进行防腐大修 1 年后的 35 kV 并联电抗器某些部位又开始锈蚀,且防锈漆出现起皮现象。据了解,打磨过程中并未对无法打磨的部位进行处理,比如电抗器的散热片。

3) 现场运维人员对防腐的认知程度低:目前变电站工作人员对防腐的认知仅停留于外观美观层次,有待进一步提高。据悉,1 年前龙王变电站 35 kV 并联电抗器大修后外观符合要求,施工方是否对细微部分处理尚不知晓,就予以验收。

2.2.3 新投入设备的腐蚀及防腐情况

在新建未投运的新都变电站和九江变电站中,均发现很多新设备已严重腐蚀,尤其是 220 kV GIS 设备柜体和踏板、站用电侧的控制刀闸和热镀锌螺丝等。这些锈蚀严重的部件均为外购件,因供应商节约成本,质量没有严格控制,外购件材质及防腐处理上都无法长时间防锈蚀。同时,在设备运输过程中,由于碰撞或安装过程方式不当,导致这些部件尤其是边缘部分防腐材料脱落,从而出现大面积锈蚀现象。

对于新投入设备的腐蚀问题,工作人员一经发现便立即通知供应商采取补救措施,但经调查发现补救后的设备及配件仍有锈蚀部位,且多为无法打磨的地方,同时基体采用的防腐材料质量差、防腐处理工艺不到位,导致防腐材料的附着性下降,降低了其防腐能力。

3 防腐建议

3.1 新型防腐技术

冷喷锌/铝防腐技术所用材料主要由无机硅氧烷树脂及高纯度进口片锌/铝组成的长效双重作用的新型钢结构重防腐材料,是替代热镀锌/铝的最新产品。其具有优越的抗腐蚀、抗冲能性能,不含异氰酸酯、苯类等毒性化学品,安全环保,并具有耐辐射、抗紫外线能力强等主要特性。该技术施工简便,可喷涂、刷涂、滚涂,是替代传统热浸铝、热镀锌、热喷铝的最佳材料,适用于船舶、钢桥、钢屋架、钢网架、电力设施、管道、贮罐等重防腐领域。

冷喷锌/铝工艺与热镀工艺性能比较如下。

1) 热镀工艺预处理采用酸洗、磷化工艺,工件表面会有酸、碱液的残余物,留下了腐蚀的隐患,且表面光滑,热镀锌层容易产生脱落;喷锌、喷铝工艺预处理采用喷砂工艺,表面处理达 GB 8923-88《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》的 Sa2.5 级,工件表面具有一定粗糙度,涂层结合力较好,抗拉强度 $\geq 0.6 \text{ kg/m}^2$ 。

2) 热镀工艺在一定的温度下施工,约 440°C 左右,故工件热镀后会产生变形;而喷锌、喷铝工艺喷涂时的温度很低,因此工件不变形。

3) 采用热镀工艺,工件受镀槽长、宽、高的限制;而采用喷锌、喷铝工艺则对工件没有限制。

4) 采用热镀工艺还存在现场修补问题。对现场安装时产生的焊缝以及装卸、运输过程中造成的损坏,修补只能采用油漆,从而产生工艺突破口。如采用喷锌、喷铝工艺进行修补,可避免产生工艺突破口。

5) 热镀锌工艺对水质污染十分严重,环保问题非常突出。

基于以上对比分析结果可见,对于四川重雾霾、高湿度等地区的变电站,建议防腐改造采用冷喷锌/铝工艺。经文献收集以及咨询专业防腐工程公司,对变电站冷喷锌/铝防腐改造工程有如下了解。

1) 施工方案:对于某需要防腐改造的变电站,要进行实地勘察,确定站内设备锈蚀分布情况,如重点锈蚀设备类型、锈蚀点数量和位置等;依据实地调研情况及需求方要求,编制合适的施工方案,避免浪费。

2) 施工工艺:原本应依据设备重要性、锈蚀情况等,确定施工工艺;但具体施工工艺,如刷漆次数、材料材质等与工程预算、设备防腐等级要求有一定关系。

3) 工程造价:据专业防腐工程公司介绍,目前

四川境内,某 110 kV 变电站采用冷喷漆技术对全站设备进行全覆盖式的防腐改造,工程总造价约为 25 万元。

鉴于冷喷防腐技术存在诸多问题,如施工工艺专业要求较高、防腐效果和有效期与施工工艺好坏密切相关、施工工序复杂且众多等,变电站采用冷喷锌/铝技术进行防腐改造时,建议委托具有高水平专业资质的防腐工程公司。

3.2 今后防腐改造工作重点

1) 目前,防腐大修效果较差,现场人员对防腐的认知程度并不高,且现场防腐处理没有相应的标准工艺要求,改造后设备的防腐能力无法鉴定,并且不能清楚地确定防腐改造操作是否到位、得当。因此,急需制定现场防腐标准工艺卡,严格要求、规范防腐改造各项作业。

2) 加强对设备制造厂的监造,对重要部件或易锈蚀部位进行重点抽查,如低电压等级刀闸操动机构、连接部位螺丝垫片等。

3) 加强设备包装、运输及安装过程的监管。包装方式不合理、运输过程中操作不当,均可能会致使设备防腐层的脱落;安装过程处理方式不当,同样会损坏设备防腐层。

4) 建立有效的地市公司监督体系,严格落实金属技术监督标准。

4 结 论

基于四川地区变电站高压电气设备锈蚀情况及防腐技术研究,得出如下结论:

1) 在所调研的变电站中,无论是已投运数十年的,还是新建尚未投运的,其户外高压电气设备均发现有锈蚀情况,且主要集中在站用电侧、110 kV 及 220 kV 侧变压器、接地刀闸、GIS 等。

2) 变电站常见腐蚀包括:缝隙腐蚀、接触腐蚀、镀锌层缺陷腐蚀、涂层缺陷腐蚀及不锈钢腐蚀。多数情况,对于某一处腐蚀,并非仅存在单一的腐蚀形式,往往是多种腐蚀联合作用。因此,对于变电站防腐改造,应对站内设备腐蚀情况进行广泛详细地调研,选取适用的、针对性强的防腐措施,以达到较好的防腐效果。

3) 冷喷锌/铝防腐技术现已在民航、石油等行

(下转第 89 页)

750 kV 乌北变电站有 2 台主变压器,其 750 kV 出线有 5 回,分别至 750 kV 凤凰、达坂城及五彩湾变电站;220 kV 出线 8 回,分别至 220 kV 龙岗、博格达、化工园、神华及米泉变电站。所研究的系统运行方式采用 2014 年目标网架数据包(设备参数、输电线路参数以 2014 年目标网架为准,以下简称 2014 年方式),该方式下,乌北变电站 750 kV 和 220 kV 侧单相短路电流分别为 19.5 kA 和 54.6 kA,乌北变电站附近 750 kV 和 220 kV 输电系统的潮流及接线图如图 1 所示。

1.2 主变压器参数

750 kV 乌北变电站主变压器参数如表 1 所示。

表 1 750 kV 乌北变电站主变压器主要参数

参数	额定值
额定容量/MVA	1 500/1 500/450
额定电压/kV	765/ 3 :230/ 3 :63
调节范围/%	230/ 3 ±2 ×2.5%
$U_{K1-2}/\%$	19.0
$U_{K1-3}/\%$	43.0
$U_{K2-3}/\%$	23.0

乌北变电站 750 kV 主变压器高、中压公共中性点采用 66 kV 电压等级绝缘水平耐压水平如下:

- 1)1 min 工频耐压:140 kV(有效值)
- 2)雷电冲击全波耐受电压:325 kV(峰值)

1.3 主变压器中性点电抗器参数

目前,750 kV 乌北变电站 220 kV 断路器额定开断容量为 50 kA,根据限制短路电流的系统仿真研究结果,乌北变电站 750 kV 变压器中性点加装电抗器的阻值为 12 Ω 时,220 kV 断路器最大短路电流(单相短路情况下短路电流)不超过 50 kA,其关键技术参数初步按如下选取:

- 1)绝缘水平(66 kV 电压等级)
1 min 工频耐压:140 kV(有效值)
雷电冲击全波耐受电压:325 kV(峰值)
- 2)短时热稳定电流 6 kA(10 s)

2 非对称故障下变压器中性点工频电压及电流

对各种非对称故障的计算分析表明,变电站母线或出线侧发生单相或两相接地故障时,变压器中性点电抗器的工频电压最高。表 2 分别给出了 2014 年方

式下,发生非对称短路故障时,750 kV 乌北主变压器中性点电抗器的工频电压及电流的计算结果。

表 2 750 kV 主变压器中性点电抗器工频过电压及电流

故障位置	故障形式	电抗阻值 /Ω	电抗器电压 /kV (有效值)	电抗器电流 /kA (有效值)
220 kV 母线或出线侧	单相接地	12	51.3	4.3
	两相接地		46.2	3.8
750kV 母线或出线侧	单相接地		12.7	1.1
	两相接地		12.0	1.0

由表 2 的计算结果可知,乌北变电站 750 kV 主变压器中性点加装 12 Ω 电抗器后,主变压器中性点的最大工频电压为 51.3 kV,通过电抗器的最大工频电流为 4.3 kA。

需要说明的是,变压器中性点加装电抗器后,对 750 kV 和 220 kV 系统的工频过电压影响极小,工频过电压都比较低。主要原因是:1)乌北变电站有 5 回 750 kV 出线和 8 回 220 kV 出线,系统联系强,短路容量大;2)每回线的线路长度较短,其中 750 kV 线路最长为 160 km,220 kV 线路最长为 27 km。

3 变压器中性点操作过电压和暂态电流

3.1 接地故障

在 2014 年方式下,计算了接地故障情况下乌北变压器中性点电抗器上的操作过电压、最大暂态电流和中性点避雷器的能耗,计算结果列于表 3。图 3 给出了变压器中性点最大电流的波形。

表 3 乌北变电站变压器中性点操作过电压

故障位置	故障类型	电抗器电压 /kV(峰值)	电抗器电流 /kA(峰值)	中性点避雷器 能耗/kJ
750 kV 母线	单相接地	42.3	2.7	<1
	两相接地	43.1	3.7	<1
220 kV 母线	单相接地	133.5	11.1	<1
	两相接地	133.4	15.7	<1

由表 3 可以看出:乌北变电站 750 kV 变压器中性点电抗器上的最大操作过电压为 133.5 kV,最大暂态电流为 15.7 kA,出现在 220 kV 母线发生两相接地故障的暂态过程中。这时,变压器中性点避雷器的能耗都小于 1 kJ。

3.2 合闸操作

表 4 给出了 2014 年方式下,乌北变电站合空载变压器、空载线路断路器合闸、单相重合闸操作情况下,变压器中性点电抗器的操作过电压情况。

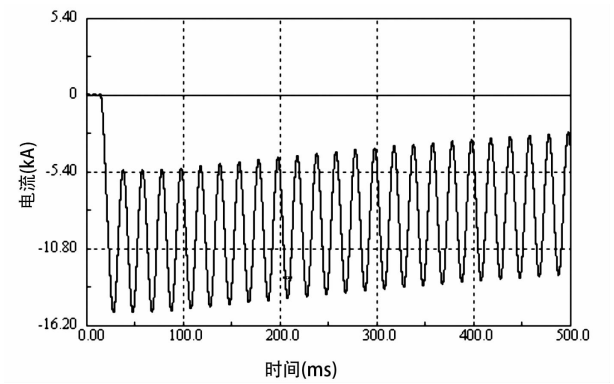


图 2 乌北变电站 220 kV 母线发生
两相接地故障变压器中性点最大电流波形

表 4 各种合闸方式下,乌北变电站中性点操作过电压

操作方式	操作侧	电抗器电压 /kV(峰值)	电抗器电流 /kA(峰值)	中性点避雷器 能耗/kJ
合空载 变压器	750 kV	110.6	2.7	<1
	220 kV	101.1	4.6	<1
合空 载线路	750 kV	7.8	0.1	<1
	220 kV	31.8	0.1	<1
线路 单相 重合闸	750 kV	3.9	<0.1	<1
	220 kV	24.5	0.1	<1

结果表明,乌北变电站合空载变压器操作时,变压器中性点最大操作过电压为 110.6 kV,电抗器的最大电流为 4.6 kA;线路合闸和重合闸操作时,变压器中性点最大操作过电压为 31.8 kV,电抗器的最大电流为 0.1 kA。可以看出合闸操作时变压器中性点电抗器上的过电压比发生不对称短路故障时的过电压要低一些。

上述变电站中性点加装电抗器后,对 750 kV 和 220 kV 系统的合闸及单相重合闸操作过电压影响也极小。此外 750 kV 侧断路器合闸电阻也对过电压有抑制作用。研究时即使考虑变压器和线路在检修方式,变压器中性点加装电抗器前后,750 kV 线路合闸及单相重合闸操作,母线侧和线路侧最大统计操作过电压都不超过 1.24 p. u. ;220 kV 线路合闸及单相重合闸操作时,母线侧和线路侧最大统计操作过电压都不超过 1.88 p. u. ,与操作过电压要求值(750kV 系统为 1.8p. u. ;220kV 系统为 3.0 p. u.)相比还有较大的裕度。

4 结 论

通过仿真结果分析表明:

- 1) 乌北变电站变压器中性点加装电抗器后,对系统的工频和操作过电压影响较小,工频和操作过电压比较低,与规程的要求值相比有较大的裕度。变压器中性点加装电抗器后,不影响变电站的绝缘配合。
 - 2) 乌北变电站主变压器中性点加装电抗器后,主变压器中性点及电抗器为 66 kV 电压等级绝缘水平,与中性点额定电压为 96 kV 的避雷器保护配合,可满足过电压与绝缘配合的要求,无需在中性点增加放电间隙。
 - 3) 对于主变压器零序电流保护,由于其动作整定值与零序电流 $3I_0$ 直接有关。当主变压器中性点经小电抗器接地时,接地短路电流幅值变小,保护装置的灵敏度变差,需要根据主变压器中性点串接小电抗器接地后的零序短路电流,重新对保护装置进行整定,并对保护装置的灵敏度进行校验,修改保护定值,满足相关要求。
- 通过所研究的结果,验证了中性点接入电抗器后工频耐压与操作耐压水平符合要求,降低了变电站短路电流,达到了优化电网结构,保证西北 750 kV 主网安全稳定运行的目的。

参考文献

[1] 周沛洪,娄颖,戴敏,等. 750 kV 宝鸡至乾县送变电工程内过电压研究[J]. 电源与清洁能源,2008,24(1): 19-23.

[2] 吕景顺,王寅仲,王欣,等. 330 kV 升压变压器中性点保护问题讨论[J]. 电网与清洁能源,2010,26(1): 45-47.

[3] 文春雷,王微波,张亚扶,等. 500 kV 变压器中性点加装小电抗影响分析与试验研究[J]. 电工技术,2014(4): 53-55.

[4] 李晓华,张波,傅龙辉,等. 多个 500 kV 站点自耦变中性点加装小电抗对零序电量叠加影响的研究[J]. 电网技术,2013,37(4): 1074-1082.

[5] 李景禄,周羽生. 关于配电网中性点接地方式的探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(8): 85-86.

[6] 刘渝根,丁伯剑,袁涛. 山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[J]. 高电压技术,2006,32(1): 32-34.

[7] 林耀洲,陈秀娟,陈维江,等. 110 和 220 kV 不接地运行变压器中性点保护方式[J]. 电网技术,2012(4): 256 – 259.

[8] 王育路,魏宾,郝西伟,等. 西安电网供电主网变压器中性点经小电抗接地的研究[J]. 高压电器,2010,46(2):91 – 94.

[9] 胡晓松,陈旭峰,赵强. 110 kV 主变压器中性点间隙击穿跳闸分析及对策[J]. 四川电力技术,2010,33(1): 89 – 91.

[10] 刘超,何林海,崔晓云,等. 110 kV 变压器中性点零序保护配置方式研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):114 – 117.

[11] 石树平. 主变中性点过电压保护配置原则探索[J]. 电力系统保护与控制,2001,29(5):41 – 44.

[12] 董恩伏,郑良华. 吉林省电网 220 kV 变压器中性点保护间隙的选择[J]. 吉林电力,2007,35(5):26 – 28.

[13] 武万才,宋仕军,张晓磊. 主变压器中性点间隙击穿零序保护误动分析与建议[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):90 – 94.

(收稿日期:2016 – 04 – 18)

=====

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是国网四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和国网四川省电力公司电力科学研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊,主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿,尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求,本刊对来稿提出以下要求:

- 1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713 – 1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 5 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。
- 2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150 ~ 300 字之内。关键词是反映论文的词组,选 3 ~ 8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。
- 3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰,少而精,插图下方应有图序和图名。能用文字和表格描述的尽可能不用插图。
- 4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。
- 5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。
- 6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料,按在正文中出现的先后次序列表于文后,以[1]、[2]……标识序号,且与正文中的指标序号一致。按 GB/T 7714 – 2005《文后参考文献著录规则》、CAJ – CD B/T 1 – 2006《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范修正版试行稿》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z];网上期刊[J/OL];网上电子公司[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

- 7) 投稿可通过 E – mail 提供电子文档,信箱为 cdscljs@163. com。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话,并请自留底稿,本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电 028 – 87082036 或 E – mail 编辑部了解审稿情况。
- 8) 本刊投稿自愿,文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改,如不愿被删改,请在原稿上注明。
- 9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站,稿件一经录用刊登,作者著作权使用费用及稿酬已一次付清,如作者不同意收录,请在来稿时提出声明,本刊将作适当处理。

本刊地址:四川省成都市青华路 24 号
邮政编码:610072
电话:(028)87082036,87082037
E – mail:cdscljs@163. com

500 kV 架空线直击和感应雷暂态过电压计算

李天鹭,陈 谦,王海林,李文帆,冯 肯

(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:目前中国大多省区已形成以特高压和超高压为骨干的输电网络,输电线路距离长、跨度大、分布广,所经过地域气象条件十分复杂,遭受各种雷电过电压的概率很高。通常将雷击过电压划分为直击和感应过电压,针对直击和感应过电压进行系统对比研究,对预防雷击事故、保障电网安全运行具有重要意义。将架空线等效为无限长载流导体,并在直击雷频域模型下采用 ATP-EMTP 建立 500 kV 架空线雷击瞬态响应模型,考虑多根导线的耦合关系,分别得出同塔双回和单回路杆塔上载流导线过电压波形及幅值。另一方面,利用 Agrawal 方程组建立了雷电电磁辐射模型,计算得出了雷击点附近线路上感应过电压。通过所计算结果,表明考虑线路耦合等多因素后,所得计算结果较经验公式计算结果偏低,符合实际情况。

关键词:雷击过电压;直击雷;感应雷;电磁耦合;ATP-EMTP

Abstract: At present, extra-high voltage and ultra-high voltage transmission grids have formed in most provinces of China. These transmission lines always have long distance, long span and wide distribution, and the weather condition is very complex where the transmission lines pass through. It is a high probability to be influenced by kinds of lightning overvoltage. The comparative study of overvoltage induced by direct lightning flash and lightning induction is carried out, which is of great significance to prevent lightning strike accidents and guarantee the safe operation. The overhead line is equivalent to an infinite conductor, and the transient response model is established under direct lightning flash frequency domain with ATP-EMTP. Considering the coupling between multiple wires, the overvoltage waveform and amplitude of double-circuit and single-circuit transmission lines are calculated. On the other hand, the lightning electromagnetic radiation model is established by using Agrawal equations, and the induced overvoltage on transmission lines near by the lightning strike spot is calculated. By comparing the obtained calculation results with the results of empirical formula, it shows that the obtained calculation results is lower because of lines coupling and other factors, which conforms to the actual condition.

Key words: lightning overvoltage; direct lightning flash; lightning induction; electromagnetic coupling; ATP-EMTP

中图分类号:TM866 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)05-0058-05

0 引 言

目前中国大多省区已形成以特高压和超高压为骨干的输电网络,输电线路距离长、跨度大、分布广,所经过地域气象条件十分复杂,遭受雷击的概率很高。随着电力技术的发展和绝缘水平的提高,电力系统内部过电压导致事故减少,而由雷击引起的设备损坏、系统故障、线路跳闸日益成为主要事故类型,对电网的安全稳定运行构成重大威胁。一般认为雷电冲击闪络必须形成稳定的电弧才能造成线路跳闸^[1],雷电流无论是直接击中输电杆塔,还是在输电线路附近形成放电,均有可能引起绝缘子闪络,

甚至击穿^[2-3]。文献[4-5]介绍了雷电在线路上传播规律,文献[6-7]对雷电在输电线路上的电磁耦合作用进行了研究。

下面研究了雷电直接击中输电杆塔,但未引起绝缘子闪络的情况下,载流导线上发生雷击瞬态过电压的过程,采用 ATP-EMTP 建立 500 kV 架空线雷击瞬态响应模型,并考虑各线路之间耦合因素,针对不同杆塔类型、雷击点和雷击时刻进行了计算,得出同塔双回线路雷击过电压较单回线路雷击过电压更小,不同雷击时刻对线路过电压幅值影响较大,雷电分别击中避雷线或输电杆塔时,线路感应过电压差异较小。另一方面,建立了雷电电磁辐射模型,根据雷电波辐射理论,考虑各线路间雷电流耦合作用,

利用 Agrawal 方程计算得出了雷击点附近线路上感应过电压,分析得出了感应雷和直击雷引起的线路过电压存在的差异。

1 输电线路直击雷冲击响应

雷电可通过直击、反击或绕击直接导致输电线路带电,且未引起输电线路绝缘子闪络情况下,可将架空线等效为无限长载流导体;并在雷电流频域模型下计算多根导线的耦合关系。设单位长度线路串联阻抗为 $R+j\omega L$,并联导纳为 $G+j\omega C$, u 与 i 分别表示点电位和点电流,均与频率相关,在频域条件下架空导线电压与电流关系可分别表示为

$$-du/dx=(R+j\omega L)I \tag{1}$$

$$-di/dx=(G+j\omega C)U \tag{2}$$

将导线等分为若干段,每一段假设电压和电流观测点,通过式(1)、式(2)可得到式(3)。

$$\begin{bmatrix} u_{m(w)} \\ i_{mn(w)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_w \cdot 1) - Z_w \cdot \sinh(\gamma_w \cdot 1) \\ \sinh(\gamma_w \cdot 1)/Z_w - \cosh(\gamma_w \cdot 1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{n(w)} \\ i_{nm(w)} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $u_{m(w)}$ 、 $i_{mn(w)}$ 分别为频域下的始端电压和端电流; $u_{n(w)}$ 、 $i_{nm(w)}$ 分别为频域下的末端电压和端电流; Z_w 和 γ_w 在瞬态电场作用下,采用 J. Marti 模型进行求解,其中 Z_w 、 γ_w 可分别表示为式(4)、式(5)^[8]。

$$Z_w = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \tag{4}$$

$$\gamma_w = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} \tag{5}$$

通用 500 kV 四分裂导线直流电阻大约为 6~20 mΩ/km;在实际计算中,相比于电感对雷电流的作用,可以忽略串联阻抗中 R 不计^[9];同时在针对输电导线进行计算时,由于导线具有高泄漏电阻值,因此在实际计算导线之间和对地耦合关系时,可以同样忽略并联电纳中 G ^[9]。在不同频域条件下,求得 Z_w 和 γ_w ,将其带入式(3)即可求得电压和电流相关关系。

2 雷电电磁感应对输电线路的响应

自然界中的雷击过程是一个不可预测的复杂现象,但是为方便计算,往往将雷云和大地之间产生的

雷电通道认为是垂直扩散型柱形波。该激励源需要用数值积分求取,并分为水平和垂直两个极化分量加载到架空线路上^[10]。

在雷击主放电时刻,雷云到地面的雷电通道附近会伴随很强的电磁场,实际上该电磁场主要是由大地回击电流产生的。雷电通道是由多分支结构组成的,因为在空气中击穿电离呈随机特性,所以分支结构也是不规则的;不过由于主通道是竖直的,为了便于计算,研究中常采用垂直单一放电通道替代雷电的多分支放电通道。设回击电流为 $i(z',t)$,起始点位置电流为 $i(0,t)$,两者之间的联系可表示为式(6)^[11]。

$$i(z',t)=H(t-z'/v)P(z')i(0,t-z'/v) \tag{6}$$

式中: H 是阶跃函数; $P(z')$ 是与地面高度相关的衰减系数; v 是电流波的传播速度,文献[12]详细叙述了 $P(z')$ 和 v 不同取值情况下对应的不同雷电波辐射模型。

将式(6)带入麦克斯韦方程组,将雷电通道视作坐标轴,雷击点视作原点,建立坐标系可以得到观察指定点 $P(r,\Phi,z)$ 的通解电场量。高度 z' 单位长度雷电通道,电流为 $i(z',t)$ 的雷电流径向电场计算式可表示为式(7)。

$$\begin{aligned} E_{r(t)} = \frac{L}{4\pi\epsilon} & \left[\frac{3rz}{R^5} \int_0^t i(\tau-R/c) d\tau + \frac{3rz}{cR^4} i(t-R/c) \right. \\ & \left. + \frac{rz}{c^2R^3} \frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t} \right] \end{aligned} \tag{7}$$

式中, $R = \sqrt{(z-z')^2 + r^2}$,对径向、轴向电场的进行近似求解,雷电回击所产生的电磁场是由底部雷电通道位置雷电电流和回击速度决定的^[13],回击辐射场的轴向电场分量表达式为式(8)^[14]。

$$\begin{aligned} E_{z(t)} = \frac{L}{4\pi\epsilon} & \left[\frac{2z^2-r^2}{R^5} \int_0^t i(\tau-R/c) d\tau + \frac{2z^2-r^2}{cR^4} i(t-R/c) \right. \\ & \left. + \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t} \right] \end{aligned} \tag{8}$$

式中: ϵ 为地面相对介电常数,F/m; z 为纵向坐标,m; r 为径向坐标,m; R 为电流偶极子到场点的距离,m; c 为真空中光速,m。

根据 Agrawal 方程可以得到散射电压 $V_{sca}(x)$ 和全电压 $V(x)$ ^[15]、入射电场 $E_{z(jw)}$ 的关系,表示为式(9);散射电压 $V_{sca}(x)$ 和全电流 $I(x)$ 关系表示为式(10);分布源 $V_s(x)$ 等于传输线上下切向电场的差,

表示为式(11)。

$$V_{sca}(x) = V(x) - \int_0^d E_{z(jw)} dz$$

(9)

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{sca}(x) \\ I(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Z_w \\ Y_w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sca}(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

(10)

$$V_s(x) = E_r(x,d) - E_x(x,0)$$

(11)

式中: Z_w 与 Y_w 可参考式(4)、式(5); d 为架空线对地高度。

设 Z_L 为负载冲击响应阻抗,得到式(12)。

$$V(x) = I(x) Z_L$$

(12)

联立方程式(9)~式(12)可近似求出相应观测点电位值。

3 直击雷冲击响应算例

目前通用电磁暂态仿真计算软件 ATP – EMTF 将架空线用 J. Marti 模型等效,并按照所述方法进行数值计算。设杆塔周围土壤电阻率为 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,土壤介电常数 $\varepsilon = 7.974 \times 10^{-11}\,\text{F/m}$,磁导率 $\mu = 1.256 \times 10^{-6}\,\text{H/m}$,在雷电流注入点输入幅值为 $100\,\text{kA}$ 的双指数电流波 $I = 1.05 \times 105(e^{-0.016t} - e^{-1.2t})$,波头/波尾 $2.6/50\,\mu\text{s}$ 。

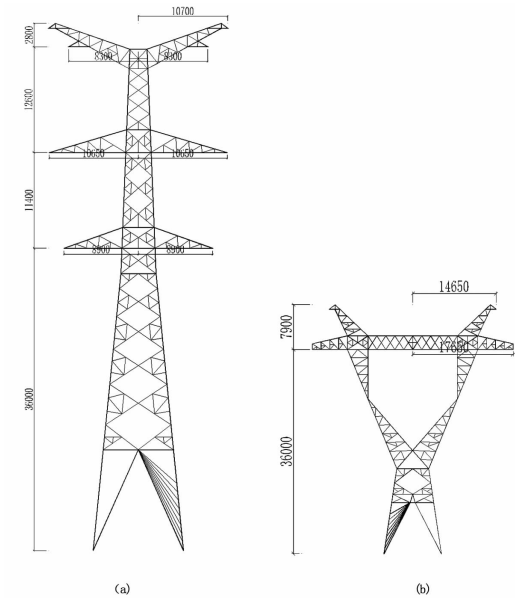


图 1 输电线路杆塔示意图

输电线路采用同塔双回架设(间距见图 1(a)),雷击点发生在常规 500 kV 直线杆塔附近,雷电击中杆塔顶端避雷线时,线路载流运行,不同观测时刻电压波形如图 2、图 3 所示。根据计算结果可以看出,雷电击中同塔双回输电杆塔的避雷线后,在

未发生绝缘子闪络的情况下,载流导线上的过电压较小。雷击发生在 0.005 s 时刻,引起 A、B、C 三相最大过电压幅值为 785 kV,雷击发生在 0.014 s 时刻,C 相处于波峰,引起三相最大过电压幅值为 991 kV,过电压持续时间均较短,波形未发生畸变。由此可见,高压载流导线上本身输电电压对过电压有较大影响,当雷击电压波峰和输电线路电压波峰时刻重叠时引起的过电压最高。

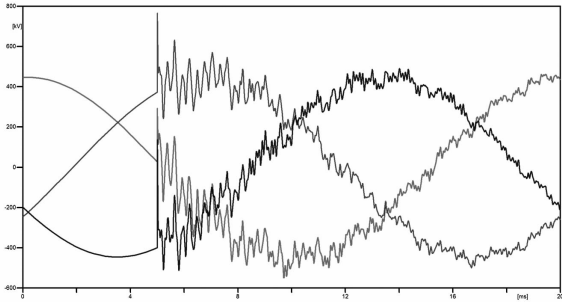


图 2 同塔双回杆塔雷击避雷线引起导线过电压波形(0.005 s)

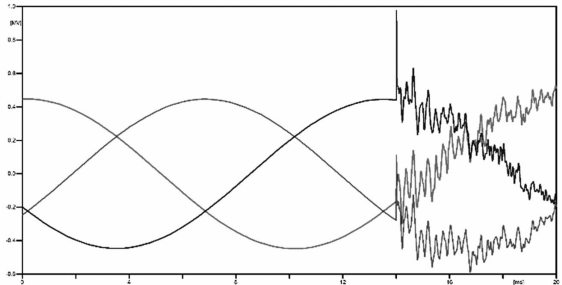


图 3 同塔双回杆塔雷击避雷线引起导线过电压波形(0.014 s)

输电线路采用同塔双回架设,雷电通过绕击或反击,击中载流导线时,过电压波形如图 4 所示。根据计算结果可以看出,在同塔双回输电杆塔情况下,雷电击中其中一相输电导线后,如果未发生绝缘子闪络,载流导线上的过电压幅值较雷击避雷线大。雷击发生在 0.014 s 时刻,引起雷电直接击中相过电压幅值达到 5 663 kV,虽然过电压持续时间均较短,但雷电直击相电压波形发生畸变。非雷电直击相电压波形同样发生畸变,但在绝缘子未击穿情况下,非雷击相受到感应雷电压影响较小,过电压幅值仅为 681 kV 左右,且滞后雷击时刻数毫秒。

输电线路采用单回架设(间距见图 1(b)),雷电通过绕击或反击,击中载流导线时,过电压波形如图 5 所示。根据计算结果可以看出,雷电击中单回

输电杆塔其中一相输电导线后,如果未发生绝缘子闪络,载流导线上的过电压幅值较同塔双回线路更大。雷击发生在 0.014 s 时刻时引起 A、B、C 三相最大过电压幅值为 6 234 kV,过电压持续时间均较短,但波形发生畸变。绝缘子未击穿情况下,非雷击相过电压幅值与同塔双回杆塔情况相当,由此看出非雷击相感应过电压幅值大小基本不受杆塔回路数影响,而雷击相受杆塔回路数影响较大,回路数越少雷电直接击中相过电压幅值越高。

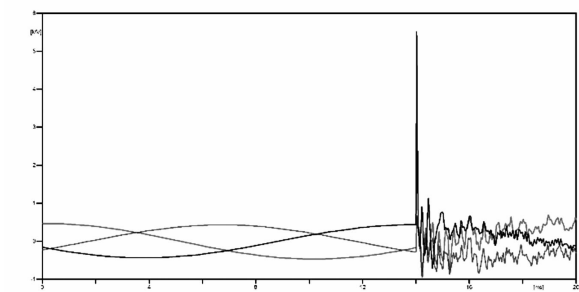


图 4 同塔双回杆塔雷击导线引起过电压波形

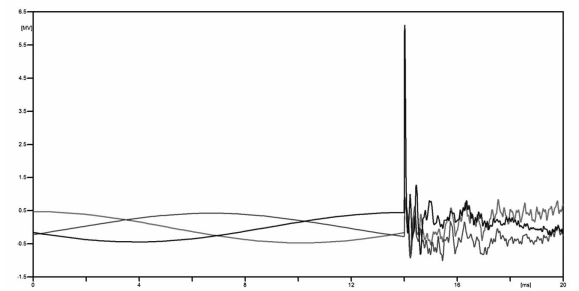


图 5 单回路杆塔雷击导线引起过电压波形

4 感应雷冲击响应算例

根据所述方法,利用 Matlab 建立模型进行数值计算,相应参数按照第 3 节所述,计算雷电通道在不同距离下对输电导线的感应电场。

设定雷电通道和输电导线处在不同水平距离,分别计算幅值为 100 kA 雷电通道附近 10 m、50 m 和 100 m 3 个观察点的径向电场,其中雷电回击速度为 $v=1.3 \times 10^8$,计算结果如图 6 所示。可见距离雷电通道 10 m 处,径向电场最大值为 2 343 V/m; 50 m 处,径向电场最大值为 492 V/m;100 m 处,径向电场最大值为 240 V/m。

由于当雷电通道距离输电导线较近时,可以认为与雷击避雷线情况类似,因此仅通过式(8)计算与雷电通道水平距离为 100 m 观测点的轴向电场,

轴向电场垂直地面平均高度设为 40 m 时,轴向电场最大值可达到 18 kV/m 左右。

实例计算以图 1(b)单回路输电杆塔为基础,假设入射电场距离导线末端结点为 1 km,径向电场可忽略,仅考虑轴向电场的影响^[16],根据第 2 节所述方法,对矩阵方程式(10)进行离散化处理,求得线路匹配负载 Z_L 为 100 Ω 的电压响应,并得到如图 7 所示三相导线上的感应电压,其中距离地面高度最高位置导线感应电压最大,峰值可达到 743 kV。

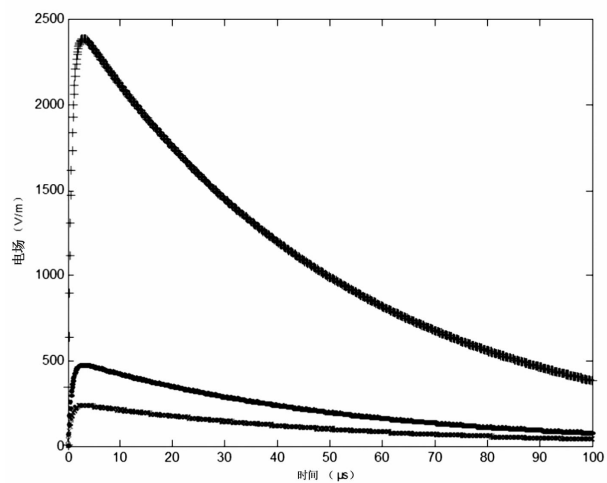


图 6 雷击导线引发绝缘子闪络过电压波形

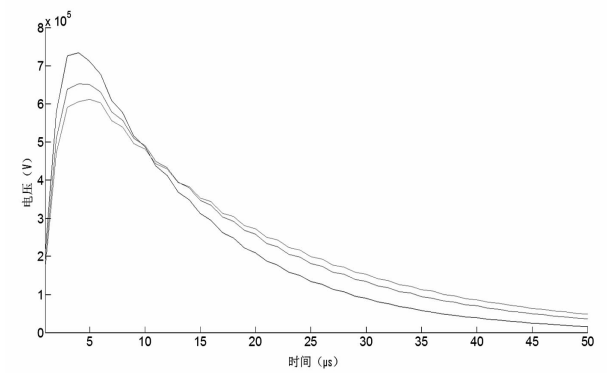


图 7 雷电通道附近架空线上感应电压

5 计算结果对比分析

目前工程上关于计算雷电直接击中杆塔、避雷线或者导线引起输电线路过电压,一般通过经验公式求得。针对雷电击中导线后,通过公式 $U=100 \times I^{[17]}$ 可估算线路过电压幅值,其中 I 为雷电流幅值。

该公式不考虑杆塔冲击接地电阻、杆塔类型和线路耦合情况,计算结果为 10 000 kV。第 3 节对 100 kA 直击雷冲击响应计算结果是:同塔双回杆塔

雷击过电压幅值为 5 663 kV, 单回路杆塔过电压幅值为 6 234 kV, 均小于规程中公式计算结果。

关于感应雷过电压有经验公式 $U = 25 \times I h_d / s$ [17], 其中: h_d 为导线悬挂高度; s 为雷击点和导线距离。

该公式同样考虑因素较少, 通过带入相同的计算条件, 计算结果为 1 000 kV。而第 4 节对单回路杆塔雷电感应过电压幅值计算结果为 743 kV, 小于规程中公式计算结果。

由于工程上对计算结果均要求留有一定裕度, 可以认为经验公式计算结果偏保守[18], 而通过所推荐的计算方法得到的计算值更接近于实际情况。

6 结 论

1) 雷电击中输电杆塔避雷线, 将通过电磁感应引起输电杆塔导线上产生过电压。如果输电导线绝缘子未发生持续闪络或击穿, 导线上过电压幅值相对较小, 持续时间均较短, 波形不会发生畸变。

2) 直击雷引起单回路架设杆塔上的过电压幅值较同塔双回杆塔水平高, 主要原因是同塔双回路导线数目更多, 距离更近, 通过静电耦合作用降低了雷电直击线路过电压幅值。非雷击相感应过电压幅值大小基本不受杆塔回路数影响, 而主要受导线间距影响。

3) 离地面高度越高的导线, 所产生的感应雷过电压幅值越高, 输电导线距离 100 kA 雷电 100 m 范围内, 可产生最大幅值在 700 kV 以上的过电压。

4) 通过经验公式计算所得直击雷和感应雷过电压幅值, 均较所提方法计算结果偏高, 但差异不大。

参考文献

[1] 文远芳. 高电压技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
[2] 谷定燮. 500 kV 输变电工程设计中雷电过电压问题[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 60-62.
[3] 张纬钹, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
[4] F Rizk. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1983-1997.
[5] Diendorfer G. Induced Voltage on an Overhead Line due

to Nearby Lightning[J]. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility, 1990, 32(4): 292-299.
[6] F Rachidi. Formulation of Field to Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field[J]. IEEE Transactions on EMC, 1993, 35(3): 404-407.
[7] Frederick M, Tesche Michel. EMC Analysis Methods and Computational Models[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1994: 268-282.
[8] 黄家裕, 陈礼义, 孙德昌. 电力系统数字仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
[9] Dommel H W, 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永壮等译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
[10] 杨静, 郗秀书, 王建国. 雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1968-1975.
[11] C A Nucci, C Mazzetti, F Rachidi, M Ianoz. On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations[C]. International Conference on Lightning Protection, Graz, 1988: 463-470.
[12] M Rubinstein, M A Uman. Methods for Calculating the Electromagnetic Fields from a Known Source Distribution: Application to Lightning[J]. IEEE Transactions on EMC, 1989, 1(31): 183-189.
[13] 邹相国. 雷电电磁场空间分布的研究与计算[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
[14] M J Master, M A Uman. Transient Electric and Magnetic Fields associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole[J]. IEEE Transactions on EMC, 1991, 33(4): 118-126.
[15] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H, et al. Transient Response of Multi Conductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field[J]. IEEE Transactions on EMC, 1980, 22(2): 119-129.
[16] 郭辉萍, 刘学观. 电磁场与电磁波[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
[17] 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[S].
[18] 刘强, 谷定燮, 张元芳. 雷击杆塔塔顶时导线上感应电压敏感性分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 31-33.

作者简介:

李天莺(1986), 硕士, 从事电力系统输变电领域的设计研究工作。

(收稿日期: 2016-06-14)

绝缘子故障在线监测系统的设计与实现

叶 芳,陈韶瑜,李 田,齐文艳,傅思伟
(天津市电力公司电力科学研究院,天津 300384)

摘 要:输电线路绝缘子故障频发,但目前无针对绝缘子的故障监测装置,因此提出了绝缘子故障在线监测系统。阐述了此系统的结构、通信控制及主要模块,全面详细地介绍了系统各模块的软件实现。该系统能实时监测绝缘子运行情况,增强了电力系统稳定性,为绝缘子故障预判和寿命评价提供了理论支撑。

关键词:绝缘子;在线监测;数据处理;软件设计

Abstract:The insulator faults of transmission lines occur frequently, but at present there is no fault monitoring device for insulators. Therefore an on – line monitoring system for insulator faults is proposed. The structure of this system, the communication control system and the main modules are described, and the software implementation of various modules is introduced in detail. The proposed system can monitor the real – time operation situation of insulators so as to improve the stability of power system, which provides the theoretical support for the pre – judgment and life evaluation of insulator fault.

Key words: insulator; on – line monitoring; data processing; software design

中图分类号:TM764 文献标志码:B 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0063 – 04

0 引 言

绝缘子常年暴露在大气中,受雷击、污秽、鸟害、冰雪、高温、高寒等因素影响,会导致各类事故的发生,常见的绝缘子事故有以下几类:

- 1)雷击事故:架空线路通道通常为丘陵、山地、空旷地带及有污染的工业区,线路极易遭遇雷击致绝缘子击穿或爆裂。
- 2)均压环事故:均压环固定螺栓处的电晕电压低,在恶劣气象条件下,电晕现象威胁了绝缘子串安全,易造成事故。
- 3)污秽事故:具有导电性的污秽物质易积聚在绝缘子表面,潮湿天气下污秽受潮使绝缘子绝缘水平降低,在正常运行时发生闪络。
- 4)其他原因:在绝缘子闪络事故中,有许多事故原因不明,如瓷绝缘子零值、玻璃绝缘子爆裂、复合绝缘子跳闸等。

综上可知,大多数绝缘子故障发生突然,故障前期肉眼不易观察,故障发生后易造成线路跳闸停电,给电力系统安全稳定运行造成很大困扰。

绝缘子常见故障原因有绝缘水平降低、绝缘部件裂纹和绝缘体破损。绝缘水平降低会增强绝

缘体的导电性,在高电位差的情况下可能出现绝缘子闪络击穿,对线路绝缘造成严重破坏。绝缘子绝缘体裂纹和破损会降低绝缘子机械性能,随着裂纹和破损面的增大,极有可能出现绝缘子断裂等事故,而绝缘部件裂纹还会带来泄漏电流,影响绝缘子绝缘水平。

1 在线监测系统的整体功能

根据绝缘子故障的特点,为绝缘子设计了一套故障在线监测系统,以期通过对绝缘子的实时监控,第一时间采集到绝缘子微小的故障信息,并通知维护人员及时处理,避免故障扩大造成严重事故。整套在线监测系统由信息采集终端、网络传输系统和后台控制单元三部分组成^[1]。

信息采集终端安装在需要监测的绝缘子上,负责采集绝缘子的分布电压、相邻绝缘子温差值和绝缘子表面及内部的泄漏电流。网络传输系统将信息采集终端采集到的大量实时数据同步传输到后台控制单元^[2]。后台控制单元将传输来的绝缘子实时物理量进行数据处理、分析和计算,将绝缘子的分布电压、温差和泄漏电流等数据与正常范围作比较,甄别出问题数据,从而判定绝缘子是否出现绝缘水平

降低、绝缘体裂纹、破损等现象,并将故障通过声光告警等形式反馈给监控人员,利于监测人员发现故障绝缘子并及时更换,避免故障扩大,造成线路运行事故。

绝缘子故障在线监测系统实时监测绝缘子运行状态,及时发现绝缘子存在的问题,能够很好地维护电力系统稳定性。

2 在线监测系统的硬件结构

根据绝缘子分布位置分散、数量多的特点,在线监测系统采用分层分布式结构^[3],为每个要监测的绝缘子安装一个信息采集单元,分布于各绝缘子间的信息采集单元通过电力通信网络连成一个有机整体,共同完成绝缘子的信息采集与分析功能^[4]。

系统采用客户端/服务器(Client/Server)结构,支持基于 TCP/IP 协议的光纤局域网接口,采用 PCI 总线设备。系统分为信息采集层、网络层和中央控制层三部分,由智能数据采集终端、同步触发单元、交换机、数据处理服务器、工作站、远程网络接口等构成,系统构成如图 1 所示^[5]。

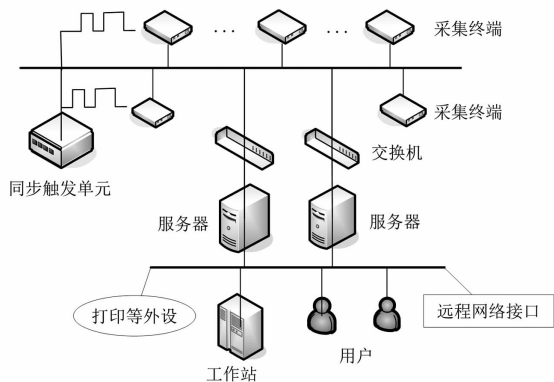


图 1 系统构成图

智能数据采集单元采用 Internet 作为前后台数据交换的载体,使用高性能的 32 位嵌入式微处理器对绝缘子的分布电压、相邻绝缘子温差值和绝缘子表面及内部的泄漏电流等信息进行全息记录,保证数据采集器长时间可靠运行;采用数字增益的可编程运算放大器,提高信号的测量精度,内置看门狗电路,外置多通道同步采集的高速模数转换芯片,与 CPU 经过并行总线连接,保证装置内部模拟数据采集的实时同步^[6]。

同步触发装置是 PCI 总线的主设备,保证所有采集单元同步采集,向从设备发送同步信号后,读取

来自从设备的模拟量、开关量信息^[7]。同步触发单元采用 32 位高性能嵌入式微处理器,同步方式采用外触发方式,以光纤连接,载有采样脉冲及数据传送同步脉冲。

服务器完成在线状态检测、物理量动态记录、故障预判等功能,是系统的核心。

工作站完成系统配置、数据离线分析及实时信息显示等人机交互功能,向系统其他部分发送遥控、遥调命令,负责整个系统的协调和管理。

3 在线监测系统的软件实现

系统按功能可分为系统软件、支撑平台和应用程序 3 个层次。由于 Linux 系统可设定性高、高效灵活、系统性能稳定可靠,前端服务器采用 Linux 操作系统。Windows 操作系统通用性好、易学易用,后台工作站以 Windows 为操作系统^[8]。

开发语言选用 C++ 与汇编语言混合编程,利用 C++ 的图形处理功能和汇编语言处理高速度、大运算量的算法程序,提高软件的执行效率,更好地利用 DSP 芯片的软硬件资源^[9]。

3.1 主程序设计

整个系统的软件部分由主程序、绝缘子物理量动态记录程序、绝缘子服役状态分析程序、故障预判程序和中断服务程序组成。

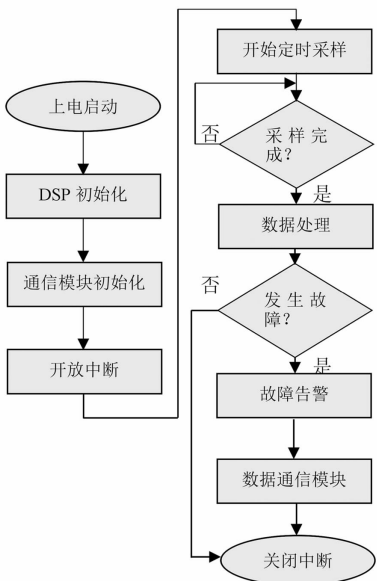


图 2 主程序流程图

主程序主要完成信号采集单元和外设的初始化、与上位机通信、数据处理和存储等任务。主程序

流程图如图 2 所示,系统首先接收由 DAS 传输的数据,选择某一线路模拟量,读取该线路采集到的绝缘子分布电压、相邻绝缘子温差和绝缘子泄漏电流数据,根据电压、电流和温度值计算出绝缘子的电压差、温升等故障判据,分别与其告警阈值作比较,发现有参数越限立即发出故障告警,将越限或故障信息通知工作站,并生成 COMTRADE 格式越限报告。

3.2 信号采集模块程序设计

信号采集程序接收同步触发装置发出的同步信号后开始数据采样,并将采集数据上送至数据处理服务器进行处理^[10]。

采样模块流程如图 3 所示。在上电启动并完成自检后,信号采集单元调取存于 FLASH 中的采样参数(采样方式、采样数据长度、采样频率等),等待同步采样信号,然后按照同步信号进行采样,并将采样数据上送,待采样完成后将采样标志清空,完成一次采样过程。

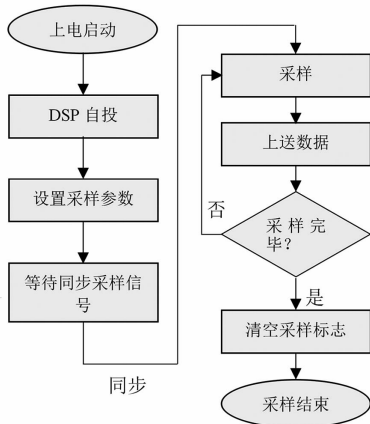


图 3 采样模块流程图

系统数据采样部分采用中断方式实现^[9]。采样中断服务程序由外部中断唤醒,待 A/D 转换结束后,BUSY 信号发生跳变使 DSP 进入外部中断服务程序,读取三相电压、电流的 A/D 转换结果。待电压、电流信号采样完成,程序跳转至主程序。此中断是在相应的硬件配置上的软件中断方式,使用外部同步触发信号作为 A/D 转换的启动信号,A/D 转换完成后触发外部中断,在中断程序中将 A/D 转换结果寄存器中的数据读出,并分别存入指定的芯片循环缓冲区内,中断服务程序流程见图 4 所示。

3.3 数据处理程序设计

数据处理模块主要是处理信号采集单元采集到的离散信号,对信号进行物理量的动态记录,并对达

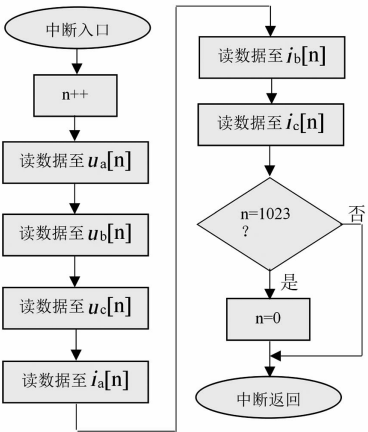


图 4 中断服务程序流程图

到告警条件而生成的故障录波文件进行故障分析。为保证数据精度,系统采样频率多选择 6.4 kHz,测量闪变的采样频率为 400 Hz,在实际采样数据中每 16 个采样点取一个作为分析闪变的有效数据。因中断的时间间隔相对较短而要处理的计算复杂,不能在一个采样间隔内全部完成,因此,数据处理过程中,将一个采样间隔做不完的运算在下一个采样间隔回到断点处继续进行,并设置闪变分析和相关运算程序的执行时间相差 10 个采样间隔,避免两个计算程序争用机器周期。

数据处理程序流程如图 5 所示。先对 DSP 和外设进行自检,自检通过则关闭中断,使其自己享用 DSP 处理器的资源,不再对其他的中断产生响应,检测数据就绪则进行数据分析、故障预判等计算,并将计算结果存放在缓冲区内,当一个主循环检测完成后再将结果上送,待所有的计算都完成后放开中断使用权,等待下一一次的数据处理^[11]。

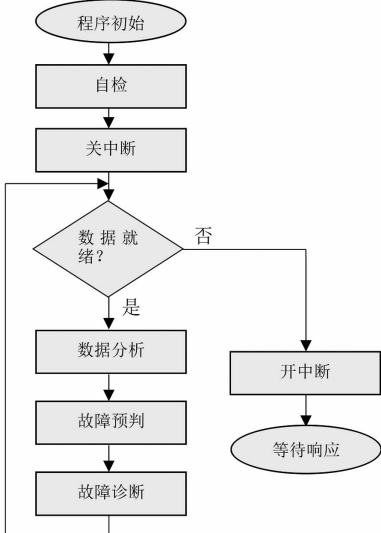


图 5 数据处理程序流程图

3.4 数据通信程序设计

数据通信程序完成上位机与下位机之间的数据传输及遥测、遥控等通讯功能,要求能够根据通信命令要求,从共享数据区中获取相应信息并发送。上位机主要与 ARM 进行通信,采用的是基于 TCP 的 socket 编程,通信进程间相互作用的通信模式为 Client/Server 模式^[12]。为了使系统中不同类型的数据能够相互转换,系统中传递的数据均遵守电力系统数据转换通用格式,即 COMTRADE (common format for transient data exchange)故障录波标准。

本系统的上位机与下位机间收发数据采用主动请求的方式,即上位机向下位机发送请求报文,连接成功后进行数据通信,服务完成后终止通信链路^[8]。部分下位机程序代码如下:

```
While(1)
{ //等待上位机请求到来
SOCKETsockConn = accept( sockSrv,
    ( SOCKADDR * ) &addrClient, &len );
Char sendBuf[ 1000 ];
Sprintf ( sendBuf, " * * * ",
    inet_ntoa( addrClient. sin_addr ) );
//发送数据
Send ( sockConn, sendBuf,
    strlen( sendBuf ) + 1, 0 );
Char recvBuf[ 1000 ];
//接收数据
recv( sockConn, recvBuf, 1000, 0 );
//关闭套接字
Closesocket( sockConn )。
```

4 结 论

绝缘子故障在线监测系统具备实时监测、动态记录和故障预判功能,提高了硬件重复利用率。系统采用集成 DSP 芯片、同步采样技术和 PCI 总线技术,提高了采样精度和可靠性。系统遵循开放性、标准性和分层性原则,具有良好的通用性和可扩展性。

绝缘子故障在线监测系统功能齐备,计算精度高,故障预判正确,可以实时发现运行中绝缘子的裂纹、绝缘破损等微小故障,并通过故障告警将绝缘子

故障及时通知监测人员,避免故障发现不及时,最终扩大造成事故。绝缘子故障在线监测系统为线路的运行监测提供了有利的技术支持,维护了电力线路运行安全,有利于电力系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 苏鹏声,王欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(1):61-65.

[2] 朱传柏,郭创新,曹一家. 基于调度综合数据平台的大规模电网分层故障诊断[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):51-55.

[3] 吴琼,刘文颖,杨以涵. 智能型电网调度决策支持系统的开发与实现[J]. 电力系统自动化,2006,30(12):79-83.

[4] 李良明,徐丙垠,张正团,等. 电力系统动态记录与故障分析支撑平台的研究[J]. 山东理工大学学报,2006,20(1):20-23.

[5] 黄琦,秦开宇,蔡荣海. 数字化电力系统中的通信基础平台体系设计[J]. 电力系统通信,2005,26(2):33-37.

[6] 余虎,姚建刚,罗滇生,等. 数字电力系统基础架构平台的设计与实现[J]. 电力系统自动化,2006,30(18):94-98.

[7] 杨宛辉,王克文,王军,等. 城市电网运行智能决策支持系统[J]. 继电器,2006,32(14):56-59.

[8] 刘天斌,王永业,柳焕章,等. 基于 COMTRADE 格式的故障分析管理系统[J]. 继电器,2001,29(11):47-49.

[9] 王晓兰,李建海,肖骏. 基于虚拟仪器技术的便携式故障录波装置设计[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(23):73-75.

[10] 程玲. 电力系统设备状态监测与故障诊断[J]. 水电厂自动化,2008,29(3):67-69.

[11] 胡扬宇,李然,杨宛辉,等. 城市电网故障诊断系统[J]. 继电器,2002,30(12):28-31.

[12] 李良明,徐丙垠,张正团,等. 电力系统动态记录与故障分析支撑平台的研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2006,20(1):20-23.

作者简介:

叶 芳(1986),工程师,从事电力系统输电线路在线监测及部件失效分析研究工作。

(收稿日期:2016-05-28)

GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析

邱 炜¹,刘 石²

(1. 国网成都供电公司,四川 成都 610041;2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘 要:现场交流耐压试验是 GIS 设备装配完成投运前最重要的交接试验之一。结合超声波局部放电检测、SF₆ 气体分解物测量等技术手段,定位分析了 2 起变电站 GIS 交流耐压过程中的放电故障。根据 GIS 设备结构特点,介绍了超声波传感器的布置原则,有效地提高了故障定位效率并且节省故障处理时间。分析了造成 2 起放电故障的盆式绝缘子沿面闪络主要原因,最后提出了 GIS 在结构设计、现场安装调试等方面的几点建议。

关键词:GIS;交流耐压试验;放电故障;局部放电;超声波

Abstract:The AC withstand voltage test of GIS is one of the most important hand – over tests before being put into operation. Combing with the ultrasonic partial discharge detection and the decomposition products measurement of SF₆, two discharge faults of GIS in the process of AC withstand voltage are located and analyzed. The layout principle of ultrasonic sensors is introduced according to the structure characteristics of GIS, which can effectively improve the efficiency of locating the discharge fault and reducing the fault processing time. The main reasons of surface flashover of the basin type insulators which causes two discharge faults are analyzed. Finally, some suggestions on the structure design, on – site installation and testing of GIS are proposed.

Key words:GIS; AC withstand voltage test; discharge fault; partial discharge; ultrasonic

中图分类号:TM835 文献标志码:B 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0067 – 04

GIS 具有占地面积较小、密封性好、受环境影响较小、运行可靠性高、检修周期长、维护工作量少、运行费用低等显著优点,在各省电力公司 110 kV 及以上变电站及发电厂都得到了广泛应用。

为检查 GIS 设备在总体装配后是否存在各种导致内部故障的隐患,需要在现场实施交流耐压试验,验证其绝缘性能是否良好,以保证其安全投入运行。在试验过程中如果发生击穿放电,需要尽快找到放电气室,对怀疑的气室解体、检查绝缘,经处理后再一次耐压试验合格后才能投入运行^[1-2]。

目前,在 GIS 设备现场耐压试验中,一般采用多名试验人员分布在耐压试验区域的 GIS 外壳附近,通过听 GIS 放电击穿时产生的声音,大致判断放电发生在哪个间隔,再利用断路器和隔离开关将整个 GIS 进行分段,重复多次耐压试验,确定故障位置,然后开罐检查,寻找故障点。这种方法只能判断出故障范围,不能进行精确定位,而且需要多次重复加压,势必对设备绝缘造成损伤。

超声波局部放电检测已经在 GIS 的带电检测中得到了广泛应用^[2-5],使用多个超声波传感器接收 GIS 放电击穿时产生的超声波信号,通过测量超声波信号的幅值大小和超声信号之间的时间差可以对

缺陷所在的气室进行定位。

在 GIS 耐压试验中,由于间隔设备数量较多,需要尽可能多地使用超声传感器,而传感器的安装固定较为费时,因此,如何优化布置传感器的位置,在有限数量传感器的情况下实现放电故障精确定位是目前耐压试验面临的一大难题。

根据设备结构特点,在现场交流耐压试验过程中优化布置超声波传感器安装位置,利用超声波信号和 SF₆ 分解产物测量等多种手段^[6-10],定位了 GIS 现场交流耐压试验时的多处放电故障点,分析了引起盆式绝缘子沿面闪络的主要原因,提出了相应的对策与建议。

1 试验方法

某 500 kV 变电站采用 3/2 方式接线,为户外 GIS 设备,2 台主变压器,6 条出线,组成 1 个完整串,6 个不完整串,共 15 个断路器间隔,主接线图如图 1 所示。

考虑到耐压设备容量以及母线电磁式电压互感器参与耐压(为防止铁心饱和,厂家要求试验频率在 50 Hz 以上),试验共分为 2 个区域进行,其中图

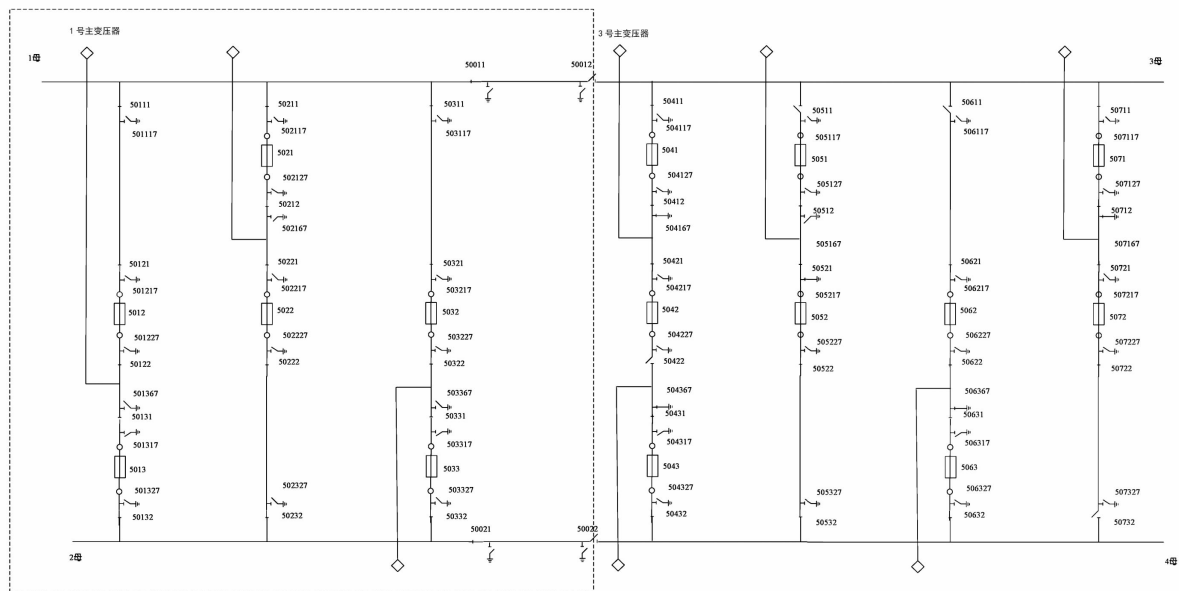


图 1 某变电站主接线示意图(其中虚框内为第 1 试验区域,其余部分为第 2 试验区域)

1 虚框内代表第 1 试验区域,其余部分为第 2 试验区域,加压点分别为 1 号主变压器和 3 号主变压器出线套管。

器,母线拐角处由于安装条件较复杂,也布置一个传感器用以定位放电故障点。

试验采用变频串联谐振电源,试验接线如图 2 所示。

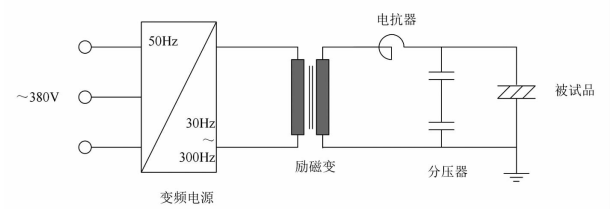


图 2 试验装置示意图

根据国家电网公司《关于加强气体绝缘金属封闭开关设备全过程管理重点措施》要求,加压程序为 0→318 kV(老练,持续 10 min)→413 kV(老练,持续 5 min)→666 kV(740 kV×90%,1 min)→349 kV(断路器局部放电测量)。

采用超声波在线监测装置进行耐压试验过程中故障定位,试验中共使用 24 个超声波传感器。由于断路器在完成出厂试验后直接运送至现场安装,不进行开罐检查;而隔离开关在运送至现场后需要开罐清理检查后再安装,容易受现场安装环境影响,同时由于采用的 ZF8A-550 型 GIS 隔离开关和电流互感器连接处盆式绝缘子为水平布置且凹面朝上,一旦安装环境控制不严格,灰尘等异物将直接掉落 在高电场强度的盆式绝缘子中心导体处,耐压过程中容易造成绝缘击穿。因此故障定位装置的布置原则为:在耐压区域所有隔离开关处均安装超声传感器以重点监视;母线则每隔 20 m 左右布置一个传

2 试验结果与分析

2.1 A 相 50232 隔离开关处盆式绝缘子闪络

第 1 试验区域 A 相,当试验电压升至 318 kV 老练 9 min 14 s 后击穿,安装在 50232 隔离开关 A 相附近处的超声传感器检测到明显超声信号,且明显大于其他气室,如图 3 所示。

为了确定放电位置,调整传感器布置位置,在 50232 隔离开关附近气室均布置 1 个超声波传感器以精确定位放电的故障气室。在不调整耐压区域的情况下,重复第 2 次加压,当试验电压升至 295 kV 时,再次发生放电击穿,50232 隔离开关处超声波传感器检测到信号幅值同样明显大于其他气室,如图 4 所示,因此初步判断 50232 隔离开关处发生了放电击穿。并且第 2 次放电电压值比第 1 次低了 23 kV 左右,说明该故障很有可能是固体绝缘材料的放电,在上一次放电时已形成了贯穿的放电通道,从而导致放电电压逐步降低。

利用 SF₆ 分解产物测试仪对 50232 隔离开关附近气室进行分解物测试,在 50232 隔离开关气室检测到 SO₂ 和 H₂S 含量分别为 1.6 μL/L 和 0.5 μL/L,而其余气室均未检测到。由于耐压试验在 SF₆ 气体成分检测合格后才进行,因此 50232 隔离开关气室检测到的 SF₆ 分解产物应是由于放电击穿导致的。

对该气室气体回收后,开罐检查发现 50232 隔

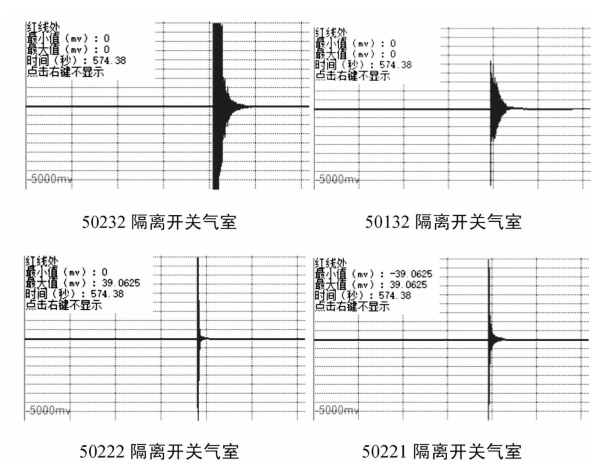


图 3 50232 隔离开关附近气室超声信号

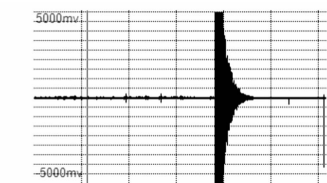


图 4 50232 隔离开关气室超声信号

离开关的盆式绝缘子(动触头侧)的凹面有明显闪络痕迹,如图 5 所示,该闪络通道形成了贯穿的放电通道;第 2 次耐压值低于第 1 次说明两次放电为同一沿面闪络通道的重复放电。该盆式绝缘子发生放电击穿的原因可能是安装时清洁不到位、隔离开关操作后产生的金属异物等掉落到盆式绝缘子表面,在电场作用下发生了沿面闪络。

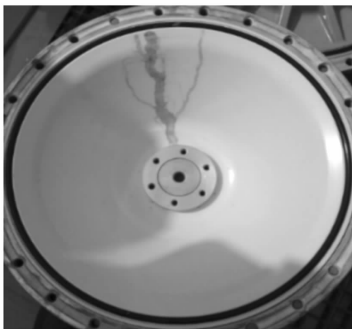


图 5 50232 隔离开关盆式绝缘子沿面闪络

2.2 B 相 50212 隔离开关处盆式绝缘子闪络

第 1 试验区域 B 相,当试验电压升至 635 kV 时发生放电击穿,超声波传感器监测显示 50212 隔离开关气室附近传感器检测到的信号明显大于其他气室,如图 6 所示,因此怀疑 50212 隔离开关处发生了放电击穿。

为了确定放电位置,调整传感器布置位置,在 50212 隔离开关附近气室均布置 1 个超声波传感器以精确定位放电的故障气室。在不调整耐压区域的情况下,重复第 2 次加压,当试验电压升至 666 kV

11 s 后,再次发生放电击穿,50212 隔离开关处超声波传感器检测到信号幅值同样明显大于其他气室。利用 SF₆ 分解产物测试仪对 50212 隔离开关附近气室进行 SF₆ 分解物测试,在 50212 隔离开关气室检测到 SO₂ 和 H₂S 含量分别为 4.8 μL/L 和 0.6 μL/L,而其余气室均未检测到;同时 GIS 设备厂家人员在 50212 隔离开关气室气体继电器处放出少量气体,也可以明显闻到一股臭鸡蛋味;因此初步判断 50212 隔离开关处发生了放电击穿。

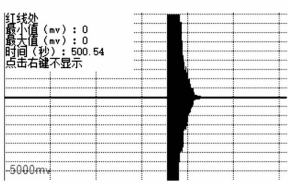


图 6 50212 隔离开关气室超声信号

开罐检查发现 50212 隔离开关盆式绝缘子(动触头侧)的凹面有 2 处明显闪络痕迹,如图 7 所示。这是因为第 1 次闪络却未使该绝缘子完全丧失绝缘性能,反而打飞了盆式绝缘子表面的杂质颗粒物使其落入电场强度较小的区域(如盆式绝缘子边缘区域),改善了盆式绝缘子的电场分布,反而使第 2 次耐压值有所提升。



图 7 50212 隔离开关盆式绝缘子沿面闪络

2.3 故障原因分析

耐压试验过程中,故障集中在隔离开关的盆式绝缘子凹面侧(动触头侧)沿面闪络;解体后发现有一些盆式绝缘子表面有黑色细小颗粒物残留,因此初步怀疑杂质颗粒物是导致盆式绝缘子沿面闪络的主要原因。

为寻找杂质颗粒物的来源,现场对更换后的 A 相 50232 隔离开关、B 相 50212 隔离开关分别操作 50 次后发现动触头侧的盆式绝缘子凹面和隔离开关导体表面有微小的黑色颗粒物,如图 8 所示。

将盆式绝缘子沿面闪络后其表面的细小颗粒物和操作 50 次后的颗粒物均进行成分分析化验,分析

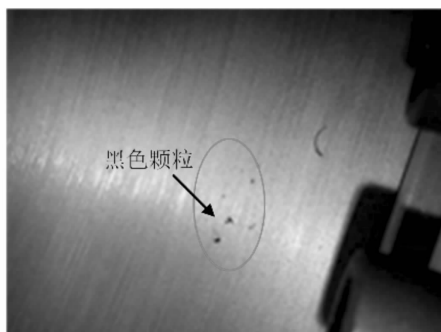


图8 隔离开关操作后产生的颗粒物

发现,沿面闪络后其表面的细小颗粒物和更换后A相50232、B相50212隔离开关操作50次后其盆式绝缘子表面的多个颗粒物成分基本相同。

其主要成分分析结果为:颗粒物中铜、钨原子占比分别达到50%和30%,铜钨合金是触头的常用材料;并且含有少量的Ag成分,这应是触头表面的镀银层,因此颗粒物极有可能是隔离开关操作时触头摩擦或其表面有毛刺产生的。

上述A相50232、B相50212的盆式绝缘子(动触头侧)凹面的颗粒物为触头、触头镀银层、涂层加铝合金等材料,因此其来源应该是闸刀、地刀动静触头的表面毛刺通过分合闸等操作磨损产生的颗粒,这些颗粒一方面可通过屏蔽罩与动触头间的缝隙而落入盆式绝缘子表面;另一方面由于颗粒很小,重量很轻,能够随动静触头分合闸瞬间产生的气流而漂浮至屏蔽罩外,最后因重力而落入盆式绝缘子表面。

当微小的杂质颗粒物存在于盆式绝缘子表面时,它一方面会改变盆式绝缘子的表面电阻分布;另一方面可使局部电场强化,在盆式绝缘子上产生微弱的局部电晕放电或沿面放电。在绝缘子表面积聚起表面电荷,不仅畸变了盆式绝缘子的表面电场,还为沿面放电提供其通道发展所需的电荷,易于放电通道的发展贯穿,导致沿面闪络。

另外,隔离开关动触头侧盆式绝缘子凹面是垂直向上布置,类似于收集皿,因此颗粒物易于直接掉入盆式绝缘子凹面中心,而盆子凹面中心处的电场不均匀且其电场强度最大,因此凹面向上的盆式绝缘子更易引起沿面闪络。

3 结论与建议

500 kV GIS交流耐压试验,采用超声局部放电在线监测系统进行放电故障定位,精确查找到2处绝缘闪络部位,有效提高了故障定位效率并且节省

了故障处理时间。2处绝缘闪络部位均位于隔离开关动触头侧水平盆式绝缘子的凹面。通过分析可知,应该是由隔离开关在现场安装过程中质量把控不严以及隔离开关在操作过程中导体和触头的摩擦产生金属颗粒,金属颗粒等杂质掉落在水平盆式绝缘子凹面高电场强度处引起电场畸变从而导致沿面闪络放电。

因此建议GIS生产厂家和安装单位:

1)在GIS设计时应尽量避免水平布置并且凹面朝上结构的盆式绝缘子;

2)GIS在户外安装时应使用防尘、防潮安装棚,保持足够的清洁度,严防外界颗粒物进入GIS腔体;

3)现场安装时应检查隔离开关等设备触头有无毛刺,触头镀银层工艺是否可靠,动静触头接触面积及接触摩擦是否均匀合适,建议现场做完机械特性试验后再次开盖清理后方满足耐压条件。

参考文献

- [1] 金李鸣. 550 kV GIS现场交流耐压试验和放电故障分析[J]. 浙江电力, 2006, 25(2): 19-21.
- [2] 贾志杰, 陈少卿, 陈洪波, 等. 超声波局部放电检测在GIS耐压试验的应用[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 29-32.
- [3] 邱昌容, 王陵. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 72-74.
- [5] 黎大健, 杨景刚, 米楚明, 等. 基于超声波信号的GIS内自由金属颗粒危险评估研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 53-57.
- [6] 颜湘莲, 王承玉, 杨韧, 等. 应用SF₆气体分解产物的高压开关设备故障诊断[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 118-123.
- [7] 刘永, 印华, 姚强, 等. 气体分析技术在GIS故障定位和故障类型判断中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 132-134.
- [8] 杨波, 王慧君. GIS盆式绝缘子表面自由金属颗粒缺陷导致局部放电的发展过程[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 73-77.
- [9] 徐敏骅, 吴晓春, 陆振华. GIS局部放电检测与定位技术的现场应用[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1086-1089.
- [10] 肖燕, 郁惟镛. GIS中局部放电在线监测研究的现状与展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 47-49.

作者简介:

邱 炜(1985), 工学硕士、工程师, 主要从事高电压试验、技术监督工作。

(收稿日期: 2016-06-01)

电气设备在线监测系统动态误差来源分析方法

吴 华¹,甘德刚²,陈 彬³,梁 星¹,龚金龙⁴

- (1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123;
- 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072;
- 3. 国网天津市电力公司电力科学研究院,天津 300384;
- 4. 国网浙江省电力公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘 要:运用动态测试误差建模理论,对电气设备在线监测系统的误差特性以及误差来源进行分析。针对傅里叶变换、小波变换等方法在分解动态测量误差时存在的不足,提出经验模态分解法与 Fisher 距离判别算法相结合的方法。首先,利用经验模态分解法对测量误差信号进行自适应分解;其次,提取每条分解子曲线的时域自相关、互相关以及频域特征信息,构建特征空间;最后,引入 Fisher 距离判据对构建的特征空间进行分类,最终确定每条误差分解子曲线的来源。为验证所提方法的有效性,对超高频局部放电监测系统开展附加误差实验,并用所提方法对系统的总误差信号进行分解与溯源。结果表明,该方法能够有效地追溯到误差产生的源头,具有较强的适用性和可靠性。

关键词:动态误差分解;经验模态分解;Fisher 判别法;误差来源分析

Abstract:On the basis of the dynamic testing error modeling theory, the characteristics and source of the dynamic testing error are analyzed for on – line monitoring system of electrical equipment. Aiming at the disadvantages of Fourier transform and wavelet transform in dynamic measurement error, a new method combining empirical mode decomposition (EMD) with Fisher discriminant analysis method is put forward for dynamic measurement error decomposition. First of all, EMD method is used for adaptive measuring error signal decomposition. Then, the time domain auto – correlation, cross – correlation and frequency domain characteristic information of the decomposed intrinsic mode function (IMFs) are extracted, and the feature space is constructed. Finally, the Fisher distance criterion is introduced to classify the feature space and determine the source of each decomposed IMF. In order to verify the effectiveness of the proposed method, the additional error experiments are carried out on the UHF partial discharge monitoring system, and the proposed method is used to decompose the total error signal of the system. Experiment results show that the proposed method can effectively find the source of the error, and it is highly feasible and applicable.

Key words:dynamic error decomposition; empirical mode decomposition; Fisher discriminant analysis method; error source analysis

中图分类号:TP2 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0071 – 07

0 引 言

随着社会经济和科技的迅猛发展,电力作为经济发展和社会生活必不可少的能源,其安全稳定运行对国计民生的影响越来越大,保证其供电可靠性对于整个国计民生而言十分重要。作为电力系统重要组成部分的电气设备,尤其是大型高电压设备,如果发生突发性停电事故,势必造成巨大的经济损失和不良的社会影响^[1-2]。因此,为电力设备,特别是大型高电压设备加装在线监测和状态检修装置,有

利于及时发现其存在的不良状况,并制定科学策略进行相应的检修维护,可大大降低其突发性故障概率,这对电力系统安全稳定运行具有重要意义。截至 2013 年年底,国家电网 28 家省电力公司装用的变电设备在线监测装置已逾 3 万套,但实际运行状况统计数据反映出如下问题:1)测量数据不准确、误报率高;2)监测设备故障率高、寿命短、维护工作量大。综上所述,应针对该类装置的附加误差来源做深入研究,找出系统中可能造成误差的因素,为制定改善精度的措施提供依据。

对于在线监测装置的误差溯源,是要根据输出

结果中的误差,追溯其产生的源头,即测量系统内部实际包含的各误差源,是误差及精度理论的逆向问题。动态误差溯源的理论^[3]由合肥工业大学费业泰教授等提出,是在前人研究正向误差理论的基础上,深入研究测试系统内部组成结构与信息传递关系,可以在系统的运行状态下确定误差源,并运用全系统动态精度理论^[4-6]。这里在动态误差基础上引入经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)^[7-9]对系统误差进行分解,并根据分解误差与原始误差的特性利用 Fisher 距离判别法^[9-11]进行误差溯源,从而可以精确定位电气设备在线监测装置中存在问题的模块,为在线监测装置的检定与维修提供理论支持。

1 动态测试误差建模方法分析

动态误差溯源建立在全系统动态精度理论的基础上,尽可能将“黑箱”白化或者灰化,进而弥补传统误差建模方法的不足。根据全系统传递链函数及误差的“白化”模型,将系统最后输出的总误差分解为各单项误差,进一步追溯到动态测试系统内部产生该项误差的模块,并分析其误差特性。一旦实现了误差来源分析,对测试系统的传输特性就有了深刻的了解,由此可掌握系统各环节误差对其输出总误差的影响及其随时间的变化规律,并对系统的各个功能模块有较为清楚的认识。

全系统动态误差建模理论,是从系统内部各组成单元结构的误差以及外部干扰因素着手,来得到整个系统的误差传递关系。对于一个完整的监测系统,不论其监测对象、运行环境还是工作方式,一般都应包括以下 5 个组成部分:信号耦合部分、信号预处理部分、信号采集部分、数据传输部分和数据处理部分。因此,可以建立如图 1 所示的监测系统动态测量结构示意图。

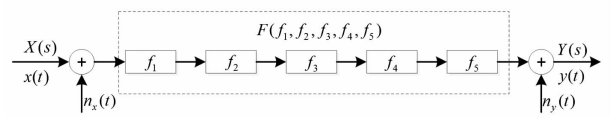


图 1 全系统动态测量系统结构

从图 1 中所示的动态测量系统可知它由 5 个单元组成,各单元构成串联的关系。根据全系统动态精度理论的建模原理^[12],整个系统的传递链函数可表示为

$$F(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) = f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 \tag{1}$$

式中, $f_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 为各单元传递函数。

从图 1 中可以看出,测量系统除了其本身内部各组成单元引起的误差外,还有系统受到内外干扰引起的误差,此时系统总的误差传输“白化”模型即全系统动态精度模型为

$$e_y(t) = n_x(t) F(f_i) + e_F + n_y(t) \tag{2}$$

式中: $e_y(t)$ 为系统输出总误差; $n_x(t)$ 为输入端受到的干扰信号; $n_y(t)$ 为输出端受到的干扰信号; e_F 为系统内部各个组成单元误差引起的系统输出总误差。 e_F 经“白化”后可表示为

$$e_F = ((e_1(t)f_2 + e_2(t))f_3 + e_3(t))f_4 + e_4(t)f_5 + e_5(t) \tag{3}$$

式中, $e_i(t)$ 为各单元误差,其中包含各单元本身的误差及其受到的干扰, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

由式(2)和式(3)可知动态监测系统总体误差是各单元部件误差 $e_i(t)$ 和传递函数 f_i 综合作用的结果,不同元器件、不同系统、不同传递链结构都会产生不同的误差影响。以上的动态误差模型反映了各部分误差在整个系统中的传播规律,揭示了测量精度的本质。

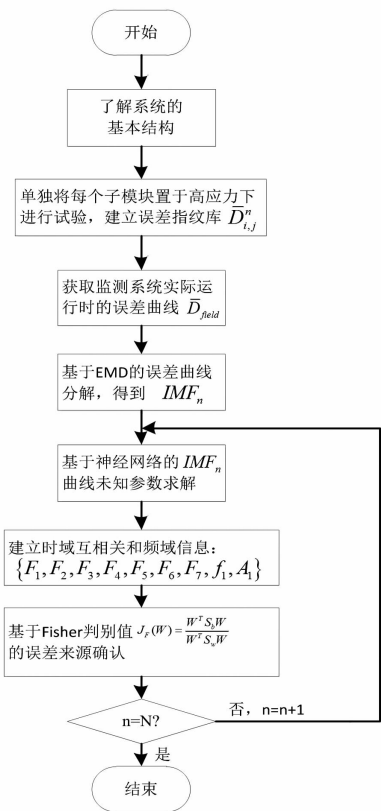


图 2 误差来源分析的一般步骤

针对不同的电气设备状态检修装置,所需要的工作就是要分析各单元部分的误差建模以及各单元全系统误差建模中的传递链函数。经过系统的“白化”建模将整个系统分为不同的子模块,单独将每个子模块置于高应力条件下,由此可获得系统各个模块的误差特性,基于此对实际运行时测量得到的全系统精度损失曲线进行 EMD 分解,提取各分解子曲线中的特征信息后,可以根据神经网络和 Fisher 距离判别法进行误差溯源。误差来源分析步骤如图 2 所示。

2 基于 EMD 法的误差分解

实际中,随着监测系统的使用,系统内电气元件、机械结构老化等导致其内部各主要结构单元的几何形状、物理特性发生变化,从而使得信号经测量系统传递后失真,最终引起输出误差的不断增大,测量系统的精度不断降低。因此,对系统动态误差的研究也即为对精度损失的研究。

近年来,许多学者对动态测量误差的分解与溯源进行了深入研究,提出了熵分解^[13]、神经网络^[14]、傅里叶变换和小波变换^[15]等方法。但是,以上方法在运用时都有一定的局限性,采用熵分解法时,无法给出具体的误差只能反应系统不确定度;傅里叶变换适合于分解平稳信号,无法分解非平稳的动态测量误差信号;神经网络与小波变换的算法构造复杂,且神经网络对网络设计以及初值选取有很高要求;而小波变换中不同的小波基会导致不同的分解结果。所提方法是将经验模态分解和 Fisher 距离判别法进行结合,避免了小波神经网络分解时需提前选取小波基函数的问题且缩短了溯源时间。

EMD 是由美国宇航局的黄鹄博士提出的一种根据数据自身的时间尺度特性进行分解的方法,能自适应地生成固有模态函数,即 IMF。由 EMD 分解出来的固有模态函数必须满足以下两个条件:

- 1)在整个数据序列中,极值点和过零点的数目必须相等或最多相差 1 个;
- 2)在任意时间点上,信号局部极大值确定的上包络线和局部极小值确定的下包络线的均值为 0。

EMD 对信号 $x(t)$ 的分解过程如图 3 所示。

- 1)设 $r_0(t) = x(t)$,确定 $r_0(t)$ 的局部极大值点

和极小值点,通过 3 次样条插值函数将极大值与极小值连接起来,确定上下包络线,计算出 2 条包络线的平均值 $m_1(t)$ 。

2)计算出 $h_1(t) = r_0(t) - m_1(t)$,若满足终止条件,则 $c_1(t) = h_1(t)$;若不满足终止条件,则将 $h_1(t)$ 视为待处理信号,重复以上步骤,这就是“筛过程”。为保证 IMF 分量的频率调制和幅度调制都有意义,黄鹄等人提出通过限制标准差 SD 来停止“筛过程”,SD 的值常取 0.2~0.3 之间,其表达式为

$$S_{SD} = \frac{\sum_0^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_0^T |h_{k-1}(t)|^2}$$

(4)

若经过 k 次筛选后, $h_k(t)$ 满足终止条件,则 $h_k(t)$ 为第 1 个 IMF 分量,记作 $c_1(t)$ 。

3) 设 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$,则 $r_1(t)$ 为 $x(t)$ 去掉高频分量后的信号,将 $r_1(t)$ 视为新的待处理信号,跳至步骤 1) 重复进行图 3 中的步骤,依次得到 $c_2(t), c_3(t), \dots$,若 n 次后, $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 满足终止条件时分解终止,则分解结果可表示为

$$x(t) = \sum_i^n c_i(t) + r_n(t)$$

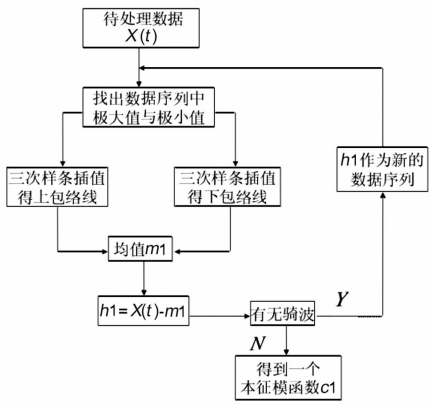


图 3 经验模态法流程图

经验模态分解作为一种自适应时间-频率信号分析方法问世以来,已被各领域学者成功地用于处理各种问题。上述方法分解出来的各特征分量,即可视为系统中各子模块产生的误差经系统传递到输出端的结果。因此,对各分解子曲线中包含的特征信息进行提取和辨识,以便进行误差溯源。

3 利用 Fisher 距离判别算法确认误差来源

经过经验模态法可以提取出各误差信息,但各误差的来源还无法确定,还需建立分解误差与

白化建模中原始误差的关联算式。由于时域互相关函数及其衍生出的特征量能够有效反映出两列时序信号的相关程度,已经被广泛应用于信号时域波形的关联性分析中;同时,大量文献指出系统中不同部件产生的误差频域特征也不尽相同;因此,所提方法结合时域互相关特征和频域特征,组成用于误差信息关联的特征子空间。具体算法如式(5)~式(12)所示。

$$A_{XY}(m) \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} X_{n+m} X_n \\ A_{XY}(-m) \end{cases} \tag{5}$$

$$F_1 = \text{Maximum value of sequence}(A_{n_{\max}}) \tag{6}$$

$$F_2 = \frac{\sum_{n=-N}^N n A_n}{A_{n_{\max}}} \tag{7}$$

$$F_3 = \frac{\sum_{n=-N}^N n A_n}{\sum_{n=-N}^N A_n} \tag{8}$$

$$F_4 = \frac{\sum_{n=-N}^N |n| A_n}{\sum_{n=-N}^N A_n} \tag{9}$$

$$F_5 = \frac{\sum_{n=-N}^N n^2 A_n}{\sum_{n=-N}^N A_n} \tag{10}$$

$$F_6 = \sum_{n=-N}^N \frac{A_n}{N(2N+1)} \tag{11}$$

$$F_7 = \sqrt{\frac{\sum_{n=-N}^N (A_n - F_6)^2}{(2N+1)}} \tag{12}$$

式中: $A_{XY}(m)$ 是序列的互相关函数; $F_1 \sim F_7$ 为基于自相关函数的特征参量; F_1 为自相关序列的最大值; F_2 表示序列的等效宽度; F_3 表示序列的中心; F_4 为序列的绝对值中心; F_5 表示序列的均方根宽度; F_6 代表序列均值; F_7 为序列的标准差。

频域特征量包括:第 1 主峰频率即频谱中最大值所处频率 f_1 和第 1 主峰幅值即频谱中的最大值 A_1 。

$F_1 \sim F_7, f_1$ 和 A_1 9 个参量构成了反映分解子曲线与原始误差曲线之间相关性的特征参量。在获取上述特征参量后,按以下步骤完成误差来源辨识。

1) 计算每条分解子曲线的自相关函数特征

$$\begin{aligned} auto_n = \{ & F_{1,auto}, F_{2,auto}, F_{3,auto}, F_{4,auto}, F_{5,auto}, \\ & F_{6,auto}, F_{7,auto}, f_{1,auto}, A_{1,auto} \} \\ & n = 1, 2, \cdots, N \end{aligned} \tag{13}$$

以及每条子曲线与原始误差曲线的互相关函数特征:

$$\begin{aligned} cross_{n,m} = \{ & F_{1,cross}, F_{2,cross}, F_{3,cross}, F_{4,cross}, F_{5,cross}, \\ & F_{6,cross}, F_{7,cross}, f_{1,cross}, A_{1,cross} \} \\ & n = 1, 2, \cdots, N; m = 1, 2, \cdots, M \end{aligned} \tag{14}$$

以上两式中, N, M 分别代表分解子曲线的个数以及原始误差曲线的个数。

2) 分别计算 $auto_n$ 与 $cross_{n,1}, cross_{n,2}, cross_{n,3}, \cdots, cross_{n,M}$ 之间的 Fisher 判别值,取原始误差曲线中使得 Fisher 判别值最大的一类作为该条分解子曲线 n 的误差来源。Fisher 判别值的计算公式为

$$J_F(W) = \frac{W^T S_b W}{W^T S_w W} \tag{15}$$

式中, S_b, S_w 分别为样本类间离散度和样本类内离散度,各自的计算公式为

$$S_b = (m_1 - m_2)(m_1 - m_2)^T, S_w = S_1 + S_2 \tag{16}$$

$$S_i = \sum_{X \in w_i} (X - m_i)(X - m_i)^T, m_i = \frac{1}{N} \sum_{X \in w_i} X \tag{17}$$

基于此判决办法可以确定分解得到的每一种误差曲线在先验数据库中所对应的误差来源,较好地实现误差溯源。

4 超高频局部放电监测系统动态误差分析

选取超高频局部放电监测系统作为实验对象,此系统可分为:信号采集部分、信号传输部分和信号处理部分,分别记为: a_1, a_2, a_3 。由于到每个子模块的误差最终会传递到输出结果的误差中,且整套系统的输出总误差是各子模块的噪声传递到输出端后的简单相加,因此完全可采用分别将子模块单独置于特定的测试环境中,让系统的传递特性隐含在其输出误差中。实验步骤可分为以下两步。

1) 步骤一:将需要测试的子部分放入试验箱内,其余部分按正常位置处于室温中;依据 GB/T 2423.2 将试验箱温度调控到试验规定的温度上限 +10℃,使试验样品温度达到稳定;当箱内温度达规定值时,对样品加电进行测试记录。

开始记录 48 h 内系统的输出数据,记为

$$D_{i,j}^n, i = a_1, a_2, a_3, j = b_1, b_2, b_3, b_4, n = 1, 2 \tag{18}$$

因此,试验共将收集到如下 24 组数据集:

$$D = \left\{ \begin{matrix} D_{a_1,b_1}^1 & D_{a_1,b_2}^1 & D_{a_1,b_3}^1 & D_{a_1,b_4}^1 & D_{a_2,b_1}^1 & D_{a_2,b_2}^1 & D_{a_2,b_3}^1 & D_{a_2,b_4}^1 & D_{a_3,b_1}^1 & D_{a_3,b_2}^1 & D_{a_3,b_3}^1 & D_{a_3,b_4}^1 \\ D_{a_1,b_1}^2 & D_{a_1,b_2}^2 & D_{a_1,b_3}^2 & D_{a_1,b_4}^2 & D_{a_2,b_1}^2 & D_{a_2,b_2}^2 & D_{a_2,b_3}^2 & D_{a_2,b_4}^2 & D_{a_3,b_1}^2 & D_{a_3,b_2}^2 & D_{a_3,b_3}^2 & D_{a_3,b_4}^2 \end{matrix} \right\} \quad (19)$$

2)步骤二:同时将同一型号同一批次的相同监测系统置于和步骤一相同的正常室温下,静置 1 h 后,记录其 48 h 内系统的输出数据 D_{normal} ,然后用式(19)中的每组数据集减去此步骤中收集的参考数据集,得到式(20)所示的误差指纹库。

$$\bar{D} = \left\{ \begin{matrix} \bar{D}_{a_1,b_1}^1 & \bar{D}_{a_1,b_2}^1 & \bar{D}_{a_1,b_3}^1 & \bar{D}_{a_1,b_4}^1 & \bar{D}_{a_2,b_1}^1 & \bar{D}_{a_2,b_2}^1 \\ \bar{D}_{a_1,b_1}^2 & \bar{D}_{a_1,b_2}^2 & \bar{D}_{a_1,b_3}^2 & \bar{D}_{a_1,b_4}^2 & \bar{D}_{a_2,b_1}^2 & \bar{D}_{a_2,b_2}^2 \\ \bar{D}_{a_2,b_2}^1 & \bar{D}_{a_2,b_3}^1 & \bar{D}_{a_2,b_4}^1 & \bar{D}_{a_3,b_1}^1 & \bar{D}_{a_3,b_2}^1 & \bar{D}_{a_3,b_3}^1 \\ \bar{D}_{a_2,b_3}^2 & \bar{D}_{a_2,b_4}^2 & \bar{D}_{a_3,b_1}^2 & \bar{D}_{a_3,b_2}^2 & \bar{D}_{a_3,b_3}^2 & \bar{D}_{a_3,b_4}^2 \end{matrix} \right\}$$

$$\bar{D}_{i,j}^n = |D_{i,j}^n - D_{normal}| \quad (20)$$

将实验所得数据进行分析:

1)首先从电网运营部门获得所测试的同类型监测系统在现场环境下收集到的 48 h 内输出数据集,记为 D_{field} ,再减去步骤二中的正常数据集,得到现场运行环境下的系统总误差曲线为

$$\bar{D}_{field} = |D_{field} - D_{normal}| \quad (21)$$

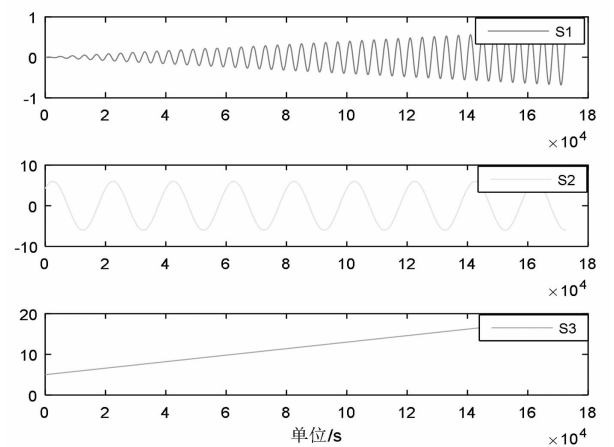


图 4 各子模块精度损失曲线

图 4 为各子模块的精度换失曲线,图中:S1 为将信号传输模块单独置于上述试验环境下得到的典型精度损失曲线;S2 为将信号处理模块单独置于上述试验环境下得到的典型精度损失曲线;S3 为将信号采集模块单独置于上述试验环境下得到的典型精度损失曲线。

2)将整套超高频局部放电装置置于上述试验环境下得到典型精度损失曲线,如图 5 所示。

3)对系统总精度损失曲线进行 EMD 分解,如图 6 所示。

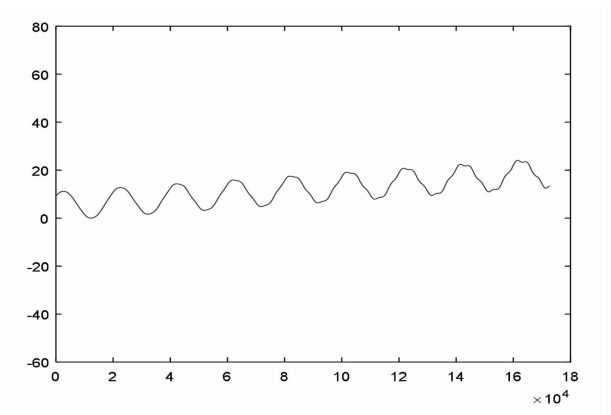
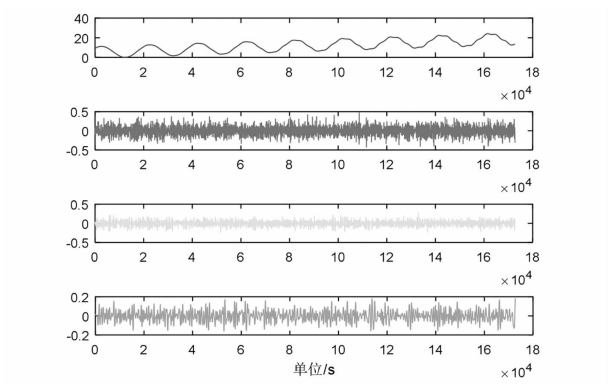
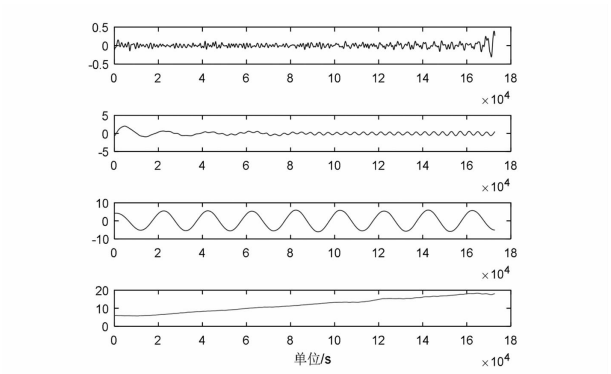


图 5 系统总精度损失曲线



(a) 原信号及 IMF₁ ~ IMF₃



(b) IMF₄ ~ IMF₆ 及余项

图 6 系统总精度损失曲线图的 EMD 分解

显然,IMF₁ ~ IMF₄ 都为高频噪声项,可不用考虑。而剩下的 IMF₅、IMF₆ 以及余项可借助于神经网络拟合方法来得到其解析表达式为

$$\begin{aligned} \text{IMF}_5 &: 0.4 \times 10^{-5} t \sin(1/2000 \pi t) \\ \text{IMF}_6 &: 6 \sin(1/10000 \pi t + \pi/4) \\ \text{residue} &: 8 \times 10^{-5} t + 5 \end{aligned} \quad (22)$$

4)特征量计算

基于时域自相关和互相关函数的特征参数计算以及频域特征参数计算,结果如表 1 所示,其中: $auto_n$

表 1 基于时域自相关和互相关函数的特征参数计算

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
$auto_5(\times 10^3)$	0.171 3	-0.000 0	-0.000 0	-1.666 6	0.000 0 + 1.68i	0.000 3	0.027 6
$auto_6(\times 10^3)$	1.031 6	-0.000 0	-0.000 0	-4.049 9	1.836 5	0.000 2	0.421 0
$auto_7(\times 10^3)$	1.217 6	0.000 0	0.000 0	0.896 3	1.108 9	0.549 6	0.360 4
$cross_{1,5}(\times 10^3)$	0.168 0	-2.983 6	3.142 6	3.303 0	2.995 6	-0.000 0	0.057 6
$cross_{2,5}(\times 10^3)$	0.198 4	-0.076 0	-0.011 1	-1.817 6	0.000 0 + 1.81i	0.000 2	0.091 1
$cross_{3,5}(\times 10^6)$	0.000 1	1.785 5	0.002 2	0.001 9	0.002 0	0.000 0	0.000 0
$cross_{1,6}(\times 10^4)$	0.001 3	-1.359 0	0.131 0	0.155 8	0.197 8	-0.000 0	0.000 5
$cross_{2,6}(\times 10^3)$	1.213 6	-1.693 2	-1.844 0	-4.868 2	1.793 6	0.000 2	0.499 8
$cross_{3,6}(\times 10^5)$	0.000 7	3.475 9	0.004 0	0.013 0	0.015 7	0.000 1	0.000 2
$cross_{1,7}(\times 10^5)$	0.000 1	-6.518 2	0.009 2	0.011 7	0.014 0	-0.000 0	0.000 0
$cross_{2,7}(\times 10^6)$	0.000 1	-1.539 2	-0.002 2	0.001 8	0.001 9	0.000 0	0.000 0
$cross_{3,7}(\times 10^4)$	0.124 9	1.666 3	0.000 6	0.089 6	0.110 8	0.056 3	0.037 0

为第 n 条 EMD 分解子曲线的自相关函数特征;
 $cross_{m,n}$ 为第 m 条误差指纹库曲线与第 n 条子曲线
互相关函数特征。

5) 基于 Fisher 距离判决算法进行误差来源识
别。IMF₅ 的自相关函数特征值以及 IMF₅ 分别
与 S1、S2、S3 的互相关函数的特征值在三维图
中的展示如图 7 所示(只取前 3 个特征即 F_1 、 F_2 、 F_3 作
图)。

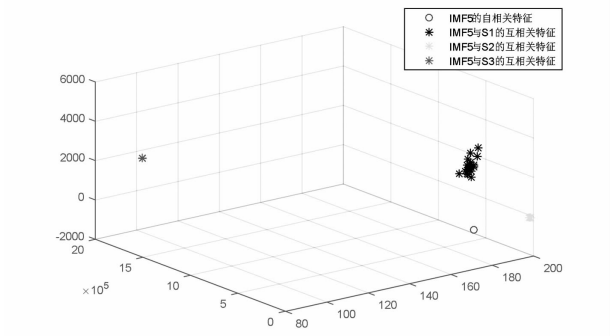


图 7 IMF₅ 的自相关特征值以及 S1、S2、S3 的互相关特征

IMF₆ 的自相关函数特征值以及 IMF₆ 分别
与 S1、S2、S3 的互相关函数的特征值在三维图
中的展示如图 8 所示(只取前 3 个特征即 F_1 、 F_2 、 F_3
作图)。

残差项的自相关函数特征值以及残差项分别
与 S1、S2、S3 的互相关函数的特征值在三维图
中的展示如图 9 所示(只取前 3 个特征即 F_1 、 F_2 、 F_3
作图)。

经过上述步骤的计算以及辨识,从表 1、图 7 ~

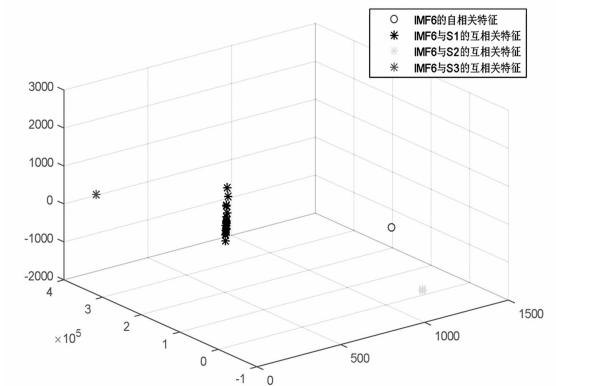


图 8 IMF₆ 的自相关特征值以及 S1、S2、S3 的互相关特征

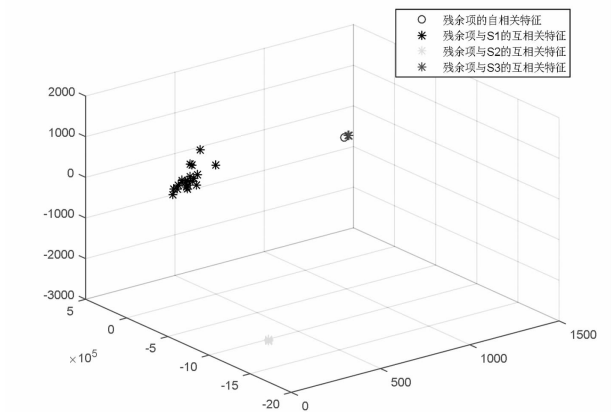


图 9 残差项自相关特征值以及 S1、S2、S3 的互相关特征

图 9 可以比较直观地看出经过 EMD 分解后的系
统误差子曲线与误差指纹库中的曲线有比较明显
的对应关系,即:

IMF₅ 对应 S1,也即 IMF₅ 所显示的误差来源
于信号传输模块;IMF₆ 对应 S2,也即 IMF₆ 所
显示的误差来源于信号处理模块;残差项对应 S3,
也即残差

项所显示的误差来源于信号采集模块。

图 10 显示了 IMF₅、IMF₆ 和残差项的拟合曲线与误差指纹库中相应曲线的对应关系,也表明了所提方法的有效性。

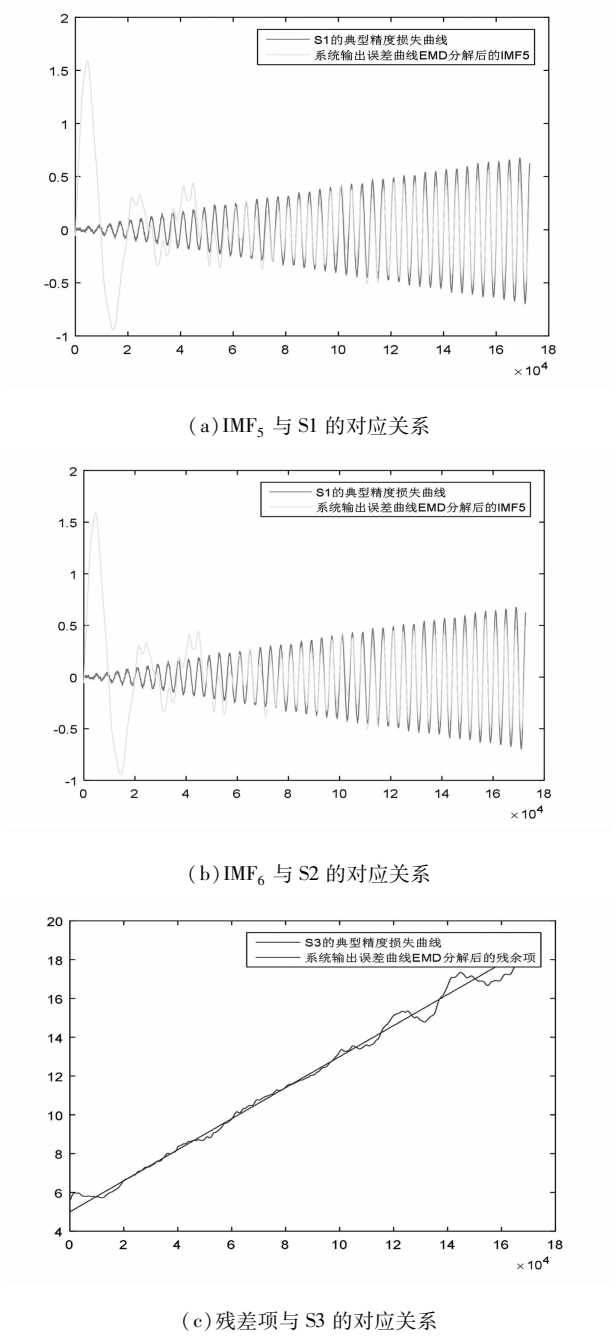


图 10 IMF₅、IMF₆ 和残差项的拟合曲线与误差指纹库中相应曲线

5 结 论

首先建立变电设备在线监测装置的动态误差模型,并提出基于经验模态法和 Fisher 距离判别算法相结合的误差溯源方法,从超高频动态误差影响因

素与建模的结果来看,动态误差建模理论用于电力系统中状态监测设备具有良好的效果:运用经验模态法进行误差分解,可以高效地从总系统误差中提取出有效误差因子;基于 Fisher 距离判别算法的误差溯源可以良好地进行误差溯源。所提研究方法为电力系统在线监测设备的实时通电误差分析提供理论与技术依据。

参考文献

[1] 姚勇,岳彦峰,黄兴泉. GIS 超高频/超声波局放检测方法的现场应用[J]. 高电压技术,2008(2): 422 – 424.

[2] 刘颖,郭小凯,方义治. GIS 特高频局放在线监测技术的应用[J]. 高压电器,2013(5): 128 – 133.

[3] 许桢英,费业泰,陈晓怀. 动态精度理论研究与发展[J]. 仪器仪表学报,2001(s2): 70 – 71.

[4] 许桢英. 动态测量系统误差溯源与精度损失诊断的理论与方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.

[5] 李晓惠. 动态测量误差分解及溯源研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.

[6] 苏文胜,王奉涛,张志新. EMD 降噪和谱峭度法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击,2010(3): 18 – 21.

[7] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[8] 张杨,刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自动化设备,2011(12): 86 – 91.

[9] 程正东,章毓晋,樊祥. 常用 Fisher 判别函数的判别矩阵研究[J]. 自动化学报,2010(10): 1361 – 1370.

[10] 杨健,杨静宇,叶晖. Fisher 线性鉴别分析的理论研究及其应用[J]. 自动化学报,2003(04): 481 – 493.

[11] 孙志军,薛磊,许阳明. 基于深度学习的边际 Fisher 分析特征提取算法[J]. 电子与信息学报,2013(04): 805 – 811.

[12] 费业泰. 论全系统动态测试精度理论的研究[J]. 合肥工业大学学报,2000,23(1): 6 – 9.

[13] 李龙根,徐静,吕秀丽. 测量与控制系统动态误差溯源熵方法[J]. 机电产品开发与创新,2005,8(6): 115 – 135.

[14] 马强,许桢英. 动态测量误差溯源方法研究[J]. 安徽机电学院学报,2001,16(4): 22 – 25.

[15] 许桢英,费业泰. 基于小波神经网络的动态测试误差溯源研究[J]. 农业机械学报,2003,34(4): 117 – 119.

(收稿日期:2016 – 07 – 18)

高压交流输变电工程电磁环境影响探讨

廖 磊¹,严 青¹,佟如意²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610041;2. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:根据交流输变电工程的频率特征解释了工频电场、工频磁场的产生机理及影响因素,列举了国内外多个组织机构对工频电场强度、工频磁感应强度标准限值的规定,进一步明确了中国电磁环境控制标准的安全性。通过对中国交流输变电设施的调查,表明中国变电站、输电线路产生的工频电场强度、工频磁感应强度均满足相应标准要求。根据国际权威机构的评估结论,没有足够的证据表明极低频场与癌症、流行性疾病等存在强烈关联性。

关键词:交流;输变电;工频;电场强度;磁感应强度

Abstract:According to the frequency characteristics of AC transmission and transformation project, the theory and influencing factors of power frequency electric field and power frequency magnetic field are explained. Moreover, the different limitations of power frequency electric field intensity and power frequency magnetic introduction intensity from several organizations at home and abroad are listed to further specify the security of Chinese limitations. The investigations of AC transmission and transformation facilities show that power frequency electric field intensity and power frequency magnetic introduction intensity of domestic substations and transmission lines are under the limitations. And according to the assessments by international authority, there is no intense correlation between extremely low frequency field and the diseases such as cancer and epidemics.

Key words:AC; power transmission and transformation; power frequency; electric field intensity; magnetic introduction intensity

中图分类号:TM752 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2016)05-0078-04

0 引 言

近年来,随着城市用电负荷日益增加,导致 110 kV、220 kV 及以上电压等级的输变电设施开始逐步出现在居民集中区,对周围居民工作和生活产生了一定程度的干扰,由此导致的居民投诉事件日益增多。随着电压等级逐渐提高,电磁环境问题已成为制约电网发展的重要因素^[1]。为解决日益冲突的矛盾,需引导公众对输变电工程产生的电磁环境影响进行科学的解释和客观的认知。

1 交流输变电工程频率特征

在中国及世界上大部分国家,交流电力系统频率采用 50 Hz,也有部分国家采用 60 Hz(如美国),属于极低频率(ELF,0~300 Hz)范畴,因此在电力或动力领域中,通常将 50 Hz(或 60 Hz)频率称为电源工作频率,即工频。相较雷达、卫星通信、微波炉

等高频领域,工频电力设施波长长达 6 000 km,远大于变电站和输电线路长度,因此变电站和输电线路无法形成有效的能量辐射。

2 工频电场、工频磁场特性

2.1 工频电场

1)工频电场产生机理

当电气设备接通电源后,便与周围空间存在电压差,从而导致工频电场产生,采用一定方向上单位距离的电位差来度量,即工频电场强度,单位为 V/m 或 kV/m。

2)工频电场强度影响因素

变电站站内的工频电场主要受断路器、电流互感器等电气设备的影响,但是受到围墙的屏蔽作用,站内工频电场衰减较快,站外工频电场主要受进出线路影响。

单回输电线路周围的工频电场强度与电压等级、导线参数(包括导线直径、导线分裂数和分裂间

距等)、塔型结构、架设高度^[2]等因素有关,当多回路输电线路同塔架设或平行架设时,工频电场强度还与其相序排列情况有关。

一般情况下,工频电场强度随着电压等级升高、导线直径增大、导线分裂数增加、分裂间距增大而增大。

通常,对于地面上同一观测点,输电线路产生的工频电场强度随线路距离地面高度的增加而降低,且不同架设高度线路的工频电场强度在水平方向上的变化规律一致,即在边导线投影附近达到最大值后,随着距边导线投影距离增大逐渐呈指数型减小^[3]。

对于单回线路,其他参数一致时,比较正三角排列、倒三角排列、水平排列三种架线型式产生的工频电场强度,其最大值及高场强区的范围从大到小依次为水平排列、正三角排列、倒三角排列。对于同塔双回线路,6 种架设方式中以逆相序排列的工频电场强度最小,相较同相序排列降低 35%,且在两相导线间存在明显的低峰峰值。

2.2 工频磁场

1)工频磁场产生机理

当电气设备工作或运转时,其间流过的交流电随着方向转换在周围空间产生感应磁场,该磁场在周围单位面积介质中产生的磁通量即为工频磁感应强度,单位为 T(一般采用 mT 或 μT)。

2)工频磁感应强度影响因素

变电站站内的工频磁场主要受高压电抗器等电气设备的影响,但是受到围墙的屏蔽作用,站内工频磁场衰减较快,站外工频磁场主要受进出线路影响。

单回输电线路周围的工频磁感应强度与电压等级、运行电流、塔型结构、架设高度等因素有关,当多回路输电线路同塔架设或平行架设时,工频磁感应强度还与其相序排列情况有关。

一般情况下,工频磁感应强度随着电压等级、运行电流升高而增大。

与工频电场强度变化趋势一致,输电线路产生的工频磁感应强度随线路距地面高度增加而降低,且不同架设高度线路的工频磁感应强度在水平方向上的变化规律一致,即在边导线投影附近达到最大值后,随着距边导线投影距离增大逐渐呈指数型减小。

2.3 工频电场与工频磁场的相互关系

根据麦克斯韦方程式描述的宏观电磁现象,只有在高频率、远场区域,才存在由于电场变化导致的感应磁场及磁场变化导致的感应电场,此时电场和

磁场相互作用和耦合,形成了动态电磁场,并以电磁波的形势向前传递能量^[4]。而根据中国交流输变电设施的工频特性,在其近场区域内工频电场和工频磁场分别存在、分别作用,是一种稳场或缓变场^[5],不存在电场与磁场的相互耦合与加强,无法形成电磁波能量传递形式,因此也不存在有效的能量辐射。

3 工频电场与工频磁场执行标准

《环境影响评价技术导则 输变电工程》(HJ 24-2014)及《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014)中对中国交流输变电工程中的工频电场强度和工频磁感应强度公众曝露控制限值作了相应规定,与其他区域或组织采用的限值标准比较情况见表 1。

表 1 中国与其他区域或组织采用的工频电场强度、工频磁感应强度公众曝露控制限值对照表(50 Hz)

标准名称	工频电场强度 /(kV · m ⁻¹)	工频磁感应强度 /μT
《电磁环境控制限值》 (GB 8702-2014)(中国)	4	100
国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则(1988)	5	100
欧洲共同体法规 (1999/519/EC)	5	100
英国国家辐射防护委员会 NRPB 建议(1999)	12	1 600
日本产业卫生 学会标准(2002)	5	100

上述标准均获得 WHO(世界卫生组织)等权威机构的认可,中国采用的标准相较于其他区域或组织更严格,表明中国的工频电场强度、工频磁感应强度公众曝露控制限值更加安全、可靠。

4 中国交流输变电设施的工频电磁场

本次对中国已经投运的部分 110 kV、220 kV、500 kV 等电压等级的变电站和输电线路(位于居民区)产生的工频电场与工频磁场进行调查,调查结果见表 2,其中某 110 kV 变电站站界外工频电场强度、工频磁感应强度随距围墙的距离变化情况分别见图 1、图 2,某 220 kV 同塔双回输电线路的工频电场强度、工频磁感应强度随距线路中心线距离、导线对地高度的变化情况见图 3。

表 2 中国典型变电站和输电线路的工频电场与工频磁场调查结果

项 目	电压等级/kV	工频电场强度/(kV·m ⁻¹)	工频磁感应强度/μT
变电站站界最大值	110	$5.57 \times 10^{-2} \sim 1.13$	$5.30 \times 10^{-5} \sim 1.1583 \times 10^{-3}$
	220	$1 \times 10^{-3} \sim 1.710$	$8.47 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-3}$
	500	$6 \times 10^{-3} \sim 1.802$	$7.41 \times 10^{-5} \sim 3.156 \times 10^{-3}$
输电线路线下最大值	110	$4.438 \times 10^{-2} \sim 7.009 \times 10^{-1}$	$5.3 \times 10^{-5} \sim 2.65 \times 10^{-4}$
	220	$9.3 \times 10^{-2} \sim 1.948$	$9.8 \times 10^{-5} \sim 5.19 \times 10^{-4}$
	500	$1.10 \times 10^{-1} \sim 2.733$	$1.80 \times 10^{-4} \sim 1.718 \times 10^{-3}$

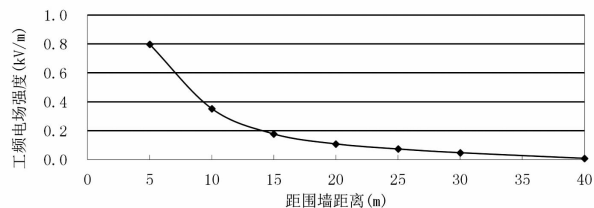


图 1 某 110 kV 变电站站界外工频电场强度随距围墙的距离变化情况

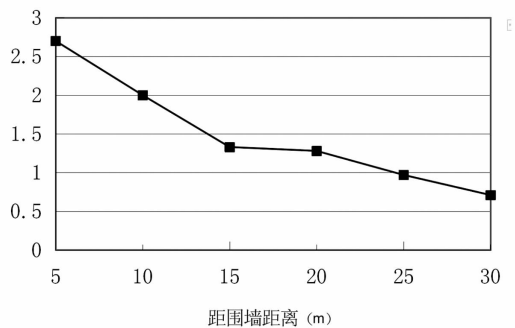


图 2 某 110 kV 变电站站界外工频磁感应强度随距围墙的距离变化情况

由表 2 可知,中国各电压等级的变电站站界及输电线路下方(位于居民区)的工频电场强度、工频磁感应强度均满足《电磁环境控制限值》中的相关规定。这是基于两个方面的原因:其一是各电压等级的变电站均可通过采取合理布置站内导线相序、安装电气设备接地装置等措施降低电磁环境影响,使得站界的工频电场强度、工频磁感应强度满足标准要求;其二是 110 kV 电压等级的输电线路产生的电磁环境影响较小,往往采用《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545 - 2010)中的最低导线高度即可使线下的工频电场强度、工频磁感应强度满足居民区的标准要求;而对于 220 kV、500 kV 电压等级的输电线路来说,若采用规程中的最低导线高度则会导致线下的工频电场强度、工频磁感应强度超标,基于工频电场强度、工频磁感应强度随着导线对地高度增加而减小的变化趋势(见图 3),因此需要提升导线对地高度,直至工频电场强度、工

频磁感应强度满足居民区的标准要求。

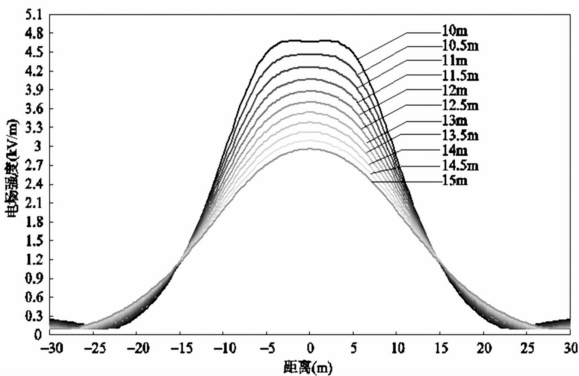


图 3 某 220 kV 同塔双回输电线路的工频电场强度、工频磁感应强度随距线路中心线距离的变化情况

由图 1、图 2 可知,变电站外工频电场强度、工频磁感应强度均随距变电站围墙距离增加而降低,由图 3 可知,输电线路附近工频电场强度、工频磁感应强度均随距输电线路边导线投影距离增加呈指数型降低,鉴于上述工频电场、磁场的衰减理论,同时考虑到周围树木、建筑物等因素的屏蔽作用,因此在输变电设施附近居民点处的工频电场强度、工频磁感应强度也满足《电磁环境控制限值》中的相关规定。

此外对于 220 kV、500 kV 线路,在无居民分布区域,往往不会抬升导线架设高度,但是对工频电场强度、工频磁感应强度超过上述标准的区域会划定电磁环境影响防护区域,在该区域内禁止新建构筑物,以最大限度地保护附近居民。

5 高压交流输变电设施的危害分析

近年来,随着公众意识的增强,社会各界对输变电设施对人体健康影响的关注度也逐渐提高,对此,WHO 开展了“国际电磁场计划”工作框架^[6],对 EMF(电场、磁场、电磁场)进行健康风险评估。根据评估结论,交流输变电设施产生的极低频场在人

体中只会引起微弱的感应电流^[7],而没有相关证据表明会对机体的生物分析及DNA造成直接损伤,对于极低频场与个别流行性疾病之间的微弱关联并不能排除其他原因。同时,IRAC(国际肿瘤研究机构)、NRPB(英国国家辐射防护委员会)等机构的研究表明^[8],未找到成人居所或职业性暴露到极低频场对任何癌症有增加危险的一致性结论,而且对观察到的儿童期白血病危险增加与居所极低频场暴露增加间的联系,没能建立起科学的解释。NIEHS(美国国家环境卫生科学研究所)将与致癌性相关的证据强度分为足够、有限、不足、缺乏的致癌性证据四类,将支持其评估的机理和体外证据分为弱、中、强三个等级。针对流行性病学与极低频场暴露关系的研究最终评估结论表明,对各种健康观察终点的评估证据均属于有限和不足的,对磁场强度低于100 μT 的毒理学研究或基因突变率研究,支持度均属于弱支持,因此不支持工频电场、工频磁场存在累积效应或长期影响的假设^[9]。

综上,交流输变电设施产生的工频电场、工频磁场属于极低频场,没有足够的证据表明其与癌症、流行性疾病等存在强烈关联性,因此针对其对人体健康影响的担忧缺乏依据,国内外相关导则标准对保护公众健康的安全性也是毋庸置疑的。但是针对公众对环境问题敏感性日益增强这一趋势,WHO强调应在全球范围内对不确定性风险采取预防政策^[10],将电磁环境控制标准建立在防止已确认的危害基础上。预防政策主要包括预防性原则、谨慎回避、合理达到尽可能低三个方面,预防政策的实质内涵体现在:

1) 预防政策应建立在对风险与危害正确评估基础上,对健康风险的科学评估结论不应因采用任何预防性政策而被破坏;

2) 公众暴露控制限值应建立在预防已知的健康危害基础上,以科学为依据的公众暴露控制限值不应因采用任何预防性政策而被破坏;

3) 对健康风险是否采取适当的预防性措施应根据风险与危害的大小,进行采取行动或不采取行动的效益-费用分析方法确定。

6 结 论

针对中国交流输变电设施的频率特征及其产生

的工频电场、工频磁场特性进行了研究,研究结论如下:

1) 中国交流输变电工程采用工频50Hz,属于极低频率范畴;

2) 工频电场、磁场的影响因素较多,其量度分别为工频电场强度、工频磁感应强度,不存在有效的能量辐射;

3) 中国采用的标准相较于其他区域或组织更严格、安全、可靠;

4) 中国各电压等级的输变电设施在设施位置及附近居民处产生的工频电场强度、工频磁感应强度均满足相关标准规定;

5) 根据国际权威机构的评估结论,没有足够的证据表明极低频场与癌症、流行性疾病等存在强烈关联性,但是针对公众对环境问题敏感性日益增强这一趋势,应在全球范围内对不确定性风险采取预防政策。

参考文献

- [1] 肖冬萍,姜克儒,张占龙,等. 工频电磁环境条件约束下的超/特高压输电线路结构布局寻优方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2333-2341.
- [2] 孙自安,姚金雄,吕娜,等. 输电线路工频电磁场环境研究[J]. 陕西电力,2015,43(4):88-91.
- [3] 邵方殷. 220 kV~500 kV 输电线路跨越和邻近住宅时的工频磁场[C]. 中国电机工程学会输电电气四届二次学术年会论文集,2002.
- [4] 倪光正,等. 工程电磁学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [5] 杨宪章,邹玲,樊亚东,等. 工程电磁场[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 世界卫生组织(WHO). 制定以健康为基础的EMF标准的框架[M]. 瑞士:世界卫生组织,2006.
- [7] 世界卫生组织(WHO). 电磁场和公众健康—生物系统中的物理性质和影响[OL]. 1998.
- [8] ELF Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer. Doc NRPB,12,2001.
- [9] NIEHS Working Group Report. Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields[OL]. Minnesota: NIEHS,1998,6.
- [10] 世界卫生组织(WHO). 电磁场和公众健康——警戒性政策[OL]. 2000.

(收稿日期:2016-07-16)

基于时间戳的时间信号自适应辨识与解析

温丽丽¹, 张国芳¹, 彭 昊¹, 陈 艳²

(1. 国网四川省电力公司电力调度控制中心, 四川 成都 610041;
2. 成都引众数字设备有限公司, 四川 成都 610299)

摘 要:在时间同步监测装置中, 需要对 IRIG - B (DC)、PPS、PPM、PPH、DCF77 和时间串口报文等时间信号进行采集处理。通常 IRIG - B (DC)、PPS、PPM、PPH、DCF77 采用硬件逻辑电路接收处理, 而时间串口报文信息的接收需要借助串口通信模块, 并需对串口通信模块进行参数设置。因此, 采用了一种基于时间戳的时钟信号处理方式, 在 FPGA 上对这类时间信号进行统一采集处理, 提取时间信号特征量对各种时间信号进行自适应识别与解析, 简化了装置的硬件结构。同时, 还可以根据时间戳对时间信号的准确度和稳定度进行评价。

关键词:时间同步监测; 时间戳; 信号辨识; 时间特征量

Abstract: In time synchronization monitoring device, the acquisition and processing for IRIG - B (DC), PPS, PPM, PPH, DCF77, time serial message and other time signal need to be carried out. Typically, IRIG - B (DC), PPS, PPM, PPH, DCF77 receive the processing using hardware logic circuit, and the processing received by time information serial message needs to use serial communication module which should set parameters for serial communication module. Therefore, the clock signal processing method based on timestamp is adopted to deal with this kind of time signals on FPGA and extract time signal feature quantity to do the adaptive identification and analysis for various time signals, which simplifies hardware structure of the device. At the same time, it can analyze the accuracy and stability of time signal according to the timestamp.

Key words: time synchronization monitoring; timestamp; signal recognition; time feature quantity

中图分类号: TN919 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954 (2016) 05 - 0082 - 04

0 引 言

电力系统中反应系统运行工况的电气参数, 都与时间参数相关, 时间参数的品质影响着系统中实时数据采集与测量的精度, 也影响着后续的电网高级应用的结果。电网安全稳定运行要求全网中的电力自动化设备与各种信息管理系统都基于统一的时间基准运行。目前, 国内的电网主要通过电厂、变电站和调度所建立 GPS 接收站, 在卫星时标的驱动下建立全网统一时间同步。接收到的 GPS 时间信号又通过多种方式众多电网业务提供统一的时间基准, 各种电网对时间同步的精度要求也不尽相同^[1]。因而, 对于电力系统中的时间授时与被授时装置, 需要按照装置对时间同步准确度要求进行分类监测与管理^[2-3]。随着智能变电站在电力系统中的日益普及, 电网中各个装置间的同步运行就越来越依赖于时间同步系统, 而对时间同步系统的监测与管理已经纳入到电力系统各级调度中心的监控范

围, 其信息也已经成为确保电网安全稳定运行, 对时间参数进行调节的重要依据。

在国内已有的时间同步监测系统中, 实时监测的数据主要包括时钟 NTP 数据、时钟状态数据、通信服务器 NTP 数据和测控装置 SOE 数据等^[4], 然而, 在现场实际应用中, 电力自动化装置多以脉冲、时间编码和串口报文等方式进行对时, 时间信号具有多样性的特点。作为时间同步监测系统前端的信号采集监测装置, 必须具备对各种时间信号直接进行采集及识别分析的能力。这里介绍了一种基于时间戳的时间信号特征量提取技术, 来实现对包括时间串口报文在内的信号统一采集与自动识别解析的方法。这不仅实现了对时间信号的直接采集, 让时间同步信号的接入简单化、灵活化, 还提高了信号解析处理的可靠性。

1 基于时间戳的处理方案

通常时间同步监测装置以固定接口和固定解码

器的方式对信号进行采集处理,不利于多路不确定信号接入的情况,并且,对时间串口报文信号需要预先进行波特率等参数配置,才能正确接收及解码,在现场应用中不够灵活、方便。要克服上述缺点,就必须将信号解析通用化,最直接的办法是利用现场可编程门阵列(FPGA)对信号的每个跳变沿打上时间戳,然后将时间戳序列通过报文发送给主板中央处理器(CPU),由 CPU 进行信号辨识及时间信息解析。基于时间戳的信号处理方案有利于简化接口板设计,可以方便地扩展重组为时间信号检测仪(便携式、手持式、虚拟仪器式)等设备。

FPGA 的时间戳生成器速率可达 125 MHz,时间戳的最小分辨率为 8 ns,满足电力系统中对任何一种时间信号的监测精度。CPU 依据时间戳序列提取出电平、脉宽和频率等特征量,再利用信号模型算法库进行信号匹配分析,自动辨识出信号类型。CPU 也可依据高精度的时间戳信息,对时间信号的信号输出精度、误码率、稳定度等信息进行统计,实现对时间信号品质监测。

2 信号特征量的提取

FPGA 除了打时间戳外,还需要标识出跳变沿的变化状态,“0”表示从高电平变到低电平,“1”表示从低电平变到高电平。这样,依据时间序列排序的时间戳与电平状态信息,经过时差计算,就可以将信号波形各个脉冲的周期、脉冲宽度等信号特征量提取出来,如图 1 所示,可以按式(1)~式(3)进行计算。

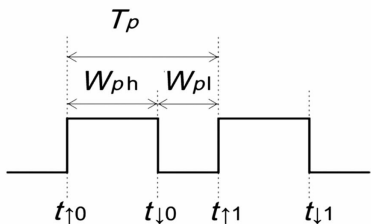


图 1 时钟信号还原示意图

1) 脉冲周期

$$T_p = t_{\uparrow 1} - t_{\down 0} \tag{1}$$

式中: $t_{\uparrow 1}$ 为连续的相邻两个脉冲间,后一个脉冲上升沿时戳; $t_{\down 0}$ 为连续的相邻两个脉冲间,前一个脉冲上升沿时戳。

2) 脉冲高电平宽度

$$W_{ph} = t_{\down 0} - t_{\uparrow 0} \tag{2}$$

式中: $t_{\down 0}$ 为同一个脉冲的下降沿时戳; $t_{\uparrow 0}$ 为同一个脉冲的上升沿时戳。

3) 脉冲低电平宽度

$$W_{pl} = t_{\uparrow 1} - t_{\down 0} \tag{3}$$

式中: $t_{\uparrow 1}$ 为连续的相邻两个脉冲间,后一个脉冲上升沿时戳; $t_{\down 0}$ 为连续的相邻两个脉冲间,前一个脉冲下降沿时戳。

3 时间信号自动识别与解析

对于已经被反演出来的波形信号,软件程序可以通过对其脉冲周期、脉冲宽度及脉冲序列进行特征分析,自动判别出信号类型;再通过每一种信号的对应编码方式,解析并提取出时钟信号所携带的时钟信息,实现信息的采集。

3.1 各类时间信号的信号特征

1) IRIG-B(DC)的信号特征

IRIG-B 时码信号是美国靶场仪器组(Inter Range Instrumentation Group)的串行时间码,每秒 1 帧,包含 100 个码元信息的波形,每个码元周期是固定值 10 ms。利用 3 个特定宽度的脉冲表示码元,其中:2 ms 脉宽表示二进制“0”码元;5 ms 脉宽表示二进制“1”码元;8 ms 脉宽表示分隔标志“P”码元。连续两个“P”码元中的后一个码元上升沿为整秒基准标志^[5]。

2) PPS、PPM、PPH 的信号特征

秒脉冲(PPS)、分脉冲(PPM)和时脉冲(PPH)分别是在整秒、整分、整时的准时沿发生跳变的单脉冲信号。一般脉冲宽度在 10 ms 到 200 ms 之间,根据时钟装置的类型不同而异。

3) DCF77 的信号特征

DCF77 时钟信号是以 1 min 为单位的帧,1 整帧里,从第 20 s 到第 58 s 为止含有以二进制十进数(BCD)格式编码的时间信息,第 59 s 无信号以代表一个新帧的起始。

4) 时间串口报文的信号特性

时间串口报文就是,每秒 1 帧,带有时间编码信息的串行信号,传输速率可为:300、600、1 200、

2 400、4 800、9 600、19 200 bps,通常为 9 600 bps。

表 1 时钟信号特征对比

类型	信号周期	脉冲周期	高电平脉宽
IRIG - B(DC)	1 s	10 ms	2 ms、5 ms、8 ms
PPS	1 s	1 s	10 ~ 200 ms
PPM	1 min	1 min	10 ~ 200 ms
PPH	1 h	1 h	10 ~ 200 ms
DCF77	1 min	1 s	100 ms、200 ms
MSG	1 s	不确定	不确定(与传输波特率相关)

通过以上的信号特征分析,可总结出各个时钟信号的异同点,如表 1 所示。

3.2 信号类型的判别

在了解了各类时钟信号的信号特征之后,软件程序可通过对信号变位周期和脉冲宽度的异同,来判别时钟信号的类型。判别条件如下:

- 1)以 2 ms、5 ms、8 ms 脉冲宽度变化交替或连续出现的,为 IRIG - B(DC);
- 2)上升沿每秒出现 1 次,且累计 40 个以上的脉冲,脉冲高电平宽度无变化,为秒脉冲;
- 3)上升沿每秒出现 1 次,且累计 40 个以上的脉冲,脉冲高电平宽度有变化,且为 100 ms、200 ms2 种脉宽交替出现的,为 DCF77;
- 4)上升沿每分钟出现 1 次的,为分脉冲;
- 5)上升沿每小时出现 1 次的,为时脉冲;
- 6)变位周期比 B 码密集,且周期是固定几个值的,即信号呈现 300、600、1 200、2 400、4 800、9 600、19 200 bps 波特率特征的,为报文类型;
- 7)其余为未知信号。

3.3 时间信号的解析

3.3.1 IRIG - B(DC)的时间信息

IRIG - B(DC)的时钟信息包含两部分:1)起始脉冲秒准时沿,即连续两个 8 ms 脉宽基准标志脉冲的第二个脉冲上升沿时间戳;2)100 个码元信息,即帧结构中包含的起始标志、秒(个位)、分隔标志、秒(十位)、基准标志、分(个位)、分隔标志、分(十位)、基准标志、时(个位)、分隔标志、时(十位)、基准标志、自当年元旦开始的天(个位)、分隔标志、天(十位)、基准标志、天(百位)(前面各数均为 BCD 码)、7 个控制码(在特殊使用场合定义)、自当天 0 时整开始的秒数(为纯二进制整数)、结束标志^[6]。

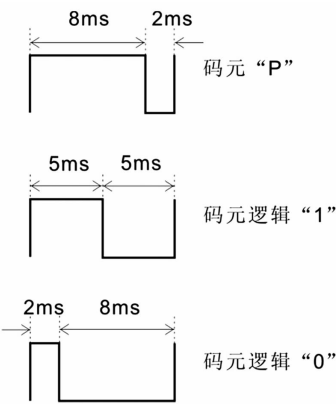


图 2 B 码码元示意图

CPU 连续不断地获得一组时间戳,计算脉冲宽度,依靠图 2 中给出的 B 码码元特征,根据脉冲宽度来判别出码元类型。在这样一组码元中,可能是一帧信号的一部分,也可能是多帧信号的组合,所以,每取一个时间戳都要进行一次数据解码分析^[7]。首先,通过查找连续两个“P”码元来判断帧的起始;检查收到起始帧标识 P0Pr 时间戳后,将每一码元位值存入 B 码的位元数组中,数组深度为 100,并开始位计数;当收满 81 个码元位后,即可根据 B 码的编码标准进行本帧数据解析。如果某次报文收到的码元位不够 81 位,则等收齐后再进行解析。实际处理时,可以对收到的数据进行逐位流水处理。IRIG - B 软件解码流程处理如图 3 所示。

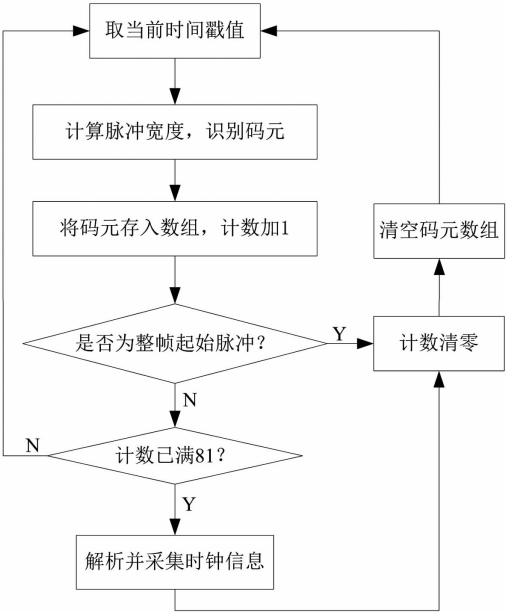


图 3 IRIG - B 软件解码处理流程

3.3.2 PPS、PPM、PPH 的时间信息

对于已经判定出信号类型的 PPS、PPM 和 PPH 脉冲信号,可直接提取该脉冲的准时沿时间戳作为

该脉冲信号所携带的时钟信息。

3.3.3 DCF77 的时间信息

DCF77 的时间编码包含以 1 min 为单位的帧,第 59 s 无信号以代表一个新帧的起始。一整帧里,从第 20 s 到第 58 s 为止含有以 BCD 格式编码的时间资讯包括:时、分、日期、星期、年、月和 3 个校验位 P1、P2 和 P3;另外,编码里也含有 5 个特殊位:R (代表备用发射塔在启动)、A1 (代表夏令时的预告位)、Z1 (夏令时为 200 ms,冬令时为 100 ms)、Z2 (冬令时为 200 ms,夏令时为 100 ms) 及 A2 (闰秒通知位)。这些特殊位都在第 15 s 和第 19 s 之间发出。

对 DCF77 信号的解析处理可以按照 IRIG - B 的方法进行操作,与 IRIG - B 信号不同的是,DCF77 以 100 ms 脉冲宽度的脉冲表示逻辑“0”,以 200 ms 脉冲宽度的脉冲表示逻辑“1”;另外,DCF77 的位元数组深度为 60。

3.3.4 串口报文的时间信息

串口对时报文中所带的时间信息包含两部分:
1) 报文首字节起始位边沿时间与整秒沿时间对齐。
2) 报文内容包含:年、月、日、时、分、秒日期时间信息。而时间频率串口报文除时间、日期之外,还包括频率信息,频率值精确到万分位。另外,也可包含用户指定的其他特殊内容,如时间基准标志、GPS 卫星锁定状态、接收 GPS 卫星数、告警信号等。对串口对时报文的监测就必需是捕捉每秒报文首字节的边沿时间,同时与报文内容中解析得到的时间相比对,计算出两者间的误差,即为串口对时报文的误差。

对于一个类型未知的输入信号,需要借助脉冲周期与波特率两个信号特征量来判定是否为串口报文类型。其中,信号脉冲周期可以根据式(1)的方法计算得出,而信号传输波特率则需要另外判定。目前,传统的波特率自动识别方法有 3 种^[7]:

- 1) 波特率穷举法,即波特率从 300 ~ 19 200 bps 逐一进行设置,尝试接收特定字节,直到正确接收为止。利用这个方法检测波特率速度较慢,在串口报文接收的过程中出现波特率改变的情况,将不能自动进行波特率重新识别。
- 2) 码元宽度实时检测法,即串口发送特定的 0x80H 报文,接收方实时检测并测量该 1 位码元的宽度,再根据码元宽度来计算波特率。这个方法需要串口报文的发送方发送特定值进行配合,实际应用存在局限性。

3) 最大公约数法,即实时检测并收集串口报文的任意码元宽度,根据一段时间内收集到的码元宽度值来求取码元的最大公约数,然后用该值来计算波特率。该方法对待测系统发送的数据没有特殊要求即可实现波特率识别,且保证了波特率识别的有效性和可靠性,也易于通过软件设计来实现。因此,项目中采用了检测计算最大公约数法来实现对串口报文传输波特率的自动识别。

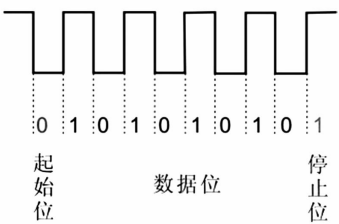


图 4 串口位(0x55)示意图

利用获取的波特率将信号的高、低电平转换成“1”、“0”位表。串行通信多采用 8 位二进制表示 1 个字节,加上 1 个起始位“0”和 1 个停止位“1”,共 10 位,如图 4 所示。如果有校验位则是 11 位。

根据以下 3 个特征可以将一串位表转换成一组 8 位串行通信数据:1) 长时间停止位之后是一帧串口报文位表;2) 起始位、停止位必须成对的出现在每个 8 位(无校验)或 9 位(有校验)位表首尾位置;3) 2 个长时间停止位之间的位表可以构成一完整帧,无多余位。利用上述 3 个特征处理后,可以将串口位信息转换为字节帧信息,然后,依据时间串口报文格式可解析得到串口报文内容中所携带的时间数据。

4 应用与性能测试

所提出的基于时间戳的时间信号辨识与解析技术已经成功应用于国网四川省电力公司时间同步监测系统的监测装置中,该系统由时间同步管理系统、省调时间同步监测装置、地调时间同步监测装置和变电站时间同步监测装置组成。省调、地调、变电站时间同步监测装置分别监测所在地时间同步系统及被授时设备时间同步状态、精度等信息,并上传到时间同步管理系统。该系统通过了国网四川省电力公司电力科学研究院的测试,依据 DL / T 1100.1 - 2009《电力系统的时间同步系统》、GB/T 26866 -

(下转第 94 页)

四川电网线损管理中的三率差异性分析

贺星棋,周 桦,鲜其军,戴松灵
(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:线损率指标是反映电网企业综合管理水平的经济技术指标,对于电网企业降损增效具有重要意义。当前,同时并存着统计、理论和财务线损率三种线损率指标,为厘清三者异同,以统计线损率为纽带,对上述线损三率的差异进行了比较分析,指出了造成线损三率差异的关键因素,并对三率的适用范围给出相应建议。

关键词:线损率;财务线损;理论线损;差异性分析

Abstract: Line loss rate is an economic and technical index which can reflect the integrated management level and is of vital importance for reducing loss and increasing efficiency of power grid companies. At present, the statistic, theoretical and financial line loss rates are all used in the analysis. In order to clarify the differences among these three line loss rates, the differences are compared and analyzed based on statistic line loss rate, and the key factors which cause the differences are pointed out. Finally, the relevant suggestions for the application of the statistic, theoretical and financial line loss rates are given.

Key words: line loss rate; financial line loss rate; theoretical line loss rate; difference analysis

中图分类号:TM731 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)05-0086-04

0 引 言

当前,在电网企业管理中,存在着多种线损率指标口径:统计线损率、理论线损率和财务线损率。其中,理论线损率是指根据电网的结构参数和运行参数,运用电工原理和电学中的理论,对电网元件中的理论线损电量及其所占比例进行计算所得的结果,主要通过与统计线损率的比较,用于指导降损节能;统计线损率是根据电能表的读数计算出来的物理发生的线损率,是当前线损管理的考核依据^[1-2];财务线损率是根据电厂上网电量、购电量和售电量的决算金额,应用统计学的余量法计算出的线损率。

线损率是一个动态指标,其大小决定于电网结构、运行方式和管理水平等诸多因素。在日常的线损分析中,经常会出现理论线损率、统计线损率和财务线损率间存在较大差异,给电网运行经济性评估和效益计算造成较大障碍。这里以四川电网为分析目标,以 2015 年相关统计数据为基础,以统计线损率为纽带,对上述线损三率的差异进行了比较分析,分别厘清了影响线损三率的关键因素,对于提升线损分析管理水平具有重要参考意义。

1 四川电网线损三率概述

1.1 理论线损率

选取 2015 年 7 月 29 日作为负荷实测代表日。负荷实测范围包括四川省电力公司管辖的各个电压等级电网(包括低压配电网),负荷实测 0~23 点正点电力电量数据。含过网电量的计算结果如表 1 所示,其中全网总线损率为 3.19%。

不含过网电量的全网总线损率为 5.94%,其中 500 kV 电网线损率为 3.26%,220 kV 电网线损率为 0.67%。

1.2 统计线损率

2015 年,四川电网统计供电量为 1 741.52 亿 kW·h,售电量为 1 578.36 亿 kW·h,统计综合线损率为 9.37%。

1.3 财务线损率

2015 年,四川电网财务决算供电量为 1 980.97 亿 kW·h,财务决算售电量为 1 854.13 亿 kW·h,财务综合线损率为 6.4%。

2 统计线损率和理论线损率差异性分析

2015 年各电压等级理论线损率与统计线损率

表 1 代表日全网线损理论计算结果

电压等级	供电量 /(MW·h)	损失电量/(MW·h)						线损率 /%
		线路	变压器		站用电量	其他	合计	
			铜损	铁损				
全网	1 229 784.43	28 941.58	3 291.36	5 124.11	1 094.99	827.94	39 279.98	3.19
500 kV	864 639.34	8 587.63	376.30	381.94	0.00	377.78	9 723.65	1.12
220 kV	762 826.75	3 433.85	731.22	948.79	6.77	0.00	5 120.63	0.67
110 kV	515 509.97	2 318.94	764.24	1 099.35	14.52	0.52	4 197.56	0.81
35 kV	137 127.91	1 634.86	204.04	262.75	102.14	86.72	2 290.51	1.67
10 kV 及以下	349 375.44	5 187.55	1 215.56	2 431.28	971.56	362.92	17 947.63	5.14

表 2 2015 年分压线损理论计算情况对比表

电压等级	全网	500 kV	220 kV	110 kV	35 kV	10 kV 及以下
理论线损率/%	3.19	1.12	0.67	0.81	1.67	5.14
统计线损率/%	5.59	1.01	1.34	1.66	2.43	10.29
差值/%	2.4	-0.11	0.67	0.85	0.76	5.15

对比情况见表 2。

由表 2 可见,除 500 kV 外,四川电网其余各电压等级理论线损计算值均低于统计线损值,分析如下:

1)7 月,四川电网 500 kV 分压统计线损率为 1.01%,较实测日理论线损率低 0.11 个百分点。主要是由于 7 月中下旬后,省内气温逐渐升高,制冷负荷逐渐释放,国调统调机组满发,分别经特高压直流、500 kV 德宝直流及川渝联络线输电线路送出,过网电量巨大。统计线损率表示的是 7 月份 31 天的一个平均水平,而实测日当天四川省内发、用电负荷均创历史新高,500 kV 电网运行状态更加接近极限,因此,造成理论线损率高于统计线损率。

2)7 月,四川电网 220 kV、110 kV 分压统计线损率分别为 1.34%、1.66%,较实测日理论线损率分别高 0.67、0.85 个百分点。主要是由于实测日当天发、用电量构成与 7 月整体构成差异较大所致。实测日 220 kV、110 kV 无损电量占比分别为 4.33%、12.48%,而 7 月分压线损统计中 220 kV、110 kV 无损电量占比分别为 2.61%、10.74%,均低于实测日水平。同时,实测日当天水电、火电开机方式均较大,火电日电量达到 10 154.7 万 kW·h,是 7 月火电平均日电量的 1.88 倍,水电电量为 7 月水电平均日电量的 1.13 倍,总体来看,火电在实测日当天开机方式更大,更有利于有功功率和无功功率实现就地平衡、减少功率的不经济流动,从而降低输电损耗。在考虑以上因素的情况下,两者之间的差异基本符合实际情况。

3)7 月,四川电网 35 kV 分压统计线损率为 2.43%,较实测日理论线损率高 0.76 个百分点。主

要是由于实测日当天 35 kV 无损电量占比为 15.56%,而 7 月分压统计中 35 kV 无损电量占比仅为 11.44%,低于实测日水平,同时,考虑到售电量统计时差等因素,两者之间的差异基本符合实际情况。

4)10 kV 及以下统计线损率远高于代表日理论线损率,两者的差值达到 5.15 个百分点。这主要是由于气候变化导致的时差电量增加以及理论线损计算中采样点不全面所致。7 月,四川全省普遍进入高温湿热天气状态,尤其是 7 月中下旬以来,气温节节高升,空调降温负荷快速增长。但受供、售电量抄表时间影响(四川低压售电量抄表时间为每月 1 日~15 日,而供电量则为每月 25 日 24 点冻结数),部分 7 月中下旬降温负荷产生电量未抄回,导致供、售电量统计数据时差影响被放大,造成统计线损率偏高。加之 7 月广元等地区调整低压用户抄表例日,提前抄表,更进一步减少了当月统计售电量,推高了中低压配网线损率。同时,在负荷实测中,基于当前智能电表覆盖的现状,四川电网选择了约 5% 的公变台区进行了负荷实测。从台区实际供电半径分布情况看,四川电网低压配电网基础仍显薄弱,供电半径 >400 m 的台区占比超过 50%,达到 53.32%。但在负荷实测中,供电半径 <150 m 的台区数量占比高于此类台区占比,因此,导致 10 kV 及以下理论线损率计算结果偏低。

综上所述,对于统计线损率和理论线损率之间的差异,主要是由于统计范围不同和影响因素不同造成。在统计范围上,统计线损率是对一个时间段的供电量差异情况进行统计分析,周期一般为 1 个月,反映的是统计周期的平均水平,覆盖了多种运

行方式;而理论线损率是对一个时间“点”,一般为 1 天,进行技术损耗的理论计算,反映的是一个“点”的电网经济性,只包含一种电网运行方式。而电网又是一个时变的动态系统,两者在时间尺度上的差异就决定了统计线损率和理论线损率在数值上的不同;在受外部因素影响上,统计线损率受管理因素,如供、售电量的差错;计量漏洞;抄表制度;抄表日期的变动等外部因素影响巨大,而理论线损率则不受抄表因素,供、售电量抄录不同期等因素影响,只反映负荷实测日当天的电网运行经济性。

3 统计线损率和财务线损率差异性分析

2015 年,四川电网财务决算供售电量与生产统计报表的供售电量差异见表 3。

2015 年,四川电网统计综合线损率、财务综合线损率相差 2.97 个百分点,两者差异见表 4。

表 3 统计、财务供售电量差异表 (单位:亿 kW·h)

项 目	统计	财务	差值
供电量	1 741.52	1 980.97	-239.45
其中:母公司	1 532.87	1 497.47	35.4
子公司	621.49	625.43	-3.94
母、子公司互供电量	412.84	416.67	-3.83
售电量	1 578.36	1 854.13	-275.77
其中:母公司	1 412.69	1 412.68	0.01
子公司	578.51	578.74	-0.23
母、子公司互售电量	412.84	412.03	0.81
售省外电量	274.69	274.74	-0.05

在售电量方面,2015 年四川电网决算售电量为 1 854.13 亿 kW·h,生产统计报表售电量为 1 578.36 亿 kW·h,相差 275.77 亿 kW·h。其中,决算电量除包含省内售电量外,还包含 274.74 亿 kW·h 售省外电量,而统计售电量则只含省内售电量。扣除售省外电量因素后,财务口径线损率为 7.43%,售电量为 1 579.39 亿 kW·h,较统计售电量多 1.03 亿 kW·h。主要是由于财务决算的子公司售电量统计范围不同(生产统计中含若尔盖公司,财务决算不含若尔盖公司),以及母公司、子公司互售电量统计方式与生产统计不同(生产统计为关口表示数,财务决算为发票电量)所造成。

供电量方面,决算电量扣除售省外电量后,为

1 706.23 亿 kW·h,较统计供电量少 35.29 亿 kW·h。其中,母公司统计供电量较决算供电量高 35.4 亿 kW·h,子公司统计电量较决算电量少 3.94 亿 kW·h。经分析,主要是由于供电量统计中的电量构成不同以及母公司、子公司互供电量统计中财务、生产统计范围不同造成:

1)供电量构成不同:生产统计中的供电量根据关口电量统计,通过电厂上网电量和省外输入电量,以及输出省外电量计算得到,包含特高压输电送出电量在四川电网 500 kV 主网中传输产生的损失电量和电厂试运行期间的调试电量;财务决算供电量则是根据发票电量来统计,不含特高压送出电量在四川电网产生的损耗。2015 年,溪洛渡、向家坝、锦屏等国调统调电厂在四川电网 500 kV 输电损耗及新投产电厂调试电量共计 31.685 亿 kW·h,剔除此部分差异后,统计供电量、财务决算供电量仅相差 3.715 亿 kW·h。

2)统计范围不同:在母公司、子公司互供电量统计中,生产统计根据关口表的示数进行统计,统计范围为公司所属供电子公司(即各县公司)与市供电公司、省公司间的关口电量,因此母公司、子公司互供、互售电量相同;财务决算则根据实际发生的发票电量来统计,统计范围除包含上述电量外,还含有各县级子公司所属的发电子公司与市供电公司、省公司间的交易电量,统计范围较生产统计大,由此造成 2015 年财务决算母公司、子公司互供电量较生产统计多 3.83 亿 kW·h。

将生产统计中包含的特高压送出电量损失及调试电量 31.685 亿 kW·h 剔除后,公司统计综合线损率为 7.68%;将财务决算中母公司、子公司互供电量口径与生产统计口径保持一致(即:在财务决算母公司、子公司互供电量中剔除各县级子公司所属的发电子公司售市供电公司、省公司电量),则 2015 年公司财务决算线损率为 7.69%,与统计线损率基本持平。

此外,由于电费发票开具不及时,也将导致财务决算和统计电量存在差异。统计中购电量部分按营销结算电量进行统计,而财务数据则是按已开具发票数据进行统计。若营销部门已与电厂结算,但电厂未及时开具发票,则财务决算电量将与营销结算电量不同,从而造成财务决算电量与统计电量差异。

表 4 统计、财务线损率差异表

项 目	统计 /(亿 kW · h)	财务 /(亿 kW · h)	统计线损率/%	财务线损率/%	线损率差值/%
报表供电量	1 741.52	1 980.97	9.37	6.4	2.97
剔除售省外电量	1 741.52	1 706.23	9.37	7.43	0.41
剔除特高压送出损耗及调试电量	1 709.83	1 706.23	7.68	7.43	0.25
剔除各县级子公司所属的发电 子公司售市供电公司、省公司电量	1 709.83	1 710.06	7.68	7.69	-0.01

综上所述,财务决算线损率计算中由于包含售省外电量,无形中人为增大了供电量数值,致使计算所得线损率偏低;在母公司、子公司互供电量统计中包含了县级子公司所属发电子公司售母公司电量,又人为减少了决算线损电量;从而造成财务决算线损率远远低于统计线损率。

4 结 语

1)统计时段和抄表时间等外部因素是造成统计线损率和理论线损率差异的主要原因。因统计线损率反映的是一个时段的电网运行经济性水平,所以在趋势分析中,因涉及时段较长,适宜于使用统计线损率;而对于具体设备的降损改造及降损后的评估,只涉及电网的一个点,因此适宜于应用理论线损率进行分析。

2)统计范围和统计方式的不同是造成统计线损率和财务决算线损率差异较大的主要原因。在剔除相关因素的影响后,2015 年四川电网财务决算线损率、统计线损率几乎相等,由此可见当前财务决算

(上接第 53 页)
业广泛应用,而在电力行业仍处于初步应用阶段,仅对 110 kV 变电站进行过冷喷防腐改造。鉴于冷喷防腐技术相比传统热镀工艺的诸多优点,建议今后应在 220 kV、500 kV 及特高压变电站中,逐步推广应用冷喷防腐技术。

4)加强现场人员对设备防腐的认知程度,强化对设备生产厂商的有效监造,规范设备包装、运输及安装过程,制定现场防腐标准工艺卡,建立有效的地市公司监督体系,落实金属监督技术标准。

参考文献

[1] 陆培钧,黄松波,豆朋,等. 佛山地区变电站接地网腐蚀状况分析[J]. 高电压技术,2008,34(9):1996 - 1999.
[2] 郑敏聪,陈自年,李建华. 大型变电站接地装置腐蚀规

线损率、统计线损率均真实、可信。但统计线损率是依据国网公司生产统计报表制度开展统计,基础数据均来自于实际发生的物理电量,不受结费等外界因素影响,较财务决算线损率更能真实地反映省内售电量与电网运行水平和收益间的关系。同时,考虑到统计数据的归口管理和向政府报送电量数据的一致性,因此,在生产经营分析中,应以统计线损率为主要分析指标,辅以财务决算线损率进行经济性辅助分析。

参考文献

[1] 丁毓山,翟世隆. 电网线损实用技术问答[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
[2] 赵全乐. 线损管理手册[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
作者简介:
贺星棋(1978),高级工程师,长期从事电网管理、分析工作;
周 桦(1963),高级工程师,长期从事电网管理工作;
鲜其军(1966),高级工程师,长期从事电网管理工作。

(收稿日期:2016 - 04 - 15)

律及防腐[J]. 华东电力,2009,37(9):1463 - 1467.
[3] 刘洋,崔翔,赵志斌,等. 变电站接地网腐蚀诊断磁场检测系统的设计与应用[J]. 电工技术学报,2009,24(1):176 - 182.
[4] 刘渝根,成文杰. 变电站电缆沟内接地导体对腐蚀诊断的影响[J]. 高电压技术,2014,40(2):505 - 512.
[5] 张秀丽,骆平,莫逆,等. 接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(19):152 - 156.
[6] 刘渝根,吴立香,王硕. 大中型接地网腐蚀优化诊断实用化分析[J]. 重庆大学学报,2008,31(4):417 - 420.
[7] 陈军君,李明,王军,等. 变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施[J]. 内蒙古电力技术,2013,31(1):7 - 11.

作者简介:

朱 军(1985),博士、工程师,从事换流站设备技术监督工作。

(收稿日期:2016 - 04 - 02)

基于全景视图的电力企业数据资产价值量化研究

罗晓伊,徐厚东,佟如意
(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:针对目前电力企业数据管理无序、不规范、分散等问题,结合当前大数据研究背景和国内外关于数据资产管理成果,提出电力企业数据资产定义、特征等概念。结合电力企业运营管理自身特点,设计出一套完整的电力企业数据资产识别方法,采用该方法构建企业级数据资产全景视图,基于全景视图开展数据资产价值量化,最后对数据资产管理工作给出了建议。

关键词:大数据;电力数据资产;数据资产全景视图;价值量化

Abstract: The power companies have been faced with problems of disordered, non – standard and dispersed data management. By summarizing and analyzing the data asset management achievements at home and abroad, the difinition and characteristics of data asset are presented. According to the chararacteristics of operation management in power companies, a complete data asset recognition method is designed, the panoramic view of data asset is established with the propoesed method, and the data asset value qualification is carried out based on the panoramic view. At last, the suggestions are given on how to carry out the work of data asset management.

Key words: big data; data asset of power company; panoramic view of data asset; data asset value qualification

中图分类号:TP31 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2016)05 – 0090 – 05

0 引 言

随着以博客、社交网络、基于位置的服务 LBS 为代表的新型信息发布方式的不断涌现,以及云计算、物联网等技术的兴起,数据正在以前所未有的速度不断地增长和积累,大数据(Big Data)时代已经到来^[1]。2012 年达沃斯经济论坛发布了报告“Big Data, Big Impact: New Possibilities for International Development”,探讨了新的数据产生方式下,如何更好地利用数据来产生良好的社会效益,分析大数据的影响、关键技术和应用领域等内容。“大数据”背景下,将数据作为资产进行管理利用已成为学界和商界的共识,数据资产所蕴含的巨大价值,使数据资产成为企业盈利新增长点^[2]。未来,将数据视为资产进行有序管理是大数据背景下对数据管理提出的更新更高的要求,资产化管理数据将成为企业管理研究的创新点之一。

国内外关于数据资产管理理论的研究尚处于启蒙阶段,研究内容以定性为主,缺少对数据资产价值量化、数据资产应用等内容研究^[3-4]。所提研究

是对国内外数据资产研究成果进行总结和深化,明确了数据资产及电力企业数据资产的定义,确定了企业数据资产管理对象并提出了量化数据资产价值的方法,力求通过该研究,促使电力企业成为率先管理数据资产的行业领军者和理论研究先行者。

1 电力企业数据资产基础研究

研究数据资产的内涵是量化电力企业数据资产价值的基础,只有明确什么是数据资产以及数据资产的特征有哪些,才能设计相应的识别数据资产的方法和构建价值量化体系。因此,开展电力企业数据资产定义与特征研究是前提和基础。

1.1 数据资产定义与特征

“数据资产”定义是从“数据”和“资产”的概念延伸得到的。因为数据资产具有数据与资产的两重身份,所以要从数据和资产这两个公认度高、定义明晰的概念中探究数据资产的定义。数据(Data)是指能够客观反映事实的数字和资料;资产(Asset)是指由企业过去交易或事项形成的、被企业拥有或控制的、预期会给企业带来经济利益的资源。基于“数

据”与“资产”的定义,推演出数据资产定义。数据资产(Data Asset)是一类被企业拥有或控制,可以客观记录企业经营活动,为企业带来价值的数据资源。数据项是数据资产的最小单元。符合以下标准条件的数据皆可称为数据资产:

1)被企业拥有或控制:由过去的活动产生或外部获取,为企业享用拥有权或控制权。

2)客观记录企业活动、反映事实:记录、描述企业各种活动,客观反映事实。

3)为企业带来价值:支撑常态化运营,或通过灵活聚合来分析经营状态,辅助运营决策,或通过交易变现增加经济收入。

数据资产与实物资产既有共性特征,如成本性、时效性,同时数据资产又具个性特征。

1)增值性:数据资产具备可关联、可聚合的特点,通过关联、聚合,形成更具价值的信息或知识,从而为企业带来更大的价值。

2)衍生性:通过分析挖掘现有数据资产,可衍生出更多类型的数据资产,比如通过对现有数据的分析,开拓出全新的业务,从而形成新类型的数据资产。

3)非消耗性:数据资产的使用或消费,仅表现为从一种物质载体转移到另一种物质载体中,并不会因为转移而对数据资产造成损耗,不像实物资产价值会随使用而递减直至完全消失。

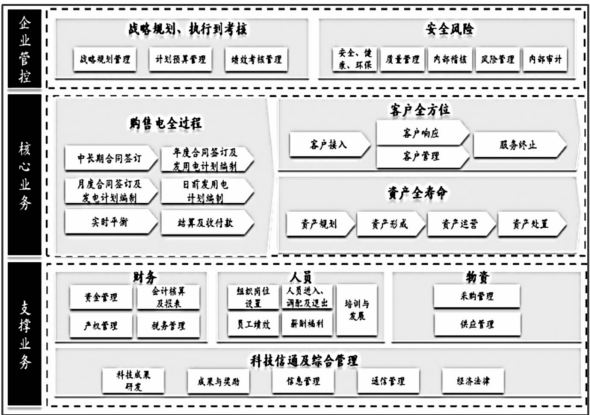
4)共享性:由于数据资产具有对物质存储载体的独立性,其能同时存储于不同载体之上,从而实现多主体同时共享。

5)高风险性:一旦出现丢失或者泄露,其无限传播性会给企业带来难以计量的损失。

1.2 电力企业数据资产定义

研究电力企业数据资产,就要明确电力企业的运营活动有哪些,这些活动会产生哪些数据资产。电力企业的数据资产就是在电力企业的运营业务活动中产生的数据资源。电力企业运营活动主要包括企业管控业务、企业核心业务和企业支撑业务,“电力企业运营活动模型(Power Company Operation Model)”如图 1 所示。

电力企业数据资产(Power Company Data Asset)的定义是:在电力企业主要运营活动过程中自主产生和外部获取的,能够客观、真实描述企业运营活动,并能为电力企业带来价值的数据资源,这些数据资源包括原始业务明细数据、统计汇总数据、经分析



加工后形成的数据。由于数据资产是伴随业务产生的,数据资产天然继承业务关联,所以数据资产之间也相互关联,形成数据资产之间的关联关系。数据资源由原始业务明细数据、统计汇总数据、分析加工数据组成,具体内容如下:

1)原始业务明细数据是指在企业运营活动中产生的具体数据,例如在客户服务领域的数据资产包括客户姓名、电话、抄表数等;

2)统计汇总数据是指在企业运营活动中通过不同口径的统计汇总所形成的数据,例如电力公司的资产总额、营业收入等;

3)分析加工后形成的数据是指在企业运营活动中,基于业务或管理需要,通过分析、加工后形成的数据,如资产负债率、净资产收益率等。

2 电力企业数据资产识别及价值量化

电力企业数据资产识别包括数据资产全景视图构建与数据资产价值衡量两部分。通过逐层盘点,明确电力企业数据资产的现状和分布情况,基于数据资产全景视图量化数据资产价值。

2.1 电力企业数据资产全景视图构建

从电力企业的业务结构出发,根据“数据对象-数据应用领域-数据应用场景-数据实体”四级识别架构梳理企业数据资产以及数据资产关系的全貌,最终构成数据资产全景视图。数据资产全景视图是对数据资产体系化、结构化的管控视图,其目的是提供一个完整统一的视角,清晰明确地展示公司级数据资产的分布、存储和流动情况,动态反应数据流与业务流的交错支撑关联。数据资产全景视图包括数据巡航层、数据资源层以及数据档案层。数据

资产全景视图的构建主要分为以下 3 步：

1) 构建数据资产识别架构,形成数据资产巡航层:数据资产巡航层的作用是以电力企业业务结构,展示企业的数据资产以及数据资产关系的全貌。其设计是基于国际通用的 IEC 61970/61968 标准,将数据资产按照“数据对象 – 数据应用领域 – 数据应用场景 – 数据实体”四级的形式进行结构化组织。其中数据对象是基于电力价值链,将参与电力运营活动的主体进行高度汇总后形成的抽象概念,例如客户、设备、产品等;数据应用领域是针对特定的数据对象开展的运营活动,例如“客户”这个数据对象包括客户服务、用电计量、电费收缴、市场拓展等;数据应用场景是指将业务领域进一步细分后形成的数据应用场景,例如客户服务应用领域包括业扩报装、故障抢修、用电检查等应用场景;数据实体是指数据应用场景下所细分出的各类业务活动。基于上述结构,共梳理出 12 项数据对象(包括资产、财务、项目、人员、物资、设备、市场、电网、客户、产品、综合、安全)、52 项数据应用领域、213 项数据应用场景(由于应用领域和场景数量较多,不在此赘述),这些数据对象、应用领域、应用场景和数据实体之间彼此基于业务的天然逻辑相互关联,共同构成一张电力企业的“数据资产全景视图”。图 2 为数据资产全景视图 – 巡航层展示图,清晰、结构化地展示了企业数据资产全貌和分布情况。

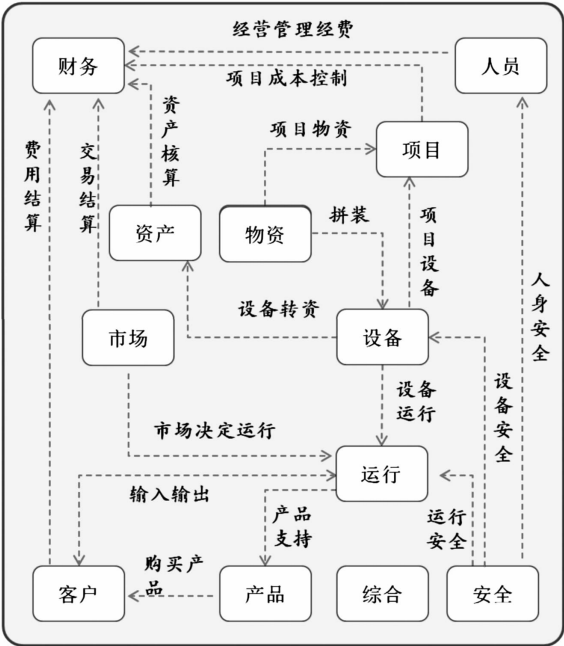


图 2 数据资产全景视图 – 巡航层

2) 识别数据资源,形成数据资源层:数据资源

层是存放数据巡航层中“数据对象 – 数据领域 – 数据场景 – 数据实体”的具体数据资源的层级。这些数据资源是指真正在数据场景中发挥作用,支撑企业运营的数据资源,包括各种原始业务明细数据、统计汇总数据和分析加工数据。

3) 建立档案,形成数据资产档案层:数据档案层是存储每个数据资源对应的不同数据属性的层级。从基础、业务、技术和管理 4 个维度惟一性的描述特定数据资产,包括其产生的业务场景、历史年份、格式、规范、获取频次、更新频率、存储系统数据库、责任部门等 22 个属性标签。

以“客户 – 客户信息 – 客户档案 – 客户”为例,构建数据资产全景视图示例。基于“客户 – 客户信息 – 客户档案 – 客户”梳理出的数据资源包括了 28 个业务明细数据、2 个统计汇总数据和 1 个分析加工数据。其中,业务明细数据包括客户标识、客户编号、客户名称、经济类型等;统计汇总数据包括采 VIP 客户数量、年生产总值等;分析加工数据包括客户服务对标指标等。针对每个数据资源分别从历史年份、格式、规范、获取频次、更新频率等属性进行描述,形成对应的数据资产档案,最终构成“客户”全景视图示例,如图 3 所示。

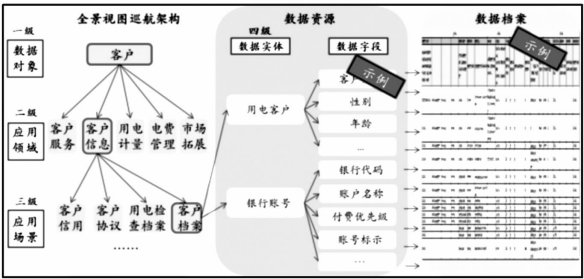


图 3 “客户”全景视图构建示例

2.2 电力企业数据资产价值量化

由于缺乏理论基础支撑,数据资产价值量化一直是国内外数据资产研究几乎未涉足的领域^[5]。衡量数据资产的价值可从使用价值、增值价值、变现价值等维度入手^[6-7]。使用价值是指数据被分析、共享、使用所产生的价值。增值价值是指通过分析应用数据,提升企业运营效率,提高管理水平,直接或间接的为企业、社会、客户带来多重效益的价值;变现价值是指通过数据租赁、数据出售等方式,获取直接的经济利益的价值。使用价值是数据资产价值的基础,变现价值和增值价值是数据资产价值的高

级应用。

结合电力企业自身运营特点,短期内较难实现数据资产的大规模出售和租赁,因此难以用货币收入衡量数据资产的变现价值;同时,数据资产增值价值具有主观性、非结构化、多样化等特点,难以用统一量纲量化数据资产的价值。相较变现价值和增值价值,数据资产使用价值的量纲统一、算法通用,因此研究选定使用价值作为衡量数据资产价值的计算标准,通过分析数据资源之间被引用次数的高低来衡量数据资产价值大小,被引用的频次越高,其价值和重要度也相对越高。

指标、报表或分析模型是电力数据资产使用的主要形式,从指标、报表、分析模型中拆分出数据项,计算数据项被引用的次数,从而衡量数据资产的使用价值。指标的数据项是指标的计算因子,例如“业扩报装容量”的计算因子包括业务报装申请编号、供电单位、业务类别、供电电压、用户编号、报装容量等;报表的数据项是报表的取数字段,例如营销领域的故障报修报表中的故障接单时间、故障报修时间等字段;分析模型的数据项是分析模型的组成要素,由不同指标、明细数据、分析加工数据组成。

由于电力企业数据资产规模和数量庞大,短期量化所有数据资产价值并不现实,建议量化过程从需求出发,根据监测分析等需求选择价值量化对象。目前,尤为关注的是客户服务质量提升问题,因此以营销领域的“供电服务监测”为例,挑选出 58 个评价客户满意度的供电服务监测指标,对指标进行拆分,分解出 92 个数据资产项,对这 92 个数据资产项进行引用分析,被引用次数越多的数据资产项,它在业务活动中发挥的价值越大、重要度越高。图 4 中的数字代表数据项,即指标所拆分的各个字段,连线表示引用关系,每个数字产生的连接点越多,表示该字段被引用的次数越多,对其需求越大,其价值也越高。分析发现,挂机时间、省(市)单位审核接单时间、省(市)单位审核回单时间、故障报修总部客服中心受理时间等字段被引用次数超过 10 次,引用次数远超其他字段,这些字段的共同特点是:在日常运营活动中起到关键作用、通过这些字段可以关联查询更多信息,字段本身具有唯一性等特点。由“供电服务监测”数据资产价值地图示例可推断哪些关键字段使用价值更高、重要度更大。未来,可以通过使用价值衡量法构建全公司的数据资产价值地图,

将各项数据资产的重要性和价值度以直观可视化的形式展现出来。

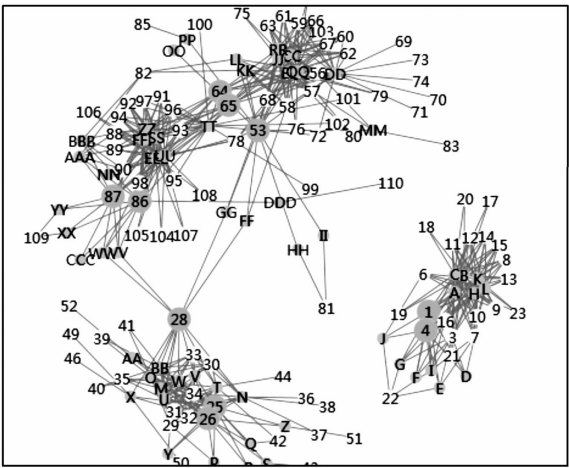


图 4 “供电服务监测”数据资产价值分布地图

3 电力企业数据资产管理建议

当前电力企业数据管理仍存在诸多问题,要想真正实现运营数据资产高效、规范、集约化管理,建议从以下几方面开展数据资产管理工作:

1) 应尽快建立数据资产管理体系,从组织架构、职责分工、流程、制度、评价考核等方面保障数据资产管理有序、规范、集中开展。组织架构上,构建自上而下的从战略层到管理层再到执行层的三级数据资产管理组织架构;职责分工上,明确数据资产管理相关部门的管理职责,确保权责明晰;流程上,设计完整的数据资产管理流程,指导各方按要求参与协同工作;制度上,制定数据资产管理办法和管理规范,确保各项工作有规可循;评价考核上,设计一套评价指标和考核机制,并与人资部的绩效考核挂钩,考核数据资产管理工作开展情况。

2) 建议逐步推进数据资产盘点,构建电力企业数据资产全景视图,推进数据资产价值量化。由于现有数据资产体量大、种类繁多、源头不清晰等原因,不建议首期开展大规模、全范围的数据资产识别工作。第 1 期识别工作,建议从数据质量好、结构化数据占比高的部门开始,待验证方法和模型可行后,形成具有通用性的盘点模板,基于第 1 期盘点工作成果,修正盘点方法与模板,逐步推进第 2 期、第 3 期数据资产识别工作。在盘点数据资产的同时,逐步开展企业级数据资产全景视图构建,将盘点出来的数据资产不断融合到数据资产全景视图中,并基

于全景视图逐步推进价值量化工作。

3) 建议优化现有业务系统和数据中心,构建数据资产管理平台。在该平台上构建企业级数据资产全景视图,以体系化、结构化的方法展示企业数据资源的分布、流动情况以及数据资源的关系。未来,要想实现数据资产体系化、结构化、规范化管理,数据资产管理平台是技术保障,各业务部门将数据资源汇集到数据中心,在平台上实现数据资产质量核查、共享、应用、流转。

4 结 语

采用归纳分析、演绎推理的方法,从数据资产管理基础理论研究入手,明晰数据资产定义与特征,提出构建数据资产全景视图的方法,并设计出围绕全景视图开展数据资产价值量化的方法,从理论和实践两方面推动电力企业数据资产管理工作。总的来说,目前数据资产管理研究仍然处于探索起步阶段,未来电力企业开展数据资产管理工作需要层层推

~~~~~

(上接第 85 页)

2011《电力系统的时间同步系统检测规范》对时间同步监测装置的功能、授时精度和监测精度等进行检测。达到以下性能指标:

- 1) 对光纤 IRIG - B ( DC ) 的测试精度:精度 ≤ 200 ns,抖动 ≤ 200 ns;
- 2) 对光纤接口 PPS 信号的测试精度:精度 ≤ 0.2 μs;
- 3) 对 RS - 485 接口串口报文的测试精度:精度 ≤ 0.2 μs。

5 结 语

所介绍的基于时间戳的时间信号辨识与解析方法,通过对信号跳变边沿打时间戳,还原出各种时间信号的波形,再根据对信号波形的特征分析,对比出信号的特征量,从而自适应辨识信号的类型,并根据各类信号的编码标准对信号进行解析。实现了对多种时间信号采集的统一接入、自动辨识与信息解析,大大简化了装置信号接口设计,提高了稳定性。同时,基于时间戳还实现了时间信号的准确度、波形的稳定度、串口报文的误码率等分析统计功能。

参考文献

[1] 汪洋,赵宏波,先毅,等. 高精度时间同步系统的应用

进,通过构建数据资产管理体系,明确职责分工,推进数据资产共享与应用,逐步实现常态化、规范有序的数据资产管理目标。

参考文献

[1] 孟小峰,慈祥. 大数据管理:概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展,2013,50(1):146 - 149.  
[2] 王元卓,靳小龙,程学旗. 网络大数据:现状与展望[J]. 计算机学报,2013,36(6):1125 - 1138.  
[3] 钟瑛,张恒山. 大数据的缘起、冲击及应对[J]. 现代传播,2013,35(7):104 - 109.  
[4] 陶学娇,胡晓峰,刘洋. 大数据研究综述[C]. 系统仿真学报,2013,25(增刊):142 - 146.  
[5] 周震刚. 中国大数据市场 10 大预测[J]. 通讯世界,2012(10):60 - 61.  
[6] 袁婕. 大数据时代的商机[J]. 现代商业,2012(30):10 - 13.  
[7] Teece David J. Capture Value from Knowledge Assets:The New Economy,Market for Know - How and Intangible Assets[J]. California Management Review,1998,40(3):55 - 79.

(收稿日期:2016 - 06 - 06)

~~~~~

和发展[J]. 电力系统通信,2011, 32(1):16 - 20.
[2] DL/T 1100.1 - 2009,电力系统的时间同步系统 第 1 部分:技术规范[S].
[3] 于跃海,张道农,胡永辉,等. 电力系统时间同步方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):82 - 86.
[4] 雷霆,黄太贵,李斌,等. 时间同步监测分析系统的开发与应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):65 - 68.
[5] IRIG STANDARD 200 - 98, IRIG SERIAL TIME CODE FORMATS[S]. 2004.
[6] 贾成龙,亓常松. 基于边沿捕获的 IRIG - B (DC) 码解码的研究与应用[J]. 浙江海洋学院学报,2013,32(5):443 - 447.
[7] 刘燕,陈兴文. 串行通信波特率自动检测方法的实现[J]. 大连民族学院学报,2008, 10(1):31 - 34.
[8] 张信权,梁德胜,赵希才. 时钟同步技术及其在变电站中的应用[J]. 继电器, 2008,36(9):69 - 72.

作者简介:

温丽丽(1982),硕士、工程师,主要从事电网调度自动化工作;
张国芳(1985),硕士、工程师,主要从事电网自动化高级软件应用研究与管理工作;
彭 昊(1988),硕士、助理工程师,主要从事电网调度自动化工作;
陈 艳(1978),硕士、工程师,主要从事电力系统自动化设备的设计与研究。

(收稿日期:2016 - 03 - 01)

《四川电力技术》2015年度优秀论文 获奖名单

2016年9月26日，由《四川电力技术》期刊编委会组织的2015年度《四川电力技术》优秀论文评比活动落下帷幕。

此次优秀论文评比，分为初选和复审两个环节，分别由《四川电力技术》期刊编委会组织的专家评选小组按照选题的针对性、解决实

际的能力、工作的难易和工作量、工作的先进性和实用性、结果的效益性、表达的清晰性等方面对期刊全年刊登的文章进行筛选评定。最后从经过初选进入复审的35篇文章中，评选出了2015年度的优秀论文。此次共评出一等奖3名、二等奖2名、三等奖12名。

2015年度优秀论文名单

奖 项	优秀论文名称	作 者	所载刊期
一等奖	典型架空输电线路电磁取能地线的选择	刘益岑 薛志航 龚奕宇 蒋兴良 谢彦斌 胡建林	2015年5期
	电网信息系统状态评价技术研究与应用	谢晓娜 常政威 陈亚军	2015年4期
	基于自抗扰的变速恒频双馈风力发电机并网控制研究	田永贵 王奔 李小明 吴桂良 李慧	2015年2期
二等奖	特高压直流同塔双回输电线路互感对电压突变量保护动作特性的影响	禹佳 孙文 周波	2015年2期
	基于孤岛模式的微电网多逆变器并联运行控制技术	李红 韩杨 沈攀	2015年5期
三等奖	电力系统低频振荡的选型判别研究与分析	周专 常喜强 张增强 王衡 张锋 贡剑	2015年4期
	换流站阀厅设备巡检监控系统研究	丁志林 王超 刘凡	2015年1期
	跨辖区一体化电能计量系统故障排查方法研究	王小波 张长春 刘钢 谢韵 雷婷 罗欢 刘璋	2015年4期
	基于模糊状态量的二次设备状态检修模型研究	何小飞 童晓阳 王锐 李江陵	2015年2期
	特高压直流输电系统逆变站换相失败对整流站的影响及其保护配置策略优化建议	禹佳 孙文 李琨 刘俊杰	2015年6期
	基于SPAR平台浮式海上风力机独立变桨距控制研究	马君豪 刘江涛 王海云 罗建春 罗庆	2015年3期
	变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺及应用	王志 王红梅 陶勇 林学松 蔡志强	2015年6期
	超特高压输电线路绕击性能分析	刘意 文艺	2015年3期
	同塔双回输电线路电流不平衡机理分析	唐明 张纯 丁理杰 张华 李旻 腾予非	2015年5期
	几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律	刘君 刘玉龙 许勇 胡琳 杨帆	2015年1期
	宜宾站换流变压器阀侧电压测量故障分析及处理	孙文 禹佳 陈伟	2015年6期
	线路避雷器在220kV山越线雷害治理中的应用	李晓东 刘守豹 江来 孟令川 崔涛 刘强	2015年1期

乐山城电电力工程设计有限公司



乐山城电公司始建于1969年，前身历经乐山供电局设计室、乐山电业局设计处、海能设计事务所、成都城电电力工程设计有限公司乐山设计部。2010年成立乐山城电电力工程设计有限公司，于2010年8月13日完成工商登记等手续。2010年12月17日取得勘察（测量）乙级和输变电工程设计乙级资质。2012年6月中旬，公司取得工程咨询资格证书和工程咨询（项目管理）证书。2014年5月中旬，公司取得工程招标代理机构资质证书，10月取得送变电工程监理（乙级）证书。公司主要从事220 kV及以下输变电工程咨询、设计、监理、招标代理及220 kV及以下输变电工程项目总承包（EPC）。

2016年3月22日，公司取得“三证合一”营业执照，注册资本由2000万元增加至5000万元，成为川南片区区域性设计公司，下设乐山、泸州、眉山、内江、自贡、宜宾六个设计部，其中公司本部和乐山设计部一体化运作，公司股东由6家国网及地方电力公司集体企业管理平台组成。公司组建后全部定员为416人，其中公司本部及乐山设计部定员161人，各地市设计部定员255人。