★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

Vol.36

2013

No.4





四川省电力公司技术技能培训中心输配电带电作业实训基地



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

四川省电机工程学会第七届三次常务理事会会议



四川省电机工程学会第七届三次常务理事会于2013年6月14日在成都召开。出席这次大会的常务 理事55人,理事长王平、副理事长兼秘书长袁邦亮,副理事长许保卫、刘俊勇、冉群、李巧模参加 了会议。

副理事长刘俊勇主持会议,副秘书长田立峰汇报了2012年工作情况和2013年工作计划,副秘书 长张治安汇报了中国电机工程学会和四川省科协的会议精神、2012年财务报告。与会代表讨论通过 了《关于吸纳单位会员、增补推荐第七届理事会理事、常务理事的情况说明》、《关于收取会费的通 知》以及《2012年财务报告》。副理事长许保卫宣读了2011年、2012年先进集体和先进个人名单, 大会进行了表彰。

理事长王平做了重要讲话,指出新的一年学会工作重点在加强学会建设,将电机工程学会建设成 为全省电机工作者的和谐之家;加强学术交流,全面促进电机工程事业的发展;办好学术期刊,建设 学术交流平台;不断创新,开拓和扩大学会工作职能,充分发挥会员作用;各理事单位按照学会章程 缴纳会费。

四川省电机工程学会第七届三次常务理事会,在与会同志的共同努力下,圆满完成了各项任务。

四川省电机工程学会 电力系统智能化专民会2013年学术年会会议



2013年6月14日,四川省电机工程学会电力系统智能化专委会2013年学术年会在成都召开,来 自全省电机工程领域的75人参加了会议。

会议由四川省电机工程学会副秘书长田立峰主持,四川省电力公司调控中心伍凌云、四川电力科 学研究院姜振超、四川大学电气信息学院刘天琪教授、西南电力设计院肖汉、四川省电力公司科技信 通部贺含峰处长分别做了题为"智能调度技术支持系统"、"智能变电站二次系统调试技术"、" 智能电网背景下电力规划的思路和方法探讨"、"浅谈智能电网——从iSGT2013看智能电网的发 展"、"四川省电力公司智能电网工作开展情况"的5个主旨报告。报告内容紧扣当前智能电网的发 展趋势,几位专家各抒己见,大会现场学术氛围浓厚。最后,副理事长兼秘书长袁邦亮对会议进行了 总结,他希望广大电机科技工作者服从并服务于电网发展大局,不断创新活动的组织形式和活动机 制,拓展学术活动的领域,丰富学术活动的内容,提高学术活动的质量和水平。

四川电力技术 SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊(光盘版》、《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊、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》入选期刊

第4期

2013 年 8 月 20 日

《四川电力技术》	
编辑委员会名单	目 次
主 任 委 员 王 平 副主任委员 张 伟	・基金项目・ 共走廊架设超/特高压输电线路电场分布及走廊优化研究 石超群 朱 军 吴静文 等(1)
刘俊勇 委 员	负荷频率特性对孤网频率稳定性影响分析 周 专 姚秀萍 常喜强 等(6) 一次调频对电网频率特性影响及频率相关稳控措施研究
(按姓氏笔画为序)	······ 胡立锦 杨永全 常喜强 等(10)
方文弟 王 卓 白家棣 刘 勇 朱白桦 朱国俊	 调速系统对弧网频率稳定性影响分析
朱 康 邓亚军 邬小端 李兴源 李建明 严 平	四川特/超高压电网脆弱度分析及应用 李 燕 苟 竞 汪彦含 等(19) 面向多种调度模式的电力交易计划统一编制与管理
胡 灿 徐 波 唐茂林	
韩晓言 谢 舫 甄 威秘 书 李世平	一种跟踪风光互补发电系统计划出力的变时间尺度短期功率预测方法
吴小冬	智能电网调度技术支持系统构架及调度自动化现状研究
四川电刀技不	计及风力发电并网的配电网潮流优化 程站立 胡 枚 陈世雯(46)
双月刊 1978 年回刊 中国标准连续出版号:	基于 PCHD 模型的 VSC - HVDC 系统的 L ₂ 増益控制 (けよ) ローズ - 本 昨年代 第(50)
<u>ISSN1003 - 6954</u> CN51 - 1315/TM	 私水良 王 奔 隊新車 等(50) 基于 NSGA - II 算法的 PSS 多目标优化设计 北 利 専知法 対 帯 (55)
2013 年第 36 卷第 4 期(总 226 期) 主管单位:四川省电力公司	220 kV 母线保护系统中母联、分段开关典型死区保护分析
主办单位:四川省电机工程学会 四川电力科学研究院	3
发行范围:公开	应用于电力系统谐波分析的采样周期自适应方法周 洲(66)
主 编:胡 灿 副 主 编:吴小冬 谢 舫 编辑出版:《四川由力技术》编辑部	考虑保护重要度计算环网方向保护配合最小断点集
发行:四川电力科学研究院情报室 地址:成都市青华路 24 号	・高电压技术・ 220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究
邮政编码:610072 电话:(028)87082037 佳 直:(028)87082036	
E – mail:cdscdljs@163.com	500 kV 内桥接线变电站停电安全浅析 庄秋月 李凡红(80)
印 刷:四川明源印务有限责任公司 封面设计:成都宏泰广告有限公司	变压器电介质频率响应测试系统研制 刘 君 张华强 王 华 等(83) 对一起换流站交流滤波器低端电容器击穿事故分析
国内定价:每册 6.00 元 [期刊基本参数] CN51 - 1315/TM* 1978* b* A4* 94* : h* P* X6 00* 4300* 22*	·····································
2013 - 08	

本期责任编辑 程文婷 编辑 吴小冬 刘斌蓉 刘坤才

CONTENTS

Electric Field Distribution of EHV and UHV Transmission Lines Erected in Common Corridor and Research on Corridor Optimization Influence Analysis of Load Frequency Characteristic on Frequency Stability of Isolated Power Grid Influence of Primary Frequency Modulation on Grid Frequency Characteristic and Research on Frequency Stability Control Measures Influence Analysis of Governing System on Frequency Stability of Isolated Power Grid Ren Hua Yao Xiuping Chang Xiqiang et al (15) Analysis on Vulnerability of Sichuan EHV and UHV Power Grid and Its Application Li Yan Gou Jing Wang Yanhan et al (19) Monthly Electricity Trading Planning and Management Considering Multi - dispatching Modes Xu Lixiong Li Xiang Liu Youbo et al (23) A Short - term Power Prediction Method Based on Variable Time Scale for Tracking Generation Scheduling in Wind - solar Hybrid Generation System Li Mingwei Qing Song (32) Research on Architecture of Technical Support System for Smart Grid Dispatching and Current Status of Dispatching Automation Pan Xiaoyan Li Jian Liang Hanquan et al (37) Research on Dispatching Strategy of Orderly Coordinated Charging for Electric Vehicle in Distribution Network Li Shuxiong Lin Mingxing Yu Xingxiang (40) Power Flow Optimization of Distributed Network Considering Wind Power Generators Cheng Zhanli Hu Mei Chen Shiwen (46) L2 Gain Control of VSC - HVDC System Based on PCHD Model Fu Yongliang Wang Ben Chen Xinhua et al (50) Multi - objective Optimal Design of Power System Stabilizer Based on NSGA - II Algorithm Zhang Li Kang Jitao Liu Ya et al (55) Analysis on Typical Dead Zone Protection of Bus Coupler and Section Switch in 220 kV Bus Protection System Research on Condition - based Maintenance of Relay Protection Song Ke He Tao Zheng Zhuowen et al (62) Determination of Minimum Break Point Set for Coordination of Direction Protective Relay in Multi - loop Network Considering Relay Protection Importance Jiang Dengli Li Yunkun Zhou Wenyue (71) Research on Protection Effect of Lightning Rod against Shielding Failure in 220 kV Transmission Line Zhang Shiming Zhang Xianyi Xu An et al (75) Research on Dielectric Frequency Response Testing System for Transformer Liu Jun Zhang Huaqiang Wang Hua et al (83) Analysis on Breakdown Accident of Lower Capacitor of AC Filter in Converter Station Leng Yi Chen Xiaodong Bao Yunfu (87) Research on the Influence of Environmental Humidity on Laboratory Measurements of Power - frequency Field Intensity Lan Xinsheng Lin Qiaohong Liu Hong et al (92)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

2013 Vol. 36 No. 4 (Ser. No. 226) 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

共走廊架设超/特高压输电线路 电场分布及走廊优化研究

石超群¹ 朱 军¹ 吴静文¹ 吴 驰² 吴广宁¹ 邱 璆¹

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031;2. 四川电力科学研究院,四川成都 610072)

摘 要:超/特高压线路共用走廊架设时,由于导线数目多,电压等级不同,所以影响电场分布的因素较多,为了分析超/ 特高压输电线路共用走廊架设时线路下方的电场分布,基于等效电荷法建立了共用走廊时工频电场的计算模型,利用 Matlab 编制计算程序,仿真分析了共用走廊时输电线路下方距离地面1.5 m 处的电场分布。重点讨论了超/特高压输电 线路的相序排列、接近距离以及导线最小对地高度对整个输电走廊电场分布的影响。研究表明超/特高压共用走廊时导 线的相序排列和导线最小对地高度对场强最大值有较大影响,高场强覆盖区域与接近距离成线性增长关系。结合电磁 环境评估标准,提出了超/特高压共用走廊架设时建议采用的相序布置,接近距离和导线最小对地高度。

关键词: 等效电荷法; 共用走廊; 工频电场; 相序布置; 接近距离; 对地高度

Abstract: The number of conductor with different voltage level is more complicated than single circuit when EHV and UHV transmission lines are erected in the common corridor , so there are many factors which will influence the distribution of electric field. The calculation model of power – frequency electric field is established based on charge equivalent method in order to analyze the distribution of electric field when using the common corridor , and Matlab is utilized to develop simulation program for the visible analysis of electric field distribution under the transmission lines at 1.5 m above the ground. The discussion lays emphasis upon some influencing factors to the distribution of electric field in the transmission corridor , such as the phase sequence of EHV and UHV transmission lines , the approaching distance between EHV and UHV transmission lines , and the clearance of conductor to the ground. Research shows that the phase sequence and the clearance of conductor to the ground. Research shows that the phase sequence and the clearance of conductor to the ground bave a great influence on the maximum of electric field , and there is a linear growth relationship between high – intensity coverage area of electric field and the approaching distance. Finally , the suggested phase sequence , approaching distance and clearance of conductor to the ground when EHV and UHV transmission lines are erected in the common corridor are proposed according to the criterion of electromagnetic environmental evaluation.

Key words: charge equivalent method; common corridor; power – frequency electric field; phase sequence arrangement; approaching distance; clearance of conductor to the ground

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0001 - 05

国内外实践和研究经验表明,特高压交流输电 线路可以实现远距离、大容量输电,有利于建立坚强 的电网。中国的能源、负荷中心分布极不均衡,能源 主要分布在西部,而电力需求主要在东部发达地区, 为缓解能源与负荷不均衡这一矛盾,更好地实现 "西电东送"和"全国联网"将特高压线路作为全国 电网的主网架是十分必要的^[1-4]。

随着特高压输电线路的建设,在经济发达且土 地资源紧张的地区,势必出现超高压线路与特高压 线路平行架设甚至共用走廊的情况,由于输电线路 走廊费用占线路建设投资的比例呈上升趋势,目前 基金项目:国家电网科技项目(2011-WG-4) 走廊费用占静态投资的比例达 20% 甚至更高,所以 输电线路走廊的优化会直接影响工程造价,而且影 响输电走廊宽度的重要因素之一就是电场分 布^[5-6]。超/特高压共用走廊架设时 输电线路下方 的电磁环境更为复杂。文献[7]对高压输电线路下方 的电磁环境限值标准进行了相关探讨,指出线路跨越 农田时,工频电场不超过 10 kV/m;线路临近民房 时,房屋所在位置离地 1.5 m 处的最大未畸变场强 不超过 4 kV/m,并以此电场限值作为输电线路走廊 宽度计算的参考值。文献[8-10]对超、特高压交 流线路单独架设时电场分布的影响因素做了一定研 究,然而对超高压与特高压线路共走廊架设时线路

• 1 •

的电场分布以及走廊宽度的研究还很少。

下面利用等效电荷法,通过数值仿真,分析了 超/特高压共用走廊架设时导线相序排列,导线的架 设高度以及线路接近距离对电场分布和走廊宽度的 影响,研究结果可以为工程实际提供理论依据。

1 等效电荷法计算电场

等效电荷法是以镜像法为基础,理论依据还是 场的唯一性定理:是把导体表面不均匀且连续分布 的电荷用其内部一组等效电荷来代替。只要这组电 荷能保证原来给定的边界条件不变,就能用这组等 效电荷求出全场域的解^[11]。等效电荷的位置和形 状是由导体的形状和对场的定性分析所设置,而电 荷值则可由给定的边界条件求出。等效电荷法可用 于计算高压电极、高压输电线和其他高压电器附近 的高压电场。

计算多导线线路中导线上的等效电荷,可写出 矩阵方程为

$$[U] = [P] [Q]$$
(1)

其中,[U]为各导线上电压列向量,由输电线上的电压和相位决定;[Q]为各导线上等效电荷的列向量; [P]为多导线系统的电位系数矩阵组成的 n 阶方阵 (n 为导线的数目),矩阵中的各元素由导线自身参数及空间位置决定。

由于[*U*]和[*P*]是已知量,通过矩阵变换即可 求出[*Q*]然后可以求出空间中任一点(*x*)处的电 场强度为

$$E_{x} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_{0}} \sum_{1}^{n} \left(\frac{x - x_{i}}{L_{i}^{2}} - \frac{x - x_{i}}{L_{i}^{2}} \right)$$
(2)

$$E_{y} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_{0}} \sum_{i}^{n} Q_{i} \left(\frac{y - y_{i}}{L_{i}^{2}} - \frac{y + y_{i}}{L_{i}^{2}} \right)$$
(3)

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \tag{4}$$

其中 E_x 为空间任一点电场水平分量; E_y 为空间任 一点电场垂直分量; x_i 和 y_i 为第 i 相导线的空间坐 标; $L_i \ L_i'$ 分别为空间任一点到第 i 相导线的距离和 到第 i 相导线镜像的距离。

利用等效电荷法,采用 Matlab 编制计算程序, 分别仿真了超高压及特高压线路单独架设时线路的 电场分布,如图1所示,500 kV 同塔双回输电线路 单独架设和1000 kV 特高压输电线路单独架设时 •2• 电场分布曲线呈马鞍形,与文献[12-14]结果相符 500 kV 同塔双回输电线路采用逆相序排列与同相序排列相比,场强最大值从10.62 kV/m 减小到8.77 kV/m 减小约17.5%。



2 仿真模型的建立

超/特高压线路共用走廊架设时,各回路首先要 满足单独架设时的线路参数要求。交流超高压线路 选取同塔双回 500 kV 线路,导线型号为 LGJ - 400/ 35 导线采用 4 分裂,分裂间距为 0.5 m^[15],底相导 线水平间距为 18 m,中相导线水平间距为 22 m,上 层导线水平间距为 15 m,中相导线与底相导线垂直 间距为 10.6 m,上层导线与底相导线垂直间距为 22 m^[16],计算时线电压取 525 kV;交流特高压线路选 取 1 000 kV 单回水平排列,导线型号为 LGJ - 630/ 35 ,导线采用 8 分裂,分裂间距为 0.4 m^[17],导线相 间距为 22.2 m,计算时线电压取 1 050 kV。*d* 表示 超/特高压线路杆塔中心线的接近距离。由于避雷 线对输电线路下方电场分布的影响很小^[18],所以在 仿真时没有考虑避雷线的作用。超/特高压线路共 用走廊架设时的示意图如图2所示。



3 同塔双回 500 kV 相序对电场分布 的影响

如图 2 所示,接近距离 d = 60 m。保持特高压 线路的相间距不变,导线的最小对地高度取 22 m, 导线相序从左至右依次为 A、B、C;保持超高压线路 导线的相对位置不变,底相导线的最小对地高度取 11 m,位于杆塔中心线左侧回路导线相序从上至下 依次为 A、B、C,改变位于杆塔中心线右侧回路导线 的相序 h种相序排列方式如表 1 所示,距地面 1.5 m 处的电场仿真结果如图 3 所示。

表 1 超、特高压共用走廊架设时的相序 排列和场强最大值

序号	ł	 相序排列	场强最大值/(kV • m ⁻¹)
排列1	A c B b C a	ABC	10.36
排列2	A a B b C c	ABC	10.30
排列 3	Ac Ba Cb	ABC	9.54
排列4	Ab Bc Ca	ABC	10.42
排列 5	Аb Ва Сс	ABC	10.23
排列6	A a B c C b	ABC	9.46

(注:500 kV 线路导线相序命名原则为左侧回路从上至

下 右侧回路从下至上; 1 000 kV 线路导线相序命名原则是 从左至右)



(b) 排列为4、5、6 相序时线路下方电场分布

图 3 不同相序时线路下方电场分布

由表1可以看出 排列3和排列6时 输电走廊 的场强最大值小于其他4种排列方式,且可以使整 个走廊场强的最大值控制在10 kV/m的限值范围。

排列1时,500 kV 同塔双回超高压线路是逆相 序排列,此时输电线路下方场强应是最小的,但是由 于其右侧回路 a 相位于最下方,与特高压 A 相的作 用增强,使场强最大值大于只有500 kV 线路单独作 用时的最大场强,而且此时整个走廊的场强最大值 超过10 kV/m 的场强限值。

排列3到排列6,虽然500 kV 同塔双回超高压 线路都是混相序排列,但是排列3和排列6时场强 最大值小于排列4和排列5时的场强最大值,因为 此时表1中标注阴影的3根导线的相位互不相同, 电场的叠加作用最小。

排列6时,500 kV 同塔双回超高压线路是正相 序排列,其两回 c 相位于最下方,超高压线路自身产 生的场强最大值都已经很高(>10 kV/m),虽然由 于特高压线路 A 相的作用,使超高压线路走廊内侧 回路产生的场强有所削弱,但是场强最大值还是由 超高压线路走廊外侧回路决定。

• 3 •

由以上综合分析可知,超/特高压共用走廊架设 时 同塔双回超高压线路采用混相序,且使表1中标 注阴影的三根导线相位互不相同,此种相序是最优 相序。

6 种相序排列方式下,高场强(>4 kV/m)覆盖 区域几乎没有变化,所以导线的相序排列方式对场 强的最大值影响较大,对高场强覆盖区域影响很小, 即导线的相序排列方式对输电线路走廊宽度的影响 较小。

4 接近距离对电场分布的影响

选取与前文仿真所采用的同样的杆塔参数和线路参数 局线相序采用排列 3 改变超高压线路与特高压线路杆塔中心线的接近距离 d ,接近距离从 60 m 每间隔 10 m 递增到 120 m ,不同接近距离时的场



强最大值与高场强覆盖区域列于表 2。仿真结果如 图 4 所示,图中绘制出了接近距离分别为 60 m、80 m、100 m、120 m 时的电场分布曲线。

接近距离/m	场强最大值/(kV・m ⁻¹)	高场强覆盖区域/m
60	9.54	127
70	9.53	137
80	9.54	147
90	9.54	157
100	9.53	167
110	9.53	177
120	9.52	187

根据表 2 的数据绘制接近距离与高场强覆盖区 域的曲线关系,如图 5 所示。

通过图 4、表 2 和图 5 综合分析可以看出,随着 接近距离的增加,场强最大值几乎没有变化,但是位 •4• 于两杆塔中心线之间的场强最小值显著减小,从 5.68 kV/m 减小到1.31 kV/m,这主要是由于交流 电场衰减很快,随着接近距离的增加,电场的叠加作 用明显减弱。



高场强覆盖区域随着接近距离的增加成线性增长,当接近距离大于70 m时,在两杆塔中心线之间 会出现场强最大值小于4 kV/m的区域,但是该区 域处于走廊内部,利用价值较小,所以在统计高场强 覆盖区域时没有考虑。目前随着电力线路的不断增 加,为了节约输电走廊,提高单位走廊输送功率,回 路间的接近距离由原来的倒杆距离逐渐向安全间隙 距离取值靠近,所以在满足线路绝缘的要求下,可以 适当缩小回路的接近距离。

5 导线最小对地高度对电场分布的影响

保持超高压与特高压各回路的导线相对位置不 变 特高压导线最小对地高度取 22 m,超高压线路 与特高压线路的接近距离 *d* 取 60 m,改变超高压线 路底相导线最小对地高度,不同导线对地高度时线 路下方的电场分布如图 6 所示。



由图 6 可以看出 底相导线最小对地高度为 10 m 时 500 kV 线路产生的场强最大值会大于 10 kV/m 底 相导线最小对地高度从 11 m 增加到 13 m 时 超高压 侧的场强最大值显著减小 从 9.00 kV/m 减小到 6.75 kV/m 但是整个走廊的场强最大值几乎不变。超高压 线路底相导线最小对地高度的提高,对高场强覆盖 区域的影响很小,高场强覆盖区域会有所减小,但是 不明显。

保持超高压与特高压各回路的导线相对位置不 变,超高压线路底相导线最小对地高度取 11 m,超 高压线路与特高压线路的接近距离 *d* 取 60 m,改变 特高压线路导线最小对地高度,不同对地高度时线 路下方的电场分布如图7所示。

由图 7 可以看出,当特高压导线最小对地高度小于 22 m 时 整个输电走廊的场强最大值是由特高压 线路产生的电场决定;特高压导线最小对地高度从 23 m 增加到 26 m 时 特高压侧的场强最大值从 8.90 kV/m 减小到 7.35 kV/m,但是整个走廊的场强最大 值几乎不变。同时 随着特高压线路导线最小对地高 度的提高 高场强覆盖区域也几乎没有变化。



6 结 论

(1)超高压与特高压输电线路共走廊架设时, 导线的相序排列会对走廊电场分布产生较大影响, 对线路走廊宽度影响较小;同塔双回超高压线路采 用混相序排列,特高压线路靠近走廊中心线的一回 线路采用与超高压底相导线互不相同的相位,此种 相序排列是能够使整个输电走廊场强满足限值标准 的最优相序。

(2)随着超高压与特高压线路接近距离的增 大 输电走廊场强最大值基本不变,且高场强覆盖区 域与接近距离成线性关系;在满足线路绝缘的要求 下,可以适当减小线路间的接近距离,以达到缩小输 电走廊宽度的目的;当超/特高压线路共走廊架设 时,接近距离建议取70~90 m。

(3)对于共走廊架设的超/特高压输电线路,走 廊内地面电场最大值与导线最小对地高度有密切关系。当超/特高压共用走廊架设时,建议超高压线路 地线导线最小对地高度大于11 m,特高压导线最小 对地高度大于23 m。

参考文献

- [1] 吴敬儒,徐永禧.我国特高压交流输电发展前景[J].电网技术 2005 29(3):1-4.
- [2] 周浩 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题 的讨论[J]. 电网技术 2005 29(12):1-9.
- [3] 张文亮 胡毅.发展特高压输电 促进全国联网[J].高 电压技术 2003 29(8):20-22 31.
- [4] 张文亮 吴维宁 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国 电网的发展[J]. 高电压技术 2003 29(9):16-18.
- [5] 陆国庆 / 何宏明 / 张军. 交直流输电线路相邻架设或公用走廊的探讨[J]. 高电压技术 ,1997 23(4):68 70.
- [6] 吴桂芳,余军,郭贤珊,等. ±800 kV 直流和 1 000 kV 交流线路同走廊时的最小接近距离[J]. 中国电力, 2007 40(12) 22 26.
- [7] 朱普轩 杨光,贺建国,等.超/特高压输电线路电磁环 境限值标准探讨[J].电网技术 2010 34(5):201-206.
- [8] 封滟彦,俞集辉.超高压架空输电线的工频电场及其影响(一)[J].重庆大学学报 2004 27(4):11-14.
- [9] 陈仕姜.500 kV 超高压输电线工频电场分布及控制研究[D].福州:福州大学 2006.
- [10] 万保权 路遥 鄔雄 等.500 kV 同塔回线路无线电干扰 和工频电场[J].高电压技术 2003 33(3):113-116.

(下转第36页)

高 历史数据与物理模型相结合的预测方法与仅采 用物理模型的预测方法相比 ,系统跟踪计划出力的 平均相对误差减小了 4%。分析可知 ,跟随系统控 制周期预测的功率预测精度越高 ,系统能量分配精 度则越高 ,各发电组件的功率设定值能更切合其自 身的实际发电能力 ,从而使发电系统的控制具有更 小的跟踪误差。

3 总 结

针对风光互补发电系统的能量分配时变周期要 求提出了一种将历史数据与物理模型相结合的功率 短期预测方法,此方法满足风光互补发电系统对功 率预测时空分辨率的要求,可实现逐点与整体预测, 同时随着系统控制周期的不断变化,满足预测周期 的时间尺度可变。将预测结果应用到能量管理中, 结果表明,历史数据与物理模型相结合的方法比仅 采用物理模型的方法减小了4%的系统跟踪误差。

所提出的方法仅需要少量历史数据,能为整个 风光互补发电系统的能量分配策略提供较为准确的 功率参考值,该方法建立的模型鲁棒性强、计算时间 短、不需要定期训练、工程实用性强。

参考文献

- [1] 李金鑫 涨建成 周阳.风光储联合发电系统能量管理 策略研究[J].华东电力,2011,39(12):2026-2029.
- [2] G. Capizzi, F. Bonanno, C. Napoli. A Wavelet Based Prediction of Wind and Solar Energy for Long – term Simulation of Integrated Generation Systems [C]. SPEEDAM

(上接第5页)

- [11] 盛剑霓,等.电磁场数值分析[M].北京:科学出版 社,1984.
- [12] 强生泽. 220 kV 同塔双回输电线空间工频电场理论 计算[J]. 高电压技术 2004 30(5):45-46.
- [13] 杨晓玲,刘浔,张大鹏,等.750 kV 同塔双回交流输电
 线路电磁环境研究[J].水电能源科学 2009 27(4):
 191-193.
- [14] 邬雄,万保权,路遥.1000 kV 级交流输电线路电磁环 境的研究[J].高电压技术 2006 36(12):55-58.
- [15] 郭日彩,许子智,李喜来,等.110~500 kV 输电线路 典型设计[J].电网技术 2007 31(1):57-64.

2010 – International Symposium on Power Electronics , Electrical Drives , Automation and Motion , 2010: 586 – 592.

- [3] 刘波 郭家宝 ,袁志强 ,等. 风光储联合发电系统调度 策略研究[J]. 华东电力 ,2010 ,38(12):1897-1899.
- [4] 张征,王晓蓉.新能源接入综合系统研究与实现[J]. 供用电,2011,28(1):15-18.
- [5] 王宏,李兵.分布式风光互补电源的能量管理策略[J].电力电子技术,2010,44(6):58-60.
- [6] 施佳锋, 冯双磊, 丁茂生, 等. 宁夏电网风光一体功率 预测系统[J]. 宁夏电力, 2011 (1):1-4.
- [7] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法 研究[J]. 中国电机工程学报 2010 30(2):1-6.
- [8] 翟载腾.任意条件下光伏阵列的输出性能预测[D].安徽:中国科学技术大学,2008.
- [9] Sancho Salcedo Sanz , Emilio G. Ortiz Garc´a. Short Term Wind Speed Prediction Based on Evolutionary Support Vector Regression Algorithms [J]. Expert Systems With Applications , 2010(1):4052 – 4057.
- [10] Gong Li , Jing Shi , Junyi Zhou. Bayesian Adaptive Combination of Short – term Wind Speed Forecasts From Neural Network Models [J]. Renewable Energy , 2011: 352 – 359.
- [11] Matthias Lange. On the Uncertainty of Wind Power Predictions – Analysis of the Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors [J]. Journal of Solar Energy Engineering , 2005: 177 – 184.
- [12] Rahman Saifur, Chowdhury B. H. Effects of clusters on the electric power form [J] wind farm. IEEE Tran on Apparatus and System, 1984, 103(8):2158-2164.
 (時時日期: 2013_03_01)

(收稿日期:2013-03-01)

- [16] 张彤. 特高压输电走廊拥挤地区线路通道设计研究 [D]. 河北: 华北电力大学 2011:15 - 16.
- [17] 李永伟,袁俊,赵全江,等.中国首条1000kV单回路 交流架空输电线路的设计[J].电机工程学报 2010, 30(1):117-125.
- [18] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究 [D]. 浙江: 浙江大学 2006: 19 – 20.

作者简介:

石超群(1989),男,硕士研究生,从事过电压与绝缘配合、电磁兼容与仿真的研究。

(收稿日期:2013-06-21)

• 36 •

负荷频率特性对孤网频率稳定性影响分析

周 专¹ 姚秀萍^{1,2} ,常喜强² ,申盛召¹

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:随着区间电网的互联,各地区的自然资源得到充分的利用。但是有些区间联络线由于输电走廊限制等原因 相对较弱,一旦发生解列事故,容易形成送端(受端)孤立电网,将导致局部系统功率严重失衡,系统的频率稳定问题 就会凸显出来。同时随着国家经济的发展,各地区的负荷类型比重不相同,负荷模型对系统频率稳定性有很大的影 响。以新疆和田地区电网为研究对象,分析负荷频率特性对孤网频率稳定性的影响,通过改变孤网中负荷模型,以及 各种负荷在孤网中的比例,得出不同的负荷模型对孤网频率稳定性影响程度不同的结论,并运用 PSASP 仿真验证了 相关结论。对实际电网稳定计算时负荷模型的选取具有重要的参考价值。

关键词: 电力系统功率频率特性; 负荷频率特性; 负荷调节效应; 频率稳定

Abstract: Along with the interconnection of interval power grids , natural resources in different areas have been utilized sufficiently. But because of the weakness of some interval links caused by transmission corridor limit and so on , the send – end isolated power grid and the receiving – end isolated power grid will come into being easily if the splitting accidents happen , which will lead to the serious power imbalance of local system , and some problems about the stability of system frequency will come up. At the same time , along with the economic development of China , the proportion of load type in each area is different , and the load model has a huge impact on the stability of system frequency. Taking the power grid of Hotian as the objective of the research , the impact of load frequency characteristics on the frequency stability of isolated power grid by changing the load model and the proportion of all kinds of load in isolated power grid. The simulation with PSASP verifies the related conclusions , which has an important reference for the selection of load model during the stability calculation of actual power grid.

Key words: power frequency characteristic of power system; load frequency characteristic; load regulation effect; frequency stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 006 - 04

0 引 言

随着中国经济的发展,中国的电网规模在不断 扩大,区间联网送电规模也在不断增大,这有利于对 各地区自然资源合理利用,大力发展清洁能源。但 区间联络线由于输电走廊限制等原因相对较弱,一 旦发生解列事故,容易形成送端(受端)孤立电网, 将导致局部系统功率严重失衡,送端电网功率大量 剩余,而受端电网功率严重缺额,系统的频率稳定问 题就会凸显出来^[1-3]。

基金项目:教育部创新团队项目(IRT1285)

各地区由于经济发展的侧重点不同,造成有的 地区以工业负荷为主,有的地区以农业负荷为主。 由于负荷的频率特性不同,造成不同负荷模型对系 统频率调节效应不同。因此在电力系统仿真时对各 地区负荷模型的正确选取是保证仿真结果正确反映 实际电网运行的重要措施。目前中国对负荷特性的 研究有很多,文献[4]主要是研究负荷特性对电压 稳定性影响;文献[5]讨论了负荷频率特性对低频 减载的影响;文献[6]研究负荷动态特性对系统静 态电压稳定性影响。还没有文献从孤网的角度考虑 负荷频率特性对孤网频率稳定性的影响,因此下面 以新疆和田地区电网为研究对象,分析负荷频率特 性对孤网频率稳定性的影响,通过改变孤网中负荷

• 6 •

模型,以及各种负荷在孤网中的比例,得出不同的负荷模型对孤网频率稳定性影响程度不同结论,运用 PSASP 仿真验证了相关结论。对实际电网稳定计算 时负荷模型的选取具有重要的参考价值。

1 电力系统频率调整特性

电力系统功率频率特性是指系统有功功率不平 衡时频率的变化特性,它是负荷频率特性、发电机频 率特性以及电压影响的综合结果。

电网中有功功率和频率相互影响,当系统中有 功功率不平衡量为 Δ*P* 时,系统中的频率变化量 Δ*f* 可表示为

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_s} \tag{1}$$

若系统中的发电机和负荷同时参与系统频率调 节,则系统的单位调节功率(K_s)可表示为

$$K_{s} = \sum_{i=1}^{n} K_{Gi} + \sum_{j=1}^{m} K_{Lj}$$
 (2)

式中 K_{Gi}为某台发电机的单位调节功率; K_{Ij}为某系 统中负荷类型的单位调节功率。

在电网负荷发生变化时,依靠发电机的调速器 以及负荷调节效应的共同作用而使电网在新的频率 下稳定运行^[7]。电网频率调节过程如图1所示。



图1 电网频率调节示意图

如图 1 所示,电网正常稳定运行在 a 点,此时电 网功率平衡。当电网中负荷从 P_L 变为 P_L时系统将 出现功率缺额,导致发电机转速下降,从而使系统中 的频率下降。若系统中常规机组调速系统没有投 运,系统中发电机组出力保持不变,系统中只能通过 负荷调节效应稳定在 b 点,系统中的频率将大幅下 降。在有调速器的情况下,调速器和负荷调节效应 同时参与消除出现的功率缺额。调速器动作增大发 电机组出力,频率降低使得负荷有功功率 P_L减小, 最终稳定在 c 点 ,系统频率稳定在合理的范围内。

2 负荷频率特性分析

当系统频率发生变化时,系统中的有功功率负荷也会发生变化,这种特性称之为负荷的频率特性^[8]。不考虑电压波动的影响,系统频率和负荷的有功功率的关系满足下式。

$$P_L = f(f) \tag{3}$$

式(1)的一般表达式为

$$P_{L} = a_{0}P_{LN} + a_{1}P_{LN}(\frac{f}{f_{N}}) + a_{2}P_{LN}(\frac{f}{f_{N}})^{2} + a_{3}P_{LN}(\frac{f}{f_{N}})^{2} + \cdots$$
(4)

式(2) 中 P_L 为频率等于 f 时整个系统的有功负荷; P_{LN} 为频率等于 f_N 时整个系统的有功负荷; a_i (i = 0, 1 2;···) 为与系统额定频率的 i 次方成正比的负荷 在 P_{LN} 中所占的百分比。

式(2)的标幺值表达式为

 $P_{L^*} = a_0 + a_1 f_* + a_2 f_*^2 + a_3 f_*^3 + \cdots$ (5) 由于系统中与频率的三次方以上成正比的负荷很 少,可以忽略其影响,再将上式对频率微分,得

$$K_L = a_1 f_* + 2a_2 f_* + 3a_3 f_*^2$$
 (6)
式中 K_L 为负荷的频率调节效应系数。不同的负荷
支路因其组成不同 $4K_L$ 值也不相同。

当系统的频率变化时,具有不同的频率调节效 应的负荷变化也是不同的,假设有两种不同频率调 节效应的负荷,它们的有功功率和频率的关系式分 别为

$$P_{L1} = f_1(f)$$
 (7)

$$P_{L2} = f_2(f)$$
 (8)

如图 2 所示,当频率从 $f_2(f_2 = 50 \text{ Hz})$ 下降到 f_1 时,负荷 1 和负荷 2 吸收的有功功率变化量不同。



图 2 中 $\Delta P_1 > \Delta P_2$,说明负荷 1 比负荷 2 对频率 的变化更敏感,即 $K_{L1} > K_{L2}$ 。由此可以得出: 当系统 频率降低时,频率调节系数大的负荷从系统吸收的 有功功率减少得更快。因此在孤网中,优先考虑频 率调节系数大的负荷,这样在频率下降的时候,可以 通过负荷自身的频率调节效应,减少从系统吸收的 功率,有利于孤网稳定保持网内功率平衡。

3 负荷频率特性对孤网频率稳定性影 响分析

当发生有功功率缺额时,电力系统频率下降程 度和下降速度主要取决于4个因素^[9-10]:发电功率 缺额数量、剩余发电机总转动惯量*M*、负荷的频率调 节效应系数*K_L、系统旋转备用容量。其中功率缺* 额、发电机转动惯量及系统旋转备用为已知量,而负 荷频率特性为系统固有特性。当系统频率变化时, 系统的负荷功率也会随频率变化。

考虑到系统阻尼作用,出现有功缺额后频率可 以表示成^[11]

$$f(t) = f_0 \left[1 + \frac{P_a}{D} (1 - e^{\frac{-Dt}{2M}}) \right]$$
(9)

式中 f_0 为系统初始频率; P_a 为系统功率不平衡量; D 为系统总阻尼系数; M 为系统惯性常数。M 一般 取 4 ~ 8 ,系统总阻尼系数 D 一般在 2 以上,当时间 较长时(t > 40 s),考虑极端情况 M 取最大值 8 D 取 最小值 2 $e^{\frac{-Dt}{2M}} \approx 0.000$ 67(可以忽略)。

因此孤网最终稳态频率只取决于孤网功率不平 衡量 *P*_a 及孤网总阻尼系数 *D*,而与惯性常数 *M* 无 关。惯性常数 *M* 只与孤网初始频率变化过程及孤 网最低频率对应时间存在一定影响,但随着时间增 大其对孤网稳态频率影响逐渐减少。

在不考虑系统旋转备用的情况下,可近似认为 孤网总阻尼系数 *D* = *K*_L,由式(9)可知,虽然 *K*_L 的 大小不影响孤网频率的初始下降率,但负荷频率特 性却对系统最低频率及稳态频率有重要的影响。*K*_L 值大的负荷在频率下降过程中从孤网中吸收的有功 负荷减少得更快,因此孤网最低频率及稳态频率较 高,有利于孤网功率平衡和频率快速恢复。

4 仿真分析

和田电网目前通过单回 286.3 km 的 220 kV 玉 • 8 •

莎线和单回 167.87 km 的 110 kV 叶皮线(正常方式 下断开备用)与主网相连,距离主系统 2 000 km 以 上,与主系统联系极其薄弱。和田电网地理接线示 意图如图 3 所示。



图 3 和田电网地理接线示意图

和田地区负荷为 240 MW,主要由波波娜水电 站(3×50 MW)、乌鲁瓦提水电站(4×15 MW) 向其 提供电源。和田地区电网靠玉莎线与主网相连,来 保持地区电网功率平衡。当玉莎线故障跳闸后,和 田电网将与主网解裂孤网运行。此时和田电网功率 不平衡出现功率缺额,孤网频率将降低,系统中的调 速系统、低频低压减载装置动作。地区负荷频率特 性影响低频减载装置动作情况,并且负荷的频率调 节效应系数对系统频率稳定性有影响,因此负荷频 率特性对孤网频率稳定性有很大的影响。下面对和 田电网在不同负荷频率特性情况下进行仿真分析。

假定玉莎线发生永久性断线时玉莎线上传输功 率为 70 MW。和田电网中只有波波娜水电机组调 速系统参与频率调节。

4.1 恒阻抗和感应电动机负荷

在运用 PSASP 程序对和田电网进行仿真时,假 定和田地区负荷主要是恒阻抗和感应电动机组成。 恒阻抗负荷与频率的变化无关,对孤网频率稳定性 影响不太。感应电动机负荷与频率的一次方成正 比,电网中感应电动机负荷比例(*a*₁)的多少对电网 频率稳定性影响很大。当地区负荷主要由这两种负 荷组成时,该地区的频率稳定性主要受感应电动机 的影响。图4 为不同负荷比例情况下对应孤网运行 的频率。

从图 4 可以看出,感应电动机负荷在孤网中所 占比例不同时,孤网中频率变化不相同。随着感应 电动机负荷所占比例增大,孤网的最低频率升高,同 时孤网稳态频率也升高,孤网频率快速得到稳定。 感应电动机负荷所占比例不同时对应的孤网频率特 征如表1所示。



图 4 不同负荷比例对应的孤网频率 表 1 感应电动机比例变化时对应的孤网频率特征

感应电动机 比例/%	孤网最低 频率/Hz	孤网稳定 频率/Hz	孤网稳定 时间/s
0	48.35	49.917	38
40	48.58	49.987	35
50	48.818	49.99	33
60	48.95	49.995	30
100	49.31	49.9997	26

由式(6) 可知,负荷的频率调节效应系数(*K_L*) 与感应电动机负荷所占比例(*a*₁) 有关。当系统中 的感应电动机负荷增大时,对应系统中的负荷频率 调节效应系数也随之增大。由表1 可得,*K_L* 越大, 孤网最低频率及稳态频率较高,孤网频率能快速恢 复,有利于孤网功率平衡。

4.2 综合负荷

为了研究不同负荷模型对孤网频率稳定性的影响 在运用 PSASP 程序对和田电网进行仿真时,假 定和田地区负荷采用 PSASP 程序中的综合负荷模型5 改变负荷模型中恒阻抗的比例。图5 为不同 恒阻抗比例情况下对应孤网运行的频率。





比例不同时,孤网中频率变化不相同,同时孤网频率 出现波动。随着恒阻抗负荷所占比例增大,孤网的 最低频率降低,同时孤网频率波动增大,直至不稳 定。若电网中负荷是由恒阻抗和综合负荷组成,电 网中的恒阻抗负荷比例直接影响系统的频率稳定 性。因此在由恒阻抗和综合负荷模型组成的电网负 荷对孤网频率稳定影响很大(见图6)。对比图4和 图5可以得出,感应电动机负荷比综合负荷更有利 于孤网的频率稳定性。因此在对电网进行仿真分析 时要正确的选取负荷模型,不同的应用选取不同的 负荷模型,这样才能准确地反应实际电网问题,将结 果应用于实际电网分析。



5 结 论

通过对孤网中不同负荷模型及负荷比例对孤网 频率影响分析,得出以下结论。

(1)负荷的频率调节效应系数大的负荷在频率 下降过程中从孤网中吸收的有功负荷减少得更快, 孤网最低频率及稳态频率较高,有利于孤网功率平 衡和频率快速恢复。

(2)负荷的频率调节效应系数(K_L)与感应电动机负荷所占比例(a₁)有关,系统中感应电动机的比例越大,对应的K_L也越大,越有利于孤网频率稳定性。

(3)感应电动机负荷比综合负荷更有利于孤网的频率稳定性。

(4) 在对电网进行仿真分析时要正确地选取负荷 模型 不同的应用选取不同的负荷模型 这样才能准确 地反应实际电网问题 将结果应用于实际电网分析。

(下转第54页)

• 9 •

流侧电压和定有功、无功功率来生成内环 dq 轴参考电流; 内环采用基于 PCHD 模型 L₂ 增益控制器来追踪参考电流 从而达到独立调节有功和无功功率及控制外部干扰的目的。仿真结果表明 ,所设计的 L₂ 增益控制器 具有很高的稳态精度及快速的响应速度 ,且能实现有功、无功功率的独立调节和对外部干扰的抑制。

参考文献

- [1] 陈谦 唐国庆 胡铭.采用 dq 坐标的 VSC HVDC 稳态 模型与控制器设计 [J].电力系统自动化 ,2004 ,28 (16):61 – 66.
- [2] 陈海荣 徐政.基于同步旋转坐标变换的 VSC HVDC 暂态模型及其控制器 [J].电工技术学报,2007,22
 (2):121-126.
- [3] 陈海荣 徐政. 向无源网络供电的 VSC HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报 2006 26(23):42 –48.
- [4] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC HVDC 系统的系统仿真研究[J].电网技术 2005 29 (8):45 50.
- [5] Liu Zhongqi Shao Weijun Song Qiang. A Novel Nonlinear Decoupled Controller for VSC – HVDC System [C]. Power and Energy Engineering Conference 2009, Asia – Pacific.
- [6] 李国栋,毛承雄,陆继明,等.基于逆系统理论的 VSC HVDC 新型控制[J].高电压技术 2005 8(31):45 – 50.
- [7] Jovcic D ,Lamont L ,Abbott K. Control System Design for

(上接第9页)

参考文献

- [1] 黄宗君 李兴源 晁剑 等.贵阳南部电网 "7.7"事故的 仿真反演和分析 [J].电力系统自动化 2007 31(9): 95-100.
- [2] P. Kundur,周孝信,李兴源,译.电力系统稳定和控制[M].北京:中国电力出版社 2002.
- [3] Horne J Flynn D ,Littler T. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2004.
- [4] 耿天翔.负荷特性对电压稳定性影响分析[J].科技创新导报 2012(10):83.
- [5] 熊小伏,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减 载方案研究[J].中国电机工程学报 2005(19):48-51.
- [6] 段俊东 黄家兴.负荷动态特性变化对电力系统静态电压 稳定性的影响研究[J].工矿自动化 2012(2):44-48.
- [7] 翟庆志 李艳军 刘明丹. 电机学 [M]. 北京: 中国电力 出版社 2002.

VSC Transmission [J]. Electric Power Systems Research. 2007 77(7):721-729.

- [8] Lee Tzann Shin. Lagrangian Modeling and Passivity Based Control of Three – phase AC/DC Voltage – source Converter [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004 51(4):892-902.
- [9] 孙元章 刘前进 杨新林. 非线性控制中的 L₂ 增益和无 源化方法 [M]. 北京:清华大学出版社 2002.
- [10] 杨贵杰 孙力 准乃政 ,等. 空间矢量脉宽调制方法的 研究[J]. 中国电机工程学报 2001 21(5):79-83.
- [11] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制 [M]. 北京: 机械工业出版社 2008.
- [12] 孙元章,焦晓红,申铁龙.电力系统非线性鲁棒控制[M].北京:清华大学出版社 2007.

作者简介:

付永良(1987),硕士研究生,从事新型高压直流输电方 面的研究;

王 奔(1960),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制;

陈新华(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为牵引变压器保护双重化;

邓大磊(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量 控制;

王吉庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量 控制。 (收稿日期:2013-03-06)

- [8] 刘健,毕鹏翔,董海鹏.复杂配电网简化分析与优化[M].北京:中国电力出版社 2002.
- [9] 汤涌 侯俊贤 刘文焯 电力系统数字仿真负荷模型中 配电网络及无功补偿与感应电动机的模拟 [J]. 中国 电机工程学报 2005 25(3):8-12.
- [10] 赵强,王丽敏,刘肇旭.全国电网互联系统频率特性及 低频减载方案[J].电网技术 2009 33(8):35-40.
- [11] New W C ,Brown B J ,Goff P G ,et al. Load Shedding , Load Restoration and Generator Protection Using Solid – State Andelectromechanical Under Frequencyrelay [EB/ OL]. Generalelectric Company . http://pm. geindustrial. com/FAQ/Documents/489/GET - 6449. pdf ,1974.

作者简介:

周 专(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向 为电力系统稳定与控制、调度自动化;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统 分析与控制。 (收稿日期:2013-04-24)

• 54 •

一次调频对电网频率特性影响及频率 相关稳控措施研究

胡立锦¹²,杨永全¹,常喜强³,张新燕²,姚秀萍³

(1.重庆电力公司建设分公司 重庆 410021; 2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;3.新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:一次调频对电网频率特性的影响与一次调频系统各项主要技术指标及参数的整定值密切相关。通过理论研究,讨论一次调频不同技术指标和参数整定对电网频率特性影响程度的大小和趋势,并结合运行大电网建立合理的 仿真系统进行仿真计算分析,得出有益于提高电网频率稳定性的一次调频措施和建议。

关键词: 一次调频; 频率特性; 稳定性; 仿真计算

Abstract: The influence of primary frequency modulation on grid frequency characteristic is closely related to main technical indexes and parameter setting values of the primary frequency modulation system. Through the theoretical research, the influence degree and trends caused by different technical indexes and parameter setting values are discussed. Then, the simulation analysis and calculation are carried out on a reasonable simulation system within the large grid which is in operation. The simulation results give some measures and proposal which is beneficial to the improvement of the frequency stability.

Key words: primary frequency modulation; frequency characteristic; stability; simulation calculation

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0010 - 05

0 引 言

一次调频指的是当电网频率超出一定范围时, 电网频率的变化将使电网中参与一次调频的发电机 组能在短时间内自动快速增加或减少负荷,利用机 组的蓄热来快速响应电网频率的变化,以使电网频 率重新趋于新平衡、稳定的能力。它是防止电网频 率大幅波动、维护电网频率稳定的重要手段^[1]。

随着电网跨区域互联、直流输电容量的不断增加以及风能、核能等电源的飞速发展相对降低了电网的自调节能力,大规模接入的风电机组甚至引入了额外的随机功率扰动,使电网稳定性进一步恶化。 合理规范并分析发电机组一次调频主要技术指标变 化对电网频率特性的影响,保障机组良好的一次调频能力,对电网的安全稳定运行和未来智能电网环 境下的优化调度具有重要的意义^[3-5]。

近年来,对发电机组一次调频特性的研究多集 中在对一次调频能力在线估计^[4]的试验研究^[5]和 对一次调频稳定性的研究等两方面。文献[6]中针 基金项目:国家自然科学基金项目(50767003,50867004) 对单机不稳定机组并网后可能稳定这一现象进行了 动态分析,证明了当电网有足够的一次调频稳定储 备时,单机不稳的机组并入电网运行时,其自身的不 稳定随之消失,但在一定程度上降低了电网的一次 调频稳定性。文献[7]理论分析了调差系数设置与 电网频率稳定性和调频能力的关联关系。文献[8] 阐述了机组一次调频应具备的特征,并以此为基础 给出了评价机组一次调频性能的4个指标;讨论了 有效扰动的必备因素,自动发电控制对一次调频效 果评价的影响及处理方法等问题。

这里以静态评价方法为基础,具体分析发电机 组一次调频主要技术指标变化对电网频率特性的影 响,寻找调差系数、频率偏差死区和负荷调节范围等 因素与电网频率的关系,并以某地区实际运行电网 为例建立仿真模型,参考电网具体要求进行仿真分 析,对电网发电机组一次调频系统的参数设置提出 建议。

1 一次调频基本原理

现代发电机组调节系统的控制回路一般如图1

• 10 •

所示,其中δ为机组的转速不等率(亦称调差系数)。正常情况下,当电网的频率在给定的死区范 围内时 机组将严格按照 AGC 或手动负荷指令控制 发电机组的出力。一旦电网出现负荷扰动,不平衡 的功率将促使频率快速变化,当电网频率越过死区 范围时,一次调频回路投入运行,同时将根据转速不 等率的设置,改变机组的出力,维护电网的稳定和平 衡。图2为发电机一次调频的作用图,当功率波动 为 $P_L \rightarrow P_{L2} \rightarrow P_{L1}$ 时,平衡运行点变化为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。







2 一次调频指标对电网频率特性影响分析

2.1 频率偏差死区作用分析

为

调速系统设置死区有两个用途:其一是当设置 的死区较小时,可以过滤转速小扰动信号,使机组功 率稳定;其二是当设置死区较大时,使机组不参与电 网一次调频,只带基本负荷。调速器死区设置过小 及过大都是不合理的,死区过小,轻微的频率偏差都 会引起调速器动作,导致机组频繁调节;死区过大, 即使发生较大功率缺额时调速器也不动作,将影响 系统一次调频。当频率偏差超过死区边界时,调频 死区估计值为

$$\Delta f_D = |f_i - f_N| \tag{1}$$

当频率偏差重归死区边界时 ,调频死区估计值

$$\Delta f_d = |f_i - f_N| \tag{2}$$

考虑调频指令信号的延迟因素,一般定义 Δf_p 与 Δf_d 的加权平均值作为系统实际死区值以配合调速器死区设定。

2.2 调差系数作用分析

发电机随电网频率波动发出功率的单位变化量 为单位调节功率,其倒数即为调差系数,用δ表示, 即

$$\delta = -\frac{\Delta f p_{_{GN}}}{f_{_N} \Delta P_{_G}} \times 100\% = \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100\% \quad (3)$$

当单台机组在同一同步器下运行时,转速由初 始值 n₀ 变为额定值 n_N 的变化量与额定值 n_N 比值 的百分比为系统的调速不等率,可以推导得出调速 不等率在数值上等于调差系数。

$$\frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\% \xrightarrow{n = \frac{60f}{P}} \frac{60f_0/p - 60f_N/p}{60f_N/p} \times 100\%$$
$$= \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100\% = \delta$$
(4)

对于复杂的电网系统调差系数决定了系统频率 与负荷之间的关系,对系统中各发电机组进行等值 可得

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{M} \Delta P_{Gi} = -\frac{\Delta f}{f_N} \times \sum_{i=1}^{M} \frac{P_{GiN}}{\delta_i}$$
$$= -\frac{\Delta f}{\delta_{\Sigma}^* f_N} P_{\Sigma^N} \qquad (5)$$

在电网出现负荷扰动时,较小的δ可以获得调 频机组较大的功率支持,但不利于机组自身的稳定; 反之较大的δ不利于电网应对突发扰动或事故时的 频率稳定,但有利于机组自身设备的稳定运行。实 际中需考虑机组响应一次调频指令的程度和出现功 率超调而过分低估或高估调速不等率δ数值的情况 对计算结果精确度的影响。

2.3 负荷调节范围影响分析

设置机组一次调频最大幅度是因为快速大幅度 变负荷危及到机组的安全运行。对于燃煤发电机 组 机组通过调速器(DEH)快速一次调频变负荷的 最大幅度应通过试验确定,主要以汽轮机调门快速 变化时主蒸汽压力、温度等与机组安全运行参数的 允许变化幅度和速率为依据。而对于已投入 AGC 控制回路的系统在系统发生扰动时,往往容易引起 AGC 指令的变化,使机组的一次调频动作与 AGC 指令变化的响应叠加在一起,此时还应考虑 AGC 指 令对系统的影响。

3 仿真实例分析

某地区孤立电网结构如图 3 所示,电网通过 220 kV 新邵阳变电站与主电网相连。地区电网夏 季外送极限方式下,外送功率为 130 MW,占全网发 电负荷比例为 15.7%;冬季受电极限方式下,输入 极限功率 130 MW,占全网发电负荷比例为 14.9%。



图 3 某地区电网结构图

两个极限方式下,如果不考虑系统低频减载和 低压减载措施,在发生城东一新玛电线路三相短路 跳双回线故障后,当火电机组转速不等率、调频死 区、调频负荷范围采用不同定值时,仿真并分析孤网 频率及发电机原动机功率变化情况。

3.1 调差系数对系统频率特性的影响分析

调差系数是反映机组调频能力的重要指标,既 反映了机组一次调频能力的强弱,又表明了稳定性 的好坏。调差系数越大,机组对电网的调频能力越 小机组运行越稳定;调差系数越小,机组对电网的 调频能力越强,但机组运行的稳定性差。当调差系 数一般设置为3%~6%变化时,得到系统稳定计算 曲线如图4、图5所示。

受电极限方式下,从图4中可以看到,如果火电 机组调差系数取为3%,则机组功率会产生较大的 过调,频率上升超过51.5 Hz,导致发电机 OPC 保护 动作,系统频率恢复时间较长稳定性较差。火电机 组调差系数取为5%或者6%,对系统频率的调节能 力和调节过程相差不大,系统恢复频率均在49.5 Hz 以上。

外送极限方式下,从图 5 中可以看到,如果火电 机组调差系数取为 3%则系统频率波动较大稳定



图 5 外送极限方式机组调差系数对孤网影响曲线 性较差。火电机组调差系数取为 5% 或者 6%,对系 统频率的调节能力和调节过程相差不大,系统恢复 频率均在 50.5 Hz 以下。

3.2 调频偏差死区对系统频率特性的影响分析 不同死区设置仿真曲线如图 6、图 7 所示。



图7 外送极限方式机组死区设置对孤网影响曲线 电网机组目前实际调速器死区设置分别为5 转 (天河机组)和2转(其他机组)。由图6、图7中可 以看到,参照该地区电网一次调频管理规定,孤岛电 网机组调速器死区设置为2转(电液型)或者6转 (机械、液压),对发电机功率调节和孤网频率变化 影响都不大。因此,目前机组的实际设置可继续采 用,若进一步调查及核实天河机组的调速器类型和 死区设置,还是能在一定程度上改善电网性能。 3.3 负荷调节范围对系统频率特性的影响分析 图 8、图 9 为不同运行方式下改变一次调频限 幅比例电网影响曲线。



图 9 外送极限方式机组限幅对孤网影响曲线

电网受电极限方式下,如果一次调频向上限幅 10%,则发生联络线断开故障后,即使全部机组功率 全部上调10%,仍然不能弥补电网功率缺额,孤网 频率将停留在47 Hz以下,还需要采取低频减载措 施才能保证系统频率稳定。外送极限方式下,如果 一次调频向下限幅10%,则发生联络线断开故障 后,即使全部机组功率全部减少出力10%,孤网仍 有剩余功率,系统频率最高大于52 Hz,将引发电机 OPC 保护动作,因此还需要采取高周切机措施防止 OPC 动作以及使系统频率恢复。

• 13 •

从图 8 中可以看到,设置较大的一次调频限幅, 可以在较大范围内调节机组功率,有利于系统频率 的恢复。极限方式下,电网机组限幅20%可以满足 孤网对系统频率调节的需求。但电网目前除天河电 厂外,其他火电厂发电机组大都为供热机组,在考虑 供电的同时,需保证稳定的供热,因此一次调频幅度 不能设置的过大;非供热火电机组受锅炉蓄热能力 限制,向上调频幅度亦不能过大。





天河电厂只通过1条220 kV 线路接入系统 ,发 生单机带天铝负荷的可能性较大,且在此情况下,只 有通过调节天河机组出力,才有可能保证天铝负荷 的供电并维持单机带负荷系统的频率在正常水平。 图 10 为发生天河一绿洲 220 kV 线路三相故障后, 在天河机组采用不同限幅定值下单机带负荷系统的 频率和机组出力变化情况。从图中可以看到,当天 河机组向下限幅整定为 20% 时,由于压出力速度较 慢 孤网初始频率波动最高值超过 55 Hz 机组 OPC 保护将动作立即关停机组;当天河机组向下限幅整 定为 50% 时,孤网初始频率波动最低值又低于 49 Hz ,如果天铝厂内配置低频减载装置 ,则部分负荷 将被低频切除:当天河机组向下限幅整定为 30% 时 孤网频率波动最高 53.5 Hz、最低 49.1 Hz、稳态 值约在 50.5 Hz 能够满足系统对频率的要求 同时 波动过程中又不致引起稳控装置的动作,但需要引 起注意的是,在单机带负荷运行情况下,天河机组 OPC 保护的 51.5 Hz 保护功能不能够投入,否则 OPC 反复动作 孤网频率最低到 30 Hz 以下 天河机 组不能够带负荷稳定运行。

4 结 论

电网能源结构、地理布局、运行方式、机组参数 等的多元化使得电网频率特性的可控性和可预见性 大幅降低,对电网频率特性及其主要影响因素进行 研究具有不可言喻的必要性和价值。从影响频率特 性的一次调频方式入手,讨论和分析不同一次调频 评价指标对电网频率特性的影响规律,结合某地区 实际电网仿真并得出以下结论。

(1)调差系数较大时频率下降较大,调速系统 能调出的有功功率较少,系统的稳定性较好,调差系 数设置过小容易引起系统波动加剧,不利于系统恢 复稳定,在满足系统其他参数整定的前提下可以适 当调高调差系数以优化系统频率响应程度。

(2) 死区设置对电网频率特性影响较小,一般满足设置:电液型汽轮机调节控制系统的火电机组和燃机死区控制在±0.033 Hz(±2 r/min)内; 机械、液压调节控制系统的火电机组和燃机死区控制在±0.10 Hz(±6 r/min)内;水电机组死区控制在±0.05 Hz内。若要进一步提高死区设置的准确性需根据当地电网实际和相关技术标准进行试验整定。

(3) 燃煤机组由于锅炉蓄热能力有限,燃烧调整需要较长时间,在加负荷方面以6%~10%为宜; 当不平衡功率超过一次调频负荷上限,通过低周减载保证电网频率在允许范围。在减负荷方面可以将 一次调频下限设置为-50%,防止 OPC 反复动作造成机组和电网振荡;若不平衡功率大于50%,还应 采用其他电网稳定措施。

参考文献

- [1] 刘念,谢驰,滕福生,电力系统安全稳定问题研究[J].四川电力技术 2004 28(1):1-6.
- [2] 于达仁,郭钰锋,徐基豫.发电机组并网运行一次调频的稳定性[J].中国电机工程学报 2000 20(9):59-63.
- [3] 高林 戴义平,马庆中,等.特高压线路解列后区域互 联电网一次调频稳定性研究[J].电网技术,2009,33
 (20):27-32.
- [4] 段南 ,李国胜 ,王玉山. 大型火电机组一次调频功能投入的研究[J]. 华北电力技术 2003(10):1-4.
- [5] 吴瑞涛,常澍平,肖利民.电网调度侧一次调频在线监测系统的开发与应用[J].河北电力技术,2008,27
 (3):15-22.

(下转第65页)

• 14 •

信息类型将实时信息进行分类,再结合历史信息和 设备运行情况,对保护的健康水平进行综合评价,判 断设备是否处于异常状态。而专家分析系统根据继 电保护装置的报警信息,利用推理原则进行推理分 析,同时,结合运行人员的经验判断来诊断保护装置 可能的异常。



图 5 保护状态检修系统工作流程图

4 结 论

继电保护装置状态检修的应用正方兴未艾,在 介绍了继电保护检修技术现状及状态检修技术应用 难点的基础上,提出了实现继电保护状态检修的关 键技术,分析了继电保护状态检修系统的基本结构 和功能组成,为继电保护状态检修的实用化作出了 一些尝试,希望能起到抛砖引玉的作用,促进继电保 护装置状态检修早日实施。

(上接第14页)

- [6] 杨冬 刘玉田 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合 决策方法[J]. 电力系统自动化 2010 34(12): 34 38.
- [7] 竺炜,谭喜意,唐颖杰,等. 汽轮发电机组一次调频性能的分析[J].电力系统自动化,2008,32(24):52-55.
- [8] 金娜,刘文颖,曹银利,等.大容量机组一次调频参数 对电网频率特性的影响[J].电力系统保护与控制, 2012,40(1):91-95.
- [9] 于达仁 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72 - 76.
- [10] 尹峰. CCS 参与的火电机组一次调频能力试验研究 [J]. 中国电力, 2005, 38(3):74-77.
- [11] 张江滨 李华 谢辉平. 水电机组并网运行频率调节 系统的稳定性[J]. 电网技术 2009 33(9): 57-62.
- [12] 刘明松 孙华东 何剑. 考虑暂态频率偏移的一次调 频旋转备用优化方法 [J]. 电网技术 2011 25(8): 129-133.
- [13] 张江滨 李华 ,谢辉平. 基于发电机组出力曲线特征

参考文献

- [1] 吴杰余,张哲,尹项根,等. 电气二次设备状态检修研究[J]. 继电器,2002,30(2):22-24.
- [2] 高翔,刘韶俊.继电保护状态检修及实施探讨[J]. 继电器,2005,33(20):23-27.
- [3] 韩平,赵勇,李晓朋,等.继电保护状态检修的实用化尝 试[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):92-95.
- [4] 李永丽,李致中,杨维.继电保护装置可靠性及其最
 佳检修周期的研究[J].中国电机工程学报,2001,21
 (6):63-71.
- [5] 丁茂生,王钢,贺文.基于可靠性经济分析的继电保 护最优检修间隔时间[J].中国电机工程学报,2007, 27(25):44-48.
- [6] 李红宁,张勇军,吴国沛,等.基于可靠性分析的微机继电保护设备最佳检周期研究[J].电力自动化设备,2007,27(9):71-74,87.
- [7] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等. 2008 年国家电网公司继
 电保护装置运行情况[J]. 电网技术,2010,34(3):
 173-177.

作者简介:

宋 柯(1969),男,高级工程师,从事水电站生产管理 工作;

何 滔(1983),男,工程师,从事电力系统继电保护工 作;

郑焯文(1990),男,硕士研究生,主要研究方向为电力 系统继电保护。 (收稿日期:2013-03-31)

的一次调频性能评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(7):99-103.

- [14] 王珍意 谢一工, 尹成全,等. 对 CPS 标准下 AGC 与 一次调频配合问题的研究 [J]. 电力系统保护与控 制 2007, 37(19): 22-25.
- [15] 周德强.基于最小一乘法的 GM(1,1) 模型及在负荷 预测中的应用 [J].电力系统保护与控制,2011,39 (1):100-103.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事电力系统安全控制 分析方面的研究;

杨永全(1973),男,高级工程师,主要从事风力发电机 技术方面的研究;

常喜强(1978),男,高级工程师,主要从事电力系统安 全稳定分析工作;

张新燕(1964),女,博士,教授,博士生导师,研究方向 为风力机控制、电气系统优化设计。

(收稿日期:2012-04-24)

调速系统对孤网频率稳定性影响分析

任 华¹ 姚秀萍^{1,2} 常喜强² 周 专¹

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:随着区间电网的互联,各地区的自然资源得到充分的利用。但是有些区间联络线由于输电走廊限制等原因 相对较弱,一旦发生解列事故,容易形成送端(受端)孤立电网,将导致局部系统功率严重失衡,系统的频率稳定问题 就会凸显出来。以新疆阿勒泰地区电网为研究对象,分析调速系统调速特性以及调速系统对孤网频率稳定性的影 响,得出孤网中不同容量机组调速系统对孤网频率影响不同;水电机组调速系统和火电机组调速系统对孤网频率影 响不同;不同容量水电、火电机组调速系统之间的配合对孤网频率影响不同。运用 PSASP 仿真验证了相关结论。这 对实际电网运行、水电和火电机组调速系统之间的配合具有重要的参考价值。

关键词: 电力系统功率频率特性; 调速系统; 调速特性; 负荷调节效应

Abstract: Along with the interconnection of interval power grids, natural resources in different areas have been utilized sufficiently. But because of the weakness of some interval links caused by transmission corridor limit and so on, the send – end isolated power grid and the receiving – end isolated power grid will come into being easily if the splitting accidents happen, which will lead to the serious power imbalance of local system, and some problems about the stability of system frequency will come up. Taking the power grid of Altay as the objective of the research, the characteristic of governing system and the influence of governing system on frequency stability of isolated power grid are analyzed. It is obtained that the governing system of the unit with different capacity has different impacts on the frequency of isolated power grid, the governing system of hydroelectric generating set and the cooperation between governing systems of hydroelectric generating set and thermoelectric generating set and thermoelectric generating set with different capacity has different impacts on the frequency of isolated power grid. The simulation with PSASP verifies the related conclusions, which has an important reference for the operation of actual power grid and the cooperation between the governing systems of hydroelectric generating set.

Key words: power frequency characteristic of power system; governing system; speed governing characteristic; load regulation effect

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0015 - 04

0 引 言

随着中国经济的发展,中国的电网规模在不断 扩大,区间联网送电规模也在不断增大,这有利于对 各地区自然资源合理利用,大力发展清洁能源。但 区间联络线由于输电走廊限制等原因相对较弱,一 旦发生解列事故,容易形成送端(受端)孤立电网, 将导致局部系统功率严重失衡,送端电网功率大量 剩余,而受端电网功率严重缺额,系统的频率稳定问 题就会凸显出来^[1-3]。 常规机组的调速系统对系统频率稳定性有很大 的影响。当系统功率发生变化时常规机组调速系统 动作使频率稳定在一定范围^[4]。现以新疆阿勒泰 地区电网为研究对象,分析调速系统调速特性以及 调速系统对孤网频率稳定性的影响,得出孤网中不 同容量机组调速系统对孤网频率影响不同;水电机 组调速系统和火电机组调速系统对孤网频率影响不 同;不同容量水电、火电机组调速系统之间的配合对 孤网频率影响不同。运用 PSASP 仿真验证了相关 结论。对实际电网运行、水电和火电机组调速系统 之间的配合具有重要的参考价值。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017)

1 电力系统频率调节过程

电力系统功率频率特性是指系统有功功率不平 衡时频率的变化特性,它是负荷频率特性、发电机频 率特性以及电压影响的综合结果。

电网中有功功率和频率相互影响,当系统中有 功功率不平衡量为 Δ*P* 时,系统中的频率变化量 Δ*f* 可表示为

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_s} \tag{1}$$

若系统中的发电机和负荷同时参与系统频率调 节,则系统的单位调节功率(*K*)可表示为

$$K_{s} = \sum_{i=1}^{n} K_{Gi} + \sum_{j=1}^{m} K_{Lj}$$
 (2)

式中 K_{Gi}为某台发电机的单位调节功率; K_{Ij}为电网中负荷类型的单位调节功率。

在电网负荷发生变化时 旅靠发电机的调速器以 及负荷的调节效应的共同作用而使电网在新的频率 下稳定运行^[5-6]。电网频率调节过程如图 1 所示。





如图 1 所示,电网正常稳定运行在 a 点,此时电 网功率平衡。当电网中负荷从 P_L 变为 P_{L1}时系统将 出现功率缺额,导致发电机转速下降,从而使系统中 的频率下降。若系统中常规机组调速系统没有投 运,系统中发电机组出力保持不变,系统中只能通过 负荷调节效应稳定在 b 点,系统中的频率将大幅下 降。在有调速器的情况下,调速器和负荷调节效应 同时参与消除出现的功率缺额。调速器动作增大发 电机组出力,频率降低使得负荷有功功率 P_L 减小, 最终稳定在 c 点,系统频率稳定在合理的范围内。

2 机组一次调频的调节机理

• 16 •

调速器是通过改变发电机的蒸汽汽流(或进水

量) 使之满足发电机的转速调节需求,从而达到功 率调节的目的。根据自动调节原理,通过转速反馈 来实现闭环控制,方法即为测量转速,将其放大后反 馈到输入端并与给定值作比较来控制调节汽阀行程 的大小,从而改变蒸汽流量,实现控制转速的目的。 转速调节系统的框图如图2所示。



图 2 转速调节系统框图

在闭环控制系统中,调速系统根据给定值和实际值的偏差进行调节。由于反馈回路的存在,若实际输出值不等于给定值,调节系统将进行调节,直到给定值与实际输出值基本相等为止。图3为火电机组调速器控制系统框图。



图 3 调速器控制系统框图

电网中参与系统频率调节的机组有水电机组调 速系统和火电机组调速系统。当系统有功功率平衡 遭到破坏,引起频率变化时,原动机的调速系统将自 动改变原动机的进汽(水)量,相应增加或减少发电 机的出力。

3 仿真分析

阿勒泰电网目前通过双回 97 km 的 220 kV 丰 泉一、二线和单回 128.97 km 的 110 kV 托铁线(正 常方式下断开备用)与主网相连。阿勒泰地区电网 公司所属发电厂总装机容量为 1 048 MW,其中火电 600 MW、水电 250 MW、风电 198 MW。阿勒泰地区 总负荷为 283.4 MW。阿勒泰电网地理接线示意图 如图 4 所示。



勒泰电网将通过丰泉一、二线向主网输送功率。现以 阿勒泰电网为研究对象 ,仿真 220 kV 丰泉一、二线发生 永久性断线 阿勒泰电网将与主网解裂孤网运行 ,分析 孤网内各调速系统对孤网频率稳定性的影响。

3.1 方案1

220 kV 丰泉一、二线发生永久性断线后,阿勒 泰电网将出现功率富裕,孤网内频率将上升,安全自 动装置动作切除部分机组。假定孤网内所有机组的 调速系统不参与一次调频。网内频率变化只能通过 切除机组和负荷调节效应来调节。而负荷调节效应 只能在小范围内调节,此时只能通过安全自动装置 动作切除机组,使功率平衡、频率稳定在合理范围 内。图 5 为切除孤网内部分机组出力后孤网内频率 和各机组出力曲线。



c 水电机组功率曲线

图6 水电机组参与,火电机组不参与时特征曲线 由图4可知,若孤网系统中所有机组调速系统 不参与调节时孤网内安全自动装置动作切除过剩的 功率。在所有机组调速系统不参与调节时系统中的 频率不会发生大的波动,孤网内只能通过安全自动 装置以及负荷调节效应使系统中的频率稳定在合理 范围内^[8]。同时各机组出力只在解网时一个大的 ・17・ 波动很快恢复到原始出力保持出力不变。但是由图 4 可以看出,安全自动装置切多余的功率全部为火 电或切水、火电时孤网内的频率不相同,在切同样多 的功率情况下切火电最后稳定频率要比切水、火电 的要低且波动要大。

3.2 方案2

假定网内水电机组调速系统参与系统频率调 节 而火电机组调速系统不参与系统频率调节。孤 网内频率变化 通过安全自动装置切除部分过剩功 率 其他过剩功率通过水电机组调速系统和负荷调 节效应同时参与调节使孤网内频率在合理范围内波 动。图 6 为安全自动装置动作切除机组部分出力后 孤网内频率及水、火电机组出力的仿真曲线。

从图 6 可以看出,水电机组调速系统参与调节, 火电机组调速系统不参与调节时,孤网内频率会产 生波动,最高频率达54.5 Hz,最低频率为48.2 Hz。 水电机组出力在额定出力以下波动,而火电机组出 力在额定出力以上波动。由此可得水电机组调速系 统在调节系统频率的同时引起系统中火电机组出力 的波动。 电机组调速系统具有调节效应。孤网内频率变化, 通过安全自动装置切除部分过剩功率,其他过剩功 率通过火电机组调速系统和负荷调节效应同时参与 调节使孤网内频率在合理范围内波动^[9-10]。图7 为安全自动装置动作切除机组部分出力后孤网内频 率及水、火电机组出力的仿真曲线。

从图 7 可以看出,火电机组调速系统参与调节, 水电机组调速系统不参与调节时,孤网内频率会产 生波动,最高频率达 50.45 Hz,最低频率为 49.89 Hz。水电机组出力为额定出力,而火电机组出力在 额定出力以下波动。对比图 6 和图 7 可得,火电机 组调速系统对孤网频率调节能力强,对孤网的冲击 影响比较大。

3.4 方案4

假定水电机组调速系统、火电机组调速系统都 参与孤网频率调节。孤网内频率变化通过安全自动 装置切除部分机组出力、水电机组调速系统、火电机 组调速系统和负荷调节效应来共同调节。图8为安 全自动装置动作切除机组部分出力后孤网内频率及 水、火电机组出力的仿真曲线。



统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):7-11.

- [2] 李碧君 温柏坚 徐泰山,等.省地两级电网安全稳定 协调防御框架及关键技术[J].电力系统自动化, 2011,35(21):26-30.
- [3] 王保义 邱素改 涨少敏. 电力调度自动化系统中基于

(上接第18页)

由图 8 可以看出,当孤网中所有机组调速系统 都参与频率调节时,孤网内频率波动特别大。孤网 内所有机组调速系统都参与频率调节有可能导致机 组调速系统调节过度,使孤网内频率下降特别厉害 引发低频减载装置动作。

通过对孤网内调速系统有没有参与孤网频率调 节仿真分析,可以得出孤网运行时系统中的频率变 化只能靠稳控装置动作以及负荷调节效应来使系统 中的频率稳定在一合理范围,但是此时系统对频率 调节能力非常差。通过仿真对比分析水电机组调速 系统与火电机组调速系统对孤网频率稳定的影响, 可以得出孤网中水电机组调速系统能快速地响应系 统中的频率变化,但是孤网水电机组调速系统参与 系统频率调节时系统中的频率波动比较大,而火电 机组调速系统能使系统频率很快稳定在一合理范 围。孤网内水电和火电机组调速系统同时参与系统 频率调节时可以提高系统对频率的调节能力,两者 能够弥补之间的不足。

4 结 论

通过对阿勒泰电网仿真分析可得在孤网运行时 调速系统对孤网频率稳定性影响比较大。当地区电 网中大部分负荷是由水电机组供应时,由于水电机 组调速系统的动态反调特性影响使地区电网与主网 解列后的频率稳定性降低。应尽快在地区电网内建 设火电机组,利用火电机组一次调频作用中和水电 机组动态反调特性,提高地区电网与主网解列后频 率稳定性。孤网内各水电机组都参与频率调节时能 快速响应系统中频率的变化,但是孤网内频率波动 较大。在安排电网运行方式进行时,因考虑孤网时 频率受水电和火电机组调速系统的影响不同,合理 安排机组的运行方式。 可信度的访问控制模型[J]. 电力系统自动化,2012, 36(12):76-81.

[4] 汪际峰. 一体化电网运行智能系统的概念及特征[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):1-6.

(收稿日期:2013-03-05)

参考文献

- [1] 黄宗君 李兴源 晁剑 筹.贵阳南部电网 "7.7"事故的 仿真反演和分析 [J].电力系统自动化 2007 31(9): 95-100.
- [2] P. Kundur,周孝信,李兴源,译.电力系统稳定和控制 [M].北京:中国电力出版社 2002.
- [3] Horne J Flynn D ,Littler T. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2004.
- [4] 于达仁 郭钰锋 徐基豫.发电机组并网运行一次调频的稳定性[J].中国电机工程学报,2000,20(9):59-63.
- [5] 何仰赞 温增根. 电力系统分析 [M]. 武汉: 华中科技 大学出版社 2002.
- [6] 周海锋 徐志勇,申洪.电力系统功率频率动态特性研究[J].电网技术 2009 33(16):58-62.
- [7] 黄青松 徐广文.水轮机调速系统自定义建模与应用[J].电力系统自动化 2012 36(16):115-117.
- [8] 竺炜 唐颖杰,谭喜意.发电机调速附加控制对系统频率稳定的作用[J].电力自动化设备 2008 28(12):21
 -24.
- [9] 涂振祥.多喷嘴冲击式大型水轮机组的调速器控制与 特殊工况运行问题研究[J].电力系统保护与控制, 2009 37(16):16-19 34.
- [10] 金娜,刘文颖,曹银利,等.大容量机组一次调频参数 对电网频率特性的影响[J].电力系统保护与控制, 2012,40(1):91-95,100.

任 华(1984),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向 为电力系统稳定与控制、调度自动化;

周 专(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制。

(收稿日期:2013-04-22)

• 39 •

作者简介:

四川特/超高压电网脆弱度分析及应用

李 燕¹ 苟 竞² 汪彦含² 陈 晨² 魏震波²

(1. 四川电力科学研究院,四川,成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院,四川,成都 610065)

摘 要:在传统电网脆弱性分析基础上,结合特/超高压电网的特点,运用基于复杂网络的结构脆弱性和基于潮流熵 的状态脆弱性理论,对四川特/超高压电网脆弱度进行分析,以此识别四川特/超高压电网的脆弱元件。分析结果表 明:四川电网具有典型的小世界网络结构特性,同时在不同的运行方式下,四川电网的脆弱节点和脆弱支路会发生转 移,其结果可以为电网的调度运行提供参考。

关键词:结构脆弱度;状态脆弱度;小世界网络;脆弱节点;脆弱支路

Abstract: Based on the vulnerability analysis of the traditional power grid and the features of EHV and UHV power grid, the vulnerability of Sichuan EHV and UHV power grid is analyzed in order to identify the vulnerable components of Sichuan EHV and UHV power grid by using the theory of structural vulnerability based on complex network and the state vulnerability based on power flow entropy. The results show that Sichuan power grid has the typical structural features of small world network , and under the different operating modes , the vulnerable buses and vulnerable branches of Sichuan power grid will shift. The results can provide a reference for the dispatching and operation of power grid.

Key words: structural vulnerability; state vulnerability; small world network; vulnerable buses; vulnerable branches 中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0019 - 04

0 引 言

随着电力工业的快速发展 特/超高压电网输电 技术的运用成为电力系统新的发展方向。以节能减 排及拉动内需为主旨的新一轮电力改革及电网建设 正在进行当中,电网规模的不断扩大及系统元件的 日益复杂为电网安全稳定与控制提出了新的更高要 求。电力系统由于自身原因和外部因素的影响,电 网事故时常发生,近来年随着全球气候环境的恶化, 冰雪灾害、地震、泥石流等地质灾害频发,对电网的 安全稳定带来重大挑战^[1-3]。

随着特/超高压电网在四川电网相继投运,特/ 超高压电网的输电优势可以提高四川电网的输电能 力,因此确保特/超高压电网安全稳定运行就显得尤 为重要。传统基于 EMS 的调度人员潮流计算和优 化调度模式,以及 *N* – 1、*N* – 2 设备模拟开断计算分 析安全性能否适应这种大规模复杂电网的实时运行 分析是急需考虑的问题。因此,结合特/超高压电网 的特点,运用基于复杂网络的结构脆弱性和基于潮流 熵的状态脆弱性理论,对四川特/超高压电网脆弱度 进行分析 以此识别四川特/超高压电网的脆弱元件。

1 基于复杂网络的电网结构脆弱性

复杂网络是对复杂系统(指由具有许多不同状态的大量基本单元的非线性作用下形成的有机整体)的一般抽象和描述方式,它突出强调了系统结构的拓扑特征。一个具体网络可抽象为一个有点集 V和边集 E 组成的图 G = (V E)。节点数记为 N = |V|,边数记为 M = |E|。E 中每条边都有 V 中一对 点与之相对应。如果任意点对(i_j) 与(j_i) 对应同 一条边 则该网络称为无向网络,否则称为有向网 络。如果给每条边富裕相应的权值,那么该网络就称为加权网络,否则称为无权网络。

在实际电网拓扑建模的基础上,运用复杂网络 理论来研究电网结构脆弱性,首先要将电网简化为 网络拓扑模型,进而对电网的平均距离、聚类系数、 节点度数、节点介数等特征参数进行计算、分析。简 化方法可以描述为^[4,5]:考虑除电厂和变电站母线 外的所有线路,将电网中所有节点分为发电机节点 集合、负荷节点集合、变电站节点集合等3类,合并

• 19 •

同杆并架的输电线路,忽略线路的并联电容支路,输 电线路和变压器支路均简化为无向有权边,边的权 重即线路的效能。经过上述简化原则,电力网络简 化为一个由N个节点和k条线路组成的稀疏连通 图,由 $N \times N$ 阶连接权矩阵 $\{e_n\}$ 表示。

复杂网络中典型的特征参数如下。

(1)网络平均距离 L。网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij}定义为连接这两个节点的最短路径权 重和^[6]。对所有节点之间的最短距离求平均值,即可得到该网络的平均距离为

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq 1} d_{ij}$$
 (1)

(2) 聚类系数 *C*。聚类系数是一个表征近邻节 点联系紧密程度的特征参数。假设网络中的一个节 点 *i* 有 *l_i* 条边将它和其他点相连,这 *l_i* 个节点之间 最多存在 *l_i*(*l_i* - 1) /2 条边,而这 *l_i* 个节点之间实际 存在的边数 *E_i* 和总的可能的边数之比就定义为节 点 *i* 的聚类系数,即

$$C_{i} = \frac{2E_{i}}{l_{i}(l_{i} - 1)}$$
(2)

(3) 节点度数 K。节点 i 的度 K_i 为与节点 i 连接的边权和。

$$K_i = \sum_{j \in i} w_{ij} \tag{3}$$

其中 µu;;表示节点 i、j 之间边的权重。

(4)节点介数 B。网络中不相邻的节点 i 和 j 之间的路径主要依赖于节点 j 和 k 的路径上所经过的节点,如果某个节点被其他许多路径经过,则表示该节点在网络中很重要,定量地描述某个节点在网络中的影响力或重要性可以用顶点的介数来衡量,定点 i 的介数 B_i 定义为

$$B_{i} = \sum_{j \ k \in v} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$$
(4)

其中 n_{jk} 表示节点 $j \le k$ 之间的最短路径的条数; $n_{jk}(i)$ 表示 $j \le k$ 之间的最短路径中经过节点i的条数。

2 基于潮流熵的电网状态脆弱性

2.1 基于节点潮流分布熵的节点脆弱度评估模型

系统正常工况下处于平衡基态,此时系统支路 *i* 的潮流为 *P_{i0}*; 当节点 *a* 负荷单位增加即系统在受到 扰动冲击工况下,支路 *i* 潮流为 *P_{ia}*; 节点 *a* 受到扰 动后过支路引起的潮流增量为

• 20 •

$$\Delta E_{ia} = P_{ia} - P_{i0} \tag{5}$$

将 Δ*E_{ia}*定义为节点 *a* 对支路 *i* 的潮流冲击 ,则 节点 *a* 对系统的潮流冲击为

$$\Delta E_a = \sum_{i=1}^{L} (P_{ia} - P_{i0})$$
 (6)

支路 *i* 所承担节点 *a* 对系统潮流冲击的比例用 支路 *i* 的潮流冲击率 η_{ia}来表示。

$$\eta_{ia} = \frac{\Delta E_{ia}}{\Delta E_a} \tag{7}$$

因此节点 a 的潮流分布熵为

$$H_D(a) = -\sum_{i=1}^L \eta_{ia} \ln \eta_{ia} \qquad (8)$$

*H_p(a)*的大小反映了不同节点过负荷扰动下系统所受潮流冲击的分布特性。因此,结合节点的潮流分布熵定义节点的脆弱度为

$$VN_a = \frac{\Delta E_a}{H_{Dmax}(a)} \tag{9}$$

 ΔE_a 表示节点单位扰动对系统的潮流冲击, ΔE_a 越大,节点 a 受扰对系统潮流冲击越大,节点 a的潮流分布熵越小,系统的潮流冲击分布越聚集在 少数几条支路上,则节点脆弱指标 $H_{Dmax}(a)$ 越大,节 点 a 的过负荷越容易导致支路越限。

2.2 基于潮流熵的支路综合脆弱度评估模型

由式(7) 可知节点 a 在支路 i 上的潮流冲击率 表示为 $\eta_{ia} = \frac{\Delta E_{ia}}{\Delta E_a}$,定义节点 a 的负荷扰动在支路 i的潮流分布熵为

$$H_{Di}(a) = -\eta_{ia} \ln \eta_{ia} \qquad (10)$$

"发电机一负荷"节点对的负荷扰动在支路 *i* 的 潮流分布熵为

$$H_{Di}(g \ d) = H_{Di}(g) - H_{Di}(d)$$
$$= \eta_{id} \ln \eta_{id} - \eta_{ig} \ln \eta_{ig} \qquad (11)$$

其中 g 为发电机节点; d 为负荷节点。

由负荷波动的随机性,支路受到的潮流冲击分 为全局冲击和局部冲击。全局冲击为支路受到的来 自每一组"发电机 – 负荷"节点对间负荷波动引起 的潮流冲击在该支路的叠加,局部冲击为支路受到 的来自"发电机 – 负荷"节点对间负荷波动引起的 最大冲击,因此,基于支路潮流分布熵的支路冲击脆 弱度为

$$V1_{i} = \frac{1}{2} \{ \frac{1}{N_{c}N_{L}} + \sum_{g \in G} \sum_{d \in L} (H_{i}(g \ d) + \max(H_{i}(g \ d))) \}$$
(12)

其中 N_c 、 N_L 分别为发电机节点与负荷节点数目; G 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合。

当电网中支路 *l_i* 断开时支路 *l_k* 分担支路 *l_i* 转移的潮流为

$$\Delta \lambda_{ki} = P_{ki} - P_{k0} \tag{13}$$

其中 P_{ki} 为支路 i 断开后支路 k 上的潮流 将 ΔE_{ka} 定 义为支路 i 对支路 k 的潮流转移冲击 ,则支路 i 对支 路 k 的潮流转移冲击率为

$$\beta_{ki} = \frac{\Delta \lambda_{ki}}{\sum_{k=1}^{L} \Delta \lambda_{ki}}$$
(14)

定义支路 i 的潮流转移熵为

$$H_T(i) = -\sum_{k=1}^L \beta_{ki} \ln \beta_{ki} \qquad (15)$$

因此定义基于支路潮流熵的支路转移脆弱度为

$$V_{2i} = \frac{P_i}{H_T(i)}$$
(16)

P_i 表示支路 *i* 的潮流 ,断开支路的潮流 *P_i* 越 大 ,其断开后对其他支路冲击越大 ,支路 *i* 断开后的 潮流转移熵 *H_T*(*i*) 越小 ,系统的潮流转移冲击分布 越聚集在少数几条支路上 ,则支路 *i* 的后果脆弱指 标 *V_{2i}*越大 ,支路 *i* 的断开潮流转移的冲击越大对系 统造成的影响后果越严重。更容易造成系统中支路 越限 ,甚至连锁故障的发生。

因此,提出结合线路冲击和后果的综合脆弱评 估模型 *V_i*。

$$V_i = V_{1i} V_{2i}$$
 (17)

式(17) 中,*V*_{1i}表示支路*i*抵抗扰动的能力大小 即支路*i*退出运行的难易程度;*V*_{2i}表示支路*i*退出 运行后对系统造成的后果严重程度。因此,支路综 合脆弱度指标*V_i*的物理意义为支路*i*受扰动的影 响越大,且退出运行后对系统的危害越大,则支路*i* 越脆弱。故对支路的脆弱度评估结果进行归一化处 理,以提取相对脆弱强度,便于比较排序。

3 四川特/超高压电网脆弱度分析

为进一步落实国家"西电东送"战略,四川电网 在"十二五"期间将形成特高压交直流并列的外送 通道,外送功率将超过30GW。四川电网电源结构 特殊,水能资源丰富且占比重大,主要分布在川西地 区,丰富的水电资源需要外送,其主要外送华中、华 东电网^[7]。而枯水期由于水电资源不能满足本地 及外送负荷欲求 濡靠西北火电支援。因此 在不同 的运行方式下 四川特高压电网的脆弱元件也会有 所不同。

3.1 结构脆弱度分析

运用第1节中建立的复杂网络结构脆弱度评估 模型,对四川特/超压电网的复杂网络结构特性进行 分析,具体计算内容如下:①将电网作为一个无向无 权网络,计算其小世界特性;②将电网的输电线路长 度作为权重,计算其小世界特性。其中权重由将每 条输电线长度除以所有统计中最大的线路长度得 到;③将电网运行方式中计算出流过线路潮流作为 权重,计算其小世界特性。结果如表1~4 所示。

表1 复杂网络结构特性

网络性质	节点 个数	网络 平均距离	聚类 系数
无向无权网络	201	8.386	0.114 0
输电线路长度为权重	201	8.717	0.124 0
丰大有功潮流为权重	195	6.322	0.111 0
枯大有功潮流为权重	194	6.370	0.098 0
丰小有功潮流为权重	189	6.835	0.082 0
枯小有功潮流为权重	189	6.795	0.084 0
同等随机网络	201	6.092	0.011 9
+			

表 2 复杂网络节点介数特征

网络性质	节点介数最高的前10位
无向无	龙王、朱坎、东坡、平春、石羊、凉水井、棉
权网络	丰、孙家坝、松柏、新棉
输电线路	龙王、朱坎、东坡、平春、石羊、凉水井、棉
长度为权重	丰、孙家坝、松柏、新棉
丰大有功潮	向家岭、园湾、松柏、广惠、双堰、大方、桥
流为权重	沟、九里、朱坎、南充
枯大有功潮	舒平、松林、铜街子、向家岭、东坡、园湾、
流为权重	范坝、松柏、广惠、双堰
丰小有功潮	向家岭、园湾、松柏、广惠、双堰、大方、桥
流为权重	沟、九里、朱坎、南充
枯小有功潮	舒平、松林、铜街子、向家岭、东坡、园湾、
流为权重	范坝、松柏、广惠、双堰
	可以看出,四川电网及相应的考虑线路
全度 线路法	动的功率方式的网络都目有小世界特

长度、线路流过的功率方式的网络都具有小世界特性。现有四川电网中:洪沟、龙王、南充、谭家湾、东坡、茂县、普提、尖山、广安、朱坎、平春、石羊、新棉、 石板箐、大面铺、凉水井、二台山、向家岭、棉丰、孙家 ・21・ 坝、松柏、园湾、广惠、双堰、大方、桥沟、九里、舒平、 松林、铜街子、范坝、丰谷、西昌、二滩、普提串补、蜀 州、玉观、代市等节点是网络的薄弱环节,和这些节 点相连的线路发生故障易导致故障向连锁故障方向 纵深。特别是介数最高的节点受到蓄意攻击时,对 小世界电网的破坏程度比对小型随机电网造成的破 坏程度要大得多。

表3 复杂网络节点度数特征

网络性质	节点度数最高的前10位
无向无权	龙王、谭家湾、新棉、尖山、洪沟、大面铺、
网络	二台山、茂县、东坡、普提
输电线路长	洪沟、普提、南充、丰谷、西昌、新棉、尖山、
度为权重	谭家湾、东坡、茂县
丰大有功	普提、二滩、普提串补、洪沟、尖山、南充、
潮流为权重	蜀州、玉观、板桥、茂县
枯大有功	普提、二滩、普提串补、洪沟、南充、谭家
潮流为权重	湾、尖山、龙王、东坡、广安
丰小有功	普提、二滩、普提串补、洪沟、南充、尖山、
潮流为权重	蜀州、板桥、玉观、广安
枯小有功	南充、洪沟、谭家湾、普提、二滩、龙王、广
潮流为权重	安、尖山、东坡
表	₹4 复杂网络节点聚类系数特性
网络性质	节点聚类系数最高的前10位
无向无权	龙王、东坡、新棉、茂县、大面铺、二台山、
网络	石板箐、南充、洪沟、丰谷、谭家湾
输电线路	龙王、新棉、茂县、大面铺、二台山、东坡、
长度为权重	向家岭、南充、石羊、丰谷
丰大有功	龙王、茂县、二台山、东坡、丰谷、大面铺、
潮流为权重	向家岭、新棉、洪沟、南充
枯大有功	龙王、新棉、二台山、东坡、洪沟、南充、向
潮流为权重	家岭、大面铺、丰谷
丰小有功	龙王、茂县、二台山、东坡、丰谷、向家岭、
潮流为权重	代市、洪沟、普提、南充
枯小有功	龙王、新棉、二台山、东坡、洪沟、南充、向
潮流为权重	家岭、大面铺、丰谷

要提高整个电网的可靠性水平,尤其是具有小 世界特性的大型电网,必须加强对那些与网络结构 密切关联节点的保护和防范,避免由于这些节点而 造成故障的连锁反应,进而减少大规模连锁故障发 生的概率。这种从网络拓扑的结构对电网进行分析 的结果可以对电网的运行管理起辅助作用。

3.2 状态脆弱度分析

运用第2节中建立的潮流熵状态脆弱度评估模型,分别计算四川特/超高压电网丰大、枯大运行方 式下的节点脆弱度和支路脆弱度,其计算结果如表 5~表7所示(仅列出排序前10的结果)。

主 5	=+	/壮士亡士て共,	占胎己亩
77 J	ートハ	/伯人刀玐 ト レノ	试肥羽皮

排序	节点名称	丰大脆弱度	节点名称	枯大脆弱度
1	雅安	3.445 3	康定	3.445 3
2	南天	3.420 2	南天	3.420 2
3	东坡	3.404 3	沐川	3.404 3
4	资阳	3.345 4	资阳	3.395 2
5	眉山	3.312 5	桃乡	3.388 4
6	九龙	3.286 2	内江	3.345 4
7	石棉	3.278 9	雅安	3.286 2
8	龙头石	3.271 6	泸定	3.278 9
9	尖山	3.193 0	石棉	3.271 6
10	普提	3.113 2	九龙	3.1509
	表6	丰大方式下支路脆弱度		

排序	线路名称	冲击脆弱度	转移脆弱度	综合脆弱度
1467,1,	-2010 1110	(归一值)	(归一值)	(归一值)
1	黄岩一广安	1	0.4707	1
2	黄岩一达州	0.9907	0.4706	0.9906
3	叙府一福溪	0.466 2	0.373 3	0.3697
4	甘谷地一康定	0.130 2	0.744 3	0.205 8
5	泸定一甘谷地	0.1879	0.455 8	0.1819
6	复龙一叙府	0.158 3	0.411 3	0.138 4
7	谭家湾一德阳	0.122 1	0.4717	0.122 4
8	毛尔盖色尔古	0.079 8	0.701 8	0.1190
9	内江一云潭	0.125 9	0.437 3	0.117 0
10	谭家湾一南充	0.096 9	0.4667	0.0960
	= 7	<u>н </u>		

表7 枯大方式下支路脆弱度

排序	线路名称	冲击脆弱度 (归一值)	转移脆弱度 (归一值)	综合脆弱度 (归一值)
1	黄岩一达州	0.9949	0.164 9	1
2	黄岩一广安	1	0.161 3	0.983 6
3	泸定一甘谷地	0.203 3	0.751 9	0.931 9
4	二滩一石板箐	0.152 0	0.648 0	0.6004
5	谭家湾一南充	0.089 8	0.972 9	0.532 5
6	色尔古一茂县	0.081 4	0.975 5	0.484 0
7	福龙一叙府	0.072 9	0.968 6	0.430 3
8	甘谷地一康定	0.1409	0.323 4	0.277 8
9	龙头石一石棉	0.052 6	0.843 4	0.270 4
10	长寿一万县	0.043 8	0.931 9	0.248 6

从计算结果可以看出,现有的四川特超高压电 网中: 丰大方式下,雅安、南天、东坡、资阳、眉山、九 龙、石棉、龙头石、尖山、普提节点脆弱,黄岩一广安、 黄岩一达州、叙府一福溪、甘谷地一康定、泸定一甘 谷地、复龙一叙府、谭家湾一德阳、内江一云潭、毛尔 (下转第45页)

• 22 •

- [6] A. Anderman. The Challenge to Fulfil Electrical Power Requirements of Advanced Vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2004 27(1):2-7.
- [7] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等 教育出版社 2007.
- [8] 杨秦. 混合动力汽车发展将分"三步走"[N]. 中国经 济导报 2008 - 12 - 20.
- [9] Denholm P. and Short W. An Evaluation of Utility Sys-

(上接第22页)

盖一色尔古、谭家湾一南充支路脆弱;枯大方式下, 康定、南天、沐川、资阳、桃乡、内江、雅安、泸定、石 棉、九龙节点脆弱,黄岩一达州、黄岩一广安、泸定一 甘谷地、二滩一石板箐、谭家湾一南充、色尔古一茂 县、福龙一叙府、甘谷地一康定、龙头石一石棉、长 寿一万县支路脆弱。这些节点和支路相连的线路发 生故障易导致故障向连锁故障方向纵深。综合从线 路受能量冲击的大小强度和线路故障后对这个系统 造成的后果两方面来定义线路的脆弱性,更加接近 实际电网的脆弱本质。

脆弱度大的节点在过负荷下对系统冲击大,导 致支路过载潮流转移的节点,快速切除这些节点的 过负荷量对系统的安全稳定起到十分重要的作用。 综合脆弱度大的支路,由于过载支路的跳闸,必将引 起系统潮流的重新分布,其影响范围是全局的,在过 负荷保护切除支路前消除薄弱支路过载,从而避免 了连锁故障的发生。

综上所述,要提高整个四川特/超高压电网的安 全稳定水平和运行可靠性,对这些脆弱节点和脆弱 线路要加强监视控制,采取必要的安保措施使其坚 强可靠,避免由于这些脆弱元件造成故障的连锁反 应,进而减少大规模连锁故障发生的概率。对于脆 弱度大的节点,其上的过负荷应该快速消除,避免引 起支路过载。对于脆弱度大的支路,过载后不能让 过负荷保护切除,而应通过紧急控制迅速消除过载 以免引起连锁故障。

4 结论与展望

四川电网具有水电资源非常丰富、比重大,水电 分布不均匀、负荷分布主要分布在川东地区,丰水期 窝电 枯水期缺电等特点。对四川特/超高压电网脆 tem Impactsand Benefits of Optimally Dispatched Plug – in Hybrid Electric Vehicles [R]. Colorado: National Re– newable Energy Laboratory 2006.

[10] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment of Plug – in Hybrid Electric Vehicles – Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions [R]. EPRI, 2007. (收稿日期: 2013 – 05 – 21)

弱度分析表明,四川电网具有典型的小世界网络特性,其较小的特征路径长度和较高的聚类系数对故障的传播会起到推波助澜的作用。同时,在不同运行方式下,四川电网的脆弱节点和脆弱线路会发生转移,丰大方式下主要水电输送通道较脆弱,其结果对四川电网的运行控制具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North – eastern Region on 31st July,2012 [R/OL]. [2012 – 08 – 16]. http:// www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12. pdf.
- [2] 方勇杰.美国"9·8"大停电对连锁故障防控技术的启示[J].电力系统自动化 2012 36(15):1-7.
- [3] 陈向宜,陈允平,李春艳,等.构建大电网安全防御体 系——欧洲大停电事故的分析及思考[J].电力系统 自动化 2007 31(1):4-8.
- [4] 曹一家 陈晓刚 孙可.基于复杂网络理论的大型电力
 系统脆弱线路辩识 [J].电力自动化设备,2006,26
 (12):1-5.
- [5] 陈晓刚 孙可,曹一家.基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J].电工技术学报,2007,22(10):138-144.
- [6] 丁明 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性 评估[J]. 中国电机工程学报 2008 28(10): 20 – 25.
- [7] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等.四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制[J].电力自动化设备2010,30(6):100-104.

作者简介:

李 燕(1986),女,助理工程师,硕士,从事电力系统稳 定分析与控制研究。

(收稿日期:2012-06-15)

• 45 •

面向多种调度模式的电力交易 计划统一编制与管理

许立雄¹ 李 响² 刘友波¹ 刘俊勇¹ 凌 亮² 孙 毅²

(1. 四川大学电气信息学院,四川成都 610065;

2. 四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘 要: 针对电力市场发展当前形势下多种调度模式的发电计划科学化管理要求,提出了面向省级电网多种调度模式的月度交易计划统一编制模型,通过设置不同的目标函数来反映不同的调度管理目标;模型采用禁忌 - 粒子群算法进行求解,利用禁忌算法的局部搜索能力来改善粒子群算法的"早熟"收敛;开发了相应的软件系统,实现月度交易计划的编制与管理。实例表明模型与方法的有效性和实用性。

关键词:月度交易计划;节能分解;平均分解;粒子群;禁忌搜索

Abstract: Aiming at the requirement of scientific power generation scheduling management under multi – dispatching modes in the new development of electricity market , a uniform optimization model for monthly trading scheduling is proposed. By setting different objective function , the present model can satisfy different dispatching modes. The Tabu – PSO is adopted to solute the uniform optimization problem , which uses the local search ability of Tabu search to improve the premature convergence problem of basic PSO. A project is developed to realize the algorithm and evaluate the implementation of monthly trading scheduling. The numerical examples show the effectiveness of the proposed method.

Key words: monthly trading scheduling; dispatching mode for energy saving; dispatching mode for justness; particle swarm optimization (PSO); Tabu search

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0023 - 05

0 引 言

交易计划编制工作是电力交易中心的主要工作 之一,其结果将直接影响后续调度中心的工作^[1]。 交易计划按照时间跨度可以分为短期的日交易计 划、中期的月度交易计划和长期的年度交易计划。 短期的日交易计划国内外研究得比较成熟^[2-6],长 期的年度交易计划国内外的研究成果也比较丰 富^[7-10],而对于中期的月度交易计划的研究相对还 比较匮乏。文献[11]基于"三公"调度模式,建立了 全周期变时段发电计划优化模型。然而"三公"调 度模式不能有效地引导电力工业朝着提高能源使用 效率,减少环境污染的方向实现可持续发展,因此国 务院特别颁布了《节能发电调度办法》。文献[1]提 出在节能调度模式下的一种综合耗量优化方法,综 合考虑了发电企业、电网公司和社会环境三方利益, 用于解决省级电网直调火力发电单元月度电能交易 计划编制问题。上述文献均是针对某一种调度模式 研究月度交易计划的编制,而目前就省一级的电力 交易中心而言,月度交易计划的编制正由平均分解 的方式向节能分解的方式过渡,迫切需要能够同时 考虑多种调度方式的月度交易计划编制方法。在深 入分析平均分解和节能分解的编制模型的基础上, 提出了考虑多种调度模式的月度交易计划统一编制 模型,采用禁忌 – 粒子群算法进行求解,并开发了相 应的系统实现月度交易计划的编制与管理。

1 月度交易计划编制模型

月度交易计划编制是根据未来月份系统的电力 电量需求,各个发电机组的检修安排、启停限制、发 电量限制等条件,确定各个发电机组在未来月份的 开停、出力及电量。编制完的计划还需要满足相应 的要求,如能耗最小、各个发电机组年合同电量完成 进度相当等。这种要求与不同的调度模式相对应,

• 23 •

如能耗最小是节能调度模式下的要求;而各个发电 机组年合同电量完成进度相当则是"三公"调度模 式下的要求。

将编制完的计划需要满足的要求作为目标函数 系统的电力电量平衡、机组运行限制作为约束条件 建立考虑多种调度模式的月度交易计划编制优化模型 通过设置不同的目标函数来反映不同的调度模式。模型具体描述如下。

1.1 优化目标

1) 节能调度模式

节能调度模式要求按照各个发电机组的能耗由 小到大安排发电,以提高电力工业能源使用效率,节 约能源,促进能源和电力结构调整。因此节能调度 模式下月度交易计划编制模型的优化目标为发电能 耗最小。

$$\min\sum_{i=1}^{\max} \boldsymbol{\eta}_i E_{i,i}^p \, i \boldsymbol{\epsilon} G$$

式中 η_i 为发电机组i的单位能耗; $E_{i,j}^p$ 为时段t内发电机组i的计划发电量。

2) "三公"调度模式

"三公"调度模式是中国传统的调度模式,"三 公"调度的关键指标是电厂年度合同电量进度,即 要求各电厂的电量完成进度尽可能相近。以时段内 各个发电机组年合同电量完成进度的方差来衡量各 个机组之间年合同电量完成进度的偏差,则优化目 标可具体描述如下。

 $\min\sum_{i=1}^{\max} D(F_{i,i}) \quad i \in G$

式中 $D(F_{i,i})$ 为时段 t 内各个发电机组年度合同电 量完成进度的方差; $F_{i,i}$ 为时段 t 内发电机组 i 的年 度合同电量完成进度。

 $F_{i \mu} = (E_{i \mu-1}^{r} + E_{i \mu}^{p}) / E_{i}^{c}$

式中 $E_{i_{j-1}}^{r}$ 为时段 t 之前发电机组 i 已经完成的发 电量; $E_{i_{j}}^{p}$ 为时段 t 内发电机组 i 的计划发电量; E_{i}^{c} 为发电机组 i 的年度合同电量。

3) 统一模型

采用不同调度模式进行月度交易计划的编制, 区别体现在目标上:节能调度模式以能耗最小作为 计划编制的指导"三公"调度以各个机组年合同电 量完成进度尽可能相近作为计划编制的指导。因 此,可以通过引入权重将不同的目标函数综合来实 现不同调度模式下月度交易计划编制的统一。

统一模型下的目标函数可描述为

 $\min \left[\alpha \sum_{i=1}^{\max} \eta_i E_{i,i}^p + \beta \sum_{i=1}^{\max} D(F_{i,i})\right] i \epsilon G$

式中 α 、 β 为权重 ,当 $\alpha = 1$ $\beta = 0$ 时 ,对应于节能调 度模式; 当 $\alpha = 0$ $\beta = 1$ 时 ,则对应于"三公"调度模 式。

1.2 系统平衡约束

发电机组的出力需要满足系统的负荷及备用需 求;同时在时段内所发电量需要与负荷消耗的电量 相匹配。因此系统的平衡约束包括了电力平衡约束 和电量平衡约束。

1) 电力需求约束

电力需求约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} x_i P_i \geq (1 + \gamma_i) P_i$$

式中 x_{i_t} 为时段 t 内发电机组的运行状态 0 为停 机 1 为运行; P_{i_t} 为时段 t 内发电机组的出力; N_c 为 发电机组总台数; γ_t 为时段 t 内系统的备用率; P_{l_t} 为时段 t 内系统的总体负荷电力需求。

2) 电量需求约束
 电量需求约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} x_{i} h_i P_i \geq (1 + \gamma_i) E_{i}$$

式中 $\alpha_{i_{i_{i_{i_{i}}}}}$ 为时段 t 内发电机组的运行状态 0 为停 机 1 为运行; $h_{i_{i_{i_{i}}}}$ 为时段 t 内发电机组的利用小时 数; $P_{i_{i_{i}}}$ 为时段 t 内发电机组的出力; N_{c} 为发电机组 总台数; γ_{t} 为时段 t 内系统的备用率; $E_{t_{i_{i}}}$ 为时段 t 内 系统的总体负荷电量需求。

1.3 机组约束

发电机组本身存在各种运行的限制,如检修、最 小启停时间等。具体的约束描述如下。

1) 机组必须停机约束

机组必须停机约束为

$$u_{i t} = 0$$
 ($i t$) ϵG_{off}

式中 ,*G*_{off}为时段 *t* 内由于检修等原因必须停运的发 电机组集合。

2) 机组必须开机约束

机组必须开机约束为

$$u_{i,t} = 1$$
 ($i t$) ϵG_{on}

式中 *G*_{on}为时段 *t* 内必须运行的发电机组集合。

3) 机组日利用小时数约束

机组日利用小时数约束为

$$h_i^{\min} \leq h_i \leq h_i^{\max}$$

式中 h_i 为发电机组i的日利用小时数; h_i^{min} 为发电

• 24 •

机组 *i* 的日最小利用小时数; *h_i^{max}*为发电机组 *i* 的日最大利用小时数。

4) 机组启停时间间隔约束

机组不能频繁启停,运行和停运都必须持续一 段时间。

$$D_{i\,t-1}^{\text{on}} + x_{i\,t} \ge T_{i}^{\text{on}}$$

$$D_{i\,t-1}^{\text{off}} + (1 - x_{i\,t}) \ge T_{i}^{\text{ol}}$$

式中 $D_{i_{t-1}}^{on}$ 为时段 t 之前发电机组 i 运行持续的天数; $D_{i_{t-1}}^{on}$ 为时段 t 之前发电机组 i 停运持续的天数; T_{i}^{on} 为发电机组 i 运行持续的最少天数; T_{i}^{off} 为发电机组 i 与运持续的最少天数。

2 求解方法

月度交易计划编制优化模型是一个复杂的混合 规划问题 ,传统的数学优化算法随着计算规模的扩 大 ,存在"维数灾"问题。

粒子群优化算法简单,可处理各种复杂优化问题,已在多个领域广泛应用,但不同程度地存在早熟收敛问题。Tabu 搜索通过禁忌准则避免迂回搜索,通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,以保证多样化的有效探索,最终实现全局最优。借鉴这一思想来改进 PSO 算法,避免算法陷入局部最优导致的早熟收敛^[12]。以改进后的 Tabu – PSO 算法来求解月度交易计划编制优化模型。流程如下。

 1)参数设置。粒子群个体的维数取优化变量 的个数即火电机组数,种群规模 M 取 40。Tabu – PSO 算法参数设置:惯性因子 w 取 0.5,学习因子 c₁ = c₂ = 2.0,速度限制取 ±4.0,禁忌长度 L 即禁忌对 象的任期取 5,最大迭代次数 I_{max}取 50。

2) 初始解生成。随机生成 *M* 个可行解 *x_i*,计算 各个可行解的目标函数 *I M* 个可行解中的目标函 数值最小的可行解作为群体当前的最优解 *P_g*,并将 其设置为禁忌对象 *,*任期为 *L*;将 *M* 个可行解设置为 粒子自身当前的最优解 *P_i*。当前迭代次数置为 1。

3) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数, 若不满足,当前迭代次数累加1:若达到最大迭代次 数则输出群体当前最优解P_。为最终的优化结果。

4) 计算各个粒子的飞行速度

各个粒子飞行速度为

 $\nu_i^{k+1} = w\nu_i^k + c_1r_1(p_i^k - x_i^k) + c_2r_2(p_g^k - x_i^k)$ 式中 μ 为惯性因子; $c_1 \ c_2$ 为学习因子; $r_1 \ r_2$ 为[0, 1]间的随机数; ν_i^{k+1} 、 ν_i^k 为粒子未来飞行速度和当前 飞行速度; p_i^k 、 p_g^k 为粒子自身当前的最优解和群体当 前的最优解。

5) 根据粒子速度产生新的粒子位置(解)

 $x_i^{k+1} = x_i^k + \nu_i^{k+1}$

6) 查看粒子位置是否被禁,若是则重复步骤4)、5) 若不是,继续以下步骤。

7) 计算粒子新位置(解) 的目标函数值,与粒子 当前最优解 p_i 对应的目标函数值 $f_{i,\text{best}}$ 比较,若小则 将粒子的新位置作为粒子的当前最优解 p_i ,并更新 $f_{i,\text{best}}$;选取种群中所有粒子自身当前最优解的最小 者,与种群当前最优解比较若小则更新种群当前最 优解 p_g 及相应的目标函数值 $f_{g,\text{best}}$,并更新禁忌对 象,若未更新种群当前最优解 则递减禁忌对象的任 期,转入步骤 3)。

3 计划管理

编制好的交易计划其效果依赖于各个电厂对计 划的执行情况。计划管理不仅是各个电厂月度开 停、出力、发电量等信息的管理,还包含了对各个电 厂计划执行情况的跟踪与评估。评估计划执行情况 的指标具体定义如下。

1) 电量偏差率

用于衡量各个发电机组实发电量对计划电量的 偏差 其定义如下。

$$\Delta\% = \frac{(E_{ij}^{c} - E_{ij}^{p})}{E_{ij}^{p}} \times 100\%$$

式中 $E_{i,i}^{c}$ 为时段 t 发电机组 i 实际的发电量; $E_{i,i}^{p}$ 为时段 t 内发电机组 i 的计划发电量 指标正值表示超发 ,负值表示欠发。

2) 偏差均衡率

用于衡量各个发电机组电量偏差相对于平均偏 差水平的差异程度,其式为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{N_{G}} (\Delta_{i}\% - \underline{\Delta}\%)^{2}}{N_{G}} i\epsilon G$$

式中 G 为发电机组集合 ,可分别取超发机组和欠发 机组进行统计; N_c 为发电机组集合里发电机组的总 台数; Δ_i % 为发电机组集合里第 i 台发电机组的偏 差率; Δ % 为发电机组集合里发电机组的平均偏差 率。

• 25 •

对各个发电机组分别统计丰水期、枯水期以及 全年的合同完成进度,其式为

$$F_{i p} = \sum_{t=p(1)}^{p(\max)} E_{i p}^{r} / E_{i}^{c}$$

式中,依据变量 p 的取值, F_{ip} 分别为发电机组 i 的 丰水期合同电量完成进度、枯水期合同电量完成进 度和年度合同电量完成进度;p(1)分别为丰水期起 始时段、枯水期起始时段和年度起始时段;p(max)分别为丰水期结束时段、枯水期结束时段和年度结 束时段; E_{ip}^{c} 为发电机组 i 已经完成的发电量; E_{ip}^{c} 分 别为发电机组 i 的丰水期合同电量、枯水期合同电 量和年度合同电量。

4 实 例

以某省公司 2012 年数据来验证模型及方法的 实用性。

4.1 计划编制

月度交易计划编制模型中系统平衡约束如表 1 所示(只列出 10—12 月份的系统电力电量需求), 其中电力需求取该月份典型日的预测负荷,电量需 求仅是火电部分的电量需求。

表1 电力电量

月份	10	11	12
电力 /MW	1 950	2 200	2 500
电量 /(MW・h)	262 000	487 000	577 000

月度交易计划编制模型中机组约束如表2所示 (只列出部分信息),包括了机组的容量、全年的合 同电量、丰枯期的合同电量、检修安排、机组日利用 小时数的最大最小值。机组启停时间间隔,所有机 组取值相同,持续开机时间不少于10天,持续停机 时间不少于10天。

表2 3	机组运往	亍信息
------	------	-----

和仍	容量	合同电量	於修	口利田小时
1/15日	/MW	/(MW • h)	111118	נייינימיניא בו
新平1号机	600.0	2 424 050	否	[5,20]
东岳1号机	300.0	1 108 800	否	[5,20]
白马2号机	200.0	758 890	否	[5,20]

采用 Tabu – PSO 分别求解节能调度模式、"三 公"调度模式下火电机组月度交易计划。表 3、表 4 分别是节能调度模式和"三公"调度模式下部分发 ・26・

电机组月度发电计划(表中的单位均为 MW・h)。

表3 节能调度模式

±n 4n	月份			
心に生	10	11	12	
新平1号机	9 300.0	21 808.0	26 758.0	
东岳1号机	4 650.0	10 904.0	13 379.0	
白马2号机	3 100.0	7 269.0	8 919.0	
表4	"三公"调	度模式		
机组	10	11	12	
新平1号机	9 300.0	36 000.0	37 200.0	
东岳1号机	4 650.0	4 500.0	4 650.0	
白马2号机	11 158.0	12 000.0	12 400.0	

4.2 计划管理

根据上述算法设计计算软件,图1展示了十月 份各个发电机组计划完成情况的评估结果。

画面上半部分是机组合同完成进度统计分析结 果展示: 左边以进程条的形式展示了查询机组全年 合同执行的进度、丰枯期合同执行的进度以及查询 月份合同计划电量的完成情况; 右半部分是所有机 组合同完成进度的统计分析结果展示,列表部分展 示了全年、丰枯期、查询月份完成进度靠前、靠后的 机组及其合同完成进度,进程条则展示了所有机组 平均执行进度。

画面下半部分展示了上网电量的偏差统计:上 面的列表展示了查询机组全年、丰枯期、查询月份实 发电量与计划电量之间的偏差;下面的列表则展示 了全年、丰枯期、查询月份实发电量与计划电量之间 的偏差量靠前、靠后的机组及其计划电量、实发电 量、偏差率。

5 结 语

针对电力体制新形势下多种调度模式的发电计 划科学化管理要求,提出了考虑多种调度模式的月 度交易计划统一编制模型,通过设置不同的目标函 数来反映不同的调度模式;模型采用禁忌 – 粒子群 算法进行求解,利用禁忌算法的局部搜索能力来改 善粒子群算法的"早熟"收敛。需指出所提模型里 的约束只包含了机组的运行约束,如何有效地考虑 系统的安全约束,将是后续进一步研究的内容。

司讲度统计	丰期执行进度		排名统计	+	0.45	0.14	丰期平均执行进	度
-120.20.20.11	78%		() =		0 <u>*</u> #		75	*
··+ 17	一计相计行计算		İ İİ	✓ 5	₹	至词	计期平均计分计	
1边辞:	16英国共11月21度		机组		进度			厦
=期 ~	59%		攀钢		84		50	%
			攀钢		83			
			临巴		82			
"选择:	全年执行进度		零羽	46	81		全年平均执行进	度
			举钢牙	(禁)	80			~
	11%				+		64	*
查询	当月执行进度						当月平均执行进/	t
	100%						873	5
网由量偏差统计				+P40 + +	4700 400			
网电量偏差统计	时段	计划电量(实发电量(超发 (MWh)	超发 (%)	欠发 (MWh)	欠发(%)	
网电量偏差统计	时段 当月	计划电量 (9300	实发电量(9925	超发 (MWh) 625	超发 (%) 6.7	欠发 (MWb)	欠发 (%)	
网电量偏差统计 ^{选择:}	时段 当月 丰期	计划电量 (9300 60116	实发电量(9925 62835	超发 (MWA) 625 2719	超发 (%) 8.7 4.5	欠发 (WYh)	欠发 (%)	
网 电量偏差统计 选择: Ξ期	时段 当月 丰期 枯期	计划电量(9300 60116 110542 170659	实发电量(9925 62835 105000	超发 (MWA) 625 2719	超发 (%) 8. 7 4. 5	欠发 (MWA) 5542 2822	欠发 (%) 5 1 - 7	
网 电量偏差统计 选择: 三期 ▼	时段 当月 丰期 枯期 全年	计划电量 (9300 60116 110542 170658	实发电量(9925 62835 105000 167835	超发 (MWA) 825 2719	超发 (%) 8.7 4.5	欠发 (MWh.) 5542 2823	欠发 (%) 5 1.7	
図 电量偏差统计 选择: Ξ期	时段 当月 丰期 枯期 全年	计划电量 (9300 60116 110542 170658	实发电量(9925 62835 105000 167835	超发 (MWh) 625 2719	超发 (%) 6. 7 4. 5	欠发 (MWh.) 5542 2823	欠发 (%) 5 1.7	
网 电量偏差统计 选择: :三期	时段 当月 本 期	计划电量(9500 60116 110542 170658	实发电量(9925 62835 105000 167835	超发 (WWA) (225 2719	超发 (%) 6. 7 4. 5	欠发 (NYK) 5542 2823	欠发 (%) 5 1.7	
羽电量偏差统计 选择: :Ξ期	时段 当月 車期 枯期 全年 排名统计 ⓒ 車期 ○	计划电量(3500 60116 110542 170658 枯期 ○全年(实发电量(3925 62835 105000 167835 〇当月 超发	超发 (WWA) (25) 2719) 前 マ	超发 (%) 6.7 4.5 6	欠发 (MWh.) 55542 2823 査询	欠发 (%) 5 1. 7	
羽电量偏差统计 选择: ご期 ▼ 选择:	时段 当月 率期 本期 金年 排名統计 ④ 本期 ○ 初組	 计划电量(3500 60116 110542 1170658 枯期 ○ 全年 (计划电量(实发电量(3325 62835 105000 167835 〇当月 超发 实发电量(超发 (MWh) 825 2719) 前 V 超发 (MWh)	超发 (%) 6. T 4. 5 6 超发 (%)	欠发 (MWh.) 55542 2823 査询 欠发 (MWh.)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	
可电量偏差统计 选择: 送择: ご現 ご見 送择: で 査询	时段 当月 車期 柱期 全年 排名統计 ③ 車期 〔 利組 金堂考1	i 计划电量(3300 60118 110542 170658 枯期 ○ 全年(i 计划电量(3300	实发电量(9325 62835 105000 167835)当月 超发 实发电量(17644	超发 (MWh) (225 2719) 前) 超发 (MWh) 8344	超发 (%) 5 T 4.5 6 超发 (%) 89.7	欠发 (M¥h.) 5542 2823 查询 欠发 (M¥h.)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	
可电量偏差统计 选择: 运期	 时段 当月 車期 枯期 全年 非名統计 ① 本期 ① 本期 ① 本期 ② 本期 ○ 本 本 第 ○ ⇒ 2 第 2 3 4 /ul>	 计划电量(9500 60116 110542 170658 枯期 ○全年(计划电量(9300 9300 	实发电量(925 62835 105000 167835 〇当月 超发 实发电量(17644 17644	超发 (MWh) 625 2719) (前) (前) (前) (前) (前) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	超发 (%) G. 7 4. 5 6 超发 (%) 89. 7 89. 7	欠发 (MYL) 5542 2823 査询 欠发 (MYL)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	
朝 电量偏差统计 选择: 三期	 日段 二月 字期 本期	 计划电量(9300 60116 110542 170658 枯期 ○ 全年 (计划电量(9300 9300 9300 9310 	实发电量(9825 (82835 105000 167835) 当月 超发 实发电量(17644 17644 17644 17644	超发 (WWh) 825 2719 前 、 超发 (WWh) 8344 8344 2875	超发 (%) 6.7 4.5 6 超发 (%) 89.7 89.7 56.2	欠发 (MWh) 5542 2823 査询 欠发 (MWh)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	
朝 电量偏差统计 选择: ご期 ♥ 选择: ▼ 査询 ② 发均衡率: 2.34%	时段 当月 車期 枯期 全年 排名統计 ③ 本期 金鑑料 金置料 金置料 金置料 江油新厂料 江油新厂案	 计划电量(300 60116 110542 170658 枯期 ○ 全年(计划电量((3300 (3300 (5115) (5115) 	次发电量(次发电量(\$62235 52235 105000 167635 当月 超发 次发电量(17644 17644 1764 79500 7950	超发 (MYL) 625 2719 ・ 前 、 8344 8344 8344 2875 2875	超发 (%) 6, 7 4.5 6 8 8 9, 7 89, 7 89, 7 89, 7 56, 2 56, 2	文发 (MYA) 5542 2823 夏词 久发 (MYA)	欠发 (%) 5 1. 7 欠发 (%)	
羽 电量偏差统计 选择: 选择: ● 查询 发均衡率: 2.34%	 时段 当月 車期 枯期 全年 非名統计 ① 本期 ① 本期 合営41 会営42 江油新厂41 江油新厂41 江油新厂41 	 计划电量(9500 60116 110542 170658 枯期 ○ 全年 (计划电量(9300 9300 \$115 \$115 \$115 \$115 		超发 (WVA) 625 2719 ● 前 ● 8344 2875 2875 2343 2343	超发 (%) 6 7 4.5 8 8 8 9 9 7 8 8 9 7 5 6,2 5 6,2 5 0,4	欠发 (MYL) 5542 2523 空沟 欠发 (MYL)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	
朝 电量偏差统计 送择: 三期 ♥ 送择: ▼ 査询 发均衡率: 2.34%	 时段 当月 車期 枯期 全年 非名統计 ③ 半期 ① 補助 (1) 金盒単1 金盒量 本 取 本 本 本 本 	 计划电量(9300 60116 110542 170658 枯期 ○ 全年 (计划电量(9300 9300 9300 9300 5115 5115 4850 4650 		超发 (WWh) 825 2719 前 、 8344 8344 2875 2875 2875 2875 2875 2875 2875	超发 (%) 6.7 4.5 超发 (%) 89.7 89.7 89.7 56.2 56.2 56.2 50.4	欠发 (MWh) 5542 2823 査询 欠发 (MWh)	欠发 (%) 5 1.7 欠发 (%)	



参考文献

- [1] 汤伟, 汪漪, 于继来, 等. 编制直调火力发电单元月度
 电能交易计划的综合耗量优化法 [J]. 中国电机工程
 学报 2009 29(5):64-70.
- [2] Wang S J , Shahidehpour S M , Kirschen D S , et al. Short – term Generation Scheduling With Transmission and Environmental Constraints Using an Augmented Lagrangian Relaxation [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 1995 , 10(3): 1294 – 1301.
- [3] Huse E S , Wangensteen I , Faanes H H. Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition [J].
 IEEE Transactions on Power Systems ,1999 ,14(2): 472 -477.
- [4] Abido M A. Environmental/Economic Power Dispatch Using Multi – objective Evolutionary Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1529 – 1537.
- [5] 张国立,李庚银,谢宏,等.日前和实时市场统一电能 交易模型[J].中国电机工程学报,2006,26(21):50-56.
- [6] 初壮,于继来.初期电力市场确定电网日发电计划的 模型与方法[J].电力系统自动化 2006 30(22):43 –
 47.
- [7] Yu Z , Sparrow F T , Nderitu D. Long term Hydrothermal Scheduling Using Composite Thermal and Composite

Hydro Representations [J]. IEE Proceedings – Generation , Transmission and Distribution , 1998 , 145(2): 210 – 216.

- [8] Ferrero R W ,Rivera J F ,Shahidehpour S M. A Dynamic Programming Two – stage Algorithm for Long – term Hy– drothermal Scheduling of Multireservoir Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 1998 ,13(4):1534 – 1540.
- [9] Fu Y ,Shahidehpour M ,Li Z. Long term Security constrained Unit Commitment Hybrid Dantzig – Wolfe Decomposition and Subgradient Approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2005 20(4): 2093 – 2106.
- [10] 王漪,于继来,柳焯.基于月度竞价空间滚动均衡化的 年中标电量分解[J].电力系统自动化,2006,30(17): 24-27.
- [11] 杨争林,唐国庆.全周期变时段"三公"调度发电计划 优化模型[J].电网技术 2011 35(2):132-136.
- [12] 许立雄,吕林,刘俊勇.基于改进粒子群优化算法的 配电网络重构[J].电力系统自动化 2006,30(7):27 -30,30.

作者简介:

许立雄(1982),男,博士研究生,从事电力系统稳定与 控制研究;

刘友波(1983),男,博士,讲师,从事电力系统连锁故 障、电力市场等领域研究。

(收稿日期:2013-03-21)

• 27 •
负荷响应机制在美国智能电网中的新模式

周启航¹ 陈 晨² , 苟 竞²

(1. 四川电力科学研究院,四川,成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院,四川,成都 610065)

摘 要:基于美国智能电网当前研究领域的发展状况,着重对现有负荷响应机制进行了深入分析与讨论。从用户政 策设计、用户反馈、自动负荷响应等方面对美国智能电网负荷响应技术的发展趋势进行了叙述。提出一种在智能电 网环境中的负荷响应新模式。此模式可以被电网运营方用于匹配可再生发电资源,从而为可再生发电资源的安全并 网运行这一难题提出一种有效解决方案。

关键词:美国智能电网;负荷响应;可再生发电资源

Abstract: Based on the recent development of smart grid in the U.S., it focuses on the in – depth analysis and discussion of the existing demand response mechanism. From the user policy, user feedback, automatic demand response and other aspects, the technology trends of smart grid are described. Finally, a new model of demand response mechanism in smart grid is proposed. It can be used to match the renewable generation resources on operator side, and propose an effective and secure solution for parallel operation of renewable generation resources.

Key words: American smart grid; demand response; renewable generation resources 中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013) 04-0028-04

0 引 言

负荷响应(demand response, DR) 是指电力用 户基于电价信号或激励机制作出响应并改变传统电 力消费模式的参与行为。当电力供应不足时,电力 公司可以通过激励机制使用户减少用电负荷,用户 可以自行决定是否参与这类机制,让那些愿意支付 高电价的用户,按他们的"正常"水平继续用电,而 那些愿意降低用电量或愿意将用电时间转移到低电 价时段使用的用户将从此类机制获益。

在美国,DR 的基本理念已经得到广泛接受和 认同,目前美国是世界上实施 DR 项目最多、种类最 齐全的国家。美国的激励型 DR 包括直接负荷控 制、可中断负荷、负荷侧投标和回购、容量及辅助服 务市场等手段。2009 年美国国家能源部向美国国 会提交的智能电网研究报告^[1]显示,如果美国电网 技术能使所有具有响应能力的负荷均参与 DR,可 削减的高峰负荷量相当于全美 10 年内的高峰负荷 增长。美国电力市场通过鼓励 DR,吸引更多的电 力市场参与者,分散市场风险,有效地促进美国电网 系统及其市场的良性发展。

1 美国电网的负荷响应现况

DR、分布式电源(distributed generation, DG)和 分布式能源储备(distributed energy storage, DES)是 目前新兴的智能电网概念中的重要组成部分。为了 简便起见,现把这些资源统一称为分布式能源资源 (distributed energy resources, DER)。尽管智能电网 框架下更多关注的是 DER 这一整体概念,但 DR 资 源作为稳定输电网运作的重要组成部分,更是整个 电力批发市场的重要元素,因此在智能电网领域中 具有重要意义。事实上,从输电网和电力批发运作 模式来看,术语"虚拟发电厂"就是专指这些 DR 资 源^[2]。

在电能及其配套服务市场中,在独立系统运营 商(independent system operator JSO)/区域输电机构 (regional transmission organization ,RTO)进行中心控 制与协调的环境下,DER/DR 依据 ISO/RTO 市场设 计和使用的运营标准提供电能供应、辅助服务、电力 储备等产品^[4]。下面简要介绍美国电力界推动智 能电网发展的主要动因和智能电网框架下各种不同 形式的 DER。 不同的 ISO/RTO 应用及控制 DR 资源的规则 不同 具有不同的 DR 服务产品市场。另外 基于不 同 ISO/RTO 的市场机制,DR/DER 服务可以由一家 或者多家市场参与者提供,包括负荷服务商(load serving entities,LSE)、配电公司(utility distribution companies,UDC)、电力服务提供商(electricity service providers,ESP)、终端用户、负荷整合器和负荷削 减服务提供商(curtailment service providers,CSP)。 部分参与者拥有负荷、发电资源或发电备用资源。 DR 资源的拥有者、操作者和整合者之间如何协调 合作是 DR 服务产品市场的一个重要研究领域。

当前美国电力市场拥有多个 ISO/RTO,包括纽 约 ISO(NYISO) 宾州一新泽西一马里兰地区的 ISO (PJM) 新英格兰地区 ISO (ISO – NE),中西部 ISO (MISO) 加州 ISO(CAISO),德州电力系统委员会 (ERCOT) 和西南电网(SPP)。在美国电力工业市 场化的过程中,ISO/RTO 形成了各自的电力市场。 这些电力市场通常包括更加细化的电力服务市场: 电能市场(日前及实时)、电能备用市场及发电容量 市场等。

2 美国智能电网负荷响应技术发展趋势

智能电网建设的涉及面非常广泛,其利益相关 者主要包括国家、电网公司、用户、设备制造商、电建 公司等。美国智能电网的利益相关者主要包括: 电 力终端用户(工业用户、商业用户和居民用户)、电 力服务零售商、输配电服务提供商、政府相关的协调 机构、大型的电力交易商/经纪人/市场、可靠性协调 委员会、产品服务提供商、能源政策制定者、政府监管 部门、智能电网倡导者、标准化组织和相关金融机构。 图1所示为美国智能电网利益相关者示意图。



营方在近期(2~5年)内将有更多的工作需要完成, 尤其是 DR 在居民用户区域内如何应用的问题。不 仅系统运营方需要一个支持 DR 的具有足够灵活性 的电力系统平台,发电侧各方也对系统的灵活性有 着高度的要求,其中代表性的是风能和太阳能的发 电方。支持 DR 技术的发展和实践验证可以提高风 能与太阳能安全并网的可行性与灵活性,从而实现 更多的可再生能源配置。其他的 DR 利益相关者, 包括技术开发人员和各类用户,必须协调合作,保证 技术发展满足所有 DR 参与者的利益和需求。

2.1 发展基于用户的实现技术

电能消费者的主要类别包括工业用户、商业用 户和居民用户。对于工业和商业用户,他们对能源 管理的了解程度比较高,针对这些用户的 DR 技术 也是相对成熟的。但对于居民层面的情况就不一样 了,居民层面的负荷分析还没有成熟的商业模式,还 需要更多的分析和通信设施以使得居民用户与智能 电网进行互联。

在传统电网中,居民用户一般来说不能自由选 择电力服务类型或者基于电价来调整他们的用电方 式,从而无法管理他们的电能消耗。智能电网具有 非常良好的前景,那是因为它提供给居民用户以自 由选择电力服务类型和基于电价来调整用电方式的 能力,从而使广大居民用户智能用电,同时也为用户 节省了更多的金钱。北美电力公司中常用的两种用 户政策是:用户反馈与差异化服务定价^[10]。

2.2 用户反馈政策

用户反馈政策的原则在于让用电客户更直观地 看到其节能效果及经济效益,从而让用户更好地理 解和改变他们的用电行为。用户反馈可以通过很多 方式来提供,从每个月的账单到即时的消费与电价 读数,其中一些方式的成本较高。

当前北美电力公司的用户反馈政策还存在一些 问题。由于目前用户反馈项目的参与用户知道电网 及电力公司提供的技术和激励机制是针对短期用电 行为的,所以调查结果仅反映出用户是如何应对短 期的用电行为激励的。而只有在用户认识到激励机 制将会是长期的,并且能使长期的理性用电策略得 到最优回报时,整个电网(包括用户端的基础设施 建设)才可能发生积极的变化。这也是各地不同时 期的用户反馈调查项目结果不一致的原因之一。当 前的调查项目的设计不能充分控制渐进性的基础设

• 29 •

施改变对调查结果造成的影响,导致项目针对 DR 的长期影响的结论不准确,可能被高估或者低估。

2.3 差异化服务定价政策

不论是静态定价还是动态定价,电力定价都反 映了实际的发电与输电成本。所谓差异化服务定 价 就是指不同需求的用户可以自由选择不同级别 的服务方式 而电力供应商根据用户的选择提供差 异化的服务 并根据这些服务所消耗的不同成本来 决定从静态定价到动态定价的差异化定价方式。传 统电网没有用户端的响应机制,无法提供用户端的 实时的动态定价与反馈。而智能电网的一个主要好 处就是可以动态定价 而非单纯的静态定价 但是这 一点又引出了很多与电力价格息息相关的重要问 题 包括电价是否应该反映实时的真实价格 是否提 供用户选择等等。许多智能用户问卷项目显示分时 定价可以将高峰用电量降低 15% 左右 而在用户侧 应用一些智能电网的新兴技术可以将这一数字翻 倍。研究表明知情程度和消费行为存在着关系,当 用户可以更快更详细地知晓实时电价信息的时候, 用户为了节省开支而倾向于在高峰时段减少用电, 从而实现高峰期的负荷削减。一般称这样的用户为 "智能用户"。美国加州的电力提供商估计,基于 DR 技术的智能用户所节省的能源将会占智能电网 所节省的能源总量三分之一到二分之一。因此,智 能用户是智能电网配置的一个重要部分。

从实际操作角度讲,差异化服务定价政策主要 包括平价电价政策、实时电价政策与混合政策3种。 对于平价电政策,用户白天与晚上用电价格是相同 的。这导致用户在非高峰时段被多收了钱,而在高 峰时段又被少收了钱。该策略并不鼓励用户从高峰 时段改变到非高峰时段用电,因此无法减少设施的 压力。对于实时电价策略,电价的制定基于实时的 供需关系和发电、输电、配电的实际成本。因此,电 价没有被多收取或者少收取,但用户可能并未在高 峰时段减少电能使用,这将导致高昂的电费。第3 种定价方式是用户在两个极端之间妥协,通过分时 计价的策略来使得用户和电力公司都受益。分时计 价减小了用户在高峰时段用电被收取高昂费用的可 能,而且还鼓励用户进行用电模式的转移。

2.4 自动负荷响应

分析者认为只有创造了一个无缝全自动化电网 与用户互联的网络,才有可能实现智能电网的全部 •30• 潜力。用户不可能也不必时时关注电价,而是提前 设置用电偏好的参数,在电价变动或者需要响应的 时候系统会根据用户设置的参数自动进行用户反 馈。利用全自动的技术可以在许多领域让房屋所有 人、建筑管理人和商业操作员来根据电价自动调整 需求。这种自动终端用户负荷调节与响应的潜力已 经在多种情况下被证明。比如,在美国加州,当电价 超过一定程度时,许多供电商与工厂合作来配置能 源管理系统以减小各种负荷(包括照明、电梯、加 热、通风和制冷)。

智能电网和智能仪表项目在自动负荷响应和能 效方面提供了最优实践的经验。把这些成功方法从 工业领域扩展到居民领域,还有许多问题需要进一 步的研究,如:用户反馈和自动化计数的最优结合点 问题; ICT 选项对自动 DR 的影响;不同用户类型对 自动 DR 设计的最优要求^[11]等问题。

3 智能电网中负荷响应的一个新模式

随着实现智能电网的相关技术(尤其是先进的 电表测量和信息通信技术)的成熟,这里基于文献 [12]提出一个基于激励机制的 DR 协议设计方案, 该方案利用自动调温器控制的负荷(thermostatically - controlled load ,TCL)来吸收可再生能源发电中的 间断性。典型的 TCL 包括商业制冷和空调负荷。



图 2 TCL 协议设计

负荷服务商(load serving entity,LSE)设计协议,为终端用户提供激励机制并鼓励用户参与。这个协议提供了不同层次的设置点调整极限和潜在的折扣,据此将用户分在不同的控制组。用户阅读协议的条款和报价,然后决定签订哪一种协议。用户的决定依赖于自身的效用函数,所谓效用函数,是指

权衡舒适度高低和省钱多少的函数。LSE 随后观察 签订各个合约的人群,跟随可再生能源的输出。图 2 为该模式的主要框架。

该方案使用预测控制(model predictive control, MPC)的方法来进行最优控制,因为MPC 具有很好 的表现和性质。它可以处理线性二次型控制中的不 等式约束,而且仅仅需要一步的风能信号预测。该 方案应用了一个博弈论模型来解决 LSE 和签订调 温器控制协议的终端用户之间的互动行为。LSE 和 用户可以不断地寻找针对对方的最佳行为,然后使 用迭代来寻找双方都满意的平衡状态。

这一机制可以让 LSE 控制用户的 TCL,因此显 著地提升了 LSE 的灵活性。若 LSE 希望有更多的 负荷被释放,则仅需要改变协议中的参数来改变控 制组的结构。文献[12]中的案例分析证实了 TCL 在合适的参数下可以非常准确地跟踪给定的风能输 出。LSE 可以改变协议参数来达到目标,比如最小 化最大跟踪误差,或实行协议的总费用等。TCL 协 议设计作为一种新的 DR 模式,是一个灵活有效的 方法,可以帮助 LSE 减少可再生能源的多变性和间 断性。这一新模式可以被电网运营方用于匹配可再 生能源,从而使可再生能源安全并网运行。

4 结 论

智能化的电网能够支持更大规模的和更丰富灵 活的 DR 机制。在电力系统中, DR 所扮演的角色正 在由最初的调峰工具转变成为具有更为多元化功能 的角色。提出了一种专门匹配可再生发电资源(如 风力发电厂)的 DR 机制,可以使负荷良好地实时匹 配风电发电量变化,从而为大规模风电安全并网运 行的实现提供了技术支持。创新的多元化 DR 机制 可以帮助智能电网充分实现其经济和社会效益最大 化。

参考文献

- DOE (U.S. Department of Energy), Smart Grid System Report [R], 2009.
- [2] Ipakchi A., Albuyeh F. Grid of the Future [J]. IEEE

Power and Energy Mag. $2009(\,9):52-62.$

- [3] NETL (National Energy Technology Laboratory), Understanding the Benefits of Smart Grids [R]. Pittsburgh, 2010.
- [4] Lightner E. M., Widergren S. E. An Orderly Transition to a Transformed Electricity System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):3 – 10.
- [5] Rahimi F., Ipakchi A. Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):82-88.
- [6] Parvania M., Fotuhi Firuzabad M. Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2010, 1(1):89 – 98.
- [7] Yunfei Wang, Pordanjani, I. R., Xu, W. An Event Driven Demand Response Scheme for Power System Security Enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011 2(1):23-29.
- [8] Saele H., Grande O. S. Demand Response From Household Customers: Experiences From a Pilot Study in Norway [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2011 ,2 (1): 102 - 109.
- [9] Le Ren Chang Chien, Luu Ngoc An, Ta Wei Lin et al. Incorporating Demand Response With Spinning Reserve to Realize an Adaptive Frequency Restoration Plan for System Contingencies [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2012 3(3): 1145 – 1153.
- [10] Samadi P., Mohsenian Rad H., Schober R., et al. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2012 3(3):1170 – 1180.
- [11] Logenthiran T., Srinivasan D., Tan Zong Shun. Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid ,2012 ,3 (3):1244 - 1252.
- [12] Xu Li., Deng S. J. An Incentive based Demand Response Contract Design for Themostatically Controlled Loads [D]. Working Paper, Georgia Institute of Technology, 2012.

作者简介:

周启航(1984),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力 系统稳定分析与控制。

(收稿日期:2013-04-08)

一种跟踪风光互补发电系统 计划出力的变时间尺度短期功率预测方法

李明伟 清 松

(国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘 要:引入各发电组件的短期功率预测值有助于风光互补发电系统制定优化的能量分配策略,更好地跟踪计划出 力。针对风光互补发电系统能量分配周期多变的特点,提出了一种变时间尺度的短期功率预测算法。该算法将历史 数据与物理模型相结合,可获得各发电组件任何时间间隔的短期功率预测值,进而实现对于计划出力的最大程度跟 踪。基于某风光互补发电站数据的仿真结果表明,基于历史数据与物理模型相结合的预测方法可更准确地实现能量 分配变周期下的计划跟踪。

关键词: 功率预测; 变时间尺度; 历史数据; 物理模型; 风光互补发电系统

Abstract: In wind – solar hybrid generation system , it is meaningful to introduce the predicted short – term power of each component to develop the optimal energy allocation strategy and track the generation scheduling in a better way. Considering the variable allocation cycle , a short – term power prediction method based on variable time scale is proposed. In the algorithm , the short – term power of different power components in any time scale could be predicted based on the histrionic data and physical model , and the tracking of generation scheduling in optimal mode is implemented. The simulation results based on the data of a wind – solar hybrid power supply system indicate that , the proposed method could be applied to hybrid generation system with variable allocation cycle , and tracks the generation scheduling in a better way , also the combined method outper– forms the pure physical model in reducing the tracking error , and improves the stability of the system output.

Key words: power prediction; variable time scale; historical data; physical model; wind – solar hybrid generation system 中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003 – 6954(2013) 04 – 0032 – 05

0 引 言

由于风和光的间歇性和随机性特点,使得大规 模的风光系统接入对电网的安全、稳定以及电能质 量带来严峻挑战。因此风光互补发电系统接入大电 网稳定运行需要实现3种控制目标:功率平滑输出、 跟踪计划出力、跟踪实时负荷出力^[1]。下面的研究 是为了发电系统更好地跟踪计划出力,增强其可调 度性,提高风能和太阳能资源的利用率。

加入风力和光伏发电功率预测信息,有利于风 光系统制定合理的能量分配策略,实现系统的计划 输出。目前,功率预测在风电场和光伏电站中已经 获得了应用^[2],可分别采用统计方法或物理方法建 立相应的模型进行预测。文献[3-5]提出在风光 系统控制策略中加入功率输出预测信息,将预测得 出的功率曲线作为决策基础使系统最大程度达到预 定控制目标。由于风光互补发电系统现场每一条馈 •32• 线上的机组数量不等,每台风机和光伏组件的控制 周期也不一定相同,再加上现场数据采集的周期不 定,现有的这些物理或统计方法^[6-10]需针对不同的 周期重复建模。由于上述模型复杂度较高、重新建 模花费时间长,因此不适用于分配周期随时可变的 风光互补系统。

针对上述问题,提出了一种时间尺度可变的可 灵活适应风光互补发电系统分配周期变化的风光功 率预测方法。该方法结合历史数据与物理模型,实 现了功率预测分辨率可变,应用于能量管理模型进 行预测控制,改善了风光互补发电系统跟踪计划出 力的能力。历史数据与物理模型相结合的预测方法 与单独采用物理模型的预测方法相比,系统跟踪计 划出力的平均相对误差减小了4%。

1 变时间尺度的短期功率预测

1.1 功率预测的基本原理

历史数据与物理模型相结合的变时间尺度功率 预测方法,由结合历史数据的变时间尺度天气预测 模块、风场风机和光伏组件物理模型构成。

其中,对于风力发电机组的功率预测,输入为天 气预报点未来24小时整点时刻的预报风速风向数 据,将此数据输入风场风机物理模型得到每台风机 测风仪处未来24小时整点时刻的预测风速;变时间 尺度的天气预测模块结合风机若干日历史风速数据 对未来24小时整点时刻的预测风速插补处理,得到 每台风机未来24小时所需预测分辨率的风速信息; 最后通过风机风速功率曲线得到所需分辨率的未来 24小时风机预测功率。

对于光伏组件的功率预测,输入为天气预报点 未来 24 小时整点时刻的预报光照强度和温度数据, 此数据即为光伏电站未来 24 小时整点时刻的预测 光照强度和温度;变时间尺度的天气预测模块结合 光伏电站的若干日历史数据对预报数据插补处理, 得到光伏电站未来 24 小时所需预测分辨率的光照 强度和温度;最后通过光伏组件物理模型得到所需 分辨率的未来 24 小时光伏预测功率。

风场短期功率预测的物理方法,需要对风电场 所在地进行物理建模,包括风场的地形、地表植被及 粗糙度、周围障碍物等;还要对风场的风机排列、风 机本身的轮毂高度、功率曲线等进行建模^[11]。图1 表示不同粗糙度及风机排列对风廓线的影响,假定 上游来的空气经过2次粗糙度变化后到达风力发电 机组的位置,风力发电机组的风廓线由 $v_1(z)$ 、 v_2 (z)、 $v_3(z)$ 三条曲线组成, $v_1(z)$ 对应的粗糙度和摩 擦速度分别是 z_{01} 和 v_{*1} ; $v_2(z)$ 对应的粗糙度和摩擦 速度分别是 $1 z_{02}$ 和 v_{*2} ; $v_3(z)$ 对应的粗糙度和摩擦 速度分别是 z_{03} 和 v_{*3} ;风机排列对风廓线的影响通 过尾流效应模型计算得出,这里采用 Rahman 模型。



径和机组间距,同时还考虑了风场的地形地貌、粗糙 度、大气扰动密度等因素对尾流效应的影响。Rahman 模型根据有限个风力发电机组构成风电场的尾 流效应图,通过迭代可以计算轮毂高度处产生的损 失,得到机组的迎风面风速^[12]。风电场的尾流效应 如图 2 所示。



图 2 中 L 表示相邻两排风力发电机组之间的 间距; dv_h 表示风力发电机组轮毂高度处的尾流损 失; H_a 表示测风高度; v_a 表示测风速; H_h 表示风力 发电机组轮毂高度; v_h 表示轮毂高度处的风速; H_b 表示受扰大气边界层高度; v_b 表示受扰大气边界层 风速; 通常情况下 H_b 、 H_h 和 v_b 、 v_h 分别满足如式(1) 所示关系。

$$\begin{cases} H_b > 30H_h \\ v_b \approx 1.6v_h \end{cases}$$
(1)

基于 Rahman 模型的尾流计算是一个类推的过程 经过类推可根据第一排的风力发电机组输入风速 求得下风向上各排风力发电机组轮毂高度的风速。

风场短期功率预测方法的输入为数值天气预 报,目前国内提供的数值天气预报分辨率多数都为 1 h。历史数据与物理模型结合的风力发电机组功 率预测流程如图 3 所示,这里使用变时间尺度的天 气预测模块对风机机舱处的风速数据进行插值处 理,处理后得到的分辨率更高的风速数据经过风力 发电机组输出特性曲线得到预期分辨率的风力发电 机组功率预测结果。



变换,可得到模型参数(光生电流、反向饱和电流、 串联内阻、并联内阻)表示的光伏电池的输出电流 和电压的显示方程。如果知道预测时刻光伏组件表 面光照强度和温度,再计算出当时情况下的模型参 数值,就可得到预测时刻光伏电池的输出电流和电 压的最大值,从而可得光伏组件的最大功率输出值。 而实际工作环境下的光伏组件模型参数值可由标准 测试条件下电池的 *I – V* 曲线提取相关信息,再通过 表达式求解得到。至此,则可建立光伏组件的物理 模型,光伏组件的输出功率可通过此物理模型根据 组件表面的光照强度和温度进行计算。

$$I = I_{ph} - I_0 \{ \exp\left[\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right] - 1 \} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$
(2)

其中 I 表示光伏电池输出电流; I_{ph} 表示光生电流; I_0 表示反向饱和电流; q 表示电子电荷常数; n 表示二 极管影响因子; k 表示波尔兹曼常数($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K); T 表示光伏电池工作温度; R_s 表示串联 内阻; R_h 表示并联内阻; V 表示光伏电池输出电压。

数值天气预报信息提供光伏组件工作环境下的 温度和光照强度。历史数据与物理模型结合的光伏 组件功率预测流程如图 4 所示,同样使用变时间尺 度的天气预测模块对天气预报分辨率下的温度和光 照强度数据进行插值处理,得到的分辨率更高的数 据经过建立的光伏组件物理模型得到预期分辨率的 光伏组件功率预测结果。



图 4 光伏组件功率预测模型结构 1.2 结合历史数据的变时间尺度预测

功率预测模块根据系统对控制周期的要求对数 值天气预报数据进行插值。插值的原理是,由于天 气信息在同一地点变化趋势的规律性,不同日期的 天气变化趋势具有相似性,针对变化趋势可求得历 史天气信息与预测日天气信息的相似度,从而选取 具有相同变化趋势的历史数据对预测日进行趋势映 •34• 射实现插值。

结合历史数据的变时间尺度天气预测模块提出 的基于相似度对天气预报数据进行插补处理的方 法,包括预测分辨率获取、历史数据提取、历史与预 测数据相似度计算、归一化处理、数据插补。

首先根据风光互补发电系统得到所需预测数据 的分辨率,通过历史数据提取模块提取当前预测时 刻之前若干天在该分辨率下的历史数据,则相似度 计算模块可计算出提取的若干天历史整点时刻数据 与天气预报数据变化趋势的相似度,归一化处理模 块根据相似度与历史变化趋势数据,计算得出未来 24 小时在预测分辨率下的天气数据变化趋势权值, 依据此权值算出预测数据变化趋势量,最终计算出 未来 24 小时在所需预测分辨率下的天气信息。该 方法的具体实现过程如下。

预测输入数值天气预报数据经物理模型处理得到 风机测风仪处风速或光伏组件处的温度和光照强度。

按所需预测分辨率的时间间隔从历史天气数据 (风速、温度、光照强度)中提取相应时间点上的数 据,作为预测所需历史数据源。所用的数据如图 5 所示,当前时间整点时刻为t,预测分辨率为T分钟, 天气预报数据为未来24小时整点时刻数据,提取了 t时刻之前若干天间隔为T的历史数据。其中,历 史天气数据的风速是风力发电机组测风仪位置的实 测历史风速数据,温度和光照强度是光伏电站位置 的实测历史温度和光照强度数据。

功率预测所用时间点

	1		1	1		11	11		Ш		··111	••
5 小	t+4 1	t+3	t+2	t+l	t	Ţ,	(-1		t-2	t-3	t-4	
8H	版报数据	天气预		→	• 前时 可点	当		•	数据	天气	历史	

图 5 变时间尺度的天气预测模块数据图

对所提取的历史上若干日整点时刻天气数据的 变化趋势与未来天气数据相应时间点上数据变化趋 势作相似度计算。此处的未来天气数据是当前时刻 之后经物理模型处理所得的天气信息。

记未来天气数据个数为 $n_{i}n = 24$; 两相邻时间 点上数据变化量为特征向量 μ_{k} 为未来天气数据的 第 k 个特征向量 μ_{jk} 为历史第 j 天的第 k 个特征向 量 则历史第 j 天与未来天气数据的相似度 r_{j} 可由 公式(3) 计算。

$$r_{j} = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} u_{k} u_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} u_{k}^{2} \sum_{k=1}^{n-1} u_{jk}^{2}}}$$
(3)

对相似度计算结果进行比较,从中取出相似度 较大($r_j \ge r_{jmax} \times 80\%$, r_{jmax} 为相似度计算结果里的最 大值)的 *m* 天的历史数据;然后对相似度作归一化 处理,由式(4)所示方程求得各历史数据的权值。

$$r'_{j} = \frac{r_{j}}{\sum_{i=1}^{m} r_{j}}$$
(4)

其中 r[·]; 表示相似度归一化处理后第 j 日历史天气 信息变化趋势的权值。

下一周期的天气预测值为当前预测时刻的实际 值与历史上各日对应此时刻数据变化趋势量的加权 平均之和。记 v_0 为当前时刻的天气信息值 v_k 表示 第k个时间间隔所对应的天气信息值 则第k+1个 时间间隔所对应的天气信息的预测值 $v_{(k+1)}$ 可由公 式(5)计算。

$$v_{(k+1)} = v_k + \sum_{j=1}^m r'_j u_{jk}$$
 (5)

其中 数组 v_k 即为未来 24 小时时间间隔为 T 的天 气预测值。

经过以上处理得到了满足预测分辨率的天气信 息,再经由余下的物理模型可得未来 24 小时满足预 测分辨率的功率预测值。

至此 根据时间间隔较长的数值天气预报信息, 结合历史数据经物理模型处理最终可得不同预测分 辨率的功率预测结果,为风光互补发电系统能量控 制提供了有力的数据支持,对保障风光互补发电系 统输出功率稳定有着重要意义。

2 算例分析

采用 Matlab 编写功率预测各模块算法,根据风 力发电机组、光伏组件出力特性,并加入地形和天气 变化等影响因素,建立预测仿真模型,并将预测结果 应用到能量管理模型进行预测控制。

利用某风光互补发电站的历史数据进行仿真实 验,采用其中的8台单机容量为1.5 MW的双馈风 力发电机组、6套单机容量为1 MW的光伏发电机 组和1套容量为2 MW的储能部件,总容量为20 MW。

图 6 为发电组件基于不同模型功率预测结果, 图中分辨率为 1 h 的曲线是基于物理模型功率预测 结果图 将物理模型与历史数据相结合 得到了时间 间隔为 15 min 的功率预测结果曲线。单台风机功 率预测平均相对误差为 20.49%,均方根相对误差 为 31.85%,单台光伏逆变器功率预测平均相对误 差为 5.91%,均方根相对误差为 18.6%,预测结果 很大程度上依靠天气预报的预测精度。由此可以看 出将物理模型与历史数据相结合,可以弥补独立基 于物理模型的功率预测分辨率受模型输入数值天气 预报分辨率限制的缺陷。



将功率预测结果应用到风光互补发电系统有功 功率控制中,其结果如图7所示。



结果表明,在符合系统发电能力的条件下发电 系统的输出功率很好地跟踪了计划出力值。当周期 为15 min 时系统功率输出跟踪能力更强、稳定性更 ・35・ 高 历史数据与物理模型相结合的预测方法与仅采 用物理模型的预测方法相比 ,系统跟踪计划出力的 平均相对误差减小了 4%。分析可知 ,跟随系统控 制周期预测的功率预测精度越高 ,系统能量分配精 度则越高 ,各发电组件的功率设定值能更切合其自 身的实际发电能力 ,从而使发电系统的控制具有更 小的跟踪误差。

3 总 结

针对风光互补发电系统的能量分配时变周期要 求提出了一种将历史数据与物理模型相结合的功率 短期预测方法,此方法满足风光互补发电系统对功 率预测时空分辨率的要求,可实现逐点与整体预测, 同时随着系统控制周期的不断变化,满足预测周期 的时间尺度可变。将预测结果应用到能量管理中, 结果表明,历史数据与物理模型相结合的方法比仅 采用物理模型的方法减小了4%的系统跟踪误差。

所提出的方法仅需要少量历史数据,能为整个 风光互补发电系统的能量分配策略提供较为准确的 功率参考值,该方法建立的模型鲁棒性强、计算时间 短、不需要定期训练、工程实用性强。

参考文献

- [1] 李金鑫 涨建成 周阳.风光储联合发电系统能量管理 策略研究[J].华东电力,2011,39(12):2026-2029.
- [2] G. Capizzi, F. Bonanno, C. Napoli. A Wavelet Based Prediction of Wind and Solar Energy for Long – term Simulation of Integrated Generation Systems [C]. SPEEDAM

(上接第5页)

- [11] 盛剑霓,等.电磁场数值分析[M].北京:科学出版 社,1984.
- [12] 强生泽. 220 kV 同塔双回输电线空间工频电场理论 计算[J]. 高电压技术 2004 30(5):45-46.
- [13] 杨晓玲,刘浔,张大鹏,等.750 kV 同塔双回交流输电
 线路电磁环境研究[J].水电能源科学 2009 27(4):
 191-193.
- [14] 邬雄,万保权,路遥.1000 kV 级交流输电线路电磁环 境的研究[J].高电压技术 2006 36(12):55-58.
- [15] 郭日彩,许子智,李喜来,等.110~500 kV 输电线路 典型设计[J].电网技术 2007 31(1):57-64.

2010 – International Symposium on Power Electronics , Electrical Drives , Automation and Motion , 2010: 586 – 592.

- [3] 刘波 郭家宝 ,袁志强 ,等. 风光储联合发电系统调度 策略研究[J]. 华东电力 ,2010 ,38(12):1897-1899.
- [4] 张征,王晓蓉.新能源接入综合系统研究与实现[J]. 供用电,2011,28(1):15-18.
- [5] 王宏,李兵.分布式风光互补电源的能量管理策略[J].电力电子技术,2010,44(6):58-60.
- [6] 施佳锋, 冯双磊, 丁茂生, 等. 宁夏电网风光一体功率 预测系统[J]. 宁夏电力, 2011 (1):1-4.
- [7] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法 研究[J]. 中国电机工程学报 2010 30(2):1-6.
- [8] 翟载腾.任意条件下光伏阵列的输出性能预测[D].安徽:中国科学技术大学,2008.
- [9] Sancho Salcedo Sanz , Emilio G. Ortiz Garc´a. Short Term Wind Speed Prediction Based on Evolutionary Support Vector Regression Algorithms [J]. Expert Systems With Applications , 2010(1):4052 – 4057.
- [10] Gong Li , Jing Shi , Junyi Zhou. Bayesian Adaptive Combination of Short – term Wind Speed Forecasts From Neural Network Models [J]. Renewable Energy , 2011: 352 – 359.
- [11] Matthias Lange. On the Uncertainty of Wind Power Predictions – Analysis of the Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors [J]. Journal of Solar Energy Engineering , 2005: 177 – 184.
- [12] Rahman Saifur, Chowdhury B. H. Effects of clusters on the electric power form [J] wind farm. IEEE Tran on Apparatus and System, 1984, 103(8):2158-2164.
 (時時日期: 2013_03_01)

(收稿日期:2013-03-01)

- [16] 张彤. 特高压输电走廊拥挤地区线路通道设计研究[D]. 河北: 华北电力大学 2011: 15 16.
- [17] 李永伟,袁俊,赵全江,等.中国首条1000kV单回路 交流架空输电线路的设计[J].电机工程学报 2010, 30(1):117-125.
- [18] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究 [D]. 浙江: 浙江大学 2006: 19 – 20.

作者简介:

石超群(1989),男,硕士研究生,从事过电压与绝缘配合、电磁兼容与仿真的研究。

(收稿日期:2013-06-21)

• 36 •

智能电网调度技术支持系统构架 及调度自动化现状研究

庞晓艳 李 建 深汉泉 李春艳

(四川电力调度控制中心 四川 成都 610041)

摘 要:随着智能电网建设的不断推进,智能电网调度技术支持系统对确保电网安全稳定运行具有重要作用。对智能电网技术支持系统的构架进行了分析,并对当前的调度自动化现状进行了综述。所提出的构架对指导智能电网调 度技术支持系统的建设具有一定作用。

关键词:智能电网;调度技术支持系统;调度自动化

Abstract: With the continuous progress of the construction of smart grid , the technical support system of smart grid dispatching plays an important role in ensuring the safe and stable operation of power grid. The architecture of the dispatching technical support system is analyzed , and the current status of dispatching automation is summarized. The proposed architecture plays a certain role in guiding the construction of technical support system for smart grid dispatching.

Key words: smart grid; dispatching technical support system; dispatching automation

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0037 - 03

近年来,中国各级电网调度自动化系统功能和 应用水平取得了质的飞跃^[1]。国网电科院、中国电 科院、东方电子等多个国内开发厂商在引进消化吸 收国外先进技术的同时,结合中国国情自行开发,不 断完善推出适合中国电网调度运行管理和生产实际 需要的调度自动化系统。

1 调度自动化系统现状

目前中国电网调度自动化系统广泛使用的平台 包括 OPEN3000、CC2000 和 D5000。

1.1 OPEN3000 系统

国网电科院开发的 OPEN3000 系统由硬件层、 操作系统层、支撑平台层和应用层组成,其中,系统 平台具备图模库一体化的功能,使图形系统的图元 与数据库实现同步连接以形成一个有机整体。基于 Internet 技术、面向对象技术、数据库技术和 JAVA 技术,根据电网调度的实际需要,将 SCADA、PAS、 AVC、DTS、FES、保护信息系统等集成于统一的支撑 平台上。该系统遵循了 IEC61970 等国际标准,既能 进行实时数据的采集、监视和自动闭环控制,也能对 电网进行分析和仿真,基本实现了电网安全性和经 济性并重的目标。

1.2 CC2000 系统

CC2000 系统是由中国电科院开发的开放式、面 向对象 EMS/DMS 支撑系统。该系统在国内外首次 采用面向对象分析、设计和编程技术,引用事件驱动 机制。该系统由实时运行管理环境、实时数据库管 理系统和人机会话子系统构成支撑平台,拥有方便、 灵活的数据库和画面生产工具。事件广播机制保证 了分布式系统各网络节点数据的一致性。

1.3 D5000 系统

智能电网调度技术支持系统(简称 D5000)的 四类应用建立在统一的基础平台之上,由基础平台 统一提供模型、数据、CASE、网络通信、人机界面、系 统管理等服务。应用之间的数据交换通过平台提供 的数据服务进行,通过平台的调用机制还能够提供 分析计算服务。

基础平台是智能电网调度技术支持系统开发和 运行的基础,负责为各类应用的开发、运行和管理提 供通用的技术支撑,为整个系统的集成和高效可靠 运行提供保障。基础平台包含硬件、操作系统、数据 管理、信息传输与交换、公共服务和功能6个层次 (如图1所示),采用面向服务的体系架构。面向服 务的软件体系架构(SOA),具有良好的开放性,能较 好地满足系统集成和应用不断发展的需要;层次化

• 37 •

的功能设计,能有效对硬件资源、数据及软件功能模 块进行良好的组织,对应用开发和运行提供理想环 境;针对系统和应用运行维护需求开发的公共应用 支持和管理功能,能为应用系统的运行管理提供全 面的支持。



2 智能电网调度技术支持系统构架^[2-4]

智能电网调度技术支持系统在国、网、省3级的 总体架构如图2所示。横向上,系统通过统一的基 础平台实现四类应用的一体化运行以及与 SG186 信息系统的有效协调,实现主、备调间各应用功能的 协调运行和系统维护与数据的同步;纵向上,通过基 础平台实现上下级调度技术支持系统间的一体化运 行和模型、数据、画面的源端维护与系统共享,通过 调度数据网双平面实现厂站和调度中心之间、调度 中心之间数据采集和交换的可靠运行。



基于多级 EMS 环境 构建不同层次电网安全稳 定防御系统,进而逐步规范、整合,形成一体化整体 防御是构筑适应特高压互联大电网安全稳定要求的 协调防御体系的有效途径。为了充分发挥电网多级 安全稳定防御系统的作用,在模型参数管理、在线数 据整合、应用结果共享等方面还需要进一步完善,具 体表现如下。

多级调度模型参数实现统一管理。虽然各级调 度关心电网安全稳定问题的侧重点有所区别,但是 分析问题时所使用的模型和参数很多都是相同的 (如低频低压减载模型及参数信息等),如果分别进 行维护,不仅增加了维护的工作量,而且很难保证模 型参数的一致性。因此需要进行模型参数的统一管 理,采用多级协调的分层分区维护机制保证电网的 模型和参数的一致性。

全网数据在线整合和共享。在省地模型参数共 享的基础上,再结合国调下发的模型参数和在线数 据,实现总调、省调和地调多层次的模型和数据的统 一整合,一方面上级调度为下级调度提供统一的全 模型和在线数据,另一方面随着下级调度模型的细 化,也进一步提高上级调度侧安全防御系统分析结 果的准确性。

应用结果信息共享和控制策略统一协调。通过 多级协调防御系统的建设,多级调度共享多级安全防 御系统的分析评估结果,上级调度将与下级电网关系 密切的内容下发,下级调度将对主网安全稳定性有显 著影响的内容上传。对于辅助决策和紧急控制的策 略,由上级调度进行统一协调,实现多级调度间的电 网安全防御系统信息的统一共享和协调控制。

多级调度分别对所辖电网范围预想故障进行安 全稳定性分析、预防控制辅助决策。主网的安全稳 定问题由上级调度负责制定安全稳定控制系统的控 制策略;下级调度负责所辖电网范围内的安全稳定 问题;下级不同调度管辖电网中的相继故障、连锁故 障,以及上下级调度管辖电网中的组合故障,由上级 调度负责分析发布,下级调度配合落实执行。

3 主要结论

电网技术支撑系统是确保电网安全稳定运行, 避免大面积停电事故的重要技术措施,而调度自动 化水平决定了电网技术支撑系统建设的高度和深 度。为此,基于当前电网调度自动化水平状况,对智 能电网技术支撑系统的构架进行了分析。

参考文献

[1] 马韬韬 郭创新 ,曹一家 ,等. 电网智能调度自动化系

• 38 •

统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):7-11.

- [2] 李碧君 温柏坚 徐泰山,等.省地两级电网安全稳定 协调防御框架及关键技术[J].电力系统自动化, 2011,35(21):26-30.
- [3] 王保义 邱素改 涨少敏. 电力调度自动化系统中基于

(上接第18页)

由图 8 可以看出,当孤网中所有机组调速系统 都参与频率调节时,孤网内频率波动特别大。孤网 内所有机组调速系统都参与频率调节有可能导致机 组调速系统调节过度,使孤网内频率下降特别厉害 引发低频减载装置动作。

通过对孤网内调速系统有没有参与孤网频率调 节仿真分析,可以得出孤网运行时系统中的频率变 化只能靠稳控装置动作以及负荷调节效应来使系统 中的频率稳定在一合理范围,但是此时系统对频率 调节能力非常差。通过仿真对比分析水电机组调速 系统与火电机组调速系统对孤网频率稳定的影响, 可以得出孤网中水电机组调速系统能快速地响应系 统中的频率变化,但是孤网水电机组调速系统参与 系统频率调节时系统中的频率波动比较大,而火电 机组调速系统能使系统频率很快稳定在一合理范 围。孤网内水电和火电机组调速系统同时参与系统 频率调节时可以提高系统对频率的调节能力,两者 能够弥补之间的不足。

4 结 论

通过对阿勒泰电网仿真分析可得在孤网运行时 调速系统对孤网频率稳定性影响比较大。当地区电 网中大部分负荷是由水电机组供应时,由于水电机 组调速系统的动态反调特性影响使地区电网与主网 解列后的频率稳定性降低。应尽快在地区电网内建 设火电机组,利用火电机组一次调频作用中和水电 机组动态反调特性,提高地区电网与主网解列后频 率稳定性。孤网内各水电机组都参与频率调节时能 快速响应系统中频率的变化,但是孤网内频率波动 较大。在安排电网运行方式进行时,因考虑孤网时 频率受水电和火电机组调速系统的影响不同,合理 安排机组的运行方式。 可信度的访问控制模型[J]. 电力系统自动化,2012, 36(12):76-81.

[4] 汪际峰. 一体化电网运行智能系统的概念及特征[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):1-6.

(收稿日期:2013-03-05)

参考文献

- [1] 黄宗君 李兴源 晁剑 筹.贵阳南部电网 "7.7"事故的 仿真反演和分析 [J].电力系统自动化 2007 31(9): 95-100.
- [2] P. Kundur,周孝信,李兴源,译.电力系统稳定和控制 [M].北京:中国电力出版社 2002.
- [3] Horne J Flynn D ,Littler T. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2004.
- [4] 于达仁 郭钰锋 徐基豫.发电机组并网运行一次调频的稳定性[J].中国电机工程学报,2000,20(9):59-63.
- [5] 何仰赞 温增根. 电力系统分析 [M]. 武汉: 华中科技 大学出版社 2002.
- [6] 周海锋 徐志勇,申洪.电力系统功率频率动态特性研究[J].电网技术 2009 33(16):58-62.
- [7] 黄青松 徐广文.水轮机调速系统自定义建模与应用[J].电力系统自动化 2012 36(16):115-117.
- [8] 竺炜 唐颖杰,谭喜意.发电机调速附加控制对系统频率稳定的作用[J].电力自动化设备 2008 28(12):21
 -24.
- [9] 涂振祥.多喷嘴冲击式大型水轮机组的调速器控制与 特殊工况运行问题研究[J].电力系统保护与控制, 2009 37(16):16-19 34.
- [10] 金娜,刘文颖,曹银利,等.大容量机组一次调频参数 对电网频率特性的影响[J].电力系统保护与控制, 2012,40(1):91-95,100.

任 华(1984),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向 为电力系统稳定与控制、调度自动化;

周 专(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制。

(收稿日期:2013-04-22)

• 39 •

作者简介:

配电网电动汽车协调有序充电调度策略研究

李书雄 林明星 余兴祥 (四川省电力公司甘孜公司 四川 康定 626300)

摘 要:针对在非协调无序充电方式下,电动汽车充电会给配电网带来一些功率损耗和电压偏移、增大负荷峰谷差等问题,构建了一种协调性有序充电调度策略。首先分析了电动汽车充电方式对配电网的影响,揭示了配电网中协调 有序充电的必要性;然后,从安全性和经济性两方面出发,同时以最小化配电网功率损耗和减小电网等效负荷峰谷差 为目标,建立了各个节点上电动汽车的最优充电调度策略。最后,采用遗传算法进行仿真求解,验证了该协调性有效 充电策略的合理性和有效性。

关键词: 电动汽车; 配电网; 协调性有序充电; 遗传算法

Abstract: Aiming at the power losses, voltage deviation and increasing differences of load peak and valley in distribution network caused by disorderly non – coordinated charging of electric vehicle, a dispatching strategy of orderly coordinated charging is established. Firstly, the effect of electric vehicle charging methods on distribution network is analyzed, and the necessity of orderly coordinated charging in distribution network is described. From the aspects of security and economy, the optimal charging dispatching strategy on each node is established taking minimizing the power losses of distribution network and decreasing the differences of load peak and valley as the goal. Finally, the rationality and validity of coordinated charging strategy are verified by the simulation with genetic algorithm.

Key words: electric vehicle; distribution network; orderly coordinated charging; genetic algorithm 中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0040 - 06

0 引 言

近年来,全球对节能减排的关注显著提升,对清 洁能源的越来越重视。传统的燃料汽车不仅大量消 耗着日益减少、存量有限的化石燃料,并且排放大量 的温室气体,从而对全球的环境和气候造成极大的 负面影响。在此背景下,电动汽车成为当今汽车发 展的必然趋势。其中,对电动汽车充电方式的研究 是其中一个重要的课题^[12]。

目前,国内外均采用非协调性无序充电方式对 电动汽车进行充电,每辆电动汽车的充电曲线都是 由各自的使用者决定的,使用者可以决定自己汽车 充电的时间和功率。该充电方式没有使电网的利用 达到最优化,电网的功率损耗和电能质量都有很大 的提升空间,并且在该无序充电方式下,进一步加大 了电网负荷峰谷差。

针对以上问题,国内外学者作了一定研究。文献[3]提出了一种平滑等效负荷波动的有序充电方 •40• 式,但未考虑涉及对整个配电网损耗等方面的影响; 文献[4]建立了一种考虑功率损耗的协调性充电方 式,但仅从定性上进行了分析;文献[5]详细分析了 协调性充电方式对电网损耗、电压偏移等的影响,建 立了一种提高配电网电能质量的充电方式,但未考 虑对系统等效负荷峰谷差带来的巨大影响。

综上问题和研究,分析了一种新的电动汽车充 电方式——协调性充电调度策略。该充电方式从经 济性和安全性两方面出发,使汽车的充电和电网的 利用达到最优,从而使网络的功率损耗降到最小,同 时减小等效负荷峰谷差。最后,通过 IEEE 标准配 电网 33 母线测试系统验证了该模型的有效性。

1 电动汽车对配电网的影响

电动汽车在充电时会消耗大量电能,从而大大 增加峰值负荷,对电网造成不利的影响。电动汽车 的充电地点主要有三个:其一是加油站,其二是停车 场,最后一个是车主的家中。这里讨论的情况主要 是电动汽车的集聚效应,也即所有电动汽车被安排 在充电站进行充电。从配电网运行者的角度考虑, 电动汽车充电时电网的功率损耗关系到经济收益, 因此,应该使电网的功率损耗减小到最小。另外,电 动汽车充电时会造成负荷大量增加,因此,避免变压 器和馈线的过负荷也是必须考虑的问题。在电动汽 车充电期间,除了功率损耗之外,电能质量(包括电 压分布、电力电量不平衡、谐波等问题)以及等效负 荷峰谷差也是配电网运行者和用户关心的重要问 题。过大的电压偏移以及峰谷差会使电力系统的可 靠性受到威胁。

在深夜让电动汽车充电能够增加基荷发电站的 负荷,也能平滑日负荷曲线,并且避免发电机的启 动,从而提高整体能效。如果让车主完全按照自己 的意愿给电动汽车充电,随意地确定充电时间和充 电功率,且配电网运行者不对所有电动汽车的充电 时间和充电功率加以协调,那么配电网将会受到极 大的影响。因为,如果不经过协调,大量电动汽车可 能集中在同一时间段进行充电,造成该时段峰值负 荷大大增加,从而增加功率损耗,加剧电压偏移,降 低配电网运行的经济性与可靠性。

2 协调性有序充电方式优化模型

2.1 协调性有序充电方式基本原理

在协调性有序充电方式下,电动汽车使用者不能 控制汽车的充电功率随时间变化的曲线,汽车的充电 调度策略曲线由配电网中一个专门的控制系统来控 制。这个控制系统的控制目标是使配电网的功率损 耗以及负荷峰谷差最小,该系统的控制依据是根据最 优化方法计算出的各个汽车最优充电功率随时间变 化的曲线。在该协调性充电方式下,各个充电动力 汽车之间存在着某种程度上的配合关系,它们的配 合使配电网中的功率损耗最小,进而使电能质量得 到相应提高,同时降低了系统等效负荷峰谷差。

2.2 电动汽车充电负荷模型

集中研究电动汽车充电的集群效应,即大量电动汽车在充电站接入后对配电网的影响,假设每辆电动汽车充电时间服从正态分布,且不受其他电动汽车影响,相互独立,因此采用蒙特卡洛模拟方法来研究电动汽车的充电行为。设第*t*时段第*k*辆电动汽车的充电功率为*P_k,则总的充电功率为*

$$P_{t} = \sum_{k=1}^{N} P_{k,t}$$
 (1)

式中 *P*_t 为第 *t* 时段总的充电功率; *k* 为电动汽车编 号; *t* 为时段编号; *N* 为电动汽车总量。

2.3 目标函数

由第1节知,该协调性充电方式从经济性和安 全性两个方面来进行整个配电网的优化,经济性体 现在系统网损方面,安全性体现在等效负荷峰谷差 方面。因此,优化目标为配电网功率损耗以及等效 负荷的方差最小。目标函数为

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} U_{ij} U_{ji} G_{ij} \cos \theta_{iji}, \qquad (2)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T} \left[\sum_{i=1}^{N} (P_{ii} + P_{ii}^{load}) - \mu \right]^2$$
(3)

其中 $f_1 \ f_2$ 分别为网损和等效负荷峰谷差目标函 数; T_N 分别为优化时段数和系统节点数; U_i ,为节 点 i 第 t 时段的节点电压; θ_{ij} ,为节点 $i \ j$ 的相角差; $P_{ij} \ P_{ij}^{load}$ 为节点 i 第 t 时段的充电功率和负荷功 率; μ 为所有时段电网等效负荷的平均值。即

$$\mu = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} P_{i,i} + P_{i,i}^{load}$$
(4)

另外,由于上述两个目标函数的量纲不同,在计 算过程中采用自适应权重法,并结合式(2)和式 (3) 将其归一转为单目标函数,得到如下形式。

$$\min f = \lambda_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \lambda_2 \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}$$
(5)

式中 λ_1, λ_2 为网损和等效负荷方差目标函数的权 重系数。

2.4 约束条件

(1)充电功率约束

$$I_i P_{i \min} \leq P_{i \downarrow} \leq I_i P_{i \max} \tag{6}$$

 $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为节点 *i* 的充电器功率最小、最 大限制; I_i 为节点状态量,当节点 *n* 有充电器时,其 值为1,否则其值为0。

(2) 电池容量约束

$$C_{i_{\ell}+1} = C_{i_{\ell}} + \eta P_{i_{\ell}} \Delta t \tag{7}$$

$$C_{i \min} \leqslant C_{i \downarrow} \leqslant C_{i \max} \tag{8}$$

$$C_{i \text{ start}} + \sum_{t \text{ start}}^{t \text{ end}} \eta P_{i t} \Delta t = C_{i \text{ max}}$$
(9)

式中,*C_{i min}、C_{i max}*为电动汽车电池电量的上下限; *C_{i start}*为电动汽车充电初始时刻电量; η 为充电效 率; Δ*t* 为时间间隔。式(7) 和式(8) 表示电量不能超 过最大容量限值,也不能低于用户的最小电量需求。 式(9) 表示若用户要求一次性在规定时间内充满电 •41• 的约束式。

(3) 网络安全约束

$$P_{i}^{\iota} = \sum_{j \in i} U_{i \iota} U_{j \iota} (G_{ij} \cos \theta_{ij \iota} + B_{ij} \sin \theta_{ij \iota})$$
(10)

$$Q_i^i = \sum_{i \in i} U_{i\,i} U_{j\,i} (G_{ij} \sin \theta_{ij\,i} - B_{ij} \cos \theta_{ij\,i})$$
(11)

$$U_{i\min} \leq U_{i} \leq U_{i\max} \tag{12}$$

$$P_{ii\,\min} \leqslant P_{ii\,i} \leqslant P_{ii\,\max} \tag{13}$$

式中 $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 、 $P_{ij,\min}$ 、 $P_{ij,\max}$ 分别为节点电压和支路功率的上下限。

2.5 算法求解

针对上述所建模型,采用普遍应用的遗传算法 进行求解。

(1)编码。选取各节点每个时段电动汽车充电 功率作为染色体个体,进行编码。

(2)适应度函数。按照遗传算法适应度函数要求需要将目标函数转化为最大值问题。因此结合式(5)构造适应度函数 f ´。

$$f' = \lambda_1 \frac{f_1^{\max} - f_1}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \lambda_2 \frac{f_2^{\max} - f_2}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}$$
(14)

(3) 遗传操作。根据种群个体适应值,并结合 潮流约束条件满足情况,执行相应遗传操作(选择、 变异和交叉)。由适应度函数知 *f*₁、*f*₂ 越小,对应的 适应度函数值越大,相应个体被选择的概率越高。 同时,采用较高个体适应度的单点交叉作为交叉算 子。由于遗传操作(选择、交叉和变异)具有随机 性,为了防止最优解在进化过程中被破坏,采取最优 保留策略,直接复制到下一代,从而提高了算法收敛 的可靠性。

(4) 算法流程。根据上述循环迭代过程可得协 调性有序充电结果,具体流程如图1。

3 算例分析

3.1 模型参数与假设

这里 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$,采用 IEEE 配电网 33 母线 系统进行算例分析 如图 2,该母线系统是一个住户 型的辐射配电网络,节点与支路参数见文献 [3,7]。 线路阻抗的大小是根据能承受的电压偏移和网络功 率损耗而确定的。随机选取这些节点中的其中一些 节点,作为电动汽车的充电节点。根据统计选择三 个重要的充电时段。第一个充电时段是用电高峰期 (18:00~22:00),该充电时间段和晚间的峰值负荷 发生的时间段是一致的。第二个充电时段是在傍晚 和夜里(23:00~6:00),该时段大多数电动汽车都 在家里,更愿意在此时段充电,进而降低充电费用, 并且电网负荷处于低谷阶段。第三个充电时时段是 上班时段(7:00~17:00),该时段通常在城市地区 的小型办公室内充电。



对于电网负荷,从某地区的居民配电网历史数 据中,选取一系列负荷曲线,将选取的大量日负荷曲 线分为两组,一组是冬季用电负荷曲线,另一组是夏 季用电负荷曲线。图3为冬季某一天单户家庭的日 负荷曲线。



• 42 •

3.2 模型结果

算例分析了电动汽车不同接入比例下(10%、 20%和30%)的系统网络损耗、电压偏移以及对等 效负荷的影响。表1、表2分别为各充电时段在不 同电动汽车接入比例下的系统网损和电压偏移。

表1 协调性有序充电方式下网络功率 损耗占总功率的比例

六中叶印	禾士	电动汽车接入比例					
尤 电 时 权	学卫	0%	10%	20%	30%		
18:00 ~ 22:00	夏季	1.5	1.7	2.0	2.4		
	冬季	2.9	3.2	3.8	4.2		
•• •• • ••	夏季	1.2	1.5	1.9	2.3		
23:00~6:00	冬季	2.4	2.9	3.5	4.1		
7:00 ~17:00	夏季	1.0	1.4	1.8	2.5		
	冬季	1.7	2.3	3.0	3.9		

从表1数据可以看出,随着电动汽车接入比例 的增大 配电网功率损耗也随之增大 这是由于电动 汽车比例增大时,意味着整个配电网网络的总负荷 增加,进而导致整个配电网网络的功率损耗也会随 之增加。

表2 协调性有序充电方式下配电网最大电压偏移

大中叶印	禾 艹	电动汽车接入比例					
允屯可投	学卫	0%	10%	20%	30%		
18:00 22:00	夏季	3.5	4.3	5.8	6.8		
18:00 ~ 22:00	冬季	4.8	5.6	6.5	7.7		
23:00~6:00	夏季	3.3	3.3	3.3	3.6		
	冬季	4.2	4.2	4.3	4.3		
7:00 ~17:00	夏季	3.0	3.4	4.2	4.9		
	冬季	3.6	4.1	4.9	5.7		

根据表 2 分析可得 协调性充电方式下,当电动 汽车的比例为 0% 时,和电动汽车的比例为 10% 的 电压偏移的差别不大。出现这种现象的原因是,当 电动汽车的比例为 0% 时,最大电压偏移出现在家 庭负荷的高峰时段。当电动汽车的比例为 10% 时, 由于采用了协调性充电方式,汽车几乎都能被安排 到家庭负荷的非高峰时段。这样,电动汽车的充电 几乎不会明显增加高峰时段的负荷量,因此,电压偏 移程度只比电动汽车比例为 0% 时略微高一些。当 电动汽车的比例为 20% 时,由于充电的汽车数量增 多,汽车充电时间的分布性就更强。于是,被安排到 高峰时期充电的汽车数量高于比例为0%时的情况。因而增加了高峰时期的总负荷,所以电压偏移比起比例为0%、10%时的程度高。同样的道理,当电动汽车比例为30%时,最大电压偏移的值比起0%、10%、20%都有所增高。

系统冬季某天各时段充电负荷和等效负荷曲线 如图 4。



3.3 模型对比分析

采用传统的非协调性自由充电模式进行算例对 比分析。表 3 和表 4 为非协调性充电方式下的系统 网损和电压偏移。

表 3 非协调性无序充电方式下网络功率 损耗占总功率的比例

东由时段	禾士	电动汽车接入比例				
尤电则权	学卫	0%	10%	20%	30%	
18:00 ~ 22:00	夏季	1.5	1.9	2.3	2.8	
	冬季	2.9	3.4	4.1	4.5	
23:00~6:00	夏季	1.2	1.6	2.1	2.7	
	冬季	2.4	3.0	3.7	4.5	
7:00 ~17:00	夏季	1.0	1.6	2.0	2.8	
	冬季	1.7	2.4	3.3	4.3	

表 4 非协调性无序充电方式下配电网最大电压偏移

六中叶印	禾士	电动汽车接入比例					
尤电则权	子卫	0%	10%	20%	30%		
18:00 ~ 22:00	夏季	3.5	4.5	5.9	7.5		
	冬季	4.8	6.1	7.8	9.0		
23:00 ~ 6:00	夏季	3.3	3.6	3.8	4.5		
	冬季	4.2	4.5	5.2	5.7		
7:00 ~17:00	夏季	3.0	3.5	4.3	5.1		
	冬季	3.6	4.3	5.3	6.0		

由上表中数据对比分析可得,由于冬季整个配 电网网络负荷高于夏季,功率损耗比夏季整个配电

• 43 •







从图 5 可以看出: 在自由充电模式下,采用蒙特 卡洛随机模拟,车主更多地选择在上班时间(7:00~ 17:00)或者用电高峰期(18:00~22:00)进行随机充 电 在该模式下势必会恶化电网的峰谷差,增加电网 的负担。采用协调性有序充电后,将大量的充电负荷 转移安排在夜间用电低谷时段(即23:00~6:00),这 有效降低了负荷峰谷差,平滑了负荷曲线。

表 5 相比自由无序充电协调性有序充电方式下 网络功率损耗减少比例

充电时段	禾士	电动汽车接入比例					
	子口一	0%	10%	20%	30%		
18:00 ~ 22:00	夏季	0	0.2	0.3	0.4		
	冬季	0	0.2	0.3	0.3		
	夏季	0	0.1	0.2	0.4		
23:00 ~ 6:00	冬季	0	0.1	0.2	0.4		
5 00 1 5 00	夏季	0	0.2	0.2	0.3		
7:00 ~17:00	冬季	0	0.1	0.3	0.4		

从表 5 可知: ①没有电动汽车充电时,协调性充 电方式与非协调性充电方式下都不会对配电网的网 络功率损耗造成影响; ②不同充电时间段、不同的电 动汽车比例的情况下,协调性充电方式比非协调性 充电方式的优越性程度不同,也就是说,在不同情况 下,协调性充电方式比非协调性方式充电减小的配 电网功率损耗的程度不同,随着电动汽车比例的增 加,协调性充电方式比非协调性方式充电的优越性 更加显著,减少的网损更多。因此,采用协调性有序 充电方式后,在不同电动汽车接入比例下整个配电 网系统网损均有所降低,提高了电网的经济性。

从表 2 和表 4 对比以及图 4 可得,在同样的情 •44• 况下,电动汽车以协调性充电方式充电比非协调性 充电方式充电的电压偏移量有较大程度的减小。比 如,在冬季的18:00~22:00以及23:00~6:00这两 个时段,当电动汽车的比例为30%时,以协调性充 电方式充电比以非协调性充电方式充电的电压偏移 小1.3%和1.4%。出现这种现象的原因是,用协调 性方式充电,能使各个电动汽车被安排在合理的时 间充电,尽量避开高峰负荷,减小高峰负荷的增量, 有效降低了负荷峰谷差,从而减小电压偏移,该充电 调度策略降低了电压偏移,提高了电能质量,避免了 无序自由充电下对负荷峰谷差的恶化,提高了电网

4 结 论

建立了以减小配电网功率损耗和峰谷差为目标 的协调性有序充电调度策略。通过配电网 33 节点 系统算例分析表明了该协调性有序充电调度策略能 将大量的充电负荷转移安排在夜间用电低谷时段, 有效地平滑了等效负荷曲线,避免了非协调性充电 方式下峰值负荷的增加以及电压偏移的加剧,提高 了配电网的安全性。同时,该充电策略降低了配电 网功率损耗,提高了整体能效,夜间充电也能有效增 加基荷发电站的负荷,提高了系统经济性。

该充电调度策略需要安装专门的控制系统,控制系统的安装会带来一定的成本,综合评估成本与整个配电网经济效益是下一步研究的内容。

参考文献

- [1] 杨孝纶. 电动汽车发展趋势及前景 [J]. 汽车科技, 2007(6):10-12.
- [2] S. G. Wirasingha N. Schofield and A. Emadi. Plug in Hybrid Electric Vehicle Developments in the US: Trends, Barriers, and Economic Feasibility [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2008.
- [3] 黄润,周鑫,严正. 计及电动汽车不确定性的有序充电 调度策略[J]. 现代电力 2012 29(3):57-63.
- [4] 万路路,王磊,丁昊. 配电网电动汽车优化充电研究 [J]. 华东电力 2011 39(12): 2049 - 2053.
- [5] Kristien Clement Nyns, Edwin Haesen, Johan Driesen. The Impact of Charging Plug – in Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid [J]. IEEE Transmissions On Power System 2010 25(1):371 – 380.

- [6] A. Anderman. The Challenge to Fulfil Electrical Power Requirements of Advanced Vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2004 27(1):2-7.
- [7] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等 教育出版社 2007.
- [8] 杨秦. 混合动力汽车发展将分"三步走"[N]. 中国经 济导报 2008 - 12 - 20.
- [9] Denholm P. and Short W. An Evaluation of Utility Sys-

(上接第22页)

盖一色尔古、谭家湾一南充支路脆弱;枯大方式下, 康定、南天、沐川、资阳、桃乡、内江、雅安、泸定、石 棉、九龙节点脆弱,黄岩一达州、黄岩一广安、泸定一 甘谷地、二滩一石板箐、谭家湾一南充、色尔古一茂 县、福龙一叙府、甘谷地一康定、龙头石一石棉、长 寿一万县支路脆弱。这些节点和支路相连的线路发 生故障易导致故障向连锁故障方向纵深。综合从线 路受能量冲击的大小强度和线路故障后对这个系统 造成的后果两方面来定义线路的脆弱性,更加接近 实际电网的脆弱本质。

脆弱度大的节点在过负荷下对系统冲击大,导 致支路过载潮流转移的节点,快速切除这些节点的 过负荷量对系统的安全稳定起到十分重要的作用。 综合脆弱度大的支路,由于过载支路的跳闸,必将引 起系统潮流的重新分布,其影响范围是全局的,在过 负荷保护切除支路前消除薄弱支路过载,从而避免 了连锁故障的发生。

综上所述,要提高整个四川特/超高压电网的安 全稳定水平和运行可靠性,对这些脆弱节点和脆弱 线路要加强监视控制,采取必要的安保措施使其坚 强可靠,避免由于这些脆弱元件造成故障的连锁反 应,进而减少大规模连锁故障发生的概率。对于脆 弱度大的节点,其上的过负荷应该快速消除,避免引 起支路过载。对于脆弱度大的支路,过载后不能让 过负荷保护切除,而应通过紧急控制迅速消除过载 以免引起连锁故障。

4 结论与展望

四川电网具有水电资源非常丰富、比重大,水电 分布不均匀、负荷分布主要分布在川东地区,丰水期 窝电 枯水期缺电等特点。对四川特/超高压电网脆 tem Impactsand Benefits of Optimally Dispatched Plug – in Hybrid Electric Vehicles [R]. Colorado: National Re– newable Energy Laboratory 2006.

[10] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment of Plug – in Hybrid Electric Vehicles – Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions [R]. EPRI, 2007. (收稿日期: 2013 – 05 – 21)

弱度分析表明,四川电网具有典型的小世界网络特性,其较小的特征路径长度和较高的聚类系数对故障的传播会起到推波助澜的作用。同时,在不同运行方式下,四川电网的脆弱节点和脆弱线路会发生转移,丰大方式下主要水电输送通道较脆弱,其结果对四川电网的运行控制具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North – eastern Region on 31st July,2012 [R/OL]. [2012 – 08 – 16]. http:// www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12. pdf.
- [2] 方勇杰.美国"9·8"大停电对连锁故障防控技术的启示[J].电力系统自动化 2012 36(15):1-7.
- [3] 陈向宜,陈允平,李春艳,等.构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考[J].电力系统自动化 2007 31(1):4-8.
- [4] 曹一家 陈晓刚 孙可.基于复杂网络理论的大型电力
 系统脆弱线路辩识[J].电力自动化设备,2006,26
 (12):1-5.
- [5] 陈晓刚 孙可,曹一家.基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J].电工技术学报,2007,22(10):138-144.
- [6] 丁明 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性 评估[J]. 中国电机工程学报 2008 28(10):20-25.
- [7] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等.四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制[J].电力自动化设备2010,30(6):100-104.

作者简介:

李 燕(1986),女,助理工程师,硕士,从事电力系统稳 定分析与控制研究。

(收稿日期: 2012-06-15)

• 45 •

计及风力发电并网的配电网潮流优化

程站立 胡 枚 陈世雯 (安徽省电力公司马鞍山供电公司 ,安徽 马鞍山 243000)

摘 要:研究了风力发电并网的潮流优化问题,分析了风力发电在潮流计算中常用的模型和方法。并针对风力发电 机组并网需要吸收电网大量无功造成配电网损耗增大的缺点,采用并联电容器对配电网无功进行补偿。在满足风电 场无功补偿的前提下,把风机的异步发电机组视为 PQ 节点,应用前推回带法计算了风机并网后的配电网潮流,在此 基础上采用改进的粒子群算法对配电网无功补偿电容器进行了优化。重点讨论了风力发电并网对配电网的网损和 电压的影响,并在配电网分析常用的33 母线系统上进行了仿真计算,得到了较好的实验结果。

关键词: 配电网; 潮流计算; 分布式发电; 风力发电; 改进的粒子群算法

Abstract: The problem about power flow optimization of distribution network with wind power generators is studied, and the commonly used models and methods in power flow calculation of wind power generation are also analyzed. Considering that wind power generators integrated with the grid may produce much active power loss by absorbing a lot of reactive power, so shunt capacitor is adopted to compensate the distribution network. Under the premise of satisfying the reactive power compensation, the asynchronous generators of wind farms are treated as PQ node to calculate the power flow of distributed network after the integration of wind power generators using the forward ad backward method. On this basis, the improved particle swarm algorithm is adopted to optimize the reactive compensating capacitor. The focuses are on the influence of wind power integration on the power loss and voltage level of distributed network , and the validity and practicability of the proposed method are simulated by an example of wind farms connected to 33 bus system , which has a satisfactory and acceptable result.

Key words: distribution network; power flow calculation; distributed generation; wind power; improved particle swarm algorithm

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013) 04-0046-04

0 引 言

随着全球资源环境压力的不断增大,社会对环 境保护、节能减排和可持续性发展的要求日益提高。 同时,电力市场化进程的不断推进以及用户对电能 可靠性和质量要求的不断提升,要求未来的电网必 须能够提供更加安全、可靠、清洁、优质的电力供应, 而具有灵活、清洁、安全、经济、友好等性能的支持各 种分布式电源(微型燃气轮机、燃料电池、太阳能光 伏发电、风力发电等)以"即插即用"的方式友好接 入的智能电网就成了未来电网的发展方向^[1]。

分布式电源(distributed generation,DG)是指在 配电系统靠近用户侧引入的功率为数千瓦至50 MW的小型模块式、与环境兼容的独立电源。分布 式发电具有投资少、占地小、建设周期短、节能、环保 等特点。风电是具有可再生性的分布式电源,近年 来随着中国能源结构的调整,风电日益得到重视,并 制订了有关政策支持风电的快速发展,风电已成为 分布式发电中发展最快的、最具有发展前景的一种 发电方式^[2]。

风电并入配电网对配电系统的网损和电压分布 有重要的影响,而潮流计算是对其进行量化分析的 主要手段。文献[3]在建立 PQ 模型时根据有功功 率调整无功功率,在有功功率已知的情况下,根据有 功功率与无功功率的近似解析式求得风场无功功 率,然后进行计算。文献[4]在分析风电机的潮流 模型的基础上,提出了 RX 模型,此模型充分考虑到 了风力发电机的输出功率特性,在常规潮流迭代基 础上增加了异步发电机的滑差迭代计算。但是该方 法潮流方程维数较大,计算程序复杂。文献[5]利 用蒙特卡罗方法仿真模拟风机风速,建立了包含风

• 46 •

力发电机组的配电网无功优化模型,并采用静止无 功补偿设备对配电网进行无功补偿。在分析风电机 组潮流计算中常用的几种数学模型的基础上,采用 了前推回带法计算了计及风力发电的配电网潮流, 在潮流计算中考虑使用并联电容器对电网进行无功 补偿,并建立了以全网的有功网损最小为目标函数 的无功优化模型,并通过算例分析对所提的方法进 行了仿真验证。

1 风力发电机组模型分析

1.1 风电机组的 PQ 等值模型

风电机组主要由风力机和异步发电机等主要元件组成^[4]。在稳态情况下,风力机从风能中吸收的机械功率与风速的三次方成正比即

$$P = 0.5\rho A V^3 C_p \tag{1}$$

式中 r 为空气密度 kg/m^3 ; V 为风速 m/s; A 为风力 机的扫掠面积 m^2 ; C_p 为风力机的风能利用系数 ,表 明风轮机从风中获得的有用风能的比例 ,它是叶尖 速比 λ 的函数 ,且有 $\lambda = \omega r/v$; r 为风轮半径; ω 为风 轮角速度。

在电力系统潮流计算中的风电机组传统的处理 方法是将其等值为 PQ 节点,并认为风电机组中电 容器自动分组投切,以保持风电场的功率因数保持 不变,即有

$$Q = P/\tan\theta \tag{2}$$

式中 θ 是并网风电场的功率因数角。由于采用的是 异步发电机 所以 θ 一般位于第四象限 $tan\theta$ 为负。

1.2 风电机组的 RX 等值模型

在含风电机组的潮流计算中,RX 等值模型基本思想是基于两个迭代过程,一是通过常规潮流迭代过程计算异步发电机的机端电压;二是通过异步发电机滑差的迭代过程计算异步发电机的滑差。根据能量守恒定律,风力机吸收的机械功率和异步发电机发出的电气功率理论上应该相等。因此,当异步风力发电机的电气功率与风力机吸收的机械功率的差值达到允许的误差范围时,说明风力发电机组达到稳定运行点。这种等值模型要基于以下两个假设^[6]。

(1) 在滑差。已知的情况下, 电机在稳态情况下 可以模拟等效成一个阻抗。

(2) 风速和功率因数曲线在已知的情况下可以 求出滑差的数值大小。 由异步发电机组等值电路原理图 1 可知 ,在 RX 等值模型中 ,其等值阻抗为



图 1 异步发电机等值电路^[4]

图 1 中 ,X₁ 为定子漏抗; X₂ 是转子漏抗; X_m 是 异步发电机的激磁电抗; R₁ 是定子电阻; R₂ 是转子 电阻; R_m 是励磁电阻; s 为转差。

异步发电机组发出的有功功率 *P* 与转子电流 *I*₂ 异步发电机的滑差 *s* 之间的关系为

$$P = -I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$
 (4)

采用 RX 等值模型方法能够较好地反映异步电 机的特性 但由于需要两个迭代过程 其总的迭代次 数多 计算负担重 同时收敛性变差。

1.3 风电机组的稳态等值模型及简化模型

目前,风力发电的机组一般都是异步发电机组。 异步发电机在超同步运行的情况下以发电方式运行。 它吸收风力机提供的机械能,发出有功功率。但是异 步发电机本身无励磁装置,需要从电网或者电容器中 吸收无功功率提供其建立磁场所需的励磁电流。多 台风力机组按照一定规则排列构成风电场,风电场的 功率为所有风电机组输出功率之和^[7]。

由图 1 中的电路关系可知发电机的有功功率的 表达式为

$$P = -\frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s) + (x_1 + x_2)^2}$$
(5)

在不考虑并联电容器的情况下,发电机从电网 中吸收的无功功率 Q 为





• 47 •

损耗与有功功率相比可忽略 因此 ,可以将励磁支路 移至电路首端 ,得到简化的异步发电机 Γ 型等值电 路 ,如图 2 所示。

若假设风电场的有功功率为风机的机械功率, 可由电路连接关系得出风电机组无功功率的表达 式。经过简化则式(6)可变为式(7),如下。

$$Q = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2(x_1 + x_2)^2}}{2(x_1 + x_2)}$$
(7)

为了减少网络损耗,通常与风力发电机组并联 安装电容器组。电容器组自动分组投切,以保证风 力发电机组的功率因数在允许的范围内变动。带并 联电容器组的风力发电机组的功率因数为^[8]

$$\cos\varphi = P/\sqrt{P^2 + (Q_c - Q)^2} \tag{8}$$

式中 *P* 为风力发电机输出的有功功率; *Q* 为风力发电机吸收的无功功率; *Q*。为并联电容器输出的无功补偿容量,可以表示为

$$Q_{c} = P_{N} \left(\sqrt{\frac{1}{(\cos\varphi_{1})^{2}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{(\cos\varphi_{2})^{2}} - 1} \right)$$
(9)

式中 $\cos\varphi_1$ 为发电机的初始功率因数; $\cos\varphi_2$ 为并联 电容器组后的发电机功率因数。

并联电容器组的实际投入组数为

$$[n] = Q_c / Q_N \tag{10}$$

式中,[*n*]表示对分数取整数运算;*Q_N*为并联电容器的单位容量。考虑并联电容器组输出无功与电压幅值有关,风机从电网吸收的实际无功为

$$Q_a = nQ_c U^2 / U_N^2 + Q$$
 (11)

在潮流计算中根据每次得到的电压幅值由式 (7)计算其吸收的无功,再根据要求达到的功率因 数由式(9)和式(10)求出并联电容器的组数,最后 由式(11)得到实际吸收的无功,这样就可以在下次 潮流计算时把风机并网节点作为 PQ 节点进行潮流 计算^[3]。

2 改进的粒子群算法

由于基本粒子群算法过多的依赖于个体最优解 和种群最优解的信息,搜索区域可能因此会受到限 制,而且设置参数、种群的大小以及它们之间的关系 也没有可供参考的准则,因此算法有开始效果好,接 近最优解时收敛很慢等缺点。针对不同的优化问 题,在基本粒子群优化算法基础上的许多改进己经 提出并产生出一些新的粒子群优化算法模型^[9]。 为保证算法的收敛性,CIERC 提出了对 PSO 进行改进的收缩因子方法(constriction factor method, CFM)。由于该方法定义了一个收缩因子 K,所以该改进的 PSO 算法被称为 PSO – cf,其定义如下。

$$\vec{v}_{i}(t) = K(\omega \times \vec{v}_{i}(t-1) + c_{1} \times Rand() \times (\vec{p}_{i best} - \vec{x}_{i}(t-1)) + c_{2} \times Rand() \times (\vec{g}_{best} - \vec{x}_{i}(t-1))$$

$$\vec{x}_{i}(t) = \vec{v}_{i}(t) + \vec{x}_{i}(t-1)$$
 (13)

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \varphi = c_1 + c_2 \varphi > 4 \quad (14)$$

式中 *K* 是收缩因子; ω 是惯性权值; c_1 和 c_2 分别是 加速常数; $\vec{x}_i(t)$ 是第 *i* 个粒子的位置; $\vec{v}_i(t)$ 是第 *i* 个粒子的速度。

这里将系统有功功率损耗和节点电压偏差最小 作为目标函数,并采用罚因子的方式将多目标的无 功优化模型转变成单目标的优化问题。具体目标函 数如下。

$$\min f(x) = \sum_{i}^{L} R_{i} \frac{p_{i}^{2} + Q_{i}^{2}}{U_{i}^{2}} + \lambda \max |U_{i} - U_{rat}| \quad (15)$$
$$Sc = [Sc_{1} \ Sc_{2} \cdots Sc_{n}] \quad (16)$$

式(15) 中 R_i 是支路电阻; P_i 和 Q_i 分别是支路的有 功功率和无功功率; U_i 是节点 i 上的电压幅值; U_{rat} 是节点参考电压(标幺值) 取值为 1.0 p. u.; λ 是罚 因子 这里取值为 10。式(16) 中 Sc_1 是补偿电容器 的投切组数。

3 基于改进粒子群算法的配电网潮流 优化步骤

前推回带法具有编程简单、计算效率高、且随着 网络复杂程度的增加速度降低不大、收敛特性好等 优点 特别适用于计算辐射型电网结构的潮流 ,是一 种性能优异的配电网潮流算法^[10]。因此这里拟采 用此方法进行系统潮流计算。

进行潮流计算前 需要给定的初始量有风电场节 点电压幅值、风力发电机的风速、定子和转子电抗、励 磁电抗、并联电容器组的额定电压、并联电容器组额 定电压下的单位容量以及进行无功补偿的并联电容 器的投切百分比。具体的潮流计算过程如下。

①确定风机输出的有功功率,输入系统数据并 初始化粒子种群;②由式(7)~式(11)计算风电场 电容器组的安装组数以及初始时刻风力发电机吸收 的无功功率和并联电容器组发出的无功功率;③调

• 48 •

用前推回推潮流计算程序计算目标函数值,即分别 计算群体中的每个粒子的潮流,得到每组控制变量 下的有功损耗;④记录粒子当前的个体极值 p_{besti} 及 目标函数值 $f(p_{besti})$,从 p_{besti} 中确定整体极值gbest并 记录gbest对应的目标函数值;⑤更新粒子飞行速度 以及在解空间中的位置;⑥再次调用前推回推法计 算系统潮流,重新判断各个粒子的目标函数值,如果 $f(pbest_{i+1}) < f(pbest_i)$ 则更新 $pbest_i$,否则不更新;将 每个粒子的适应值与整个粒子群的gbest相比较,如 果较好则重新设置gbest,否则gbest值不变,重新初 始化粒子群;⑦当满足全局最好位置连续若干次无 变化或达到预先给定的最大迭代次数条件后,迭代 停止,否则转入步骤(3);⑧输出补偿电容器的投切 组数以及对应的网损值,潮流优化结束。

4 算例分析

采用图 3 所示的 33 母线配电系统进行分析。 根据文献 [10],系统电压基准值为 12.66 kV,视在 功率基准值为 10 000 kV • A,系统总的有功负荷是 3 715.0 kW,总无功负荷是 2 300.0 kW。在节点 17、24、32 并入 3 台风机,单台风力发电机的额定容 量为 600 kW 其额定电压为 0.69 kV 功率因数为 0.89。 在节点 9、16、30 并联 3 组补偿电容器,并联电容器 组的额定电压为 0.69 kV,每台并联电容器的额定 容量为 40 kvar,采用百分比值确定容量,调节精度 为 0.01。风电场的功率因数由初始的 0.89 提高到 0.99。并联风机的参数参考文献 [11]。潮流计算 方法采用前推回带法。





由图 4 可以看出 33 母线系统的电压幅值在 0. 91~1.0 p. u. 之间。潮流计算经过 5 次迭代后收 敛 系统总的有功网损为 405 kW。

在节点 24、32、17 并入风电机组后 潮流计算经 过 5 次迭代收敛 ,迭代结束后的节点电压幅值与风 机并网前比较如图 5 所示。



由图 5 可以看出风机并网后向系统发出有功 功率,供给与风电场节点相近的节点负荷,有效地提 高了整个配电网的电压幅值水平,节点电压幅值范 围为 0.932~1.0 p.u.之间。潮流计算结束后得到 系统有功网损为 229 kW。

在节点9、16、30 接入并联电容补偿器组后 应用改进的粒子群算法对配电网进行无功优化 试验次数为 20 次 种群规模为 39 维数为 3 收缩因子为 0.729 8 加速因子均为 2.01 ,迭代收敛精度为 10⁻⁶ ,控制变量范围为 0~5。经过优化后的电压幅值与优化前相比较如图 6 所示。

• 49 •

(4) 试验时,湿度采用相对湿度表示,但对测量 结果影响的本质因素是绝对湿度。在均匀电场中, 电极间介质变化对电场的改变是一致的,试验结果 可以充分说明,电场强度传感器需要防止湿度的影 响。现场测量结果达到2~8 倍误差的原因,应该涉 及其他因素,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 邵方殷. 交流线路对平行接近的直流线路的工频电磁 感应[J]. 电网技术 ,1998 22(12):61-65.
- [2] 黄道春 ,阮江军 ,文武 ,等. 特高压交流送电线路电磁 环境研究[J]. 电网技术 2007 ,31(1):6-11.
- [3] 国家环境保护局. HJ/T 10.2 1996 辐射环境保护管 理导则一电磁辐射测量仪器和方法[S]. 北京: 中国标 准出版社,1996.
- [4] 国家环境保护局. HJ/T 24 1998 500 kV 超高压送变 电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S]. 北京: 中

(上接第49页)

相比没有优化的含风机的配电网,电压幅值有了进 一步的提高,系统总的有功网损也有了显著的降低。 采用改进的粒子群算法对含风机的配电网进行潮流 优化不但没有增加潮流收敛需要的迭代次数,而且 有效地降低了系统的有功网损,提高了节点电压幅 值。证明所使用的潮流优化方法是正确的。



5 结 论

研究了计及风机并网的配电网潮流优化方法, 通过比较分析风电场并网潮流计算的几种常用模型,选用带补偿电容的风机稳态等值模型作为研究 对象,并采用改进的粒子群算法对风机并网的配电 网潮流进行了优化。仿真实验结果表明,该算法可 行,对于减少网络的功率损耗和提高节点电压幅值 有显著的作用,为各种 DG 的并网优化运行提供了 国标准出版社,1998.

- [5] 施东风,孙沙青,王冲,等.不同布置方式 220 kV 变电 所对周围环境的电磁辐射分布[J].环境测量管理与 技术 2007,19(2):44-51.
- [6] 庄振明,谢咏梅,宋永忠,等. 解决电磁辐射分析仪测 量值偏高的方法[J].环境测量管理与技术,2008,20 (4):70-71.
- [7] 彭继文 周建飞 周年光 等. 湿度对 500 kV 超高压交 流架空送电线路区域电磁环境的影响研究 [J]. 电网 技术 2008 32(增刊 2):237-239.
- [8] 俞集辉 郑亚利 徐禄文 等. 湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. 重庆大学学报 2009 32(2):137-140.
- [9] 何家宁 Daniel Tao 涨宗华 筹. 电选机电场强度与相对 湿度之间的关系 [J]. 金属矿山 2006 360(6):27-29.

作者简介:

兰新生(1979),男,高级工程师,目前主要从事电力环 境测量与治理工作。 (收稿日期:2013-04-22)

理论和方法参考。

参考文献

- [1] 陈述勇 宋书芬 李兰欣 ,等. 智能电网技术综述 [J].
 电网技术 ,2009 ,33(8):1-7.
- [2] 雷亚洲.与风电并网相关的研究课题[J].电力系统自动化,2003,27(8):84-89.
- [3] 李新 彭怡,赵晶晶,等.分布式电源并网的潮流计算 [J].电力系统保护与控制,2009,37(17):78-81,87.
- [4] 徐娇 李兴源. 异步发电机组的简化 RX 模型及潮流计 算[J]. 电力系统自动化, 2008 32(1):22-25.
- [5] 陈琳 种金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功 优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 30(14): 20-24.
- [6] 刘洋,康凯,王邦惠,等.含风电系统的潮流计算分析[J].山东电力技术,2009(4):21-24.
- [7] 胡敏 周任军 杨洪明 ,等. 考虑风力发电的系统无功 优化模型和算法 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学 版 2009 6(1):43-48.
- [8] 王守相 江兴月,王成山.含风力发电机组的配电网潮 流计算[J].电网技术 2006 30(21):42-45 61.
- [9] 刘述奎. 基于自适应聚焦粒子群算法的电力系统无功 优化[D]. 成都: 西南交通大学 2009.
- [10] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等 教育出版社 2007.
- [11] 顾威,李兴源,魏巍.异步发电机稳态模型研究[J]. 四川电力技术,2009,32(3):20-24.

作者简介:

程站立(1985),男,硕士研究生,主要从事配电网潮流 优化、分布式发电技术研究。

(收稿日期:2013-03-26)

• 94 •

基于 PCHD 模型的 VSC – HVDC 系统的 L_2 增益控制

付永良,王 奔 陈新华,邓大磊,王吉庆 (西南交通大学电气工程学院,四川,成都 610031)

摘 要:基于轻型高压直流输电系统的端口受控哈密顿系统(PCHD)模型,提出了一种针对基于电压源换流器的轻型 高压直流(VSC-HVDC)输电系统的L2增益控制新方法。首先根据VSC-HVDC的不同控制方式,确定相应的dq坐 标下的电流参考值。在此基础上,根据控制目标和能量平衡的关系设计误差系统的能量存储函数,通过L2增益控制 的方法设计控制器,实现对参考电流的渐近追踪和对外界干扰的抑制。仿真结果验证了所提出的控制策略的正确性 和有效性。

关键词: 高压直流输电; 电压源换流器; 哈密顿系统; 能量函数; L₂ 增益控制

Abstract: Based on the port – controlled Hamilton with dissipation (PCHD) model , a new L_2 – gain repetitive control strategy of voltage sourced converter based high voltage direct current (VSC – HVDC) system is proposed. In the theory , the converter model of VSC – HVDC is equivalent to a dissipative passive system , and according to different control modes of VSC – HVDC , the reference currents in the corresponding dq – axis are determined. On the basis , L_2 – gain repetitive controller is designed to trace the reference currents and suppress the external disturbances. The simulation results verify the validity of the proposed control strategy.

Key words: high voltage direct current (HVDC); voltage sourced converter (VSC); port – controlled Hamilton system; energy function; L₂ gain control

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0050 - 05

随着可控关断型电力电子器件和 PWM 技术的 发展,基于电压源换流器的轻型高压直流(VSC – HVDC)输电系统越来越受到人们的关注。与传统 的直流输电系统相比,该输电系统可向无源网络供 电、无换相失败风险、有功和无功功率可独立控制、 并且易于构成多端直流系统等优点^[1]。

目前,VSC - HVDC 的控制策略包括采用控制 交流侧电压和相位,进而控制交流侧电流的间接电 流控制策略^[2,3]及直接电流控制策略^[4,5],但其内、 外环采用两级 PI 来实现,暂态性能不理想;采用前 馈解耦的方式实现系统电流快速跟踪和有功、无功 功率独立调节的控制策略^[6],但其外环建立在逆系 统模型的基础上,在大扰动情况下很难保持稳定;采 用状态反馈精确线性化理论,来独立调节有功和无 功功率的控制策略^[7],其算法太过复杂。近年来, 基于无源理论的非线性控制成为电流跟踪控制的研 究热点,但参数的扰动以及外界干扰对其控制效果 有很大的影响。

为抑制外界因素的影响,下面将采用 L_2 增益控制的新方法[8-9]。首先建立轻型高压直流输电系统

在旋转坐标系下的数学模型并写成端口受控的哈密 顿形式^[11,12] 通过控制目标与能量平衡的关系设置 能量存储函数 ,并根据 L₂ 增益干扰抑制理论设计控 制率 ,从而实现交流侧电流的快速跟踪和直流侧电 压恒定 ,同时也实现了对外界干扰的抑制。最后通 过 Matlab 仿真对所设计的控制器进行了验证。

1 VSC - HVDC 工作原理和数学模型

假设两端无穷大 VSC – HVDC 输电系统结构如 图1 所示,两端换流器均采用 VSC,具有相同的拓 扑结构。



图 1 中 ,*U*_{s1}、*U*_r、*i*_{s1}和 *U*_{s2}、*U*_i、*i*_{s2}分别为整流侧和 逆变侧的双端电源电压、换流器的交流侧电压和电 流; R_1 、 R_2 和 L_1 、 L_2 为整流侧和逆变侧换流器的等效 电阻和电感 其中 $R_1 = R_2 = R$ $L_1 = L_2 = L$; C_1 、 C_2 、 R_{de} 、 L_3 分别为直流侧两端电容和线路等效电阻、电感 其 中 $C_1 = C_2 = C$; U_{de1} 、 U_{de2} 为直流侧两端直流电压。

由于 VSC – HVDC 系统中的整流器和逆变器的 电路结构相同,且与三相电压型 PWM 换流器电路 相似,如图2。



所以以整流侧电路为例,建立系统数学模型如 下。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = U_{sd} - S_d U_{dc1} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = U_{sq} - S_q U_{dc1} - \omega L i_{sd} - R i_{sq} \end{cases}$$
(1)
$$C \frac{dU_{dc1}}{dt} = i_{dc} - i_d$$

式中 S_d 、 S_q 表示坐标变换后的开关函数; U_{sq} 、 U_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{sd} 分别为 U_{sabc} i_{sabc} 变换后的对应的 d、q 轴分量。

2 PCH 模型与 L₂ 增益干扰抑制

端口受控哈密顿系统(PCH) 是无源性、耗散性 理论研究的最新成果。考虑下面的计及耗散和干扰 量的 PCH 系统方程为

$$\dot{x} = \left[J(x) - R(x)\right] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_1(x) u + g_2(x) \omega$$
(2)

式中 $x \in R^n$ 是状态矢量; $u \in R^m$ 代表输入矢量; R (x) 为半正定对称矩阵 ,反映了端口上的附加阻尼; J(x) 为斜对称阵 ,满足 J(x) = -J(x) ,反映了系统 内部的互联结构; H(x) 为系统的 Hamiltonian 函数; $g_1(x) u$ 等效表示外部源输入; $\omega \in R^p$ 为干扰向量且 $\omega \in L_2$ [0 ,T]。

非线性 L_2 增益干扰抑制问题即在指定的罚输入 信号的条件下,寻找一个反馈控制率 $u = \alpha(x)$ 和正定 的存储函数 V(x) 使得下式的耗散不等式成立。

$$\dot{V}(x) \leq -Q(x) + \frac{1}{2}(\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2)$$

其中 Q(x) 为给定的非负函数; $\gamma > 0$ 为干扰抑制标 准; || • || 为对应向量的 Euclidian 范数。

3 L_2 增益控制器设计

3.1 VSC - HVDC 参考电流计算

设计控制器时,外环控制器整流侧采用定直流 电压和定无功功率控制,逆变侧采用定有功功率和 无功功率的控制策略。根据生成的参考电流,设计 内环无源控制器进行跟踪,以达到控制有功功率、无 功功率的目的。

根据瞬时功率理论 同时 ,忽略换流电抗器电阻 和开关损耗时 ,换流站的有功功率、无功功率和直流 侧的有功功率的表达式如下。

$$\begin{cases} P_{1} \approx P_{s} = \frac{3}{2} (U_{sd}i_{sd} + U_{sq}i_{sq}) \\ Q_{1} = Q_{s} = \frac{3}{2} (U_{sq}i_{sd} - U_{sd}i_{sq}) \\ P_{1} = P_{dc} = U_{dc1} \cdot i_{d} \end{cases}$$
(3)

VSC – HVDC 为三相平衡系统,令两端无穷大 电源 a 相相电压的初相角为0°,有: $U_{sd} = U_{s}$, $U_{sq} = 0$, 又因 U_{s} 一个为恒定值,所以有功功率、无功功率可 以通过调节 i_{sd} 、 i_{sg} 独立来控制。

当给定有功功率、无功功率和直流侧电压的 参考值 P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{delref} ,由式(3)得到电流的预估 值 i'_{sd} 、 i'_{sq} ,为了消除稳态误差,通过三个 PI 调节 器 PI(1)、PI(2)、PI(3),把实际测得的有功功率、无 功功率以及直流侧电压值和给定参考值之间的偏差 转化为修正量 Δi_{sd} 、 Δi_{sq} ,然后用相应的预估计值加 上修正值,从而得到的内环参考电流 i^*_{sd} 、 i^*_{sq} ,PI 调节 器的参数通过实验得到。

3.2 L₂ 增益控制器设计
 定义系统(1) 的状态变量为
 x = [x₁ x₂]^T = [Li_{sd} Li_{sq}]^T = D[i_{sd} i_{sq}]^T
 并取哈密顿能量函数

$$H(x) = \frac{1}{2}x^{T}D^{-1}x$$
 (4)

将它们写成端口受控干扰的耗散哈密顿形式为 $\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_1(x) u + g_2(x) \omega$ (5)

式中,

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} R(x) = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

• 51 •

(9)

$$g_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u = \begin{bmatrix} U_{sd} - S_{d}U_{dc1} \\ U_{sq} - S_{q}U_{dc1} \end{bmatrix}$$
$$g_{2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega = \begin{bmatrix} \omega_{d} \\ \omega_{q} \end{bmatrix}$$

为实现对外环参考电流的跟踪,并抑制外界干扰,建立误差系统,令

取 $\varepsilon = (J - R) i_s^* - \dot{x}^* + g_1(x) u$,并定义罚输入 矢量 $z = G \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}$,其中,G为二阶单位矩阵。利用完全

平方配方法构造 γ 耗散不等式得

$$\begin{split} \dot{H}_{d} &= -\left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} R \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} + \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} \varepsilon + \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} g_{2}\omega \\ &= -\left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} R \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{2} \left(\gamma^{2} \parallel \omega \parallel^{2} - \parallel z \parallel^{2}\right) \\ &- \frac{1}{2} \parallel \gamma \omega - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} \parallel^{2} + \frac{1}{2\gamma^{2}} \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} \frac{\partial H_{d}}{2\tilde{x}} + \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial H\tilde{x}}\right)^{T} \varepsilon \\ &= - \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} R \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{2} \left(\gamma^{2} \parallel \omega \parallel^{2} - \parallel z \parallel^{2}\right) \\ &+ \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} \left[\left(\frac{1}{2\gamma^{2}} + \frac{1}{2}\right) \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} + \varepsilon\right] \\ &- \frac{1}{2} \parallel \gamma \omega - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}} \parallel^{2} \end{split}$$
(7)

利用动态反馈注入阻尼 冷

$$\varepsilon + \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2}\right)\frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}} = -R_a \frac{\partial H_d}{\partial \tilde{x}}$$
 (8)

其中
$$R_a = \begin{pmatrix} r_{a1} \\ r_{a2} \end{pmatrix}$$
且 r_{a1} 、 r_{a2} 均大于零。将式

(8) 带入式(7) 得

$$\dot{H}_{d} \leq -Q + \frac{1}{2} (\gamma^{2} \|\omega\|^{2} - \|z\|^{2})$$

$$\ddagger \mathbf{p} \ Q = \left(\frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}\right)^{T} (R + R_{a}) \frac{\partial H_{d}}{\partial \tilde{x}}$$

当干扰 ω 到罚输入 z 的 L₂ 增益小于指令水平 γ 时,为实现对控制目标的渐近跟踪,利用公式(8) 便可得到如下的控制率。

$$\begin{cases} S_{d} = \frac{U_{sd} - Ri_{sd}^{*} + \omega Li_{sq}^{*} - Li_{sd}^{*} + (r_{a1} + \frac{1}{2\gamma^{2}} + \frac{1}{2})(i_{sd} - i_{sd}^{*})}{U_{dc1}} \\ S_{q} = \frac{U_{sq} - \omega Li_{sd}^{*} - Ri_{sq}^{*} - Li_{sq}^{*} + (r_{a2} + \frac{1}{2\gamma^{2}} + \frac{1}{2})(i_{sq} - i_{sq}^{*})}{U_{dc1}} \end{cases}$$

将计算得到的 S_a 、 S_q 经坐标变换即可得到换流器的控制信号 S_a 、 S_b 、 S_c ,同理可以得到逆变侧的控制信号。控制框图如图 3。



4 仿真分析

为验证所设计的控制器的有效性,在 Matlab 中 搭建了图 1 所示的 VSC – HVDC 系统。其主要参数 如下: 交流母线额定电压 $U_{s1} = U_{s2} = 10$ kV,直流电 压 $U_{de} = 20$ kV,交流侧电感和电阻分别为 $L_1 = L_2 =$ 15 mH $R = 0.2 \Omega$,直流侧电感 $L_3 = 20$ mH,直流侧 等效电阻 $R_{de} = 0.5 \Omega$,直流侧电容 $C_1 = C_2 = 7$ mF, 变流器额定功率为 14 MW。所有值均采用标幺值 表示,交流侧和直流侧的基准功率为 12.4 MW,交 流侧基准电压为 8.16 kV,交流侧电流基准值为 1 kA; 直流侧电压基准值 20 kV,电流基准为 600 A。 取注入阻尼参数 $r_{a1} = 10$ $r_{a2} = 10$; $\gamma = 0.2$ 。

稳态工作时,整流器和逆变器的直流侧电压以 及有功功率定值均为1.0,无功功率定值为0。取上 述参数,仿真结果如图4、图5所示。图4为整流侧 直流电压 U_{de1} 、有功和无功功率 P_1 、 Q_1 的响应波形; 图5为逆变侧直流电压 U_{de2} 、有功和无功功率 P_2 、 Q_2 的响应波形。在有功功率、无功功率波形图中,实线 表示有功功率,虚线表示无功功率。

当系统在 *t* =1 s 整流侧发生有功功率阶跃响应 (-0.1 p.u.); *t* =1.7 s 整流侧无功功率发生阶跃响应 (-0.1 p.u.)时 仿真结果如图6、图7 所示。图6 为整

• 52 •



• 53 •

流侧电压和定有功、无功功率来生成内环 dq 轴参考电流; 内环采用基于 PCHD 模型 L₂ 增益控制器来追踪参考电流 从而达到独立调节有功和无功功率及控制外部干扰的目的。仿真结果表明 ,所设计的 L₂ 增益控制器 具有很高的稳态精度及快速的响应速度 ,且能实现有功、无功功率的独立调节和对外部干扰的抑制。

参考文献

- [1] 陈谦 唐国庆 胡铭.采用 dq 坐标的 VSC HVDC 稳态 模型与控制器设计 [J].电力系统自动化 ,2004 ,28 (16):61 – 66.
- [2] 陈海荣 徐政.基于同步旋转坐标变换的 VSC HVDC 暂态模型及其控制器 [J].电工技术学报,2007,22
 (2):121-126.
- [3] 陈海荣 徐政. 向无源网络供电的 VSC HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报 2006 26(23):42 –48.
- [4] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC HVDC 系统的系统仿真研究[J].电网技术 2005 29 (8):45 50.
- [5] Liu Zhongqi Shao Weijun Song Qiang. A Novel Nonlinear Decoupled Controller for VSC – HVDC System [C]. Power and Energy Engineering Conference 2009, Asia – Pacific.
- [6] 李国栋,毛承雄,陆继明,等.基于逆系统理论的 VSC HVDC 新型控制[J].高电压技术 2005 8(31):45 – 50.
- [7] Jovcic D ,Lamont L ,Abbott K. Control System Design for

(上接第9页)

参考文献

- [1] 黄宗君 李兴源 晁剑 等.贵阳南部电网 "7.7"事故的 仿真反演和分析 [J].电力系统自动化 2007 31(9): 95-100.
- [2] P. Kundur,周孝信,李兴源,译.电力系统稳定和控制[M].北京:中国电力出版社 2002.
- [3] Horne J Flynn D ,Littler T. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition 2004.
- [4] 耿天翔.负荷特性对电压稳定性影响分析[J].科技创新导报 2012(10):83.
- [5] 熊小伏,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减 载方案研究[J].中国电机工程学报 2005(19):48-51.
- [6] 段俊东 黃家兴. 负荷动态特性变化对电力系统静态电压 稳定性的影响研究[J]. 工矿自动化 2012(2):44 – 48.
- [7] 翟庆志 李艳军 刘明丹. 电机学 [M]. 北京: 中国电力 出版社 2002.

VSC Transmission [J]. Electric Power Systems Research. 2007 77(7):721-729.

- [8] Lee Tzann Shin. Lagrangian Modeling and Passivity Based Control of Three – phase AC/DC Voltage – source Converter [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004 51(4):892-902.
- [9] 孙元章 刘前进 杨新林. 非线性控制中的 L₂ 增益和无 源化方法 [M]. 北京:清华大学出版社 2002.
- [10] 杨贵杰 孙力 凗乃政 ,等. 空间矢量脉宽调制方法的 研究[J]. 中国电机工程学报 2001 21(5):79-83.
- [11] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制 [M]. 北京: 机械工业出版社 2008.
- [12] 孙元章,焦晓红,申铁龙.电力系统非线性鲁棒控制[M].北京:清华大学出版社 2007.

作者简介:

付永良(1987),硕士研究生,从事新型高压直流输电方 面的研究;

王 奔(1960),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制;

陈新华(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为牵引变压器保护双重化;

邓大磊(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量 控制;

王吉庆(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量 控制。 (收稿日期:2013-03-06)

- [8] 刘健,毕鹏翔,董海鹏.复杂配电网简化分析与优化[M].北京:中国电力出版社 2002.
- [9] 汤涌 侯俊贤 刘文焯 电力系统数字仿真负荷模型中 配电网络及无功补偿与感应电动机的模拟 [J]. 中国 电机工程学报 2005 25(3):8-12.
- [10] 赵强,王丽敏,刘肇旭.全国电网互联系统频率特性及 低频减载方案[J].电网技术 2009 33(8):35-40.
- [11] New W C ,Brown B J ,Goff P G ,et al. Load Shedding , Load Restoration and Generator Protection Using Solid – State Andelectromechanical Under Frequencyrelay [EB/ OL]. Generalelectric Company . http://pm. geindustrial. com/FAQ/Documents/489/GET - 6449. pdf ,1974.

作者简介:

周 专(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,硕士生导师,高级工程师,研究方向 为电力系统稳定与控制、调度自动化;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统 分析与控制。 (收稿日期:2013-04-24)

• 54 •

基于 NSGA – II 算法的 PSS 多目标优化设计

张 利¹, 康积涛¹, 刘 芽², 刘伟波¹

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031;2. 鄂尔多斯市东胜区大规模 储能技术研究所暨中国科学院工程热物理研究所东胜分所,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要: 电力系统稳定器(PSS)能够很好地抑制电力系统低频振荡,其参数的整定尤为重要。一般处理方法是将系统 状态矩阵特征值实部和阻尼比分别加权转换成单目标问题,进而用优化算法对 PSS 控制器参数进行优化,而权重的 选取对参数影响极大。以特征值实部和阻尼比作为两个目标,用 NSGA - Ⅱ多目标进化算法优化处理,最后与传统的 遗传算法相比较。仿真结果表明,采用 NSGA - Ⅱ算法设计的 PSS 控制器,可以有效地阻尼电力系统低频振荡。

关键词:低频振动; PSS; 特征值; 阻尼比; NSGA - II 算法

Abstract: Power system stabilizer (PSS) can inhibit the low – frequency oscillation well and the selection of its parameters is particularly important. Generally, both the real part and damping ratio of the eigenvalue of the system state matrix are weighted and then it is transformed into a single objective problem to design the controller parameters of PSS using optimization algorithm, but the parameters are influenced greatly by the selection of the weight. The real part and damping ratio of the eigenvalue are considered as two objectives to optimize the parameters using NSGA – II multi – objective evolutionary algorithm. Comparing with the traditional methods, the simulation results show that the PSS controller designed by NSGA – II algorithm can damp the low – frequency oscillation of power system effectively.

Key words: low - frequency oscillation; power system stabilizer (PSS); eigenvalue; damping ratio; NSGA - II algorithm 中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954 (2013) 04 - 0055 - 04

0 引 言

工程经验表明,大型电力系统区域互联在带来 优越性的同时,随之也会产生很多问题。低频振荡 便是其中颇为常见而危害也较大的一种^[1]。适当 地调整电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)一直是一个研究热点。经过多年的发展,神经 网络、模糊控制等现代控制技术已被采用来设计 PSS 控制器。目前 PSS 控制器优化设计方法中大多 是每次设计仅考虑一个指标,然而考察控制系统的 性能指标有很多种,控制器设计的目标是使这多项 目标达到一个最佳的折衷^[2]。传统优化算法大多 是将多目标问题加权转化为单目标问题进行优化, 但是各个目标函数往往没有共同的度量标准,加权 求解带有很大的主观性;因此,有必要引入高效实用 的多目标优化算法。

多目标进化算法能很好地找到 Pareto 前沿,通过选择合适的设计目标,利用多目标进化算法就可

以得到一组控制器设计方案,设计者根据自己的设 计偏好,选择合适的参数即可。这里所用的 NSGA - II (non - dominated sorting in genetic algorithms) 算法就是多目标进化算法中效果非常好的一种。求 取了带 PSS 控制器的单机无穷大系统状态矩阵,基 于状态矩阵的特征值的实部和阻尼比提出了设计目 标 ,然后用 NSGA - II 算法对其进行优化,并将所得 结果与传统遗传算法的结果进行了比较。

1 NSGA - Ⅱ算法概述

NSGA 算法是一种基于 Pareto 最优解的遗传算法 是一种非常有效的多目标进化算法; NAGA 算法的选择、交叉和变异算子和基本遗传算法类似 ,主要区别在于: NSGA 算法在选择算子执行之前根据个体的支配关系对其进行了分层^[3]。

NSGA 算法利用适应度共享函数保持了种群的 多样性^[3],但实际应用发现还是存在不足,主要体 现在:①计算复杂度较高,为0(*mN*³),*m*为目标函 ・55・ 数个数 N 为种群大小 ,②没有精英策略; ③需要人 为指定共享半径 σ_{share} 。

NSGA – II 算法对上述不足进行了改进: ①提出 了快速非支配排序算法; ②提出了拥挤度和拥挤度 算子; ③引入精英策略。

NSGA - Ⅱ算法具体过程如图1所示。



图 1 NSGA - Ⅱ 算法具体过程图

2 问题陈述

2.1 单机无穷大系统数学模型

单机无穷大系统示意图如图 2 所示,其中,发电 机采用三阶模型,励磁系统采用一阶模型,忽略发电 机励磁电流和空载电势之间因为铁心饱和而出现的 非线性关系,忽略线路损耗及分布电容,则单机无穷 大系统的数学模型^[4]如式(1)。



图 2 单机无穷大模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1) \omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \\ T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - (x_d - x'_d) i_d - E'_q \\ T_A \frac{dE_{fd}}{dt} = K_A (V_{pss} - V_t + V_{ref}) - E_{fd} \end{cases}$$
(1)

式中 $P_e = v_d i_d + v_q i_q$; $V_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$; $v_d = x_q i_q$; v_q = $E_{q} - x_d i_d$; T_J 为机组惯性时间常数; D 为阻尼系 数; T_A 为快速励磁系统时间常数; K_A 为励磁放大倍 数; V_t 为发电机端电压; V_{pss} 为 PSS 输出电压; E_{fd} 为 ・56・ 励磁系统输出电压。

将非线性方程式(1)在运行点线性化后,可以 得到系统的线性微分方程组如式(2)。

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - K_1 \Delta\delta - D\Delta\omega - K_2 \Delta E'_q \\ T'_{do} \frac{d\Delta E'_q}{dt} = \Delta E_{fd} - k_4 \Delta\delta - k_3 \Delta E'_q \\ T_A \frac{dE_{fd}}{dt} = K_A (\Delta V_{pss} - K_5 \Delta\delta - K_6 \Delta E'_q) - \Delta E_{fd} \end{cases}$$
(2)

2.2 PSS 结构 这里所采用 PSS 传递函数加图 3 |

这里所采用 PSS 传递函数如图 3 所示。



图 3 PSS 传递函数

其微分方程为

 $X = [\Delta \delta \ \Delta \omega \ \Delta E_{q}^{\prime} \ \Delta E_{fd} \ \Delta V_1 \ \Delta V_2 \ \Delta V_{pss}]^{T}$,矩阵 A 为状态矩阵。

2.3 目标函数

为了确保系统的稳定性,需要将状态矩阵特征 根实部限制在负半轴的某一区域,实现这一目标的 数学体现为

$$J_1 = (\sigma_i - \sigma_0) \quad i = 1 \ 2 \cdots n \tag{4}$$

 σ_i 是第 i 个运行方式下特征根实部的最大值 n是运行方式的数目。 σ_0 为门槛值 取经验值 $-2^{[5]}$ 。

同时还需要提高阻尼比来限制最高超调量,实 现这一目标的数学体现为

$$J_2 = (\xi_0 - \xi_i) \qquad i = 1 \ 2 \cdots n \tag{5}$$

ξ_i 是第 *i* 个运行方式下阻尼比的最大值 ,这里 *ξ*₀ 取 0. 37^[5].

所提出的多目标优化数学模型为

 $\min\{ J_1, J_2 \}$

这里约束为 PSS 的参数边界。

 $\begin{cases} 1 \le K_p \le 50 \\ 1 \le T_w \le 20 \\ 0 \le T_i \le 5 \quad i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \end{cases}$ (6)

分别采用传统遗传算法和 NSGA – II 算法来解 决这个优化问题,来寻找最优或接近最优解集{ K_p , T_w , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 }。

3 算例分析

为了保证系统的鲁棒性,考虑3种不同的运行 方式,如表1所示。

表1 3 种不同的运行方式

负荷	<i>P</i> /p. u.	Q /p. u.	V /p.u.
正常	1.00	0.015	1.04
过载	1.10	0.400	1.04
容性负荷	0.70	0.300	1.04

取种群规模为 200,进化代数为 1 000,交叉概 率 0.9,变异概率为 0.1。两种方法的优化结果如表 2 所示。

表 2 两种算法得到的控制器优化结果

	K_p	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4		
GA	26.32	15.3	0.055	0.018	2.11	3.87		
NSGA2	31.08	10.5	0.052	0.024	1.76	4.53		
表 3 正常负荷下的特征值和阻尼比								
不加 PSS	0.2	$0.240\ 1 \pm 3.960\ 5i$ -0						
GA	$-2.1017 \pm 4.9801i$				0.38	88		
NSGA2	-3.302 5 ±5.933 6 <i>i</i>				0.48	63		

表 3 是系统在正常负荷下得到的振荡模式的特征值和阻尼比,可见,不加 PSS 时系统阻尼较弱,甚至为负;加 PSS 后,特征值实部均小于 -2 阻尼比均大于 0.37 №SGA - II 算法得到的阻尼比更大。

为了体现 NSGA – II 算法的优越性,设计了4 种系统稳定性实验,取发电机的转速和有功功率为 观测信号。

①励磁系统扰动; 当 t = 1 s 时,在励磁系统 V_{ref} 加入阶跃信号。





图 4 励磁扰动下发电机转速和有功功率响应曲线 ②机械输入功率扰动; 当 *t* = 1 s 时 在发电机的

P_m加入阶跃信号。



图 5 机械输入抗动下发电机转速和有切切率响应曲线
③三相短路;当 t = 1 s 时 输电线路发生三相接
地短路 持续时间为 0.2 s。









图 7 A 相接地短路下发电机转速和有功功率响应曲线 当系统受到扰动后 系统会产生 0.5~1 Hz 的低 频振荡 ①和②情况下 不加 PSS 时系统振幅随时间 衰减 因为缺乏足够的阻尼 衰减相对缓慢 加 PSS 后 衰减明显加快 振幅也大幅减小: 而 NSGA – Ⅱ算法

设计的 PSS 相对传统遗传算法 效果更优。③和④ 情况下 不加 PSS 时,系统趋于崩溃,可见无论三相 接地短路还是单相接地短路,危害都非常大;当加 PSS 后振荡衰减最后趋干稳定 NSGA - Ⅱ算法设计 的 PSS 效果同样更优。

4 结 论

设计了 NSGA - Ⅱ多目标进化算法优化 PSS 参 数来抑制低频振荡,为了验证有效性,设计了4种系 统稳定性实验。仿真结果表明,所设计的 PSS 极大 缩短系统恢复稳态时间,提高了系统稳定性。同时 与传统遗传算法设计的 PSS 相比较,仿真结果也说 明用 NSGA – Ⅱ算法设计的 PSS 性能远优于传统遗 传算法设计的 PSS。

参考文献

- [1] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. NewYork: McGraw - Hill ,1994.
- [2] 张鹏翔.多目标进化算法及其在电力系统中的应用研 究[D]. 华中科技大学 2004.
- [3] 关志华. 非支配排序遗传算法(NSGA) 算子分析 [J]. 管理工程学报,2004,18(2):56-60
- [4] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] Milad Khaleghi ,Mohsen Mohammadian. Design of Two Power System Stabilizers Coordinately Based on Strength Pareto Evolutionary Algorithm [C]. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications , 2009: 1527 -1532.
- [6] Y. L. Abdel Magid. Optimal Multi objective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Power Systems ,2003 , 18(3): 1125 -1132.

作者简介:

张 利 (1985), 男, 硕士研究生, 从事智能算法在电力 系统的应用研究。

(收稿日期:2013-03-31)

欢迎订阅 欢迎投稿

220 kV 母线保护系统中母联、分段开关典型 死区保护分析

邹 瑜 陈宏元 李凡红 陈 勇(四川省电力公司检修公司 四川 成都 610041)

摘 要:就目前220 kV 母线保护系统中母联、分段开关典型死区故障时的保护动作行为进行了描述,分析了典型死区 保护逻辑存在的问题;就此问题提出了母联、分段开关两侧 TA 电流判据策略,从而有效避免了合位死区故障时装置 误跳正常母线区段的情况,可有效降低事故影响范围。与此同时,在各类母线故障情况下,也将改进后逻辑的选择准 确性和出口动作时间上与目前的保护装置逻辑进行了对比,并对改进措施的优劣势进行了探讨,为此类保护设计及 调试提供实用的参考。

关键词: 母线差动; 死区保护; 母联(分段) 开关; 两侧 CT 电流判据

Abstract: The protection action during typical dead zone fault of bus coupler and section switch in 220 kV bus protection system at present is described , and the logic problems of typical dead zone protection are analyzed. The CT differential current criterion of both sides are put forward to judge dead zone fault ahead of time , thus the protection can effectively avoid tripping normal bus segment when the dead zone failure happens in closed position , so it can effectively reduce the influence scope of the accident. At the same time , in all kinds of bus faults , the improved logic selection accuracy and export action time are compared with the current protection logic , and the advantages and disadvantages of the improvement measures are also discussed , which can provide a useful reference for the future protection designing and commissioning.

Key words: bus differential protection; dead zone protection, bus coupler (section switch); CT current criterion of both sides 中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0059 - 03

母线是变电站连接变压器等电气设备和相应配 电设备的重要电气元件,它承担着汇集、分配和传送 电能的重要责任。因此 母线保护也尤其重要 它必 须在短时间内快速判断故障区域 选择性地跳开部 分断路器 尽快地使系统与故障点隔离 且尽可能减 小事故影响范围。目前国内 220 kV 母线差动保护 已基本微机化 电流是判断母线是否故障的最重要 判据 保护装置通过各间隔电流互感器获取电流量 按区域进行矢量合计算,再加之其他的辅助判据进 行综合判断来确定母线故障区间,在故障时通过作 用于断路器跳闸的方式来隔离故障。由于电流互感 器与断路器是两个设备,在它们之间发生故障时会 使母差保护装置产生误判,虽然装置中的死区保护 逻辑最终可以切除故障点且死区故障的概率极低, 但随着电网的日趋复杂 ,电力系统的稳定可靠运行 变得愈加重要 在死区故障发生时继电保护的选择 性和速动性将会大打折扣。这里就 220 kV 母线保 护系统中母联、分段开关典型死区故障存在的问题

进行探讨 提出针对性的建议 在一定程度上能够大 大降低此类故障的事故影响范围。

 母联、分段死区保护逻辑分析(以 双母线接线方式为例)

下面以双母线接线方式的南瑞继保 RCS915 系 列保护装置(其母联 TA 极性指向 I 母)为例,对目 前母差保护装置死区故障的动作行为进行分析。其 母联开关和母联 TA 之间发生故障时的示意图如图 1 所示。



• 59 •

为了便于分析,图1仅表示出母联、I母及II母分 支,母线各线路分支的TA极性指向线路,而母联的 TA极性指向母线,各母小差计算公式如式(1)所示。

$$\dot{I}_{I \oplus \sqrt{\pm}} = \sum \dot{I}_{I \oplus M \hat{\eta} \neq 2B} + \dot{I}_{\oplus \mathbb{R}}$$

$$\dot{I}_{I \oplus \sqrt{\pm}} = \sum \dot{I}_{I \oplus M \hat{\eta} \neq 2B} - \dot{I}_{\oplus \mathbb{R}}$$

$$(1)$$

当出现上述故障时 根据母差保护动作逻辑:大 差元件启动,同时由于 II 母小差也将满足动作条件, 在复压条件开放的条件下,母差将动作跳开母联及 II 母上所有支路,其动作逻辑如图2所示。当其跳 开后故障点依然存在,保护必须通过启动死区逻辑 才能隔离故障点,其动作逻辑如图3所示。



图 2 RCS915 系列母差主保护逻辑框图(以 I 母为例)

由于 I 母小差和 II 母小差在母联间隔采集的电 流量均来自同一 TA,此 TA 靠近 I 母侧,在母联断 路器处于合闸状态下,母联开关与 TA 之间发生故 障时,由于 II 母小差比差元件动作且其余条件均满 足,所以保护装置将无时限跳开 II 母上所有断路器 (包括母联断路器),跳开后故障依然存在,此时大 差比差元件与 II 母小差比差元件仍然动作,母联开 关 TWJ 置 1,通过死区保护逻辑判据跳开 I 母上所 有断路器,故障点被隔离。在母联断路器处于分闸 状态时,母联 TA 电流不计入小差计算,发生死区故 障时母差保护会正确选择故障母线。

由此看出:在母联合位死区发生时,理想情况是 切除母联和 I 母上所有间隔的断路器即可,而不用 切除 II 母,但是现在的母差保护逻辑却先切除 II 母, •60•

后切除了 I 母上所有间隔的断路器 ,使母联两侧的 两段母线全部失压。



故障点的切除时间是在Ⅱ母差动跳闸后经死区 保护判据并延时出口跳闸的。也就是说从故障发生 到故障隔离的时间为:Ⅲ母差动出口时间+母联开 关位置辅助接点闭合时间+死区动作延时+开关动 作灭弧时间。其中母联死区动作延时定值,应大于 母联开关TWJ动作与主触头灭弧之间的时间差,以 防止母联TWJ开入先于开关灭弧动作而导致母联 死区保护误动作,即母联开关位置辅助接点闭合时 间+死区动作延时时间>开关动作灭弧时间。

2 改进的措施建议

近两年新建的变电站一次设备大多采用室外 GIS 布置,GIS 设备一般在断路器两侧均装有电流互 感器,即将母联开关两侧电流互感器均接入母差保 护装置,其故障示意图如图 4 所示,其中 TA I 接入 I 母小差进行计算,而 TA II 接入 II 母小差进行计 算,并且两小差同样都加入复合电压闭锁功能(电 压取自 220 kV 母线 TV),各母线小差计算公式如 式(2)所示。合位死区故障时,应先使母联断路器 跳开并封锁两组母联 TA(不计入小差计算),再次 进行差流计算来选择故障母线(仍然加入复合电压 闭锁逻辑)。即当 A 点故障时,先跳开母联断路器 后,两组母联 TA 不再计入各自小差进行计算,II 母 上电压恢复正常且无小差电流;I 母复合电压开放 且小差比差动作,跳开 I 母上所有间隔的断路器 将 系统与故障点隔离。



图 4 双 TA 时的母联死区故障示意图

为了区分死区和其他区间故障,必须让装置在 故障发生时就锁定故障区间,可以加入图4中TAI 与TAII之间是否有差流的一些判据来区分故障区间,主要判据如下。

(大差启动) AND(母联开关合位且 TA I 与 TA I 之间有差流) AND(I、Ⅱ 母小差均有差流) AND (丙段母线复压条件均开放) = 母联 TA I 与 TA Ⅱ 之 间死区发生故障

(大差启动) AND(母联开关合位且 TA Ⅰ 与 TA Ⅱ 之间无差流) AND(Ⅰ 母小差有差流) AND(Ⅰ 母 夏压条件开放) = Ⅰ 母发生故障



图 5 双 TA 时的母联死区逻辑示意图(1 母为例) 若判断为死区故障,则先跳开母联开关后再判 断故障区间来选择母线,母联开关跳开后,两段小差 均封锁母联 TA 电流分别进行差流计算,选择死区 故障点(此时选择母线是需要一个延时,与目前的 母差死区保护时间要求一致,防止母联 TWJ 开入先 于开关灭弧动作而导致另一段正常母线误动作,延 时整定值应大于开关灭弧时间与辅助接点动作之间 的差值);若判断为非死区的其余区间故障(如 B 点 故障),则不提前跳开母联开关,按照原有的母差逻 辑模式执行但小差计算较之于传统小差计算略微差 异,如式(2)所示。其逻辑流程如图 5 所示。

与目前的母差保护装置相比较,在非死区故障 区间短路时,多加入了一个判母联两个 TA 之间差 流的逻辑判据,在时间上与大差、小差同时进行逻辑 判断,保护出口时间与目前的母差保护出口时间没 有大的差别;在死区故障时,故障切除时间为:判死 区故障母联开关出口时间+母联开关位置辅助接点 闭合时间+选择死区故障点延时+开关动作灭弧时 间,死区故障切除时间与目前的母差死区故障动作 时间没有大的差别。

3 改进措施的优劣势

改进措施的优势: 在母联、分段分位与合位死区 发生故障时能够正确地判断故障区间 杜绝了保护装 置在合位死区故障时误跳一段非故障母线的情况 ,且 在各区间故障的动作时间与目前保护装置相当。

改进措施的劣势: 增大了死区区间范围; 增大了 保护装置的运算量和复杂程度; 在母联开关只有一 组 TA 的情况下需增加一组互感器设备成本。

4 结 论

通过以上分析研究,对母联、分段死区故障提出 了有针对性的解决方法,即在母联、分段开关两侧各 安装一组 TA 并引入母差保护装置,通过两组 TA 之 间差流计算来区分死区故障和一般区间故障。在死 区故障的时候不会错误地动作非故障母线段,有效 降低了事故影响范围。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中 国电力出版社 ,1995.
- [2] 南瑞继保股份有限公司. RCS 915 系列母线差动保 护装置说明[M].

作者简介:

邹 瑜(1984),男,助理工程师,电力系统智能控制及 继电保护,长期从事继电保护管控工作;

陈宏元(1975),男,工程师,长期从事电力系统变电运 行管控工作;

李凡红(1984),男,工程师,从事继电保护调试方面工作。 (收稿日期:2013-03-05)

继电保护状态检修的研究

宋 柯¹ 何 滔¹ 郑焯 χ^2 童 χ^1 张海翔² 吕飞鹏² (1. 国电大渡河瀑布沟水力发电总厂 四川 雅安 625304; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要:状态检修作为一种新兴的检修技术正在电力系统的二次设备中逐步开展。在对继电保护状态检修的现状和 技术难点研究的基础上,提出了实现继电保护状态检修的关键技术,有效解决了二次回路状态监测的难题;分析了继 电保护状态检修系统的基本结构和功能组成,为实施继电保护状态检修提供了参考和借鉴。

关键词:继电保护;状态检修;操作回路;电力系统

Abstract: As a new maintenance technology, the condition - based maintenance is developing gradually in secondary equipment of power system. On the basis of the researches about the present situation and the technical difficulties , the key technologies to achieve the condition - based maintenance of relay protection are proposed , which solves the problems of condition monitoring for secondary circuit. The basic structure and functions of the condition - based maintenance system of relay protection are analyzed , which provides a reference for the implementation of condition - based maintenance of relay protection.

Key words: relay protection; condition - based maintenance; control circuit; power system

中图分类号: TM77 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013) 04-0062-04

引 言 0

20世纪90年代以来,随着计算机技术、通信技 术、信息技术在电力系统领域的拓展应用 使电气设 备的状态检修技术有了实施的基础。状态检修 ,即 在设备状态监测的基础上,根据监测和分析诊断的 结果科学安排检修时间和项目的检修方式 通常 泡 含状态监测、状态诊断、检修决策3个环节[1]。目 前 架空线路、油浸式变压器、SF。断路器等一次设 备已经开始按照状态检修的导则要求有序地开展状 态检修的工作。而继电保护装置作为电力系统最重 要的二次设备之一,对其开展状态检修工作可以有 效地提高设备的可用率 降低继电保护检修工作量, 提高设备的管理水平 是电网经济发展的必然要求。

近年来,开展继电保护装置状态检修研究的呼 声很高 众多学者在理论和实践上展开了深入的探 索和研究。文献[1]提出了电气二次设备状态检修 的研究思路。文献 [2]利用 SEL 保护的可编程逻辑 功能实现操作回路监视及探讨了继电保护状态检修 的实现方案。文献[3]提出了一种继电保护状态检 修的技术体系结构。文献[4-6]研究了继电保护 • 62 •

装置的最佳检修周期。

在上述学者研究成果的基础上 ,分析了继电保 护检修技术的现状及技术应用的难点 提出了实现 继电保护状态检修的关键技术,分析了继电保护状 态检修体系结构 ,为继电保护状态检修的实用化作 出了一些尝试。

继电保护状态检修现状及难点 1

目前 继电保护检修仍以定期检修为主。而这 种单纯按固定时间间隔对设备进行检修,不考虑设 备实际情况的检修方式存在很大的强制性和盲目 性 造成电气设备的可用度下降 以及人力、物力、财 力的浪费 同时定期检修也会在一定程度上影响继 电保护装置的使用寿命 过度检修和检修不足并存, 并且两次检修之间出现的保护故障往往不能及时发 现,为电力系统的安全稳定运行埋下了隐患。

随着微机保护应用技术的迅速发展,保护装置 本身具备了很强的自检功能,理论上可以实现对于 逆变电源,电流、电压输出回路,保护定值的完整性, 保护的输出/输入接点,保护的数据通信环节的监 视 以及保护装置重要信息的数据远传 这为继电保
护装置实现状态检修奠定了坚实的基础。

虽然微机保护本身具备了状态检修的实施基础,但是除了继电保护装置本身外,还包括交流输入、直流回路、操作控制回路等。因而对于继电保护的状态检修必须作为一个系统性的问题来考虑,才能使保护状态检修技术在实际应用中得到推广,而这些二次回路是由若干继电器和电缆组成,点多、分散,对其实现"无盲点"监测具有相当的难度,导致继电保护的状态检修工作难以推进。

目前,对这些二次回路的监测手段还不多,而近 年来由于二次回路的故障造成继电保护装置不正确 动作的比例相当高。据历史统计资料显示^[7],2008 年国家电网公司220 kV及以上交流系统的继电保 护装置不正确动作18次,其中TA回路绝缘破损1 次、电压测量回路异常1次、保护装置内部参数设置 错误1次、电源插件异常1次。这些缺陷发生在两 次定期检修之间,若能通过状态监测及早发现,对有 效提高继电保护正确动作次数具有极大的帮助。

因此,实施继电保护装置状态检修应完整监测: 直流系统,包含直流动力、操作及信号回路绝缘良 好、回路完整;交流测量系统,包含 TV、TA 二次回路 绝缘良好、回路完整,测量元件的完好;逻辑判断系统,包含硬件逻辑判断回路和软件功能。

2 实现技术

2.1 保护二次回路

随着微电子技术、计算机技术的快速发展,可编 程逻辑 PLC 技术已经广泛应用于各行各业中。对 继电保护状态的监测,这种技术使过去采取硬件式 结构的操作箱回路可通过软件编程来实现,有效地 通过操作箱的智能化延伸到保护装置的自检范畴 内。例如美国 SEL 提供的数字仿真式继电保护平 台基于平台化技术,利用可逻辑编程的 PLC 功能根 据不同的需要灵活、有效地设计微机操作箱,解决了 二次回路状态检修的问题,可为实现保护系统完整 的状态监测创造了必要的条件。

但上述技术适合于在新兴的智能变电站中应 用 若在常规变电站采用智能化的操作箱 不仅增加 了系统的复杂性 从而降低系统的可靠性 而且应用 在大量低压保护上也不经济。因此 ,针对常规的变 电站 ,提出了远程传动对二次回路进行试验的方法 来检测回路的可靠性。

首先.在用电低谷时,提前向用户发出停电通 知.然后进行远程传动实验。在监测中心对保护装 置发送一次远程传动命令后,执行一次跳闸 - 重合 闸的操作。整个过程只需要1~2 s,对用户和电网 的影响不大,可检验保护出口到断路器执行机构之 间的回路接线是否正确,还顺带检测了断路器动作 的正确性。

该方法很适合低压馈电线路,对于不是很重要 的负荷,理论上可以通过使保护装置有计划性的动 作,实现跳闸 – 重合闸回路的检测,从而替代定期检 验,大大降低了检验的工作量。对于变压器保护,如 果能够由站内其他变压器转带负荷,也是可以进行 远程传动试验的。

2.2 断路器状态的监测

从实现保护的意义来讲,作为电力系统重要一次设备的断路器是继电保护装置在一次设备的延伸。因此,对断路器跳闸接点的有效监视是继电保护状态监测的重要环节之一。

常用的方法是检验常开、常闭辅助接点(52A、 52B),正常情况下 52A 和 52B 的状态是相反的,如 果状态相同,就表明断路器很有可能处于异常状态, 应在一定延时后予以报警。具体情况如下:若 52A 和 52B 同时闭合,则表明:①二次回路或辅助接点 有缺陷;②断路器有缺陷。若 52A 和 52B 同时断 开,则表明①二次回路或辅助接点有缺陷;②断路器 处于隔离状态;③断路器有缺陷。

一般断路器检修需要确保操作动作机构正常, 跳合闸回路正确,断路器的遮断容量满足系统要求, 这种定期检修方式只能给予断路器大致的维修指 导,而保护记录了断路器每次动作的情况,可为更精 确地评估断路器的状态提供参考信息。

2.3 TV、TA 的监测

电压回路的监视一般由 3 个环节组成,如图 1 所示。

1) 单相或两相电压失却:若在检测零序电压
 时 零序和负序电流为0 则表明电压回路有故障。

2)带负荷时三相电压失却:在此情况下无法检测到零序电压,因而不能启动电压回路监测功能,一般根据电流的变化量来启动电压回路监测功能。

3) 线路充电时三相电压失却: 此情况的发生一 般由两个原因引起,一是近区故障,二是 TV 回路有

• 63 •

故障 前者需要加速跳闸 后者需要闭锁保护。



图1 电压回路监视示意图 电流回路的监视示意图如图2所示。



图 2 电流回路监视示意图

一般地,若在无零序电压的情况下监测到零序 电流,则表明电流回路异常。另外,由于电压互感器 的联接需要反映一次侧的零序电压,所以变压器必 须是一次侧接地或三相5柱式,采用瞬间闭锁、延时 警告的逻辑。

2.4 收集继电保护装置信息

为了科学、全面地对继电保护装置的状态进行 评估,合理地制定检修策略,除了在线监测到的保护 装置状态信息,对于继电保护设备的基础资料信息 收集也是必不可少。

继电保护的基础资料主要由原始资料、检修资 料及遗传缺陷资料组成。原始资料包含出厂资料 (如设备参数、技术说明书、出厂试验报告等)、技术 协议、安装记录、相关会议纪要、验收报告等;检修资 料包含巡检记录、例行试验报告、消缺记录、诊断性 试验报告等;遗传缺陷资料包含家族式缺陷(如保 护装置的液晶显示屏、开关电源等在设备运行后同 一时间发生故障)、历年缺陷及异常记录、历次状态 评价报告等。

广泛、完整地收集继电保护的基本资料是对其 开展状态检修工作的重点也是难点之一,只有建立 了健全的基础资料后才能对继电保护装置的状况进 行全面有效的评估。

3 继电保护状态检修系统

继电保护状态检修的关键在于有效地发现保护系统的异常,及时消除保护装置或回路的缺陷,因此,良好的状态监视系统是保护状态检修的首要环节,继电保护状态监视系统的结构示意图如图3所示。



图 3 保护状态监测系统

保护状态监视系统基本由3部分组成:①信息 采集系统;② 信息分析系统;③信息传输系统。信 息采集系统主要实现保护装置、跳闸线圈、相关回路 等关键信息的采集,这些是继电保护状态检修系统 实现的基础;信息分析系统主要进行数据处理和分 析,如保护定值的管理、保护自检报警、保护动作报 警等;信息传输系统一般采用光纤作为媒介,增加其 抗干扰能力。

在获取了继电保护状态信息的基础上,后台分 析系统利用专家库的知识和经验,模拟专家的思维 决策对信息进行推理判断,判断设备是否故障及确 定故障的位置、性质,并得出检修结论。保护状态检 修后台分析系统从功能上一般分为基本应用功能和 高级应用功能,如图4所示。



从图 5 可看出,保护状态检修系统先根据报警

• 64 •

信息类型将实时信息进行分类,再结合历史信息和 设备运行情况,对保护的健康水平进行综合评价,判 断设备是否处于异常状态。而专家分析系统根据继 电保护装置的报警信息,利用推理原则进行推理分 析,同时,结合运行人员的经验判断来诊断保护装置 可能的异常。



图 5 保护状态检修系统工作流程图

4 结 论

继电保护装置状态检修的应用正方兴未艾,在 介绍了继电保护检修技术现状及状态检修技术应用 难点的基础上,提出了实现继电保护状态检修的关 键技术,分析了继电保护状态检修系统的基本结构 和功能组成,为继电保护状态检修的实用化作出了 一些尝试,希望能起到抛砖引玉的作用,促进继电保 护装置状态检修早日实施。

(上接第14页)

- [6] 杨冬 刘玉田 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合 决策方法[J]. 电力系统自动化 2010 34(12): 34 38.
- [7] 竺炜,谭喜意,唐颖杰,等. 汽轮发电机组一次调频性能的分析[J].电力系统自动化,2008,32(24):52-55.
- [8] 金娜,刘文颖,曹银利,等.大容量机组一次调频参数 对电网频率特性的影响[J].电力系统保护与控制, 2012,40(1):91-95.
- [9] 于达仁 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72 - 76.
- [10] 尹峰. CCS 参与的火电机组一次调频能力试验研究 [J]. 中国电力, 2005, 38(3):74-77.
- [11] 张江滨 李华 谢辉平. 水电机组并网运行频率调节 系统的稳定性[J]. 电网技术 2009 33(9): 57-62.
- [12] 刘明松 孙华东,何剑. 考虑暂态频率偏移的一次调 频旋转备用优化方法[J]. 电网技术,2011,35(8): 129-133.
- [13] 张江滨 李华 ,谢辉平. 基于发电机组出力曲线特征

参考文献

- [1] 吴杰余,张哲,尹项根,等. 电气二次设备状态检修研究[J]. 继电器,2002,30(2):22-24.
- [2] 高翔,刘韶俊.继电保护状态检修及实施探讨[J]. 继电器,2005,33(20):23-27.
- [3] 韩平,赵勇,李晓朋,等.继电保护状态检修的实用化尝 试[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):92-95.
- [4] 李永丽,李致中,杨维.继电保护装置可靠性及其最
 佳检修周期的研究[J].中国电机工程学报,2001,21
 (6):63-71.
- [5] 丁茂生,王钢,贺文.基于可靠性经济分析的继电保 护最优检修间隔时间[J].中国电机工程学报,2007, 27(25):44-48.
- [6] 李红宁,张勇军,吴国沛,等.基于可靠性分析的微机继电保护设备最佳检周期研究[J].电力自动化设备,2007,27(9):71-74,87.
- [7] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等. 2008 年国家电网公司继
 电保护装置运行情况[J]. 电网技术,2010,34(3):
 173-177.

作者简介:

宋 柯(1969),男,高级工程师,从事水电站生产管理 工作;

何 滔(1983),男,工程师,从事电力系统继电保护工 作;

郑焯文(1990),男,硕士研究生,主要研究方向为电力 系统继电保护。 (收稿日期:2013-03-31)

的一次调频性能评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(7):99-103.

- [14] 王珍意 谢一工, 尹成全,等. 对 CPS 标准下 AGC 与 一次调频配合问题的研究 [J]. 电力系统保护与控 制 2007, 37(19): 22-25.
- [15] 周德强.基于最小一乘法的 GM(1,1) 模型及在负荷 预测中的应用 [J].电力系统保护与控制,2011,39 (1):100-103.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事电力系统安全控制 分析方面的研究;

杨永全(1973),男,高级工程师,主要从事风力发电机 技术方面的研究;

常喜强(1978),男,高级工程师,主要从事电力系统安 全稳定分析工作;

张新燕(1964),女,博士,教授,博士生导师,研究方向 为风力机控制、电气系统优化设计。

(收稿日期:2012-04-24)

应用于电力系统谐波分析的采样周期自适应方法

周 洲

(成都电业局,四川成都 610021)

摘 要:提出了一种谐波检测时,基于序列相关计算的采样周期自适应方法。该方法首先计算两组相邻采样信号序 列的相关系数,根据相关系数和二次修正方程修正采样周期,不断迭代直至采样序列满足同步化收敛条件;最后对最 新同步序列进行 FFT 计算得到各次谐波参数值。该方法无需知道信号的实际频率,在迭代过程中采样点数保持不 变,克服了基于相关计算的采样窗口同步化方法中由于采样周期固定所引起的长序列 DFT 计算。数字仿真计算表明 在系统信号频偏较大的情况下该方法收敛速度快,计算量小,计算精度高。

关键词: 非同步采样; 快速傅里叶变换(FFT); 相关系数; 谐波分析; 采样周期自适应

Abstract: A method for exact calculation of static harmonic using adaptive sampling period based on correlation calculation is presented. It is an iterative optimization procedure which searches for the most suitable sampling period according to the correlation coefficient of two adjacent sections and the quadric modified equation. The harmonic parameters are finally presented by the FFT calculation of the latest synchronous sequence. The algorithm does not require any knowledge about the system frequency , and the long sequence DFT computation can be avoid because of the constant sampling window. Various case studies using simulation data show that the proposed algorithm has fast convergent speed and high detection precision even if the system frequency deviation is large.

Key words: non - synchronized sampling; fast Fourier transform (FFT); correlation coefficient; harmonic analysis; adaptive sampling period

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013) 04-0066-05

电网中大量非线性负荷的应用导致谐波污染日 益严重 对谐波成分的准确分析有利于对电能质量 进行合理评估。离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT) 和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT) 因适用于计算机计算而被广泛应用, 但是电网频率波动会导致信号采样的不同步,此时 会出现影响测量精度的频谱泄漏问题^[1]。

很多种方法已经可以降低由于非同步采样中频 谱泄漏引起的测量误差。在频域,可以选择适当的 窗函数来降低旁瓣带来的长范围泄漏,并通过对频 率、相位和幅值进行插值的手段减少短范围泄 漏^[2-10]。

在时域,可以在截断数据后补零来降低栅栏效 应^[1],通过波峰检测分析谐波参数,但此方法克服 不了谐波间的频谱干扰且计算量较大;时域同步插 值通过对采样序列进行拉格朗日插值近似实现序列 的同步采样^[11-14],此方法需要知道信号的实际频 率。文献[15]提出了一种基于相关计算的采样窗 •66• 口同步化方法,该方法无需知道信号的实际频率,通 过序列迭代计算使得采样序列长度自动满足同步化 收敛条件。但是在实际应用于稳态谐波计算时,由 于该方法采样周期在迭代过程中保持恒定,且实际 系统中电网频率在一定范围波动,这样会使得算法 迭代时间长,同步化序列长,并且最终的同步化序列 无法采用 FFT 算法。因此,提出了一种新的采样周 期自适应方法用于谐波计算,通过计算固定长度相 邻信号序列的相关系数并结合提出的二次修正方 程,不断迭代调整采样周期,得到满足 FFT 算法要 求的同步化采样序列。最后通过 FFT 计算得到各 次谐波幅值相位。仿真算例证实了该方法的有效 性。

基于序列相关计算的采样窗口同步 化方法^[15]

连续信号等间距离散化后得到有限长的离散时 间序列 表示为信号向量 $S = \{S_0, S_1, \dots S_{N-1}\}$ 。两 个长度相同的信号向量 S_1 和 S_2 的相关计算为这两 个向量的内积。

$$\langle X_{P} | X_{P} \rangle = || X_{P} || \cdot || Y_{P} || \cos\theta \quad (1)$$

其中 $\theta \in [0 \ \pi]$ 表示两向量之间的夹角。

定义两离散信号序列的相关系数如下。

$$K_p = \frac{\langle X_P, Y_P \rangle}{||X_P|| \cdot ||Y_P||}$$
(2)

 K_p 的取值范围为 [-1,1] K_p 值用来指示两个 离散信号之间的相似程度。 $K_p = 1$ 表示两个离散信 号相位一致; $K_p = -1$ 表示两个离散信号相位相反。

基于相关系数的采样窗口同步化计算步骤如下。 考虑一离散信号 S

$$\{S_0 \ S_1 \ S_2 \cdots \ S_{p-1} \ S_{p+1} \ , \cdots S_{2p-1} \ S_{2p} \ S_{2p+1} \ , \cdots \}$$
(3)

1) 选择 p 的初始值 确定信号 X_p 为迭代的初始 序列 ,其中 $X_p = \{ S_0 | S_1 | \dots | S_{p-1} \}$ 。

2) 定义一个与 X_p 长度相同的后继信号 $Y_p = \{S_p, S_{p+1}, \dots, S_{2p-1}\}$ 。

3) 计算 X_p 与 Y_p 的相关系数 K_p 。

4) 视察 K_p 是否满足收敛条件(K_p = 1),若不满
 足,令 p = p + 1,重复步骤 1)、2)和 3) 直到序列满足
 收敛条件。

在此也可以称 K_p 为周期指示器。可以通过考 察 K_p 与 1 的接近程度来估计采样窗口的同步化程 度。当 K_p = 1 时 ,表示序列 X_p 和 Y_p 完全相同 ,采样 已经实现了同步化; 对序列 X_p 进行 DFT 便可以精 确得到信号各次谐波参数 ,此时频谱泄漏的影响为 零。 $K_p \neq 1$ 时则继续进行迭代计算直到满足收敛条 件为止。在实际应用中 ,若要求对各种信号都满足 收敛条件 K_p = 1 ,则会使得采样序列非常长。一般 情况下根据精度要求以 $\varepsilon = | K_p - 1 | \leq \varepsilon_{set}$ 作为收 敛条件。

该方法的优点在于,不需要预先知道信号各成 分的频率,采样窗口可以通过基于相关计算的迭代 方法自适应求得,从而实现信号的整周期截断与同 步采样。很显然,此方法在信号非平稳的情况下是 不适用的。往往满足收敛条件的同步化序列非常 长,在固定采样周期的非同步采样下尤为明显。

2 基于相关系数的采样周期自适应

上节所述的信号周期自适应方法可以在不知道

信号频率的情况下对其实现同步采样,但是其存在下面两个问题:①要满足收敛条件 $\varepsilon = | K_p - 1 |$ $<math>\leq \varepsilon_{set}$ 的采样序列较长,迭代运算次数较多且DFT的运算量较大;②通过迭代计算得到采样序列的点数 p_{max} 无法保证满足 $p_{max} = 2^{M}(M$ 为正整数),以至在一般情况下对采样序列不能使用FFT算法。

现考虑固定每周期采样点数 $N = 2^{M}$ 。初始采样 周期为 $T_{s0} = Nf_{0}(f_{0}$ 表示信号没有频偏时的频率,对 于 50 Hz 系统 $f_{0} = 50$ Hz)。

通过计算 X_N 与 Y_N(Y_N 为 X_N 的后继 N 点序列) 的相关系数 根据修正方程 不断地修正信号的采样 周期 使得信号满足收敛条件实现同步采样。

计算中相关系数越是接近 1,表示此时的 X_N 与 Y_N 越接近,采样周期的修正量就应该越小; 反之,相 关系数越是远离 1 表示 X_N 与 Y_N 相似程度越差,采 样周期的修正量就应该越大。这样可以加快信号的 收敛速度。

设第 i+1 次采样周期修正为

$$T_{s(i+1)} = \frac{1}{f_0(N \pm \Delta N_i)}$$
(4)

 ΔN_i 称为采样周期修正因子 i = 0 , $2 \cdots$ 。

根据上述要求 采用二次抛物线的修正方程为

$$\Delta N_i = AN \sqrt{1 - K_{Ni}} \tag{5}$$

其中 AN 为迭代加速因子; N 为采样点数; K_{Ni} 表示 第 i - 1 次序列 X_{Ni} 与 Y_{Ni} 的相关系数。

当 N = 64 时修正方程的函数图形如图 1 所示。



图 1 采样周期修正因子 ΔN_i 的修正方程函数图

从图1可以看出 相关系数越是接近1,修正量 就越小,这样使得收敛更快且保证信号序列由快到 慢接近收敛点。在某种程度上来讲,加速因子 AN 的取值越大,收敛速度越快。

基于相关系数的采样周期自适应具体步骤 •67• 如下。

 1) 根据 T_{s0}采样得到 2N 点的信号序列 ,前 N 个 点序列为 X_{N0} ,后 N 个点序列为 Y_{N0} ,根据式(2) 计算 得到相关系数 K_{N0}。

2) 根据修正方程 $\Delta N_0 = AN \sqrt{1 - K_{N0}}$ 和式(3) 分别计算 $T_{s1} = \frac{1}{f_0(N + \Delta N_0)}$ 和 $T_{s2} = \frac{1}{f_0(N - \Delta N_0)}$ 。

3) 根据步骤 2) 分别得到两个采样周期值,采
 样并计算 K_{N1}和 K_{N2}。若 K_{N1} > K_{N2},说明信号频率偏
 大,式(3) 分母中的符号在迭代过程中定为"+"号;
 若 K_{N1} < K_{N2},说明信号频率偏小,定为"-"号。

4) 根据步骤 2) 得到的采样周期对信号继续采
 样,计算 K_{Ni}。

5) 根据修正方程 $\Delta N_i = AN \sqrt{1 - K_{Ni}}$ 和式(3) 计算得到第 *i* + 1 次的采样周期。

6) 根据新的采样周期继续采样 2N 点的信号序列,计算 K_{Ni},判断是否满足收敛条件。满足则结束 计算 不满足则返回步骤 5) 继续迭代计算,直到满 足为止。

最后,对满足收敛条件的最新采样序列做 FFT 计算得到信号各次谐波的幅值和相对相位(由于采 样周期的不断调整使得各次谐波相位发生变化,相 位计算采用以基波相位作为零度基准值)。

3 数字仿真计算

含有各次谐波的电力系统信号表示为

$$x(t) = \sum_{m=1}^{m_{\text{max}}} A_m \sin(2\pi m f t + \varphi_m)$$
 (6)

其中 m 为正整数; A_m 和 φ_m 分别表示 m 次谐波的 幅值和相角 具体参数如表 1 所示。

表1 谐波参数设置

谐波次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
幅值/V	240	0.1	12	0.1	2.7	0.05	2.1	0	0.3
相位/°	0	10	20	30	40	50	60	0	80
上答 1	. .	ш ш т	<u>+ :+</u>	- 66 J	上谷耳	三 2++-/二	ニレナナ	.	

计算 1: 对两种方法的计算量进行比较。

首先,对信号进行基于采样窗口同步化的迭代 计算^[15],采样频率为固定值 3 200 Hz,初始迭代序 列 X_p 的p = 60,收敛标准 $K_p > 0.999$ 99。在不同频 率偏差的情况下得到收敛所需的迭代次数、加法和 乘法运算次数如表 2 所示。再对信号进行基于采 样周期自适应的迭代计算,此时,初始采样频率 $f_{s0} = 3 200$ Hz,收敛标准 $K_p > 0.999$ 99999。每 周期采样点数恒是N = 64,通过迭代计算不断地修 正采样周期最终使得采样序列达到收敛条件,具体 的运算量亦如表 2 所示。

从表中看出,后者的迭代次数及运算量要明显 小于前者。采用基于采样周期自适应的迭代计算 时,随着加速因子的增加可以有效地提高收敛速度。

计算2:对谐波计算精度进行数字比较。

假设信号实际频率 f = 49.5 Hz ,对式(4) 信号 分别采用以下方法进行谐波计算。方法 1 ,直接采 用 FFT 算法计算; 方法 2 ,采用基于信号周期自适应 的方法计算^[15]; 方法 3 ,采用基于采样周期自适应 的方法计算。方法 1 的采样频率 $f_s = 3 200$ Hz ,窗口 长度为 64 点。方法 2 和方法 3 的采样频率、收敛条 件等与计算 1 时相同。

计算结果如表 3 所示,从各次谐波的分布可以 看出,信号中的偶次谐波含量要远比奇次谐波小。

现令

$$\alpha = \sum_{\substack{m \neq 1 \\ m \neq 8}} \left| \frac{\Delta A_m}{A_m} \right| \cdot \left| \frac{\Delta \varphi_m}{\varphi_m} \right|$$
(7)

作为测量精度指示因子。 ΔA_m 和 $\Delta \varphi_m$ 为 m

	基于采样窗	12同步化的	迭代计算[15]		基于采样周期自适应的迭代计算						
信号频率/	收敛斜	条件 $K_p > 0.9$	999 99	1)	1) 收敛条件 K _p > 0. 999 999 999 9 2) 采样点数 N = 64						
Hz	p	的初始值为	60		修正加速因子	= AN = 2	修正	E加速因子 AI	V = 12		
	迭代次数	乘法次数	加法次数	迭代次数	乘法次数	加法次数	迭代次数	乘法次数	加法次数		
49	790	360 630	358 270	61	11 713	3 843	7	1 345	441		
49.5	1 040	604 760	601 640	58	11 137	3 654	7	1 345	441		
49.8	198	31 778	31 185	52	9 985	3 276	7	1 345	441		
50.2	196	31 261	30 674	52	9 985	3 276	7	1 345	441		
50.5	638	242 760	240 850	58	11 137	3 654	7	1 345	441		

表 2 两种方法运算量的比较

• 68 •

次谐波幅值和相位的绝对误差,由于基波和 8 次谐 波存在零值,在此不参与 α 因子计算。最后单独做 绝对误差比较。

根据表中数据计算,采用方法1时,奇次谐波的 α因子为

$$\alpha_{\hat{\mathfrak{T}}_{n}} = \sum_{\substack{m \neq 1 \\ m > \hat{\mathfrak{T}}_{n}}} \left| \frac{\Delta A_{m}}{A_{m}} \right| \cdot \left| \frac{\Delta \varphi_{m}}{\varphi_{m}} \right| = 1.6074$$

偶次谐波 α 因子为

$$\alpha_{\text{@x}} = \sum_{\substack{m \neq 8 \\ m \neq n \text{(Bx)}}} \left| \frac{\Delta A_m}{A_m} \right| \bullet \left| \frac{\Delta \varphi_m}{\varphi_m} \right| = 48.989$$

由于非同步采样,尤其是对于含有量较小的偶 次谐波而言测量误差较大。

采用方法 2 时, 奇次、偶次谐波精度指示因子分 别为 $\alpha_{\sigma\chi}$ = 0.000 862 221 和 $\alpha_{g\chi}$ = 0.001 4。其精 度和 FFT 相比有着明显地提高。

采用方法 3 时,根据最后一列数据,得到奇次、偶次谐波精度指示因子分别为 $\alpha_{\sigma\chi} = 0$ 和 $\alpha_{g\chi} = 0.000016766。并且从表中可以看出收敛标准的提高导致测量精度的提高,但在相同加速因子的条件下会增加迭代次数。与方法 2 相比,增加后的运算量仍甚小,并且精度要远高于方法 2。$

对于基波,方法3的测量误差为零值。方法1、 2都有一定程度的误差存在。对于8次谐波,方法3 计算得到的幅值误差要远远小于其他方法,但是其 相位误差较大。

在采用方法2时,由于信号的频率未知,导致满 足收敛标准的信号序列很长,且不能保证满足FFT 的采样点数要求(如表中的点数为1099点),这样 通过 DFT 计算谐波参数时计算量就会更加大。

4 应用讨论

4.1 加速因子的取值范围

加速因子 AN 的大小决定了计算迭代的初始步 长。从这里的仿真结果可以看出,加速因子 AN 的 取值越大,迭代计算的初始步长越长,算法收敛速度 也就越快,谐波计算的实时性也就越高。但是,对于 一个工频周波信号,若盲目提高加速因子取值,可能 会引发计算收敛序列变成若干个周期,从而影响计 算实时性和 DFT 计算量。因此,加速因子 AN 应根 据实际信号的频偏特性在一起范围内取值。这个取 值范围取决于信号频率偏差范围。

设信号的频率偏差为 Δf [·] 理想的采样周期应为

$$T_{s} = \frac{1}{f_{0}(N \pm \Delta N')} = \frac{1}{N(f_{0} \pm \Delta f')}$$
(8)

			采样窗口 的迭付 (方注	コ同步化 弋计算 去 2)		基	于采样周	期自适应	ī的迭代计	算(方法	3)	
信号谐	FFT 算法 信号谐 (方法 1)		$K_p > 0.999999$		收敛标准 K _p >0. 999 999 9				收敛标准 K _p > 0.999 999 999 9			
波次数		~ -)	需要 1 099 点的 DFT 计算		AN = 4		<i>AN</i> = 12		AN = 4		<i>AN</i> = 12	
			迭代	135 次	迭代	17次	迭代	5次	迭代	28次	迭代	7次
	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位
1	241.05	-1.745	240.000	0.028	240.000	0.000	240.000	0.000	240.000 0	0.000	240.000 0	0.000
2	2.946	1.369	0.097	10.303	0.112	17.508	0.109	13.143	0.1003	10.211	0.100 2	10.074
3	13.747	13.421	11.998	20.086	12.001	20.043	12.004	20.021	12.000 0	20.001	12.000 0	20.000
4	1.626	9.333	0.099	30.417	0.099	34.805	0.103	32.647	0.1000 0	30.120	0.1001	30.059
5	3.827	25.159	2.699	40.152	2.696	40.090	2.701	40.080	2.6999	40.002	2.700 0	40.002
6	1.042	14.938	0.049	50.814	0.046	53.015	0.050	54.055	0.0499	50.068	0.0500	50.088
7	2.925	39.150	2.099	60.211	2.097	59.977	2.099	60.068	2.099 9	59.999	2.100 0	60.001
8	0.895	25.571	0.001	207.770	0.002	-73.841	0.002	177.170	0.000 1	-72.180	0.000 1	177.350
9	1.019	37.669	0.300	80.356	0.299	79.581	0.299	80.311	0.300 0	79.989	0.300 0	80.007

表3 3 种方法谐波参数计算结果

• 69 •

根据式(8) 可以计算得到

$$\Delta N' = \frac{\Delta f' N}{f_0} \tag{9}$$

在采样周期自适应的迭代过程中,步长 ΔN_i 应 小于等于 $\Delta N'$ 。另由于迭代步长是单调递减的,因 此第一次迭代计算的值应为最大 $\Delta N_{\rm max}$ 必须满足

$$0 < \Delta N_{\max} = AN \sqrt{1 - K_{N0}} \leq \frac{\Delta f'N}{f_0} \qquad (10)$$

得到 AN 的取值范围为

$$0 < AN < \frac{\Delta f \ N}{f_0 \ \sqrt{1 - K_{N0}}} \tag{11}$$

根据电力系统的运行规范和标准,电力系统的 频率往往被控制在50 Hz ±0.5 Hz 之间,因此信号 的频率偏差是有上限的 根据这个上限,可以确定加 速因子 *AN* 的取值上限。取值为0.5 Hz。

4.2 收敛条件

计算结果的精度取决于用户所定的计算收敛条 件、即为: $\varepsilon = | K_p - 1 | \leq \varepsilon_{set}$ 。若 K_p 取值越高,则 计算误差越小;反之 则计算误差越大。但提高计算 精度的代价是影响计算的实时性、因此、在实际应用 过程中 K_p 的取值可以根据测量的精度要求、计算 实时性和环境的噪声水平等综合考虑后取值,在先 保证信号实时性的条件下,即采样的时间必须小于 某个数 t^{max} 的条件下,取相关系数最高的那组周波 数据进行 DFT 计算,得到相应的谐波值。

5 结 论

采用采样周期自适应的方法可以有效解决由于非 同步采样引起的频谱泄露问题。具体有以下几个特点。

 1) 该方法无需知道电网信号的实际频率,随着 电网频率的偏移,迭代计算可以不断适应频率的动 态偏移实现同步采样。

 2) 迭代过程中通过对采样周期进行修正,并引 入修正加速因子可以提高信号序列收敛速度,即使 在频率偏差较大时也能即时使序列很快收敛。

3) 在迭代过程中采样点数恒定,每次迭代的计算量相同;而采样周期固定时,每次迭代的计算量随着迭代次数的增加而增加。当迭代次数较多时计算量很大。

4) 采样点数满足 $N = 2^{M}$ 因此可以采用 FFT 计算 提高运算速度。

5) 实际分析时也可用时域多项式插值手段对 采样信号进行采样周期调整的重采样。

参考文献

- [1] Ignacio, Santamaria Caballero, Carlos J, Pantaleon Prieto, Jesus Ibanez, et al. Improved Procedures for Estimating Amplitudes and Phases of Harmonics with Application to Vibration Analysis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Mesurement, 1998, 47(1): 209 – 2144.
- [2] Dusan Agrez. Weighted Multipoint Interpolated DFT to Improve Amplitude Estimation of Multifrequency Signal
 [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Mesurement, 2002, 51(2):287 - 292.
- [3] D. Belega ,D. Dallet. Frequency Estimation via Weighted Multipoint Interpolated DFT [J]. IET Science ,Measurement & Technology 2008 2(1):1-8.
- [4] 潘文 ,
 [4] 潘文 ,
 (1) 窗函数研究 [J]. 电工技术学报 ,1994 ,9 (1):50 54.
- [6] 张伏生 ,耿中行 ,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报 ,1999 ,19(3):63-66.
- [7] 孙红伟 李梅 袁健华 等.用于电力系统谐波分析的加窗 FFT 算法研究[J]. 高电压技术 2004 30(8):52-55.
- [8] 钱昊 赵荣祥. 基于插值 FFT 算法的间谐波分析 [J].中国电机工程学报 2005 25(21):87-91.
- [9] 赵文春,马伟明,胡安.电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J].中国电机工程学报2001 21(12):83-87.
- [10] 柴旭峥 文习山 关根志 筹. 一种高精度的电力系统谐波 分析算法[J]. 中国电机工程学报 2003 23(9):67-70.
- [11] 陈隆道 , 钱照明 , 张圣训. 周期域分析中非同步取样 数据的同步化 [J]. 电子学报 2001, 29(7):1-4.
- [12] 曾泽昊 余有灵,许维胜. 一种减小泄漏的同步化算法[J]. 电测与仪表 2005(479):12-14.
- [13] 曾泽昊,余有灵,许维胜.基于插值同步算法的频谱泄漏分析与仿真[J].系统仿真技术 2005 1(3):148-152.
- [14] 惠锦 杨洪耕. 改进的时域同步插值算法在基于 TDA 谐波和间谐波测量中的应用 [J]. 电工技术学报, 2008 23(7):124-129.
- [15] T. X. Zhu. Exact Harmonics/Interharmonics Calculation Using Adaptive Window Width [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 47(1): 2279 – 2288.
- [16] 郑恩让 杨润贤 高森. 关于电力系统 FFT 谐波检测 存在问题的研究[J]. 继电器 2006 34(18):52-57.
- [17] 布赖母 柳群译.快速傅立叶变换[M].上海:上海科学技术出版社,1979.

(收稿日期:2013-02-06)

考虑保护重要度计算环网方向保护配合最小断点集

江登笠¹ 李运坤¹ 周文越²

(1. 德阳电业局检修公司(检修试验) 四川 德阳 618000;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要:在对复杂环网方向保护进行整定计算时,确定其最优配合顺序的核心步骤就是求解最小断点集(MBPS)。根据保护主后备的依赖关系,建立了计算 MBPS 的数学模型,将整定过程用一系列矩阵运算表示,并加入到约束条件。 将保护重要度引入到目标函数中,利用人工蜂群算法对模型进行求解,得到最优 MBPS。通过算例验证算法及模型的 有效性。

关键词:整定计算;最小断点集;配合依赖关系;保护重要度;人工蜂群算法

Abstract: Determination of minimum break point set (MBPS) is the first step during setting and calculation of direction protection in a complex multi – loop network. A new model for directly obtaining MBPS is established through the coordination dependency relationship of primary and backup relay. The setting process is expressed through a series of matrix operation which becomes the constraint. The relay protection importance is introduced into the objective function and artificial bee colony algorithm is used for solving the model and obtaining the optimal MBPS. At last , it verifies the validity of the proposed algorithm and model by an example.

Key words: setting calculation; minimum break point set (MBPS); coordination dependency relationship; relay protection importance; artificial bee colony algorithm

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0071 - 04

0 引 言

计算最小断点集(minimum break point set ,MB-PS) 是复杂环网方向保护整定计算第一个步骤。因 为,只有找到最小断点集,并在断点对应的保护安装 处断开断点,使环网变为辐射型网络后,才可以顺利 地对整个环网进行整定计算。

近年来,计算 MBPS 的方法主要是基于图论的 方法^[1-4]和基于保护配合依赖关系的方法^[5-7]。上 述文献提出的算法虽然可得到基数最小的多组 MB--PS,但无法确定最优的那组 MBPS。文献 [8]首次提 出了多组同基 MBPS 的选取方法,首先采用文献 [6]提出的算法得到网络的多组 MBPS,再考虑保护 重要度选取最优的一组 MBPS,需要两次计算,较为 复杂,而且文献 [6]的算法无法得到所有的 MBPS, 因此所选取的 MBPS 并非是最优的 MBPS。

首先参照文献 [7] 提出的方法,根据保护主后 备的依赖关系,将整定过程用一系列矩阵运算表示, 并作为约束条件引入 MBPS 的计算模型,然后通过 计算节点和线路电气介数得到保护重要度,并加入 目标函数中,通过人工蜂群算法对模型进行求解,最 后得到最优 MBPS。

1 MBPS 求解模型

1.1 形成保护有向图的节点邻接矩阵

图 1(b) 所示的有向图表示图 1(a) 所示的电网 的方向保护的配合依赖关系。图 1(b) 中的节点表 示相应编号的保护,有向边表示各个保护之间的配 合关系。例如,与节点6相邻的两条边指向节点4 和2,则表示保护6需要与保护4和2配合,即保护 6 是保护4和2的后备保护。

图 1 所示的保护配合关系可以用有向图的节点 邻接矩阵表示 $A = (a_{ij})$ 。其中 A 为 n 阶方阵 n 为 保护的个数。如果保护 i 是保护 j 的后备保护 ,则 $a_{ij} = 1$,否则为 0。这样一来 ,就可求出图 1 的节点 邻接矩阵 A。



1.2 利用保护配合关系判断断点集

在确定了电网的断点集后,在断点处将环网解 开,环网就变成一个辐射网络。对于一个辐射网络, 其整定顺序是以终端线路保护作为保护整定起点, 然后根据保护配合关系,逐级往上整定,直到所有保 护都被整定。现用 n 维向量表示断点集 n 为电网 中保护的个数 $X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$,若保护 j 属于断 点集 ,则 x_j 等于 0,否则为 1。MBPS 即为使 X 中所 有元素之和最大的断点集。

可以用以下方法表示全网保护的整定过程^[7], 并通过这个过程判断 *n* 维向量 *X* 是否表示了电网的一种断点集。

步骤 1: 构造 n 维 0 – 1 向量 $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$,并根据保护主后备依赖关系确定保护配合有向 图的节点邻接矩阵 A_{\circ}

步骤 2: 如果向量 $X^0 = [x_1^0 \ x_2^0 \ \cdots \ x_n^0] + x_j^0 = 0$, 则将 *A* 中的第 *j* 行置零。

步骤 3: 按式(1) 计算 Xⁱ⁺¹。

 $X^{i+1} = (A \times (X^{i})^{T})^{T}$ (1) 式中 *i* 初始值为 0。在得到后 X^{i+1} 对 X^{i+1} 中大于 1 的元素置 1。

步骤 4: 若在 $X^{i+1} = |x_1^{i+1}, x_2^{i+1}, \cdots, x_n^{i+1}|$ 中 x_j^{i+1} = 0 则将 A 的第 j 行置 0。

步骤 5: 若 $X^{i+1} \neq 0$,则返回步骤 3 继续计算,否则结束。

对于任何一个 n 维向量 X,如果可以通过以上 步骤进行计算后,所有的元素变为 0,则表示这个向 量所表示的集合代表了一种断点集。将上述计算过 程用一个函数 f(X A)表示。对于一个含 n 个方向 保护的电网 A 为它的保护有向图的节点邻接矩阵, •72• 若对一个n 维0 – 1 向量X f(X A) = 0 则X 所表示的集合为该电网的断点集。

1.3 保护重要度

综合考虑文献[9]、[10]、[11]提出的线路电气 介数和节点电气介数来判断保护的重要度。

1.3.1 线路电气介数

$$B(m, n) = \sum_{i \in G : i \in I} |I_{ij}(m, n)|$$
 (2)

式中 *B*(*m*,*n*)为线路(*m*,*n*)的电气介数; *I_{ij}(m*,*n*) 为在发电机 – 负荷节点(*i*,*j*)上加单位电流源后,在 线路(*m*,*n*)引起的电流; *G*、*L*分别为发电机节点和 负荷节点的集合。

1.2.2 节点电气介数

$$B(n) = \sum_{i \in \{i,j\} \in L} B_{ij}(n)$$
(3)

式中 B(n) 为节点电气介数; $B_{ij}(n)$ 为发电机 – 负荷节点对 n 节点的电气介数。

$$B_{ij}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{m} |I_{ij}(m \ n)| & n \neq i \ j \\ 1 & n = i \ j \end{cases}$$
(4)

式中 *m* 为所有与节点 *n* 直接相连的节点。 1.2.3 节点电气介数

定义保护重要度为与该保护相关的线路电气介 数与节点电气介数之和。

$$\lambda(j) = B(m, n) + B(n)$$
 (5)

式中 $\lambda(j)$ 为保护j的重要度。

由于断点保护的整定不与其他保护配合,因此 断点保护不能完全保证其动作的选择性。为降低保 护误动、拒动的概率,在计算 MBPS 时应优先考虑保 护重要度之和较小的。

1.3 建立求解 MBPS 的数学模型

通过 1.1 所陈述的算法可以判断一个 n 维向量 X 所表示的集合是否是该电网的断点集。因此这种 判断可作为求解 MBPS 数学模型的约束条件。将保 护重要度引入目标函数中,若某断点集所有保护的 重要度之和较大,则其被选中的概率小,反之被选中 的概率大。式(6) 为求解 MBPS 的数学模型。

$$\begin{cases} \max(\beta_{1}\sum_{j=1}^{n} x_{j} + \frac{\beta_{2}}{1 + \sum_{j=1}^{n} \lambda(j) |x_{j} - 1|}) \\ \text{st. } f(X|A) = 0 \end{cases}$$
(6)

式中 $X = [x_1 \ x_2 \ ; \cdots \ x_n]$ 表示电网的某一断点集; *n* 为电网中保护的个数 若保护 *j* 属于断点集 ,则 x_j 等 于 0 ,否则为 1; $\beta_1 \ \beta_2$ 为权重因子 ,应合理选取 $\beta_1 \$ β₂ 使目标函数中的第一项始终大于第二项,以使得 最终所得断点集的基数最小,但不能相差太大,否则 第二项在优化中将不起作用。

2 人工蜂群算法计算 MBPS

2.1 算法基本原理

2005 年, D. Karaboga 成功地将蜜蜂觅食原理运 用于数值优化问题上,提出了人工蜂群算法^[12]。作 为一种典型的群居生物,单个蜜蜂的智慧是有限的, 但是当一群蜜蜂聚在一起时,就会表现出惊人的智 慧。不管在什么环境下,蜜蜂总是可以在蜂巢周围 找到食物最丰富的食物源。

在人工蜂群算法中,每个食物源对应优化问题 的一个可行解,食物源的丰富程度对应可行解的适 应度值。在算法开始阶段,所有的蜜蜂皆为侦察蜂, 在蜂巢附近寻找食物源,之后,引领蜂会对食物源领 域进行搜索,并比较搜索前后食物源的丰富程度,选 择较丰富的食物源作为采集目标。当引领蜂完成搜 索后,它们会回到蜂巢,并在舞蹈区将自己掌握的食 物源信息与其他蜜蜂分享,跟随蜂会根据食物源的 丰富程度以一定概率选择引领蜂进行跟随。当然, 食物源越丰富,被选择的概率也就越大。

在人工蜂群算法中,蜂群的觅食行为与优化问题之间存在如表1所示的关系。

表1 蜂群的觅食行为与优化问题对应关系

蜂群觅食行为	优化问题
蜜源	可行解
蜜源的收益度	可行解的适应度大小
觅食速度	优化速度
收益度最大的蜜源	最优解

2.3 求解 MBPS 的具体步骤

步骤 1: 计算电网中各个保护的重要度。

步骤 2: 根据电网的保护配合依赖关系有向图 形成表示保护主后备关系的节点邻接矩阵 A,随机 产生 M 个初始 n 维 0 - 1 向量 $X_j = [x_j^1, x_j^2, \cdots, x_j^n] x_j^i$ = 0 或 1 j = 1 2 3 ··· M,即 M 个初始解。对每一个 向量,判断是否满足约束条件 $f(X_j, A) = 0$,对不满 足的向量,舍去并重新产生一个代替,直到 M 个初 始向量都满足为止。

步骤 3: 用式(7) 计算每个初始解的适应度 C_i。

对每一个初始解进行领域搜索。其方法是:随机选 中 *X_j* 中的一个元素 ,若该元素为 0 ,则将其置 1;若 该元素为 1 ,则将其置 0。判断搜索后的解是否满足 约束条件 ,若不满足则舍去。计算搜索后的解的适 应度 ,并与初始解的适应度比较 ,选择适应度较大的 解 ,淘汰适应度较小的解。

$$C_{j} = \beta_{1} \sum_{j=1}^{n} x_{j}^{i} + \frac{\beta_{2}}{1 + \sum_{i=1}^{n} \lambda(j) |x_{j}^{i} - 1|} \qquad x_{j}^{i} \in X_{j} \quad (7)$$

步骤 4: 按适应度的大小,从大到小将每个解排 序, 按轮盘赌的方式进行选择。对每一个被选中的 解,进行领域搜索,判断搜索后的解是否满足约束条 件,若不满足则舍去。计算搜索后的解的适应度,并 与搜索前解的适应度比较,选择适应度较大的解,淘 汰适应度较小的解。

步骤 5: 判断每个解被搜索的次数,将超过 N (这里设 N 为 10) 次搜索而没有更优的解淘汰,产生 新解代替。若该解为种群最优解则不淘汰。

步骤 6: 判断是否达到最大迭代次数,若没达 到,则转步骤2继续计算。若达到最大迭代次数,则 结束算法。

3 算例分析



采用图2所示算例^[8]。

表2 保护重要度

保护 编号	重要度	保护 编号	重要度	保护 编号	重要度
1	1.323 6	14	3.738 2	27	3.994 5
2	1.323 6	15	3.352 3	28	1.765 4
3	1.087 4	16	3.002 6	29	0.910 2
4	1.798 8	17	3.122 0	30	1.783 4
5	2.6897	18	3.453 3	31	1.780 3
6	2.6897	19	3.085 1	32	1.774 4
7	2.8837	20	3.085 1	33	2.260 2
8	3.155 7	21	2.970 5	34	1.152 0
9	2.117 3	22	4.003 9	35	2.556 0
10	2.435 4	23	4.1834	36	3.122 1
11	2.389 1	24	2.424 8	37	2.885 8
12	2.731 3	25	3.109 3	38	4.000 0
13	3.276 6	26	3.741 5		

形成保护配合有向图节点邻接矩阵 A 由于矩 阵维数过大,这里就不列出。

算例中的保护 23 为末端线路首端保护。需要 在计算完成后加入断点集。



图 3 人工蜂群算法进化过程

β₁、β₂分别取1和10。人工蜂群算法参数设置 如下:引领蜂与跟随蜂数量相等,为300个,侦察蜂 1个,计算迭代次数为100次。图3为人工蜂群算 法的进化曲线。算法结束后,加入保护23,得到最 优 MBPS 为{1,2,3,8,9,10,11,17,24,28,29,32, 23}。该 MBPS 基数为13,与文献[6]一致。

4 结 论

利用环网方向保护的主后备依赖关系,将整定 过程用一系列矩阵运算表示,并将其作为求解 MBPS •74• 数学模型的约束条件。综合考虑节点和线路电气介数 计算出保护重要度 加入到目标函数中 采用人工 蜂群算法对模型进行求解 得到最优的 MBPS。现有 算法只是单方面考虑基数最小计算 MBPS 或在不完 整的多组同基 MBPS 中选取最优的一组。所提出的 算法弥补了这些不足 具有一定的实用性。

参考文献

- [1] Damborg M J ,Ramaswami R ,Venkata S S ,et al. Computer aided Transmission Protection System Design , Part I: Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1984 ,103(1): 104 114.
- [2] 吕飞鹏 米麟书 美可薰.环网方向保护配合最小断点 集的神经计算方法[J].中国电机工程学报,1997,17
 (3):184-189.
- [3] 刘丹,吕飞鹏.基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J].电力系统自动化 2008,32(21): 27-31.
- [4] Bapeswara Rao V V Sankara Rao K. Computer aided Coordination of Directional Relays: Determination of Break Points [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1988 ,3 (2):545 – 548.
- [5] 吕飞鹏. 基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24):65-69.
- [6] 刘丹 吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集 计算方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):24-27.
- [7] 吕飞鹏,刘丹.基于蚁群算法计算环网保护配合最小 断点集的新方法[J].四川大学学报:工程科学版, 2010,42(4):142-147.
- [8] 李运坤,吕飞鹏,陈新,等.基于节点重要度估计的多 组同基最小断点集选取方法[J].电力系统自动化, 2010,12(34):58-60.
- [9] 陈晓刚 孙可 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构 脆弱性分析[J]. 电工技术学报 2007 22(10):138-144.
- [10] 徐林,王秀丽,王锡凡.基于电气介数的电网连锁故 障传播机制与积极防御[J].中国电机工程学报, 2010,30(13):61-68.
- [11] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关 键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报 2010, 30(1):33-39.
- [12] Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization [R]. Ericiyes University, Engineering Facylty, Computer Department 2005.

作者简介:

李运坤(1987),男,硕士,从事变电检修工作;

江登笠(1985),男,本科,从事变电检修工作;

周丈越(1989),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 继电保护。 (收稿日期:2013-04-26)

220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究

张仕名¹ ،张先怡² ,许 安³ 凗 涛³ 陈 平¹ 李 昆¹ 李晓东¹ ,江 来¹ 李振华¹ (1. 西昌电业局,四川 西昌 615000; 2. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;

3. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 雷击是高压及超高压输电线路的主要事故之一,反击跳闸发生的概率很低,绕击是发生故障跳闸的主要原因。 可以在地线上架设水平侧向短针的分布式绕击防治措施以有效提高地线引雷能力,防止绕击跳闸。以西昌 220 kV 输电 线路 N148 号杆塔为例,分析并比较了杆塔附近地线上安装防绕击侧针前后,线路绕击率、绕击跳闸率以及绕击雷电 流幅值的变化情况。通过实例计算发现,防绕击侧针安装以后明显改善了线路的防绕击能力,可见安装防绕击侧针 作为输电线路的防雷改造措施,具有较好的实用性。

关键词: 防绕击侧针; 绕击; 防护效果; 计算方法

Abstract: Lightning stroke is one of the major accidents in HV and EHV transmission lines. The trip – out accidents are mainly caused by shielding failure and rarely caused by back flashover. In order to prevent the trip – out by shielding failure , the lightning rod against shielding failure can be installed on the lightning conductor that can improve the triggered lightning capacity of the ground wires. Taking N148 tower in 220 kV transmission line of Xichang for example , the differences of shielding failure rate , shielding failure trip – out rate and shielding failure lightning peak current of the transmission line which has installed the lightning rod against shielding failure near N148 tower are analyzed. With the help of calculation analysis , it is found that after installing the lightning rod against shielding failure , the ability against shielding failure of transmission lines has been improved obviously. Therefore , it is in high practicality to use lightning rod against shielding failure as the improvement measures of the protection against lighting in transmission lines.

Key words: lightning rod against shielding failure; shielding failure; protection effect; calculation method 中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0075 - 05

0 引 言

雷击是高压及超高压输电线路的主要事故之 一。国家电网公司跨区电网输电线路 2003—2005 年雷击分别占总故障跳闸的 45 %、34 %、17 % (2005 年冰灾占较大比重);国家电网公司系统 2003 年110~500 kV 线路雷击闪络跳闸占线路总 跳闸的 35.12 %;在湖北超高压线路前 20 年运行 中,发生已查明雷害事故就有 19 次,占故障跳闸总 次数的 57.6 %。故雷击跳闸故障是影响输电线路 特别是超高压线路安全可靠运行的主要形式。

从雷电流幅值概率分布曲线来看,雷电流幅值 主要集中分布在5~50 kA 范围 约占整个雷电次数 的90%以上;超过100 kA 的雷电流较少。而引起线 路雷击跳闸的雷电流幅值以10~50 kA 范围占绝大 多数 与雷电绕击比率相吻合。加强线路的防雷设 计,对于500 kV 线路采取以防绕击雷为主 220 kV 线 路以防绕击、反击雷并重,110 kV 线路以防反击雷为 主的技术方针,有针对性地采取综合防雷技术措施。 根据雷电定位系统统计结果分析,负极性雷电产生 的概率远大于正极性雷电,但正极性雷电流的平均 强度大于100 kA 的概率较负极性雷电流高。

1 输电线路直击雷防护

输电线路直击雷分为绕击雷和反击雷。由于造 成反击和绕击的雷电流具有各自特点,且对输电线 路的危害具有差异。因此需要根据线路雷击跳闸后 收集和测量的各种相关数据,对绕击和反击进行判 断。判据如表1所示,具体包括:雷电流大小、线路 耐雷水平、地线保护角、杆塔接地电阻、绝缘子类型、

地形地貌及防雷设施使用情况等。

表1 绕击与反击的不同特征

序号	比较项目	反击	绕击
1	雷电流幅值	雷电流较大	雷电流较小
2	杆塔接地电阻	大	小
3	闪络基数 与相数	一基多相或多 基多相	单基单相或相邻 两基同相
4	地形特点		上坡或山顶等 易绕击处
5	闪络相别	耐雷水平较 低相(如下相)	易绕击相 (如项相)

110 kV 线路的反击耐雷水平一般在 45 ~ 75 kA 220 kV 反击耐雷水平一般为 75 ~ 110 kV ,500 kV 反击耐雷水平一般为 120 ~ 160 kA。这样,只有 当落雷超过耐雷水平时,才引起跳闸,但概率很小也 属正常。对于运行线路防止反击发生,主要是通过 降低杆塔接地电阻等措施来保证线路的耐雷水平, 减少雷击跳闸率。故运行中通过加强杆塔接地装置 的维护,控制了反击发生的条件,一般情况下,超高 压线路发生反击的概率极低。

绕击是输电线路雷击跳闸的另一种形式(对于 高压输电线路绕击为主要形式)。随着 GPS 雷电定 位观测系统的广泛采用,人们对输电线路雷击故障 有了更加清晰的认识,统计资料表明,大量的雷击跳 闸故障都是由相对较小的雷电流引起的,一般约15 ~30 kA,如此小的雷电流幅值远未达到反击的条 件^[1-2]。理论分析认为,在相对较小的雷电流状态 下,避雷线屏蔽失效,造成雷电绕击导线,引起输电 线路雷击跳闸。

2 防绕击侧针的防护机理与安装方式

输电线路的屏蔽系统由地线、杆塔和大地三者 构成 绕击跳闸可归咎于屏蔽系统的引雷能力不够, 针对具体情况增强某一屏蔽体的引雷能力可有效地 防止绕击跳闸。这里提出在地线上架设水平侧向短 针的分布式绕击防治措施以有效提高地线引雷能 力 防止绕击跳闸。它可保护档距内任意危险段且 引针很短 ,易于工程实现。

输电线路同一档距内,不同位置的绕击率也是 存在差异的:临近输电线路杆塔的导线由于受到杆 塔的屏蔽作用,遭受绕击的概率较低,称为安全区; 在离杆塔稍远的区域,由于杆塔对周围电场有畸变 作用,同时这一范围得不到杆塔的屏蔽保护,导致这 一区域遭受绕击的概率显著升高,称为危险区;而离 杆塔更远的区域,既不存在杆塔对电场的畸变作用, 也没有杆塔的屏蔽保护,其绕击率恢复正常水平,称 为正常区。

通过小模型试验得出,一基约30 m 高的220 kV 杆塔(如图1所示)在其两侧10~30 m 的范围内,绕 击概率远高于档距中央部分^[3-4]。



图 1 220 kV 典型塔型

根据高压输电线路同一档距内安全区、危险区 及正常区域的划分,在距离杆塔15m及30m处的 避雷线上分别水平加装两组长度为1.2m的防绕击 预放电避雷针,安装方式如图2所示。



图 2 220 kV 猫头塔防绕击侧针安装示意图

由现场统计数据及实验室模拟实验发现,高压 及以上输电线路,绕击主要发生在杆塔临近区域,且 某些线路杆塔临近区域的绕击远高于档距中央。因 此针对临近杆塔附近线路绕击情况进行分析,可忽 略地线和导线的弧垂,假设地线和导线水平平行。

• 76 •

3 防绕击侧针的防护效果与计算方法

3.1 加装防绕击侧针时对保护角的影响

在未安装绕击避雷针时,图3中避雷线对输电 线路的保护效果分析如下。





根据图 3 中的参数得到该图所示线路保护角 α 与避雷线和导线间相对位置的关系如下。

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \tag{1}$$

式中 α 为避雷线对边导线的保护角。

当根据导线高度及导线和避雷线的相对位置关系,可以计算得到避雷线的高度 *h*_s。

安装防绕击侧针以后,根据防绕击侧针的工作 原理以及保护范围,可以近似认为是将避雷线外移, 防绕击侧针长度为 Z 得到如图 4 所示。

根据图4 加装防绕击侧针后 相当于是保护角 变小了 此时线路保护角为β。



$$\tan\beta = \frac{y'}{x} = \frac{y-z}{x}$$
(2)

以西昌 220 kV 昌山线、山越线输电线路某基杆 塔为例进行分析,昌山线 N148 号杆塔具体参数如 表 2 所示。

根据 N148 杆塔参数可得,导线和避雷线间的 水平间距为

$$y = 9.5 - 6 = 3.5 \text{ m}$$

根据杆塔及导线安装结构,结合公式(1)可得 避雷线与导线垂直距离为 *x*。

$$x = \frac{y}{\tan \alpha} = \frac{3.5}{\tan 17.65^{\circ}} = 11 \text{ m}$$

在距离杆塔 15 m 及 30 m 处的避雷线上分别水 平加装两组防绕击预放电避雷针,由于侧针长度可 以根据实际需要进行调整,假设侧针安装调节后,其 在水平方向长度 Z 为 1.2 m。

则根据公式(2)安装侧针后避雷线对变相导线 的保护角变为

$$\beta = \arctan \frac{3.5 - 1.2}{11} = 11.81^{\circ}$$

3.2 加装防绕击侧针时对绕击率的影响

线路运行经验、现场实测和模拟实验均证明,需 电绕过避雷线直击导线的概率与避雷线对边导线的 保护角、杆塔高度以及线路经过地区的地形、地貌、 地质条件有关。按照 DL/T 620 – 1997 标准,绕击率 P_α可用下式计算。

对平原线路:
$$\log P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\iota}}}{86} - 3.9$$
 (3)

对山区线路:
$$\log P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\iota}}}{86} - 3.35$$
 (4)

式中 α 为避雷线对边导线的保护角; h_i 为杆塔高度 μ 位为 m。

由这两个计算绕击率的公式可知,绕击率与保 护角大小有关,安装防雷侧针后,效果类似保护角减 小,故绕击率也会受到影响。

根据安装侧针后的避雷线保护角结合式(3)或 者式(4)能求出安装避雷针后杆塔附近导线新的绕 击率 *P_β*。再由安装防绕击侧针前后的绕击率 ,得到 绕击率的下降程度为

$$\Delta P = \frac{P_{\alpha} - P_{\beta}}{P_{\alpha}} \times 100\%$$
 (5)

安装防绕击侧针前,则根据式(4)可得

$$\log P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.35 = \frac{17.65 \sqrt{34}}{86} - 3.35$$
$$= -2.153$$

加装防绕击侧针后,由式(4)可得

$$\log P_{\beta} = \frac{\beta \sqrt{h_{t}}}{86} - 3.35 = \frac{11.81 \sqrt{34}}{86} - 3.35$$
$$= -2.549$$

可以得到 $P_{\beta} = 0.002 823$ 因此安装放绕击侧针 前后绕击率的变化情况为

$$\Delta P = \frac{0.007\ 03 - 0.002\ 823}{0.007\ 03} \times 100\% = 60\%$$

• 77 •

表 2 西昌 220 kV 昌山线 N148 号杆塔具体参数

故障杆、易击 杆塔塔号	杆塔全高 $h_t/{ m m}$	避雷线水平 间距 /m	边相保护角 α /°	导线排 列方式	边相导线距 塔中心距离 /m	边相导线对 地高度 /m	绝缘子串 长度 <i>S</i> /mm	地面倾角 θ /°
昌山线 N148	34	12	17.65	三角	9.5	23	3 176	40

通过上述分析发现,加装防绕击雷侧针以后,杆 塔临近区域的绕击率降低了60%,得到了较好改善。

前面分析中没有考虑防绕击侧针的预放电特 性。且针型电极较棒形电极有更强的引雷效果。实 际应用中、防绕击侧针有效地将大量绕击雷转变为 击中杆塔和避雷线的直击雷。

3.3 加装防绕击侧针时对绕击跳闸率的影响

根据雷电统计资料,自然界中的雷闪绝大部分 为负雷闪,以负雷闪为例进行分析。雷电绕击导线 时的耐雷水平为

$$I = \frac{U_{50\%}}{100} \tag{6}$$

雷击导线超过耐雷水平的雷电幅值概率为

$$P_I = 10^{(-\frac{I}{88})} \tag{7}$$

建弧率为

$$\eta = \left\{ 4.5\left(\frac{U_n}{\sqrt{3S}}\right)^{0.75} - 14 \right\} \times 10^{-2}$$
 (8)

雷电穿越避雷线保护绕击导线引起杆塔绝缘闪 络雷击跳闸率次数为

$$n_{dx} = N_{dx} P_{I_{ii}} \boldsymbol{\eta} \tag{9}$$

式中 $P_{I_{ij}}$ 为雷击导线时超过阈值的雷电值概率; N_{dx} 为 100 km 年(40 个雷暴日) 线路雷电绕击次数 即

$$N_{dx} = N_L P_{\alpha} \tag{10}$$

式中 N_L 为 100 km 年架空线路雷击总数; P_{α} 为在 正的避雷线保护角(避雷线比导线更靠近杆塔轴心 布置)时 /雷电绕击导线概率。

因此,加装防雷侧针后,由于绕击率受到影响, 绕击跳闸率也会随着受到影响。

雷电绕击导线时 导线的耐雷水平为

$$I = \frac{1\ 200}{100} = 12\ \text{kA}$$

建弧率为

$$\eta = \left\{ 4.5\left(\frac{220}{\sqrt{3}\times 3.176}\right)^{0.75} - 14 \right\} \times 10^{-2} = 57.8\%$$

雷击导线超过耐雷水平的雷电幅值概率为

$$P_I = 10^{(-\frac{1}{10})} = 0.7305$$

安装防雷侧针前 绕击跳闸率为

9.5 23 3 176 40

$$n_{dx} = 0.28 \times (12 + 4 \times 34) \times 0.578 \times \frac{0.703}{100}$$

 $\times \frac{73.05}{100} = 0.123$

安装防雷侧针后,可以等效为避雷线外移,两避 雷线间距增加2.4 m 绕击跳闸率为

$$n_{dx} = 0.28 \times (14.4 + 4 \times 34) \times 0.578 \times \frac{0.2823}{100} \times \frac{73.05}{100} = 0.05$$

以上计算分析表明,安装防绕击侧针后,输电线 路绕击跳闸率也得到了明显改善。

3.4 加装防绕击侧针时对绕击雷电流幅值的影响

经典电气几何模型如图 5 所示。根据电气几何 模型分析 ± 220 kV 直流输电线路的最大绕击雷电 流幅值在安装防绕击前后的变化情况^[5-6]。



图 5 经典电气几何模型示意图

图 5 中 r_c 为雷电先导对导线击距; r_s 为雷电 先导对避雷线击距; h_c 为导线悬挂总高度 , h_s 为避 雷线悬挂点高度; kr_c 为对地击距; k 为击距系数 ,经 典电气几何模型中认为 k = 1 $r_c = r_s$ 。

导线击距与雷电流的关系计算公式参照 IEEE std 123 - 1997。

$$r_c = 10I^{0.65} \tag{11}$$

当 $\theta_1 = \theta_2$ 时 暴露弧为0,不再发生绕击,此时 对应的击距为最大击距。当地面倾角 $\theta = 0$ 时,最大 击距 r_{sm} 为

$$r_{sm} = \frac{(h_s + h_c) + 2\sqrt{h_s h_c} \sin\alpha}{2\cos^2\alpha}$$
(12)

由于实际建设中,大部分高压杆塔处于山区,所

• 78 •

在位置地形复杂多变,地面倾角不为0(如图6所 示)。因此当线路所处位置存在地面倾角θ时,线 路背山侧的保护角相还增加地面倾角的角度。



图 6 杆塔地面倾角示意图 当地面倾角 $\theta \neq 0$ 时,最大击距 r_{sm} 为



(13)

针对临近杆塔附近线路绕击情况进行分析,可 忽略地线和导线的弧垂,假设地线和导线水平平行。 即此处计算取 h_i 和 h_c 为避雷线和导线悬挂点高 度 地面倾角为 $\theta = 40^\circ$ 。

利用式(13) 可计算出最大击距: *r_{sm}* = 140.02 m 输电线路的最大绕击雷电流 *I_{max}*与最大击距 *r_{sm}* 有关 ,即

$$I_{\max} = (0.1r_{sm})^{1.54}$$
(14)

由此公式可以得出: Imax = 58.23 kA

安装防绕击侧针以后,由之前分析可知避雷线 对边相导线的保护角改变为β=11.81°

利用式(13) 可得: r_{sm} = 101.43 m

带入式(14) 可得: I_{max} = 35.44 kA

根据上述分析可得,安装防绕击侧针后最大绕 击雷电流幅值明显减小。根据上一小节的分析得 到,±220 kV 输电线路的耐雷水平为 $I_{min} = 12$ kA。 由此可以看出,由于加装防绕击侧针以后,发生绕击 的最大雷电流幅值已经大大减小。雷电流幅值只有 在输电线路的耐雷水平与最大绕击雷电流幅值之 间,即[I_{min} , I_{max}]才能发生绕击跳闸,而最大雷电流 幅值的减小,即发生绕击跳闸的雷电流幅值区间变 小,意味着发生线路跳闸的可能也越小。因此防绕 击侧针较好地抑制输电线路的绕击跳闸故障。

4 总 结

通过对 220 kV 杆塔线路加装防绕击保护侧针 分析可知:加装侧针后,线路的绕击率、绕击跳闸率、 绕击雷电流幅值都有了明显的改善;侧针长度越长, 侧针的保护作用越大,改善的效果越好。所以在加 装侧针时,应侧针长度越长越好。

但是在实际应用中,首先,可以肯定侧针越长保 护作用越好的性能,但侧针的运输、制造、购买以及 加装等也是需要一定的成本,不能一味使用加装较 长的侧针来防绕击雷,必须综合考虑杆塔避雷线与 导线的水平距离,侧针的制造、运输和加装成本,以 及杆塔周围环境等因素,尽量使得加装侧针经济实 用。

参考文献

- [1] 钱冠军. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究[J]. 高电压技术,1997 23(2):73-75.
- [2] 易辉,崔江流.我国输电线路运行现状及防雷保护[J].高电压技术 2001 27(6):44-45.
- [3] 钱冠军 汪晓瑜 徐先芝 ,等. 沿输电线路档距方向绕 击概率的变化 [J]. 高电压技术, 1999, 25(1):23-25.
- [4] 樊春雷,吴广宁,李瑞芳,等. 高压输电线路绕击跳闸 率的研究[J]. 电瓷避雷器 2009(2):36-39.
- [5] 马御棠,吴广宁,张星海,等. 地形对输电线路最大绕 击雷电流的影响[J]. 电瓷避雷器 2010(1):29-32.
- [6] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等.复杂地形输电线路绕击 耐雷性能计算方法的改进[J].高压电器,2011,47
 (4):96-100.

作者简介:

张仕名(1964),男,本科,高级工程师,主要从事输电线 路在山区的防雷研究;

张先怡(1988),男,硕士研究生,主要研究方向为过电 压防护与接地技术。

(收稿日期:2013-03-10)

• 79 •

500 kV 内桥接线变电站停电安全浅析

庄秋月 李凡红

(国网四川省电力公司检修公司 四川 成都 610041)

摘 要:500 kV 变电站采用内桥接线方式具有占地少、易操作等特点,特别针对两条出线、3 台开关的情况。其优点在 于线路的停、送电操作比较方便,发生故障时也不会影响其他回路的正常运行,但此时主变压器发生故障或误操作所 造成的安全风险因素则相对要高得多,这就对变电站运行维护及倒闸操作的安全可靠性提出了更高的要求。以四川 首座 500 kV 内桥接线变电站为例,详细介绍了其停送电的危险点和不同的操作方案,并对各方案进行了风险对比,其 目的在于为运行人员的停送电操作提供决策,进而提高变电站内的安全操作水平。

关键词: 内桥接线; 500 kV 变电站; 操作过电压; 桥开关

Abstract: The inner bridge connection in 500 kV substation has the features of small footprint and easy operation, especially for two outlets and three switches, which is more convenient for power supply interruption and power transmission and will not affect the normal operation of other lines. However, it will increase relatively higher safety risk factors when the main trans-former fails or malfunction happens, so the safety and reliability of operation maintenance and switching operation in substation need higher requirements. Taking the first 500 kV substation with inner bridge connection in Sichuan for example, the relative dangerous points in power supply interruption and power transmission and the different operating programs are introduced in detail, and the risks in each program are compared, which aims to provide the decision – making for operating staff in power supply interruption and power transmission so as to increase the level of safe operation in substation.

Key words: inner bridge connection; 500 kV substation; switching – surge overvoltage; bridge switch 中图分类号: TM406 文献标志码: A 文章编号: 1003 – 6954(2013) 04 – 0080 – 03

500 kV 变电站在有两条出线、3 台开关的情况 下设计优先采用内桥接线方式,其优点在于一方面 线路的停、送电操作比较方便,发生故障时也不会影 响其他回路的正常运行;另一方面具有占地面积少 的特点。但此时主变压器发生故障或误操作所造成 的安全风险因素则相对要高得多,这就对变电站运 行维护及倒闸操作的安全可靠性提出了更高要求。

1 运行方式简介

500 kV 南坝变电站是电能量汇聚和转供的中枢 站 其内桥主接线如图 1 所示,为简洁起见.图中只标 明了设计的开关、刀闸及母线,其余均省略。其中,两 条 500 kV 线路分别由原连接绵阳至广元的乐昭二线 开 π 而来,主变压器高压侧则通过隔离刀闸(50124 和 20123) 与 500 kV 部分连接; 220 kV 部分采用双母单 分段方式将周围小水电汇集并送至主电网中; 35 kV 采用单母方式来实现系统电压调整以及站用电供 给。因此,该站高压侧的运行工况主要存在以下4 种方式。

方式 1:桥 5012 开关合位,两条线路带两台变 压器并列运行(正常运行方式);

方式 2: 桥 5012 开关合位,一条线路带两台主 变压器运行(另一条线路停电检修);

方式 3:桥 5012 开关合位,两条线路带一台主 变压器运行(另一台主变压器停电检修);

方式 4: 桥 5012 开关分位,两条线路分别带两 台主变压器运行。

其中,方式1、方式4为常见运行方式,变电安 全可靠性也较高;方式2、方式3仅在一条线路或一 台主变压器停电检修时出现,运行可靠性相对较低, 此时若供电线路永久性发生故障,将极易出现全站 失电的情况,因此需采取有效措施来避免。

由于内桥方式中变压器高压侧仅设置了隔离刀 闸,而隔离刀闸不能带负荷拉合变压器^[1],这就要 求主压器变故障停电操作时必须将变压器全停后方

• 80 •

可拉合此刀闸以进行主变压器故障点的隔离,从而 给变压器相关的倒闸操作带来了一定的麻烦,更有 可能发生误操作事故。同时,在投切变压器过程中 所产生的操作过电压、励磁涌流等因素是变压器送 电操作中涉及到的典型危险点,因此有必要对内桥 方式下变压器操作进行对比研究。为叙述简洁,仅 以变压器停电操作为例来详细分析可能带来的安全 风险。



图 1 500 kV 南坝站一次主接线图(高压侧)

2 操作危险点分析

对于 500 kV 常见的 3/2 接线或全桥接线方式, 由于变压器及两侧开关为一个完整的电气单元,变 压器停电操作只需顺序拉开低、中、高压侧开关及其 两侧刀闸,并做好安全措施即可。而内桥接线由于 方式特殊,变压器停电操作会影响到一回线路的正 常运行^[2],如有需要还必须考虑主变压器停电后对 所受影响的线路恢复供电。

变压器停电操作应遵循先停负荷侧,后停电源 侧的基本原则^[3]。因为变压器在操作过程中,先停 电源侧时容易导致负荷侧向变压器反送电,若此时 发生故障还可能造成保护装置误动或拒动,延长故 障切除时间,扩大故障范围。就500 kV 南坝变电站 而言 220 kV 部分多为小型水电站,先期投运的两 条线路接至水晶电厂,电能通过水晶一、二线在变压 器汇集后由广南、绵南线送出。在调度规程中关于 变压器的操作规定也明确指出:500 kV 变压器宜从 500 kV 侧停电或充电,必要时也可以从 220 kV 侧 停电或充电。但 500 kV 变电站电源侧与负荷侧并 没有明显意义上的界定或规范。因此,变压器停电 操作从整体上考虑两种方案(以标准运行方式1 为 例分析1号主变压器的停电操作,低压侧均为负荷, 在此不做讨论)。

方案 1: 先停低压侧, 再停中压侧, 后停高压侧。

主变压器在断掉低压侧、中压侧负荷后,再操作 500 kV 部分则相当于用高压侧切断空载变压器。

①桥 5012 开关、线路 5011 开关

500 kV 广南线路长达 170 km 若先操作桥 5012 开关,则相当于长线路末端带空载变压器。根据输 电线路等值电路的简化计算,可将长距离输电线路 分解成若干个小距离段,得到长线路运行下的集中 参数等值电路如图 2 所示。其中,*R*、*X_L、X_c*分别为 长线路的等值电阻、等值电抗、等值容抗。

从图 2 可以看出,长距离输电线路下系统的对 地容抗大大提高,且分裂导线的使用可相对减小线 路电抗值,即与大地平行的长距离输电线路最终类 似于在线路与大地间并联了一个大容抗值的电容。 由长线路运行带来的容升效应可知,电容补偿无功 后将大大提升线路末端电压 $U_0 \circ U_0$ 加在空载变压 器上达到一定值时可能造成变压器工作磁通密度增 加、铁心饱和,即产生变压器过励磁现象,严重影响 变压器绝缘。

在此基础上,此时如再操作线路 5011 开关,在 切断空载变压器的过程中还可能出现幅值较高的操 作过电压 *U*₁,它与 *U*₀叠加后所产生的过电压 *U* 值 将更大,从而对变压器及整个系统的安全运行造成 极大的威胁。

另外值得一提的是:考虑到变压器本质上相当 于一个感性负载,在与长距离输电线路对地的等值 电容参数配合下,在进行操作时是否还可能形成振 荡回路产生谐振现象出现严重谐振过电压? 若*L*、*C* 参数匹配,符合谐振回路构成的条件,产生的过电压 还将包括因谐振引起的谐振过电压(实际可达3倍 左右),最后叠加产生的过电压 *U*很可能达到6倍 的额定电压以上。这也是一个值得思考和分析的问 题。

②线路 5011 开关、桥 5012 开关
 在操作完线路 5011 开关后,运行方式为: 绵阳・81・



图 2 输电线路集中参数等值电路

线、2 号主变压器带全站负荷,此时切除桥 5012 开 关对系统过电压及变压器绝缘影响并不大。操作过 程中若1号主变压器发生故障,保护跳 5012 而该开 关拒动,则2号主变压器也将被迫停电,从而引起全 站失电。但该类事件为概率性事件,发生的可能性 较小,但这也对桥开关的保护配置、功能回路提出了 更高的选择性、灵敏性要求。

方案 2: 先停低压侧 再停高压侧 后停中压侧

前面在变压器操作的原则中已经提到 500 kV 对电源侧、负荷侧没有明显的范围界定。华中电网 就 500 kV 变压器操作顺序规定为: 500 kV 停(送) 电 220 kV 解(合) 环。逆向思维从送电角度出发思 考 500 kV 变压器应从高压侧送电,主要基于以下 因素考虑: ①是变压器高压侧电流小, 且都配备有完 整继电保护 合高压侧开关逐步送电时若发生故障 可以查看是哪步操作导致的故障以及时排查 此时 低压侧未带负荷不会出现高压侧保护动作用负荷的 情况:②若是从低压侧送电,此时高压侧开路,带负 荷合高压侧开关对主变压器冲击合闸时所产生的励 磁涌流很大,由此带来的电动力对变压器的机械强 度也是一个巨大的考验,不利于变压器的长期运行, 且此时主变压器故障还可能造成甩负荷。综合上述 分析可知,变压器宜从高压侧送电,停电则顺序相 反。特殊情况下需要先从高压侧停电时桥 5012开 关与线路 5011 开关的操作顺序同样也影响到变电 站安全运行。

③线路 5011 开关、桥 5012 开关

这种情况下,操作先拉开线路 5011 开关后,变 电站运行方式变为一条线路带两台主变压器供全站 负荷,此时若1号主变压器发生故障,保护装置若正 确动作跳开桥 5012 开关及中压侧 201 开关(5011 开关及 301 开关已经断开),对本次倒闸操作的安 全影响相对较小;若此时桥 5012 开关失灵拒动,则 断路器失灵保护动作还将导致2号主变压器失电, •82• 引起全站停电。因此,此种操作方式并不能满足变 电站安全运行的需要。

④桥 5012 开关、线路 5011 开关

停电操作拉开桥 5012 开关后,由两条线路带两 台变压器并列运行的方式1变成了两条线路分别带 两台主变压器运行的方式4,供电可靠性并不受影 响,且由于 220 kV 还有部分负荷,此时再操作线路 5011 开关,即使1号主变压器故障跳闸,对运行安 全并没有多大的影响。

3 优化方案

通过以上多种操作方案的对比分析,可将各利 弊总结归纳如表1。

衣」	主受压器停电探作力条的利弊对几

		运	行方式							
操作	两	两条线路带两台主变压器并列运行								
	方案	操作顺序	危险点	推荐 方案						
	方案1	① 301 - 201 - 5012 - 5011	操作引起过电压 过高 <i>威</i> 胁变压器 绝缘							
1号主	方案2	② 301 - 201 - 5011 - 5012	开关拒动可能引 起全站失电	\checkmark						
变压器 由运行 转冷备用		③ 301 - 5011 -	先停高压侧,冲击 电流大,威胁变压 器绝缘;开关失灵							
		5012 - 201	拒动可能引起全							
		④ 301 -	站失电 先停高压侧 ,冲击							
		5012 – 5011 – 201	电流大 <i>威</i> 胁变压 器绝缘							

从上述方案对比可知,内桥接线方式下的变压 器停电操作宜按低压侧、高压侧的顺序,高压侧则应 先操作线路侧开关,后操作桥开关,以避免操作引起 的过电压对变压器的绝缘水平造成威胁,最后再操 (下转第91页)

参考文献

- [1] 郝巍,李兴源,金小明,等. 直流输电引起的谐波不 稳定及其相关问题[J]. 电力系统自动化,2006,30 (19):94-99.
- [2] 林莘,孟涛,徐建源,等.快速暂态过电压对断路器
 中并联电容的影响[J].高电压技术,2009,35(10):
 2361-2365.
- [3] 聂定珍,袁智勇. ±800 kV 向家坝—上海直流工程换 流站绝缘配合[J]. 电网技术,2007,31(14):1-5.
- [4] 周沛洪,修木洪,谷定燮,等. ±800 kV 直流系统过
 电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术,2006,32
 (12): 125-132.

(上接第82页)

作主变压器高压侧隔离刀闸以隔离主变压器。若主 变压器停电操作后还需对停电线路恢复供电,还应 及时操作线路开关以切实达到操作目的,但应注意 设计各类保护的动作配合,及时投切相关保护功能。





同时 从以上多种操作方案存在的危险点分析 中可以看出 桥开关是保证供电可靠性的重要因素。 从图 3 绵阳一南坝一广元局域电网的分布图可知, 在以上各类方案的操作过程中,1 号主变压器的停 电操作导致武昭停电后,广元站由富乐变电站通过 乐昭一线单线供电,广元站就 500 kV 部分形成孤网 运行方式,若此时乐昭一线线路跳闸,而保护及重合 闸未正确动作或误动作,广元站 500 kV 部分两条进 线全部断电,将大大降低变电站供电可靠性,更有严 重者将导致变电站乃至广元局域电网大面积停电, 对电力系统的经济运行造成巨大损失。

4 防误操作措施

变电站倒闸操作的正确性是确保变电站安全可 靠运行的关键,内桥接线方式下的变压器防误操作 显得更为重要。综上分析,可采取下列措施切实保 证供电可靠性。

(1) 严防误拉合主变压器高压侧隔离开关。由

- [5] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC-HVDC系统仿真研究[J].电网技术,2005,29 (8):45-50.
- [6] 周宗川,王勇,周建丽. ±660 kV 换流变电站 330 kV 交流场启动过电压仿真分析[J]. 宁夏电力,2011 (1): 26-30.

作者简介:

冷怡(1981),工程师,主要从事电压无功管理、工程项 目管理工作:

陈晓东(1976),高级工程师,主要从事电网规划设计、 工程管理等工作;

鲍云浮(1961),工程师,主要从事企业管理、电网规划 设计、工程建设管理等工作。 (收稿日期:2013-03-07)

于内桥接线的特殊性,运行时确保变压器高压侧隔 离开关的正确操作是非常重要的环节,即该刀闸的 基本操作条件是:只有在低、中、高压侧开关及桥开 关断开后才能进行操作。因此,必须对该刀闸及相 关设备的五防、间隔逻辑及有关电气联锁固化,确保 联锁条件的正确无误。

(2) 对于程序化操作方式而言,应根据不同的运行方式拟定正确的操作步骤,并定期对程序化逻辑进行复查与审核。在对运行人员的技术或专题培训中,还应定期进行学习、演练,以提高值班人员的正确操作及应急处理事故能力。

(3)内桥接线的停送电操作必须提前考虑全网系统的潮流走向及运行方式,对操作过程中可能存在的隐患和问题要及时分析,并汇报各省调部门,避免出现操作过程中站内设备的正常运行。

5 结 语

500 kV 变电站采用内桥接线方式具有一定的 特殊性,从停送电操作方面对各方案的优劣进行了 分析和比对,并综合实际情况对操作方案进行了合 理优化,为变电站值班员的倒闸操作提供了一定辅 助决策,切实提高变电站安全操作水平。

参考文献

- [1] DL/T 572-2010 , 电力变压器运行规程 [S].
- [2] 王辑祥.电力接线原理及运行[M].北京:中国电力出版社 2005.

作者简介:

庄秋月(1986),女,工程师,现从事电力系统变电运行 管理工作;

李凡红(1984),男,工程师,现从事电力系统继电保护 及控制方面的工作。

(收稿日期:2013-03-26)

• 91 •

变压器电介质频率响应测试系统研制

刘 君 张华强 王 华 胡敏恒 李 波 (成都电业局 四川 成都 610041)

摘 要:为将电介质频率响应法的变压器绝缘状态评估应用于生产实际,阐释了电介质频率响应原理,研制了微电流测 试系统、信号采集、信号处理、上位机软件等组成的电介质频率响应系统,并应用于现场 220 kV 变压器状态测试评估。 关键词: 变压器; 电介质频率响应; 复电容; 油纸绝缘

Abstract: In order to apply the insulation condition evaluation of transformers in dielectric frequency response method to the actual operation, the theory of dielectric frequency response is introduced firstly. Then the dielectric frequency response system is studied which consists of the micro current measurement system, signal acquisition, signal processing and software etc. At last, the system is applied to the field testing and evaluation for the condition of 220 kV transformers.

Key words: transformer; dielectric frequency response; complex capacitance; oil - paper insulation

中图分类号: TM845 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0083 - 04

变压器承担着电压的转化及能量传输,是电力 系统最重要设备之一,其绝缘状态关系着牵引供电 系统运行的安全性及可靠性。变压器长期经受过负 荷冲击 绝缘故障(尤其是绕组变形等机械作用引 起的绝缘故障)的发生频率较高^[12]。油纸绝缘状 态及其性能将严重影响变压器绝缘的电气寿命和机 械寿命 如何对变压器油纸绝缘状态进行评估一直 是业内广泛关注的技术难题^[3,4]。变压器绝缘状态 评估传统测试法(如绝缘电阻测量、介质损耗正切 测量等) 局限于单个信息,提供的绝缘信息少,所受 干扰因素多 难以建立绝缘状态与测试结果对应关 系。电介质响应法作为一种新的绝缘测试方法,其 研究始于 20 世纪 80 年代 ,90 年代后回复电压法、 极化去极化电流法等时域电介质响应法陆续涌 现[56] 而频率响应法由于所获信息量大、测试电源 电压低而受到广泛关注^[7-9]。因此有必要开展电介 质频率响应法的变压器绝缘状态评估^[9,10]。下面阐 释了电介质频率响应原理 研制了微电流测试系统、 信号采集、信号处理、上位机软件等组成的电介质频 率响应系统,并应用于现场 220 kV 变压器状态测试 评估。

1 电介质频率响应原理

在平板电容两端加上时变电压 U(t) 将产生空

间均匀电场 $E(t) = U(t) / d_{t} d$ 为电极间距离。电极 两端产生电位移 D(t),由真空即时贡献 $\varepsilon_0 E(t) (\varepsilon_0$ 为真空介电常数) 和惯量延迟的极化响应 P(t) 所组 成^[11,12],即

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) P(t)$$
(1)

根据电介质物理 极化响应的傅里叶变换可表 示为^[19]

$$p(\omega) = \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{\infty} - 1 + \chi(\omega) \right] E\omega$$
 (2)

式中 \mathscr{E}_{∞} 为极高频介电常数; ω 为角频率; $\chi(\omega)$ 为频 率相关的复极化系数。

由于麦克斯韦方程式定义的全电流包括电导电 流及位移电流^[19],即电流密度为

$$J = \sigma_0 E + \partial D / \partial t \tag{3}$$

式中 σ_0 为直流电导率 ,式(3) 的傅里叶变换为

$$J(\omega) = \sigma_0 E(\omega) + j\omega D(\omega)$$
 (4)

即

$$J(\omega) = j\omega\varepsilon_0 \left\{ \varepsilon_{\infty} + \chi(\omega) - j\left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega} + \chi''(\omega)\right] \right\} \cdot E(\omega)$$
$$= j\omega\varepsilon_0 \left[\varepsilon'(\omega) - j\omega''(\omega)\right] E(\omega)$$
(5)

式中 $\varepsilon(\omega)$ 为复介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 实部; $\varepsilon''(\omega)$ 为虚 部; 复极化常数的实部表示了位移电流与激励电场 垂直的部分,对损耗无贡献; 而其虚部给出了位移电 流与激励电场同相位的部分,为损耗部分。因此 极 化过程可以通过测试激励电压下的响应电流幅值和 相位来研究^[11,12]。系统响应电流为

• 83 •

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left\{ \varepsilon_{\infty} + \chi(\omega) - j \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right] \right\} \cdot U(\omega)$$
$$= j\omega \left[C'(\omega) - jC''(\omega) \right] \cdot U(\omega)$$
$$= j\omega C(\omega) U(\omega) \tag{6}$$

式中 $I(\omega)$ 为响应电流; $U(\omega)$ 为激励电压; C_0 为几 何电容; $C(\omega) \ C''(\omega)$ 分别为复电容 $C(\omega)$ 的实部 及虚部。在不同频率范围内 油纸复合绝缘老化、温 度、微水含量将改变其值。

2 电介质频率响应测试系统

所研制的电介质频率响应测试系统包括微电流 测试系统、信号采集、数据处理、上位机软件等 图 1 为装置系统图。



图1 电介质频率响应测试系统图

2.1 微电流测试系统

变频驱动系统采用 XD5A 超低频信号发生器, 频率范围为0.001~1000 Hz,误差为<1.5%,最大 输出电压/电流为100 V /50 mA,正弦信号失真度 为<0.2%。如果测试对象的电容为1000 pF 根据 欧姆定律,流过试样电流为

$$I = U \bullet j\omega C \tag{7}$$

在 0.001 Hz , 驱动电压 100 V 情况下 ,流过的电 流为 0.628 × 10⁻⁹ A。因此 ,响应信号非常微弱 ,测 得的信号非常容易受到外界噪声干扰。因此 ,对信 号提取以及信号调理电路要求非常高。

(1) 信号提取

根据图 1 所示的电介质频率响应现场测试系统 图 测试对象为流过待测试样的微电流。为方便测 量 通过 *I* – *V* 转换电流将待测电流信号转换为电压 信号。反馈电流放大型测量电路在频率响应特性及 转换线性方面的优异性能 ,测量电路的设计是基于 反馈式电流放大器型 *I* – *V* 转换电路 ,如图 2 所示。 根据电路原理 ,可以得出

$$V_{\rm O} = -I_{\rm S}R_{\rm f} \tag{8}$$

Rf <u>Is</u> V_o

图 2 I – V 转换电路原理

根据需要放大倍数,通过选取适当的 *R*_f 值即可 实现。微电流测试时,运放的输出误差还受失调电 压 *V*_{os}、偏置电流 *I*_b 影响,选择的运放需满足:偏置 电流 *I*_b < 被测电流 *I*_s 输入阻抗 *R*_i >> 反馈电阻 *R*_f; 增益、共模抑制比高;失调电压及漂移小;噪声小。 因此 根据以上所提到的对运放的要求,该测试仪选 用 TI 公司的 OPA128LM 低噪声放大器。

(2) 信号放大

由于 *R*_f 一般达到 M 级,其杂散电容使测试信 号产生畸变。图 3 所示的电路为杂散电容消除电 路 其中 *C*_f 为电路中的杂散电容 *R*₁ 与 *C*₁ 为外加 的 RC 网络。通过调整电阻 *R*₁ 和电容 *C*₁ 的取值 , 使其满足

$$R_1 C_1 = R_f C_f \tag{9}$$

从而达到消除寄生电容的影响。



图 3 杂散电容消除电路

由于待测电流信号为 10^{-9} A,所需放大倍数较高,设计两级放大电路。系统电路如图 4 所示,通过 一个 500 MΩ 电阻和 120 pF 的电容的并联电路作为 油纸复合绝缘的模型, R_f 为 10 MΩ,其引入的杂散 电容通常为 0.5 pF,则根据式(5)~(3)选取 R_1 为 5 kΩ C_1 为 1 nF 配合组成杂散电容消除电路;在第二 级放大电路中,放大倍数为 R_3/R_2 = 10,其阻值分别 为 100 kΩ 和 10 kΩ,由于这两个电阻为 kΩ 级,故其 杂散电容可忽略不计,微电流测试电路如图 4 所示。

• 84 •



图4 系统电路原理图

2.2 数据采集

数据采集是采用 NETVI – 4712 型 8 通道数据 采集仪。其采样频率为 2.5 K ~ 50 M ,A/D 分辨 率为 12 bit ,直流精度为 ± 0.2% (FS) ,交流精度 为 ± 0.5% (1 000 Hz) ,通道间相差 < 1° (3 × 10⁵ Hz) 输入信号带宽为 0 ~ 15 MHz。采集软件是基于 DaqView 2.11 为基层软件开发 ,系统能够对不同频 率条件下的介质响应信号采集 ,其采集界面如图 5 所示。



图 5 数据采集界面

2.3 上位机软件

采用 C + + builder 编制上位机软件,对采集信 号进行处理。通过几何可换算为复介电常数,通过 测试输出电压与微电流幅值及相角差来计算待测对 象复电容的实部及虚部,并可通过几何 C₀ 按式(6) 换算为复介电常数。输出电压与微电流之间的相角 利用过零比较法得到,上位机界面如图 6 所示。

所建立的电介质频率响应现场测试系统如图 7 所示。系统测试频率范围为 0.001 ~1 000 Hz ,最大 输出电压/电流为 100 V /50 mA ,测试对象范围为 100 pF ~100 μF。



图 6 测试系统上位机软件界面



图 7 电介质响应现场测试系统

3 变压器电介质频率响应测试

基于电介质响应的基本原理,选取两台 220 kV 油浸式变压器进行电介质响应测试,进行电介质频率 响应测试评估。1 号变压器投运时间为 2009 年 9 月, 2 号变压器投运时间为 2004 年 8 月。变压器停电后, 解除连接在变压器高低压套管的所有引线,将变压器 整体隔离,低压侧套管并联,高压侧套管并联,对高低 压套管间变压器主绝缘进行电介质频率响应测试,接 线方式如图 8 所示,测试结果如图 9 所示。

由图9可以看出,所研制的变压器电介质频率 响应测试系统能有效地测试出 220 kV 变压器主绝 缘电介质频率响应。由于1号主变压器投运时间较 2号主变压器晚5年,测试结果能反映出1号主变 •85•

压器绝缘状态优于2号主变压器。



图 9 变压器高低压绕组主绝缘电介质频率响应

4 结 论

根据电介质理论,阐释了电介质频率响应原理, 研制了微电流测试系统、信号采集、信号处理、上位 机软件等组成的电介质频率响应系统,并应用于现 场 220 kV 变压器主绝缘电介质频率响应测试。所 研制的变压器电介质频率响应测试系统能有效地测 试出 220 kV 变压器主绝缘电介质频率响应。测试 结果能反映其绝缘状态。

参考文献

- M. Wang , A. J. Vandermaar , K. D. Srivastava. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service [J]. IEEE Elec. Insul. Mag. ,2002 18(6):12 – 25.
- [2] L. E. Lundgaard , W. Hansen , D. Linhjell , T. J. Painter. Aging of Oil – impregnated Paper in Power Transformers [J]. IEEE Trans. Power. 2004 ,19(1):230 – 239.
- [3] 刘君,吴广宁,周利军,等.油纸绝缘体系微水扩散的 分子模拟[J].高电压技术,2010,36(12):2907 -2912.
- [4] T. K. Saha , Z. T. Yao. Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service – aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery , 2003 , 18(1): 128 – 135.
- [5] T. K. Saha ,P. Purkait. Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil – paper Insulation of Aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144 – 154.
- [6] Linhjell D ,Lundgaard L. Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(1):156-169.
- [7] Jun Liu Lijun Zhou ,Guangning Wu et al. Dielectric Frequency Response of Oil – paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012 ,19(2):510-520.
- [8] S. L. M. Berleze R. Robert. Response Functions and After – effect in Dielectrics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2003 ,10(4):665-669.
- [9] J. Blennow, S. M. Gubanski. Field Experiences with Measurements of Dielectric Response in Frequency Domain for Power Transformer Diagnostics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006 21 (2):681-688.
- [10] L. J. Zhou ,G. N. Wu ,J. Liu ,Modeling of Transient Moisture Equilibrium in Oil – paper Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2008 ,15(3): 872 – 878.
- [11] Jonscher A K. Dielectric Relaxation in Solids [M]. London: Dielectrics Press Limited ,1996: 66 – 110.
- [12] 殷之文. 电介质物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003:57-65.

作者简介:

刘 君(1984),男,博士,主要从事高压电气设备绝缘 状态评估及其方法研究。

(收稿日期:2013-04-22)

• 86 •

对一起换流站交流滤波器低端电容器击穿事故分析

冷 怡 陈晓东 鲍云浮 (泸州电业局 四川 泸州 646000)

摘 要: 就一起换流站交流滤波器低端电容击穿事故展开分析,利用 PSCAD/EMTDC 软件建立电容器的电磁暂态模型开展仿真计算,得到了故障相的操作过电压,最后根据计算结果找出了故障原因,并为避免类似故障再次发生提出 改进建议。

关键词:交流滤波器;击穿;仿真

Abstract: A breakdown accident of a lower capacitor of AC filter that happened in a converter station is introduced. A simulation model of electromagnetic transient is established with PSCAD/EMTDC for the capacitor to analyze the process of the accident, thus the switching overvoltage of fault phase is obtained. And the fault reason is found out according to the calculation results, which gives the improvement suggestions to avoid the similar accident again.

Key words: AC filter; breakdown; simulation

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0087 - 05

0 引 言

在高压直流输电系统中,由于换流阀由开关器 件构成,会在交流侧产生大量的谐波,会对电网的输 电品质及现场的通信设备造成极大危害,这就需要 在交流侧接入滤波器滤除特征谐波^[1];同时,换流 器在运行过程中需要消耗换流容量40%~60%的 无功,这也需要交流滤波器来提供。直流输电系统 的运行性能和安全可靠程度与交流滤波器的运行状 态密切相关。

1 事故介绍

1.1 事故经过

2011 年 10 月 18 日 00:05,某换流站双极功 率由1 841 MW 升至2 041 MW,在双极功率值升 至1 847.5 MW 过程中,5633 交流滤波器自动投 入运行,此时监控系统报"5633 交流滤波器低端电 抗器电流异常",现场检查发现低端电抗器、电流互 感器 T2、C2 电容器外观无异常,用钳形电流表测量 T2 二次端子发现 C 相无电流,A、B 相电流正常。

将 5633 交流滤波器停电后,对 5633 C 相 T2 电

流互感器进行了绝缘、耐压、变比、二次直阻、伏安特 性等试验,试验数据合格;对与 T2 电流互感器电气 相连的低端电抗器 L2 进行直流电阻试验,试验数据 合格;对与电抗器 L2 及 T2 的串联支路相并联的 C2 电容器组(由两只电容器并联)进行测试,发现其中 一只已经导通,同时检查 F2 避雷器 C 相动作 1 次 (A 相、B 相未动作)。滤波器的接线方式如图 1。

更换故障电容器后 ,5633 交流滤波器重新投入 运行时,监控系统再次报 "5633 交流滤波器低端电 抗器电流异常",停电后现场检查发现 5633 交流滤 波器 C 相 C2 两只电容器均已导通,电容器外观无 明显异常; C 相 F1、F2 避雷器各动作 1 次,A、B 相 F1、F2 避雷器未动作。

1.2 主要元件工况

该滤波器支路的相关元件配置情况及历年工况 如下。

1.2.1 选相合闸装置

5633 交流滤波器的断路器配置了选相合闸装 置,其选相逻辑为在每相电压过零点附近投入该相 断路器,控制方式为定角度控制。查阅首检后历次 5633 交流滤波器投入时的故障录波记录,发现每次 投入时 <u>C</u> 相断路器的合闸角及合闸时对应的系统 电压值均明显大于 A₅B 两相 具体表1 中所示。

• 87 •



图 1 5633 交流滤波器接线图 表 1 5633 断路器的历次合闸时刻及对应的系统过电压值

日期	时间 -	合闸滞机	后于电压过零点时	寸间 /ms	回路接通时对应的系统电压值 /kV				
	비가 [8]	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相		
2011年6月5日	08:13	1.3	1.4	3.1	181.2	177.1	363.7		
2011年7月2日	21:52	1.0	1.6	2.5	124.3	194.7	316.0		
2011年7月5日	21:52	1.1	1.8	2.5	139.0	219.5	307.2		
2011年7月8日	21:52	0.8	1.5	2.5	104.6	191.5	311.1		
2011年7月21日	00:47	1.6	1.5	2.0	225.8	188.5	255.9		
2011年10月18日	00:05	1.5	1.2	3.8	189.5	153.1	402.9		
2011年10月19日	18:27	1.1	1.0	3.6	149.8	140.2	395.4		

1.2.2 断路器

5633 交流滤波器的断路器型号为 LW10B – 550YT 配进口 ABB 弹簧贮能液压机构。对比该断 路器技术协议、现场交接试验、首检试验的数据,发 现 5633 交流滤波器的断路器合闸时间满足要求,合 闸同期性与技术要求相符。

1.2.3 避雷器

表 2 F1、F2 避雷器动作次数统计

		截止20	011.5.2	8 首检时	截止 2011. 10. 20 时			
		A 相	B相	C 相	A相	B相	C 相	
动作	F1	14	15	27	14	15	33	
次数	F2	13	13	14	13	13	16	

5633 交流滤波器的高端避雷器 F1 型号为 Y71WL5 – 142/373 低端避雷器 F2 型号为 Y7.6WL5 -40/89。从 2011 年 5 月首检至事故发生时的避雷 器动作次数统计情况如表 2 中所示。从表 2 的统计 结果可见: C 相避雷器的动作次数远高于 A、B 两 相,这说明在滤波器投切过程中 C 相发生过电压的 概率远高于 A、B 两相。

1.2.4 低端电容器 C2

C2 电容器为两只电容器并联结构 ,C2 电容值 为 10.74 μF。C2 两端的操作冲击电压为 60 kV ,最 大持续电压为 6.1 kV。

2 事故原因分析

查看 5633 投入的故障录波图 C 相断路器在电压过零点后 3.8 ms 及 3.6 ms 才出现合闸电流。与 A、B 相比较 C 相合闸角明显偏大。

据此 推测可能是选相合闸装置或断路器 C 相故 障 导致 C 相合闸角偏大 ,合闸瞬间电压过大 造成滤 波电容被击穿^[2]。于是查阅首检后历次 5633 交流滤 波器投入时的故障录波 ,发现每次投入时 ,C 相断路 器的合闸角均明显大于 A、B 两相。首检后 5633 共计 7 次投入运行 除 2011 年 7 月 21 日 00:47 投入时 ,C 相合闸时刻为电压过零点后 2.0 ms 对应电压瞬时值 为 255.9 kV ,F1 避雷器未动作外 ,其余 6 次合闸时间 均大于 2 ms ,对应的电压瞬时值均高于 300 kV ,C 相 F1 避雷器均发生动作。首检后 F2 避雷器共计动作 2 次 ,且均伴生 C2 击穿现象。根据 F2 避雷器动作情 况 ,可以初步确认 C2 存在过电压现象^[3-4]。

F1 避雷器的 3 mA 参考电压为 201 kV。根据 故障录波图,A、B 相断路器在选相合闸装置作用 下,于电压过零点1.0~1.5 ms内合闸,对应的 500 kV 母线电压瞬时值为 131.12~192.64 kV,小于 201 kV;而 C 相断路器于电压过零点 3.6~3.8 ms 内合闸,对应的 500 kV 母线电压瞬时值为 395.4~

• 88 •

402.91 kV,远大于201 kV。因此,在F1 避雷器的动作特性下,选相合闸装置的正常工作是保证F1 安全运行的必要条件。

根据 5633 断路器交接、首检及本次断路器机械 特性试验记录,交接试验时 C 相断口合闸时间为 61.2 ms、61.8 ms,首检试验时 C 相断口合闸时间为 63.0 ms、63.0 ms,本次诊断试验时 C 相断口合闸时 间为 63.1 ms、63.3 ms,C 相断路器合闸时间增加超 过 1.5 ms,大于预期值(合同规定为小于 1 ms),也 导致了选相合闸控制效果不佳。

此外 C2 电容器极板间操作冲击电压耐压值为 60 kV。根据厂家提供的 F2 伏安特性 在 7.6 kA 电 流下 F2 的操作冲击残压为 89 kV 200 A 电流下的 残压为 77 kV。F2 残压偏高也可能是造成 C2 击穿 的原因。

3 建立仿真模型

为定量计算合闸过程中在低端电容器 C2 上产 生的操作过电压大小,在电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 中建立仿真模型,以复现故障发生 时以及不同合闸条件下在 C2 上产生的操作过电 压^[5-6]。



根据该换流站电气接线方式及设备基本参数, 建立仿真模型如图 2 所示: 直流为双极 12 脉动结 构,直流系统送端采用定电流控制,受端采用定熄弧 角控制,仿真中考虑换流变压器的饱和特性,换流站 无功补偿情况视直流传输功率而定。

4 仿真结果

4.1 事故模拟

设置仿真条件为: 在投入 5633 交流滤波器前, 直流传输功率为1 845 MW 换流站投入无功补偿容 量 8 × 155 Mvar,换流母线初始工作电压为 534.0 kV。投入 5633 交流滤波器,其 A 相、B 相断路器合 闸滞后于电压过零点时间分别为 1.2 ms 和 1.1 ms, C 相断路器合闸滞后于电压过零点时间为 3.6 ms。 合闸时刻设置与 10 月 19 日故障录波装置采集到的 数据相同,以便重现故障过程。

经过仿真计算,对比 A、B、C 相曲线可发现,由 于 C 相合闸滞后时间远大于 A、B 两相,造成其合闸 过程中产生了较为严重的操作过电压。C 相操作过 电压值达到了 82.7 kV,高于滤波器低端电容器 C2 的耐压水平 60 kV,如图 3 所示。

在合闸过程中,A、B 相的避雷器 F1、F2 均未动 作,C 相的 F1、F2 均动作,合闸过程中 C 相 F1 产生 的能量为 10.61 kJ,F2 产生的能量为 0.47 kJ,如图 4、图 5 所示。虽然避雷器 F1、F2 对低端电容 C2 起 到了一定的保护作用,但 C2 上的瞬时过电压仍高 达 82.7 kV,避雷器残压过高导致了 C2 被击穿。 4.2 合闸滞后时间与操作过电压的关系

令 A 相、B 相断路器合闸滞后于电压过零点时 间分别为 1.2 ms 和 1.1 ms 改变 C 相合闸时间得到 C 相低端电容器操作过电压值与合闸滞后时间的关 系 计算结果如表 3 所示 其对照关系如图 6 所示。

在滞后时间小于 2 ms 时,低端电容器两端操作 过电压值基本与其呈线性关系,当滞后时间为 1.5 ms 时,过电压值达到 60.7 kV,已经超过低端电容器 的耐压值。而当滞后时间为 3.6 ms 时,操作过电压 值达到 82.7 kV,已远超低端电容器的耐压值。

5 结论及建议

采用定熄弧 电磁暂态仿真结果表明,交流滤波器低端电容 特性,换流站 操作过电压值与其断路器闭合时刻滞后电压过零点 合闸滞后时间与操作过电压间的关系

合闸滞后时间 /ms	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
操作过电压值 /kV	4.33	20.7	41.3	60.7	76.3	82.1	82.7	82.7	82.8	82.6	82.8

• 89 •



(3) 滤波电容与避雷器间的配合应合理、可靠, 选用避雷器的残压应小于低端电容器的耐压值,使 避雷器起到应有的保护作用。

• 90 •

大的合闸冲击 使 C 相低端电容上产生较大的操作

过电压。虽然合闸过程中 C 相的避雷器 F1 和 F2

参考文献

- [1] 郝巍,李兴源,金小明,等. 直流输电引起的谐波不 稳定及其相关问题[J]. 电力系统自动化,2006,30 (19):94-99.
- [2] 林莘,孟涛,徐建源,等.快速暂态过电压对断路器
 中并联电容的影响[J].高电压技术,2009,35(10):
 2361-2365.
- [3] 聂定珍,袁智勇. ±800 kV 向家坝—上海直流工程换 流站绝缘配合[J]. 电网技术,2007,31(14):1-5.
- [4] 周沛洪,修木洪,谷定燮,等. ±800 kV 直流系统过
 电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术,2006,32
 (12): 125 132.

(上接第82页)

作主变压器高压侧隔离刀闸以隔离主变压器。若主 变压器停电操作后还需对停电线路恢复供电,还应 及时操作线路开关以切实达到操作目的,但应注意 设计各类保护的动作配合,及时投切相关保护功能。





同时 从以上多种操作方案存在的危险点分析 中可以看出 桥开关是保证供电可靠性的重要因素。 从图 3 绵阳一南坝一广元局域电网的分布图可知, 在以上各类方案的操作过程中,1 号主变压器的停 电操作导致武昭停电后,广元站由富乐变电站通过 乐昭一线单线供电,广元站就 500 kV 部分形成孤网 运行方式,若此时乐昭一线线路跳闸,而保护及重合 闸未正确动作或误动作,广元站 500 kV 部分两条进 线全部断电,将大大降低变电站供电可靠性,更有严 重者将导致变电站乃至广元局域电网大面积停电, 对电力系统的经济运行造成巨大损失。

4 防误操作措施

变电站倒闸操作的正确性是确保变电站安全可 靠运行的关键,内桥接线方式下的变压器防误操作 显得更为重要。综上分析,可采取下列措施切实保 证供电可靠性。

(1) 严防误拉合主变压器高压侧隔离开关。由

- [5] 梁海峰,李庚银,李广凯,等.向无源网络供电的 VSC-HVDC系统仿真研究[J].电网技术,2005,29 (8):45-50.
- [6] 周宗川,王勇,周建丽.±660 kV 换流变电站 330 kV
 交流场启动过电压仿真分析[J].宁夏电力,2011
 (1):26-30.

作者简介:

冷怡(1981),工程师,主要从事电压无功管理、工程项 目管理工作:

陈晓东(1976),高级工程师,主要从事电网规划设计、 工程管理等工作;

鲍云浮(1961),工程师,主要从事企业管理、电网规划 设计、工程建设管理等工作。 (收稿日期:2013-03-07)

于内桥接线的特殊性,运行时确保变压器高压侧隔 离开关的正确操作是非常重要的环节,即该刀闸的 基本操作条件是:只有在低、中、高压侧开关及桥开 关断开后才能进行操作。因此,必须对该刀闸及相 关设备的五防、间隔逻辑及有关电气联锁固化,确保 联锁条件的正确无误。

(2) 对于程序化操作方式而言,应根据不同的运行方式拟定正确的操作步骤,并定期对程序化逻辑进行复查与审核。在对运行人员的技术或专题培训中,还应定期进行学习、演练,以提高值班人员的正确操作及应急处理事故能力。

(3)内桥接线的停送电操作必须提前考虑全网系统的潮流走向及运行方式,对操作过程中可能存在的隐患和问题要及时分析,并汇报各省调部门,避免出现操作过程中站内设备的正常运行。

5 结 语

500 kV 变电站采用内桥接线方式具有一定的 特殊性,从停送电操作方面对各方案的优劣进行了 分析和比对,并综合实际情况对操作方案进行了合 理优化,为变电站值班员的倒闸操作提供了一定辅 助决策,切实提高变电站安全操作水平。

参考文献

- [1] DL/T 572-2010 , 电力变压器运行规程 [S].
- [2] 王辑祥.电力接线原理及运行[M].北京:中国电力出版社 2005.

作者简介:

庄秋月(1986),女,工程师,现从事电力系统变电运行 管理工作;

李凡红(1984),男,工程师,现从事电力系统继电保护 及控制方面的工作。

(收稿日期:2013-03-26)

• 91 •

环境湿度对实验室工频电场强度测量结果的影响研究

兰新生 林巧红,刘 虹,周易谦,王方强,王 杰 (四川电力科学研究院,四川,成都 610072)

摘 要:采用对工频电场强度测量传感器密封与不密封的两种方式,分析了实验室内 EHP-50C 传感器工频电场强度 测量结果受环境湿度的影响程度,做出了 EHP-50C 传感器工频电场测量结果受环境湿度影响程度的明确结论,并给 出了测量结果受环境湿度影响的数值范围。

关键词:湿度;工频电场强度;测量结果

Abstract: The influences of environmental humidity on the measurement results of power – frequency field intensity of EHP – 50C sensor in the laboratory are analyzed with the two ways of sealed sensor and non – sealed sensor. The clear conclusion is obtained that the measurement results of power – frequency field intensity of EHP – 50C sensor are affected by the influence of the environmental humidity. The numerical range of measurement result affected by environmental humidity is also given. **Key words**: humidity; power – frequency field intensity; measurement result

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 04 - 0092 - 03

随着输电线路不断向大容量和超(特)高压发展。社会各界对输变电设施电磁环境问题广泛关注^[1-2];同时周边居民对输变电工程的环保投诉日益增多,其中大多数居民反映高压输电线路工频电场和工频磁场对其生活或身体的影响。工频电场强度作为电力工程环保验收评价的重要指标,对于电力工程环境保护工作的评判具有重要的意义。

在工频电场强度的现场测量过程中发现,同一 高压输电线路在相同运行工况(电压和电流)、同一 测点使用同一测量设备在不同环境湿度下测试时, 工频电场强度测量结果可达日常平均值的2~8 倍^[4-5],且远远高于国际大电网会议推荐方法的计 算值。针对这一问题,国内众多学者进行了研 究^[6-9],但仍未提出在不同环境湿度下准确测量工 频电场强度的可行方法。

经过研究发现 环境湿度从两个方面使测量结果 与正常情况差别较大。一是影响测量设备的电场强 度传感器; 二是改变输电线路对地电场的强度分布。 基于此 ,实验采用传感器密封与否两种方式 ,用标准 电场中不同空气介质湿度下的测量结果 ,分析环境湿 度对工频电场强度测量设备传感器的影响程度。

1 实验室实验介绍

1.1 标准电场

• 92 •

根据 DL/T 988 - 2005《高压交流架空送电线 路、变电站工频电场和磁场测量方法》附录 A 中所 述方法构建标准电场。实验采用 2 m × 2 m 的两块 平行极板,间距 0.8 m,调整施加在极板上的电压而 改变标准电场强度。



图 1 用于校准电场测量仪的平行极板

1.2 工频电场测量设备

工频电场强度测量系统采用国际知名的纳达公司制造的 PMM8053B 主机和 EHP – 50C 传感器组成。

1.3 实验原理及过程

将密封与不密封的传感器放入平行极板中央 在 恒定电场(2.5 kV/m)下,保持环境温度不变,调整环 境湿度(40%~75%)获得测量系统对工频电场强度 的测量结果。

表1 密封情况下不同环境湿度工频电场强度测量结果									
 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电场标准值 /(kV・m ⁻¹)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
环境相对湿度 /%	44.3	48.1	52	57.4	60.0	61.3	62.7	65.0	70.8
测量结果 /(kV • m ⁻¹)	3.05	3.05	3.04	3.08	3.05	3.04	3.04	3.08	3.09
表 2 不密封情况下不同环境湿度工频电场强度测量结果									
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电场标准值 /(kV・m ⁻¹)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
环境相对湿度 /%	39.7	40.7	41	44.6	47.5	49.5	50.2	51.1	53
测量结果 /(kV • m ⁻¹)	2.56	2.45	2.48	2.50	2.51	2.50	2.50	2.51	2.51
序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
电场标准值 /(kⅤ・m ⁻¹)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
环境相对湿度 /%	54.7	56.3	57.9	59.1	59.8	61.9	63.2	65	65.4
测量结果 /(kV • m ⁻¹)	2.51	2.52	2.56	2.66	2.70	2.71	2.72	2.74	2.75
序号	19	20	21	22	23				
电场标准值 /(kⅤ・m ⁻¹)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5				
环境相对湿度 /%	67.3	68.1	69.2	70.7	74.6				
测量结果 /(kV • m ⁻¹)	2.76	2.78	2.78	2.80	2.81				







图 3 不密封情况下不同环境湿度工频电场强度相关图

2 工频电场强度测量结果

工频电场强度测量结果如表 1、表 2、图 2、图 3 所示。

3 数据分析

从表1数据和图2曲线直观地看出,实验室测

量条件下 密封电场强度传感器时 测量结果不随环 境湿度的变化而变化。而表 2 数据和图 3 曲线表 明,实验室条件下,不密封电场强度传感器,相对湿 度超过55%时,测量结果随着环境湿度增大而迅速 增高;在相对湿度小于55%时,测量结果保持恒定 且与标准电场数值非常吻合。结合电场强度经典物 理学公式: *E* = *U*/*d* 可知,电场强度仅与极板电压和 极板间距有关,与空气介电常数无关。

4 讨 论

(1)实验室测量条件下,密封 EHP - 50C 传感器时,工频电场强度测量结果不随湿度变化而变化, 且系统误差保持稳定,易可靠校准。这对改进传感器提供了重要依据。

(2)实验室测量条件下,未密封 EHP - 50C 传 感器时,测量系统工频电场强度测量结果在环境相 对湿度小于55%时不随环境相对湿度变化而变化, 并且与标准值高度吻合;在环境相对湿度大于55% 时,测量结果随环境相对湿度的变化而迅速变化。

(3) 以上两点说明,在实验室条件下,PMM8053B 和 EHP - 50C 传感器组成的工频电场强度测量系统, 当相对湿度小于 55% 时,测量结果不受湿度的影 响;当相对湿度大于 55% 时,测量结果随环境湿度 的增加而逐渐增大,在试验的最高相对湿度 75% 时 相对误差也最大,为 12%。

• 93 •

(4) 试验时,湿度采用相对湿度表示,但对测量 结果影响的本质因素是绝对湿度。在均匀电场中, 电极间介质变化对电场的改变是一致的,试验结果 可以充分说明,电场强度传感器需要防止湿度的影 响。现场测量结果达到2~8 倍误差的原因,应该涉 及其他因素,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 邵方殷. 交流线路对平行接近的直流线路的工频电磁 感应[J]. 电网技术 ,1998 22(12):61-65.
- [2] 黄道春 ,阮江军 ,文武 ,等. 特高压交流送电线路电磁 环境研究[J]. 电网技术 2007 ,31(1):6-11.
- [3] 国家环境保护局. HJ/T 10.2 1996 辐射环境保护管 理导则一电磁辐射测量仪器和方法[S]. 北京: 中国标 准出版社,1996.
- [4] 国家环境保护局. HJ/T 24 1998 500 kV 超高压送变 电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S]. 北京: 中

(上接第49页)

相比没有优化的含风机的配电网,电压幅值有了进 一步的提高,系统总的有功网损也有了显著的降低。 采用改进的粒子群算法对含风机的配电网进行潮流 优化不但没有增加潮流收敛需要的迭代次数,而且 有效地降低了系统的有功网损,提高了节点电压幅 值。证明所使用的潮流优化方法是正确的。



5 结 论

研究了计及风机并网的配电网潮流优化方法, 通过比较分析风电场并网潮流计算的几种常用模型,选用带补偿电容的风机稳态等值模型作为研究 对象,并采用改进的粒子群算法对风机并网的配电 网潮流进行了优化。仿真实验结果表明,该算法可 行,对于减少网络的功率损耗和提高节点电压幅值 有显著的作用,为各种 DG 的并网优化运行提供了 国标准出版社,1998.

- [5] 施东风,孙沙青,王冲,等.不同布置方式 220 kV 变电 所对周围环境的电磁辐射分布[J].环境测量管理与 技术 2007,19(2):44-51.
- [6] 庄振明 谢咏梅 ,宋永忠 ,等. 解决电磁辐射分析仪测 量值偏高的方法[J]. 环境测量管理与技术 ,2008 ,20 (4):70-71.
- [7] 彭继文 周建飞 周年光 等. 湿度对 500 kV 超高压交 流架空送电线路区域电磁环境的影响研究 [J]. 电网 技术 2008 32(增刊 2):237-239.
- [8] 俞集辉 郑亚利 徐禄文 等. 湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. 重庆大学学报 2009 32(2):137-140.
- [9] 何家宁 Daniel Tao 涨宗华 筹. 电选机电场强度与相对 湿度之间的关系 [J]. 金属矿山 2006 360(6):27-29.

作者简介:

兰新生(1979),男,高级工程师,目前主要从事电力环 境测量与治理工作。 (收稿日期:2013-04-22)

理论和方法参考。

参考文献

- [1] 陈述勇 宋书芬 李兰欣 ,等. 智能电网技术综述 [J].
 电网技术 ,2009 ,33(8):1-7.
- [2] 雷亚洲.与风电并网相关的研究课题[J].电力系统自动化,2003,27(8):84-89.
- [3] 李新 彭怡,赵晶晶,等.分布式电源并网的潮流计算 [J].电力系统保护与控制,2009,37(17):78-81,87.
- [4] 徐娇 李兴源. 异步发电机组的简化 RX 模型及潮流计 算[J]. 电力系统自动化, 2008 32(1):22-25.
- [5] 陈琳 种金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功 优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 30(14): 20-24.
- [6] 刘洋,康凯,王邦惠,等.含风电系统的潮流计算分析[J].山东电力技术,2009(4):21-24.
- [7] 胡敏 周任军 杨洪明 ,等.考虑风力发电的系统无功 优化模型和算法 [J].长沙理工大学学报:自然科学 版 2009 6(1):43-48.
- [8] 王守相 江兴月 ,王成山. 含风力发电机组的配电网潮 流计算[J]. 电网技术 2006 ,30(21):42-45 ,61.
- [9] 刘述奎. 基于自适应聚焦粒子群算法的电力系统无功 优化[D]. 成都: 西南交通大学 2009.
- [10] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等 教育出版社 2007.
- [11] 顾威,李兴源,魏巍.异步发电机稳态模型研究[J]. 四川电力技术,2009,32(3):20-24.

作者简介:

程站立(1985),男,硕士研究生,主要从事配电网潮流 优化、分布式发电技术研究。

(收稿日期:2013-03-26)

• 94 •