

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

Sieyuan

更安全 更可控 更高效

- 集成产品开发系统
- 博士后科研工作站
- 产品全生命周期管理系统
- 产品全面通过KEMA权威认证
- 高压电器工程技术研究中心
- 国家火炬计划重点高新技术企业

220kV云南曲靖金钟变电站



向全球客户提供一流的电气设备与服务，帮助客户安全、可靠、高效地使用和维护电力。

■ 思源高压 ■ 思源清能 ■ 思源弘瑞 ■ 思源赫兹 ■ 思源储能 ■ 思源电容器 ■ 如高高压 ■ 思源输配电 ■ 一分公司

思源电气股份有限公司
SIEYUAN ELECTRIC CO., LTD.

电话: 021-61610502
地址: 上海市华宁路3399号

销售热线: 021-61610977
邮编: 201108

网址: www.sieyuan.com
E-mail: webmaster@sieyuan.com

ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.36
2013
No.1

四川电力送变电建设公司



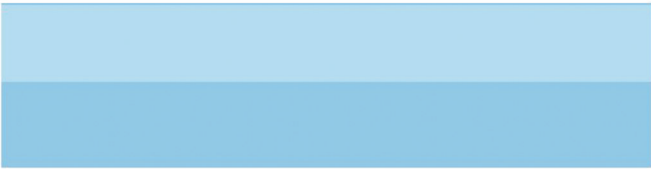
地址：成都市建设南支路2号

电话：028-62729799

传真：028-62729555

作为“西电东送”的重要组成部分，锦屏送出工程的建设将成为四川水电送出的枢纽通道，它将通过锦苏线这条“电力高速公路”把电能源源不断地输送到华东等地区。由国家电网四川电力送变电建设公司负责施工的锦裕线、锦乐线5、6标、锦西线1、3标等锦屏送出工程，线路全长277km，塔基679座，跨越了近30km无人区。工程沿线地势高差悬殊，沟谷纵横，山势陡峻，一级级索道横跨于悬崖绝壁之上，形成了有效运输网络，为施工建设推波助力。对于超长、超重物资和设备，人力及骡马运输根本无法实现，索道运输效率低下。该公司全面学习分析国内外先进施工经验，经过前期研讨和分析，首次采用直升机在高山地区的峡谷中运输物资，这一措施大大缓解了高山无人区运输大件的难题，为锦屏送出工程按期完成奠定了基础。







城电设计
CHENGDIAN DESIGN

成都城电电力工程设计有限公司



公司领导班子



设计人员探讨设计方案

公司于1954年成立，2003年取得设计、勘测、咨询“乙级”资质，2012年取得了国家住建部颁发的电力行业送电、变电甲级工程设计、工程勘察工程测量专业“甲”级、国家发改委颁发的工程咨询甲级资质，公司通过了ISO质量、环境、职业健康安全管理体系认证。2012年成为四川省电力技术经研院的设计中心；具有60年从事送变电勘测、设计、工程咨询的经验，是专门从事220kV 及以上电力工程勘察设计、工程咨询项目总承包服务的机构。

成都城电电力工程设计有限公司，秉承国家电网公司“努力超越 追求卓越”的企业精神，努力提升公司全方位的形象与实力。

为了使命 我们壮志凌云！

为了责任 我们情怀依旧！



甲级正本



设计甲级 正本



户外GIS变电站



110KV GIS屋外配电装置



苏场变电站220kV 主变压器及防火墙联合构架



220kV 苏场变电站220线路与10kV 电容器组



勘察甲级 正本



质量管理体系证书



职业健康安全体系认证证书



环境管理体系认证证书

四川省电机工程学会

2012年学术年会在成都召开



2012年12月7日，四川省电机工程学会2012年学术年会在成都召开。

会议上半场由四川省电机工程学会副理事长刘俊勇主持，四川省电机工程学会副理事长、四川省电力公司总工程师刘勇代表王平理事长做了热情洋溢的致辞。刘勇副理事长希望各位会员能借助学术年会这个平台，自由、深入地进行学术交流和技术研讨，拓展知识领域，探索创新思路。

本次年会作为四川省电机工程领域学术交流的一次盛会，得到了各理事单位、专委会以及广大会员的高度重视和积极参与。大会共征集论文158篇，内容覆盖电力生产各个环节以及智能电网发展、工程设计、规划等多个领域，是历年来投稿单位最多、覆盖专业最广的一次。经过单位申报、学术专委会推荐、专家评审，最终评选出一等奖3个、二等奖6个、三等奖9个以及6个优秀组织奖。会上对获奖单位及个人颁发了奖状。

随后，由四川省电机工程学会副秘书长、四川省电力公司科技信通部主任田立峰主持会议。四川电力经济技术研究院院长朱国俊、四川电力科学研究院副院长常晓青、四川大学电气信息学院院长刘俊勇、西南交通大学电气工程学院副教授解绍锋分别作了“四川电网发展及近期热点问题”、“特高压与智能电网调试关键技术研究与应用”、“智能电网的发展及其实践”、“电气化铁路同相供电技术”的学术年会主旨报告。4个报告内容紧扣当前电力行业的发展趋势，几位专家各抒己见，大会现场学术氛围浓厚。

四川省电力公司科技信通部贺含锋处长和东方电气集团电气室况明伟主任还分别介绍了新成立的电力系统智能化专委会、电气制造和新能源专委会的组织结构、学术方向和学术活动计划。

最后，副理事长兼秘书长袁邦亮对会议进行了总结，他希望广大电力科技工作者要勇敢地肩负起时代重任，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，拓展学术活动领域，提高学术活动的质量和水平。

E6000手持式电能质量分析仪

智能精准，一览无疑

达到IEC 61000-4-30 A级标准

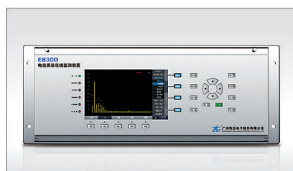
ZLG 更多产品信息,请浏览:

<http://www.zlg.cn>

搜索



E8000单回路在线监测装置



E8300多回路在线监测装置



E6000手持式电能质量分析仪



E6100便携式电能质量分析仪



周立功 教授

中国计算机学会中国微机(嵌入式系统)专委会常务理事
国家级卓越工程师实践教育中心主任

符合全新的国际标准

符合电能质量测量国际标准IEC 61000-4-30
符合电能质量测量国际标准IEC 61000-4-15
符合电能质量测量国际标准IEC 61000-4-7
符合国际标准IEC 61010-1:2001安全等级
CAT III 1000 V / CAT IV 600 V

认证

通过专业检测机构的型式实验认证
通过国内高级别的IEC 61850一致性测试

领先技术

高速同步采样专利技术
多核处理并行计算技术
高速可靠的网络通讯技术
嵌入式实时操作系统技术
高精度数据采集技术

欢迎免费试用

诚招代理商和项目合作伙伴
致远电子致力于电力自动化产品研发与服务

欢迎拨打免费服务热线
400-888-4005

广州致远电子股份有限公司

代理洽谈: 020-28267813 销售电话: 020-28262524 22644261 技术支持: 020-28267856
地址: 广州市天河区车陂路黄洲工业区7栋2楼 邮编: 510660 传真: 020-28267891 技术支持邮箱: PQ@zlg.cn

CONTENTS

Application Research of Electromechanical and Electromagnetic Transient Hybrid Simulation in Loop Closing Analysis of Power Grid	Hu Lijin Chang Xiqiang Zhou Mao et al(1)
Grid Integration Method of DFIG and Its Simulation Analysis	Guo Dawei Wang Weiqing Zhang Xinyan(7)
Overview of Crowbar Protection for Doubly - fed Wind Turbine Generating System	Wei Lili Chao Qin Yuan Tiejia(12)
Research on Wind Power Forecasting Problem Based on Neural Network	Zhang Tao Zhang Xinyan Wang Weiqing(16)
Selection of Voltage Class and Conductor Cross - section for HVDC Transmission Project from Xinjiang to Sichuan	Tang Quan Deng Yingying Dai Songlin et al(19)
Impact of HVDC Transmission Project from Xinjiang to Sichuan on Sichuan Power Supply and Analysis on Location of HVDC Conversion Station	Meng Jing Tang Quan Du Xinwei et al(25)
Research and Development of Protective Relaying Life - cycle Information Management and Statistical Analysis Module Based on OMS of Sichuan Provincial Dispatching Center	Wang Yunli Zhang Lie Shen Hua(29)
Analysis on Load Characteristics of Xinjiang Electrified Railway and Its Impact on Regional Power Grid Based on Probability and Statistic	Yin Xin Zhang Shaozhou Liu Hongli et al(33)
Research on Optimal Capacity Configuration of Hybrid Wind/PV/Energy Storage System	Zhang Zhongwen Cao Dun Peng Changwei et al(37)
Thinking of Integration Method for Large - scale Wind Farm When Connecting to Grid	Shi Yajuan Wang Haiyun Chang Xiqiang(44)
Analysis on Capacity Credit of Photovoltaic Power Generation	Zhou Zhuhan Yao Xiuping Chang Xiqiang(48)
Study on Modeling and Control Strategy for Single Machine Infinite Bus System with Unified Power Flow Controller	Deng Dalei Wang Ben Fu Yongliang(53)
Online Detection, Identification and Correction for Bad Data of Power System Based on Support Vector Machine	Bao Yongjin(59)
Application of Interval Combination Model to Medium and Long Term Load Forecasting	Xu Zhixiang(64)
Discussion on Commissioning Technology of Secondary System in Smart Substation	Zhao Zihan(70)
Tracking Control and Synchronization of Ferro - resonance Chaotic Phenomenon in 110 kV Substation	He Bo Kang Jitao Zhang Huazhi et al(73)
Measuring Method for Dielectric Loss Factor of Main Capacitance in 220 kV Capacitor Voltage Transformer	Ma Shouxiao Su changsheng Zhang Yunfeng et al(77)
Impact Analysis of Electromagnetic Environment for a 220 kV Quadruple - circuit Transmission Line on the Same Tower in Sichuan and Its Protective Measures	Nan Fang Zhang Yajun Jiang Nanxi(81)
Matlab Simulation for Active Power Filter	Gao Yong(84)
Research on Numerical Simulation of Vortex Pulverized Coal Burner with Tiny - oil Ignition of W Flame Boiler and Its Application	Pu Xuesen Xiao Hongbo Qian Feng et al(87)
Cause Analysis and Troubleshooting for Abnormal Load Rise of Turbine Governor	Tang Jieyang Li Tiantian Mao Chenggang et al(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2013 Vol. 36 No. 1

(Ser. No. 223)

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

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2013 年第 36 卷第 1 期(总 223 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028) 87082037

传 真:(028) 87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 21*

2013-02

目 次

• 基金项目 •

机电-电磁暂态混合仿真在电网合环分析中的应用研究

..... 胡立锦 常喜强 周 茂 等(1)

双馈异步风力发电机的并网方式研究及仿真分析

..... 郭大伟 王维庆 张新燕(7)

双馈风电机组中 Crowbar 保护综述 魏丽丽 晁 勤 袁铁江(12)

基于神经网络的风功率预测问题研究 张 涛 张新燕 王维庆(16)

“疆电入川”直流输电电压等级及导线截面选型

..... 唐 权 邓盈盈 戴松灵 等(19)

• 输配电技术 •

“疆电入川”对四川电力供应影响及落点分析

..... 孟 婧 唐 权 杜新伟 等(25)

四川省调 OMS 系统继电保护全寿命周期信息管理及统计分析模块的研究与开发

..... 王云丽 张 烈 申 华(29)

基于概率统计的新疆电气化铁路负荷特性分析及对地区电网的影响

..... 印 欣 张绍洲 刘红丽 等(33)

风光储输系统最优容量配比研究 张钟文 曹 敦 彭长巍 等(37)

对大型风电场接入电网并网方式的思考 史亚娟 王海云 常喜强(44)

光伏发电容量可信度分析 周 专 姚秀萍 常喜强(48)

UPFC 单机无穷大系统建模与控制策略研究 邓大磊 王 奔 付永良(53)

基于支持向量机的电力系统不良数据在线检测辨识与修正 包永金(59)

区间组合模型在中长期负荷预测中的应用 徐志向(64)

智能变电站二次系统调试技术探讨 赵子涵(70)

110 kV 变电站铁磁谐振混沌现象的追踪控制与同步

..... 何 波 康积涛 张花芝 等(73)

220 kV 电容式电压互感器主电容介质损耗因数测试方法

..... 麻守孝 苏进胜 张云凤 等(77)

四川某 220 kV 同塔四回线路电磁环境影响分析及其防护对策

..... 南 方 张亚军 姜南希(81)

有源电力滤波器的 Matlab 仿真 高 勇(84)

• 发电技术 •

W 炉旋风微油煤粉燃烧器的数值模拟研究与应用

..... 蒲学森 肖宏博 钱 锋 等(87)

水轮机调速器负荷异常上升原因分析及处理

..... 唐杰阳 李甜甜 毛成钢 等(92)

《四川电力技术》投稿须知 (52)

机电-电磁暂态混合仿真在电网合环分析中的应用研究

胡立锦^{1,2}, 常喜强³, 周茂¹, 夏时宇¹, 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. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 电网带电合环是提高供电可靠性以及保障系统供电质量的一种重要方法。分析了纯机电暂态仿真和电磁暂态仿真的优缺点, 研究并提出了适合机电-电磁暂态混合仿真的网络等效方法和接口技术实现过程, 在此基础上, 提出基于 PSASP 平台的电网合环仿真计算系统设计思路。该系统运用机电暂态-电磁暂态混合仿真的方法来判断合环条件, 既可以反映特定系统中详细的电磁暂态变化过程, 又可仿真较大规模的电力系统, 无需等值且准确性较高。

关键词: 电网合环; 解决方案; 混合仿真

Abstract: Live loop closing in power grid is a vital way to improve the reliability of power distribution and ensure the quality of power supply. The advantages and disadvantages of the pure electromechanical transient simulation and the pure electromagnetic transient simulation are analyzed. The network equivalent method and the implementation process of interface technology suitable for electromechanical and electromagnetic transient hybrid simulation are studied and proposed. On this basis, the design ideas about simulation system of loop closing in power grid are put forward based on the PSASP platform. The system utilizes electromechanical-electromagnetic hybrid simulation to judge the condition of loop closing, which can not only reflect the electromagnetic transient state process but also can highly precisely simulate the large-scale system without equivalence.

Key words: loop closing in power grid; solution; hybrid simulation

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0001-06

0 引言

随着超高压、特高压骨干输电网络的不断建成和投运, 地区电网环状结构增多, 双电源或多电源供电越来越普遍, 通过合环操作实现不间断供电倒负荷和设备检修成为电网运行方式调整的一种必然趋势。然而, 合环操作过程中会造成馈线断路器两侧电磁突变并产生冲击环流, 合环电流造成的系统热稳定影响、联络阻抗易突增造成的联络线暂态稳定极限影响、系统潮流分配改变、联锁切机切负荷等安全自动装置拒动误动等对电网安全稳定运行造成严重威胁。由此可见, 合环操作在保证电网供电可靠性的同时, 又因环流等因素严重威胁到电网的安全稳定运行, 采取合理的手段更加真实和具体地研究合环问题对电网运行方式制定等具有实际的参考价值。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767003, 50867004)

文献 [1] 基于 PSASP 计算合环潮流, 采用忽略发电机模型中 q 轴的 g 绕组的作用, 采用恒定 E_d' 的五阶模型, 励磁和调速系统仍采用综合程序提供的典型模型参数。文献 [10] 采用实时数据及离线数据相结合的方法计算合环潮流, 其核心是对于进行合环分析的局部网络的所有运行数据采用实时数据, 而对于该局部网络以外的网络则依据离线数据进行网络等值。文献 [8] 利用叠加原理, 根据戴维南等效定律, 将合环前后电网等效成在合环之前。文献 [2] 利用 BPA 等离线计算软件通过合环后潮流和合环前的电压回推得出戴维南等值阻抗。文献 [9] 提出了天津开发区电网快速环流计算软件, 该软件结合了实时和离线数据, 能对电网各种工况下的环流进行计算分析。在进行次同步振荡等问题研究时, 电磁暂态网络包含有发电机, 采用文献 [1, 2] 所提出的等值电路, 电磁暂态网络等值为时变负荷(恒阻抗负荷, 或恒阻抗、恒功率、恒电流等相配比), 或是文献 [3] 所提出的等值电路, 电磁暂态网

络等值为时变电流源,都不能准确地描述该电磁网络的特性。

下面在研究机电暂态仿真和电磁暂态仿真的基础上,提出 PSASP 平台下基于机电-电磁暂态混合仿真的方法来实现对电网合环分析研究,即对需要研究的合环局部电网进行电磁暂态仿真以反映真实的合环过程中电气量的变化规律,而对其余大电网系统采用基于潮流的不等值机电暂态仿真,通过接口程序实现整个仿真系统的同步对接运行和数据交互。混合仿真方法既保证了电磁暂态过程的精细化要求,同时又避免了系统侧等值而产生的模型误差,具有一定的参考价值和现实意义。

1 机电暂态仿真与电磁暂态仿真

如图1所示,在电力系统仿真时,整个网络可分为两大部分:机电暂态网络和电磁暂态网络(图中所示为一个接口点情况)。

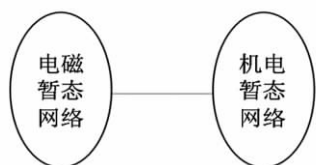


图1 网络分割示意图

常规仿真大多采用对非研究对象进行等值考虑:在进行机电暂态仿真研究时,将电磁暂态网络按戴维南电路等值,如图2(a)所示;在进行电磁暂态仿真研究时,将机电暂态网络进行诺顿电路等值,如图2(b)所示。

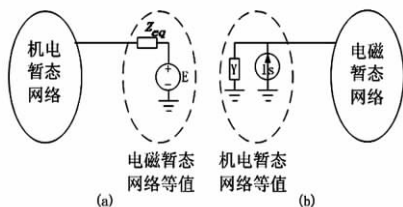


图2 网络等值图

但是单纯的机电暂态仿真和电磁暂态仿真面对更加多元化和复杂的现代电力系统网络表现出诸多不足:忽略电磁暂态网络进行机电暂态研究无法衡量柔性输电系统(FACTS)、超高压交直流输电系统以及风光储系统等不同环境和运行方式下对电网稳定性的影响。同时,以工频等值阻抗的形式表示机电暂态网络有其固有的局限性,其一,工频等值阻抗

并不能真实反映系统的谐波阻抗特性,对系统高频特性的描述并不准确;其二,以工频等值阻抗的形式表示机电暂态系统,有可能将系统中本来很小的特征谐波放大,有些系统中还有可能引起原系统并不存在的新的谐波。而进行电磁暂态研究时,若将机电暂态网络进行诺顿电路等值将进一步复杂网络的整体求解过程,加之电磁暂态研究仿真步长一般为50微秒级导致计算急剧膨胀,对仿真系统要求增加。

2 机电-电磁暂态混合仿真技术

混合仿真技术实现了在一次仿真过程中对大规模电网的机电暂态仿真和局部电网的电磁暂态仿真过程,对研究大电网环境下电力系统整体稳定性和局部动态特性有很强的现实意义和理论价值。

所提出的混合仿真过程实现原理如图3所示,以电磁暂态网络为参考点则机电暂态网络为一个戴维南电路,并向中间接口处发送阻抗和电势数据;而以机电暂态网络为参考点,电磁暂态网络为诺顿等效电路并向接口发送电压和电流数据。这种等值电路,对于网络为有源或无源网络情况都是适宜的。

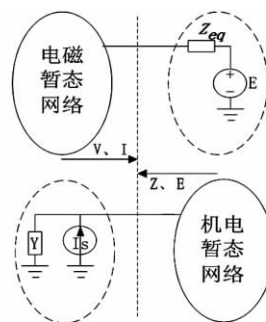


图3 混合仿真实现原理

为了提高混合仿真模拟精度,需要在原有对机电暂态系统进行工频等值的基础上添加频域等值功能。具体由以下几个步骤完成。

- 1) 对机电暂态系统进行频域扫描,计算出系统在接口点处的阻抗-频率特性关系。
- 2) 采用矢量匹配算法进行频率拟合,得到式(1)。

$$Z_{ep}(s) = d_0 + \frac{r_1}{s - a_1} + \frac{r_2}{s - a_2} + \cdots + \frac{r_N}{s - a_N} \quad (1)$$

- 3) 根据式(1)形成如图4所示的电阻、电感、电容元件组成的串并联等值网络。

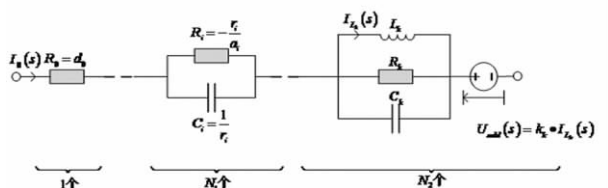


图4 等效阻抗网络

其中, $R_0 = d_0$, $R_k = \frac{-r_{kR}}{a_{kR}}$, $C_i = \frac{1}{r_i}$, $R_i = \frac{-r_i}{a_i}$,

$$k_k = \frac{-2a_{kR}Y_{kR} - 2a_{kI}r_{kI}}{a_{kR}^2 + a_{kI}^2}, C_k = \frac{1}{2r_{kR}}, L_k = \frac{2r_{kR}}{a_{kR}^2 + a_{kI}^2}$$

4) 将此电路作为机电暂态网络的等值电路, 接入电磁暂态网络共同计算。

3 机电-电磁暂态混合仿真接口数据交互实现

完成混合仿真最关键的技术在于实现接口处数据的交换与共享。

3.1 接口数据交互时序

由于机电暂态网络计算的步长大, 而电磁暂态网络计算的步长小, 通常以机电暂态步长为交互单位进行。机电暂态网络和电磁暂态网络的数据交换可采用如下的时序(以机电暂态网络计算步长为 $DTP = 0.01\text{ s}$, 电磁暂态网络计算步长为 $DTE = 0.001\text{ s}$ 为例)。

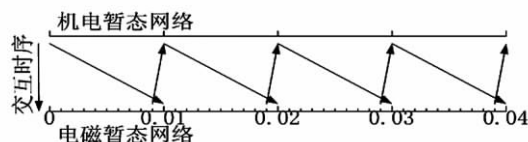


图5 接口数据交换时序

在 $t = N \times DTP$ 时刻两网络交换数据, 其中电磁暂态网络接收的是机电暂态网络在 $t - DTP$ 时刻的值, 机电暂态网络接收的是电磁暂态网络在 $t - DTE$ 时刻的值。

3.2 接口数据交互形式

机电暂态网络和电磁暂态网络的数据交换采用如下的数据形式: 初始化时机电暂态网络向电磁暂态网络发送(传递)机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵及正、负、零序等值电势的初始值; 在每一机电暂态网络积分步长, 机电暂态网络向电磁暂态网络发送(传递)边界点的正、负、零序等值电势, 电磁暂态网络向机电暂态网络发送(传递)边界点的

正、负、零序电压和电流。在有故障或操作导致机电暂态网络结构发生变化时, 机电暂态网络还需向电磁暂态网络发送(传递)机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵。

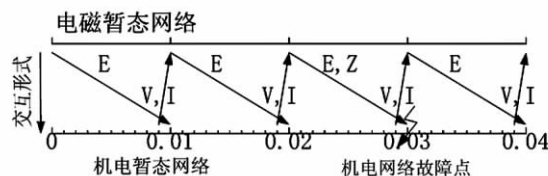


图6 接口数据交互形式

3.3 接口方法在仿真网络中的实现

机电暂态网络为三序相量网络, 而电磁暂态网络为三相瞬时值网络, 因此, 需要对机电-电磁暂态接口数据进行序-相变换及瞬时量-相量变换, 这部分工作由电磁暂态网络计算部分来完成, 主要有:

(1) 获得机电暂态网络的三序戴维南等值电势和阻抗后, 将其转换为三相瞬时值形式。

(2) 将边界点的三相电压、电流瞬时值转换为相量值, 再进一步转换为三序相量值。①通过傅里叶变换, 将电磁暂态网络边界点的 A、B、C 相注入电流瞬时值, 转换成相量值; 将电磁暂态网络边界点的 A、B、C 相注入电压瞬时值, 转换成相量值。②将边界点的 A、B、C 相电流、电压(相量)转换为正、负、零序电流、电压(相量)。

其流程图如图 7 所示: 接口模块首先接收机电暂态网络的边界点正、负、零序等值电势 E^i (相量形式, i 为序标), 然后结合机电暂态网络的边界点正、负、零序等值阻抗 Z_{eq}^i , 将其变换成 A、B、C 相电流源并联 A、B、C 相导纳的形式; 另一方面, 接口模块还要将电磁网络边界点的 A、B、C 相注入电流及 A、B、C 相电压瞬时值 V_{abc} 、 I_{abc} , 通过快速傅里叶变换得到向量电压和电流 $\vec{V}$ 、 $\vec{I}$ 后再转换成正、负、零序相量值 E^i 、 i^i , 并发送给机电暂态网络。完成一次信息交互后, 机电和电磁暂态网络继续进行下一个时步各自的计算。

3.4 不对称导纳的处理

若机电暂态网络中包括发电机, 机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗阵转换成 A、B、C 三相导纳阵后, 会出现导纳阵不对称的情况。假设图 8 中区域 A 代表电磁暂态网络, 区域 B 代表机电暂态等值网络; A 与 B 之间的边界点为 m (这里 m 不仅仅代表一个边界点, 而是代表边界点的集合), A 与 B 之

间将形成如图8所示的 $[k]$ 关联关系。

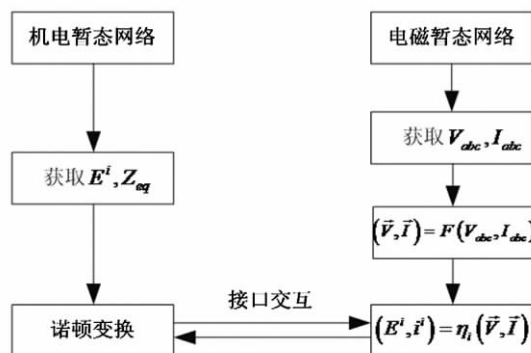


图7 接口模块交互流程

考虑到 q 为单位阵,可推得

$$(p^T Y_A^{-1} p + Y_B^{-1}) i_\alpha = Y_B^{-1} h_B - p^T Y_A^{-1} h_A \quad (2)$$

在仿真初始化时以及机电暂态网络或电磁暂态网络结构发生变化时刻进行LU分解式(2),其他时刻进行回代 i_α 计算各节点电压即可。

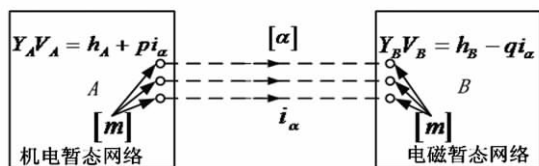


图8 机电-电磁接口示意图(节点分裂后)

4 机电-电磁暂态混合仿真在合环问题研究中的应用

4.1 合环问题的分类

根据不同的分类标准将合环问题按电压等级、合环模式以及电磁/非电磁情况进行分类。

(1) 按电压等级分类

目前,国内针对电网合环问题的研究多数着眼于配电网合环^[7-9],因为配电网一般采用环网设计、辐射运行的模式,即闭环结构,开环运行^[1],这种结构的电网合环问题出现的比较多。配电网按电压等级来分类,可分为高压配电网(35~110 kV)、中压配电网(6~20 kV)、低压配电网(380 V)等。

(2) 按合环模式分类

配电网合环问题一般可以分为以下3类^[14]。

①同一变电站同一区域的馈线合环,它们之间直接通过母联开关或联络开关进行合环操作,这类合环操作相对比较简单安全(直接合环)。

②同一变电站来自不同区域的馈线合环,合环母线的上一级电源来自不同的分区,它们之间直接通过母联开关或联络开关进行合环操作。

③不同变电站的馈线合环,合环母线属于不同变电站,馈线间通过联络开关进行合环操作^[1]。

(3) 其他分类

①电磁合环

从广义上说,凡是不同电压等级的网络相连,都可能出现电磁环网,电磁环网运行中,由于高一级电压线路断开造成负荷转移而造成的事故扩大,在国内外电力系统中已经出现过多次^[13-14],即使很强的电磁环网也有可能出现稳定问题。电磁合环问题的存在给现代电网的运行管理带来麻烦,也给电网的发展带来不确定因素。

②非电磁环网合环

非电磁环网合环是相同电压等级的电气元件组成的环网中出现的合环问题,此类合环问题在输电网和配电网中都会出现,与高压输电网络所采用的多环路网络结构不同,配电网采用更多的是辐射型、环式等结构方式。正常时,联络开关断开;当其中某一个站的出线开关需要检修或有其他突发事件时,先合上联络开关,再断开该站出线开关,通过另一个站的低压母线带上两端配电线路负荷,这就是配电网中的非电磁合环。

4.2 传统合环问题解决方案比较

传统合环问题解决方案大多基于经验估算、简单网络等值和机电暂态仿真等方法。由于电力系统本身的复杂性,调度运行人员根据自己的运行经验来判断系统是否可以合环操作容易引起连锁反应,导致系统大面积停电甚至系统解列,有较大的局限性。网络等值方法虽然在一定程度上解决了电网分析中计算速度与精度之间的矛盾,但同时牺牲了一定的系统动态特性,且该方法不能仿真合环操作对于整个系统稳定性的影响,因此不适用于电磁合环的模拟;未考虑外部网络模型,无法准确获得等值电势和等值阻抗,且不能用于大电网求解、冲击电流计算、谐波分析和三相负荷不对称的情形。而机电暂态仿真在时间刻度的描述上不够细致,并且由于其基于相量模型,不能够得到最恶劣的合环情况,并难以处理不对称负荷问题,不能计及合环操作时可能引入较多谐波分量,以及难以处理三相负荷不对称的情形。

4.3 基于 PSASP 的机电-电磁暂态电网合环仿真计算系统

这里提出采用机电-电磁暂态混合仿真的方法对电网合环仿真问题进行研究,基于 PSASP 和 Windows 平台设计仿真计算系统,顾全了计算速度的同时也保证了计算精度。

(1) 系统概述与仿真流程

系统架构如图9所示。

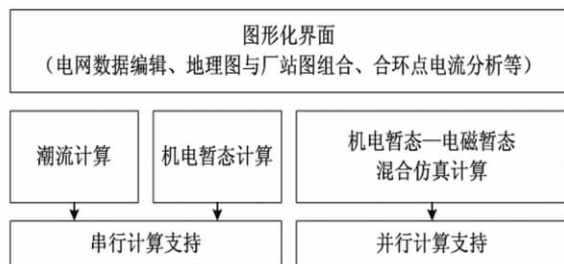


图9 合环电流仿真计算系统架构图

(2) 功能模块

合环电流仿真计算系统主要包含了以下功能模块:图形化界面、合环潮流、合环点电磁暂态网络自动划分(用户不可见)、机电暂态模型到电磁暂态模型自动转换(用户不可见)、串行合环暂态仿真(机电暂态仿真)、并行合环暂态仿真(机电暂态-电磁暂态混合仿真)。通过混合仿真中电磁暂态开关统计仿真功能,能够分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响。

(3) 合环潮流

合环潮流能够提供的计算结果包括常规潮流计算的结果,支路潮流(支路电流、输送功率)的对比查看,母线电压的对比查看以及合环潮流报告。报告中包括合环前母线电压差、合环前母线相角差、合环点电流值、过流保护定值、与保护定值的差值、与保护定值的差值(百分数)、合环操作是否可行等。

(4) 机电暂态仿真

合环机电暂态仿真能够提供的计算结果包括常规机电暂态仿真结果,自动监视合环点电流、输送功率以及合环计算报告。报告中包含合环点最大冲击电流值、合环点最大冲击电流百分数(相对于继电保护定值)、合环点稳态电流幅值、合环操作是否可行等。

(5) 机电-电磁暂态混合仿真

机电-电磁混合仿真流程图如图10所示,合环

混合仿真能够提供的计算结果包括以下几点:①合环点附近电压电流情况,包括合环点两侧合环前后的三相电流波形、三相电压波形以及三相电流幅值和三相电压幅值;②合环计算报告,其中包括合环点最大冲击电流值、合环点最大冲击电流百分数(相对于继电保护定值)、合环点稳态电流幅值以及合环操作是否可行;③提供开关统计功能,系统可以分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响,给出最恶劣的合环情况。

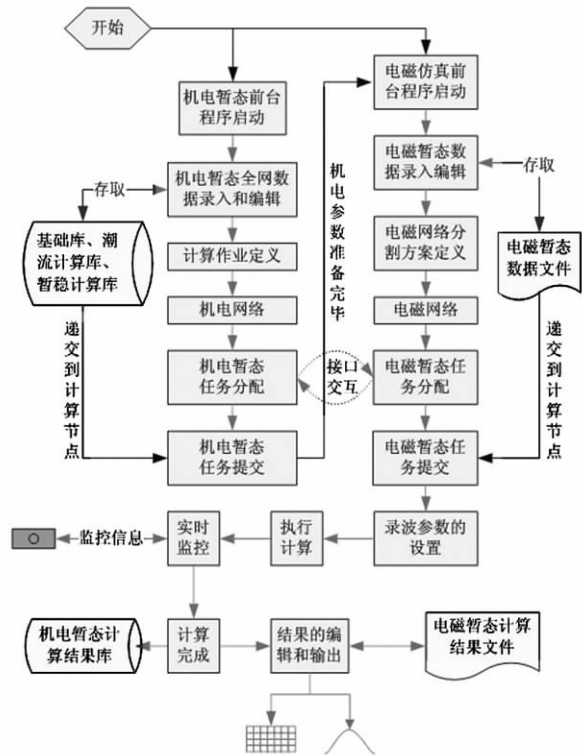


图10 机电暂态、电磁暂态混合仿真流程

4.4 电网合环操作仿真计算系统的优势与不足

本系统相较其他合环计算仿真系统,有以下几点优势:①采用的数据与 PSASP 7.0 数据兼容,方便用户调用数据;②仿真规模大(系统规模超过 10 000 个节点),采用的数据样本多;③采用全网络数据进行求解,无需等值,计算精度高;④能够精确得到合环操作的稳态电流和冲击电流;⑤能够计及谐波分量,既提高了计算精度又方便用户分析原因;⑥能够模拟不对称负荷,增大了系统对不同负荷情况的适用性;⑦通过混合仿真中电磁暂态开关统计仿真功能,能够分析并统计不同合环时刻对冲击电流幅值的影响;⑧能够清晰表示合环路径,界面更加直观。系统的不足之处在于该离线系统涉及到数据的维护。

5 结 语

电力系统环网运行势必产生合环问题,而随着电力系统的发展,城市电网传输的功率迅速增长,城市电网必须增建更高电压等级的送电线路,电磁环网的出现不可避免,带来的电磁合环问题则更加严重。电网合环后的稳态电流计算和合环冲击电流的计算都需要采用仿真软件或者潮流分析来实现,现有的仿真软件有些是应用于区域电网的,有些无法实现实时在线仿真,数据维护量比较大,计算速度和算法上也还有很多不尽人意的地方。于是提出了基于电磁暂态-机电暂态混合仿真方法的电网合环操作仿真计算系统设计思路,它基于 Windows 平台开发,是基于普通 PC 机的离线分析工具。既可以反映特定系统中详细的电磁暂态变化过程,又可仿真较大规模的电力系统,无需等值且准确性较高。

参考文献

- [1] 廖伟. 10 kV 配电网合环操作研究 [J]. 贵州电力技术, 2001, 13(4): 33-36.
- [2] 夏翔, 熊军, 胡列翔. 地区电网的合环潮流分析与控制 [J]. 电网技术, 2004, 28(22): 33-37.
- [3] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法 [J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60.
- [4] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电磁环网条件下西北 750 kV 电网运行方式的研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(15): 33-37.
- [5] 程林. 电磁环网解合环与控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [6] 葛少云, 李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 124-127.
- [7] Cheng C S, Shirmohammadi D. A Three-phase Power-Flow Method for Real-time Distribution System Analysis [J]. IEEE Transactions on Power System, 1995, 10(2): 671-679.
- [8] 胡立锦, 张新燕, 刘东强, 等. 备自投含风电时和常规能源不同备自投的考虑 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 120-124.
- [9] 强兴华. 地区电网合环操作的潮流近似计算 [J]. 江苏机电工程, 2002, 10(21): 39-40.
- [10] 叶剑, 陶玉华. 基于开口电压法的手工潮流计算方法 [J]. 上海电力, 2010(1): 52-55.
- [11] 张耀先. 天津开发区电网快速合环计算探讨 [J]. 天津科技, 2009(3): 69-71.
- [12] 夏翔, 周昱甬, 邱伟成. 地区弱电磁环网合环潮流探讨 [J]. 继电器, 2004, 32(23): 28-31.
- [13] 王庆, 应庆强, 摆存曦, 等. 银川地区 10 kV 配电网合环电流及计算方法的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 35(2): 41-44.
- [14] 冯静. 鹤壁配电网合环电流计算、分析及决策系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [15] 冯静, 张建华, 刘若溪. 基于 PSCAD 的配网合环电流分析 [J]. 现代电力, 2009, 26(3): 41-44.
- [16] 陈霄, 王磊, 李扬. 配电网合环冲击电流的分析 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 40-42.
- [17] 付轲, 蔡泽祥, 邱建, 等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 71-76.
- [18] 张祖平, 范明天, 周莉梅. 城市电网电磁环网的解环问题研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(19): 42-44.
- [19] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2007, 31(15): 61-65.
- [20] 朱晓荣, 赵猛, 王毅. 双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 20-29.
- [21] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 66-72.

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;

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;

周茂(1977), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电规划与设计;

夏时宇(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电规划与设计;

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: 2012-10-16)

双馈异步风力发电机的并网方式研究及仿真分析

郭大伟, 王维庆, 张新燕

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 分析并推导了双馈风力发电机的数学模型, 对常见的并网方式做了分析和比较。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了 DFIG 的软并网方式模型, 仿真了电机故障及风速变化时电机及电网侧所产生的冲击电流的大小。验证了软并网方式能够很好地抑制并网运行时冲击电流对大电网的影响。

关键词: 双馈发电机; PSCAD 仿真; 软并网; 冲击电流

Abstract: The mathematical model of doubly - fed induction generator (DFIG) is analyzed and derived. The common grid integration methods are also analyzed and compared. The soft grid - connection model of DFIG is established in the PSCAD/EMTDC environment. The impulse current generated at the generator side and the grid side is simulated when there is generator fault and the change of wind velocity, which proves that the proposed mode can well suppress the impact of impulse current on the big grid when DFIG is connected to the big grid.

Key words: doubly - fed induction generator (DFIG); PSCAD simulation; soft grid - connection; impulse current

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 01 - 0007 - 05

0 引言

风能作为一种安全、清洁、丰富的可持续能源, 已受到了广泛的重视和开发, 目前世界装机总量已经超过 25 GW。双馈风力发电机(doubly - fed induction generator, DFIG) 的定子直接与电网连接, 并通过交 - 直 - 交转子励磁变频器控制转子电流的频率、相位、幅值来间接调节定子侧的输出功率, 实现发电机的有功和无功功率解耦控制, 改善功率因数, 系统动态性能良好^[1]。

在 PSCAD/EMTDC 环境下建立了 DFIG 及相应的控制系统仿真模型, 并模拟仿真了 DFIG 的软并网过程, 对软并网仿真结果进行了分析和研究。

1 发电机的并网方式

1.1 并网的理论条件

发电机并网时, 为减小冲击电流及机械摩擦, 一般要求发电机端电压的相序、幅值、频率、相位角要与电网连接端的值相等^[2]。并网时其电压相量分析如图 1 所示。

并网前断路器两端发电机侧和电网侧的电压分别为^[3]

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51010105064, 2011211A016, BS100122)

$$u_M = U_M \sin(\omega_M t + \delta_M) \quad (1)$$

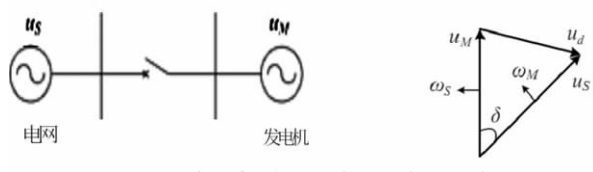


图1 发电机并网示意图及相量分析

$$u_s = U_s \sin(\omega_s t + \delta_s) \quad (2)$$

发电机与电网之间的电压差 u_d 为

$$u_d = u_M - u_s \quad (3)$$

合闸的理想条件是

- 1) 两电压幅值相等, 即 $U_M = U_s$;
- 2) 两电压角频率相等, 即 $\omega_M = \omega_s$;
- 3) 合闸瞬间的相角差为零, 即 $\delta = 0^\circ$ 。

1.2 常见并网方式

1.2.1 直接并网

当发电机的幅频相值跟大电网相等时, 即可通过开关或断路器直接跟主配网连接。这种并网方式投资省, 结构最简单, 但是灵活性不足, 可靠性较差。在并网瞬间就可能存在三相短路现象, 供电系统将受到 6 ~ 8 倍的发电机额定电流的冲击, 系统电压瞬时严重下降。因此这种并网方法只适用于发电机容量在百千瓦级以下而电网容量较大的情况。

1.2.2 降压并网

这种并网方法是在异步发电机与电网之间串接

电阻或电抗器或者接入自耦变压器,以达到降低并网合闸瞬间冲击电流幅值及电网电压下降的幅度。因为电阻、电抗器等元件要消耗功率,在发电机并入电网以后,进入稳定运行状态时,必须将其切除,这种并网方法适用于百千瓦级以上、容量较大的机组,显而易见这种并网方式经济性比较差。中国引进的200 kW 异步发电机组,就是采用这种并网方式,并网时发电机每相绕组与电网之间皆串接有大功率电阻。

1.2.3 自动准同期装置并网^[3]

发电机与大电网并网运行时,有一个重要的操作过程——同期并列操作,因此,可通过自动准同期并网装置进行并网。发电机的准同期判定条件包括电压差、频率差和相角差,发电机的差频并网也就是要在同期点两侧电压和频率接近时,通过预测两侧相角差为零的时刻来完成并列。发电机在孤岛模式下平稳运行,发出同期命令,当电压差、频率差不合格时,对发电机实现均频、均压控制,快速促成准同期条件的成立,加快自动并网的进程。当发电机与公用电网之间的电压差和频率差满足准同期条件时,自动提前发出合闸脉冲,使发电机和大电网在相位差满足相位差条件的瞬间并网。

1.2.4 捕捉式准同步快速并网

捕捉式准同步快速并网技术的工作原理是将常规的整步并网方式改为在频率变化中捕捉同步点的方法进行准同步快速并网。该技术可不丢失同期机,准同步并网工作准确、快速可靠,既能实现几乎无冲击准同步并网,又能很好地解决并网冲击与造价的矛盾,非常适合于发电机的并网操作^[4]。

1.2.5 晶闸管软并网

此种方法在 HVDC 中已得到广泛的应用,技术日趋完善。在发电机与大电网之间串入晶闸管控制系统,目的是通过控制晶闸管的导通角,将发电机并网瞬间产生的冲击电流限制在规定的范围内(一般为1.5~2倍额定电流以下),从而得到一个平滑的并网暂态过程。

前4种并网方式习惯上称为硬并网,因并网时伴随有冲击电流的可能性及潮流控制的困难性,这里提出基于电压源换流器(VSC)的软并网并网方式。

2 基于 PSCAD/EMTDC 的 DFIG 并网仿真

本例在 PSCAD / EMTDC 环境下,以基于 VSC

的并网方式搭建 DFIG 并网的模型。根据 DFIG 定转子的控制特性,整个系统采用电流闭环矢量控制。由检测到的电网三相电压,经变换得到定子磁链的相角,和转子电流一起经坐标变换和 PWM 调制产生驱动信号。DFIG 的数学模型及控制模块分别叙述如下。

2.1 双馈异步电机的数学模型

如果假设发电机为三相对称理想电机,不计零轴分量,以定子旋转磁场坐标系 $[d_e, q_e, 0]$ 为参考, d_e 轴超前轴 90° ,同时定义发电机吸收有功功率为正,则可得 DFIG 的数学模型为^[5]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{rd}' \\ U_{rq}' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/T_0 & -s \\ s & 1/T_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} + \frac{1}{T_0} \begin{bmatrix} 0 & x' - x \\ x - x' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -x' \\ x' & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, E_d' 、 E_q' 分别为 DFIG 暂态电势的 d_e 和 q_e 轴分量; U_{rd}' 、 U_{rq}' 分别为转子绕组虚拟电压的两轴分量; T_0 为转子绕组的短路时间常数; s 为转差率; x 是定子漏抗和激磁电抗之和; x' 为发电机暂态电抗; I_{sd} 、 I_{sq} 为定子电流的两轴分量; U_{sd} 、 U_{sq} 为定子电压的两轴分量; r_s 为定子绕组电阻。

其中,电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_{ds} &= p\psi_{ds} - \omega_1\psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} &= p\psi_{qs} + \omega_1\psi_{ds} - R_s i_{qs} \\ u_{dr} &= p\psi_{dr} - \omega_s\psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} &= p\psi_{qr} + \omega_s\psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

磁链方程为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ds} &= -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

电磁转矩和运动方程为

$$\left. \begin{aligned} p\omega_r &= (T_m - T_e) / J \\ T_e &= \frac{3}{2} N_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ \omega_s &= s\omega_1 = \omega_1 - \omega_r \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, s, r 为定子量和转子量; L_s, L_r, L_m 为定子自感、转子自感和定转子互感; $\omega_1, \omega_r, \omega_s$ 为电机同步角速度、转子角速度和转差角速度; T_e 为风力发电机电磁转矩; J 为发电机转动惯量; T_m 为风力发电机输入转矩; N_p 为极对数; θ_r 为定子磁链相角; p 为微分算子^[3]。

2.2 转子侧功率变换器矢量控制模型

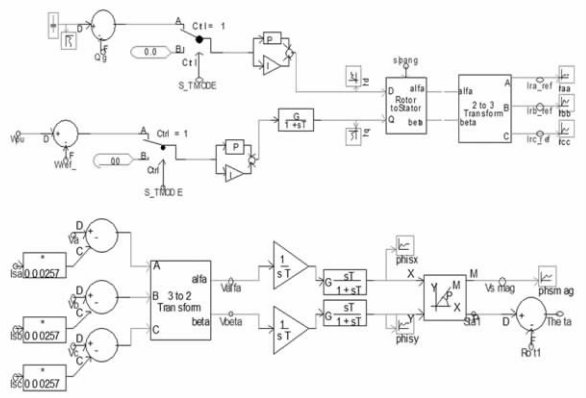


图2 基于PSCAD的转子侧变换器矢量控制模型

由于定子、转子保持同步才能形成稳定的电磁转矩,所以转子电流的同步信号 θ_{rot} 是由定子磁链位置角 θ_{sta} 减去转子磁链位置角 θ_{rot} 得到的, θ_{rot} 是通过发电机内部输出变量获取的。利用基于电流滞环控制的 PWM 技术控制机侧换流器,使转子电流等于参考电流值,从而完成对定子侧无功功率和发电机转速的独立控制。

2.3 网侧功率变换器矢量控制模型

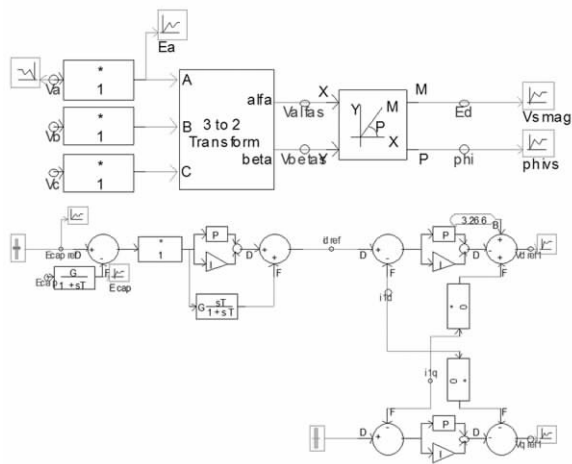


图3 基于PSCAD的网侧变换器矢量控制模型

网侧变换器采用电网电压定向的矢量控制,并采用前馈解耦控制以实现直流电压与无功功率的独立控制。矢量控制的输出为网侧变换器 dq 轴电压参考值,经过坐标变换输出三相电压给定值,给定电

压值与三角波发生器的输出比较得到网侧变换器 IGBT 的控制信号^[4]。利用 SPWM 技术控制换流器,即将调制信号与三角波载波相比较获得触发信号控制网侧换流器,从而实现直流电压和无功功率的独立控制。在图3中,信号 i_{dref} 以 $i_{\text{d}} - i_{\text{q}}$ 解耦控制的电压误差为驱动信号。

2.4 电压源换流器(VSC)并网装置

在 PSCAD 环境下,VSC 的模型如图4。

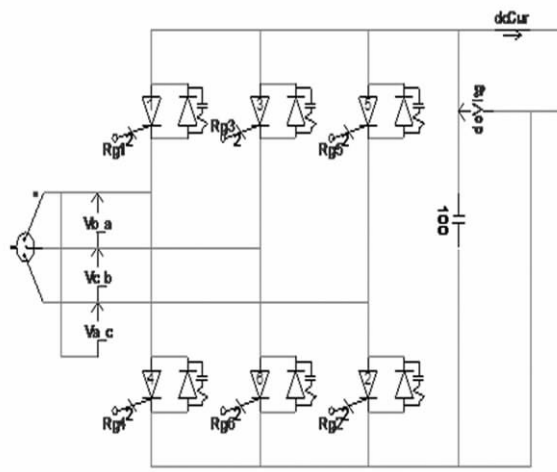


图4 VSC 系统整流侧模型

图4中为VSC装置的整流侧模型,逆变侧为其对称装置。VSC的门极控制脉冲采用SPWM控制方式^[5],即以与系统电压同相位的正弦波为调制波,以一频率为正弦波频率的整数倍的三角波为载波进行调制,原理如图5所示。

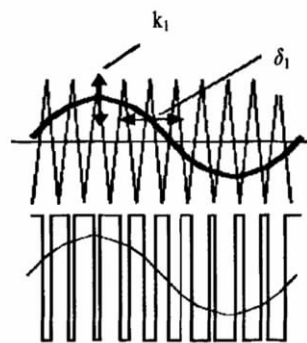


图5 SPWM 控制原理图

1) 正弦波产生模块

PLL 为三相锁相环,它跟踪输入信号并输出与输入信号同步变化的相角。按由控制规则决定的控制相位角及变压器的接法对 PLL 的输出相位进行移位,得到正弦波的相角。图6中,脉宽调制正弦参考信号由信号“mr”控制,其相位由信号“shft”控制。RefRon 和 RefRoff 是用来控制 IGBT 导通和关断时间的调制信号,彼此相差 180°。

2) 三角载波产生模块

通过锁相环得到输入信号的同步相位后, 乘上希望的载波次数, 被 360 除, 取余, 并把得到的值进行变换。TrgRon 是用从 [0, 90, 270, 360] 到 [0, 1, -1, 0] 对应的方法得到的三角载波; TrgRoff 是用从 [0, 90, 270, 360] 到 [0, -1, 1, 0] 对应的方法得到的三角载波 [8]。

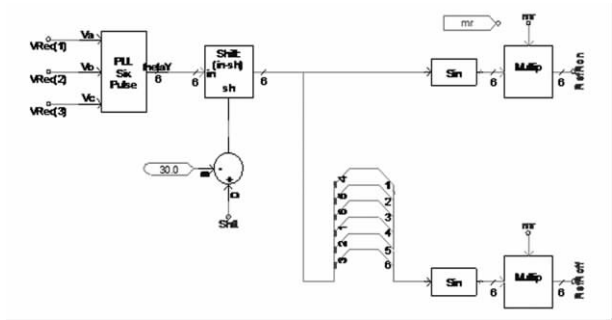


图 6 正弦波产生模块

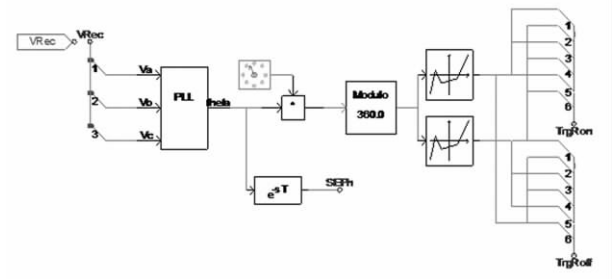


图 7 三角载波产生模块

3 仿真分析

仿真中以最佳叶尖速比控制为例, 由贝兹理论可得, 风机从风能中捕获的机械功率为 [8]

$$p=0.5 \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot V_w^3 \tag{9}$$

其中, ρ 为空气密度; R 为叶片半径; V_w 为风速; C_p 为风力机转换效率系数, 调节 C_p 可以调节捕获的风能, 且 C_p 为叶尖速比 λ 和桨矩角 β 的函数, 因此可以用以下方程式表达。

$$C_p=0.22 \cdot (116/\lambda_i - 0.4\beta - 5) \cdot \exp(-12.5\lambda_i) \tag{10}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{11}$$

其中, $\lambda = W_T \cdot R/V_W$, V_W 为风机的转速; λ_i 为过程变量 [10]。其中, 大电网的电压等级为 10 kV, DFIG 的主要参数如表 1 所示。

1) 在 0.2 s 时设置电动机扰动故障, 在发电机侧、电网侧及直流侧分别测得波形, 如图 8a、b、c。

2) 风速 0.5 s 时由 12 m/s 突变为 20 m/s 时仿真波形, 如图 8d、e、f。

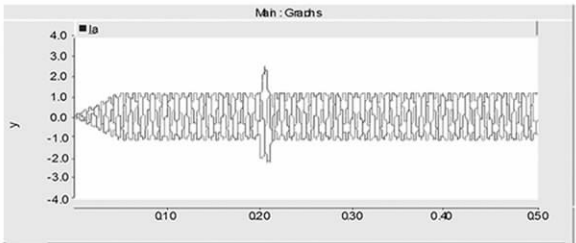
表 1 DFIG 主要参数 [11]

参数	风力机额定功率	电机额定功率	额定电压	额定风速
参考数值	1 MW	0.9 MW	0.69 kV	12 m/s

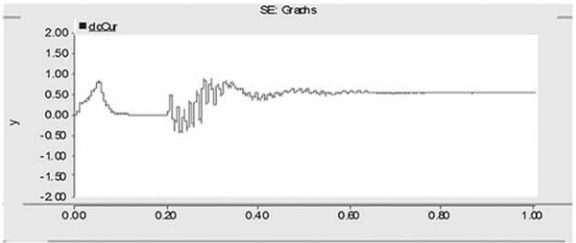
续表 1

参数	励磁电抗	定子电阻	定子漏抗	转子电阻	转子漏抗
参考数值	4.2 p. u.	0.005 4 p. u.	0.1 p. u.	0.006 07 p. u.	0.12 p. u.

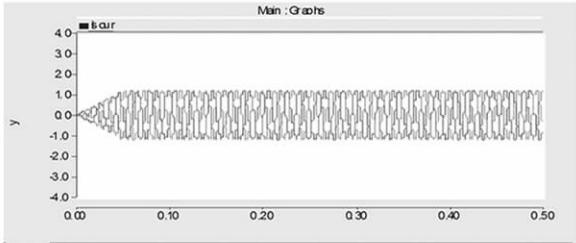
通过图 8a 的仿真结果可以看出, 在 0.2 s 时发电机端扰动故障产生冲击电流, 经 VSC 的整流逆变作用, 到大电网侧时, 由图 8c 可以看出其电流幅值基本维持不变, 冲击电流的作用很小。图 8c 中, 流经 VSC 的电流在 0.2 s 时发生震荡, 但很快趋向平稳。在 0.5 s 时, 风速由 12 m/s 突变为 20 m/s, 此时因为风力机的风能捕获控制系统, 输出电磁转矩基本维持不变。由图 8d 和图 8f 可以看出, 产生的冲击电流较直接并网时(冲击电流最高可达额定电流的 7 倍)要小得多, 到大电网侧时, 基本没有受到冲击电流的影响, 过渡较平稳。



a 发电机侧电流仿真波形



b 整流直流侧电流仿真波形



c 大电网侧电流仿真波形

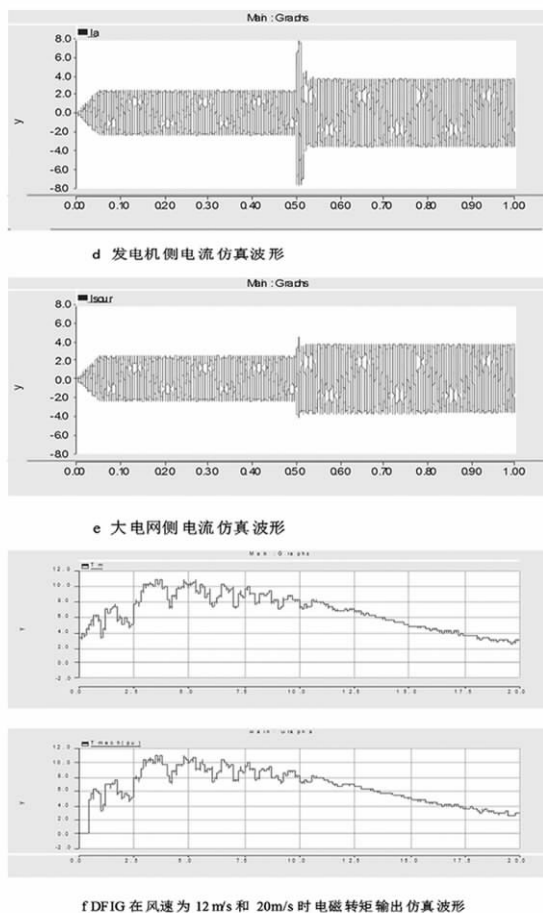


图8 PSCAD 仿真波形

4 结 论

在 PSCAD 环境下,通过与发电机侧产生的冲击电流进行比较可知,经 VSC 并网装置可以有效地抑制并网瞬间对大电网的电流冲击,把冲击电流限制在比较小的范围内,保护了发电机自身设备的安全和电网的正常运行。目前在轻型直流输电领域,VSC 已经得到了实践应用,运行稳定,技术成熟。为了更好地平滑并网,还应注意:为减少软并网持续的时间与冲击电流的峰值,机组的并网转速应随风速调节;晶闸管导通速度不易过快,否则可能会引起并网电流幅值的跃变上升。

参考文献

- [1] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介 [J]. 电网技术, 2005, 25(12): 27-32.
- [2] 辜承林, 等. 电机学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [3] Tamura J, Ueno M. Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD / EMTDC [J]. IEEE Porto Power, 2001(14): 10-13.
- [4] 丁明, 李宾宾, 韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34(10): 26-31.
- [5] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 等. 基于 PSCAD / EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真 [J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
- [6] AnayaLara O, Acha E. Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2002, 17(1): 266-272.
- [7] 冯双磊. 基于 PSCAD-EMTDC 的变速风电机组控制系统仿真研究 [J]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [8] 陆城. 变速恒频风力发电用双 PWM 变换器的协调控制 [J]. 北京: 中国科学院, 2004.
- [9] 高阿龙. 基于 PSCAD 的变速恒频双馈风力发电系统建模与控制研究 [J]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] 院海, 晁勤, 吐尔逊. 基于 PSCAD 的并网型风机建模及仿真 [J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 15-19.
- [11] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.

作者简介:

郭大伟(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及电力系统稳定控制;

王维庆(1959), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要致力于风能利用技术的研究和应用, 主持完成了自治区级和国家级重点课题5项;

张新燕(1964), 女, 教授, 硕士研究生导师, 从事风力发电机组故障诊断方面的研究。

(收稿日期: 2012-10-09)

欢迎订阅 欢迎投稿

双馈风电机组中 Crowbar 保护综述

魏丽丽, 晁 勤, 袁铁江

(新疆大学电气工程学院, 新疆, 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 电网要求风电机组具有一定的低电压穿越能力 (LVRT), 特别是双馈式风机 (DFIG) 在电网的广泛应用, 研究 DFIG 的 LVRT 尤为重要。主要讲述了采用 Crowbar 保护电路提高 DFIG 的 LVRT, 包括转子侧 Crowbar 保护和直流侧 Crowbar 保护, 并对 Crowbar 保护电阻大小的合理选择做了简要分析, 以及对 Crowbar 电路投切时间的选择做了详细说明, 在此基础上选择 Crowbar 保护可以大大提高风机的 LVRT 功能。

关键词: 低电压穿越; 转子侧 Crowbar 保护; 直流侧 Crowbar 保护; 保护电阻; 投切时间

Abstract: A certain low voltage ride through capability (LVRT) of wind turbine is required by power grid, in particular, the doubly-fed wind turbine (DFIG) is widely used in the grid, so studying LVRT of DFIG is particularly important. The crowbar protection circuit is adopted to improve LVRT of DFIG, including the crowbar protection of rotor side and the crowbar protection of DC side. How to select the reasonable size of crowbar protective resistor is analyzed briefly, and the selection of switching time for crowbar circuit is described in detail, so on this basis, selecting the crowbar protection can greatly improve the function of LVRT.

Key words: low voltage ride through (LVRT); crowbar protection of rotor side; crowbar protection of DC side; protective resistor; switching time

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0012-04

0 引 言

当电网故障时导致端电压骤降, 引起转子过流、转速的升高以及电磁转矩的剧烈振荡, 使双馈机组从电网中脱离, 进而可能导致整个电网的崩溃, 所以保持风机短时间持续并网非常重要。针对此问题国内外学者提出了多种控制策略, 文献 [1] 提出利用串联制动电阻在电网故障时提升风电机组的端电压并吸收过剩有功功率进而提高风电场低电压穿越能力; 文献 [5] 提出在改进控制策略的基础上加入静止无功补偿器的方法来实现双馈风机的低电压穿越功能; 文献 [6] 提出一种改进转子励磁变换器控制算法和定子磁链的消磁方法来改善双馈机的低电压运行特性; 文献 [1] 提出了基于电机暂态磁链补偿技术的控制策略, 控制转子电流空间矢量和相应的漏磁场分量, 以抵消定子磁链中的暂态直流分量和负序分量以避免转子过电流; 文献 [2] 提出采用定子侧电力电子开关的方法, 当故障发生时将电机定子暂时与电网切断, 直到电网电压恢复到一定值之

后再快速重新并网, 以避免电压突变给电机带来的电磁振荡和转子过压等问题, 并且不会消耗额外的电网无功功率; 文献 [6] 提出定子侧加装串联电抗, 以提高电机定子侧的端电压, 从而达到抑制磁链振荡的目的。虽然针对低电压穿越提出了很多控制策略和方案, 但目前主要采用 Crowbar 电路来实现电压跌落时变速恒频双馈风机的不间断运行。

1 Crowbar 的类型

Crowbar 开关是借鉴国际测试领域内的先进技术, 利用电容器的瞬间对大电感放电, 当电流达到峰值时, 触发 Crowbar 开关, 使电流延续通过从而达到较长的放电形式的一种方式。按照所用元件的不同, Crowbar 分为主动式 (active) 和被动式 (passive) 两种类型, 其中 Passive Crowbar 保护中使用的器件是晶闸管, 而 Active Crowbar 保护中采用 IGBT, 主要的区别在于能否强制关断。Passive Crowbar 是一种自我保护形式的 Crowbar 电路, 当电网发生故障引起转子电流升高时会触发 Crowbar 保护动作使风机

基金项目: 新疆科技支撑项目 (201091204); 新疆高技术研究计划项目 (201132116)

在短时间内脱离电网,一旦 Crowbar 保护电路动作后难以自动关断,一般需要双馈电机定子从电网脱离以及转子电流衰减殆尽后,晶闸管才能回到其阻断状态,等并网条件满足时双馈电机才能重新并网运行。Active Crowbar 是一种自关断保护,当端电压骤降导致转子侧电流或直流母线电压增大到预定的阈值时触发 IGBT 开关元件动作,同时转子侧变流器中所有开关器件被关断,转子侧变换器被短接,使得转子故障电流只能流过 Crowbar 保护电路,使双馈式网机(DFIG, doubly-fed wind turbine)在短时间内持续并网运行。当 DFIG 转子电流和转子变换器直流电压降低到保护值以下时,保护电路的开关器件再次动作,DFIG 就从鼠笼式异步电机的恒速运行状态过渡到变速运行状态,从而实现了一定的低压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力。

2 电网故障时 DFIG 的瞬态变化分析

图1为简化的 DFIG 的结构图,其中双馈电机的定子直接与电网相连,转子通过交直交变换器与电网相连。

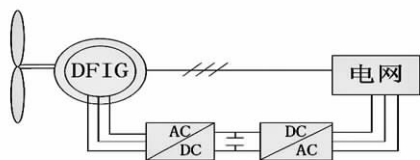


图1 简化的 DFIG 结构图

当电网发生故障引起机端电压骤降时,由于 DFIG 的定子直接与电网相连导致双馈发电机的定子电压跌落,同时引起转子电流的增大,并且使 DFIG 的电磁转矩和输出功率下降,电磁转矩的减小必定导致转子转速的上升,而转子电流的不断加大会导致直流侧电压升高,网侧变换器的电压以及有功、无功功率也都会产生振荡。因为端电压跌落引起的过流会损坏变换器,而过压会损坏发电机的转子绕组,为了保护 DFIG 转子侧的变换器,采用过流过压保护是非常关键的。

3 现有的 Crowbar 保护电路

3.1 转子侧 Crowbar 保护电路

转子侧 Crowbar 保护电路目的是当电网出现电压骤降时,为了保护转子侧变流器,立刻投入 Crowbar 保护装置,为转子侧的浪涌电流提供回路,以达到限制转子变流器过流和转子绕组过电压的作用,从而保持双馈电机在短时间内连续不脱网运行。目前转子侧典型的 Crowbar 电路有以下3种。

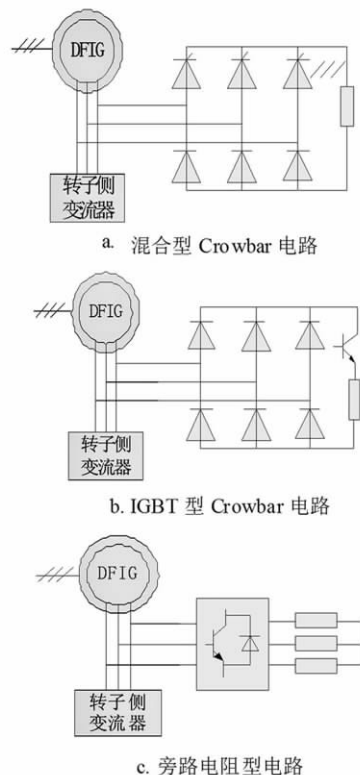


图2 转子侧 Crowbar 保护电路

(1) 混合型 Crowbar 电路(如图2a)。每个桥臂由二极管和 GTO 串联组成,直流侧串有吸收电阻。当电网正常工作时,Crowbar 保护电路不动作,当有故障产生引起转子过流、过压时,Crowbar 保护电路迅速投入电路工作,短路转子侧变流器使转子旁路形成回路,分担转子上的部分电流和电压,从而起到保护转子侧变流器的作用。

(2) IGBT 型 Crowbar 电路(如图2b)。每个桥臂由两个二极管串联组成,直流侧由一个 IGBT 和一个吸收电阻串接而成。当系统正常工作时,Crowbar 保护电路不工作,当转子过流或转速升高时,在检测信号的作用下导通 IGBT,使 Crowbar 电路投入运行,吸收电阻消耗过剩的能量,起到泄流保护作用。

(3) 旁路电阻型电路(如图2c)。当电网电压跌落时,通过功率开关器件将旁路电阻连接到转子回路中,这就为电网故障期间所产生的大电流提供

了一个通路,从而达到限制转子过电流,保护变流器的作用。

3.2 直流侧 Crowbar 保护电路

直流侧 Crowbar 保护电路并联在电容的两端,当电网正常运行时,Crowbar 保护电路不工作。当电网电压突然跌落时,导致直流侧输入功率大于输出功率,此时 Crowbar 电路立刻投入运行,消耗直流侧多余的能量,以限制直流侧电压的上升,从而保护了直流母线电容和变流器的安全。其直流侧典型 Crowbar 电路有以下3种。

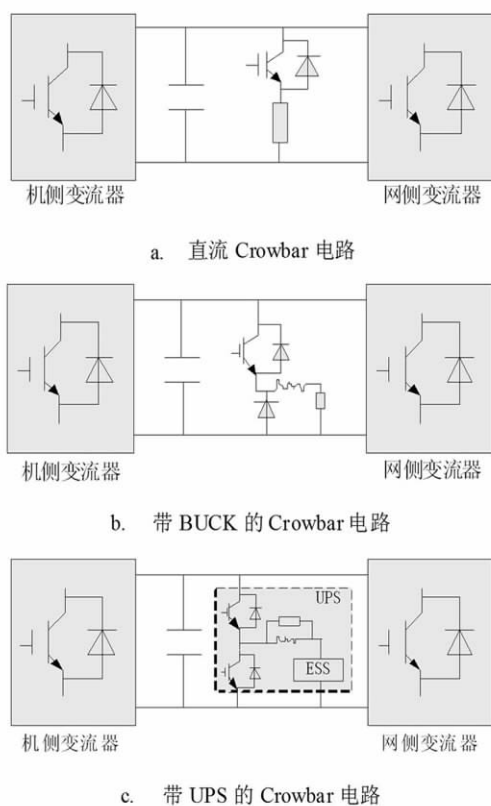


图3 直流侧 Crowbar 保护电路

(1) 直流侧 Crowbar 电路(如图3a)。当电网电压突然降低时,引起转子过电流,过电流流过直流母线电容,引起电容电压的波动,同时网侧变流器控制直流母线电压的能力减弱,不能及时将转子侧过剩的能量传递到电网上,可能导致直流母线电压迅速上升,从而危害直流母线电容的安全。此时投入直流 Crowbar 保护电路,利用电阻消耗转子侧多余的能量,为过剩能量提供适当的通道,防止直流母线电压过高。

(2) 带 BUCK 的 Crowbar 电路(如图3b)。当电网电压突然降落时,导致转子过流和直流母线电容

过压,此时使用 BUCK 电路能有效降低直流母线电压和吸收转子侧多余的能量,从而保证了变流器的安全。

(3) 带 UPS 的 Crowbar 电路(如图3c)。在电网电压下降时使用 UPS(uninterruptible power supply)维持直流母线电压一定范围内,UPS 中的 ESS(energy storage system)使用超级电容储能,当直流侧电压升高时,通过变换器把多余的能量储存在储能设备中;当直流侧电压下降时,通过电力电子开关把储存的能量释放出来,为超级电容器充电,同时可以利用储能设备的能量为电网提供有功功率,实现能量双向利用,保持直流侧电压的稳定。

4 Crowbar 电阻大小的选取

Crowbar 电路中的电阻 R_c 的选取很重要, R_c 阻值选择过大会导致转子电流衰减越快,但过大的 R_c 会导致网侧变流器中功率开关器件和转子侧变流器的交流侧过电压,从而会损坏变流器,并使直流母线电压振荡幅值增大;而阻值过小不能起到限制转子过电流的作用,而且可能故障清除后 Crowbar 仍在运行。对此相关文献中列出了选择 Crowbar 电阻 R_c 的两条基本原则:一是 R_c 应足够大,以达到限制转子故障电流幅值的要求;二是不应过大,避免电流经转子变流器上反并联二极管向直流母线充电,造成直流母线电压陡升。由文献[6]可知 Crowbar 电阻的最佳选择范围如下。

1) R_c 在整定范围的最小值

$$R_{cmin} = \frac{\sqrt{U_s^2 - \omega_s^2 L_\sigma^2 I_{safe}^2}}{I_{safe}} \quad (1)$$

2) R_c 在整定范围的最大值

$$R_{cmax} = \frac{U_{dc} \omega_s L_\sigma}{\sqrt{3U_s^2 - U_{dc}^2}} \quad (2)$$

式中, U_s 为定子电压幅值; U_{dc} 为直流母线正常工作上限值; L_σ 为定转子总漏磁,即 $L_\sigma = L_{\sigma s} + L_{\sigma r}$; I_{safe} 取 1.2 倍转子额定电流; ω_s 为同步电机角速度。

3) 结合式(1)和式(2)的计算可得到电阻 R_c 的合理取值范围,即为了对短路电流的抑制效果更好, R_c 一般在合理取值范围内取较大值,即 $R_c = \lambda R_{cmax}$,其中 λ 为安全裕度系数,一般取 0.9 ~ 0.95。在合理

范围内选取 Crowbar 阻值,既可以有效抑制故障期间的转子过电流,又有助于故障后的电网电压恢复。

5 Crowbar 投切时间选择

当电网故障导致转子电流或直流母线电压增大到预定的阈值时触发 IGBT 开关元件动作,这时 Crowbar 保护电路投入,同时旁路转子侧变换器使转子故障电流只能流过 Crowbar 保护电路,消耗多余能量,从而保持双馈机组的不脱网运行。

Crowbar 的切出时间是 LVRT 控制的重要指标,过早或过晚切除 Crowbar 都会对 DFIG 的 LVRT 效果产生较大影响,因此 Crowbar 切出时间的选择很关键。由文献 [7]、[8] 可知 Crowbar 保护电路应在故障清除前切出,而且 Crowbar 的切出时间离故障清除时间越短,系统的响应越理想。这样可以使得机端电压、DFIG 电磁转矩、转子电流和转速、直流侧电压、定子侧有功功率和无功功率的振荡最小,系统恢复时间最短,从而提高了故障清除后电网恢复稳定运行的能力。

6 结 语

Crowbar 保护电路虽然在实现低电压穿越时简单可行,而且不对系统正常运行产生影响而被广泛应用,但难点在于 Crowbar 电阻的选择,阻值选择过大或过小都会对低电压穿越能力产生很大影响,此外 Crowbar 保护电路中增加了许多硬件设备,大幅度地增加了风机的运行成本,因此随着低电压穿越技术的发展,改进 Crowbar 结构或寻求其他更为简单有效便宜的方法来提高低电压穿越的可靠性也是非常必要的。

参考文献

- [1] 王虹富,林国庆,邱家驹,等. 利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力 [J]. 电力系统自动化,2008,32(18): 81-85.
- [2] 李建林,赵栋利,李亚西,等. 适用于变速恒频双馈感应发电机的 Crowbar 对比分析 [J]. 可再生能源,2006(5): 57-60.
- [3] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析. 中国电机工程学报,2010,30(22): 29-36.
- [4] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [5] 李建林,孔德国,赵斌,等. 一种风力发电机组低电压穿越控制方法: 中国,200810106044 [P]. 2008-09.
- [6] 向大为,杨顺昌,冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略 [J]. 中国电机工程学报,2006,26(3): 164-170.
- [7] 张学广,徐殿国. 电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制 [J]. 电机与控制学报,2009,13(1): 99-103.
- [8] 胡家兵,孙丹,贺益康,等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制 [J]. 电力系统自动化,2006,30(8): 21-26.
- [9] 关宏亮,赵海翔,迟永宁,等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求 [J]. 电网技术,2007,31(7): 78-82.
- [10] Moren J, Haan SWH. Ride-through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator During a Voltage Dip [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20(120): 435-441.
- [11] Da Wei, Xiang, Li Ran, Tavner PJ, Yang S. Control Of a Doubly-fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-through [J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2006(21): 652-662.
- [12] Ekanayake JB, Holdsworth L, Wu X, et al. Dynamic Modeling of Doubly-fed Induction Generator Wind Turbines [J]. Power System, IEEE Trans, 2003(18): 803-809.
- [13] Petersson A, Lundberg S, Hiringer T. A DFIG Wind Turbine Ride-through System Influence on the Energy Production [J]. Wind Energy, 2005, 8(3): 251-263.
- [14] 蒋雪冬,赵舫. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机撬棒控制策略 [J]. 电网技术,2008,32(12): 84-89.
- [15] 徐殿国,王伟. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报,2010,22(30): 29-36.
- [16] Xiangwu Yan, Giri Venkataramanan, Yang Wang, et al. Grid-fault Tolerant Operation of a DFIG Wind Turbine Generator Using a Passive Resistance Network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2896-2905.

(下转第69页)

- 荷短期预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 56-58.
- [6] 牛东晓, 王建军, 李莉, 等. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 30-34.
- [7] Bates J M, Granger C W J. Combination of Forecasts [J]. Journal of Operational Research Quarterly, 1969(20): 451-468.
- [8] 方仍存. 电力系统负荷区间预测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [9] 马永开, 唐小我. 两种组合预测优化模型的分析 and 比较 [J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(1): 99-103.
- [10] Wang Jianzhou, Zhu Suling, Zhang Wenyu, et al. Combined Modeling for Electric Load Forecasting with Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Energy, 2010(35): 1671-1678.
- [11] 周四清, 王坚强. 基于多准则优化的组合预测方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1651-1654.
- [12] 毛李帆, 姚建刚, 金永顺, 等. 中长期电力组合预测模型的理论研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 53-58.
- [13] 周淦, 任海军, 李健, 等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 47-52.
- [14] Zhao Junhua, Dong Zhaoyang, Xu Zhao, et al. A Statistical Approach for Interval Forecasting of the Electricity Price [J]. IEEE Trans. on Power System, 2008, 23(2): 267-276.
- [15] Khosravi A, Nahavandi S, Creighton D. Construction of Optimal Prediction Intervals for Load Forecasting Problems [J]. IEEE Trans. on Power System, 2010, 25(3): 1496-1503.
- [16] 徐惠莉, 吴柏林, 江韶珊. 区间时间序列预测准确度探讨 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(1): 133-140.
- [17] 游仕洪, 程浩忠, 谢宏, 等. 模糊组合预测在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004(3): 54-56.
- [18] 曾鸣, 刘玮, 汪晓露. 含置信区间的改进 ARIMA 电价预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 25-31.
- [19] Donald F, Specht. A General Regression Neural network [J]. IEEE Trans Neural Netw, 1991, 2(6): 568-576.
- [20] Cortes C, Vapnik V. Support Vector Networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(1): 273-297.
- [21] Suykens J A K, Gestel V T. Least Squares Support Vector Machines [M]. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [22] 赵文清, 朱永利, 张小奇. 应用支持向量机的变压器故障组合预测 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 14-19.
- [23] 安伟光, 孙振明, 张辉. 预测区间技术在航天器数据处理中的理论与应用研究 [J]. 宇航学报, 2006(27): 109-112.
- [24] 陈攀, 李燕辉, 王文圣, 等. 电力负荷预测的灰色随机组合模型 [J]. 四川水力发电, 2004, 23(3): 80-81.
- [25] 李建蹦, 吴小俊. 基于 Box-Cox 变换的分类器性能改进 [J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 172-174.

作者简介:

徐志向(1980), 男, 电气工程专业工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统工程技术相关工作及研究。

(收稿日期: 2012-07-25)

(上接第15页)

- [7] 张靠社, 王媛, 胡德海. 基于 Crowbar 保护的双馈感应发电机组的低电压穿越研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 10(27): 66-71.
- [8] 孔宪国, 刘宗歧. 基于主动式 Crowbar 的双馈风电机组 LVRT 性能优化分析 [J]. 现代电力, 2012, 29(1): 77-81.
- [9] 苏平, 张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈

风力发电系统 LVRT 仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 23(38): 164-171.

作者简介:

魏丽丽(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为并网型风力发电系统及其控制方面。

(收稿日期: 2012-07-09)

基于神经网络的风功率预测问题研究

张 涛,张新燕,王维庆

(新疆大学电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 为了更准确地预报风力发电机出力,给出了一种基于神经网络的风功率预测方法。介绍了风功率预测的现状和相关标准,基于一般预测方法准确率、合格率低等因素的考虑,尝试采用 BP 神经网络对其进行优化。计算数据和仿真结果表明优化后的预测数据准确率、合格率更高,对风电场出力预测有一定的帮助。

关键词: 风力发电; 功率预测; 神经网络; 优化; Matlab; 仿真

Abstract: In order to forecast the output power of wind turbines more accurately, a wind power forecasting method based on the neural network is presented. The present situation of wind power forecasting and the relevant standards are introduced. Based on the consideration for the low accuracy and qualification rate of the general forecasting methods, the BP neural network is adopted to optimize it. The calculation data and simulation results show that the prediction data after the optimization are more accurate and qualified, and it is helpful for the output prediction of wind power.

Key words: wind power generation; power forecasting; neural network; optimization; Matlab; simulation

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0016-03

0 引 言

全球性的能源危机和气候变暖,驱动了新能源在世界范围内的迅速发展。风能作为一种可再生、洁净的能源,已得到世界各国的高度重视。风力发电以其储藏量巨大、转换形式简单、可大规模开采以及零污染等特点成为未来经济、科技发展中最有代表性和最有潜力的新能源之一。2003 年,中国风力发电累计总装机容量为 567 MW,而到了 2008 年已达到了 12 210 MW。但是风力发电也有其缺点,其中波动性和间歇性最明显。随着风电在电网中所占比例增大,大电网的不确定性增大,电力调度的难度也随之增大。为此,对风功率的预测就显得尤为重要。目前相关的研究很多,文献 [1] 介绍了一种运用神经网络对风电功率进行短期预测的方法,证明了神经网络对研究风功率预测的有效性;文献 [2] 从物理和统计方法,给出了 SVM(支持向量机)预测方法,其对风功率预测有很大应用空间;文献 [3] 分别将 EMD 和 EEMD 方法与时间序列的方法相结合应用于风功率预测中,实验证明该方法的正确性;文献 [4] 归纳了目前风功率预测的方法模型,提出了

基金项目: 新疆大学博士基金项目(BS100122); 国家自然科学基金项目(50867004); 国家“十一五”863 项目(2009AA05Z445)

改进方向。还有很多文章也都从各个角度对风功率预测进行了研究 [5-9], 都有各自见解。

1 风功率预测

1.1 风功率预测概念

风功率预测是指风电场风力发电机发电功率预测,其原理是根据风电场气象信息有关数据,利用物理模型计算和科学统计方法,对风电场的风力风速进行短期预报,并预测出风电场的功率,从而也可实现电力调度部门对风电调度的要求。

1.2 风功率预测相关要求

国家颁布的《风电场功率预报管理暂行办法的通知》给出了一系列预测预报要求: 风电场功率预测系统提供的日预测曲线最大误差不超过 25%; 实时预测误差不超过 15%。全天预测结果的均方差跟误差应小于 20%。

风电场发电预测预报考核指标为风电场发电预测预报准确率、合格率和上报率。

准确率为

$$r_1 = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{P_{Mk} - P_{Pk}}{Cap} \right)^2} \right) \times 100\%$$

其中, r_1 为预测计划曲线准确率; P_{Mk} 为 k 时段的实际平均功率; P_{Pk} 为 k 时段的预测平均功率; N 为日

考核总时段数; Cap 为风电场开机容量。

合格率为

$$r_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_k \times 100\%$$

其中, $(1 - \frac{P_{Mk} - P_{Pk}}{Cap}) \times 100\% \geq 75\%$, $B_k = 1$

$$(1 - \frac{P_{Mk} - P_{Pk}}{Cap}) \times 100\% \leq 75\%, B_k = 0$$

上报率为

月风电功率预测数据传输率(%) = (月成功传输数据天数 / 月日历天数) $\times 100\%$ 。

2 BP 神经网络优化

2.1 BP 神经网络简介

BP 神经网络是常见的三层(输入层、承接层和输出层),网络通过学习自动校正各层之间的参数,以此来记忆前面的训练结果使系统具有适应时变特性的能力而不产生泛化,BP 网络结构如图 1 所示。

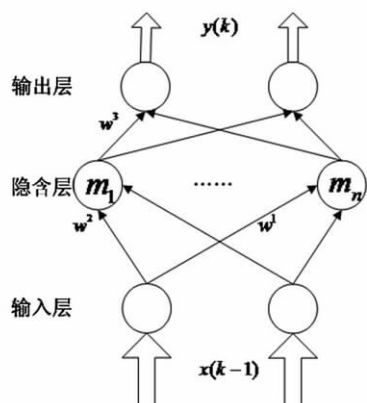


图 1 BP 网络结构图

2.2 基于 BP 神经网络的风功率预测

通过如下非线性空间状态方程对网络进行建模。

$$\begin{cases} y(k) = G(w^3 m(k)) \\ m(k) = F(w^1 J(k)) + w^2(x(k-1)) \\ J(k) = m(k-1) \end{cases}$$

上式中, y 、 m 、 x 、 J 分别表示 1 个输出向量, n 个神经元节点, k 维输入向量和 n 维反馈状态向量; w^1 、 w^2 、 w^3 分别代表承接层与隐含层、输入层与中间层、隐含层和输出层之间的连接权值; G 为输出神经元传递函数; F 为隐含层神经元传递函数。网络采用 BP 算法进行权值修正,学习指标函数采用误差平方和函数,训练误差为

$$E_{rr}(w) = \sum_{k=1}^n [y_k(w) - O_k(w)]^2$$

基于 BP 神经网络的风功率预测方法还有两个必备部分,即输入样本和对应的输出样本。将风电场给出的风功率预测曲线作为输入样本,这里取短期预测曲线。

3 仿真与结果

在 Matlab 中建立 BP 神经网络的数学模型,对样本进行训练和测试。

图 2 中各曲线的意义为: Train——训练误差曲线; Validation——验证误差曲线; Test——测试误差曲线; Best——理想误差曲线; Goal——预设误差限。

由图 2 可以看出经过 6 步训练后神经网络的训练误差已满足误差允许的限制,达到了预设的误差限;且验证误差曲线和测试误差曲线的下降趋势与训练误差曲线的下降趋势相同。

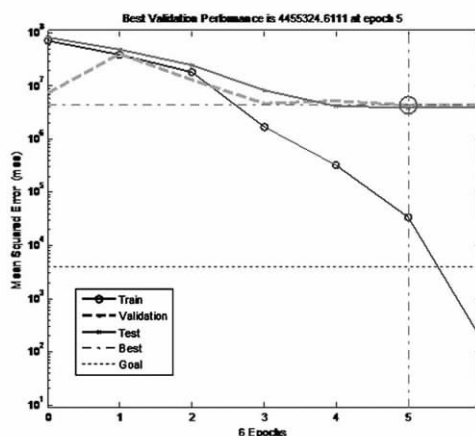


图 2 网络训练误差曲线

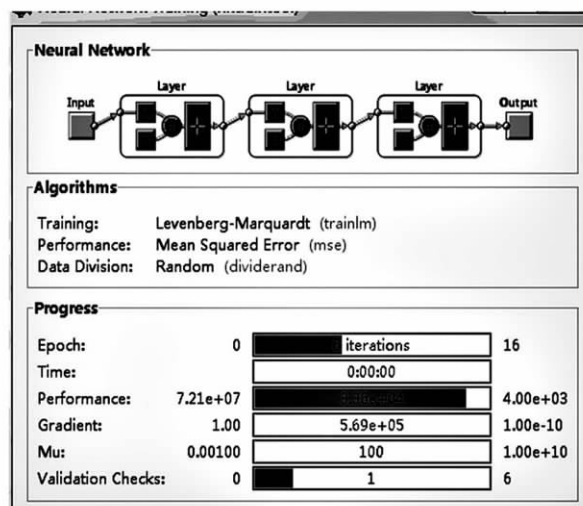


图 3 神经网络训练过程

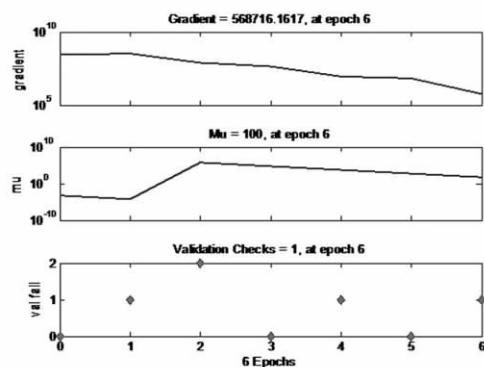


图4 训练状态曲线

由图3和图4可以看出,通过6步训练,训练误差已达到预设误差限; Gradient(逼近梯度)和参数mu曲线的整体趋势是下降的,神经网络处于一个逼近最佳状态的趋势,由图5可以看出曲线的回归特性。

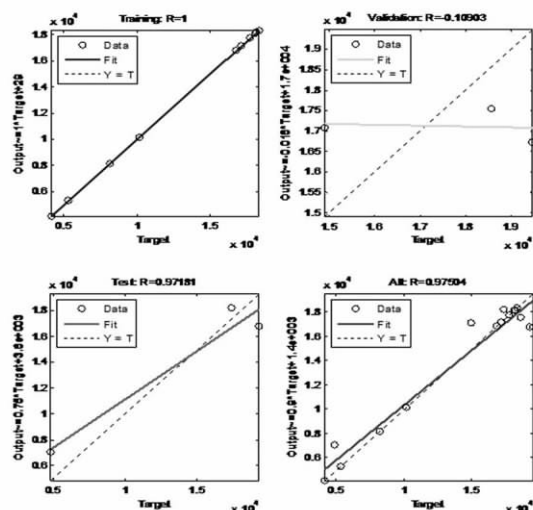


图5 回归特性曲线

图6为神经网络的优化输出与预测输出及实际输出的对比图,由图可以看出经过优化的输出曲线近似于实际输出曲线,而原始预测曲线则存在着较大的偏差。

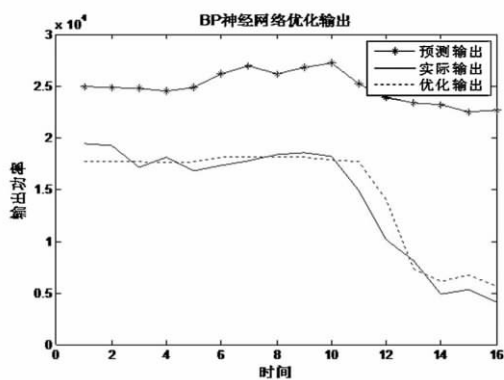


图6 优化输出对比曲线

表1 优化数据对比

优化输出	未优化输出	实际输出
17 918	29 935.78	19 472.87
17 905	29 891.21	19 245.12
17 855	29 750.12	17 155.76
17 220	29 533.16	24 128.75
17 902	29 863.30	16 802.07
16 823	31 199.18	17 348.64
17 773	31 932.91	17 752.22
16 950	31 148.47	18 333.95
17 011	31 767.36	18 570.24
18 498	32 269.56	18 164.22
16 689	31 248.28	14 895.04
12 211	28 888.62	10 171.21
7 743	28 386.97	8 157.89
7 406	28 238.50	4 854.66
6 165	27 513.38	5 298.11
5 847	27 713.31	4 095.49

将表1中的数据,带入到准确率和合格率公式中计算。

准确率为

$$r_1 = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{P_{Mk} - P_{Pk}}{Cap} \right)^2} \right) \times 100\% = 88.78\%$$

合格率为

$$r_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_k \times 100\% = 93.75\%$$

优化后的数据准确率为88.75%,合格率为93.75%,符合国家颁布的《风电场功率预报管理暂行办法的通知》中的相关要求。

4 结 语

通过运用BP神经网络的方法,对风电场风功率预测数据进行优化,计算数据和仿真结果表明,优化后的风功率数据准确率为88.75%,合格率为93.75%,符合国家颁布的《风电场功率预报管理暂行办法的通知》中的相关要求,证明该方法的有效性。

参考文献

- [1] 黄金花,彭晖. 风电场短期风功率的神经网络方法预测研究[J]. 电工电气,2009(9): 57-60.
- [2] 戚双斌,王维庆,张新燕. 基于支持向量机的风速与风功率预测方法研究[J]. 华东电力,2009(9): 1600-1603.

(下转第47页)

扩大,交流输电受到同步运行稳定的限制。对比分析交流输电方式与柔性轻型直流输电方式的优缺点,电网系统的稳定性及输电的可靠性以及故障时对风机的影响,表1的对比结果表明,采用柔性轻型直流输电有较好的经济效益和优越的运行特性。

5 结 论

通过对交流与直流输电方式的比较,得出以下结论。

(1) 由于建设换流站的造价过高,考虑到风力发电场地处偏僻,人烟稀少,若线路出现故障,维护不方便,不能及时排除故障,在风机容量较大、风力发电集中地方,将多台风力发电机组接至汇流母线处,采取柔性轻型直流输电。

(2) 现在海上风电也采取柔性轻型直流输电,由于海上风电场受地理环境的影响,不能建造高压输电线路,远距离输电时,应考虑要尽可能降低损耗,故只能采用海底电缆输送直流电。

(3) 由于大容量的风电场对电网系统的影响是很大的,大规模风电并网除了对系统带来电压、稳定和调度影响外,还将对电网短路电流水平和电能质量带来较大的影响^[4],故采用直流输电技术。对于小容量风电场,由于对电网的影响较小,故采用交流

输电。故对于分散式的风力发电机,采取交流输电较适宜。

(4) 前面提出了大型风电场接入电网方式的相关建议,为大力发展风电清洁能源、大型风电场的并网安全稳定运行、减小系统影响提供了借鉴,同时也为风电接入系统设计提供了参考。

参考文献

- [1] 王新志. 现代风力发电技术以工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] 任清晨. 风力发电机组工作原理和技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [3] 傅旭, 李海伟, 李冰寒. 大规模风电场并网对电网的影响及对策综述 [J]. 陕西电力, 2010(1): 53-57.
- [4] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.

作者简介:

史亚娟(1989),女,硕士研究生,研究方向为风力机控制与电力系统继电保护;

王海云(1974),女,教授,硕士生导师,研究方向为风力机控制与电力系统继电保护;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术。

(收稿日期:2012-08-30)

(上接第18页)

- [1] 常鹏,高亚静,张琳,等. 基于 EEMD 与时间序列法的短期风电场功率预测 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(3): 33-39.
- [2] 王丽婕,廖晓钟,高阳,等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 118-121.
- [3] 陆宁,周建中,何耀耀. 粒子群优化的神经网络模型在短期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 65-68.
- [4] 王凤霞. 风功率预测技术 [J]. 云南电力技术, 2011, 39(5): 58-59.
- [5] 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(2): 1-6.

- [6] 潘迪夫,刘辉,李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型 [J]. 2008, 32(7): 82-86.

- [7] 杜颖,卢继平,李青,等. 基于最小二乘法支持向量机的风电场短期风速预测 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 62-66.

作者简介:

张涛(1979),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电气系统优化与设计;

张新燕(1964),女,博士研究生,教授,硕士生导师,主要研究方向为风力机控制与电气系统优化设计;

王维庆(1959),男,硕士研究生,教授,博士生导师,主要研究方向为风能利用技术的研究和应用。

(收稿日期:2012-09-18)

“疆电入川”直流输电电压等级及导线截面选型

唐 权¹, 邓盈盈¹, 戴松灵¹, 朱国俊¹, 宋福龙²

(1. 四川省电力公司电力经济技术研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

摘 要: 采用加拿大 Teshmont 公司推荐公式和 Kimbark. E. W 推荐公式计算, 并通过年费用分析法进行综合经济性比较, 选择“疆电入川”直流输电电压等级为 $\pm 1\,100\text{ kV}$ 。采用经济电流密度公式, 计及电晕、电磁环境和可听噪声等约束, 进行“疆电入川”直流输电导线截面选择。对选取导线进行线路经济性分析, 并针对不同的线路长度、上网电价、计算年限变化进行敏感性分析, 推荐导线截面为 $8 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 。

关键词: 疆电入川; 电压等级; 导线截面; 综合经济性

Abstract: By adopting the calculation formulae proposed by Teshmont Co. and Kimbark. E. W, and comparing their economical efficiency, the voltage class of HVDC transmission project from Xinjiang to Sichuan is determined to be $\pm 1\,100\text{ kV}$. Using the formula of economic current density and considering the restrains of corona, electromagnetic environment and audible noise, the cross-section of conductor is determined too. The economical efficiency of the adopted conductor is analyzed, the sensitivity analysis of the different line length, on-grid power tariffs and calculation period change is carried out, so the cross-section of conductor is recommended to be $8 \times 1\,000\text{ mm}^2$.

Key words: HVDC transmission project from Xinjiang to Sichuan; voltage class; conductor cross-section; economical efficiency

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0019-06

0 引 言

四川能源结构的特点是富水缺煤、丰气少油, 最大的供电特点则是丰枯矛盾突出, 即丰水期因为用电不完而弃水, 枯水期则缺电拉闸。“疆电入川”是从支撑四川“十二五”经济发展考虑, 依据目前平衡偏紧、丰枯矛盾加剧的供电形势而提出的解决四川能源供需矛盾的方案, 采用大容量、远距离“点对点”输电, 即建设特高压直流输电线路从新疆送 10 GW 电力进入四川。

由于直流输电通过晶闸管元件或阀桥串联可获得不同的电压和电流, 直流输电的标准电压等级国际上尚无完整的标准体系, 而是针对每一个直流工程的具体情况进行额定电压的选择。

文献 [1] 针对目前世界上电压等级最高 ($\pm 800\text{ kV}$) 的直流输电工程, 详细介绍了开展特高压直流输电关键技术试验的相关研究, 包括电磁环境研究、空气间隙绝缘特性研究、带电作业研究、污秽四川省电力公司科技项目(川电发展 [2012] 75)

外绝缘特性研究、特高压设备运行特性和设备长期带电考核等。文献 [2] 根据中国电网特点和特高压交直流建设情况, 探讨了 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流在中国电网发展中应用的可行性, 并分析了基本配置方案和经济性。文献 [3] 提出了为直流输电系统划分电压等级标准化序列的思想, 确定了电压等级序列组成, 比较各电压等级的经济性, 得出各自的适用范围。文献 [4] 提出了 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流输电技术研发思路, 研究了 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 直流输电在各种情况下的系统适应性和研究重点, 分析了换流站设备和线路的技术可行性, 提出了从换流站造价、线路造价和能源价格方面分析 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流输电技术经济优势的研究思路。

“疆电入川”送入电力应主要满足成都地区负荷供电, 同时兼顾川东北的负荷发展需要。输电距离为 2 500 ~ 3 000 km, 远景输电规模超过 100 GW, 输电容量大、距离长, 采用 $\pm 800\text{ kV}$ 直流输电线损率将超过 10%, 损耗过大, 客观上也要求采用更高电压等级直流输电 [5]。根据公式推导选择“疆电入川”直流输电电压等级, 并通过综合经济比较研究

“疆电入川”的导线截面选择。

1 按经验公式计算直流输电电压

采用加拿大 Teshmont 公司推荐公式如下。

$$U_d = K \cdot P^{\frac{1}{2}}$$

式中, U_d 为双极直流线路对地电压, kV; K 为常数, 取 11.5; P 为直流输送功率, MW。

根据该公式, 直流经济输电电压只和输送功率有关。不同输送容量的估算直流输电电压如表 1。

表 1 依据输送容量估算的直流电压

输送功率 P/MW	5 000	5 500	6 000	8 000	10 000
直流电压 U_d/kV	813.2	852.9	890.8	1 028.6	1 150

根据高压直流输电工程专家 Kimbark, E. W 推荐的公式, 直流经济输电电压与输送容量及输电距离有关。

$$U_d = \sqrt{\frac{1000P \cdot L}{3.398L + 1.408P}}$$

式中, K 为常数, 取 11.5; P 为直流输送功率, MW; L 为送电距离。

不同输电容量与输电距离所估算的直流输电电压如表 2。

表 2 根据输电容量与输电距离估算的直流输电电压
单位: kV

输电距离 L/km	输送功率 P/MW			
	5 500	6 000	8 000	10 000
1 000	702.6	711.7	738.7	756.4
1 500	801.5	815.1	856.4	884.4
2 000	869.8	887.2	941.2	978.8
2 500	920.2	940.9	1 006.1	1 052.3
3 000	959.1	982.6	1 057.6	1 111.7

比较上述两表的计算结果可以看到, 两者的计算结果有一定差异, 但对于直流送电 10 000 MW, 输电距离在 2 500 km 左右时, 二者的结果很接近, 都为 1 100 kV 左右。

2 ± 800 kV 与 $\pm 1 100$ kV 直流输电综合经济性

2.1 基本原理

采用年费用分析法研究 ± 800 kV 与 $\pm 1 100$ kV 直流输电的经济性。年费用比较是一种基于等产出

效益对比投入的技术经济分析方法^[9]。不同输电电压等级造价随着输电距离变化的速度不同, ± 800 kV 与 $\pm 1 100$ kV 电压等级间存在一个临界经济距离。该方法针对产出效益相等的不同技术方案, 将各方案的初投资和运行成本费用等所有支出折算为年费用, 进行比较, 年费用低的方案经济性好。

年费用计算模型如图 1。



图 1 年费用计算模型图

其中, P 为送端输送功率; ΔP 为损耗; P' 为受端到网功率。因不同技术方案输电损耗不同, 为实现等产出比较, 考虑受端补充装机, 提供损耗电量。

工程费用主要包括建设投资、运行维护费用、送端购电费用以及受端补充装机的购电费用。其中, 建设投资为工程投产前发生, 一次性投入, 按照折现率折算为年值; 运行维护费用在工程投产后每年都会发生, 运行维护费用按照工程固定资产原值的一定比重(称运行维护费率)估算; 受端补偿线损购电费用按照受端上网电价与线损电量乘积估算, 考虑到该费用中包含了电厂利润、税金等, 属于国民经济转移支付范畴, 因此, 根据电厂平均水平在受端上网电价中予以扣除。

2.2 计算方法

(1) 计算工程年费用

$$C_{\text{annual}} = C_{\text{proj-annual}} + C_{\text{oper}} + C_{\text{oper}} + C_{\text{in}} + C_{\text{to}}$$

式中, C_{annual} 为年费用; $C_{\text{proj-annual}}$ 为投资年值; C_{oper} 为年运行维护费; C_{in} 、 C_{to} 为送端、受端的购电费用。

其中, 投资年值 $C_{\text{proj-annual}} = C_{\text{proj}} \times \frac{i \times (1+i)^N - 1}{i \times (1+i)^N}$

年运行维护费 $C_{\text{oper}} = A_{\text{fixed}} \times R_{\text{oper}}$

送端购电费用 $C_{\text{in}} = P_{\text{in}} \times C_{\text{apa}} \times H_s$

受端购电费用 $C_{\text{to}} = P_{\text{to}} \times C_{\text{apa}} \times \delta\% \times \tau$

式中, C_{proj} 为工程投资; i 为折现率; N 为运营期; A_{fixed} 为固定资产原值; R_{oper} 为运行维护费率; P_{in} 为送端上网电价; C_{apa} 为线路额定容量; H_s 为线路利用小时数; P_{to} 为送端上网电价; $\delta\%$ 为功率线损率; τ 为损耗利用小时数。

(2) 计算单位容量年费用

$$C_{\text{annual-u}} = \frac{C_{\text{annual}}}{C_{\text{apa}}} = \frac{C_{\text{proj-annual}} + C_{\text{oper}} + C_{\text{in}} + C_{\text{to}}}{C_{\text{apa}}}$$

式中, $C_{\text{annual-u}}$ 为年费用; C_{apa} 为线路额定容量。

由于不同电压等级上网电价相同,单位容量购电费用相同,送、受端的购电费用可互抵简化为

$$\begin{aligned} C_{\text{in}} + C_{\text{to}} &= P_{\text{in}} C_{\text{apa}} H_s + P_{\text{to}} C_{\text{apa}} \delta\% \tau \\ &= P_{\text{to}} C_{\text{apa}} (H_s + \delta\% \tau) \end{aligned}$$

单位容量年费用即为

$$C_{\text{annual-u}} = \frac{C_{\text{proj-annual}} + C_{\text{oper}}}{C_{\text{apa}}} + P_{\text{to}} (H_s + \delta\% \tau)$$

2.3 基本配置方案与基础参数

以国家电网公司研究提出的直流电压等级序列基本配置方案为基础,进行直流线路的经济性比较研究。

表3 直流电压等级序列的基本配置方案

额定电压 /kV	额定电流 /A	额定容量 /MW	导线截面 /mm ²	电流密度/ (A·m ⁻²)	接线方式
±800	4 500	7 200	6 × 1 000	0.89	双12脉动
±1 100	4 500	10 000	8 × 900	0.70	双12脉动

2.3.1 投资参数

根据基本配置方案和造价分析结果采用典型方案参与比较计算。其中,考虑直流线路工程的地理条件,高电压等级考虑高山大岭地形和覆冰比重较高。

2.3.2 利用小时

大型水电年平均发电利用小时数约为4 700 h,考虑水火调剂,直流输电利用小时可以达到5 000 h以上。火电利用小时通常在5 000 h以上,个别缺电地区火电利用小时超过6 500 h。中国未来直流输电工程利用小时数估计可达到5 000 ~ 6 000 h。因此,年费用计算中采用利用小时数5 500 h,对应的电能损耗利用小时数为3 600 h。

2.3.3 上网电价

四川地区火电标杆上网电价平均为0.45元/kWh,选取0.45元/kWh作为基础参数。

2.3.4 其他参数

根据文献[7]和电价体制改革试点的工作经验,运行期按25年计算,折现率取8% [8],参照电力规划设计指标取值,运行维护费用按总投资的1.8%计。

2.4 计算结果

基于基础参数,计算并对比±800 kV与±1 100 kV典型方案年费用临界经济距离约2 300 km,小于2 300 km ±800 kV直流输电经济,大于2 300 km ±1 100 kV直流输电经济。

3 ±1 100 kV 特高压直流导线截面选择

架空送电线路导线截面一般按经济电流密度选择 [9],根据电晕、电磁环境和可听噪声等约束进行校核,并考虑节能降耗的因素。对超高压、特高压线路,电晕、电磁环境和可听噪声往往成为选择导线截面的主要决定因素。

3.1 经济电流密度

导体的经济电流密度公式为

$$J = \frac{I_{\text{max}}}{S} = \sqrt{\frac{(C + C_0) \alpha \times 10^3}{A \rho \tau \beta}}$$

其中, I_{max} 为第一年导体最大负荷电流; S 为最佳经济截面; C 为年维修折旧费系数; C_0 为设备投资系数与资金偿还率之和; α 为单位截面积、单位导线长度导线价格; ρ 为导线电阻率; τ 为最大负荷损耗利用小时数; β 为电价; A 为运行损耗系数。在导线材料和最大负荷利用小时数一定的情况下,经济电流密度与 $\sqrt{\alpha/\beta}$ 成正比。

从国内外直流工程的情况看 [9],直流线路的电流密度通常都在1 A/mm²左右,容量越大,线路越长,所选择的电流密度相对要小些。通常直流输电工程利用小时数为4 000 ~ 6 000 h,按照现行标准经济电流密度取为(0.9 ~ 1.1) A/mm²,则根据现阶段与标准制定年代的价格参数,铝导线的合理电流密度应在(0.59 ~ 1.05) A/mm²范围区间之内。

3.2 导线选择的技术约束

3.2.1 子导线截面的选择

导线的选择主要包括分裂数和子导线截面两个部分。其中,导线分裂数的选择主要基于技术、环境等约束,根据工程的电压等级和走廊要求实际确定。而子导线截面的确定除考虑技术约束外,应当尽可能按照已有标准序列进行选取,充分利用现有成熟技术,降低研发费用,缩短制造周期。

中国宁东—山东直流输电线路已采用1 000 mm²导线,大截面导线的采用,不仅可以减小线路损耗,还可以降低输电线路的表面场强、无线电干扰和可听噪声等。为适应中国快速增长的电力需求、

降低输电损耗、提高线路输送能力,在导线截面选取时也充分考虑了大截面导线成功研发的可能,针对各电压等级列出了 LGJ - 800/55 子导线、LGJ - 900/70 子导线和 LGJ - 1000/45 子导线作为可选方案进行比较。

3.2.2 电晕约束

电磁环境是直流输电线路设计、建设和运行中必须考虑的重大问题,直接和输电线路的电晕特性有关。直流输电线路的电晕现象主要包括电晕损失、无线电干扰和可听噪声等。

直流电晕损失主要与导线表面场强和天气有关,在直流输电导线选择时,适当增加导线分裂数和子导线截面可减小导线表面场强,降低线路的电晕损失。 ± 1100 kV 直流线路导线截面电晕损失计算如表4所示。

表4 ± 1100 kV 直流线路不同导线截面电晕损耗计算结果

电压等级/kV	导线型号/mm ²	电晕损耗/(kW·km ⁻¹)			
		大雨	好天气 (干导线)	大雨/好天气 电晕损耗之比	综合损耗
± 1100	8×800	29.79	12.03	2.48	13.81
	8×900	29.53	11.82	2.50	13.59
	8×1000	29.31	11.69	2.51	13.45

注:按大雨10%、好天气90%考虑,得到综合损耗结果。

根据电晕约束, ± 1100 kV 线路宜采用8分裂及以上导线。

3.2.3 电磁环境和可听噪声等约束

表5给出了 ± 1100 kV 直流线路采用各导线截面时,正极性导线对地投影外20 m的可听噪声和无线电干扰场强(80%/80%值)。

表5 ± 1100 kV 直流线路可听噪声和无线电干扰计算结果

导线型号	8×800	8×900	8×1000
可听噪声/dB(A)	42.95	41.34	39.93
无线电干扰场强 (dB·μV ⁻¹ ·m ⁻¹)	47.94	47.58	47.33

适当增加导线分裂数和子导线截面,有助于限制输电线路的无线电干扰和可听噪声。根据电磁环境和可听噪声约束 ± 1100 kV 子导线采用800 mm²截面以上均能满足要求。

3.3 输电损耗分析

直流输电损耗包括两端换流站损耗、直流输电线路损耗和接地极系统损耗3部分。接地极系统损

耗很小,通常可以忽略不计。直流输电线路损耗是直流输电损耗的主要部分,对于远距离直流输电工程而言更是如此。两端换流站的设备类型繁多,它们的损耗机制又各不相同,目前所采用的方法是通过分别测试和计算换流站内各主要设备的损耗,然后将这些损耗相加得到换流站的总损耗^[14]。通常换流站的损耗约为换流站额定功率的0.5%~1%^[14],本次研究中将其取为0.75%,两端换流站损耗合计为1.5%。

3.4 线路经济性分析

综合考虑上述因素, ± 1100 kV 电压等级可选导线截面:8×800 mm² 导线、8×900 mm² 导线、8×1000 mm² 导线。

以上导线截面均在铝导线的合理电流密度范围之内。考虑到大截面导线等新技术未来达到成熟水平(即不考虑示范工程中新技术研发相关成本)以及电价的上涨趋势,与目前已达到的成熟技术方案相比,更大截面导线经济性更好、损耗更低。下面通过年费用方法将线路损耗折算为经济值,对不同电压等级采取不同导线截面进行比较。

(1) 直流线路造价的测算方法

线路工程造价包含线路建设本体投资和其他费用,本体费用由架线工程、杆塔工程、基础工程、土方工程和附件工程5部分构成,其中架线工程、杆塔工程、基础工程3部分为主要构成部分,占本体费用80%左右。

本报告采用对不同电压等级、不同导线截面和分裂根数的线路的主要工程量指标(导线、铁塔、基础)进行估算,结合已建和在建的直流线路工程,参考500 kV 交流线路工程的费用构成(交直流线路的费用构成,概算编制是一致的),测算出架线工程、杆塔工程、基础工程3部分的单位造价。

按照预算编制规定并结合实际工程,测算不同电压等级其他费用占本体费用的比例,计算出各电压等级直流线路工程单位综合造价。

(2) 直流线路工程量的测算

导线工程量计算是根据导线截面、分裂根数计算不同截面和分裂根数的导线单位公里重量。

导线荷载作为杆塔负荷,是杆塔重量测算的基础,计算不同截面和分裂根数的导线在覆冰工况和大风工况下的垂直荷载和水平荷载,作为估算直线塔重量的基础。同时,根据对地距离、导线弧垂、绝

缘子串长估算杆塔平均呼称高度。

根据荷载计算结果,估算不同电压等级典型直线塔和耐张塔的重量、基础混凝土量、基础钢材量。

以已建、在建和设计中的 ± 500 kV、 ± 800 kV工程的相关资料为基础,分析其费用的构成,以及各部分费用所占的比例,尤其是架线工程、杆塔工程、基础工程与单位公里导线重量、杆塔重量、基础混凝土量、基础钢材量的关系,估算出架线工程、杆塔工程、基础工程的单位公里造价,见表6。

本体工程费用测算是参照交流500 kV线路典型造价架线工程、杆塔工程、基础工程3项占本体工程的比例^[2];其他费用测算是参考已建呼辽直流、向上直流、锦苏直流等工程概算投资确定,估算出直流线路单位公里造价结果如表7。

表6 ± 100 kV 架线工程、杆塔工程、
基础工程的单位公里造价

单位: kV、万元/km

序号	电压等级	导线型号	分裂根数	架线工程	杆塔工程	基础工程
1		LGJ-800/55	8	96.0	190.8	56.1
2	± 100	LGJ-900/75	8	107.0	210.2	65.6
3		LGJ-1000/45	8	119.1	233.5	74.5

表7 ± 100 kV 直流线路单位公里造价

单位: kV、万元/km

序号	电压等级	导线型号	分裂根数	本体费	其他费	综合费用
1		LGJ-800/55	8	428	247	675
2	± 100	LGJ-900/75	8	475	265	740
3		LGJ-1000/45	8	521	286	807

(3) 不同地形和覆冰条件下投资变化范围

参考电网工程限额设计控制指标,可得不同地形的调整系数指标如下。 ± 500 kV线路在全国分布较广,线路通过重冰区的比例较小,按照平均地形估算综合造价; ± 800 kV和 ± 100 kV直流线路考虑实际工程主要为西南山区至华东送电线路,参照金沙江—华东、锦屏送出工程的地形比例和覆冰情况,地形比例如表8。

表8 ± 100 kV 不同地形的调整系数

地形	平地	河网	丘陵	山地	高山
比例	1.03	1.02	1.17	1.50	1.28

途经20 mm冰区约为10%,20 mm以上冰区约为3%,综合考虑覆冰对整个工程造价的影响系数为1.13。

按上述条件测算出的综合单位造价范围如表9

所示。

表9 ± 100 kV 电压等级不同截面
导线综合单位造价范围

单位: kV、万元/km

序号	电压等级	导线型号	分裂根数	综合费用
1		LGJ-800/55	8	648~712
2	± 100	LGJ-900/75	8	710~772
3		LGJ-1000/45	8	765~845

3.5 敏感性分析

“疆电入川”特高压直流工程目前还处于规划阶段,线路长度、受端销售电价等均存在不确定性。针对不同的线路长度、上网电价、计算年限变化进行敏感性分析,以保障研究结论具有良好的适应性。

(1) 线路长度变化

对于线路长度减少200 km研究各种导线截面的经济性。

表10 ± 100 kV 电压等级不同截面导线经济比较表

(长度2400 km、电价0.45元/kWh、计算年限25年)

项目	导线型号		
	LGJ- 8×800	LGJ- 8×900	LGJ- 8×1000
电晕损耗/MW	33.1	32.6	32.3
电阻损耗/MW	440	398	358
换流站损耗/MW	150	150	150
总损耗/MW	623	581	541
电能损耗/MWh	2389450	2233490	2087990
线路投资/万元	1620000	1776000	1936800
换流站投资/万元	1970000	1970000	1970000
总投资/万元	3590000	3746000	3906800
大修维护费/(万元·a ⁻¹)	70880	73532	76266
能损费/(万元·a ⁻¹)	107525	100507	93960
年运行费/万元	178405	174039	170225
年费用/万元	514712	524960	536210
投资差/万元	0	156000	316800
年运行费差/万元	0	-4366	-8180
年费用差/万元	0	10248	21497

从计算结果可知,线路长度减少,8×1000 mm²导线年费用较8×800 mm²导线差值减少。

(2) 电价变化

对于电价增加到0.5元/kWh和0.6元/kWh分别研究各种导线截面的经济性。

从计算结果可知,电价增加,8×1000 mm²导线年费用较8×800 mm²导线差值减少,经济性更好。

(3) 计算年限变化

将计算年限从25年提高至40年计算各种导线

截面的经济性。

表 11 ±1 100 kV 电压等级不同截面导线经济比较表
(长度 2 600 km、电价 0.5 元/kWh、计算年限 25 年)

项目	导线型号		
	LGJ - 8 × 800	LGJ - 8 × 900	LGJ - 8 × 1 000
电晕损耗/MW	35.9	35.3	35.0
电阻损耗/MW	477	431	388
换流站损耗/MW	150	150	150
总损耗/MW	663	616	573
电能损耗/MWh	2 543 570	2 374 620	2 216 990
线路投资/万元	1 755 000	1 924 000	2 098 200
换流站投资/万元	1 970 000	1 970 000	1 970 000
总投资/万元	3 725 000	3 894 000	4 068 200
大修维护费/(万元·a ⁻¹)	73 175	76 048	79 009
能损费/(万元·a ⁻¹)	127 179	118 731	110 850
年运行费/万元	200 354	194 779	189 859
年费用/万元	549 307	559 564	570 963
投资差/万元	0	169 000	343 200
年运行费差/万元	0	-5 575	-10 495
年费用差/万元	0	10 257	21 656

表 12 ±1 100 kV 电压等级不同截面导线经济比较表
(长度 2 600 km、电价 0.6 元/kWh、计算年限 25 年)

项目	导线型号		
	LGJ - 8 × 800	LGJ - 8 × 900	LGJ - 8 × 1 000
电晕损耗/MW	35.9	35.3	35.0
电阻损耗/MW	477	431	388
换流站损耗/MW	150	150	150
总损耗/MW	663	616	573
电能损耗/MWh	2 543 570	2 374 620	2 216 990
线路投资/万元	1 755 000	1 924 000	2 098 200
换流站投资/万元	1 970 000	1 970 000	1 970 000
总投资/万元	3 725 000	3 894 000	4 068 200
大修维护费/(万元·a ⁻¹)	73 175	76 048	79 009
能损费/(万元·a ⁻¹)	152 614	142 477	133 020
年运行费/万元	225 789	218 525	212 029
年费用/万元	574 743	583 310	593 133
投资差/万元	0	169 000	343 200
年运行费差/万元	0	-7 264	-13 760
年费用差/万元	0	8 567	18 390

从计算结果可知,计算年限增加,8 × 1 000 mm² 导线年费用较 8 × 800 mm² 导线差值减少,经济性有所提高。

对于直流输电来说,电压等级越高,受到电晕约束、可听噪声、电磁干扰等电磁环境约束较大,而大截面导线虽然电流密度略小,经济性略差,但在电磁环境方面影响较小;此外,从节能降耗角度,由于高电压等级输电距离较远,虽然投资和年费用有所增

加,但大截面导线的降损效果较好,在电价上涨情况下大截面导线经济性改善会更为明显。因此,建议“疆电入川”直流工程导线截面选择 8 × 1 000 mm²。

表 13 ±1 100 kV 电压等级不同截面导线经济比较表
(长度 2 600 km、电价 0.45 元/kWh、计算年限 40 年)

项目	导线型号		
	LGJ - 8 × 800	LGJ - 8 × 900	LGJ - 8 × 1 000
电晕损耗/MW	35.9	35.3	35.0
电阻损耗/MW	477	431	388
换流站损耗/MW	150	150	150
总损耗/MW	663	616	573
电能损耗/MWh	2 543 570	2 374 620	2 216 990
线路投资/万元	1 755 000	1 924 000	2 098 200
换流站投资/万元	1 970 000	1 970 000	1 970 000
总投资/万元	3 725 000	3 894 000	4 068 200
大修维护费/(万元·a ⁻¹)	73 175	76 048	79 009
能损费/(万元·a ⁻¹)	114 461	106 858	99 765
年运行费/万元	187 636	182 906	178 774
年费用/万元/年	500 015	509 457	519 934
投资差/万元	0	169 000	343 200
年运行费差/万元	0	-4 730	-8 862
年费用差/万元	0	9 442	19 919

4 结 论

(1) 通过加拿大 Teshmont 公司、高压直流输电工程专家 Kimbark. E. W 分别推荐的公式计算,“疆电入川”直流输电电压等级应选择为 ±1 100 kV。

(2) ±800 kV 与 ±1 100 kV 直流输电综合经济性比较表明,直流输电距离超过 2 300 km, ±1 100 kV 电压等级经济性更优,“疆电入川”直流工程初步估计线路长度约 2 500 km,因此,建议“疆电入川”直流输电电压等级选择为 ±1 100 kV。

(3) 经综合技术经济比较及敏感性分析,“疆电入川”直流输电导线截面推荐选择为 8 × 1 000 mm²。

参考文献

[1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究 [J]. 中国电机工程学报,2007(22):1-7.
[2] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. ±1 000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):1-5.

(下转第 32 页)

管理及分析工作的需求,采用 J2EE 技术架构、B/S 模式的体系结构,基于 OMS 平台,利用 Java 语言和 Web 服务综合集成方案设计开发了继电保护全生命周期信息管理及统计分析模块。与传统的继电保护信息管理系统相比,所设计的模块在如下方面进行了改进。

(1) 从统计分析角度出发,数据结构设计严格遵照《运行评价规程》的细节要求;

(2) 结合一次设备接线方式的特点以及继电保护设备的配置原则,提供便捷的记录录入方式,大幅提高数据录入速度;

(3) 结合继电保护专业特点提供设备数量、时间属性、线路保护通道、设备类型等信息的校核功能,确保数据填报的准确性;

(4) 以保护设备台账为对象,贯穿其生命周期内的全部动作、缺陷、检修、反措、技改等信息,同时将各类信息与保护设备台账关联综合展示,便于工作人员及时、全面地掌握设备情况;

(5) 充分考虑继电保护专业日常管理工作的实际需要,实现了分析结果图形化展示以及分析报告的一键式生成,可为开展设备技术改造、实施“反措”等工作提供科学的数据支撑;

(6) 提供基本信息、信息管理、运行状态监控、数据同步、多系统数据服务交互,多层级软件动态更新等组件,多种类型组件可任意组合配置,从而全面支持用户的多方位需求。

参考文献

[1] DL/T 623-2008,电力系统继电保护及安全自动装置

(上接第 24 页)

- [2] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
- [3] 刘泽洪,高理迎,余军,等. $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流输电技术研发思路(英文) [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 76-82.
- [4] 国网北京经济技术研究院,中国电力科学研究院. 直流输电电压等级序列研究 [R]. 北京: 国家电网公司, 2008.
- [5] 张文泉. 电力技术经济评价理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 电力工业部. 电网建设项目经济评价暂行办法 [J].

运行评价规程 [J].

- [7] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等. 2007 年国家电网公司继电保护装置运行情况 [J]. 电网技术, 2008, 32(16): 5-8.
- [8] 贾长朱,王剑峰,刘力丰,等. 基于 Web 的电力系统继电保护远程分布式信息管理系统的设计与实现 [J]. 继电器, 2000, 28(10): 65-68.
- [9] 陈月从,林俐,杨东,等. 基于 Java 技术的跨平台图形化继电保护管理信息系统的研究与开发 [J]. 继电器, 2005, 33(18): 15-19.
- [10] 李艳涛,栗然,赵敏. 基于 Web 的继电保护管理信息系统研究与实现 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 41-43.
- [11] 郭挺,谢敏,刘明波,等. SVG 和 Ajax 技术在电网分析及辅助决策支持系统中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 83-89.
- [12] 李国庆,潘振波,王丹,等. 基于 C/S 与 B/S 混合架构的配电地理信息系统 [J]. 电网技术, 2009, 33(6): 102-106.
- [13] 唐婧. 基于 J2EE 的数据发布系统设计与实现 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(12): 180-181.

作者简介:

王云丽(1981),女,硕士,工程师,任职于四川电力调度控制中心;

张烈(1984),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

申华(1978),女,硕士,工程师,研究方向为计算机科学技术。

(收稿日期: 2012-11-15)

北京: 电力工业部, 1998.

- [14] 国家发展改革委,建设部. 建设项目经济评价方法与参数(第三版) [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [15] DL/T 5092-1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程 [J].
- [16] 李战鹰,任震,陈永进. 直流输电系统网损研究 [J]. 电力系统自动化设备, 2007, 27(1): 9-12.
- [17] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [18] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型造价: 500 kV 线路分册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2012-10-24)

“疆电入川”对四川电力供应影响及落点分析

孟 婧,唐 权,杜新伟,李 新,戴松灵,朱国俊

(四川省电力公司电力经济技术研究院,四川 成都 610041)

摘 要:“疆电入川”是解决四川电力供应问题的最佳途径。在保障四川枯期用电需要的基础上,分析了“疆电入川”对减少丰期弃水、提高水电外送通道经济性能的作用;并根据四川省内电力流向,提出疆电入川受端换流站落点最佳范围。

关键词:疆电入川; 电力保障; 水火互济; 落点分析

Abstract: HVDC transmission project from Xinjiang to Sichuan is the best way to solve the problems of power supply in Sichuan. Based on the guarantee of power consumption requirements in dry season in Sichuan, the effects of HVDC transmission project from Xinjiang to Sichuan on reducing water resources waste in rain season and improving economic performance of delivering hydroelectricity outward from Sichuan are analyzed. Furthermore, according to the power flows inside Sichuan, the optimal range for the sites of HVDC conversion station in Sichuan is proposed.

Key words: HVDC transmission project from Xinjiang to Sichuan; power supply; hydro-thermal electricity exchange; location analysis of HVDC conversion station

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0025-04

0 引 言

进入 21 世纪以来,四川经济持续快速发展,“十一五”期间国内生产总值年均增长 13.8%。全社会用电量年均增长率达 10.4%。随着西部大开发的继续推进,四川经济将在“十二五”及“十三五”期间实现跨越式发展,GDP 年平均增长率为 12% 和 8.5%,全社会用电量、用电负荷以 8%~12% 的速度相应增长,到 2015 年,四川全社会用电量 250 000 GWh,最大负荷 48 000 MW,2020 年全社会用电量 367 000 GWh,最大负荷 70 500 MW。

经济的快速发展,用电需求的不断增加,必须要有充足的电力支撑作为保障。受四川能源“富水缺煤”的结构特点影响,供电丰枯矛盾问题十分突出。“疆电入川”是解决四川电网枯期电力供应紧张,有效减少丰期弃水的最佳途径。

1 四川电力供应“丰余枯缺”矛盾凸显

四川水力资源极为丰富,技术可开发量位居全国第一。四川能源资源的禀赋决定了四川电源水电为主的自然结构,2010 年四川全省全口径电源装机容量

43 140 MW,其中水电装机 30 830 MW,占比 71.5%。随着金沙江一、二期,锦屏、官地等一批大型电站投运,预计 2015 年、2020 年总装机容量将分别达到 91 290 MW、142 100 MW,其中水电装机达到 80% 以上。

受全年降水分布不均的影响,水电出力在各月份中的差异也很大,据近几年资料统计,四川水电丰期(6 月—10 月)电量全年占比平均在 60% 以上,枯期(1 月—4 月、12 月)占比则不到 30% (含部分年调节电站枯期电量),平期(5 月、11 月)近 10%。尽管在“十二五”至“十三五”期新增的水电中,锦屏、官地等大型或巨型水电站具有一定的调节能力,但四川水电的整体调节性能仍较差,据统计到 2020 年,四川具有季调节能力电站装机占水电总装机比例为 27% 左右,具有年调节能力的电站仅占 11%。

四川水电的调节性能差,在一年中表现出发电能力的“丰大枯小”,导致供电能力的“丰余枯缺”。电力平衡结果显示,2015 年、2020 年,丰水期四川扣除直流外送电力 23 100 MW 后,电力盈余分别为 6 370 MW、15 040 MW;枯水期,电力缺额分别达到 8 840 MW、8 300 MW,此外若考虑二滩、锦屏等电站已签订的协议中需通过四川电网转送重庆的 1 700 MW 电力,四川枯期实际电力缺额达到 10 000 MW 以上。

表1 四川水电出力特性

年 份	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
水文年	平水年	偏特枯年	枯水年	平水年	枯水年	平水年
水电机组利用小时	4 326	3 954	4 017	3 963	4 080	4 433
丰期发电量比例/%	56	57.1	64	60	62.8	63.3
枯平期发电量比例/%	44.0	42.9	36	40	37.2	36.7
其中: 枯期/%	36	34.9	28	32	29.2	28.7

备注: 2008 年受地震影响, 水电出力下降

丰水期四川电量富余较大, 除满足自身需要外尚有大量外送电量; 枯水期, 四川电量缺额较大。2015 年, 水电可发电量为 327 800 GWh, 利用小时数约 4 400 h, 丰、平、枯期电量比例约为 61: 14: 25; 火电按电煤供应能力, 可发电量为 45 800 GWh, 枯期电量缺额达到 27 100 GWh。2020 年, 水电可发电量为 520 600 GWh, 利用小时数约 4 400 h, 丰、平、枯期电量比例约为 58: 15: 27; 火电可发电量为 45 800 GWh, 枯期电量缺额达到 26 800 GWh。

2 “疆电入川”解决四川“枯缺”的最佳途径

受四川能源“富水缺煤”的结构特点影响, 供电丰枯矛盾问题十分突出。“丰余”的问题需要新建特高压交流通道增强外送能力解决, “枯缺”则可以通过本省自建火电、减少直流外送电力、引进外来电源等 3 种途径解决。

(1) 改变四川电网自身电源结构, 增加网内火电装机

2010 年至 2020 年 10 年期间, 四川新建火电 11 600 MW, 其中“十二五”期新建 3 000 MW, “十三五”期新建 8 000 MW 左右。若缺额的 10 000 MW 电力均由省内自建火电来解决, 则需新建火电装机共计 21 600 MW 火电。

根据预测, 四川 2015 年发电用煤约 30 000 000 t, 可支撑装机约 10 000 MW, 目前四川煤电装机已达到 12 000 MW, 规划新增装机将大量依靠外省运煤。根据目前的煤价测算, 宁夏、陕西等外省电煤运至四川, 到厂价每吨标准煤需要 1 000 ~ 1 100 元, 每千瓦时仅燃料成本就达到 0.35 ~ 0.385 元, 按照目前的火电上网电价, 影响火电投资和火电厂发电的积极性。因此, 增加本省火电装机容量, 难以解决产

能、运输、环保和经济性问题, 只能作为保障四川枯期电力供应的补充措施和起到加强电源支撑的作用。

(2) 将规划直流外送水电在枯水期留存四川电网

目前四川的向家坝、锦屏、溪洛渡等巨型水电站主要考虑通过特高压直流送往负荷较大的华东地区消纳, 从负荷特性和输电通道看华东和四川具备水火互济的条件, 通过枯期适当留存外送电力电量确实可以保障四川自身部分用电需求。

然而, 枯期留存需要考虑一系列的问题。首先考虑到向家坝、锦屏、溪洛渡等大型电站外送方案已经实施或接近实施, 现有电站接入方案及网架无法满足留存要求, 需要对电网进行较大规模的调整, 工期难以保证; 并且将规划外送水电容量枯期留存部分电力电量给四川电网, 虽然可以部分解决四川电网枯期用电需求, 但将对华东等受端电网产生一定影响, 需要额外补充火电装机; 此外外送水电枯期留存四川, 直流外送工程利用效益也将较大降低, 2015 年特高压直流通道综合利用小时数由约 5 000 h 降低到约 4 000 h, 2020 年由约 4 500 h 降低到约 3 500 h。因此, 考虑送、受端电网实际情况、调整网架所需工期及直流工程经济性等因素, 将规划直流外送水电枯水期留存不是解决四川枯期用电需要的最佳途径。

(3) 更大范围能源优化配置, 接纳外来电力

从全国能源分布分析, 西藏的水电、新疆的火电具有引进四川的可能性, 从电源的出力特性分析, 四川需要引进能够与水电出力互补的电源, 而西藏的水电出力特性也是丰多枯少, 引进西藏水电将加重四川电网“丰余枯缺”矛盾, 同时根据西藏水电开发时序, “藏电入川”难以及时解决四川电网“枯缺”问题。新疆电源主要为火电, 引入四川后在解决枯期

用电需要的同时也可以优化四川电源结构。

2015—2020年四川电网枯期电力缺额约为10 000 MW,在引入 $\pm 1\ 100\text{ kV}$ 、10 000 MW的新疆—四川特高压直流工程后,四川电网枯期电力缺额有效缓解,枯期用电需要基本能够满足。

3 新疆火电与四川水电互济运行

受用电结构影响,四川日负荷峰谷差较大,由于水电调峰能力有限,丰期存在大量调峰弃水电量,需要新增具有良好调峰能力的电源。若新疆火电成功进入四川,参与小范围调峰,减少弃水调峰电量,同时将减少的弃水电量安排在基荷位置工作并参与外送,交直流外送通道经济效益可进一步调高。

根据2020年电量平衡结果,在丰期盈余电力全部外送的情况下,若疆电未入川,四川电网丰期弃水电量达到14 300 GWh。以典型月8月为例,由于四川电网网内电源缺少调峰电力,需要弃水调峰,富余水电电力电量主要分布在低谷和平段。若要想减少水电弃水,其最佳方式是低谷多送电量,但从川电外送实际情况看,丰水期日送电曲线基本上按一条直线运行或者参与受端电网小幅度调峰,低谷无法多送电量。

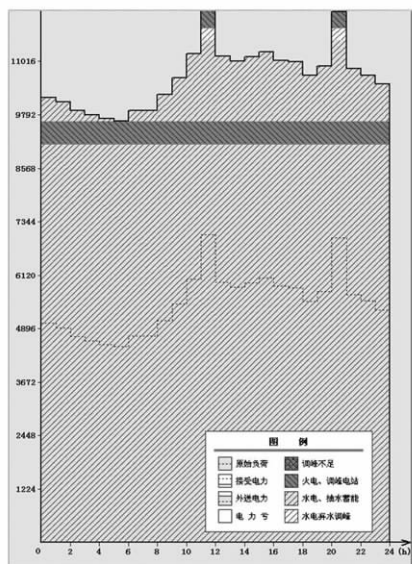


图1 2020年平水年8月典型日电站工作位置示意图

若在负荷高峰期,采用短时购入高峰时段电力的措施,可增强四川网内电源的调峰能力,减少弃水调峰电力,同时增加外送,扩大四川富余水电消纳范

围。以典型月8月为例,若考虑利用“疆电入川”承担部分系统调峰任务,水电多在基荷位置运行,利用交流通道富余能力,提高四川水电外送容量,减少水电弃水,达到较为理想的送电方式。2020年全年有效减少弃水约4 000 GWh,经济效益十分明显。同时,川渝特高压交流外送通道及向家坝—上海、溪洛渡—浙西、锦屏—苏南、白鹤滩—湖北、乌东德—温州等特高压直流利用小时数均可保持到5 000 h,输电通道的整体利用效率得到显著提高。

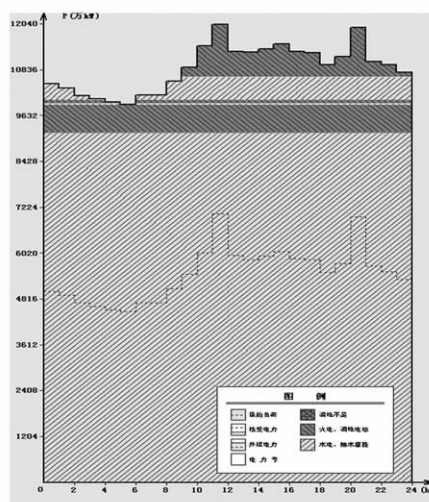


图2 2020年平水年8月典型日电站工作位置图(疆电参与调峰)

表2 2020年四川电网电量平衡表(疆电未入川)

单位: GWh

	丰期	平期	枯期	合计
一. 系需电量	316 200	93 000	203 300	612 500
二. 水电可用	317 800	75 000	129 500	522 300
1. 水电发电	303 600	75 000	129 500	508 100
1) 峰荷	30 500	14 000	34 600	79 100
2) 基荷	273 000	61 100	95 000	429 100
2. 弃水电量	14 300	0	0	14 300
三. 火电发电	12 700	18 000	66 400	97 100
1) 峰荷	100	0	0	100
2) 基荷	12 500	18 000	66 400	96 900
四. 利用小时	222 500	65 400	137 800	425 700
1) 水电	256 600	63 500	109 600	429 700
2) 火电	53 200	75 400	278 000	406 600

4 “疆电入川”受端换流站落点最佳位置

四川电网按电力送受关系可分为送端电源和受端电网。送端电源主要位于四川省西部水力资源十

分丰富的大渡河和雅砻江等江河流域,甘孜、凉山及川西北的阿坝等3个少数民族自治州以及雅安等地区。受端电网按所处地理位置、规模和联系紧密程度划为8个分区,即:成都、川西北(包括德阳、绵阳、广元)、川南(宜宾、泸州、自贡、内江、资阳)、川东北(遂宁、南充、广安、达州、巴中)、乐山、眉山、攀枝花和西昌。成都、乐山和攀枝花电网为四川最大受端电网,合计年售电量接近全省的二分之一。

表3 2020年四川电网电量平衡表(疆电参与调峰)

	单位: GWh			
	丰期	平期	枯期	合计
一. 系需电量	321 200	93 000	192 900	607 100
二. 水电可用	316 000	75 000	129 500	520 500
1. 水电发电	306 400	75 000	129 500	510 900
1) 峰荷	30 900	14 000	34 600	79 500
2) 基荷	275 400	61 100	95 000	431 500
2. 弃水电量	9 600	0	0	9 600
三. 火电发电	14 600	18 000	63 400	96 000
1) 峰荷	0	0	0	0
2) 基荷	14 600	18 000	63 400	96 000
四. 利用小时	225 900	65 400	135 700	427 000
1) 水电	259 100	63 500	109 600	432 200
2) 火电	61 400	75 400	265 400	402 200

2015年,丰期,成都、川西北、川东北、川南4个片区存在电力缺额,可以通过片区间的电力交换补充;枯期,成都、川西北、川东北、川南、乐眉、阿坝6个片区存在电力缺额,川西北及阿坝、川南及乐眉可由德宝直流工程和省内区间电力交换补充,川东北地区在成都地区缺额需要由“疆电入川”送入电力补充。

2020年,丰期,四川电网成都、川西北、川东北、川南4个片区存在电力缺额,且相对2015年缺口加大,川南可以通过片区电网间电力交换补充,成都、川西北、川东北的部分电力缺额需要由“疆电入川”送入电力补充;枯期,成都、川西北、川东北、川南、乐眉5个片区存在电力缺额,川西北、川南及乐眉片区的电力缺额可通过德宝直流工程和省内区间电力交换补充,川东北和成都地区缺额将依靠“疆电入川”提供电力。

根据省内电力流向分析,并结合电网发展规划,2015年、2020年成都和川东北地区均存在10 000~

15 000 MW、1 000~3 000 MW 电力缺额无法通过片区间的电力交换完全满足。因此“疆电入川”送入电力应主要满足成都地区负荷供电,同时兼顾川东北的负荷发展需要。建议“疆电入川”受端换流站宜落点在成都东部(金堂)、德阳南部(中江)、遂宁西部(大英)、资阳北部(简阳、乐至)结合部区域。

2015年、2020年四川电网电力流向示意图见图3~图6。

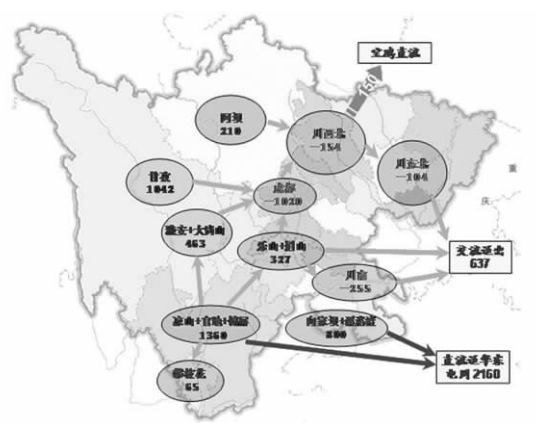


图3 2015年丰大方式四川电网电力流向示意图

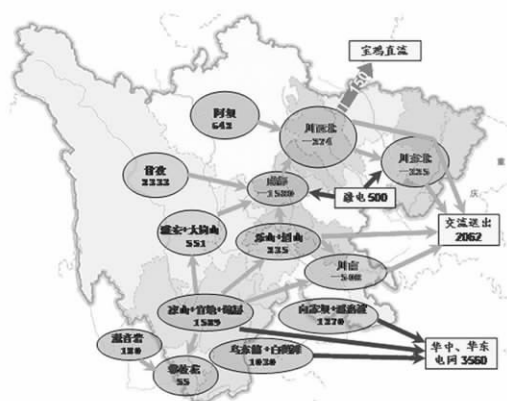


图4 2015年枯大方式四川电网电力流向示意图

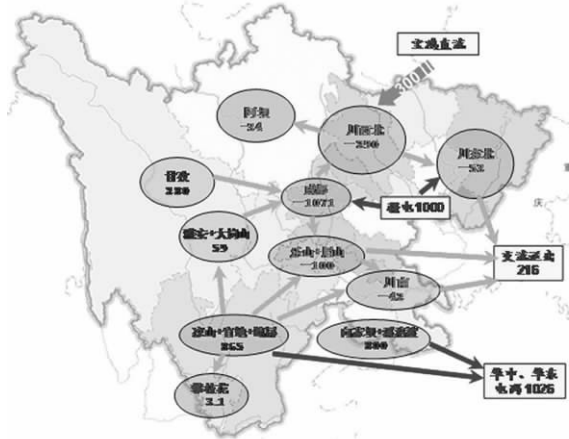


图5 2020年丰大方式四川电网电力流向示意图

(下转第43页)

功率输出曲线基本符合负荷曲线。在研究中,将目标2作为约束条件,并考虑一定的裕度,将目标1作为优化目标,进而建立了优化模型。但未考虑蓄电池容量与其成本的关系,在下一步的研究中,会对其进行进一步的改进。

参考文献

- [1] 聂继华,杨益民. 风/光互补发电系统的优化设计 [J]. 节能, 2008(10): 50-53.
- [2] 李爽. 风/光互补混合发电系统优化设计 [J]. 北京: 中国科学院, 2001.
- [3] 朱芳,王培红. 风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化 [J]. 上海电力, 2009(1): 23-26.
- [4] 刘晓光. 风力发电系统风力机输出特性的模拟与控制 [J]. 青岛: 青岛大学, 2009.
- [5] 祝贺,徐建源. 风电场 GM-WEIBULL 风速分布组合模型出力预测 [J]. 华东电力, 2008, 36(11): 144-146.
- [6] HJ Green, J Manwell. A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems [A]. Proceedings of Wind Power'95 [C]. Washington DC, 1995.

- [7] 徐宝清,田德,韩巧丽,等. 风力发电机组输出功率特性的数值模拟 [J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2008(1): 30-33.
- [8] 陈博. 风光复合发电的初探 [J]. 上海电力, 2008(2): 139-141.
- [9] Lu Lin, Yang Hongxing. Wind Data Analysis and a Case Study of Wind Power Generation in Hong Kong [J]. Wind Engineering, 2001, 25(2): 115-123.
- [10] 陈俊. 光伏系统发电量计算的分析 [J]. 农村牧区机械化, 2006(2): 27-28.
- [11] 陈珩. 电力系统稳态分析(第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] 陈赞,严正. 可再生能源并网发电的可靠性分析和节能分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 215-218.
- [13] 李丹,彭军,余岳峰. 离网型风光互补发电系统匹配方法优化研究 [J]. 华东电力, 2008, 36(3): 86-90.
- [14] 包能胜,刘军峰,倪维斗. 风电与燃气轮机互补发电容量配比的仿真研究(广东省自然科学基金项目) [J].

(收稿日期: 2012-09-25)

(上接第28页)

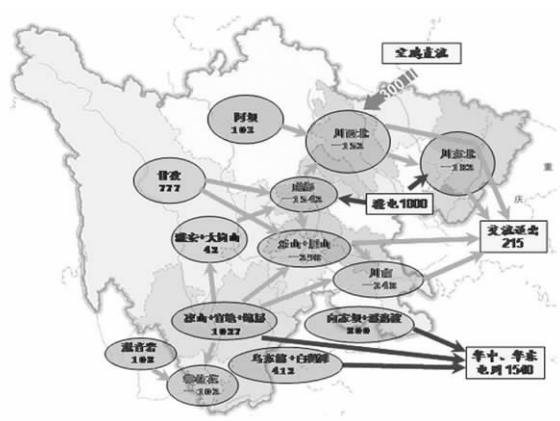


图6 2020年枯大方式四川电网电力流向示意图

5 结语

(1) 四川水电所占比重大, 丰枯期出力差异明显, “丰盈枯缺”矛盾十分突出。引入新疆火电是解决枯期电力缺额的最佳途径, 通过水火互济运行, “疆电入川”与“川电外送”通道协调运行, 四川能源综合利用及特高压交直流电网的整体经济效益明显提高。

(2) 根据四川省内电力流向分析, 确定“疆电入川”受端换流站宜落点在成都东部(金堂)、德阳南部(中江)、遂宁西部(大英)、资阳北部(简阳、乐至)结合部。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 张云洲. 我国跨区域电力资源配置前景分析特高压 [J]. 中国电力, 2004, 37(9): 5-7.
- [4] 孙昕,刘泽洪,印永华,等. 中国特高压同步电网的构建以及经济性和安全性分析 [J]. 电力建设, 2007, 28(10): 7-11.
- [5] 孙正运,裴哲义,夏清,等. 减少水电弃水调峰损失的措施分析 [J]. 水利发电学报, 2003, 83(4): 1-7.
- [6] 魏杰. 关于当前西藏电力供需形势的分析 [J]. 水力发电, 2005, 31(7): 14-16.

(收稿日期: 2012-10-24)

四川省调 OMS 系统继电保护全寿命周期信息管理及统计分析模块的研究与开发

王云丽¹, 张 烈², 申 华²

(1. 四川省电力公司四川电力调度控制中心, 四川 成都 610041;

2. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192)

摘 要: 在分析现有继电保护全寿命周期信息管理以及统计分析相关软件存在问题的基础上, 针对四川省调继电保护专业信息管理及统计分析工作的需求, 结合目前电网发展形势、继电保护专业技术发展趋势以及继电保护专业自身特点, 利用基于 J2EE 平台(Java2 平台企业版)和 Web 服务的综合集成方案, 提出并实施了 B/S 架构的继电保护设备全寿命周期信息管理及统计分析模块。基于调度运行管理系统(operation management system, OMS)统一平台, 遵照 DL/T 623-2010《电力系统继电保护及安全自动装置运行评价规程》的数据规范格式, 实现继电保护数据的分布维护、集中共享, 为继电保护专业的信息管理及统计分析工作提供完整全面的专业工具。

关键词: 电力系统; 继电保护; 全寿命周期信息; 统计分析; 调度运行管理系统(OMS)

Abstract: According to the requirements of protective relaying information management and statistical analysis in electric power companies, combined with the development trend of power grid and relay protection technology as well as the major characteristics of relay protection, a data management and statistical analysis system of B/S structure for protective relaying life-cycle information is proposed and implemented with comprehensive schemes of J2EE (Java 2 platform, enterprise edition) platform and Web service. As a useful major tool, it is based on the unified platform of dispatching operation management system (OMS), which is in accordance with the data specification format of DL/T 623-2010 "Evaluation Rules of Protective Equipment and Power System Stability Control Devices".

Key words: power system; protective relaying; life-cycle information; statistical analysis; dispatching operation management system (OMS)

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0029-04

0 引 言

随着电网规模的迅速扩大及各项技术的飞速发展, 继电保护在电网安全稳定运行中发挥着越来越重要的作用。继电保护设备具有数量繁多、种类庞杂、逻辑严密、信息海量等特点, 这要求继电保护专业必须实现精细化管理, 确保电网的安全稳定运行。目前, 国内已有几个继电保护设备信息管理软件投入应用^[1-3], 可完成不同层级调度机构继电保护专业的信息采集及管理工作, 但这些软件之间数据结构和功能都存在较大的差异, 特别是统计功能对设备全寿命周期信息的分析能力存在严重不足。为加强电网调度运行管理, 规范四川电网调度系统继电保护基础数据的建设与交换, 提高工作效率, 实现各

级调度生产基础信息的纵向互联和横向共享, 并基于调度生产管理 OMS 系统, 按照相关专业技术规程与国家电网公司以及四川省电力公司对继电保护专业管理的规范、规定, 在总结以往工作和相关软件运行的经验基础上, 设计并开发了继电保护全寿命周期信息管理及统计分析模块, 该模块可覆盖县调、地调、省调, 形成自下而上、统一、规范的继电保护专业数据平台。

1 模块整体设计

1.1 数据结构设计

该模块作为 OMS 系统的重要组成部分, 数据结构基于 OMS 系统的关系型数据库管理系统设计而成, 实现与网络和操作系统的无缝集成, 在整个网络

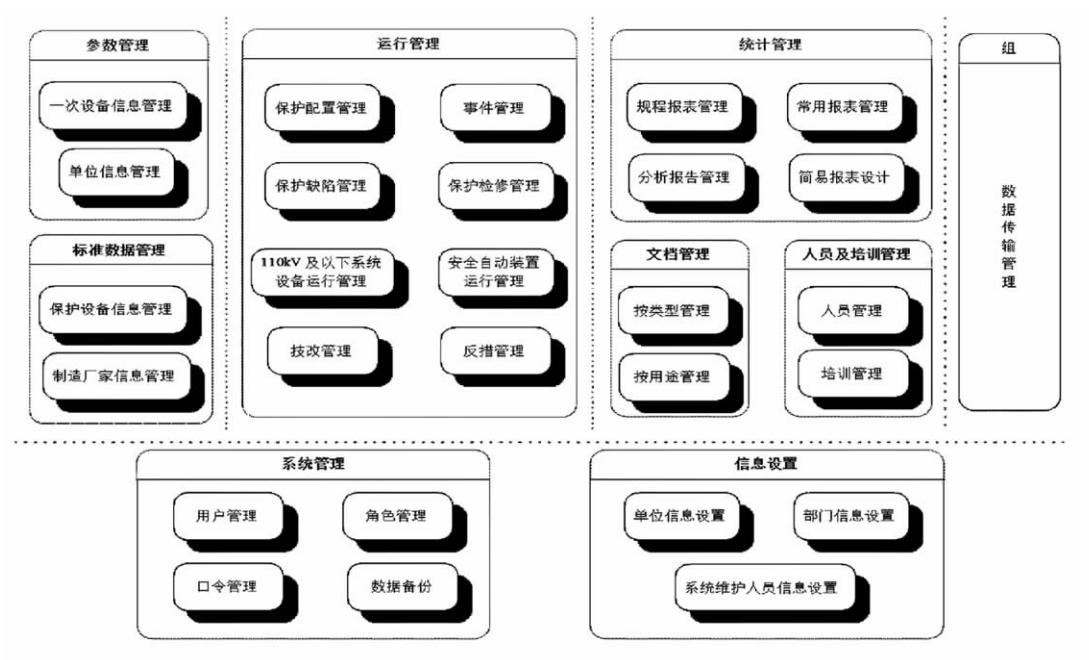


图1 继电保护设备全寿命周期信息管理及统计分析模块功能结构图

及OMS系统中保证数据信息的完整和一致,具有使用简单、高性能、伸缩性强、可扩展性强等优点。

本模块的数据组织依据如下原则:①信息管理基于统一的保护设备库,通过设备的唯一编码将与其相关的各类运行数据相关联;②对设备数据、运行数据分别采用不同的组织形式,其中,设备数据按运维单位、厂站划分,每个运维单位包含多个厂站,每个厂站包含多台保护设备;运行数据以保护设备为对象,依据运行信息的不同属性进行分类管理。

1.2 架构设计

作为原单机版“继电保护统计分析及运行管理系统”的升级,该模块采用J2EE技术架构、B/S模式的体系结构,利用Java语言和Web服务综合集成方案开发而成。其结构可划分为:数据层、应用服务支撑层、业务应用层以及表现层。

模块功能主要包括参数管理、运行管理、统计分析、数据传输管理、标准数据管理等模块,模块各功能如图1所示。其中,关系数据库构成数据层;系统管理及信息设置两个模块实现模块运行的基本信息维护,隶属基础服务层;参数管理、标准数据管理、运行管理、统计管理、文档管理、人员及培训管理、数据传输管理7个模块归属于业务层;表现层即展示逻辑层,实现用户与程序之间的交互。

2 主要功能设计

2.1 保护设备全寿命周期信息管理

• 30 •

保护设备全寿命周期信息从其可靠性角度出发,涵盖设备在役期间的全部运维信息,为设备的综合最优利用提供科学的数据支撑。

为全面管理并展示设备全寿命周期信息,本模块以设备台账信息为基础,提供保护设备标准数据、保护设备台账、事件及保护动作、保护检修、保护缺陷、保护技改反措等管理模块,各模块结构关联如图2所示。

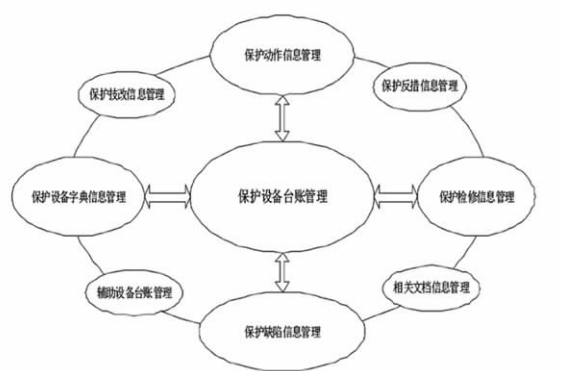


图2 保护设备全寿命信息管理功能结构图

(1) 保护设备标准数据管理模块,包括设备型号、制造厂家、保护类型、保护类别、保护分类、软件版本及校验码等属性,该部分信息以“字典”的形式固化于程序中,强化数据的标准化管理。

(2) 保护设备台账管理,包括保护设备资产归属、设备安装、设备型号、软件版本等属性,作为全寿命周期信息的基础,模块还提供关联添加设备相关运行信息的功能,用户可选择任一条保护设备记录

关联添加缺陷、检修、辅助设备、文档等信息。

(3) 事件及保护动作管理,记录一次设备故障情况以及相应的保护设备动作、故障录波动作以及线路重合闸的情况(针对线路故障),科学、全面地记录并展示每一次事件信息。

(4) 保护缺陷管理,记录设备的缺陷情况,包括缺陷发生和消除的时间、缺陷设备类型、缺陷部位、原因、责任单位、设备退出运行和恢复运行的时间、缺陷现象以及处理措施等,切实反映设备自身的运行情况。

(5) 保护检修管理,记录设备的检修情况,包括保护检修时间、检修类型、检修单位、检修工作中遇到的问题以及处理情况等,该模块还可为工作人员制定检修工作计划提供数据支持。

2.2 统计分析

统计分析模块是模块的重要组成部分之一,严格按照《电力系统继电保护及安全自动装置运行评价规程》(以下简称《运行评价规程》)的要求设计,在此基础上结合四川省电力公司各级调度机构继电保护专业的工作需求,提供多样化的分析方法,对设备基础情况、运行情况等信息进行科学分析,提高信息的可用性,并提供直观、深入的分析结果。

该模块提供《运行评价规程》规定的报表分析功能、结合专业管理工作需求设计的常用报表分析功能、自定义报表分析功能以及常用分析报告一键生成功能。此外,为了能够更加直观地展示分析结果,该模块还采用 iReport 与 Visifire 工具提供图形展示功能,结合各报表分析结果的属性及特点形成柱状、折线、饼状等图形。具体功能情况如下。

(1) 按《运行评价规程》要求设计 19 张报表,同时结合各个报表的特点,设置查询时间、调度单位、电压等级等查询条件,细化分析结果;

(2) 继电保护设备基本情况分析,包括设备发展、分布情况、设备运行年限情况、保护设备国产化、微机化情况、各主要设备制造厂家的市场占有率以及保护设备软件版本应用情况等;

(3) 继电保护设备动作情况分析,包括保护设备动作基本信息、保护设备正确动作率、故障快速切除率等运行指标的计算分析;

(4) 继电保护设备缺陷情况分析,包括保护设备缺陷原因、消缺时间、缺陷责任单位、设备百台故障率、不同运行年限的设备缺陷情况、以及各设备制

造厂家生产设备的缺陷情况等;

(5) 按照各级调度单位需要,可对分析结果进行科学组合,形成分析报告并支持报告的一键生成;

(6) 提供报表设计工具,支持工作人员结合自身需求进行报表设计,从而更充分地利用模块涵盖的各类信息。

3 技术方案及特点

3.1 技术方案

模块的设计及开发充分考虑继电保护专业信息管理 & 统计分析工作的需要,从资源配置到功能设置均采用主流计算机技术与网络技术,且能较好地适应功能扩展,可按照实际情况进行功能的灵活配置。各项解决方案采用 J2EE 标准技术架构、MVC (模型-视图-控制器) 模型及 DAO (数据访问对象) 设计模式。其中, J2EE 架构使模块具有更好的可伸缩性、灵活性、易维护性; MVC 模型有效地实现了独立分层设计,可以快速地响应业务逻辑的变更,为构造应用程序提供强有力的手段; DAO 模式使业务逻辑更加清晰,且富于形象性及描述性,为日后的维护带来极大的便利^[6-8]。

3.2 技术特点

上述技术方案的应用使本模块具有如下特点。

(1) 核心组件均采用标准 Java 语言开发,使其能够支持 Linux、Unix 和 Windows 主流操作系统;

(2) 提供基本信息、信息管理、运行状态监控、数据同步、多系统数据服务交互,多层级软件动态更新等组件,多种类型组件可任意组合配置,从而全面支持用户的多方位需求;

(3) 采用存储加密、权限控制、统一身份认证等机制,在数据存储、管理、服务、应用等各个层次建立安全保障机制,结合 OMS 系统数据管理及传输模式,确保数据的安全与完整;

(4) 采用 iReport 与 Visifire 相结合的方式,实现多维度统计分析功能,采用直观的图、表结合方式展示分析结果,并支持多格式文件生成,充分满足用户的统计分析需求。

4 结 语

针对四川省调各级调度机构继电保护专业信息

管理及分析工作的需求,采用 J2EE 技术架构、B/S 模式的体系结构,基于 OMS 平台,利用 Java 语言和 Web 服务综合集成方案设计开发了继电保护全生命周期信息管理及统计分析模块。与传统的继电保护信息管理系统相比,所设计的模块在如下方面进行了改进。

(1) 从统计分析角度出发,数据结构设计严格遵照《运行评价规程》的细节要求;

(2) 结合一次设备接线方式的特点以及继电保护设备的配置原则,提供便捷的记录录入方式,大幅提高数据录入速度;

(3) 结合继电保护专业特点提供设备数量、时间属性、线路保护通道、设备类型等信息的校核功能,确保数据填报的准确性;

(4) 以保护设备台账为对象,贯穿其生命周期内的全部动作、缺陷、检修、反措、技改等信息,同时将各类信息与保护设备台账关联综合展示,便于工作人员及时、全面地掌握设备情况;

(5) 充分考虑继电保护专业日常管理工作的实际需要,实现了分析结果图形化展示以及分析报告的一键式生成,可为开展设备技术改造、实施“反措”等工作提供科学的数据支撑;

(6) 提供基本信息、信息管理、运行状态监控、数据同步、多系统数据服务交互,多层级软件动态更新等组件,多种类型组件可任意组合配置,从而全面支持用户的多方位需求。

参考文献

[1] DL/T 623-2008,电力系统继电保护及安全自动装置

(上接第24页)

- [2] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
- [3] 刘泽洪,高理迎,余军,等. $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流输电技术研发思路(英文) [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 76-82.
- [4] 国网北京经济技术研究院,中国电力科学研究院. 直流输电电压等级序列研究 [R]. 北京: 国家电网公司, 2008.
- [5] 张文泉. 电力技术经济评价理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 电力工业部. 电网建设项目经济评价暂行办法 [J].

运行评价规程 [J].

- [7] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等. 2007 年国家电网公司继电保护装置运行情况 [J]. 电网技术, 2008, 32(16): 5-8.
- [8] 贾长朱,王剑峰,刘力丰,等. 基于 Web 的电力系统继电保护远程分布式信息管理系统的设计与实现 [J]. 继电器, 2000, 28(10): 65-68.
- [9] 陈月从,林俐,杨东,等. 基于 Java 技术的跨平台图形化继电保护管理信息系统的研究与开发 [J]. 继电器, 2005, 33(18): 15-19.
- [10] 李艳涛,栗然,赵敏. 基于 Web 的继电保护管理信息系统研究与实现 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 41-43.
- [11] 郭挺,谢敏,刘明波,等. SVG 和 Ajax 技术在电网分析及辅助决策支持系统中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 83-89.
- [12] 李国庆,潘振波,王丹,等. 基于 C/S 与 B/S 混合架构的配电地理信息系统 [J]. 电网技术, 2009, 33(6): 102-106.
- [13] 唐婧. 基于 J2EE 的数据发布系统设计与实现 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(12): 180-181.

作者简介:

王云丽(1981),女,硕士,工程师,任职于四川电力调度控制中心;

张烈(1984),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

申华(1978),女,硕士,工程师,研究方向为计算机科学技术。

(收稿日期:2012-11-15)

北京: 电力工业部, 1998.

- [14] 国家发展改革委,建设部. 建设项目经济评价方法与参数(第三版) [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [15] DL/T 5092-1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程 [S].
- [16] 李战鹰,任震,陈永进. 直流输电系统网损研究 [J]. 电力系统自动化设备, 2007, 27(1): 9-12.
- [17] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [18] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型造价: 500 kV 线路分册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期:2012-10-24)

基于概率统计的新疆电气化铁路负荷特性分析及对地区电网的影响

印欣¹, 张绍洲¹, 刘红丽², 常喜强³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 伊犁电力公司, 新疆 伊宁 835000; 3. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 对新疆电气化铁路负荷特性进行分析, 总结出新疆电气化铁路运行组织规律, 同时研究了电气化铁路对地区电网的影响, 即造成地区电网负荷预测准确率、电压调整和控制、供电线路电压质量等方面的问题并提出解决措施, 对于电铁负荷预测、电压调整、运行控制、谐波治理等具有指导意义。

关键词: 电气化铁路; 牵引变电站; 负荷特性

Abstract: The load characteristics of the electrified railway in Xinjiang are analyzed, and the operating organization rules of electrified railway in Xinjiang are summed up. The impact of electrified railway on the regional power grid is studied which causes some problems in the load forecasting accuracy of regional power grid, voltage regulation and control, voltage quality of power supply line etc., and the relevant countermeasures are proposed, which has a guiding significance for load forecasting of electrified railway, voltage regulation, operation control and harmonic suppression etc.

Key words: electrified railway; traction substation; load characteristics

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0033-04

0 引言

新疆第一条电气化铁路精伊霍线精河至伊犁全线共设精河南、敖包、阿恰尔、苏古尔、苏布台、布列开、伊宁东7个电铁牵引变电站, 主要任务是向电力机车供电。牵引供电系统的负荷特性, 主要取决于电力机车的电气特性、铁路线路条件和运输组织方案等因素。电气化铁路的相继投入运行, 已影响到电网的安全、稳定、环保运行和供电质量。从分析电气化铁路运行数据着手, 找出了新疆电气化铁路的运行规律和负荷特性, 在现场调查和实测的基础上, 分析研究了电气化铁路对地区电网的影响, 即造成地区电网负荷预测准确率、电压调整和控制、供电线路电压质量、接入变电站继电保护装置等问题, 提出了加强负荷预测、调度运行管理、电压调整等多项解决措施。对于电铁负荷预测、电压调整、运行控制、谐波治理等方面具有指导意义。

1 电气化铁路负荷特性分析

电气化铁路牵引负荷是移动、幅值变化大而且

频繁的特殊负荷, 其负荷日波动的特征非常明显, 引起这种日波动的原因与线路条件、机车类型与操纵、机车速度、牵引重量等因素有关, 而这些因素又具有随机性, 因此电铁牵引负荷是一个典型的日波动负荷, 具有短时冲击负荷的特征; 电铁牵引负荷又是不平衡负荷, 它引起三相电力系统不对称, 产生负序电流; 形成负序电压; 电铁牵引负荷由整流型电力机车产生, 含有丰富的谐波, 属于谐波电流源。因此对电网的影响较大。

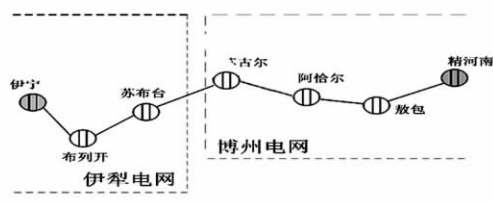


图1 新疆电气化铁路示意图

电铁负荷随时间在不断变化, 一般用负荷图表表示。常规的统计方式是每隔15 min采集牵引变压器高压侧有功功率, 一天采集96个点的数据。采集的数据当中, 有电铁通过的时段牵引变电站向列车供电, 主变压器高压侧有功不为0, 其余时段由于铁路上没有列车通行, 主变压器高压侧采集到的有

功均为0。但考虑到采集误差的影响,原本有功为0的时段内有很小的功率存在,不为0的有功时段内采集到很小甚至0功率,需要根据概率统计的方式剔除由于采集误差造成的不准确。根据SCADA系统实测数据,以2011年1月阿恰尔牵引变电站2号主变压器高压侧有功功率为例,如图2所示。

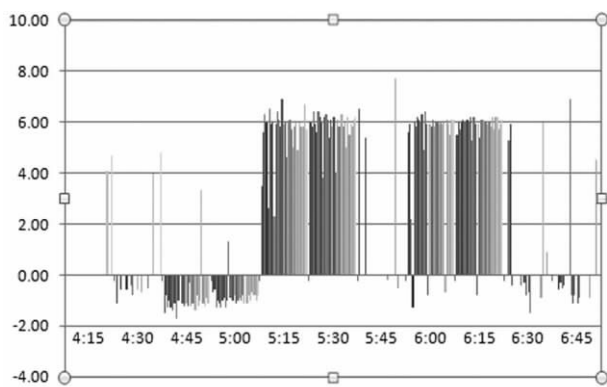


图2 2011年1月阿恰尔牵引变电站2号主变压器
高压侧有功功率示意图(MW)

从图2中可以看出1月阿恰尔牵引变电站的送电情况。每日4:30分之前,牵引变电站接触网几乎没有功率流动,说明铁路上没有大规模的物力、人力运输,负荷较小,零星的负荷可能是铁路人员检修或采集系统造成的误差。4:30~5:00,有接近1 MW的功率流入供电臂内,说明即将有负荷较重的电力机车从阿恰尔牵引变电站送电范围内驶过,电力机车受电将从上一个牵引变电站接触网过渡到阿恰尔牵引变电站接触网,电力机车上的直流电机失去电源,由电动机状态转变为发电机状态向接触网供电。5:00~5:30,电力机车驶入阿恰尔牵引变电站供电范围内,牵引变电站开始给电力机车供电,主变压器向电力机车输送功率较大,达到6 MW左右。受天气、节假日、春运等因素对铁路运力造成的影响,电铁负荷在这一时段内仍然呈现随机性、波动性特点。从图中还可以看出,每日电铁负荷高峰均集中在5:00~5:30和5:45~6:15两时间段内,每日电铁负荷同时率较高,负荷较大,时间节点较为固定,由此推断出两时段内通行的列车均为客运列车。根据铁路运输相关规定,两列电力机车同向行驶时间间隔至少30 min,可以推断出5:45~6:15行驶的列车与5:00~5:30铁路上行驶的列车是相向而行的。其余时刻铁路上有零星的负荷,这是由于天气情况造成火车晚点、误点以及线路检修等原因造成的。

根据以上分析可知,精伊霍电气化铁路每日双向发行一趟客运列车,在每日5:00~5:30和5:45~6:15两时间段由阿恰尔牵引变电站供电,最大负荷为7.7 MW,最小负荷为4.2 MW,平均负荷达到5.9 MW。

2011年3月12日阿恰尔牵引变电站2号主变压器检修,由1号主变压器转带电铁负荷,以SCADA系统实测阿恰尔牵引变电站1号主变压器高压侧有功功率为例,如图3所示(3月12日至3月27日)。

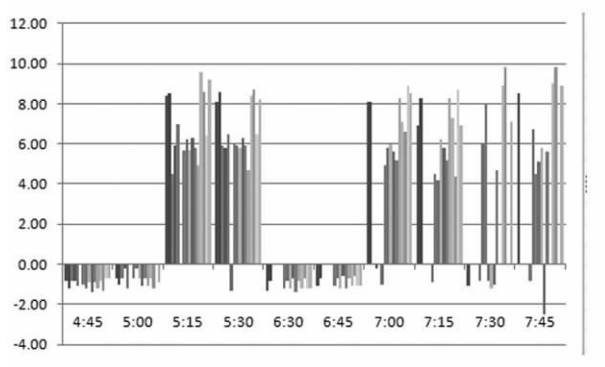


图3 2011年3月12日至27日阿恰尔牵引变电站
1号主变压器高压侧有功功率示意图(MW)

从图3中可以看出,5:00~5:30通行的列车时刻表没有发生变化,而相向而行的列车由5:45~6:15改为6:45~7:15通过牵引站送电范围。由于改变送电方式,同时受天气原因、铁路状况、节假日的影响更加剧烈,阿恰尔牵引变电站3月份负荷同时率较1月份有明显的下降,列车通行时段内负荷波动性更加明显。同时,随着客运量的提升,传输功率也有了一定的增加。从图中可以看到5:00~5:30时段内电铁最大负荷为9.6 MW,最小负荷为4.2 MW,平均负荷为6.9 MW,最大峰谷差为5.4 MW。

对比1月份负荷特性柱状图,可以发现3月份电铁在阿恰尔牵引变电站供电范围内最大负荷较大,平均负荷以及最大峰谷差也较大,日负荷较1月有明显的升高。同时随着线路运行状况的不断改善,客运线路车次不断增加,铁路运力相应提高,使得负荷呈现出的波动性、时段性更加明显。

通过以上分析可知,了解了电铁负荷特性,同时把握了铁路运输的组织方式,对于电网部门更好地开展负荷预测、电压调整、谐波治理、供电可靠性等方面提供了切实的依据。

2 电气化负荷对地区电网的影响

目前伊犁电网所接的电气化铁路牵引变电站负荷主要以 110 kV 电压等级接入伊犁电网,在现场调查和实测的基础上,目前电气化铁路对伊犁电网的影响主要表现在如下几个方面:负荷预测、电压调整和控制、电压质量、继电保护方面。

2.1 负荷管理方面

电气化牵引负荷在有机车运行时,存在负荷,机车停运时,负荷消失,且列车行进过程中遇到的阻力也不断变化,列车需要频繁地启动、加速、惰行、制动(仅考虑单个牵引变电站供电范围内机车的启动次数,电气化铁路为 20 次以上),或者从一个供电区进入或退出,都将造成牵引负荷剧烈地波动,这些都使得牵引变电站负荷存在着随机性、无序性、冲击性,负荷随着机车进行波动,这对地区电网负荷预测准确性产生一定的影响,典型日负荷波动曲线具体参见图 5。

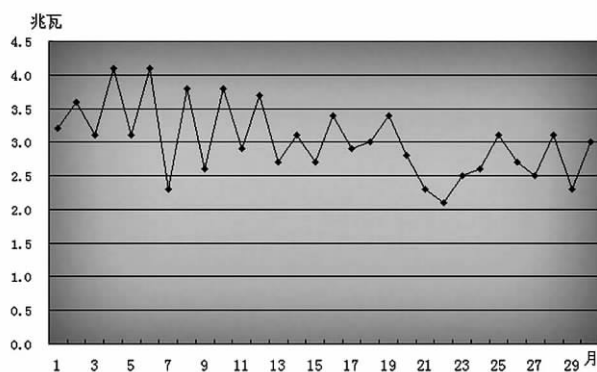


图4 伊东牵引变电站月负荷波动曲线

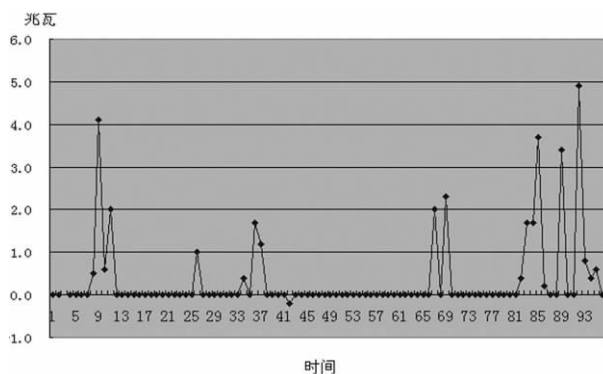


图5 伊东牵引变电站日负荷波动曲线

目前伊犁地区电网电铁负荷波动在 0 ~ 5 MW,且波动较快。这增加了负荷预测的难度,影响了准确性的提高,对于发电出力安排、地区上下网功率交

换均造成了影响。

2.2 电压控制方面

电铁牵引负荷在波动时,产生较大的冲击电流。产生最大电流突变量的主要原因是电力机车在合闸时内部变压器产生了励磁涌流,最大涌流幅值大约可达最大容量机车额定电流的 4 倍,在 PCC 点将产生较大的电压波动,电压的波动对与之相连的枢纽变电站电压调整和控制也产生较大的影响。典型日电压波动曲线具体参见图 6。

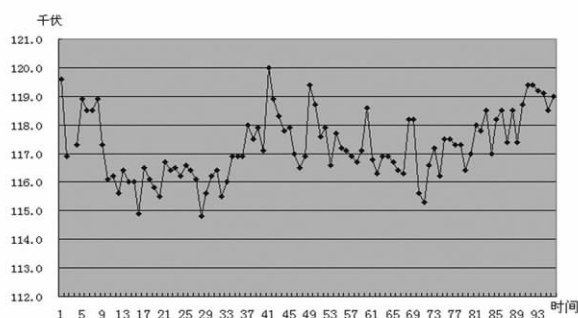


图6 枢纽变电站 110 kV 母线日电压波动曲线

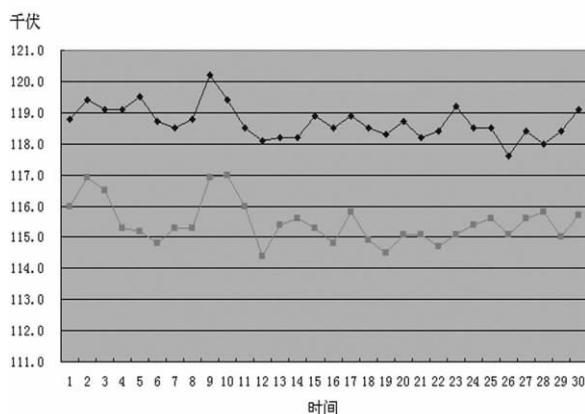


图7 枢纽变电站 110 kV 母线月电压波动曲线

从上图可以看出,日负荷波动较大时,对电压影响也较大,110 kV 电压日波动达到 6 kV 以上,若在负荷高峰时期,枢纽变电站电压较低时,易造成电压越限,这增大了枢纽变电站电压控制难度。若电铁交错,班次增多,之间间隔时间短,那么长时间闪变也会明显。突然的电压变化导致自动化控制装置停顿或误动、变频调速器停顿、电动机暂停,破坏生产,设备运行会变得困难、过热或导致绝缘性能不能满足实际电压的变化。长期或反复的电压波动会降低设备使用寿命,反复出现的电压波动可能导致计算机系统硬件损坏、死机、异常。还会造成电表转速加快,瞬流会严重影响感性电度表表盘的作用力矩和转速,使表盘发生阶跃式地转快。

2.3 对设备的影响

电铁牵引负荷由于产生负序电流,其负序电流造成三相电流不对称,因而会造成电力变压器三相电流中有一相电流增大,而不能有效发挥变压器的额定出力(变压器容量利用率下降)。另外,还造成变压器的附加能量损失,在变压器铁心磁路中产生附加发热。

电铁牵引负荷由于产生负序电流,其负序电流造成三相电流不对称,负序电流流过送电线路时,负序功率实际上并不做功,而只造成电能损失,增加了网损,降低了送电线路的输送能力。

2.4 对供电质量的影响

电铁牵引变电站所接的公共 PCC 点的各项电能指标与其短路容量有着密切的关系,短路容量越大,分配给牵引变电站负荷的限值就越大,电铁负荷对系统的相对影响就越小。电气化牵引变电站在设计时,其影响电能质量的校核通常采用最终规模的短路容量进行校核,在电气化牵引站接入时,其系统规模未达到最终规模,同时在系统运行方式变化时,系统的短路容量也不同。所以电铁牵引变电站所接的公共 PCC 点的各项电能指标也是一个动态变化,在系统小方式时,尤其是在后半夜时,公共点的各项指标均增大,过渡时期短路电流比设计短路电流小,将造成谐波增大。图 8 为枢纽变电站 220 kV 母线短路电流变化图,从图中可以看出,短路电流是有一定变化的,因此需要加强对谐波的监测。

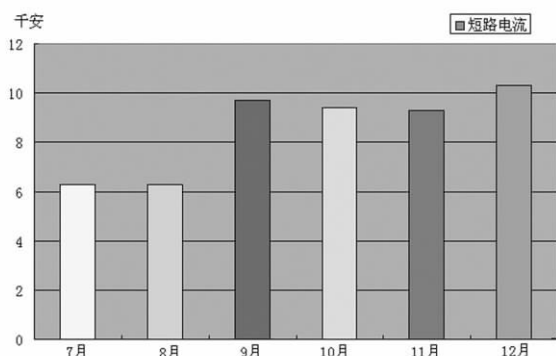


图 8 枢纽变电站 220 kV 母线短路电流变化图

3 针对电铁负荷对地区电网的影响所采取的措施

目前新疆正大力建设电气化铁路,同时电气化铁路牵引负荷也在快速增长,面对电铁牵引负荷增长的局面,需要积极应对,积极采取有效措施保证电

网安全稳定运行和最大限度地接纳电气化牵引负荷。

(1) 针对电气化铁路牵引负荷的波动性、无序性和随机性,加大对电铁牵引负荷的分析,掌握其运行规律的变化,通过对负荷的概率分布分析,找出其中的特性,便于更好地进行负荷预测和分析。

(2) 针对电气化铁路牵引负荷对电压的影响,加大分析力度,尤其是仿真分析,提前做好技术措施,防止电压波动幅度较大,确保电压合格。对电气化铁路接入的公共站,精心监控母线电压,有条件的加装动态无功补偿装置,以跟踪系统电压变化。

(3) 针对电气化铁路牵引负荷的冲击性、单相性、负序性,加大对设备的检测力度,定期进行设备运行状态评估,以提前发现问题、解决问题。

(4) 针对电气化铁路牵引负荷产生的谐波,加大对谐波的检测、治理和控制。定期进行谐波状态评估,以提前发现问题、解决问题。

4 结 语

对新疆电气化铁路负荷特性进行分析研究,总结出电气化铁路运行组织规律,同时结合地区电网提出电铁对地区电网的影响。掌握了电气化铁路的运行规律,可以提高电网负荷预测的准确性,同时对于电压调整、谐波治理、短路电流、供电质量等方面具有一定的指导意义。牵引供电系统是一个庞大而又复杂的系统,对其进行全面的分析是一项较为复杂的工作。今后的工作还有很多,如列车牵引运行过程的仿真以及电力列车动态仿真模型,计算各个变电所供电臂负荷依时间变化的全过程以及全线列车运行的全过程等等,将在今后的学习和工作中在这些方面做进一步分析研究和探讨。

参考文献

- [1] 原媛. 电力负荷特性分析及中长期负荷预测方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [2] 贺文武. 电力负荷特性统计分析方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [3] 康重庆. 电力系统负荷预测 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 赵希正. 中国电力负荷特性分析与预测 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 37, 52 - 53.

(下转第 76 页)

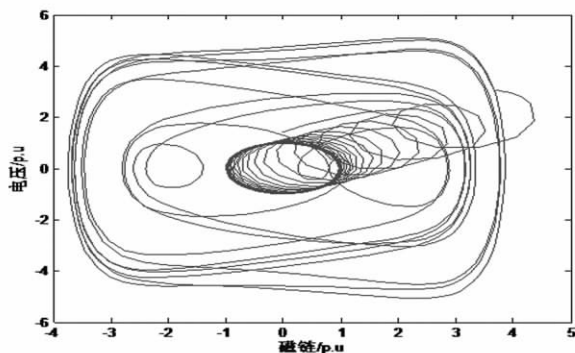


图9 混沌抑制的相平面图(异结构)

4 结 论

在基于系统稳定性理论的基础上,采用追踪控制与广义投影同步方法,设计合适的非线性反馈控制器,能够有效地实现同结构或异结构系统之间的混沌抑制与同步。数值仿真结果表明:该方法能够有效地实现铁磁谐振过电压混沌现象的抑制与同步。所设计的方法简单,易于实现,对抑制 110 kV 变电站时常发生的铁磁谐振过电压混沌现象具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] 贾红琴. 电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制 [J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 69-70.
- [2] 李云阁, 施围. 母线间电容对铁磁谐振的影响 [J]. 高压电器, 2004, 40(2): 112-114.
- [3] Z. Emin, B. A. T. Al Zahawi, D. W. Auckland, et al. Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers:

A Study Based on Nonlinear Dynamics [J]. IEEE Proceeding Online, 1997, 144(4): 383-387.

- [4] Jacobson D. A. N. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System [J]. Power Engineer Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 1206-1212.
- [5] 代姚, 司马文霞, 孙才新, 等. 应用 T-S 模糊方法对铁磁谐振过电压的混沌抑制 [J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 878-883.
- [6] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 基于常值脉冲法的铁磁谐振过电压混沌抑制 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 57-51.
- [7] 司马文霞, 郑哲人, 杨庆, 等. 用参数不匹配混沌系统的脉冲同步方法抑制铁磁谐振过电压 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 218-225, 251.
- [8] 徐勇. 电压互感器 V-I 特性对谐振影响的物理仿真 [J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 61-64.
- [9] 张博, 鲁铁成, 杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 31-35.
- [10] 蔡国梁, 黄娟娟. 超混沌 Chen 系统和超混沌 R_össler 系统的异结构同步 [J]. 物理学报, 2006, 55(8): 3997-4004.
- [11] 闵富红, 王执铨. 复杂 Dynamical 混沌系统的追踪控制与同步 [J]. 物理学报, 2008, 57(1): 31-36.

作者简介:

何波 (1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压;

康积涛 (1962), 男, 教授, 研究方向为电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2012-10-10)

(上接第 36 页)

- [1] 林海雪, 周胜军. 电气化铁路的谐波标准问题 [J]. 中国电力, 1999(9): 55-58.
- [2] 刘遵义, 杨红旗. 电气化铁路对河南电网电能质量的影响(讲义) [J].
- [3] 刘付平, 阮联生. 负序电流对电力系统的危害(讲义) [J].
- [4] 吴竞昌主编. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 铁道部第二勘测设计院. 牵引供电系统 [J].
- [6] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 电力负荷特性分类方法研究 [J]. 电力系统自动化, 2005(22): 33-38.
- [7] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法

及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64-68.

- [2] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的分类与综合 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 12-16.
- [3] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Designing Cost Effective Demand Management Contracts Using Game Theory [J]. IEEE PES Winter Meeting, New York, January, 1999.
- [4] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(2): 317-322.

(收稿日期: 2012-09-25)

风光储输系统最优容量配比研究

张钟文¹, 曹 敦¹, 彭长巍², 钱 芳¹

(1. 四川省电力公司检修公司雅安中心, 四川 雅安 625000;

2. 张家界供电局, 湖南 张家界 427000)

摘要: 风能和太阳能均为可再生清洁能源, 由于其不确定性, 接入电网会造成一定的波动, 但风能和太阳能有天然的互补性, 再与蓄电池储能相结合, 可使其功率输出平稳, 减少波动。以弃风损失、弃光损失最小为目标对风力发电、光伏发电和蓄电池储能三方面进行容量最优配置的研究。首先针对风速数据和太阳辐射量数据, 确立了风速模型以及光伏阵列倾斜面上太阳辐射量的计算, 利用风力机功率输出特性和光伏阵列输出特性, 得到风力发电量和光伏发电量与风速和倾斜面上太阳辐射量的关系式, 最终建立一个含不确定参数的优化模型。以某地区的风速数据和太阳辐射量数据为例, 根据优化模型, 在该地区建立风光储输系统并对系统各部分的容量进行最优化配置。

关键词: 风光储输系统; 优化设计; 容量配置; 双参数威布尔分布

Abstract: Wind energy and solar energy are the renewable clean energy. Because of their uncertainty, there will be some fluctuations when accessing into the grid. The wind energy and solar energy have a natural complementarity, and then combined with the battery energy storage, the output of their power can be smooth and the fluctuations can be reduced. The optimal configurations of the wind power generation, photovoltaic power generation and battery energy storage are studied taking the minimum loss of wind power casting and the minimum loss of light casting as the objective. Firstly, aiming at the wind velocity data and solar radiation data, the wind velocity model is established and the solar radiation of the established PV array tilted surface is calculated. Using the power output characteristics of wind turbine and the output characteristics of photovoltaic array, the relationship expressions between wind power generation, photovoltaic power generation, wind velocity and solar radiation on tilted surface are obtained. Finally, the optimization model with uncertain parameters is established. Taking wind velocity data and solar radiation data of a region for example, a hybrid wind/PV/energy storage system is built and the optimal capacity configuration for the various parts of the system is calculated according to the optimization model.

Key words: hybrid wind/PV/energy storage system; optimization design; capacity configuration; two-parameter Weibull distribution

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)01-0037-07

0 引言

风光储输发电系统, 即风力发电、光伏发电和储能输能相结合的系统, 是采用风力发电机和太阳能电池方阵组成的一个发电系统, 它从太阳能、风能发电都需要蓄电池组储能共同点出发, 巧妙地将太阳能发电和风能发电结合在一起, 在很大程度上避免了太阳能、风能最大的问题, 即发电可维持性不高的缺点^[1]。

风光储输系统^[2,3]有以下特点: (1) 利用风能、太阳能的互补性, 可以获得比较稳定的输出, 系统有较高的稳定性和可靠性; (2) 在保证同样供电的情况下, 可大大减少储能蓄电池的容量; (3) 通过合理地设计

与匹配, 可以基本上由风光储输发电系统供电, 很少或基本不用启动备用电源如柴油机发电机组等, 可获得较好的社会效益和经济效益。

风光储输系统容量优化的目标应同时考虑可靠性、经济性及环境效应。经济性即保证最少弃风损失(风能完全跟踪风速)、弃光损失(光能跟踪辐射量), 以最小的成本获得最大的电能输出; 可靠性即功率输出平稳, 风光储联合功率系统输出符合负荷曲线; 环境效应即对环境的污染最小, 由于是可再生能源发电, 相比传统能源发电, 对环境的污染较小。

1 发电模型建立

1.1 风力发电模型

风速模型选用双参数威布尔分布风速模型^[4-6]。

双参数威布尔(Weibull)分布是一种主流的描述风频分布的概率模型,Weibull双参数分布需要从离散数据拟合出理想的能反应真实情况的函数,计算过程中风速间隔按照国际IEA组织推荐的比恩法(method of bins)定为1 m/s。

Weibull分布的概率密度函数为

$$P(v < v_i < v + dv) = P(v > 0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right] dv \quad (1)$$

式中, c 是尺寸参数; k 是形态参数; v 为样本风速。

其累积分布函数为

$$f(v) = P(v < v_i) = P(v \geq 0) \{1 - \exp[-(\frac{v_i}{c})^k]\} \quad (2)$$

取风速作为随机变量,求其前6阶矩,用Gram-Charlier级数就可以很好地拟合出其概率密度函数。

如果知道了风速平均值 $\bar{v}$ 与风速方差 σ ,则

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} (1 \leq k \leq 10) \quad (3)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (4)$$

式中, $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$; $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$; $\Gamma(a)$ 为

Gamma函数,其定义式为 $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy$ 。

风能平均功率密度可以用式(5)表示。

$$\overline{P_w} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (5)$$

式中, ρ 为空气密度。

如果 $f(v)$ 是威布尔分布参数,则

$$\overline{P_w} = \frac{\rho \bar{v}^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k})}{2 [\Gamma(1 + \frac{1}{k})]^3} \quad (6)$$

不同的风力机具有不同的功率输出特性,所以用来描述风机性能的模型也不大一样,由于要建立容量配置的最优模型,故功率输出特性要与额定功率有关,采用下述方程来计算风力机的功率输出^[7-9]。

$$P_w(v) = \begin{cases} P_r \frac{v^k - v_c^k}{v_r^k - v_c^k} & (v_c \leq v \leq v_r) \\ P_r & (v_r \leq v \leq v_f) \\ 0 & (v \leq v_c \text{ or } v \geq v_f) \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_r 为风力机的额定功率; v_c 为切入风速; v_r 为额定风速; v_f 为切出风速; k 为威布尔形状参数。

通过分析一年中风电场所地的风速数据,可求得年平均风速和方差,运用公式(1)、(3)、(4),求出年威布尔形状参数 k 、标度参数 c ;通过分析风电场所在地每月风速数据,求得月平均风速和方差,运用公式(1)、(3)、(4),求出月威布尔参数^[8-10]。

风速大于或等于某一特定值的概率,可以用下面的威布尔公式来计算。

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \\ P(v \geq u) = \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

对于大多数风电机而言,切入风速在3.0~4.5 m/s。如果假设其切出风速为无穷大,则通过运用式(8),可以求得当风电机切入风速为3.0 m/s时,全年运行7 869 h,运行概率达89.83%;切入风速为4.5 m/s时,全年运行6 692 h,运行概率达到76.39%。从这么高的运行小时数可以看出,若风电场所在地的风能发电储量丰富,切入风速为3 m/s的风电机几乎可以全年运行。

运用式(8)与风力机功率输出特性,可求得风力机的每月发电量与年发电量。为计算方便,将每月天数按照30 d计算。

1.2 光伏发电模型

要求得太阳辐射量,需要对当地的太阳能辐射资源、地理及气象数据有尽量详尽的了解,从气象站得到的资料一般只有水平面上的太阳总辐射量 H 、水平面散射量 H_d ,通过这两个数据求得太阳在不同倾斜面上辐射量^[11]。

$$HT = (H - H_d) R_b + H_d \frac{1 + \cos \alpha}{2} + H \frac{1 - \cos \alpha}{2} \rho \quad (\text{kWh/m}^2/\text{day}) \quad (9)$$

式中, H 、 H_d 为水平面的总辐射量和散射量; α 为光电板倾角; ρ 为地物表面的反射率,在工程计算中一般取0.2; R_b 为倾斜面与水平面的直射量之比。

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \alpha) \cos \delta \sin w_s + w_s \frac{\pi}{180} \sin(\phi - \alpha) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin w_0 + w_0 \frac{\pi}{180} \sin \phi \sin \delta} \quad (10)$$

式中, ϕ 为当地纬度; w_s, w_0 是倾斜面和水平面的日落时角; δ 为太阳赤纬角。

$$\delta = 23.45 \sin |2\pi \times \frac{284 + n}{365}| \quad (11)$$

式中, n 是一年中的第几天。

$$W_0 = ar \cos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (12)$$

$$W_s = \min [W_0, ar \cos(-\tan(\phi - \alpha) \cdot \tan \delta)] \quad (13)$$

光伏发电量为

$$E_s = [P - P(T - 25) \times 0.4\%] \frac{HT}{1} / 1000 \quad (\text{kWh/day})$$

式中, P 为光伏发电额定容量; T 为月平均气温。

1.3 蓄电池模型

风光储输系统一般都建在风能和太阳能都比较丰富的地区,能充分利用风能和太阳能互补发电,但是一年之中还是存在日照少、风力较弱的时候,这个时候需要用蓄电池来供电,采用下述模型来确定蓄电池最低容量^[1]。

蓄电池组最低容量的确定和负载的要求有关,假定某地点的负载功率曲线 f_r 为一直线,即一天中负载为一常量,当选用了某一类型的风机和 PV 组件,确定了数量之后,根据当地的气象数据,得出它们的月发电量曲线分别为 f_1 和 f_2 ,两者相加的和 f_3 就是发电系统月发电量曲线(f_3 与 f_2 重合部分,即当没太阳光 f_1 为 0 的时候),然后与负载功率需求曲线 f_r 对比, f_3 处于 f_r 下端的时间区间段是需要蓄电池组来供电的时间。当 $f_3 < f_r$ 时需要蓄电池组供电,对这些区间部分分别积分,积分绝对值大者为当月蓄电池组最低容量 W_b 。考虑到蓄电池的最大放电深度,实际计算还要除以最大放电深度 DOD ,深循环型蓄电池一般取值为 80%,浅循环型蓄电池一般取值为 50%。假设在一年中共有 n 段区间,那么蓄电池最低容量 W_b 可以表示为

$$W_b = \max [\int (f_r - f_3) dx] / DOD \quad (14)$$

在算例的蓄电池组最低容量确定中,假设某地点的负载功率曲线一定,每月的负载功率设为一确定值,当确定了风力发电、光伏发电容量之后,根据当地的气象数据,分别得到它们的月发电量,两者相

加的和就是发电系统月发电量,然后与负荷月需电量相比较,若月发电量小于负荷月需电量,则该部分电量由蓄电池来提供,得到当月蓄电池最低容量,比较每月蓄电池最低容量,取最大值作为所需的蓄电池容量。

1.4 负荷模型

优化目标要求理想平稳输出,即联合系统的功率输出曲线符合负荷曲线,在研究中,考虑功率输出符合负荷曲线的走向趋势即可,并网后不会引起电网波动。

年负荷曲线一般指年最大负荷曲线,即表示一年内每月最大有功功率负荷变化^[11]。根据年负荷曲线,可得到每个月的最大有功功率负荷,因为该优化问题是按月考虑,简化考虑时,将每个月的负荷都按照该月的最大有功负荷来计算。

对于不同行业,均可从有关手册查到他们的最大负荷利用小时数,故用电量为每月的最大负荷与该月最大负荷利用小时数的乘积。

2 优化模型及优化算法

2.1 优化模型

为确定风力发电、光伏发电和储能 3 个方面的最优配比,建立优化模型,目标是保证最少的弃风损失、弃光损失,最少的弃风损失是指把已有风能全用上,风能完全跟踪风速;功率输出平稳,即风光储输联合系统的输出要符合负荷曲线,最终要求功率输出平稳是因为调风调频比较困难。

在建立优化模型时,将最小弃风损失、弃光损失作为目标函数,功率输出平稳作为约束条件,即负荷曲线留有一定裕度,有一定的上下波动的范围。先暂不考虑蓄电池的容量,风力发电容量、光伏发电容量确定后,再计算蓄电池容量^[12-14]。

系统的总的弃风损失、弃光损失最小。

目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^{12} [W_w(i) + W_s(i) - W_{load}(i)] \quad (15)$$

式中, W_w 为风力发电能量;第 i 个元素代表风力发电机在第 i 个月发电的总能量; W_s 为光伏发电能量,第 i 个元素代表光伏组件在第 i 个月发电的总能量。同理, W_{load} 为负荷用电量,第 i 个元素代表负载在第 i 个月所需要的总能量。每个月均按 30 d 来计

算。

功率输出符合负荷曲线,留有一定裕度。

约束条件为

$$\begin{cases} P_w > 0 \\ P_s > 0 \\ P_{load} > 0 \\ 0.9P_{load}(i) \leq P_w(i) + P_s(i) \leq 1.1P_{load}(i) \quad i=1,2,\dots,12 \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_w 为风力发电功率,第 i 个元素代表风力发电机在第 i 个月的发电平均功率; P_s 为光伏发电功率,第 i 个元素代表光伏组件在第 i 个月的发电平均功率。同理, P_{load} 为负荷月功率,第 i 个元素代表负载在第 i 个月的用电平均功率。

2.2 优化算法

在研究中,所采用的优化算法的基本思想为:采用循环求解的方法,根据负荷用电量初步估计风光光伏的最大装机容量,即上限值(该值也可随意假设),取值时要偏大,风力发电量、光伏发电量作为外层循环,约束条件作为内层循环,符合约束条件则求出其风光损失,通过循环找出风光损失最小的最优容量配置。

优化算法流程图如图1所示。

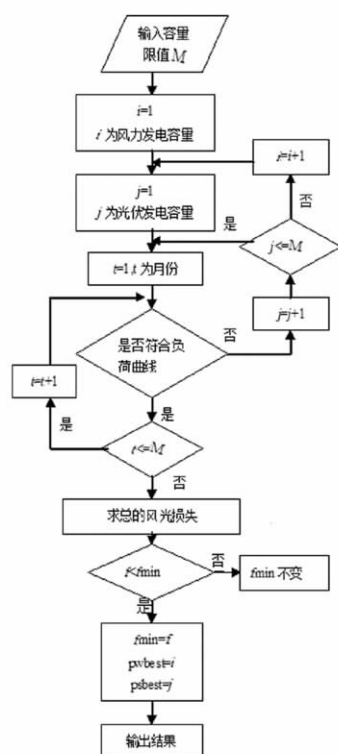


图1 优化算法流程图

3 算例分析

某地地理位置为北纬 $45^{\circ}40'$, 东经 $116^{\circ}58'$, 该地的气象数据如表1所示。

表1 当地气象数据资料

月份	水平面总辐射 平均值 ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	水平面散射 辐射平均值 ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	月平均 气温 / $^{\circ}\text{C}$	月平均 风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.86	0.74	-22	7.26
2	2.69	1.08	-17	6.41
3	3.97	1.57	-8.6	6.91
4	5.26	2.07	2.24	7.67
5	6.25	2.44	11.5	6.29
6	6.21	2.59	17.9	6.79
7	5.68	2.49	21.1	6.47
8	5.17	2.20	19.4	6.33
9	4.21	1.75	10.4	6.96
10	3.06	1.26	0.93	7.78
11	2.06	0.84	-11	7.36
12	1.63	0.65	-19	8.26

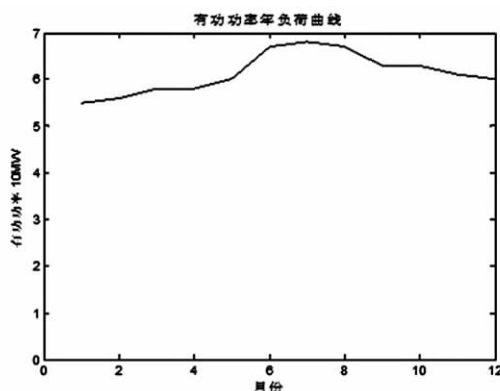


图2 该地区有功年负荷曲线

该地的年负荷曲线如图2所示。

若在该地建立风光储输系统,则确定风力发电、光伏发电和蓄电池的容量。

通过分析该地区的风速数据,求得年平均风速和方差。运用式(1)、(3)、(4),可求出威布尔形状参数 $k=2.27$, 标度参数 $c=8.02 \text{ m/s}$ 。

通过分析每月风速数据,求得月平均风速和方差。运用式(1)、(3)、(4)可求出月威布尔参数,其结果如表2所示。

从表2中的数据可以看出,每月的威布尔参数

各不相同,表明一年中每个月的月平均风速分布函数各不相同。图 3 列出了两个典型的月平均风速分布函数曲线的比较。

对于大多数风电机而言,切入风速在 3.0 ~ 4.5 m/s。如果假设其切出风速为无穷大,则运用式(9),可以求得风电机风速为 3.0 m/s 时,全年运行 7 869 h,运行概率达到 89.83%;切入风速为 4.5 m/s 时,全年运行 6 692 h,运行概率达 76.39%。从这么高的运行小时数可以看出,该地区的风能发电储量十分丰富,切入风速为 3 m/s 的风电机几乎可以全年运行。

通过式(6) 求出该地区年风能平均功率密度为 377.4 W/m,全年风能发电储量为 3 306 kWh/m²。同样运用式(5) 可以求得月风能平均功率密度,结果如表 3 所示。

表 2 当地月威布尔参数

月份	平均风速/ (m·s ⁻¹)	形状参数 <i>k</i>	标度参数 <i>c</i> /(m·s ⁻¹)
1	7.26	2.48	8.19
2	6.41	2.24	7.23
3	6.91	2.38	7.80
4	7.67	2.57	8.64
5	6.29	2.21	7.11
6	6.79	1.99	7.66
7	6.47	1.88	7.29
8	6.33	2.09	7.15
9	6.96	2.23	7.86
10	7.78	2.48	8.77
11	7.36	2.95	8.24
12	8.26	2.54	9.30

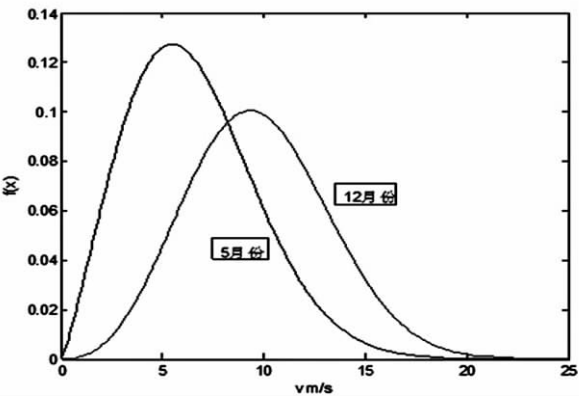


图 3 5 月和 12 月风速分布函数曲线图

图 4 给出了月平均风速和月风能平均功率密度的变化曲线。从图 4 中可以看出,两条曲线有类似

的变化趋势,但不尽相同,原因在于月平均功率密度不仅由平均风速决定,而且还由威布尔形状参数 *k* 所决定。

表 3 该地区月风能平均功率密度

月份	平均功率密度/(W·m ⁻²)
1	375.3
2	281.0
3	334.3
4	431.1
5	268.7
6	374.5
7	344.9
8	288.7
9	361.1
10	462.0
11	348.1
12	543.0

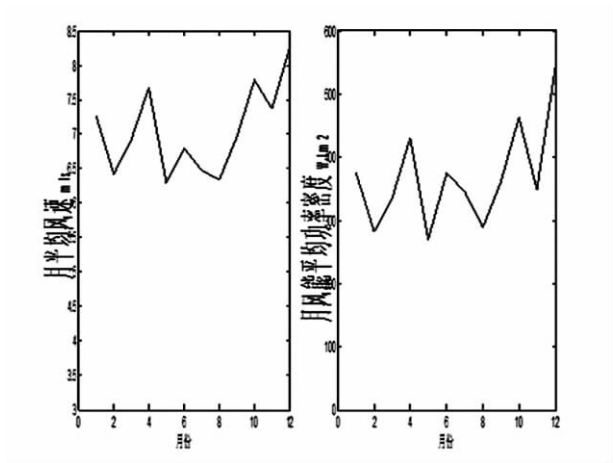


图 4 月平均风速和月风能平均功率曲线图

所选用风机的额定风速为 10.5 m/s,切入风速为 4 m/s,切出风速为 18 m/s。表 4 为所选定的风电机在各个月份不同的运行概率。

从表 4 中可以看出,每个月风电机的运行概率都不一样,11 月份的运行概率最低,为 71.94%。若按照每月 30 d 计算,11 月份和 7 月份的运行时间相差 121.5 h。月运行概率的变化趋势与月风能平均功率密度的变化趋势不一致,其原因在于运行概率不仅由风速分布决定而且还决定于风电机的性能。

根据提到的风力机功率输出特性式(7),假设装机容量为 *P*,在不同的风速时风电机所发出的功率可用风电机输出特性来求解。

表 4 该地区风电机月运行概率

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
运行概率	0.843 5	0.766 3	0.814 8	0.869 5	0.754 9	0.755 8	0.719 4	0.742 0	0.799 4	0.864 4	0.888 1	0.884 6

月风力机发电量则根据月平均发电功率、月运行概率来求解,每月按照 30 d 来计算。

光伏发电量的计算相比较为简单,根据该地区的气象资料中的每月平均水平面总辐射量和水平面散射辐射,利用公式(9)~(12)求出倾斜面上辐射量,倾斜角度在文中的求解中设为 40°。根据所求出的每月平均辐射量,利用公式(13),得到光伏发电量与辐射量的关系式,即当光伏发电系统的容量确定以后,光伏系统发电量与光辐射量有一定的对应关系。

根据年有功功率负荷曲线,根据有功功率年负荷曲线的定义,可知其表示一年内每月最大有功功率负荷变化,故由该曲线可得到每个月的最大功率,并将其作为每月负荷有功功率来考虑,每天负荷最大利用小时数为 15 h,每月负荷有功功率如表 5 所示。

表 5 该地区月负荷有功功率

月份	有功功率 10 MW
1	5.5
2	5.6
3	5.8
4	5.8
5	6.0
6	6.7
7	6.8
8	6.7
9	6.3
10	6.3
11	6.1
12	6.0

算例计算结果如下。

风力发电量、光伏发电量容量分配结果为风力发电容量为 60 MW,光伏发电容量为 110 MW,初步计算每个月的蓄电池充放电量如表 6 所示。

表 6 初步计算蓄电池充放电量(- 代表放电) 单位: MWh

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
充放电量	1.71	-90.33	43.48	240.9	-4.66	-50.35	-158.92	-179.81	-40.62	64.84	-105.16	123.68

由表 6 可以看出,蓄电池 4 月份放电量最大,蓄电池的容量为 240 MWh,在研究中由于未考虑蓄电池的放电深度,故取最大的蓄电池充放电量作为蓄电池的容量。

最后可得该实例的最优化配置结果即风力容量为 60 MW,光伏容量为 110 MW,蓄电池容量为 240 MWh。

将风光联合系统的功率输出曲线与有功功率负荷曲线相比较,如图 5 所示。

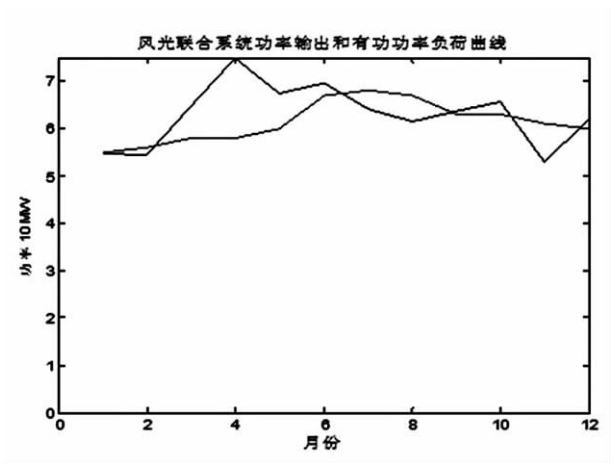


图 5 风光联合系统功率输出曲线和有功功率负荷曲线

从图 5 可以看出,风光联合系统的功率输出曲线较接近有功功率负荷曲线。在风、光联合系统中加入蓄电池可进一步改善系统的输出特性,使系统输出稳定,更符合有功功率负荷曲线。

4 结 语

随着传统能源的供应不足以及传统能源对环境的污染加重,可再生能源的发展越来越引起人们的关注。风能和太阳能这两种能源取之不尽用之不竭,并且具有天然的互补性,建立风光互补系统将会是今后大力发展的方向。

根据发电模型,进行风、光储输系统优化,优化目标有两个:系统弃风弃光损失最小;系统输出平稳,

功率输出曲线基本符合负荷曲线。在研究中,将目标2作为约束条件,并考虑一定的裕度,将目标1作为优化目标,进而建立了优化模型。但未考虑蓄电池容量与其成本的关系,在下一步的研究中,会对其进行进一步的改进。

参考文献

- [1] 聂继华,杨益民. 风/光互补发电系统的优化设计 [J]. 节能, 2008(10): 50-53.
- [2] 李爽. 风/光互补混合发电系统优化设计 [J]. 北京: 中国科学院, 2001.
- [3] 朱芳,王培红. 风能与太阳能光伏互补发电应用及其优化 [J]. 上海电力, 2009(1): 23-26.
- [4] 刘晓光. 风力发电系统风力机输出特性的模拟与控制 [J]. 青岛: 青岛大学, 2009.
- [5] 祝贺,徐建源. 风电场 GM-WEIBULL 风速分布组合模型出力预测 [J]. 华东电力, 2008, 36(11): 144-146.
- [6] HJ Green, J Manwell. A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems [A]. Proceedings of Wind Power'95 [C]. Washington DC, 1995.

- [7] 徐宝清,田德,韩巧丽,等. 风力发电机组输出功率特性的数值模拟 [J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2008(1): 30-33.
- [8] 陈博. 风光复合发电的初探 [J]. 上海电力, 2008(2): 139-141.
- [9] Lu Lin, Yang Hongxing. Wind Data Analysis and a Case Study of Wind Power Generation in Hong Kong [J]. Wind Engineering, 2001, 25(2): 115-123.
- [10] 陈俊. 光伏系统发电量计算的分析 [J]. 农村牧区机械化, 2006(2): 27-28.
- [11] 陈珩. 电力系统稳态分析(第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] 陈赞,严正. 可再生能源并网发电的可靠性分析和节能分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 215-218.
- [13] 李丹,彭军,余岳峰. 离网型风光互补发电系统匹配方法优化研究 [J]. 华东电力, 2008, 36(3): 86-90.
- [14] 包能胜,刘军峰,倪维斗. 风电与燃气轮机互补发电容量配比的仿真研究(广东省自然科学基金项目) [J].

(收稿日期: 2012-09-25)

(上接第28页)

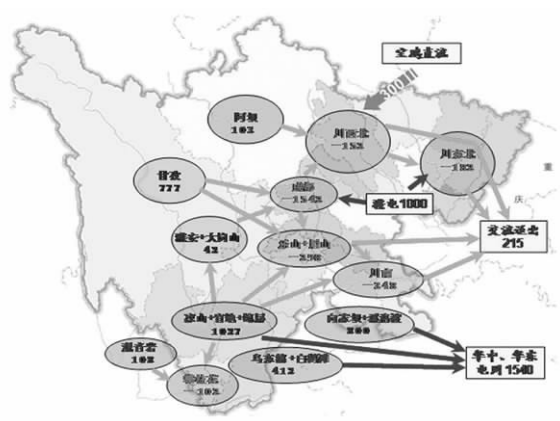


图6 2020年枯大方式四川电网电力流向示意图

5 结 语

(1) 四川水电所占比重大,丰枯期出力差异明显,“丰盈枯缺”矛盾十分突出。引入新疆火电是解决枯期电力缺额的最佳途径,通过水火互济运行,“疆电入川”与“川电外送”通道协调运行,四川能源综合利用及特高压交直流电网的整体经济效益明显提高。

(2) 根据四川省内电力流向分析,确定“疆电入川”受端换流站宜落点在成都东部(金堂)、德阳南部(中江)、遂宁西部(大英)、资阳北部(简阳、乐至)结合部。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 张云洲. 我国跨区域电力资源配置前景分析特高压 [J]. 中国电力, 2004, 37(9): 5-7.
- [4] 孙昕,刘泽洪,印永华,等. 中国特高压同步电网的构建以及经济性和安全性分析 [J]. 电力建设, 2007, 28(10): 7-11.
- [5] 孙正运,裴哲义,夏清,等. 减少水电弃水调峰损失的措施分析 [J]. 水利发电学报, 2003, 83(4): 1-7.
- [6] 魏杰. 关于当前西藏电力供需形势的分析 [J]. 水力发电, 2005, 31(7): 14-16.

(收稿日期: 2012-10-24)

对大型风电场接入电网并网方式的思考

史亚娟¹, 王海云¹, 常喜强²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 随着大型风电场开发建设、接入电网, 结合当前大型风电场接入电网后运行存在的问题, 对大型风电场接入电网并网方式进行了分析和讨论, 就并网方式进行了研究, 从风机运行特点、风电场并网后对电网的影响、电网故障后对风电场的影响等方面展开了讨论。通过对比分析交流输电方式与柔性轻型直流输电方式的优缺点, 电网系统的稳定性及输电的可靠性以及故障时对风机的影响, 提出了大型风电场接入电网方式的相关建议, 为大力发展风电清洁能源, 大型风电场的并网安全稳定运行, 减小系统影响提供借鉴, 同时也为风电接入系统设计提供参考。

关键词: 并网方式; 交流输电; 柔性轻型直流输电; 稳定性

Abstract: With the development, construction and integration of large-scale wind farms, and combined with the existing running problems after the integration of large-scale wind farms, the integration methods of large-scale wind farms when connecting to the grid are analyzed and discussed. The operating characteristics of fan, the influence of wind farms after the integration on power grid, and the influence of faulted power grid on wind farms are discussed. By comparing the advantages and disadvantages of AC transmission system with flexible light DC transmission system, the power system stability, the transmission reliability and the influence of failure on the fan, the relevant recommendations for the ways when the large-scale wind farms connecting to the grid are proposed, which provides a reference for the development of clean energy, the safe and stable integration operation of large-scale wind farms and the reduction of system influence, as well as the design of wind power integration system.

Key words: grid integration; AC transmission; flexible HVDC light transmission; stability

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)01-0044-04

0 引言

随着风电的规模不断扩大, 风力发电在电力系统中占有的比例也在增加, 风电对电网安全稳定运行的影响也在增大。风电场容量较大时, 如发生因系统故障造成的低电压问题时, 若大型风电场不具备低电压穿越能力时, 则会造成风电机组大型脱网, 因损失、容量过大, 会产生频率、电压、稳定问题, 使得系统安全运行稳定受到较大影响^[1]。此外, 风机在此过程中也会因高低电压问题、频率波动而受到影响和损害。由于风电机组因自身能量转换特点, 并网是采用低频率转化为 50 Hz 工频并网^[2]。因此就风机自身特点、风机并网运行特点、风电场并网后对电网的影响、电网故障后对风电场的影响等方面展开了讨论, 通过对交流输电方式与直流输电方式的对比分析, 与风电并网相结合, 提出了大型风电场接入时采用不同的电网接入方式。

1 目前风电场并网运行方式

风电场接入电网一般有两种方式, 一种是传统的并网方式, 单个风电场容量均比较小, 作为一种分布式电源, 分散接入地区配电网, 以就地消纳为主; 另一种是在风能资源丰富区域集中开发风电基地, 通过输电通道集中外送, 如欧美国家规划中的海上风电和中国正在开发的内蒙古、张家口、酒泉和江苏沿海千万千瓦级风电基地。风电机组单机容量和并网运行的风电装机规模越来越大, 对系统的影响也越来越明显。

2 目前风电场并网运行存在的问题

大型风电场接入电网后, 风电场对电网的影响已从简单的局部电压波动等问题发展到对电网调节控制(调频调峰、经济调度)、电能质量、电网稳定等

诸多方面^[3]。

2.1 对电网调节控制的影响

电网传统的调度(发电)计划的编制及实施,完全基于电源的可靠性、负荷的可预测性。当系统风电容量达到一定的规模后,风电的随机性和不可预测性会给传统的调度(发电)计划的安排和实施带来问题。

2.2 对电网电压的影响

由于风速为随机变化的量,使得风电场的输出功率具有波动性,风电机组的频繁启停、切换,产生电压的波动、闪变,从而将影响局部电网的电能质量;风电场大量采用电子器件,给电网带来谐波,如并联电容与电抗元件发生谐振会放大谐波效应。必须重视和计算分析风电场造成局部电网的电压波动、闪变和谐波污染问题。

2.3 对电网稳定性的影响

风力发电系统通常接入电网的末端,改变了配电网功率单向流动的特点,使潮流流向和分布发生改变,这在原有电网的规划和设计时是没有预先考虑的。当风电注入功率增大时,风电场附近局部电网的电压和联络线功率可能会超出安全范围,严重时会导致电压崩溃。

2.4 对电能质量的影响

随着越来越多的风电机组并网运行,风力发电对电网电能质量的影响引起了广泛关注。风资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率呈波动性,可能会影响电网的电能质量,如电压偏差、电压波动和闪变、谐波等。

3 风电并网可采用的方式

3.1 交流输电

首先交流电是靠电磁感应出来的,其大小和方向,随时间的变化按一定规律作周期性的变化。在波形图上,正弦交流电是正弦函数曲线。交流电的优点是它的电压可经变压器进行转变。输电时将电压升高,以减少输电线路上的功率损耗和电压损失;用电时将电压降低,可保证用电安全、并可降低设备的绝缘要求;交流电设备的造价也较低。由于风能的随机性和间歇性决定了风电机组的输出特性也是波动的和间歇的,当风电容量较小时,这些特性对电力系统的影响并不显著,但随着风电容量在系统所

占比例的增加,对系统稳定的影响就会越显著,一旦风电比重超过风电穿透功率极限值,就会引起系统失稳,出现风电机组从电网切除的情况,会使电网崩溃。交流输电必须同步运行,交流远距离输电时,电流的相位在交流输电系统的两端会产生显著的相位差;并网的各系统交流电的频率虽然规定统一为50 Hz,但实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统不能同步运行,需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术加以调整,否则就可能在设备中形成强大的循环电流损坏设备,或造成不同步运行的停电事故;两个交流系统若用交流线路互连,则当一侧系统发生短路时,另一侧要向故障一侧输送短路电流。因此使两侧系统原有开关切断短路电流的能力受到威胁,需要更换开关。交流输电并网方式如图1所示。

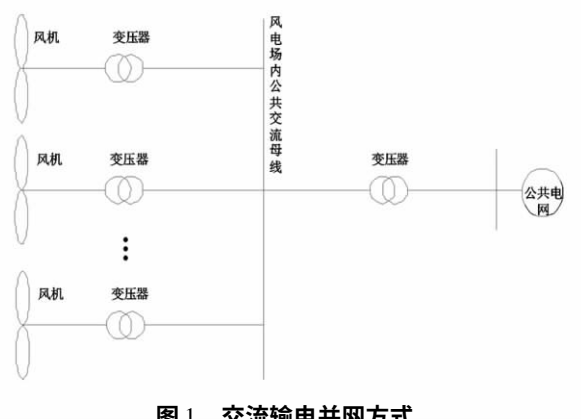


图1 交流输电并网方式

3.2 直流输电

直流电其大小和方向均不随时间变化,是一个固定值。在波形图上,直流电是平行于时间轴的直线。直流输电最显著的优点就是没有电气耦合,它将输电线路与两端设备隔离,同时也将故障进行隔离;其次,直流输电线路造价低,对于架空输电线路,当线路建设费用相近时,直流输电的功率约为交流输电的1.5倍,对于电缆线路,直流输电的功率更大于1.5倍的交流输电;在双极直流输电系统中,如果其中一级的设备发生故障,另一极能以大地作为备用回路,带半负载运行,并且系统出现故障时,短路电流对风机的影响较小;直流输电线所联系的两端交流电网不要求同步运行,直流输电本身不存在稳定问题,输送的功率不受电力网稳定问题的限制;交流电网用直流隔开,由于电网小了,其短路容量也小了,对电气设备保护有利,事故停电的影响范围也较小,提高了电网运行的安全性。首先直流输电的

换流装置的造价高;其次,大容量的换流装置本身是一个谐波源,会使电网的电压和电流波形产生畸变,因此为了减少换流器的谐波输出,在直流输电系统的换流站都装有滤波装置来吸收高次谐波,以抑制谐波分量;直流输电线路两端的换流站都要消耗无功功率,需要装设约为输电功率 40% ~ 60% 的并联电容器进行补偿;现在直流断路器尚在研制中,直流避雷器、直流电压、电流互感器以及线路专用的直流绝缘子尚需进口,由于生产量不大,制造成本及价格较昂贵;电子装置对周边环境有影响,强磁场对于弱电信号的传输有干扰。直流输电并网方式如图 2 所示。



图 2 直流输电并网方式

4 柔性轻型直流输电方式在风电中的应用

4.1 两种应用方式

轻型柔性直流输电技术,它将风机与电网之间利用电力电子设备装置进行隔离,没有直接的电气连接,没有磁的变化,没有相位的变化,采取直流输电,不会影响到直流侧的电压幅值,也减小了对电网的冲击。风机运行稳定,则其输出的电压和频率是稳定的,这样电网系统也会稳定。

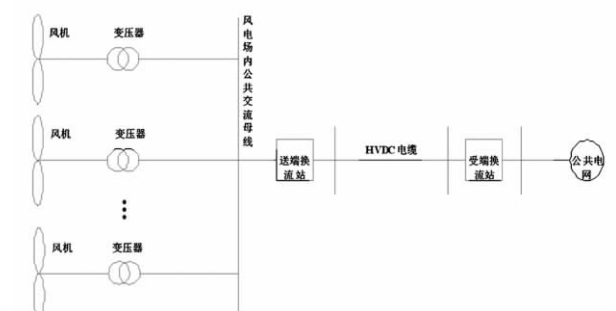


图 3 基于轻型 HVDC 的发电机集中控制并网方式

第一种是基于轻型 HVDC 的发电机集中控制并网,各风力发电机输出的交流电经升压变压器升压后用交流电缆送到风电场内轻型 HVDC 送端换流站的公共交流母线上,送端 VSC 将交流电变换为直流后用轻型 HVDC 电缆送到受端换流站,再经受端 VSC 变换为交流电后送入公共电网。特点是各

风电机组的有功功率和无功功率由送端集中控制,电气结构较简单,但不能达到每台机组都工作在理想的转速上。

第二种是基于轻型 HVDC 的发电机分散控制并网,各风力发电机输出的交流电经升压变压器升压后由各机组的 VSC 变换成直流电,经轻型 HVDC 电缆连接到风电场内的公共直流母线上,然后用轻型 HVDC 电缆送到受端换流站,经受端 VSC 变换为交流电后送入公共电网,实际是一个多端直流输电网络。特点是各风电机组的有功功率和无功功率分别由各自的 VSC 分散控制,电气结构较复杂,但能使得每台机组都工作在理想的转速上。

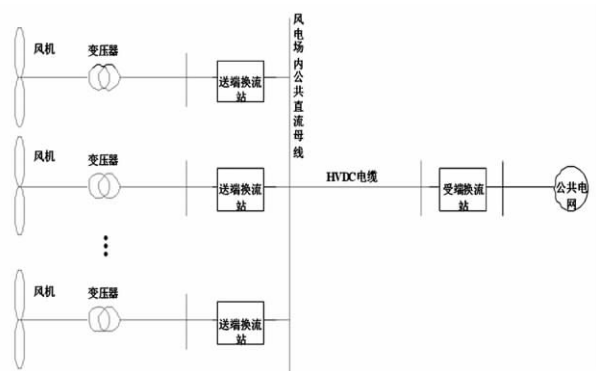


图 4 基于轻型 HVDC 的发电机分散控制并网

表 1 交流输电系统与柔性轻型直流输电系统对比

性能	输电方式	
	交流输电系统	柔性轻型直流输电系统
能否隔离故障	不能	能
能否提高系统稳定性	不能	能
传输的容量	较小	较大
故障对风机的影响	较大	较小
故障对电网的冲击	较大	较小
故障电网电压波动	较大	较小
故障电网频率波动	较大	较小
对电能质量的影响	较大	较小
噪声影响	较大	较小
谐波影响	较大	较小
配套电气件数	较少	较多
实际建设时间	稍长	稍短
工程造价	较小	较大

4.2 交流与柔性直流输电的对比

随着远距离大容量输电线路的不断增加和电网

扩大,交流输电受到同步运行稳定的限制。对比分析交流输电方式与柔性轻型直流输电方式的优缺点,电网系统的稳定性及输电的可靠性以及故障时对风机的影响,表1的对比结果表明,采用柔性轻型直流输电有较好的经济效益和优越的运行特性。

5 结 论

通过对交流与直流输电方式的比较,得出以下结论。

(1) 由于建设换流站的造价过高,考虑到风力发电场地处偏僻,人烟稀少,若线路出现故障,维护不方便,不能及时排除故障,在风机容量较大、风力发电集中地方,将多台风力发电机组接至汇流母线处,采取柔性轻型直流输电。

(2) 现在海上风电也采取柔性轻型直流输电,由于海上风电场受地理环境的影响,不能建造高压输电线路,远距离输电时,应考虑要尽可能降低损耗,故只能采用海底电缆输送直流电。

(3) 由于大容量的风电场对电网系统的影响是很大的,大规模风电并网除了对系统带来电压、稳定和调度影响外,还将对电网短路电流水平和电能质量带来较大的影响^[4],故采用直流输电技术。对于小容量风电场,由于对电网的影响较小,故采用交流

输电。故对于分散式的风力发电机,采取交流输电较适宜。

(4) 前面提出了大型风电场接入电网方式的相关建议,为大力发展风电清洁能源、大型风电场的并网安全稳定运行、减小系统影响提供了借鉴,同时也为风电接入系统设计提供了参考。

参考文献

- [1] 王新志. 现代风力发电技术以工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] 任清晨. 风力发电机组工作原理和技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [3] 傅旭, 李海伟, 李冰寒. 大规模风电场并网对电网的影响及对策综述 [J]. 陕西电力, 2010(1): 53-57.
- [4] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.

作者简介:

史亚娟(1989),女,硕士研究生,研究方向为风力机控制与电力系统继电保护;

王海云(1974),女,教授,硕士生导师,研究方向为风力机控制与电力系统继电保护;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术。

(收稿日期:2012-08-30)

(上接第18页)

- [1] 常鹏,高亚静,张琳,等. 基于 EEMD 与时间序列法的短期风电场功率预测 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(3): 33-39.
- [2] 王丽婕,廖晓钟,高阳,等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 118-121.
- [3] 陆宁,周建中,何耀耀. 粒子群优化的神经网络模型在短期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 65-68.
- [4] 王凤霞. 风功率预测技术 [J]. 云南电力技术, 2011, 39(5): 58-59.
- [5] 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(2): 1-6.

- [6] 潘迪夫,刘辉,李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型 [J]. 2008, 32(7): 82-86.

- [7] 杜颖,卢继平,李青,等. 基于最小二乘法支持向量机的风电场短期风速预测 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 62-66.

作者简介:

张涛(1979),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电气系统优化与设计;

张新燕(1964),女,博士研究生,教授,硕士生导师,主要研究方向为风力机控制与电气系统优化设计;

王维庆(1959),男,硕士研究生,教授,博士生导师,主要研究方向为风能利用技术的研究和应用。

(收稿日期:2012-09-18)

光伏发电容量可信度分析

周 专¹, 姚秀萍², 常喜强²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 随着光伏电站大量接入电网、光伏发电容量在系统中的比例不断增大, 光伏发电对系统的影响也随之增大。光伏电站接入电网改变了电力系统的规划和备用容量, 同时也为调度带来了困难。光伏发电对电力系统发电可靠性具有一定的贡献, 如何衡量光伏发电的容量可信度是电力系统规划和评估光伏发电必须解决的关键问题之一。根据光伏发电容量可信度的定义, 给出了几种光伏发电容量可信度评估方法, 通过对不同比重和不同负荷特性下的光伏发电容量可信度分析, 得出了光伏发电容量可信度的决定因素。对光伏电站接入电网的运行调度有一定的指导意义, 同时为政府部门以及电力运行规划部门制定相关政策提供科学依据, 具有重要的理论和工程实践价值。

关键词: 光伏发电; 容量可信度; 可靠性; 备用容量

Abstract: With a lot of photovoltaic (PV) power stations connecting to the grid and the increasing proportion of PV power generation capacity in the system, the influence of PV power generation on the system is also increasing. Although PV power stations connected to the grid have changed the planning and spare capacity of power system, they also have aroused some difficulties for dispatching. PV power generation has made a certain contribution to the reliability of power system, and how to measure the capacity credit of PV power generation is one of the key issues which must be resolved by power system planning and the evaluation of PV power generation. According to the definition of the capacity credit of PV power generation, several kinds of assessment methods for the capacity credit of PV power generation are given. By analyzing the capacity credit of PV power generation with different gravity and different load characteristics, the determinants of the capacity credit of PV power generation are obtained, which has a certain guiding significance for the dispatching of PV power stations connecting to the grid. What's more, it can provide the government departments and the power operational planning departments with the scientific basis to formulate the relevant policies, which will be of great value to the theory and engineering practice.

Key words: photovoltaic power generation; capacity credit; reliability; reserve capacity

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0048-05

0 引言

随着能源危机以及人类环境保护意识的加强, 可再生能源的利用得到了越来越广泛的发展, 越来越多的并网型光伏发电出现在电力系统中^[1]。但是光伏发电是间歇性的, 随着光照的变化而变化, 光伏发电不容易控制, 它不能像常规电站一样能随着负荷的变化而改变其出力, 因此这为光伏电站并网的运行调度带来一定的困难。同时随着光伏电站大量的接入系统, 系统的不确定性将增大, 为保证系统正常运行需要配备一定的备用容量, 维持电力系统的功率平衡与稳定运行^[2]。因此光伏电站的接入电网将改变电力系统的规划和备用容量。

虽然光伏发电具有较强的随机性、间歇性和波动性, 但从可靠性角度分析, 光伏电站接入电网仍具有一定的负荷携带能力, 可提高系统的可靠性水平。从经济性角度分析, 光伏发电如果替代一定的常规机组发电, 能够减少常规机组的燃料费用和运行费用, 具有可观的环保效益。下面将根据光伏发电容量可信度的定义, 给出了几种光伏发电容量可信度计算方法, 通过对不同比重和不同负荷特性下的光伏发电容量可信度分析, 得出了光伏发电容量可信度的决定因素。为光伏电站接入电网的运行调度提供一定的指导意义, 同时能够为政府部门以及电力运行规划部门制定相关政策提供科学依据, 具有重要的理论和工程实践价值。

1 光伏发电出力模型

光伏出力和电网负荷均具有不确定性。从长时间尺度来看,光伏出力的波动特性主要由太阳位置、电站经纬度、海拔高度、气象因素决定,负荷波动特性主要由生产、生活、气象因素决定^[1]。

光伏电站的输出功率与光照强度、光伏阵列面积和光电转换效率等因素密切相关。对于一个光伏阵列,其输出功率为

$$P = EA\eta \quad (1)$$

式中, E 为光照强度; A 和 η 分别为电池方阵的面积和光电转换效率。

光照强度具有随机性,因此光伏阵列的输出功率也是随机波动的。据统计,在一定时段内(1 h或几小时),光照强度近似呈Beta分布^[2],其概率密度函数为

$$f(E) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{E}{E_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{E}{E_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中, E 和 $E_{\max}$ 分别为这一时间段内的实际光照强度和最大光照强度; α 和 β 为Beta分布的形状参数; Γ 为Gamma函数。

由式(1)可知,光伏阵列输出功率也呈Beta分布,其概率密度函数为

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中, $P_{\max} = E_{\max}A\eta$,为电池方阵的最大输出功率。

2 光伏发电容量可信度

光伏发电容量可信度是指在保持系统可靠性水平不变的前提下,并网光伏电站能够替代的常规机组发电容量占光伏电站装机容量的百分比,其数学表达式为

$$CC = \frac{\Delta C}{C_{SN}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, CC 为光伏发电容量可信度; C_{SN} 为光伏电站总装机容量; ΔC 为光伏电站能够替代的常规发电机组容量。

由于大量光伏电站接入电网,光伏电站对系统的影响也越来越大。光伏发电到底能替代多少常规发电即光伏发电容量可信度如何,对分析光伏电站接入系统影响有重要意义。光伏发电容量可信度的

确定有利于对光伏发电并网运行进行调度。同时也可以确定系统中的备用容量,有利于系统规划。无视光伏发电容量可信度,盲目地配置较大容量的旋转备用会直接影响电力系统运行的经济性;对光伏发电容量可信度的期望过高又会给电力系统运行的可靠性带来风险^[3],因此要对光伏发电容量进行有效的评估。

光伏发电容量可信度的高低取决于光照强度、负荷特性、光伏发电在电网中的比重。

光伏发电站接入电网可以提供一定的功率,为系统安全、可靠运行作出一定的贡献。光伏发电容量可信度的确定,可以更加精确地对系统的可靠性进行评估。同时光伏发电是间歇性的、不可控的,在保证系统安全稳定运行时需要配备一定的备用容量。光伏发电容量可信度的确定可以精确地规划系统中的备用容量。

3 评估方法

在进行光伏发电容量可信度评估时要满足两个原则^[4]:①最大常规发电装机容量需求随着光伏发电装机容量的增加,常规发电装机总容量需求只能保持原来水平或降低。②实际常规发电装机容量需求,如果光伏发电能对电网运行安全性作出贡献,则实际需要的常规发电装机容量可以降低。

光伏发电容量可信度评估方法有概率性方法和确定性方法。

3.1 概率性方法^[5]

电力系统是一个具有随机特性的大系统,负荷水平变化、元件故障等都具有不确定性,同时光伏电站的输出功率也具有很强的随机性,采用概率性方法更符合电力系统实际运行情况。光伏发电容量可信度评估的概率性方法是借助电力系统可靠性评估实现的。

基于电力不足概率(LOLP),在保证电力系统可靠性水平不变的情况下,新增光伏电站的同时减少系统中的常规发电。则光伏发电可信容量(ΔC)为减少的常规发电量,表达式为

$$\Delta C = C_o - C_s \quad (5)$$

C_o 和 C_s 分别为光伏电站并网前后系统投入常规发电机组的总容量。

概率性方法基于电力系统可靠性理论,对常规

发电机组和光伏发电的随机特性具有良好的处理机制,能很好地区分不同性质的电源对系统可靠性的影响,方法严谨,计算结果准确。不足之处是,概率性方法需要复杂的建模,计算量较大,且计算所需数据集较难获取。

3.2 确定性方法

确定性方法以系统高峰负荷时段的光伏发电容量因子(光伏电站平均出力与最大出力的比值)近似替代容量可信度,只需统计研究周期内光伏电站的输出功率,无需进行可靠性建模,计算简单、快速。

然而,确定性方法与研究周期有关,即系统高峰负荷时段选取的合适与否直接影响光伏发电容量因子的计算结果。与概率性方法相比,确定性方法虽然简单,但是由于没有考虑系统中的随机因素,从而不能反映系统潜在的风险,很难准确地反映光伏发电对系统可靠性的贡献,仅适用于近似计算。

如图1所示,分析光伏发电与负荷的关系^[8],光伏发电出力是在白天,而系统中的用电负荷高峰也是出现在白天这一时段。即光伏发电在负荷用电最高峰时有一定的贡献。这里所用的光伏容量可信度评估方法是根据光伏发电对负荷的作用提出来的,统计每天负荷最大时所对应的光伏发电量,求出统计的光伏发电量的平均值,该平均值就是光伏发电所能替代的常规机组发电容量(ΔC)。

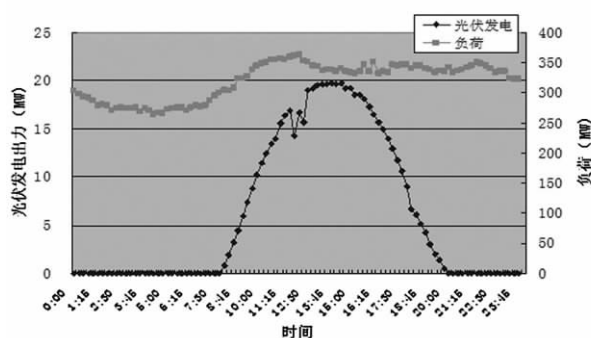


图1 光伏发电与负荷关系曲线

4 不同角度下的光伏发电容量可信度

容量可信度的主要决定因素^[9]:①负荷峰值与间歇式电厂出力之间的相关程度;②间歇式电厂出力的平均水平;③间歇式电厂在系统中的比重;④间歇式电厂所处的自然条件(风速、光照强度)。由光伏发电特性可以知道,光伏发电容量可信度的大小

受很多方面的影响。

4.1 光伏发电在系统中的不同比重

随着国家大力推广可再生资源,光伏发电作为清洁能源在电网中的比重不断增大。光伏电站大量并入电网对电网的运行调度、电网规划和备用容量产生较大的影响。光伏发电容量可信度也会随着光伏电站在电网中的比重不同而发生改变。

A地区总装机容量为560 MW,其中光伏发电容量为40 MW,占总装机容量的7.2%。B地区总装机容量为1 123 MW,其中光伏发电容量为20 MW,占总装机容量的1.8%。对这两个地区光伏发电容量可信度进行评估,结果如表1。

表1 光伏发电容量可信度

地区	光伏发电容量 /MW	所占比重 /%	容量可信度 /%
A地区	40	7.2	38.2
B地区	20	1.8	52

由表1计算结果可以得出,光伏发电装机容量在系统中的比重增大时,光伏发电容量可信度反而减小。

4.2 不同负荷特性

光伏发电是间歇、可变和不可控的,它的出力随着光照强度和温度的变化而变化。系统中的负荷需求也是变化的,具有不确定性。若光伏发电出力能随负荷需求变化而变化,则光伏发电对系统的贡献越大,即光伏发电容量可信度越大。因此光伏发电与负荷相关性不同,光伏发电容量可信度也不同。

如图2所示,A地区的最大负荷是在22:30,最小负荷是在6:15,地区的负荷变化比较大。而该地区光伏发电出力的最大值是在12:30。由图可以知道该地区的光伏发电出力与负荷的相关性不强。

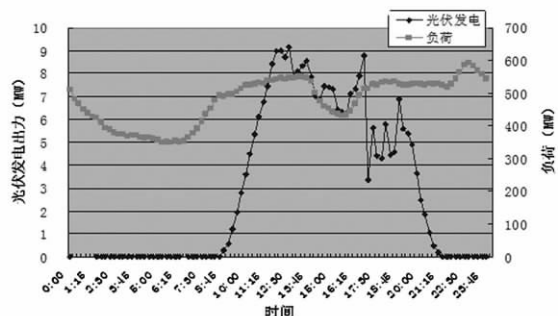


图2 A地区光伏发电出力与负荷曲线

如图3所示,B地区的最大负荷是在12:30,最小负荷是在3:45,地区的负荷变化不大。而该地区

光伏发电出力的最大值是在 13:30。由图可以知道该地区的光伏发电出力与负荷的相关性强。

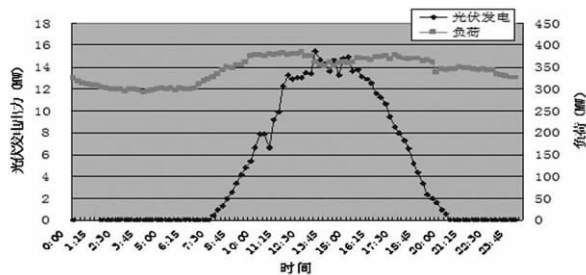


图3 B地区光伏发电出力与负荷曲线

对这两地区光伏发电容量可信度进行评估,评估结果如表2。

表2 光伏发电容量可信度

地区	光伏发电容量 /MW	光伏发电容量可信度 /%
A地区	20	10.5
B地区	20	36.2

由表2计算结果可以得出,光伏发电容量可信度与负荷特性有关,当光伏发电出力与负荷相关性强时光伏发电容量可信度大;反之光伏发电容量可信度小。

5 系统中额外备用容量

由于系统中的需求与发电的不确定性变化,为了保证电力系统安全稳定运行,系统需要配备一定的备用容量。大量光伏电站接入系统,系统的不确定性将增大^[4],这对系统中的备用容量要求更高。系统中的备用容量过高,有利于系统的安全稳定运行,但投资过高。系统中的备用容量过低,系统不能安全稳定运行。

光伏电站接入电网对系统的可靠性有一定的贡献,它的接入将改变系统的备用容量大小。光伏发电容量可信度的确定对系统中备用容量的配备有重要的意义。通过对光伏发电容量可信度进行评估,可以合理地配备系统中的备用容量。在不考虑光伏发电容量可信度时,系统要求备用容量要有100%的备用。这样在电力系统规划中有很大的浪费,投资费用大。当考虑光伏发电容量可信度时,在电力系统规划中可以适当地减少备用容量,减少投资。

不同备用方式与只含常规发电装机方式的对比如图4所示。由图可以看出若考虑系统中的光伏发

电容量可信度时,系统中的总备用容量会比其他两种备用方式低,同时光伏电站接入系统可以降低系统所需的常规机组容量。

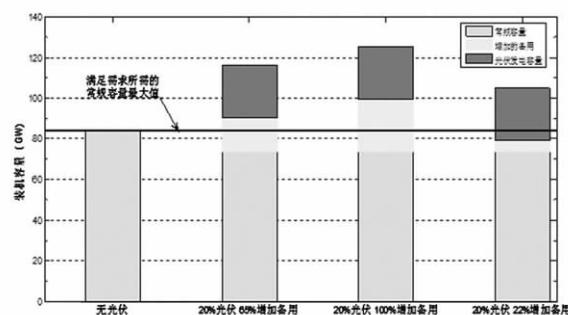


图4 不同备用方式

6 结语

通过对光伏发电容量可信度分析,提出了一种简便的光伏发电容量可信度评估方法,通过对实际光伏发电分析得出如下结论:①光伏电站接入系统可以提高系统的可靠性,在一定的条件下可以替代一部分常规发电机组发电容量。②光伏发电容量可信度的大小与负荷特性及光伏发电容量在系统中的比重有关。光伏电站出力与负荷峰值相关性越强,则光伏发电容量可信度越大;光伏发电容量占系统的比重低时光伏发电容量可信度就大。③光伏发电容量可信度的确定有利于系统中备用容量的规划,适当地减少投资。

参考文献

- [1] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化,2011,35(19): 101-107.
- [2] Godfrey Boyle 著,中国电力科学研究院新能源研究所译. 可再生能源与电网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 基于随机模型的光伏发电置信容量评估方法 [J]. 电力系统自动化,2012,36(13): 32-37.
- [4] Karaki S. H., Chedid R B, Ramadan. Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-wind Energy Conversion Systems [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [5] Milborrow D. J. Capacity Credits - Clarifying the Issue [J]. Meteorological Magazine, 2002, 80.

- [6] L. L. Garver, Effective Load Carrying Capability of Generating Units [J]. IEEE Trans on Power Application and Systems, 1996, 85(8): 910-919.
- [7] 江婷婷. 风电场运行容量可信度评估与应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [8] Wang Yibo, Wu Chunsheng, Liao Hua. Study on Impacts of Large-scale Photovoltaic Power Station on Power Grid Voltage Profile [C]. 3rd International Conference on DRPT 2008. China: Nanjing, 2008.
- [9] 王一波, 伍春生, 廖华, 等. 大型并网光伏发电系统稳

态模型与潮流分析 [J]. 清华大学学报. 2009, 49(8): 1093-1097.

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, 硕士生, 研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期: 2012-07-25)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力科学研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊, 主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿, 尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求, 本刊对来稿提出以下要求。

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性; 论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明; 语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713-1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写, 篇幅以版面不超过 6 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组, 选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰, 少而精, 插图下方应有图序和图名。能用文字或表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位和符号》。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献尽量选用公开发表的资料, 按在正文中出现的先后次序列于文后, 以 [1]、[2]……标识序号, 且与正文中的指示序号一致。按 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》和 CAJ-CDB/T1-2006《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。

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

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件, 信箱为“cdscdljs@163.com”。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话, 并请自留底稿, 本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电(028) 87082036、87082037 或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿, 文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改, 如不愿被删改, 请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站, 稿件一经录用刊登, 作者著作权使用费及稿酬已一次付清, 如作者不同意收录, 请在来稿时提出声明, 本刊将作适当处理。

来稿请寄: 四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072

电话: (028) 87082036, 87082037

E-mail: cdscdljs@163.com

UPFC 单机无穷大系统建模与控制策略研究

邓大磊, 王 奔, 付永良

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 对含 UPFC 的单机无穷大系统的工作机理进行了研究分析, 将 UPFC 等效为可控并联电流源与可控串联电压源, 建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的含 UPFC 的单机无穷大系统七阶非线性数学模型; 采用逆系统原理对该非线性模型进行解耦线性化。采用具有强鲁棒性的变结构控制理论为解耦后的模型设计控制器。最终计算机仿真结果验证了所建模型的正确性及其控制策略对系统稳定作用的优越性。

关键词: 统一潮流控制器; 逆系统解耦; 变结构控制; 单机无穷大系统

Abstract: The working mechanism of single machine infinite bus system with unified power flow controller (UPFC) is analyzed. The UPFC could be equivalent to a controllable parallel current source and a controllable series voltage source. A seven-order nonlinear mathematic model of the single machine infinite bus system with UPFC is established, which includes the generator excitation system and the steam valve adjustment system. The theory of inverse system is used to decouple and linearize the nonlinear model. Then, the variable structure control theory due to its strong robustness is used to design the controller for the decoupled model. The final computer simulation results verify the correctness of the model and the superiority of the control strategy in power system stability.

Key words: unified power flow controller; decoupling of inverse system; variable structure control; single machine infinite bus system

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0053-06

0 引 言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为柔性交流输电系统(FACTS)成功的技术实现,已广泛引起电力界的关注。UPFC的功能强大,控制调节灵活。UPFC是一个通过直流电容器把并联变流器和串联变流器连接在一起的装置^[1-2]。通过控制并联侧变流器流入母线的电流幅值和相角,可同时实现并联无功补偿和平衡串联变流器与电网交换的有功,使直流电容电压维持恒定;通过控制串联侧变流器注入输电线的电压幅值和相角,既可以控制输电线上的有功和无功潮流,又可以调节接入点电压幅值和相角,同时还起到补偿输电线电抗的作用。但是由于UPFC控制变量多,变量间耦合程度强,因此,UPFC的控制器设计较为复杂。文献[3-5]分别应用非线性控制理论和最优控制理论对UPFC进行了研究,文献[6]应用鲁棒性较强的变结构控制理论对UPFC进行控制器设计,并取得了较为良好的效果。

通过分析含UPFC的单机无穷大系统的特点及其各矢量之间关系,建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的七阶非线性数学模型,并利用逆系统解耦线性化方法、变结构控制原理设计了系统的控制器,实现了单机系统在受到大的扰动后,具有迅速维持发电机功角、发电机转速以及UPFC并联侧接入点母线电压稳定的功能,并同时保障了发电机具有向无穷大系统稳定地输送有功功率的能力。最后,仿真结果验证了所建立模型的正确性及其控制策略对系统稳定作用的优越性。

1 含UPFC单机无穷大系统模型建立

系统控制器的性能与所建立的系统模型密切相关,针对UPFC自身控制变量较多,直接建立含UPFC的单机无穷大系统数学模型较为复杂这一情况,则将UPFC的串、并联侧的变流器分别等效为串联可控电压源与并联可控电流源,进而对系统进行建模。在含有UPFC的单机无穷大系统中等效的并联可控电流源和串联可控电压源可视为两个独立的结

构,因此,串联侧的有功消耗不再需要并联侧提供,并联侧等效电源是只产生无功的电流源,其无穷大系统的等效电路图如图1所示^[4]。

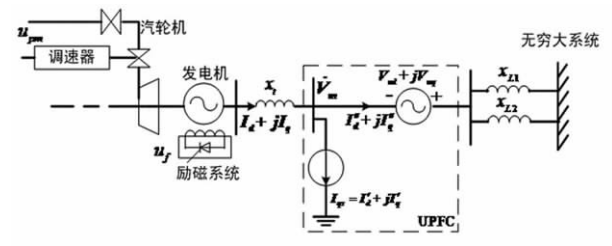


图1 含UPFC单机无穷大系统等效电路图

其中,各变量均已在 \$dq\$ 坐标下表示, \$V_m\$ 为 UPFC 并联侧接入点母线电压; \$V_u\$ 为 UPFC 串联侧等效可控电压源电压; \$I_q\$ 为 UPFC 并联侧等效可控无功电流源; \$u_f, u_{pm}\$ 分别为发电机励磁系统和汽门调节器的控制量; \$u_{ud}, u_{uq}, u_{qs}\$ 分别为 UPFC 串联侧等效电压源控制量和并联侧等效电流源控制量,其他各变量的意义如图1标示。在图1中,各变量之间有如下关系。

$$\begin{cases} I'_d = \frac{V_{mq} + V_{uq} - V_s \cos \delta}{x_2} \\ I'_q = \frac{V_s \sin \delta - V_{md} - V_{ud}}{x_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I''_d = 0 \\ I''_q = I_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_d = I'_d + I''_d \\ I_q = I'_q + I''_q \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)至式(3)可推得如下关系式。

$$\begin{cases} V_{md} = \frac{(x_1 + x_q)(V_s \sin \delta - V_{ud}) + (x_T + x_q)x_2 I_{qs}}{x_{q\Sigma}} \\ V_{mq} = \frac{E'_q x_2 + (x_T + x'_d)(V_s \cos \delta - V_{uq})}{x'_{d\Sigma}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, \$x_1 = x_d + x_T\$; \$x'_1 = x'_d + x_T\$; \$x_2 = \frac{x_{L1} x_{L2}}{x_{L1} + x_{L2}}\$; \$x_{d\Sigma} = x_1 + x_2\$; \$x'_{d\Sigma} = x'_1 + x_2\$; \$\delta\$ 为电机功率角。通过图1和以上各式,可建立考虑发电机励磁、汽门调节系统的含UPFC单机无穷大系统的数学模型,如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{E}'_q \\ \dot{V}_{uq} \\ \dot{I}_{qs} \\ \dot{P}_H \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0 P_H + \frac{\omega_0}{H} C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{H}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H}}{x'_{d\Sigma}} \\ \frac{E'_q (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} \\ + \frac{(x_q - x'_d)(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})(E' - V_s \cos \delta + V_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \\ - \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{q\Sigma}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} (V_s \cos \delta - V_{uq}) \\ \frac{1}{T_{ud}} (-V_{ud} + V_{ud0}) \\ \frac{1}{T_{uq}} (-V_{uq} + V_{uq0}) \\ \frac{1}{T_q} (-I_{qs} + I_{qs0}) \\ - \frac{1}{T_{H\Sigma}} P_H + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} P_{m0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{ud}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{uq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_{ud} \\ u_{uq} \\ u_{qs} \\ u_{pm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在式(5)中, \$\frac{dV_{ud}}{dt}, \frac{dV_{uq}}{dt}\$ 为 UPFC 串联侧等效可控电压

源动态过程描述方程; \$\frac{dI_{qs}}{dt}\$ 为 UPFC 并联侧等效可控

电流源动态过程描述方程; \$V_{ud0}, V_{uq0}\$ 分别为等效电压源 \$dq\$ 初始值; \$I_{qs0}\$ 为等效电流源初始值; \$P_H, P_{m0}\$ 分别为高压汽缸输出机械功率、发电机总机械功率初始稳态值; \$E'_q\$ 为发电机暂态电势; \$\omega\$ 为发电机角速度; \$\omega_0\$ 为同步转速; \$V_s\$ 为无穷大母线电压; \$T_{d0}\$ 为发电机励磁绕组时间常数; \$T_{H\Sigma}\$ 为高压汽缸汽门调节时间常数; \$T_q\$ 为 UPFC 并联侧变流器调节惯性时间常数; \$T_{ud}, T_{uq}\$ 为 UPFC 串联侧变流器调节惯性时间常数; \$C_{ML}, C_H\$ 分别为中低压和高压汽缸的等效功率分配系数; \$D, H\$ 分别为阻尼系数和发电机惯性时间常数。

在设计系统的控制器时,输出量的选取与系统

的控制状态变量有很大的关系,考虑到系统功角的稳定性、UPFC 并联侧接入母线点电压的稳定性以及发电机汽门开度对发电机输出有功功率的影响,综合以上因素,这里选取系统的输出量为 $y_1 = \delta$; $y_2 = V_{md}$; $y_3 = V_{mq}$; $y_4 = P_e$; $y_5 = E'_q$ 。系统的控制输出量写成矩阵形式如式(6)所示。

$$y = [h_1(x) \quad h_2(x) \quad h_3(x) \quad h_4(x) \quad h_5(x)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{(x_T + x_q)(V_s \sin \delta - V_{ud}) + (x_T + x_q)x_2 I_{qs}}{x'_{d\Sigma}} \\ \frac{E'_q x_2 + (x_T + x'_d)(V_s \cos \delta - V_{uq})}{x'_{d\Sigma}} \\ \frac{E'_q(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可见,其形式为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为一非线性系统。其中,

状态变量为

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7]^T$$

$$= [\delta \quad \omega \quad E'_q \quad V_{ud} \quad V_{uq} \quad I_{qs} \quad P_H]^T$$

控制变量为

$$u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5]^T$$

$$= [u_f \quad u_{ud} \quad u_{uq} \quad u_{qs} \quad u_{pm}]^T$$

输出变量为

$$y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \quad y_5]^T$$

$$= [h_1(x) \quad h_2(x) \quad h_3(x) \quad h_4(x) \quad h_5(x)]^T$$

$$= [\delta \quad V_{md} \quad V_{mq} \quad P_e \quad E'_q]^T$$

2 系统控制器设计

2.1 系统解耦线性化

由系统状态方程式(7)可以看到,含 UPFC 的单机无穷大系统是一个多输入、多输出、强耦合、非线性的系统,直接对其进行控制器设计是相当复杂。这里应用逆系统方法对原系统模型进行解耦线性化。逆系统方法^[8-9],是利用被控对象的逆系统将被控对象补偿成具有线性传递关系的系统,即伪线性系统。然后,可灵活运用各种控制理论来设计该伪线性系统的控制器。

根据逆系统原理,求解出原系统的逆系统,过程如下。

对 y_1 求三次导数,得

$$\ddot{y}_1 = \ddot{\delta} = \frac{\omega_0 \dot{P}_H}{H} - \frac{D}{H} \dot{\omega} + \frac{\omega_0 E'_q \dot{V}_{ud}}{H x'_{d\Sigma}} - \frac{\omega_0 E'_q x_2 \dot{I}_{qs}}{H x'_{d\Sigma}}$$

$$- \frac{\omega_0}{H} \frac{(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) \dot{E}'_q}{x'_{d\Sigma}}$$

$$- \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma}} \quad (8)$$

对 y_2 求一次导数,得

$$\dot{y}_2 = \dot{V}_{md} = \frac{(x_q + x_T) x_2 \dot{I}_{qs}}{x_{q\Sigma}} - \frac{(x_q + x_T) \dot{V}_{ud}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{V_s \cos(\delta) \dot{\delta} (x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}} \quad (9)$$

对 y_3 求一次导数,得

$$\dot{y}_3 = \dot{V}_{mq} = \frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_{d\Sigma}} - \frac{(x'_d + x_T) \dot{V}_{uq}}{x'_{d\Sigma}}$$

$$- \frac{V_s \sin(\delta) \dot{\delta} (x'_d + x_T)}{x'_{d\Sigma}} \quad (10)$$

对 y_4 求一次导数,得

$$\dot{y}_4 = \dot{P}_e = \frac{\dot{E}'_q (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x_{q\Sigma}} + \frac{E'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(x_q - x'_d) (E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) x_2 \dot{I}_{qs}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + \frac{E'_q x_2 \dot{I}_{qs}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) (\dot{E}'_q + V_s \sin(\delta) \dot{\delta} + \dot{V}_{ud})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}}$$

$$- \frac{(x_q - x'_d) (E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) \dot{V}_{ud}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{E'_q \dot{V}_{ud}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(x_q - x'_d) (E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \quad (11)$$

对 y_5 求一次导数,得

$$\dot{y}_5 = \dot{E}'_q = -\frac{1}{T_{d0}} \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} (V_s \cos \delta - V_{uq})$$

$$+ \frac{1}{T_{d0}} u_f \quad (12)$$

通过观察系统数学模型式(5)中后5个显含控制输入 $u_f, u_{ud}, u_{uq}, u_{qs}, u_{pm}$ 的子方程以及系统各个输出量 $y_1 = \delta, y_2 = V_{md}, y_3 = V_{mq}, y_4 = P_e, y_5 = E'_q$ 的导数可以看出,关于各个输出量导数的表达式(式(8)至式(12))中已显含控制量。由逆系统的相对阶定义^[8]可知,上述系统的相对阶: $a = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5] = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$,那么,系统的相对阶数 $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 7$,与系统的阶数 $n = 7$ 相等,故该系统是完全可逆的。以下推导各个控制量的表达式。

由式(12)可解得系统控制输出量 u_f 的表达式为

$$u_f = T_{d0} \dot{\gamma}_5 + \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} (V_s \cos \delta - V_{uq}) \quad (13)$$

由式(10)可得系统状态变量一阶导数 $\dot{V}_{uq}$ 的表达式为

$$\dot{V}_{uq} = \frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_d + x_T} - \frac{x'_{d\Sigma} \dot{\gamma}_3}{x'_d + x_T} - V_s \sin(\delta) \dot{\delta} \quad (14)$$

为以下求解表达简便,令

$$A_1 = -\frac{\omega_0 (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) \dot{E}'_q}{H x'_{d\Sigma}} - \frac{\omega_0 \dot{E}'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{H x'_{d\Sigma}}$$

$$A_2 = \frac{V_s \cos(\delta) \dot{\delta} (x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}}$$

$$A_4 = \frac{(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) (\dot{E}'_q + V_s \sin(\delta) \dot{\delta} + \dot{V}_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + \frac{\dot{E}'_q (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} + \frac{\dot{E}'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma}} + \frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}}$$

$$B_1 = \frac{\omega_0 \dot{E}'_q}{H x'_{d\Sigma}}; \quad B_2 = -\frac{(x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}}$$

$$B_4 = -\frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{\dot{E}'_q}{x_{q\Sigma}}$$

$$C_1 = -\frac{\omega_0 \dot{E}'_q x_2}{H x'_{d\Sigma}}; \quad C_2 = \frac{(x_q + x_T) x_2}{x_{q\Sigma}}$$

$$C_4 = \frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) x_2}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{\dot{E}'_q x_2}{x_{q\Sigma}}$$

那么,式(9)和式(11)可以写成

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_2 = A_2 + B_2 \dot{V}_{ud} + C_2 \dot{I}_{qs} \\ \dot{\gamma}_4 = A_4 + B_4 \dot{V}_{ud} + C_4 \dot{I}_{qs} \end{cases} \quad \text{解得}$$

$$\dot{I}_{qs} = \left(\frac{\dot{\gamma}_2 - A_2}{B_2} - \frac{\dot{\gamma}_4 - A_4}{B_4} \right) / \left(\frac{C_2}{B_2} - \frac{C_4}{B_4} \right) \quad (15)$$

$$\dot{V}_{ud} = \frac{\dot{\gamma}_2 - A_2}{B_2} - \frac{C_2}{B_2} \frac{B_4 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - B_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \quad (16)$$

则,将式(15)、式(16)代入式(8)可得发电机高压汽缸输出机械功率 P_H 的一阶导数的表达式为

$$\dot{P}_H = \frac{H}{\omega_0} \ddot{\gamma}_1 + \frac{D}{\omega_0} \dot{\omega} - \frac{H}{\omega_0} \left(A_1 + \frac{B_1 (\dot{\gamma}_2 - A_2)}{B_2} - \frac{B_4 B_1 C_2 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - B_2 B_1 C_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_2 B_4 C_2 - B_2^2 C_4} + \frac{C_1 B_4 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - C_1 B_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \right) \quad (17)$$

根据式(5)、式(14)至式(17)便可解得系统剩余4个控制输入 u_{ud} 、 u_{uq} 、 u_{qs} 、 u_{pm} 的表达式,如式(18)至式(21)所示。

$$u_{ud} = -\frac{T_{ud}}{B_2} \frac{B_4 C_2 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - B_2 C_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} + \frac{T_{ud}}{B_2} (\dot{\gamma}_2 - A_2) + V_{ud} - V_{ud0} \quad (18)$$

$$u_{uq} = T_{uq} \left(\frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_d + x_T} - \frac{x'_{d\Sigma} \dot{\gamma}_3}{x'_d + x_T} - V_s \sin(\delta) \dot{\delta} \right) + V_{uq} - V_{uq0} \quad (19)$$

$$u_{qs} = \frac{T_q (B_4 C_2 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - B_2 C_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4))}{B_4 C_2 - B_2 C_4} + I_{qs} - I_{uq0} \quad (20)$$

$$u_{pm} = \frac{T_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \ddot{\gamma}_1 + D \dot{\omega} - H \left(A_1 + \frac{B_1 (\dot{\gamma}_2 - A_2)}{B_2} - \frac{B_4 B_1 C_2 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - B_2 B_1 C_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_2 B_4 C_2 - B_2^2 C_4} + \frac{C_1 B_4 (\dot{\gamma}_2 - A_2) - C_1 B_2 (\dot{\gamma}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \right) + \frac{1}{C_H} P_H - P_{m0} \quad (21)$$

至此,原系统的逆系统已经求出,在式(8)至式(12)中,令: $v_1 = \ddot{\gamma}_1$, $v_2 = \dot{\gamma}_2$, $v_3 = \dot{\gamma}_3$, $v_4 = \dot{\gamma}_4$, $v_5 = \dot{\gamma}_5$, 然后把构造出的逆系统(逆系统:原系统的5个控制输入量 u_f 、 u_{ud} 、 u_{uq} 、 u_{qs} 、 u_{pm} 关于系统状态变量 δ 、 ω 、 E'_q 、 V_{ud} 、 V_{uq} 、 I_{qs} 、 P_H 以及伪线性系统控制输入量 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 的函数表达式)串联在原系统之前,原系统与逆系统一起就构成了一个伪线性系统。

原系统被解耦后,所构成的伪线性系统可以分解成5个伪线性系统为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = z_{11} \\ \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = v_1 \\ \gamma_1 = \delta \end{cases} \quad (22) \quad \begin{cases} \dot{V}_{md} = v_2 \\ \gamma_2 = V_{md} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{mq} = v_3 \\ y_3 = V_{mq} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \dot{P}_e = v_4 \\ y_4 = P_e \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = v_5 \\ y_5 = E'_q \end{cases} \quad (26)$$

其中, $z = [z_{11}, z_{12}]$ 为中间变量。

2.2 系统控制器设计

经过逆系统解耦已经得到原系统的线性化子系统(22)、(23)、(24)、(25)、(26),那么,就可采用各种线性系统控制策略对这些子系统进行控制器设计。变结构控制对系统的外在干扰和摄动在一定条件下具有较强的鲁棒性或者说不变性^[10],由逆系统解耦方法得到的伪线性系统,采用变结构控制来分别设计各个子系统的控制器则变得很简单。因此,采用变结构控制原理设计系统控制器。

根据系统设计控制器实现目标: $\delta \rightarrow \delta^*$; $V_{md} \rightarrow V_{md}^*$; $V_{mq} \rightarrow V_{mq}^*$; $P_e \rightarrow P_e^*$; $\dot{E}'_q \dot{E}'_q^*$ 及变结构控制理论趋近律的方法,可以得到5个切换面为

$$\begin{cases} s_1 = c_1(\delta - \delta^*) + c_2(\delta - \delta^*)' + c_3(\delta - \delta^*)'' \\ s_2 = V_{md} - V_{md}^* \\ s_3 = V_{mq} - V_{mq}^* \\ s_4 = P_e - P_e^* \\ s_5 = \dot{E}'_q - \dot{E}'_q^* \end{cases} \quad (27)$$

指数趋近律可以大大改善趋近 $s(x) = 0$ 的正常运动:趋近过程变快,引起的抖动大大削弱。故取指数趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sgn}(s) - k \cdot s \quad (28)$$

由式(22)至式(28)可得解耦后系统的控制律为

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - k_1 s_1 - c_1 \dot{\delta} - c_2 \ddot{\delta} \\ v_2 = -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \\ v_3 = -\varepsilon_3 \text{sgn}(s_3) - k_3 s_3 \\ v_4 = -\varepsilon_4 \text{sgn}(s_4) - k_4 s_4 \\ v_5 = -\varepsilon_5 \text{sgn}(s_5) - k_5 s_5 \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, k_1, k_2, k_3, k_4, c_1, c_2$ 为变结构控制参数,均为正实数。各种常实数的设计原则为:在保证系统不会发生振荡的条件下,适当地增大参数 $k_1, k_2, k_3, k_4, c_1, c_2$ 可以使系统获得较快的跟踪速度,而相应地减小参数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 可以使系统减小抖动。

3 仿真实验

为验证对含 UPFC 的单机无穷大系统建模的正确性、采用逆系统解耦附加变结构控制策略的可行性和有效性,以及滑模变结构对参数变化的鲁棒性,在 Matlab 仿真环境下,对系统进行仿真验证^[11-12]。仿真参数如表1。

表1 系统仿真参数

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
H	16	ε_1	0.3
D	5	ε_2	0.3
$T_{H\Sigma}$	0.45	ε_3	0.3
T_{d0}	6.9	ε_4	0.3
T_s	0.2	ε_5	0.3
C_H	0.4	k_1	10
C_{ML}	0.6	k_2	10
T_{ud}	0.2	k_3	10
T_{uq}	0.2	k_4	10
C_1	21	C_2	10
δ_0	60	k_5	3

系统的其他仿真参数为(p.u.): $x_d' = 0.299$; $x_q = 0.31$; $x_d = 0.799$; $x_T = 0.02$; $P_{m0} = 0.78$; $P_{e0} = 0.8$; $x_{L1} = 1.6$; $x_{L2} = 1.6$; $I_{q0} = 0.315$; $E'_q = 0.84$; $V_m = 1.0$ 。

以下为输电系统发生故障情况下的动态响应曲线图。设置系统发生的故障:在图1中的双回供电线路其中一回 x_{L2} 发生三相短路。发生短路过程中的具体情况为:在1s时刻, x_{L2} 发生三相短路;经0.15s后故障切除,输电系统由单回线供电;然后在1.5s时刻,系统重合闸成功,使系统迅速恢复正常工作状态。系统仿真结果如图2至图5所示,图中的虚曲线为参考文献[1]和[4]设计的系统最优控制下的控制结果。

通过以上仿真结果首先可看到,由虚曲线表示的利用最优控制方法设计的系统控制器控制下的响应曲线振荡幅值较大,系统在受到大的扰动后,恢复

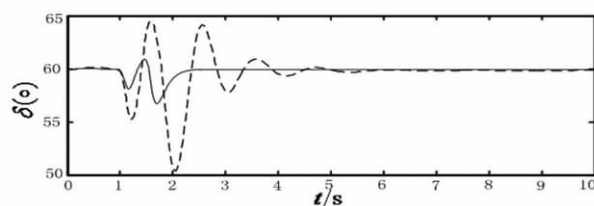


图2 发电机功角相应曲线

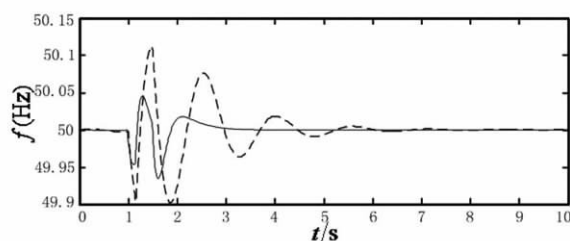


图3 发电机转速响应曲线

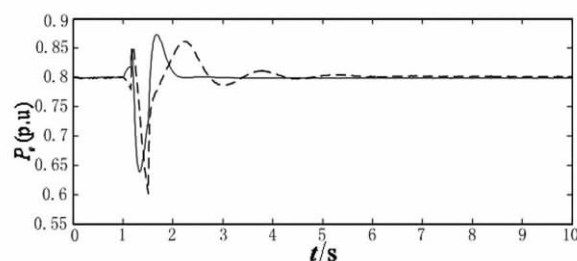


图4 传输功率响应曲线

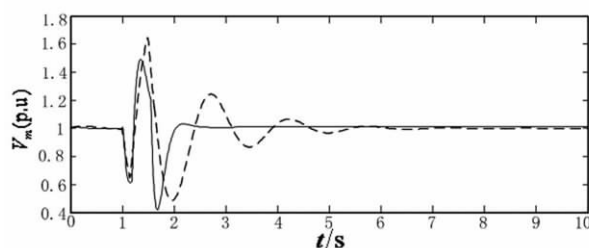


图5 并联侧接入点电压响应曲线

稳定性的能力略次与所运用的控制器设计方法。在所设计的系统控制器下,功角的第一摆动幅度明显较小,并且响应速度明显较快;同样,频率的波动也较小,响应速度和恢复稳定状态的速度较快;系统传输的功率和UPFC并联侧接入母线电压的响应曲线相对于最优控制的响应结果,虽然在摆动幅值上没有明显变化优势,但是其响应速度有明显的改善。

从以上各图都可看到,在变结构控制策略下,系统鲁棒性较好,系统在干扰作用下能够将振动幅值限制在有效范围内,不至于使发电机产生剧烈振荡;在系统故障切除并恢复到正常工作状态下时,系统迅速恢复稳定,振荡幅度小且能够迅速得到平息。仿真结果证明了所建立的含UPFC的单机无穷大系统模型的正确性以及所选解耦控制方法的有效性。

4 结 论

主要研究了含UPFC的单机无穷大系统的建模与控制策略。在分析研究系统等效电路图中各个矢

量关系的基础上,建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的七阶系统模型,并利用逆系统解耦原理对系统模型解耦线性化。为增强系统的抗干扰能力,选取鲁棒性较强的变结构控制原理设计系统的控制器。仿真结果证明该建模方法及控制策略的正确性,且在输电系统出现大扰动时,与其他方法相比,在稳定性方面显示出更强的鲁棒性和抗干扰性。

参考文献

- [1] 程汉湘. 柔性交流输电技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 陈建业, 蒋晓华, 于音杰, 等. 电力电子技术在电力系统中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [4] 罗春雷, 孙洪波, 徐国禹. UPFC 动态建模与最优控制研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 4-6.
- [5] 罗春雷, 孙洪波, 徐国禹. 含 UPFC 系统的状态方程及控制系统研究 [J]. 电网技术, 1997, 21(10): 11-14.
- [6] 王奔, 黄崇鑫, 李泰, 等. 统一潮流控制器逆系统方法控制策略 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 551-556.
- [7] 董良英, 房大中, 林旭军. 含统一潮流控制器的电力系统新型潮流算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 8-10.
- [8] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆系统控制方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] 李东海, 姜学智, 李立琴, 等. 逆系统方法在电力系统控制中的应用 [J]. 电网技术, 1997, 21(7): 10-12.
- [10] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 钱碧甫, 王奔, 黄崇鑫, 等. 静止同步串联补偿器的变结构控制器设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 124-129.
- [12] 杜继伟, 王奔. 静止无功补偿、励磁和汽门协调滑模静控制器的研究 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27(6): 16-21.

作者简介:

邓大磊(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制;

王奔(1960), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统非线性变结构控制与电能质量控制。

(收稿日期: 2012-08-29)

基于支持向量机的电力系统不良数据 在线检测辨识与修正

包永金

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘要: SVM 是数据挖掘中一种具有优良模式识别性能的新方法, 该方法具有学习速度快、全局最优和泛化能力强等优点。首先利用支持向量机回归(SVR) 构建辨识遥测不良数据的模型, 在状态估计前通过比较预测值与实测值之间的差值来一次性辨识遥测不良数据。接着将状态估计后得到的标准残差作为支持向量机分类(SVC) 的输入, 依靠拓扑错误的残差特性来分类辨识出拓扑错误。通过对 IEEE-30 母线的仿真分析证明了该方法的有效性, 现行状态估计器的效率及合格率可以得到很好的提高。

关键词: 不良数据; 电力系统状态估计; 检测辨识; 支持向量机

Abstract: SVM is a new method with excellent pattern recognition properties in data mining, which has the advantages of fast learning, global optimum and high generalization. Firstly, support vector machine regression is utilized to establish the identification model for the telemetric bad data, which compares the differences between the predicted values and the measured values before state estimation. Then the obtained standard residuals after state estimation are used as the input of SVC classification, and the topology error is identified based on the characteristics of these residuals. The efficiency of the proposed method is proven by the simulation analysis of IEEE-30 bus model, thus the efficiency and the percent of pass of the existing state estimators can be highly improved.

Key words: bad data; power system state estimation; detection and identification; support vector machine

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0059-05

0 引言

在能量管理系统(energy management system, EMS)中, 电力系统状态估计负责处理由 SCADA 采集到的包含噪声的冗余数据以便为诸如: 经济分配、安全分析等应用软件提供精确的实时数据。电力系统运行人员通过分析这些软件的结果来采取决策。如果所使用的实时数据库中包含错误数据, 这些应用软件的结果可能毫无意义, 根据这些结果采取的决策也很可能对电力系统的安全运行产生危险。故而不良数据辨识是状态估计中一项十分重要的任务。

现行电力系统中有许多状态估计的方法^[1]。在正常运行(噪声数据主要来自量测不准确)的条件下, 这些方法通常都会获得很好的结果。不过当出现较大的量测误差和拓扑结构错误的时候, 情况可能就不一样了。不良数据辨识的方法正是基于这些问题而提出的。大多数的方法都是在进行状态估

计计算后, 利用量测残差进行假设检验的统计理论方法^[2-4]。在很多情况下这些方法都表现得很好, 不过仍然存在着一些缺点: 难于辨识多相关不良数据, 对于关键量测点的不良数据和包含不相关支路时的拓扑结构错误无法辨识。而且这些方法很难同时处理遥测和遥信不良数据。针对以上这些问题, 又提出了基于数据挖掘的方法。主要有基于神经网络(ANN)^[5-7]、基于模糊理论和聚类分析^[8]及基于间歇统计(GSA)^[9]等一些方法。基于神经网络的方法大多采用典型工况的正确量测数据作为训练样本来构造了一个神经元网络, 用估计前滤波来辨识各种形式的不良数据。但由于神经网络算法的固有特性, 不能从根本上避免训练过饱和及陷入局部最小值的问题, 且随着时间的推移, 训练样本集应该动态更新, 但此类文献也没有提出对样本集更新的动态处理措施。

支持向量机(support vector machine, SVM)是数据挖掘中一种具有优良模式识别性能的新方法。利

用 SVM 回归和分类算法分别建立起了辨识遥测和遥信不良数据的模型: 回归模型采用 SVM 非线性回归算法对各种运行情况下的正常遥测数据进行曲线拟合(即训练), 使模型具有对遥测数据的一步预测能力; 针对状态估计中拓扑结构错误的特点(一条支路上的拓扑结构错误会在该支路周围的支路潮流和母线注入功率上产生较大的残差), 应用支持向量机分类算法构建起了辨识遥信不良数据的分类模型。值得一提的是上述两种模型都可进行在线训练, SVM 在线学习方法能对每次迭代过程中增加的样本进行学习, 利用前一次迭代的运算结果, 减少计算复杂度, 实现在较小时间代价下的新样本学习。模型构建好后首先运用回归模型对实际遥测数据进行预测, 通过比较预测值与实测值之间的残差来一次性辨识量测数据中的遥测不良数据。一旦检测出不良数据就可将其替换成合理的预测值以避免出现系统的不可观测性。遥信不良数据辨识时, 先对消除不良数据影响后的量测数据进行状态估计, 算出量测残差, 再将量测残差输入分类模型, 运用 SVM 分类的良好泛化能力辨识出遥信错误。通过对 IEEE-30 节点模型的仿真结果表明, 所提出的方法对电力系统不良数据检测的效率和准确性都有较大的提高, 说明了方法的有效性。

1 支持向量机算法介绍

1.1 支持向量机回归算法

支持向量机(SVM)是由 Vapnik^[1]最早提出的一种统计学习方法。目前国内外所研究的支持向量机回归算法主要是多输入、单输出, 即每次只能对一个特征量进行回归预测, 对于多输出支持向量机的研究并不多^[1-12], 且算法的效果也不太理想。鉴于此, 采用多个单输出支持向量机来实现多输出问题。

将支持向量机用于解决回归问题即支持向量回归(support vector regression, SVR)。SVR 用来解决回归预测的基本思想是: 通过一个非线性映射 φ , 将输入空间中的数据映射到高位特征空间 G 中, 并在 G 空间中进行线性回归。假设有这样的训练数据 $\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\} \subset x \times R$, 这里 x 表示输入样本空间(如: $x = R^d$)。SVR 通过引入损失函数来解决回归问题, 采用式(1)来计算函数。

$$y = f(x) = (\omega \cdot \varphi(x)) + b, \varphi: R^m \rightarrow \omega \in G \quad (1)$$

• 60 •

对优化目标取极值

$$\min Q = \frac{1}{2} \|W\|^2 + c \sum_{i=1}^n (\xi_i^* + \xi_i) \quad (2)$$

约束条件为

$$\begin{cases} y_i - (\omega \cdot \varphi(x_i)) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ (\omega \cdot \varphi(x_i)) + b - y_i = \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (3)$$

式中, c 为惩罚因子; ξ_i^* 、 ξ_i 为松弛因子; ε 为损失函数。引入拉格朗日因子 a_i 和 a_i^* , 把凸优化问题转化为最大二次型, 用核函数来代替内积运算, 则优化目标形式如下。

$$\max w(a, a^*) = \sum_{i=1}^n y_i (a_i - a_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (a_i - a_i^*) (a_j - a_j^*) K(x_i, x_j) \quad (4)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n a_i^* \\ 0 \leq a_i \leq c, i = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq a_i^* \leq c, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

对优化目标取极值和引入拉格朗日因子 a_i 和 a_i^* , 函数可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (6)$$

高维特征空间中线性问题的内积运算可以用核函数来代替, 即

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \phi(x_j) \quad (7)$$

常用的核函数有: 径向基函数、多项式函数、Sigmoid 函数、线性函数等。

目前, SVR 的训练方式有两种: 批量训练与在线训练。其问题表述和最优化求解的原理相同, 不同点在于: 在线支持向量机不断将新样本添加到训练集, 通过在线调整模型参数, 实现预测模型的不断变化, 而不是批量式的一次训练所有样本。这样不但能提高其训练时间, 而且能提高模型的适应能力, 使系统的运行情况发生变化时, 模型能相应地发生变化。增量式 SVR 的基本思想如图 1 所示。

这里采用增量学习的 SVR 来训练数据, 具体算法可以查看文献 [3]。

1.2 支持向量机分类算法

支持向量机分类(support vector classification, SVC)与 SVR 算法很相似, 具体算法可查看相关文献 [4], 在此不再赘述。采用在状态估计前后分别进行不良数据辨识的方式, 在状态估计后采用 SVC

主要对遥信不良数据进行分类辨识。

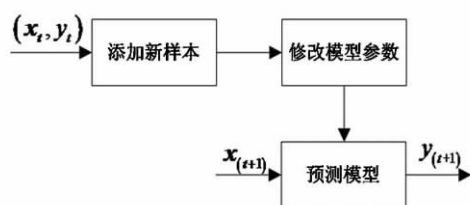


图1 增量式SVR的基本思想

一般来说,当系统某一元素(输电线或母线)发生拓扑错误或量测量突变时,不良数据只会出现在围绕该元素的量测点上,故而对每一个系统元素都采用一个 SVC 分类器来具体辨识出不良数据的类别。当出现不良数据时,只会调用该不良数据所对应的 SVC 分类器,以减少计算量。对任意支路 $s-r$ 来说, SVC 的输入是该支路潮流和支路两端母线上注入功率的标准残差;当 SVC 用于辨识母线结构错误时,其输入为母线电压和母线上各支路潮流的标准残差。

状态估计后的不良数据分为支路拓扑错误、母线拓扑错误以及遥测错误。遥测错误是由于状态估计前辨识遥测不良数据时的漏判或误判造成,此外系统中某一元素发生的拓扑错误也可能在与其相邻的元素上产生较大的残差,此类异常数据点称作非不良数据点。在训练阶段,支路拓扑错误所对应的 SVC 输出选为 -1,遥测错误的输出选为 1,而非不良数据点的输出选为 0。至于母线拓扑错误的输出则要根据具体母线可能发生的拓扑错误而定,有几种拓扑错误就选几个输出值。

2 基于 SVM 的不良数据检测与辨识

2.1 检测与辨识的模型

应用支持向量机来辨识电力系统不良数据的模型如图2所示。下面分别对模型各部分加以说明。

第1步:计算遥测数据的估计值和平方误差

由经过良好训练的 SVR 模型可得到原始遥测数据的估计值。初始 SVR 模型可通过离线训练获得,训练集可由各种运行条件下的历史正常遥测数据或对网络进行离线仿真获取。进行在线预测时,每采到一次遥测数据就可由回归模型获得该组遥测数据的估计值,然后再将该组遥测数据添加到训练数据中进行 SVR 增量学习。由于 SVR 增量学习不

需要从头进行训练,所以训练的时间很短,满足在线辨识的需要。获得估计值之后,就可由量测值和估计值计算平方误差。

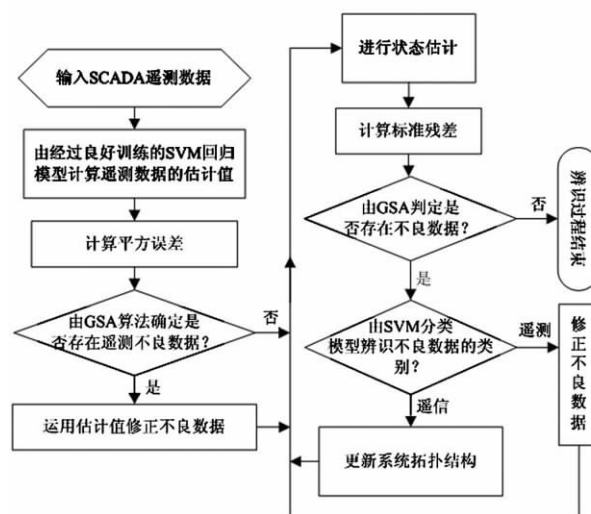


图2 不良数据辨识模型

第2步:辨识和修正遥测不良数据

为避免阈值选取主观性对辨识结果带来的影响,这里采用 GSA 算法来辨识遥测数据中的不良数据。GSA 方法是一种强化聚类效果的数据挖掘算法,它可以估计数据集最佳的聚类个数。在电力系统不良数据辨识中,可以将良好数据和不良数据所在的聚类准确地区分进而检测和辨识不良数据^[9,13]。据此将上一步获得的平方误差进行聚类,如果聚类个数大于1,则表明有不良数据,接着辨识出不良数据并采用估计值进行修正。

第3步:进行状态估计

在消除遥测不良数据的影响后就可利用状态估计器对系统进行状态估计,这里采用加权最小二乘法状态估计。进行状态估计的目的是为了获取系统最可能的运行状态和为辨识遥信不良数据做准备。

第4步:计算标准残差并判别是否存在不良数据

由上一步计算得到的状态估计值和 SCADA 量测值就可以计算出标准残差,判别是否存在不良数据仍然采用 GSA 算法,判别的原则同辨识遥测不良数据时一样。如果不存在不良数据则状态估计结束,输出估计结果。依然存在不良数据时,此时的不良数据有两种情况:一是由于遥信数据错误产生,此类不良数据即遥信不良数据;此外在辨识遥测不良数据时漏判和相邻支路的遥信错误也会导致本支路残差过大而出现不良数据,此类的不良数据称为量

测量突变。这里采用 SVM 分类算法来辨识上述不良数据的类别。

第5步: 由 SVM 分类模型辨识不良数据的类别

由于发生拓扑错误时的残差特性与发生遥测不良数据时的残差特性有很明显的区别,所以在获取训练数据集时不需要模拟系统所有运行状态。进行在线辨识时,对上一步获得的每一个不良数据调用它所对应的分类器,由分类器就可获得该不良数据的类型。对于遥测不良数据可采用其估计值进行修正或者直接丢弃;对于拓扑结构错误则更新系统拓扑结构。接着转入下一次状态估计,重复第3步到第5步直到不再出现不良数据为止。

2.2 算例分析

通过 IEEE-30 节点系统为例来验证方法的可行性。在缺乏真实量测数据的情况下,假设系统的运行情况如下: 将原系统中给定的负荷作为最大负荷需求,最小负荷假定为最大负荷的 20%, 用一个负荷取值区域模型来模拟母线上的负荷波动。这样的一个例子如图 3 所示,图 3 中一条母线上的最大和最小负荷通过一个 6 个时间段的取值区域来表示。母线上所有可能的负荷波动都包含在阴影区域以内。对母线 2 上所接的发电机采用同样的处理方法,母线 1 作为平衡节点,变压器的变比选取在 0.95 ~ 1.05 之间。

根据上述运行情况,通过仿真计算获取了 288 组运行数据,其中三分之二用于训练 SVM 模型,其余用于测试。模型将添加噪声后的数据作为输入数据,将潮流计算值作为目标值来进行训练。对于大型系统不良数据辨识实时性的要求,在训练和测试阶段可将量测值分为几组分别计算,即每组数据都可以有它相应的模型。这样就可将每次采集到的量测数据送入其对应的分组模型进行不良数据的辨识。这里采用文献 [7] 所述将数据按电压等级分为了两组。

情况 1: 遥测不良数据

假设第 35 组测试数据中出现了 6 个不良数据,分别是 P_{6-9} 、 P_{6-10} 、 Q_{19-20} 、 Q_{8-28} 、 Q_2 和 V_{15} 。不良数据与正常量测值的偏差在 $\pm (20 - 100)$ 标准差之间。此种情况下,GSA 算法正确地区分出了上述不良数据。不良数据的情况如表 1 所示。

表 1 遥测不良数据辨识结果

不良数据	真实值	量测值	估计值	估计误差
P_{6-9}	0.221 7	0.530 2	0.226 5	0.004 8
P_{6-10}	0.127 0	0.301 5	0.129 8	0.002 8
Q_{19-20}	-0.023 8	0.149 2	-0.023 0	0.000 8
Q_{8-28}	-0.028 9	0.028 1	-0.027 9	0.001 0
Q_2	0.396 7	-0.085 1	0.400 8	0.004 1
V_{15}	1.053 0	1.398 7	1.060 0	0.007 0

情况 2: 支路遥信变位错误

假设在第 72 组数据的时刻收到支路 4-12 错误的遥信变位信息。支路 4-12 开关实际为闭合状态,但收到的遥信信息为开关断开。根据前面所提方法,在进行状态估计后,只有当出现不良数据时才会调用不良数据所对应的 SVM 分类模型对不良数据进行辨识,且每个系统元素都对应着一个 SVM 分类模型。由 GSA 算法得出的一组可疑数据如表 2 所示。从分类结果可以得出 SVM 分类模型成功辨识出了支路 4-12 的遥信变位错误。

表 2 支路遥信错误辨识

不良数据集{4-12;9-11;6-10}	
SVM 分类模型	分类输出
SVM_{4-12}	-1
SVM_{9-11}	0
SVM_{6-10}	0

值得注意的是当辨识出遥信错误后就可直接更新系统的拓扑结构,无需再进行其他的辨识。

情况 3: 母线分裂型错误

假定在 90 组数据的时刻母线 15 发生分裂,但并没有收到相应的遥信信息。分裂前后的情况如图 3 所示。

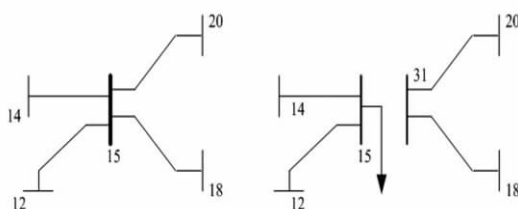


图 3 母线 15 分裂前后模型

表 3 列出了可疑数据集,在训练阶段将此类型拓扑错误对应的 SVC 输出选为 2。由分类结果可知 SVM 模型成功辨识出了母线 15 的分裂错误。

表3 母线分裂型错误辨识

不良数据集{ 15 - 18; 23 - 24; 23 }	
SVM 分类模型	分类输出
SVM ₁₅₋₁₈	2
SVM ₂₃₋₂₄	0
SVM ₂₃	0

3 结 论

以上提出了一种在电力系统实时状态估计中辨识不良数据的新方法。与传统状态估计中的假设检验方法相比,该方法可以很好地避免残差污染和残差淹没,且能克服基于神经网络的方法中神经网络训练过饱和和容易陷入局部最小值的问题。仿真分析证明了本方法的有效性,将此方法与现行电力系统状态估计结合可有效实现不良数据的辨识与修正。

参考文献

- [1] ALi Abur, Antonin Gómez Expósito. Power System State Estimation: Theory and Implementation [M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [2] L. Mili, Th Van Cutsem and M. Ribbens Pavella. Hypothesis Testing Identification: A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1984, 103 (11) : 3239 - 3252.
- [3] L. Mili, Th. Van Cutsem. Implementation of HTI Method in Power System State Estimation [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1988, 3 (3) : 887 - 889.
- [4] Salehfar H, Zhao R. A Neural Network Preestimation Filter for Bad Data Detection and Identification in Power System State Estimation [J]. Electric Power System Research. 1995, 34 (9) : 127 - 134.
- [5] J. C. S. Souza, A. M. Leite da Silva, A. P. Alves da Silva. Online Topology Determination and Bad Data Suppression in Power System Operation Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Power Sys-

tems, 1998, 13 (3) : 796 - 803.

- [6] S. P. Teeuwsen. Neural Network Based Multi - dimensional Feature Forecasting for Bad Data Detection and Feature Restoration in Power System [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006: 18 - 22.
- [7] D. Singh, J. P. Pandey, D. S. Chauhan. Topology Identification, Bad Data Processing, and State Estimation Using Fuzzy Pattern Matching [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (3) .
- [8] Huang SJ, Lin JM. Enhancement of Power System Data Debugging Using GSA - based Data Mining Technique. [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4) : 1022 - 1029.
- [9] Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer, 1995: 138 - 145.
- [10] F. Pérez - Cruz, G. Camps, E. Soria, J. Pérez, A. R. Figueiras Vidal, and A. Artés - Rodríguez. Multi - dimensional Function Approximation and Regression Estimation [J]. in Proc. ICANN, Madrid, Spain, 2002.
- [11] M. P. Sánchez - Fernández, M. de Prado - Cumplido, J. Arenas - García, and F. Pérez - Cruz. SVM Multiregression for Nonlinear Channel Estimation in Multiple - input Multiple - output Systems [J]. IEEE Trans. Signal Process, 2004, 52 (8) : 2298 - 2307.
- [12] Parrella F. Online Support Vector Regression [D]. Master's Thesis, University of Genoa, 2007.
- [13] Chih - Wei Hsu, Chih - Chung Chang, and Chih - Jen Lin. A Practical Guide to Support Vector Classification. Technical Report, Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taipei, 2003. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>
- [14] 吴军基, 杨伟, 葛成, 等. 基于 GSA 的肘形判别用于电力系统不良数据辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (22) : 23 - 28.

作者简介:

包永金 (1975), 男, 宜宾电业局工程师, 主要从事输配电运行工作。

(收稿日期: 2012 - 08 - 10)

发展风电 保护环境

区间组合模型在中长期负荷预测中的应用

徐志向

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

摘要: 由于年负荷的发展包含稳定增长趋势成分和随机成分, 因此针对单一中长期负荷预测模型通常难以达到理想的预测精度, 而组合模型可以对不同的预测模型进行优化组合和信息的综合利用, 提出建立基于支持向量机的变权组合预测模型, 实现了组合模型的结构风险最小化代替传统的经验风险最小化。同时针对以往预测模型仅仅实现点预测的不足, 建立基于区间参数估计理论的中长期负荷区间组合预测模型, 可以解决以往负荷模型预测的无精度范围的问题, 对传统的中长期负荷预测模型进行了拓展。最后将该模型应用于实际负荷预测中, 验证了该方法的有效性和可靠性。

关键词: 负荷预测; 支持向量机; 结构风险最小化; 区间组合预测模型; 区间值

Abstract: Because the annual load includes some steady increasing trend components and some stochastic components, it is difficult for a single medium and long term load forecasting model to achieve the desired forecasting accuracy, while the combination model can realize the optimal combination for the different forecasting models and can synthetically utilize the forecasting information of every model, so the time series variable weight combinational forecasting model based on support vector machine is proposed which can realize structural risk minimization of the combination forecasting model instead of the traditional experience risk minimization. At the same time, aiming at the shortcomings of the former load forecasting model which usually just realizes the point forecasting, the interval combination forecasting model of medium and long term load is established based on interval parameter estimation theory, which can solve the problem of the former forecasting model without the range of precision and develop the traditional forecasting model of medium and long term load. Finally, this model is utilized to the practical load forecasting, and the validity and reliability are verified.

Key words: load forecasting; support vector machine; structural risk minimization; interval combination forecasting model; interval value

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0064-06

0 引言

电力系统中长期的负荷预测是电力系统运行、规划等工作的重要基础, 对保证电网运行的经济性尤为重要。准确的负荷预测有助于提高系统的安全性与稳定性, 从而提高经济效益和社会效益。传统的预测方法有趋势外推法、时间序列法、回归分析法和灰色模型法等^[1-4]。由于年电力负荷由确定性和随机性成分组成, 确定性成分主要由国民经济发展、长期气候变化、行政调控等因素决定, 随机成分由偶然因素导致, 具有不确定性, 因此这些方法显得不够有效。近年来, 基于人工智能理论如神经网络、支持向量机等方法得到了成功应用^[5-6]。但单个预测模型进行预测仍存在一些缺陷, 如信息源的单一性、对

模型参数敏感等, 而组合预测模型可以综合各模型的优势, 实现更准确的负荷预测。

组合预测就是将不同的预测方法进行适当的组合, 综合利用各种方法所提供的有用信息, 从而尽可能地提高预测精度^[7]。大量的实验表明, 组合预测往往优于单一预测模型^[8-10]。文献[1]综合多个准则对组合模型预测效果进行评价。文献[2]考虑了各预测方法各时点上的预测精度状态, 通过加权马尔可夫链定性地推测出预测年份上各单项预测方法的预测精度状态, 确定其在预测年份的权系数进而预测。文献[3]借鉴层次分析法的思想, 采用方差-协方差优选组合预测方法和灰色关联分析分别确定各单一预测模型在各评价指标下的相对权重, 最终确定组合预测模型中的组合权重。

但是目前所提出的组合预测方法以及预测

模型往往均是建立在实际值序列和预测值序列都为单点值基础上的。由于经济发展的复杂性,影响实际负荷变化的因素很多,同时对于未来负荷的规划,掌握负荷的精确变化是不可能的。而且负荷数据在一定范围内变化也是正常的。因此预测模型不但应给出未来的趋势变化,预测结果作为一区间值给出负荷的变化范围更为合理。区间数据的变化形态也越来越受到重视。区间计算的思想始于20世纪30年代,系统的理论体系则在1966年,国际著名计算数学专家R. E. Moore专著《区间分析》的出版,自此以后区间计算在数学、计算机、物理、工程等领域获得了广泛的应用^[14-16]。文献[7]对中长期负荷建立了模糊组合预测模型,并给出了一个区间范围,对区间组合预测仅进行了初步探讨。文献[8]在现有ARIMA电价预测模型的基础上,借助统计学的区间估计理论,给出了一种含置信区间的电价预测方法,但并没有对预测模型误差项进行正态性检验。

通过对中长期电力负荷数据及其预测模型进行深入分析,首先综合神经网络、灰色系统和最小二乘支持向量机各单一预测模型的优势,建立基于支持向量机的变权组合预测模型,实现了组合模型的结构风险最小化代替传统的经验风险最小化。同时采用基于统计推断学的区间参数估计理论,建立组合预测与区间估计理论相结合的电力负荷区间组合预测模型,给出未来电力负荷数据在一定置信度下的变化区间,从而实现了对中长期电力负荷发展趋势更加准确的预测。

1 组合预测模型的构建

首先讨论了灰色系统、神经网络和最小二乘支持向量机3种预测模型,在此基础上提出建立基于支持向量机的变权组合预测模型。

1.1 灰色预测模型

灰色系统理论认为所有随机过程都是在一定幅值范围、一定时区内变化的灰色量,称这个随机过程为灰色过程。灰色模型不需要任何原始序列的概率分布,可实现较少数据的建模^[9]。同时中长期电力负荷预测具有信息不完全和不确定的性质,符合灰色变量的特征,因此可采用GM(1,1)模型预测中长期电力负荷。

1.2 广义神经网络

人工神经网络技术在预测中得到了广泛的应用,其中应用较多的是BP神经网络及其改进网络,但BP神经网络有收敛速度慢、训练时间长、容易陷入局部极小点等缺点。广义神经网络(generalized regression neural network, GRNN)是由Donald F. Specht提出的,是RBF神经网络的一个分支,一种基于非线性回归理论的前馈式神经网络模型^[9]。该网络在逼近能力和学习速度上有较强的优势,预测效果也较好。此外该网络还可以处理不稳定的数据,所以经常用于对非线性函数的逼近。

GRNN神经网络的理论基础是非线性回归分析。设随机变量 x 和 y 的联合概率密度函数为 $f(x, y)$,已知 x 的观测值为 X ,则 y 相对于 X 的回归,即条件均值为

$$\bar{Y} = E[y|X] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f(X, y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(X, y) dy} \quad (1)$$

Y 即为在输入为 X 的条件下, Y 的预测输出。如果GRNN神经网络的概率密度函数(隐含层的传递函数)采用高斯函数,则网络的输出为

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

式中, $D_i^2 = (X - X_i)^T (X - X_i)$; X_i, Y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为第 i 个取样样本的输入和输出; σ 为光滑因子。

1.3 最小二乘支持向量机

SVM(support vector machine)是由Vapnik提出的一种统计学习方法,是在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小原理的基础上发展起来的一种新的机器学习方法^[10]。具有理论完善、适应性强、全局优化、训练时间短和泛化能力强的特点。其基本思想为选择一个非线性变换 $\phi(\cdot)$ 将 n 维输入、1维输出样本向量 $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)]$ ($x_i \in R^n, y_i \in R, i = 1, 2, \dots, l$), l 为训练样本个数,从原空间映射到高维特征空间,并在该高维特征空间构造最优线性回归函数得

$$f(x) = w\phi(x) + b \quad (3)$$

最小二乘支持向量机^[11]在优化目标中选择的损失函数为误差 ξ_i 点的二范数。因此优化问题为

$$\min \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (4)$$

约束条件为

$$y_i [w^T \phi(x_i) + b] = 1 - \xi_i \quad (i=1, \dots, l) \quad (5)$$

一般, 由于 w 可能为无限维, 直接求解式的优化问题极其困难, 因此将这一优化问题转化到其对偶空间中, 引入拉格朗日函数得

$$L = \frac{1}{2} w^T w + \sum_{i=1}^l \xi_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i \{ y_i [w^T \phi(x_i) + b] - 1 + \xi_i \} \quad (6)$$

通过最小二乘法求出 a 和 b , 由此得到预测输出

$$y(x) = \sum_{i=1}^l a_i \phi^T(x) \phi(x) + b \quad (7)$$

1.4 预测模型的最优组合

由于目前各种组合预测方法都是基于经验风险最小化原则, 而支持向量机是基于结构风险最小化原则。同时支持向量机的拓扑结构仅是由支持向量决定, 并且无需确定具体的函数表达式, 较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极小等问题, 具有较强的泛化能力。文献 [2] 对应用支持向量机的组合预测过程和参数计算方法进行了详细的探讨, 这里不再赘述。该模型综合了线性模型、指数模型、乘幂模型、非等间隔灰色 GM(1,1) 模型和非等间隔灰色 Verhulst 模型。虽然线性模型、指数模型和乘幂模型具有模型简单、计算量较小的特点, 但是实际的负荷数据不是单调线性变化的, 而是波动性较大的数据, 尤其对于非线性发展的中长期电力负荷。因此单调模型不能很好跟踪其变化趋势, 于是提出将广义神经网络、灰色模型与最小二乘支持向量机 3 种不同机理的非线性预测模型首先作为单一预测模型分别对训练集的负荷进行预测, 然后将 3 个模型的拟合结果作为 SVM 的输入, 实际的负荷数据作为输出, 这样就得到下一年的负荷组合预测模型。每次使用组合模型预测都需要对支持向量机进行训练后再预测。因此, 每次模型训练得到的组合权重都是基于结构风险最小化原则的, 隐含于训练模型中。

2 区间预测理论的应用

通过建立的基于支持向量机的变权组合预测模型可以实现对下一时刻的预测, 却无法给出精度范围。由于影响负荷预测对象的因素很多, 某些参数在一定范围内波动属正常现象。因此预测模型不但应给出负荷的未来变化趋势, 更重要的是应能够给

出负荷在某一置信度下的变化范围。

1937 年, Neyman 提出的置信区间 (confidence interval) 理论已被广泛应用, 区间估计和点估计是其重要的组成部分。置信区间估计方法包括枢轴量法、假设检验法、大样本法等。这里采用较常见的枢轴量法构造置信区间。

设 $y_n = [y_{n-k+1}, y_{n-k+2}, \dots, y_{n-1}, y_n]$ 为电力负荷第 $n+1$ 时刻以前的真实数据。 $\hat{y}_{n+1}$ 为电力负荷第 $n+1$ 时刻的预测输出。二者的关系可以表示为

$$\hat{y}_{n+1} = g(y_n, w) + \varepsilon \quad (8)$$

$g(y_n, w)$ 为组合预测模型, 随机变量 ε 为模型输出误差服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布。可以通过 W 检验、 A^2 检验或 W^2 检验等方法对负荷预测模型的误差进行正态性验证。当确认预测模型的误差服从正态分布的假设, 可得如下推导 [23]。

$$T = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{S} \quad (9)$$

$$\text{其中, } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i;$$

由上式可得

$$T = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{\sigma} \quad (10)$$

因此统计量 T 服从 $t(n-1)$ 分布。由于 T 是 μ 的点估计 $\bar{X}$ 和 μ 的函数, 又与参数 $\theta = (\mu, \sigma^2)^T$ 无关, 因此有

$$\begin{cases} p_\theta \left[\frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{S} \leq t_{1-\alpha} \right] = 1 - \alpha \\ p_\theta \left[-t_{1-\alpha} \leq \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{S} \right] = 1 - \alpha \end{cases} \quad (11)$$

由此可得 μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 时的双侧同等置信区间为 $[\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2}(n-1), \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2}(n-1)]$ 在正态分布总体的 UMPU 检验下, 负荷预测模型误差

$$I_w(\varepsilon_{n+1}) = [\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2}(n-1), \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2}(n-1)] \quad (12)$$

是 μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的 UMAU 同等置信预测区间。式 (12) 即为预测模型的误差区间, 结合式 (8) 的组合预测模型, 得出第 $n+1$ 时刻 y_{n+1} 模型的预测区间为

$$I_w(y_{n+1}) = g(y_{n+1}, w) + I_w(\varepsilon_{n+1}) \quad (13)$$

3 应用实例

为验证提出的区间组合预测方法,以某省1978—1998年21年年用电量数据^[24]的实际数据为例对该系统的年用电量进行预测,并对预测结果进行评价分析。运用1978—1993年的年用电量数据进行模型的构建,1994—1998年的年用电量数据进行模型的验证。并同时与各单项模型进行了对比。表1为1978—1998年的用电量。

表1 1978—1998年用电量

单位: GWh

年份	负荷值	年份	用电量
1978	80.13	1989	17 267
1979	90.78	1990	17 711
1980	93.95	1991	18 815
1981	94.25	1992	19 437
1982	100.29	1993	21 891
1983	108.15	1994	24 755
1984	116.37	1995	27 350
1985	124.92	1996	29 210
1986	129.83	1997	29 917
1987	151.12	1998	30 408
1988	159.92		

最小二乘支持向量机模型采用了RBF径向基函数作为核函数。

$$K(x, x_k) = -\frac{\|x - x_k\|^2}{2\gamma^2} \quad (14)$$

式中, γ 为核宽。核参数 γ 和惩罚参数 C 采用了交叉验证方法对参数进行寻优($\gamma = 1.61, C = 960$)。GRNN神经网络的光滑因子 $\sigma = 0.01$ 。作为组合模型的支持向量机函数svr采用Quadratic损失函数,通过参数寻优得到RBF核参数 $\gamma = 100, C = 10^4$,误差 $\varepsilon = 0.001$ 。

通过Matlab提供的正态分布检验函数lillietest对所建模型误差项均进行正态性检验, $\alpha = 0.01$,通过对组合预测模型误差进行假设检验,均得到 $h = 0$,因此接受负荷组合预测模型误差项服从正态分布的假设。图1为含有前20个数据量的负荷组合预测模型误差的正态性检验图。从图中可以清楚地看出,所提出的区间组合预测模型的误差基本符合正态性

标准线,可认为该预测模型误差近似服从正态分布,因此可直接对模型误差应用区间估计理论。如果预测模型的误差不能满足正态性分布的要求,可通过Box-Cox变量变换法^[25]将模型数据转换为正态分布样本。

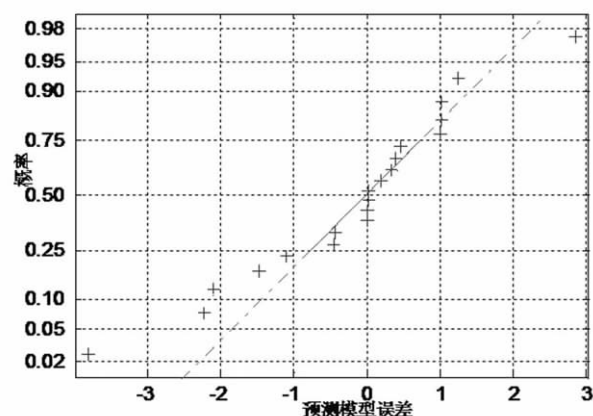


图1 负荷组合预测模型误差的正态性检验图

图2为各负荷预测模型MAPE的变化情况。从图可明显看出随着模型数据量的增加,LSSVM模型和GRNN模型误差基本保持不变,GM模型误差一直处于较高的位置,而所提出的组合预测模型对数

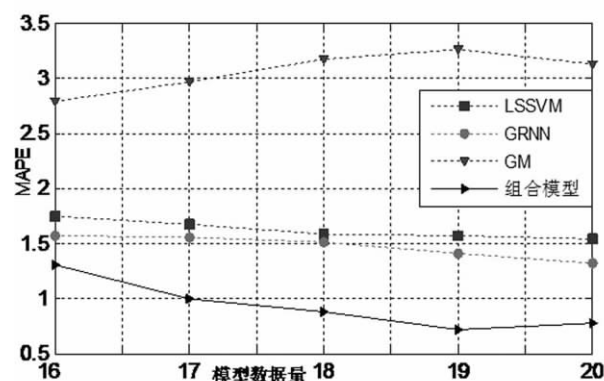


图2 负荷预测模型的MAPE图

据进行了比较好的拟合。主要是由于模型通过SVM进行非线性组合,充分挖掘了原始数据和单一模型的信息和实现了利用组合模型结构风险最小化原则代替传统的经验风险最小化。通过后验误差 ε 和平均绝对百分误差(MAPE)对各模型进行了评价。通过表2的各预测模型的预测结果对比可以看出组合预测方法的 ε 和MAPE都比单一预测方法小,预测可靠性更高。后验误差 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{\hat{y}_{t+i} - y_{t+i}}{y_{t+i}} \quad (15)$$

式中, y_{t+i} 为校验实际值; $\hat{y}_{t+i}$ 为模型预测值。同时以

表 2 各预测模型的预测结果比较 (单位: 100 G kW · h)

年份	实际值	负荷预测值						
		LSSVM	GRNN	GM	组合模型	下限	上限	
1994	247.55	238.45	-0.038 2	216.08	-0.145 6	230.70	-0.073 0	243.53
1995	273.5	278.14	0.016 7	244.19	-0.120 0	252.86	-0.081 6	270.96
1996	292.1	302.794	0.035 3	270.43	-0.080 1	278.30	-0.049 6	292.94
1997	299.17	309.91	0.034 7	289.88	-0.032 0	303.53	0.014 4	304.15
1998	304.08	313.93	0.031 4	298.29	-0.019 4	324.75	0.063 6	301.23
MAPE			3.12		7.95		5.65	
							1.09	1.90
								1.36

平均绝对百分误差 (MAPE) 来衡量各模型的拟合精度及预测精度,其定义为

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_{t+i} - y_{t+i}}{y_{t+i}} \right| \cdot 100 \quad (16)$$

从图 3 各模型的负荷预测变化情况可看出,所提出的变权组合模型预测效果明显优于其他 3 种模型,能较好地预测负荷的发展。图 4 为负荷在 1 - α 置信水平下的预测区间(α = 95%)。由图可清晰地看出,负荷的发展均落在了置信范围为 95% 的区间内。由于置信水平越大预测区间包含未来真实数据的概率越大,区间范围更可靠;反之,区间范围更精确。因此在实际中应当根据实际情况选取最优的置信水平。

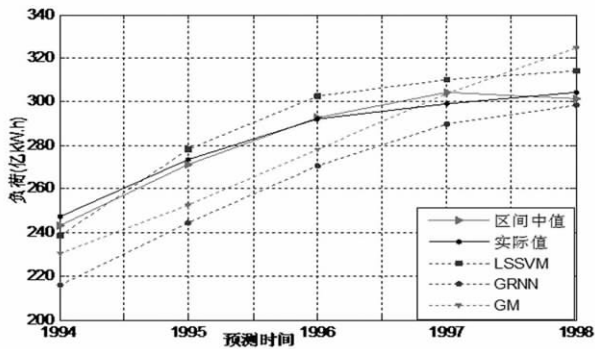


图 3 各模型的负荷预测值

4 结 论

针对单一电力负荷预测模型预测精度不高的情况下,所提出的基于支持向量机的时间序列变权组合预测模型,可以综合各单一预测模型所具有的优势,实现组合模型的结构风险最小化代替传统的经验风险最小化,增强了预测模型的稳定性。同时根据统计推断学的区间参数估计理论,将中长期负荷模型的点预测推广到了区间预测,以一定置信度给

出数据发展的区间预测范围,解决了以往负荷模型预测的无精度范围的问题,对传统负荷预测模型进行了拓展。同时通过与 GRNN、GM、LSSVM 3 种单一模型对实际负荷进行对比预测,实例充分表明所提出的负荷区间组合预测模型能有效提高电力系统负荷预测的精度,具有较好的工程应用价值。区间置信度的选取与负荷的实际发展情况、专家经验等很多因素相关,因此如何根据负荷发展的实际情况选取最优的置信度有待进一步研究。

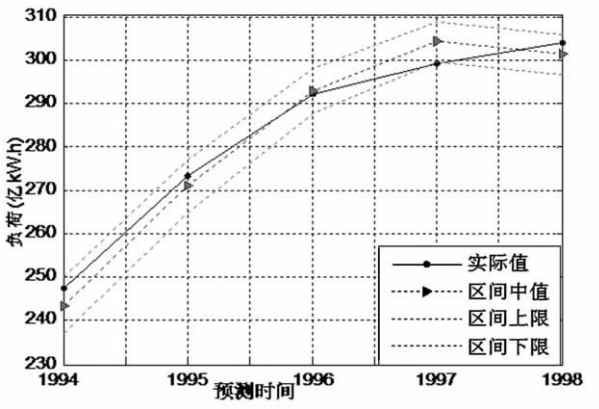


图 4 负荷在 1 - α 置信水平下的预测区间(α = 95%)

参考文献

[1] 牛东晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社,1999.

[2] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测 [M]. 北京: 中国电力出版社,2007: 112 - 114.

[3] 雷绍兰,孙才新,周淦,等. 电力短期负荷的多变量时间序列线性回归预测方法研究 [J]. 中国电机工程学报,2006,26(2): 25 - 29.

[4] 张友泉. 一种基于灰色系统理论的中长期电量预测模型 [J]. 电网技术,1999,23(8): 47 - 50.

[5] 李光珍,刘文颖. 基于 LSSVM 和马尔可夫链的母线负

- 荷短期预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 56-58.
- [6] 牛东晓, 王建军, 李莉, 等. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 30-34.
- [7] Bates J M, Granger C W J. Combination of Forecasts [J]. Journal of Operational Research Quarterly, 1969(20): 451-468.
- [8] 方仍存. 电力系统负荷区间预测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [9] 马永开, 唐小我. 两种组合预测优化模型的分析 and 比较 [J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(1): 99-103.
- [10] Wang Jianzhou, Zhu Suling, Zhang Wenyu, et al. Combined Modeling for Electric Load Forecasting with Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Energy, 2010(35): 1671-1678.
- [11] 周四清, 王坚强. 基于多准则优化的组合预测方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1651-1654.
- [12] 毛李帆, 姚建刚, 金永顺, 等. 中长期电力组合预测模型的理论研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 53-58.
- [13] 周淦, 任海军, 李健, 等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 47-52.
- [14] Zhao Junhua, Dong Zhaoyang, Xu Zhao, et al. A Statistical Approach for Interval Forecasting of the Electricity Price [J]. IEEE Trans. on Power System, 2008, 23(2): 267-276.
- [15] Khosravi A, Nahavandi S, Creighton D. Construction of Optimal Prediction Intervals for Load Forecasting Problems [J]. IEEE Trans. on Power System, 2010, 25(3): 1496-1503.
- [6] 徐惠莉, 吴柏林, 江韶珊. 区间时间序列预测准确度探讨 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(1): 133-140.
- [7] 游仕洪, 程浩忠, 谢宏, 等. 模糊组合预测在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004(3): 54-56.
- [8] 曾鸣, 刘玮, 汪晓露. 含置信区间的改进 ARIMA 电价预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 25-31.
- [9] Donald F, Specht. A General Regression Neural network [J]. IEEE Trans Neural Netw, 1991, 2(6): 568-576.
- [20] Cortes C, Vapnik V. Support Vector Networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(1): 273-297.
- [21] Suykens J A K, Gestel V T. Least Squares Support Vector Machines [M]. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [22] 赵文清, 朱永利, 张小奇. 应用支持向量机的变压器故障组合预测 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 14-19.
- [23] 安伟光, 孙振明, 张辉. 预测区间技术在航天器数据处理中的理论与应用研究 [J]. 宇航学报, 2006(27): 109-112.
- [24] 陈攀, 李燕辉, 王文圣, 等. 电力负荷预测的灰色随机组合模型 [J]. 四川水力发电, 2004, 23(3): 80-81.
- [25] 李建鹏, 吴小俊. 基于 Box-Cox 变换的分类器性能改进 [J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 172-174.

作者简介:

徐志向(1980), 男, 电气工程专业工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统工程技术相关工作及研究。

(收稿日期: 2012-07-25)

(上接第15页)

- [7] 张靠社, 王媛, 胡德海. 基于 Crowbar 保护的双馈感应发电机组的低电压穿越研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 10(27): 66-71.
- [8] 孔宪国, 刘宗歧. 基于主动式 Crowbar 的双馈风电机组 LVRT 性能优化分析 [J]. 现代电力, 2012, 29(1): 77-81.
- [9] 苏平, 张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈

风力发电系统 LVRT 仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 23(38): 164-171.

作者简介:

魏丽丽(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为并网型风力发电系统及其控制方面。

(收稿日期: 2012-07-09)

智能变电站二次系统调试技术探讨

赵子涵

(四川电力送变电建设公司, 四川 成都 610051)

摘要: 智能变电站是以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求自动完成二次系统信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能。智能变电站二次系统主要由保护装置、测控装置、智能终端、合并单元等智能组件组成,其主要特征是数据采集数字化、信息交互网络化。主要对智能变电站二次系统调试的试验流程、试验重点和难点等进行探讨。

关键词: 智能电网; GOOSE; IEC 61850

Abstract: Smart substation realizes automatically the basic functions of information acquisition, measurement, control, protection, metering and monitoring for the secondary system taking the total - station information digitization, communication platform networking and information sharing standardization as the basic requirements. The secondary system of smart substation is mainly composed of the intelligent components such as protection device, control device, intelligent terminal and merging unit. Its main features are the data acquisition digitization and interactive information networking. The emphases of this discussion are the procedure, key point and difficulty of the test for the commissioning of secondary system in smart substation.

Key words: smart grid; GOOSE; IEC 61850

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2013) 01 - 0070 - 03

1 智能变电站二次系统试验流程

智能变电站二次系统的试验流程主要包括: 审图、出厂验收、现场装置功能调试、现场系统功能调试、现场系统性能调试和系统启动调试以及全系统投产等。具体流程如图1所示。以下将简要介绍几个重要过程的工作内容。

1.1 出厂验收

出厂验收主要对硬件、功能、性能和可靠性等进行检验。一般在二次系统集成商处进行,验收前需具备以下条件。

①系统集成商已按照配置要求,在工厂环境下完成软件开发和系统集成;

②系统集成商已搭建模拟测试环境,提供测试设备,并完成相关技术资料的编写;

③二次设备供应商的出厂试验达到合同及相关技术规范的要求。

1.2 现场装置功能调试

现场装置功能调试主要对所有二次设备进行功能和性能测试,如保护装置的定值校验、测控装置的

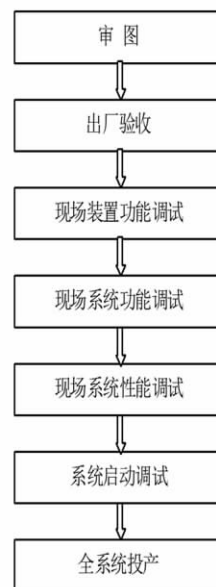


图1 智能变电站二次系统试验流程图
同期功能测试以及交换机收发功率测试。

1.3 现场系统功能调试

现场系统功能调试主要指系统联调及整组传动,在所有现场装置功能调试工作完成后进行。此外,现场系统功能调试还包括站级监控系统调试和远动通信系统调试等。

1.4 现场系统性能调试

现场系统性能调试主要测试二次系统性能指标,如遥信变位传送时间、遥控命令执行传输时间和网络负荷率测试等。

1.5 系统启动调试

系统启动调试通常在整组传动合格并通过有关部门验收后进行。主要检验智能变电站二次系统在实际带电运行时能否正常工作。系统启动调试过程中,由于没有常规的电流电压二次电缆连接,无法使用第三方的表计进行保护装置的相量校核,主要通过保护装置本身的测量量确认相量是否正确。

2 试验重点

智能变电站二次系统的试验涉及范围较广,这里主要探讨出厂验收、现场试验的相关内容及其试验手段,重点分析一些与常规变电站不同的试验内容。

2.1 出厂验收

二次系统出厂验收试验的对象是集成后的智能变电站二次系统,主要包括保护装置、测控装置、保护测控一体化装置、智能终端、网络设备、站级监控系统和远动工作站等。出厂验收主要从硬件检查、系统功能测试、系统性能测试、系统稳定性测试等方面进行试验。

对于 IEC 61850 测试,主要进行模型文件合法性、一致性和互操作测试,需在第三方软件和测试平台上进行,通常出厂验收时不具备该条件。为保证相关设备的一致性和互操作性,可在出厂验收系统上对每个型号的设备分别抽取一台进行完整的关联试验,检查该装置与其他设备能否实现互操作,保证本站所使用设备间的一致性和互操作性。智能变电站对通信可靠性要求非常高,不仅在出厂验收时测试网络设备的性能指标,还应在现场安装完成后测试整个网络的性能,对于规程并未明确的网络性能,目前通常测试网络负荷率、交换机吞吐量、交换机丢包和收发功率等。进行保护整组传动时,需结合变电站的 GOOSE 配置表、图,检查不同设备间的 GOOSE 虚端子开入逻辑,确保所有装置的配置文件和设计符合要求。其他项目试验内容和常规变电站类似。

2.2 现场装置功能调试

2.2.1 合并单元

合并单元(merging unit, MU)主要负责整合多

个电子式互感器采集的数据,并供相关保护、测控、计量和录波等设备使用。合并单元通常按间隔配置,大致分为线路合并单元和母线合并单元,具有电压切换和电压并列功能。根据合并单元的功能,确定其试验项目如下。

①合并单元通过网络传输信息,网络地址应与相关配置文件一致,否则无法和其他设备互联,所以在软件检查中增加了装置 MAC 地址的检查。

②合并单元经光纤与其他设备通信,为保证通信可靠稳定,光纤端口的收、发信功率应有足够的裕度,通过测量可确定功率是否满足要求。

③合并单元通信中断或异常时,相关设备应能正确闭锁,这可通过模拟试验来检验。

④在告警功能检查中,采集模块故障告警、数据异常告警等涉及电子式互感器的故障,需电子式互感器厂家配合模拟相应故障。

⑤GOOSE 虚端子开入的检查涉及其他设备,需结合系统的整组传动试验进行,全面检查开入和开出的相关配置。

⑥电压切换功能试验时,如果装置使用的开关、刀闸位置为硬接点接入,则可直接在合并单元进行模拟;如果装置使用的开关、刀闸位置接点通过 GOOSE 虚端子开入获取,则需在智能终端上进行相应的开关、刀闸切换模拟。

2.2.2 智能终端

智能终端(ICU)主要负责采集开关、刀闸的位置以及执行控制命令等。试验项目中前5项内容与合并单元前5项相同,这里主要分析遥信和遥控功能试验。遥信试验除了同测控装置及综合自动装置后台核对遥信信号之外,还需要同相关的保护装置、合并单元、录波装置等进行 GOOSE 虚端子连接的正确性检查。遥控试验需在综合自动装置后台、测控装置、就地把手上分别进行分、合闸操作,同时还要结合保护传动,检查保护动作能否正确动作出口。

2.2.3 保护及测控装置

智能变电站保护功能的测试方法与传统变电站的测试方法有较大不同,后者通过继电保护测试仪直接在保护装置上输入电压和电流模拟量,而智能变电站保护装置的测试有以下两种方法。

①将传统继电保护测试仪输出的电压、电流模拟量加至 TA/TV 模拟器,由其将模拟信号变成特殊格式的数字光信号,再送至合并单元 MU,由 MU 通

过光纤送至保护装置。由于 TA/TV 模拟器与 MU 间的通信协议在 IEC 61850 中尚无规定,属于 ECT/EVT 生产厂家的内部协议,因此,TA/TV 模拟器目前为 ECT/EVT 生产厂家提供。

②使用数字继电保护测试仪直接输出数字式电流、电压量和开入量,并读取 GOOSE 出口报文测量保护动作时间。

2.3 现场系统功能调试

此项工作在现场装置功能调试完成后进行。通常先检查通信网络、二次电缆连接的正确性;再通过一次通流及升压、整组传动,再次确认二次系统工作正常。通过模拟保护装置动作,检查保护出口、智能终端及开关机构是否正常,开关是否正确跳合闸。现场系统功能调试还包括站级监控系统相关功能(如遥控功能、全站防误闭锁功能和主从切换功能)以及远动工作站相关功能的测试,并与调度主站进行联调。系统调试过程主要进行相量测试,对于智能变电站主要通过二次设备本身的测量量确认相量是否正确。

2.4 网络通信测试

2.4.1 网络延时测试

保护装置 GOOSE 网络的延时直接影响了保护的速动性。而采样网络的延时直接影响装置采样数据的实时性和同步性,需专门测试网络的延时。

2.4.2 通信接口检验

通信接口的功率裕度对通信可靠性的影响很大,需测量光纤通信端口发送功率、接收功率、接收灵敏功率,测试合并单元激光供能的输出功率。

2.4.3 通信功能检验

检查智能变电站二次系统在通信网络异常时的运行情况。

①设备与 MU 或交换机的采样值通信中断测试:拔出 MU 或交换机与设备的连接光纤后,设备应提示“采样通信中断”且告警灯亮,同时后台应收到“采样通信中断”告警信号;当 MU 与设备的光纤连接后,设备应提示“采样通信恢复”且告警灯灭,同时后台应收到“采样通信恢复”信号。

②MU 与采集器的通信中断测试:拔出 MU 与采集器的连接光纤后,设备应提示“TV 断线”或“TA 断线”且告警灯亮,同时后台应接收到“TV 断线”或“TA 断线”告警信号;当 MU 与采集器的光纤连接后,信号复归。

③设备与交换机的 GOOSE 通信中断测试:拔出交换机与装置的 GOOSE 连接光纤后,设备应提

示“GOOSE 通信中断”且告警灯亮,同时后台应收到“GOOSE 通信中断”告警信号;当接入交换机与设备的通道光纤后,设备应提示“GOOSE 通信恢复”且告警灯灭,同时后台应收到“GOOSE 通信恢复”信号。

④ICU 与交换机的 GOOSE 通信中断测试:拔出对应 ICU 与交换机的连接光纤后,设备应提示“GOOSE 通信中断”且告警灯亮,同时后台应收到“GOOSE 通信中断”告警信号;当对应 ICU 与交换机的光纤连接后,设备应提示“GOOSE 通信恢复”且告警灯灭,同时后台应收到“GOOSE 通信恢复”信号。

⑤过程层通信异常测试:当插拔光纤造成信号抖动时,设备应不误动;当抖动消失后,设备应恢复正常;当收到错误报文时,设备应不误动;当错误报文消失后,设备应恢复正常。

⑥站控层网络测试:测试站控层网络的各种服务,模拟各种肯定和否定测试,观察设备的反应,设备应不死机。

⑦通信端口能力测试:通过报文发生器向设备的通信端口发报文,当通道吞吐量满负载时,设备应不死机;当通道正常后,设备应能恢复正常。

3 试验难点

3.1 采样同步性测试

变电站内的母线保护、变压器保护、方向距离保护以及测控计量设备等,对数据源同步的精度要求很高,为保证智能变电站数据的同步,通常采用全站时钟源同步、区域采样点插值同步等方法。任何方式的同步,其最终目标都是实现保护、测控设备采集的数据的同步,因此,现场同步性测试就是检验二次设备采集的数据是否同步。

3.1.1 电流采样同步性测试

与传统差动保护不同,各电子式电流互感器数据更新时间并不相同,采样网络传输延时也不一致,使智能变电站差动保护各模拟量存在采样非同步问题。所以,必须测试差动保护不同电流互感器采样的同步性并调整。站内差动保护(如母线差动保护、主变压器差动保护)可采用一次通流的方法测试同步性,在两个电子式电流互感器一次侧输入大小和方向相同的电流,根据保护装置中这两个电流量的采样角度差判断采样的同步性。

(下转第 80 页)

表 1 两年试验数据对比

运行编号	出厂电容量 /pF	2009 年拆线正接线试验数据			2010 年不拆线反接线试验数据		
		C_x /pF	ΔC /%	$\text{tg}\delta$ /%	C_x /pF	ΔC /%	$\text{tg}\delta$ /%
265 CVT C_{11}	9 771	9 749	-0.22	0.09	9 781	0.10	0.11
266 CVT C_{11}	9 808	9 871	0.64	0.15	9 897	0.91	0.16
265 OYB C_{11}	6 510	6 535	0.38	0.10	6 548	0.58	0.12
265 OYC C_{11}	6 510	6 453	-0.87	0.11	6 471	-0.59	0.12
266 OYB C_{11}	6 530	6 557	0.41	0.07	6 565	0.53	0.09
266 OYC C_{11}	6 530	6 547	0.26	0.08	6 557	0.41	0.09

4 结 论

由理论分析和现场试验数据可得: 在测量 220 kV 电容式电压互感器主电容 C_{11} 介质损耗因数时, 对上瓷套下端、下瓷套上端和低电位端 δ 点用软铜线进行低压屏蔽, 就可以采用反接线低压屏蔽法进行介质损耗因数测量, 且与正接线测得数据的误差在规程允许范围之内。为了提高工作效率, 减少停电时间, 在现场工作时可以采用前面所介绍的方法。

参考文献

[1] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术 [M].

(上接第 72 页)

3.1.2 电压采样同步性测试

测控装置及电压并列装置中, 不同间隔的电压采样需同步处理, 电压采样的同步情况可通过对不同电压互感器并接升压, 在测控装置及电压并列装置上检查电压采样的角度差来确定。

3.2 装置时钟准确度校验

智能变电站对时钟的准确度要求高, 事件顺序记录的时钟误差不得大于 1 ms, 合并单元的同步精度需达到微秒级。对于事件顺序记录时钟, 由 GPS 时钟源向装置提供标准脉冲信号, 并将时钟源信号接至装置的开入端, 将装置采集的信号与时标与标准时钟的输出时间进行对比, 即可判断装置时钟误差。而对于合并单元等采样设备的时钟精度, 目前尚无测量手段, 只能通过采样同步检查确保不同采样之间的同步。

4 结 语

智能变电站具有数字化、信息化等特点。信息交互主要通过通信手段实现, 与常规变电站通过电

北京: 中国科学技术出版社, 2004.

[2] 马文磊. 电压互感器介质损耗因数测量的结果分析 [J]. 中国电机工程学会第九届青年学术会议, 2006: 739 - 742.
[3] 邢惜波. 浅谈串级式电压互感器介质损耗因数测试 [J]. 广东水利水电, 2004(5): 77 - 78.

作者简介:

麻守孝(1985), 男, 硕士研究生, 主要从事高压电气设备绝缘在线监测和故障诊断技术研究;
蒋自金(1965), 男, 高级技师, 四川省电力公司优秀技能人才, 主要从事电气试验相关工作及研究。

(收稿日期: 2012 - 09 - 01)

缆连接实现有着本质的差别, 原有的试验手段已不能满足现场试验的需要, 需要探索新的试验方法, 配置相应的试验仪器。通过对智能变电站二次系统试验技术的探讨研究, 分析智能变电站二次系统的试验流程、试验重点和难点, 为下一步开展智能变电站相关试验工作打下了基础。

参考文献

[1] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则 [S].
[2] 朱大新. 数字式变电站综合自动化系统的发展 [J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20 - 22.
[3] 宋卓. 浅谈电子式互感器的原理及比较 [J]. 广西轻工业, 2009, 2(2): 60 - 61.
[4] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61 - 65.
[5] 赵丽君, 席向东. 数字化变电站技术应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 118 - 121.
[6] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1 - 7.

作者简介:

赵子涵(1984), 男, 主要从事常规变电站和智能变电站的安装、调试等方面的工作。(收稿日期: 2012 - 10 - 31)

110 kV 变电站铁磁谐振混沌现象的追踪控制与同步

何波, 康积涛, 张花芝, 刘伟波

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于系统稳定性理论的基础上, 采用追踪控制与广义投影同步方法设计非线性反馈控制器。对 110 kV 变电站时常发生的铁磁谐振过电压混沌现象进行抑制。研究表明, 该方法能够较快地实现同结构或异结构系统之间的混沌控制与同步。

关键词: 铁磁谐振; 混沌; 追踪控制; 广义投影同步

Abstract: Based on the theory of system stability, a nonlinear feedback controller is designed using the method of tracking control and generalized projective synchronization. The controller can control the chaotic phenomena of ferro-resonance overvoltage which often occurs in 110 kV substations. The research results show that the proposed method can achieve the chaos control and synchronization in the same structure or different structure quickly.

Key words: ferro-resonance; chaos; tracking control; generalized projective synchronization

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0073-04

0 引言

在 110 kV 变电站中, 会时常发生由电压互感器引起的铁磁谐振过电压^[1,2]。系统在适当的参数下会激发混沌现象, 电压幅值升高, 严重时破坏系统绝缘, 使电网的安全运行和人身安全受到威胁, 因此抑制铁磁谐振混沌现象是一个急切需要解决的问题。近年来, 国内外的专家和学者利用非线性动力学理论^[3,4]和混沌抑制与同步方法来研究铁磁谐振过电压的混沌现象。在铁磁谐振过电压混沌抑制方面, 国内外专家和学者提出了一系列抑制措施和方法。其中文献^[5]采用 T-S 模糊方法设计的非线性控制器对铁磁谐振混沌现象进行抑制, 但方法较为复杂; 文献^[6]提出了利用常值脉冲方法来抑制混沌现象, 控制能耗大, 不能任意选择控制目标; 文献^[7]提出了利用反馈脉冲法来实现参数不匹配系统之间的混沌同步, 该方法只能实现同结构系统之间的同步, 而不能实现异结构系统之间的同步。于是, 在基于系统稳定性理论的基础上, 采用混沌控制和广义投影同步方法, 设计了合适的非线性反馈控制器, 能够实现异结构或同结构系统之间的追踪控制与同步。数值仿真表明该方法对铁磁谐振混沌现象具有较好的抑制效果, 能够快速、准确地达到控制目标, 实现混沌同步。

1 铁磁谐振过电压的混沌现象

1.1 铁磁谐振的数学模型

某 110 kV 变电站铁磁谐振过电压的单相简化电路图如图 1。 C_B 表示断路器的均压电容, C 表示 C_B 与系统母线及其他设备的对地电容之和, L 表示母线电压互感器的励磁电感, R 表示母线电压互感器的铁心损耗的等值电阻, E 为电源相电压的有效值, ω 为角频率^[8]。

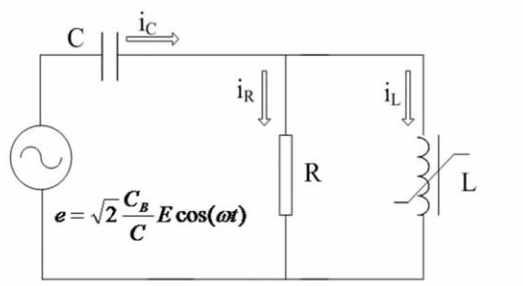


图1 铁磁谐振过电压单相简化电路图
计算中, 电压互感器的磁化特性曲线可表示为^[8]

$$i_L = f(\psi) = a\psi + b\psi^7 \quad (1)$$

其中, $a = 3.42$, $b = 0.41$ 。根据基尔霍夫定律可得到如下非线性方程组^[8]。

$$\begin{cases} \dot{\psi} = u \\ \dot{u} = -qu - \frac{(a\psi + b\psi^7)}{C} + p\cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $p = \sqrt{2}C_B\omega E/C$, $q = 1/RC$ 。

1.2 铁磁谐振的混沌分析

为了表达方便,令 $x_1 = \psi$, $x_2 = u$ 。把式(2)中所有参数转换为标么值,非线性方程组可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1x_2 \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + c_1x_2 + d_1x_1^7 + g_1\cos(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

当参数 $a_1 = 314.16$, $b_1 = -6.41$, $c_1 = -0.31$, $d_1 = -0.75$, $g_1 = 345.58$ 时,系统将出现混沌现象^[9],其电压波形及相平面图如图2、图3。所有的参数均为标么值,并将式(3)所表示的混沌系统称为系统(1)。

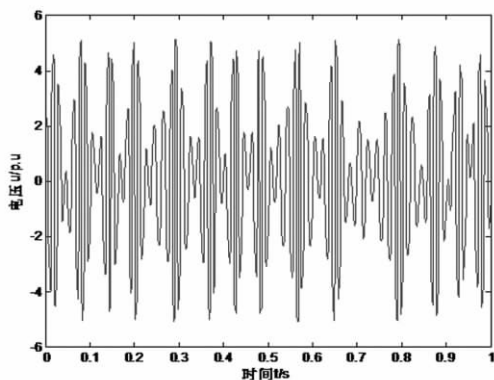


图2 系统(1)的时域电压波形

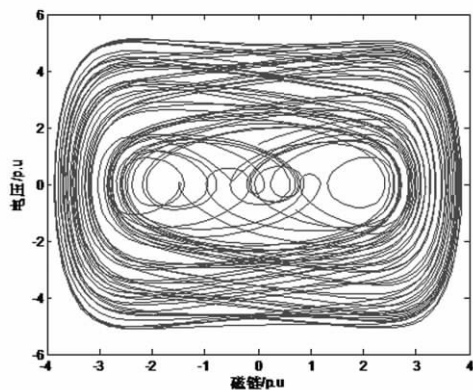


图3 系统(1)的相平面图

2 铁磁谐振混沌追踪控制与广义投影同步

2.1 理论分析

非线性混沌系统^[10,11]为

• 74 •

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x) + U(t, x, y) \\ \dot{y} = g(t, y) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $x, y \in R^n$; f, g 是 $R \times R^n \rightarrow R^n$ 的可微函数。式(4)中的第一式是响应系统,第二式是驱动系统, $U(t, x, y)$ 是控制器输入。令 $e(t) = x(t) - y(t)$, 只要误差系统满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - y(t)\| = 0 \quad (5)$$

即设计的非线性反馈控制器就能使响应系统 $x(t)$ 对驱动系统 $y(t)$ 的信号进行追踪,从而实现了响应系统的混沌控制与广义投影同步。

2.2 控制器设计分析

假设驱动系统信号为 $[y_1 \ y_2]$, 控制器 u 为 $[u_1 \ u_2]$, 故响应系统加入控制器可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1x_2 + u_1 \\ \dot{x}_2 = b_1x_1 + c_1x_2 + d_1x_1^7 + g_1\cos(\omega t) + u_2 \end{cases} \quad (6)$$

不论驱动系统的形式,均设计如下统一形式的非线性反馈控制器 u 。

$$\begin{cases} u_1 = V_1(t) + \dot{y}_1 - a_1y_2 \\ u_2 = V_2(t) + y_2 - b_1y_1 - c_1y_2 - d_1y_1^7 - g_1\cos(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

设追踪误差为 $e_1 = x_1 - y_1$, $e_2 = x_2 - y_2$, 将式(6)代入式(5)中可得到同步误差系统为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & a_1 \\ b_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

这里的 $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$ 是关于误差变量 e_1 、 e_2 函数的控制输入信号,即

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 \\ v_3 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 + a_1 \\ v_3 + b_1 & v_4 + c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可知,零解是误差系统的平衡点,只要矩阵 A 的特征值为负,就能满足式(5),即设计的控制器就能使响应系统与驱动系统同步。这里的驱动系统应该是可微的,而且是有界的。采用这种混沌追踪控制与广义投影同步的方法,就能够实现与响应系统同结构或异结构系统之间的同步,从而达到抑制混沌的目的。

3 数值仿真

3.1 同结构系统之间的追踪控制与同步

将式(11)所表示的系统作为驱动系统,称为系统(2)。可知,系统(2)与系统(1)具有相同数学模型,称为同结构系统。当参数取 $a_2 = 314.16$, $b_2 = -637.67$, $c_2 = -31.42$, $d_2 = -78.54$, $g_2 = 345.58$ 时,系统运行在正常的工作状态,其时域图、相平面图如图4、图5,电压稳定时的标么值为1,可作为驱动系统,来抑制混沌现象,将系统(1)的电压限制在合理的工作范围内。

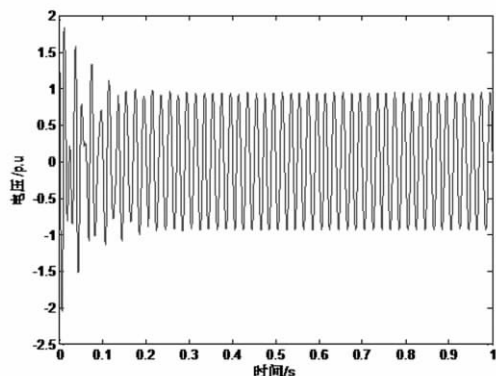


图4 系统(2)的时域电压波形

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = a_2 z_2 \\ \dot{z}_2 = b_2 z_1 + c_2 z_2 + d_2 z_1^7 + g_2 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (11)$$

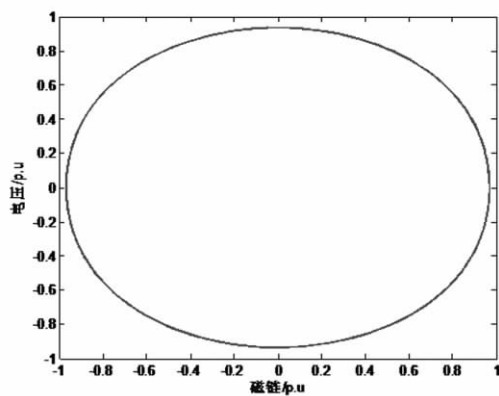


图5 系统(2)的相平面图

取驱动系统信号 $[y_1 \ y_2] = [z_1 \ z_2]$,当 $\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} -20 & -a_1 \\ -b_1 & -20 - c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

时,系统(1)运行到0.2 s时切入控制器,其波形及相平面图如图7、图8。可见,在切入控制器后,系统(1)的电压幅值迅速降低,在0.5 s时就与系统(2)实现了完全同步,抑制混沌速度快,当系统发生铁磁谐振过电压时,该控制器能有效地抑制过电压,确保系统安全运行。

3.2 异结构系统之间的追踪控制与同步

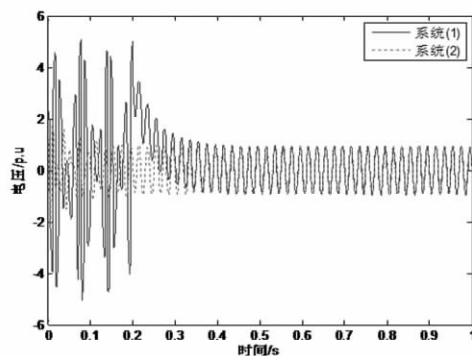


图6 混沌抑制的时域电压波形(同结构)

在铁磁谐振过电压的混沌抑制中,通常希望把混沌控制在可控的周期轨道上。故取驱动系统为 $[y_1 \ y_2] = [\sin(\omega t) \ \cos(\omega t)]$,驱动系统 $[y_1 \ y_2]$ 与响应系统互为异结构系统。当 $\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} -15 & -a_1 \\ -b_1 & -15 - c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

时,系统(1)运行到0.2 s时切入控制器 u ,其时域波形和相平面图如图9、图10。可知,所设计的非线性反馈控制器能够较快地实现异结构系统之间的追踪控制与同步,能够将铁磁谐振的混沌现象控制到稳定的周期轨道上。

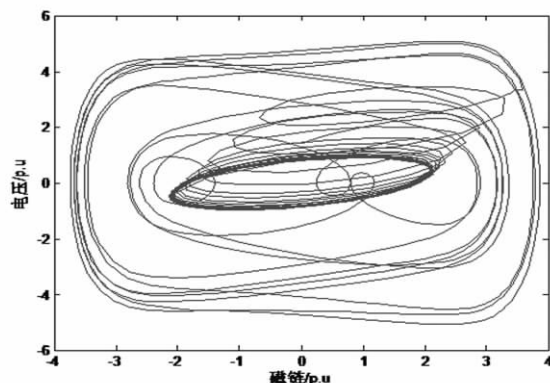


图7 混沌抑制的相平面图(同结构)

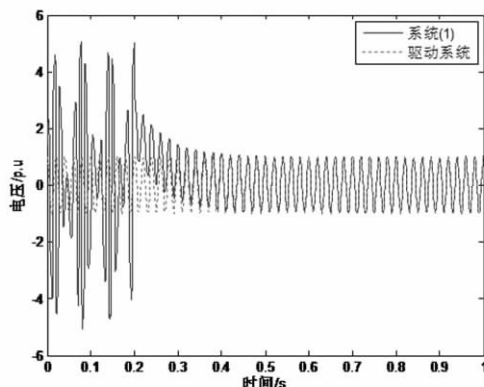


图8 混沌抑制的时域电压波形(异结构)

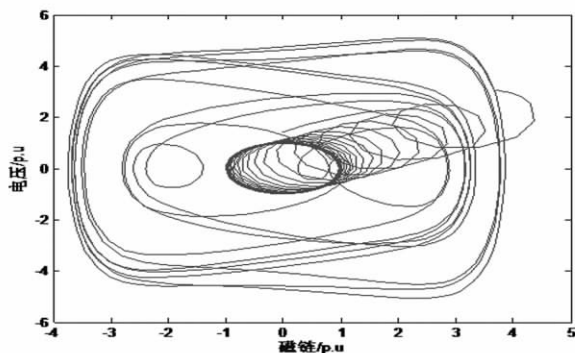


图9 混沌抑制的相平面图(异结构)

4 结 论

在基于系统稳定性理论的基础上,采用追踪控制与广义投影同步方法,设计合适的非线性反馈控制器,能够有效地实现同结构或异结构系统之间的混沌抑制与同步。数值仿真结果表明:该方法能够有效地实现铁磁谐振过电压混沌现象的抑制与同步。所设计的方法简单,易于实现,对抑制 110 kV 变电站时常发生的铁磁谐振过电压混沌现象具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] 贾红琴. 电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制 [J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 69-70.
- [2] 李云阁, 施围. 母线间电容对铁磁谐振的影响 [J]. 高压电器, 2004, 40(2): 112-114.
- [3] Z. Emin, B. A. T. Al Zahawi, D. W. Auckland, et al. Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers:

A Study Based on Nonlinear Dynamics [J]. IEEE Proceeding Online, 1997, 144(4): 383-387.

- [4] Jacobson D. A. N. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System [J]. Power Engineer Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 1206-1212.
- [5] 代姚, 司马文霞, 孙才新, 等. 应用 T-S 模糊方法对铁磁谐振过电压的混沌抑制 [J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 878-883.
- [6] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 基于常值脉冲法的铁磁谐振过电压混沌抑制 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 57-51.
- [7] 司马文霞, 郑哲人, 杨庆, 等. 用参数不匹配混沌系统的脉冲同步方法抑制铁磁谐振过电压 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 218-225, 251.
- [8] 徐勇. 电压互感器 V-I 特性对谐振影响的物理仿真 [J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 61-64.
- [9] 张博, 鲁铁成, 杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 31-35.
- [10] 蔡国梁, 黄娟娟. 超混沌 Chen 系统和超混沌 R_össler 系统的异结构同步 [J]. 物理学报, 2006, 55(8): 3997-4004.
- [11] 闵富红, 王执铨. 复杂 Dynamical 混沌系统的追踪控制与同步 [J]. 物理学报, 2008, 57(1): 31-36.

作者简介:

何波 (1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压;

康积涛 (1962), 男, 教授, 研究方向为电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2012-10-10)

(上接第 36 页)

- [1] 林海雪, 周胜军. 电气化铁路的谐波标准问题 [J]. 中国电力, 1999(9): 55-58.
- [2] 刘遵义, 杨红旗. 电气化铁路对河南电网电能质量的影响(讲义) [J].
- [3] 刘付平, 阮联生. 负序电流对电力系统的危害(讲义) [J].
- [4] 吴竞昌主编. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 铁道部第二勘测设计院. 牵引供电系统 [J].
- [6] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 电力负荷特性分类方法研究 [J]. 电力系统自动化, 2005(22): 33-38.
- [7] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法

及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64-68.

- [2] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的分类与综合 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 12-16.
- [3] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Designing Cost Effective Demand Management Contracts Using Game Theory [J]. IEEE PES Winter Meeting, New York, January, 1999.
- [4] Mural Fabrioglu, Fernando L. Alvarado. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(2): 317-322.

(收稿日期: 2012-09-25)

220 kV 电容式电压互感器 主电容介质损耗因数测试方法

麻守孝¹, 苏进胜², 张云凤³, 马守丰², 蒋自金¹

(1. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000; 2. 西宁供电公司, 青海 西宁 810001;
3. 青海省电力公司检修公司, 青海 西宁 810001)

摘要: 针对 220 kV 电容式电压互感器主电容介损测量的问题, 比较了正接线和反接线测量介质损耗因数原理上的差别, 设计了现场测量主电容介损的反接线屏蔽方法。现场实际数据验证了反接线屏蔽方法和传统的正接线方法在测量主电容介损时的差别, 证明了反接线屏蔽方法在测量主电容介损时能够保证数据精度, 并能减少人力、物力和停电时间。

关键词: 电容式电压互感器; 介质损耗因数; 正接线; 反接线; 屏蔽

Abstract: For the problems about dielectric loss measurement of main capacitance in 220 kV capacitor voltage transformer, the differences in the dielectric loss factor principles measured by positive wiring and reversed wiring are compared, and the shielding method of reversed wiring to measure dielectric loss factor of main capacitance in the field is designed. The actual data verifies the differences of the traditional positive wiring method and the shielding method of reversed wiring in measuring the dielectric loss factor of main capacitance, and it proves that the shielding method of reversed wiring could ensure the accuracy of data during measuring dielectric loss factor of main capacitance, and could reduce the manpower, material resources and power failure time.

Key words: capacitor voltage transformer; dielectric loss factor; positive wiring; reversed wiring; shielding

中图分类号: TK217 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)01-0077-04

0 概述

电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)广泛应用于工频 50 Hz 的高压和超高压中性点直接接地电力系统中, 作为电压及功率测量、继电保护和自动装置抽取电压信号。其总体上可分为电容分压器和电磁单元两大部分, 电容分压器由主电容及分压电容组成, 电磁单元由中间变压器、补偿电抗器、限压装置和阻尼器等组成, 如图 1 所示。根据电容分压器和电磁单元的组装方式, 可分为叠装式和分装式两大类, 目前国内常见电容式电压互感器大都采用叠装式结构。叠装式是电容分压器叠装在电磁单元油箱之上, 电容分压器的下节底盖有一个中压出线套管和一个低压端子出线套管, 伸入电磁单元内部将电容分压器中压端与电磁单元相连^[1]。

电容分压器采用户外式瓷套外壳, 内装经过高真空浸渍处理的若干元件串联组成的电容芯子, 元件由电容器纸和聚丙烯薄膜组成的复合介质与铝箔

卷绕而成。瓷套内灌注 12 烷基苯等绝缘油, 并装有金属膨胀器, 瓷套内的绝缘油预加了一定的油压以补偿油体积随温度的变化。220 kV 电压等级的电容式电压互感器有两个主电容 C_{11} 和 C_{12} , 电容 C_{12} 和分压电容 C_2 是装在同一个绝缘瓷套内, 分压电容器 C_2 的高压端和低压端引线分别通过瓷套由电容器底板引出, 接到电磁单元中间变压器的一次绕组高压端和二次端子接线板上的 δ 通讯端。

电容式电压互感器底部的金属箱为电磁装置, 箱体内装有中间变压器、补偿电抗器、限压装置和阻尼器等。箱体内灌注绝缘油, 油面至箱顶预留有规定的空间距离, 以补偿绝缘油体积随温度的变化。中间变压器二次绕组由电磁装置侧面的接线盒引出。阻尼器由电阻、电感、电容元件组成谐振型或速饱和型阻尼器, 长期接在辅助二次绕组两端。补偿电抗器与分压电容 C_2 组成串联谐振回路, 以消除高次谐波, 同时能抑制谐波的放大, 减小电压波形畸变; 当系统电压波动时, 不至于影响互感器电压比的变化。

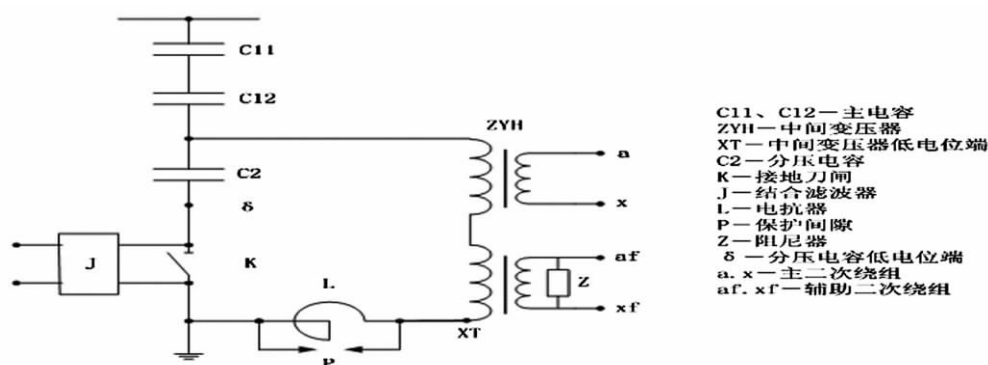


图1 CVT 电气原理图

1 电容分压器介质损耗因数测试的意义

绝缘介质在高电压作用下,都有能量损耗,这些损耗称为介质损耗。介质损耗会使绝缘材料温度上升,进而导致损耗越大,此时温升越高,如此恶性循环。如果介质温度高达使绝缘体熔化、烧焦,则会使介质失去绝缘性能而造成热击穿。电容式电压互感器发生运行事故,主要是由于生产厂家对电容芯子烘干不好留有较多水份,或元件卷制后没有及时转入压装,造成元件在空气中滞留时间过长,个别电容器由于胶圈密封不严进入水份,在卷制过程中碰破电容器纸,使绝缘中局部受潮或发生局部放电,聚积大量能量形成热击穿,从而使其内部压力不断增加而超过外瓷套的强度所造成的。因此介质损耗因数测试是电容式电压互感器绝缘监测中衡量其绝缘水平的一项重要试验项目。

另外,运行中的电容式电压互感器,当二次电压为零或在开口绕组出现电压信号时,退出运行后应首先检测主电容和分压电容的电容量及介质损耗因数,以及中间变压器的变压比或电容分压器的分压比。运行条件下 C_2 和中间变压器一次绕组电感在过电压下易于损坏,对于一次绕组的断线或短路故障,可以在用自激法测量电容分压器介质损耗因数的同时来发现故障^[2,3]。

交接验收试验和缺陷检测时,自激法测量电容式电压互感器的主电容 C_{12} 和分压电容 C_2 作为原始记录存档和故障后的分析比较有实用性。

2 介质损耗因数测量的方法

在实际现场中,西林电桥测量介质损耗因数的

接线方式主要有正接线和反接线,如图2和图3所示。

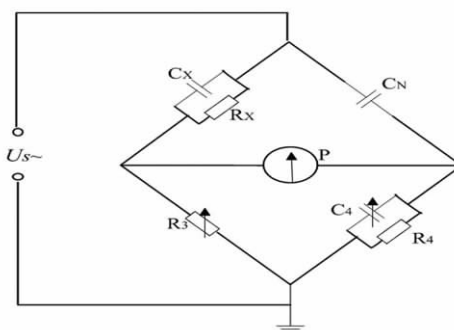


图2 正接线

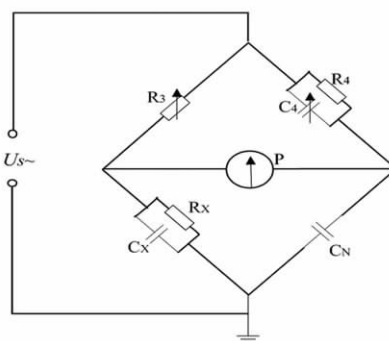


图3 反接线

2.1 正接线测量

当被测试品两端对地绝缘,高压加在试品两端,此时所测介质损耗因数为试品的实际值,由于试品在高电位,试品与大地之间的杂散电容很小可以忽略。并且,此时电桥处于低电位,试验电压不受电桥绝缘水平限制。

2.2 反接线测量

当被测试品一端牢固接地时,无法用正接线进行测量,此时可利用反接线进行测量,测量时电桥处于高电位,由于试品一端接地,非接地端与大地之间的杂散电容影响较大,此时所测值为被测试品与杂

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 两年试验数据对比

运行编号	出厂电容量 /pF	2009 年拆线正接线试验数据			2010 年不拆线反接线试验数据		
		C_x /pF	ΔC /%	$\text{tg}\delta$ /%	C_x /pF	ΔC /%	$\text{tg}\delta$ /%
265 CVT C_{11}	9 771	9 749	-0.22	0.09	9 781	0.10	0.11
266 CVT C_{11}	9 808	9 871	0.64	0.15	9 897	0.91	0.16
265 OYB C_{11}	6 510	6 535	0.38	0.10	6 548	0.58	0.12
265 OYC C_{11}	6 510	6 453	-0.87	0.11	6 471	-0.59	0.12
266 OYB C_{11}	6 530	6 557	0.41	0.07	6 565	0.53	0.09
266 OYC C_{11}	6 530	6 547	0.26	0.08	6 557	0.41	0.09

4 结 论

由理论分析和现场试验数据可得: 在测量 220 kV 电容式电压互感器主电容 C_{11} 介质损耗因数时, 对上瓷套下端、下瓷套上端和低电位端 δ 点用软铜线进行低压屏蔽, 就可以采用反接线低压屏蔽法进行介质损耗因数测量, 且与正接线测得数据的误差在规程允许范围之内。为了提高工作效率, 减少停电时间, 在现场工作时可以采用前面所介绍的方法。

参考文献

[1] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术 [M].

(上接第 72 页)

3.1.2 电压采样同步性测试

测控装置及电压并列装置中, 不同间隔的电压采样需同步处理, 电压采样的同步情况可通过对不同电压互感器并接升压, 在测控装置及电压并列装置上检查电压采样的角度差来确定。

3.2 装置时钟准确度校验

智能变电站对时钟的准确度要求高, 事件顺序记录的时钟误差不得大于 1 ms, 合并单元的同步精度需达到微秒级。对于事件顺序记录时钟, 由 GPS 时钟源向装置提供标准脉冲信号, 并将时钟源信号接至装置的开入端, 将装置采集的信号与时标与标准时钟的输出时间进行对比, 即可判断装置时钟误差。而对于合并单元等采样设备的时钟精度, 目前尚无测量手段, 只能通过采样同步检查确保不同采样之间的同步。

4 结 语

智能变电站具有数字化、信息化等特点。信息交互主要通过通信手段实现, 与常规变电站通过电

北京: 中国科学技术出版社, 2004.

[2] 马文磊. 电压互感器介质损耗因数测量的结果分析 [J]. 中国电机工程学会第九届青年学术会议, 2006: 739 - 742.
[3] 邢惜波. 浅谈串级式电压互感器介质损耗因数测试 [J]. 广东水利水电, 2004(5): 77 - 78.

作者简介:

麻守孝(1985), 男, 硕士研究生, 主要从事高压电气设备绝缘在线监测和故障诊断技术研究;
蒋自金(1965), 男, 高级技师, 四川省电力公司优秀技能人才, 主要从事电气试验相关工作及研究。

(收稿日期: 2012 - 09 - 01)

缆连接实现有着本质的差别, 原有的试验手段已不能满足现场试验的需要, 需要探索新的试验方法, 配置相应的试验仪器。通过对智能变电站二次系统试验技术的探讨研究, 分析智能变电站二次系统的试验流程、试验重点和难点, 为下一步开展智能变电站相关试验工作打下了基础。

参考文献

[1] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则 [S].
[2] 朱大新. 数字式变电站综合自动化系统的发展 [J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20 - 22.
[3] 宋卓. 浅谈电子式互感器的原理及比较 [J]. 广西轻工业, 2009, 2(2): 60 - 61.
[4] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61 - 65.
[5] 赵丽君, 席向东. 数字化变电站技术应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 118 - 121.
[6] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1 - 7.

作者简介:

赵子涵(1984), 男, 主要从事常规变电站和智能变电站的安装、调试等方面的工作。(收稿日期: 2012 - 10 - 31)

四川某 220 kV 同塔四回线路电磁环境影响 分析及其防护对策

南 方¹, 张亚军¹, 姜南希²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 电磁环境影响是制约电网建设和发展的一个重要因素。结合实际工程, 利用送电电气设计软件包, 对四川地区某 220 kV 同塔四回线路电磁环境进行研究, 分析了导线对地高度、相序布置等因素对工频电磁场和无线电干扰的影响, 并与国家环境影响评价标准相比较, 提出了减小其电磁环境影响的措施。

关键词: 电磁环境; 同塔四回线路; 影响分析

Abstract: The impact of electromagnetic environment is an important factor which restricts the construction and development of power grid. Combined with the actual transmission project and using the software package of electrical design, the electromagnetic environment of a 220 kV quadruple-circuit transmission line on the same tower in Sichuan is studied. The impacts of conductor height and the configuration of phase sequence on power-frequency electromagnetic environment and radio interference are analyzed. After compared with the national environmental impact assessment standard, the measures for reducing the impact of electromagnetic environment are proposed.

Key words: electromagnetic environment; quadruple-circuit transmission line on the same tower; impact analysis

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)01-0081-03

0 引 言

随着四川经济的高速发展, 城市电网加快改造建设, 日益匮乏的土地资源成为制约架空线路建设的主要因素, 尤其在经济发达的成都平原, 线路走廊与地方用地、城市规划的矛盾更显突出, 而同塔多回线路是提高线路走廊的输送容量, 是解决该矛盾的重要途径^[1-2]。由四川电力设计咨询有限责任公司设计的成都地区某输电线路, 因靠近城市经济中心, 部分地段线路走廊非常紧张, 拟按同塔四回线路设计。

近年来, 由于对输变电工程电磁环境影响存在误解, 担心输变电设施有“电磁辐射”, 部分居民阻挠城区输变电工程的建设, 严重影响了成都地区的电网安全运行水平。由于该同塔四回线路途经区域多为居民密集区, 因此, 该线路的电磁环境影响将直接影响其建设可行性。下面将采用送电电气设计软件包, 对该线路的工频电磁场、无线电干扰进行模拟计算, 研究讨论同塔四回线路的电磁环境影响, 并提出相关防护措施。

1 计算模型

根据本工程的沿线情况, 经综合技术经济比较, 选定本工程铁塔采用国家电网公司 110 ~ 500 kV 输电线路通用设计 2/2GT1 子模块和 2F2 子模块。典型铁塔如图 1 所示。典型导线相序排列方式见表 1。选择导线型号为 JL/G1A-630/45-45/7, 分裂间距为 600 mm, 输送电流按照经济电流运行方式(756 A)。其中, 导线对地高度按《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010), 在居民区对地最低距离为 7.5 m。模拟计算了在不同导线高度、相序布置等参数变化^[3]对电磁环境的影响。

2 电磁环境影响评价标准

输电线路在运行期间的主要环境影响因子为工频电磁场和无线电干扰。目前, 中国高压输变电工程的相关环境标准尚未制定。依据国家环保部制定的《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评

价技术规范》(HJ/T 24-1998),推荐以4 kV/m 作为居民区工频电场强度评价标准;推荐以国际辐射保护协会(IRPA)关于公众全天辐射时的工频限值100 μT 作为工频磁感应强度评价标准。

表1 典型相序排列方式

同相序	逆相序	异相序1	异相序2	异相序3	异相序4
A1 A2	A1 C2	A1 A2	A1 A2	A1 C2	A1 A2
B1 B2	B1 B2	B1 C2	B1 B2	B1 B2	B1 B2
C1 C2	C1 A2	C1 B2	C1 C2	C1 A2	C1 C2
A3 A4	A3 C4	A3 A4	A3 A4	A3 A4	A3 C4
B3 B4	B3 B4	B3 B4	B3 C4	B3 B4	B3 B4
C3 C4	C3 A4	C3 C4	C3 B4	C3 C4	C3 A4

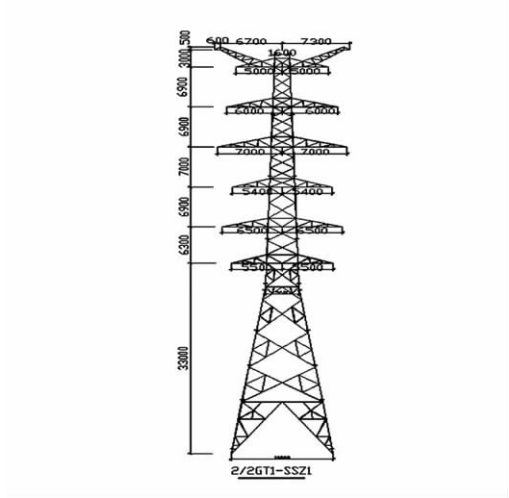


图1 典型铁塔型式

高压输电线路的无线电干扰限值执行《高压交流架空送电线无线电干扰限值》(GB 15707-1995)规定,在距线路边导线投影20 m、测试频率为0.5 MHz、好天气条件下的无线电干扰限值如表2所示。

表2 无线电干扰限值

电压等级/kV	110	220~330	500
无线电干扰限值/dB(μV·m ⁻¹)	46	53	55

3 电磁环境影响因素分析

3.1 相序影响

本线路所经区域为居民活动较为密集区,根据《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545-2010),导线最低对地高度为7.5 m。在导线高度为7.5 m 时,不同导线排列方式下,地面上方1.5 m 处的工频电场强度、工频磁感应强度和距线

路边导线投影20 m、频率为0.5 MHz、好天气条件下的无线电干扰值见表3、图2~图4。

表3 各相序电磁环境比较

相序名称	最大电场强度 /(kV·m ⁻¹)	最大磁感应强度 /μT	无线电干扰 /dB(μV·m ⁻¹)
同相序	6.694	27.9	32.81
逆相序	5.311	28.4	34.49
异相序1	6.623	26.4	32.78
异相序2	5.962	27.6	33.14
异相序3	6.568	24.1	32.64
异相序4	5.419	28.0	33.16

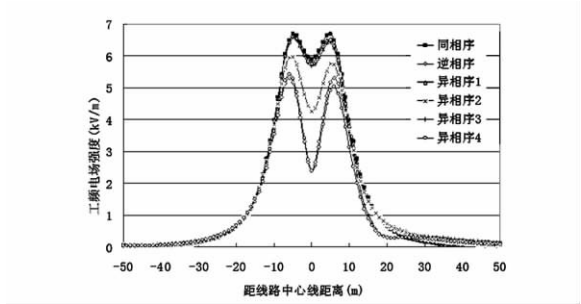


图2 各相序下工频电场强度变化趋势

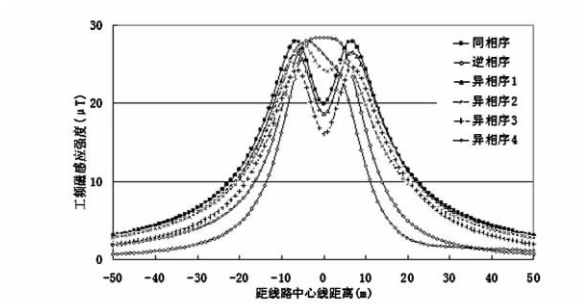


图3 各相序下工频磁感应强度变化趋势

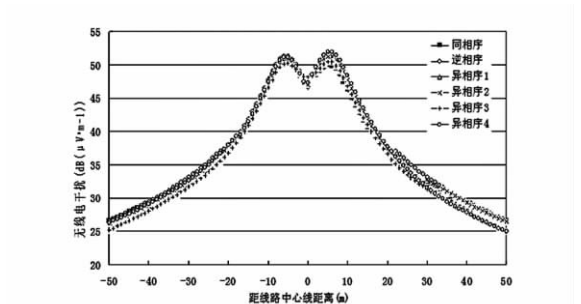


图4 各相序下无线电干扰变化趋势

从表3、图2及图3可知,导线的排列方式对电磁环境影响有较大的影响。以该同塔四回输电线路为例,导线相序布置形式对工频电场强度的影响较为明显,在同样铁塔尺寸和导线高度下,逆相序排列比同相序排列工频电场强度低26%,其余相序排列时的工频电场强度介于两者之间,因此改变相序布

置方式可减小工频电场强度。

从表3、图2及图3可知,在不同相序条件下,工频磁场强度最大值为 $28.4\text{ }\mu\text{T}$,仅占国家标准限值的28.4%,与 $100\text{ }\mu\text{T}$ 的标准限值相比仍有较大裕度。因此工频磁场不是输电线路建设的电磁环境制约因素。

从图4可知,在各种相序条件下,距线路边导线投影 20 m 、频率为 0.5 MHz 、好天气条件下的无线电干扰值最大为 $34.49\text{ dB}(\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$,小于国家标准限值 $53\text{ dB}(\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$,且不同导线相序布置对无线电干扰影响不大,因此无线电干扰不是输电线路建设的电磁环境制约因素。

3.2 导线对地高度影响

导线对地高度对各相序电磁环境的影响如图5~图7所示。

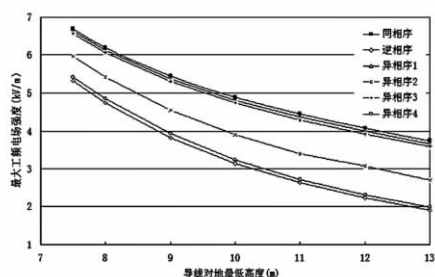


图5 导线对地高度对最大工频电场强度的影响

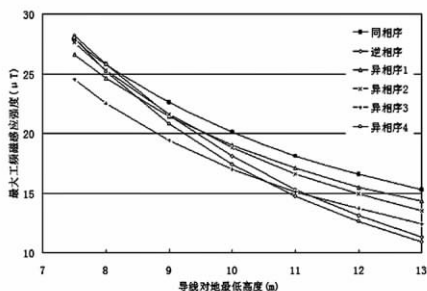


图6 导线对地高度对最大工频磁感应强度的影响

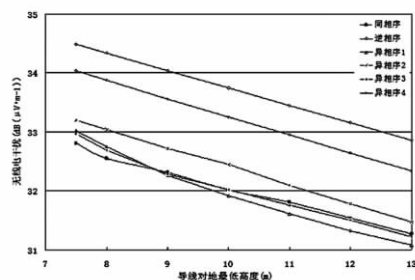


图7 导线对地高度对无线电干扰的影响

从图5可以看出,随着导线对地高度的提升,输电线路产生的工频电场强度逐渐减小。导线采用同相序排列时,导线从 7.5 m 分别提高到 8 m 、 10

m 、 12 m ,工频电场强度分别减小了 7.5% 、 27.2% 、 39.2% ,为满足 4 kV/m 的工频电场强度的评价标准,需将导线对地最低高度提升到 12.5 m 。导线采用逆相序排列时,导线从 7.5 m 分别提高到 8 m 、 10 m 、 12 m ,工频电场强度分别减小了 10.8% 、 41% 、 58.1% ,为满足 4 kV/m 的工频电场强度的评价标准,只需将导线对地最低高度提升到 9 m 。因此,通过抬高导线对地高度,可以有效减小工频电场强度,但是导线越高,建设成本越大,且当导线增至一定高度时,再靠抬高导线高度减小电场强度,效果不明显,经济投入将增大。因此减小同塔四回线路工频电场强度,可通过提升导线高度,改变相序排列来配合使用,达到技术、经济的最佳效果。

从图6可以看出,随着导线对地高度的提升,该同塔四回线路产生的工频磁感应强度呈变小趋势。导线从 7.5 m 分别提高到 8 m 、 10 m 、 12 m ,工频磁感应强度分别减小约 8% 、 28% 、 41% ,在各种情况下,工频磁感应强度的最大值与 $100\text{ }\mu\text{T}$ 的标准限值相比仍有较大裕度。

从图7可以看出,随着导线对地高度的提升,线路边导线投影 20 m 、频率为 0.5 MHz 、好天气条件下的无线电干扰值呈变小趋势。导线对地最低高度从 7.5 m 提升至 13 m 时,线路边导线投影 20 m 、频率为 0.5 MHz 、好天气条件下的无线电干扰值减小 $1.4\sim 1.9\text{ dB}(\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$ 。在各种排列方式下,该同塔四回线路产生的无线电干扰均远小于相应的评价标准限值。

4 结 论

(1) 不同相序排列方式对同塔四回线路的工频电场强度有较大影响。

(2) 工频磁感应强度、无线电干扰不是影响同塔四回线路设计的主要因素。

(3) 在同样铁塔尺寸和高度下,逆相序排列比同相序排列工频电场强度低 26% ,采用逆相序排列方式是减小同塔四回线路电磁环境影响的有效途径。

(4) 同塔四回线路设计中,可通过抬高铁塔高度、改变相序排列方式,实现工程技术、经济的合理性。

(下转第94页)

系曲线是一个模型试验数据,与实际存在较大差别,当功率反馈切至开度反馈模式时,即使有功给定保持不变,由于转换成开度给定值存在误差,造成了机组实际有功功率输出值发生较大的波动。

在开度反馈方式下,当时水头为 167.43 m,外部功给为 546.21 MW,经协联曲线计算后的开度给定为 79.76%,远比当时功率反馈下的实际开度 68.13% 大,由于导叶开限为 79.34%,因此切换为开度反馈方式后,调速器导叶开度由 68.13% 上升至导叶开限 79.34% 为止,造成了 5 号机组负荷异常上升。

2.5 分析结论

综合以上分析,可以得出 5 号机调速器在电网异常时负荷异常上升的原因如下。

(1) 电网冲击对 5 号机调速器残压测频元件造成影响,导致残压频率突变,频率差超过 0.5 Hz 引起调速器反馈方式由功率反馈切换为开度反馈。

(2) 调速器切换为开度反馈方式后,其功率给定值需转换为当前水头下开度/功率协联曲线模型对应的开度给定值,大于切换前的实际开度,从而导致负荷异常上升。

3 处理措施

分析电网冲击造成调速器负荷异常上升的原因,主要有:①电网冲击的影响,电网发生线路跳闸、雷电干扰等各种冲击因素无法消除,其影响不可避免。②机组调速器全水头开度/功率协联曲线模型数据不准确,由于该模型数据是试验数据,且水轮机出力、水头、导叶开度是一个非常复杂的非线性关系,无法得到准确的定量数据模型,因此校核开度/功率协联曲线模型具有很大的难度,操作性不强。根据实际经验,专业人员采取了切实可行的措施,主

要有以下 3 点。

(1) 完善调速器功率反馈切开度反馈逻辑:当机组频率偏差超过 0.5 Hz 且持续一段时间,方可切换为开度反馈模式。当增加延时判断条件后,就避免了电网冲击造成测频回路瞬时突变对调速器的干扰,增加了调速器稳定可靠性。

(2) 加强监视、勤调整导叶开限。特别在高水头下,调整导叶开限略大于机组额定功率对应的导叶开度,防止调速器负荷异常上升造成机组超出力运行的异常状况。

(3) 对 5 号机调速器残压测频板件及通道进行校验,检查残压测频抗干扰性并更换测频板件。

采取以上措施后,电网多次发生线路跳闸、重合闸动作、电压波动等异常,二滩电厂水轮机调速器未再发生负荷异常上升事件。实际运行表明,针对调速器负荷异常上升采取的措施简单可行,有效地避免电网冲击对水轮机调速器的影响。

参考文献

- [1] 魏守平. 现代水轮机调节技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 陈飞翔, 蒲瑜. 二滩水电厂调速器负荷波动分析与对策 [J]. 水电站机电技术, 2005, 28(1): 5-6.
- [3] 吴建荣, 王秀梅. 二滩水电站 5 号机组负荷波动原因分析及处理 [J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 22-23, 67.
- [4] 魏守平, 王雅军, 罗萍. 数字式水轮机调速器的功率调节 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(4): 20-22.

作者简介:

唐杰阳(1981), 男, 主要从事流域水电站运行管理工作。

(收稿日期: 2012-10-09)

(上接第 83 页)

参考文献

- [1] 邬雄, 丁燕生. 我国 500 kV 电网的电磁环境状况和策略 [J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2408-2411.
- [2] 《输变电设施的电磁、磁场及其环境影响》编写组. 输变电设施的电磁、磁场及其环境影响 [M]. 北京: 中国

电力出版社, 2007: 99-109.

- [3] 王广周, 张嵩阳, 闫东, 等. 500 kV 超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策 [J]. 高压电器, 2010, 46(8): 93-100.
- [4] 谢连科. 110 kV 同塔双回交流输电线路工频电磁场分布规律研究 [J]. 山东电力技术, 2009(4): 3-5.

(收稿日期: 2012-10-09)

有源电力滤波器的 Matlab 仿真

高 勇

(四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电力谐波带来了严重的危害,有源滤波器是抑制电力谐波的一种有效手段。在 Matlab 仿真环境中搭建了有源滤波器的系统模型,并对其进行了仿真。仿真结果表明,各仿真模块能够完成各自的功能,整个系统的滤波效果非常好。因而,该仿真模型能对软、硬件的设计起到重要的指导作用。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波抑制; Matlab 仿真

Abstract: Power harmonic brings the serious harms, while the active filter is an effective means to eliminate the harmonic. A system model of active power filter (APF) is established in Matlab simulation environment and the simulation is carried out under the given parameter. The simulation results show that each simulation module can perform its function and the filtering effect of the overall system is very good. Thus, the simulation model has a significant guidance for the software and hardware design of APF system.

Key words: active power filter (APF); harmonic suppression; Matlab simulation

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0084-03

0 引言

自20世纪70年代以来,由于电力电子技术及半导体技术的飞速发展,使得各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中得到了越来越广泛的应用,然而,由谐波所造成的危害也越来越严重了。由于谐波的存在,不仅会使得电能在生产、传输和利用过程中的效率降低,而且还会导致电气设备的使用寿命因过热、产生振动和噪声、绝缘老化而缩短,甚至还可能引起电气设备故障或烧毁^[1]。同时,谐波的存在也常常会引起继电保护和自动装置的误动作而引起电能计量出现混乱^[2]。在电力系统外部,谐波对通信设备和电子设备也会产生严重的干扰。因此,谐波问题受到了世界各国的普遍关注,谐波的治理成为了一大研究热点。目前,对于谐波的治理主要有采用无源滤波装置和有源滤波器(active power filter, APF)。有源电力滤波器的滤波效果非常好,在其额定的无功功率范围内,可以实现完全滤波。然而,有源电力滤波器是一个复杂非线性的控制系统,要对其进行精确地理论分析是比较困难的,所以通过用模拟仿真实验的方式来验证控制系统就显得非常必要^[3,4-7]。

在 Matlab 中有许多实用的工具箱,如控制系统

工具箱、滤波器设计工具箱、通信工具箱等。Simulink 是基于 Matlab 的框图设计环境,可以用来对各种动态系统进行建模、分析和仿真,而且 Simulink 还提供了丰富的功能块以及不同的专业模块集合^[8]。因此,这里拟采用利用 Matlab 对有源电力滤波器进行动态的系统仿真。

1 Matlab 仿真简介

Matlab 及其 Simulink 环境下的仿真平台在控制系统仿真中应用很普遍,仿真环境界面简单。

Simulink 是一个能对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包。它支持线性和非线性系统连续和离散时间模型,或者是两者混合的模型,可方便迅速地建立起各种非线性或线性的模型。Simulink 模型不仅能让用户知道具体的环节动态细节,随时观察仿真过程中系统各处的动态变化,而且能清晰地了解各器件、各系统间的信息交换,掌握各部分之间的交互影响^[3,5-7]。

2 谐波计算仿真模型

要对谐波进行计算,则设计了谐波计算仿真模型、三相/两相的转换模型和两相/三相的转换模型。

谐波检测模型采用 $i_p - i_q$ 方式算法。如图1所示,非线性负载电流 i_a, i_b, i_c 经过 $3/2$ 变换、 C 运算后得到有功电流 i_p 和无功电流 i_q ; 经低通滤波器滤波得到其直流分量, 然后进行 C 反变换、 $2/3$ 变换得到基波电流, 然后负载电流与基波电流相减后便得到谐波电流分量。

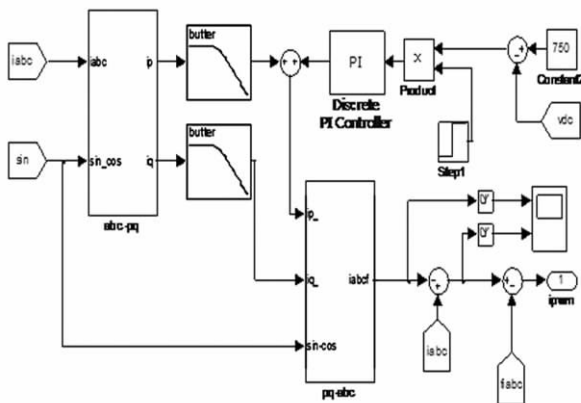


图1 谐波计算模型

在该运算方式中,需要与A相电网电压同相位的正弦信号 $\sin\omega t$ 和余弦信号 $\cos\omega t$,在仿真模型的建立中,用锁相环和正余弦信号发生电路模型产生,如图2所示。

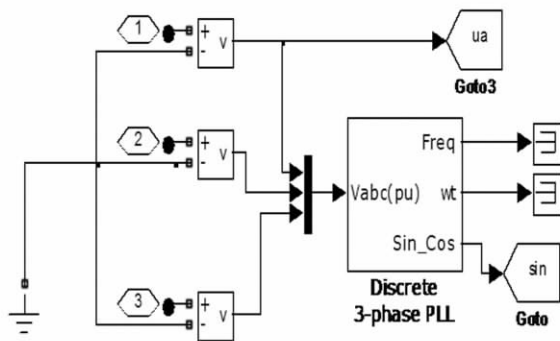


图2 PLL与正余弦信号发生模型

图3为三相负载电流经过 $C_{32}C$ 变换后得到两相有功电流和无功电流的过程,其中模型中的 $\sin - \cos$ 为与A相电压同相位的正、余弦信号。

在 $i_p - i_q$ 方式算法来进行谐波电流检测时,有一个低通滤波环节,用于从有功和无功电流中检出其直流分量。低通滤波算法的性能直接决定着谐波检测的精确性和动态跟踪速度,影响着有源电力滤波器谐波补偿的性能。设计的基本原则是:应保证对直流分量的增益为1,并尽可能衰减交流分量。目前常用的滤波器形式有FIR滤波器(非递归模型)和IIR滤波器(递归模型)。FIR滤波器的优点是可以精确到线性相位,但维数一般很高,而IIR滤

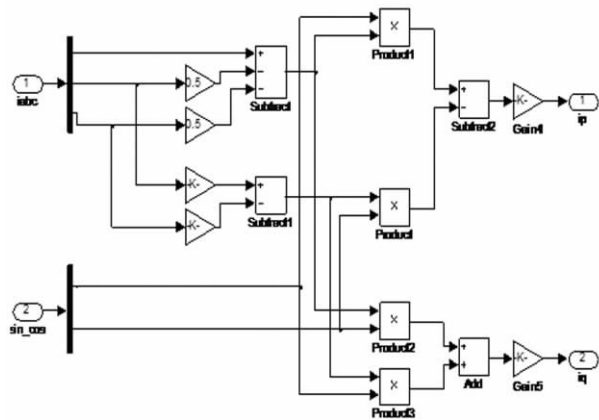


图3 三相/两相转换模型

波器在维数不需要很高的情况下就能满足一定的指标。这里选用的是2阶ButterWorth滤波器,在低频段,该滤波器具有较好的检测精确性。

两相/三相变换的仿真模型如图4所示,有功和无功电流的直流分量经过 $C^{-1}C_{23}$ 变换后,输出三相负载电流的基波分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 。

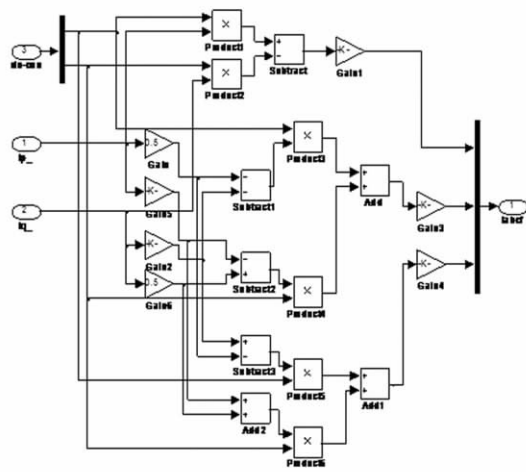


图4 两相/三相转换模型

3 PWM信号控制主电路仿真模型

有源电力滤波器的主电路由逆变器组成,主要用于在特定PWM脉冲的控制下补偿交流电网存在的谐波电流^[8]。PWM信号产生及控制变流器的仿真模型如图5所示,该模型的输入电流为 i_{pwm} ,它是谐波电流与逆变器输出电流的差值,通过滞环比较来控制逆变器开关器件的通断,从而产生补偿谐波电流。

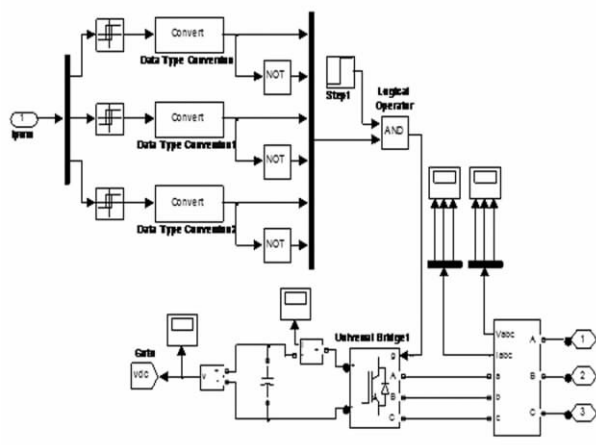


图5 PWM 信号控制模型

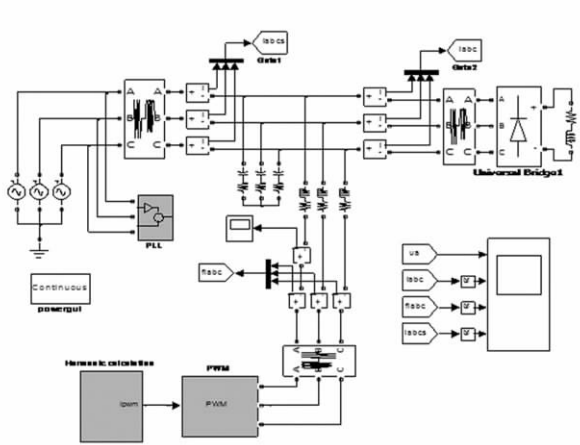


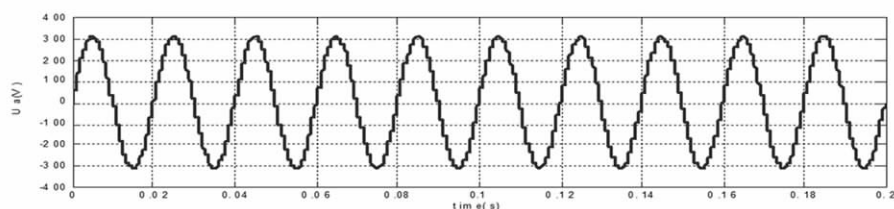
图6 APF 系统模型

该仿真模型主要包括了谐波源产生电路、谐波计算模块、PWM 信号产生并控制变流器产生补偿电流的模块。

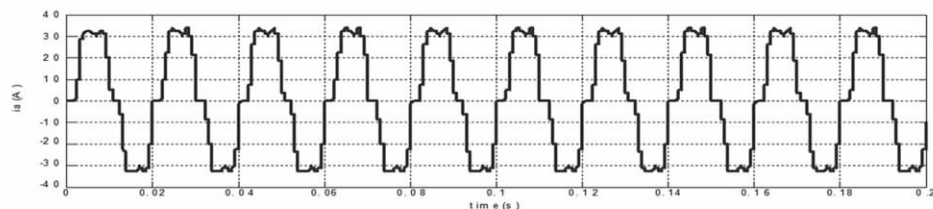
4 系统仿真模型及参数设置

(1) 系统仿真模型

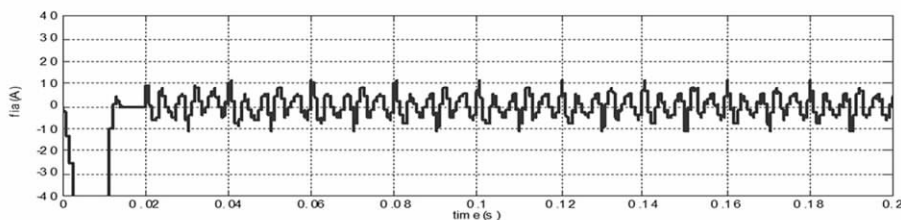
(2) 参数设置



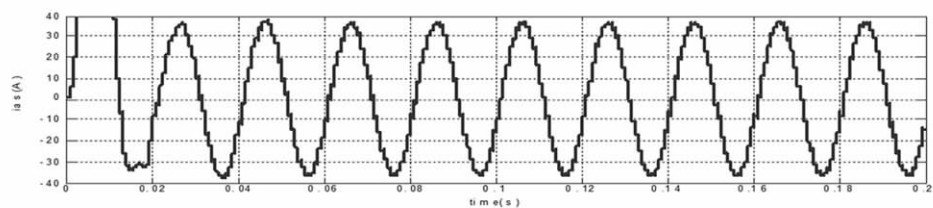
(a) A 相电压波形



(b) A 相负载电流波形



(c) 谐波补偿电流波形



(d) 补偿后的系统电流波形

图7 APF 系统的仿真波形

(下转第91页)

的控制,对主喷口的流场变化不敏感;

3) 旋风微油煤粉燃烧器与原燃烧器在喷口处的速度略有不同,更有利于延长煤粉的停留时间,有利于着火。

4) 旋风微油煤粉燃烧器在华电珙县电厂 2×600 MW 超临界机组 W 炉上得到应用,作为节油点火燃烧器使用时节油效果显著,作为正常燃烧器使用时性能与原双旋风煤粉燃烧器一致。

参考文献

[1] 黄志强,王军. 双旋风筒煤粉浓缩型燃烧器特性试验

(上接第86页)

采用相电压为 220 V,频率为 50 Hz 的三相对称系统。为了使有源电力滤波器在工作时有一个较好的补偿效果和较快的反应速度,变流器直流侧的电压要超过其线电压的 2 倍以上^[8],这里控制直流侧的电压选择为 750 V。

选定的电容值为 $2\,000\ \mu\text{F}$,输出电感值为 2 mH。

5 仿真结果与分析

仿真结果如图 7(a)、(b)、(c)、(d) 所示。

由仿真波形可以看出,原来由于非线性负荷所造成的电流波形发生严重的畸变,在接入 APF 进行谐波电流补偿以后,该系统电流的波形基本上为一个正弦波形,从而达到了滤波效果。通过进行 FFT 频谱分析之后,得到谐波含量和总谐波畸变率:总谐波畸变率在补偿前达到了近 18.5%,补偿之后不到 2.1%;各次谐波的补偿率均达到了 90% 以上。由此可见该仿真滤波器系统基本上实现了谐波补偿的功能。

6 结 论

根据有源滤波器系统结构的组成,搭建了基于 Matlab-Simulink 仿真环境下的系统模型,并对各个模块分别给予仿真结果以及结论分析。通过仿真结

果可以发现,各仿真模块能够完成模块的功能,整个系统能够完成滤波任务。

参考文献

- [1] 张永刚,陈海啸. 谐波危害及治理探讨 [J]. 技术与市场,2012,19(3): 73.
- [2] 曹璐,王富生. 浅谈谐波对电能表计量的影响 [J]. 科技向导,2012(3): 338.
- [3] 年珩,全宇. 谐波电网电压下 PWM 整流器增强运行控制技术 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(9): 41-49.
- [4] 苏奎峰,吕强,耿庆锋,等. TMS320F2812 原理与开发 [M]. 北京: 电子工业出版社,2005.
- [5] 王亮,赵玲. 电力有源滤波器的 Matlab 仿真 [J]. 上海电力学院学报,2005,21(1): 21-26.
- [6] 王忠礼,段慧达,高玉峰. MATLAB 应用技术: 在电气工程与自动化专业中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社,2007.
- [7] 刘海峰,陈梅. 基于 MATLAB 的电力有源滤波器(APF)的仿真 [J]. 电气开关,2006,44(4): 35-37.
- [8] 吴春芳,程汉湘,朱约章,等. 并联型有源电力滤波器的 MATLAB 仿真研究 [J]. 节能技术,2005,23(2): 118-121.
- [9] 陈庆国,赵春明. 三相四线制并联型电力有源滤波器的算法和参数仿真 [J]. 电机与控制学报,2009,13(1): 20-24.

作者简介:

高勇(1978),男,主要从事电力调度自动化及电力信息化研究。
(收稿日期:2012-08-11)

W 炉旋风微油煤粉燃烧器的数值模拟研究与应用

蒲学森¹, 肖宏博², 钱 锋¹, 谢明均², 赵兴华², 金 黄¹

(1. 深圳东方锅炉控制有限公司, 广东 深圳 518057; 2. 四川华电珙县发电有限公司, 四川 珙县 644500)

摘 要: 针对采用双旋风煤粉燃烧器的 W 型火焰锅炉, 为降低锅炉启动和稳燃油耗, 提出采用微油油枪点火的旋风微油煤粉燃烧器。通过数值计算方法分析其用作锅炉正常运行主燃烧器使用时的性能, 得到喷口外的流场分布, 分析与原双旋风煤粉燃烧器的差异。旋风微油煤粉燃烧器在四川华电珙县电厂 2×600 MW 超临界机组上的应用验证了其性能与原双旋风煤粉燃烧器基本一致。

关键词: W 型火焰锅炉; 燃烧器; 节油点火

Abstract: Aiming at W flame boiler with the double vortex pulverized coal burner, the vortex pulverized coal burner with tiny-oil ignition is proposed and adopted in order to reduce the oil consumption of start-up and steady burning of boiler. Through the numerical calculation method, the performances of main burner used during the normal operation of the boiler are analyzed, the flow field distribution outside the nozzle is obtained, and the differences between the proposed burner and the original double cyclone burner are analyzed. The application of vortex pulverized coal burner with tiny-oil ignition to 2×600 MW supercritical unit in Sichuan Gongxian Power Plant of China Huadian Corporation validates that its performances are in accordance with the original double cyclone pulverized coal burner.

Key words: W flame boiler; burner; oil-saving ignition

中图分类号: TK223.23 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0087-05

0 前 言

近年来随着燃油供应日益紧张及油价不断上涨, 为降低火力发电厂煤粉锅炉在基建调试、启动和低负荷稳燃油耗, 微油点火技术在 $150 \sim 1\,000$ MW 级四角切圆燃烧锅炉和前后墙对冲燃烧锅炉上已得到了广泛的应用。而对 W 型火焰锅炉, 由于其燃用较难点燃的无烟煤、空间结构紧凑、燃烧方式特殊, 采用节油燃烧技术的应用较为困难。

现有一些针对 W 型火焰锅炉提出的节油燃烧器方案, 由于对燃烧器改动较大, 因而带来对锅炉正常运行时性能影响尚不明确。针对采用双旋风煤粉燃烧器的 W 型火焰锅炉, 提出了一种旋风微油煤粉燃烧器, 利用微油点火降低锅炉启动和低负荷稳燃的油耗, 重点关注其作为正常燃烧器运行时与原双旋风煤粉燃烧器的性能对比。

1 双旋风煤粉燃烧器

针对无烟煤难着火的特点, 双旋风煤粉燃烧器

利用旋风分离将煤粉浓缩, 煤粉气流经过均分器, 切向进入燃烧器两个旋风筒。在离心力作用下, 煤粉颗粒被甩向外周, 一部分含粉较少的乏气在燃烧器中心部分被引出后, 通过乏气管, 在拱上的靠近炉膛中心的部位送入炉内高温区域。从燃烧器喷口下射的主煤粉气流由于风量的减少, 风粉比降低, 提高了燃烧器主喷口煤粉浓度^[1]。燃烧器主喷口装有消旋叶片, 可以使燃烧器煤粉气流旋流减小, 增大其刚性。燃烧器的主喷口和乏气喷口均设有环形二次风。拱上每只燃烧器还设有两个二次风开口, 其中一个插入大油枪和点火枪。下炉膛水冷壁区域有 D 挡板控制的一层二次风和 F 挡板分别控制的两层二次风。

2 旋风微油煤粉燃烧器的技术原理

旋风微油煤粉燃烧器将旋风分离技术和微油点火技术结合, 保持了原有的旋风分离, 在煤粉主喷口直段内部设分级煤粉燃烧室, 带有独立配风的微油油枪从燃烧器乏气弯头轴向插入至一级煤粉燃烧室

入口。其关键在于在燃烧器旋风筒内的消旋浓缩装置,将煤粉从旋风筒边壁区域浓缩至中心一级燃烧室。煤粉在一级燃烧室内被高温微油火焰点燃,在燃烧器喷口处即形成较为稳定的煤粉火焰。保留原有的大油枪,保持燃烧器喷口的位置和大小不变,保持原有的风量配比风速和燃烧组织不变。图1为旋风微油煤粉燃烧器结构示意图(单喷口)。

3 旋风微油煤粉燃烧器性能分析

3.1 燃烧器喷口消旋效果对比

采用 FLUENT 流体计算软件,对旋风微油煤粉燃烧器内部空气流场进行了分析。几何模型选取从煤粉均分器出口到燃烧器主喷口和乏气喷口的范围。根据王海刚等人^[4]的研究,标准 $k-\varepsilon$ 模型在计算旋风分离时有明显缺陷,RNG $k-\varepsilon$ 模型仍然是基于涡粘性假设同样不适用于旋风分离计算。RSM 湍流模型的计算精度较高^[5],因此采用 RSM 模型模拟旋风分离器内部的气流湍流流动。

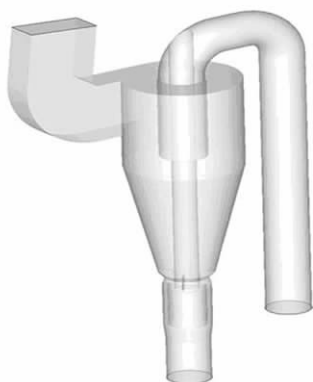


图1 旋风微油煤粉燃烧器结构示意图

图2和图3分别为原燃烧器与旋风微油煤粉燃烧器主喷口切向速度分布计算结果。原燃烧器主喷口由于消旋叶片的作用,明显分为3个区域。但由于消旋叶片位置位于燃烧器喷口附近,喷口靠近外圈部分区域切向速度较大,最高达16 m/s。而旋风微油燃烧器的消旋效果较好,切向速度分布均匀,最高切向速度仅为6~8 m/s。

上述结果表明旋风微油煤粉燃烧器的消旋效果显著。

3.2 风量分配和阻力

通过对原双旋风煤粉燃烧器和旋风微油煤粉燃烧器的风量计算结果对比,原燃烧器乏气比例约占

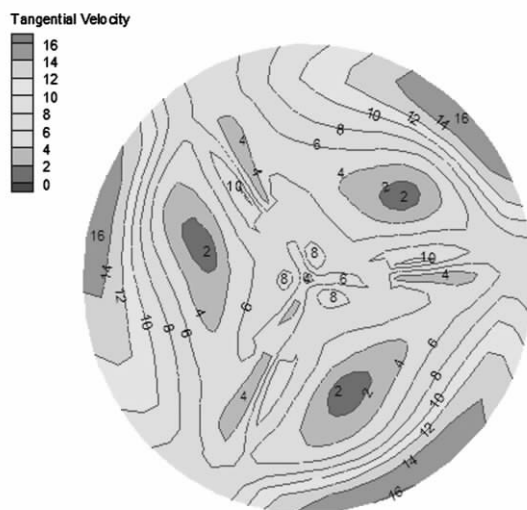


图2 原燃烧器主喷口切向速度分布

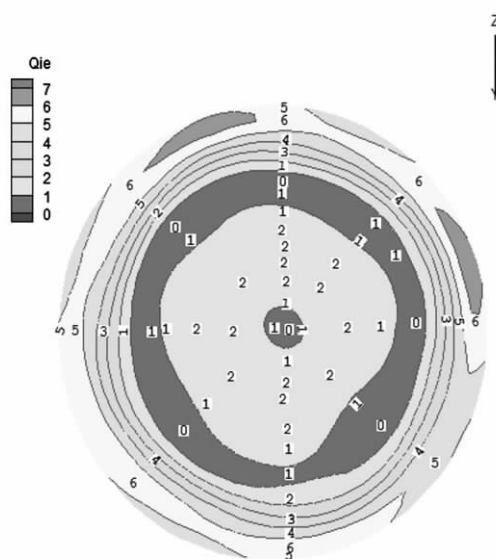


图3 旋风微油燃烧器主喷口切向速度分布

33% (假设乏气风门全开),与张杰等人^[6]的试验结果较接近。旋风微油煤粉燃烧器乏气比例约为34%~42%,根据内部消旋浓缩装置结构变化有所差异。

在相同条件下旋风微油煤粉燃烧器的阻力增大,约100 Pa,相对原燃烧器设计阻力变化不大。

3.3 燃烧器外流场计算结果

为研究旋风微油煤粉燃烧器的应用对炉膛内流场产生的影响,对单组喷口(含乏气喷口和环形二次风喷口)的外流场进行建模分析,不考虑炉膛形状、烟气回流以及其他配风的影响。模型计算域如图4所示。计算域形状为长圆柱体,宽度为1.2 m (Z 轴,沿炉膛长度方向),长度为3.2 m (X 轴,沿炉膛宽度方向),为避免压力出口条件对喷口外区域

流场的影响,计算域高度为 11 m(Y 轴,炉膛高度方向)。

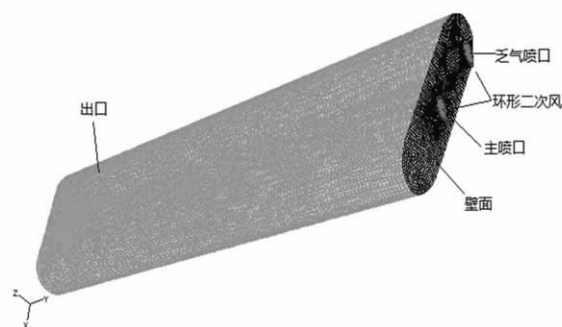


图4 燃烧器外流场计算域示意图

计算网格划分为结构体网格,对靠近主、乏气喷口的区域局部加密。壁面及各喷口的形状考虑了炉拱的实际角度。分别对原燃烧器及旋风微油煤粉燃烧器的内流场进行计算,将主喷口与乏气喷口的结果作为输入条件,考察燃烧器外流场的分布。

对原燃烧器喷口外流场的计算结果显示,主喷口和乏气喷口受到环形二次风的射流影响,速度逐渐增大,在发展到一定程度后再衰减。主喷口、乏气喷口及其相应的环形二次风的两股射流相对独立。图5为 $Z=0$ 截面上的轴向速度分布。在距主喷口 5.5 m 处,两股射流已基本融合。

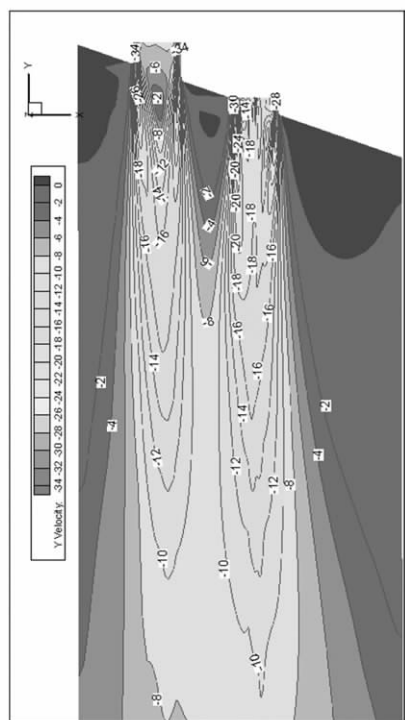


图5 原燃烧器外 $Z=0$ 平面轴向速度

旋风微油煤粉燃烧器做主燃烧器的喷口外流场的计算结果表明,对于主喷口和乏气喷口出口速度

分布,起主要作用的同样为环形二次风的射流。在二次风出口处,气流速度较高,进入计算域一定深度后发生衰减。图6为旋风微油煤粉燃烧器 $Z=0$ 截面上的轴向速度分布,与原燃烧器流场近似。

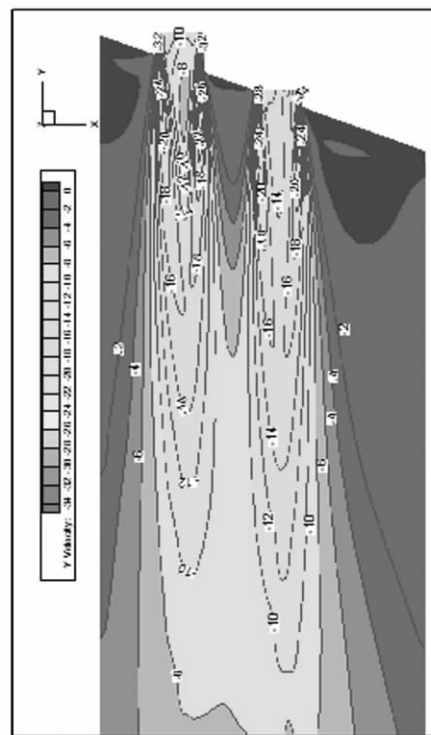


图6 旋风微油煤粉燃烧器 $Z=0$ 截面轴向速度分布

3.4 燃烧器外流场分析

图7为原燃烧器和微油煤粉燃烧器外流场不同高度截面上 $Z=0$ 中心线的轴向速度分布。尽管乏气比例有所差异,乏气喷口外的速度场基本保持一致。这是由于环形二次风的动量较大,是影响流场的主要因素。同样,主喷口外的流场也主要受环形二次风的影响。在喷口 2.5 m 外,轴向速度分布几乎一致。

在主喷口附近,原燃烧器轴向速度呈 V 型分布,即主喷口中间速度高外围速度低,而旋风微油煤粉燃烧器呈 A 型分布,与之相反。这种差异在主喷口外 2 m 内都有所体现。从图7中可以明显看出燃烧器主喷口外 1.5 m 的范围内,旋风微油煤粉燃烧器的速度更低,表明煤粉在此区间的停留时间较长。

由于环形二次风的风速远高于一次风,因此喷口外中心线的速度先是在环形二次风的带动下逐渐升高,在二者风速达到一致后,随着射流的衰减逐渐减小。因此可以认为中心线上风速出现下降时环二次风与一次风完成混合。

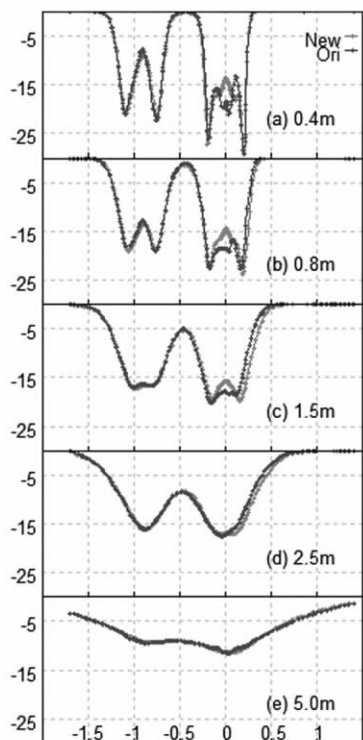


图7 距燃烧器喷口不同高度截面上
 $Z=0$ 中心线轴向速度

从图8可以看出混合距离的具体变化。在距原燃烧器主喷口0.5 m处轴向速度达到最大,这是由一次风本身在消旋叶片的影响下产生的变化,而在距主喷口1.5 m处,环形二次风与一次风即完成混合。在旋风微油煤粉燃烧结构中,该距离推迟到距喷口2.5 m外。在环形二次风保证喷口整体下冲动能不受影响的情况下,局部较低的速度有利于延长煤粉的停留时间,和环形二次风混合时间延迟有助于减小煤粉着火所需的着火热,从而更易于着火和燃烧。

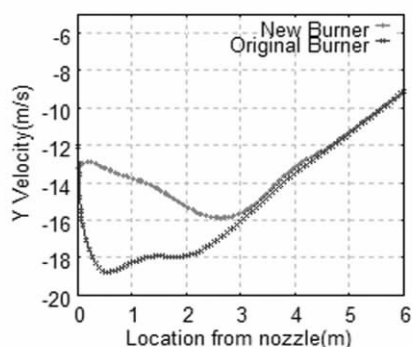


图8 主喷口外 $Z=0$ 中心线上轴向速度

图9为原燃烧器与微油煤粉燃烧器主喷口外中心线上的切向速度。旋风微油煤粉燃烧器采用固定式的消旋叶片能够在燃烧器外中心线上大幅消除旋

流。随着下冲深度的增加,在环形二次风射流的作用下,两种燃烧器的旋流均逐渐被消除。

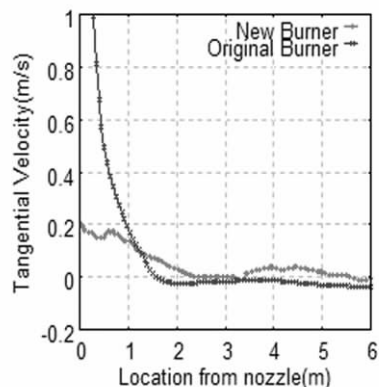


图9 主喷口外 $Z=0$ 中心线切向速度

4 旋风微油煤粉燃烧器的应用情况

四川华电珙县电厂 2×600 MW 新建机组的锅炉采用东方锅炉股份有限公司生产的配600 MW 机组的超临界 W 型火焰燃烧、垂直管圈水冷壁变压直流锅炉。单炉膛露天岛式布置,燃用无烟煤。锅炉配备6台双进双出钢球磨煤机并采用了动态分离器,每台磨煤机对应4只燃烧器,总共24只煤粉燃烧器。为减少机组在基建调试期间油耗,将其中B、E两台磨煤机对应的煤粉燃烧器改为旋风微油煤粉燃烧器,在机组调试期间节油效果显著,节油率达到36%。

1号炉在通过168 h试运行后进行了燃烧优化,锅炉运行情况良好。占燃烧器总数量三分之一的旋风微油煤粉燃烧器作为正常燃烧器使用时与原旋风煤粉燃烧器性能基本一致。根据燃烧优化其中的24个试验工况的统计,平均排烟温度与设计值相当;飞灰可燃物含量在2.5%~5.0%之间;锅炉效率能达到设计保证值; NO_x 排放量小于700 mg/ Nm^3 ,明显低于国内已投运的同类型锅炉排放量^[4]。

5 结 论

介绍了一种新型旋风微油煤粉燃烧器,可有效降低 W 型火焰锅炉的点火启动与低负荷稳燃油耗。

1) 通过燃烧器内部流场的计算分析得知,旋风微油煤粉燃烧器与原双旋风燃烧器相比,消旋效果更为显著,乏气比例相差不大,阻力略有增加;

2) 燃烧器的喷口外流场主要受到环形二次风

的控制,对主喷口的流场变化不敏感;

3) 旋风微油煤粉燃烧器与原燃烧器在喷口处的速度略有不同,更有利于延长煤粉的停留时间,有利于着火。

4) 旋风微油煤粉燃烧器在华电珙县电厂 2×600 MW 超临界机组 W 炉上得到应用,作为节油点火燃烧器使用时节油效果显著,作为正常燃烧器使用时性能与原双旋风煤粉燃烧器一致。

参考文献

[1] 黄志强,王军. 双旋风筒煤粉浓缩型燃烧器特性试验

(上接第86页)

采用相电压为 220 V,频率为 50 Hz 的三相对称系统。为了使有源电力滤波器在工作时有一个较好的补偿效果和较快的反应速度,变流器直流侧的电压要超过其线电压的 2 倍以上^[8],这里控制直流侧的电压选择为 750 V。

选定的电容值为 $2\,000\ \mu\text{F}$,输出电感值为 2 mH。

5 仿真结果与分析

仿真结果如图 7(a)、(b)、(c)、(d) 所示。

由仿真波形可以看出,原来由于非线性负荷所造成的电流波形发生严重的畸变,在接入 APF 进行谐波电流补偿以后,该系统电流的波形基本上为一个正弦波形,从而达到了滤波效果。通过进行 FFT 频谱分析之后,得到谐波含量和总谐波畸变率:总谐波畸变率在补偿前达到了近 18.5%,补偿之后不到 2.1%;各次谐波的补偿率均达到了 90% 以上。由此可见该仿真滤波器系统基本上实现了谐波补偿的功能。

6 结 论

根据有源滤波器系统结构的组成,搭建了基于 Matlab-Simulink 仿真环境下的系统模型,并对各个模块分别给予仿真结果以及结论分析。通过仿真结

果可以发现,各仿真模块能够完成模块的功能,整个系统能够完成滤波任务。

参考文献

- [1] 张永刚,陈海啸. 谐波危害及治理探讨 [J]. 技术与市场,2012,19(3): 73.
- [2] 曹璐,王富生. 浅谈谐波对电能表计量的影响 [J]. 科技向导,2012(3): 338.
- [3] 年珩,全宇. 谐波电网电压下 PWM 整流器增强运行控制技术 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(9): 41-49.
- [4] 苏奎峰,吕强,耿庆锋,等. TMS320F2812 原理与开发 [M]. 北京: 电子工业出版社,2005.
- [5] 王亮,赵玲. 电力有源滤波器的 Matlab 仿真 [J]. 上海电力学院学报,2005,21(1): 21-26.
- [6] 王忠礼,段慧达,高玉峰. MATLAB 应用技术: 在电气工程与自动化专业中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社,2007.
- [7] 刘海峰,陈梅. 基于 MATLAB 的电力有源滤波器(APF)的仿真 [J]. 电气开关,2006,44(4): 35-37.
- [8] 吴春芳,程汉湘,朱约章,等. 并联型有源电力滤波器的 MATLAB 仿真研究 [J]. 节能技术,2005,23(2): 118-121.
- [9] 陈庆国,赵春明. 三相四线制并联型电力有源滤波器的算法和参数仿真 [J]. 电机与控制学报,2009,13(1): 20-24.

作者简介:

高勇(1978),男,主要从事电力调度自动化及电力信息化研究。
(收稿日期:2012-08-11)

水轮机调速器负荷异常上升原因分析及处理

唐杰阳¹, 李甜甜², 毛成钢¹, 张晓辉¹

(1. 雅砻江流域集控中心, 四川 成都 610021; 2. 二滩水力发电厂, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 针对二滩水电站 5 号机组调速器在电网冲击时发生负荷异常上升现象, 根据机组功给、功率及频率、残压测频突变波形, 从调速器反馈方式切换逻辑入手分析了负荷异常上升原因, 提出了频率超差增加延时判断条件、调整导叶开限等处理措施。实际运行情况表明, 采取的措施简单可行, 有效地避免了电网冲击对水轮机调速器的影响, 为处理类似问题提供了参考思路。

关键词: 电网冲击; 调速器; 负荷; 异常上升; 分析

Abstract: For the abnormal load rise of No. 5 unit governor in Ertan Hydropower Station during the grid shock, the reasons for abnormal load rise as viewed from the switching logic of the governor feedback mode are analyzed according to the power and frequency, the residual voltage frequency - measuring sudden - change waveform. The measures are proposed, such as increasing time - delay determining conditions due to the frequency beyond tolerance and adjusting the opening limit of guide blade etc. The actual operation proves that the adopted measures are simple and feasible, and can effectively avoid the impact of grid shock on the turbine governor, which provides a reference for dealing with the similar problems.

Key words: grid shock; turbine governor; load; abnormal rise; analysis

中图分类号: TK730 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2013)01 - 0092 - 03

1 二滩水电站调速器

二滩水电站水轮机调速器由控制系统和机械部分组成。控制系统采用 WT - S PLC - STARS 型调速器, 调速器机械部分主要由 TD150 型三级伺服阀、油压装置、直缸接力器与过速限制装置组成。

调速器控制系统由两套完全相同的数字式调速器头组成, 互为备用。每套调速器头主要由 PLC(模块为 140 CPU 434 12A) 及其相关 I/O 板件、功率变送器、导叶位置传感器、测速整形模块及测速探头等组成。另外还设置了一套独立的转速继电器装置, 用于 CCS、电气过速保护与蠕动、转速为零等信号, 还用于风闸、高压油、机组技术供水泵辅助设备控制信号, 转速继电器控制功能由 PLC(FX2N - 32MT - D 型) 实现。

调速器具有频率跟踪功能, 有开度反馈/功率反馈两种反馈模式, 可以实现调速器手/自动控制模式、运行模式无扰动切换以及自动调节导叶、自动按水头整定空载开度、开机、停机等功能。

机组并网运行频率波动超过 ± 0.5 Hz 时, 调速器自动转为“孤网运行”方式。

机组不并网时调速器仅能在“开度反馈”模式运行, 机组并网运行时可转为“孤网运行”或“功率反馈”模式。故障时调速器自动切换到“开度反馈”模式。

调速器头及转速继电器测频信号来自齿盘和残压, 正常运行时转速继电器以残压测频为主, 齿盘测频为辅; 调速器头以残压测频为主, 齿盘测频为辅。

2 水轮机调速器负荷异常上升原因的分析

2.1 事件概述

2011 年 8 月 7 日 05: 55, CCS 发“GIS 1、2 号录波装置启动, 1~6 号机故障录波器触发”报警。

05: 56, 全厂总有功 2 860 MW, CCS 发“5 号机开度反馈控制方式投入, 5 号机有功功率上限 1 580 MW, 5 号机有功调节故障, 5 号机有功联控模式退出, 5 号机有功功率上限 2 600 MW”信号, 运行人员立即在 CCS 上压 5 号机导叶开限。

06: 02, 现场检查 5 号机调速器在开度反馈方式, 电调柜事件信息有“远方激活开度反馈产生”信号, 无报警信号。全面检查 5 号机调速器

系统无异常。

06:04, CCS 上投入“五号机功率反馈方式”,并将该机投入 AGC。

在电网的冲击下,5 号机组负荷由 510 MW 突然上升至 600 MW 以上,由运行人员将导叶开限由 79.9% 压至 70%,对应有功由 600 MW 减至 550 MW。

2.2 数据波形分析

电网发生冲击时,5 号机组频率、功给、功率波形见图 1 所示。

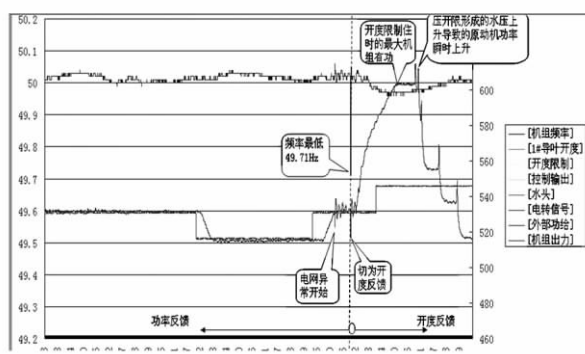


图 1 5 号机组频率、功给、功率波形图

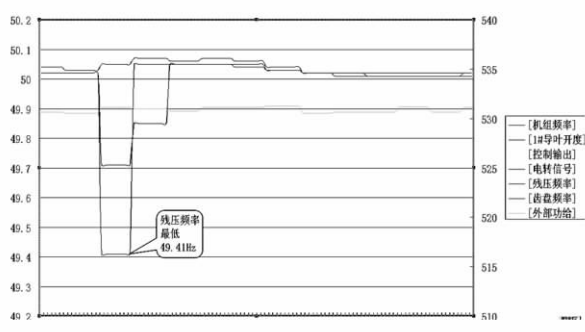


图 2 5 号机组频率、残压测频突变波形图

电网发生冲击时,其他并网机组的波形见图 3 所示(以 2 号机组为例)。

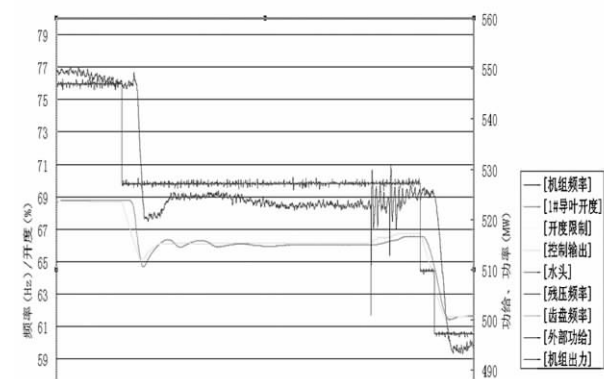


图 3 其他并网机组频率、功给、功率波形图(以 2F 为例)

通过图 1 ~ 图 3 的波形数据,可以看出:

1) 电网发生冲击时,5 号机端电流、电压波动导致调速器功率测量发生波动的现象,其他机组亦存在有相同的现象。

2) 电网发生冲击时,5 号机调速器测量采样的机组频率最低达到 49.71 Hz,残压频率最低达到 49.41 Hz,其他机组频率无突变现象。

3) 5 号机调速器在外部功给最大为 546.21 MW 时,导叶开度随控制输出量的变大而增加直到开度限制值为止,从而导致机组出力异常升高达到 603 MW。其他机组的有功输出与有功给定值基本一致。

4) 5 号机负荷异常上升后,运行人员通过手动减导叶开限,回关导叶,将机组出力控制在 510 MW 左右。

2.3 调速器反馈方式切换逻辑

从事件记录上看,调速器反馈方式在 449 ms 内发生了两次由功率反馈切换为开度反馈,第一次开度反馈投退间隔只有 124 ms。而且事件表明:调速器自动切为开度反馈方式后,监控随即自动设定为开度反馈方式。

机组并网后,调速器将功率反馈切换为开度反馈方式的情况有:手动选择开度反馈方式、功率变送器故障及频率超差 0.5 Hz 共 3 种情况。对以上情况逐一分析:对于手动选择开度反馈方式情况,事发时无人员操作;对于功率变送器故障,PLC 程序设定的条件为功率变送器采集数值越上限、下限且保持 3 s 以上,同时故障信号会在调速器和监控系统报出,而实际检查并没有故障信号,可以排除;对于频率超差 0.5 Hz 情况,从图 2 的 5 号机组频率、残压测频波形图可以看出,当时 5 号机调速器工控机采样机组残压频率由 50.02 Hz 突变为 49.41 Hz,持续了 141 ms,而 PLC 测量的频率最低值一旦低于 49.5 Hz,则符合频率超差 0.5 Hz 条件,导致调速器自动切换为开度反馈方式,瞬间突变频率超差随即导致监控系统在 124 ms 内相继报出 5 号机调速器切开度反馈投入、退出事件。

2.4 负荷异常上升原因分析

根据调速器控制原理:在功率反馈方式下,监控系统送给调速器的功率给定直接与机组反馈的有功功率进行比较控制;在开度反馈方式下,有功给定需转换为开度给定后,再与导叶实际开度进行比较控制。有功给定转换为不同水头下开度给定的协联关

系曲线是一个模型试验数据,与实际存在较大差别,当功率反馈切至开度反馈模式时,即使有功给定保持不变,由于转换成开度给定值存在误差,造成了机组实际有功功率输出值发生较大的波动。

在开度反馈方式下,当时水头为 167.43 m,外部功给为 546.21 MW,经协联曲线计算后的开度给定为 79.76%,远比当时功率反馈下的实际开度 68.13% 大,由于导叶开限为 79.34%,因此切换为开度反馈方式后,调速器导叶开度由 68.13% 上升至导叶开限 79.34% 为止,造成了 5 号机组负荷异常上升。

2.5 分析结论

综合以上分析,可以得出 5 号机调速器在电网异常时负荷异常上升的原因如下。

(1) 电网冲击对 5 号机调速器残压测频元件造成影响,导致残压频率突变,频率差超过 0.5 Hz 引起调速器反馈方式由功率反馈切换为开度反馈。

(2) 调速器切换为开度反馈方式后,其功率给定值需转换为当前水头下开度/功率协联曲线模型对应的开度给定值,大于切换前的实际开度,从而导致负荷异常上升。

3 处理措施

分析电网冲击造成调速器负荷异常上升的原因,主要有:①电网冲击的影响,电网发生线路跳闸、雷电干扰等各种冲击因素无法消除,其影响不可避免。②机组调速器全水头开度/功率协联曲线模型数据不准确,由于该模型数据是试验数据,且水轮机出力、水头、导叶开度是一个非常复杂的非线性关系,无法得到准确的定量数据模型,因此校核开度/功率协联曲线模型具有很大的难度,操作性不强。根据实际经验,专业人员采取了切实可行的措施,主

要有以下 3 点。

(1) 完善调速器功率反馈切开度反馈逻辑:当机组频率偏差超过 0.5 Hz 且持续一段时间,方可切换为开度反馈模式。当增加延时判断条件后,就避免了电网冲击造成测频回路瞬时突变对调速器的干扰,增加了调速器稳定可靠性。

(2) 加强监视、勤调整导叶开限。特别在高水头下,调整导叶开限略大于机组额定功率对应的导叶开度,防止调速器负荷异常上升造成机组超出力运行的异常状况。

(3) 对 5 号机调速器残压测频板件及通道进行校验,检查残压测频抗干扰性并更换测频板件。

采取以上措施后,电网多次发生线路跳闸、重合闸动作、电压波动等异常,二滩电厂水轮机调速器未再发生负荷异常上升事件。实际运行表明,针对调速器负荷异常上升采取的措施简单可行,有效地避免电网冲击对水轮机调速器的影响。

参考文献

- [1] 魏守平. 现代水轮机调节技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [2] 陈飞翔, 蒲瑜. 二滩水电厂调速器负荷波动分析与对策 [J]. 水电站机电技术, 2005, 28(1): 5-6.
- [3] 吴建荣, 王秀梅. 二滩水电站 5 号机组负荷波动原因分析及处理 [J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 22-23, 67.
- [4] 魏守平, 王雅军, 罗萍. 数字式水轮机调速器的功率调节 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(4): 20-22.

作者简介:

唐杰阳(1981), 男, 主要从事流域水电站运行管理工作。

(收稿日期: 2012-10-09)

(上接第 83 页)

参考文献

- [1] 邬雄, 丁燕生. 我国 500 kV 电网的电磁环境状况和策略 [J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2408-2411.
- [2] 《输变电设施的电磁、磁场及其环境影响》编写组. 输变电设施的电磁、磁场及其环境影响 [M]. 北京: 中国

电力出版社, 2007: 99-109.

- [3] 王广周, 张嵩阳, 闫东, 等. 500 kV 超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策 [J]. 高压电器, 2010, 46(8): 93-100.
- [4] 谢连科. 110 kV 同塔双回交流输电线路工频电磁场分布规律研究 [J]. 山东电力技术, 2009(4): 3-5.

(收稿日期: 2012-10-09)



成都市兴名源电器有限公司位于成都市大邑工业集中发展区内，注册资金2000万元，公司专业从事0.5~35kV 电流、电压互感器和干式组合互感器研发、生产及销售。

公司拥有一支技术精湛、工作经验丰富、责任心强的精英团队，先后构建了具有国际领先技术的环氧树脂浇注生产线、自动压力凝胶生产线、真空滤注油生产线，并配备了国内外先进的试验、检验仪器设备。

公司通过了ISO9001:2008质量管理体系认证，生产的产品全面通过电力工业设备电气质量检验测试中心（武高所）和机械工业第五（西安）计量测试中心站西安高压电器研究所（西高所）的各项检测项目。是国家电网中标企业，通过了国家电网公司招投标管理中心审查委员会审核，取得《国家电网公司集中招标活动供应商资质业绩信息核实结果证明文件》。



联系电话：028-88269989
028-88269916