

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



向家坝水电站

ISSN 1003-6954



0 2>

9 771003 695135

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.37

2014

No.1

四川西昌电力股份有限公司

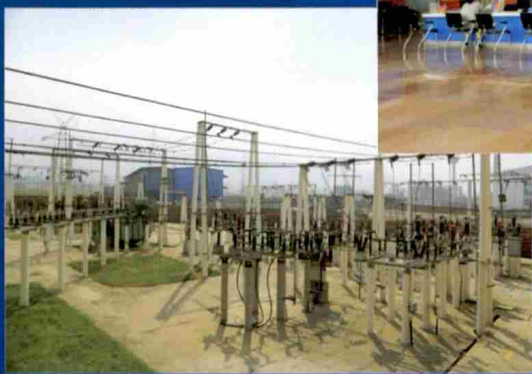
四川西昌电力股份有限公司成立于1980年，1994年6月改制为股份有限公司，2002年5月在上交所上市（股票代码600505），是凉山州内唯一一家A股上市公司。四川省电力公司、凉山州国有投资发展有限责任公司、四川省水电投资经营集团有限公司分别为一、二、三大股东。

公司属发输配供一体化企业，主要负责西昌市城区及安宁河以东部分地区供电，连接州内普格、昭觉、美姑、金阳、布拖、盐源、木里七县及德昌、会理和冕宁部分地区。公司权益水电装机133.42 MW；在建、拟建水电站权益装机约160 MW；网内并网电站120座，装机容量约550 MW；输配电线路131条近2 000 km；110 kV变电站7座、35 kV变电站6座，变电总容量约580 MVA。年发电量500 GWh，售电量约1 400 GWh。

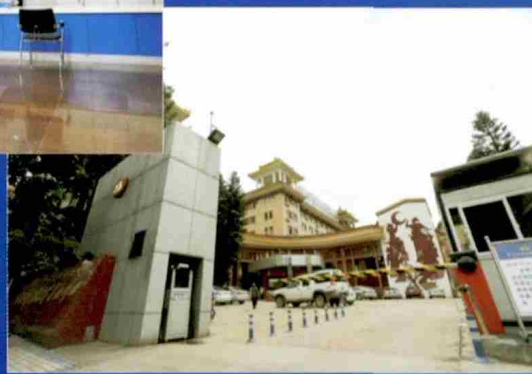
公司秉承“客户至上，社会责任优先”理念，在各股东单位、地方各级党委政府和社会各界的关心支持下，以促进经济社会发展为己任，力争为社会奉献更加充足、安全、实惠的电能。



公司营业大厅



公司110 kV 锅盖梁变电站全貌



公司全貌



公司110 kV锅盖梁变电站全貌



公司开展安全用电知识宣传

中国长江电力股份有限公司

向家坝水力发电厂



转子吊装



夜色

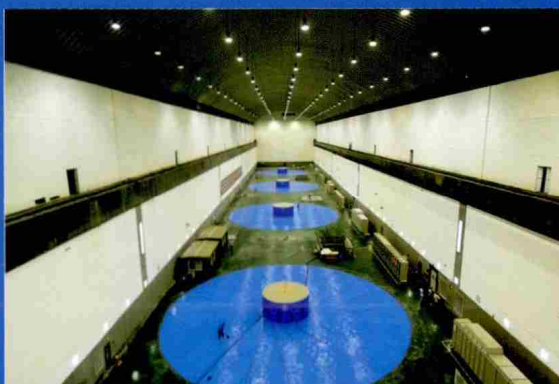


控制室



向家坝水电站是金沙江梯级开发中的最末端一个电站，坝址位于四川省宜宾县和云南省水富县交界的金沙江上，电站以发电为主，兼顾防洪、改善通航条件、灌溉，同时具有拦沙和对溪洛渡水电站进行反调节等作用。向家坝水电站拦河大坝为混凝土重力坝，坝顶高程384 m，最大坝高162 m，坝顶长度896.256 m。电站左、右岸共安装8台（单机容量800 MW）水轮发电机组，总装机6400 MW，多年平均发电量30.88 TWh，装机容量在国内仅次于三峡和溪洛渡，是目前中国第三大水电站。2006年11月工程正式开工，2008年11月工程截流，2012年10月大坝下闸蓄水，2012年11月5日首台机组正式投产发电。截止2013年12月31日，右岸电站4台机组已全部投产发电、左岸电站2台机组已投产发电；电站将于2015年全部建成竣工，主要供电华中、华东地区，兼顾川、滇两省用电需要。

向家坝水力发电厂于2012年2月27日正式成立，是中国长江电力股份有限公司下属的电力生产单位，主要负责电站的运行维护管理。自筹建以来，向家坝电厂深入践行“建管结合、无缝交接”的管理理念，全方位地参与工程建设，周密地进行电力生产准备，圆满完成了首批机组接机发电目标。站在新起点，扬帆新征程，向家坝电厂将以“创建国际一流水电站”为愿景，精益运行、精心维护、精细管理，努力实现机组安全稳定运行，充分发挥电站经济效益和社会效益。



右岸地下厂房

国网四川省电力公司眉山供电公司

国网四川省电力公司眉山供电公司于2001年12月26日随眉山建市而成立,是四川省电力公司下属特大型一类供电企业,经营区域覆盖全市一区五县及成都部分地区,供电范围超7 390 (km)²,服务人口360余万人。

公司成立以来,把自身的发展与眉山地方经济高速发展相结合,围绕建设电网坚强、资产优良、服务优质、业绩优秀的“一强三优”现代公司的战略目标,不断提升企业综合实力,在为地方经济社会持续快速发展提供可靠能源电力保障的同时,自身也得到了快速发展。截至2012年年底,公司拥有35 kV及以上变电站66座(不含500 kV变电站),变电容量4 018.5 MVA; 35 kV及以上线路161条,总长2 090.7 km。眉山电网形成了以两座500kV变电站为支撑,以220 kV输电线路为骨干网,110 kV环网双电源供电的格局。公司售电量从2001年的1 315 GWh最高增长到2012年的8 099 GWh。

公司成立以来,在加快物质文明建设的同时,公司努力弘扬“努力超越、追求卓越”的企业精神,忠实履行社会责任,不断推进公司的创新发展。公司相继荣获“全国五一劳动奖状”、“全国模范职工之家”、“全国电力行业优秀企业”、“省级最佳文明单位”等300余项市级及以上荣誉称号。

在“十二五”期间,公司将进一步加快实施省电力公司与眉山市政府的“十二五”战略合作协议,加大电网建设力度,提升供电保障能力,为眉山市实现“经济跨越、文化繁荣、环境一流、人民幸福”的目标提供坚强的电力保障。



为地方经济社会发展提供强大的电力保障



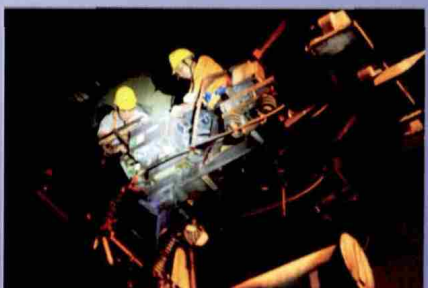
走上街头向市民宣传安全用电知识



新建变电站施工



“包片进村”服务“三农”



夜间抢修

四川省晶源电气设备制造有限公司

四川省晶源电气设备制造有限公司是一家集配电变压器研发、生产、销售为一体的高科技民营企业，主要生产、销售油浸式变压器、干式变压器、非晶合金变压器、特种变压器及预装式变压器，致力于打造中国西部非晶合金变压器生产基地。公司占地近70 000 m²，已建标准厂房16 000 m²，拥有完善、先进的生产设备和检测设备，能充分满足用户需要。2012年公司被科技局评为四川省建设创新型培育企业及战略型新兴产业。公司自主研发的SCBH15型10 kV系列三相三柱非晶合金干式变压器于2012年12月成功通过四川省科技厅组织的成果鉴定。该项目产品创新性强，其主要性能指标处于国内领先水平。在国网四川省电力公司2013年第一批配(农)电网设备协议库存招标采购中，公司中标非晶合金包01BYQ (K)。

公司竭诚欢迎与新老客户合作，共创美好明天！



非晶合金油浸式变压器



非晶合金干式变压器

公司地址：四川省射洪县太和大道北段银华工业城

联系人：赵军

联系电话：0825-6625001

传真：0825-6625090

国网四川省电力公司宜宾供电公司



宜宾供电公司办公楼

国网宜宾供电公司成立于1978年，原名为“四川省电力公司宜宾电业局”，于2013年7月1日正式更名为“国网四川省电力公司宜宾供电公司”（简称国网宜宾供电公司），是国网四川省电力公司下属的特二型供电企业，下设11个职能部门、5个支撑和实施机构、3个县级供电公司，代为管理省公司控股的国网江安县供电公司、省公司全资子公司——国网宜宾市南溪供电有限责任公司，2个集体企业（宜宾远能电业集团公司、三新电力服务公司）。

直供区域为宜宾市翠屏区、南溪区部分地区以及云南省云天化股份有限公司，面积 $1\,128(\text{km}^2)$ （宜宾总面积 $13\,000(\text{km}^2)$ ）。四川省水电产业集团控股的屏山县、兴文县、高县、筠连县、宜宾县、珙县电力公司均为公司趸售用户。

截止2012年年底，公司固定资产为31.71亿元。共拥有35 kV及以上变电站46座，变电总容量4 195 MVA（220 kV变电站9座，主变压器17台，变电容量2 430 MVA；110 kV变电站

25座，主变压器43台，变电容量1 667.5 MVA；35 kV变电站12座，主变压器14台，变电容量97.5 MVA）。拥有10 kV配网在运线路4 726 kW（城市配网 754 kW，农网 3 972 kW），35 kV及以上输电线路共计127条段2 010.94 kW。

2012年，公司完成售电量5.46 TWh（母公司口径）。主营业务收入净额25.78亿元。缴纳各种税费1.01亿元。综合线损率4.02%（并表口径）。完成固定资产投资3.13亿元。电费回收率实现100%。完成省公司下达的资产经营考核目标。



宜宾供电公司党委书记
副总经理彭军



宜宾供电公司总经理
党委副书记何自力



变电检修



线路施工

近年来，在国网四川省电力公司的正确领导下，国网宜宾供电公司按照省公司“五个发展”总布局，以科学发展观为引领，紧紧围绕“1381”发展目标，始终坚持“依法治企、科学治企、风清气正、人企共进”的工作基调，努力推动企业“安全发展、协调发展、绿色发展、创新发展、科学发展”，先后荣获了全国精神文明建设先进单位，国家电网公司“抗震救灾功勋集体”、“特高压直流输电示范工程突出贡献集体”、“世博保电先进集体”、“离退休工作先进集体”，四川省“五一”劳动奖状等一系列荣誉称号。

达州供电公司



“创先争优”承诺
争当“四优”党员



优质服务达州“气都”



220 kV变电站集中检修



结对帮扶阿坝壤塘、
甘孜色达藏区



达州500 kV变电站



融冰化雪送光明

国网达州供电公司始建于1966年8月，属四川省电力公司特大（I）型供电企业。公司全口径员工3 584人，全员劳动生产率42.26万元/人·年。截至2013年6月底，固定资产总额达43.94亿元。2012年，完成售电量7.183 TWh，同比增长1.93%。2013年上半年，累计完成售电量3.75 TWh，同比增长8.89%。截至2013年4月15日，企业已实现连续安全生产3 000天的新跨越。

在四川省电力公司和达州市委、市政府的坚强领导下，通过近几年的大力建设，公司已拥有35 kV及以上变电站75座，总容量4 650.1 MVA，35 kV及以上线路168条、2 797.6 km。达州电网已经形成了以500 kV达州站、临巴电厂和东岳电厂为主要电源点，以220 kV南、中、北部环网为骨干（其中，达州中部城区为双环网），各级电网协调发展，供电可靠性较高的供电网络，为达州经济社会又好又快发展奠定了坚实的供电基础。企业自身发展也取得了新突破，先后荣获“全国五一劳动奖状”、“全国模范职工之家”、“全国精神文明建设先进单位”、“全国供电可靠性金牌企业”、“国家电网公司文明单位”、“四川省安全文化示范企业”、“四川省模范职工之家”和省公司“红旗党委”和“四好班子”、达州市“诚信企业示范单位”、“抗洪救灾先进集体”等称号。

CONTENTS

Study of Voltage - dropped Control of VSC - MTDC	Wu Xin Li Xingyuan (1)
Wide - area Low - frequency Oscillation Analysis Based on Wavelet Denoising and Stochastic Subspace Identification	Liu Chang Li Changsong Li Huaqiang Xu Haiqing (5)
Impact of Different Control Modes on Power Flow Calculation of AC - DC System	Tao Yishan Yan Guangxin (10)
Visualization Design and Implementation of Dynamic Monitoring for Power System Operation	Wang Bo Yang Honggeng (13)
Analysis and Application of Real - time Power Dispatching System	Yin Tao Wang Yanfeng Zhang Hongtu Zhang Chi Wu Xuan Hu Xian Zhang Qinqin Jiang Ke (19)
Research and Application of Centralized Monitoring and Analysis Platform for Sichuan Electrical Information Security	Liu Shanmei Chai Jiwen (23)
Invulnerability Assessment of Power System Based on Node Vulnerability	Li Yanqing Li Huaqiang Li Qian Huang Zhaomeng (26)
Research on Fast Calculation Method for Injected Reactive Power of Node Based on L Index	Wang Tao Gong Xue Deng Yawen (29)
Research on Wide - area Damping Control Oriented Reduced Order Identification for System	Chen Keyi Ruan Zhen He Qiang HeJinbo (33)
Thinking on Relay Protection Vector Testing for Startup of New Light - load and No - load Equipment	Liang Jing Feng Xiaoping Chang Xiqiang Xiao Xue Yin Xin (39)
Superficial Discussion on Influence of Control Circuit of Circuit - breaker in 500 kV Hydraulic Unit on Self - adaptive Reclosing	Li Lihong Yao Guang Yang Xiaotao (43)
Research on Adaptive Model of 110 kV Automatic Throw - in Equipment of Emergency Power Supply	Zhang Dawei Peng Hai Liu Yu (47)
Research on Practical Application of Condition - based Maintenance to Relay Protection Devices in Substation	He Xiaofei Wang Rui Zhen Wei (50)
Analysis on Excitation Overload Alarm Caused by Setting Calculation Errors of Generator Protection	Chen Xiping Ji Jie Cao Gang Cai Xiangang Wang Wensong Zhang Wei (55)
Discussion on Double Lines Parallel Operating Mode	Wu Ling Liu Qin (59)
Analysis of Power - frequency Electromagnetic Environment of Ultra - high Voltage AC Transmission Lines	Xu Cui'e Wen Yi Li Jianming (63)
Audible Noise Analysis and Noise Reduction Discussion for Equipment in HVDC Converter Station	Ye Chunyan Wang Fangqiang Chen Wei Wang Jie Ren Zhichao (68)
Influence Analysis of Electrified Railway Traction Load on Operational Characteristics of Wind Farms	Zhang Xinwei Li Bo (71)
Research on Application of SMES to Smoothing Power Output of Wind Farms	Yan Guangxin Wang Kai (76)
Steady - state Sampling Error of Rogowski Coil Current Transformer Based on Integrator with Zero Drift	Guo Youhua (81)
Optimization of 3/2 Busbar Wiring and Switching Operation Mode in 750 kV Substation	Xu Chuang Shi Hui Yin Xin Chang Xiqiang Wang Fei (84)
Impact of Transfer Voltage from Ground Fault in Step - up Side of Main Transformer on Generator Stator Grounding Protection in Hydropower Station	Huang Jianqiong Ji Jie Cai Xiangang Chen Xiping (88)
Research on Microbial Growth in Transformer Insulation Oil	Wang Jie Liu Hong Tang Ping Li Bo (92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2014 Vol. 37 No. 1

(Ser. No. 229)

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

2014 年第 37 卷第 1 期(总 229 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* 23*

2014-02

目 次

• 基金项目 •

基于电压下降方式的 VSC-MTDC 控制方式研究…………… 伍 欣 李兴源(1)

基于小波去噪和随机子空间算法的广域低频振荡估计

…………… 刘 畅 李长松 李华强 许海青(5)

• 电力系统 •

不同控制方式对交直流系统潮流计算的影响…………… 陶奕杉 闫广新(10)

电力系统运行动态监视的可视化设计与实现…………… 王 波 杨洪耕(13)

实时电力调度系统的分析及应用

…… 银 涛 王彦沅 张宏图 张 驰 吴 璇 胡 翔 张勤勤 蒋 科(19)

四川电力信息安全集中监测分析平台研究与应用…………… 刘姗姗 柴继文(23)

基于节点脆弱性的电力系统抗毁性分析

…………… 李艳卿 李华强 李 迁 黄昭蒙(26)

基于 L 指标节点无功注入量快速确定方法研究

…………… 王 涛 龚 雪 邓亚文(29)

面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识研究

…………… 陈科屹 阮 征 何 强 贺静波(33)

空载轻载新设备启动送电继电保护向量测试的思考

…………… 梁 静 冯小萍 常喜强 肖 雪 印 欣(39)

浅谈 500 kV 液压机构断路器控制回路对自适应重合闸的影响

…………… 李利红 尧 广 杨晓涛(43)

110 kV 备用电源自动投切装置自适应模型研究

…………… 张大伟 彭 海 刘 宇(47)

变电站继电保护装置状态检修实际应用研究

…………… 何小飞 王 锐 甄 威(50)

一起发电机保护定值计算错误引起的励磁过负荷报警分析

…………… 陈熙平 季 杰 曹 钢 蔡显岗 王文松 张 伟(55)

双回线并列运行方式探讨…………… 吴 玲 刘 勤(59)

• 高电压 •

特高压交流输电线路工频电磁环境分析…………… 许翠娥 文 艺 李建明(63)

高压直流换流站设备可听噪声的分析与降噪探讨

…………… 叶春燕 王方强 陈 巍 王 杰 任志超(68)

电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响分析…………… 张新伟 李 波(71)

超导储能装置应用于风电场平滑功率输出的研究…………… 闫广新 王 凯(76)

基于积分器零漂的罗氏线圈电流互感器稳态采样误差…………… 郭又华(81)

750 kV 变电站 3/2 母线接线与倒闸操作方式优化

…………… 徐 闯 石 辉 印 欣 常喜强 王 飞(84)

水电站主变压器高压侧接地故障传递电压对发电机定子接地保护的影响

…………… 黄建琼 季 杰 蔡显岗 陈熙平(88)

变压器绝缘油中微生物生长研究…………… 王 杰 刘 虹 唐 平 李 博(92)

基于电压下降方式的 VSC – MTDC 控制方式研究

伍 欣 李兴源

(四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要: 电压源换相高压直流输电是基于电压源换流器 (VSC) 的新一代高压直流输电技术。首先对 VSC – HVDC 的内外环控制进行分析, 确定内外环控制方式, 然后对多端柔性直流输电 (VSC – MTDC) 的控制策略进行研究, 采用电压下降的控制方式对五端直流系统进行建模, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行仿真模拟。结果表明采用电压下降控制方式的 VSC – MTDC 具有良好的系统协调性, 具备利用上层控制可以快速自动调节功率分配的特性, 并且具有良好的扩容性。

关键词: 多端柔性直流; 电压下降控制; 内外环控制; PSCAD/EMTDC; 系统扩容

Abstract: VSC – HVDC transmission is a new generation of high – voltage DC transmission technology based on voltage source converter (VSC). The inner ring and outer ring control of VSC – HVDC is analyzed firstly to determine the inner and outer ring control method , and the control strategies of multiterminal VSC – HVDC transmission system (VSC – MTDC) are studied. The modeling of five – terminal DC system is carried out using the voltage – droppd control , and the simulation is done with PSCAD/EMTDC simulation software. The results show that VSC – MTDC has a good system compatibility under the voltage – droppd control , has the characteristics of adjusting power allocation fast and automatically using the upper control , and can expand its capacity easily.

Key words: multiterminal VSC – HVDC; voltage – dropped control; inner and outer ring control; PSCAD/EMTDC; capacity expansion

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 – 6954(2014) 01 – 0001 – 04

0 引 言

随着分布式能源的广泛开发, 新型直流输电系统有着广泛的应用, 国际上许多的研究机构都在进行着相应的研发和建设, 其中包括 ABB 公司在瑞典 (Hellsion) 搭建的工业试验用 VSC – HVDC 系统以及后来的同样位于瑞典哥特兰 (Gotland) 岛上的世界第一条投入商业运行的 VSC – HVDC 系统等^[1-3]。

国内外现在关于电压源直流输电系统的研究已经较为深入, 技术也相当成熟, 但在 VSC – HVDC 基础上衍生出来的基于电压源变流器多端直流输电系统 (VSC – MTDC) 现在尚处于理论研究阶段, 世界上尚无任何已经投入运行的系统。目前国内外所有的多端直流输电系统都是电流源变流器多端系统, 它的直流侧可以等效成一个受控电压源, 因此需要精确的电压平衡才能并联运行。而电压源变流器的直

流侧可以等效成一个理想电流源, 因此可以搭建环形、辐射形、网形以及混合型并联直流网络, 因此对 VSC – MTDC 的研究, 有着非同寻常的意义^[4-6]。

VSC – MTDC 可以在风力发电、分布式发电、海上风电场、城市中心配电等场合应用, 在系统的灵活性和经济性上面与两端系统相比优势明显, 但与此相应, 在控制方式上也更加灵活多变, 更加困难。

1 内外环控制方式

1.1 内环电流控制器

电压源变流器由于采用的是正弦脉宽调制 (SPWM) , 所以变流器有延时为 $1/(1 + T_w s)$, 其中的 $T_w = 1/2f_s$, f_s 是变流器的开关频率^[7-10]。对于典型的电压源变流器来说, 其时间常数 $\tau = L/r$ 比 T_w 大很多, 因此在利用比例积分 (PI) 控制器进行闭环控制时, 可以用其零点来消除外电路的主导极点。如图 1 所示, 图中 i_d 和 i_q 分别是 d 轴和 q 轴电流控制器的参考电流, 是由外环控制器提供的, 内环电流控制

基金项目: 国家科技部“973”项目 (2013CB22804) ; 国家电网公司科技项目资助

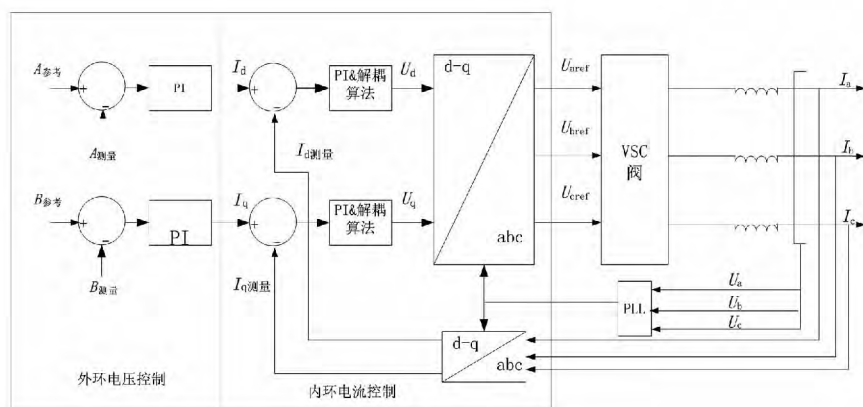


图 1 VSC 直接电流控制原理示意图

器输出的是 d 轴和 q 轴的参考电压 V_d 和 V_q 。经过帕克反变换后得到的就是 PWM 调制用的正弦参考电压 U_{aref} 、 U_{breif} 和 U_{cref} 。

1.2 外环电压控制器

外环控制器包括有功部分和无功部分,有功部分可以控制有功功率或者直流电压,无功部分可以控制无功功率或者交流电压。有功部分输出信号是 d 轴电流参考值,无功部分输出信号是 q 轴电流参考值。外环控制器一般同时包含有功控制和无功控制。这里采用的是直流电压控制和交流电压控制。

1.2.1 定直流电压控制

定直流电压变流站交直流功率必须平衡,所以有

$$P_{AC} + P_{DC} + P_{cap} = 0 \quad (1)$$

公式中的 P_{cap} 是电容上储存的有功功率,利用 dq 做好以下的变流器数学模型,可以得出

$$\frac{3}{2} V_s i_d + V_{DC} I_{DC} + V_{DC} (I_{dc} - I_{DC}) = 0 \quad (2)$$

其中 $I_{dc} - I_{DC} = I_{cap}$ 是变流器直流侧电容的电流。从公式(2) 可以看出电容电流为

$$I_{cap} = - \left(\frac{3 V_s i_d}{2 V_{DC}} + I_{DC} \right) \quad (3)$$

根据电容电压得出的电容电流为

$$I_{cap} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (4)$$

将公式(4) 带入式(3) 得到直流电压微分方程变为

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = - \frac{2}{C} \left(\frac{3 V_s i_d}{2 V_{DC}} + I_{DC} \right) \quad (5)$$

从公式(5) 可以看出直流电压变化率与有功电流有关,故可以通过有功电流参考值 i_d^* 控制变流器的直流电压。利用直流电压信号作为补偿信号可以

明显地改善控制器的性能。定点压变流器的额定容量不是无限的而且直流电压控制器也无法限定变流器的有功功率,所以应该为直流电压控制器加装功率限制。

功率限制是通过有功电流和无功电流的最大

值控制实现的,根据公式: $P_{DC} = P_{dq} = \frac{3}{2} V_{sd} i_d = \frac{3}{2} V_s i_d$ 在交流电压确定的条件下得到有功功率 P_{DC} 与有功电流 i_d 的关系,因此根据变流器的额定功率可以确定有功电流的最大值和最小值,而两者绝对值相等符号相反,且分别对应着变流器的最大整流功率与最大逆变功率。

该控制器是在定直流电压控制器的基础上改进而成,在定电压控制器输出端上添加了一个幅值限定器,其输出的 d 轴电流参考值的上限均是定功率控制器决定的,所以当变流器的整流功率为变流器额定功率时 P_{max} d 轴电流参考信号无法继续升高,变流器的最大整流功率被限制为 P_{max} 。当变流器的逆变功率等于 P_{min} 时 d 轴电流参考信号无法继续降低,变流器的最大逆变功率被限制为 P_{min} ,且 $P_{min} = -P_{max}$ 。

1.2.2 交流电压控制

弱交流网络的线路电阻和电抗较大,如果改变有功功率,这会造成明显的电压波动。因此如果变流器连接的是弱交流网络,需要设定变流器维持交流电压恒定。

电力系统中有

$$\dot{V}_c - \dot{V}_s = (r + j\omega L) \dot{I} \quad (6)$$

其中, $\dot{V}_c$ 为变流器交流侧电压向量; $r + j\omega L$ 是线路阻抗; $\dot{I}$ 为交流电流向量。

$$\dot{I} = \left(\frac{s}{|\dot{V}|} \right)^* = \left(\frac{P+jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right)^* = \left(\frac{P-jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

将公式 (7) 带入公式 (6) 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= \dot{V}_s + (r+j\omega L) \dot{I} \\ &= \dot{V}_s + (r+j\omega L) \left(\frac{P-jQ}{V_c/\sqrt{2}} \right) \\ &= \dot{V}_s + \left(\frac{P+Q\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \right) + j \left(\frac{P\omega L-Qr}{V_c/\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

处于正交坐标轴上的有功和无功分量对合成电压幅值 V_c 的影响很小。因此,可以忽略正交轴上的分量,则 V_c 可以近似为

$$\dot{V}_c = \dot{V}_s + \left(\frac{P+Q\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \right) \quad (9)$$

在公式 (9) 中 P 是由所需有功功率决定的。因此通过无功补偿可以维持交流电压恒定 V_c 。当有功功率 P 不变时,其数学关系如下

$$\Delta V_c = \frac{\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \Delta Q = \frac{\omega L}{V_c/\sqrt{2}} \Delta V_s i_q \quad (10)$$

交流电压控制器的结构如图 1 所示,其中 i_q 是内环无功电流控制器的参考输入信号。

2 电压下降控制方式

采用电压下降控制方式的多端系统,其换流器的直流输出端电压随输出电流或者功率的不同而线性变化,为了保证系统的稳定运行,一般采用下降输出的特性,即输出直流电压随输出有功功率或者直流电流的增加而下降,下降的 $P-V$ 或 $I-V$ 特性使得系统功率可以在各个换流器间稳定地分配,各换流器 $P-V$ 或 $I-V$ 曲线的下降决定了系统功率分配特性的优劣。

图 2 中所有变流器都采用的是直流电压下降控制器,但是每个变流器的直流电压设定值都不同,由于变流器间是并联的,忽略线路直流电压下降,则变流器的直流电压相等。因为每个变流器的特性不同,所以虽然直流电压相同但直流功率不同,当功率平衡时,直流网络电压稳定。

图 2 中第一行是应用电压下降策略正常运行的一个三端系统。当变流器 2 和 3 降低电压设定值时,如第二行所示,则 P_2 和 P_3 增大,由于变流器 2 和 3 是逆变站,所以功率不平衡,即

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 < 0 \quad (11)$$

由于直流功率小于零,直流电容放电,所以直流电压降低。根据变流器 1 的特性可知,电压下降时它会增大输入到直流网络的功率使其在新的电压下恢复平衡。类似的是当变流器 1 升高电压设定值如图 2 中第三行所示时,由于变流器 1 是整流变流器,故功率不平衡为

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 > 0 \quad (12)$$

此时直流电容充电,所以直流电压升高,导致变流器 2 和 3 的吸收功率增加,进而重新恢复平衡。

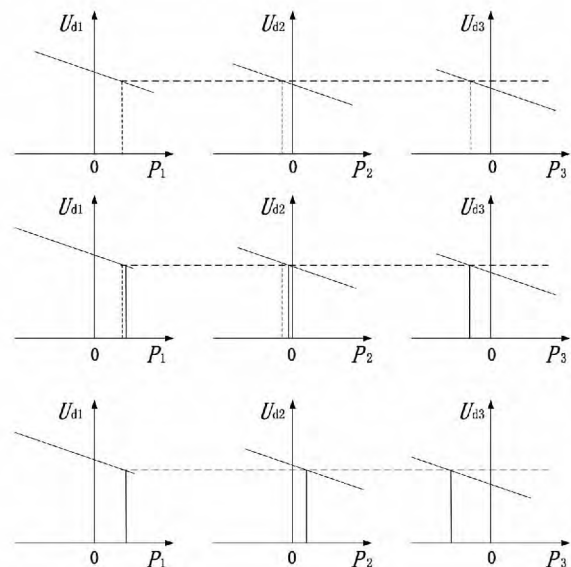


图 2 采用电压下降控制方式的多端系统控制特性

如果下降斜率较陡,那么功率分配特性较好,且不易发生功率振荡,但是同时由于直流电压下降较多,导致电压质量较差,而且直流电压偏离额定值过多时也会使得系统无法保持稳定运行;相反,如果曲线下下降斜率比较平缓,那么电压质量较好,但是较小的斜率又使得系统的功率分配性能较差。因此采用电压下降控制方式,最关键的就是要选择合适下降斜率,从而平衡电压质量和功率分配特性,确保系统的正常稳定运行。

采用电压下降控制的多端系统具有良好的扩充性与运行的灵活性,但是随着系统规模的扩大,直流系统的静态稳定性会降低,因此不适合大规模的系统采用。

理论上,采用带电压下降特性控制方法的多端系统不需要上层控制进行定值协调,即可稳定运行。但是,由于采用该方法的多端系统仍然需要进行潮流调整,因此上层控制器仍然是必须的,所以可以只保留其中的潮流整定模块,而忽略掉电流整定值协

调模块。采用这种方式运行时,各个换流站的控制具有一定的稳定裕度,并且不需要高速通讯的支持;同时,各个换流器在上层控制器的协调下,不断校正参考值。

3 仿真分析

采用 PSCAD/EMTDC 软件建立五端直流系统,如图 3 所示,VSC1、VSC2 为逆变侧,VSC3、VSC4、VSC5 为整流侧。

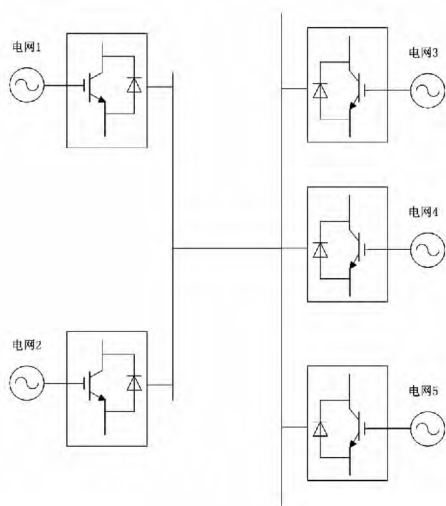


图 3 五端直流输电系统并联结构示意图

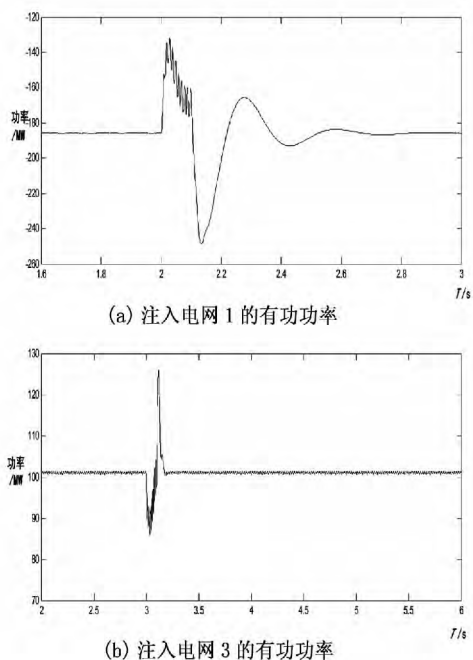


图 4 单点-单相故障情况下的仿真分析

算例 1: 在 $T = 2 \text{ s}$ 时 VSC1 交流侧发生单相接地故障,持续时间为 0.1 s ; 在 $T = 3 \text{ s}$ 时 VSC3 交流侧发生接地故障,持续时间为 0.1 s ,由图 4 可见,不

管是整流侧还是逆变侧发生接地故障时均可以快速恢复稳定。

算例 2: VSC5 在 $T = 1.5 \text{ s}$ 时发生短路故障,由图 5 可见,逆变侧 VSC1 功率下降,直流电压下降,有效地阻止了系统不稳定的发生。

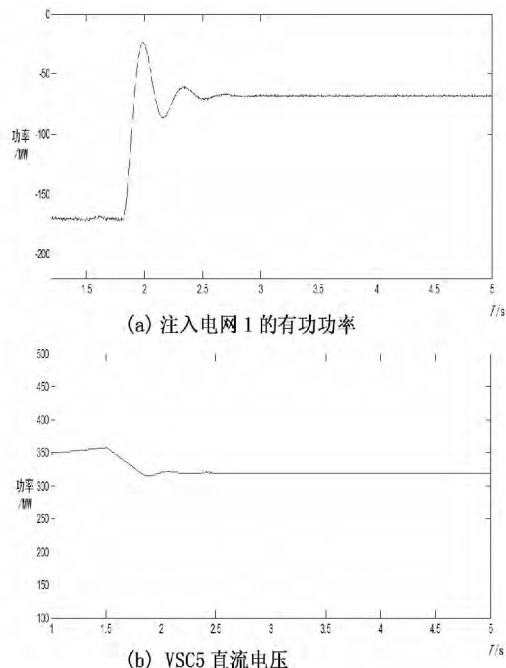


图 5 VSC5 侧短路故障情况下的仿真分析

4 结 论

由以上仿真分析可以看出,采用电压下降控制方式的 VSC - MTDC 系统具有使用上层控制可以直接快速调节潮流分配,对于 $N - 1$ 系统而言,可以保持系统的稳定性,在失去 1 个电网或 1 台机组的情况下仍然可以保证其他电网的稳定运行,这个在分布式能源的开发利用中有很大的优势,因为,例如风电、太阳能发电等均具有随一些不确定因素变化的特点,而应用电压下降控制方式可以尽可能地忽略掉这些不稳定因素,而且采用电压下降控制方式的 VSC - MTDC 具有良好的扩容性,可以在原系统上继续添加柔性直流系统。

参考文献

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2010.
- [2] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC - MTDC 的直流电压控制策略 [J]. 电网技术 2006 30(19): 28 - 33.

(下转第 9 页)

方法在处理非平稳信号时具有很大优势,较适合对实际大电网的实测信号的分析。

表 3 去噪后分析结果与未去噪分析结果及理论值比较

模式	频率/Hz			阻尼比/%		
	去噪前	去噪后	理论值	去噪前	去噪后	理论值
1	0.401 2	0.384 5	0.379 7	2.21	1.52	1.60
2	0.537 6	0.511 3	0.521 3	4.21	2.29	2.44
3	0.620 9	0.648 5	0.657 5	3.66	4.17	4.06

4 结 论

提出了一种利用小波去噪技术对振荡数据进行预处理,然后运用随机子空间方法对数据进行分析的新方法,用于电力系统低频振荡信号特征的提取,特别是对非平稳信号的处理具有有效性和准确性。而且随机子空间方法具有参数少、抗噪能力较强、分辨率较高、拟合效果较好等优点,满足低频振荡辨识和系统振荡分析的需要。小波预处理技术在提高精确度的同时,也降低了分析速度。

参考文献

- [1] Klein M, Rogers G J, Kunder P. A Fundamental Study of Inter-area oscillations in Power Systems [J]. Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.
- [2] Task Force of Advisory Group 01 of Study Committee 38. GIGRE Technical Brochure on Analysis and Control on Power System Oscillation [R]. Paris: GIGRE Special Publication, 1996.
- [3] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 22(10): 59-63.
- [4] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别 [J]. 电网技术, 2009, 33(5):

44-47.

- [5] Wies R W, Pierre J W, Trudnowski D J. Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-frequency Electromechanical Modes of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 167-173.
- [6] 韩松, 何利铨, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 56-60.
- [7] Ghasemi H, Canizares C, Moshref A. Oscillatory Stability Limit Prediction Using Stochastic Subspace Identification [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(2): 736-745.
- [8] 陈卓. 工况模态分析在低频振荡辨识中的应用初探 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 34-37.
- [9] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [10] D. L. Donoho. De-noising by Soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [11] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1250-1257.
- [12] Carl T. The What, How, and Why of Wavelet Shrinkage Denoising [J]. Computing in Science & Engineering, 2000, 2(3): 12-19.
- [13] Hilton L, Ogden T. Data Analytic Wavelet Threshold Selection in 2-D Signal Denoising [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(2): 496-500.
- [14] Van Overschee Peter, De Moor Bart. Subspace Algorithms for the Stochastic Identification Problem [C] // The IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, England: 1991. (收稿日期: 2013-08-26)

(上接第 4 页)

- [3] Lie Xu, Liangzhou Yao, Christian Sasse. Grid Integration of large DFIG-Based Wind farms Using VSC Transmission [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1952-1961.
- [4] Dorn J, Huang H, Retzmann D. Novel Voltage Source Converters for HVDC and FACTS Applications [C]. Conf. CIGRE Symposium, Osaka, Japan, 2007.
- [5] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-75.
- [6] Bin Lu, Boon-Teck Ooi. Nonlinear Control of Voltage-source Converter System [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22(4): 1186-1195.
- [7] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.

- [8] Beerten, J., Van Hertem, D., Belmans, R. VSC MTDC System with a Distributed DC Voltage Control - A Power Flow Approach [C]. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim: 1-6.
- [9] 梁盟. 柔性多端直流输电的控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [10] TANG, Lian-xiang, Ooi B T. Protection of VSC-Multi-Terminal HVDC against DC Faults [C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference. 2002: 719-724.

作者简介:

伍欣(1986), 硕士研究生, 主要研究方向为高压柔性直流输电;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2013-11-19)

基于小波去噪和随机子空间算法的 广域低频振荡估计

刘 畅 李长松 李华强 许海青
(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 电网规模的日益扩大使得广域低频振荡成为电力系统稳定运行中备受关注的问题之一, 提出了一种利用小波软阈值去噪技术, 首先对电力系统低频振荡数据进行预处理, 然后采用随机子空间算法提取低频振荡信号特征的分析方法。该方法直接利用在线量测数据识别出系统的低频振荡及其特征参数, 有效地克服 Prony 算法、自回归滑动平均算法及希尔伯特-黄等算法受噪声、系统实际阶数的影响大以及单一随机子空间辨识算法难以处理非线性、非平稳振荡信号的缺点。数值仿真及实例分析均验证了基于小波预处理技术的随机子空间算法在电力系统低频振荡分析中的可行性。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 区间振荡; 随机子空间算法; 小波软阈值; 去噪

Abstract: With the development of power grid, the inter-area low-frequency oscillations become one of the increasing concerns in the stable operation of power system. A method using wavelet soft threshold denoising technology is proposed. Firstly, the low-frequency oscillation data of power system is preprocessed, and then the characteristics of low-frequency oscillation signal are extracted by stochastic subspace algorithm. This method identifies the low-frequency oscillation and its characteristic parameters based on on-line measurement data directly, and effectively overcomes the defects that Prony algorithm, autoregressive and moving average (ARMA) algorithm and Hilbert-Huang transform algorithm are influenced by noise and actual order number of the system as well as the shortcomings that it is difficult for single stochastic subspace to deal with nonlinear and non-stationary oscillation signals. The feasibility of applying the proposed method to the analysis on low-frequency oscillation of power system is verified by numerical simulation and instance analysis.

Key words: power system; low-frequency oscillation; inter-area oscillation; stochastic subspace algorithm; wavelet soft threshold value; denoising

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0005-05

0 引 言

随着大型机组快速励磁系统的采用以及电力系统规模的不断扩大、互联, 低频振荡问题日益突出, 严重威胁着电力系统的安全稳定运行。按照振荡的频率和涉及的范围, 低频振荡通常划分为两种形式: 局部模式和广域模式^[1-2]。其中, 广域模式为区域间振荡, 即系统中某区域机群与另一区域机群的相对振荡。相对于局部模式, 该模式的成因、影响因素和控制都更为复杂, 且对系统稳定的破坏程度大, 因而更值得运行人员关注。近年来, 随着相量测量装置 (phasor measurement unit, PMU) 的彻底实用化以及基于 PMU 的广域相量测量系统 (WAMS) 的逐步

基金项目: 四川大学青年教师科研启动基金 (No. 2011SCU11001)

建成并在电力系统中应用, 使得利用在线的广域向量测量数据进行广域低频振荡分析成为可能^[3]。目前通过分析实测数据识别和分析低频振荡模式的方法有 Prony 算法^[4]、自回归滑动平均 (autoregressive and moving average, ARMA) 算法^[5]和希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT)^[6]等先进的数学方法, 通过对某一局部动态观测信息的信号处理, 分析系统的低频振荡现象。但上述方法存在受噪声信号影响较大, 系统阶数确定困难, 容易出现伪模态和计算过程复杂、耗时长等缺点。

随机子空间辨识 (stochastic subspace identification, SSI) 算法能够从实测振荡信号中提取振荡频率及阻尼比的同时还能够获得相应的振型信息, 文献 [7-8] 对随机子空间辨识方法在电力系统低频振荡分析中的应用做了初步的探索。但建立在线性系

统理论以及所受扰动为平稳信号假设的基础上的随机子空间辨识方法在处理非线性、非平稳的电力系统实测振荡信号方面的有效性和准确性有待研究和验证。鉴于小波分析^[9]能以不同的小波变换尺度,将信号分解成不同的频段分量,具有良好的时、频局域性,在处理非平稳信号时具有良好的效果,因此,结合小波去噪和随机子空间辨识算法,开展电力系统低频振荡在线分析的研究。

1 小波去噪

在小波变换应用中,目前主要有硬阈值和软阈值去噪方法^[10]。由于噪声信号强度的随机性,以及小波分解过程中信号与噪声的传播特性不同,每一层小波分解系数所采用的阈值应该是随小波系数的变化而变化的,能实现这种变动阈值的方法就是软阈值去噪方法,而硬阈值算法^[11]由于其自身缺陷而不适用于实际场合。软阈值去噪方法近年来得到很大发展,其去噪效果被证明是很有效的。

1.1 小波软阈值消噪原理

含有噪声的一维信号可以表示成如下形式。

$$s(i) = f(i) + u(i) \quad (1)$$

其中 $f(i)$ 为真实信号; $u(i)$ 为高斯白噪声; $s(i)$ 为含噪声的信号。对信号 $s(i)$ 进行消噪的目的就是要抑制信号中的噪声部分,从而在 $s(i)$ 中恢复出真实信号 $f(i)$ 。在实际工程中,有用信号通常表现为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现为高频信号。一般来说,一维信号的消噪算法可以分为 3 个步骤进行:①对信号进行小波分解;②小波分解高频系数的阈值量化;③对信号进行重构。

在这 3 个步骤中,最关键的一步就是如何选取阈值方式和如何进行阈值的量化,从某种程度上来说,它直接关系到信号消噪的质量。

1.2 软阈值的选取

软阈值的选取方法很多^[12]。经比较,下面采用启发式阈值(heursure)方法,它是在通用阈值和无偏风险阈值的基础上进行计算的,这种方法阈值风险较小,有用信号不易丢失。具体计算原理和计算步骤如下^[13]。

(1) 噪声强度的计算

噪声强度的计算可采用以下公式。

$$\sigma = \frac{1}{0.6745N} \sum_{i=0}^{N-1} |D_i^k| \quad (2)$$

式中 D_i^k 为第 k 层小波系数 ($1 < k < M$); N 为该层小波系数的个数; M 为小波分解最高次数。

(2) 通用阈值的计算

通用阈值计算的理论依据是: N 个具有独立同分布的标准高斯变量中的最大值小于 T_1 的概率随着 N 的增大而趋于 1。其中 T_1 由式(3)来计算。

$$T_1 = \sigma(2 \ln N)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 σ 为噪声强度; N 为所处理的变量的个数。

(3) Stein 无偏风险阈值的计算

将某一层小波系数的平方按由小到大排列,得到一个向量: $W = [w_1, w_2, \dots, w_N]$, 其中 $w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_N$, N 为小波系数的个数。由此计算风险向量 $R = [r_1, r_2, \dots, r_N]$, 其中

$$r_i = \frac{n - 2i + (n - i) w_i + \sum_{k=1}^i w_k}{N} \quad (4)$$

以 R 元素中的最小值 r_b 作为风险值,由 r_b 的下标变量 b 求出对应的 w_b , 则阈值 T_2 为

$$T_2 = \sigma(w_b)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(4) 启发式阈值的计算

计算 $H_w = \sum_{i=1}^N w_i^2$, 令 $\eta = (H_w - N)/N$ 和 $u = (\log N)^{3/2} N^{1/2}$ 则有

$$T_3 = \begin{cases} T_1 & \eta < u \\ \min(T_1, T_2) & \eta \geq u \end{cases} \quad (6)$$

最终的软阈值就是 T_3 。

1.3 非平稳信号的小波软阈值去噪

在实际的工程应用中,大多数信号可能包含着许多尖峰或突变,而且噪声信号也并不是平稳的白噪声。对这种信号进行去噪处理时,传统的傅里叶变换完全是在频域中对信号进行分析,它不能给出信号在某个时间点上的变化情况,因此分辨不出信号在时间轴上的一个突变。但是小波分析能同时在时频域内对信号进行分析,所以它能有效地区分信号中的突变部分和噪声,从而实现对非平稳信号的去噪。如图 1 所示,使用小波软阈值去噪方法对一个含噪的矩形波信号进行去噪处理,说明此方法对非平稳信号具有良好的去噪效果。

2 随机子空间理论

2.1 随机子空间思想

随机子空间辨识^[14]方法是近年来发展的一种线性系统辨识方法,可以有效地从环境激励的系统响应中获取模态参数。它采用简单可靠的数学工具如矩阵的正交三角分解 QR(QR factorization) 和奇异值分解 SVD(singular value decomposition) 获取状态矩阵及其特征值,结合最小二乘法,得到信号的振荡参数。

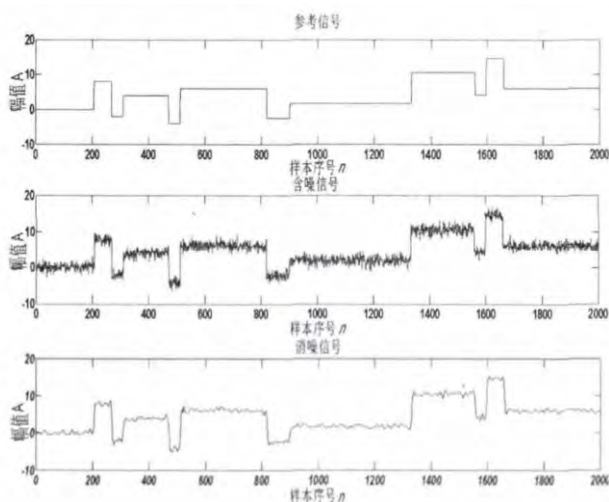


图 1 含噪矩形波的去噪结果

在实际应用中,量测数据在时间上都是离散的,所以经离散采样后,可得如下随机状态空间系统。

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (7)$$

式中 A 为系统矩阵; C 为输出矩阵; w_k 、 v_k 分别为零均值过程噪声和测量噪声,且互不相关。根据输出数据 y_k 可构造 Hankel 矩阵 $Y_{0/2i-1}$,如式(8)。

$$Y_{0/2i-1} = \frac{1}{\sqrt{f}} \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,下标 $0/2i-1$ 表示 Hankel 矩阵第一列的第一块行和最后一块行的下标,下标 p 和 f 分别表示“过去”和“将来”。

定义输出 y_k 自协方差矩阵 R_i 为

$$R_i = E[y_{k+1}y_k^T] \quad (9)$$

由协方差序列组成的 Toeplitz 矩阵 $T_{1/i}$ 为

$$T_{1/i} = Y_f Y_p^T \quad (10)$$

对 Toeplitz 矩阵进行奇异值分解,秩为非零的奇异值个数,亦为系统的阶数。

$$T_{1/i} = USV^T = \begin{pmatrix} U_1 & U_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (11)$$

$T_{1/i}$ 可分解为 $T_{1/i} = O_i \Gamma_i$,其中 O_i 为可观矩阵; Γ_i 为反转随机可控矩阵。根据上式可得如下系统矩阵 A 和 C 。

$$A = S_1^{-\frac{1}{2}} U_1^T V_1^T S_1^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$C = O_i(1:l) \quad (13)$$

2.2 模态识别

得到系统状态矩阵 A 后,对其进行特征值分解: $\Psi^{-1} \Lambda \Psi = A$,获得系统的特征值 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$),设采样时间间隔 Δt ,则信号的频率 f_i 和阻尼比 ξ_i 以及振型 Φ 为

$$f_i = \arg \lambda_i / (2\pi \Delta t) \quad (14)$$

$$\alpha_i = 1/n |\lambda_i| / \Delta t \quad (15)$$

$$\xi_i = \alpha_i / \sqrt{a_i^2 + (2\pi f_i)^2} \quad (16)$$

$$\Phi = C \psi \quad (17)$$

综上所述,随机子空间算法根据系统的输出数据,可以识别出电力系统线性化模型 $\{A, C\}$,进一步即可识别全部振荡参数。

2.3 随机子空间算法的有效性分析

按下式产生一理想信号。

$$\begin{aligned} x = & 160.74e^{-0.15t} \cos(2\pi \times 0.46t + 1.32) \\ & + 173.38e^{-0.452t} \cos(2\pi \times 1.53t + 0.86) \end{aligned} \quad (18)$$

此信号包含两个振荡模式。在此信号上叠加一个噪声强度为 2 dBm 的高斯白噪声作为测试信号来验证算法的有效性。信号的时间长度为(0~10) s,采样频率为 20 Hz(采样间隔 0.05 s)。经奇异值分解计算可知随机子空间辨识过程的阶数应定为 4 阶,然后得到系统状态矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 0.9270 & 0.1354 & 0.3052 & -0.0513 \\ -0.1726 & 0.9201 & 0.0975 & 0.3114 \\ -0.2368 & -0.1588 & 0.9257 & 0.1388 \\ 0.1748 & -0.2356 & -0.1734 & 0.9227 \end{bmatrix} \quad (19)$$

最终辨识结果与理论值的比较见表 1。

通过比较发现,此方法能较准确地辨识出信号

各模式的频率、阻尼比,具有很高的频率分辨率。

表 1 随机子空间法辨识结果与理论值比较

模式	取值	频率/Hz	阻尼比/%
1	理论值	0.46	5.19
	计算值	0.458 8	5.57
2	理论值	1.53	4.68
	计算值	1.529 6	4.89

3 仿真实例

算例采用 IEEE 16 机 68 节点系统^[14]如图 2 所示。系统可划分为 5 个区域: Group 1,新英格兰(G1 ~ G9); Group 2,纽约(G10 ~ G13); Group 3,等效机组 G14; Group 4,等效电机 G15; Group 5,等效电机 G16。系统中存在着 3 个弱阻尼的互联振荡模式,分别为 0.37、0.5、0.61 Hz。表 2 给出了传统小干扰特征根的分析结果。

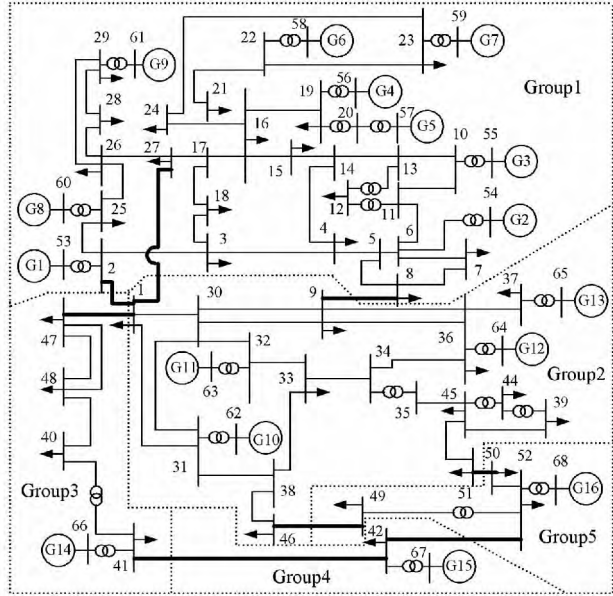


图 2 16 机 68 节点系统图

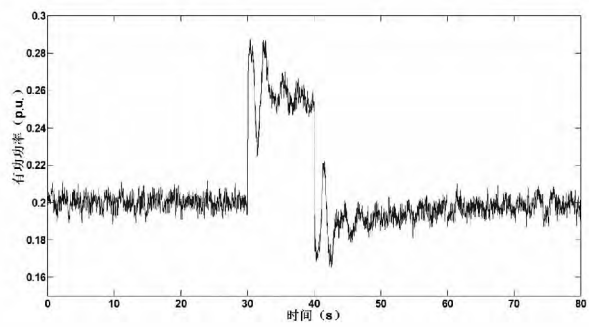


图 3 联络线上有功波动

在系统正常运行方式下,模拟在母线 9 上增加随机负荷, $t = 30\text{ s}$ 时增加一个 0.1 p. u. 的阶跃负荷, $t = 40\text{ s}$ 时去除阶跃负荷,以形成非平稳信号。记录联络线 8 ~ 9 上传送的有功功率,采样间隔为 0.1 s,分析 0 ~ 100 s 间数据,其波形见图 3。

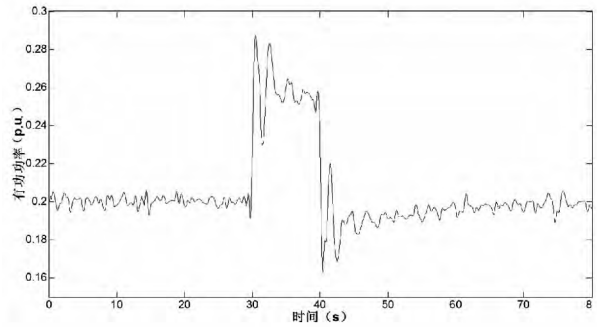


图 4 去噪后有功波动

应用小波启发式软阈值方法对采样数据进行去噪处理(见图 4),然后用随机子空间法辨识振荡的主导模式,并与未采用小波去噪的分析结果对比,结果见表 3。图 5 给出了辨识得到的 3 个模式的模态图(横坐标为发电机号,纵坐标为幅值),从图中可以看出频率为 0.384 6 的互联振荡模式的参与机组有 Group 1 ~ Group 5,频率为 0.511 2 的互联振荡模式的主要参与机组有 Group 3、Group 5,频率为 0.648 5 的互联振荡模式的主要参与机组有 Group 1、Group 2。

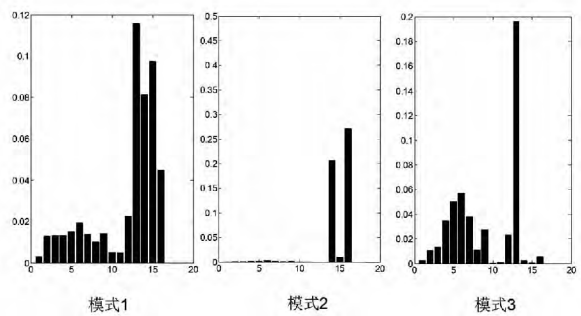


图 5 模态图

表 2 弱阻尼的互联模式

模式	特征值	频率 /Hz	阻尼比 /%	主要参与区域
1	$-0.038 1 \pm 2.385 3i$	0.379 7	1.60	Group 1 ~ Group 5
2	$-0.079 8 \pm 3.274 3i$	0.521 3	2.44	Group 3、Group 5
3	$-0.167 9 \pm 4.127 9i$	0.657 5	4.06	Group 1、Group 2、Group 4

由表 3 可以看出,联络线上的有功发生了频率分别为 0.384 6 Hz、0.511 2 Hz、0.648 5 Hz 的低频振荡,为区间振荡模式,印证了随机子空间法的正确性,而且小波去噪的去噪处理起到了较好的效果,此

方法在处理非平稳信号时具有很大优势,较适合对实际大电网的实测信号的分析。

表 3 去噪后分析结果与未去噪分析结果及理论值比较

模式	频率/Hz			阻尼比/%		
	去噪前	去噪后	理论值	去噪前	去噪后	理论值
1	0.401 2	0.384 5	0.379 7	2.21	1.52	1.60
2	0.537 6	0.511 3	0.521 3	4.21	2.29	2.44
3	0.620 9	0.648 5	0.657 5	3.66	4.17	4.06

4 结 论

提出了一种利用小波去噪技术对振荡数据进行预处理,然后运用随机子空间方法对数据进行分析的新方法,用于电力系统低频振荡信号特征的提取,特别是对非平稳信号的处理具有有效性和准确性。而且随机子空间方法具有参数少、抗噪能力较强、分辨率较高、拟合效果较好等优点,满足低频振荡辨识和系统振荡分析的需要。小波预处理技术在提高精确度的同时,也降低了分析速度。

参考文献

- [1] Klein M, Rogers G J, Kunder P. A Fundamental Study of Inter-area oscillations in Power Systems [J]. Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.
- [2] Task Force of Advisory Group 01 of Study Committee 38. GIGRE Technical Brochure on Analysis and Control on Power System Oscillation [R]. Paris: GIGRE Special Publication, 1996.
- [3] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 22(10): 59-63.
- [4] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别 [J]. 电网技术, 2009, 33(5):

44-47.

- [5] Wies R W, Pierre J W, Trudnowski D J. Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-frequency Electromechanical Modes of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 167-173.
- [6] 韩松, 何利铨, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 56-60.
- [7] Ghasemi H, Canizares C, Moshref A. Oscillatory Stability Limit Prediction Using Stochastic Subspace Identification [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(2): 736-745.
- [8] 陈卓. 工况模态分析在低频振荡辨识中的应用初探 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 34-37.
- [9] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [10] D. L. Donoho. De-noising by Soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [11] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1250-1257.
- [12] Carl T. The What, How, and Why of Wavelet Shrinkage Denoising [J]. Computing in Science & Engineering, 2000, 2(3): 12-19.
- [13] Hilton L, Ogden T. Data Analytic Wavelet Threshold Selection in 2-D Signal Denoising [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(2): 496-500.
- [14] Van Overschee Peter, De Moor Bart. Subspace Algorithms for the Stochastic Identification Problem [C] // The IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, England: 1991. (收稿日期: 2013-08-26)

(上接第 4 页)

- [3] Lie Xu, Liangzhou Yao, Christian Sasse. Grid Integration of large DFIG-Based Wind farms Using VSC Transmission [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1952-1961.
- [4] Dorn J, Huang H, Retzmann D. Novel Voltage Source Converters for HVDC and FACTS Applications [C]. Conf. CIGRE Symposium, Osaka, Japan, 2007.
- [5] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-75.
- [6] Bin Lu, Boon-Teck Ooi. Nonlinear Control of Voltage-source Converter System [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22(4): 1186-1195.
- [7] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.

- [8] Beerten, J., Van Hertem, D., Belmans, R. VSC MTDC System with a Distributed DC Voltage Control - A Power Flow Approach [C]. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim: 1-6.
- [9] 梁盟. 柔性多端直流输电的控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [10] TANG, Lian-xiang, Ooi B T. Protection of VSC-Multi-Terminal HVDC against DC Faults [C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference. 2002: 719-724.

作者简介:

伍欣(1986), 硕士研究生, 主要研究方向为高压柔性直流输电;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2013-11-19)

不同控制方式对交直流系统潮流计算的影响

陶奕衫, 闫广新

(新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 不同控制方式直接影响交直流网架的潮流计算结果, 针对典型的交直流混合输电系统, 给出了直流换流站的几种换流控制方式, 分别讨论了典型 3 机 7 节点的交直流输电系统在不同控制方式下的潮流计算, 针对不同控制方式的潮流计算结果进行了比较分析。仿真结果表明, 不同控制方式下交直流系统潮流结果存在一定差异, 每种控制方式有各自特点, 对实际计算提供了理论指导依据。

关键词: 高压直流输电; 潮流计算; 控制方式

Abstract: Different control modes will directly affect the power flow calculation results of AC-DC network frame, for a typical AC/DC hybrid system, several control modes for HVDC converter station are presented, the power flow calculation is discussed under different control modes in a typical 3-generator 7-bus AC-DC transmission system, and the calculation results based on different control modes are compared and analyzed. The simulation results show that there are some differences in power flow calculation results of AC-DC system and each control mode has its own characteristics, which provides a theoretical basis for the actual calculation.

Key words: HVDC; power flow calculation; control mode

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0010-03

0 引言

中国东部沿海地区经济发达, 负荷密集, 而能源中心却位于西部, 这就造成了供需矛盾, 能源与负荷发展极不平衡。发展高压、大容量、远距离输电就变得势在必行, 为了提高电网的稳定性与安全性, 各电网之间的互联已经进入了实施阶段^[1]。单纯交流输电在远距离输电时也存在其局限性, 成本高、网损大, 在非频率或非同步的互联电网中存在一定的缺陷。因此, 无论是经济上还是技术上, 高压直流输电都比交流电网有优势。随着全国电网互联的完成, 高压直流输电必将在西电东送中发挥重要作用。

换流站是高压直流输电系统的核心部分, 换流站灵活、多变的控制策略是保证直流输电系统安全稳定运行的前提条件。文献[2]详细介绍了 6 种主要的换流站控制方式。文献[3]对一种慢速控制方式进行了研究: 交直流混合系统变压器分接头控制, 并对分接头控制进行了数学建模。文献[4]对考虑多种控制方式的高压直流系统的潮流进行了计算。

在实际运行中, 不同控制方式下直流输电系统的潮流存在很大的差异, 整流、逆变的控制方式直接影响潮流结果, 快速控制与慢速控制的配合也对潮流的结果有一定影响。下面对几种控制方式进行了研究, 对比了电压波动下的潮流结果, 对其优缺点进行了分析, 并对潮流影响的程度进行了定量分析。

1 换流器数学模型

1.1 换流器的数学表达

高压直流输电的核心是换流器, 直流系统建模的实质就是换流器的建模。图 1 为交直流系统等效电路图^[5], 交流电通过整流、逆变形成完整的传送过程, X_c 、 R_d 分别为等效漏抗和直流电阻; U_d 、 I_d 分别为直流电压与直流电流。

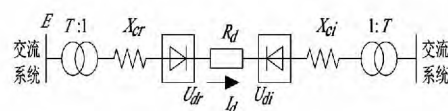


图 1 交直流系统等效图

换流器稳态数学模型^[6 7]如下。

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T} E \\ I_d = \frac{U_{dor} \cos \alpha - U_{doi} \cos \beta}{3X_{Tr}/\pi + R_d + 3X_{Ti}/\pi} \\ U_d = U_{d0} \cos \alpha - 3X_{Tr} I_d / \pi \\ P_{ac} = U_d I_d \\ \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_T}{E} + \cos \beta \right) \\ \beta = \pi - \alpha \\ \gamma = \beta - \mu \\ \cos \varphi = \frac{\pi U_d}{3\sqrt{2} E} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 r 代表整流侧; i 代表逆变侧; α 为整流器触发角; β 为逆变器触发超前角; γ 为熄弧角; μ 为换相角; φ 为功率因数角; T 为换流变压器变比; U_{d0} 为空载直流电压; U_d 为直流侧电压; I_d 为直流电流; P_{dc} 为直流输送功率。

1.2 换流变压器变比计算

潮流计算时,通常需要考虑有载调压变压器的抽头级数,此时的实际变比为与抽头级数有关,如式(2)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{E}{E_N} \times \frac{U_{d0N}}{U_{d0}} \\ TC = \frac{\eta - 1}{\Delta \eta} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 η 为变比; TC 为抽头级数; E_N 、 U_{d0N} 分别为交流侧母线额定电压和额定空载直流电压; $\Delta \eta$ 为换流变压器分接头步长。

2 控制方式

2.1 栅/门极控制

直流系统中,对直流侧电压和电流的控制响应速度较快,通常只有 1 ~ 4 ms,也称为快速控制,常用的 6 种控制模式有:定电压控制(CV)、定电流控制(CC)、定功率控制(CP)、整流器定触发角控制(CN)或逆变器定熄弧角控制(CEA)、定角控制和无功功率控制。

有时为了避免在系统故障时由于电压过低而造成的危害,还有两种保护性的控制模式:最小触发角限值控制和低电压限电流控制。

这里主要针对以上 6 种控制方式,分析研究它们在整流和逆变侧不同组合方式下的优缺点,为实际计算提供理论依据。

2.2 分接头控制

换流变压器分接头控制又叫慢速控制,调节时间较长,通常为 5 ~ 10 s。它起到对换流变压器有载调压分接头控制、调节的目的。这样就能将整流器或逆变器的角度维持在一定范围内,使直流电压或换流变压器侧绕组空载电压在正常的范围内。因此,在实际控制中要对快速控制和慢速控制合理配合。

3 算例分析

采用典型 3 机 7 节点交直流混联系统对潮流进行计算,系统图如图 2 所示。

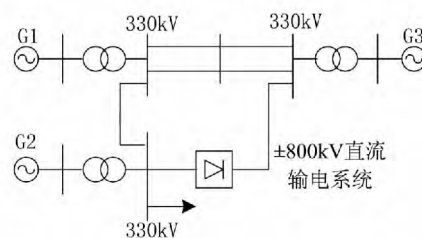


图2 3机7节点交直流系统图

模型为 330 kV 和 ± 800 kV 交直流混联系统,该模型具体参数如下:直流系统 $I_N = 1.2$ kA, $U_N = 800$ kV, $P_N = 960$ MVA, $R = 19.8$ Ω; 触发角 $\alpha = 15^\circ$; 熄弧角 $\gamma = 15^\circ$; 换流变压器整流侧和逆变侧漏抗分别为 18.43 Ω、15.0 Ω。针对该模型,分别对所提到的几种控制方式组合,采用交替迭代法计算潮流。

下面对不同控制方式组合进行分析。

(1) α 角、 β 角固定。整流侧 α 角和逆变侧 β 角固定时,该方式下的潮流结果如表 1 所示。

表 1 整流侧角 逆变侧角固定时潮流结果

E/kV	I_d/kA	U_{d0}/kV	U_d/kV	P_{ac}/MW
371.95	1.20	759.23	721.0	911.07
372.27	1.20	770.48	732.3	924.57
373.10	1.12	777.31	741.6	870.58
373.38	1.05	783.63	732.0	822.81

计算结果表明,交流侧电压波动时,直流侧电流较为敏感。交流电压升高约为 2 kV 时,直流电流由 1.2 kA 跌落至 1.05 kA,直流侧电压升高约 24 kV,传输功率减小 89 MW。

由式(1)可知,当 α 、 β 固定时,空载直流电压正比于交流电压,且随交流侧变化波动较大,由此可以看出,在 α 、 β 固定时的直流系统稳定性差,不建议在实际工程中采用。

(2) α 角、 γ 角固定。整流侧 α 角和逆变侧 γ 角固定时,该方式下的潮流结果如表2所示。

表2 整流侧角、逆变侧角固定时潮流结果

E/kV	I_d/kA	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV
370.87	1.2	777.63	739.47
367.74	1.3	777.07	759.85
364.58	1.4	775.76	735.76
361.34	1.5	773.84	726.16
358.08	1.6	771.44	720.56

计算结果表明,直流侧电流波动时,逆变侧电压较为敏感。当直流侧电流略有增加,逆变侧和整流侧电压都会下降,但逆变侧下降幅度远大于整流侧。直流侧电流升高越多,整流和逆变侧的压差就越大,进而使电流进一步增加,这种恶性循环将严重影响电网安全。

(3) 电流 I_d 、 γ 角固定。整流侧电流 I_d 和逆变侧 γ 角固定时该方式下的潮流结果如表3所示。

表3 整流侧 I_d 、逆变侧 γ 固定时角潮流结果

E/kV	$\alpha/(\circ)$	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV	P_{ac}/MW
370.88	14.8	776.63	739.47	931.95
368.82	16.1	777.52	739.36	933.02
366.60	16.9	777.44	739.23	932.92
364.31	18.0	777.31	739.12	932.77
361.85	19.2	777.20	738.99	932.64

计算结果表明,交流侧电压波动时,直流侧电流、电压、功率基本稳定,变化不大。当整流侧电流 I_d 和熄弧 γ 角固定时,交流侧电压波动 α 角可自我调节。由式(1)可知,直流侧电压、功率也不随交流侧电压波动而变化,这种控制方式能提供持续、稳定的功率输出,是较为合理的控制方式。

(4) α 角、 I_d 固定。整流侧 α 角和逆变侧电流 I_d 固定时,该方式下的潮流结果如表4所示。

计算结果表明,交流侧电压波动时,通过调整熄弧角可使直流侧电流保持恒定,但电压会有波动。由式(1)可知, α 角、 I_d 固定,交流侧电压直接影响直流侧。这种控制方式适用于整流侧电压骤降或逆变侧电压上升的情况。

表4 整流侧角、逆变侧 I_d 固定时潮流结果

E/kV	$\gamma/(\circ)$	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV
373.97	17.7	777.08	742.12
376.28	18.9	771.44	736.44
378.69	20.0	779.88	730.48
381.30	20.9	759.24	724.28

(5) I_d 、 U_d 固定。整流侧电流 I_d 和逆变侧电压 U_d 固定时,该方式下的潮流结果如表5所示。

表5 整流侧 I_d 、逆变侧 U_d 固定时潮流结果

E/kV	$\alpha/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$
372.62	15.0	18.00
373.77	15.5	18.80
375.60	17.0	20.00
377.03	18.0	21.00
377.39	18.5	21.65

计算结果表明,交流侧电压扰动时,直流侧电压、电流基本维持稳定,是较为理想的控制方式。计算数据表明,交流电压扰动,熄弧角变化明显,实际采用中应该综合考虑利弊。

(6) P_d 、 γ 角固定。整流侧功率 P_d 和逆变侧 γ 角固定时,该方式下的潮流结果如表6所示。

表6 整流侧 P_d 、逆变侧 γ 角固定时潮流结果

E/kV	U_{d0r}/kV	$\alpha/(\circ)$	I_d/kA	P_{ac}/MW
346.76	752.83	15.0	2.00	1 505.66
341.78	771.95	14.1	1.95	1 505.30
336.41	792.64	13.5	1.90	1 506.01

计算结果表明,直流侧电压波动时,换流站调整 α 角,从而改变整流侧电流 I_d ,使输出功率保持稳定。该控制方式适合恒功率传送,但交流侧电压波动过大时可能导致换流器过电流。

4 结 论

对不同控制方式下交直流混联系统的潮流计算进行了研究,分析了各种控制方式下的优缺点,结果表明:对于高压直流输电系统而言,逆变侧定角或定电压,整流侧定功率或定电流控制,在理论上是较为合适的控制方式,但在实际控制中要根据具体情况采用不同控制方式相互配合,所做研究对实际工程提供了理论依据。

(下转第46页)

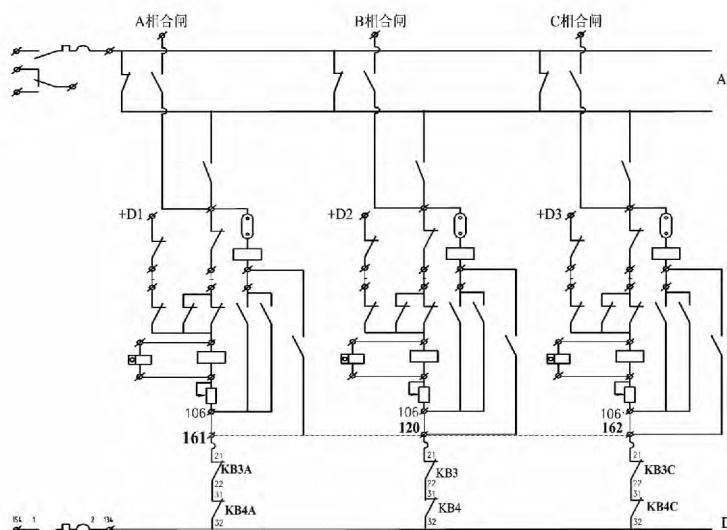


图 3 开关汇控箱 SF₆ 空压低、油压纸闭锁各闸连线

置具备分相重合的功能,还应特别注意开关传动试验的验收,重点检查控制回路是否满足分相闭锁合闸的要求,以确保自适应重合闸分相顺序重合功能的实现。

(2) 液压机构断路器采用油压储能,储能效果极易受到气候、零部件的工艺条件等因素的影响而造成压力不足够支持断路器实现分-合-分的循环操作,导致重合闸不成功,在运行中应特别注意加强对液压系统的检查,保证设备运行条件的良好性。

参考文献

- [1] 郑玉平,黄震,张哲,等.同杆并架双回线自适应重合闸的研究[J].电力系统自动化,2004,28(22):58-62.

- [2] 郑玉平,张哲,等.同杆双回线的继电保护及自动重合闸.第二十八届中国电网调度运行会议论文集[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.
- [4] 朱建红,陈福锋,等.新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J].电力自动化设备,2007,27(4):31-33.
- [5] 沈军,张哲,郑玉平,等.500 kV 同杆双回线自适应重合闸方案[J].电力设备,2006,7(1):20-23.
- [6] 梁懋,钟泽章,殷光辉,等.JCJZ-21A 型多相重合闸装置[J].电力自动化设备,1990,3(1):43-54.

作者简介:

李利红(1984),工程师,技师,从事变电运行工作。

(收稿日期:2013-08-19)

(上接第 12 页)

参考文献

- [1] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌.交直流混合输电系统的换流变压器分接头控制[J].电网技术,2006,9(30):22-27.
- [4] 杨彬,叶鹏,孙保功,等.多种控制方式下 HVDC 系统的潮流计算[J].电网技术,2010,34(6):139-143.
- [5] 陈厚合,李国庆,姜涛.控制方式转换策略下的改进交

直流系统潮流算法[J].电网技术,2011,35(8):93-98.

- [6] 胡金磊,张尧,李聪.交直流电力系统概率潮流计算[J].电网技术,2008,32(18):36-40.
- [7] 倪以信.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 王毅,侯俊贤,马士英,等.用于调度计划安全稳定校验的潮流自动整合调整方法[J].电网技术,2010,34(4):100-104.

作者简介:

陶奕彩(1971),工程师,主要从事电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2013-09-17)

电力系统运行动态监视的可视化设计与实现

王 波¹ 杨洪耕²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司 江苏 南京 210061; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要: 基于新一代的智能电网调度技术支持系统的可视化技术平台对电力系统运行动态监视的可视化功能进行了整体方案的设计与应用效果的实现。详细介绍了基于 WAMS 系统功能的电网动态监视可视化功能实现的整体流程框架、总体界面设计以及各应用功能的可视化效果等。在江苏智能电网调度系统中的应用表明,该电网运行动态监视可视化功能能够实现电力系统动态运行状态高效、精准的监视与告警,能够让运行人员快速、直观地掌握重要的电网动态运行信息。

关键词: 智能电网调度; WAMS; 动态监视; 可视化; 动态运行信息

Abstract: Based on the new generation of visualization platform of the dispatching technical support system for smart power grid, an overall scheme design and application implementation of the visualization for power system dynamic monitoring is presented. The overall visualization process framework, the overall interface design and the visual effects of each application function for power system dynamic monitoring based on wide-area measurement system (WAMS) are introduced in detail. Its application to the dispatching system of Jiangsu smart power grid show that the visualization functions can realize an efficient and accurate monitoring and alarming for the dynamic operating condition of power system and help the operators to grasp the important operation information of power system quickly and intuitively.

Key words: smart power grid dispatching; WAMS; dynamic monitoring; visualization; dynamic operation information

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0013-06

0 引 言

随着电网的发展和电力市场的推进,电力系统运行的复杂程度日益增大,作为电网动态实时监测的新技术和重要手段,广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)对电网的安全稳定运行发挥了重要的作用。然而在目前现有的基于 WAMS 应用功能的电网运行动态监视系统中,由于反映系统运行状态及电网事件的各类关联信息相对分散,使得调度员不得不通过频繁的界面操作与切换才能获取电网动态运行状态以及处理事件的完整信息,缺少有效、直观的显示方式来表现复杂、大量的动态关联信息,影响了调度决策和事件处理。

近年来,随着可视化技术的发展及其在电力系统中的逐步应用,为解决电网动态运行监控的上述问题提供了新颖而可行的手段。基于南瑞公司在新一代智能调度技术支持系统上开发的可视化平台提出电网运行动态监视完整应用功能的可视化整体设计与实现方案。它通过将电网运行动态越限信息、

扰动信息、低频振荡等事故信息与可视化平台相整合,借助于信息面板、事件总揽和多主题窗口的分层、分级展示,实现了电网事件的一键式浏览与查阅,便于调度人员从整体上快速把握当前电网的运行状态,很好地满足了调度运行监控对事件关联信息的图形化需求,为使用人员提供了直观、快速的事件处理手段。

1 可视化功能设计

1.1 整体功能框架

基于 WAMS 系统应用功能的电网运行动态监视可视化功能主要可分为两部分,即:告警信息的汇总可视化展示和非告警类应用功能可视化展示。电网运行动态监视各相关后台应用通过将各自的告警信息或重要运行信息发送给对应的可视化功能模块实现各自可视化效果的展示,其整体功能流程如图 1 所示。

其中,“告警信息汇总可视化展示”汇集罗列了当前整个 WAMS 系统主要应用功能的重要告警信

息,使得运行人员一目了然地掌握当前 WAMS 系统的所有应用告警情况,目前主要包括:动态越限监视可视化(电压越限、功率越限、相对相角越限、功角越限、频率越限)、在线扰动识别可视化(短路扰动、非全相运行、非周期并网、直流闭锁)、低频振荡监视可视化以及动态电压/频率裕度可视化。

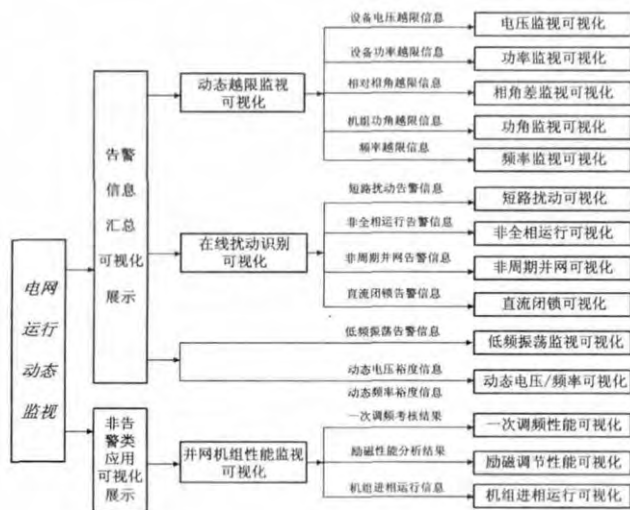


图 1 电网运行动态监视可视化整体功能流程

而“非告警类应用功能可视化展示”是指该类应用信息不参与“电网动态监视”整体可视化告警状态的判断与展示,目前主要为并网机组性能监视可视化功能,包括:一次调频性能监视可视化、励磁调节性能监视可视化以及机组进相运行监视可视化的展示。

1.2 总体界面设计

基于新一代智能调度技术支持系统的南瑞可视化平台框架,电网运行动态监视可视化总体界面功能主要由 4 个部分组成,如图 2 所示。

(1) 告警信息总览面板

它通过不同颜色实时反映电网运行动态监视整体应用功能状态。

当动态监视无任何类型告警信息时,面板显示为绿色;而当该出现任一般性告警时,显示为黄色,出现严重告警时显示为红色;而当该应用运行状态异常时则显示为灰色,如图 2 中标识区域 1。

(2) 动态告警信息树

在界面左侧以树形层次结构汇总展示各类电网动态运行告警信息,以关键设备或时间为节点分层、分级关联详细告警信息,如越限设备、厂站、实际值、限值、越限率以及各类性能参数等等,并对不同程度告警进行醒目的颜色区分,如图 2 中标识区域 2。

(3) 地理潮流图

实现以中间地理潮流图为主要展示场景的电网动态越限告警信息、WAMS 重要运行信息的各种可视化效果展示(如设备动态定位、气泡、公告板、3D 柱图、饼图、仪表图、等高线渲染等等),如图 2 中标识区域 3。

(4) 多主题窗口

在界面右侧或下方,配合动态告警信息树的不

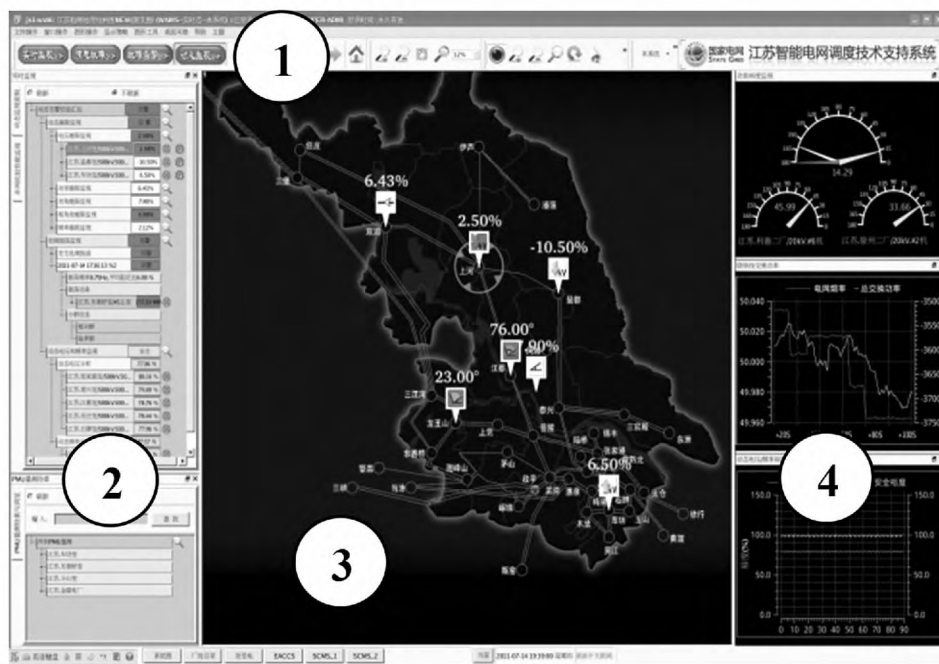


图 2 电网运行动态监视可视化总体界面

同告警类型、不同告警设备,主题窗口联动切换展示与该告警事件相关的其他关联信息,如相关统计列表信息、动态曲线、柱状图、罗盘图等等,如图 2 中标识区域 4。

下面将具体介绍电网运行动态监视的各主要可视化功能实现效果。

2 可视化功能实现与应用

2.1 动态越限监视可视化

动态越限监视可视化功能旨在利用可视化的手段展显基本 PMU 量测数据的越限告警情况,使得调度人员能够快速过滤并重点关注当前系统的重要越限信息。它主要包括:电压越限告警可视化、功率越限告警可视化、相对相角越限告警可视化、功角越限告警可视化、频率越限告警可视化等信息的展示。

当动态越限监视可视化模块实时监测到上述类型的相关 PMU 数据越限时,在可视化界面告警动态信息树上“动态越限监视”相关越限分类节点将出现醒目的告警状态。通过点击各类越限层次节点及下属节点可展开相关详细越限信息,如越限设备、所属厂站、当前值、限额及越限率等。

点击各越限分类节点右侧图标 1(相关图标效果见图 9 所示)按钮时,在地理潮流图上以该越限类公告板效果标识越限设备分布情况如图 2 所示。例如:图标 2 标识线路功率的一般越限,图标 3 和 4 则分别标识机组功角的一般越限与母线电压的严重越限情况。

当鼠标悬停至越限标识图标时,还将显示详细越限提示信息。点击具体越限设备右侧图标 5 按钮时则将以悬浮窗口形式展示所选越限设备的实时越限 PMU 数据曲线。点击具体越限设备右侧的图标 6 按钮,将在地理潮流图上对该越限设备进行动画定位显示。

除了上述 PMU 数据基本越限告警信息展示以外,动态越限监视可视化模块还实现了对全网层面整体动态运行状态的展示功能。主要包括:全网 PMU 厂站分布与工况状态、全网 PMU 电压云图、全网 PMU 频率云图、全网电压相角分布以及全网机组功角裕度分布、PMU 布点及其运行状态等电网总体层面信息的可视化展示功能,图 3 展示了全网电压相角分布效果(局部),它使用动态罗盘图元的渐变

背景色与指针偏移位置直观地标识了全网母线电压相角的分布情况。



图 3 全网电压相角分布可视化效果

2.2 电网扰动识别可视化

电网扰动识别可视化通过采用可视化技术,实现短路扰动、非全相运行、非同期并网以及直流闭锁功能的可视化效果,以提高调度运行人员对电网扰动监视的敏感度与可观测能力。

当电网发生上述相关类型扰动时,在可视化界面左侧的“电网扰动识别”告警动态树将出现醒目的告警状态,同时相关扰动类型层次节点及下属节点下将罗列出对应的扰动信息,具体如下。

- (1) 短路扰动: 扰动时间、扰动设备、相位、短路电流值;
- (2) 非全相运行: 扰动时间、扰动设备、相位;
- (3) 非周期并网: 并网时间、扰动设备、电压差以及相角差;
- (4) 直流闭锁: 闭锁时间、直流极以及闭锁功率。

当点击具体扰动设备右侧的图标 1 按钮时,将在地理潮流图上使用相关扰动类型公告板效果图标 7 标识扰动设备分布情况,使用公告板图标 8 标识由该扰动引起的潮流突变设备分布情况,如图 4 所示。

当鼠标悬停至扰动信息图标时,将显示详细扰动提示信息。同时,根据不同扰动类型,多主题窗口将联动切换,展示扰动关联信息,具体为如下。

- (5) 短路扰动: 相关首/末端厂站图以及扰动时刻该设备的三相电压、电流扰动曲线;
- (6) 非全相运行: 相关首/末端厂站图以及非全相运行线路的三相电压、电流变化曲线;

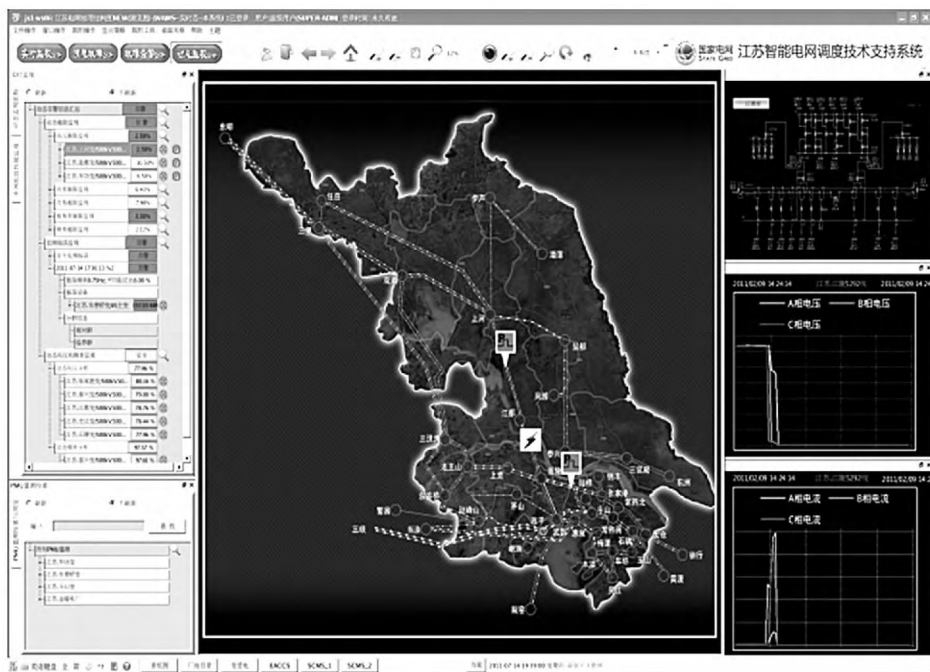


图 4 短路扰动可视化效果

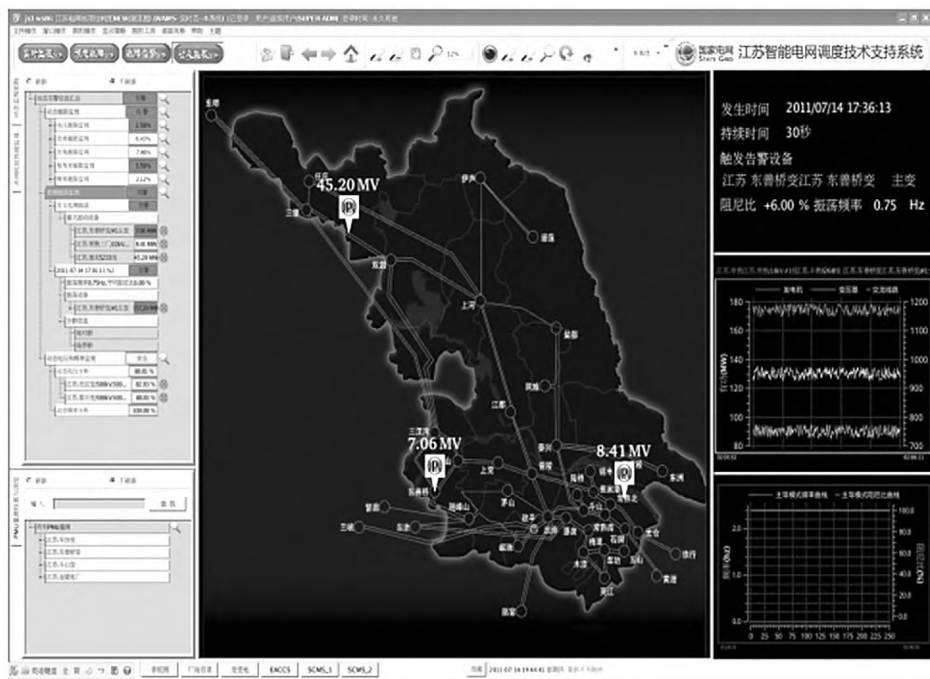


图 5 低频振荡监视可视化效果

(7) 非周期并网: 相关首/末端厂站图以及并网时刻的电压和相角差曲线;

(8) 直流闭锁: 相关厂站图以及直流极或附近功率突变曲线。

同样, 点击具体扰动设备右侧的图标 6 按钮, 可实现扰动设备动态定位展示。

2.3 低频振荡可视化

低频振荡监视可视化功能主要展示振荡主导模

式和相应的振荡设备信息, 以帮助调度人员快速深入地掌握振荡事故信息便于进一步的事故处理, 如图 5 所示。

在电网正常情况下, 低频振荡监视可视化模块在地理潮流图上使用多个绿色图标 9 标识当前系统中实时功率波动最大的 1 台发电机、1 条交流线路和 1 台变压器的分布情况。图标上方数据能够反映当前各个振荡设备的功率波动数据。同时, 右侧多

主题窗口自动切换显示为上述功率波动设备对应的实时功率趋势曲线。

而当电网发生低频振荡时,在可视化界面的“低频振荡监视”告警动态树节点将以醒目的告警状态显示,并将罗列出相关低频振荡信息。通过点击低频振荡事件时间层次节点及下属节点可展示详细振荡信息,主要包括:振荡设备名称、振荡发生时间、振荡消失时间、持续时间、最大功率波动值、最大值及最大值时刻、最小值及最小值时刻、平均模式频率、触发告警设备、分群信息等。

当点击具体振荡设备右侧的图标 1 按钮时,将在地理潮流图上以低频振荡类公告板效果图标 10 标识该振荡设备分布以及机组分群信息情况,当鼠标悬停至振荡设备图标时,还将显示详细振荡提示信息。同时,右侧多主题窗口中联动切换显示该振荡设备的相关有功或无功功率振荡曲线、低频振荡模式曲线(主导模式频率、主导模式阻尼比)等。

2.4 动态电压和频率监视可视化

动态电压和频率监视可视化主要展示电网中电压和频率动态偏移的可接受性,评估电网实际运行过程中的动态安全性。

当电网正常情况下,该可视化模块在地理潮流图上实时标识出当前系统中最小的动态频率裕度图标 11 和最小的动态电压裕度图标 12 设备分布情况。图标上方的数据反映了对应的裕度数值。

在电网异常情况下,主屏潮流图上将使用上述红色 V/F 图标标识裕度告警设备信息及其位置分布,并在可视化界面的“动态电压频率”告警动态树上以醒目的告警状态显示,并罗列出对应动态电压与频率裕度告警信息,主要包括:系统电压状态、电压裕度最小母线及其电压裕度;系统频率状态、频率裕度最小母线及其频率裕度。

同时,在多主题窗口中联动切换显示电网动态电压/频率汇总信息、最小电压裕度以及最小频率裕度趋势曲线。因为动态电压和频率监视可视化效果与低频振荡监视可视化效果相似,这里不在例举。

2.5 一次调频动作性能评价可视化

当电网发生频率扰动且变化达到一次调频响应门槛时,在“并网机组性能监视”页面的动态告警信息树上将看到全网机组一次调频响应性能评价与统计情况,主要按照各评价等级(优秀、良好、中等、较差、反调节、无效、免考核等)分类,并包含各评价等

级统计结果信息(机组台数、台数百分比、总容量、总容量百分比)以及具体涉及机组的罗列。

当点击具体评价等级节点右侧图标 1 按钮时,将在地理潮流图上使用反映该一次调频评价等级可视化图标(如图标 13 ~ 16)展示该评价等级所属机组分布情况,鼠标悬停具体图标将显示机组详细一次调节评价信息。同时,右侧的多主题窗口则联动切换展示一次调频响应的系统总交换功率与系统频率曲线、系统响应概况信息、全网调频特性情况。

除此之外,当点击“一次调频性能监视”根节点侧的图标 1 按钮时,将在地理潮流图上使用饼图显示全网范围内一次调频电厂全部机组本次一次调频考核情况的统计,如图 6 所示。图 6 中使用饼图的绿色份额标识所关联电厂一次调频动作评价合格机组所占百分比,使用黄色份额标识不合格机组百分比,而使用蓝色份额标识免考核机组百分比。

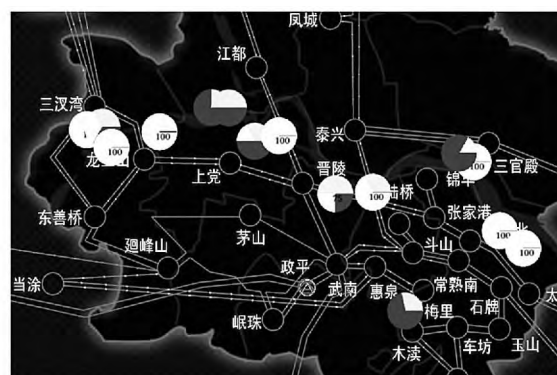


图 6 PMU 电厂一次调频评价统计的可视化

2.6 励磁调节监视可视化

该可视化模块主要实现了对由电网扰动引起的励磁系统的动态调节响应过程与调节性能分析结果的可视化展示。

当实际运行机组由于电压扰动而引起其励磁系统调节动作时,将在动态信息树的“励磁调节性能监视”节点下方按照机组罗列其对应励磁系统调节性能分析结果,主要包括:扰动发生时间、扰动前调节精度、扰动后调节精度、暂态电压调整率、最大电压倍数、励磁电压响应时间、最大励磁电压、最大励磁电流等信息、PSS/AVR 投退情况等。

当点击具体励磁调节机组右侧的图标 1 按钮时,在地理潮流图上采用励磁调节动作图标(如图标 17 ~ 19)可视化地展示励磁调节状态与分布情况。当鼠标悬停至相应图标时,将采用提示窗显示励磁调节详细性能参数提示。同时,该可视化模块

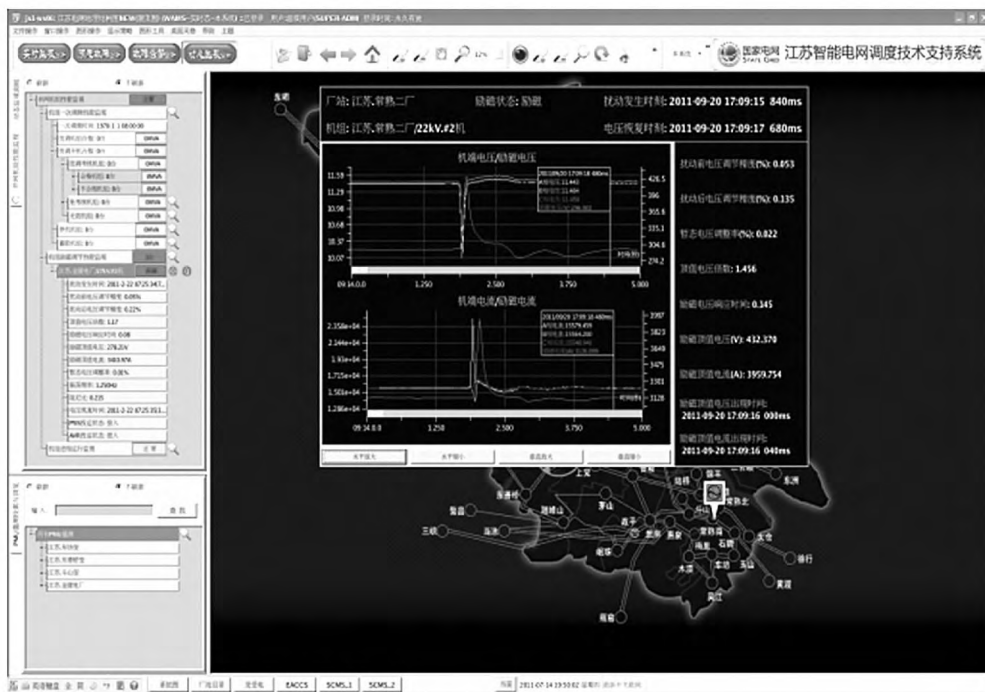


图 7 励磁系统调节性能监视可视化

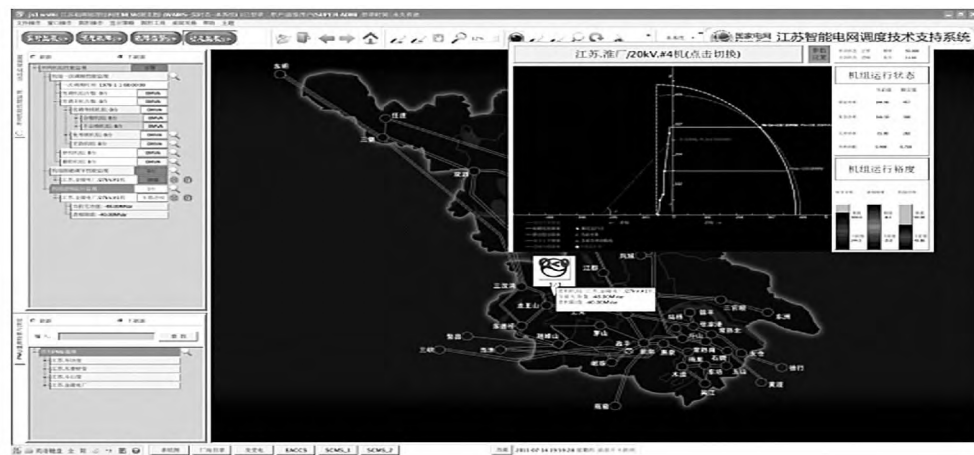


图 8 机组进相运行监视可视化

还将以悬浮窗口的方式展示所选励磁调节机组的本次励磁调节详细动态响应过程,包括机端三相电压、电流扰动曲线;励磁电压、励磁电流调节响应曲线以及该机组励磁系统调节性能参数分析结果,如图 7 所示。

2.7 机组进相运行可视化

当系统中监测到机组进相运行时,点击“机组进相运行”动态信息树节点,将展开当前全网进相运行机组的详细运行情况,并按机组罗列相关进相状态参数,主要包括:开始进相时间、进相持续时间、进相深度、无功积分电量等信息。

当点击“机组进相运行监视”节点右侧的图标 1

按钮时,该可视化模块在地理潮流图上将使用可视化图标 20 标识当前全网进相运行机组的状态与分布情况,当鼠标悬停至相应图标时,还将显示详细进相信息提示。

点击具体进相运行机组右侧的图标 1 按钮时,将以悬浮窗口的方式展示该机组当前 PQ 运行图,并突出进相限制曲线/低励曲线等信息,如图 8 所示。



图 9 图标显示样式

(下转第 38 页)

根据辨识出的系统模型和噪声模型,以及所设计的控制器,按照式(25)和式(26)重新设计得到如图3所示最优输入信号谱和最优预滤波器幅频特性。

两者都具有明显的低通特性,在主导振荡频率 0.58 Hz 及以下频率有较大值,截止频率在 0.8 Hz 左右,比本辨识实验中采用的截止频率 2 Hz 略低。可见,由于电力系统呈低通特性,且低频振荡频率小于 2 Hz,因此将输入信号谱和预滤波器设计为低通特性,截止频率取为高于低频振荡频率,是一种适用性较强的设计方案。

4 结 论

电力系统降阶的可行性是能够用低阶模型来辨识系统的基础。基于模式可控可观性分析,提出了面向广域阻尼控制器设计的电力系统可降阶原理,并提出了 H_∞/H_2 范数下的降阶误差分析方法,以及降阶原理估计和 BIC 准则结合的模型定阶方法。进一步地,针对广域阻尼控制器设计,提出了辨识实验中的最优激励信号和最优预滤波器设计方法,并指出采用具有低通特性的激励信号谱和预滤波器是一种实用的设计方案。四机两区系统上进行的仿真表

明了上述方法和理论的有效性。

参考文献

- [1] 谢小荣,肖晋宇,童陆园,等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
- [2] Lennart Ljung. System Identification——Theory for the User(2nd ed) [M]. USA: Prentice Hall, 2002.
- [3] Kamwa I, Luc Gerin-Lajoie. State-space System Identification-toward MIMO Models for Modal Analysis and Optimization of Bulk Power Systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(1): 326-335.
- [4] Lu Chao, Li Licheng, He Jingbo, et al. Optimal Coordinate Design of Multiple HVDC Modulation Controllers based on MIMO System Identification [C]. 2007 IEEE PES General Meeting, 2007: 1-8.
- [5] Xie Xiaorong, Lu Chao. Optimization and Coordination of Wide-area Damping Controls for Enhancing the Transfer Capability of Interconnected Power Systems[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1099-1108.
- [6] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

(收稿日期: 2013-11-04)

(上接第 18 页)

3 结 论

基于智能电网调度支持系统的可视化平台,结合现有 WAMS 系统应用功能,设计并实现了电网运行动态监视完整的可视化功能。

通过实时获取电网运行相关的动态告警信息,该可视化功能将不同类型的电网动态运行信息与告警进行汇集与综合展示,实现对电力系统动态运行状态高效、精准的监视与告警。从实际应用中的效果来看,它能够使得运行人员快速、直观地掌握电网动态运行情况,提高调度运行人员对电网动态越限、电网扰动、低频振荡等重要电网事件以及机组并网性能评价等的响应速度与决策处理能力。

参考文献

- [1] 李丹,韩福坤,郭子明,等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 52-56.

- [2] 曹路,汪德星,岑宗浩. 广域测量系统在华东电网中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(12): 38-41.
- [3] 干磊,康河文,何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-155.
- [4] 周喜超,智勇,郑伟,等. 基于 WAMS 系统的甘肃陇南电网大负荷扰动试验[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 129-131.
- [5] 沈国辉,余东香,孙湃,等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 31-36.
- [6] 李大勇,马冬雪,王晓宁,等. 电网信息可视化应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 156-158.
- [7] 王庆红. 电力系统可视化技术及其在南方电网的应用[J]. 南方电网技术, 2006, 2(3): 40-44.

作者简介:

王波(1981), 硕士, 高级工程师, 从事的主要工作为广域相量测量系统相关研究与开发;

杨洪耕(1949), 教授, 博导, 长期从事电能质量、电网扰动和谐波的研究工作。

(收稿日期: 2013-07-23)

实时电力调度系统的分析及应用

银涛,王彦沅,张宏图,张驰,吴璇,胡翔,张勤勤,蒋科
(四川电力调度控制中心,四川成都 610041)

摘要:结合四川电力调度控制中心的实际现状,在充分考虑省级调控中心与统调电厂之间的通信条件下,提出了实时调度系统的概念。基于 .net 环境的原型开发,实现了实时通信的 C/S 应用系统,并在此基础上进一步分析探索了实时电力调度的优化算法,提高调度效率。

关键词:调令系统实时调度; .net; C/S 应用系统

Abstract: Combining with the actual situation of Sichuan Electric Power Dispatching Control Center, the concept of real-time dispatching system is proposed with full consideration of the communication conditions between the provincial control center and power plant. The C/S application system for the real-time communication is realized based on the .net development environment. On this basis, the optimization algorithm for the real-time power dispatching is further analyzed to improve the efficiency of dispatching.

Key words: real-time dispatching of scheduling system; .net; C/S application system

中图分类号: TM734 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)01-0019-04

0 引言

随着电网的飞速发展,四川电网已由华中电网中的末端电网转变为大水电、大送出型枢纽电网,运行方式日趋多样,电气耦合关系日趋复杂。随着电网规模的不断扩大,四川电力调度控制中心(以下简称省调)下达设备检修、系统运行方式改变、事故处理、新设备投运等操作指令更加频繁;同时要求实现电力系统经济运行,通过实时调整发电厂有功出力平衡供电负荷,使得电力调度的工作强度和负担急剧增加。在深入分析调度指令特性,综合考虑省调与发电厂站之间的数据网络运行状态的基础上,提出了使用实时调令的概念。采用智能排序和短期负荷曲线调整算法优化调度策略,并开发了并网发电厂实时调令系统来实现实时调度的目标。

1 调度指令的工作现状及存在的问题

调度指令(以下简称调令)是指电网调度机构值班调度员对其下级值班调度员或调度管辖厂站值班员发布有关运行和操作的指令。由于电网运行的特殊性,对调令具有及时性高、内容准确、信息传输安全以及可追溯等要求。

现行的调令作业方式主要依靠电话语音,省调调度员通过人工拨号向下辖电厂发送点对点的语音调令。调令口述完毕后需要对方复述并确认收到做为回执,同时计算机保存双方通话录音,并要求人工纸质记录电话调令内容存档,以备复核。

此种调令作业方式存在拨号延时,响应速度慢,不能同时向多个电厂发送调令以及纸质留存的文档不易保存和管理等问题,并且语音调令的作业方式对实现规范化、精细化管理有一定制约作用。随着并网发电机组增加,社会用电负荷越来越大,调度方式也将日益复杂,调度工作需要改变传统的调令作业方式,高度集成业务各项功能来简化工作流程,提高生产效率,增进调度管理水平。

2 实时调度的应用分析

2.1 基于高实时性的智能调令

根据目前的网络通信基础以及调度工作的需要,建立了一套完备的调令系统,连接省调主站与电厂端,实时与进行交互,对数据获取自动化要求也较高,涉及计划曲线、实时电量、电厂实时发电能力等相关数据。按常用设置上网出力,回计划曲线等调令类型对调令进行分类,以电厂的所属发电集团、自然流域分布、机组装机容量等属性对电厂进行归类

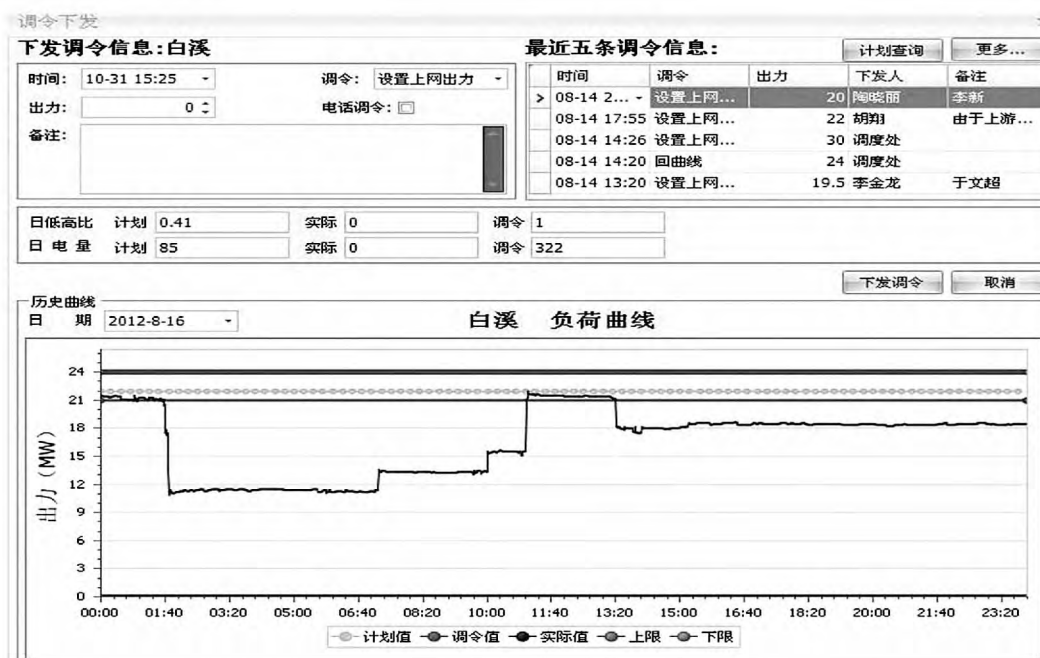


图 1 电厂实时调度

排序。调度员能快速选取调令对象以及调令类型,并输入文字内容,省调与电厂的调令交互也由一对一模式变为更高效的一对多模式。通过统计发现基于调度数据专用网络的实时调令下发速度是电话模式的两倍,调令的准确性也提高了 30%,同时调令延时性也控制在平均 200 ms 以内,很大程度地改善了调度工作效率。电厂实时调度如图 1 所示。

2.2 调令的实时监测与反馈分析

以往的发电调度业务没有实时系统支撑,无法对电厂的调度指令执行情况进行监测,只能过后进行考核。调令系统将对主站端发出的每一条调令进行监测,并发送回执信息以判断电厂端是否成功接收调令。调令系统能够通过智能化图形和数据列表的形式对发电计划曲线,电厂实际发电出力曲线,调令目标发电出力曲线进行实时监测,通过对比及时发现电厂违规发电动作,及时纠正发电出力,保证主网安全运行。

2.3 应急处理

主站端数据库服务器采用双机集群方式对数据进行实时备份并归档到磁盘阵列上,当其数据库发生故障造成数据丢失时,可通过双机集群的磁盘阵列快速恢复数据以保证安全生产。

主站端应用服务器采用主备方式进行部署,当应用服务器发生故障时,可立即通过切换应用程序到备用服务器的方法保障系统的正常运行。

在系统主站因意外发生故障期间,电厂端程序无法连接主站端服务,电厂在申请调整发电出力时会自动退回该申请并告知操作人员电厂端已与主站端失去联系,应改变联系方式进行申请,以保障电厂正常生产秩序。

3 实时调度的挖掘与优化算法

3.1 电厂智能排序

智能排序是指将电厂基础技术参数、调令中的出力信息或运行方式、实时的发电低高比、机组实时负荷率、发电计划完成比例等信息做为电厂的附加属性。同时,引入交叉变量四川省经济与信息委员会最新下发的《主网统调分发电机组排序表》里面的排位参数。综合考量电厂目前运行状态,对运行电厂进行优先发电分类排序,调度人员可以参照排序科学调整电厂出力,以达到节能发电调度和资源利用最大化的目标(如图 2)。

3.2 超短期负荷曲线调整

超短期负荷曲线调整是根据省调自动化部门提供的超短期负荷预测曲线修正当前的发电计划。超短期负荷预测曲线的数据粒度与日发电计划编制一样统一为 15 min,计量单位为万千瓦时。

负荷预测偏差曲线与原始计划曲线必然存在差



图 2 电厂智能排序

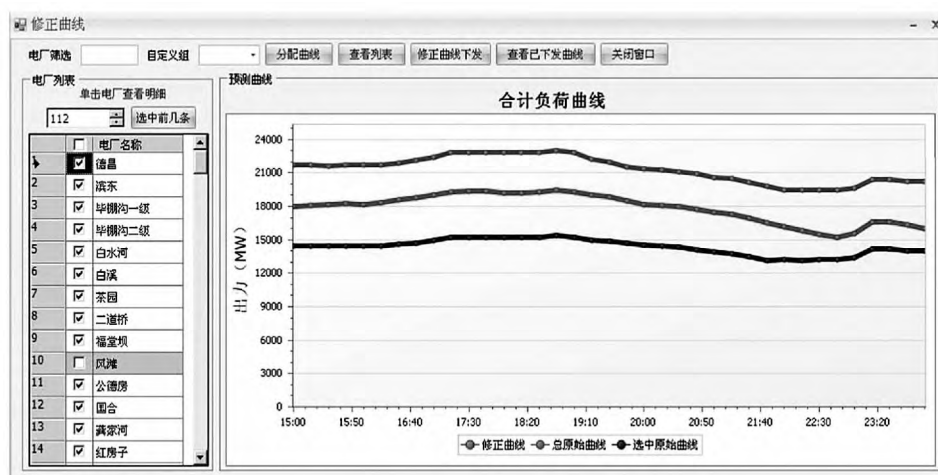


图 3 超短期负荷曲线调整

值 $\{x|x \geq 0\}$,并从当前时间起计算当天每一计划点的数据计算出两条曲线之间的偏差量,通过人工判断或给系统设定阈值偏差量来判定是否需要调整原始计划曲线。

某电厂某时刻调整后曲线负荷值为该时刻的负荷预测偏差值乘以该厂原始计划占该时刻总原始计划的比例。

$$f(x) = x \frac{P_i}{\sum_p} \{x|x \geq 0\}$$

4 主要技术手段

4.1 网络通信设计

调令系统因其应用的特殊性,对通信网络要求较高,必须实时保证通信网络的高稳定性、低延时性和极高的安全性。现有通信运营商提供的普通网络无法满足系统要求,因此调令系统主站端与电厂端统一部署在国家电网调度数据专网。在保证省调主

站与电厂端高连通率的情况下,通过网络防火墙保证通信安全。在此调度数据专网的基础上,通过调令系统数据交换平台服务,完成电厂端与主站端之间的数据实时交互。

4.2 数据库设计

省调主站端系统的数据库软件采用 Oracle 企业版,使用数据库集群对系统进行支撑。集成的集群件:利用一组通用、内置的集群服务创建和运行数据库集群。自动工作负载管理:将服务连接请求发送给拥有最低负载的适当服务器;一旦发生故障,自动将剩余的服务器重新分配以用于服务。

电厂端系统支持离线操作,仅保存本电厂调度范围内的调令,提供历史调令查询功能。同时本地数据库会保存与本电厂关联发电计划曲线,发电机组的技术出力等参数,同时会下载备份并网电厂辅助服务及运行管理考核的结果,便于电厂对发电运行情况进行离线分析。

4.3 系统技术架构

四川电网并网发电厂实时调令系统采用 C/S 架构,分为数据交换平台、调令主站端、电厂客户端。考虑到企业级应用安全性、可靠性、稳定性、可扩展性,将采用 .net remote 中间件技术实现,通过中间件技术实现企业级应用数据交换平台。 .net remote 提供了一个功能强大、高效的处理远程对象,是微软中间件技术企业级解决方案。 .net remote 具备分布事务处理,同时具备动态集群的能力,可在不改变程序的情况,建立动态集群,提高服务的处理能力。目前国际上 C/S 架构上, .net remote 是一种常用的优秀的解决方案。

4.4 系统物理架构

四川电网并网发电厂实时调令系统调令主站系统包括调令主站应用程序服务和调令主站客户端;电厂端调令系统包括电厂调令主站应用程序服务和调令电厂端;调令主站主要部署在省调,使用对象为调度员和相关专责;电厂调令系统的主站应用程序服务部署在省调,电厂端分别部署在 200 多家并网发电厂,使用对象为 200 多家电厂相关人员。

5 系统的关键技术难点及解决方法

5.1 横向数据交换实现

实时调令系统要实现对全省统调电厂的实时调令下发和短期负荷调整,必须要接入其他管理应用系统,横向收集集成各应用系统的生产和管理数据。

省调调度数据专网可通过网络物理隔离装置与网络防火墙实现与省调生产大区的信息交互。调令系统建立了与发电计划编制系统的数据接口,以收集发电计划曲线参数;建立了与四川电网 EMS、TMR 等系统的数据接口,实时采集电厂出力与上网电量等生产数据;建立了与省调自动化之间的数据接口,接收超短期负荷曲线调整参数等数据。这些数据做为实时调度的数据支撑,通过接口文件和传输软件实时交换与更新,提高调令系统辅助决策的科学性与及时性。

5.2 主站服务端与电厂端数据交互

部署在同一调度数据专网内的电厂端与主站端,需要实现电厂与省调之间的调令请求、机组出力调整以及负荷参数等信息的实时通讯与数据交互。数据交换通过两种方式实现:①由电厂端主动发起,向主站服务请求同步数据;②由主站服务端自动发

送的方式,将采用 Remoting 客户端事件注册机制来实现:电厂端首先在主站服务注册事件,订阅需要的主题数据,当主站服务需要同步数据时,触发该事件,将同步数据的内容放入事件消息中,调用客户端代理,将数据发送到电厂端,电厂端对消息进行相应的处理。Remoting 通信机制既支持 TCP 信道又支持 HTTP 信道,传输速度极快,实现了主站-电厂端调令快速交互。同时 Remoting 既可传输基于 XML 协议的 SOAP 包又可传输二进制数据流,有效解决了通信多样化和通讯性能衰减的问题,同时又降低了系统对调度数据专网 IIS 服务器的依赖性。

部署在 200 多个统调电厂的调令电厂端程序与主站服务端保持实时通信,为保证调令能够及时准确到达电厂,必须时刻监测主站与电厂的通信状况。主站程序实时向电厂端发送响应请求,电厂端收到请求后响应发送回执到主站。通过主站与电厂之间的响应-回执机制来监测通信状况,若主站未收到电厂端回执,则触动告警,系统发出网络通信中断的提示。

主站端需要同时与 200 多个电厂端保持 7×24 小时的实时联系,期间主站通过调令群发功能同时向几十个电厂发送调令,电厂端向主站发送上网出力、负荷调整等运行申请,下载并网电厂辅助服务及运行管理考核到本地等操作会造成系统并发访问较多。为保证系统稳定运行,系统采用多线程处理架构进行开发,并基于调度安全准则将部分数据存储在电厂端的本地数据库中,以减小主站服务端和电厂端的数据交互量。并且对数据库中占用磁盘空间较大的数据表进行存储分区以提高数据库 I/O 性能,从而保证系统能在高并发访问的环境中保持稳定运行。

6 结 论

建立了高智能、高准确性的实时调度策略,通过调令监测与反馈机制,全过程实时监督调令执行情况,实时分析反馈参数并及时做出响应。电厂发电智能排序以及超短期负荷曲线调整算法,有效提高了电力资源的利用效率,为节能发电调度、科学合理利用资源提供了有力的决策支持。同时能够实时修正发电计划曲线,使发电负荷与用电负荷趋于最优的平衡状态。实时调令策略的分析和应用具有深度

(下转第 67 页)

μT 的限值^[7]。由图 5、6、7 可以得到, A 相电压初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 时, 离地 1.5 m 处场强最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, A 相电压初始相角为 60° 时, 场强最大值出现在边相导线附近; 由图 8、9、10 可以得到, A 相电流初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 时, 离地 1.5 m 处磁感应强度最大值出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, A 相电流初始相角为 60° 时, 磁感应强度最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内。

4 结 论

运用 ANSYS 有限元分析软件, 对 1 000 kV 特高压单回交流输电线路在典型导线布置形式下的电磁环境做了仿真计算, 其计算结果与参考文献 [1] 类似。结果表明如下。

1) 特高压单回交流输电线路下方离地 1.5 m 处电磁场强度均满足国家相关标准的要求, 不会对地面人员产生危害;

2) 电场强度最大值在 A 相电压初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 的情况下, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, 初始相角为 60° 时, 出现在边相导线附近; 磁感应强度最大值在 A 相电压初始相角为

0° 或 120° 、 30° 或 90° 的情况下, 出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, 初始相角为 60° 时, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内;

3) 酒杯塔导线到地面的距离较猫头塔略高, 故典型水平布置导线电场强度较三角布置导线略低; 且导线水平布置时磁感应强度较大。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 王晓燕. 特高压交流输电线路电磁环境研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [3] 刘红文, 杨卓, 谭向宇, 等. 高海拔 500 kV 紧凑型输电线路电场仿真分析与对比研究 [J]. 电线电缆, 2013 (2): 42 - 45.
- [4] 程炜. 特高压输电线路电磁环境的数值仿真研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [5] 庄秋月. 1 000 kV 变电站雷电侵入波的分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [6] 刘振亚. 特高压输电知识问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] HJ/T 24 - 1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范 [S].

(收稿日期: 2013 - 12 - 10)

(上接第 22 页)

挖掘的潜力, 通过开发人工智能和调度算法能进一步提高调度指令准确性与科学性, 不断探索创新, 创造更大的经济价值和社会效益。

参考文献

- [1] 雷怀光, 张振. 国基于 .NET 技术的高校人事管理系统的研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2008, 26(5): 162 - 165.
- [2] Ferrero RW, Rivera JF, Shahidehpour SM. A Dynamic Programming Two - stage Algorithm for Long - term Hydro-thermal Scheduling of Multireservoir Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1534 - 1540.
- [3] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 120 - 130.
- [4] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment

of Plug - in Hybrid Electric Vehicles [R]. New York: EPRI, 2007: 23 - 27.

- [5] 王志平, 熊光泽. 实时调度算法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 205 - 208.
- [6] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49 - 52.

作者简介:

银 涛(1981), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

王彦津(1981), 学士学位, 从事科技、项目及工程管理工作;

张宏图(1973), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

吴 璇(1980), 学士学位, 从事电力监控运行工作;

胡 翔(1976), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

张勤勤(1982), 学士学位, 从事通信运维工作;

蒋 科(1983), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作。

(收稿日期: 2013 - 11 - 05)

四川电力信息安全集中监测分析平台研究与应用

刘姗姗, 柴继文

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 针对四川电力当前信息安全数据较分散、缺乏实时监控问题, 提出建立信息安全集中监测分析平台, 提取各系统中与安全相关的数据, 并利用实时监控手段弥补安全数据短板, 对获取到的海量数据进行综合展示分析, 全面地分析监测报告, 帮助深入掌握系统安全漏洞和信息安全趋势, 实现安全技术和管理相结合, 同时利用关联分析可以找出安全事件中各种属性之间的相关特性, 排除无意义的信息, 及时对安全问题进行快速定位, 提升了网络信息安全预警防护能力。

关键词: 信息安全; 集中监测; 预警分析

Abstract: Aiming at the scattered information security data and the lack of real-time monitoring at present in Sichuan power grid, a centralized information security monitoring and analysis platform for Sichuan Electric Power Company is presented. The centralized monitoring and analysis platform can extract the useful data from the existing systems and monitor the security vulnerability on the web or weak passwords etc. The comprehensive analysis report of the mass data stored in the information security monitoring platform can help to know well the system security vulnerabilities and the trend of information security. Meanwhile, the association analysis from the platform can help to find out the related characteristics of security events, which can exclude the meaningless information and rapidly improve the capacity of the early warning.

Key words: information security; centralized monitoring; early warning analysis

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0023-03

0 引 言

随着国家电网公司信息化的不断建设和完善, 八大业务应用整体全面推广、拓展深化应用, 信息化效能、效率、效益提升作用明显, 信息系统的基础性、全局性、全员性作用日益增强。电网信息安全已经提到与安全生产同样高度, 信息系统安全成为电力安全的最重要组成部分之一。目前国家电网公司已建成边界监测系统、桌面终端管理系统等信息安全相关系统, 但各系统着重点不同, 数据较分散, 同时对于内网邮箱弱口令、门户弱口令、网站漏洞等缺乏实时监控手段, 不利于信息安全督查工作, 也为信息安全埋下了隐患^[1]。

针对上述问题, 对适合四川电力的信息安全集中监测分析平台进行研究应用, 该平台能提取现有系统中与安全相关的数据, 并对其进行整合、分析; 能对网站漏洞、系统弱口令等进行实时监控; 能对数据进行综合展示分析, 全面地分析监测报告, 帮助深入掌握系统安全漏洞和信息安全趋势, 督查人员通

过报告能及时定位安全风险, 第一时间通知运维单位快速整改。

1 集中监测分析平台总体架构

信息安全集中监测分析平台包括信息安全相关数据抽取规则管理、信息安全相关数据抽取、安全策略配置和下发、系统口令、扫描分析、漏洞扫描分析、安全事件集中管理、安全事件关联分析、安全设备状态实时监控、全景展示等功能模块^[2]。图 1 为系统总体架构图。

系统应用采用满足技术先进性与成熟性相结合的基于 J2EE 的多层技术构架, 以提高系统的灵活性、可扩展性、安全性以及并发处理能力。采用组件技术将界面控制、业务逻辑和数据映射分离, 实现系统内部的松耦合, 灵活、快速地响应业务变化对系统的需求。系统层次结构总体上划分为客户层、接入表示层、业务逻辑层、数据层(包含数据映射层和数据源), 通过各层次系统组件间服务的承载关系, 实现系统功能。系统技术架构如图 2 所示。

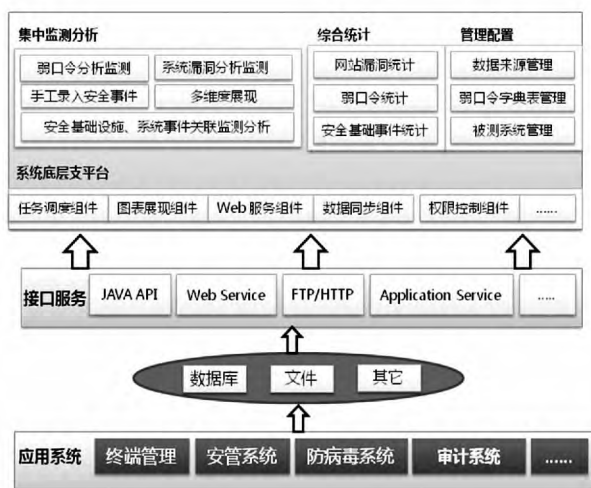


图 1 系统总体架构图

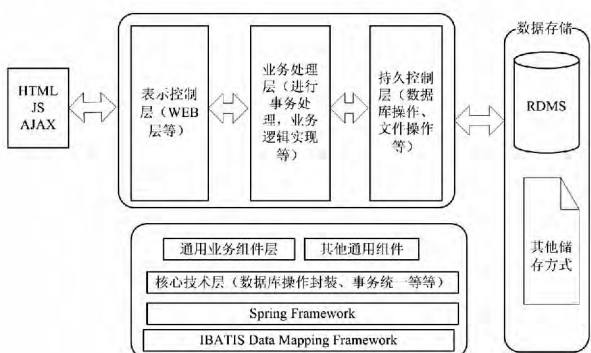


图 2 系统技术架构图

表示控制层对应平台中的控制器,实现画面与后台的数据交换、画面之间的迁移、画面数据的检查等功能;业务处理层对应具体的业务,在此层处理业务逻辑,并通过数据库操作层完成到数据库的交互;持久控制层对应数据库操作,所有的数据库操作都必须且只能集中在该层。控制器依赖于业务处理层,而业务处理层依赖于持久控制层,通过依赖注入功能,可以将这种依赖性通过相关配置进行统一管理,最大限度地降低各层次之间的耦合性^[3]。

1.1 现有安全数据整合

现有安全数据整合模块建立信息安全数据表,提取四川电力现有信息系统中与安全相关的数据,进行跨部门、跨平台的安全信息的统一收集、分析、处理。在数据抽取、转换和加载 (ETL: Extract, Transact, Load) 过程中使用包括直接抽取、文件抽取、WEB 抽取等几种常见形式^[4]。对不同应用系统,采用不同抽取方式;甚至对同一应用系统中不同的业务数据,也可以采用不同抽取方式。

直接抽取是指 ETL 服务器直接连接到应用系

统后台数据库中直接抽取所需数据的方式,因此必须设置严格的权限控制,保证用户不能访问和修改系统中的其他敏感信息,以免造成安全问题。且由于会对应用系统数据库造成大量负荷,因此必须进行抽取时间窗口控制,协调对外服务时间和抽取时间,以减少数据抽取对正常业务运行造成的影响。基于以上考虑,这里对数据敏感度较小、数据及时性要求不高的 IDS、IPS 入侵数据进行直接抽取。

WEB 抽取是通过 WEB 服务获取系统需要的数据的抽取方式。通过这种方式可以方便获取需要的数据,同时可以对这些数据做校验等操作,是目前一种先进的抽取方式,不便的是在数据量很大时,网络传输速度会很忙,严重影响系统性能。对于数据量较小、系统接口实现较困难的考核指标类数据采用 WEB 抽取完成。

文件交换是指将需要抽取的业务数据保存为有格式的文本文件,ETL 服务器通过读此文件内容来获取业务数据的数据抽取方式。文件交换对原数据库系统造成影响较小。采用此方式时,应用系统需要将需要抽取的数据按照约定格式保存在文件中,并通过 FTP、文件共享等方式将保存有业务数据的文件传递约定位置。ETL 服务器从约定位置取出数据文件,并通过文件分析引擎对文件进行分析,取出业务数据。这里除 IDS、IPS、小数据外,主要数据均采用文件交换形式传输,且传输时约定文件传输结束标志,标志内容为已传输完毕的数据文件的文件名,以及此文件的 MD5 验证码。ETL 服务器获取传输结束标志文件后,认为对应的数据文件已经传输完毕。然后再通过对数据文件进行 MD5 验证,将验证码与传输结束标志文件内的 MD5 验证码进行对比来验证数据文件是否完整。同时约定文件重传标记,当传递到约定交换位置的数据文件在上传完毕和下传开始期间发生损坏,导致约定位置的数据文件和应用服务器生成的数据文件不一致。这样,ETL 服务器根据约定位置的数据文件计算出的 MD5 验证码就和传输结束标志文件中的 MD5 码不一致,从而发现文件不一致的错误,发现错误后,ETL 服务器需要使用文件重传标志来通知应用系统重新传输相应的数据文件。

数据整合分析模块能帮助安全督查人员在原有系统数据的基础上增强对比分析,对各个信息系统产生的数据进行监测数量、监测位置、监测范围以及

数据的匹配度和数据类比结果进行分析,得出不同系统对相似对象监控的差异,并按时生成信息安全类比分析报告。

1.2 漏洞实时监测

四川电力地域广,所属地市单位、控股、代管单位众多而分散,而专职信息安全督查执行人员有限,无法及时对各单位的终端、网络等情况及时进行督查,而且在工作时间进行漏洞扫描会造成系统访问量增大,影响系统性能。为此,要在集中监测分析平台上实现实时监测功能,对四川电力范围内所有对内、对外服务网站漏洞及应用系统弱口令等进行实时监测与提醒。在实现方式上采用实时调度任务完成,分别设计网站扫描调度任务和弱口令扫描调度任务,扫描时由管理员根据系统实际运行情况配置调度任务执行时间、执行周期、扫描对象等信息,系统根据配置信息调度扫描任务进行自动定时(一般设定在夜间)扫描,自动汇总分析结果^[5]。

在进行信息系统弱口令扫描时,对可直接获取口令明文的被测系统,本系统按照系统密码强度规则分析口令明文,判断口令的强度,对不符合规则的

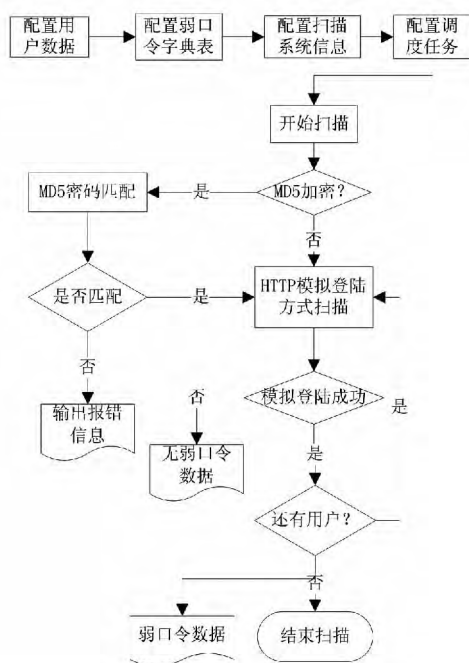


图 3 弱口令监测流程图

系统口令进行记录。对不能直接获取口令明文的被测系统,本系统按照弱口令字典表、ETL 抽取的系统用户账号信息,通过模拟系统登录原理,检查被测系统用户弱口令,记录不符合规则的系统口令,并保留检测分析过程,将发现不符合规则口令的过程、系统

现场情况保存为图片作为督查证据。弱口令监测流程图如图 3。

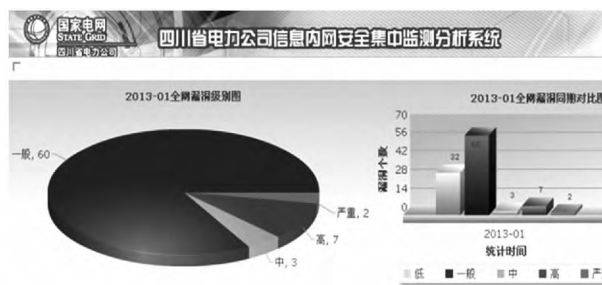


图 4 四川电力全网漏洞图

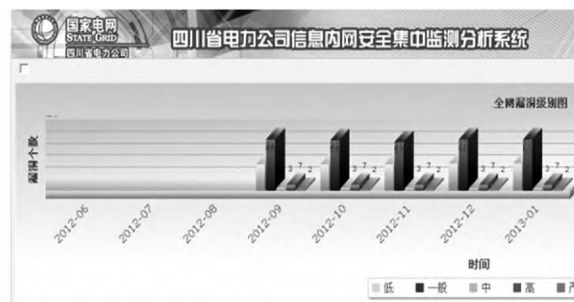


图 5 四川电力全网漏洞环比图



图 6 四川电力当月入侵日志统计



图 7 四川电力各单位告警统计

内、外网网站漏洞自动扫描模块主要扫描 SQL 注入、跨站脚本攻击(XSS)、失效的访问控制、缓存溢出问题、HTTP 响应拆分漏洞、参数篡改、隐式字段处理、目录遍历攻击等由 OWASP(open web application security project, 开放式 web 应用程序安全项目)

(下转第 54 页)

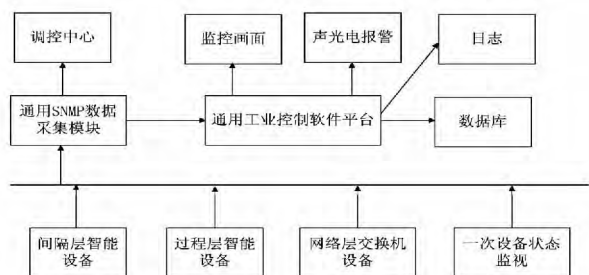


图 3 智能变电站状态监测可视系统框架

6 结 论

针对继电保护状态检修工作展开研究,对保护设备缺陷进行分析,建立设备状态检修评估体系,并提出了相应的检修策略,取得了一些创新性成果。最后对智能变电站中二次设备状态检修进行了简要分析。相比传统变电站,智能变电站在实现状态检修方案更有基础以及可操作性,相信随着智能变电站的推广,继电保护设备状态检修将会得到更广泛应用。

参考文献

- [1] 陈钢. 变电站电气设备的状态检修和状态监测技术现状及其发展趋势[J]. 贵州电力 2005(1): 15-17.
- [2] 黄建华. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化 2008(2): 12-14.
- [3] 陈维荣, 宋永华, 孙锦鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术 2000 24(11): 12-17.
- [4] 楼凤丹. 输变电设备状态检修评估分析软件系统[J]. 电力设备 2004(2): 10-12.
- [5] 郑圣, 赵航. 故障信息处理系统中继电保护装置的可靠性研究[J]. 继电器 2005 33(11): 37-39.
- [6] 李永丽, 李致中, 杨维. 继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 63-65.
- [7] 许靖, 王品. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术 2000(8): 48-52.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士研究生, 工程师, 现从事继电保护二次检修工作。

(收稿日期: 2013-09-23)

(上接第 25 页)

所公布的 web 应用安全漏洞, 并针对出现的漏洞给出指导性建议。

1.3 全景展示

具有安全数据整合及漏洞实时监测功能的集中监测分析平台基本完全挖掘出四川电力当前信息系统运行过程中与安全相关的数据, 依托对这些海量数据的综合展示分析, 管理者能快速识别当前风险, 为信息安全下一步投资提供充分的参考依据。

2 结 论

针对四川电力当前信息安全相关数据较分散, 同时对于弱口令、网站漏洞等缺乏实时监控手段问题, 不利于信息安全督查工作开展问题, 提出建立信息安全集中监测分析平台, 提取现有各系统中与安全相关的数据, 并对其进行整合、分析, 同时对弱口令、网站漏洞等进行实时监控, 最后对海量数据进行综合展示分析, 全面地分析监测报告, 帮助深入掌握系统安全漏洞和信息安全趋势, 实现安全技术和管理的结合, 同时利用关联分析可以找出安全事件中各种属性之间的相关性, 排除无意义的信息, 及时

对安全问题进行快速定位, 提高安全事件的应急响应处理能力。

值得说明的是, 如何利用集中监测分析平台的海量安全事件进行信息安全态势感知, 从总体上动态反映网络安全状况, 并对网络安全状态的发展趋势进行预测和预警, 是安全领域具有挑战性的问题, 也是尚需进一步努力的地方^[6]。

参考文献

- [1] 四川省电力公司. 四川省电力公司“十二五”信息化规划[Z]. 2011.
- [2] 沈昌祥, 张焕国, 冯登国, 等. 信息安全综述[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学 2007 37(2): 129-150.
- [3] 郭红星. 网络信息安全预警监控系统设计与实现[J]. 计算机安全 2012(2): 48-50.
- [4] 王刚军, 张学松, 郭志忠. 电力信息安全的监控与分析[J]. 电网技术 2004 28(9): 50-53.
- [5] 赵衍. 基于网络数据挖掘的信息安全监控体系[J]. 上海管理科学 2010 23(4): 52-55.
- [6] 余勇, 林为民. 基于等级保护的电力信息安全监控系统的设计[J]. 计算机科学 2012(11): 440-442.

(收稿日期: 2013-10-21)

基于节点脆弱性的电力系统抗毁性分析

李艳卿 李华强 李 迁 黄昭蒙

(四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 大停电事故一般由个别元件故障开始并最终导致全系统崩溃, 而其中极少数带有重负荷的节点往往起到助推作用, 因此寻找这些关键节点, 分析该部分节点失效情况下的电力系统的抗毁性, 具有重要的研究价值。基于静态能量函数, 建立相关的脆弱性评估指标模型, 对电力系统的节点脆弱性进行评估, 从而确定电力系统的脆弱环节。在此基础上, 对电力网络拓扑模型进行蓄意攻击和随机攻击, 分析比较电力系统在这两种攻击下的网络抗毁度指标, 结合系统能量和网络图论分析研究电力系统的抗毁性。通过对某地区电网的实际仿真, 验证了该方法的合理性与有效性。

关键词: 电力系统抗毁性; 静态能量函数; 节点脆弱性; 网络抗毁度

Abstract: The blackouts usually start from the individual component failure and eventually lead to system crash, and a very few nodes with heavy load play a promoting role in the tendency, therefore, it is very important to find out these key nodes and analyze the system invulnerability under the conditions of node failures. The relevant vulnerability evaluation index model is established based on the static energy function, and the node vulnerability of power system is evaluated so as to confirm the fragile link of power system. On this basis, the intentional attacks and random attacks to the topology model of power grid are carried out, and then the network invulnerability index during the two types of attacks is analyzed and compared. Finally, the invulnerability of power system is analyzed and studied combining system energy with network graph theory. The rationality and effectiveness of the proposed method are verified by the simulation of the actual regional power grid.

Key words: invulnerability of power system; static energy function; node vulnerability; network invulnerability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0026-03

0 引 言

在电网规模迅速扩大、结构变得愈加复杂的情况下, 电网不可预知因素更多, 不确定性更大, 甚至会发生大面积、连锁性的大停电事故^[1-2], 而确保电力系统的安全稳定运行也更加重要和困难。因此, 电力系统抗毁性分析的提出不仅有着很好的理论研究意义, 更具有潜在的应用价值。

网络抗毁性是从网络连通性的角度来描述网络拓扑结构安全性的一个静态指标。一个网络的抗毁性是指至少破坏网络中多少个节点或边才能中断节点间的联系, 即是衡量破坏一个网络的困难程度^[3]。目前网络抗毁性的定量分析大部分通过不同方法计算网络拓扑结构中的节点的重要度, 从而得到网络的抗毁度。文献[4]介绍了网络连通度和虚拟节点的概念, 阐述了基于连通度的网络抗毁性评价模型, 并将其应用到电力系统应急通信网络。

文献[5]提出了以节点电气介数指标来衡量元件的脆弱程度。文献[6]应用复杂网络理论, 借鉴有权网络的抗毁性评估方法, 构建了中压配电网网络结构抗毁性评估模型。文献[7]提出了一种基于最短路径数的网络抗毁评价方法, 通过对计算节点之间的最短路径数, 将待评价网络与全连通网络进行网络抗毁性评价。

但是, 在电力系统的抗毁性评估中, 考虑电力系统自身特性, 结合其运行状态进行抗毁性分析也是不可或缺的一方面。文献[8]在网络动态性基础上, 研究级联失效条件下复杂网络的抗毁性能, 认为网络的动态特性对网络抗毁性影响很大。文献[9]在脆弱性评估的基础上, 考虑实际电网中负荷的大小和发电机的出力, 提出系统最大供电区域指标, 利用该指标分析了电力系统在连锁故障下的抗毁性。

根据脆弱性的定义, 电网中最脆弱的环节是电网运行状态最接近临界运行状态, 且故障后对整个

电网的安全稳定运行造成的影响后果最严重的环节。基于能量的观点^[10-11,13],建立有效和快速的脆弱性评估指标模型对电网的脆弱性进行分析评估,筛选出电网的脆弱环节。对筛选出的电网脆弱节点进行排序,依次对脆弱节点施加扰动,结合抗毁性评估的理论、模型以及方法,利用电网抗毁度指标来进一步分析电网的抗毁性。并通过与随机故障法对比,验证了所提方法的正确性与有效性。

1 节点静态能量函数和脆弱性指标

1.1 节点静态能量函数

由静态能量函数模型^[10]可得多母线系统中第 i 节点的静态能量函数 E_i 的表达式,如式(1)。

$$\begin{aligned} E_{ij} &= \int_{(\delta_{ij}^s, V_{ij}^s)}^{(\delta_{ij}, V_{ij})} [f_{p_{ij}} f_{q_{ij}}] d \left[\begin{matrix} \delta_{ij} \\ V_{ij} \end{matrix} \right] \\ &= \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} (P_{ij} - P_{ij}^s) d\delta_{ij} + \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left(\frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right) dV_{ij} \\ &= \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} [V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s] d\delta_{ij} \\ &\quad + \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left[\frac{-V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right] dV_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 节点脆弱性指标

当电力网络中某一个脆弱节点发生故障,而该故障所引起的其他因素的变化将会对与其相关联的其他环节产生影响。由于这些相关联的环节自身也存在脆弱性,在这些因素的共同作用下,可能导致许多保护装置相继动作,使得故障影响在一定范围内传播和扩大,形成级联崩溃,甚至大面积的系统灾变^[12]。因此,在研究电力网络的抗毁性前预先找出电网的脆弱环节是非常重要的。

定义各节点的脆弱性指标^[13]为

$$\eta_i = \frac{\partial E_i}{\partial U_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

具体对于某一节点 i 有

$\eta_i > 0$ 时,该节点承受系统中负荷增长的能力较强; $\eta_i = 0$ 时,能量及电压均处于临界状态; $\eta_i < 0$ 时,承受负荷增长的能力较弱,且其 $|\eta_i|$ 的数值越大,表示该节点越难在负荷增长情况下,维持电压稳定。

据此,可有效地判别出系统的薄弱节点。

2 抗毁性指标建立

2.1 自然连通度

当一个节点与其他任意节点连接的部分路径出现故障时,与这个节点连通的不同路径数越多,发生故障时可替代的路径就越多。在复杂网络抗毁性分析中,该特性可用自然连通度表示,即

$$\bar{\lambda} = \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right) \quad (3)$$

式中, N 为网络节点数; λ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为网络邻接矩阵 $A(G)$ 的特征根。

2.2 抗毁度指标

将网络 G 的抗毁度指标^[14]定义为

$$s(G) = \frac{\ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right)}{S_0} \quad (4)$$

式中, S_0 为考虑所有可行路径的“完全网络图”的自然连通度。对于不同的网络结构,当网络中各节点的备用路径越多,则网络的抗毁度越大,其在遭受扰动或攻击时能维持系统稳定运行的性能越好。

3 电力系统抗毁性评估流程

在电力系统抗毁性分析中,电力网络可能面临两种方式的攻击,即蓄意攻击和随机攻击^[15]。故这里采用的抗毁性分析步骤如下。

1) 蓄意攻击模式

① 计算算例系统各节点的脆弱性指标;

② 把各节点按其脆弱性指标从大到小依次排序,并移除最脆弱的一个节点;

③ 判断网络运行状态是否达到崩溃,若没有,返回①,否则进入④;

④ 根据式(4)计算得到网络抗毁度指标。

2) 随机攻击模式

① 在仿真模型的节点中随机移除一个;

② 判断网络运行状态是否达到崩溃,若没有,返回①,否则进入③;

③ 根据式(4)计算得到网络抗毁度指标。

4 算例分析

以四川省某地区电网为例,将该电网中的 500

作者简介:

陈熙平(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

季杰(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

曹钢(1985),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

蔡显岗(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

王文松(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

张伟(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作。

(收稿日期:2013-08-06)

(上接第 28 页)

置不能及时动作,则会导致系统电压全面下降,逐渐拉垮整个系统电压水平,抑或功率严重不平衡,功角不稳定,最终导致系统崩溃。

仿真结果表明,按脆弱度指标来攻击电力网络中的节点,确实对电网的破坏性更强,电力系统运行状态的恶化速度更快。基于电力系统的脆弱环节分析其抗毁性合理且有效。

5 结 论

基于静态能量函数,构建节点脆弱度指标,找出系统的脆弱环节,利用抗毁性分析原理对其进行蓄意攻击和随机攻击,然后结合电力系统网架结构构建系统抗毁度指标,分析评估电力系统抗毁性。通过对电力系统的基于脆弱性评估的抗毁性研究,在传统抗毁性分析方法的基础上计及了能量的分布,首先找出系统中存在的薄弱环节,然后通过预想的攻击模式分析薄弱环节故障对电网造成的各种影响,为电力系统的安全及稳定运行提供有价值的参考和指导信息。

参考文献

- [1] 邹江峰,章显亮.巴西“2009.11.10”和“2011.2.4”大停电事故及启示[J].中国电力,2011,44(11):19-22.
- [2] 陈竟成,黄瀚.印度大停电事故分析与启示[J].中国电力,2012,45(10):12-16.
- [3] 程克勤,李世伟,周健.基于边权值的网络抗毁性评估方法[J].计算机工程与应用,2010,46(35):95-100.
- [4] 高强,刘献伟,邱丽君.电力系统应急通信网络及其抗毁性分析[J].电网技术,2009,33(11):104-108.
- [5] 张向亮,吕飞鹏,张向军,等.考虑节点电气介数的多组同基最小断电集选取方法[J].中国电力,2012,45(6):10-13.

- [6] 杨丽徙,林茂盛,张宏伟,等.中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J].电力系统自动化,2012,36(1):28-31.
- [7] 饶育萍,林竞羽,侯德亨.基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J].通信学报,2009,30(4):113-117.
- [8] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等.基于级联失效的复杂网络抗毁性[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(10):1252-1257.
- [9] 张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.
- [10] Overbye T J, Demarco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.
- [11] 刘群英,刘俊勇,刘起方.节点势能架构下的电压脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2008,28(25):30-37.
- [12] 丁道齐.深入研究复杂电网动态行为特征构建中国特高压电网安全保障[J].中国电力,2008,41(8):1-7.
- [13] 郑武,李华强,刘慧,等.基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):79-83.
- [14] 田田,吴俊,谭跃进.基于自然连通度的复杂网络抗毁性仿真优化研究[J].复杂系统与复杂性科学,2013,10(2):88-94.
- [15] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等.基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J].电力系统自动化,2013(8):65-69.
- [16] 丁道齐.降低电力系统物理脆弱性,应对自然灾害和恶意攻击[J].中国电力,2009,42(6):26-31.

作者简介:

李艳卿(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统分析、稳定及优化问题研究;

李华强(1965),博士,教授,从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。

(收稿日期:2013-09-14)

基于 L 指标节点无功注入量快速确定方法研究

王 涛¹, 龚 雪², 邓亚文²

(1. 成都市三新电力服务有限公司, 四川 成都 610000;

2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘 要: 随着电网负荷的不断增长, 电压稳定性问题日益突出, 电网出现电压失稳的可能性也越来越大。为了改善系统电压稳定性, 以电压稳定在线监控的简化 L 指标为基础, 分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响; 根据简化 L 指标函数的微分基本性质, 推导出了一种关于无功优化通用的、规范的解析算法。该方法能快速地计算负荷节点无功注入量, 使得电网运行在带相应负荷的最佳稳定状态。通过 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 系统的算例仿真, 验证了所述方法对于提高电压稳定性, 降低电网崩溃风险的可行性和有效性。

关键词: 电压稳定; L 指标; 无功注入量; 无功优化; 快速计算

Abstract: With the improvement of grid load, the problem of grid voltage stability is increasingly prominent, which increases the possibility of voltage instability. In order to improve the system voltage stability in a timely and effective manner, the influences of different injected reactive power on voltage stability are analyzed based on the simplified L index in online monitoring of voltage stability, and a general, canonical and analytical algorithm to optimize VAR is deduced according to the differential property of simplified function of L index. By the proposed approach, the injected reactive power of node can be calculated quickly so that the grid operation can be in the optimal steady state with the corresponding load. The simulations with IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 and IEEE-118 systems have verified the feasibility and validity of the proposed method to improve the voltage stability and reduce the risk of grid collapse.

Key words: voltage stability; L index; injected reactive power; reactive power optimization; fast calculation

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0029-04

0 引 言

随着电网规模的扩大、电力需求的不断增加, 电压稳定性面临的挑战日益增大。系统电压下降不仅会降低网络传输能力, 增加损耗, 不利于电气设备的运行, 情况严重时还会使电网面临电压崩溃, 甚至发展为更为严重的全网性事故^[1-2]。为保证电网安全的运行, 尽量避免发生电压失稳事件, 研究能在线监控电压稳定性和快速确定出改善电压稳定性的方法十分必要^[3-5]。

电压稳定评估指标是电压稳定性研究取得的重要进展, 它是衡量系统电压稳定性的有效方法, 也是实施电压稳定控制的基础^[6-9]。文献[10, 11]提出的可用于在线监测的 L 指标, 以其准确性、线性、快速性等优点备受关注, 已应用在实际电网中。但是 L 指标提供的信息仍然相对较少, 文献[12]考虑到实际电网线路电抗远大于电阻, 母线电压相位较小

等特点简化了 L 指标, 提出了 $L-Q$ 灵敏度分析方法。 $L-Q$ 灵敏度分析可提供电压稳定在线监控的多元信息, 有利于定量分析节点间电压的相互影响, 但是计算量依然较大, 且对于解决电压失稳的反应速度还需提高。

考虑以上问题, 下面以电压稳定在线监控的简化 L 指标为基础, 分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响; 根据函数微分性质, 推导出了一种关于无功优化通用的、规范的解析算法。该方法能快速地确定负荷节点无功注入量, 使得电网运行在带相应负荷的最佳稳定状态, 保证了电网运行的安全, 避免发生电压失稳事件。

1 简化 L 指标

电压稳定局部 L 指标是 Kessel 等根据最简单的两节点系统推导得出。将 L 指标扩展到一般的多节点系统需把节点分为两种类型, 一种是作为负荷节

点的 PQ 节点, 定义为 α_L ; 另一种是作为电源节点的 PV 节点和平衡节点, 定义为 α_G 。每个负荷节点 $j \in \alpha_L$ 的局部指标 L_j 可由 (1) 式求解^[10-11]。

$$L_j = \left| \frac{S_j^+}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} \right| = \left| \frac{S_j + S_j^{corr}}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} \right| = \left| \frac{S_j}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} + \frac{\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| = \left| 1 + \frac{\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| \quad (1)$$

式中 S_j 为负荷节点 j 的节点功率; S_j^{corr} 是来源于其他负载的等效功率, 其表达式为

$$S_j^{corr} = \sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i} \quad (2)$$

式中 Y_{jj}^+ 为节点自导纳; $Y_{jj}^+ = \frac{1}{Z_{jj}^*}$; α_L 为负荷节点的集合; V_i, V_j 为负荷节点 i, j 的电压向量; $v_j^2 = V_j \cdot V_j^*$;

v_j 为负荷节点 j 的电压幅值; Z_{ij} 为负荷节点 i 与 j 之间互阻抗的共轭; S_i 为系统对负荷节点 i 的等值负荷。

电压稳定的情况, 任何节点 j 都必须满足条件 $L_j \leq 1$, 定义系统的全局 L 指标为

$$L = L_{\max} = \max_{j \in \alpha_L} (L_j) \quad (3)$$

L 取值在 0 ~ 1.0 之间, L 取值越小表明系统越稳定, 当 $L \rightarrow 1.0$ 时, 系统电压趋于临界稳定状态。基于对稳定性的保证必须有 $L < 1$, L 与 1.0 之间的差值可作为系统的电压稳定裕度。

算式 (1) 是包含复数运算的复杂表达式, 随着电网规模的增大, 计算量将急剧增加。考虑到实际电网中, 线路电抗远大于电阻, 母线电压相位较小等特点, 文献 [12] 忽略节点电压相角和电阻的影响提出了简化 L 指标。根据算式 (1) 设定为

$$\left| \frac{\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| \leq 1 \quad (4)$$

推导出,

$$L_j = \begin{cases} 1 + \left| \frac{\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| & (\text{舍去}) \\ 1 - \left| \frac{\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{f^2 + g^2} \end{cases} \quad (5)$$

根据简化方法有

$$\begin{cases} f = \sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{f_i}{v_i} \\ f_i = Q_i X_{ji} \\ g = \sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{g_i}{v_i} \\ g_i = -P_i X_{ji} \end{cases} \quad (6)$$

式中 P_i 和 Q_i 分别为负荷节点 i 注入的有功和无功功率; X_{ji} 为负荷节点 j, i 之间的电阻和电抗。因此可得

$$L_j = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{f^2 + g^2} = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Q_i X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (7)$$

2 最佳无功补偿

设定初始的 L 值表达式为

$$L_{jori} = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Q_i X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (8)$$

无功补偿时, 令无功注入量为 ΔQ_i , 则新的无功 $Q_{inew} = Q_i + \Delta Q_i$, 从而得出无功注入量与 L_j 的关系为

$$L_j = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (9)$$

用负荷节点电压稳定指标 L_j 对无功注入量求偏导使其结果等于零时, 可求得负荷节点 L_j 的极值。因 L_j 是凸函数, 所以求得的是其极小值, 即是电网在带相应负荷运行的最佳稳定状态。其表达式如下。

$$\frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q_m} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

其中 m 表示负荷节点的个数。

但是, 考虑到电网中的负荷节点有多个, 极值的求解就要进行多次。为了简化计算和便于理解, 不妨将各个负荷节点的 L_j 值相加求取其和值 L_{sum} , 这样就求解各个负荷节点多个极小值转化成求解其和值 L_{sum} 的极小值^[13]。其表达式如下。

$$L_{\text{sum}} = L_1 + L_2 + \cdots + L_m \quad (11)$$

$$L_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^m \left[1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left(\sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left(\sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \right] \quad (12)$$

为了简化算式令

$$\mu = \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \quad \nu = \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \quad (13)$$

$$\frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j \in \alpha_L \\ j \neq 1}} -\frac{1}{v_j} \cdot \frac{X_{j1}}{v_1} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \\ \vdots \\ \sum_{\substack{j \in \alpha_L \\ j \neq m}} -\frac{1}{v_j} \cdot \frac{X_{jm}}{v_m} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

当式(14)的值为零向量时,可将其化成矩阵形式为

$$D \cdot K \cdot Q + D \cdot K \cdot \Delta Q = 0 \quad (15)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & X_{m1} \\ & \ddots & \\ X_{1m} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \frac{X_{1m}}{v_m} \\ & \ddots & \\ \frac{X_{m1}}{v_1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{从而推出 } \Delta Q = -Q \quad (18)$$

3 算例仿真

根据以上推导,将 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 系统作为算例,在 matpower 平台上对各系统进行算例分析。其计算结果如图 1 所示。

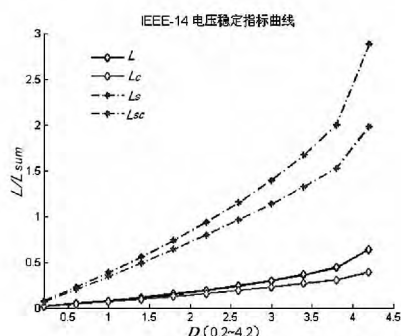


图 1 IEEE-14 负载变化的 L/L_{sum} 值曲线

图 1 中以 IEEE-14 标准模型的原始负荷为基准,以 0.2 倍基准负荷为步长,在 0.2~4.2 倍范围

内变化。 L 是取负荷节点局部稳定指标 L_j 中的最大值, L 曲线是负荷节点未进行无功补偿,负荷在给定范围内变化所得的全局电压稳定性指标 L 值的曲线; L_s 则是其对应的各个负荷节点 L_j 值求和的曲线; L_c 曲线是表示负荷在给定范围内变化,负荷节点注入的无功功率为计算所得时得到的全局电压稳定性 L 值曲线, L_{sc} 同上则是各负荷节点 L_j 值求和曲线。对比曲线 L 、 L_c 可看出,采用前面提出的无功补偿方案对改善系统电压稳定性的效果明显,并且电网带的负荷越重,改善电压稳定性的效果越显著。如负荷为 3.8 倍时 L 曲线对应的 L 值已接近 0.5,由曲线可知,此时系统对负荷的增加已经特别敏感,负载稍微增大就会有导致系统电压失稳的可能性;相应的负载情况下 L_c 曲线中 L 值已减小为 0.3 左右,此时系统运行在较安全的电压环境下。由此可知,当电网电压稳定性较差时,该方法可较好的提高其电压稳定性,较大地降低系统面临崩溃的风险。对比曲线 L 、 L_s 和 L_c 、 L_{sc} 可以看出两条曲线的走势相同,因此可以近似地将 L_s 作为 L 的放大,更加便于观测。

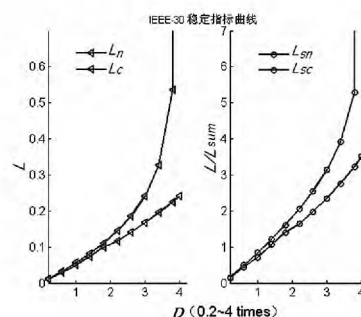


图 2 IEEE-30 负载变化的 L/L_{sum} 值曲线

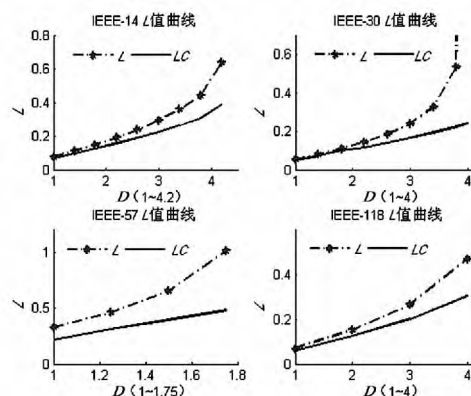


图 3 IEEE 4 种模型对应各自负载变化的 L 值曲线

IEEE-30 标准模型的负载范围为 0.2~4 倍,根据图 2 中曲线可得出与图 1 相似的结论,并且还

可以看出无功补偿后,电网的负荷裕度也有明显的改善。

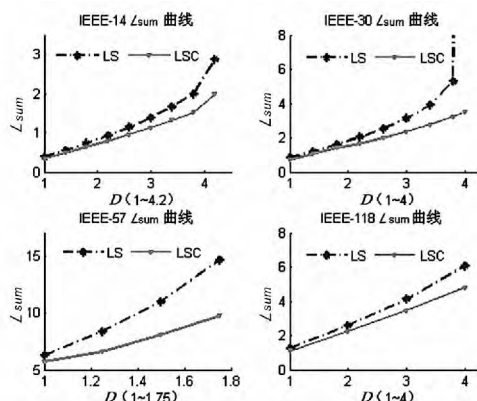


图 4 IEEE 不同模型对应各自负载变化的 L_{sum} 值曲线

分析图 3、图 4 可知,所提出的方法适用于多种电网模型,验证了其普遍适用性。从图中还可以得出 IEEE-118 节点系统的负荷裕度是最大的,IEEE-57 系统的负荷裕度最小。

以上结果是对 IEEE 中的各种模型进行的计算分析,对于以上结果还可以进一步改善。从 IEEE 标准模型的支路数据可知,模型中的电阻和电抗之间的差值相对于实际电网中的差值还是存在一定的差异,所以电网的有功负荷对于电网的压降比例要比实际的电网的比例大。若将所提方法应用于与实际电网更接近的模型中,也就电阻远小于电抗,则有功负荷引起的电压降部分几乎可以忽略不计,这样的情况下所得结果会更加理想。

4 结 论

以电压稳定在线监控的简化 L 指标为基础,分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响,并推导出了一种通用的、规范的能快速确定负荷节点无功注入量的解析算法,根据解析算法得出的无功注入量,对电网模型实施了相应无功补偿措施。通过 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 模型系统仿真分析,验证了所提方法能明显改善系统电压稳定性;并且电网负载越重,其改善效果越显著,证明了该方法可较为有效地降低系统面临崩溃的风险,保证电网运行的安全,避免发生电压失稳事件;多个电网模型的仿真分析也验证了其普遍适用性。

参考文献

- [1] IEEE Committee Report. Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience [M]. New York: IEEE Publication, 1990.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition. Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [3] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 李兴源,王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-5.
- [5] 贾宏杰,余贻鑫,王成山. 利用局部指标进行电压稳定在线监控的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 45-49.
- [6] 余贻鑫. 电压稳定研究述评[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 1-8.
- [7] 张江红,孟宪朋,刘怀东,等. 电力系统电压稳定的分析研究[J]. 电工技术, 2011(6): 30-32.
- [8] 刘益清,陈超英,梁磊,等. 电力系统电压稳定评估的动态分析方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 105-108.
- [9] 段献忠,何仰赞,陈德树. 论电力系统电压稳定的几种实用判据和安全指标[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.
- [10] P. Kessel, H. Glavitsch. Estimating the Voltage Stability of a Power System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, PWRD-1(3): 346-354.
- [11] 贾宏杰,孙晓彦,张沛. 基于 L 指标的电压稳定约束下的最优潮流[J]. 电力系统自动化学报, 2006(1): 34-38.
- [12] 姜涛,李国庆,贾宏杰,等. 电压稳定在线监控的简化 L 指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 1-7.
- [13] 吴文传,张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J]. 中国电机学报, 2004, 24(1): 36-39.

作者简介:

王 涛(1970), 工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

龚 雪(1989), 硕士研究生,主要研究方向为电压/无功优化控制;

邓亚文(1990), 硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化、智能控制。

(收稿日期: 2013-08-16)

面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识研究

陈科屹¹ 阮 征¹ 何 强¹ 贺静波²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国家电网公司, 北京 100031)

摘 要: 广域阻尼控制是抑制电力系统区间低频振荡极具潜力的手段, 降阶辨识方法可用于获取广域阻尼控制器设计所需要的模型。电力系统的维数成千上万, 基于模式可控可观性分析提出了电力系统面向阻尼控制器设计的可降阶原理、降阶误差分析方法以及基于降阶原理估计和 BIC 准则的模型定阶方法, 并研究了降阶辨识实验的激励信号和预滤波器设计。四机系统的仿真算例表明了所提出的面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识原理与方法的有效性。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 广域阻尼控制; 降阶辨识

Abstract: Wide-area damping control is a great potential approach for the damping of inter-area low-frequency oscillations. Reduced order identification provides a feasible solution to get the system model for the design of damping controller. The principle of order reduction for damping controller design in power system is studied based on mode controllability and observability analysis. Then model reduction error is analyzed and a model order selection method is proposed according to reduction error analysis and BIC criterion. Then an input and pre-filter design method is proposed for damping control oriented identification experiments. The availability of proposed principle and methods are verified in a four-machine system.

Key words: power system; low-frequency oscillation; wide-area damping control; reduced order identification

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0033-06

0 引 言

大区电网互联的形势下, 低频振荡问题已成为限制省间和区间功率传输极限的瓶颈, 即使安装了大量传统的励磁附加阻尼控制器 (power stability stabilizer, PSS), 区间低频振荡问题仍然没有得到有效解决^[1]。广域测量技术的发展和普及使得采用广域信号作为阻尼控制的输入信号成为可能, 研究表明^[1], 对于抑制区间低频振荡, 广域阻尼控制与本地阻尼控制相比具有明显优势。

在广域阻尼控制中, 传统 PSS 设计中所采用的单机无穷大系统的假设已经不再适用。学者们陆续提出了基于极点配置、最优控制及鲁棒控制等现代控制理论的广域阻尼控制器设计方法, 然而这些方法都要基于系统模型, 因此系统模型的获取是设计广域阻尼控制器的关键。降阶辨识方法为获取电力系统控制器设计可用的模型提供了一种有效手段。

系统辨识的方法众多, 基于模型的方法主要有预报误差法 (prediction error method, PEM) 和子空间辨识法两种, 对于系统辨识的算法实现、辨识的收

敛性和一致性、辨识误差的分布、模型的定阶方法以及辨识实验的最优激励信号和最优预滤波器设计方法, L. Ljung 在其经典巨著^[2]中做了系统的总结。相比之下电力系统中面向控制的辨识研究开展的较少, J. Kamwa 在这方面做了很多先驱性的工作, 他采用子空间辨识等方法为电力系统 MIMO 控制器设计提供模型, 获得了很好的仿真效果^[3]。文献[4]采用 PEM 辨识方法获得了系统模型, 并在此基础上进行了 MIMO 最优控制器设计。系统辨识方法在电力系统中应用的同时, 在降阶原理及方法体系方面还有待研究, 包括: ① 电力系统面向阻尼控制器设计的可降阶原理: 电力系统的阶数有成千上万阶, 可以用几阶到十几阶的模型来表示的原因; 降阶的误差分析; 降阶模型阶数的确定等等; ② 电力系统的降阶辨识方法体系: 电力系统辨识可用的方法; 面向广域阻尼控制误差度量; 辨识实验的激励信号、预滤波器设计等等。

1 电力系统的可降阶原理与降阶误差分析

1.1 模式可控可观性与系统降阶

电力系统线性模型可以表示成解耦状态方程^[6]为

$$\dot{z} = Az + B'u \quad (1)$$

$$y = C'z \quad (2)$$

其中 $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$; z_i 为对应模式 λ_i 的状态变量; b_i' 为 B 的第 i 行, 对应输入 u 对模式 λ_i 的可控性; c_i' 为 C 的第 i 列, 对应输出 y 对模式 λ_i 的可观性。先分析简单情况, 令 $u = Ky$, K 为常数。

此时系统可表示成

$$\dot{z} = Az + B'KC'z = (A + KB'C')z \quad (3)$$

其中 $A + KB'C'$ 为闭环状态矩阵, 用 A' 来表示。当模式 λ_i 不可控, 即 $b_i' = 0$ 时, A' 具有如下形式。

$$A' = \begin{bmatrix} \lambda_1 + Kb_1'c_1' & Kb_1'c_2' & \cdots & Kb_1'c_i' & \cdots \\ Kb_2'c_1' & \lambda_2 + Kb_2'c_2' & \cdots & Kb_2'c_i' & \cdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_i & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

经过矩阵行变换, 式(4)与式(5)的特征值相同为

$$PA'P^T = \begin{bmatrix} \lambda_1 + Kb_1'c_1' & Kb_1'c_2' & \cdots & 0 & \cdots \\ Kb_2'c_1' & \lambda_2 + Kb_2'c_2' & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_i & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 P 为行变换矩阵。注意到, 式(5)所示矩阵即式(6)所示系统的闭环状态矩阵。

$$\begin{cases} \dot{z}_i = \lambda_i z_i \\ \dot{z}_j = \lambda_j z_j + b_j' \cdot K \cdot \sum_{k=1, k \neq i}^n c_k' z_k, j \neq i \end{cases} \quad (6)$$

式(6)所示系统由不受控和受控两解耦的子系统构成, 其中受控的子系统不含有与不可控模式相关的状态变量, 因此其阶数是原系统的阶数减去不可控的模式数。控制器设计可针对该受控子系统进行, 与在原系统上设计控制器是等同的。

由上述分析可知, 当系统存在不可控的模式时, 对于控制器设计而言, 可以对系统进行降阶, 降阶后的系统不含有不可控的模式。由对偶原理可知, 当存在不可观的模式时, 系统同样也可以被降阶。上述证明是在控制器为比例环节的假设下完成的, 对于一般情况, 通过将控制器表述成状态方程形式与

系统的解耦状态方程联立, 通过类似的证明过程可以得到相同的结论, 此处从略。

当存在不可控或不可观的模式时, 对于控制器设计而言, 被控系统可以被降阶而不损失有用的信息。由此可以推想, 当存在可控可观性相对很弱的模式时, 在承受一定的误差的前提下, 也可以对被控系统进行降阶。后一种情形在电力系统中更为常见。对于阻尼控制器设计而言, 以 PSS 设计为例, 虽然电力系统阶数很高, 但是单台发电机参与的模式有限, 且本地反馈信号也只对本地模式和部分区间模式可观性较强, 因此对于 PSS 的设计而言, 其对于系统的大部分模式是不可控不可观或者极弱可控、可观的, 因此可以对系统进行大规模的降阶。

引入广域信号作反馈后, 由于信号的选择不受限制, 可以挑选对区间模式具有强可观性的信号, 且由于控制点和反馈信号的选择可以分离, 对控制点可控的本地模式, 可以选择反馈信号使之不可观, 使得控制器既可控又可观的模式集中在区间振荡模式, 从而可以进一步降低系统的阶数。

1.2 降阶模型的误差

考虑单输入单输出系统 $G(s)$ 。 $G(s)$ 的传递函数可写成如下形式(假设特征方程无重根)。

$$G(s) = \frac{R_1}{s - \lambda_1} + \cdots + \frac{R_r}{s - \lambda_r} + \frac{R_{r+1}}{s - \lambda_{r+1}} + \cdots + \frac{R_n}{s - \lambda_n} \quad (7)$$

其中 $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$, $R_i = c_i' b_i'$ 为模式 λ_i 的留数, 有 $|R_1| \geq |R_2| \geq \cdots \geq |R_n|$ 。假设系统降为 r 阶。

$$G_r(s) = \frac{R_1}{s - \lambda_1} + \frac{R_2}{s - \lambda_2} + \cdots + \frac{R_r}{s - \lambda_r} \quad (8)$$

当 $R_{r+1} = R_{r+2} = \cdots = R_n = 0$, 自然有 $G_r(s) = G(s)$ 。

如果 $R_{r+1} \neq 0$, 降阶会带来误差。该误差为

$$\Delta G_r(s) = G(s) - G_r(s) = \frac{R_{r+1}}{s - \lambda_{r+1}} + \cdots + \frac{R_n}{s - \lambda_n} \quad (9)$$

该误差是被舍去的模式所引入的误差之和。模型误差可以用 H_∞ 范数和 H_2 范数来评估。

用 H_∞ 范数来评估模型误差, 可以考察模型误差的幅频响应的峰值。模式 λ_i 在 $G(s)$ 中对应的项为 $R_i/(s - \lambda_i)$, 该项在频域上的最大幅值为 $|R_i|/|\alpha_i|$, 舍去该模式所带来误差的 H_∞ 范数即为 $|R_i|/|\alpha_i|$ 。由于各模式对应幅频上的峰值不出现在同一频率,

因此式(9)所示误差范数的上限和近似的下限为

$$\max_{i=r+1, \dots, n} \{ |R_i| / |\alpha_i| \} \leq \|\Delta G(s)\|_{\infty} \leq \sum_{i=r+1}^n |R_i| / |\alpha_i| \quad (10)$$

该上限保守性太强, 下限更接近误差的真实值。用 H_2 范数来评估模型误差, 可以反映在整个频谱范围内误差的总体大小, 同时也对应模型与实际系统间单位冲激响应之差的能量。

模式 λ_i 对应项 $R_i/(s - \lambda_i)$ 的 H_2 范数平方为^[5]

$$\|(\lambda_i)\|_2^2 = \begin{cases} -\frac{(\operatorname{Re}\{R_i\}\lambda_i)^2 + (\operatorname{Re}\{R_i\lambda_i^*\})^2}{\alpha_i|\lambda_i|^2}, & \operatorname{Im}\{\lambda_i\} \neq 0 \\ -\frac{R_i^2}{2\alpha_i}, & \operatorname{Im}\{\lambda_i\} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由于单位冲激脉冲响应的总能量近似等于各模式能量的和, 式(9)所示误差的 H_2 范数可近似由式(12)表示。

$$\|\Delta G_r(s)\|_2 \approx \left(\sum_{i=r+1}^n \|(\lambda_i)\|_2^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

无论是范数还是范数下的误差表示都反映出, 舍去留数小且阻尼大的模式所带来的模型误差较小。误差的大小是相对的, 误差范数相对于系统范数的相对大小更能准确地评价模型的质量。

1.3 基于降阶原理和 BIC 准则的模型定阶方法

模型定阶是辨识过程中非常重要的一环。令辨识的相对误差小于 ε_0 , 由降阶原理做出的模型阶数估计由式(13)给出。

$$\|\Delta G_r(s)\| \leq \varepsilon_0 \|G(s)\| \leq \|\Delta G_{r+1}(s)\| \quad (13)$$

其中, $\|\cdot\|$ 可以是 H_{∞} 范数或 H_2 范数, $\|\Delta G_r(s)\|$ 的计算公式由式(9)、(10)和(11)给出。随着阶数的增加单调递减。 $\|G(s)\|$ 为系统的总范数。

采用降阶理论给出了阶数的估计后, 在辨识过程中再采用传统的定阶准则来做调整和校核。传统的 BIC 定阶准则^[87]为

$$\operatorname{BIC}(p) = N \ln V_N + p \ln N \quad (14)$$

其中 p 为模型阶数; N 为采样点数; V_N 为预报误差的方差。该准则包含了对拟合精度的评价和对模型阶数的惩罚两部分。降阶原理与 BIC 准则的结合, 赋予了定阶方法清晰的物理意义, 改变了传统 BIC 等方法依赖辨识拟合程度大量试算的局面。

2 电力系统的降阶辨识实验设计

降阶的可行性是用低阶模型来辨识系统的基础。系统辨识常用方法主要有预报误差法和子空间辨识法两大类^[2], 其中预报误差法使用最为广泛, 并可用于闭环辨识。这里以预报误差法为例讨论辨识实验中的激励信号和预滤波器设计。

待辨识的系统如下表示。

$$y(t) = G_0(q)u(t) + H_0(q)e(t) \quad (15)$$

其中 q 是移位算子; G_0 是被控系统; u 是激励信号输入; y 是测量输出; e 是方差为 λ_0 的白噪声; H_0 是噪声模型。辨识模型与实际系统间总会存在误差, 其大小可以用模型与实际系统之差的方差和偏差来评价, 定义模型品质度量的准则函数^[2]为

$$J(\theta) = \int_{-\pi}^{\pi} |G_0(e^{j\omega}) - G(e^{j\omega}, \theta)|^2 C(\omega) d\omega \quad (16)$$

其中 $G(e^{j\omega}, \theta)$ 为辨识模型的频域表示; $C(\omega)$ 为品质加权函数, 对应在不同频率段对辨识精度的不同要求。 $J(\theta)$ 近似可分解为“方差贡献” $J_V(\theta)$ 与“偏差贡献” $J_B(\theta)$ 之和。对于开环辨识情况, $J_V(\theta)$ 可表示为^[2]

$$J_V(\theta) \approx n/N \int_{-\pi}^{\pi} C(\omega) \Phi_v(\omega) / \Phi_u(\omega) d\omega \quad (17)$$

其中 n 是模型阶数; N 是采样数据点数; $\Phi_v(\omega)$ 为辨识中噪声的功率谱, 有 $\Phi_v(\omega) = \lambda_0 |H_0(e^{j\omega})|^2 \Phi_u(\omega)$ 为激励信号的功率谱。

为使得 $J_V(\theta)$ 最小, 最优激励信号设计^[2]为

$$\Phi_u^{opt}(\omega) = \mu \sqrt{C(\omega) \cdot \Phi_v(\omega)} \quad (18)$$

其中 μ 是可调常数。为使得偏差贡献项 $J_B(\theta)$ 最小, 应满足式(19)^[2]。

$$\Phi_u(\omega) |L(e^{j\omega})|^2 / |H(e^{j\omega}, \theta^*)|^2 = kC(\omega) \quad (19)$$

其中 $H(e^{j\omega}, \theta^*)$ 为 N 趋于无穷时噪声模型的收敛值; k 是可调常数。

对于以广域阻尼控制器设计为目的的电力系统降阶辨识, 推导相应的品质加权函数 $C(\omega)$ 如下。

广域阻尼控制器的参考信号一般为零, 系统的输入和输出满足如下方程。

$$\begin{aligned} u(t) &= -K(q)y(t) \\ y(t) &= G_0(q)u(t) + v \end{aligned} \quad (20)$$

其中 K 为反馈控制器; v 代表外部扰动。系统只受

外部扰动激励; $y = S_0 v$, S_0 为输出灵敏度函数, $S_0 = 1/(1 + G_0 K)$ 。令 $R(q)$ 为

$$R(q) = G(q, \theta) / [1 + G(q, \theta) K(q)] \quad (21)$$

实际系统的 S_0 与所设计的 $\hat{S}_0$ 之差 $\tilde{S}_0$ 为

$$\tilde{S}_0 = \frac{1}{1 + G_0 K} - \frac{1}{1 + G(q, \theta) K} \approx \frac{RK[G(q, \theta) - G_0]}{G_0(1 + G_0 K)} \quad (22)$$

为使得设计系统输出逼近实际系统输出, 必须极小化目标函数为

$$J(G) = \int_{-\pi}^{\pi} |G(e^{j\omega}, \theta) - G_0|^2 \left| \frac{RK}{G_0(1 + G_0 K)} \right|^2 \Phi_v^{cl} d\omega \quad (23)$$

对比式(16), 可知此时的 $C(\omega)$ 为

$$C(\omega) = |RK/[G_0(1 + G_0 K)]|^2 \Phi_v^{cl} \quad (24)$$

Φ_v^{cl} 是指闭环运行时的噪声谱。将式(24)代入式(18)和(19), 可以得到面向广域阻尼控制器设计的最优激励信号和最优预滤波器设计如下。

$$\Phi_u^{opt}(\omega) = \mu |RK/[G_0(1 + G_0 K)]| \sqrt{\Phi_v^{cl} \cdot \Phi_v} \quad (25)$$

$$|L(e^{j\omega})|^2 = |H(e^{j\omega}, \theta^*)|^2 \sqrt{C(\omega)/\Phi_v(\omega)} \quad (26)$$

求解上两式需要已知真实系统 G_0 、噪声谱 Φ_v^{cl} 和 Φ_v 以及 K 和 R , 这些在辨识前都不会已知。一种可行的方法是采用迭代辨识, 每次辨识前用上次辨识得到的系统模型、噪声谱以及重新设计的控制器代入式(25)和(26)重新求解激励信号和预滤波器。对于实际系统中的辨识实验, 也可以采用仿真系统中的系统模型和控制器作为设计依据。

以上激励信号和预滤波器的设计方法在实际应用中显得非常复杂, 式(18)和(26)给出了一个结论: 在辨识精度要求高的频率段, 激励信号谱和预滤波器幅频响应都应该具有更大值。由于辨识出的模型会用于设计控制器以阻尼低频振荡, $C(\omega)$ 在低频段会有更大的值, 一种实用的简化设计方法是把激励信号谱和预滤波器设计成低通的形式, 将截止频率设置在一般振荡的最高频率 2 Hz 左右。

设计出激励信号的谱后, 滤波后的高斯白噪声是一种频域和时域特性都较为理想的激励信号实现方式, 此外还需要结合对激励信号的幅值和能量的限制来确定可调系数 $\mu^{[2]}$ 。

3 仿真算例分析

仿真算例在四机两区系统上进行, 仿真工具为 Matlab, 系统如图 1 所示, 各元件参数与文献[6]相同。

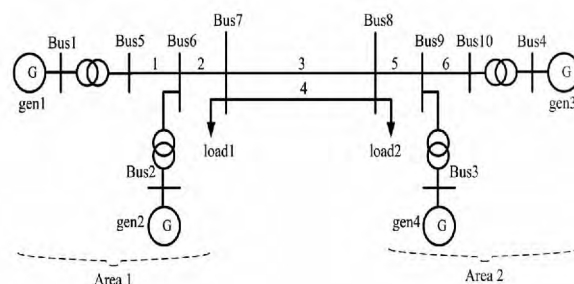


图 1 四机两区系统示意图

每台发电机都配备励磁和调速系统, 系统共 54 阶。以发电机 4 的励磁参考电压为控制点, 分别以机端功率和区域 1 与区域 2 间的交换功率作为反馈信号, 考查面向本地控制和广域控制的电力系统可降阶情况。分析的结果见表 1, 为简化篇幅, 省略了大量无关紧要的左半平面实轴上的非振荡模式。

由表 1 可知, 系统有 3 个弱阻尼的机电振荡模式, 其中 0.557 7 Hz 模式为区间振荡模式, 1.104 9 Hz 模式为 G3/G4 间的本地振荡模式, 1.131 6 Hz 模式为 G1/G2 间的本地振荡模式; 其他模式为阻尼情况很好的控制器及磁链模式。G4 对于 G3/G4 本地模式及区间模式的可控性较强, 对于 G1/G2 的本地振荡模式可控性很差, 且对于大量与 G4 不相关的控制器/磁链模式不具有很强的可控性; 同样 G4 机端功率信号对于 G1/G2 模式的可观性很差, 且对于大部分控制器/磁链模式基本不具有可观性; 相比本地信号, 广域的区域交换功率信号的模式可观性基本集中在区间振荡模式, 对于其他本地模式及控制器/磁链模式的都基本不可观。

结合前述基于模式可控可观性的可降阶原理可知, 此系统可以实现大规模的降阶来简化控制器的设计。以模型误差 10% 为限, 用 H_2 范数来评估误差, 本地控制需要保留的模型阶数为 8 阶, 广域控制为 3 阶; 用范数评估误差, 本地控制需要保留的模型阶数为 10 阶, 广域控制为 4 阶。该分析结果表明, 降阶的程度与控制点和反馈信号的选择相关, 而对电力系统的大规模降阶是可行的。

表 1 四机两区系统模式可控可观性分析

频率 /Hz	阻尼	G4 可控性	本地信号 可观性	广域信号 可观性	本地控制 H_2 范数	广域控制 H_2 范数	本地控制 H_∞ 范数	广域控制 H_∞ 范数
0.557 7	0.051 3	4.638 4	0.186 4	0.311 4	2.025 7	3.356 1	4.800 1	8.017 7
1.104 9	0.118 0	28.380	0.168 5	0.015 7	4.430 3	0.375 3	3.808 1	0.355 8
1.131 6	0.118 3	0.627 3	0.011 3	0.054 2	0.008 1	0.035 7	0.008 4	0.040 1
0.089 8	0.400 7	1.328 2	0.093 5	0.029 1	0.276 1	0.086 3	0.503 1	0.156 9
0.102 5	0.453 4	2.018 5	0.033 9	0.029 2	0.100 4	0.120 5	0.208 7	0.179 8
0.305 6	0.681 1	8.681 1	0.109 4	0.083 4	0.716 9	0.491 1	0.531 8	0.405 1
0.072 8	0.968 6	1.604 1	0.114 7	0.058 9	0.030 0	0.094 9	0.103 2	0.053 0
0.006 2	0.999 8	1.095 0	0.049 1	0.054 0	0.053 4	0.046 9	0.027 5	0.030 2
1.574 6	0.657 5	83.246	0.000 3	0.000 4	0.008 7	0.013 7	0.003 1	0.003 6
2.300 9	0.750 9	1 516.5	0.017 6	0.003 0	6.195 5	1.186 8	1.626 2	0.277 9
1.249 4	0.973 4	0.052 7	0.001 9	0.003 7	0.004 7	0.009 2	0.001 3	0.002 5
0.070 2	0.999 9	2.115 3	0.003 1	0.002 6	0.053 6	0.102 0	0.014 9	0.012 5
1.098 4	0.992 8	853.50	0.000 2	0.000 9	0.000 1	0.000 3	0	0
4.889 8	0.858 7	264.41	0	0	0.000 2	0.001 2	0.000 1	0.000 1
0	—	1.504 9	0.045 7	0	0	0	0	0.421 8
.	.	.	.	.	.	.	.	.

采用 PEM 的方法辨识从控制点到广域反馈信号的被控系统模型,采样率为 10 Hz,仿真时长为 40 s。由于实际系统模型未知,因此首先将激励信号谱和预滤波器设计成低通的形式,截止频率为 2 Hz,激励信号选用滤波后的高斯白噪声,滤波器为二阶巴特沃兹低通滤波器,衰减率取为 0.707。辨识得到的各阶模型拟合度如表 2 所示。

由上述基于降阶原理的估计可知,采用 3 阶模型已能较好地拟合系统。从表 2 可以看出,随着模型阶数从 3 阶上升到 11 阶,模型的拟合精度并没有显著提高,这反映了降阶理论对模型阶数做出的估计是合理的。辨识出的 3 阶模型含有一对频率为 0.58 Hz、阻尼比为 5.47% 的极点,与表 1 的小干扰分析结果基本相同。根据 BIC 准则进行最后的校验,确定模型的阶数为 3 阶。

表 2 不同模型阶数下的拟合度

模型阶数	3	5	7	11
拟合度 /%	81.4	82.4	81.8	84.2

根据辨识的 3 阶模型采用极点配置的方法^[6]设计出广域阻尼控制器,与本地 PSS 控制相比较,控制效果如图 2 所示,其中 PSS 参数由文献[6]给定。可见,与本地 PSS 控制相比,广域阻尼控制对于区间

低频振荡的阻尼更强,该算例同时也表明广域阻尼控制器的设计可以基于降阶辨识模型进行。

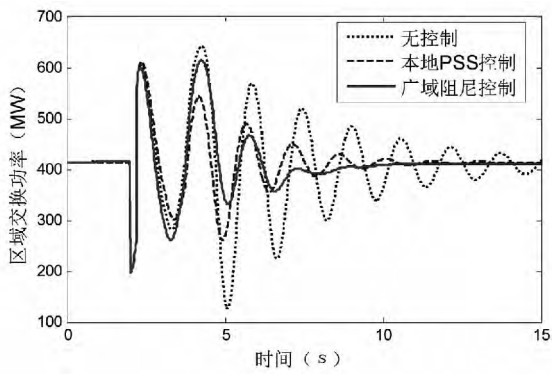


图 2 根据辨识模型设计广域阻尼控制器的控制效果

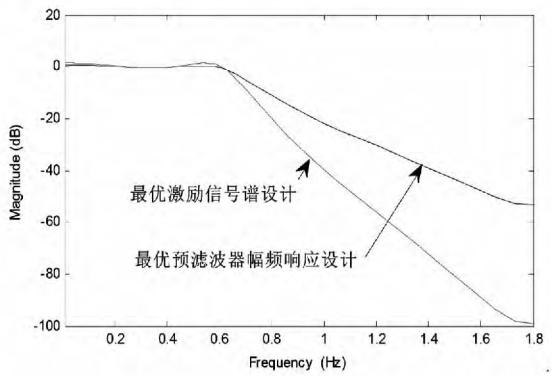


图 3 最优激励信号谱和最优预滤波器幅频响应设计

根据辨识出的系统模型和噪声模型,以及所设计的控制器,按照式(25)和式(26)重新设计得到如图3所示最优输入信号谱和最优预滤波器幅频特性。

两者都具有明显的低通特性,在主导振荡频率 0.58 Hz 及以下频率有较大值,截止频率在 0.8 Hz 左右,比本辨识实验中采用的截止频率 2 Hz 略低。可见,由于电力系统呈低通特性,且低频振荡频率小于 2 Hz,因此将输入信号谱和预滤波器设计为低通特性,截止频率取为高于低频振荡频率,是一种适用性较强的设计方案。

4 结 论

电力系统降阶的可行性是能够用低阶模型来辨识系统的基础。基于模式可控可观性分析,提出了面向广域阻尼控制器设计的电力系统可降阶原理,并提出了 H_∞/H_2 范数下的降阶误差分析方法,以及降阶原理估计和 BIC 准则结合模型定阶方法。进一步地,针对广域阻尼控制器设计,提出了辨识实验中的最优激励信号和最优预滤波器设计方法,并指出采用具有低通特性的激励信号谱和预滤波器是一种实用的设计方案。四机两区系统上进行的仿真表

明了上述方法和理论的有效性。

参考文献

- [1] 谢小荣,肖晋宇,童陆园,等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化,2004,28(2):37-40.
- [2] Lennart Ljung. System Identification—Theory for the User(2nd ed) [M]. USA: Prentice Hall,2002.
- [3] Kamwa I, Luc Gerin-Lajoie. State-space System Identification-toward MIMO Models for Modal Analysis and Optimization of Bulk Power Systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems,2000,15(1):326-335.
- [4] Lu Chao, Li Licheng, He Jingbo, et al. Optimal Coordinate Design of Multiple HVDC Modulation Controllers based on MIMO System Identification [C]. 2007 IEEE PES General Meeting,2007:1-8.
- [5] Xie Xiaorong, Lu Chao. Optimization and Coordination of Wide-area Damping Controls for Enhancing the Transfer Capability of Interconnected Power Systems[J]. Electric Power Systems Research,2008,78:1099-1108.
- [6] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill,2001.

(收稿日期:2013-11-04)

(上接第 18 页)

3 结 论

基于智能电网调度支持系统的可视化平台,结合现有 WAMS 系统应用功能,设计并实现了电网运行动态监视完整的可视化功能。

通过实时获取电网运行相关的动态告警信息,该可视化功能将不同类型的电网动态运行信息与告警进行汇集与综合展示,实现对电力系统动态运行状态高效、精准的监视与告警。从实际应用中的效果来看,它能够使得运行人员快速、直观地掌握电网动态运行情况,提高调度运行人员对电网动态越限、电网扰动、低频振荡等重要电网事件以及机组并网性能评价等的响应速度与决策处理能力。

参考文献

- [1] 李丹,韩福坤,郭子明,等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术,2004,28(23):52-56.

- [2] 曹路,汪德星,岑宗浩. 广域测量系统在华东电网中的应用[J]. 电力设备,2005,6(12):38-41.
- [3] 干磊,康河文,何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):152-155.
- [4] 周喜超,智勇,郑伟,等. 基于 WAMS 系统的甘肃陇南电网大负荷扰动试验[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):129-131.
- [5] 沈国辉,余东香,孙湃,等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术,2009,33(17):31-36.
- [6] 李大勇,马冬雪,王晓宁,等. 电网信息可视化应用研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):156-158.
- [7] 王庆红. 电力系统可视化技术及其在南方电网的应用[J]. 南方电网技术,2006,2(3):40-44.

作者简介:

王波(1981),硕士,高级工程师,从事的主要工作为广域相量测量系统相关研究与开发;

杨洪耕(1949),教授,博导,长期从事电能质量、电网扰动和谐波的研究工作。

(收稿日期:2013-07-23)

空载轻载新设备启动送电继电保护 向量测试的思考

梁 静¹,冯小萍²,常喜强²,肖 雪³,印 欣⁴

(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 国网新疆电力公司电力调度控制中心,新疆 乌鲁木齐 830002;

3. 华北电力大学,河北 保定 071003;4. 国网新疆电力公司检修公司,新疆 阜康 831500)

摘 要:对一次新设备启动送电过程中空载及轻载线路继电保护向量测试工作遇到的问题进行了讨论,对解决方法进行综合论述分析,提出了新设备启动过程中带负荷测向量的注意事项,并在此基础上提出了新的测试方法。新方法不仅解决了大多数空载及轻载线路保护向量无法测试的缺点,同时大大缩短了测试时间,确保了电网的安全稳定运行。

关键词:新设备;向量;轻载;空载;启动送电

Abstract: The problems occurring in the relay protection vector testing for no-load and light-load lines during the startup of new power transmission equipment are discussed, the comprehensive solutions are analyzed, the points needing attention in the process of vector testing with load for new equipment startup are proposed, and a new testing method is put forward on this basis. The new method not only improves the shortcomings that the protection vector cannot be tested in most no-load and light-load lines, but also significantly reduces the testing time, which ensures the safe and stable operation of power grid.

Key words: new equipment; vector; light-load; no-load; startup

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0039-04

0 前 言

继电保护带负荷测向量对于新设备送电至关重要,其主要是利用工作电压、负荷电流检查电流二次回路的正确性,结合一次设备负荷情况进行矢量分析,判断设备运行情况是否良好。核相的目的是通过二次电压回路的大小和相位的测量,判断二次电压回路是否正确,变比及极性使用是否正确。

空载及轻载线路的继电保护向量测试一直是工程实际中的难题。随着越来越多的新设备启动,调度运行人员在启动送电过程中往往为保证电网安全,腾空母线造成负荷太小,无法满足继电保护带负荷测向量的要求而影响保护测试,从而影响新设备送电,进而影响新设备相关配套工程的建设。特别是对于电网中新建的许多电厂,此种问题更加突出。大量电厂正在或即将建设,但在电厂辅机调试期间及发电机启动投运初期,由于高压启备线路所带厂内负荷太小,短期内无法满足进行带负荷测向量的

要求。尤其是对于大机组的发电厂,由于短路容量大,一般电流互感器的变比很大,为达到二次电流向量测试的需要,所需负荷将更大,有可能造成所有辅机全部投入仍然达不到二次电流向量测试需要的负荷。在此种情况下,若将高压启备线路投入运行,则无法保证系统母差保护和线路保护向量的正确性,将严重威胁电网的安全稳定运行;而如果不将高压启备线路投入运行,则电厂的辅机调试将无法开展,又会极大影响电厂的建设。

因此,解决空载及轻载线路的继电保护向量测试问题可以突破新设备启动中的难题,减少新设备启动测试时间,尤其是对于电厂建设,不仅具有巨大的经济效益,而且密切关系到整个电网的安全稳定运行,意义十分重大。

1 继电保护测向量的作用和测试内容

继电保护带负荷测试对继电保护的安全运行起着至关重要的作用,无论是对母差保护、线路或变压

器差动保护 均要进行带负荷测向量。新投设备带有母差保护或带方向的保护,电流互感器更换或返厂检修后,更换线路保护,总之只要是涉及 TA 更换、保护装置更换或电流回路改动都需要带负荷测向量。

带负荷测试前,要深入了解保护原理、实现方式和定值意义,熟悉现场接线;带负荷测试中,要按照带负荷测试内容,认真、仔细、全面收集数据;带负荷测试后,要对照分析方法,逐一检查、逐一判断。

带负荷测试数据检查:测试得到的数据对正确分析、判断设备情况起到了决定性的作用,因此,检查是必不可少的。检查步骤如下(以变压器为例)。

①检查电流相序。在正确接线条件下,各侧电流都是正序。

②检查电流对称性,每侧 A 相、B 相、C 相电流幅值基本相等,相位互差 120° ,且 A、B、C 三相电流依次超前 120° 。

③检查各侧电流幅值,核实 TA 变比,将变压器各侧一次电流除以二次电流,得到实际 TA 变比,该变比应和整定变比基本一致。

④检查差流(或差压)大小及整定值正确性。对励磁电流和改变分接头引起差流,变压器差动保护一般不进行补偿,而采用带动作门槛和制动特性来克服,测差流(或差压)不会等于零。

而实际上目前的相量检查试验如下。

①确定一次系统的负荷情况:电流大小、功率性质、功率流向;

②测量二次电流,确定 TA 变比正确;

③根据设定基准电压(推荐用 A 相),测量各相电流与电压间的夹角,确定电流相序以及计算 P 、 Q ,与一次系统对照;

④对于差动保护,还要测量差流或差压。

2 继电保护带负荷测向量的原理

带负荷测向量的方法以电流互感器二次回路极性由母线指向电力设备为例进行说明。首先记录被测试电流互感器所流过的负荷电流及有功、无功的大小和方向(后台一次值)。然后用钳型电流表测试电流二次回路三项及中性线的电流大小和各项电流与系统电压的角度,根据所测得数据进行分析判断,具体如下。

(1)在测量各测电流相位之前,电流幅值应该

大于误差的一半,就是保证线路带有一定的负荷,达到仪器的精确度,并且保证在测量过程中运行工况稳定。各绕组的电流幅值不能过小,否则分析结果将会出现错误。电流互感器所流过的负荷电流与所测的各项电流幅值的比值应与电流互感器的变比一致,中性线电流幅值很小,但不为零。

(2)保证在测量过程中有统一的基准点,选择参考相电压时,注意电压和电流的同极性关系,在谐波比较大的变电所采用线电压作为参考电压有助于减小误差;正确的使用仪器,注意电流的流入流出方向。

(3)三相电流幅值基本相等,相位角互差 120° (电铁等特殊负荷外),呈正序分布。在测量过程中,由于电流互感器自身存在角度误差,测试过程中的负荷波动,所测的相位及幅值都会存在误差,一般角度误差在 10° 以内。

(4)基准电压超前同名相电流的角度与有无功的送受情况相一致。在绘制相位图时,参考相位方向在时钟零点位置,其他各相参照参考项角度顺时针为正绘制,所得的角度为电流滞后电压的角度。

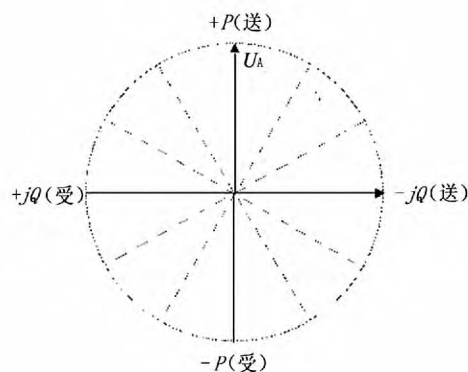


图 1 功角坐标图

功角坐标如图 1。

①第一象限 $P > 0$, $Q > 0$, 测试点“送出有功,送出无功”;

②第二象限 $P > 0$, $Q < 0$, 测试点“接受有功,送出无功”;

③第三象限 $P < 0$, $Q < 0$, 测试点“接受有功,接受无功”;

④第四象限 $P < 0$, $Q > 0$, 测试点“送出有功,接受无功”。

3 继电保护带负荷测向量的方法

当前解决空载及轻载线路继电保护向量测试问

题的传统方法有两大类:一类可称之为直接法,即想办法提高线路的负荷,使之达到继电保护向量测试所需要的大小;另一类可称为间接法,即暂时不测量空载及轻载线路的继电保护向量,而是改变系统的一、二次运行方式,使之适应母差及线路保护向量未测试而无法正常运行投入运行的情况。

3.1 直接法及其分析

直接法的具体实施方法与工程实际的条件有密切的关系,总的来说有以下几种。

方案 1:若新设备送电网架结构具有双回线,则考虑通过双回线环带负荷,使之达到继电保护向量测量的要求。

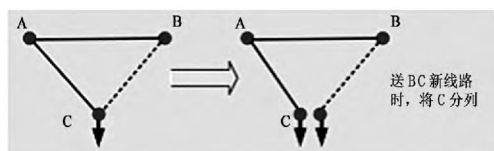


图 2 方案 1 示意图

方案 2:发电厂在启备变压器低压侧带临时负荷,使之达到继电保护向量测量的要求。

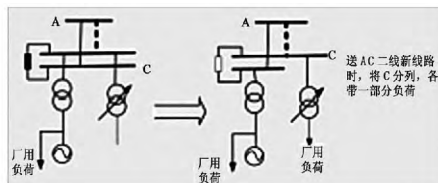


图 3 方案 2 示意图

方案 3:用未测向量的断路器临时带已运行的相邻间隔线路,改变运行方式,使之达到继电保护向量测试的要求。

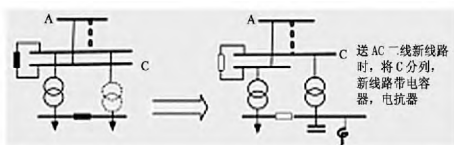


图 4 方案 3 示意图

方案 4:利用无功补偿设备损耗增加负荷进行测向量。

3.2 间接法及其分析

间接法一般有以下几种。

方案 1:在电厂辅机调试期间暂时不测量保护向量,对侧变电站通过母联或分段开关串接在线路前,由母线或分段开关的独立母联过流保护来保护启备线路,直至发电机启动送电可以测量保护向量,

方案 2:在电厂辅机调试期间暂时不测量保护

向量,对侧变电站通过旁路开关带启备线运行,由旁路开关保护来保护启备线,直至发电机启动送电可以测量保护向量。

4 新方法原理与分析及实施中的注意事项

4.1 方案 1

4.1.1 新方法原理

在变电站中,由于已运行的同一电压等级的开关电流互感器极性是正确的,所以可以用已运行的开关电流互感器作为基准,将其一次侧按正极性通过低压电缆串接待测保护向量启备线开关电流互感器,在电流互感器一次侧用大电流变比试验仪加电流通过,以模拟负荷电流,利用外加电源通过电流互感器传变压器,检查启备线开关电流互感器二次电流回路电流复制大小和相位关系的正确性,从而来判断保护电流二次回路接线是否正确。

4.1.2 新方法的分析

新方法是利用在互感器一次侧用大电流变比试验仪加电流以模拟负荷电流,从而达到继电保护向量测试的要求,负荷电流与实际的负荷电流指示在电压等级上有所不同,其一次电流的通路是完全相同的,因而对于电流的继电保护向量测试来说,两者

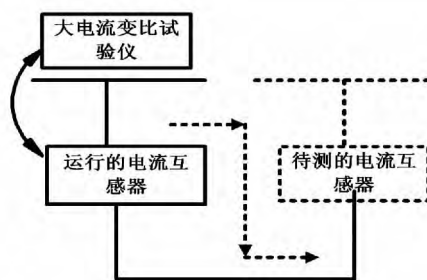


图 5 新方案 1 原理示意图

本质是相同的,其测试结果完全可以信赖,而从新方法的具体实施方案可以看出,新方法的实施是较为简单的,无需对一次方式做大的调整,实施过程中对电网的安全稳定运行也无影响,方案应用于工程实际不仅具有巨大的经济效益,而且可以保证电网的安全稳定运行。

4.1.3 新方法具体实施中的注意事项

(1) 防止感应过电压

由于模拟一次负荷电流需要在开关场地接线,系统母线上产生的感应电压,将可能对人身、设备、

仪器产生危害,同时,较高的感应过电压有可能通过低压电缆引入所用低电压系统,将致使设备绝缘击穿或者人身触电事故,因此,必须采取切实有效的防止感应过电压的措施。

防止感应过电压的措施,在试验接线前,应将作为击穿的开关及启备线开关均转为检修,然后才可以接线,在试验接线结束后,应只保留一个接地点,这样既可以防止一次电流回路在高压磁场中形成感应过电压,对人身和设备构成威胁,又可以避免试验时模拟的负荷电流经过多个接地点分流。

(2) 模拟负荷电流对试验条件的要求

试验所需的仪器有:大电流变比试验仪 1 台(输入电压,AC 220 V/25 A/50 Hz;输出电流,AC 1 000 A/5 V 或 500 A/10 V;),SY 3 000 智能三相电力参数测试仪器 1 块,数字式万用表 1 块,大量程交流电流表 1 块。

对试验条件的几点要求:大电流变比试验仪的容量应满足要求,在可能的情况下应尽量大一点,连接电流互感器一次侧的电缆截面应尽量大一些,以减轻大电流变比试验仪的负荷,测量二次电流向量的相位表应采用高精度的相位表,尤其是最小灵敏电流应尽量小,以保证测量结果的可靠性。

4.2 方案二

4.2.1 新方法原理

在变电站电流互感器的户外端子箱处临时将要测试的二次绕组与备用绕组并联,此时该电流互感器的两个二次绕组如果极性相同则流过的电流将增

大一倍,使之达到继电保护装置向量测试所需要的电流大小,从而来验证保护装置电流二次回路极性是否正确。



图 6 新方案 2 原理示意图

4.2.2 新方法的分析

新方法是利用电流互感器的两个二次绕组并联增大电流来实现的,其测试结果完全可以信赖,且实施起来比较容易,同时也无需对一次方式进行调整,对电网的安全稳定运行没有影响。

4.2.3 新方法具体实施中的注意事项

新方法可能会由于施工工艺不良、接线不紧固造成电流二次回路开路,此时将会在电流互感器二次侧感应出高电压,威胁人身安全和仪表、保护装置运行,甚至会造成电流互感器磁路饱和、铁心发热烧毁互感器。另外,该方法需要用到电流互感器的备用二次绕组,目前国内互感器厂家生产的电流互感器部分只有 6 个二次绕组,除去计量与测量外用于保护的二次绕组只有 4 个,由于 220 kV 系统保护均按双重化原则配置,对于常规变电站很多时候电流互感器用于保护的二次绕组没有备用,这就给该方法的实施带来困难。

5 各种方法的比较

各种方法的比较见表 1。

表 1 两种方法的比较

比较项目	直接法	间接法	新方法
优点	测量简单可靠	测量相对复杂	测量简单可靠
缺点	方案 1: 需要同时占用两条输电线路,对电网运行方式影响较大,而且由于许多工程实际不是双回线结构,不具备普遍性。 方案 2: 其优点也是继电保护向量测量简单可靠,缺点是电厂所用的风机、水泵、磨煤机、引风机等用电设备需要由启备变压器供电,其负荷很难达到进行测向量的要求,而其他没有负荷,或者其他负荷由于电压等级不同,又很难转移到启备变压器的低压侧,增加临时负荷难度大。 方案 3: 在变电站内一次要重新布线,由于重点跨度较大,临时引线较为困难,安全距离很难保证,安全措施难以实施,对系统的安全稳定运行产生较大的事故隐患,投资费用较大,经济效益差。 方案 4: 无功补偿设备负荷电流较小,且有时没有无功补偿设备,受到限制。	方案 1: 启备线路要单独长期占用一条(段)母线,对电网运行方式影响较大,而且由于变电站的母差长期无法投入运行,对系统的安全稳定运行产生很大的影响。 方案 2: 启备线要长期占用旁路开关,对电网运行方式影响很大。	可能存在感应过电压 可能存在 TA 二次回路开路或无备用绕组
受制因素	网架结构、运行方式、负荷大小、费用	网架结构、运行方式、负荷大小	仪器、TA 二次绕组

(下转第 91 页)

整定计算导则》取 0.6 倍主变压器高压侧电压作为主变压器高压侧的零序电压^[4]。通过锦屏二级水电站的实际参数计算得出在主变压器高压侧发生单相接地时,其零序电压为相电压的 0.29 倍。通过计算主变压器高压侧传递至发电机端的零序电压,验证了锦屏二级水电站发电机基波零序电压定子接地保护无需再增加主变压器高压侧零序电压闭锁。由于躲开了主变压器高压侧单相接地的传递电压,因此发电机定子接地保护动作延时可适当缩短,更有利于保护发电机定子的安全运行。

参考文献

- [1] DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
[2] 李光琦. 电力系统暂态分析(第三版)[M]. 北京: 中国

(上接第 42 页)

6 结 论

随着电网的快速发展,新设备投运也越来越多,尤其是大量电厂正在或即将建设,电厂在建设期间需要启备线送电对各种厂用机械进行调试,但是由于负荷过小,无法满足进行带负荷测向量的要求,造成保护无法正常投入,影响设备送电,这种矛盾随着电厂的快速建设及电网的快速发展越来越突出。当前采用的方法都有一定的优缺点,但基本上缺点多于优点,施工难度大,受制因素多,普遍性差,难于推广。因此,所提出的针对空载及轻载线路向量测试新方法有利于系统的安全稳定运行,接线简单,操作方便,易于测试,同时具有普遍性,对于类似的空载线路及轻载线路的继电保护向量测试均可采用。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
[2] 国家电力调度通信中心编. 电力系统继电保护使用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
[3] 国家电力调度通信中心编. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

电力出版社, 2007: 86-91.

- [3] 巨争号. 接地故障传递电压对发电机定子接地保护的影响[J]. 神华科技, 2011, 9(5): 54-57.
[4] 季杰. 发电机定子接地保护在二滩水电站的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(3): 35-38.

作者简介:

黄建琼(1984), 硕士, 工程师, 从事发电厂监控系统工作;

季杰(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作;

蔡显岗(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作;

陈熙平(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作。

(收稿日期: 2013-08-26)

- [4] 华中工学院编. 电力系统继电保护原理与运行[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
[5] 吕继绍主编. 继电保护整定计算与实验[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1983.
[6] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
[7] 张志竞, 黄玉铮. 电力系统继电保护原理与运行分析(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
[8] 王广延, 吕继绍. 电力系统继电保护原理与运行分析(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
[9] 王梅义, 蒙定中, 郑奎璋, 等. 高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.
[10] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
[11] 陶然, 熊为群. 继电保护自动装置及二次回路[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

作者简介:

梁静(1960), 硕士研究生导师, 高级工程师, 从事电力系统继电保护方面的工作;

冯小萍(1979), 硕士, 主要从事电力系统继电保护工作;

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统运行与稳定方面的工作。

(收稿日期: 2013-05-19)

浅谈 500 kV 液压机构断路器控制回路 对自适应重合闸的影响

李利红¹, 尧 广², 杨晓涛²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041; 2. 国网泸州供电公司, 四川 泸州 646000)

摘 要: 在 500 kV 开关传动试验验收过程中, 发现同塔双回输电线路自适应重合闸开关液压机构控制回路 with 常规重合闸开关控制回路设计相同, 自适应重合闸功能将无法实现, 这给电力系统的稳定、可靠运行带来极大的安全隐患。通过对自适应重合闸动作过程及液压机构控制回路分析, 提出了具体的解决方案和防范措施。

关键词: 同塔双回; 自适应重合闸; 液压机构; 控制回路; 低油压闭锁合闸

Abstract: During the acceptance of 500 kV switch driving test, it is found that the control circuit of hydraulic unit in self-adaptive reclosing switch is the same as the control circuit of the general reclosing switch in double-circuit lines on the same tower, so the function of self-adaptive reclosing cannot be achieved, which brings a great security risk to the stable and reliable operation of power system. Though analyzing the action process of self-adaptive reclosing and the control circuit of hydraulic unit, the specific solutions and preventive measures are proposed.

Key words: double-circuit lines on the same tower; self-adaptive reclosing; hydraulic unit; control circuit; locking closing under low oil pressure

中图分类号: TM773 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)01-0043-04

0 引言

某 500 kV 变电站 500 kV 泸复一、二、三线是随川电东送工程的建设而出现的, 是四川电网与 ± 800 kV 复龙换流站连接的唯一交流通道, 其安全稳定运行显得尤为重要。为增大复奉直流近区电网供电的可靠性, 同杆并架的泸复一、二线采用自适应重合闸来提高瞬时性故障的重合概率^[1-4]。但在对泸复一、二线开关验收过程中, 发现该液压机构控制回路在油压闭锁、SF₆ 压力闭锁部分均未考虑与自适应重合闸相配合的因素, 根本无法实现泸复一、二线自适应重合闸分相重合的功能。下面就自适应重合闸与常规重合闸具体的动作过程进行了比较分析, 并将不合理的控制回路带来的危害性进行了具体阐述, 最终提出了与自适应重合闸相匹配的控制回路设计改进。为新投、改扩建站的自适应重合闸液压机构断路器控制回路在设计及验收方面提供一定的参考价值。

1 自适应重合闸及现象说明

1.1 自适应重合闸

同杆并架双回线是将两回线装设在同一杆塔上, 可节省大量的线路走廊, 具有较高的经济价值^[5]。但同杆双回线与单回输电线路相比线间距离更近, 发生故障的概率更大, 且故障类型也更广。简单的常规重合闸无严重故障识别能力, 不具备分相重合的功能, 面对同杆双回线较为复杂的多相故障、跨线故障时, 不仅容易造成重合于永久性故障而使系统及电力设备在短时间内遭受两次严重故障的冲击, 对系统的稳定以及设备运行造成严重的影响, 极端情况下可能导致系统失稳以及电力设备损坏, 无法满足 500 kV 系统稳定性及可靠性的要求。而自适应重合闸是将同杆并架的两线六相作为一个整体考虑, 不仅能正确区分单线路相间故障和双回线的跨线故障, 还根据自适应重合闸故障相电压判据和辅助判据可识别故障点状态, 从而实现无严重故障的分相顺序重合^[6], 并且任何线路故障情况下两回线同时只有一相重合, 其合闸遵循如下的原则进行:

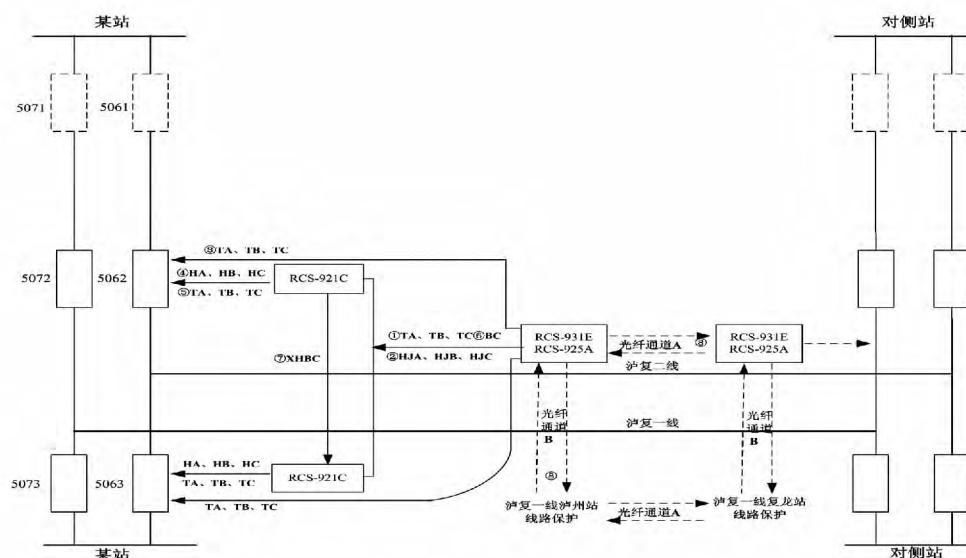


图 1 泸复一、二线线路保护与断路器保护配合实现自适应重合闸联系图

图示说明: ①TA、TB、TC: 泸复一、二线线路保护分相跳闸接点分别开入至 5062、5063 断路器保护, 作为重合闸逻辑判据之一。②HJA、HJB、HJC: 泸复一、二线线路保护分相合闸接点开入至断路器保护, 作为自适应重合闸工作逻辑的判据之一。③TA、TB、TC: 泸复一、二线线路保护分相跳闸出口直接作用于开关。④HA、HB、HC: 泸复二线 5062 断路器保护合闸出口作用于开关, 当满足自适应重合闸判据后, 可实现分相顺序重合。⑤TA、TB、TC: 泸复二线 5062 断路器保护跳闸出口作用于开关。⑥BC: 泸复一、二线线路闭锁重合闸。当严重故障、沟三闭重开入等条件任一满足时, BC 开入至断路器保护对重合闸放电。⑦XHBC: 闭锁先重。先合开关对后合开关发闭锁信号, 后合开关经后合重合延时 + 重合闸整定时间发出合闸命令。⑧双通道结构。为完成双回线保护及自适应重合闸功能, RCS-931E 采用双通道结构, 通道 A 用于与线路对侧的 RCS-931E 通讯, 完成纵差保护功能及取得对侧信息; 通道 B 用于与本侧同杆双回线另一回线的 RCS-931E 交换信息, 得到为完成分相按顺序重合所必需的信息。

①两回线有同名相故障时, 同名相同时优先重合; ②两回线无同名相故障时, 按两回线超前相合闸; ③两回线多相故障时, 多相故障线路的超前相优先重合^[3-5]; ④远故障侧优先重合。自适应重合闸的分相顺序重合不仅可以避免重合于多相永久性故障, 还通过两线故障同名相先合减少了整个的重合时间, 极大地提高输电的可靠性和重合的概率。

1.2 现象说明

2010 年 1 月, 泸复一、二、三回线建成验收阶段, 在对泸复一线 5073 开关传动试验验收过程中, 运行人员远方分开 5073 开关, 并将 5073 开关 A 相液压机构高压油箱内的油压降至合闸闭锁接点动作 (油压低于 27.8 ± 0.8 MPa), 在汇控箱内操作就地手动合 5073 开关, 发现 5073 开关 A、B、C 三相均不能正常合闸。同样的操作方法, 将 5073 开关 B 相或 C 相油压降低至合闸闭锁, 5073 开关也不能正常合闸, 同时监控机上有“油压低闭锁合闸”的信号发出。用类似的方法使 5073 开关 A、B、C 三相中任意一相机构箱内 SF₆ 低气压闭锁合闸接点动作后, 该

开关也是三相均不能正常合闸。依次验收分闸回路及 5072、5062、5063 开关, 发现本批河南平高的 LW10B-550/CYT 型液压机构断路器的控制回路均采用单相油压低闭锁三相合闸和单相 SF₆ 气压低闭锁三相分、合闸, 为典型的常规重合闸液压机构断路器控制回路设计, 无法满足自适应重合闸分相顺序合闸的要求。

2 分析与讨论

泸复一线 5072、5073 开关, 泸复二线 5062、5063 开关控制回路设计为单相油压低闭锁三相合闸及单相 SF₆ 气压低闭锁三相分、合闸, 当任何一相油压或 SF₆ 气压低闭锁合闸都会导致线路合闸失败, 从根本上阻碍了自适应重合闸功能的实现, 具体原因分析及错误设计所带来的危害性简要阐明如图 1。

(1) 泸复二线发生 B、C 相瞬时性接地故障时, 自适应重合闸实现的过程为: 泸复二线线路保护 RCS-931E 动作跳开 B、C 相, 5062、5063 断路器保

护 RCS-921C 跟跳 B、C 相,按超前相先合的原则先重合 B 相,线路保护 RCS-931E 先将故障相 HJB 开入至 5062、5063 断路器保护 RCS-921C 中重合 B 相,并遵循先合边开关 5063 后合 5062 的顺序合闸,若 5062、5063 断路器控制回路可实现分相合闸,则 B 相重合成功,待 B 相电压恢复超过 120 ms 后再重合 C 相。但事实上,5062、5063 断路器控制回路采用单相合闸闭锁三相合闸的方式时,即当线路保护 RCS-931E 将故障相 HJB 开入至 5062、5063 断路器保护中重合 B 相后,B 相油压经分-合操作后,油压低闭锁合闸继电器动作,则 A、B、C 三相合闸均被闭锁,C 相将不能启动合闸,泸复二线 5062、5063 断路器终因三相不一致保护动作跳闸,从而降低了重合闸的成功率,也扩大了线路停电的概率。

(2) 泸复一线的 AB 相和泸复二线的 BC 相同时发生故障,自适应重合闸按顺序先同时合上泸复一线和泸复二线的 B 相,如果都重合成功,则接着合泸复二线的 C 相,最后合泸复一线的 A 相。但控制回路采用单相合闸闭锁三相合闸的方式时,两回六相中任一相断路器机构出现油压低闭锁合闸或因 SF₆ 气压低闭锁合闸时,所有断路器均不能重合成功,双回线重合失败,该单相闭锁三相合闸的控制回路不仅使自适应重合闸保护失去优势,严重情况下甚至造成设备损坏或系统的瓦解。

很显然,自适应重合闸采用按相启动的方式,断路器的控制回路也必须采用按相闭锁的原则,才能充分发挥该重合闸方式的优势,提高重合闸成功率。

3 解决措施

将泸复一线 5072、5073 开关、泸复二线 5062、5063 开关液压机构合闸控制回路油压低闭锁、SF₆ 气压低闭锁合闸进行 3 处分相闭锁更改后,达到与自适应重合闸分相顺序重合功能的配合要求。具体的改进措施如下。

(1) 在开关汇控箱内解开单相 SF₆ 气体密度继电器启动三相 SF₆ 气压低闭锁合闸继电器 KB4 的连线 115,并在 A、C 相分别增加了 SF₆ 气压低闭锁合闸继电器 KB4A 和 KB4C。如图 2 所示(虚线部分表示拆除连线)。

(2) 在开关汇控箱内解开单相油压位置启动三相油压低闭锁合闸继电器 KB3 的连线 121,并在 A、C 相分别增加了油压低闭锁合闸继电器 KB3A 和 KB3C(如图 2)。

(3) 在开关汇控箱内开关合闸控制回路中解开了单相经 SF₆ 气压低、油压低闭锁三相合闸电源负极的连线 161、120、162,并在 A、C 相合闸控制回路中分别增加了经本相 SF₆ 气压低、油压低闭锁合闸的连线。如图 3(虚线部分表示拆除连线)。

4 结论及建议

(1) 在新投或扩建 500 kV 变电站的验收过程中,应特别注意对 500 kV 同杆双回线路自适应重合闸功能的验收,不仅在保护逻辑验收时要求保护装

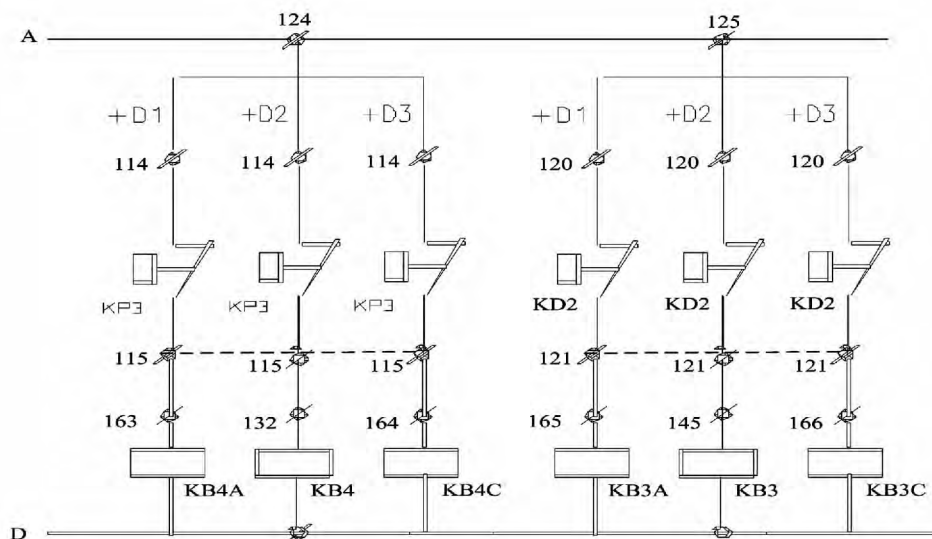


图 2 开关汇控箱 SF₆ 气压低闭锁和油压低闭锁继电器

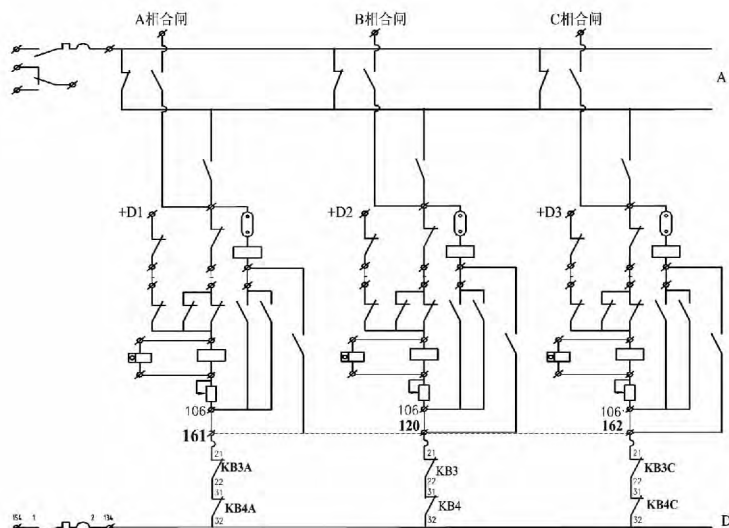


图 3 开关汇控箱 SF₆ 空压低、油压纸闭锁各闸连线

置具备分相重合的功能,还应特别注意开关传动试验的验收,重点检查控制回路是否满足分相闭锁合闸的要求,以确保自适应重合闸分相顺序重合功能的实现。

(2) 液压机构断路器采用油压储能,储能效果极易受到气候、零部件的工艺条件等因素的影响而造成压力不足够支持断路器实现分-合-分的循环操作,导致重合闸不成功,在运行中应特别注意加强对液压系统的检查,保证设备运行条件的良好性。

参考文献

- [1] 郑玉平,黄震,张哲,等.同杆并架双回线自适应重合闸的研究[J].电力系统自动化,2004,28(22):58-62.

- [2] 郑玉平,张哲,等.同杆双回线的继电保护及自动重合闸.第二十八届中国电网调度运行会议论文集[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.
- [4] 朱建红,陈福锋,等.新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J].电力自动化设备,2007,27(4):31-33.
- [5] 沈军,张哲,郑玉平,等.500 kV 同杆双回线自适应重合闸方案[J].电力设备,2006,7(1):20-23.
- [6] 梁懋,钟泽章,殷光辉,等.JCJZ-21A 型多相重合闸装置[J].电力自动化设备,1990,3(1):43-54.

作者简介:

李利红(1984),工程师,技师,从事变电运行工作。

(收稿日期:2013-08-19)

(上接第 12 页)

参考文献

- [1] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌.交直流混合输电系统的换流变压器分接头控制[J].电网技术,2006,30(9):22-27.
- [4] 杨彬,叶鹏,孙保功,等.多种控制方式下 HVDC 系统的潮流计算[J].电网技术,2010,34(6):139-143.
- [5] 陈厚合,李国庆,姜涛.控制方式转换策略下的改进交

直流系统潮流算法[J].电网技术,2011,35(8):93-98.

- [6] 胡金磊,张尧,李聪.交直流电力系统概率潮流计算[J].电网技术,2008,32(18):36-40.
- [7] 倪以信.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 王毅,侯俊贤,马士英,等.用于调度计划安全稳定校验的潮流自动整合调整方法[J].电网技术,2010,34(4):100-104.

作者简介:

陶奕彩(1971),工程师,主要从事电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2013-09-17)

110 kV 备用电源自动投切装置自适应模型研究

张大伟, 彭海, 刘宇

(国网成都供电公司 四川 成都 610021)

摘要: 常规备自投装置只能适应设定的电网运行方式, 动作逻辑固定。提出一种备用电源自动投切装置自适应模型, 在调度控制中心主站建模, 自适应电网模型变化, 实现对电网方式自动跟踪控制。介绍了自适应备自投模型的总体框架, 备自投自适应建模程序、建模维护工具等。工程运用实例表明, 备自投自适应模型能够良好地适应电网方式变化, 迅速、准确地恢复供电, 极大地提高了电网供电可靠性。

关键词: 备用电源自动投切装置; 自适应模型; DTS; 调度自动化

Abstract: The traditional automatic throw-in equipment of emergency power supply can only be suitable for the given operating mode of power grid, and its action logic is regular. A new adaptive model of automatic throw-in equipment of emergency power supply is proposed, which builds its model in dispatching control center, adapts to the variation of the grid model, and automatically tracks the grid model. The total frame of the new model, the model procedure and the model maintenance tools are introduced. According to the engineering application, the new model which greatly improves the reliability of power supply can adapt to the grid variation rapidly and accurately.

Key words: automatic throw-in equipment of emergency power supply; adaptive model; dispatching training system (DTS); dispatching automation

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0047-03

0 引言

智能电网的不断发展, 各个行业对供电质量和供电可靠性的要求越来越高, 特别是一些重要的用电客户, 具有电量需求大、生产工艺要求严格及自动化水平高等特点。如果突然停电, 即使停电时间只有几分钟, 都可能使整个生产线停产, 而重新恢复生产要经过很长时间而且操作复杂。一次突然停电还会给企业带来很大的经济损失, 给人民生活造成极大的影响, 从而使国民经济蒙受巨大损失。最近世界几次大停电对社会和经济的发展造成了巨大的影响, 如表 1 所示。

表 1 近年世界重大事故损失统计

年份	事件	损失统计
2003	美加大停电	停电 29 h 8 人死亡, 经济损失 300 亿美元
2005	俄罗斯大停电	损失 3 939.5 MW 负荷, 经济损失 10 亿美元
2006	欧洲大停电	1 500 万户居民受影响
2012	印度大停电	10 亿人受影响, 负荷损失 40 000 MW

电网运行过程中, 调度员在故障发生后, 需要通知运行操作人员到站检查设备, 并安排相关事故带电巡线, 核对现场备自投信息与保护配置方式, 再结合相关的电网运行方式进行恢复供电, 若相关转供电源点负荷较重, 需要较大的调整电网方式, 过程较为复杂, 耗时较长。提出了 DTS 备自投电网自适应模型, 对于局部的事故, 采用电网备用电源自动投切装置闭环控制模式, 实现负荷的快速自动恢复; 而对于大规模复杂事故, 则采用备用电源自动投切装置开环控制模式, 提供快速恢复决策算法, 自动给出恢复策略, 从而有效地恢复供电, 提高供电可靠性, 确保智能电网坚强可靠。

1 系统总体框架

备用电源自动投切装置自适应模型控制系统利用主站系统采集的各相关变电站遥信、遥测量及保护动作信号作为备自投的充电、动作、闭锁条件等, 当满足动作条件时, 由控制中心发出指令, 以遥控操作的方式投切相关设备, 实现备用电源的自动投入功能。

如图 1 所示,备用电源自动投切装置自适应模型控制系统基于 DTS 模拟的 EMS 平台,通过检索模型库生成备自投模型。备自投模型生成相应控制策略后,由安全分析模块对策略进行校正,最终再通过数据采集与监控(DTS 模拟 SCADA)系统下发相应的控制策略。

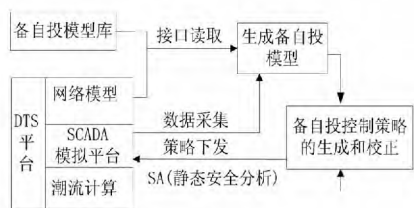


图 1 系统总体框架

2 备自投自适应建模理论

智能电网备自投应支持自动建模功能,通过获取实时电网状态,根据变电站内的不同拓扑结构,智能地识别并生成不同的备自投模型。主要功能是确定系统当前的运行方式从而决定采用何种备自投模型。系统结合网络分析和开关运行状态判断出当前系统的运行方式,从而决定采用何种备自投方式。因此必须准确无误地判断出系统的运行方式,防止由于方式判断失误导致的误动和拒动。

电网中的备自投数量较大,为了有效降低维护工作量和出错率,在电网监控主站开发了备用自投模型的自动生成算法,该算法根据电网的实时状态和站内网架的不同拓扑结构识别出不同的备自投模型。

如图 2 所示为控制算法流程图,首先遍历 DTS 模型截取的 EMS 断面中所有厂站,通过搜索获取厂站中所有正在投入运行的母线,获取母线所连接的线路,接着获取线路上的开关状态以及母联开关状态。根据得到的开关状态确定备自投是属于进线备自投还是分段备自投,并确定主供电源及备用电源。接着分别确定备自投的充电条件、动作条件、闭锁条件、动作序列和判据逻辑,形成完整的备自投模型。

建立上述模型后,备自投系统根据备自投模型,利用模拟 SCADA 系统采集到的数据以及网络分析功能驱动备自投模型库。当备自投模型满足充电条件之后,该备自投模型投入运行;当运行的备自投模型满足动作条件之后,备自投模型将产生动作策略。由于动作策略涉及开关的操作而改变整个网络的潮流

,需要重新进行一次潮流计算,判断当前系统的运行状况,然后检测系统当前是否存在线路过载或者变压器过载,如果存在,则取消备自投的动作策略,否则直接按照先前给出的策略下发。

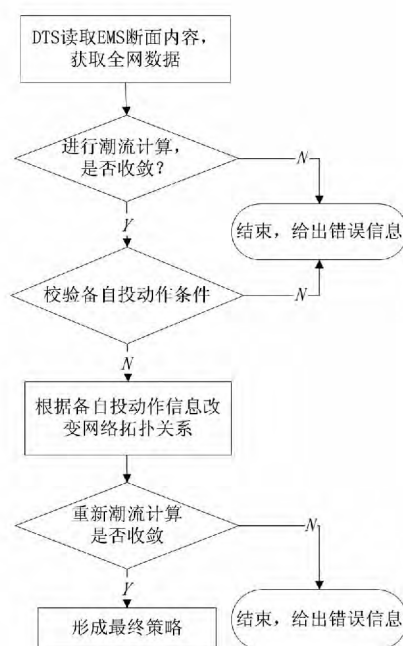


图 2 控制算法流程图

3 主站备自投建模维护工具

备用电源自动投切装置自适应模型全部在主站端完成建模信息的录入,把维护工作集中到调度自



图 3 备自投信息管理系统配置图

动化系统主站进行,可以自动适应电网不同的运行方式,大大减少了维护工作量;无须在厂站端添加任何设备,节省了厂站端设备投资和运行维护费用,从而促进了备自投功能的推广应用,提高了供电可靠

性 如图 3 所示为 DTS 继电保护及自动装置信息管理系统配置图。配置一个厂站的备自投信息 ,包括厂站名称、主备电源设备名称、备自投装置投退标志、动作时间等信息。

在电网运行过程中 ,相关保护信号动作需要闭锁备自投装置 ,系统开发了相关的闭锁备自投功能 ,使得调度员在培训时能够完整地体现电网实际运行情况 ,提高调度监控人员的运行操作水平 ,如图 4 所示为保护闭锁备自投设置信息。



图 4 保护闭锁备自投信息图

4 几个关键进程

在 DTS 培训的过程中 ,需要监测关键进程是否正常运行 ,常用关键进程如表 2 所示。

表 2 几个关键进程

序号	进程名称	说明
1	dts_mandog	DTS 进程管理 ,负责管理培训过程中 DTS 进程的起停
2	dts_op	DTS 右键操作管理进程
3	dts_prinfo_op	DTS 保护和自动装置维护工具服务端
4	dts_ctl_op	DTS 主控台服务端
5	dts_install_server	模型维护服务端进程

5 系统测试及应用

110 kV 备用电源自动投切装置自适应模型系统已在成都地调 DTS 系统中进行了安装 ,调试 ,并

成功运行。成都电网 110 kV 变电站 110 kV 母线标准接线方式主要有:单母分段、单母分段带旁路、双母线方式。所建立的备自投系统根据上述各种运行方式要求 ,建立相应的备自投模型。以 110 kV 吉祥街站为例 ,说明备自投系统的基本工作原理 ,吉祥街站备自投装置动作前后的电气接线如图 5、图 6 所示 ,备自投装置运行状态为动作前投入 ,动作后失去备用电源后退出。

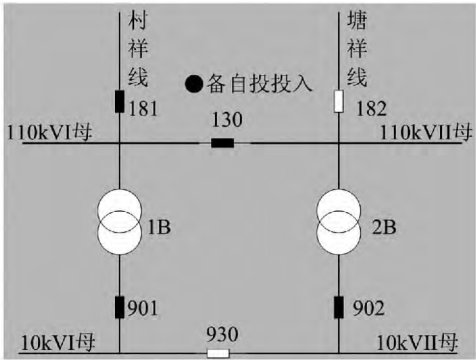


图 5 吉祥街变电站备自投装置动作前运行方式

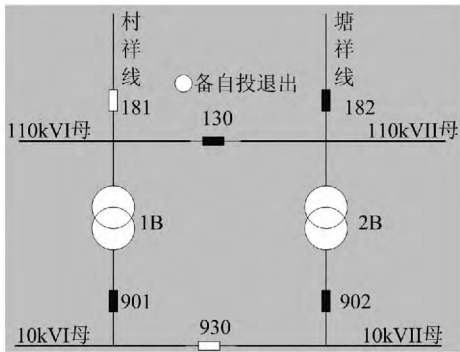


图 6 吉祥街变电站备自投装置动作后运行方式

吉祥街站通过村祥线和塘祥线由新二村站和塘坎街站供电 ,塘祥线为备自投线路 ,当备自投满足充电条件时 ,让其投入运行。通过 DTS 模拟设置线路故障 ,模拟村祥线 181 开关跳闸 ,备自投装置启动校验 ,经检测 ,满足投入条件 ,备自投装置动作 ,吉祥街变电站恢复供电。

表 3 备自投装置动作前后主变压器有功对比

厂站名称	所有主变压器有功/MW	
	事故前	事故后
110 kV 吉祥街站	23. 9	23. 85
220 kV 新二村站	100. 6	77. 8
220 kV 塘坎街站	82. 34	108. 1

表 3、表 4 为备自投装置动作前后 110 kV 吉祥 (下转第 62 页)

电站供电可靠性。如 110 kV 变电站所供负荷较重,正常方式下不满足分列运行条件,要求在 110 kV 变电站安装备自投装置,实现分段备投方式。

(2) 在负荷侧变电站安装备自投装置

1) 若所供负荷又较轻的线路,采用一备一用方式,负荷侧变电站投入线路备自投方式,220 kV 变电站侧线路开关分别上两段母线,提高供电可靠性;

2) 若所供负荷又较重的线路,采用线路变压器组运行方式,负荷侧变电站投入分段备自投装置,220 kV 变电站侧线路开关分别上两段母线,提高供电可靠性。

(3) 将双回线路安排在 220 kV 变电站的同一段 110 kV 母线上运行,由双回线路并列运行供电的 110 kV 变电站,将双回供电线路安排在 220 kV 变电站的同一段 110 kV 母线上运行。这种运行方式可以使事故停电范围大大缩小。但当母线故障时,

(上接第 49 页)

街变电站、220 kV 新二村变电站、220 kV 塘坎街变电站主变压器有功、相关线路有功对比。从对比中可以看出,备自投动作正常,变电站无负荷损失,有效地提高了电网供电可靠性。

表 4 备自投装置动作前后线路有功对比

厂站名称	线路名称	线路有功/MW	
		事故前	事故后
110 kV 吉祥街站	村祥线	24.1	0
	塘祥线	0	23.91
220 kV 新二村站	村祥线	24.5	0
220 kV 塘坎街站	塘祥线	0	24.20

6 结 论

根据电网运行特点,提出一种备用电源自动投切装置自适应模型,自动跟踪电网运行方式的变化,在调度控制中心主站建模,实现对电网方式自动跟踪控制,方便调度监控人员对电网备自投信息的全面了解,在事故情况下,可以快速有效地切除故障,恢复供电,确保电网安全可靠运行。工程运用实例表明,备自投自适应模型能够良好地适应电网方式

会造成相应的 110 kV 变电站全停。

4 结 语

随着建设“一强三优”步伐的加快,不断提高电网供电可靠性是电网企业的职责。合理的电网结构和运行方式是保证电力系统安全稳定运行的基础。继电保护装置能否有效发挥作用与电网结构和运行方式有密切的关系,必须把它们作为一个整体来考虑。为此,根据电网实际情况,因地制宜,制定安全可靠的供电方式,设计最优的保护整定方案,是提高供电可靠性的有力保证。

作者简介:

吴 玲(1972),女,工程师,从事电网规划管理;

刘 勤(1968),男,工程师,从事电网调度管理。

(收稿日期:2013-09-27)

变化,极大地提高了电网供电可靠性。

参考文献

- [1] DL/T 526-2002 静态备用电源自动投入装置技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 杨浚文,吴文传,孙宏斌,等. 一种基于 EMS 的广域备自投控制系统[J]. 电力系统自动化,2010,34(11):61-66.
- [4] 郝文斌,洪行旅,陈立. 智能电网地区调度支持系统框架研究[J]. 四川电力技术,2011,34(4):1-3.
- [5] 孙建华,李国友,姚捷. 自适应备用电源自投装置的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(4):88-90.
- [6] 张建平,胡建绩. 面向智能电网的多适应性规划体系设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(10):1-7.

作者简介:

张大伟(1984),研究生,工程师,研究方向为电力调度自动化;

彭 海(1981),研究生,工程师,研究方向为电力调度自动化。

(收稿日期:2013-08-01)

变电站继电保护装置状态检修实际应用研究

何小飞¹, 王 锐¹, 甄 威²

(1. 国网乐山供电公司 四川 乐山 614000; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 简要介绍了状态检修体制的演变和现状, 分析了设备故障发展过程, 研究了变电站继电保护装置状态检修基本原理和思路, 分析了继电保护装置状态监测的内容, 并结合缺陷分析建立了设备状态评估体系和制定了检修策略, 提出改进了的评估周期和检修项目, 最后对智能变电站继电保护装置状态检修应用做了简要分析研究。

关键词: 继电保护; 状态检修; 状态评估; 检修策略

Abstract: The evolution and current status of condition - based maintenance system are briefly introduced, the development process of equipment failures is analyzed, the basic principles and ideas of condition - based maintenance for relay protection devices in the substation are studied, and the contents of condition monitoring for relay protection devices are analyzed. Combined with the defect analysis, the condition assessment system is established, the maintenance strategies are formulated, and the improved evaluation cycle and maintenance projects are proposed. At last, the application of condition - based maintenance to relay protection devices in smart substation is briefly analyzed.

Key words: relay protection; condition - based maintenance; condition assessment; maintenance strategy

中图分类号: TM77 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0050 - 05

0 引言

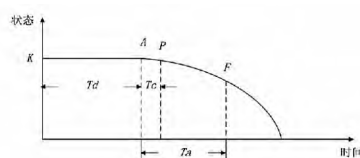
随着电网规模扩大, 输变电设备的增多, 状态检修成为电力系统研究热门课题, 而网络通讯技术、传感器技术发展使状态检修成为可能。设备检修体制随着科学发展, 由最初的事后检修发展为计划检修, 计划检修又经过多年发展成状态检修。状态检修以可靠性为中心, 通过状态监测手段, 诊断设备健康状况, 从而确定设备是否需要检修或最佳检修时机。相比计划检修, 可以减少停运时间, 提高设备可靠性, 降低检修费用, 提高经济效益。目前, 国内对电气一次设备状态检修的研究应用较多, 而二次继电保护状态检修相对较少, 与一次设备状态检修主要依赖传感器在线监测相比, 继电保护装置状态检修由于缺少预警手段因而更多依靠设备自检报警以及对设备缺陷的综合分析。

1 继电保护装置状态检修基本原理

1.1 设备故障发展过程的研究分析

设备故障有一个发展的过程, 不是瞬间出现的, 一般可分为 3 个时期: 正常状态、存在异常但不存在

功能的状态、功能故障状态。



K: 设备投运点 A: 潜在故障出现点 F: 设备功能故障点

图 1 设备故障发展过程示意图

如图 1 所示, 开始阶段设备状态较平稳, 一段时间后到 A 点状态开始下降, 到 F 点发展为功能故障。F 点之前的状态, 即为潜在故障状态。Ta 为从潜在故障发展到功能故障的间隔期, Tc 为检修检测的间隔期。由图 1 可知, Tc 只有小于 Ta 时才可能在功能故障发生前检测到潜在故障。

1.2 状态检修的定义

状态检修可定义为: 在设备状态监测的基础上, 根据监测和分析诊断的结果科学安排检修时间和项目的检修方式。它有 3 层含义: 设备状态监测、设备诊断、检修决策。状态监测是状态检修的基础, 设备诊断是以状态监测为依据。状态检修内容不仅包括在线监测与诊断还包括设备运行维护、带电检测、预防性试验、故障记录、设备管理、设备检修等工作, 最后综合设备信息、运行检修等方面信息作出检修决策。

表 1 近 5 年微机保护缺陷统计表

		保护装置本体						外部配套装置				自动装置			交直流系统			通讯总控系统	
		电源插件	模拟量输入	开关量输入	CPU板	出口插件	光纤高频通道	电压切换箱	操作箱	打印机	GPS电源	二次回路	故障录波器	行波测距	备自投	充电模块	交流屏		蓄电池
缺陷次数	2008年	4	1	0	4	0	12	0	0	1	1	6	5	6	0	1	1	3	3
	2009年	7	0	0	13	0	8	0	0	1	0	12	4	4	0	2	2	4	2
	2010年	3	3	1	9	0	5	0	0	2	1	15	5	4	0	3	1	4	2
	2011年	4	1	0	4	0	7	0	0	2	1	14	0	2	0	0	0	2	1
	2012年	6	1	0	6	0	8	1	0	2	2	13	1	1	0	0	0	0	0

2 变电站继电保护设备状态检修实现

2.1 继电保护设备状态检修的基本思路

继电保护状态检修策略有 3 个组成部分: 实际状态信息的采集、设备状态诊断方法和状态检修策略应用。采集实际状态信息是整个系统的输入, 而输出为检修策略的应用, 而状态检修策略的核心内容是状态分析诊断模型的合理确立, 即如何科学合理建立继电保护设备状态评估体系。

2.2 继电保护设备状态监测

状态检修的基础是设备状态监测。站内二次设备的状态监测可用直流回路绝缘监测方法对直流回路绝缘进行监测包括直流动力、操作及信号回路绝缘良好、回路完整性; 利用 TV、TA 的断线监测交流测量系统, 包括 TV、TA 二次回路绝缘良好、回路完整等; 逻辑判断回路和软件功能监测; 二次保险熔断报警等。与一次设备不同的是二次设备的状态监测对象不用过分依靠传感器。因此, 电气二次设备的离线检测数据也是状态监测与诊断的依据。

2.3 继电保护设备状态评估体系

继电保护设备状态评估体系需要以下几个关键指标。

(1) 设备正确动作率

$$f(a) = \frac{m}{n} \times 100\% \tag{1}$$

其中 m 表示保护设备正确动作次数; n 表示评价周期内保护动作次数。由于保护不正确动作对于装置运行具有十分重要影响, 因此在评估周期内, 只要出现一次不正确动作, 则设定为

$$f(a) = 0$$

(2) 设备故障率

继电保护设备故障主要包括保护装置故障、外部

配套装置故障、自动装置故障、交直流系统以及通讯总控系统故障。对所在班组管辖的保护设备近 5 年微机保护在运行和定校中发现的缺陷进行统计, 所在的班组负责乐山局 23 座 35 kV 及以上变电站, 其中 220 kV 变电站 5 座, 110 kV 变电站 17 座, 35 kV 变电站 2 座, 数量约占全局变电站数量一半。各类设备缺陷统计如表 1 所示, 可得出以下结论。①在微机成套保护上发现的缺陷相对较少, 而其辅助装置(包括收发信机、电压切换箱、操作箱等)、其他二次回路及元件上缺陷较多; ②在微机保护本体中模拟量、开关量输入及出口部分的缺陷较少, 而电源及主机部分的缺陷较多; ③微机保护的缺陷次数, 并非完全随保护数量的增多而成比例上升, 而主要取决于新投产设备的产品质量及安装质量。

根据以上分析, 设定保护设备故障率为

$$f(b) = \frac{m}{n} \times 100\% \tag{2}$$

其中 m 表示在一个设备评价周期内, 保护设备故障即出现缺陷的次数; n 表示一个评价周期内的天数, 设定 $n = 10$ 。

对于设备缺陷可分为危急、严重、一般 3 类缺陷, 而每一类缺陷, 由于重要程度不同权重系数也不同。设定对一般缺陷, 出现一次计为 1; 对严重缺陷, 出现一次计为 2; 对危急缺陷, 出现一次计为 3。对于在一个评价周期内, 同一保护装置累发生 2 次类似缺陷时, 再增加一个 2 的系数相乘, 发生 3 次, 再增加一个 3 的系数相乘, 发生 4 次后, 就直接对保护进行一次检修。

(3) 缺陷处理率

缺陷处理率是指一个评价周期内一个设备缺陷处理率。

$$f(c) = \frac{m}{n} \times 100\% \tag{3}$$

其中 m 表示在一个设备评价周期内, 保护设备处理好的缺陷数; n 表示一个评价周期内所有缺陷数。对于不同类别的缺陷, 加权系数不同。对一般缺陷, 加权系数为 1; 对严重缺陷, 加权系数为 1.2; 对危急缺陷, 加权系数为 1.5。

(4) 设备运行服役率

根据微机保护设备全寿命管理规定, 微机继电保护装置从投运到报废, 使用期限一般为 10 ~ 12 年, 因此设定为

$$f(d) = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (4)$$

其中 m 表示在设备服役周期年数, 从设备生产日期算起; n 为设备服役规定最长周期, 设定 $n = 12$ 。

以上 4 个指标构成了继电保护设备状态评估体系。设某一设备状态评价总分为 100 分, 其中正确动作率分值为 30 分, 设备故障率分值为 30 分, 缺陷处理率为 30 分, 设备运行服役率为 10 分, 则在一个评价周期内的评分公式为

$$z = 30 \times f(a) + 30 \times (1 - f(b)) + 30 \times f(c) + 10 \times f(d) \quad (5)$$

通过式(5)计算 z 最后的分值即为该保护设备状态评价分值。

2.4 检修策略的确定原则

根据分值 z 将设备分为以下 3 个状态。

(1) 一类状态(正常状态): $z \geq 90$, 表示该设备处于正常状态。

(2) 二类状态(异常状态): $70 < z < 90$, 该状态比一类状态较差, 但是设备基本处于正常, 此类设备纳入重点巡视范围。

(3) 三类状态(临界状态): $z \leq 70$, 此类装置一

般都是在评价周期内出现了问题, 建议此类装置在第 2 年纳入检修计划, 其中分值越低的安排计划检修时间越早。

2.5 状态检修评估周期

根据多年运行检修经验, 评估周期可按以下考虑。

(1) 220 kV 系统保护设备 1 年 1 次;

(2) 10 ~ 110 kV 系统保护设备 2 年 1 次;

在实际应用中, 考虑到电网可靠性, 可按电压等级从低到高逐步推广, 可先考虑对 10 kV、35 kV 设备纳入状态检修。

3 状态检修评估系统设计方案

3.1 设备管理模块

设备台帐的滚动修改是试验管理、运行管理、缺陷管理、设备状态分析的基础。设备管理模块进一步规范了设备从变电所、设备间隔、设备组、设备、子设备到相关技术参数之间的层次关系, 通过不同权限的设定明确了设备(或部件)新增、更换、调度命名变更等业务职能的分配。设备管理不仅是变电设备状态检修分析系统的基础, 同时也为决策层及时把握全局设备分布, 适时进行设备技术改造提供了技术支撑。

如图 2 所示, 该图为 SG186 上的设备管理模块, 从图中的信息可以看到设备的型号、生产厂家, 投运日期, 可以将里面再增设几列内容, 包括校验码、软件版本。这些每个班组中的台帐信息都有详细记录。



图2 SG186 生产管理系统中设备管理部分

3.2 试验管理模块

试验数据是设备状态量信息中的主要数据,试验管理模块实现了设备试验数据信息化管理工作,在整个试验管理中,通过信息系统的管理和约束,形成了从定义、分配、录入到班组、工区、局的三级审核的闭环管理流程,并可以通过流程监控及时把握维护任务的进展情况,及时进行监督和考核。通过试验管理流程的规范化、信息化管理,使乐山供电公司试验管理的透明度得到加强,采集流程周期明显缩短,有效提高了管理效率和管理水平。

3.3 运行管理模块

设备曾经出现的缺陷及目前存在的缺陷是判断设备健康状况的重要判据,缺陷管理模块从变电工区、局生技及调度职能部门、修试厂等各个部门形成闭环管理,具有统计功能(包括同类设备之间的统计)、流程监控及声音提示功能。在 SG186 系统中分别加入以上几个模块,其中,设备管理和缺陷管理数据用于评估体系计算,而运行管理、试验管理数据用于评估体系参考。

4 继电保护设备状态检修项目

根据以上分析可知自动装置、二次回路缺陷相对较多,而微机保护装置本体缺陷较少。因此实行状态检修后,校验项目重点应从以往保护功能逻辑校验转移至二次回路与辅助设备的检查上。目前乐

表 2 目前与过去保护年检主要内容比较

	过去保护年检主要内容	目前保护年检主要内容
1	交、直流绝缘电阻测试	交、直流绝缘电阻测试
2	开关量输入回路检查(弱电开入)	开关量输入回路检查(弱电开入)
3	模数转换系统检验(零漂、有效值)	模数转换系统检验(零漂、有效值)
4	保护定值检验(包括动作时间)	保护定值检验(包括动作时间)
5	带开关传动(包括跳闸矩阵检验)	带开关传动(包括跳闸矩阵检验)
6	反措确认	保护出口端子对地电位检验(开出量)
7		信号回路测试
8		录波回路测试
9		保信回路测试
10		反措确认

山供电公司已采用国网四川省电力公司最新的保护年检调试标准卡,如表 2 所示。从表中可以看出,新的标准卡与以往的标准卡相比,主要是加强对回路(信号回路、保信回路、录波回路、开出量)的检验,而这些检验过去只是在新安装调试时才进行试验。

5 智能变电站继电保护设备状态检修浅析

5.1 智能变电站的二次设备状态监测

智能变电站因基于强大的网络通信技术使得继电保护设备具有强大的“自检”能力,从而为状态检修的实现提供了良好的基础。智能变电站的继电保护装置二次电流、二次电压输入的方式为光纤以太网传输的数字采样值报文的输入;保护动作出口不再是跳闸、重合闸接点,而是光纤以太网传输的 GOOSE 开关量信息。装置本身可以对接收的 SMV 采样值报文进行监视,如有接收中断、丢数据帧、接收数据帧 CRC 不正确等现象,立即告警 SMV 采样异常即可;保护投退用软压板控制,不存在传统变电站压板状态监测的困难;由于大量光纤取代电缆,也不再需要回路绝缘状况监测(直流回路除外)。因此二次设备状态监测更为全面、可靠。对智能变电站继电保护装置的状态监测,包括以下方面。

(1) 逆变电源监测,包括电源工作环境(温/湿度)、负载情况、工作时间、开关次数、电容曲线等;

(2) 以太网通讯口运行情况监测,后台软件用 SNMP 协议监视各交换机端口状态,包括 GOOSE 报文和 SV 报文序号连续性,接收的 SMV 报文、GOOSE 报文速率、误码率统计、是否丢帧丢点、通讯是否中断等;

(3) 微机系统自检,如 RAM 是否出错、看门狗是否动作、装置的重启次数等、装置上电次数统计。

5.2 智能变电站继电保护设备状态检修实现方案

如图 3 所示,各台继电保护装置的监测信息均汇集到状态监测中心,从而建立起一套继电保护状态检修系统,相关人员在监测中心就能实时监控设备运行状况,并综合分析各项数据监测结果,评估设备健康状况。当设备出现异常信息时候,智能告警决策系统以声光电等多报警形式提示人员制定设备检修方案。

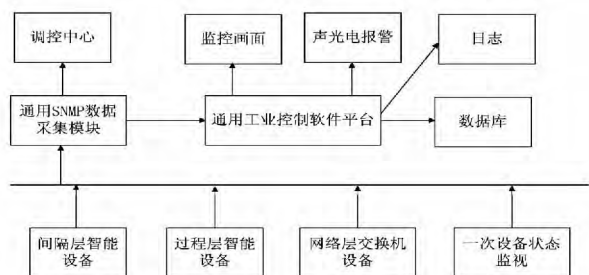


图 3 智能变电站状态监测可视系统框架

6 结 论

针对继电保护状态检修工作展开研究,对保护设备缺陷进行分析,建立设备状态检修评估体系,并提出了相应的检修策略,取得了一些创新性成果。最后对智能变电站中二次设备状态检修进行了简要分析。相比传统变电站,智能变电站在实现状态检修方案更有基础以及可操作性,相信随着智能变电站的推广,继电保护设备状态检修将会得到更广泛应用。

参考文献

- [1] 陈钢. 变电站电气设备的状态检修和状态监测技术现状及其发展趋势[J]. 贵州电力 2005(1): 15-17.
- [2] 黄建华. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化 2008(2): 12-14.
- [3] 陈维荣, 宋永华, 孙锦鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术 2000 24(11): 12-17.
- [4] 楼凤丹. 输变电设备状态检修评估分析软件系统[J]. 电力设备 2004(2): 10-12.
- [5] 郑圣, 赵航. 故障信息处理系统中继电保护装置的可靠性研究[J]. 继电器 2005 33(11): 37-39.
- [6] 李永丽, 李致中, 杨维. 继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 63-65.
- [7] 许靖, 王品. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术 2000(8): 48-52.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士研究生, 工程师, 现从事继电保护二次检修工作。

(收稿日期: 2013-09-23)

(上接第 25 页)

所公布的 web 应用安全漏洞, 并针对出现的漏洞给出指导性建议。

1.3 全景展示

具有安全数据整合及漏洞实时监测功能的集中监测分析平台基本完全挖掘出四川电力当前信息系统运行过程中与安全相关的数据, 依托对这些海量数据的综合展示分析, 管理者能快速识别当前风险, 为信息安全下一步投资提供充分的参考依据。

2 结 论

针对四川电力当前信息安全相关数据较分散, 同时对于弱口令、网站漏洞等缺乏实时监控手段问题, 不利于信息安全督查工作开展问题, 提出建立信息安全集中监测分析平台, 提取现有各系统中与安全相关的数据, 并对其进行整合、分析, 同时对弱口令、网站漏洞等进行实时监控, 最后对海量数据进行综合展示分析, 全面地分析监测报告, 帮助深入掌握系统安全漏洞和信息安全趋势, 实现安全技术和管理的结合, 同时利用关联分析可以找出安全事件中各种属性之间的相关性, 排除无意义的信息, 及时

对安全问题进行快速定位, 提高安全事件的应急响应处理能力。

值得说明的是, 如何利用集中监测分析平台的海量安全事件进行信息安全态势感知, 从总体上动态反映网络安全状况, 并对网络安全状态的发展趋势进行预测和预警, 是安全领域具有挑战性的问题, 也是尚需进一步努力的地方^[6]。

参考文献

- [1] 四川省电力公司. 四川省电力公司“十二五”信息化规划[Z]. 2011.
- [2] 沈昌祥, 张焕国, 冯登国, 等. 信息安全综述[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学 2007 37(2): 129-150.
- [3] 郭红星. 网络信息安全预警监控系统设计与实现[J]. 计算机安全 2012(2): 48-50.
- [4] 王刚军, 张学松, 郭志忠. 电力信息安全的监控与分析[J]. 电网技术 2004 28(9): 50-53.
- [5] 赵衍. 基于网络数据挖掘的信息安全监控体系[J]. 上海管理科学 2010 23(4): 52-55.
- [6] 余勇, 林为民. 基于等级保护的电力信息安全监控系统的设计[J]. 计算机科学 2012(11): 440-442.

(收稿日期: 2013-10-21)

一起发电机保护定值计算错误引起的 励磁过负荷报警分析

陈熙平 季 杰 曹 钢 蔡显岗 王文松 张 伟
(锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615000)

摘 要: 通过现场发电机励磁过负荷事件的检查、分析, 对励磁后备保护及过负荷定值重新整定计算, 找出了报警原因和问题所在, 现场立即采取措施, 有效避免励磁反时限保护动作而造成的机组强迫停运事件的发生。最后对于定值计算和管理提出了对策和建议。

关键词: 励磁绕组; 过负荷; 反时限; 整定计算

Abstract: Through the inspection and analysis of generator excitation overload in the field, the set points of excitation backup protection and overload are calculated again, and the reasons of the alarm and the problem are found out. The measures are taken immediately in the field to effectively prevent the forced outage caused by excitation inverse protective action. Finally, the countermeasures and suggestions of setting calculation and management are proposed.

Key words: excitation winding; overload; inverse time; setting calculation

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0055-04

0 引 言

继电保护装置作为保证电网安全稳定运行的最后一道保护屏障, 有选择性地、可靠地、快速地对故障进行隔离, 能有效地防止事故扩大。但继电保护装置如何动作、如何配合是由保护定值来控制的, 一旦定值整定出现错误或是在定值的执行、管理过程中出现任何漏洞都将给电力系统带来巨大的隐患, 甚至发展为事故。

通过介绍现场一起由于定值整定计算错误引起发电机励磁过负荷报警现象、危害、处理过程, 由此提出相关的防范措施。

1 励磁系统保护配置情况

某电厂发电机型号为 HLV97-LJ-655, 额定容量为 600 MW, 机端电压 20 kV, 采用自并励的励磁方式。励磁系统配置两套独立的电气量保护, 具体保护包括励磁变差动保护、励磁过流保护、励磁过负荷保护。发电机、励磁部分保护按两块屏配置, 各配置一套 RCS-985GW 发电机保护装置。其中励磁变压器差动保护主要反应励磁变压器内部故障; 励

磁过流保护主要反应励磁变压器外部的过流故障; 励磁过负荷保护反应励磁变压器绕组的平均发热状况, 为充分利用励磁变压器的过负荷能力^[1], 励磁过负荷定时限保护只投信号, 反时限投跳闸。

2 事件现象

2013 年 1 月 17 日 07:51, CCS 报警“1 号机组发电机 B 套保护装置报警、B 套励磁过负荷报警、A 套保护装置报警、A 套励磁过负荷报警”; 2 号机组报警同 1 号机组。07:56, 1 号、2 号机组发电机保护装置与 CCS 上报警信号均自动复归。09:11, CCS 再次报与 07:51 相同事件, 报警信号瞬时复归。

3 事件分析与处理

3.1 现场检查

09:21 现场检修人员现地检查发现 1 号发电机保护装置与 CCS 上报警信号一致, 1 号发电机有功为 601.3 MW, 无功为 102.4 Mvar, 励磁电流为 2 440.7 A, 2 号发电机有功为 602.1 MW, 无功为 108.5 Mvar, 励磁电流为 2 448.9 A。

3.2 事件分析

经查看机组故障录波连续录波文件发现,在CCS报警时1号、2号励磁变压器高压侧电流(二次值)均在0.21~0.23 A之间变化,由于励磁过负荷定时限报警电流定值为0.21 A,故1号、2号发电机保护报警正确。

经询问运行值班人员得知励磁过负荷期间对侧换流站正在进行直流负荷调整,负荷增加约为300 MW,相应无功增加约为150 MW。07:51报警时1号机组无功120.3 Mvar、2号机组无功118.6 Mvar。09:11报警时1号机组无功130.4 Mvar、2号机组无功131.6 Mvar,1号机励磁电流瞬时最大2495 A、2号机励磁电流瞬时最大2506 A。而两台机组在换流站负荷调整前无功均在100 Mvar左右,故判定由于发电机感性无功增加导致励磁电流增加,从而导致励磁过负荷报警。

通过向自动班核实得知发电机励磁电流2126 A为发电机功率因数为1.0时的额定励磁电流值,此时发电机仅发出有功不发无功。当发电机在功率因素滞后的工况下运行时,发电机电枢电流为去磁电流^[2],此时为维持发电机机端电压不变,发电机需过励运行,即增加励磁电流。而机组在额定功率因素(0.9滞后)的运行工况下,额定励磁电流为2790 A。现场检查发电机满负荷时励磁电流为2442 A,未达到额定励磁电流,故保护装置本不应报警。经核查定值单和定值计算书,发现励磁过负荷保护计算用的额定电流在功率因素为1.0时的额定电流,使得计算出的保护定值偏小,导致保护装置报警。

3.3 励磁绕组反时限过负荷保护原理

励磁绕组反时限保护由以下3部分组成:下限启动部分、反时限部分、上限定时限部分。上限定时限部分设最小动作时间定值。

当励磁回路电流超过下限整定值 I_{1szd} 时,反时限保护启动,开始热积累,反时限保护热积累值大于热积累定值保护发出跳闸信号。反时限保护能模拟励磁绕组过负荷的热积累过程及散热过程。

反时限动作曲线如图1,反时限动作方程为

$$[(I_1/I_{jz})^2 - 1] \times t \geq KL_{zd} \quad (1)$$

式中 I_1 为励磁回路电流; I_{jz} 为励磁回路反时限基准电流; KL_{zd} 为励磁绕组热容量系数定值。

图1中 t_{min} 为反时限上限延时定值, t_{max} 为反时限下限延时, I_{1szd} 为反时限启动定值, I_{1th} 为上限电流值。

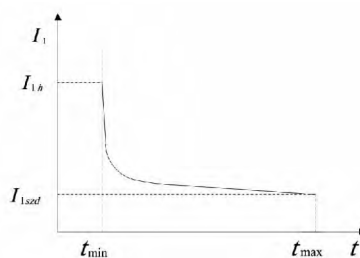


图1 励磁绕组过负荷反时限动作曲线

3.4 励磁后备保护及过负荷定值整定计算

使用额定励磁电流为2790 A计算出的励磁后备保护定值和过负荷保护定值。

表1 励磁系统保护计算参数

励磁系统保护计算参数	数值
发电机额定励磁电流 I_f/A	2790
三相桥式整流系数 K_{re}	0.816
励磁变压器变比 n_T	20 kV/0.655 V
励磁变压器高压侧TA变比 n_{TA}	300
发电机强励电流倍数 N	2

3.4.1 励磁后备保护过流Ⅱ段保护(躲过强励磁时的电流)

保护动作电流为励磁变压器高压侧电流。

强励时变压器高压侧一次电流^[3]为

$$I_{ff.t} = K_{re} N I_f / n_T \quad (2)$$

将表1中的数据代入公式(2)中,计算得出强励时变压器一次电流为149.14 A。

保护动作电流为

$$I_{dz} = K_{rel} I_{ff.t} / (n_{TA} K_{d0}) \quad (3)$$

取可靠系数 $K_{rel} = 1.2$,返回系数 $K_{d0} = 0.95$,计算得出励磁后备保护过流Ⅱ段保护定值为0.63 A。

该保护动作延时: $t = 2$ s,动作于停机、灭磁和跳发电机出口断路器,启动发电机断路器失灵保护和故障录波。

3.4.2 励磁绕组过负荷保护

(1) 定时限报警段定值

励磁绕组额定运行条件下,励磁变压器高压侧一次电流为

$$I_{e1} = K_{rel} I_f / n_T \quad (4)$$

将表1中数值代入公式(4)中,计算出 I_{e1} 为74.57 A。

励磁绕组热过负荷定时限报警段定值为

$$I_2 = K_{rel} I_{e1} / (n_{TA} K_{d0}) \quad (4)$$

取可靠系数 $K_{rel} = 1.2$,返回系数 $K_{d0} = 0.95$,计算得出 I_2 为0.27 A。

该保护延时 5 s 动作于发信,启动故障录波。

(2) 反时限整定值(用热过负荷保护实现)

反时限启动定值: $I_3 = 1.05 \times I_2 = 1.05 \times 0.27 = 0.29$ A;

反时限上限时间定值为 10 s;

转子绕组过热常数: $C' = [(I_{fd}/I_{je})^2 - 1]t$,按强励磁 $2I_f$ 时,允许运行 50 s,则 $C' = (2^2 - 1) \times 50 = 150$;

励磁绕组热容量: $C = 0.8C' = 0.8 \times 150 = 120$;

反时限基准电流: $I_{je} = I_{e1}/n_{TA} = 74.57/300 = 0.25$ A(取正常额定电流)。

该保护动作于发信,跳灭磁开关和发电机出口断路器,启动发电机断路器失灵保护和故障录波。

表 2 保护定值对比 (A)

保护定值	计算参数	
	励磁额定电流为 2 126 A 时定值	励磁额定电流为 2 790 A 时定值
励磁后备保护过流 II 段定值	0.48	0.63
励磁过负荷定时限报警电流定值	0.21	0.27
励磁过负荷反时限启动电流定值	0.22	0.29
励磁过负荷反时限基准电流	0.19	0.25

3.5 现场处理

当励磁变压器高压侧励磁电流(二次值)达到反时限启动电流值 0.22 A 时,对应发电机励磁电流为 2 469.5 A。即若发电机励磁电流大于 2 469.5 A 时,励磁过负荷保护启动,开始对励磁绕组进行热积累计算,若励磁电流持续大于 2 469.5 A,当达到励磁绕组热容量定值 120 时保护动作于跳闸。反时限励磁过负荷保护逻辑详见图 2。

现场检查发现励磁绕组热容量已经积累到 103,已经接近跳闸热容量定值。

检修人员检查出问题所在后,通知运行人员加强监视,将励磁电流尽量控制在 2 469.5 A 以下。检修人员立即将现场发现的励磁后备保护及过负荷保护计算参数使用有误的问题反馈至定值计算单位,要求计算单位尽快核算励磁后备保护、励磁绕组过负荷保护定值并下发最新定值。在最新定值下发后,经安全生产技术部批准,检修人员将励磁后备保护、励磁绕组过负荷保护定值进行修改,消除了励磁绕组过负荷可能导致机组跳闸的隐患。

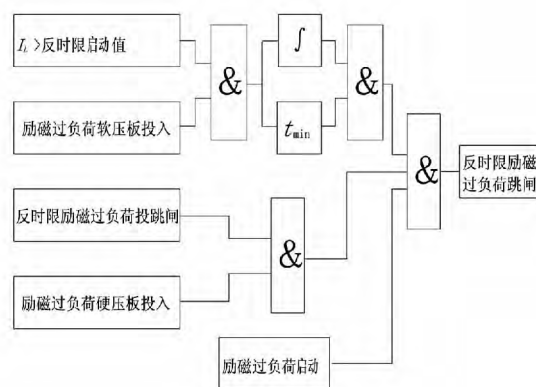


图 2 反时限励磁绕组过负荷保护逻辑框图

4 事件后的思考

4.1 事件的严重后果

该事件及时发现、及时处理,避免了机组跳闸的可能。若事件发生后运行人员未对发电机励磁电流进行控制,或在对励磁电流进行控制后,系统发生故障,调度要求机组强励磁,稳定系统电压,此时将增加励磁电流,届时保护装置将一定报“励磁过负荷报警”,且进行励磁绕组热积累。若在机组强励保系统电压时机组又跳闸,此时将加重系统的故障,可能引起系统电压严重的波动。

4.2 对策及建议

(1) 首先,定值计算是决定保护装置正确动作的关键环节。定值计算人员应具备高度的工作责任心。其次整定计算工作应严格遵守计算原则和相应导则,按照保护说明书要求进行定值整定,以保证保护装置满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求。

(2) 定值计算单位应多与现场人员沟通,详尽地阅读、了解被保护设备的有关资料,确保计算使用的参数正确完备。

(3) 现场定值单的执行必须规范仔细。现场人员不仅要核算定值计算方法、过程,同样要检查计算参数的正确性。尤其对于新建、在建电站的电厂自管定值更应仔细核查,规范执行定值单。

参考文献

- [1] 能源部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册 2: 电气二次部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 1991: 641 - 650.
- [2] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 北京: 华中科技大学出版社, 2005: 328 - 336.

作者简介:

陈熙平(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

季 杰(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

曹 钢(1985),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

蔡显岗(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

王文松(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

张 伟(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作。

(收稿日期:2013-08-06)

(上接第 28 页)

置不能及时动作,则会导致系统电压全面下降,逐渐拉垮整个系统电压水平,抑或功率严重不平衡,功角不稳定,最终导致系统崩溃。

仿真结果表明,按脆弱度指标来攻击电力网络中的节点,确实对电网的破坏性更强,电力系统运行状态的恶化速度更快。基于电力系统的脆弱环节分析其抗毁性合理且有效。

5 结 论

基于静态能量函数,构建节点脆弱度指标,找出系统的脆弱环节,利用抗毁性分析原理对其进行蓄意攻击和随机攻击,然后结合电力系统网架结构构建系统抗毁度指标,分析评估电力系统抗毁性。通过对电力系统的基于脆弱性评估的抗毁性研究,在传统抗毁性分析方法的基础上计及了能量的分布,首先找出系统中存在的薄弱环节,然后通过预想的攻击模式分析薄弱环节故障对电网造成的各种影响,为电力系统的安全及稳定运行提供有价值的参考和指导信息。

参考文献

- [1] 邹江峰,章显亮.巴西“2009.11.10”和“2011.2.4”大停电事故及启示[J].中国电力,2011,44(11):19-22.
- [2] 陈竟成,黄瀚.印度大停电事故分析与启示[J].中国电力,2012,45(10):12-16.
- [3] 程克勤,李世伟,周健.基于边权值的网络抗毁性评估方法[J].计算机工程与应用,2010,46(35):95-100.
- [4] 高强,刘献伟,邱丽君.电力系统应急通信网络及其抗毁性分析[J].电网技术,2009,33(11):104-108.
- [5] 张向亮,吕飞鹏,张向军,等.考虑节点电气介数的多组同基最小断电集选取方法[J].中国电力,2012,45(6):10-13.

- [6] 杨丽徙,林茂盛,张宏伟,等.中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J].电力系统自动化,2012,36(1):28-31.
- [7] 饶育萍,林竞羽,侯德亨.基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J].通信学报,2009,30(4):113-117.
- [8] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等.基于级联失效的复杂网络抗毁性[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(10):1252-1257.
- [9] 张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.
- [10] Overbye T J, Demarco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3):1196-1202.
- [11] 刘群英,刘俊勇,刘起方.节点势能架构下的电压脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2008,28(25):30-37.
- [12] 丁道齐.深入研究复杂电网动态行为特征构建中国特高压电网安全保障[J].中国电力,2008,41(8):1-7.
- [13] 郑武,李华强,刘慧,等.基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):79-83.
- [14] 田田,吴俊,谭跃进.基于自然连通度的复杂网络抗毁性仿真优化研究[J].复杂系统与复杂性科学,2013,10(2):88-94.
- [15] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等.基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J].电力系统自动化,2013(8):65-69.
- [16] 丁道齐.降低电力系统物理脆弱性,应对自然灾害和恶意攻击[J].中国电力,2009,42(6):26-31.

作者简介:

李艳卿(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统分析、稳定及优化问题研究;

李华强(1965),博士,教授,从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。

(收稿日期:2013-09-14)

双回线并列运行方式探讨

吴 玲¹ 刘 勤²

(1. 国网自贡供电公司 四川 自贡 643000; 2. 国网宜宾供电公司 四川 宜宾 644000)

摘 要: 通过对 110 kV 系统双回线并列运行下故障类型、保护动作、存在问题进行详细的分析,提出继电保护整定计算、继电保护配置、运行方式等方面的解决方案,以减小事故影响,缩小事故停电范围,提高电网安全、稳定运行,确保可靠供电。

关键词: 双回线; 并列运行; 方式

Abstract: Based on the analyses of fault types, protection action and existing problems of 110 kV double lines under parallel operation, the solutions for the setting calculation and configuration of relay protection and the operating mode are proposed in order to reduce the influences and outage range of the accident, improve the safe and stable operation of power grid and ensure the reliable power supply.

Key words: double lines; parallel operation; mode

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0059-04

0 引 言

近年来 随着社会经济的快速发展 要求供电企业提供更加安全、稳定、可靠的电力。为提高电网的输送能力 双回线越来越多地用于电网的各电压等级中。为保证对用户供电的可靠性 很多电网的双回线优先考虑并列运行方式。

一般电网 220 kV 变电站的 110 kV 母线为双母线 其配出线较多 一般并列运行双回线分别由不同母线供电。通常采用单号编号开关上 I 段母线 双号编号开关上 II 段母线运行的标准运行方式。对 220 kV 变电站 110 kV 系统有双回线路出线的接线 如单回线路发生短路故障 故障线路保护或线路开关拒动 会发生 220 kV 变电站 110 kV 两段母线失压的电网大面积停电事故。具体分析如下。

1 系统运行方式及保护配置

1.1 运行方式

某 220 kV 变电站两台主变压器带 110 kV 4 回出线 其中 L2、L3 线路为双回线并列运行方式 220 kV 变电站 1 号主变压器高、中压侧中性点接地运行 运行方式如图 1。

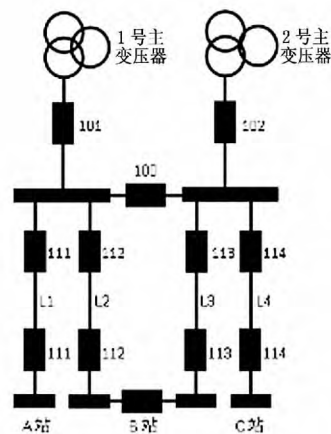


图 1 220 kV 站正常运行方式

1.2 相关间隔的保护配置

(1) 220 kV 主变压器后备保护和 110 kV 线路保护配置情况

220 kV 主变压器后备保护配置: ①主变压器 3 侧配置双套复压闭锁方向过流保护、主变压器 220 kV 和 110 kV 侧配置双套零序电流保护、主变压器 220 kV 和 110 kV 侧配置双套主变压器中性点间隙零序过流、零序过压保护。

110 kV 线路保护配置: 差动保护、3 段式相间距离保护、3 段式接地距离保护、4 段式零序电流保护。

(2) 220 kV 主变压器后备保护和 110 kV 线路保护时限设置情况

220 kV 主变压器后备保护时限: ①220 kV 主变压器 110 kV 侧复压闭锁方向过流保护时限为 3.6 s (跳 100 号开关)、3.9 s (跳主变压器 110 kV 开关)、4.2 s (跳主变压器 3 侧开关); ②220 kV 主变压器 110 kV 侧零序过流保护时限为 1.2 s (跳 100 开关)、1.5 s (跳主变压器 110 kV 开关)、3.5 s (跳主变压器 3 侧开关); ③220 kV 主变压器 110 kV 侧主变压器中性点间隙零序过流、零序过压保护时限为 0.3 s (跳主变压器 3 侧开关)。

220 kV 主变压器后备保护方向规定: ①110 kV 侧复压闭锁方向过流和零序过流保护时限 I、II 段方向, 由主变压器指向 110 kV 母线, III 段不带方向;

110 kV 线路保护时限: 差动、相间、接地距离保护 I 段 0 s, 零序电流 I 段停用; 相间、接地距离保护 II 段 0.9 s; 相间、接地距离 III 段 3.3 s, 零序保护 II 段 1.2 s, 零序保护 III 段 1.8 s; 零序保护 IV 段 3.3 s。

110 kV 线路保护方向规定: 由 110 kV 母线指向线路, 零序 IV 段不带方向。

2 存在问题分析

2.1 线路 1 发生单相接地故障

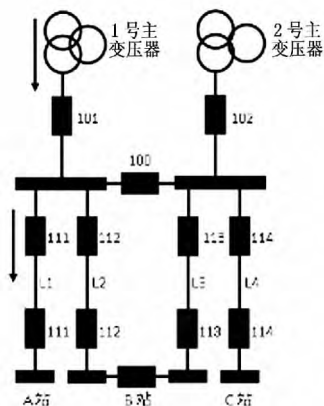


图 2 线路 1 发生单相接地故障的系统短路电流

线路 1 发生单相接地故障, 系统短路电流如图 2 所示。1 号主变压器高压侧和中压侧均流过零序电流, 1 号主变压器高压侧和中压侧零序过流启动, 如果线路 111 开关或 111 开关线路保护装置拒动, 在故障发生后 1.2 s, 由 1 号主变压器中压侧零序过流 I 段动作, 跳 110 kV 母联 100 开关。

在 110 kV 母联 100 开关跳开后, 故障零序电流分布如图 3 所示, 在故障发生后 1.5 s, 由 1 号主变压器中压侧零序过流 II 段动作跳 101 开关, 此时故

障仍未被切除, 在 220 kV 站的 110 kV 系统形成了一个局部不接地系统, 如图 4 所示, 在这个系统中, 接地相电压为零, 非接地相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 在这过电压作用下, 这系统中所接的主变压器中性点可能会分别被击穿, 直到 220 kV 站 2 号主变压器中压侧中性点被击穿, 由 2 号主变压器中压侧中性点间隙零序过流或直接由间隙零序过压保护动作, 跳开 2 号主变压器 3 侧开关, 故障被切除, 此时 220 kV 站 110 kV 系统失压。

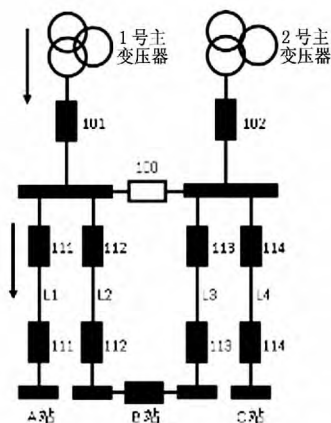


图 3 110 kV 母联 100 开关跳开后故障零序电流分布

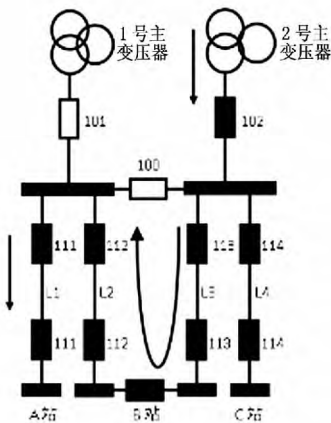


图 4 110 kV 母联 100 开关、1 号主变压器 101 开关跳开后故障零序电流分布

2.2 线路 L4 发生相间故障

线路 L4 发生相间故障, 系统短路电流如图 5 所示。2 台主变压器高压侧和中压侧均流过短路电流, 如果线路 114 开关保护拒动或 114 开关拒动, 2 台主变压器 110 kV 侧复压方向过流保护同时动作, 以 3.6 s 跳开 110 kV 母联 100 开关。

110 kV 母联 100 开关断开后, 因 2 号主变压器与 114 开关接在同一母线, 直接给故障点提供故障电流; 而 1 号主变压器则经 101 开关、线路 L2、线路

L3、线路L4为故障点提供故障电流。此时母联开关100开关虽然断开,但并列运行的线路L2、线路L3起了母联的作用,只是I、II母的残压值不同。在1、2号主变压器110 kV复压方向过流保护在跳开100开关后,没有返回,仍在启动状态。2号主变压器以3.9 s跳开102开关。

流过1号主变压器的故障电流由距离拒动元件最近的保护来切除,由图6可看出,最近的保护为B变电站的113开关保护。如果故障点在B变电站113开关距离保护II段范围内,且距离II段时间小于0.3 s,在2号主变压器110 kV复压方向过流动作之前,113开关距离II段动作跳开113开关,此时可以将故障点完全隔离;如果距离II段时间等于0.3 s,则113开关距离II段与2号主变压器110 kV复压过流有可能同时动作;如果故障点在113开关距离保护II段外(距离III段时间一般大于1.5 s),此时只能有1号主变压器110 kV复压过流动作3.9 s跳开101开关,才能将故障点完全隔离。

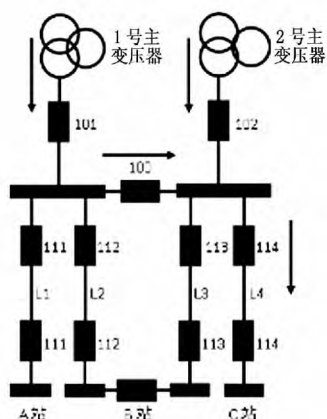


图5 线路L4发生相间故障的系统短路电流

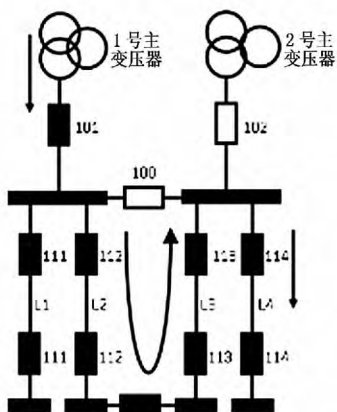


图6 110 kV母联100开关、2号主变压器102开关跳开后故障电流分布

由以上分析可以看出,对于220 kV变电站110 kV出线有双回线路的系统,双回线路采用并列运行方式且分别运行在两段母线上,如单回线路发生故障,同时故障线路开关或线路保护拒动,受并列双回线路的影响,都将发生220 kV变电站110 kV母线全停的电网大面积停电事故。

3 解决方案

通过以上分析可以看出,正是由于有双回线并列运行,在特定条件下,故障发生后产生了迂回供应的故障电流,导致为其供电的220 kV主变压器误跳,从而扩大了停电范围。因此为了避免上述问题的发生,可以从保护整定计算、保护配置、运行方式等方面加以考虑,尽量减小事故影响,缩小事故停电范围。

方案1:调整保护定值

若双回线路所供110 kV变电站没接小电机组,220 kV主变压器110 kV侧后备保护跳110 kV侧分段开关时限按与本站110 kV出线线路保护II段时限配合整定,整定为1.8 s;双回线路110 kV变电站侧开关线路零序保护II段与220 kV变电站110 kV单回线路零序、距离保护III段配合,零序保护II段时限整定为0.5 s,距离保护II段时限整定为1.5 s。

方案2:增加保护或自动装置

(1) 在负荷侧变电站安装故障解列装置

在负荷变电站110 kV母线分段100开关增加装设灵敏的解列保护装置,当发生故障后,迅速动作跳开110 kV母线分段100开关,将L2线、L3线从双回线并列运行状态迅速解开成分列运行方式,满足保护动作的选择性。

(2) 在中心站配置110 kV断路器失灵保护

如果所供110 kV变电站为重要用户,根据有关规定,线路保护采用远后备方式,如果由其他线路或变压器的后备保护切除故障将扩大停电范围(例如采用多三角形接线、双母线或分段单母线等时),并引起严重后果时,可以装设断路器失灵保护。在保持当前运行方式的前提下,在220 kV变电站配置110 kV断路器失灵保护可以使停电范围大大缩小。

方案3:调整系统运行方式

(1) 双回线路所供110 kV变电站接有小电机组,

则可采取双回线路分列运行方式,在110 kV变电站侧安装备自投装置,实现线路备投以增加110 kV变

电站供电可靠性。如 110 kV 变电站所供负荷较重,正常方式下不满足分列运行条件,要求在 110 kV 变电站安装备自投装置,实现分段备投方式。

(2) 在负荷侧变电站安装备自投装置

1) 若所供负荷又较轻的线路,采用一备一用方式,负荷侧变电站投入线路备自投方式,220 kV 变电站侧线路开关分别上两段母线,提高供电可靠性;

2) 若所供负荷又较重的线路,采用线路变压器组运行方式,负荷侧变电站投入分段备自投装置,220 kV 变电站侧线路开关分别上两段母线,提高供电可靠性。

(3) 将双回线路安排在 220 kV 变电站的同一段 110 kV 母线上运行,由双回线路并列运行供电的 110 kV 变电站,将双回供电线路安排在 220 kV 变电站的同一段 110 kV 母线上运行。这种运行方式可以使事故停电范围大大缩小。但当母线故障时,

(上接第 49 页)

街变电站、220 kV 新二村变电站、220 kV 塘坎街变电站主变压器有功、相关线路有功对比。从对比中可以看出,备自投动作正常,变电站无负荷损失,有效地提高了电网供电可靠性。

表 4 备自投装置动作前后线路有功对比

厂站名称	线路名称	线路有功/MW	
		事故前	事故后
110 kV 吉祥街站	村祥线	24.1	0
	塘祥线	0	23.91
220 kV 新二村站	村祥线	24.5	0
220 kV 塘坎街站	塘祥线	0	24.20

6 结 论

根据电网运行特点,提出一种备用电源自动投切装置自适应模型,自动跟踪电网运行方式的变化,在调度控制中心主站建模,实现对电网方式自动跟踪控制,方便调度监控人员对电网备自投信息的全面了解,在事故情况下,可以快速有效地切除故障,恢复供电,确保电网安全可靠运行。工程运用实例表明,备自投自适应模型能够良好地适应电网方式

会造成相应的 110 kV 变电站全停。

4 结 语

随着建设“一强三优”步伐的加快,不断提高电网供电可靠性是电网企业的职责。合理的电网结构和运行方式是保证电力系统安全稳定运行的基础。继电保护装置能否有效发挥作用与电网结构和运行方式有密切的关系,必须把它们作为一个整体来考虑。为此,根据电网实际情况,因地制宜,制定安全可靠的供电方式,设计最优的保护整定方案,是提高供电可靠性的有力保证。

作者简介:

吴 玲(1972),女,工程师,从事电网规划管理;

刘 勤(1968),男,工程师,从事电网调度管理。

(收稿日期:2013-09-27)

变化,极大地提高了电网供电可靠性。

参考文献

- [1] DL/T 526-2002 静态备用电源自动投入装置技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 杨浚文,吴文传,孙宏斌,等. 一种基于 EMS 的广域备自投控制系统[J]. 电力系统自动化,2010,34(11):61-66.
- [4] 郝文斌,洪行旅,陈立. 智能电网地区调度支持系统框架研究[J]. 四川电力技术,2011,34(4):1-3.
- [5] 孙建华,李国友,姚捷. 自适应备用电源自投装置的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(4):88-90.
- [6] 张建平,胡建绩. 面向智能电网的多适应性规划体系设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(10):1-7.

作者简介:

张大伟(1984),研究生,工程师,研究方向为电力调度自动化;

彭 海(1981),研究生,工程师,研究方向为电力调度自动化。

(收稿日期:2013-08-01)

特高压交流输电线路工频电磁环境分析

许翠娥¹ 文 艺² 李建明³

(1. 华电四川宝珠寺水力发电厂, 四川 广元 628003; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 随着特高压交直流输变电工程建设的逐渐开展, 该电压等级下线路走廊附近电磁环境越来越受到人们和环境部门的重视。以晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 单回交流输电线路为例, 利用 ANSYS 有限元分析软件对不同导线布置情况下输电线路附近的电场和磁场分布进行了建模分析。研究表明, 1 000 kV 特高压单回交流输电线路附近电磁场满足相关标准要求。

关键词: 特高压; 有限元分析; ANSYS; 工频电磁场

Abstract: With the gradual construction of the ultra-high voltage (UHV) AC/DC power transmission and transformation projects, the electromagnetic environment near the line corridors under such voltage level gets more and more attention of the people and the environmental department. Taking Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1 000 kV single-circuit AC transmission line for example, the distribution of electric field and magnetic field near the transmission line under different conductor configurations are analyzed in modeling using ANSYS finite element analysis software. The researches show that the electromagnetic field near 1 000 kV UHV single-circuit AC transmission line satisfies the requirements of the related standards.

Key words: ultra-high voltage (UHV); finite element analysis; ANSYS; power-frequency electromagnetic field

中图分类号: TM451+2 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0063-05

0 引 言

交流输电线路在正常工作时, 导线上的电荷将在周围空间产生工频电场, 导线内的电流将在周围空间产生工频磁场。特高压电网随着电压等级的升高和电流的增加, 使得其工频电磁场对周边环境的影响变大, 因而越来越受到工作人员和普通民众的关注。沿特高压交流输电线路走廊附近的工频电磁场分析, 也成为了世界各国学者研究的热点问题。沿特高压输电线路附近的工频交变电磁场不仅会造成无线电干扰和可听噪声等环境问题, 还会对处于线路附近人体的健康和精神造成影响^[1]。

输电线路产生的工频电场对人类的影响主要是稳态电击、暂态电击和可能的生态影响, 导线表面的电场分布关系到线路电晕放电, 而电晕效应正是引起无线电干扰和可听噪声的主要原因; 处于输电线路附近的人体会在线路产生的工频磁场作用下产生感应电流, 超过一定限制的感应电流会使人体产生不适感, 影响人的健康。鉴于特高压输电线路对周

围电磁环境的重要影响, 各国对其周围电磁场分布做了大量的研究, 也提出了各自的电磁环境限值标准, 可为特高压输电线路铁塔、线路走廊、导线选型等提供重要依据。因此, 研究特高压交流输电线路的工频电磁环境是非常有必要的。

1 空间工频电磁场计算方法

可用于交流输电线路工频电磁场分析的数学模型和计算方法有很多种。出于简化特高压交流输电线路周围电磁场分布模型的考虑, 目前的工程计算中大多采用二维空间模型。其主要的计算方法包括: 等效电荷法、有限差分法、有限元法和矩量法等^[2]。以电场分布为例, 利用等效电荷法和有限元法的计算原理如下。

1.1 等效电荷法理论基础

以边界上的电荷分布或一组虚设的模拟电荷为未知数, 根据库仑定律直接决定的由电荷分布求解电位的积分方程, 利用已知的边界条件, 写出一组对电荷求解的线性方程组, 再按所求得的电荷, 便得出

电场空间分布的近似解。这类数值计算方法主要就是等效电荷法。

作为求解静电场的有效方法,模拟电荷法是基于电磁场的唯一性定理,将电极表面连续分布的自由电荷或介质分界面上连续分布的束缚电荷用一组离散化的模拟电荷予以等值替代,再应用叠加原理,将离散的模拟电荷在空间所产生的场量叠加,即得原连续分布电荷所产生的空间电场分布。静态电场的数学模型可视为以电位函数为待求量的泊松方程或拉普拉斯方程的定解问题,但在实际工程问题中,电荷的分布情况往往是未知的,不能直接由给定的边界条件解出。

1.2 有限元法理论基础

从拉普拉斯方程或泊松方程出发,将电场连续域内的问题变为离散系统的问题来求解。也就是说,把场域空间划分为有限个网格,以网格节点的电位为所求未知数,利用已知的边界条件,写出一组对节点上的电位求解的线性方程组,从而求出电场空间分布的近似解。这类数值计算方法主要就是有限元法。

有限元法是一种以变分原理和剖分插值为基础的方法^[3]。在计算时,他将研究场域剖分为若干有限单元,再利用彼此间的插值函数来表达每个单元的解,进而利用电磁学中相关原理来建立用以求解节点未知量的有限元方程,从而将一个连续域中的无限自由度问题转化为离散的有限自由度问题。

1.3 计算方法比较

通过比较计算特高压交流输电线路周围电磁场的方法可以知道,采用等效电荷法可计算无边界区域,计算数据量小,计算时间短;但对于分析边界情况复杂,变化比较严重的场域问题时,应用性较差。有限元法具有多种网格划分方法,能够适应于复杂多变的边界形状,有限元单元即可以为曲面也可以为曲线单元,从而保证了复杂边界形状的计算精度^[4]。故采用有限元分析软件 ANSYS 来分析特高压交流输电线路周围工频交变电磁场的分布状况。

2 仿真模型建立

2.1 仿真计算方法

1 000 kV 特高压交流输电线路通常都处在比较复杂的地理环境中,计算它产生的电磁场较为复杂。为了便于分析和计算,现对其输电线路周围电磁场

计算模型做了如下简化处理。

- 1) 将工频电磁场看作准静态场;
- 2) 把三维电磁场视作二维场。因特高压输电线路较长,为简化计算模型,故而忽略线路端部效应和弧垂,并取输电线路弧垂的最低点为导线对地高度;
- 3) 忽略线路附近铁塔、树木以及其他建筑物对电磁场分布的影响;
- 4) 忽略系统和负荷的不对称性以及电压、电流的波动,将线路运行电压看作三相对称的正弦电压;
- 5) 将大地视作良导体,在计算电场分布时取大地电位为零;
- 6) 电晕放电时,不影响导线表面的电磁场分布情况和附近空气介电常数,即可将输电线路周围空气视为同一介质。

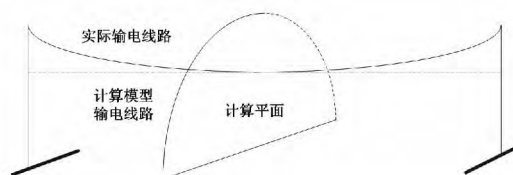
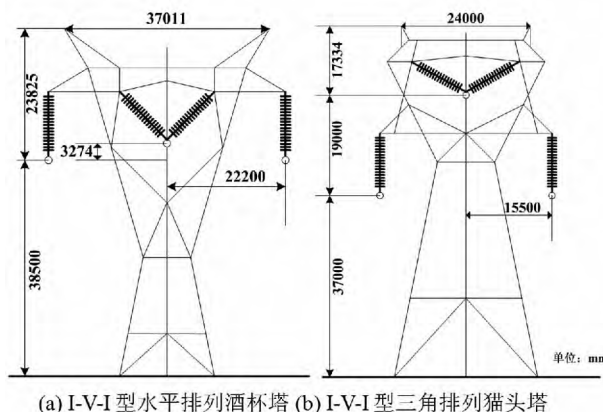


图 1 特高压线路等效计算模型

2.2 特高压交流输电线路尺寸和导线布置

中国晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压单回交流输电线路杆塔典型塔型如图 2 所示。图 2 (a)、(b) 中输电线路均采用 8 分裂导线,分裂间距均为 0.4 m,导线型号为 8 × LGJ-500/45 钢芯铝绞线,子导线半径为 0.015 m,弧垂为 17 m;避雷线型号为 LBGJ-150-20AC 铝包钢绞线,避雷线半径为 0.008 m,弧垂为 15 m^[5]。

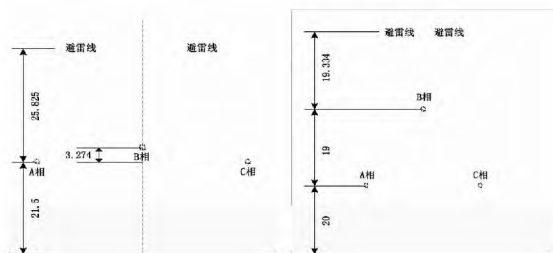


(a) I-V-I 型水平排列酒杯塔 (b) I-V-I 型三角排列猫头塔

图 2 1 000 kV 特高压单回线路杆塔参数

2.3 有限元仿真模型

按照上述电场计算条件和导线布置数据,分别建立考虑了避雷线影响的 I-V-I 型水平排列和 I

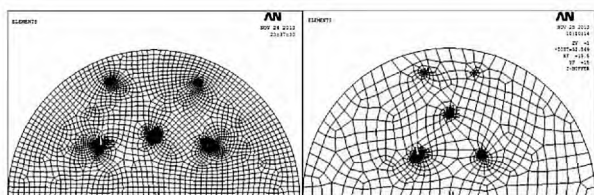


(a) 酒杯塔导线布置及相序 (b) 猫头塔导线布置及相序

图 3 导线离地最低点界面图

-V-I 型三角排列的 1 000 kV 特高压单回交流输电线路 ANSYS 有限元计算模型。

为了方便分析线路周围电场分布,酒杯塔和猫头塔建立了圆心在 B 相分裂导线正下方地表,半径分别为 60 m 和 70 m 的半圆形的远场边界。其网格划分结果如图 4 所示。



(a)水平排列导线网格划分结果(b)三角排列导线网格划分结果

图 4 输电线路有限元模型网格划分结果

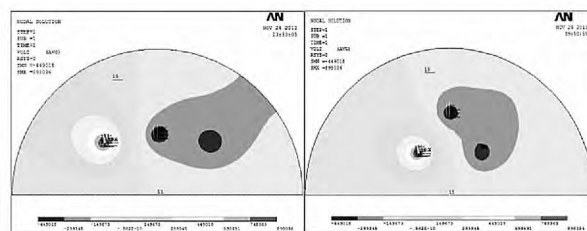
3 仿真计算结果

3.1 输电线路周围电场分布

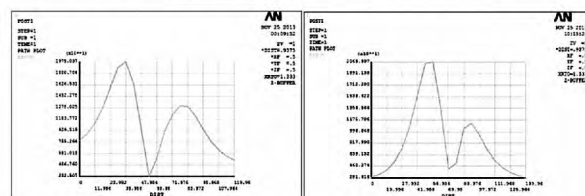
中国 1 000 kV 特高压交流电网最高运行线电压为 1 100 kV 相电压峰值为 898 kV。当 A 相初始相角为 0°时,三相导线施加的电压载荷为 $U_A = 898.036$ kV $U_B = -449.018$ kV $U_C = -449.018$ kV;当 A 相初始相角为 30°时,三相导线施加的电压载荷为 $U_A = 777.722$ kV $U_B = -777.722$ kV $U_C = 0$ kV;当 A 相初始相角为 60°时,三相导线施加的电压载荷为 $U_A = 449.018$ kV $U_B = -898.036$ kV $U_C = 449.018$ kV;两根避雷线和地面电压载荷均设为 0 V,半圆弧施加远场边界条件。当 A 相初始相角为 90°和 120°时,输电线路周围工频电场分布与相角为 0°和 30°时的情况相似,仅仅是关于铁塔中心线轴对称了而已,故不再分析。

不同 A 相电压初始相角情况下, I-V-I 型水平排列导线和 I-V-I 型水平排列三角排列导线线路周围电位梯度分布云图以及离地 1.5 m 处电场横

向分布如图 5、6、7 所示。

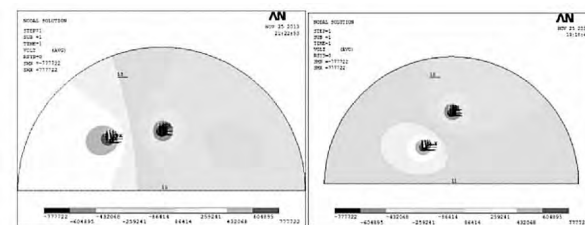


(a)水平排列导线电位分布云图 (b)三角排列导线电位分布云图

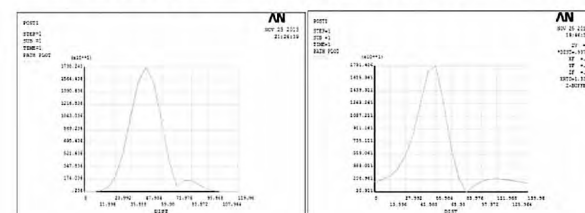


(a)水平排列导线电场横向分布 (b)三角排列导线电场横向分布

图 5 A 相电压初始相角为 0°时电位分布云图及离地 1.5 m 处电场横向分布



(a)水平排列导线电位分布云图(b)三角排列导线电位分布云图



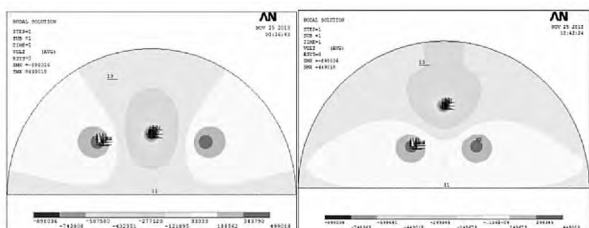
(a)水平排列导线电场横向分布 (b)三角排列导线电场横向分布

图 6 A 相电压初始相角为 30°时电位分布云图及离地 1.5 m 处电场横向分布

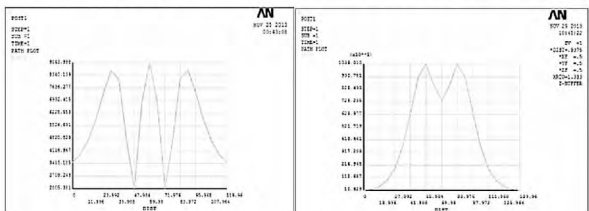
3.2 输电线路周围磁场分布

由于 1 000 kV 特高压交流输电线路,采用了 8 分裂导线,当无并联电抗时,根据 1 000 kV 线路参数计算分析,波阻抗为 242.5 Ω ,自然功率为 4 546 MVA,按自然功率传输时相的电流为 2.5 kA^[6]。故相导线电流峰值为 3.536 kA。

当 A 相初始相角为 0°时,三相导线施加的电流载荷为 $I_A = 3.536$ kA $I_B = -1.768$ kA $I_C = -1.768$ kA;当 A 相初始相角为 30°时,三相导线施加的电流载荷为 $I_A = 3.062$ kA $I_B = -3.062$ kA $I_C = 0$ kA;当 A 相初始相角为 60°时,三相导线施加的电流载荷



(a) 水平排列导线电位分布云图 (b) 三角排列导线电位分布云图

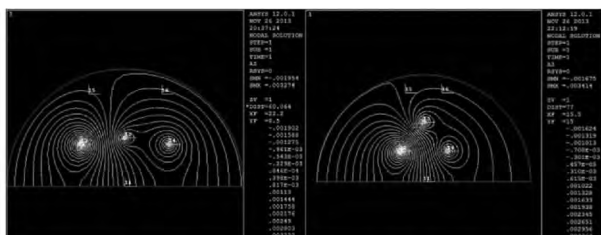


(a) 水平排列导线电场横向分布 (b) 三角排列导线电场横向分布

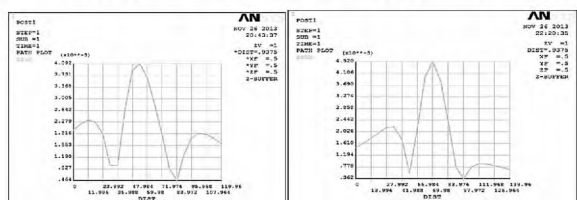
图 7 A 相电压初始相角为 60° 时电位分布云图及
离地 1.5 m 处电场横向分布

为 $I_A = 1.768 \text{ kA}$ $I_B = -3.536 \text{ kA}$ $I_C = 1.768 \text{ kA}$; 与电场分布类似; 当 A 相初始相角为 90° 和 120° 时输电线路周围磁场分布与相角为 0° 和 30° 时关于铁塔中心线轴对称, 故不再分析。

不同 A 相电流初始相角情况下, I-V-I 型水平排列导线和 I-V-I 型水平排列三角排列导线线路周围磁力线分布以及离地 1.5 m 处磁感应强度横向分布云图如图 8、9、10 所示。



(a) 水平排列导线磁力线分布云图 (b) 三角排列导线磁力线分布云图

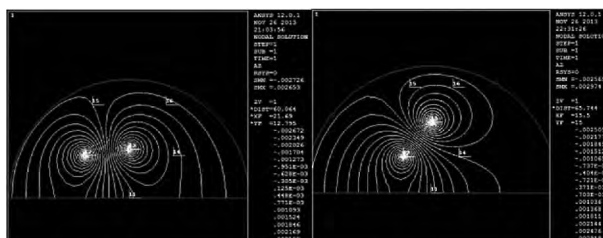


(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

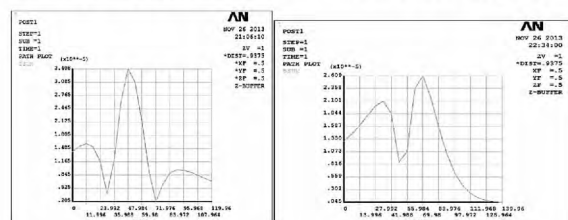
图 8 A 相电流初始相角为 0° 时磁力线分布及
离地 1.5 m 处磁感应强度横向分布

3.3 特高压交流输电线路电磁场仿真结果

输电线路下方在距离地面 1.5 m 处电场强度和磁感应强度的仿真结果最大值如表 1 所示。

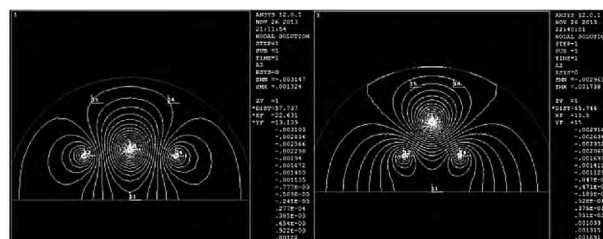


(a) 水平排列导线磁力线分布 (b) 三角排列导线磁力线分布

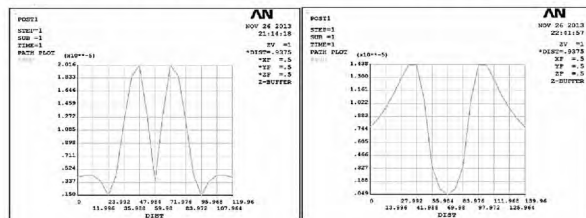


(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

图 9 A 相电流初始相角为 30° 时磁力线分布及
离地 1.5 m 处磁感应强度横向分布



(a) 水平排列导线磁力线分布 (b) 三角排列导线磁力线分布



(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

图 10 A 相电流初始相角为 60° 时磁力线分布及
离地 1.5 m 处磁感应强度横向分布

表 1 离地 1.5 m 处电磁场仿真结果最大值

导线布置形式	电场强度幅值 $/(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$			磁感应强度幅值 $/\mu\text{T}$		
	0°	30°	60°	0°	30°	60°
I-V-I 水平排列	1.975	1.738	0.904	40.92	34.08	20.16
I-V-I 三角排列	2.070	1.791	1.033	35.20	26.09	14.38

上述计算结果均满足国家环保总局制定的 HJ/T 24-1998《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》标准对电磁场限值的要求。从表 1 中可以看出, 距地面 1.5 m 处最大电场强度未超过 4 kV/m 的限值, 最大磁感应强度未超过 100

μT 的限值^[7]。由图 5、6、7 可以得到, A 相电压初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 时, 离地 1.5 m 处场强最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, A 相电压初始相角为 60° 时, 场强最大值出现在边相导线附近; 由图 8、9、10 可以得到, A 相电流初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 时, 离地 1.5 m 处磁感应强度最大值出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, A 相电流初始相角为 60° 时, 磁感应强度最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内。

4 结 论

运用 ANSYS 有限元分析软件, 对 1 000 kV 特高压单回交流输电线路在典型导线布置形式下的电磁环境做了仿真计算, 其计算结果与参考文献 [1] 类似。结果表明如下。

1) 特高压单回交流输电线路下方离地 1.5 m 处电磁场强度均满足国家相关标准的要求, 不会对地面人员产生危害;

2) 电场强度最大值在 A 相电压初始相角为 0° 或 120° 、 30° 或 90° 的情况下, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, 初始相角为 60° 时, 出现在边相导线附近; 磁感应强度最大值在 A 相电压初始相角为

0° 或 120° 、 30° 或 90° 的情况下, 出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, 初始相角为 60° 时, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内;

3) 酒杯塔导线到地面的距离较猫头塔略高, 故典型水平布置导线电场强度较三角布置导线略低; 且导线水平布置时磁感应强度较大。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 王晓燕. 特高压交流输电线路电磁环境研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [3] 刘红文, 杨卓, 谭向宇, 等. 高海拔 500 kV 紧凑型输电线路电场仿真分析与对比研究 [J]. 电线电缆, 2013 (2): 42 - 45.
- [4] 程伟. 特高压输电线路电磁环境的数值仿真研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [5] 庄秋月. 1 000 kV 变电站雷电侵入波的分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [6] 刘振亚. 特高压输电知识问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] HJ/T 24 - 1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范 [S].

(收稿日期: 2013 - 12 - 10)

(上接第 22 页)

挖掘的潜力, 通过开发人工智能和调度算法能进一步提高调度指令准确性与科学性, 不断探索创新, 创造更大的经济价值和社会效益。

参考文献

- [1] 雷怀光, 张振. 国基于 .NET 技术的高校人事管理系统的研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2008, 26(5): 162 - 165.
- [2] Ferrero RW, Rivera JF, Shahidehpour SM. A Dynamic Programming Two - stage Algorithm for Long - term Hydro-thermal Scheduling of Multireservoir Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1534 - 1540.
- [3] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 120 - 130.
- [4] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment

of Plug - in Hybrid Electric Vehicles [R]. New York: EPRI, 2007: 23 - 27.

- [5] 王志平, 熊光泽. 实时调度算法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 205 - 208.
- [6] 郑延海, 张小白, 钱玉姝, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49 - 52.

作者简介:

银涛 (1981), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

王彦津 (1981), 学士学位, 从事科技、项目及工程管理工作;

张宏图 (1973), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

吴璇 (1980), 学士学位, 从事电力监控运行工作;

胡翔 (1976), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;

张勤勤 (1982), 学士学位, 从事通信运维工作;

蒋科 (1983), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作。

(收稿日期: 2013 - 11 - 05)

高压直流换流站设备可听噪声的分析与降噪探讨

叶春燕¹, 王方强¹, 陈 巍¹, 王 杰¹, 任志超²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 高压直流换流站可听噪声的环境影响是直流输电急需解决的关键技术问题之一。对高压直流换流站主要噪声源的产生机理和声学特性进行了研究, 并对噪声源的频谱特性进行了实测和分析, 在此基础上提出了噪声控制措施, 将噪声水平控制在国家标准允许范围内, 对实际工作具有一定的指导意义。

关键词: 换流站; BOX-IN; 声屏障; 频谱特性; 降噪

Abstract: The environmental impact of audible noise in HVDC converter stations is one of the key technical issues needing to be resolved urgently. The generation mechanism and acoustic characteristics of main noise source for HVDC converter station are studied, and the spectral characteristics of the noise source are measured and analyzed. On this basis, the noise control measures are proposed to restrict the noise levels within the allowable range of national standards, which has a guiding significance for the actual work.

Key words: converter station; BOX-IN; sound barrier; spectral characteristics; noise reduction

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0068-03

0 引 言

直流输电是电力系统近年来迅速发展的一项新技术, 具有送电距离远、输送容量大、线路损耗小的优点。换流站是直流输电工程中直流和交流进行相互能量转换的系统, 但它在给人们带来电力资源优化配置的同时, 会对周边环境辐射出很大的噪声, 并引起了社会的广泛关注。因此对高压直流换流站的可听噪声进行分析并提出降噪措施势在必行。

1 换流站设备噪声分析

换流站内的主要噪声源包括换流变压器、平波电抗器、交直流滤波器组、风机, 其中, 换流变压器、平波电抗器、交直流滤波器发生的噪声为电磁噪声, 风机发出的噪声为机械噪声和空气动力学噪声。下面对主要噪声源产生机理及频谱特性进行分析。

1.1 换流变压器噪声

换流变压器是换流站噪声的最主要来源, 其噪声来源于 3 个方面: 1) 铁心励磁时, 硅钢片的磁致

伸缩作用, 使得变压器铁心的尺寸发生变化, 引起周围空气和自身的振动所产生的振动噪声^[1]; 2) 换流变压器冷却系统的风扇和盘管产生的噪声; 3) 线圈导线和线圈间的电磁力对变压器和磁性材料的噪声^[2]。

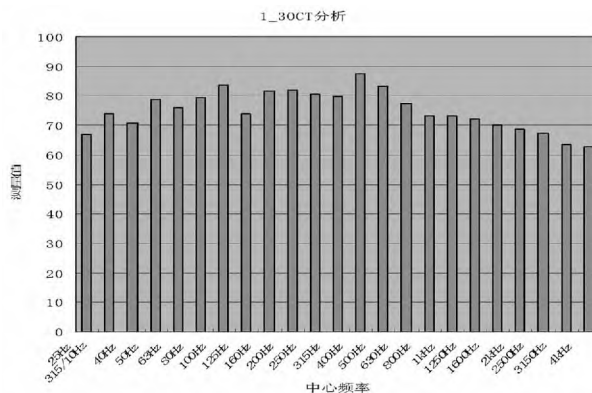


图 1 换流变压器可听噪声频谱图

图 1 是某换流站换流变压器实测噪声频谱, 其频率以 100 Hz 基频及其谐频为主。从 1/3 倍频程频谱测量结果看出, 换流变压器在中低频部分有明显的峰值, 而受冷却风扇的影响, 中频带的声级也较高, 高频带的声级呈平缓下降的趋势, 设备噪声总体频带较宽。在 100、400、500 Hz 的中心频率上出现

峰值,平均噪声水平 85 ~ 100 dB^[3]。

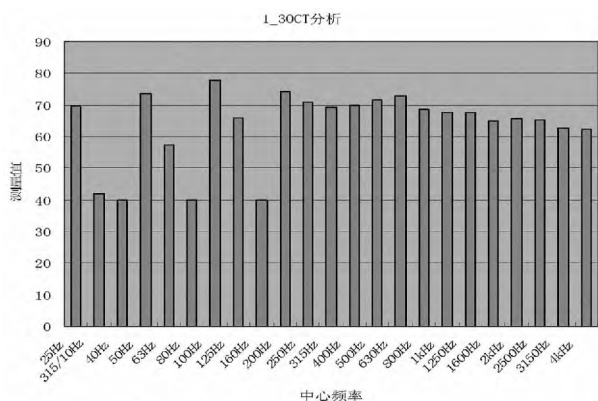


图2 平波电抗器噪声频谱图

1.2 平波电抗器噪声

平波电抗器的噪声主要由直流电流和谐波电流的相互作用引起绕组振动^[4]。油浸式平波电抗器的绕组和绝缘结构与换流变压器相同,因此其噪声的产生机理、频率范围、声级强度和换流变压器类似。从图2看出,噪声总体频带较宽。在低频段100、200、400 Hz的中心频率上有明显峰值,在中、高频上频率成分丰富并趋于平缓。平波电抗器前噪声总声级为85 ~ 90 dB^[5]。

1.3 交流滤波器组

交流滤波器组由滤波电抗器和滤波电容器组成。电抗器一般采用干式空心电抗器,电抗器线圈受交替变化的电磁场作用而引发周期性的磁致伸缩作用而产生噪声,在低频有明显峰值。电容元件的底部和顶部产生的噪声最大,是噪声的主要来源^[6]。在声级强度上低于换流变压器和平波电抗器产生的噪声。

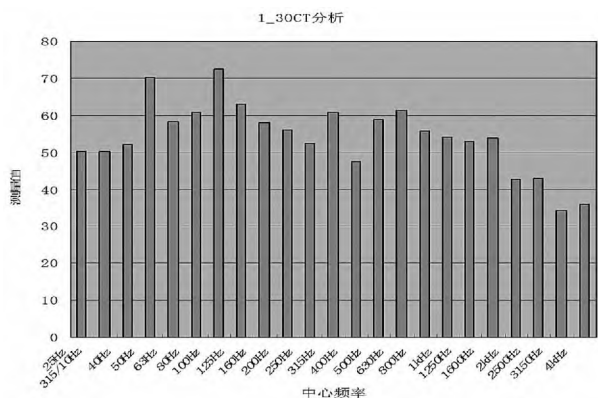


图3 交流滤波器组噪声频谱图

由图3看出,噪声的总体频带较宽,交流滤波器组噪声在低频段的50、100、125、200 Hz的中心频率上出现峰值,在中、高频上趋于平缓,其声级强度

低于换流变压器和平波电抗器的噪声。滤波器组噪声总声级为63.6 ~ 65.6 dB^[7]。

1.4 阀外冷设备

阀外冷设备的风冷机组或冷却塔也是产生换流站噪声的设备。阀冷却塔风机噪声的频谱特性属于典型的风机噪声频谱,噪声分布频带较宽,低、中、高频段频率成分丰富平均,无明显峰值。

2 换流站噪声治理研究

换流站周边的环境敏感目标噪声执行《声环境质量标准》(GB 3096-2008),换流站站界噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)。按照厂界环境噪声排放标准,II类标准限值为昼间小于60 dB(A),夜间小于50 dB(A)^[8]。噪声控制途径包括以下3种方法:①控制噪声源;②切断噪声传播途径;③保护噪声受体。下面结合换流站设备实际情况分别阐述。

2.1 声源控制

2.1.1 换流变压器

换流变压器是换流站中噪声最大的单体设备,为了降低对外辐射噪声:①由于磁致伸缩率大小与硅钢片的材质有关,可采用磁致伸缩率小的高导磁材料,如高导磁硅钢片,铁心的噪声在同样工作磁密下降低2 ~ 4 dB(A),但这种方法成本较高。②降低铁心磁通密度。试验表明,磁通密度每降低0.1 T,铁心噪声可降低2 ~ 3 dB(A)^[9];③采用低噪声风扇;④在油箱内部加吸音材料,在外部加隔音板。

2.1.2 平波电抗器

1) 对于干式平波电抗器,可限制线圈的振动,调整结构尺寸、间隔棒和机械支撑使共振频率远离临界频率,使用大导体增加惯性来减少振幅等办法,可将噪声降低5 ~ 10 dB;

2) 采用顶部和底部封装分别加装屏蔽层的方式降噪,屏蔽后降噪可达15 ~ 20 dB^[10]。

2.1.3 交流滤波器组

1) 采用低噪声电抗器^[11];

2) 采用双塔式电容器。电容器的噪声很大,换流站的电容器组是由一系列单个电容器组成,这些元件以串联的形式连在一起,导致高度很大,经过优化改进后,将电容器组由单塔式变为双塔式,在降低电容器高度的同时,也降低了电容器对外辐射的噪声。

2.2 噪声传播途径的控制

如果上述方法不能大幅度有效降低噪声,或者进一步降低设备噪声所需成本较高时,可考虑采用切断噪声传播途径为主的降噪措施,如隔声、消声、吸声和隔振等。

2.2.1 换流站设计方案优化

1) 尽量将控制楼、阀厅和换流变压器布置在站址中央区域;

2) 阀厅和换流变压器宜采用面对面方式布置;

3) 交流滤波器与换流变压器宜分开布置,同时降低交流滤波器高度,并使其远离站界^[12]。通过采用噪声分析软件 SOUNDPLAN 对换流站区域噪声进行模拟计算,图 4 和图 5 分别为采用一字形和面对面布置时换流站的噪声分布图。

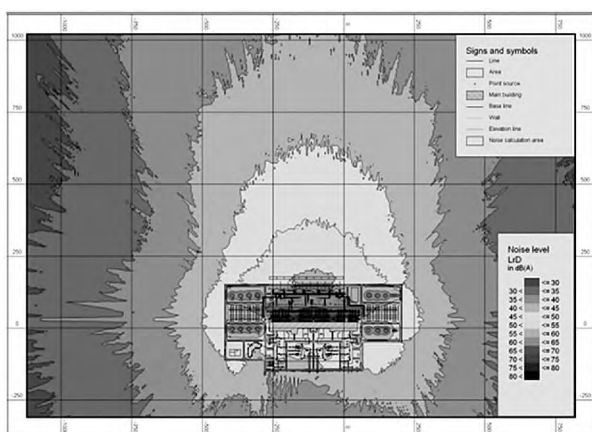


图 4 采用一字形布置时换流站的噪声分布

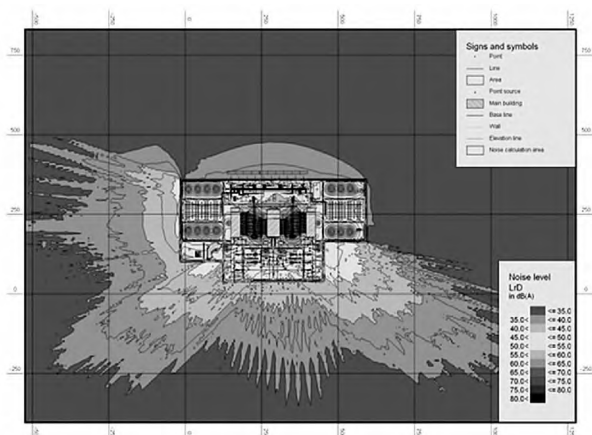


图 5 采用面对面布置时换流站的噪声分布

从图 4 和图 5 可以看出,与按一字形布置时相比,阀厅和换流变压器按面对面布置时能改善换流站外的噪声环境。

2.2.2 设置声屏障等

1) 声屏障材料有砖墙、钢结构、复合结构多种类型,声屏障的插入损失(也即降噪量)取决于声波

在声屏障上的透射、绕射和反射情况^[13],一般可取得 5 ~ 15 dB 的降噪效果;

2) 隔声罩:其隔音效果比声屏障要好,一般降噪量可以达到 15 ~ 25 dB(A)。例如采用隔声封装的“BOX-IN”技术,它是借助换流变压器防火墙对换流变压器本体进行封闭式隔声处理的一种变压器噪声治理的新技术^[14],目前采用最多的是移动式 BOX-IN 技术,可有效降低噪声量 30 dB;

3) 隔振装置:可以降低噪声 1 ~ 5 dB(A)。如换流变压器等设备在其底部加装减振装置来降低低频结构噪声;

4) 风机消声器:一般可取得 15 ~ 30 dB(A) 的降噪效果^[15]。

2.3 保护噪声受体

通过在换流站外围围墙上设置声屏障,可以阻挡一部分噪声的传播,隔离透射声,并使绕射声有足够的衰减作用^[16],基本上可以把站界噪声标准限制在规定值内。

3 噪声治理效果分析

对某换流站主要噪声源降噪方案如下。

方案 1: 换流变压器采用 BOX-IN 封装方式降噪,则换流站噪声水平得到最大限度降低,站界噪声水平小于 50 dB。

方案 2: 换流变压器两侧加防火墙、厂房外墙及通风降噪装置四周设置声屏障,防火墙上贴吸声材料(复合吸声体),并延长防火墙长度。

方案 3: 换流站电容器组采用双塔结构,从而降低了声源高度,并减少了噪声传播范围。

方案 4: 换流阀冷却塔选用低噪声风扇,并采用屏蔽罩降低其噪声。

对比上述降噪方案,采用噪声分析软件 SOUNDPLAN 对换流站区域噪声进行模拟计算,其中方案 1 能使换流站噪声水平得到最大限度降低,使站界噪声控制在 50 dB(A) 以下,居民点噪声级也控制在声环境质量标准 II 类标准之内。

4 结 论

1) 换流变压器、平波电抗器、交流滤波器组、阀
(下转第 87 页)

4 结 语

重点分析了新疆 750 kV 变电站 3/2 母线接线方式,对 3/2 接线方式在运行的可靠性、检修方式下的灵活性与倒闸操作的安全性方面进行重点讨论,同时结合实际工作情况提出了几点优化倒闸操作效率的建议,对于新疆超高压电网运行维护具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 何仕卿. 220 kV 母线保护改造问题[J]. 四川电力技术, 2009, 31(20): 73-74.

- [2] 钟惠霞. 南方电网 500 kV 3/2 断路器主接线的特殊运行方式[J]. 电网技术, 1995(5): 35-39.
[3] 范锡普. 发电厂电气部分[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
[4] 宋继成. 220 ~ 500 kV 变电所电气接线设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[5] 广西电力设计院. 500 kV 玉林变初步设计[Z]. 1998.
[6] 中南设计院. 500 kV 南宁变初步设计[Z]. 2000.

作者简介:

徐 闯(1981), 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

石 辉(1984), 工程师, 主要研究方向为现代电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2013-09-06)

(上接第 70 页)

外冷风机是换流站内的主要噪声源,其噪声类型包括电磁噪声、机械噪声和空气动力学噪声。采取降噪措施时应统筹规划,遵循环保达标、技术可行、经济合理的原则进行治理。

2) 换流站内的设备噪声频谱特征具有频带较宽的特点,其中以中低频噪声为主,高频成分较弱。

3) 换流变压器在 100、400、500 Hz 的中心频率上出现峰值,中频带的声级较高,高频带的声级呈平缓下降的趋势,设备噪声以铁心振动噪声为主,因此应主要针对铁心采取降噪措施。

4) 平波电抗器在 100、200、400 Hz 的中心频率上有明显峰值,在中、高频上频率成分丰富并趋于平缓。设备噪声以铁心振动和线圈电磁振动为主,因此应针对铁心和线圈采取降噪措施。

5) 交流滤波器组在低频段的 50、100、125、200 Hz 的中心频率上出现峰值,在中、高频上趋于平缓,应主要针对电容器和电抗器采取降噪措施。

6) 换流站噪声控制应先合理选择换流站站址,其次尽可能地降低噪声源的数量和强度,然后考虑合理选择和优化设计方案,最后才考虑必要的隔声、消声等降噪治理措施。同时为了控制降噪成本,噪声控制工程应与主体工程同时设计、同时施工、同时投产。

参考文献

- [1] 余尤好,陈志宝. 大型电力变压器的噪声分析与控制[J]. 变压器, 2007, 44(6): 23-26.
[2] 马大酋. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
[3] 刘惠玲. 环境噪声控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.

- [4] 邱宁,穆华宁,胡小龙. ± 800 kV 换流站噪声控制研究[R]. 北京中国电力工程顾问集团公司, 2005.
[5] Lan T S, Chiu M C. Optimal Noise Control on Plant Using Simulated Annealing[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2008, 32(3-4): 423-437.
[6] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
[7] GB 12349-90 工业企业厂界噪声测量方法[S].
[8] GB 12348-1990 工业企业厂界噪声标准[S].
[9] 南方电网技术研究中心. 云南—广东 ± 800 kV 直流输电工程可听噪声研究报告[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2006.
[10] 刘培杰,孙海涛,王红卫. 噪声模拟软件 Cadna/A 在交通噪声预测评价中的应用[J]. 电声技术, 2008, 32(7): 64-67.
[11] 河南电力试验研究院. 灵宝换流站可听噪声测试报告[R]. 郑州, 2005.
[12] 韩辉,吴桂芳,陆家榆. ± 800 kV 换流站阀厅与换流变压器采用一字形或面对面布置的噪声分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 1-5.
[13] 杨一鸣,章旭雯. 特高压直流换流站设备的降噪措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 149-152.
[14] 张劲松. 高压直流换流站噪声综合治理研究[J]. 电力建设, 2007, 28(8): 14-16.
[15] 高聚元,宋金鹏. 贵广直流肇庆换流站噪声治理工程设计方案[R]. 北京: 北京绿创声学工程股份有限公司, 2006.

作者简介:

叶春燕(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电磁环境监测及治理工作。

(收稿日期: 2013-10-08)

电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响分析

张新伟¹ 李 波²

(1. 国网乌鲁木齐供电公司 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 国网荆州供电公司 湖北 荆州 434500)

摘 要: 随着兰新铁路电气化改造工程建设, 风资源丰富的新疆出现了电气化铁路牵引站与风电场集中接入电网的情况。综合考虑电铁牵引负荷的特点和风电场的功率特性, 通过理论推导从谐波和负序的角度分析了电铁牵引负荷对风电场的影响, 并且结合新疆电网实际, 在电力系统仿真分析软件 DigSILENT PowerFactory 中建立模型进行仿真分析, 深入研究了电铁牵引负荷在运行过程中对风电场运行特性的影响, 并对解决措施进行了探讨, 具有一定的实际意义。

关键词: 电铁牵引负荷; 谐波; 风电场; 瞬时功率

Abstract: With the construction of electrification reconstruction project of Lan - Xin Railway, the central integration of electrified railway traction substations and wind farms has appeared in Xinjiang. The characteristics of electrified railway traction load and the power features of wind farm are taken into account, and through the theoretical analysis, the influences of electrified railway traction load on operational characteristics of wind farms are analyzed as viewed from the harmonics and negative sequence. Combined with the actual situation of Xinjiang power grid, the equivalent model is established on the basis of power system simulation and analysis software DigSILENT PowerFactory. After the simulation and analysis, the impacts of electrified railway traction load on the operational characteristics of wind farms are studied and the solving measures are discussed, which is of practical significance.

Key words: electrified railway traction load; harmonic; wind farm; instantaneous power

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0071 - 05

0 引 言

随着越来越多的大型风电场并网运行, 在新疆部分地区的风电场周围伴随有铁路的穿越。电气化铁路在运输效率、节能环保等方面具有显著优势, 已成为现阶段铁路建设发展的主要方向。随着电气化改造工程建设, 大量的电气化铁路牵引站与风电场集中接入电网。电铁牵引负荷具有功率波动、谐波和负序特性, 对电网影响较大。而风电场的出力因风的不稳定性而波动较大, 风电机组单机容量相对较小, 风电场中有大量风电机组并列运行。现有的文献主要是针对电铁牵引负荷对电网的影响和风电场的运行特性分别进行研究, 针对新疆电网出现的电铁牵引负荷与风电场集中接入地区电网的情况, 对电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响进行分析研究具有重要的实际意义。

1 电铁牵引负荷的特点

特殊的驱动类型和供电方式造成了电铁牵引负

荷具有功率因数低、波动范围大、谐波含量丰富、负序电流大等特点。

(1) 随机波动性

与电力系统中的常规负荷相比, 电铁牵引负荷的特殊性表现在它的快速移动和频繁波动, 机车类型、运行状态、线路条件、载重量等一系列因素都会影响到电力机车的电流特性, 牵引电流从零到满载或者从满载到零的大范围变化往往发生在几秒钟内, 并且贯穿于整个运行过程。

(2) 谐波特性

目前中国大多使用交直型电力机车, 牵引电机所使用的直流电是基于桥式变流器整流得到的, 整个电流变换过程是一个非线性过程, 所以牵引电流中含有大量的谐波分量, 其中奇次谐波是特征分量, 偶次谐波是非特征分量。特征谐波分量以 3、5、7 次谐波为主, 其中 3 次谐波最大。电铁牵引负荷产生的谐波属于相位分布广泛且幅值波动大的三相不平衡谐波。

(3) 负序特性

同一个电铁牵引站的不同供电臂所接带负荷的

单相性和较小相关性决定了电铁牵引负荷的单相独立性,所以当电铁牵引负荷接入三相基本平衡的电力系统时会在电网中造成一定的负序分量,引起三相电压和电流的不平衡。

2 电铁牵引负荷的谐波对风电场的影响

2.1 电铁牵引负荷的谐波特性分析

电铁牵引负荷是电网中典型的不对称谐波源,在其运行过程中产生的不平衡谐波电流表现的特殊的序量规律。

在分析电铁牵引负荷产生的不平衡谐波时,基波电流的幅值分别用 $\bar{i}_{A1}$ 、 $\bar{i}_{B1}$ 、 $\bar{i}_{C1}$ 表示, h 次谐波电流的幅值分别用 $\bar{i}_{Ah}$ 、 $\bar{i}_{Bh}$ 、 $\bar{i}_{Ch}$ 表示, B、C 相谐波电流与 A 相谐波电流的幅值差分别用 $\Delta\bar{i}_{Bh}$ 、 $\Delta\bar{i}_{Ch}$ 表示,基波电流的初始相角分别用 φ_{A1} 、 φ_{B1} 、 φ_{C1} 表示, h 次谐波电流相对于基波电流的初始相角分别用 φ_{Ah} 、 φ_{Bh} 、 φ_{Ch} 表示。三相不平衡时 B、C 相谐波电流相对于三相平衡时 B、C 相谐波电流的相角差分别用 $\Delta\varphi_{Bh}$ 、 $\Delta\varphi_{Ch}$ 表示,时域下基波电流可以表示为式(1)。

$$\begin{cases} i_{A1}(t) = \bar{i}_{A1} \sin(\omega t + \varphi_{A1}) \\ i_{B1}(t) = (\bar{i}_{A1} + \Delta\bar{i}_{B1}) \sin(\omega t + \varphi_{A1} - 120^\circ + \Delta\varphi_{B1}) \\ i_{C1}(t) = (\bar{i}_{A1} + \Delta\bar{i}_{C1}) \sin(\omega t + \varphi_{A1} - 240^\circ + \Delta\varphi_{C1}) \end{cases} \quad (1)$$

那么,时域下 h 次谐波电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{Ah}(t) = \bar{i}_{Ah} \sin[h(\omega t + \varphi_{A1}) + \varphi_{Ah}] \\ i_{Bh}(t) = (\bar{i}_{Ah} + \Delta\bar{i}_{Bh}) \sin[h(\omega t + \varphi_{A1} - 120^\circ + \Delta\varphi_{B1}) + \varphi_{Ah} + \Delta\varphi_{Bh}] \\ i_{Ch}(t) = (\bar{i}_{Ah} + \Delta\bar{i}_{Ch}) \sin[h(\omega t + \varphi_{A1} - 240^\circ + \Delta\varphi_{C1}) + \varphi_{Ah} + \Delta\varphi_{Ch}] \end{cases} \quad (2)$$

各次谐波电流通过对称分量法可以分解为正序、负序、零序分量,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_+ \\ \bar{i}_- \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ah} \\ \bar{i}_{Bh} \\ \bar{i}_{Ch} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $a = e^{j120^\circ}$ 。

三相电流平衡时, $\Delta\bar{i}_{Bh} = \Delta\bar{i}_{Ch} = 0$, $\Delta\varphi_{Bh} = \Delta\varphi_{Ch} = 0$,通过式(2)、式(3)可以得出:当 $h = 3k +$

1,如 $h = 1, 4, 7, \dots$ 时,电流只有正序分量;当 $h = 3k - 1$,如 $h = 2, 5, 8, \dots$ 时,电流只有负序分量;当 $h = 3k$,如 $h = 3, 6, 9, \dots$ 时,电流只有零序分量。

三相电流不平衡时, $\Delta\bar{i}_{Bh}$ 、 $\Delta\bar{i}_{Ch} \neq 0$ 或 $\Delta\varphi_{Bh}$ 、 $\Delta\varphi_{Ch} \neq 0$,或者两者都满足 $\Delta\varphi_{B1}$ 、 $\Delta\varphi_{C1}$ 的值对谐波电流的序分量影响较大。由式(2)、式(3)计算得出:当 $\Delta\varphi_{B1} = \Delta\varphi_{C1} = \pm 5^\circ$ 时,3 次谐波电流中正、负序分量分别占到了 16% 和 14%,6 次谐波电流中正、负序分量分别占到了 33% 和 22%;当 $\Delta\varphi_{B1} = \Delta\varphi_{C1} = \pm 20^\circ$ 时,6 次谐波电流中只含正序分量。

通过以上分析,电铁牵引负荷在运行过程中注入电网的 $3h$ 次谐波电流会因基波电流相角偏差而含有正序和负序分量,甚至只含正序或者负序分量。因此,基波电流不对称时 $3h$ 次谐波电流将不受 Y/Δ 接线变压器的阻碍而在电网中任意流动。

2.2 电铁谐波对风电场的影响

风力发电不同于水电、火电等常规电源的显著特点是单机容量较小,为了充分利用能量密度较低的风能,风电场中通常有大量风电机组并列运行。

当电气化铁路牵引站与风电场集中接入地区电网时,电铁牵引负荷注入电网的三相不平衡谐波电流将会注入风电场,对变压器、电流变换装置、补偿装置、风电机组等电力设备造成影响。部分风电场投运的是恒速恒频风电机组,在风机出口处装设有补偿无功功率的电容器组,并且风机和补偿电容是同退同投的。风电场中投运风电机组(电容器组)的数量会因风速过大(超过切除风速)或者故障检修等不确定因素而随机变化,因此,风电场的等值阻抗会在一个较大的范围内变动,PCC 点处的谐振点分布范围较大,较容易引起谐波放大和谐振。

注入风电场的谐波电流会增加风电机组和变压器的损耗,加速绝缘老化,引起附加振动。对于安装恒速恒频风电机组的风电场,谐波电流的注入会增加补偿电容的介质损耗,降低其使用寿命。如果风电场内部发生了谐波电流放大或者谐振,风机出口处的补偿电容器组可能会因为过电流而跳闸甚至损坏,那么对应的风电机组也会退出运行,这样就会造成风电场输出有功功率的变化,加剧风电场出力的不确定性。

3 电铁牵引负荷的负序对风电场的影响

3.1 不平衡电压下风电机组的功率特性

在分析三相电压不平衡时风电机组输出的有功功率时,用 u_A 、 u_B 、 u_C 表示风机出口处三相电压瞬时值,用 i_A 、 i_B 、 i_C 表示风机出口处三相电流瞬时值,风电机组输出的有功功率瞬时值 P_s 可以表示为

$$P_s = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (4)$$

风电机组出口处的箱式变压器通常为 Δ/Y 接线,所以不考虑零序电流分量,利用派克变换将三相静止坐标系下的 A、B、C 三相分量变换到同步旋转坐标系下的 d 、 q 、0 三个分量,式(4)可以写出如下形式。

$$P_s = u_d i_d + u_q i_q \quad (5)$$

利用对称分量法将三相不平衡时电压和电流矢量分解为正序和负序分量,用 ω 表示同步电角速度, φ_0 表示正序初始旋转角和负序初始旋转角的差值,那么同步旋转坐标系下电压电流分量如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_d = u_d^+ + u_d^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + u_q^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ u_q = u_q^+ + u_q^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad - u_d^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ i_d = i_d^+ + i_d^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + i_q^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ i_q = i_q^+ + i_q^- \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad - i_d^- \sin(2\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

瞬时功率如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_s = P_0 + P_{C2} \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ \quad + P_{S2} \sin(2\omega t + \varphi_0) \\ P_0 = u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+ + u_d^- i_d^- + u_q^- i_q^- \\ P_{C2} = u_d^- i_d^+ + u_q^- i_q^+ + u_d^+ i_d^- + u_q^+ i_q^- \\ P_{S2} = u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+ - u_q^+ i_d^- = u_d^+ i_q^- \end{cases} \quad (7)$$

令 $\frac{P_{C2}}{\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}} = \sin\theta$, $\frac{P_{S2}}{\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}} = \cos\theta$, 那么风

电机组的瞬时功率可以表示为

$$P_s = P_0 + \sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2} \sin(2\omega t + \varphi_0 + \theta) \quad (8)$$

由式(8)可以看出:不平衡电压下风电机组输出的有功功率包括恒定功率分量 P_0 和额定频率两倍的波动功率分量 $\sqrt{P_{C2}^2 + P_{S2}^2}$ 。通过对同步旋转坐标系中风电机组的数学模型的推导和分析可以得出风电机组的无功功率也包含二倍频的波动分量。

3.2 负序对风电场的影响

电铁牵引负荷具有单相独立性,其注入电网的负序电流大小与两供电臂的电流幅值及两供电臂功率因数角之差相关。负序电流注入风电场后将造成箱式变压器和风电场升压站主变压器的局部过热,损坏绝缘,导致风电机组的附加发热和振动,继电保护装置误动作,使风电机组输出的有功功率具有 100 Hz 的波动分量。由于电铁牵引负荷的取流特性多变,风电场的输出功率也是随机变化的,这两种不确定因素会造成风电场输出的瞬时功率波动幅值频繁变化,这势必会加剧电网的电压波动和闪变等电能质量问题。

4 仿真分析

4.1 仿真模型及参数

以兰新铁路红柳河至阿拉山口段电气化改造工程建设中,MGT 牵引站、DBS 牵引站与 ALSK 风电场、WLDBS 风电场通过 220 kV ALSK 变电站集中接入新疆电网为例,地区电网接线如图 1 所示。

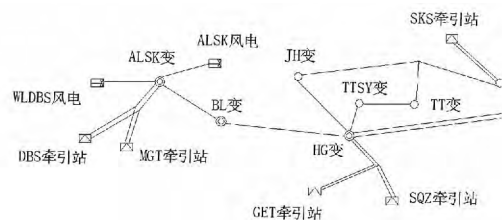


图 1 地区电网接线图

电气化铁路牵引站和风电场均是 110 kV 接入。ALSK 风电场和 WLDBS 风电场各装设了 66 台单机容量 750 kW 的恒速恒频风电机组,两个风电场的装机容量均为 49.5 MW,升压站的主变压器均为 $Y_n - d11$ 接线形式。MGT 牵引站和 DBS 牵引站的供电区段均运行的是韶山 7 型电力机车。在进行仿真分析时以各供电臂电力机车全开考虑。在电力系统仿真分析软件 DIgSILENT PowerFactory 中搭建仿真模型,基于不平衡潮流进行谐波潮流计算和瞬时功率时域仿真,分析了电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响。

4.2 谐波影响仿真分析

1) 风电机组投运数量不变,谐波相角变化

当两个风电场均满发,即 66 台风电机组全部投运,电铁牵引负荷注入电网的 3 次谐波电流相角与基波电流相角差 $(\varphi_{A3} - \varphi_{A1}, \varphi_{B3} - \varphi_{B1}, \varphi_{C3} - \varphi_{C1})$

变化时,风电场汇流母线处各次谐波电流值如图 2、图 3、图 4 所示。

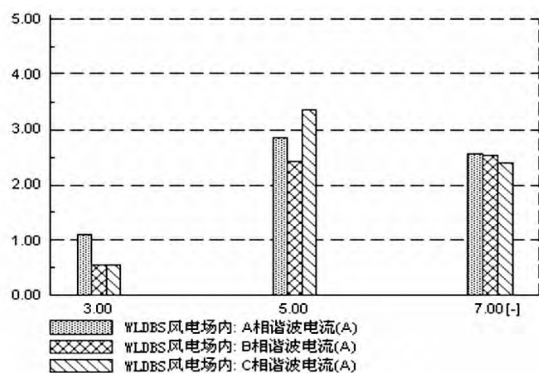


图 2 $\Delta\varphi_{A3}=5^\circ, \Delta\varphi_{B3}=5^\circ, \Delta\varphi_{C3}=5^\circ$ 时
风电场的谐波电流

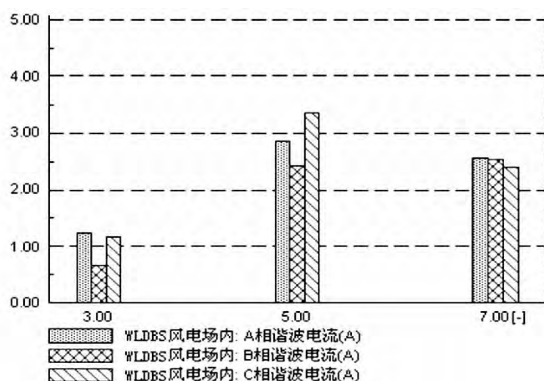


图 3 $\Delta\varphi_{A3}=10^\circ, \Delta\varphi_{B3}=20^\circ, \Delta\varphi_{C3}=30^\circ$ 时
风电场的谐波电流

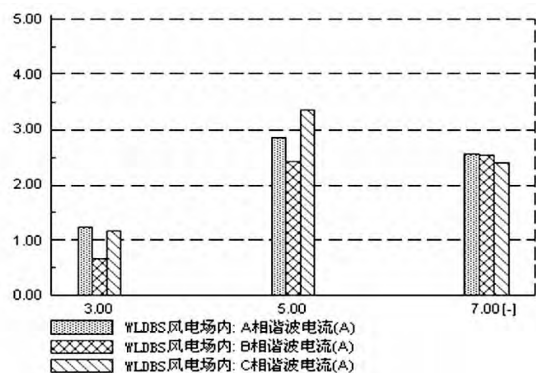


图 4 $\Delta\varphi_{A3}=10^\circ, \Delta\varphi_{B3}=30^\circ, \Delta\varphi_{C3}=50^\circ$ 时
风电场的谐波电流

通过对图 2、图 3、图 4 的对比分析可得:风电场汇流母线处 3 次谐波电流的大小会随着 3 次谐波相角与基波相角差值的变化而变化,不受风电场升压站主变压器接线形式的影响。

2) 谐波电流不变,风电机组投运数量变化

当电铁牵引负荷注入电网的谐波电流幅值和相位不变,两个风电场各投运 66 台、33 台、15 台风电机组时,风电场汇流母线处的各次谐波电流值如图

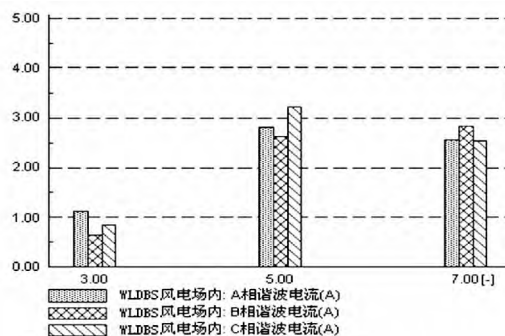


图 5 风电场投运 66 台机组时谐波电流

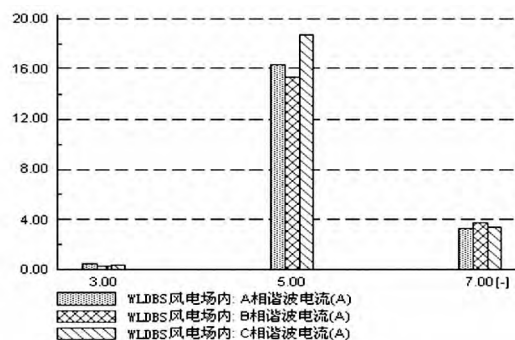


图 6 风电场投运 33 台机组时谐波电流



图 7 风电场投运 15 台机组时谐波电流

通过对图 5、图 6、图 7 的对比分析可得:当风电场满发时,风电场汇流母线处的各次谐波电流值相对较小;当风电场各投运 33 台风电机组时,两风电场内 5 次谐波被放大;当风电场各投运 15 台风电机组时,WLDBS 风电场内 7 次谐波被放大。

研究表明:电铁牵引负荷在运行过程中产生的三相不平衡 3h 次谐波的相位偏差不同时,由于谐波电流中序分量的不同而使得注入风电场中的 3h 次谐波含量也不同;随着风电场中投运恒速恒频率风电机组数量的变化有可能引起风电场内部的谐波放大或者谐振。

4.3 负序影响仿真分析

当 BYH 风电场有功出力 33.75 MW,CH 风电场有功出力为 49.5 MW,电铁牵引站接带与电力机

车等功率的三相平衡负荷时两个风电场的输出功率瞬时值如图 8 所示, 电铁牵引站接带的电力机车在行驶和启动过程中两个风电场的输出功率瞬时值如图 9、图 10 所示。

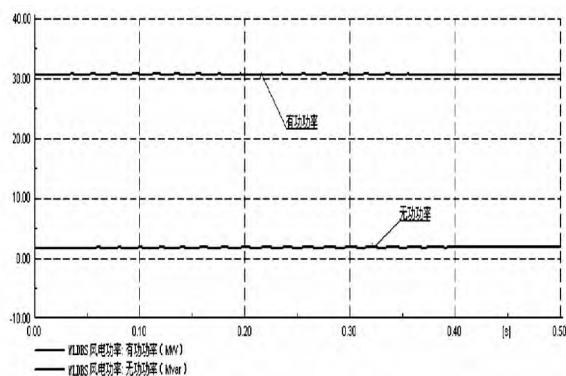


图 8 三相平衡负荷接入后风电场的输出功率

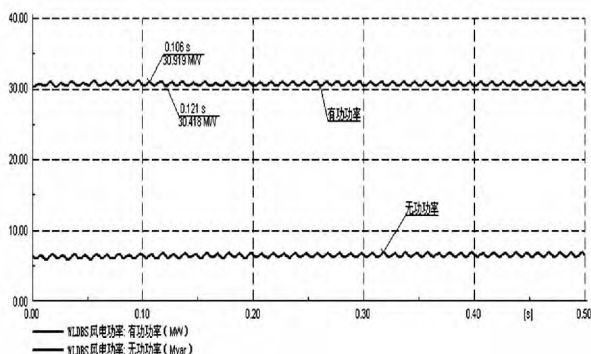


图 9 电铁牵引负荷行驶过程中风电场的输出功率

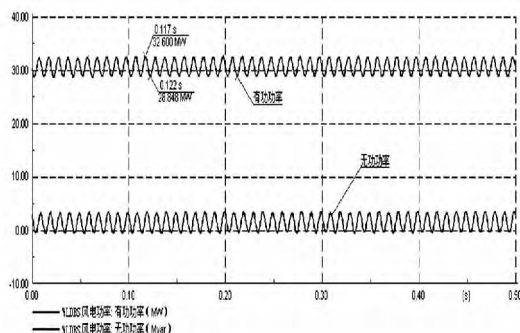


图 10 电铁牵引负荷启动时风电场的输出功率

通过对图 8、图 9 的对比分析可得: 当电铁牵引负荷与风电场集中接入地区电网后, 负序电流引起的三相电压不平衡将会造成风电场的瞬时有功功率和瞬时无功功率以 100 Hz 的频率波动。通过对图 9、图 10 的对比分析可得: 牵引功率越大时风电场输出功率的波动幅值就越大, 风电场的输出功率越大时功率波动也越大。

研究表明: 电铁牵引负荷在运行过程中引起的电压不平衡将造成风电机组的输出功率包含频率为 100 Hz 的波动分量, 波动幅值与电铁牵引负荷

的取流及风电场的输出功率呈正相关的关系。

5 结 论

针对电气化铁路牵引站与风电场集中接入新疆电网的情况, 通过理论推导和仿真分析相结合的方法, 深入研究了电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响, 结果表明电铁牵引负荷在运行过程中产生的谐波、负序电流等将对风电场的输出功率产生较大影响。

针对电铁牵引负荷的谐波对风电场的影响, 一方面, 可以采用谐波含量相对较少的交直交型电力机车; 另一方面, 对于规划待建的风电场, 最好安装单机容量较大并且可以实现有功功率和无功功率解耦控制的双馈异步风电机组或者直驱永磁同步风电机组, 减小风电场中谐波放大或者谐振的概率。针对电铁牵引负荷负序对风电场的影响, 一方面可以综合考虑经济、技术等因素在集中接入点装设具有分相控制能力的 SVC 动态无功补偿装置; 另一方面, 可以采用抗扰能力相对较强的风电机组或者选择其他的接入点, 尽量避免电铁牵引站和风电场集中接入电网。

参考文献

- [1] 吴帆. 基于实测数据的牵引变电所运行特性仿真及评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [2] 顾文. 电气化铁路对徐州电网的影响[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [3] 贺建闽, 黄治清. 电力用户谐波测量与评估[J]. 供用电, 2002, 13(6): 134-140.
- [4] 聂静静, 吴文宣. 高速电气化铁路谐波的仿真计算与分析[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(1): 8-11.
- [5] 杨晓萍, 段先锋. 直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 7-12.
- [6] 胡家兵, 贺益康. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 47-56.
- [7] 陈宁, 朱凌志. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-108.

作者简介:

张新伟(1986), 主要从事电网稳定分析和电网电价方面的研究工作;

李波(1973), 主要从事电网调度控制工作以及电网输配电价方面的研究工作。(收稿日期: 2013-08-12)

超导储能装置应用于风电场平滑功率输出的研究

闫广新¹, 王 凯²

(1. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 新疆风电工程设计咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要: 建立了风电机组和超导储能 (superconducting magnetic energy storage, SMES) 装置的数学模型以研究 SMES 对并网风电场运行稳定性的改善。针对风电系统中经常出现的联络线短路故障和风电场的风速扰动, 提出利用 SMES 安装点的电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号的策略。并搭建了风电场接入电网后的仿真模型, 对实例系统进行的仿真计算结果表明, SMES 采用该控制策略, 不仅可以在网络故障后有效地提高风电场的稳定性, 而且能够在快速的风速扰动下平滑风电场的功率输出, 降低风电场对电网的冲击。

关键词: 风力发电系统; 电力系统稳定; 超导储能 (SMES)

Abstract: The mathematic models for wind power generator and superconducting magnetic energy storage (SMES) unit are set up, and the function of SMES in improving the operation performance of wind farms is then studied. According to the short-circuit fault in the grid and wind disturbance of the wind farms often occurred, a new strategy using voltage deviation of SMES connection point as control signal of the active power controller of SMES unit is presented. A simulation model of the power system connected with wind farm is established. The simulation results show that with the designed controller, SMES can not only improve the transient stability of wind power system after the short circuit of the grid, but also effectively smooth the output of wind farm and reduce the impulsion to power system during the fast wind disturbance.

Key words: wind power system; power system stability; superconducting magnetic energy storage (SMES)

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0076-05

0 引 言

开发利用新能源和可再生能源是解决中国能源和环境问题的重要措施之一, 风电是可再生能源的重要组成部分。风力发电作为目前世界上可再生能源开发利用中技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一, 由于其在减轻环境污染、调整能源结构、解决偏远地区居民用电问题等方面的突出作用, 越来越受到世界各国的重视并得到了广泛的开发和利用^[1]。目前, 在中国越来越多的大中型风电场相继建成并投入运行。截止 2012 年年底, 全国风电并网总量达到 60 830 MW, 发电量达到 100 400 GWh, 风电已超过核电成为继煤电和水电之后的第 3 大主力电源。由于自然风资源不稳定的特点, 风电功率的波动性和间歇性会对局部电网电压的稳定性和电能质量产生影响。另外, 众多大型风电场多位于电网结构薄弱环节, 需通过一定的措施改善风电场的运行性能。为了更加充分地利用可

开发的风能资源, 提高风力发电的比例, 除了合理地进行规划设计外, 有必要探讨改善风电场运行性能的有效措施, 降低风电对电网的影响。

超导磁储能 (superconducting magnetic energy storage, SMES) 具备快速的功率吞吐和灵活的四象限调节能力, 在维持电网稳定、提高输电能力和改善电能质量方面发挥了极其重要的作用。将超导磁储能用于风力发电系统, 是一种理想的提高风电系统动态性能和解决系统稳定性的手段。

下面建立了风电机组、风电场和 SMES 数学模型, 并针对某风电场通过 MATLAB/Simulink 进行了仿真, 研究 SMES 对并网风电场运行稳定性的改善, 对实例系统的仿真研究表明, SMES 在改善风电场稳定性方面具有优良的性能。

1 风电机组的模型

根据风力发电系统的特性, 风电机组数学模型主要环节包括: 风能的吸收和转换装置——风机; 起

连接作用的中间环节——轮毂、齿轮箱、联轴器；机械能到电能的转换装置——发电机，如图 1 所示，图中 E 为异步发电机的内电势， ω 为转子转速^[1]。

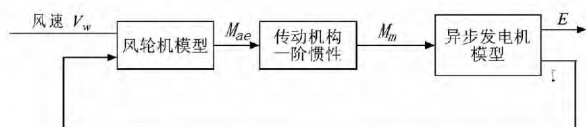


图 1 简化风电机组模型框图

各部分数学模型如下。

(1) 风轮机模型

$$M_m = 0.5\pi\rho C_p \frac{V_w^2 R^3 \Omega_N}{\lambda P_N} \times 10^{-3} \quad (1)$$

其中 M_m 为风机叶片产生的转矩； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； V_w 为作用于风轮机的风速， m/s ； R 为风轮机半径， m ； λ 是叶尖速比； C_p 为风能利用系数（即在单位时间内风轮所吸收的风能与通过风轮旋转面的全部风能之比）； Ω_N 是风轮机的额定机械角速度， Rad/s ； P_N 是风轮机额定功率， MW ^[2]。

(2) 传动机构模型

忽略损耗和传动轴的柔性，传动部分可用一阶惯性环节模拟为

$$\frac{dM_T}{dt} = \frac{1}{T_h} (M_m - M_T) \quad (2)$$

式中 M_T 为轮毂输出转矩， p.u. ； T_h 为轮毂惯性时间常数， s ^[3]。

(3) 异步发电机组模型

异步发电机采用忽略定子绕组暂态的机电暂态模型，如式(3)^[2,3]。

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_E - M_T) \\ T'_{d0} \frac{dE'}{dt} = -E' - j(x - x')I - j2\pi f_0 T'_{d0} E'_s \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_j 为转子惯性时间常数， s ； s 为发电机转差率 $s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0}$ ； $x = x_1 + x_m$ ， x_1 为定子漏抗， x_m 为激磁电抗； $x' = x_1 + \frac{x_2 x_m}{x_2 + x_m}$ 为发电机的暂态电抗； x_2 为转子漏抗； r_2 为转子绕组电阻； E' 为发电机的暂态电势； I 为发电机定子电流； $T'_{d0} = \frac{x_2 + x_m}{r_2}$ 为定子开路时转子回路的时间常数^[4]。

(4) 异步发电机的电磁转矩

发电机电磁转矩方程为

$$M_e = \text{Re}(EI^*) \quad (4)$$

为简化计算，在系统仿真分析时，风电场采用如下等值的原则。

①额定容量相等。等效额定容量 s_Σ 是所有风电机组额定容量之和， p_i 是第 i 台风电机组的额定容量。即

$$s_\Sigma = \sum_{i=1}^n s_i \quad (5)$$

②注入电网的功率相等。 p_Σ 是所有风电机组注入功率之和， p_i 是第 i 台风电机组的注入功率，即^[5]

$$p_\Sigma = \sum_{i=1}^n p_i \quad (6)$$

2 SMES 数学模型和控制策略

2.1 SMES 的工作原理

由于超导体的超导电性，电能可以电磁能的形式无损耗地存储于磁体当中。当系统处于工作状态时，超导磁体通过功率变换电路将磁体电流转换为换流器的直流支撑电压。图 2 所示是一种串联电压型 SMES 系统原理，主要针对电压敏感负荷，基本功能为对非正常电压进行动态补偿，以满足敏感负荷对电压质量的要求。

超导储能用换流器与普通逆变电路不同，简言之，换流器连接储能单元与电网，工作环境复杂，功率双向流动，对开关电路要求较高；通用逆变器作为电源设备，服务对象一般为用户负载，工作环境单一。所以，换流器必须具备电压等级较高、开关谐波含量少以及结构灵活易于维护等特点。

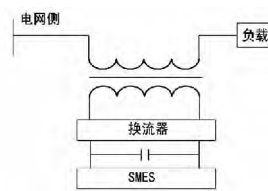


图 2 SMES 系统原理图

2.2 SMES 的数学模型

采用 SMES 的风力发电系统如图 3 所示，SMES 单元接在风力发电机母线上，用来改善系统动态特性。以下介绍 SMES 调节原理，并建立 SMES 模型。

超导储能单元是柔性交流输电技术中的一种，由一个超导线圈（super conducting coil）、一个强制换向变流器（forced-commuted converter）、一个控制

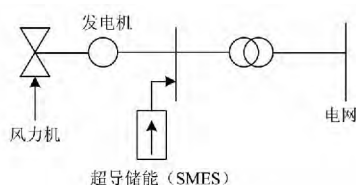


图 3 采用 SMES 的风力发电系统

器 (controller) 组成。强制换向变换器是基于晶闸管的半导体开关,可工作于逆变器状态和整流器状态,使 SMES 单元在相应的状态下发出或吸收有功功率和无功功率。具有了这种功能的 SMES 单元可被看作是一个由有功和无功控制器控制幅值和相位的可控电流源^[4,5]。

考虑到 SMES 是一种并联补偿装置,可以等效为一个可控的电流源,因此它的直流系统与交流电网的连接环节采用电流源型换流桥。为充分发挥 SMES 的有功无功的综合调节能力,采用双桥结构换流装置和不等触发角的控制方式,分别控制两个换流桥的触发角来控制直流电压的大小以及交流侧电压与电流的相角差,从而控制超导线圈的充放电以及与系统交换的无功功率。

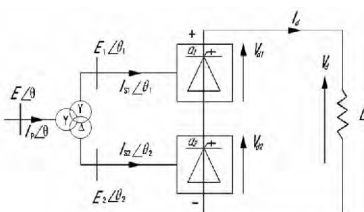


图 4 双桥 SMES 与交流系统的连接示意图

忽略变压器的损耗和换弧电抗,SMES 的数学模型如式 (7)。

$$\begin{cases} V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \\ I_{s1} = I_{s2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \\ \theta_1 = \varphi_1 - \alpha_1 \\ \theta_2 = \varphi_2 - \alpha_2 \\ I_p \angle \theta = I_{s1} \angle \theta_1 + I_{s2} \angle \theta_2 \\ \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} V_d \end{cases} \quad (7)$$

其中, V_d 、 I_d 分别为超导线圈上的直流电压和电流; α_1 、 α_2 为两个换流桥的触发角; V_{d1} 、 V_{d2} 为两换流桥直流侧的电压; I_{s1} 、 θ_1 、 I_{s2} 、 θ_2 分别为两换流桥交流侧电流的幅值与相角; E_1 、 φ_1 、 E_2 、 φ_2 为换流桥交流侧电压的幅值与相角; E 、 φ 、 I_p 、 θ 是 SMES 与系统连接

点的节点电压和注入电流的幅值与相角。

2.3 SMES 的控制方式

并网风电场中严重扰动主要有系统的短路故障和阵风的扰动。为更好地模拟这两种扰动形式,需要选择 SMES 的安装地点和控制信号。风电场一般都由大量的分散分布的风电机组构成,在每台风电机组出口安装 SMES 装置势必增加系统的维护量,降低可靠性和经济性。因此选择 SMES 的安装地点为风电场升压站的低压侧,对风电场进行集中控制和调节。

异步发电机本身没有励磁装置,在输出有功功率的同时要从电网吸收大量的无功功率。随着风电场出力的增加,异步发电机吸收的无功功率也相应增加,机端电压随有功出力的增加而降低,电压的变化反映了风电场有功出力的变化。因此,选取电压偏差作为有功控制器的控制信号,对 SMES 应当补偿的有功功率进行调节。当风速变化使风电场出力增加时,风电场端电压降低 ($\Delta U < 0$),为了平滑风电场的输出,应控制 SMES 装置吸收一定的有功功率,超导线圈充电,反之,应控制超导线圈放电,这与网络短路故障时提高稳定性防止风轮机失速的控制规律是一致的。由此可见,通过采用电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号,能够充分发挥 SMES 有功无功综合调节的能力,使其既能满足提高暂态稳定性的要求又能够在风速扰动时降低风电场对电网的冲击。

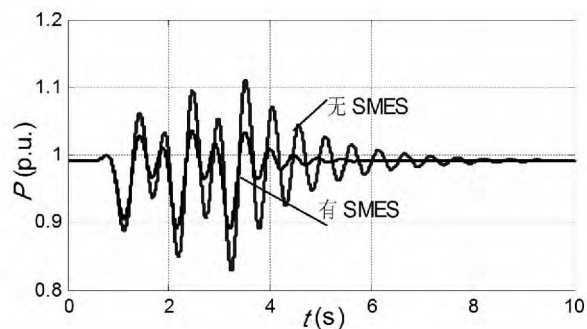
附加控制器: 将反映超导线圈电流的信号 $\Delta\omega/\Delta P$ 作为负反馈,送入有功控制器作为辅助控制可以加快超导线圈的电流恢复过程。

对于双桥系统,SMES 与交流系统交换的功率满足

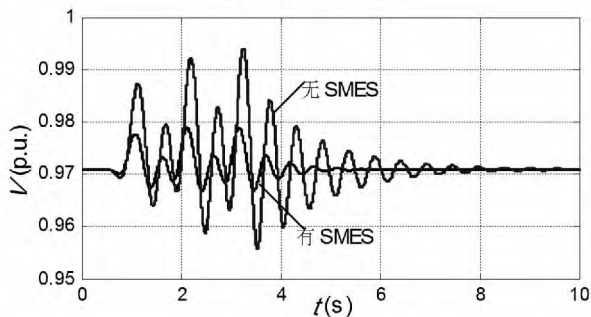
$$\begin{cases} P_{SEMS} = V_{d0} I_d (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \\ Q_{SEMS} = V_{d0} I_d (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E$ 为理想空载情况下的单桥最大直流电压。

因为有两个控制信号 α_1 和 α_2 ,所有可以实现对 P_{SEMS} 、 Q_{SEMS} 的独立控制; SMES 有很快的响应速度,采用带有一阶惯性环节的比例控制已经就有很好的效果。有功和无功功率综合控制的思路是: 首先由控制信号 $\Delta\omega/\Delta P$ 和 ΔU 分别通过控制器产生期望控制功率 P_{SEMS}^* 和 Q_{SEMS}^* ,然后再经过对 SMES 容量限制的处理后得到实际能够补偿的有功 P^* 和无功 Q^* 。超导线圈电流 I_d 作为负反馈送入

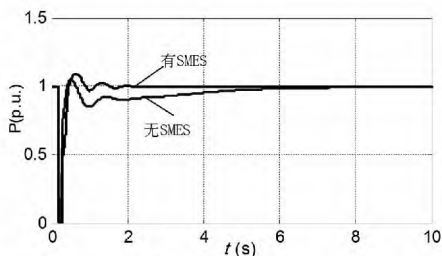


(a) 线路(11-10) 有功功率

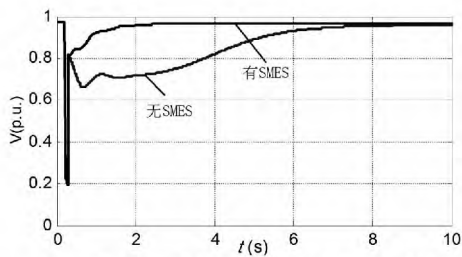


(b) 节点 11 电压

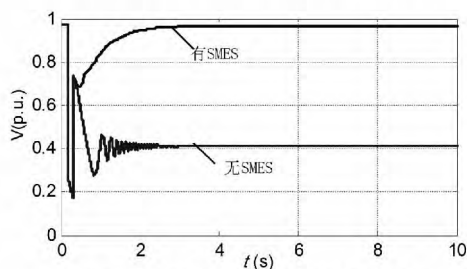
图 7 阵风情况下风电场的电压和有功曲线



(a) 线路(11-10)有功功率(0.2 s 故障,0.28 s 切除)



(b) 节点 11 电压(0.2 s 故障,0.28 s 切除)



(c) 节点 11 电压(0.2 s 故障,0.32 s 切除)

图 8 短路故障后风电场出口电压和有功变化曲线
压很快失稳,而安装 SMES 装置可以使系统的电压

很快恢复。

以上的分析和仿真结果表明,通过采用合适的控制策略,使用超导储能装置不仅可以在网络故障后有效地提高风电场的稳定性,而且能够在快速的风速扰动下平滑风电场的输出,降低风电波动对电网的冲击。

4 结 论

针对并网风电场的功率波动对电网造成的影响,提出了 SMES 应用于风电场的控制方式,并进行了在阵风 and 三相短路故障两种情况下并网风电场的仿真研究。仿真结果表明,加装 SMES 的并网型风电场具有良好的动态性能,不仅能很好地吸收风电场输出有功功率的波动成分,有效平滑注入电网的有功功率,同时,SMES 也起到了抑制电网电压波动的作用。分析表明,通过合理选择 SMES 的控制方式,采用具有较小储能量的 SMES 就能够降低并网风电场在阵风扰动时对电网的影响,有效提高网络故障后风电场的稳定性。

参考文献

- [1] 吴学光,张学成,印永华,等.异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J].电网技术,1998,22(6):68-72.
- [2] 李先允,陈小虎,唐国庆.大型风力发电场等值建模研究综述[J].华北电力大学学报,2006,33(1):42-46.
- [3] 郑丽,马维新,李立春.超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J].清华大学学报,2001,41(3):73-76.
- [4] Tripathy S C. Dynamic Simulation of Hybrid Wind Diesel Power Generation System with Superconducting Magnetic Energy Storage [J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(9):919-930.
- [5] 吴俊玲,吴畏,周双喜.超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J].电工电能新技术,2004,7(3):59-63.
- [6] Anca D., Poul S., Frede B. Dynamic Modelling of Wind Farm Grid Interaction [J]. Wind Engineering, 2002, 26(4):191-208.
- [7] Akhmatov V., Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations Importance of Windmill Mechanical System [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9):709-717.

作者简介:

闫广新(1981),硕士毕业,工程师,从事电力系统设计工作;

王 凯(1985),助理工程师,从事风电工程设计工作。

(收稿日期:2013-07-23)

基于积分器零漂的罗氏线圈电流互感器稳态采样误差

郭又华

(国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要: 由某运行的智能化变电站罗氏线圈电流互感器稳态采样值出现较大的直流误差的现象出发, 介绍了罗氏线圈电流互感器积分电路的基本原理和零漂引起积分漂移的机理, 推导了有损积分器的传递函数, 分析得出因积分器电路参数取值不当造成过大直流分量。在对积分电路参数进行调整后, 罗氏线圈电流互感器幅值误差和相角误差达到相关规范要求。

关键词: 罗氏线圈; 电流互感器; 积分器; 采样误差

Abstract: According to the relatively large DC error occurred in steady-state sampling value of Rogowski coil current transformer in a running smart substation, the basic principle of integrator circuit of Rogowski coil current transformer and the mechanism of integral drift caused by zero drift are introduced, the transfer function of lossy integrator is derived. It is obtained that the excessive DC component is caused by the improper value of the feedback resistance through the analysis. After adjusting the parameters of integrator circuit, the amplitude error and phase angle error of Rogowski coil current transformer meet the requirements of the relative regulations.

Key words: Rogowski coil; current transformer; integrator; sampling error

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0081-03

0 引言

电子式互感器与传统互感器相比, 在绝缘性能、动态范围、抗干扰能力、抗饱和能力、体积、价格等诸多方面具有较大的优势^[1], 受到研究人员的广泛关注。按其构成原理不同, 分为无源式与有源式。无源式电子电流互感器利用法拉第(Faraday) 磁光效应感应被测信号, 又称为磁光式互感器(MOTA); 有源式电子互感器利用电磁感应等原理感应被测信号, 对于电压互感器采用电阻、电容或电感分压等方式, 对于电流互感器采用罗氏(Rogowski) 线圈^[1-2]。

基于罗氏线圈的电子式电流互感器凭借其原理上的优势正在逐渐推广应用, 同时也出现一些新的问题。在某运行的智能化变电站, 主变压器低压侧保护用电流采集器上送波形显示: 主变压器空载时波形呈现一定的直流分量, 且双采样通道直流分量大小不一致, 最大瞬时值不超过额定电流的 4%; 在负荷状态下, 负荷分量叠加直流分量, 使波形发生偏移。采样值误差已威胁到主变压器的安全运行, 不得不停电检查。针对出现的稳态电流采样误差问题, 这里从罗氏线圈电流互感器工作原理、积分电路

参数选取的角度进行了讨论, 得出了积分器参数不合理导致积分漂移, 采样误差过大的结论。经过调整积分器电路参数解决了直流误差超标的现象, 为分析类似问题提供了一条新思路。

1 罗氏线圈互感器积分电路

为了方便论述, 还是需要简要介绍一下罗氏线圈互感器的工作原理。罗氏线圈是将导线均匀绕制在非磁性环形骨架上的空心线圈, 根据安培环路定律和电磁感应定律, 被测电流产生的磁场在线圈两端感应的电动势(罗氏线圈输出电压) 正比于被测电流对时间的微分。因此罗氏线圈输出电压必须经过积分变换才能还原被测电流的值。

$$i(t) = -\frac{1}{M} \int_0^t E(t) dt \quad (1)$$

式中 $E(t)$ 为罗氏线圈输出电压; $i(t)$ 为被测电流; M 为线圈与载流导线之间互感^[3-6]。

由于偏置电压是运算放大器的固有特性, 理想积分器很容易就达到饱和至电源电压而起不到积分效果。为解决该问题, 实际应用时最简单的办法是

在积分电容两端并联一负反馈电阻,构建 RC 耗能回路,这种积分器即有损积分器^[7]。本案中使用的有损积分器电路和参数如图 1 所示。

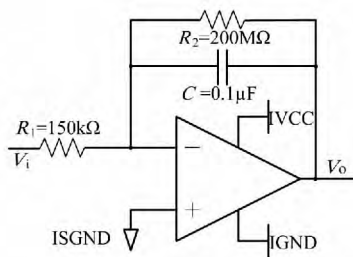


图 1 有损积分器电路和参数

由于构成积分器的实际元器件都不是理想元件,运放的偏移、电容的泄漏与损耗、运放及其他模拟器件的时漂和温漂造成 Q 点发生偏移等因素都会使积分器的输出产生漂移。表现为当输入电压为零时,输出电压偏离零值附近,即所谓零漂。

积分零漂是不可能完全消除的,但是可以通过一些方法减小零漂。包括从选材出发,选用温度稳定性高的电容元件、失调电压和失调电流较小的精密运放,采用技术手段在输入端对失调进行补偿或调零^[8-9],采用数字处理算法如 Hilbert 变换消除直流零漂^[10]。除此之外,加大积分时间常数可以减小零漂^[11]。可见对于已经定型的技术方案,合理配置积分器参数是减小零漂简单、有效的手段。

同模拟积分器相比,数字积分器中的模数转换器和运放驱动电路等模拟电路结构简单稳定,受温漂、时漂影响小,实现其积分器功能的算法则完全不受环境因素影响,具有一致性,并可以针对模拟电路的漂移进行有效的补偿。但由于本案采用的是硬件积分方案,因此数字积分器的优劣并不是这里需要论述的重点。

2 有损积分器的传递函数

如图 1 所示,根据放大器的“两虚”原则 $V_- = V_+ = 0$,流入放大器的电流等于零,则流过 R_1 的电流等于流过电容 C 和反馈电阻 R_2 的电流,所以

$$\begin{aligned} (\dot{V}_i - V_-)/R_1 &= (V_- - \dot{V}_0)/\left[\left(R_2/sC\right) \parallel \left(R_2 + \frac{1}{sC}\right)\right] \\ &= (V_- - \dot{V}_0)/[R_2/(1 + sCR_2)] \end{aligned}$$

则有

$$\dot{V}_i/R_1 = -\dot{V}_0/[R_2/(1 + sCR_2)] \quad (2)$$

于是有损积分器 s 域传递函数为

$$H(s) = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_0} = -\frac{R_2/R_1}{1 + sCR_2} \quad (3)$$

其频域传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{R_2/R_1}{1 + j\omega CR_2} = \frac{1}{R_1/R_2 + j\omega CR_1} \quad (4)$$

其幅频特性可写成为

$$|H(\Omega)| = H_0 \cdot \frac{\Omega_0}{\sqrt{\Omega^2 + \Omega_0^2}} \quad (5)$$

由此相频特性写成为

$$\Phi(\Omega) = \arctan(\Omega/\Omega_0) \quad (6)$$

式(5)、(6)两式中 $\Omega = 2\pi f$ 为输入电压的角频率, $\Omega_0 = 1/(R_2C)$, $H_0 = R_2/R_1$,式(4)中令 $\omega = 0$,故有损积分器对直流分量的增益为

$$H(0) = R_2/R_1 \quad (7)$$

而由于 R_1 远小于 R_2 (R_2 通常为兆欧级),则式(4)中 $R_1/R_2 \approx 0$,可将有损积分器传递函数简化为

$$H(\Omega) = \frac{1}{2\pi f CR_1} \quad (8)$$

若 f 为交流信号基波频率,则式(8)即为有损积分器对交流基波分量的增益。

3 误差分析

在罗氏线圈电流互感器运行一段时间后,由于模拟电路元件老化和温度的变化,积分器的失调电压也随之改变,且各运放的失调电压并不一致,且运放对交流和直流信号的传递函数是不一样的,这就导致运行一段时间后发生采样误差超标的现象。

国标 GB/T 20840.8-2007 要求保护用电子式电流互感器一次端子通过额定准确限值一次电流时,比差不超过百分之一,角差不超过 $60'$ 。

将图 1 所示积分器电路参数 R_1 、 R_2 代入式(7),可得出该有损积分器直流分量增益约为 1333。另将 C 与 R_1 代入式(8), f 取基波频率 50 Hz,可求出交流基波增益约等于 0.212。

对比直流增益和交流增益可见,积分器对直流分量太敏感,致使元件温漂通过积分器后,产生了非常大的直流增益,从而导致空载时最大出现 0.4In 左右的直流零漂。负荷状态下,采集器输出波形在正常稳态电流的基础上叠加了该直流分量,出现较大的采样误差。但因交流增益很小,只在波形上表

现出来很小的背景噪声。

处理零漂过大简单的方法就是通过适当降低反馈电阻 R_2 的值,减小积分器对直流分量的增益。将 R_2 从 200 M Ω 降低为 2 M Ω ,其增益缩小 100 倍,零飘幅值下降到 0.004In 以下。由式(4)可知,参数 R_2 调整后对交流基波增益的影响基本可以忽略。

又将 $C=0.1 \mu\text{F}$ 、 $R_2=2 \text{ M}\Omega$,基波频率 f 取 50 M Ω ,带入式(6),计算得出基波相位为 89.09°。尽管依然满足国标,但角差已接近上限。考虑到互感器的综合误差可能大于单纯由积分器造成的角差,因此应适当调整电容的取值。现取 $C=1 \mu\text{F}$,计算得出的相位为 89.91°,角差小于 6'。

按照新参数更换插件的电容、电阻元件后,实测结果满足要求。但是需要指出,模拟积分器的参数决定着其本身的性能。适当提高积分器的反馈电阻或者积分电容的参数可以改善积分器暂态响应性能。减少 R_2 是以降低积分器暂态响应特性为代价的。当参数配置不当,当系统故障时,可能对暂态电流的采样值带来更大的误差,暂态输出波形将严重失真,因此不能一味盲目降低 R_2 [5]。

4 结 论

罗氏线圈电流互感器相对于传统的电磁式互感器具有很多富有吸引力的优点,因此是技术发展的方向。但由于运算放大电路的固有特性,模拟积分器零漂是不可避免的,必需妥善应对处理,否则将影响采样的精度。

合理配置积分器参数是降低采样值零漂简单有效的方法之一。采用罗氏线圈配合具有良好参数的模拟积分器,不但在测量稳态电流时具有较高的精度,而且能比较真实地反映故障电流的暂态过程。

通过案例分析,发现并处理了某智能化变电站因罗氏线圈电流互感器积分器模拟电路参数选择不

当引起的稳态电流采样误差超标的问题,为分析处理使用电子式电流互感器的采样误差问题提供了一个可供参考的新思路。

参考文献

- [1] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 94-98.
- [2] 姚翔,潘贞纯,高厚磊,等. 数字化变电站中电子互感器的应用现状研究[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会,北京: 中国农业大学, 2008: 1175-1178.
- [3] 龚勇镇. 罗氏线圈电流传感检测技术研究概况[J]. 广西轻工业, 2011(2): 54-56.
- [4] 毛安澜,叶国雄,吴士普, Rogowski 结构电子式电流互感器复合误差的检测方法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 30-35, 44.
- [5] 谢彬,尹项根,张哲. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 45-50, 86.
- [6] 谢完成,戴瑜兴. 罗氏线圈电子式电流互感器的积分技术研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 10-13.
- [7] 郭乐,申狄秋,卢家力. 电子式互感器积分方案的比较研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 38(18): 111-114.
- [8] 胡思明. 一种减小积分零漂的方法[J]. 电子技术, 1996(2): 28-29.
- [9] 吴昭方. 积分器零漂的自动补偿[J]. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2008, 14(2): 28-30.
- [10] 刘彬,叶国雄,郭克勤,等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器复合误差计算方法[J]. 高压技术, 2011, 37(10): 2391-2397.
- [11] 李沐荪. 跟踪式仪表积分器的设计问题[J]. 长春地质学院学报, 1979(4): 52-60.

作者简介:

郭又华(1979), 工程师,从事继电保护、电测仪表工作。

(收稿日期: 2013-08-01)

欢迎投稿 欢迎订阅

750 kV 变电站 3/2 母线接线与倒闸操作方式优化

徐 闯¹ 石 辉¹ 印 欣¹ 常喜强² 王 飞²

(1. 国网新疆电力公司检修公司 新疆 阜康 831500;

2. 新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 新疆超高压枢纽变电站 750 kV 母线 3/2 接线形式与传统母线接线形式有着重要的区别,其电气主接线形式对电网供电可靠性和电网经济性有着至关重要的影响。重点分析新疆电网 750 kV 母线 3/2 接线形式,同时结合生产实际情况,对 3/2 接线方式下的倒闸操作进行了优化,并对特殊运行方式下的倒闸操作提出了优化建议。

关键词: 3/2 接线; 倒闸操作; 接线方式

Abstract: There is an important difference between 3/2 connection mode and the traditional busbar connection mode in Xinjiang 750 kV EHV substation, and its main electrical wiring has a critical influence on the reliability of power supply and the economy of power grid. The focus of analysis is on 3/2 connection mode of 750 kV busbar in Xinjiang power grid, and combined with the actual situation of the production, the switching operation under 3/2 connection mode is optimized, and the optimization suggestions for switching operation in special operating mode are proposed.

Key words: 3/2 connection; switching operation; wiring mode

中图分类号: TM861 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)01-0084-04

0 引 言

目前新疆 750 kV 变电站 8 座,高压侧母线全部采用 3/2 接线方式。这种接线方式的特点是两条线路之间有 3 组断路器,每条线路平均有一个半断路器,如图 1 所示。

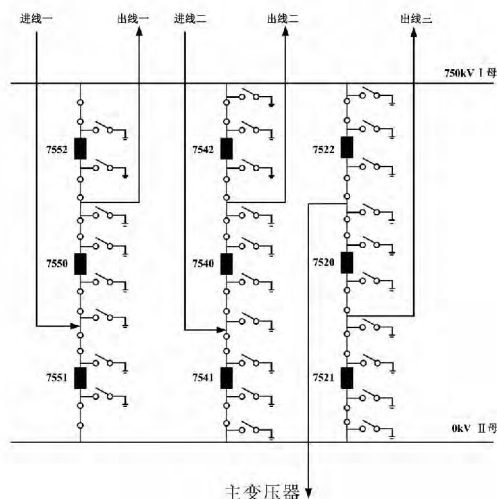


图 1 3/2 完整接线方式

从图 1 可以看出 3/2 完整接线方式没有多回

路集结点、并由两个元件(线路或发变组)引线,每串用 3 台断路器接向两组母线(I、II)组成一个半断路器接线,每一回输电线路经 1 台断路器接至母线,两条输电线路回路之间由 1 个联络断路器形成 1 串。

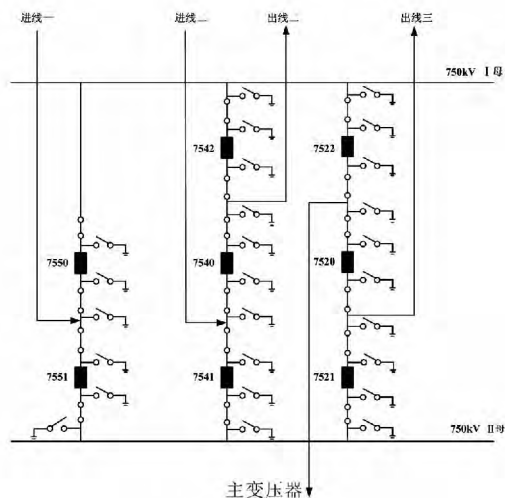


图 2 3/2 不完整接线方式

从图 2 可以看出 3/2 不完整接线时,有一串是由两个断路器连接,接于两母线之间,两断路器之间接一条线路。其余为完整 3/2 接线方式。

3/2 接线方式运行灵活、供电可靠,多用于 330 kV 及以上的超高压电网。由于这种接线方式与新疆传统 220 kV 变电站采用的双母线带旁路接线形式存在很大差别,并且电压等级更高,因此需要在运行中灵活掌握这种接线方式,提高技术水平与运行经验。

下面主要从运行方式、保护、检修灵活性等方面重点讨论 3/2 母线接线形式,同时对 3/2 接线方式下的倒闸操作进行了优化。对于增强运行经验、提高运维效率具有现实指导意义。

1 3/2 母线接线方式运行分析

1.1 线路开关数

表 1 开关数比较

接线形式	断路器	隔离开关
3/2 完整接线	9	18
3/2 不完整接线	8	16

从表 1 知,3/2 完整接线时,断路器和隔离开关比较多,导致电流互感器配置也较多,二次接线复杂,二次操作项目多。

1.2 主接线可靠性分析

用停电百分比进行定量比较分析电气主接线的可靠性,则停电百分比的数学表达式为

停电百分数 = $\frac{\text{停电回路数}}{\text{主接线总回路数}} \times 100\%$

由图 1 所示 3/2 接线形式的故障停电可靠性数据分析见表 2。

表 2 3/2 完整接线的故障停电可靠性分析

运行情况	故障类别	停电回路数	停电百分比 /%
无设备检修	母线侧断路器故障	0	0
	母线故障	0	0
	中间断路器故障	0	0
中间短路器检修	母线侧断路器故障	1~2	16.6~33.3
	母线故障	1~2	16.6~33.3
母线断路器检修	中间断路器故障	2	33.3
	母线故障	0	0
母线检修	母线侧断路器故障	0	0
	母线故障	0	0
	中间断路器故障	1	16.6

从表 2 可以看出,采用 3/2 完整接线方式,故障停电回路数最多为 3 回,占全部回路数的 60%,不会发生全回路停电的现象。这是因为发生母线故障

或断路器故障时,不会影响线路供电。同时当断路器拒动时,事故不扩大,隔离开关只作为隔离电源使用,不需要切换母线。

1.3 一次设备检修、倒闸操作方面

通常来说,如果一串中接两条线路,应尽量一条接母线进线,一条母线出线,或接两条联系紧密的相邻线路,这样可以保证两条母线都故障时,仍有功率传送。当然,如果有两台主变压器,应分别接入两个串中。

在一般电气主接线中,母线比线路重要,一旦因为停电时误操作,直接带负荷拉母线侧隔离开关,导致母线故障,母线所在线路会全部停电,先拉负荷侧隔离开关,如果发生带负荷拉开关,只会造成线路故障,母线不会故障。而在 3/2 断路器接线方式下,线路或变压器比母线更为重要,因为即使母线故障,母线上所有断路器全部跳闸,仍然不会影响线路和主变压器供电,但是会影响运行的稳定性。

虽然 3/2 断路器接线方式下,带负荷拉开关发生的概率很低,各地方对于倒闸操作中隔离开关拉合的顺序没有明确规定,但是按照《安规》要求“停电拉闸操作必须按照断路器(开关)——负荷侧隔离开关(刀闸)——母线侧隔离开关(刀闸)的顺序依次进行”来确定拉闸顺序,考虑到断路器两侧隔离开关发生带负荷拉闸事故对系统影响程度的不同,在 3/2 接线方式下依然适用。

3/2 接线的隔离开关,仅仅只作为隔离电器使用,不需要倒闸操作。处理事故时利用断路器操作,消除事故迅速。同时由于断路器不需要代路操作,可任意停下来检修,及时发现缺陷,及时处理,保证断路器处于良好的工况,其边断路器、中间断路器、隔离开关操作简单,运行方便,设备检修条件好。

1.4 3/2 完整接线继电保护运行、检修

3/2 断路器接线方式下,线路保护不但按双重化进行配置,对每一个断路器还有一套专用的保护装置,这也导致在倒闸操作过程中,重合闸投退具有与以往不同的特点。

母线保护装置设有两组独立的单母线差动保护,结构简单。当母线保护误动时跳开本母线的断路器,元件不会停电。保护装置校验时可停一条母线进行,此时另一母线故障,只要两线路之间的断路器正常,此时只会造成解列运行,而不会造成停电事故,几乎无影响。

断路器失灵保护启动回路是由所连接两个元件的保护出口和本身的判别元件构成,同时采用电压判别设备,故保护装置和电压切换回路比较复杂。

其电压电流回路元件的仪表、线路保护装置的电流回路,需接两组电流互感器,故交叉接线比较复杂,而母线保护装置电流回路是固定连接,比较简单。各元件的电压回路接于专用电压互感器,不需要切换,较简单。同时由于隔离开关不用倒闸操作,所以断路器和隔离开关各元件之间没有倒闸连锁,连锁回路简单。

控制回路由于联络断路器受两个元件控制,比较复杂。

1.5 灵活性和扩建性分析

表 3 灵活性和扩建性分析

接线方式	运行方式	检修停电	改扩建
3/2 完整接线	运行方式灵活多变	一台开关计划检修不停电	
		隔离开关不需要倒闸操作,同时也不需要二次回路切换和调整保护定值	
		开关检修间隔 10~15 年	

3/2 接线形式满足了运行方式的灵活性,但是在改扩建工程中受到很大限制。

2 3/2 接线过渡方式下值得注意的问题

750 kV 变电站在投运初期,各出线间隔都不完整,很少能一次组成 2 个以上的完整串,存在多种过渡方式。图 3 是比较常见的一种接线方式。

(1) 3/2 接线不完整串产生的过渡方式变化

如图 3 所示,在 3/2 不完整接线形式中,若在 7530 检修状态下,发生 7520 开关跳闸,则系统可能解列为两部分。而此时,线路开关 7532、7531、7521 均处于运行状态,系统运行方式已经发生了较大变化,在稳控系统定值判断、事故处理等方面均需要特殊考虑。

又如 7531 母线侧隔离开关检修(或者 7521 母线侧隔离开关检修)时,若此时 7520(或者 7532)发生故障,则系统也可能解列为两部分运行。同时,如果完整串设备停运形成不完整串,也可能造成上述情况,需给予高度关注。

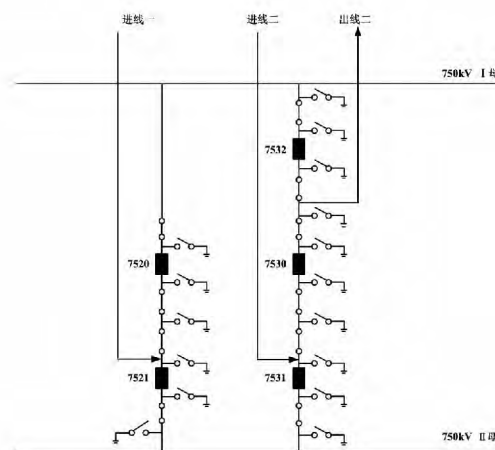


图 3 3/2 接线建设初期的不完整接线形式

3 倒闸操作方式优化

新疆 750 kV 变电站,站内设备多,设备区面积比较大,每次遥控操作电气设备,都需要在设备区检查实际位置。由于主控室距离设备区较远,需要来回往返,延长了倒闸操作时间,缩短了变电检修的有效工作时间,降低了操作效率。因此,如何提高倒闸操作效率,降低操作时间已成为 750 kV 变电站运维人员迫切需要解决的问题之一。

作为运维人员,在满足安规和运行规程的基础上,提出了如下优化倒闸操作的几个方面。

(1) 优化操作步骤

合理调整操作顺序,优化操作线路。比如母线进行倒闸操作时,按照实际间隔顺序依次进行操作,尽量减少不必要的操作,比如保护压板投退等。

(2) 安排辅助操作人员

安排辅助操作人员负责现场设备的检查,由辅助操作人员通过无线通讯设备(如对讲机)汇报现场设备实际位置,减少人员往返路程,缩短了操作时间。

(3) 集中监控和现场操作相结合

因为 750 kV 变电站综合自动化程度高,可以采用集中监控下的操作模式,开关都能在监控后台计算机上遥控。另派一名变电运维人员专门在现场检查设备操作到位情况,并用对讲机向主控台汇报。由于在计算机上依靠软件规则更易实现完善的防误功能,因此这种操作方式比常规的现场操作更快捷、更安全,因而更有利于电网的安全运行。

4 结 语

重点分析了新疆 750 kV 变电站 3/2 母线接线方式,对 3/2 接线方式在运行的可靠性、检修方式下的灵活性与倒闸操作的安全性方面进行重点讨论,同时结合实际工作情况提出了几点优化倒闸操作效率的建议,对于新疆超高压电网运行维护具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 何仕卿. 220 kV 母线保护改造问题[J]. 四川电力技术, 2009, 31(20): 73-74.

- [2] 钟惠霞. 南方电网 500 kV 3/2 断路器主接线的特殊运行方式[J]. 电网技术, 1995(5): 35-39.
[3] 范锡普. 发电厂电气部分[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
[4] 宋继成. 220 ~ 500 kV 变电所电气接线设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[5] 广西电力设计院. 500 kV 玉林变初步设计[Z]. 1998.
[6] 中南设计院. 500 kV 南宁变初步设计[Z]. 2000.

作者简介:

徐 闯(1981), 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

石 辉(1984), 工程师, 主要研究方向为现代电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2013-09-06)

(上接第 70 页)

外冷风机是换流站内的主要噪声源,其噪声类型包括电磁噪声、机械噪声和空气动力学噪声。采取降噪措施时应统筹规划,遵循环保达标、技术可行、经济合理的原则进行治理。

2) 换流站内的设备噪声频谱特征具有频带较宽的特点,其中以中低频噪声为主,高频成分较弱。

3) 换流变压器在 100、400、500 Hz 的中心频率上出现峰值,中频带的声级较高,高频带的声级呈平缓下降的趋势,设备噪声以铁心振动噪声为主,因此应主要针对铁心采取降噪措施。

4) 平波电抗器在 100、200、400 Hz 的中心频率上有明显峰值,在中、高频上频率成分丰富并趋于平缓。设备噪声以铁心振动和线圈电磁振动为主,因此应针对铁心和线圈采取降噪措施。

5) 交流滤波器组在低频段的 50、100、125、200 Hz 的中心频率上出现峰值,在中、高频上趋于平缓,应主要针对电容器和电抗器采取降噪措施。

6) 换流站噪声控制应先合理选择换流站站址,其次尽可能地降低噪声源的数量和强度,然后考虑合理选择和优化设计方案,最后才考虑必要的隔声、消声等降噪治理措施。同时为了控制降噪成本,噪声控制工程应与主体工程同时设计、同时施工、同时投产。

参考文献

- [1] 余尤好,陈志宝. 大型电力变压器的噪声分析与控制[J]. 变压器, 2007, 44(6): 23-26.
[2] 马大酋. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
[3] 刘惠玲. 环境噪声控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.

- [4] 邱宁,穆华宁,胡小龙. ± 800 kV 换流站噪声控制研究[R]. 北京中国电力工程顾问集团公司, 2005.
[5] Lan T S, Chiu M C. Optimal Noise Control on Plant Using Simulated Annealing[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2008, 32(3-4): 423-437.
[6] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
[7] GB 12349-90 工业企业厂界噪声测量方法[S].
[8] GB 12348-1990 工业企业厂界噪声标准[S].
[9] 南方电网技术研究中心. 云南—广东 ± 800 kV 直流输电工程可听噪声研究报告[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2006.
[10] 刘培杰,孙海涛,王红卫. 噪声模拟软件 Cadna/A 在交通噪声预测评价中的应用[J]. 电声技术, 2008, 32(7): 64-67.
[11] 河南电力试验研究院. 灵宝换流站可听噪声测试报告[R]. 郑州, 2005.
[12] 韩辉,吴桂芳,陆家榆. ± 800 kV 换流站阀厅与换流变压器采用一字形或面对面布置的噪声分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 1-5.
[13] 杨一鸣,章旭雯. 特高压直流换流站设备的降噪措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 149-152.
[14] 张劲松. 高压直流换流站噪声综合治理研究[J]. 电力建设, 2007, 28(8): 14-16.
[15] 高聚元,宋金鹏. 贵广直流肇庆换流站噪声治理工程设计方案[R]. 北京: 北京绿创声学工程股份有限公司, 2006.

作者简介:

叶春燕(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电磁环境监测及治理工作。

(收稿日期: 2013-10-08)

水电站主变压器高压侧接地故障传递电压 对发电机定子接地保护的影响

黄建琼, 季 杰, 蔡显岗, 陈熙平
(锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615000)

摘 要: 发电厂主变压器大接地系统高压侧发生接地故障时, 故障点零序电压会经主变压器高低压绕组间耦合电容传递到发电机侧, 因此在整定发电机基波零序电压定子接地保护定值时需校验该传递电压的影响。结合锦屏二级水电站的运行参数, 阐述了主变压器高压侧接地故障传递电压的计算方法, 校验了发电机基波零序电压定子接地保护定值的正确性。

关键词: 主变压器; 接地故障; 耦合电容; 定子接地

Abstract: When the grounded system for high voltage system gets out of order, the zero - sequence voltage of fault point is transferred to the generator by the coupling capacitance of step - up transformer. So the influence of transfer voltage should be considered in calculation setting of relay protection. According to the operational parameters of Jinping Hydropower Station, the calculation methods for the transfer voltage of ground fault in step - up side of main transformer are introduced, and the correctness of set points of stator grounding protection of zero - sequence voltage is checked.

Key words: main transformer; ground fault; coupling capacitance; stator grounding protection

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014) 01 - 0088 - 04

0 引 言

DL/T 684 - 2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》^[1]明确要求发电机定子接地保护基波零序电压整定值或延时要与系统接地保护配合。鉴于锦屏二级水电站发电机定子接地保护未经主变压器高压侧零序电压闭锁, 因此需校验主变压器高压侧系统发生接地故障时, 故障点零序电压经主变压器高低压绕组间耦合电容传递到发电机侧对基波零序电压定子接地保护的影响。发电机基波零序电压定子接地保护在躲过主变压器高压侧接地传递电压的情况下, 应尽量缩短延时, 取 0.3 ~ 1.0 s。

锦屏二级水电站是雅砻江流域龙头电站, 单机容量为 600 MW, 共 8 台机组, 采取一洞双机联合单元运行方式, 总装机容量为 4 800 MW, 机端电压为 20 kV, 定子绕组接线方式为中性点经接地变压器接地三相 6 分支 Y 形接线。发电机定子接地保护采用“基波零序保护 + 3 次谐波电压”和注入式定子接地保护构成的双重化 100% 定子接地保护。

1 对称分量法计算主变压器高压侧单相接地故障零序电压

1.1 对称分量法

不对称故障通常通过对称分量法可以简化系统分析和运算。3 个不对称的相量可以唯一分解成 3 组对称相量(即对称分量): 正序分量、负序分量和零序分量^[2]。

$$\begin{cases} \dot{F}_a = \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b = \dot{F}_{b1} + \dot{F}_{b2} + \dot{F}_{b0} \\ \dot{F}_c = \dot{F}_{c1} + \dot{F}_{c2} + \dot{F}_{c0} \end{cases} \quad (1)$$

式中, 第 1 组 $\dot{F}_{a1}$ 、 $\dot{F}_{b1}$ 、 $\dot{F}_{c1}$ 幅值相等, 相位 $\dot{F}_{a1}$ 超前 $\dot{F}_{b1}$ 120° , $\dot{F}_{b1}$ 超前 $\dot{F}_{c1}$ 120° , 为正序相量; 第 2 组 $\dot{F}_{a2}$ 、 $\dot{F}_{b2}$ 、 $\dot{F}_{c2}$ 幅值相等, 相位 $\dot{F}_{a2}$ 滞后 $\dot{F}_{b2}$ 120° , $\dot{F}_{b2}$ 滞后 $\dot{F}_{c2}$ 120° , 为负序相量; 第 3 组 $\dot{F}_{a0}$ 、 $\dot{F}_{b0}$ 、 $\dot{F}_{c0}$ 幅值和相位均相同, 为零序相量。

令 $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$, 则 3 个不对称相量则可以通过其中 1 个相量的 3 个序量进行计算, 即

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过式(2)可知,对于电力系统中三相对称元件中的不对称电压和不对称电流,可通过分解成 3 组对称的分量进行分别计算。由于每组分量的 3 相是对称的,因此仅需分析 1 相,便可计算出其他两相。

1.2 主变压器高压侧系统单相接地故障计算

以锦屏二级水电站主变压器高压侧发生 a 相接地短路为例,其系统图如图 1 所示。下面利用对称分量法计算短路电流及短路点的电压的关系式。

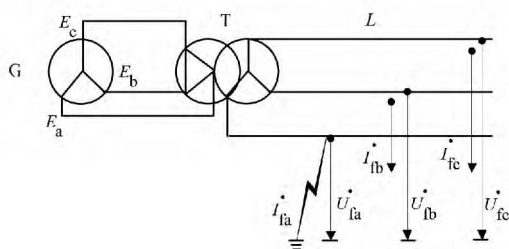


图 1 a 相接地系统图

主变压器高压侧 f 点发生单相接地故障,使得 f 点的三相电压和三相电流均不对称,而此时发电机的电动势仍为三相对称的正序电动势,发电机、变压器和线路的三相参数是对称的。将故障处的电压和故障电流分解成 3 组对称分量,如图 2 所示。

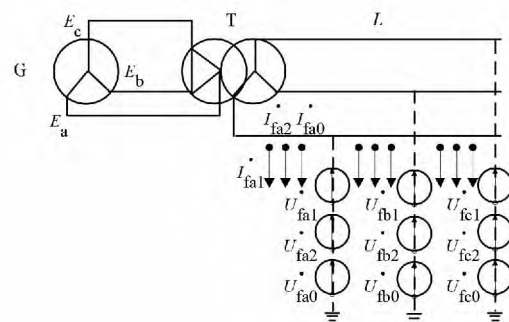


图 2 短路点电压、电流各序分量

根据 a 相的电压平衡关系有如下平衡关系。

$$\begin{cases} \dot{E}_a - \dot{U}_{fa1} = \dot{I}_{fa1}(z_{G1} + z_{T1} + z_{L1}) \\ 0 - \dot{U}_{fa2} = \dot{I}_{fa2}(z_{G2} + z_{T2} + z_{L2}) \\ 0 - \dot{U}_{fa0} = \dot{I}_{fa0}(z_{T0} + z_{L0}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 z_{G1} 、 z_{T1} 、 z_{L1} 为发电机、变压器、线路的正序阻抗; z_{G2} 、 z_{T2} 、 z_{L2} 为发电机、变压器、线路的负序阻抗; z_{T0} 、 z_{L0} 为变压器、线路的零序阻抗。由于主变压器高压侧星形接地,故发电机侧没有零序电流流过,因

而公式中零序阻抗无发电机零序阻抗。

根据边界条件,可知故障相的对地电压为零,非故障相的对地故障电流为零,因此有如公式(4)的边界关系。

$$\begin{cases} \dot{U}_{fa} = 0 \\ \dot{I}_{fa} = \dot{I}_{fb} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

利用对称分量法可转换为式(5)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{fa1} + \dot{U}_{fa2} + \dot{U}_{fa0} = 0 \\ a^2 \dot{I}_{fa1} + a \dot{I}_{fa2} + \dot{I}_{fa0} = 0 \\ a \dot{I}_{fa1} + a^2 \dot{I}_{fa2} + \dot{I}_{fa0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(3)、(5)可推算出式(6)。

$$\dot{U}_{fa0} = \dot{E}_a \times \frac{Z_{T0} + Z_{L0}}{Z_{G1} + Z_{T1} + Z_{L1} + Z_{G2} + Z_{T2} + Z_{L2} + Z_{T0} + Z_{L0}} \quad (6)$$

令,

$$Z_{1\Sigma} = Z_{G1} + Z_{T1} + Z_{L1}$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{G2} + Z_{T2} + Z_{L2}$$

$$Z_{0\Sigma} = Z_{T0} + Z_{L0}$$

则有

$$\dot{U}_{fa0} = \dot{E}_a \times \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (7)$$

2 接地点零序电压至发电机端的传递电压计算

2.1 相关计算参数

根据锦屏二级水电站实际参数,选取基准容量 $S_j = 100 \text{ MVA}$ 、500 kV 平均电压 $U_j = 525 \text{ kV}$,发电机正序、负序电抗标幺值: $X''_d = 0.0372$,主变压器正序、负序、零序电抗标幺值(330 kV 侧) $X_{B1} = X_{B2} = X_{B0} = 0.0224$,高压 500 kV 母线等值电抗在系统最大方式时: $X_1 = X_2/X_0 = 0.00737/0.01044$,系统最小运行方式: $X_1 = X_2/X_0 = 0.01716/0.02960$ 。

2.2 计算等值电路图

锦屏二级水电站发变组为联合单元接线方式,即两台相邻机组通过主变压器高压侧并联的接线方式接入系统,双机系统最大运行方式下参数,各序量标幺值阻抗如图 3^[3]。

2.3 主变压器高压侧单相接地零序电压计算

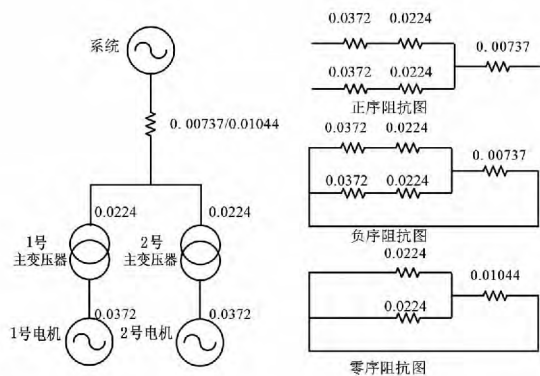


图 3 各序量标幺值阻抗图

根据公式(7),在主变压器高压侧发生单相接地故障时,高压侧接地点的故障零序电压计算如下。

$$\begin{aligned}\dot{U}_{H0} &= \dot{E}_a \times \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \\ &= \frac{0.00541}{0.00656 + 0.00656 + 0.00541} \times \frac{525}{\sqrt{3}} \\ &= 88.5 \text{ kV}\end{aligned}$$

2.4 传递电压计算

锦屏二级主变压器为特变电工衡阳变压器有限公司提供,以其提供的某一台主变压器介质损耗因素测量相关试验报告为例计算传递电压,见表 1 所示。

表 1 锦屏二级水电站主变压器电容值

部位	施加电压 /V	电容值 / μF
高压~低压及地	10 000	9.701
低压~高压及地	10 000	27.220
高压、低压~地	10 000	25.216

实验电路图如图 4 所示。

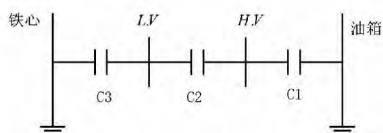


图 4 主变压器电容试验图

通过表 1 和图 4 可计算出主变压器高低压侧间耦合电容为 $5.86 \mu\text{F}$ 。

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 9.701 \mu\text{F} \\ C_2 + C_3 = 27.22 \mu\text{F} \Rightarrow C_2 = 5.86 \mu\text{F} \\ C_1 + C_3 = 25.216 \mu\text{F} \end{cases}$$

传递电压计算所需的锦屏二级水电站发电机相关参数如表 2。

锦屏二级水电站发电机定子接地保护原理图如图 5 所示。

表 2 发电机相关计算参数

设备	参数名称	数值
发电机	单相相对地电容 / μF	1.783
断路器	单相匹配电容 / μF	0.39
接地变压器	接地变型号	20/0.866
接地变压器	二次电阻额定值 / Ω	0.92
接地变压器	电阻分压比	1/5
发电机定子接地保护	基波零序电压灵敏段 /V	8

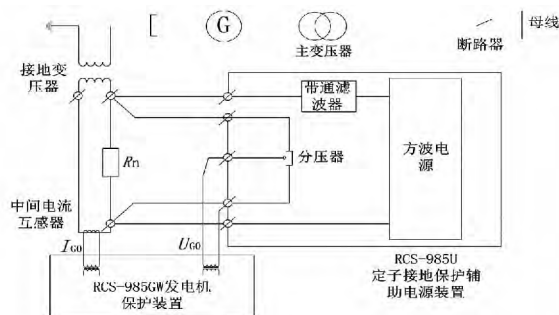


图 5 发电机定子接地保护原理图

发电机定子接地保护等效电路图如图 6 所示^[4]。

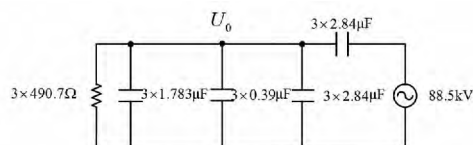


图 6 发电机定子接地保护电路图

主变压器高压侧发生短路接地故障,基波零序电压 88.5 kV 通过主变压器高低压绕组间耦合电容 $C_M = 5.68 \mu\text{F}$ 传递到发电机机端零序电压 U_0 为

$$U_0 = 88.5 \text{ kV} \times$$

$$\frac{3 \times 490.4 \parallel \frac{10^6 \times 3}{j\omega \times (1.783 + 0.39 + 0.00292)} \times 3}{3 \times 490.7 \parallel \frac{10^6 \times 3}{j\omega \times (1.783 + 0.39 + 0.00292)} \times 3 + \frac{10^9 \times 3}{j\omega \times 2.929 \times 3}}$$

$$\text{即 } U_0(\text{二次}) = 84.5 \times \frac{0.866}{20 \times 5} \approx 0.73 \text{ V}$$

通过以上计算可知,主变压器高压侧单相接地短路传递到发电机定子接地保护零序电压 0.73 V ,远小于定子接地零序电压灵敏段定值 8 V ,符合技术监督要求校验主变压器接地零序传递电压不影响发电机定子接地保护的要求。

3 结 论

DL/T 684 - 2012《大型发电机变压器继电保护

整定计算导则》取 0.6 倍主变压器高压侧电压作为主变压器高压侧的零序电压^[4]。通过锦屏二级水电站的实际参数计算得出在主变压器高压侧发生单相接地时,其零序电压为相电压的 0.29 倍。通过计算主变压器高压侧传递至发电机端的零序电压,验证了锦屏二级水电站发电机基波零序电压定子接地保护无需再增加主变压器高压侧零序电压闭锁。由于躲开了主变压器高压侧单相接地的传递电压,因此发电机定子接地保护动作延时可适当缩短,更有利于保护发电机定子的安全运行。

参考文献

- [1] DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
- [2] 李光琦. 电力系统暂态分析(第三版)[M]. 北京: 中国

(上接第 42 页)

6 结 论

随着电网的快速发展,新设备投运也越来越多,尤其是大量电厂正在或即将建设,电厂在建设期间需要启备线送电对各种厂用机械进行调试,但是由于负荷过小,无法满足进行带负荷测向量的要求,造成保护无法正常投入,影响设备送电,这种矛盾随着电厂的快速建设及电网的快速发展越来越突出。当前采用的方法都有一定的优缺点,但基本上缺点多于优点,施工难度大,受制因素多,普遍性差,难于推广。因此,所提出的针对空载及轻载线路向量测试新方法有利于系统的安全稳定运行,接线简单,操作方便,易于测试,同时具有普遍性,对于类似的空载线路及轻载线路的继电保护向量测试均可采用。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 国家电力调度通信中心编. 电力系统继电保护使用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] 国家电力调度通信中心编. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

电力出版社, 2007: 86-91.

- [3] 巨争号. 接地故障传递电压对发电机定子接地保护的影响[J]. 神华科技, 2011, 9(5): 54-57.
- [4] 季杰. 发电机定子接地保护在二滩水电站的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(3): 35-38.

作者简介:

黄建琼(1984), 硕士, 工程师, 从事发电厂监控系统工作;

季 杰(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作;

蔡显岗(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作;

陈熙平(1987), 本科, 助理工程师, 从事发电厂继电保护工作。

(收稿日期: 2013-08-26)

- [4] 华中工学院编. 电力系统继电保护原理与运行[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [5] 吕继绍主编. 继电保护整定计算与实验[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1983.
- [6] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [7] 张志竞, 黄玉铮. 电力系统继电保护原理与运行分析(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [8] 王广延, 吕继绍. 电力系统继电保护原理与运行分析(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [9] 王梅义, 蒙定中, 郑奎璋, 等. 高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.
- [10] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [11] 陶然, 熊为群. 继电保护自动装置及二次回路[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

作者简介:

梁 静(1960), 硕士研究生导师, 高级工程师, 从事电力系统继电保护方面的工作;

冯小萍(1979), 硕士, 主要从事电力系统继电保护工作;

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统运行与稳定方面的工作。

(收稿日期: 2013-05-19)

变压器绝缘油中微生物生长研究

王 杰¹ 刘 虹¹ 唐 平¹ 李 博²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司供电服务中心 四川 成都 610041)

摘 要:以变压器绝缘油为唯一碳源进行微生物生长增殖研究,从绝缘油中分离出 4 株厌氧微生物;在游离水存在条件下,35 ℃ 是 4 株厌氧微生物生长增殖的最佳适宜温度,高于 50 ℃ 时微生物生长受到抑制;无游离水的环境条件下微生物不能进行生长增殖。

关键词:微生物;变压器;绝缘油;生长

Abstract: The growth and proliferation of microorganisms are studied taking transformer insulation oil as the sole carbon source. It isolates 4 strains of anaerobic microorganisms from insulation oil. In the presence of free water, the 4 strains of anaerobic microorganism proliferate under 35 ℃ which is the optimum temperature and their growth is inhibited above 50 ℃, while microorganisms cannot grow and proliferate without free water.

Key words: microbe; transformer; insulation oil; growth

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0092-03

0 引 言

变压器绝缘油是从石油中分馏精炼而成的矿物绝缘材料,主要由烷烃、环烷烃和芳香烃组成,其非极性结构分子具有良好的绝缘等性能,因此能够在变压器内起着绝缘、冷却和灭弧作用。变压器绝缘油在储存、运输以及使用过程中易受污染而使其电气性能下降,如介质损耗因数及介电常数增加、击穿电压降低等,这些性能的变化严重破坏了变压器的安全运行,给电力系统造成巨大的经济损失。

近年来有关微生物污染变压器绝缘油的研究报道很多,吉林大学姚丽丽^[1]等人用自制的 JOA 无机盐营养液培养出能够以变压器介质油为唯一碳源的微生物;韦强^[2]介绍了微生物对变压器油电气绝缘性能的影响;梅子青^[3]等人研究大型变压器油中放线菌代谢产物对绝缘油电气性能的影响。这些研究均未揭示出微生物在变压器运行环境条件下是否生长增殖。

下面将通过微生物在变压器运行环境条件下生长增殖研究,确定微生物在运行变压器环境下是否能够生长增殖以及生长环境条件,为研究变压器绝缘油介质损耗因数增高提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料及仪器

主要试剂:硫酸铵、硫酸镁、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、柠檬酸三钠、氢氧化钠(10%水溶液)、盐酸(6 mol/L 水溶液);琼脂粉。试剂均为分析纯。

主要仪器:

电子天平(FA1104 型),上海良平仪器仪表有限公司。

电热恒温培养箱(SC-50X 型),四川吉峰农业机械设备厂。

手提式压力蒸汽灭菌锅(YXQ-SG46.280-B),成都胜利医用设备厂。

单人净化工作台(SW-CJ-IO 型),苏州净化设备有限公司。

显微镜(XS-18 型),江南光电(集团)股份有限公司。

常规器具:烧杯、三角瓶、移液管、量筒、培养皿、滴管、载玻片及盖玻片、接种环。

1.2 试验方法

1.2.1 培养基制备

向 1 000 ml 蒸馏水中依次加入 2.0 g 硫酸铵、

0.2 g 硫酸镁、6.0 g 磷酸二氢钾、4.0 g 磷酸氢二钾、1.0 g 柠檬酸三钠,用氢氧化钠或盐酸调节 pH 值至 7.0~7.2 后加入 12 g 琼脂粉使其凝固。

1.2.2 厌氧培养法

在干燥器隔板下面放置一定量用纱布包好并用细线系住的焦性没食子酸,将接种后的培养物置于隔板上,用美蓝作氧气指示剂,从干燥器一侧加入氢氧化钠溶液,将焦性没食子酸没入氢氧化钠溶液,盖上干燥器盖密封干燥器,器内即形成无氧环境。

1.2.3 分离纯化方法

挑取一杯培养液于预先准备好的平板上进行划线,盖上皿盖,然后将平板倒置于 37℃ 培养箱中培养数天后,取出用显微镜观察菌落生长情况,挑取特征明显的菌落,再次在平板上进行划线分离培养。经过反复多次划线分离培养,直至从培养液中挑出特征具有单一、质地均匀的菌落。

1.2.4 微生物鉴定

在显微镜下观察细胞的形状、大小及排列情况;革兰氏染色反应等确认微生物是否为纯种;生理化实验确定该菌可能所属的属、种。

2 试验结果与讨论

2.1 微生物在变压器绝缘油中的生长

以变压器油作为唯一碳源,采用人工接种的方法,温度为 37℃ 的条件下进行厌氧培养,10 天后对培养的微生物进行分离纯化后显微观察和生理化实验鉴定微生物的种属。

2.1.1 微生物菌落形态

分离得到的 4 株厌氧菌经革兰氏染色过后在显微镜下观察其菌落形态及个体形态如图 1、图 2、图 3、图 4。

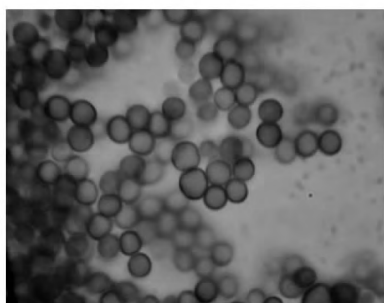


图1 Y1 革兰氏染色

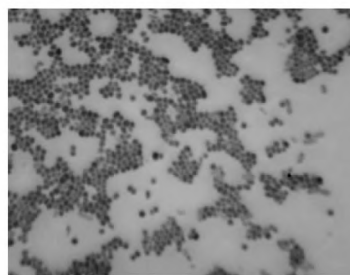


图2 Y2 革兰氏染色



图3 Y3 革兰氏染色

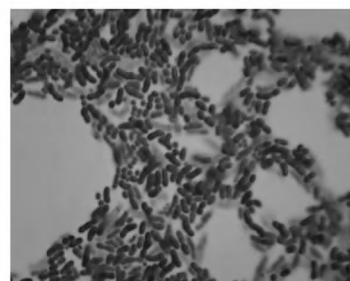


图4 Y4 革兰氏染色

图中,Y1 菌落形态呈不规则假根状,边缘为裂叶状,个体形态圆球形;Y2 菌落呈圆形,湿润,菌体较小,为圆形;Y3 菌落呈圆形,表面有颗粒状产物,长杆状,呈链状排列;Y4 菌落呈圆形,较小,呈凸起状,短杆状,略弯。

2.1.2 生理化实验鉴定

由表 1 生理化实验结果,依据伯杰氏细菌鉴定手册第 14 部分判断,分离后得到的 4 株厌氧均属于消化球菌科。

Y1 号菌属于消化球菌科八叠球菌属;Y2 号菌可归为韦荣氏球菌科属 I 韦荣氏球菌属;Y3 号为革兰氏阳性、甲基红试验为阳性、可发酵葡萄糖。从这些特点可以确定其为芽孢杆菌属的蜡状芽孢杆菌种;Y4 号为革兰氏阴性、不能利用葡萄糖、不液化明胶,因此确定其为拟杆菌科的脱硫弧菌属。

2.2 微生物在绝缘油中生长影响因素研究

2.2.1 温度对微生物生长的影响

将 Y1、Y2、Y3、Y4 活化后,先接种到生理盐水

表 1 生理化实验结果

编号	革兰氏染色	细胞形态	甲基红试验	明胶液化试验	石蕊牛奶试验	糖发酵试验	柠檬酸盐试验	过氧化氢酶试验
Y1	阳性	球菌	+	-	不凝固	-	+	-
Y2	阴性	球菌		-	不凝固	+	+	+
Y3	阳性	杆菌	+	-	不凝固	+	+	-
Y4	阴性	杆菌	-	-	不凝固	-	-	+

中稀释摇匀 梯度稀释后接种到无机盐固体培养基中 ,以变压器油为碳源分别在温度为 15 ℃、20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃、40 ℃、45 ℃、50 ℃、60 ℃温度条件下恒温培养 3 天后进行梯度稀释法计数 ,结果如图 5。

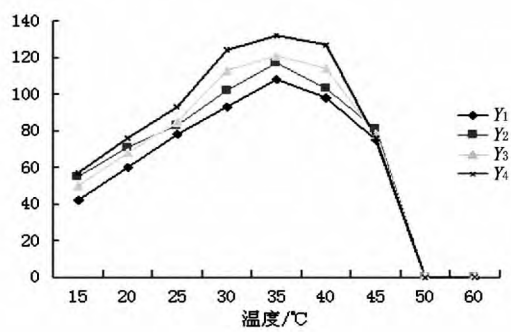


图 5 温度对绝缘油中微生物生长影响

图中显示: 在低温环境下 ,厌氧菌的生长速度随温度增高而增加; 温度在 25 ℃至 40 ℃之间 ,微生物最适宜生长; 当温度高于 50 ℃后时 ,微生物蛋白质受温度影响变性而不能存活 ,无菌落形成。

2.2.2 水分对微生物生长的影响

表 2 绝缘油中的微量水分对微生物生长的影响

编号	培养前(1×1E8) /ml	培养后(1×1E8) /ml
Y1	35	36
Y2	53	50
Y3	42	41
Y4	60	58

挑取单菌落 Y1、Y2、Y3、Y4 分别接种在运行的变压器绝缘油中 ,绝缘油中的水分含量为 25 μg/L 温度为 37 ℃条件下厌氧培养 10 天后 ,观察菌数变化。

由表 2 可知 ,当绝缘油水分含量为 25 μg/L 37 ℃培养 4 株厌氧菌培养前后菌落数均无明显变化。因此 ,可判断当绝缘油中无游离水条件下 ,厌氧菌不能生长增殖。

3 结 论

(1) Y1、Y2、Y3、Y4 微生物能够以变压器绝缘油为唯一碳源厌氧生长增殖。

(2) 以变压器绝缘油为唯一碳源 ,35 ℃是厌氧微生物生长的最佳适宜温度; 当温度达到 50 ℃以上时厌氧微生物生长受到抑制。

(3) 以变压器绝缘油为唯一碳源 ,在无游离水的环境下氧菌不能生长增殖。

参考文献

[1] 姚丽丽 ,刘贤忠 ,梅子青 ,等. 大型变压器介质油中放线菌的研究[J]. 吉林大学自然科学学报 ,2000(1) : 91 - 94.

[2] 韦强 ,肖福明 ,胡秉海 ,等. 绝缘油中的微生物浅析[J]. 变压器 ,2001 ,38(3) : 21 - 24.

[3] 梅子青 ,姚丽丽 ,王海晶 ,等. 变压器介质油中放线菌对油介损的影响[J]. 吉林大学自然科学学报 ,2002 (4) : 200 - 203.

作者简介:

王 杰(1979) , 硕士,工程师,从事电网绝缘化学研究与应用。

(收稿日期: 2013 - 07 - 25)

倡导节能低碳 推动绿色发展

国家电网四川电力送变电建设公司

国家电网四川电力送变电建设公司创建于1958年5月，原名西南电业管理局送变电工程公司，1980年更名为四川电力送变电建设公司。公司系国家电网四川省电力公司下属的全资子公司，国家电力工程施工总承包壹级资质及国家一级承装类、一级承修类、一级承试类企业，质量管理GB/T19001—2000—ISO9001:2000、职业健康安全管理GB/T28001—2001与环境管理GB/T24001—2004idtISO14001:2004体系认证企业。公司下设6个送电专业分公司、2个建筑安装专业分公司、应急抢修中心、离退休服务中心、物业管理服务中心。主营输变电工程施工安装、调试及运检。经过五十多年的不懈奋斗，公司已成长为拥有坚强的电网建设和运检维护能力、丰富的人才储备、先进的企业文化以及现代管理模式的综合型企业。

半个世纪来，公司先后在国内国外建成各种电压等级的输电线路2万余公里，变电站230余座。参加并完成了国家“西电东送”、特高压示范工程、青藏交流联网等重点工程建设，在500kV、750kV、800kV及1000kV工程建设中屡创佳绩，多次荣获国家建筑工程鲁班奖，国家优质工程银质奖等奖项。通过成功参与并圆满完成多个重要工程建设和急难险重任务，全面提升了公司的电网建设能力，有效树立了公司一线大型施工国企的品牌形象。

面对2008年雨雪冰冻灾害、“5.12”汶川特大地震，公司肩负起抗冰保电、抗震救灾、灾后重建的艰巨任务，充分体现了“诚信、责任、创新、奉献”的国家电网企业核心价值观，全面展示了“特别讲政治、特别能吃苦、特别能战斗、特别能奉献”的川送铁军形象。公司先后被评为全国精神文明先进单位、国家电网抗灾救灾恢复重建功勋集体、四川省先进企业、四川省最佳文明单位、四川省电力公司抗震救灾恢复重建杰出贡献先进集体。

展望未来，四川电力送变电建设公司将以科学发展观为指导，紧紧围绕国家电网公司建设“一强三优”现代公司的战略目标，深化“两个转变”，努力拓展电网建设和运行检修产业链，全力创建一流的电网建设企业，将公司打造为“建设坚强电网的中坚力量，维护主网安全的特种部队”，谱写公司更加辉煌的崭新篇章！



国家电网公司董事长、党组书记刘振亚在川藏联网工程暨四川甘孜巴塘500kV变电站奠基仪式上向四川电力送变电建设公司总经理、党委副书记郑大金授突击队旗。



四川送变电公司针对高山、高落差、放线段长、过滑车次数多的特殊外部条件，为保证顺利开展架线工程，保护导线放线质量，研发出组合式山区重型索道在500kV锦乐线将重达5.1t的大型施工器具张力机从山底运输到山顶的指定位置。首次在高山大岭地区张力场“上山”。



中国第一条特高压1000kV淮上线正紧张建设，平均170m的特高压铁塔施工给送变电员工带来极大挑战，四川电力送变电建设公司攻克了一项项世界施工难题。图为施工人员正上塔施工作业。