

★四川省一级期刊

●万方数据数字化期刊群入网期刊

●《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

●《中国期刊全文数据库》收录期刊

●首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

●北极星中华期刊网入网期刊

●中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

●中国农村电气化信息网

●重庆维普中文科技期刊数据库

●《超星数字图书馆》入网期刊

●《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.34

2011

No.3

CONTENTS

Study on Effect of Brake Resistance on Fault Ride-through Capability of Doubly-fed Induction Generator.....	Zhao Hailiang Huang Weixi(1)
Study on Time-of-use Price Mechanism in Demand Side of Electricity Market under Incentive Regulation	Li Jun Liu Junyong Zhang Li et al(5)
Research Progress on Suppression Measures of Transformer DC Bias.....	Jiang Wei Wu Guangning Liu Yuzhuo et al(9)
Study and Application of Estimation Method for Network Loss to Distribution Network Planning	Cheng Xijuan Zhou Buxiang Liao Fengran(14)
Analysis of 220 kV Short-circuit Current of Xinjiang Power Grid and Research of Restrictive Measures	Hu Renxiang Chao Qin Chang Xijiang et al(19)
Study on Grid-connected Scheme of Multiple Distribution Generations in Distribution Network Based on Life Cycle Cost	Lin Tao(22)
Parameter Design of Power System Stabilizer Based on Self-adaptive Differential Evolution Algorithm	Yang Zhihan Zhang Xuexia Li Qi et al(26)
Application of Security and Stability Control to Optical Fiber Transmission Network	Yin Mingchun(29)
Research and Development of Setting Calculation and Operation Management System of Provincial and Regional Integrated Data Platform for Relay Protection	Wang Shengli Shi Jing Chang Xijiang et al(32)
Research on Setting Calculation of Relay Protection for Utilization Equipment in Low-voltage Power Grid	Song Qi Song Hanrong Ying Qin(36)
A Pilot Project of Reliability of Transmission and Distribution System and Its Research.....	Yang Shu Jin Zhong(40)
Analysis of a Typical Accident of Protection Misoperation	Lu Tiansheng Ma Yanwei Li Pingping(42)
Analysis and Improvement of Protection Misoperation Due to Setting Zone Run Area for Microprocessor-based line	Zeng Li Hu Jingjing Wu Jurmei et al(45)
Bi-level Reserve-purchase Decision Considering Weighted Network Topology.....	Zhang Guofang Liu Junyong Iii Lin(48)
Influence of Charging System of Electric Vehicle on Power Grid and Design of Its High-frequency Transformer	Zhang Ran Chen Lei Tian Jiashen et al(53)
Research on Lightning Performance of Fujiang River Crossing	Tong Jichun(57)
Method for Reducing Tower Impulse Grounding Resistance.....	Jiang Ping Yang Lin(61)
Cause Analysis for an Abnormal Warming of SF ₆ Gas Density Relay	Ma Chun(64)
Analysis on Harmonic and Negative Sequence of V/V Traction Transformer Poured into System in Electrified Railway Traction Substations	Tong Qinggang Wang Maosheng(65)
Application of Ultrasonic Inspection and Measurement Technique of Partial Discharge to the First 220 kV Substation in Tibet	Zhou Yongjun Wang Jun Gan Degang(69)
Analysis of 35 kV Cable End Fault and Its Treatment.....	Bai Haifeng Chen Jian(73)
Application of Nechip to Remote Monitoring System of DC Power Supply Equipment	Zhan Yi Deng Ping Liu Renli et al(75)
Discussion on Stator Iron Loss Test for 600 MW Turbo-generator	Jiang Jianing Yuan Xinghui Song Gongyi et al(78)
Practice of Boiler Shutdown without Stopping Turbine for 300 MW CFB Boiler.....	Jiang Hao(81)
A Simple Method for Eliminating the Effects of Cylinder Distortion on Large-scale Steam Turbine	Huang Guoqiang(84)
Several Problems Needing Attention in Reforming of High-voltage Frequency Conversion of Condensate Pump in Thermal Power Plants	Guo Bochun(87)
Commissioning Problems in Biomass Engineering	Li Lanfang Zhao Weigang(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2011 Vol.34 No.3

(Jan. No. 213)

Bimonthly Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

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 鄔小端

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

2011年第34卷第3期(总213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

四川电力试验研究院

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:四川电力试验研究院情报室

地址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传真:(028)87314278

E-mail:cdscdlj@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*Y6.00*4300*27*

2011-06

目次

·基金栏目·

制动电阻对变速双馈风电机组故障穿越能力的影响研究 赵海岭 黄伟(1)
激励性监管下的电力市场需求侧分时电价机制研究

..... 李俊 刘俊勇 张力等(5)
变压器直流偏磁抑制措施的研究进展 蒋伟 吴广宁 刘愈倬等(9)

·电网技术·

电网规划中的网络损耗评估算法的研究与应用 程秀娟 周步祥 廖烽然(14)
新疆电网220kV短路电流分析和限制措施研究

..... 胡仁祥 晁勤 常喜强等(19)
基于LCC的配网多点分布式发电并网方案研究 林涛(22)

基于自适应差分算法的电力系统稳定器参数设计
..... 杨祉涵 张雪霞 李奇等(26)

安全稳定控制在光传输网中的应用 殷明春(29)
继电保护整定计算及运行管理省地一体化数据平台的研究与开发

..... 王胜利 石静 常喜强等(32)
关于低压电网用电设备继电保护整定计算的探索

..... 宋其 宋汉蓉 尹秦(36)
输变电系统可靠性工作的试点及研究 杨树 金钟(40)

一起典型的保护误动作事故分析 卢天盛 马彦伟 李萍萍(42)
一起由于定值跑区造成保护误动原因分析及改进措施

..... 曾丽 胡晶晶 吴俊美等(45)
计及加权网络拓扑的备用购买双层决策 张国芳 刘俊勇 吕林(48)

电动汽车充电系统对电网的影响及其高频变压器的设计
..... 张燃 陈磊 田佳桑等(53)

·输变电技术·

涪江大跨越雷电性能研究 佟继春(57)
降低杆塔冲击接地阻抗方法 蒋平 杨琳(61)

SF₆密度继电器一次异常报警的原因分析 马春(64)
电铁牵引站V/V牵引变压器注入系统的谐波和负序分析

..... 童庆刚 汪茂盛(65)
局部放电超声波检测技术在西藏首座220kV变电站的应用

..... 周勇军 王军 甘德刚(69)
35kV电缆头故障分析及处理 柏海峰 陈建(73)

NechIP芯片在直流屏远程监测系统中的应用 詹毅 邓平 刘人礼等(75)

·发电技术·

600MW汽轮发电机定子铁损试验方法探讨 江建明 袁兴惠 宋功益等(78)
300MW CFB机组停炉不停机的实践 江浩(81)

消除大型汽轮机汽缸变形影响的一种简便方法 黄国强(84)
火电厂凝结水泵高压变频改造应注意的问题 郭伯春(87)

生物质工程中的调试问题 李兰芳 赵伟刚(92)

·简讯·

加强技术监督 给力德阳换流站 (18)

智慧电网 节能减碳新利器 (68)

制动电阻对变速双馈风电机组故障穿越能力的影响研究

赵海岭¹, 黄伟²

(1 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2 新疆独山子石化公司乙烯电气部, 新疆 独山子 833600)

摘要: 为保持系统稳定, 必须要求风电机组具有故障穿越能力。双馈风电机组故障穿越能力已成为研究热点。介绍了故障穿越标准, 分析了双馈风电机组暂态特性与制动电阻的工作原理, 详细分析电网电压跌落情况下, 制动电阻接在风电场升压变压器低压侧与接在风电机组机端对双馈风机故障穿越能力影响。试验结果表明: 故障期间投入制动电阻, 能有效提升双馈风电场故障穿越能力。

关键词: 风力发电; 故障穿越; 制动电阻; 变速双馈风电机 (DFIG)

Abstract: In order to improve the stability of power system, the capability of fault ride-through (FRT) is required for the large wind farms. The research on fault ride-through of doubly-fed induction generator (DFIG) has become a hot issue. The standards of fault ride-through are introduced, and then the transient characteristics of doubly-fed induction generator and the working principle of brake resistance are analyzed. The effects of brake resistance placed at the low side of the transformer of wind farm or the terminal of DFIG on fault ride-through of doubly-fed induction generators are analyzed in detail when there is a voltage dip in grid side. The test results show that the brake resistance can substantially improve the performance of low voltage ride-through (LVRT) of a DFIG wind farm when placing it at the low side of transformer of the wind farm.

Key words: wind power generation; fault ride-through (FRT); brake resistances; doubly-fed induction generator (DFIG)

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0001-04

0 引言

近几年, 风力发电技术作为可再生能源的一种重要形式, 在世界范围内得到迅速发展。尤其是变速恒频风力发电技术, 受到世界各国的亲睐。随着风电容量不断增大, 世界很多国家要求风电机组运行具有故障穿越功能^[1-3]。

目前, 对于如何提高风电机组的故障穿越能力, 国内外进行了大量研究。对于恒速恒频风电机组, 主要采用投切无功补偿装置与变桨距控制。变桨距控制缺陷是无法提供短时无功缺额。文献[1]通过仿真分析说明 STATCOM 对异步风电场的静态和暂态稳定性的贡献, 在故障时的无功支撑有效提高了风电场的故障穿越能力。文献[2-4]针对双馈风电机组, 在电网故障时采用 active crowbar 电路旁路转子侧变流器, 有效提升双馈风机的故障穿越能力。文献[6]通过在双馈风机直流侧增加卸荷电路来吸收多余能量, 达到稳定电压的目的。文献[7]利用串联制

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50867004)

动电阻提高风电场 LVRT 能力的方法, 提出基于转速-电压动态稳定域的制动电阻投切策略, 并针对基于恒速风电机组的典型风电场模型进行暂态仿真。文献[8]以某地区电网为例, 通过计算系统中所有母线依次发生短路时对风电机组端电压影响程度, 据此给出了双馈风电场 LVRT 功能中的电压限制值。串联制动电阻能够提高恒速异步风机的故障穿越能力已研究了很多年, 但能否提高变速恒频机组的故障穿越能力还很少有报道。这里主要针对制动电阻接在变速双馈风电场升压变电站的低压站与将制动电阻接在双馈风机机端, 在系统发生故障时, 对风电机组故障穿越能力的影响进行分析。试验结果表明: 不论将制动电阻接在风电场升压变压器处还是风机机端, 都能有效提高风电机组故障穿越能力。

1 故障穿越与双馈风电机组暂态特性

1.1 风电机组的故障穿越能力

故障穿越能力是指风电场 PCC 点的电压出现跌落时, 风电机组继续保持并网运行, 穿越这段故障时

间,甚至能为系统提供一定的无功支撑。所以故障穿越是对并网风机在电网出现电压跌落时仍保持并网的一种特定的运行功能要求^[5]。

德国的 E.ON 公司对风机低电压做出严格规定。风电机组的控制曲线图如图 1。

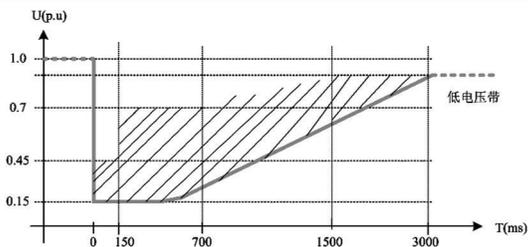


图 1 德国 E.ON 公司故障穿越功能标准

图中粗线以上区域是风电机组应该保持并网运行区域。如图 1 所示,电压降低至 0.15 p.u. 时要求风电机组在线运行 0.625 s, 0.45 p.u. 时要求风电机组继续运行 1 s, 0.7 p.u. 时继续运行 2 s 而电压在不低于 0.9 p.u. 时要求风电机组能够持续运行。

1.2 双馈风电机组暂态特性

双馈风电机组的结构是定子直接与电网相连,转子则通过一个背靠背的 PWM 变流器与电网相连。在电网发生故障时,电网电压的跌落直接反应在双馈风机定子侧。而定子磁链则不会发生突变,风轮机输入机械功率短时也不会减少,转子加速最终造成转子绕组的过电压与过电流^[9]。如果短时的过电流不能得到有效抑制,则不免会对 PWM 变流器的电力电子器件造成损坏^[10]。如果风机保护装置动作使得风机退出运行,有可能会加剧事故,这会对电网的稳定运行造成严重影响,因此,必须采取有效措施,来减少电网电压跌落时产生直流侧过电流,提高风机故障穿越能力。

2 串联制动电阻原理介绍

图 2 是风电场接入系统的模型图,在这里,制动电阻接在风电场升压变压器低压侧。串联制动电阻接在每台风机机端风电场模型如图 3 所示。串联制动电阻由电阻器、旁路开关和控制器组成。正常情况下,旁路开关处于闭合状态,将电阻器短接。在发生故障情况下,旁路开关断开,使电阻器接入电网,当故障消除,控制器使旁路开关闭合,从而电阻器退出运行。串联制动电阻的作用在于,在电网发生严重故障电压跌落很

低情况下,电阻器利用很大的短路电流产生的压降,抬升风机机端电压,吸收风机过剩有功功率,避免转子加速过多,提高了风电机组的故障穿越能力^[7]。

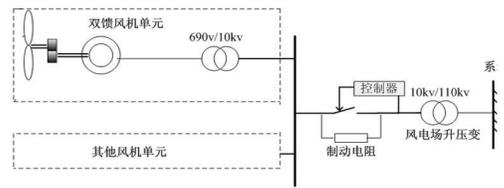


图 2 串联制动电阻接在升压变低压侧

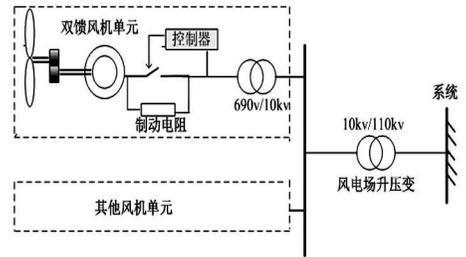


图 3 串联制动电阻接在双馈风机机端

3 制动电阻对故障穿越影响分析

主要考虑以下两种方案。方案 1:将制动电阻接在风电场升压变压器低压侧;方案 2:将制动电阻接在每台风机机端。在系统侧发生三相故障时,制动电阻对变速双馈风机故障穿越能力的影响。为增加分析结果的准确性,取以下假设条件。

- (1) 风电场风速保持不变为 14 m/s
- (2) 故障期间风电机组内部保护装置不动作;
- (3) 无桨距控制与无功补偿措施;
- (4) 设制动电阻投切控制器从判断故障到使开关动作总延时时间为 50 ms

3.1 算例系统

算例系统如图 4。算例中风电场采用“一机一变”,各风机经过机端升压变压器升至 10.5 kV,然后汇总后统一经过升压变压器接入 110 kV 系统中,再经过双回输电线路与等值外部系统相连,系统阻抗 $Z_s = 0.0164 + j0.435 \Omega$ 。PCC 为风电场接入系统的并网点。且在风电场 PCC 点接有 40 MVA 的负荷。风电场装机容量为 49.5 MW。机组采用恒功率因数控制的变速双馈风电机组。其中双馈风电机组的相关参数如下:机端电压为 690 V;额定功率为 1.5 MW;发电机转子电阻 0.0155 p.u. 转子电抗为 0.109 p.u. 定子电阻为 0.0078 p.u. 定子电抗为

0.175 p.u. 励磁电抗为 3.057 p.u. 电机参数 ω_g 为 1200 r/min; 风轮叶片参数 R 为 35.2 m, 发电机转动部分惯性时间常数 T_j 为 7.36 s 极对数为 3。

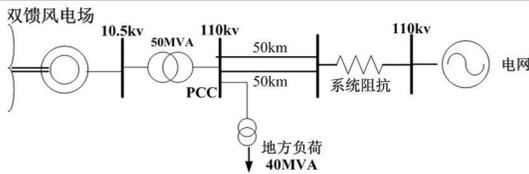


图 4 风电场接入电网的系统图

3.2 方案 1 结果分析

将制动电阻 (阻值取 15Ω)^[11] 接在风电场升压变压器低压侧, 系统侧在 1 s 时刻发生三相对地短路, 故障持续 0.3 s 结束。分别就以下三种情况进行仿真验证。

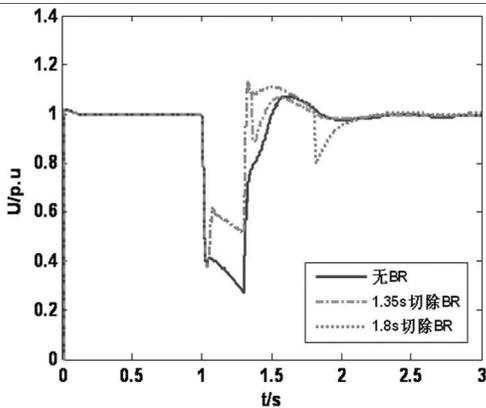


图 5 1号双馈风机机端电压

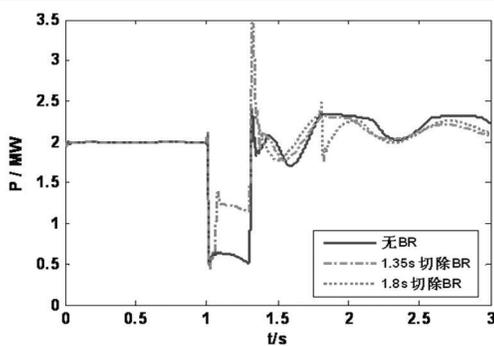


图 6 1号双馈风机机端有功功率

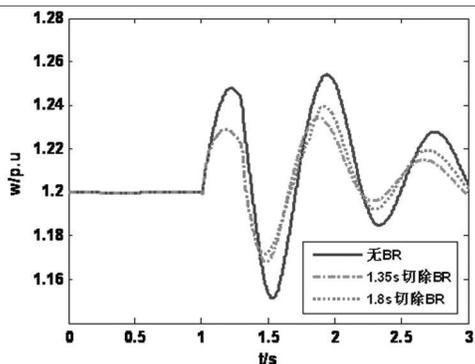


图 7 1号双馈风机转子转速

(1)故障期间不投制动电阻;

(2)时刻 1 s 故障发生, 1.05 s 制动电阻投入运行, 1.3 s 故障结束, 1.35 s 切除制动电阻;

(3)时刻 1 s 故障发生, 1.05 s 制动电阻投入运行, 1.3 s 故障结束并不切除制动电阻, 在 1.8 s 将制动电阻切除。

选取双馈风电场 1 号风机作为监测对象, 1 号风机的动态运行曲线如图 5 至图 7 所示 (机端电压、有功功率与转子转速)。

由以上仿真图可以看出, 风电机组正常运行时, 机端电压、输出有功功率均保持在额定值, 在 1 s 时刻发生三相故障时, 风电机组机端电压与输出电磁功率突然跌落, 且转子开始加速。此时将制动电阻投入系统运行, 由图 5 可以看出, 风机端电压只降低到正常电压值的 0.54 倍左右, 相比无制动电阻的情况, 风机机端电压抬升了近 0.2 倍正常值, 且故障切除后能很快回到正常值, 波动很小。但如果故障小时一段时间后切除制动电阻, 机端电压会有较大波动。由此可得, 故障期间接入制动电阻能明显提高风机机端电压。故障期间, 由于前面假设风力机无桨距控制, 风力机输入的机械功率不会减少, 在图 8 中, 不接制动电阻, 输出有功减少到 0.5 MW, 而接入制动电阻之后, 消耗了风机输出的过剩有功功率。所以相比无制动电阻接入的情况, 风机输出的电磁功率只减少到约 1 MW。制动电阻的投入, 有效减少风力发电机组的机械功率与电磁功率的不平衡^[8]。大风机的转子转速和无制动电阻时相比, 升高量也明显减小, 大大延缓风机加速, 如图 7 所示。

3.3 方案 2 结果分析

将制动电阻串接在每台风机机端, 电阻大小会使风机等值电路发生变化, 主要影响风电机组转子与定子阻抗参数, 考虑上述因素, 制动电阻阻值选择 0.01Ω , 故障方式与故障时间同上, 仍对以上三种情况进行仿真分析。选取双馈风电场 3 号风机作为监测对象, 3 号风机的动态响应曲线如图 8 至图 10。

在图 8 中, 3 号风机机端电压和无制动电阻相比, 抬升量不明显, 但在故障结束后能使机端电压很快回到正常值。但 1.8 s 时刻切除制动电阻, 会使风机机端电压发生较大波动, 使风机机端电压变得不稳定。从图 9 可以看出, 不投制动电阻, 在故障消失后风机输出有功不断波动。需经过较长时间才能稳定在额定值。但投入制动电阻风机有功减少量较小, 在

故障切除后能很快稳定到额定值。但 1.8 s 时刻切除制动电阻也会使功率发生波动。从图 10 可以明显看出,接入制动电阻可以较好地延缓风机转子加速。因此,制动电阻接在风机机端时,对机端电压提升不明显,但能很好稳定有功功率与转子转速。而且需要考虑制动电阻切除时间问题^[12]。

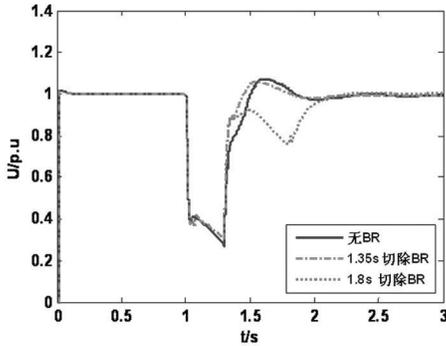


图 8 3号双馈风机机端电压

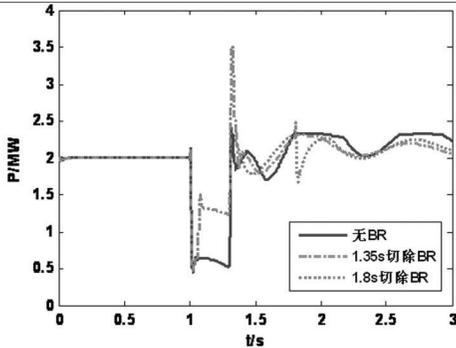


图 9 3号双馈风机机端有功功率

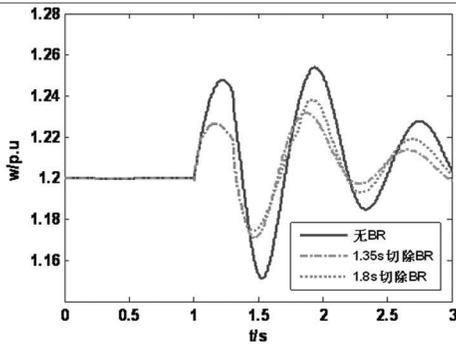


图 10 3号双馈风机转子转速

4 结 语

经过试验验证,可以得出以下结论。

(1)不论将制动电阻接在风电场升压变电站低压站处还是接在风电场每台机组机端,都可以提升风电机组故障穿越能力,有益于风机的暂态稳定性。

(2)将制动电阻接在风电场升压变电站低压站处,对于提升故障穿越要优于将制动电阻接在风机机端时的改善效果。

(3)在制动电阻投切方式上,需要考虑投切时间问题。

参考文献

- [1] 范伟,赵书强,胡炳杰.应用 STATCOM 提高风电场的电压稳定性[J].电网与清洁能源,2009,25(4):40-44.
- [2] 张学广,徐殿国.电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制[J].电机与控制学报,2009,13(1):99-103.
- [3] 魏林君,迟永宁,赵建国,等.双馈变速风电机组低电压穿越控制[J].电网与清洁能源,2009,25(2):41-45.
- [4] 杨涛,迟永宁,郑涛.双馈变速风电机组低电压穿越控制方案的研究[J].现代电力,2009,26(4):36-40.
- [5] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化,2008,20(2):1-8.
- [6] Abbey G, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage stability[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting San Francisco 2005.
- [7] 王虹富,林国庆,邱家驹,等.利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J].电力系统自动化,2008,32(18):81-85.
- [8] 肖盛,张建华,郭世繁,等.并网双馈风电机组低电压穿越能力研究[J].电网与清洁能源,2010,26(2):69-73.
- [9] 操瑞发,朱武,涂祥存,等.双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J].电网技术,2009,33(9):72-77.
- [10] 胡家兵,孙丹,贺益康.电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J].电力系统自动化,2006,30(8):21-26.
- [11] MORREN Johan, DE HAAN Sjoerd W H. Ride through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator during a Voltage Dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [12] Andrew Causebrook, David J Atkinson, and Alan G. Jack. Fault Ride-Through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors[J]. IEEE Transactions On Power System, 2007, 966-975.

作者简介:

赵海岭(1984),男,硕士研究生,研究方向风力发电与并网技术;

黄伟(1979),男,工程师,研究方向为电气自动化。

(收稿日期:2011-04-02)

激励性监管下的电力市场需求侧分时电价机制研究

李俊, 刘俊勇, 张力, 胥威汀

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 当前中国电力市场体制下, 供电公司需要制定需求侧分时电价以提高电网效率, 而政府对销售电价体系制定承担着监管责任。从 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路出发, 将不同时间段的电力供给看作具有相互替代性的不同服务, 考虑电力负荷和分时电价的特殊性, 建立基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型。模型将峰时段可能造成的阻塞成本上涨或新增电网投资作为外部性因素, 引入超弹性概念修正各时段负荷需求价格弹性, 并增加带权重的 Ramsey 指数保障社会福利分配的相对公平, 为政府确定分时电价水平以激励性监管供电公司的需求侧分时电价提供了理论参考。

关键词: 激励性监管; 分时电价; Ramsey-Boiteux 定价; 电力市场; 需求侧

Abstract: Under the current system of electricity market power company needs to formulate time-of-use (TOU) price to improve the efficiency of the grid but the government bears the responsibility for the regulation of the TOU pricing. Based on the basic idea of the Ramsey-Boiteux pricing mechanism and considered the characteristics of power load with TOU price regarding the power supply of different times as different service which can substitute each other the TOU pricing model is established based on the maximization of social welfare. The model takes the increased congestion costs of peak load and the additional network investments as external factors uses the concept of super-elastic price instead of price elasticity and increases the weight of the Ramsey index to protect the fair distribution of social welfare relatively which provides a reference for government to regulate the TOU price.

Key words: incentive regulation; time-of-use (TOU) price; Ramsey-Boiteux pricing; electricity market; demand side management (DSM)

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0005-04

0 引言

供电公司制定合理的需求侧分时电价, 通过电价信号引导电力用户调整用电行为合理用电, 可促进资源的优化配置, 提高整个电力系统的效率。而电力作为一种关系国计民生的垄断性公用品, 对其销售价格的制定, 政府需监管价格水平 (最高限价), 防止供电公司利用分时电价过分剥夺消费者剩余。因此, 政府担负着分时电价的激励性监管职责, 政府如何确定分时电价最高限价或价格水平以激励性监管供电公司制定合理需求侧分时电价, 是亟需解决的问题。

国内外大量的电力工作者及学者在需求侧分时电价方面做了深入细致的研究。Kischen D. S 等着重研究了负荷需求弹性并在弹性角度建立了需求侧分时电价模型, 开辟了需求侧研究分时电价的先河^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金 (50977059)

汤玉东、吴军基等基于 DSM 的总目标建立了分时电价的数学模型, 并运用模糊半梯度隶属度函数方法, 从负荷曲线上各点分别处于峰时段和谷时段的可能性入手, 优化了峰谷时段的划分办法^[2]。面对分时电价模型中遇到的多目标规划问题, 谭忠富等将目标函数中最大最小值问题转化为约束条件, 构造新多目标非线性优化模型, 然后采用模糊数学中的最满意方法求解多目标模型^[3-4]。曾绍伦、任玉珑等将博弈论引入分时电价研究中, 在政府限价的前提下允许电力公司调整电价以实现电力负荷控制的目标, 利用博弈论制定了由政府确定电价水平、电力公司确定电价、电力用户确定用电量的分时电价模型^[5]。从用户价格响应和满意度的角度, 丁伟、袁家海等^[6]提出建立用户的电价响应矩阵以反映用户对峰谷分时电价的响应, 并综合考虑用户用电方式的满意度和电费支出的满意度, 给出了峰谷分时电价优化决策模型。文献^[7]重点研究了用户反应机制, 通过多代理仿真研究

分时电价下的用户分时反应机制,讨论了供电公司对分时电价政策的调整问题。由于实施需求侧分时电价后供电公司风险增大,文献 [8-11]从成本角度,考虑节能调度、价格联动等影响因素,对发电侧和需求侧联动分时电价进行了研究。以上研究都是站在供电公司角度,考虑实施怎样的需求侧分时电价对供电公司有利,而需求侧分时电价作为销售电价,政府具有监管的职能,为防止供电公司利用分时电价过分剥夺消费者剩余,这就需要对从政府的角度研究对需求侧分时电价的规制水平。

Ramsey 次优定价体系已被公认为针对垄断行业激励性监管的有效方法。但由于电力负荷及电力网络的特点,峰时段的大量负荷需求可能引起阻塞成本上涨或电网投资增加等外部性因素发生变化,同时不同时间段的电力需求并非相互独立而是根据价格信号彼此影响的,和拉姆齐定价的假设条件不符。再者电力服务还具备公用性的特点,其弹性相对较小的服务大部分是生活用电需求,这部分电价的调控和基本的拉姆齐定价结论矛盾^[12]。在 Ramsey-Boiteux 定价思路的基础上,引入峰时段可能造成的阻塞成本上涨或电网投资增加等作为外部性变量,将不同时段的电量供给看作相互替代性的不同服务,利用超弹性概念打破基本 Ramsey-Boiteux 定价模型中服务相互独立的假设,同时利用附带权重的 Ramsey 指数完善对低弹性市场电价的约束,通过社会福利次优制定一套基于政府角度分时电价监管水平的方法,以实现政府对供电公司实施需求侧分时电价的激励性监管。

1 拉姆齐定价理论

Ramsey 定价是针对公共垄断行业不能实现边际成本定价情况下的次优定价理论。

假定一个公共事业部门提供 n 项服务, $k=1, \dots, n$ 其数量为 $q=(q_1, \dots, q_n)$ 。价格向量 $p=(p_1, \dots, p_n)$ 的需求函数为 $q_k=D_k(p_1, \dots, p_n)$ 。符号 $\eta_k=-[\partial D_k / \partial p_k] / [D_k / p_k]$ 表示服务 k 的需求弹性。在需求独立的情况下, q_k 仅仅是 p_k 的函数,且

$$\eta_k = -[\partial D_k / \partial p_k] / [D_k / p_k]$$

公司收入为 $R(q) = \sum_{k=1}^n p_k q_k$ 。设 $C(q_1, \dots, q_n)$ 表示成本函数。如果联合成本为 k_0 , 不变的边际成本为 c_1, \dots, c_n , 则

$$C(q_1, \dots, q_n) = k_0 + \sum_{k=1}^n c_k q_k$$

Ramsey 定价的基本思想是在保证垄断企业收支平衡的前提下,实现消费者剩余最大化,即

$$\begin{aligned} \text{OF: } & \text{MAX} \{S(q) - C(q)\} \\ \text{ST: } & R(q) - C(q) \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

为计算上的便利,用其对偶规划模型代替模型 (1),即在提供满足 Ramsey-Boiteux 基准社会福利的基础上使公司利润达到最大。

$$\begin{aligned} \text{OF: } & \text{MAX} \{R(q) - C(q)\} \\ \text{ST: } & S(q) - C(q) \geq S(q^*) - C(q^*) \end{aligned} \quad (2)$$

对模型 (2), 设 $1/\lambda$ 表示约束的影子价格, 当需求独立时, 对 q_k 一阶求导可得 Ramsey 定价公式为

$$\frac{p_k - c_k}{p_k} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \cdot \frac{1}{\eta_k} \quad (3)$$

式 (3) 中 $\lambda / (1 + \lambda)$ 表示 Ramsey 指数, 用 R 表示。式 (3) 表明, 每类服务的价格在边际成本上的涨价幅度 $(p_k - c_k) / p_k$ 与其需求价格弹性成反比, 这就是著名的反弹性规则 (inverse elasticity rule IER)。Ramsey 定价考虑服务的边际成本、用户需求价格弹性对服务价格的影响, 在边际成本一定的情况下, 对于需求价格弹性较大的服务, 如果提价过高, 就会引起需求量的明显减小, 致使消费者福利损失; 如果给需求价格弹性较小的服务提价, 引起的需求量变动相对较小, 对社会福利的影响也较小。

由于模型 (2) 中 Ramsey-Boiteux 基准社会福利没有严格的标准, 为增加激励性, Ramsey 定价模型的进一步演化成为最高限价模型, 在此不再详述。

2 基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型

2.1 模型介绍

基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型是在 Ramsey-Boiteux 定价思路结合电力市场的自身特点的改进和完善, 其改进和完善主要在以下方面。

1) 由于电网建设和运营的特殊性, 如果某时段的电量超过电网最大阈值负荷, 将会造成网络瘫痪。解决该问题必然导致阻塞成本增加或电网投资增加。将该问题造成的阻塞成本增加或电网投资增加看作外部性变量引入模型。

2) 当分时电价发生变化时, 不同时间段的负荷之间不是相互独立而是互相替代的关系, 在各时段需求弹性的基础上引入交叉弹性进行修正, 利用修正后的超弹性概念代替基本需求价格弹性, 这就打破了传统

Ramsey-Boiteux 定价的假设条件,且更符合电力供给的特点。

3)按照传统的 Ramsey-Boiteux 定价结论,提倡涨价的低弹性市场主要是生活用电,提倡降价的高弹性市场集中在大工业用电,传统的 Ramsey-Boiteux 定价为保证垄断环境中社会福利总体相对最大化,实质上是将生活用电的部分消费者剩余转移到了大工业用电,在社会福利分配方面不尽如人意。文章对低弹性市场引入分段权重的 Ramsey 指数以解决社会福利的分配问题。

2.2 模型假设

1)假设共有峰、平、谷 3 个不同时段,用 $k=1, 2, 3$ 分别表示,不同时间段的电力供给为相互不独立的服务,服务之间存在着替代关系。 η_k 表示各时段的需求价格弹性, η_k 表示交叉价格弹性,超弹性 η_k 表示经过修正的考虑服务之间替代关系的需求弹性,平时段的交叉价格弹性忽略不计。

2)服务的外部性用 B_k 表示。为方便计算,假设其为与线性关系,即

$$B_k = \begin{cases} 0 & q_k < q_{max} \\ b_1 - b_2 q_k & q_k \geq q_{max} \end{cases}$$

当峰值负荷超过阈值负荷 q_{max} 时,外部性表现为负值(表示增加阻塞成本或新增电网投资),且随着负荷的增加而绝对值增大。如图 1 所示。

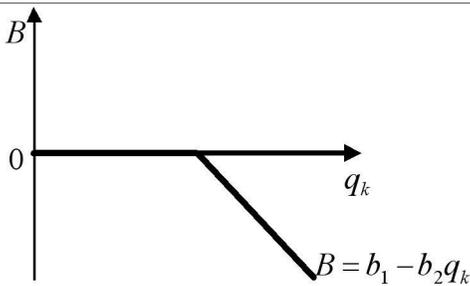


图 1 外部性示意图

3)为公平化社会福利的分配,对低弹性市场中的生活用电,利用 Ramsey 指数 R 设置权重进行分类。设定单个用户的基本用电量为 \bar{q} 实际用电量为 q 关系如下。

$$R = \begin{cases} 0 & q \leq \bar{q} \\ 0.5 & q > \bar{q} \end{cases}$$

即保障基本生活用电,超额的生活用电部分按照 Ramsey 定价,这也是阶梯电价的理论基础。

2.3 模型的建立和求解

按照 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路,引入外

部性变量、超弹性变量和低弹性市场的 Ramsey 权重指数建立模型。

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \{ R(q) + \sum_k B_k q_k - C(q) \} \\ & \text{ST} \begin{cases} S(q) - C(q) \geq S(q^*) - C(q^*) & (4) \\ B_k = \begin{cases} 0 & q_k < q_{max} \\ b_1 - b_2 q_k & q_k \geq q_{max} \end{cases} & (5) \\ R = \begin{cases} 0 & q \leq \bar{q} \\ 0.5 & q > \bar{q} \end{cases} & (6) \\ q_k = a_1 - a_2 p_k & (7) \\ C(q) = k_0 + \sum_{k=1}^n q_k p_k & (8) \end{cases} \end{aligned}$$

约束(4)为 Ramsey 定价的基本约束;约束(5)为外部性等式约束,结合负荷的实际情况可知, $q_k \geq q_{max}$ 仅可能出现在峰时段负荷当中;约束(6)为社会福利分配公平约束,即“生命线”电价约束,仅针对居民生活用电;约束(7)为需求约束;约束(8)为成本约束,其中, k_0 表示沉没成本,即已经完成的电网投资。

经过简单的数学推导可得峰时段的电价关系为

$$\frac{(1 + \frac{2b_2 a_2}{\lambda + 1}) p - (a_1 - \frac{b_1 - 2a_1 b_2}{\lambda + 1})}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_1} \quad (9)$$

平时段的电价关系为

$$\frac{p - c}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_2} \quad (10)$$

谷时段的电价关系为

$$\frac{p - c}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_3} \quad (11)$$

其中, R 为 Ramsey 指数; η_k 表示各时段的需求超弹性,由交叉价格弹性和基本需求价格弹性组成^[13],其关系为

$$\begin{cases} \eta_1 = \eta_1 \cdot \frac{\eta_1 \eta_3 - \eta_{13} \eta_{31}}{\eta_1 \eta_3 + \eta_1 \eta_{13}} \\ \eta_2 = \eta_2 \\ \eta_3 = \eta_3 \cdot \frac{\eta_1 \eta_3 - \eta_{13} \eta_{31}}{\eta_1 \eta_3 + \eta_3 \eta_{31}} \end{cases} \quad (12)$$

2.4 模型讨论

通过对模型的分析 and 求解,可得以下结论。

1)模型的基本思想是在保证供电企业收支平衡的前提下,实现社会福利的最大化。模型以社会福利最大化为第一目标,这正是政府监管垄断公用品销售价格最终目标。

2)由式(12)可知,用交叉价格弹性修正基本需求价格弹性后的超弹性小于其对应时段的基本需求

价格弹性, 实质上是增加了高弹性市场即峰负荷时段的价格上涨空间, 同时增加了低弹性市场即谷负荷时段的价格下降空间, 价格差的拉大更有利于利用价格信号对负荷进行削峰填谷。

3) 根据负荷的特点, 约束 (5) 只出现在峰时段 (按照常理, 其他时段负荷量超过电网最大阈值为小概率事件)。由式 (9) 可知, 外部性为负, 表示成本增加, 在其他条件不变的情况下, 外部性变量的引入将导致峰时段的电价提高。

4) 带权重的 Ramsey 指数只作用于低弹性市场的生活用电类别, 由式 (6) 可知, 在基本用电量 q 之下, Ramsey 指数 R 为 0, 将 $R=0$ 带入式 (11), 可得在 $q \leq \bar{q}$ 情况下 $p = c$, 即对基本生活用电部分, 政府监管供电公司按照边际成本定价。而超过居民基本用电量的生活用电还是采取 Ramsey 定价, 保证了社会福利分配的相对公平。这也是梯级电价理论基础。

3 仿真分析

选取某市典型负荷曲线利用 Matlab 进行仿真, 原始负荷数据见表 1。

表 1 负荷原始数据

时段	负荷 /MW	时段	负荷 /MW	时段	负荷 /MW
0	732.51	8	825.45	16	1 218.46
1	654.23	9	1 108.66	17	1 295.94
2	555.42	10	1 209.14	18	1 370.56
3	488.09	11	1 313.74	19	1 303.14
4	454.54	12	1 384.66	20	1 371.61
5	436.77	13	1 278.44	21	1 315.80
6	537.55	14	1 206.94	22	1 128.38
7	683.56	15	1 088.26	23	904.57

按照文献 [4] 中峰谷时段的划分办法, 将以上日负荷曲线分为 3 个时段: 高峰时段 10:00—23:00, 平段时段 23:00—01:00, 08:00—10:00, 低谷时段 01:00—08:00。为简化问题, 实施分时电价前电力市场中使用单一电价 0.56 元 /kW · h, 取 $\lambda=1$, 即 Ramsey 指数 $R=0.5$ 。仿真结果见表 2。

表 2 分时电价实施前后仿真结果比较

指 标	峰	平	谷
实施前电价 / (元 / kW · h)	0.56	0.56	0.56
实施后电价 / (元 / kW · h)	0.77	0.58	0.09
基本量以下居民生活电价 / (元 / kW · h)	0.29	0.29	0.29
实施前社会福利 / 万元	84.95		
实施后社会福利 / 万元	103.39		
实施前供电公司利润 / 万元	557.21		
实施后供电公司利润 / 万元	593.42		

由表 2 可以看出, 激励性监管下的峰谷分时电价制定前后, 峰时段电价上涨的幅度小于谷时段电价下降的幅度, 符合 Ramsey 定价思路, 即高弹性市场价格变化对社会福利的影响大于低弹性市场价格变化对社会福利的影响, 因此为保证社会福利最大化, 尽量减小高弹性市场的价格涨幅。分时电价实施前后, 社会福利增加 18.44 万元, 达到了垄断次优情况下的社会福利最大化。同时, 实施前后供电公司的利润略有上升。实施分时电价前后负荷变化情况如图 2 所示。

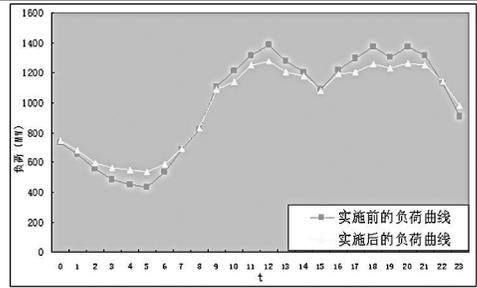


图 2 实施前后负荷仿真比较

从负荷曲线可以看出, 分时电价的实施, 有明显的削峰填谷作用。系统最大负荷从 1 384.66 MW 下降到 1 276.58 MW, 最小负荷从 436.77 MW 上升到 536.34 MW, 有效地降低了系统峰时段压力, 提高了电网运营效率。

4 结 论

从 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路出发, 将不同时段的电力供给看作具有相互替代性的不同服务, 考虑电力负荷和分时电价的特殊性, 将峰时段可能造成的阻塞成本上涨或新增电网投资作为外部性因素, 引入超弹性概念修正各时段负荷需求价格弹性, 并增加带权重的 Ramsey 指数保障社会福利分配的相对公平, 为政府制定分时电价的监管水平提供了理论基础。政府可按该分时电价监管水平对供电公司制定的分时电价进行激励性监管。由仿真可知, 模型具有一定的现实操作性, 可推广至政府对网络垄断型企业激励性监管中的分时价格水平核定。

参考文献

[1] Kischen D S, Stbac G, Cum perayot P et al Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices [J]. IEEE Transaction on Power Systems 2000, 15 (2): 612—617.

(下转第 13 页)

[22] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-120

[23] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.

[24] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.

[25] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.

[26] 王新丽. 系统中性点接地方式的选择 [J]. 电工技术. 2008(9): 70-71.

[27] 朱天游. 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18

[28] 陆国庆, 姜新宇, 江健武, 等. 110 kV 及 220 kV 系统变压器中性点经小电抗接地方式的研究及其应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 70-74.

[29] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.

[30] 赵杰, 黎小林, 吕金壮等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-90

[31] 郑健超, 刘曲, 李立涅. 深层接地极对直流偏磁影响的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 35(6): 1-6.

[32] 陈凡, 曹林, 赵杰, 等. 云广与贵广 II 回直流输电系统共用接地极设计 [J]. 高电压技术, 2006, 32(16): 154-157.

[33] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.

[34] 朱成鼎. 三相五柱式铁心磁通的计算 [J]. 变压器, 1997, 34(1): 16-20.

[35] O. Biro. On the Use of the Magnetic Vector Potential in Finite Element Analysis of 3D Eddy Currents [J]. IEEE Trans on Magnetics 1989, 25(4): 3145-3159.

作者简介:

蒋伟 (1979), 男, 博士, 主要从事高电压绝缘技术方面的研究。

吴广宁 (1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备在线监测及故障诊断、电力系统及自动化、高速机车牵引电机绝缘技术等方面的研究。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 8 页)

[2] 吴军基, 丁宁, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-16.

[3] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型 [J]. 中国管理科学, 2005, 5(13): 87-92.

[4] 谭忠富, 王绵斌, 等. 峰谷分时电价优化模型及其模糊求解方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 9(9): 145-151.

[5] 曾绍伦, 任玉珑, 李俊. 基于博弈论的分时电价模型及其仿真 [J]. 华东电力, 2007, 8(35): 40-43.

[6] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 20(29): 10-14.

[7] Yuan Jia-hai. Customer Response Under Time-of-Use Electricity Pricing Policy Based on Multi-Agent System Simulation [C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006, 814-818.

[8] 胡福年, 汤玉东, 邹云. 考虑双边价格联动的峰谷分时电价机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(27): 61-66.

[9] Emre Celebi and J. David Fuller. A Model for Efficient

Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2007, 22(1): 60-67.

[10] 谭忠富, 王绵斌, 等. 发电侧与供电侧峰谷分时电价联动的分级优化模型 [J]. 电力系统及自动化, 2007, 21(31): 26-34.

[11] 谭忠富, 陈广娟, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 1(29): 55-62.

[12] 齐放, 张粒子, 等. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 2(12): 24-27.

[13] Jean-Jacques Laffont, Jean Tirole. Competition In Telecommunication [M]. POSTS & TELECOM PRESS 2002.

作者简介:

李俊 (1981), 男, 博士研究生. 从事电力市场及电力系统稳定与控制研究。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、智能电网、电力系统稳定与控制等方面的研究。

张力 (1982), 男, 博士研究生, 从事电力市场、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期: 2011-02-25)

变压器直流偏磁抑制措施的研究进展

蒋伟^{1,2}, 吴广宁², 刘愈倬³, 侯春青³

(1 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;
3 山西电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 高压直流输电单极大地回路运行产生的地电流会导致变压器直流偏磁, 引起变压器局部过热、振动加剧、噪声增大等不良反应。分析了抑制流入变压器中性点的直流流量的 3 种主要措施的研究情况, 即串接电容、接动态补偿装置、串接电阻。串接电阻法简单实用、经济性好, 便于在直流接地极附近交流系统推广应用, 指出要以整个交流电网中变压器中性点直流量不超标为目标, 进行变压器接小电阻的合理配置。此外, 变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能有效地抑制直流偏磁, 对相关研究中的进展和存在的问题进行了论述。

关键词: 直流偏磁; 动态补偿; 中性点; 抑制措施

Abstract: HVDC transmission system who works in monopolar operation will generate neutral current that causes transformer DC bias which will cause transformer local overheating and increase the vibration noise and other adverse reactions. The study situation of three main suppression methods of neutral current flowing to the transformer is analyzed that is series capacitance connecting dynamic compensation device and series resistance. The series resistance method is simple practical economical and easy to promote the application in AC system near DC grounding electrode. It is pointed out that the aim is no limit exceeding of the DC value of the whole transformer neutral in AC grids and the rational configuration by connecting the resistor is also proposed. In addition, the optimization design of transformer internal structure and a number of DC transmission lines sharing the same grounding electrode can suppress DC bias. The progress and the existing problems of relevant study are discussed.

Key words: DC bias; dynamic compensation; neutral point; suppression measure

中图分类号: TM81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0009-05

0 引言

特高压直流输电具有超远距离、超大容量输电的优点, 多条特高压直流输电线路的规划建设有利于缓解中国“能源和负荷分布不均衡”的问题, 推动“西电东送、南北互供和全国联网”的电力战略发展的实施^[1-4]。中国直流输电的运行经验表明, 变压器局部过热、振动加剧、噪声增大等问题, 是由直流输电单极大地回路运行产生的地电流窜入变压器引起的, 而特高压直流输电的入地电流达 4 kA 左右, 会引发更严重的变压器直流偏磁问题^[5-7]。

目前, 已有一些关于解决直流偏磁问题的研究, 取得了一些进展, 但也存在不少问题^[8-10]。多数学者通过研究限制流入变压器中性点的直流电流来缓解直流偏磁问题, 利用电容器来限制直流的方法有 2

种: 在交流线路上串联电容器和在变压器中性点接电容器。串接电容后需要变压器接地的有效性, 以及对系统继电保护及自动化装置、输电线路故障定位装置等的影响分析。中性点直流量的反向补偿法只研究了简单的直流发生装置进行补偿, 尚无学者研究具有报警、启动和闭锁等功能的实时、动态补偿装置。有分析变压器中性点串接小电阻限制地中直流的可行性, 并从抑制效果和继电保护角度分析及该校接入小电阻后对系统造成的影响^[11-15]。此外, 变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能有效地抑制直流偏磁, 相关研究取得了一定的进展, 但要在实际直流输电工程中应用, 仍需进行大量的研究和评估^[16-22]。

下面分析了直流偏磁抑制措施的研究进展, 指出了各种抑制方法的优缺点, 对研究中的问题和不足进行了论述, 明确了直流偏磁抑制措施进一步的研究方向, 以能解决实际问题为目标, 提出了抑制直流偏磁

基金项目: 西南交通大学博士创新基金资助项目

相关研究的建议。

1 接电容器抑制法

电容器有“隔直通交”的特性,串联电容器可以达到抑制直流电流的目的,按串联电容器的位置,可分为在输电线路接电容器和在变压器中性点接电容器两种方式^[23-25]。

1.1 输电线路接电容器

输电线路串联电容器在理论上是能有效隔断经变压器中性点串入的直流量,但是,在线路上串入电阻后会增加线路的阻抗,要在较高电压等级的输电线路串联电容器时,电容器的容量必然会很大,这会带来造价、安装、对继电保护的影响等问题。更重要是电容器串接到输电线路后,会降低输电的可靠性,因电容器损坏而带来的损失将是巨大的。另外,系统中的自耦变压器在各电压等级间有电的联系,直流电流可以通过自耦变压器流到另一电压等级的线路。要想有效地隔断串入的直流量,必须在与交流系统相连的所有出线上均装设串联电容器,这必然增加大量资金的投入。因此,该方法在实际应用中并不可行。

1.2 变压器中性线接电容器

相对于在输电线路串联电容器法,在变压器中性点接电容器抑制直流偏磁电流的方法更可行。

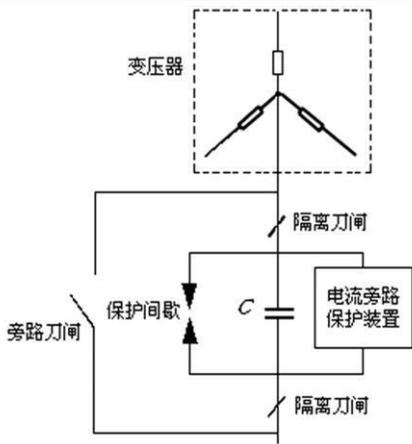


图 1 变压器中性点接电容器及其保护装置

变压器中性点装设电容器时需要在中性点电容器上并联电流旁路保护装置(见图 1),在系统单相短路时,如果电容器两端电压超过一定限值,电流旁路保护装置动作,降低电容器两端的暂态过电压,并且为零序电流提供通路,这样才能尽量减小电容的容量,节约成

本,同时还能减小电容器的体积,便于安装。

但是,该方法也存在以下不足之处。间隙动作受气候、温度、风力、环境污秽物等多项因素的影响,存在着较大的分散性,如果间隙在故障时不能及时击穿,过高的过电压会危及电容器的安全^[26]。另外,中国 500 kV 变压器以及部分 330 kV、220 kV 和 110 kV 变压器中性点经小电抗接地^[27, 28],如果为抑制直流偏磁电流而在中性点接入电容器,需要对电抗器的阻值重新计算,并分析变压器中性点接入电容器和小电抗两个元件后变压器中性点的绝缘水平、对继电保护的影响和是否有效接地等问题。

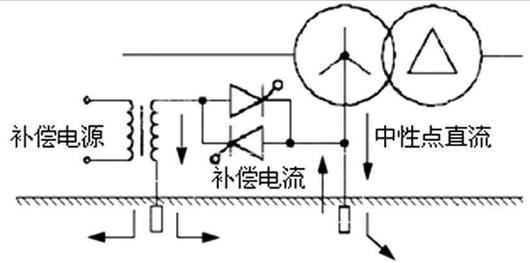


图 2 中性点补偿电流法

2 接动态电流补偿装置

中性点补偿电流法是在出现直流偏磁现象的变压器中性点接一个直流发生装置(见图 2),产生一个与直流接地极电流大小相等,方向相反的直流来进行补偿,以此来削弱甚至是消除中性点直流量,从而避免变压器发生直流偏磁^[28, 29]。

由于接地极直流量的大小并不一定恒定,故该方法关键是要研制高灵敏度的霍尔电流传感器监测中性点直流,再将中性点电流相关信息传输给补偿电流装置,以便进行实时动态补偿,动态补偿装置原理见图 3。

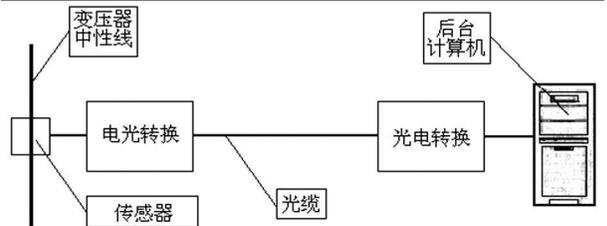


图 3 动态补偿装置原理图

目前尚无中性点直流的动态补偿装置相关的研究。还有一些其他研究采取了直流的电流补偿法的思路,向地网注入电流来升高或降低地网电位,以减小两变电站地网间的电位差。注入电流时要注意地

网、避雷线及变电站其他设备的分流影响,对补偿容量的合理控制是该方法的难点。该补偿法适用于直流较小的场合,它的补偿调节的控制过程比较复杂,应避免出现电流的过补偿。

目前尚无直流偏磁动态补偿装置相关的研究,可将增加该装置的输出接口、提供报警、启动和闭锁等功能,与反向直流电流发生装置和远端独立接地体等设备,构成一个完整的限制变压器中性点直流电流的装置。动态补偿装置完善了中性点补偿电流法,能够避免出现欠补偿和过补偿,可以在直流偏磁严重的变电站使用,但由于制造成本的问题,大面积推广必然会增加资金投入,建议在直流接地极附近的交流系统使用动态补偿装置和接小电阻法相结合,形成高低搭配,既能有效解决直流偏磁问题,又不至于使成本太高。

3 变压器中性点接小电阻法

在直流偏磁严重的变压器接入小电阻可有效抑制流入该变压器的直流量,且接入小电阻成本低,易于推广应用^[30],但可能会导致附近其他变压器中性点直流超标,因此,要以整个目标电网的变压器的直流量都不超过承受限度为目的,对接入的小电阻进行全网考虑,达到既消除了直流量超标变压器的直流偏磁的问题,又不会将直流接地极电流转移到电网中其他变电站的变压器中。另外,要研究中性点接入小电阻后的雷电过电压、内部过电压、对系统继电保护的影响、小电阻的参数选取原则及其保护。

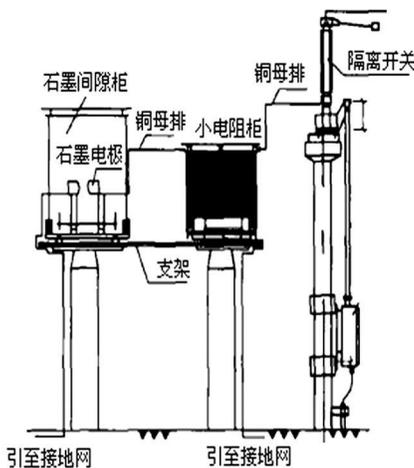


图 4 变压器中性点接小电阻

变压器接小电阻后,应校核变压器中性点的过电

压是否在安全的范围内,需考虑的过电压包括:雷电过电压、短路过电压、操作过电压等。文献 [30] 以春城站为例,对主变压器中性点串接电阻器后雷电过电压、工频过电压和操作过电压 3 个方面进行了校核。

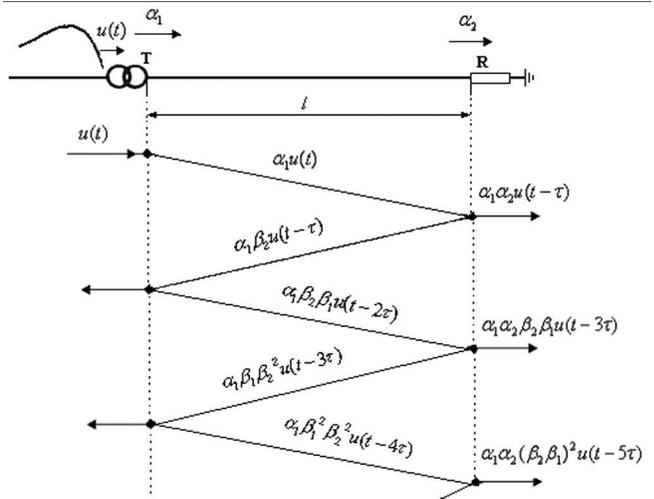


图 5 雷电波侵入变压器中性点的电压行波网络图

雷电侵入波从变压器传播到小电阻时,会发生折反射,进入小电阻的是折射波。折射波与侵入波的关系与变压器和电阻器的暂态阻抗比值紧密相关。由于变压器暂态阻抗通常可达前者的几百、甚至上千欧,而接入电阻的暂态阻抗很小只有几欧姆,因此实际上折射波很小,中性点电位不会因为接入小电阻而提高很多。

实际中短路发生的位置是随机的,导致由短路产生的过电压也不相同,应按最严重的情况进行仿真计算,即短路发生在近端线路。单相短路故障在所有故障中占 65% ~ 70%。随着电网容量的增加,架空输电线间距离的增大,单相短路故障所占比率也将增大。由于两相短路、三相短路无零序电流产生,故分析时可不予分析。应重点分析变压器所在变电站附近线路发生单相短路时产生的过电压。

4 其他抑制直流偏磁的方法

采用深层接地极和多条直流输电共用接地极也能减小接地极电流对变压器的影响^[31-33]。在分析直流偏磁下变压器铁心内电磁分布特点的基础上,也可以采用优化变压器内部设计的方法,改善直流偏磁时变压器内部的漏磁分布,减少损耗,从而降低过热点,达到削弱直流偏磁效应,即局部过热、振动、噪声的目

的,提高变压器承受直流偏磁的能力^[34, 35]。

5 结 论

高压直流输电单极大地回路运行产生的地电流会导致变压器直流偏磁,干扰变压器的安全稳定运行。目前抑制流入变压器中性点的直流量相关措施的研究主要有 3 种,即串接电容、接动态补偿装置、串接电阻。串接电阻法简单实用、经济性好,便于在直流接地极附近交流系统推广应用,但要以整个交流电网中变压器中性点直流量不超标为目标,进行变压器接小电阻的合理配置。动态补偿装置能够避免出现欠补偿和过补偿,可以在直流偏磁严重的变电站使用,但由于制造成本的问题,不宜大面积推广。建议在直流接地极附近的交流系统使用动态补偿装置和接小电阻法相结合,形成高低搭配,既能有效解决直流偏磁问题,又兼顾了经济性。另外,变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能起到抑制直流偏磁的作用。

参考文献

[1] 国家电网公司. 溪洛渡、向家坝水电站输电方案优化论证报告 [R]. 北京: 国家电网公司, 2005.

[2] 中国电力工程顾问集团公司. 金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华东、华中 ±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告 [R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.

[3] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1—12.

[4] Liang X M, Liu Z H, Wang S W, et al. Planning of UHVDC Transmission System in China [C]. Asia Pacific Region T&D Conference Dalian, China, 2005.

[5] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1—8.

[6] 吴广宁, 蒋伟, 曹晓斌. 现代高压电力工程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[7] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[8] 蒋伟, 吴广宁, 黄震, 等. 特高压直流输电的地中电流对变压器的影响及其计算 [J]. 高压电器, 2008, 44(6): 534—536, 540.

[9] Jiang W ei, Wu Guangning, Xiao Hua, Huang Zhen, Saleh

Yahya Muhammed. Effects of Transformer DC Bias and the Relationship between UHVDC Grounding Current and Grounding Resistances [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2530—2535.

[10] A. Fardoun, E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum. Experimental Analysis of a DC Bucking Motor Blocking Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 88—99.

[11] P. Picher, L. Bolduc, A. Dutil et al. Study of the Acceptable DC Current Limit in Core-forms Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 257—265.

[12] D. H. Boteler, R. M. Shier, T. Watanabe et al. Effects of Geomagnetically Induced Currents in B. C. Hydro 500kV System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 818—823.

[13] 王艳艳. 大规模电网 GIC 治理方法和技术的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2009.

[14] Philip R. Price. Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1002—1008.

[15] D. Tousignant, L. Bolduc, A. Dutil. A Method for the Indication of Power Transformer Saturation [J]. Electric Power Systems Research, 1996, 115—120.

[16] L. Bolduc, A. Gaudreau, A. Dutil. Saturation Time of Transformers under DC Excitation [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 95—102.

[17] Shu Lu, Yili Liu, Jaime De La Ree. Harmonics Generated From A DC Biased Transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 725—731.

[18] Shu lu, Yili Liu. Study of Power Transformer Excitation under GIC [J]. Proceedings of the 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems Detroit, 1993, 879—882.

[19] Shu Lu, Yili Liu. FEM Analysis of DC Saturation To Assess Transformer Susceptibility To Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1367—1376.

[20] Nobuo Takasu, Tetsuo Oshi. An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 1173—1182.

[21] Y. You, E. F. Fuchs, P. R. Bames. Reactive Power Demand of Transformers with DC Bias [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1996, (7—8): 45—52.

- [22] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-120
- [23] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
- [24] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- [25] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.
- [26] 王新丽. 系统中性点接地方式的选择 [J]. 电工技术, 2008(9): 70-71.
- [27] 朱天游. 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18
- [28] 陆国庆, 姜新宇, 江健武, 等. 110 kV 及 220 kV 系统变压器中性点经小电抗接地方式的研究及其在应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 70-74.
- [29] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.
- [30] 赵杰, 黎小林, 吕金壮等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-90
- [31] 郑健超, 刘曲, 李立涅. 深层接地极对直流偏磁影响的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 35(6): 1-6.
- [32] 陈凡, 曹林, 赵杰, 等. 云广与贵广 II 回直流输电系统共用接地极设计 [J]. 高电压技术, 2006, 32(16): 154-157.
- [33] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.
- [34] 朱成鼎. 三相五柱式铁心磁通的计算 [J]. 变压器, 1997, 34(1): 16-20.
- [35] O. Biro. On the Use of the Magnetic Vector Potential in Finite Element Analysis of 3D Eddy Currents [J]. IEEE Trans on Magnetics 1989, 25(4): 3145-3159.

作者简介:

蒋伟 (1979), 男, 博士, 主要从事高电压绝缘技术方面的研究。

吴广宁 (1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备在线监测及故障诊断、电力系统及自动化、高速机车牵引电机绝缘技术等方面的研究。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 8 页)

- [2] 吴军基, 丁宁, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-16.
- [3] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型 [J]. 中国管理科学, 2005, 5(13): 87-92.
- [4] 谭忠富, 王绵斌, 等. 峰谷分时电价优化模型及其模糊求解方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 9(9): 145-151.
- [5] 曾绍伦, 任玉珑, 李俊. 基于博弈论的分时电价模型及其仿真 [J]. 华东电力, 2007, 8(35): 40-43.
- [6] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 20(29): 10-14.
- [7] Yuan Jia-hai. Customer Response Under Time-of-Use Electricity Pricing Policy Based on Multi-Agent System Simulation [C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006, 814-818.
- [8] 胡福年, 汤玉东, 邹云. 考虑双边价格联动的峰谷分时电价机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(27): 61-66.
- [9] Emre Celebi and J. David Fuller. A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2007, 22(1): 60-67.
- [10] 谭忠富, 王绵斌, 等. 发电侧与供电侧峰谷分时电价联动的分级优化模型 [J]. 电力系统及自动化, 2007, 21(31): 26-34.
- [11] 谭忠富, 陈广娟, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 1(29): 55-62.
- [12] 齐放, 张粒子, 等. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 2(12): 24-27.
- [13] Jean-Jacques Laffont, Jean Tirole. Competition In Telecommunication [M]. POSTS & TELECOM PRESS 2002.

作者简介:

李俊 (1981), 男, 博士研究生, 从事电力市场及电力系统稳定与控制研究。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、智能电网、电力系统稳定与控制等方面的研究。

张力 (1982), 男, 博士研究生, 从事电力市场、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期: 2011-02-25)

电网规划中的网络损耗评估算法的研究与应用

程秀娟¹, 周步祥¹, 廖烽然²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 烟台市供电公司, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对规划期电网信息不足及不确定性, 结合规划阶段高压、中压和低压配电网各自的特点, 在相关近似处理的基础上, 提出了适合各电压等级的理论线损率估算方法。特别是在中、低压配网中, 针对主干线不同负荷分布情况, 引入了损耗率修正因子法, 最大限度地克服了规划期电网信息匮乏、负荷分布模糊等制约因素, 为规划期线损率评估提供了一种实用性很强的方法, 对优化规划方案起到了一定的作用。

关键词: 损耗率修正因子; 线损率; 电压等级; 配电网规划

Abstract: Considering the insufficient information and the uncertainty of power grid in the planning period, the methods for estimating the line loss rate are presented based on the relevant approximation, combining with the features of high-voltage, medium-voltage and low-voltage distribution network in the planning stages. Especially regarding medium-voltage and low-voltage distribution network, a correction factor method for different load distribution of main line is proposed to overcome the restrictive factors such as insufficient data of power grid in the planning stage and fuzzy load distribution. The method provides a very practical way for the assessment of line loss in the planning period and plays a certain role to optimize the planning projects.

Key words: loss rate correction factor; line loss rate; voltage grade; distribution network planning

中图分类号: TM731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0014-05

0 引言

配电网线损率是电力部门一项综合性经济技术指标, 也是表征电力系统规划设计水平和电网经济运行的一项重要指标。因此, 现代配电网规划中对规划涉及各阶段目标年度都有综合线损率的规划目标要求, 故需要对配电网进行分电压等级理论线损计算, 同时这些指标对规划方案的选择起着非常重要的作用。鉴于配电网规划的灵活性、不确定性以及规划中理论线损指标的工程进度要求, 如何快速有效地计算出各种规划方案的线损水平指标, 成为电力规划工作者关心的问题。

目前, 传统的计算线损的方法有均方根电流法、平均电流法、结点等效功率法、潮流法等。由于这些算法都需要大量的结构和运行数据, 因此主要适用于现运行配电网线损的计算, 针对规划水平年简化和分电压等级组合方法的研究尚不多见^[1-4]。由于规划中电网详细的接线和实际的负荷均不确定, 难以直接应用常规的理论线损方法进行计算。因此, 如何解决规划设计阶段馈线数据匮乏、负荷分布信息模糊、线

路上配电变压器分布不明等制约因素成为规划阶段线损计算的关键技术。

从配电网规划的实际应用角度出发, 根据规划已知的电网信息和按照满足规划所需计算精度的要求, 结合规划期配电网特点, 提出了分电压等级计算线损的简洁实用方法。特别是针对中低压配网结构比较复杂、分支线路多、规模大、相关电网参数难于获取等特点, 引入损失系数法, 采用基于配电变压器容量的等值电阻法, 并根据实际负荷分布规律引入了损失系数法修正线损率, 为估算规划年配网线损率提供了一种合理且实用的方法。

1 规划年线损率及其特点分析

线损率的计算不仅需要配电网的结构参数, 而且还需要大量的运行数据。而规划年不仅缺乏运行数据, 规划网络的结构数据也存在很大的不确定性。因此, 如何克服线损所需参数的匮乏性和网架的不确定性成为规划年线损率估算的关键。

在各规划年, 通过分区负荷预测可得到各 110 kV 变电站的最大负荷。同时, 通过对各 110 kV 变

站进行 10 kV 线路新增及改造规划, 可知各变电站 10 kV 出线数及路径。根据规划年可知的电网信息和满足规划所需计算精度的要求, 以某典型日为例分电压等级分析。

1.1 高压配网分析

规划年 35~110 kV 的网架结构相对确定、结构相对简单、数据容易收集, 各结点的负荷率和最小负荷率均比较高, 各结点的负荷曲线形状也较接近。除一些特殊支路 (如存在功率交换的联络线) 外, 根据其网架规划、分区负荷预测及运行方式, 利用结点等效功率用潮流计算方法算出的支路功率 ΔP_{\max} 与支路的实际等效功率基本一致^[5], 且若干实例计算表明, 其误差控制在 5% 以内^[5]。

表 1 规划年高压配网可知信息

名称	参数
最大负荷损耗功率	$\Delta P_{h \max}$
最大负荷利用小时数 /h	$T_{h \max}$
功率因数	$\cos\varphi$
最大负荷损耗小时数 /h	$\tau_{h \max}$
全社会总用电量 / $\times 10^8$ kWh	S

1.2 中压配网分析

中国中压配网虽然庞大, 但是一般都是辐射状网络。针对规划阶段馈线数据匮乏、实际负荷分布信息模糊、馈线详细接线不确定以及线路上配电变压器分布不明等制约因素, 现以规划网主干线为单元做以下近似处理。

(1) 根据对中压配网负荷预测, 可知中压配网最大总负荷 P_{\max} , 假设在某种典型接线方式下, 负荷均匀分布到每条馈线上, 且馈线总条数为 Y, 则可知单条馈线的平均负荷量为

$$P_{l0} = P_{\max} / Y \quad (1)$$

(2) 假设规划设计中每条馈线采用配电变压器型号基本相同, 负载率基本一致 (一般考虑经济负载率为 0.6~0.7), 根据主干线负荷量可估算出每条馈线所带的平均配电变压器总容量及其台数。

根据以上分析便可估算出主干线单条馈线的功率损耗 ΔP_{l0} , 考虑次干线损耗引入修正系数 μ (一般取 0.8), 可得单条馈线损耗。

$$\Delta P_{l0} = \Delta P_{l0}' / \mu \quad (2)$$

(3) 假设规划水平年中压配网典型接线方式分区有 M 个, 由单条馈线损耗逐个累加便可得到整个中压配网的线损率。

1.3 低压配网分析

表 2 规划年中压配网可知信息

可知信息	分区典型接线
线路总负荷 /MW	$P_{\text{总 max}}$
线路主要型号	LGJ-XXX
线路条数	N
配变主要型号	如 S11(250 kVA)
线路平均配变台数	W
平均架空长度 /km	L
最大负荷利用小时 /h	$T_{\text{总 max}}$
功率因数	$\cos\varphi$
最大负荷损耗小时 /h	$\tau_{\text{总 max}}$

在低压配网这个电压等级上, 配电网要比中压配网复杂得多, 并且缺乏完整的、准确的线路参数和负荷参数。考虑到低压线的电量损失在全网损失中所占比例较小 (一般 0.4 kV 低压线损都只占总线损的 5% 以下)^[5], 所以用简化方法估算低压线损率对总线损的计算误差不会有明显的影响。因此规划年可以只估算典型台区线损率。先按照容量选取典型台区, 并计算各个容量下典型台区的平均线损率, 再用月供电量之和乘以平均线损率, 得出台区损耗, 最后将各组台区损耗汇总。

表 3 规划新建典型台区可知信息

可知信息	典型台区	
	低压主干线	低压次干线
线路主要型号	LGJ-XXX	LGJ-XXX
平均架空长度 /km	0.04	0.12
负荷性质	居照、商业、动力等	
公变总用户数	X	

2 高压配网线损率的评估

计算日假设在某种运行方式下, 对高压配网进行潮流计算便可知典型日的功率损耗 ΔP_{\max} 。然后根据最大负荷损耗时间法 (T- τ 法) 来估算线损。假定负荷恒定为最大, 经过最大负荷损耗时间 τ_{\max} , 网络中损耗的电能与实际电网全年损耗的电能相等, 从而得到年线损电量及线损率。

$$\Delta P_{h,y} \% = \frac{\Delta P_{h \max} \times \tau_{\max}}{35/110 \text{ kV 公用网年供电量}} \times 100\% \quad (3)$$

τ_{\max} 是最大负荷利用小时数和功率因数的函数 $\cos\varphi$, 即 $\tau = f(T_{\max}, \cos\varphi)$, 根据 T_{\max} 和给定的 $\cos\varphi$ 查表可得 τ_{\max} 的值。

3 中压配网线损率的评估

考虑到城网是单环网、N 供一备等, 农网大部分

是单负荷, 将中压馈线划分为城网和农网两种典型接线方式, 分别算出城网和农网主干线以及线路上所带的变压器的损耗, 累加可得整个中压的配电网损耗。

3.1 典型接线主干线的线路损耗估算

假设配电线路负荷沿线分布有一定规律时, 利用分散损耗系数法, 根据配电线路出口总的均方根电流、馈线首端负荷及沿线分布形式和主干线参数直接求出总损耗, 不必逐点进行计算^[5]。

在满足实际工程计算精度的前提下, 采用不要求收集运行数据的基于配电变压器容量 (一般考虑经济负载率为 0.6~0.7) 的等值电阻法。馈线等值电阻和代表日均方根电流为 (推导略)。

$$R_{eq1} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{Ni}^2 rL}{S_{N\Sigma}^2} \quad (4)$$

$$I_{ms} = \frac{0.6 S_{N\Sigma}}{\sqrt{3} U_N} \quad (5)$$

式中, S_{Ni} 为通过第 i 段线路供电的配电变压器的额定容量 (kVA); $S_{N\Sigma}$ 为该条配电线路全部配电变压器的额定容量的总和 (kVA); U_N 为线路额定电压; r 为馈线单位长度电阻; L 为馈线长度。

先假设整条馈线负荷集中分布于主干线末端, 可计算得功率损耗 ΔP_{L0} 。

$$\begin{aligned} \Delta P_{L0} &= 3 I_{ms}^2 R_{eq1} \times 10^{-3} \\ &= 0.6^2 \frac{\sum_{i=1}^m S_{Ni}^2 rL}{U_N^2} \end{aligned} \quad (6)$$

再根据规划年该馈线的实际负荷分布, 用线路末端集中负荷供电时的功率损耗乘以损耗率修正因子 G_p 来估算^[6,7], 可得该主干线实际的损耗为

$$\Delta P_L = G_p \times \Delta P_{L0} \quad (7)$$

式中, 末端集中分布时 $G_p = 1$, 沿线均匀分布时 $G_p = 0.333$, 沿线渐增分布时 $G_p = 0.533$, 沿线渐减分布时 $G_p = 0.20$, 中间较重分布时, $G_p = 0.38$ 。

3.2 计及变损的中压配网损耗估算

现对线路上配电变压器做近似处理, 根据单条馈线上的负荷可估算得到每条馈线的平均配电变压器总容量和台数 W 。则根据配电变压器型号可查到每台配电变压器的空载损耗为 ΔP_{T0} , 负载损耗为 ΔP_k , 则馈线上配电变压器总损耗可估算为

$$\Delta P_T = [\Delta P_{T0} + K_i^2 \times \Delta P_k] \times W \quad (8)$$

式中, K_i 为第 i 台配电变压器的平均负载率。

计入分支线损耗引入修正系数, T 为配电变压器

一年投运小时数, 一般取 8760。由此可估算出单条馈线年有功总损耗为

$$\Delta P_{\Sigma} = [\Delta P_L / 0.8 + K_i^2 \Delta P_k \times W] \tau_{max} + \Delta P_{T0} \times T \times W \quad (9)$$

假设规划年典型接线方式分区为 M , 典型接线方式馈线条数为 Y , 则中压配网年线损率可表示为

$$\Delta P_{m,y} \% = \frac{\sum_{i=1}^M (Y \times \Delta P_{\Sigma})}{P_{max} T_{max}} \times 100\% \quad (10)$$

4 低压网综合线损率的评估

对于规划阶段低压线损计算以工程精度需求做适当简化。鉴于 0.4 kV 低压网有三相四线制、单相两线制、三相三线制等供电方式, 利用改进台区等值电阻法估算典型台区线损率, 进而估算整个低压网线损率。

4.1 规划新建台区

对于规划新建或改造较大的台区, 借助改进的台区等值电阻法计算, 结合低压电力网的特殊性, 利用中压电力电量平衡结果计算出一个等效电阻, 线路结构类似 10 kV 线路处理方法。

以三相三线制接线为例, 针对规划线路中的公用配电变压器, 可以按电力平衡结果以及台区用户的负荷性质 (居民、商业、动力等终端用户), 由此得该类配电变压器的等值电阻和典型平均电流为

$$R_{eq1} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i rL}{N} \quad (11)$$

$$I_{av} = \eta \frac{0.6 S_{av}}{\sqrt{3} U_{av}} \quad (12)$$

式中, N_i 为低压线路各计算线段的电力网结构参数; N 为配电变压器低压出口电网结构常数; η 为计入典型负荷的形状系数, 居民用户 η 取 1.84, 商业用户 η 取 1.75, 动力用户 η 取 1.73。

由此得该台区总损耗为

$$\Delta P = G_p \times N I_{av}^2 R_{eq1} T \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中, N 为电力网结构系数, 单相供电取 2, 三相三线制取 3, 三相四线制取 3.5, 对于规划年一般取 3。

对于单相两线制接线, 线路通过电流为 I 此段线路电阻为 R 其损耗为 $I^2 R$ 地线损耗为 $I^2 R$ 相应的三相三线制线路电流为 $I/\sqrt{3}$, 电阻为 R_{dz} , 三条火线损耗为 $3 \times (I/\sqrt{3})^2 R_{dz}$ 。根据损耗相等的原则

$$2 \times I^2 R = 3 \times (I/\sqrt{3})^2 R_{dz} \quad (14)$$

由此得 $R_{dz} = 6R$, R_{dz} 为对应三相四线制线路的计入电阻。

对于三相四线制接线, 假设三相负载平衡, 则地线损耗为 0, 其计入电阻与三相三线制一致。

根据以上分析, 规划新建台区年总损耗为

$$\Delta P = G_p \times N I_{lv}^2 \lambda R_{eq} T \times 10^{-3} \quad (15)$$

式中, 三相制接线线路 $\lambda = 1$, 单相制接线 $\lambda = 6$ 。

4.2 台区损失系数法

针对规划年变动不大的现有低压台区, 按照负荷分类, 借助台区电压损失率法计算。这种方法只要求简单的电压运行数据, 避免了难于整理的电力网结构数据, 既简便易行又相对合理。

抽样检测该网送端电压和末端电压, 得到电压损耗百分数 $\Delta U\%$ 。

计及损失因数补偿的线路功率损耗为

$$\Delta P_{10}\% = G_p (1+a) K_{pU} \Delta U\% \quad (16)$$

式中, G_p 是功率损失系数; a 负荷不对称系数, 规划年取 1.67; K_{pU} 与配电线结构及负荷分布规律有关, 末端集中分布时 $K_{pU} = 1/\cos^2\varphi$, 均匀分布时 $K_{pU} = 2/3\cos^2\varphi$ 。可近似地取 $K_{pU} = 0.75^{[1]}$ 。

5 实际应用

本次规划严格按照《中国南方电网公司 110 kV 及以下配电网规划指导原则》中对平均线损率、供电可靠性、负荷转供能力和电压损耗率等指标的要求, 将规划年各电压等级线路负载率及供电半径控制在合理范围之内^[8]。以海南某地区为例, 算例中分别对城网和农网各取一种典型接线方式进行线损估算。

5.1 高电网线损率实例计算

根据网架规划及负荷预测可知规划水平年海南某地区全社会供电量为 7 328 GW h 经高压网潮流计算后, 得到经过无功补偿后的 110 kV 电压等级电网总有功损耗为 12.657 MW (包括变压器和线路)。根据 $T_{max} = 5 400 \text{ h}$ $\cos\varphi = 0.971$, 查表得最大负荷损耗小时数取 3 600 h 则高压网年线损率为

$$\begin{aligned} \Delta P_{h,y}\% &= \frac{\Delta P_{h,max} \times \tau_{max}}{35/110 \text{ kV 公用网年供电量}} \times 100\% \\ &= \frac{12.657 \times 3 600}{73.28 \times 10^5} \times 100\% = 0.622\% \end{aligned}$$

5.2 中压网线损率实例计算

由负荷预测及网架规划可得规划水平年海南某

区域网和农网两种典型接线的相关数据, 如表 1 所示。

规划水平年海南某区负荷均匀分布, 根据式 (5)、(6) 及 (7) 求得整个中压配网损耗为 133 334.2 MW h。

考虑同时率为 0.95, 规划水平年整个中压配网公用网最大负荷 $P_{max} = 1 201.75 \text{ MW}$, 可得海南某区规划水平年中压配电网的年线损率为

$$\begin{aligned} \Delta P_{m,y}\% &= \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{max} T_{max}} \times 100\% \\ &= \frac{133 334.2}{1 201.75 \times 3 500} \times 100\% = 3.17\% \end{aligned}$$

表 4 海南某区中压网典型接线数据

参数表	分区典型接线	
	城网	农网
线路总负荷 /MW	1 054	211
线路主要型号	LGJ-240	LGJ-120
线路条数	302	85
配电变压器主要型号	S11(250 kVA)	S11(100 kVA)
线路平均配电变压器台数	27	42
平均架空长度 /km	3.21	8.91
最大负荷利用小时 /h	3 500	3 000
功率因数	0.95	0.9
最大负荷损耗小时 /h	2 000	1 700

注: 为了便于统计, 算例中架空线路长度取平均供电半径; 取配电变压器负载率为 0.6。

5.3 低压网线损率实例计算

本次规划只考虑新建台区, 按照《导则》中对规划半径的要求, 县城小于 250 m, 重要乡镇小于 300 m, 农村小于 500 m。考虑海南某区地域特点, 算例中平均架空长度取导则允许最大供电半径的 80%。根据电网可知参数求得线损率如表 2 所示。

表 5 规划新建典型台区接线数据

参数表	典型台区	
	低压主干线	低压次干线
线路主要型号	LGJ-120	LGJ-95
平均架空长度 /km	0.04	0.12
负荷性质		居照
公变总用户数		896
低压网线损率 /%		3.33

注: 线路型号取比例最大的一种。

假设规划水平年中压网公用网负荷全部为低压侧负荷, 最大负荷利用小时数取与中压网相同, 最大损耗小时数取 $\tau_{max} = 1 700 \text{ h}$ 则低压网最大损耗功率为

$$\Delta P = \frac{P_{max} T_{max} \times \Delta P_{L,y}\%}{\tau_{max}}$$

$$= \frac{1\ 201.75 \times 3\ 500}{1\ 700} \times 3.33\%$$

$$= 82.39(\text{MW})$$

假设 10 kV 公用线年供电量与低压公用年供电量近似相等。根据以上三节的计算结果,可估算得到海南某区规划水平年全网的年综合线损率为

$$\Delta P_{\Sigma} \% = \Delta P_{h} \% + (\Delta P_{m} \% + \Delta P_{l} \%)$$

$$\times \frac{10\ \text{kV}\ \text{公用网}\ \text{年}\ \text{供电量}}{35/110\ \text{kV}\ \text{公用网}\ \text{年}\ \text{供电量}}$$

$$= 0.622\% + (3.17\% + 3.33\%) \times$$

$$\frac{1\ 201.75 \times 3\ 500}{73.28 \times 10^5}$$

$$= 4.3\%$$

由以上分析计算可知,到规划水平年,海南某区年综合网损率将达到 4.3%,其中高压网理论线损率为 0.622%,中压网理论线损率为 3.17%,低压网理论线损率为 3.33%,各项指标水平均满足南方电网公司的相关要求^[8]。

6 结论及分析

规划、设计阶段线损的计算主要用于电网规划方案比较,对优化电网有着重要意义。但是由于各种制约因素,目前对规划、设计阶段理论线损计算的研究很少。在实际配网规划实践的基础上探讨一种分电压等级的简化线损估算方法。所提出的适合高压配网、中压配网、低压配网的理论线损率估算方法,特别是对于中低压规划理论线损的估算方法,克服了现有大多数理论计算方法缺乏规划态配网数据的问题。算例表明了所提方法的简洁和实用,能够解决规划期理论线损的计算问题。

对于规划态的理论线损评估,由于网架和负荷分布的不确定性,馈线一般只考虑了网架主干线,对负荷分布在满足实际工程计算精度的基础上做了一定

假设,分电压等级计算模型也是在一定程度的假设基础上建立起来的,但是经过实例验证,已能够满足规划阶段的工程精度要求,对优化电网规划方案起到了一定的作用。

参考文献

- [1] 郭晓军. 回归分析法在线损计算中的应用 [J]. 继电器, 2002, 30(8): 50-51, 54.
- [2] 张超, 刘宪林. 集成神经网络在配电网线损分析中的应用 [J]. 继电器, 2002, 30(7): 3-6.
- [3] 辛开远, 杨玉华, 陈富. 计算电网线损的 GA 与 BP 结合的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 79-82.
- [4] 李秀卿, 汪海, 许传伟, 等. 基于免疫遗传算法优化的神经网络配电网网损计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 37-39.
- [5] 杨秀台. 电力网线损的理论计算和分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1985.
- [6] 赵俊光, 王主丁, 乐欢. 中压配电网规划中馈线电气计算的估算方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 98-101.
- [7] 方向晖. 中低压配电网规划与设计基础 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [8] 中国南方电网公司. 220 kV 以下城市电网优化工作组. 中国南方电网公司 110 kV 及以下配电网规划指导原则 [S]. 2009.
- [9] 付浩, 周步祥, 陈实. 输电网理论损耗计算的改进方法 [J]. 继电器, 2007, 35(7): 28-31, 36.

作者简介:

程秀娟 (1986), 女, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥 (1965), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究工作。

(收稿日期: 2010-11-19)

加强技术监督 给力德阳换流站

四川省首条直流输电工程 ±500 kV 德宝直流输电工程, 定于 2011 年 5 月 26 日至 6 月 4 日进行首次停电检修。

四川电科院为保证此次技术监督任务顺利实施, 专门成立了德阳换流站首检技术监督机构, 明确了现场技术监督项目负责人、专业负责人, 现场安全负责人; 并且制定了详细的技术监督计划表, 明确了技术监督人员职责, 确保现场技术监督不留死角, 为德阳换流站安全投运进行技术保障。

新疆电网 220 kV 短路电流分析和限制措施研究

胡仁祥¹, 晁勤¹, 常喜强¹, 姚秀萍², 焦莉³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 新疆电力公司电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 陕西省电力公司, 陕西 西安 710004)

摘要:随着新疆电网规模的快速发展、大电源的接入、与西北电网联网运行, 新疆电网在满足了不断增长的电力需求的同时, 短路电流的水平也日益增大, 需要高度关注。结合新疆电网的发展规划, 利用 PSASP 程序进行新疆电网短路电流计算, 通过对新疆电网近几年短路电流水平的分析, 短路电流值主要分布区间和短路电流限制措施的分析, 提出新疆电网短路电流存在的问题以及限制短路电流的方法, 为电网断路器设备选型、电网运行方式优化、打开电磁环网, 电网规划提供理论依据和借鉴。

关键词:新疆电网; 短路电流; 限制措施

Abstract: With the rapid development of Xinjiang power grid, the augmentation of its big capacity and the interconnection with Northwest power grid, Xinjiang power grid has satisfied the unceasing power demand, meanwhile, it needs a high attention to the increasing short-circuit current. According to the development plan of Xinjiang power grid, the short-circuit current of Xinjiang power grid is calculated with PSASP program. Through the analysis of short-circuit current in recent years, as well as the analysis of the major distribution areas of short-circuit current and its restrictive measures, the existing problems of short-circuit current in Xinjiang power grid and the methods to limit the short-circuit current are proposed, which provides the theoretical foundation and reference for the type selection of circuit-breaker, the optimization of operating mode, the opening of electromagnetic ring and the planning of power grid.

Key words: Xinjiang power grid; short-circuit current; restrictive measure

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0019-03

0 引言

近几年新疆电网规模和容量不断的增大, 母线短路电流也不断上升, 其部分设备的遮断容量已明显不能满足系统要求。系统短路电流还将继续快速增长。文献 [7-8] 分别对具体电网的短路电流发展过程以及抑制措施进行了分析, 指出网络规划是解决短路电流问题的根本途径。文献 [9-10] 介绍了一种新型的短路电流限制器, 文献 [11] 介绍了小电抗接地对短路电流的抑制作用。

下面重点分析新疆 220 kV 电网短路电流的发展过程, 和不同网架结构运行方式下的短路电流水平对新疆电网的影响。在此基础上提出限制短路电流的方法, 并对各种方法的适用性和经济性进行比较。

1 短路电流计算条件

计算网络包括新疆全区电力系统, 以及与西北电

联网运行。计算新疆电网 2009 年夏季和冬季最大运行方式、2010 年夏季和冬季最大运行方式、以及冬季大负荷时期 750 kV 升压运行、与西北电网联网运行、与西北电网联网合环运行等多种运行方式。

短路电流计算运用母线单相和三相短路电流值, 是由于母线短路电流值大于其他线路的短路电流值, 固可以将其用于校验故障母线的的所有开关遮断容量。

使用的计算程序是中国电力科学研究院开发的“电力系统分析综合程序”(Power System Analysis Software Package PSASP)。

2 新疆 220 kV 电网短路电流分析

2.1 2010 年与 2009 年短路电流比

2010 年新疆电网 220 kV 电压等级电网短路电流水平均较 2009 年有大幅度的增长。

表 1 220 kV 母线短路电流增幅最大的站点

运行方式	母线名	单相短路电流 /kA		三相短路电流 /kA	
		2009年	2010年	2009年	2010年
夏大	交河	4.26	8.54	4.62	9.59
	玉龙	1.42	2.61	1.97	3.4
	莎车	1.82	3.1	1.37	2.2
冬大	玉龙	1.29	2.98	1.2	2.58
	交河	4.28	8.64	4.68	9.54
	莎车	1.77	3.38	1.87	3.65

由表 1 可以看出,在夏大运行方式时,交河的短路电流不论是单相还是三相都比 2009 年时增长了一倍多。在冬大运行方式时,玉龙和交河的短路电流单相和三相都是 2009 年短路水平的两倍。虽然这些母线的短路电流都增长很快,却都没有超过开关额定遮断容量。但这些站点都是需要密切关注。

2.2 2010 年短路电流区间

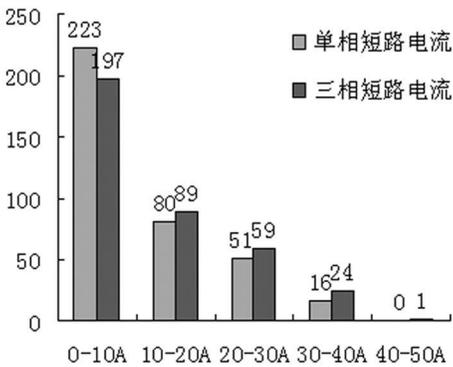


图 1 不同运行方式下单相和三相短路电流区间柱形图

由图 1 可以看出,电网的单相和三相短路电流大都集中在 0~10 kA 的区间,新疆电网的短路电流大都在断路器的额定开断能力之内。这也说明了新疆电网还比较薄弱。也有母线的短路电流在 30~40 kA 和 40~50 kA,都还在断路器的额定开断能力之内,必须引起高度注意。但其中红二电的短路电流升至 39.4 kA,该区 LW15-220(遮断容量为 40 kA)型高压断路器,说明此断路器的裕度已不多,如果再有新的大电源投入,此断路器可能会超标。根据 2011 年的电网规划计算出红二电的短路电流达到了 47 A,已超过其现有断路器的额定容量。鉴于此种情况这里对短路计算方法、分支电流和开关设备进行讨论,最后对这即将超标的问题提出几种限制措施。

3 短路电流计算的注意事项

3.1 计算方法

目前电力系统分析软件在短路电流计算方法上主要分为基于潮流(基于方式)和不基于潮流(基于方案)两种。基于潮流(基于方式)的短路电流计算方法,实质是叠加法原理,在计算中详细模拟发电机、线路、变压器、负荷等元件实际值。不基于潮流(基于方式)的短路电流计算方法,计算时发电机内电势取 1.0,负荷忽略,电压运行水平不考虑,其他都和基于潮流一样,如表 2 所示。

表 2 短路电流计算方法比较

项目	基于潮流	PSASP 不基于潮流
发电机内电势	实际值	1.0
旋转马达负荷	可考虑	忽略
静止负荷	可考虑	忽略
交流线路、变压器支路电阻	考虑	考虑
变压器变比	实际变比	实际变比
交流线路的电容	考虑	考虑
容性、感性无功补偿	考虑	考虑
电压运行水平	实际电压	不考虑

从表 2 可以看出,两种计算短路的方法主要差别在于发电机内电势、负荷和电压运行水平上。从文献 [2] 知,不基于潮流的结果比基于潮流的结果偏大。在基于潮流中,发电机内势为实际值,在发生短路故障时,考虑次暂态,电势 E 将下降而小于 1.0,从而计算出的短路电流也会小于不基于潮流的计算结果。

在考虑负荷时,若负荷模型采用感应电动机,在基于潮流方式下计算结果中将含有感应电动机提供的短路电流。在不基于潮流中,电压运行水平不考虑,即在发生短路故障时,不考虑电压下降的因素,所以其计算结果要大于基于潮流的计算结果。

3.2 分支电流

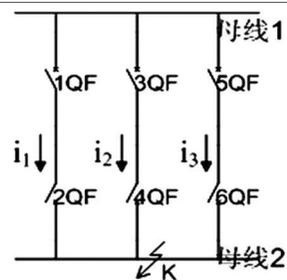


图 2 母线 K 点发生短路

本次计算短路电流所用程序为 PSASP(不基于潮流)。该方法在计算短路时,短路电流是母线处的短路电流,即为所有并列运行输电线的合电流。如图 2 所示,在 K 点发生短路故障时, K 点的短路电流为

三条支路的合电流 (即 $I_1 + I_2 + I_3$)。从图 2 可知母线短路时, 如果三条输电线长度和各种参数相同的话, 那么流过每个断路器的短路电流只有母线处短路电流的三分之一。

短路点发生在图 3 所示的 K1 点 (K1 点假设为 2QF 的出线端) 时, 那么 K1 点短路电流为 I_2 与 I_1 之和 ($I = I_1 + I_2$), K1 的短路电流和母线处的短路电流一样大。然而流过 2QF 的短路电流却只有 I_2 , 此电流明显小于 K1 的短路电流, 小于图 1 所示的母线短路电流。

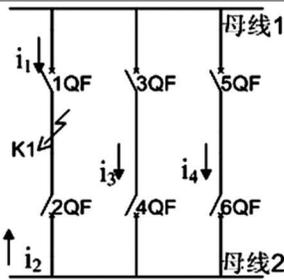


图 3 输电线支路在 K1 点发生短路

而如果短路点 K1 发生在 1QF 的出线端, 那么短路点 K1 的短路电流为 $I_1 + I_2 + I_3$ 。此短路电流也等于母线处的短路电流, 然而流过 2QF 的短路电流也只有 I_2 与 I_1 之合。该电流也小于母线处的短路电流。其余断路器流过的短路电流将更小于母线处的短路电流。

从上面的分析可知, 实际流过 QF 的短路电流是小于母线处的短路电流。而在实际的工程中, 各处的断路器是按母线处的短路电流来校验与安装的。

3.3 开关设备

以前的开关设备以多油开关设备或者少油开关设备为主, 由于其开关设备自身性能作用需要留有 30% 的预度, 即短路电流 / 开关遮断电流 70% 的开关设备才算合格; 70% 的开关设备为不合格。而随着新工艺的发展, 目前开关为 SF₆ 开关, 此开关性能好。然而是否可以不留预度, 或者少留预度, 如 10% 的预度, 值得思考和斟酌。

4 限制短路电流的措施

4.1 目前限制短路电流的主要措施

1) 母线分段运行; 2) 串联电抗器; 3) 提高断路器的遮断容量; 4) 电磁解环运行; 5) 采用适当的电压调节手段; 6) 新型高压熔断器或者短路电流限制

器。

4.2 限制其短路电流的方案

上面介绍的几种常用限制短路电流的方法, 选其最常用的运用在红二电上, 从技术性、安全性和经济性三方面讨论采用这几种方法的优缺点。

4.2.1 更换大的遮断容量断路器

更换大的遮断容量断路器, 此方法能马上解决红二电短路电流超标问题。但随着新疆 750 kV 电网建设的进度、电网网架的加强, 电网短路水平将继续增加, 更换断路器是不能从根本上解决短路电流的超标问题。而且此方法的造价也很大, 如设备价格和更换设备时造成停电等直接经济损失。

4.2.1 电磁解环运行

电磁解环运行, 从方法的运用效果可以看出, 红二电的单相短路电流下降了 2.72 kA, 三相短路电流下降了 2.18 kA。从限制短路电流的目的来说, 解环很有利。从经济上讲, 文献 [17-18] 从理论上证明了解环运行将更经济。从安全稳定来说, 当新疆 750 kV 电网网架结构坚强了, 实现解环运行更有利于电网的安全运行。

4.2.1 母线分列运行

母线分列运行, 此方法能有效地增大阻抗, 限制短路电流。而且也是最简单、最经济和最有效的方法。但此方法将削弱系统的电气联系, 降低电网安全裕度和运行灵活性。故障时, 母线突然分段运行, 这时可能将造成所接负荷分配不平衡, 严重过负荷时可能会使设备损坏, 给电网的安全运行带来的隐患。而如果故障发生在输电线的出线端时, 要等母线分段后方可将故障点的断路器跳开, 使故障持续时间延长, 将给电网运行造成严重的后果。

综上所述, 限制红二电短路电流即将超标问题上, 首先推荐考虑解开电磁环网运行, 而后是分母运行。

5 结论

对新疆电网的短路电流计算知, 电网的短路电流与 2009 年比明显上升。特别是与西北电网的联网运行使得短路电流进一步上升。从技术性、安全性和经济性等方面讨论了用于限制红二电的短路电流的几种方法, 得出首选解环运行, 而后是分母运行。短路

(下转第 39 页)

(2)按躲大容量变压器低压侧短路整定。

$$I_{dzj} = K_k K_{jk} \times I_{b,max}^{(3)} / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.5; $I_{b,max}^{(3)}$ 为大容量变压器低压侧最大三相短路电流; n_{LH} 为电流互感器变比。时限取其大值: $t = 0.2\text{ s}$

3.6.2 过流保护整定计算

过流保护整定原则如下。

(1)躲最大负荷电流整定。

$$I_{dzj} = K_k K_{jk} \times I_{h,max} / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.2~1.3; $I_{h,max}$ 为最大负荷电流; 其余参数与前相同。

(2)与出线开关速断保护电流最大定值配合。

$$I_{dzj} = K_k \times I_{dzj} / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.1~1.15; $t = 0.5\text{ s}$ (微机保护取 0.3 s)。

4 结 语

随着电力系统的发展, 系统短路电流增加, 10 kV 母线近端短路电流将对一次设备特别是变压器带来较大的安全隐患。快速切除 10 kV 母线近端短路故障, 保障了一次设备特别是变压器安全, 同时迅速恢

复变电站 10 kV 母线电压, 减少电网电压波动, 提高了 10 kV 系统的供电可靠性, 同时提升了电力系统的优质服务和经济效益。总结多年保护整定的工作经验, 针对电流保护时限级差小, 在满足一般整定原则的基础上提出了一种适合实际应用的 10 kV 及以下系统电流保护的整定原则, 保证 10 kV 及以下系统安全、稳定、可靠运行。

参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [s].
- [2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程 [s].

作者简介:

宋汉蓉 (1962), 女, 四川德阳人, 本科, 从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。

宋 其 (1964), 男, 四川德阳人, 研究生, 从事过电力营销工作。

尹 秦 (1963), 男, 四川工程职业技术学院。

(收稿日期: 2010-11-12)

(上接第 21 页)

电流计算方法也会产生短路电流计算误差, 那么现如今对短路电流的评价标准是否可以调整或者放宽。而且新疆的风电接入后对电网的单相、三相短路电流也有助增作用。这就使得要备加注意各地的母线短路电流是否超过各处断路器的遮断容量。

参考文献

- [1] 谢泽权. 限制短路电流技术的探讨 [J]. 广东电力, 1997, 10(2): 29-31.
- [2] 田华. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 56-60, 65.
- [3] 李明, 张小青. 电力系统故障限流器技术的研究 [J]. 电气时代, 2005(4): 54-56.
- [4] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] 何鸿基, 史可琴. 西北电网运行中的新问题 [J]. 中国电力, 2000, 33(5): 42-44.
- [6] 张炜. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社,

2004.

- [7] 陈怡静, 黄民翔. 宁夏电网短路电流水平分析和限流措施研究 [J]. 能源工程, 2008(2): 10-14.
- [8] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
- [9] 张益, 张滨, 等. 短路电流限制器对电力系统暂态稳定影响的研究 [J]. 继电器, 1998, 26(5): 8-11.
- [10] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 41-42.
- [11] 毛雪雁, 宣晓华. 500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的研究 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 26-29.
- [12] 成涛, 成连生. 电力系统的电磁环网运行 [J]. 华中电力, 2001, 14(6): 17-19.

作者简介:

胡仁祥 (1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

晁 勤 (1959), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究。

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 研究为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2010-11-12)

基于 LCC 的配网多点分布式发电并网方案研究

林 涛

(达州电业局, 四川 达州 635000)

摘 要: 分布式电源并网会带给配电网多方面的影响, 为衡量不同地理位置的多台分布式电源并网方案的 (可靠性) 效益—成本, 将全寿命周期成本的概念引入配电网中。依据 LCC 的概念, 通过计算不同分布式电源并网方案的投资成本、维护成本、设备残值, 以及基于可靠性的平均停电损失费用, 求得不同方案下的量化成本, 并给出对应算例加以验证。

关键词: 分布式电源; 全寿命周期成本; 配电网; 可靠性效益—成本

Abstract: A wide range of effects will be brought into power grid when the distributed generations connect to the grid. A new manner which introduces the idea of life cycle cost (LCC) into the distribution network to measure the (reliability) benefit—cost of multiple distributed generations at different geographic locations is proposed. Based on the concept of LCC, the optimal solution of different grid—connected plan of distributed generations is obtained according to the calculation of the investment costs, maintenance costs, salvage value of equipment and the average interruption costs, and the relevant examples are given.

Key words: distributed generation; life cycle cost; distribution network; reliability benefit—cost

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2011)03—0022—04

0 引 言

随着科技的进步、环保意识的提高, 可再生能源受到越来越多的关注。近年来, 电力行业的相关部门也大量提倡将各种可再生能源发电技术以分布式发电 (distributed generation, DG) 的形式并入电网, 以提高供电的可靠性、高效性, 扩大供电范围。但传统的配电网以辐射型网络为主, 当 DG 并入配网后, 将引入逆向潮流, 改变各节点的电压分布, 对传统保护设备带来极大的冲击。此外, 可再生能源发电的分布式电源的输出电能具有较大的波动性, 并网后, 存在输出功率不稳定、谐波含量较大等问题, 控制不当会对电能质量造成一定的影响。为了较好地利用 DG 的优势, 尽量抑制其对配电网的不良影响, 大量机构、学者对 DG 的并网方案及控制方法进行了研究。

文献 [1—2] 基于双母线模型, 对单个分布式发电并入前后的负荷节点的电压变化情况进行了分析; 文献 [3] 基于辐射型配电网模型, 分析了多个分布式发电在不同位置、不同出力的情况下并网对配网的静态电压分布的影响; 文献 [4] 通过讨论多点分布式发电并网对电压的影响, 研究了通过变电站中央控制系统对 DG 进行电压控制的方案。然而, 现有的多数

研究, 都只是从技术层面对分布式发电的并网方案进行分析讨论, 没有考虑分布式发电并网的经济因素。

基于现有的分布式发电并网技术, 从全寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 最优的观点出发, 对不同的分布式发电并网方案进行 (可靠性) 效益—成本分析, 以确定对供电部门而言, 较优的多点分布式发电并网方案。为简化分析, 假设所有分布式发电均为供电部门投资建设的微型电源, 并且以供电部门的效益最优为先导。

1 分布式发电

分布式发电是指功率在几十千瓦到几十兆瓦范围内、模块式的、分布在负荷附近的清洁环保发电设施, 能够经济、高效、可靠地发电。分布式发电是区别于传统集中发电、远距离传输、大互连网络的发电形式^[3]。目前, 常见的分布式发电主要有以气体或液体作燃料的内燃机、微型燃气轮机、可再生能源发电 (如太阳能发电、风力发电、潮汐发电等) 和各种工程用的燃料电池。

分布式发电的并网对现有的配电网络而言犹如一柄双刃剑, 安置恰当可以提高供电的可靠性, 安置不当则会降低原有供电可靠性, 影响电能质量。分布

式发电常见的优点主要有以下几种。

1) 分布式电源是相互独立的, 操作灵活, 且由于容量不大, 投切操作不会对系统的稳定性造成影响, 具有较高的灵活性和稳定性。

2) 大型的分布式发电系统可部分消除配电网的过负荷和堵塞, 增加配电网的输电裕度; 小型的分布式电源可直接作为重要负荷的后备电源, 故障发生时, 可迅速投入使用, 维持供电, 以提高供电可靠性。

3) 在偏远地区采取分布式发电, 可以节省投资, 降低能耗, 提高系统的经济性; 此外, 分布式发电具有较好的调峰性能, 可用其灵活的跟踪负荷的变化, 降低系统的运行成本。

4) 分布式发电多采用可再生能源, 排废量少, 清洁环保。

但是当分布式发电 (特别是大型分布式发电系统) 的位置、容量布置不当时, 也会对供电系统的保护设备、短路电流问题、可靠性、电网效益以及电能质量带来不利的影响。

2 配电网 LCC 分析模型

全寿命周期成本 (LCC) 是指设备或系统在整个寿命周期内所需要消耗的总费用, 它包括初期投资费用、运行维护费用和退役处理费用等。美国预算局将 LCC 定义^[5]为: 大型系统在预定有效期内发生的直接、间接、重复性、一次性及其他的相关费用, 是设计、制造、开发、使用维修、支援等过程中发生的费用和预算中所列入的必然发生的费用的总和。

2.1 等年值法

配电网的全寿命周期成本是指系统从初期设计、设备购置到退役的整个寿命周期内需要的费用总和, 其费用是按时间顺序发生在整个寿命周期内, 而非只发生在投资初期, 故在分析中, 采用等年值法对配电网进行经济评估, 以避免由设备寿命差异带来的影响。

在经济学中, 资金是具有时间价值的。当前的一笔资金, 即使不考虑通货膨胀的因素, 也比将来同等数量的资金更有价值, 因为其可以在使用过程中产生利润。所以, 在对整个寿命周期内的效益-成本进行分析时, 应当把不同时刻的金额折算到同一个时间点上, 在相同的时间基础上对成本效益进行比较, 这就是等年值法^[6]。

等年值法将资金的时间价值分为现值 P、等年值

A、将来值 F。其中, 现值 P 为当前时刻的等效金额; 等年值 A 为等额支付的金额, 通常每期为一年; 将来值 F 为资金换算到将来某一时刻的等效金额。三者之间的换算关系如下。

① 现值与将来值的关系

$$F = P(1 + i)^n \quad (1)$$

② 等年值与将来值的关系

$$A = F \cdot \frac{i}{(1 + i)^n - 1} \quad (2)$$

其中, i 为贴现率; n 为设备的使用寿命。

2.2 配电网的 LCC 计算模型

配电网的全寿命周期成本可以从初期投资成本、运行成本和退役成本 3 个方面统筹分析^[7, 8]。

1) 初期投资成本: 由设备购置成本等年值 (如式 (3) 所示) 及方案设计费用的等年值 (如式 (4) 所示) 构成。

$$C_{is} = \frac{C_s(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (3)$$

$$C_{id} = \frac{C_d(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (4)$$

则总的初期投资成本为

$$C_i = (C_s + C_d) \cdot \frac{(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (5)$$

其中, C_s 为设备的实际购置费用; C_d 为配网方案的实际设计费用。

2) 运行成本: 由平均每年的设备维护费用 (式 (6) 和配网每年的停电损失费用 (式 (7)) 构成。

$$C_m = \sum N_{jm} \times C_{jm} \quad (6)$$

$$C_l = \sum_{p=1}^{L_p} \sum_{t=1}^{T_p} EENS_{pt} \times C_{LOSS_{pt}} \quad (7)$$

则总的运行成本为

$$C_c = (C_m + C_l) \cdot n \quad (8)$$

其中, N_{jm} 为第 j 类设备平均每年的维护次数; C_{jm} 为第 j 类设备平均每次的维护费用; L_p 为配电网的负荷点总数; T_p 表示第 p 个负荷点平均每年有 T_p 种停电持续时间; $EENS_{pt}$ 指 p 点第 t 次停电的失电量; $C_{LOSS_{pt}}$ 指 P 点第 t 次停电对应的单位停电损失。然而, 配电网中设备的种类繁多、数量巨大, 增大了设备维护参数统计工作的复杂度, 所以在这里的算例分析中, 采用等效人工费用的形式代替设备的具体维修费用。

3) 退役成本: 退役成本只考虑各设备退役后的残值, 在对设备残值进行评估时, 通常以当前的市场情况为参考, 故在 LCC 分析中, 可认为残值同初期的

投资成本一样,是发生在设备的寿命初期的,属于现值,故其等年值表达式如下。

$$C_{rA} = \frac{C_r(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (9)$$

其中, C_r 为设备的残值。

4) 配电网的 LCC 模型:配电网的全寿命周期成本包括初期投资成本、运行成本及退役成本,其表达式为

$$LCC = C_i + C_c - C_{rA} \quad (10)$$

3 方案对比

多点分布式发电并网的方案有很多种,可以就地并网,也可以集中并网,并且根据每台分布式电源的并网位置和容量的不同,其对电网的影响也不同。首先以 DG 并网对配电网的电压分布的影响为依据,参考相关研究初步选定两种对比方案,然后设定算例,对两种方案分别进行 LCC 仿真计算,从而获取(可靠性)效益-成本对比结果,以确定可靠性及经济性双优的多点 DG 并网方案。

3.1 并网方案初选

分布式电源靠近负荷,故其对电力系统有着多方面的影响。文中考虑 DG 对电网电压的支撑作用,并据此确定 DG 的初步并网方案。

由文献 [3] 可知,对于辐射型配电网,多个 DG 分别就地接入后,对馈线的电压分布的改善作用明显,各负荷节点的电压均有不同程度的上升,且越接近馈线末端,电压的提升幅度越大,对负荷节点的电压支撑是有利的。并且总出力相同的 DG,随每个分布式电源的接入位置不同,对电压的改善效果也不同,若所有的 DG 均在馈线后偏末端的位置接入,则对电压的支撑效果最佳。

当多个 DG 集中接入配电网时,对电压的分布情况也有一定的改善,但效果弱于分散接入。且根据集中接入点的不同,对电压的影响效果也不同。当从馈线首端(母线侧)集中并网时,整个馈线的电压分布同未接入 DG 时的电压分布情况大致相同,而当接入点越接近馈线末端,各负荷点的电压变化量越大。

在考虑 DG 并网后系统性能的前提下,以 DG 并网的经济性为主要的目标,故在选取方案时,应当计入一定的设备投资、系统改善费用等相关经济因素,综上所述,最终选定如下两个对比方案。

方案 1:分散并网,即多个 DG 分别就地并入 380

V 用户端电网。此方案以电压改善情况为先导。

方案 2:集中并网,即多个 DG 构成分布式发电系统集中从馈线母线侧并网(10 kV),此时配网的电压分布的变化最小,故控制策略、保护方案等方面不用作较大的改动。此方案以经济性能为先导。

3.2 算例分析

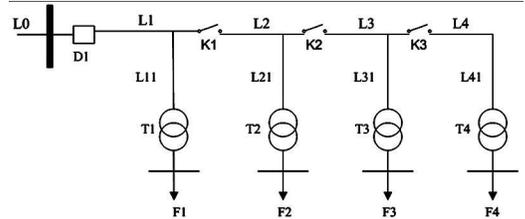


图 1 传统配电网

以图 1 所示的配电网为例,分别对 3.1 节中的两个方案进行 LCC 的定量对比,线路和分布式电源的参数如表 1 和表 2 所示,假设所有负荷均为静态恒功率负荷,且每个 DG 的出力恒定。

表 1 系统失效数据

元件	长度 /km	失效率 / (次 / km · a)	修复时间 / (h 次)
L ₀	1.5	0.1	4.0
L ₁	4	0.1	4.0
L ₂	1	0.1	4.0
L ₃	2	0.1	4.0
L ₄	3	0.1	4.0
L ₁ 1	2.5	0.1	2.0
L ₂ 1	3	0.1	2.0
L ₃ 1	2	0.1	2.0
L ₄ 1	2	0.1	2.0
变压器	\	0.06	100

表 2 分布式电源的出力和位置

分布式电源	出力 /kW	地理位置
DG1	300	F1
DG2	800	F2
DG3	300	F3

此外,在算例中,均将分布式电源作为后备电源考虑,当电网出现故障时, DG 优先向就近的负荷供电。且假定所需增设的设备寿命周期均为 20 年,每台设备的残值均为设备单价的 1%,贴现率为 10%,每度电售价为 0.6 元。

3.2.1 分散并网

分布式电源按照表 2 所示的出力和位置接入配电网中。此时, DG 的输出电压通过电力电子逆变装置转换成 380 V 的工频电压后输送上网。由于是就地并网,所需增设的输电线路极短,可忽略不计,且在各 DG 处安装适当的刀闸以控制其投切。选用 NH2-100 型隔离开关,单价为 100 元/台,供需 3 个隔离开

关,则方案一 的 LCC 计算如下。

1) 初期投资成本

忽略方案的设计费用,则初期投资成本的等年值为

$$C_i = \frac{100 \times 3 \times (1 + 10\%)^{20}}{(1 + 10\%)^{20} - 1} = 352.379 \text{ 元}$$

2) 运行成本

运行成本由设备维护费用和平均停电损失费用组成,采用人工费用等效代替设备的维修费用。据统计数据可知,隔离开关维护的人工费用为 0.1 万/年。而通过建立 DG 并网后的网络模型,利用表 1 和表 2 中的数据,由故障模式分析法求得配网的平均年失电量 EENS 为 4 424.238 kW·h 则方案 1 的运行成本为

$$C_c = 1\,000 \times 3 \times 20 + 4\,424.238 \times 0.6 \times 20 = 113\,090.856 \text{ 元}$$

3) 退役成本

$$C_n = 1\% \times C_i = 3.52 \text{ 元}$$

4) 全寿命周期成本

$$LCC_1 = 352.379 + 113\,090.856 - 3.52 = 11.344 \text{ 万元}$$

3.2.2 集中并网

分散于不同地理位置的 DG 集中在母线侧并网,则需通过升压变压器将逆变器输出电压升至 10 kV,选用 380 / 10 型变压器 3 台,单价为 15 万元/台,高压户外型刀闸 (GW9-10 / 400V) 3 台,单价为 260 元/台。并且由于非就地接入,则传输线路不可忽略不计,则 DG1~DG3 并网所需的输电线路分别长 3 km、4 km、7 km。

按照 3.2.1 中的步骤计算后有方案 2 的 LCC 数据如表 4 所示。

表 4 集中并网方案计算结果

名称	数据
初期投资成本等年值	85.837 万
维护费用	80 万
年平均失电量	14642.35 kW·h
停电损失	17.57 万
设备残值	8.5837 万

则方案 2 时的全寿命周期成本为

$$LCC_2 = 85.837 + 80 + 17.57 - 8.5837 = 174.8233 \text{ 万元}$$

对比两方案的计算结果可知,方案 1 不管从经济上还是可靠性指标上均优于方案 2。

4 结论及展望

通过 3.2 节中的算例分析可知,当 DG 作为后备

电源时,分散并网不但有效地改善了配电网的节点电压,一定程度地提高了网络的可靠性,而且与集中并网相比,其全寿命周期成本较低,整体的(可靠性)效益一成本较优。

但是,前面并未考虑 DG 并网对保护策略的影响,分散并网必然会为配电网带来逆向潮流,则会影响原有保护装置的正常工作,要确保网络的安全,则必须对保护装置进行改进,这部分的投资在文中是没有考虑的。此外,分散并网时负荷节点的电压变化率较大,则当 DG 退运行时会带来较大的电压波动,故在实际应用中,还要考虑对 DG 接入点安装无功补偿设备和能快速动作的电压支撑设备。相对而言,方案 2 中的 DG 母线侧集中并网方案不会带来逆向潮流,且接入点统一,整体控制较简易。故在今后的研究中,可将上述两点列入考虑范围,进行更加深入、全面的研究分析。

参考文献

[1] Caire R, Rrtiere N, Martino S et al. Impact Assessment of LV Distributed generation on MV Distribution Network[C]. Proceeding of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Piscataway(NJ), IEEE, 2002(3): 1423-1428

[2] Conti S, Raiti S, Tina G, Small-scale Embedded Generation Effect on Voltage Profile: An Analytical Method[C]. IEE Proceeding—Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(1), 78-86.

[3] 王志群,朱守真,周双喜,等,分布式发电对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56-60

[4] K. Nara, S. Ishizu, Y. Mishima. Voltage Control Availability of Distributed Generators in Power Distribution System [C]. Power Tech, IEEE Russia, 2005(6): 1-6.

[5] 日比宗平. 寿命周期费用评价法——方法及实例 [M]. 北京:机械工业出版社,1984.

[6] 王锡凡. 电力系统规划基础 [M]. 北京:水利电力出版社,1994.

[7] 张桦,侯兴哲,基于 LCC 的配电网可靠性成本效益分析模型及应用 [C]. 中国设备管理协会设备寿命周期费用委员会第八次年会: 61-67.

[8] 张桦,刘华勇. 基于可靠性的电力系统设备 LCC 分析应用 [C]. 重庆市电机工程学会 2008 年学术会议论文集: 7-81.

作者简介:

林涛(1972),工程师,四川省达州电业局调度中心。

(收稿日期:2010-09-15)

基于自适应差分算法的电力系统稳定器参数设计

杨祉涵, 张雪霞, 李 奇, 邓美玉

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 自适应差分算法强大高效, 是一种基于群体的随机搜索技术, 一般用于连续空间优化问题求解, 被广泛应用于科学和工程领域。自适应差分算法是在差分进化算法基础上经过改进得到的算法, 其实验向量生成策略及其相关的控制参数值拥有自适应能力, 这种能力是通过从前期生成可能解的过程中学习得来的。在利用 Simulink 建立起单机无穷大系统仿真模型的基础上, 根据时间乘绝对误差积分准则 (ITAE 准则) 设计寻优问题的目标函数, 将电力系统稳定器的参数设计问题转化为最小化问题, 并用自适应差分算法求解。最后在单机无穷大系统上进行仿真实验, 结果表明经过优化设计的电力系统稳定器拥有良好性能。

关键词: 自适应差分算法; Simulink; ITAE 准则; 单机无穷大系统

Abstract: Differential evolution (DE) algorithm is an efficient and powerful population-based stochastic search technique for solving the optimization problems over continuous space which has been widely applied to the scientific and engineering fields. Self-adaptive differential evolution (SaDE) algorithm is the improved algorithm, in which both trial vector generation strategies and their associated control parameter values are gradually self-adapted by learning from their previous experiences in generating promising solutions. Based on the simulation model of single machine infinite bus system, the objective function of optimization issue is designed according to the time by absolute error integral criterion (ITAE criterion). The parameter design issue of power system stabilizer is converted to the minimization issue. Finally, the simulation test is carried out on a single machine infinite bus system, and the results show that the power system stabilizer has a good performance after the design optimization.

Key words: self-adaptive differential evolution algorithm; Simulink; ITAE criterion; single machine infinite bus system

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)03-0026-03

0 引 言

在电力系统运行的时候^[1], 若发电机经输电线路并列运行, 且此时又有扰动发生, 则会出现发电机转子之间的相对摇摆, 这会在缺乏必要阻尼的时候造成持续振荡; 与此同时, 输电线的功率也有相应的振荡, 对功率正常输送造成影响; 电力系统低频振荡时常发生在长距离且重负荷的输电线上, 现代多使用快速高顶值倍数的励磁系统, 这就使得励磁系统时间常数减小而造成系统阻尼减小, 增加了低频振荡发生的可能性。

于 20 世纪 60 年代后期出现的电力系统稳定器 (power system stabilizer pss), 目前已经得到了全世界范围内的广泛使用。据国际大电网会议第 38 届研究委员会组织的专门工作组做出的专门研究结论中指出^[2]为消除低频振荡的威胁, 首先应该仔细考虑研

究如何对系统中主要发电机的电力系统稳定器进行整定, 因为截至目前为止, PSS 仍可称得上是抑制低频振荡最为经济有效的手段。

差分进化算法是一种基于群体的随机搜索算法^[3], 它一般用于连续空间优化问题求解, 在科学和工程领域都有广泛的应用。尽管如此, 进化差分算法在解决特定问题上能否取得成功很大程度依赖于正确选择实验向量的生成策略和与其相关的控制参数值。采用了一种自适应差分进化 (SaDE) 算法, 该算法中实验向量生成策略及其相关的控制参数值有自适应能力, 这是通过从前期生成可能解的过程中学习得来的。因此, 一个更合适的生成策略以及它的参数设置可以自适应地确定并且匹配搜索过程进化的不同阶段。它避免了在“实验与错误”环节寻找最合适实验向量生成策略和相关参数值的计算损耗。而是在前期生产可能解的经验中使得策略和相关参数都能够达到自适应。

采用了自适应进化差分算法对电力系统稳定器的参数进行设计,将时间乘绝对误差积分准则(即 ITAE 准则)作为设计目标。ITAE 准则是一种选择性和实用性都比较好的误差积分准则,它反映了系统的综合控制性能,所以是最常用的目标函数之一。虽然用解析法运算比较困难,但借助计算机辅助运算就不难确定系统的最优参数。以往的电力系统稳定器的参数寻优更多是寻找机电振荡模式下的最小阻尼比,而根据 ITAE 准则进行设计能够综合考虑 PSS 与励磁系统的性能。

1 PSS 参数设计问题的数学描述

1.1 PSS 的数学模型描述

常用超前一滞后校正模型 PSS 的传递函数框图如图 1 所示^[4]。

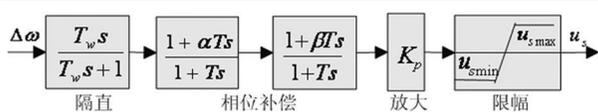


图 1 电力系统稳定器传递函数框图

实际 PSS 的输入信号有可能为加速功率偏差,现选择转速偏差作为输入信号。传递函数如下所示。

$$U = K \cdot \frac{sT_w}{1 + sT_w} \cdot \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \cdot \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \Delta\omega \quad (1)$$

式中, T_w 为隔直环节的时间常数; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为超前一滞后环节的时间常数; K 为 PSS 增益。一般来说,时间常数 T_w 、 T_2 和 T_4 是已经确定的,需要设计的参数就是 K 、 T_1 和 T_3 。

1.2 PSS 参数设计的目标函数及其约束条件

目前看来,电力系统稳定器的参数寻优更多是寻找机电振荡模式下的最小阻尼比,为同时考虑 PSS 与励磁系统的综合性能,将优化的控制目标设为系统输出按最小误差跟踪给定值的能力,即遵循 ITAE 准则。ITAE 准则是在已知传递函数下,求最佳化系统瞬态响应的简捷方式。与其他准则相比较,能产生较小的超调和振荡。从动态角度看,ITAE 准则在处理误差绝对值与时间乘积的积分时,能够兼顾受扰动时系统在振荡过程中及趋于平稳时的输出误差^[5],因此将其选为寻优问题的目标函数。

$$f = \int_0^t |i|\omega_m(t) - \omega_{ms}| dt \quad (2)$$

式(2)即为选定的目标函数,在式(2)中 ω_m 表示

的是转子角速度; ω_{ms} 表示的是转子角速度的稳态值; i 表示可调权重因子。

至此该寻优问题可以完整的表达为

$$\begin{cases} \min \left\{ \int_0^t |i|\omega_m(t) - \omega_{ms}| dt \right\} \\ T_{1\min} < T_1 < T_{1\max} \\ T_{3\min} < T_3 < T_{3\max} \\ K_{\min} < K < K_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

上式中增益 K 的取值范围 $[0.1, 1000]$, T_1 和 T_3 的取值范围为 $[0.01, 1]$ 。

2 自适应差分算法简介

所采用的自适应进化差分算法避免了在“实验与错误”环节寻找最合适实验向量生成策略和相关参数值的计算损耗。而是在前期生产可能解的经验中使得策略和相关参数都能够达到自适应。

2.1 实验向量生成策略自适应

在自适应差分算法中,对每个当前代的目标向量,一个实验向量生成策略的选择是依据其在前代中成功生成进化解的确定数量得出的概率。选定的策略后来是应用到相应的目标向量上来生成试验向量。更具体的是,在每代中,选择每个策略的概率和为 1。这些概率是在进化中按如下方法进行自适应的:设第 k 个策略在当前代的概率是 P_k , $k=1, 2, \dots, K$, 其中 K 是候选集合中包含的总个数。每个策略的初始概率为 $1/K$, 每个策略被选中的概率相同。用随机选择的方式为当前种群的目标向量选中一个实验向量生成策略。在第 G 代时,评价完所有生成实验向量,第 k 种策略生成的成功进入下一代的实验向量数量记为 n_{kG} , 而未能进入下一代的实验向量数量记为 n_{kG} 。用“成败记录”来存储这些数据,称这几代确定数据的循环为学习阶段(LP)。在第 G 代,不同实验向量生成策略生成的实验向量能否进入下一代的成功和失败记录是被存储起来的,一旦存储溢出,最早的记录就会被新的记录取代。

在初始化学阶段后,选择策略的概率依据就变为“成败记录”。在每代中,选择第 k 个策略的概率如下式所示。

$$P_{kG} = \frac{S_{kG}}{\sum_{k=1}^K S_{kG}} \quad (4)$$

$$S_{k,G} = \frac{\sum_{g=G-LP}^{G-1} n_{s_{k,g}}}{\sum_{g=G-LP}^{G-1} n_{s_{k,g}} + \sum_{g=G-LP}^{G-1} n_{f_{k,g}}} + \epsilon \quad (5)$$

其中 $k=1, 2, \dots, K; G < LP$ 。其中 $S_{k,G}$ 表示第 k 种实验向量生成策略生成的实验向量在学习阶段进入下一代的成功概率。最小常数是用于避免可能的无效成功率。为确保选择策略总和始终为一, 将 $S_{k,G}$ 分开表示为 $\sum_{k=1}^K S_{k,G}$ 用于计算 $P_{K,G}$ 。

2.2 相关参数自适应

相关参数是指 NP, CR, F 这三个参数。一般来说, NP 是作为用户指定参数, 因为它高度依赖于待解决问题的复杂性。事实上, 种群数量 NP 不需要优化调试, 只需要根据具体问题采用典型值即可。而在自适应差分进化算法中, 参数 F 是由平均值和标准差分别为 0.5 和 0.3 的正态分布近似表示。F 值由此正态分布随机采样以匹配当前种群的每个目标向量。

良好的 CR 值能将给定问题限定在较小范围内, 使得算法的表现更好。因此, 试图将 CR 的取值范围根据其在给定问题时生成成功进入下一代的实验向量情况来进行调整。假定 CR 遵循平均值为 CR_m , 标准差为 Std 的正态分布。将 CR_m 初始化为 0.5; Std 的值应该设定得较小以确保大多数由 $N(CR_m, Std)$ 生成的 CR 值在 $[0, 1]$ 的范围内。因此, 将 Std 的值设置为 0.1。

3 参数设计及仿真结果

所采用的仿真软件是 Matlab2010b 的电力系统仿真模块集 SimPowerSystems Blockset (SPB)。同时也利用 Matlab 开发了自适应差分进化算法的算法程序, 这也是为了方便程序与模型之间的相互调用。图 2 就是单机无穷大系统的仿真模型。

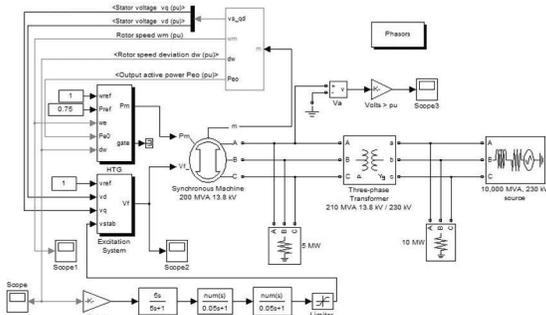


图 2 单机无穷大系统

在优化过程中将典型参数值选为 $T_w = 5, T_2 = 0.05, T_4 = 0.05$ ^[6]。采用了种群大小为 60、进化代数

为 60 的自适应差分进化算法对 K、 T_1 、 T_3 三个参数进行优化设计, 并与种群大小为 100、进化代数为 100 条件下的全面学习粒子群算法 (CLPSO) 的优化结果^[7]进行对比。优化结果如表 1 所示。

表 1 参数优化结果对比

算法	参数		
	K	T_1	T_3
SaDE	49.2834	0.1051	0.1247
CPSO	3.9213	0.0256	0.6146

3.1 小扰动情况

仿真第 10 s 时, 在励磁电压参考端加入 10% 的阶跃扰动信号。图 3 为所设计的电力系统稳定器与文献 [7] 中设计的电力系统稳定器的作用效果对比。

从图 3 可以看出, 用 SaDE 算法设计得出的电力系统稳定器作用效果良好, 在 1.7 s 内完全平息振荡, 而文献 [7] 中的电力系统稳定器用了 2.9 s 才完全平息振荡。

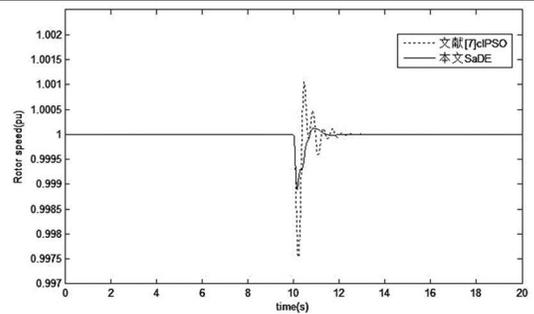


图 3 转子角速度

3.2 大扰动情况

图 4 是经两种优化算法优化所设计得出的 PSS 在系统于第 10 s 时发生三相短路故障, 0.02 s 后故障切除的情况下产生的作用效果。

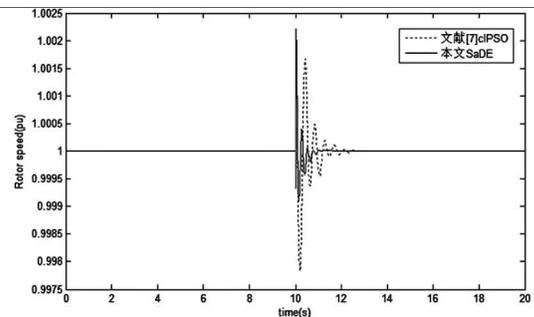


图 4 转子角速度

由图 4 可以看出, 经过 SaDE 算法优化设计得到的电力系统稳定器性能更好, 能够使振荡在 1 s 内就基本平息下来, 文献 [7] 中基于 CPSO 算法优化得到的电力系统稳定器则需要 3 s 才能完全平息振荡, 其

(下转第 72 页)

[2] 游一捷, 黄继, 邓巨怡, 等. 用局部放电超声故障探测仪探测电缆头故障 [J]. 高压电器, 2000, 18(1): 59—60.

[3] 舒乃秋, 胡芳, 周黎. 超声传感技术在电气设备故障诊断中的应用 [J]. 传感器技术, 2003, 5(22): 1—4.

[4] 王建生, 邱毓昌. 气体绝缘开关设备中局部放电在线监测技术 [J]. 电工电能新技术, 2000(4): 44—48.

[5] 罗勇芬, 黄平, 赵文炎, 等. 多局部放电源的电磁波和声信号时序分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 22—26.

[6] 陆瑾, 袁聪波, 孙骏, 等. 变压器局部放电的声电联合检测技术应用 [J]. 华东电力, 2006, 34(9): 78—80.

[7] 罗勇芬, 李彦明, 刘丽春. 变压器局部放电的超声波和射频联合检测技术的现状和发展 [J]. 变压器, 2003, 40(12): 28—30.

[8] 北京兴迪仪器有限公司. AE900型局部放电故障检测仪技术资料 [Z]. 中国: 北京兴迪仪器有限公司, 2008.

[9] DL/T 555—2004. 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则 [S].

[10] 李晨焱, 时卫东. GIS局部放电监测中超声波法与超高频法的比较 [J]. 科技经济市场, 2006, 17(10): 23.

[11] 苑舜. 全封闭组合电器局部放电超声传播特性及监测问题的研究 [J]. 中国电力, 1997, 30(1): 7—10.

[12] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88—92.

[13] 金立军, 胡青, 邱国海, 等. GIS电晕放电监测 [J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 25—27.

[14] 金立军, 刘卫东. GIS金属颗粒局部放电的实验研究 [J]. 高压电器, 2002, 38(3): 10—13.

[15] Power Diagnostix Corporation. AIA compact Acoustic Insulation Analyzer Use Manual [Z]. Germany: Power diagnostix corporation, 2005.

作者简介:

周勇军 (1975), 男, 工程师, 从事电力生产技术管理工作。

(收稿日期: 2011—04—18)

(上接第 28 页)

作用效果并不明显。

4 结 论

在 Simulink 中搭建单机无穷大系统系统, 将其与 SaDE 算法程序相结合, 进行了电力系统稳定器的参数优化设计。综合考虑励磁系统和电力系统稳定器的性能, 按照 ITAE 准则选择系统的控制目标, 把电力系统稳定的参数设计问题转化为带有不等式约束的寻优问题。将在 Simulink 中搭建的无穷大系统进行了对电力系统稳定器作用效果的仿真。仿真结果显示, 使用 SaDE 算法优化设计的电力系统稳定器作用效果良好, 超过了经 CIPSO 算法优化的电力系统稳定器。自适应差分进化算法是一种具有较好的全局搜索能力和寻优速度的群体智能优化算法。

参考文献

[1] 束洪春. 电力工程信号处理应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 197—198.

[2] 李莉. 基于遗传算法优化权值的 H^∞ 电力系统稳定器的设计 [D]. 济南: 山东大学硕士论文, 2007.

[3] A. K. Qin, V. L. Huang, P. N. Suganthan. Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization [J]. IEEE Transaction Evolu-

tionary Computation, 2009, 13(2): 398—417.

[4] 范国英, 郭雷, 孙勇, 等. BFO—PSO 混合算法的 PSS 参数优化设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 28—31.

[5] 吴峰, 陈维荣, 李奇, 等. 基于粒子群优化算法的 PSS 参数优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 53—58.

[6] J. J. Liang, A. K. Qin, Ponnuthurai Nagarathnam, Suganthan, S. Baskar. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE Transaction Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67—82.

[7] J. J. Liang, A. K. Qin, Ponnuthurai Nagarathnam, Suganthan, S. Baskar. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE Transaction Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67—82.

作者简介:

杨祉涵 (1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制。

张雪霞 (1979), 女, 博士研究生, 研究方向为群体智能算法、电力系统无功优化等

李 奇 (1984), 男, 博士研究生, 研究方向为群体智能算法、电力系统稳定控制等。

邓美玉 (1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网及新能源应用。

(收稿日期: 2011—04—02)

安全稳定控制在光传输网中的应用

殷明春

(四川省电力公司通信自动化中心, 四川 成都 610041)

摘要:利用光纤通道传输安控信号已大量应用于安全稳定控制系统中。总结了安控信号接入光纤自愈环的方式及 SDH 自愈网保护类型;结合二滩、瀑布沟安控系统,分析了安控在光传输网中实际的应用,说明了双设备双通道的重要性。

关键词:安全稳定控制系统;光纤通信;自愈网

Abstract: The signal of security and stability control transmitted by optical fiber channel has been widely applied to security and stability control system. The access method of security and stability control to optical fiber self-healing ring is introduced as well as the protection type of self-healing network (SDH). Based on the Ertan-Pubugou security and stability control system, the practical application of security and stability control to optical fiber transmission network is analyzed, which shows the importance of double equipment and double channel.

Key words: security and stability control system; optical fiber communication; self-healing network (SDH)

中图分类号: TM761 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0029-03

0 引言

随着电网规模越来越大,结构越来越复杂,不同地区之间的电网联系也越来越紧密。在这种形势下,安全稳定控制系统是保障电网安全、可靠运行的重要手段之一。作为电网第二道防线的安全稳定控制系统,在某种意义上,比电网第一道防线的继电保护系统更重要。安全稳定控制系统内各厂站之间的信息交换通过通信网实现。各厂站之间的信息交换随着通信方式、通信技术的发展而改进。

1 安控业务在电力光传输通信网的接入方式

安控业务在电力光传输通信网的接入方式有专用光纤通道和复用光纤通道 2 种。

1.1 专用光纤通道

安控装置具有光接口,且两站安控设备之间通过光纤直接相连,其连接方式如图 1 所示。这种方式避免了与其他装置的联系(主要包括通信专业的设备),减少了信号的传输环节,增加系统使用的可靠性。

由于光纤衰减的原因,专用光纤通道宜用于两站之间小于 50 km 的线路。这种方式速度快,可靠性

高,但是非标准化,占用的资源比较多,故采用较少。

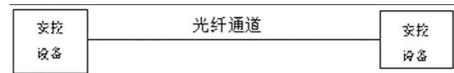


图 1 安控通道专用光纤连接方式

1.2 复用光纤通道

当采用复用光纤通道方式时,安控设备输出的光信号需要经过接口转换设备变换,成为满足 ITU-TG.703 标准且能与通信网络互联的 64 kbit/s 或 E1 电信号,其连接方式如图 2 所示。

2 安全稳定控制系统对通信和通道的要求

电力系统安全稳定控制系统是由两个及以上厂站的安全稳定控制装置通过通信设备联络构成的系统,是确保电力系统安全稳定运行的第二道防线的重要设施。

从安控系统的定义得知,安控装置之间的信号交换传递是通过通信系统完成的。稳控装置之间的通信主要实现装置间的数据、命令交换,通常是采用全双工交换方式,数据传输速度快,对数据的实时性、可靠性要求高。通信的实时性、可靠性、安全性是衡量通信技术的几个重要方面。安全稳定控制系统要保证系统发生故障后一定时间内及时响应,装置之间的

信息通信必须实时、可靠。根据电力系统安全稳定控制的需要以及目前的通信水平,通常两个站之间的信息传递要求在 10~30 ms 内可靠传送。

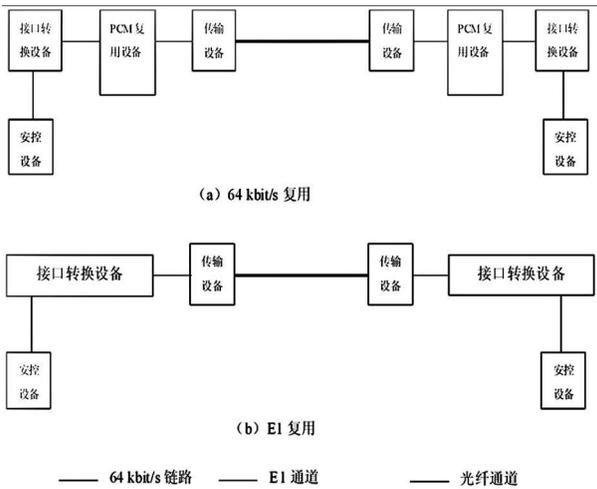


图 2 安控通道复用光纤连接方式

安全稳定控制装置的通信应用层协议目前绝大部分采用 DL/T 667-1999 (IEC 60870-5-103:1997)通信规约,将来将会逐渐过渡到以 IEC 61850 为主的应用层协议。

目前,在全国各网省电力公司制定了安控系统相应的规程,要求通信采用双通道双设备。通信双通道是物理上独立的两条通道。这样,提高了安控通信通道的可靠性,并且光纤通信自愈网也提供了通信通道的保护。

3 光纤 SDH 自愈网类型及保护方式

自愈网是指无需人为干预、网络即能在极短时间内从故障中自动恢复所携带的业务,使用户感觉不到出现故障的通信网。自愈网的类型包括线路保护倒换和环型网保护倒换。

按自愈环结构可将自愈环分为通道倒换环和复用段倒换环 2 大类。

1) 通道倒换环上其业务保护是以通道为基础的,即保护 STM-N 信号中的某个 VC(某 1 路 PDH 信号),在 VC 通道等级 (VC-3, VC-4, VC-12) 上,自动把传输信号从工作通道倒换到保护通道,对于 STM-1 为 VC-12 (2 Mbit/s), 对于 STM-4 为 VC-12 或 VC-4 (155 Mbit/s), 对于 STM-16 则为 VC-4。倒换与否取决于某一通信信号传输质量的优劣,通常利用收端是否收到 TU-AIS 信号或丢失

信号 (LOS 告警) 来决定该通道是否应进行倒换,不需要使用 APS 协议,倒换速度较快 (<50 ms)。

2) 复用段倒换环是以复用段为基础的,倒换与否由每对字节的复用段信号质量优劣决定。倒换是由 K1、K2 (b1~b5) 字节所携带的 APS 协议来启动的。当复用段出现问题时,环上整个 STM-N 或 1/2 STM-N 的业务信号都切换到备用通道上。复用段保护倒换的条件是出现 LOF、LOS、MS-AIS、MS-EXC 告警、指针丢失 (LOP)、误码超过门限等情况。由于 STM-N 帧中只有 1 个 K1 和 K2,所以复用段保护倒换是将环上的所有主用业务 STM-N (4 纤环) 或 STM-N (2 纤环) 都倒换到备用通道上去,而不是倒换其中的某 1 个通道。在实际应用中,复用段倒换需要依靠 APS 协议和硬件保护才能满足 30 ms 倒换时间。

通道保护环属于子网连接保护形式,是对端到端的业务进行保护,发送端永远桥接,因此,业务在工作子网连接和保护子网连接 2 条路径上同时发送。而在接收端,通过对 2 条路径接收到的业务信号进行比较后选择质量好的一路进行接收。复用段 1+1 MSP 保护,正常工作时 2 个并行的复用段同时传送 STM-N 信号, 1 个携带业务信号, 1 个备用。

4 安控在光通信网的实际应用

安控在光通信网中的应用指安控业务在光通信网安全可靠的传送。

随着四川电网骨干网 (500 kV 网) 的扩大加强,光通信网也得到很大的发展。安控系统的通信方式由载波通信、64 K 复用光纤通信等转向主流的 2 M 复用光纤通信。对于某些大型稳控系统有多个站无主从关系的安全稳定控制装置同时并列运行,装置之间相互交换信息。每个站有两套装置分为 A、B 两套系统并列运行或主辅方式运行,各站安全稳定控制装置的决策受到其他站装置的运行工况关联,如二滩、瀑布沟输出安全稳定控制系统。其基本结构如图 3 所示。

为了保证安控系统的安全可靠运行,实行双设备双通道,即两套安控装置、两套通信设备、两条通信通道。以板桥至洪沟的安控为例,说明双设备双通道运行情况。板桥站、洪沟站都在川东南光纤环网上。板桥 1 号安控装置 2 M 接入板桥 1 号光设备,经过川东

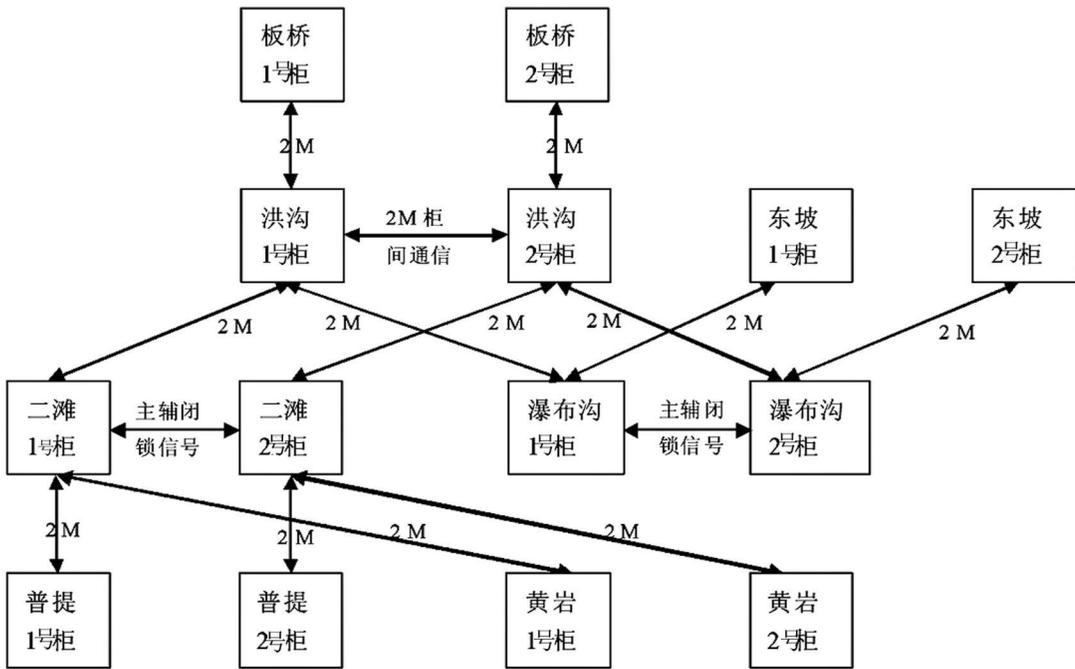


图 3 二滩及瀑布沟安控系统通信结构图

南环以东西两个方向传送到洪沟 1 号光设备 (双发选收),再传送 2 M 到洪沟 1 号安控装置,形成一条完整的通道。同理,板桥 2 号安控装置 2 M 接入板桥 2 号光设备,经过川东南环以东西两个方向传送到洪沟 2 号光设备,再传送 2 M 到洪沟 2 号安控装置。因此,在板桥站与洪沟站的安控,任一安控装置、光设备、环网上任一段光缆的故障均不会影响它们之间的信息传送。根据业务运行的需要,在任一光设备、安控装置、光缆故障时应该及时排除,保证“双设备双通道”运行方式。

4.2 安控在光通信网的应用实例效果分析

安控运行不因一台设备、一条单独的通道故障而中断运行。

瀑布沟至洪沟的安控通道由川西南环和川东南环的 2 M 组成。2010 年 6 月 19 日 9:00 至 20 日 20:00 棉越线开断,造成川西南光环网开环运行,瀑布沟至洪沟的安控通道由 2 条变为 1 条。在这种情况下,不影响瀑布沟至洪沟的安控信号传递,瀑布沟至洪沟的安控系统正常运行。2010 年 8 月 15 日 10:00 至 20:00 瀑布沟侧 1 号安控及设备异常,需要停运检修。此时瀑布沟至洪沟的安控信号由 2 号安控装置系统传输,不

影响瀑布沟至洪沟的安控信息交换,系统运行正常。

瀑布沟至洪沟的安控系统在一条通道故障或者一台设备故障情况下,仍正常运行,说明了安控系统“双设备双通道”的配置是必要的,“双设备双通道”运行方式满足安控系统可靠生产运行。

5 结 语

光纤通道传输速率高、可靠性高,是目前传输安控信号的重要途径。因此,在通信运行维护层面,要求电力通信部门在设计、施工和日常运行维护中,从客观实际出发,深入分析光纤通信的机理,结合电网运行的特点,不断优化电力通信网络,完善保护机制,从而满足跨区域送电和超长距离电力传输的要求。

参考文献

- [1] 邹桂清. 电流差动保护在华为光传输网中的实现方案 [M]. 电力系统通信, 2009, 30(12): 34-36, 45.
- [2] 许建安. 电力系统通信技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.

(收稿日期: 2010-12-18)

节约能源 保护环境

继电保护整定计算及运行管理省地一体化 数据平台的研究与开发

王胜利¹, 石 静², 常喜强¹, 姚秀萍¹

(1 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 国电新疆红雁池发电有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要:提出基于 C/S 及 B/S 的继电保护整定计算及运行管理省、地一体化数据平台系统, 实现统一基础数据、统一模型、统一规范、统一标准、统一平台, 以满足省、地调继电保护管理部门分布式的数据维护管理和联合式的计算校核分析的需求, 提高各级调度机构的继电保护整定计算、定值管理和运行管理整体水平, 满足智能电网“源端维护, 全网共享”的要求。

关键词:继电保护; 整定计算; 运行管理; 定值管理; 省地一体化

Abstract: The setting calculation and operation management of provincial and regional integrated data platform system for relay protection are proposed based on C/S and B/S. It has unified the basic data, the model, the specifications, the standards and the platform in order to meet the needs of distributed data maintenance and management and joint counting analysis of relay protection management department of provincial and regional dispatching to improve the levels of setting calculation, setting management and operation management for relay protection of each dispatching agency and to meet the requirements of “maintenance at source of data and sharing data within whole grid” of smart grid.

Key words: relay protection; setting calculation; operation management; setting management; provincial and regional integration

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)03-0032-04

0 引 言

随着电网规模的不断扩大, 电网结构日趋复杂, 继电保护工作人员面临定值管理、回执校核、统计分析、运行管理、反措管理等十分繁重的工作, 上下级局之间、局与各厂站之间存在着大量重复性工作^[1], 而且数据的真实性、可靠性存在问题。Internet/Intranet 网络技术与数据库技术的飞速发展, 尤其是电网公司内部建立的企业内部计算机网络系统日臻成熟, 开发一套基于 C/S (Client/Server) 及 B/S (Browser/Server) 的电力系统继电保护整定计算及运行管理系统成为电网发展的必然要求, 以实现省、地调及地、地调之间数据同步更新, 信息及时传递, 建立起严密的、快捷的信息沟通、共享机制^[2], 真正实现“无纸化”办公。

目前的继电保护管理系统一般是以整定计算、定值管理、信息管理分别为侧重点进行开发和设计, 而且基本是单机或是局域网内使用, 以新疆电网为例, 省、地调共使用 6 个不同厂家的整定计算软件, 省、地

调及各地调之间定值单、接口阻抗及接口定值的发布和执行过程基本通过邮件、传真等传统手段, 不仅工作效率和自动化水平较低, 而且使定值管理流程及回执过程不可控、不在控。

在当前国家电网公司提出建设智能电网发展战略的背景下, 经过对最新计算机网络及软件技术、最新的技术标准体系以及国内已建、在建系统的研究, 提出建立“继电保护整定计算及运行管理高级应用省地一体化数据平台系统”, 新系统的建设应统筹考虑并前瞻性地规划该系统的开发与研究工作, 以保证不仅能够有效提升继电保护专业管理水平, 还能适应数字化变电站及智能电网建设的技术要求。

1 设计原则

本系统的开发以实用性为主要原则, 在满足现有继电保护管理模式基础上, 充分考虑电网未来发展模式及智能电网技术的发展, 具备在此系统基础上二次开发的功能。

1)采用标准化的数据模型、标准化的接口方法。鉴于 IEC 61970 是系统端应用系统的唯一国际标准,因此继电保护的应用须采用 IEC 61970-CM 或基于 IEC 61970-CM 扩展的数据模型,并在接口方法上采用 IEC 61970-CIS 标准。同时,IEC 61850 也规定了厂站端保护装置的信息模型,为了适应智能电网技术的发展,应用对于保护装置的内部建模应能承载 IEC 61850 的模型信息,与故障信息系统互操作的接口应使用基于 IEC 61850-ACSI 的具体映射。

2)分布式维护。各单位需对其管辖范围内的继电保护基础数据的准确性和及时更新负责,因此系统应支持按单位进行各类数据的分布式维护并规定数据的唯一性标识方法,实现分布管理、责任明确、格式统一。

3)具有开放性。系统应具备开发新的应用功能、应用系统的扩展,支持数据模型的扩展,适应未来电网管理模式及技术发展的要求。

4)多用户共享。基础数据按管辖范围进行维护,但各用户共享基础数据,同时支持多用户按照权限同时访问和修改数据,并支持异地协作。

5)交互简单。本系统交互设计避免用户在使用时进行多重设置及确认和计算、查询、浏览等界面的反复跳转^[3],在满足使用者需求的基础上,减少繁琐的操作。

2 系统结构

如图 1 所示,每个调度机构配置一台交换节点服务器用于与其他调度机构交换数据,交换节点服务器通过电力企业内部网络彼此相连,交换各方需要的数据,即获取自己所需要的数据,也同时向其他调度机构提供他们所需要的数据,获取的数据存贮在本地交换节点服务器上,成为向客户端提供数据服务时的数据来源。将获取的数据首先下载到本地交换节点服务器,使得本地客户端可以对其直接进行频繁的操作,大大降低传输通道的时间占用率,提高网络传输的速度。

在省调的交换节点服务器上还需配置注册中心,以简化交换节点服务器的设置以及加入和退出,同时便于监视各个调度机构之间的交换过程。

RDF 数据服务通过提供数据访问服务将数据环境呈现给客户端,允许用户通过应用客户端浏览和修改数据。RDF 数据服务支持一个调度机构的本地网络内同时存在任意多个数据访问服务,每个数据访问

服务都可以是不同的数据版本,使得应用可以工作在自己需要的数据版本上、相互独立,同时也可对同一个数据版本进行共享。数据访问服务可以灵活部署,既可以同在一台服务器/工作站上,也可以在多个服务器/工作站上。当部署在本机上时,可以进入离线模式,以支持用户在与调度机构本地网络断开的环境下仍就开展工作。

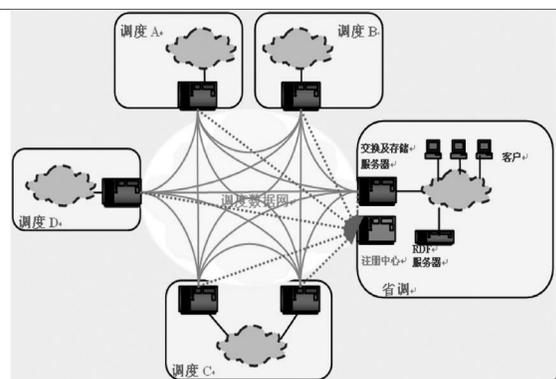


图 1 系统网络结构图

3 系统软件结构

为解决软件通用性及扩展性的要求,系统软件采取模块化的设计思想,各个模块均具有扩展接口,便于今后系统的二次开发,数据图形平台是整个系统的基础平台,其他独立的模块可通过基础平台有机地结合。

4 系统功能

4.1 整定计算

目前国内已应用的整定计算软件多数是按照调管的电压等级不同,即整定计算原则不同而针对省级用户及地调用户分别开发的,省调与地调、地调与地调之间的接口阻抗和接口定值均需本网核算后,以通知单或文件的形式通过省调进行交换,无法根据系统运行方式的变化做到按需计算的目的。

继电保护省地一体化数据平台运用分布式软件体系,考虑数据交换、数据存储、数据访问 3 个服务过程,采用既联合又独立的工作方式,实现在电网各调度机构之间建立继电保护基础数据的交换机制,在每一个电网运行机构内建立基于继电保护基础数据的各种专业应用,以实现继电保护基础数据、应用数据在“源端维护,全网共享”,实现省、地调继电保护同

步整定校核、联合计算分析等,便于各调度机构整定计算过程的可控、在控,缩短整定计算时间,提高整定计算的准确性和工作效率,同时促进省地调整定计算工作的一体化、规范化目标。

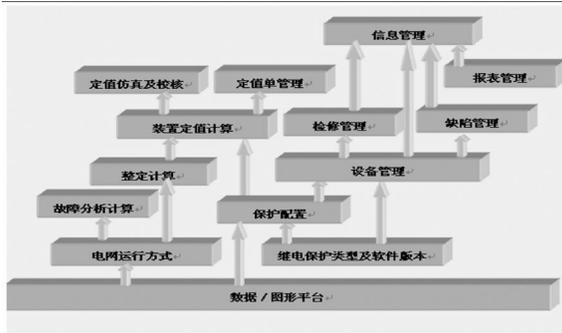


图 2 系统软件结构图

系统支持图形建模功能,提供元件工具箱绘制一次系统图及设备参数的录入、维护;故障模拟仿真、复杂故障分析研究、保护定值自动校核功能、单点或多点的等值计算等工作;计算结果以表格模式或图形模式显示,并根据需要全部显示或指定查看;定值管理模块与整定计算模块相连,在整定计算结束后按照已经建立的模板自动生成定值单,生成的定值单开始定值单管理流程。

4.2 定值单管理

借鉴工作流能将一系列过程规则完全或部分自动执行,使得文档、信息或任务能在不同执行者之间传递与执行^[4]。文献[2]提出将工作流的思想引入定值单管理系统,文献[6]提出将工作流技术引入发电企业管理信息系统,可见工作流技术引入定值单管理系统在可行性及实用性等方面均已获得一致的认可。工作流可为定值单等相关业务的协同处理过程提供工作流程支持,能够按照用户自定义的规则自动传递文档、信息或者任务,同时提供修改、跟踪、管理、查询、统计、打印等功能,大大提高工作效率,规范工作流程,使得整个过程更加透明、简洁。系统实现了定值单的自动流转,同时又可监控定值单的流转过程,本系统定值单管理流程图如图 3 所示,系统流程的确认采用电子签章或签名的形式,处理过的定值单自动进行属性升级。

定值单管理系统的流程及功能描述在很多文章里均做了详细的描述及定义,在此不再赘述,重点提出在管理系统中增加“调试定值”及“回执单校核”流程。

整定计算人员根据上报参数计算完毕并生成定值单后,首先将此时定值单作为调试定值单,现场调

试人员根据定值单中要求实现的功能及定值进行现场试验调试,确认各项功能及定值范围均与现场保护装置相符,然后开始定值单的校核、审核等流程,以避免正式定值单下发后因与现场装置不符而出现反复的现象,尤其在新保护装置第一次入网使用时显得尤为重要。

目前大多数单位定值回执单由施工单位或运行单位人员打印保护装置版本信息、定值清单、软压板清单等信息,因回执单要求实效性,故采用邮寄或由专人送至调度单位的整定计算人员,整定计算人员将定值单与打印清单核对的方式进行回执校核,此种方式即无法保证回执单快速回执的要求,同时定值更改范围较大时亦增加了整定计算人员的工作量。因此提出由运行维护的指定人员对回执单校核并进行流程化管理,打印清单原件由整定计算人员保存,保证了回执的及时性。流程中规定如打印清单与定值单存在不符之处时需将回执情况转送计算人,由定值计算人员处理。

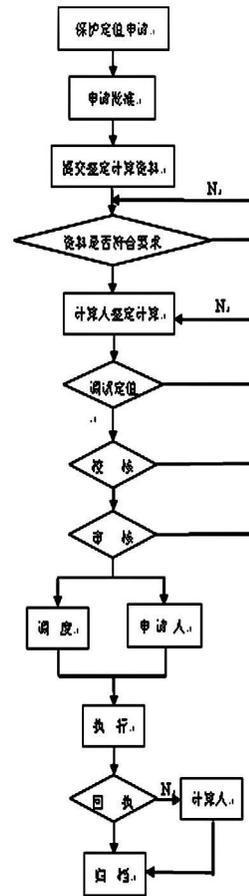


图 3 定值单管理系统流程图

4.3 运行管理系统

基于 Web 的继电保护整定计算及运行管理省、

地一体化数据平台系统的建立,以模块化的设计思想,将各主要功能封装成相互独立的模块。以丰富的共享数据为基础开展继电保护设备管理、检修管理、缺陷管理、故障信息管理、统计分析、反措及计划管理、图档管理等,将整个系统的管理和维护工作分散给各层的职能部门,做到分布管理、责任明确、数据共享、格式统一^[1]。通过资源信息整合,使各单位由以前仅掌握管辖范围内设备情况等信息转变为对全网相关信息一目了然,同时将目前的管理由单纯的上下分配级职能转变成紧密的纵向管理模式,减少了各级部门的重复性劳动,提高管理工作效率。

目前国内现有的继电保护定值管理及信息管理系统^[6-8]多数采用 C/S 与 B/S 模式(如图 3 所示),针对目前电网企业内部调度数据网的建立,省、地调的数据访问可采用 C/S 模式,电网企业内部客户提出访问数据库的服务请求,经由应用服务器的验证后,即可访问数据库服务器,数据库服务器根据客户要求进行处理后将结果反馈给客户。而电力企业目前仍未与电网企业计算机网络相连,故可使用 B/S 模式。充分发挥了 C/S 与 B/S 模式灵活的硬件系统构成及更好的支持分布式计算环境等优点。

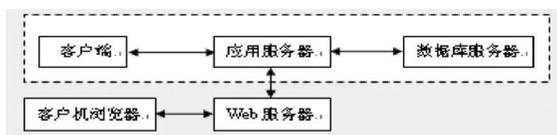


图 4 运行管理系统结构图

4.4 系统安全

本系统采用用户权限、口令防护、日志记录确保系统数据安全。

系统最高权限用户设在省调,由其负责整个系统的安全、授权、维护、管理等工作,同时直接管理各地调最高权限用户。地调最高权限用户分别负责其管辖系统的安全、授权、维护、管理等工作,并根据工作性质确定操作员用户及一般用户,操作员可以处理在其权限范围内的工作任务,一般用户仅具有查询、浏览等权限。

每个用户仅在被授予权限内访问系统相关使用功能,登陆时需输入用户名及密码,身份验证通过后即可进行相关操作。同时系统会记录每一个用户在系统停留期间所做操作,内容包括用户名、用户级别、登陆时间、操作性质、操作内容及登陆所用计算机 IP 地址等信息^[9],便于系统管理员查询并及时发现非

法操作用户,确保系统数据安全。

5 结 语

通过建立全疆统一的电网模型标准和规范,提升了全疆的继电保护运行管理水平,依托现代网络通信技术将使省调能够实时掌握各地区继电保护管理状况,统一的数据交换标准体系将使系统的运行不会受到各地区继电保护管理水平的影响,一举解决继电保护整定计算联合计算统一管理的难题。通过各自维护各地区局所辖的变电站、线路的电网模型、电网参数、图形及其他业务数据的分布式维护体系,解决省地之间管理数据的交换,实现继电保护生产管理、运行管理、设备管理的流程化、信息化管理,提高继电保护生产管理的效率,为继电保护的集约化管理、更深层次的应用和智能电网的发展打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 贾长朱,等.基于 Web 的电力系统继电保护远程分布式信息管理系统的设计与开发[J].继电器,2000,28(10): 65-68
- [2] 黄海.继电保护定值管理系统研究[J].福建电力与电工,2003,23(2): 20-21.
- [3] 王慧芳,等.电网继电保护整定计算软件的实用性研究[J].电力系统自动化,2004,28(21): 85-88.
- [4] 赵瑞东,陆晶,时燕,等. workflow 与工作流管理技术综述[J].科技信息,2007(8): 105-107.
- [5] 罗正军,姚建刚,罗滇生,等.基于 workflow 技术的发电企业管理信息系统的研究与开发[J].继电器,2004,32(2): 53-56.
- [6] 程景清,林振志,刘前进.基于 C/S 和 B/S 模式的继电保护定值管理系统[J].继电器,2006,34(1): 18-21.
- [7] 邓兆云,张建平.电力调度生产管理信息系统的工作流系统[J].电力系统自动化,2003,27(16): 78-80
- [8] 李宝树,张建坡,李勇.继电保护定值管理系统的研究与开发[J].电力系统保护与控制,2009,37(6): 77-80
- [9] 汪源生.基于 Web 的继电保护信息管理系统的设计和开发[J].电力系统自动化,2001,25(5): 64-66.

作者简介:

王胜利(1978),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,工程师,长期从事继电保护整定计算及运行管理工作;

石静(1982),女,新疆乌鲁木齐人,本科,助理工程师,长期从事电气运行及火电厂环保管理工作。

(收稿日期:2011-01-12)

关于低压电网用电设备继电保护整定计算的探索

宋 其, 宋汉蓉, 尹 秦
(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要: 在 10 kV 及以下系统中, 继电保护配合时限级差较少, 供电级数多, 按照常规的继电保护整定原则编制一套合理的保护整定方案, 满足保护“四性”的要求有很大难度。而 10 kV 系统的供电可靠性影响千家万户用电客户, 影响电力系统的优质服务 and 经济效益。所以正确、灵活运用保护整定计算原则, 保证 10 kV 及以下系统安全、稳定、可靠运行非常重要, 针对 10 kV 线路、电弧炉变压器、电动机、电容器等供电设备的保护配置和整定计算, 提出解决办法。

关键词: 低压电网; 保护; 整定计算

Abstract: In 10 kV system and below, the time-limit grade of relay protection matched is insufficient, but the grade of power supply is vast. It is hard to draw up a rational protection program and satisfy the protection requirements of “four features” according to the normal setting principle of relay protection. The power supply reliability of 10 kV system will affect millions of customers, and affect the quality of service and the economic benefits. So it is very important to use the principle in a right and flexible way to ensure the safe, stable and reliable operation of 10 kV system and below. Aiming at the protection allocations and setting calculations of supply apparatus such as 10 kV lines, arc furnace transformers, electric motors and capacitors, the measures are put forward to settle the above-mentioned problems.

Key words: low-voltage power grid; protection; setting calculation

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)03-0026-04

0 前 言

随着电力系统的快速发展, 系统短路电流增加, 10 kV 母线近端短路电流将对一次设备特别是变压器带来较大的安全隐患。快速切除 10 kV 母线近端短路故障, 保障了一次设备特别是变压器安全, 同时迅速恢复变电站 10 kV 母线电压, 减少电网电压波动, 提高了 10 kV 系统的供电可靠性, 同时提升了电力系统的优质服务 and 经济效益。正确、灵活运用保护整定计算原则, 编制一套合理的保护整定方案, 在既满足保护“四性”要求, 又保证 10 kV 及以下系统安全、稳定、可靠运行, 为 10 kV 供电系统的保护整定计算带来了新的课题。

2 10 kV 供电系统保护配置

对单侧电源线路一般配置两段过电流保护, 第一段为不带时限的电流速断保护; 第二段为带时限的过电流保护。

2 用户侧典型一次接线和保护配置

一般 10 kV 用户侧的典型一次接线为一个进线开关和两个出线 (变压器) 开关, 分别在进线开关处和出线开关处配置了三段式或两段式带时限电流保护或反时限电流保护。如图 1 所示。

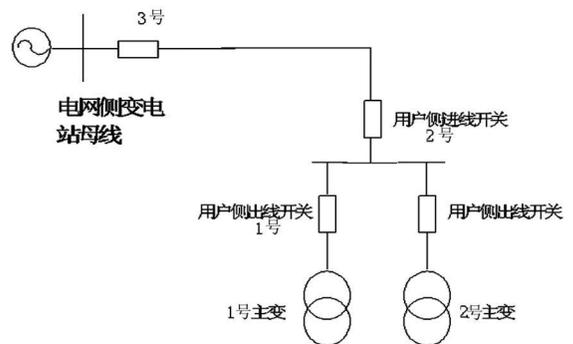


图 1 电网接线运行图

3 10 kV 及以下系统保护整定计算方案

3.1 电网侧出线保护整定计算

3.1.1 瞬时电流速断保护

用来快速切除线路前端故障,保证变电所或重要用户负荷所要求的最低残余母线电压。

1) 整定原则

按躲过线末大方式下最大三相短路电流整定,并保证出口有规定的灵敏度。

$$I_{dzj} = 1.3 \times I_{kmax} / n_{LH}$$

式中, I_{kmax} 为线路末端短路的最大短路电流; n_{LH} 为电流互感器变比。

2) 具体处理原则

(1) 线路末端接有开闭所或用户变电所的线路,要优先保证动作的选择性,按躲开闭所或用户变电所处短路整定。并校验线路出口处故障的灵敏度(正常大方式下,母线出口处灵敏度 $K_{lm} \geq 1$)。

(2) 公用线路

① 按躲变压器励磁涌流整定

通常 10 kV 线路上装有大量的配电变压器,在线路投入时,这些配电变压器在合闸瞬间,各变压器所产生的励磁涌流在线路上相互叠加,产生了一个复杂的电磁暂态过程,在系统阻抗较小时,会出现较大的涌流,时间常数也较大。按躲线路上所接变压器的励磁涌流整定。

$$I_{dzj} = 1.2 \times K_k \sum I_n / n_{LH}$$

式中, $\sum I_n$ 为配电变压器额定电流之和; n_{LH} 为电流互感器变比; K_k 为励磁涌流的倍数,取 6。

② 按保出口处有灵敏度整定

对于公用长线路,在躲变压器励磁涌流的前提下,可直接按保证出口故障有 $K_{lm} = 1.3$ 灵敏度整定。

3.1.2 过电流保护

现有的微机保护具有完善的电流保护 I、II、III 段,为简化计算,推荐采用电流保护 II、III 段均整定为过电流保护,不设限时速动段的原则整定。

整定原则:按躲最大负荷电流整定。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \times K_{zqd} I_n / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数,取 1.2~1.3; K_f 为返回系数,取 0.85~0.9 (常规保护取 0.85,微机保护取 0.9); K_{jx} 为接线系数,电流互感器采用三相星形接线方式和不完全星形接线方式, $K_{jx} = 1$; 三角形接线方式和两相电流差接线方式, $K_{jx} = \sqrt{3}$ 。 I_n 为负荷电流; K_{zqd} 为负荷自启动系数,取 1.5; n_{LH} 为电流互感器变比。

其中最大负荷电流的确定如下。

① 公用线路:按 TA 一次值、架空导线及电缆线路允许载流量的最大值、所供线路的实际最大电流值,取三者中的最小值。

② 接有电动机的负荷线路:在线路带最大负荷时,还要考虑有电动机自启动,过电流保护在电动机自启动时不动作。电动机的自启动电流一般为额定电流的 5~7 倍。过电流保护定值按线路带最大负荷时,所接线路上供电的最大一台电动机自启动整定。

$$I_{dz} = K_{jx} (K_{kfb,max} + K_{zqd} I_n) / K_f$$

式中, K_{zqd} 为负荷自启动系数,取 5; I_n 为线路上所供最大一台电动机的额定电流。

其余参数与前相同。

③ 对接有冶炼变压器等特殊负荷的线路。

接有冶炼变压器的线路,要考虑变压器过负荷运行的情况,一般冶炼变压器在运行过程中会短时间过负荷 200%。

$$I_{dz} = (K_{kfb,max} + K I_n) / K_f$$

式中, I_n 为冶炼变压器额定电流。

接有电弧炉变压器的线路

$$I_{dz} = (K I_{k,max} + K I_n) / K_f$$

式中, K 为电弧炉变压器过载系数,取 2.5。

3.2 电弧炉变压器保护整定计算

3.2.1 速断保护整定

电弧炉变压器作为电源的最后一级用电设备,运行中保护仅满足与上级保护的配合关系,按照常规的保护整定原则整定,过流保护时限很难配合,建议根据此设备的特点及在电网中的具体接线情况,采用特殊的保护整定原则,满足保护上、下级配合关系。

速断保护整定原则:按躲电弧炉变压器励磁涌流整定,即取 8 倍额定电流整定。

$$I_{dzj} = K_k \times 8 I_n / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数,取 1.2; 其余参数与前相同。

时限元件:时限取 0 s

3.2.2 过流保护整定

电弧炉变压器特点是在电弧引燃时及熔化期冶炼电流可以达到额定电流的好几倍,一般在额定电流的 1.2~3.5 倍,持续时间一般为 3 s 左右。

1) 过流保护整定原则

电流元件:①按躲电弧炉变压器冲击电流整定,

即 3.5 倍过流定值。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \times K_{le} / K_f n_{LH}$$

式中, K_{zd} 为负荷自起动系数, 取 3.5; 其余参数与前相同。

②按灵敏度要求选择

$$I_{dzj} = K_{jx} I_{bmin}^{(2)} / K_{lm} n_{LH}$$

式中, K_{lm} 为灵敏系数, 取 1.25~1.5; $I_{bmin}^{(2)}$ 为变压器低压侧最小两相短路电流。

时限元件: $t = 0.5 s$

3.3 10 kV 整流变压器保护整定计算

3.3.1 速断保护整定

整流变压器不考虑过载运行。当在直流电流侧发生短路时, 应由速断保护动作跳开高压断路器切断短路电流。

速断动作电流整定原则如下。

(1)按躲整流变压器励磁涌流整定, 即取 8 倍额定电流整定。

$$I_{dzj} = K_k \times 8 I_e / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.2。

(2)校验整流变压器低压侧短路有 $K_{lm} = 1.3$ 灵敏度整定。

时限取 0 s

3.3.2 过流保护整定

过流保护整定原则如下。

(1)按照变压器额定电流选择。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \times I_e / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.3; I_e 为整流变压器额定电流; 其余参数与前相同。

(2)按灵敏度要求选择。

$$I_{dzj} = K_{jx} I_{bmin}^{(2)} / K_{lm} n_{LH}$$

式中, K_{lm} 为灵敏系数, 取 1.25~1.5; $I_{bmin}^{(2)}$ 为变压器低压侧最小两相短路电流。

时限元件整定: $t = 0.5 s$

3.4 10 kV 电动机出线保护整定计算

3.4.1 速断保护整定

过电流保护在电动机自启动时不动作。电动机的自启动电流一般为额定电流的 5~7 倍。

速断动作电流整定原则: 按躲电动机的自启动电流整定。

$$I_{dzj} = K_k \times K_{qd} I_e / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.2; K_{qd} 为电动机自启动系数, 取 5~7; 时限取 0 s

3.4.2 过流保护整定

过流保护整定原则: 按照变压器额定电流选择。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \times I_e / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.3; I_e 为电动机额定电流。

时限元件整定: $t = 20 s$

3.4.3 低压闭锁过流保护整定

过流保护整定原则如下。

电流元件: 按照变压器额定电流选择。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} \times I_e / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.3; I_e 为电动机额定电流; 其余参数与前相同。

电压元件: $U \leq 70 V$

时限元件整定: $t = 0.5 s$

3.5 10 kV 电容器保护整定计算

3.5.1 速断保护整定

速断动作电流整定原则如下。

(1)按躲电容器充电电流整定

$$I_{dz} = (4-5) I_{cc}$$

式中, I_{cc} 为电容器组额定电流。

(2)保证保护安装处在最小方式下, 灵敏系数 ≥ 2 。

$$I_{dz} \leq I_{bmin}^{(2)} / K_{lm}$$

式中, K_{lm} 为灵敏系数, 取 ≥ 2 ; 时限取 0 s

3.5.2 过流保护整定

过流保护整定原则如下。

(1)按电容器组额定电流选择。

$$I_{dzj} = K_k K_{jx} K_{bw} \times I_{cc} / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.25; K_{bw} 为考虑电流波形中可能有高次谐波存在, 因此电流值将比标准正弦波电压时有所增加。 K_{bw} 为电容器波纹系数, 取 1.25。

(2)按灵敏度要求选择。

$$I_{dzj} = K_{jx} I_{bmin}^{(2)} / K_{lm} n_{LH}$$

式中, K_{lm} 为灵敏系数取 1.25~1.5; $I_{bmin}^{(2)}$ 为保护安装处在最小方式下两相短路电流。

时限元件整定: $t = 0.2 s$

3.6 进线柜开关保护整定计算

3.6.1 速断保护整定计算

速断保护整定计算原则如下。

(1)按躲变压器励磁涌流整定。

$$I_{dzj} = 1.2 \times (8 I_{l1} + I_{l2}) / n_{LH}$$

式中, I_{l1} 为大容量变压器额定电流; I_{l2} 为小容量变压器额定电流。

(2)按躲大容量变压器低压侧短路整定。

$$I_{dzj} = K_k K_{jk} \times I_{b,max}^{(3)} / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.5; $I_{b,max}^{(3)}$ 为大容量变压器低压侧最大三相短路电流; n_{LH} 为电流互感器变比。时限取其大值: $t = 0.2\text{ s}$

3.6.2 过流保护整定计算

过流保护整定原则如下。

(1)躲最大负荷电流整定。

$$I_{dzj} = K_k K_{jk} \times I_{h,max} / K_f n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.2~1.3; $I_{h,max}$ 为最大负荷电流; 其余参数与前相同。

(2)与出线开关速断保护电流最大定值配合。

$$I_{dzj} = K_k \times I_{dzj} / n_{LH}$$

式中, K_k 为可靠系数, 取 1.1~1.15; $t = 0.5\text{ s}$ (微机保护取 0.3 s)。

4 结 语

随着电力系统的发展, 系统短路电流增加, 10 kV 母线近端短路电流将对一次设备特别是变压器带来较大的安全隐患。快速切除 10 kV 母线近端短路故障, 保障了一次设备特别是变压器安全, 同时迅速恢

复变电站 10 kV 母线电压, 减少电网电压波动, 提高了 10 kV 系统的供电可靠性, 同时提升了电力系统的优质服务和经济效益。总结多年保护整定的工作经验, 针对电流保护时限级差小, 在满足一般整定原则的基础上提出了一种适合实际应用的 10 kV 及以下系统电流保护的整定原则, 保证 10 kV 及以下系统安全、稳定、可靠运行。

参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [s].
- [2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程 [s].

作者简介:

宋汉蓉 (1962), 女, 四川德阳人, 本科, 从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。

宋 其 (1964), 男, 四川德阳人, 研究生, 从事过电力营销工作。

尹 秦 (1963), 男, 四川工程职业技术学院。

(收稿日期: 2010-11-12)

(上接第 21 页)

电流计算方法也会产生短路电流计算误差, 那么现如今对短路电流的评价标准是否可以调整或者放宽。而且新疆的风电接入后对电网的单相、三相短路电流也有助增作用。这就使得要备加注意各地的母线短路电流是否超过各处断路器的遮断容量。

参考文献

- [1] 谢泽权. 限制短路电流技术的探讨 [J]. 广东电力, 1997, 10(2): 29-31.
- [2] 田华. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 56-60, 65.
- [3] 李明, 张小青. 电力系统故障限流器技术的研究 [J]. 电气时代, 2005(4): 54-56.
- [4] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] 何鸿基, 史可琴. 西北电网运行中的新问题 [J]. 中国电力, 2000, 33(5): 42-44.
- [6] 张炜. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社,

2004.

- [7] 陈怡静, 黄民翔. 宁夏电网短路电流水平分析和限流措施研究 [J]. 能源工程, 2008(2): 10-14.
- [8] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
- [9] 张益, 张滨, 等. 短路电流限制器对电力系统暂态稳定影响的研究 [J]. 继电器, 1998, 26(5): 8-11.
- [10] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 41-42.
- [11] 毛雪雁, 宣晓华. 500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的研究 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 26-29.
- [12] 成涛, 成连生. 电力系统的电磁环网运行 [J]. 华中电力, 2001, 14(6): 17-19.

作者简介:

胡仁祥 (1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

晁 勤 (1959), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究。

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 研究为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2010-11-12)

输变电系统可靠性工作的试点及研究

杨树¹, 金钟²

(1 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072; 2 乐山电业局, 四川 乐山 614000)

摘要:介绍了现实施的输变电设施可靠性评价规程与即将实施的输变电系统可靠性评价体系的联系和区别,并以本次乐山电业局试点工作为基础,探讨新评价规程在实际生产工作中的应用。

关键词:设施可靠性;系统可靠性

Abstract The relationships and differences between the reliability evaluation code for transmission and distribution installation which is in operation and the reliability evaluation system of transmission and distribution system which will be put into operation are introduced. Based on the pilot project of Leshan Power Supply Bureau, the application of new evaluation code to the practical work is discussed.

Key words: reliability of the installation; system reliability

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0040-02

0 引言

2009年初,国家电网公司组织对老版《输变电设施可靠性管理工作手册》进行了修订,形成了当前使用的《输变电设施可靠性管理工作手册(第二版)》。输变电设施可靠性作为电力可靠性管理的一项重要内容,是以设施功能为目标的面向设施的可靠性范畴。输变电设施可靠性管理以计算机为工具,以评价指标为基础,通过指标的分析,量化描述输变电设施在电力系统中的运行状况,指导电力系统规划设计、设备制造、安装调试和生产管理等各个环节的工作。输变电设施可靠性主要是指架空线路、变压器、断路器、隔离开关、电抗器、电流互感器、电压互感器、避雷器、耦合电容器、阻波器、电缆线路、全封闭组合电器、母线等 13 类设施在预定时间和规定条件下完成其规定功能的概率,即输变电设施可靠性评价属于元件可靠性评价。

1 输变电系统可靠性评价体系简介

输变电系统可靠性评价体系自输变电设施可靠性评价规程演变,其主要目的是更加系统地对输变电设施进行可靠性管理,构建独立的评价指标体系,通过对这些指标的分析,实现量化描述输变电系统在电

力系统中的运行状况,指导电力系统规划设计、设备制造、安装调试和生产管理等各个环节的工作目标。

输变电系统可靠性评价细则中对统计范围的划定与输变电设施可靠性评价规程中基本一致,对本企业产权范围内 66 kV 及以上全部输变电设施,包括受委托运行、维护、管理的输变电设施进行统计和管理,而变压器中凡电压等级低于 66 kV 侧均不纳入统计范畴。与输变电设施可靠性评价规程相比,输变电系统可靠性评价体系中最大的变化是引入了回路的概念,即连接两个或更多的传输终端、变电站或是系统输电节点之间的设备组称作回路,回路应具备以下功能:在某一特定的容量范围内将电能从一端传输到另一端;为系统提供操作可变的连接;在某些特定情况下能够自动地将本身与整个输变电系统隔离。

输变电系统可靠性评价体系中将回路划分为母线回路、变电回路和输电回路三种类型,其中母线回路是指在同一变电站内,同一电压等级地所有母线及其之间地联络设备,包括独立连接到母线上的不单独构成回路的设备(如避雷器、电压互感器等);变电回路是指变压器本体及其各侧母线回路连接点以内的设备;输电回路是指输电线路本体及其与各侧所接变电站母线回路连接点以内的设备。而判定回路是否停运的重要条件为回路是否丧失了某一特定容量范围下将电能从一端传输至另一端的功能,如此功能消失,则认为回路停运。相比较输变电设施可靠性评

价规程,回路基础属性中增加了电源点个数和连接回路数两个参数,运行数据中增加了折算系数这一参数。如图 1 所示即为一个含有一台双绕组变压器的变电回路。

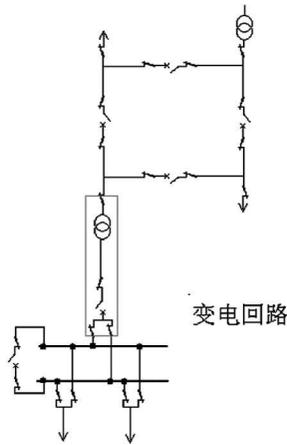


图 1 变电回路示意图

与输变电设施可靠性评价规程相似,输变电系统可靠性评价体系中回路运行状态也分为计划停运、故障停运、调度停运备用和受累停运备用,所不同的是,回路计划停运中包括了二次设备计划检修导致的回路停运,同时也包括了输变电设施可靠性评价规程中第三、四类非计划停运事件;输变电系统可靠性评价体系中的统计指标也由原来的单类设施指标转变为回路指标,包括回路可用系数、回路停运频率、回路故障停运率、回路平均故障停运时间等,同时也加入了回路计划重复停运率、回路瞬时停运率等新的指标。

2 可靠性试点工作及研究

本次试点工作范围包括了乐山地区内 500 kV 南天站、220 kV 九里站等 10 座 110 kV 及以上电压等级变电站,以及连接这 10 座变电站之间 110 kV 及以上电压等级架空线路 15 条,统计时间范围为 2007 年 1 月至 2009 年 12 月。本次试点工作的结果体现出了输变电系统可靠性管理与输变电设施可靠性管理的不同之处,主要表现在以下 3 个方面。

1) 停运事件时间统计的不同。以 2009 年 3 月 27 日 220 kV 九里站 1 号主变压器及 1011 号、1013 号隔离开关周期性试验为例,两类设施停役操作票的操作开始时间均为 3 月 27 日 7:00,1 号主变压器工作票上许可开始工作时间为当日 13:05,工作终结时间为 14:34,复役操作票上的操作结束时间为 2009

年 4 月 1 日 0:22;1011 号隔离开关许可开始工作时间为 13:09,工作终结时间为 13:32,1013 号隔离开关许可开始工作时间为 13:18,工作终结时间为 14:45。在输变电设施可靠性管理中,应对上述 3 个计划停运事件进行分别录入统计,其中起始时间和终止时间分别按操作票上的操作开始时间和操作结束时间统计,作业起始时间和作业终止时间分别按工作票上的许可开始工作时间和工作终结时间统计;而在输变电系统可靠性管理中,由于上述设施均处于 220 kV 九里站 1 号主变压器回路中,则按照变电回路计划停运事件统计,停运的起始时间与停役操作票上操作开始时间一致,终止时间与复役操作票上的操作结束时间一致,而工作票上的许可开始工作时间和工作终结时间则不参与统计。

2) 二次设备检修纳入相应回路计划停运事件统计。在输变电设施可靠性评价规程中,二次设备的停运事件不属于统计范畴,而在新的输变电系统可靠性评价体系中,二次设备的停运应记为相应回路的停运事件。例如乐山电业局 2008 年 9 月 19 日 10:05 220 kV 沫松北线 B、C 相阻波器试验,在输变电系统可靠性中记为 220 kV 沫松北线输电回路计划停运一次,停运时间从阻波器试验开始一直到该回路中最晚检修结束的号 2636 号隔离开关。

3) 对第三、四类非计划停运的取消。输变电设施可靠性评价规程中定义设施非立即停运,且能延迟至 24 小时后停运为第三类非计划停运,定义计划停运的设施,若不能如期恢复可用状态,则超过预定时间的停运部分,记为第四类非计划停运。而在输变电系统可靠性评价体系中,将第三、四类非计划停运事件全部归类为计划停运事件。例如 2008 年 6 月 13 日 220 kV 沫水站 102 开关 TA 三相因小修超时,在新的输变电系统可靠性评价体系中归为 220 kV 沫水站 2 号主变压器变电回路的计划停运事件中,而不再单独记为第四类非计划停运事件。

3 结语

输变电设施可靠性评价规程向输变电系统评价体系的过渡,更加科学合理地将回路功能与电能的传输紧密结合在一起,通过对回路中电能是否从一端传输至另一端来衡量回路功能的是否丧失,这对描述电

(下转第 60 页)

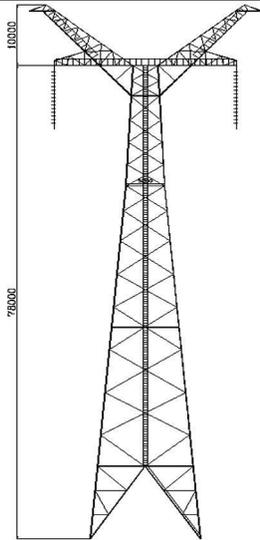


图 3 涪江大跨越直线塔 GBK-78

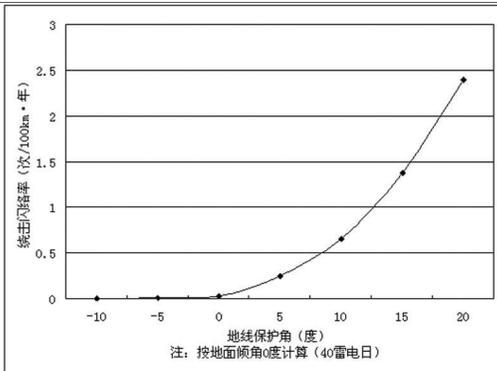


图 4 地线保护角与绕击跳闸率的关系

涪江大跨越塔从铁塔布材、导地线偏移、地线保护角等方面综合考虑,最终按保护角 -10° 设计。

分别按规程法(见《中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620-1997》)、电气几何模型(EGM)和先导发展塔型对涪江大跨越的绕击闪络率进行了计算,综合考虑绕击闪络率和反击闪络率后其雷击闪络其计算结果见表 2。

表 2 各种方法计算涪江大跨越雷击闪络率结果
(闪络率 /100 km·a)

改进电气 几何模型 (IEEE 推荐)	改进电气 几何模型 (Ericsson)	先导发 展模型 (Rizk)	规程法
0.005	0	0	0.143

5 结 论

大跨越线路的防雷保护措施主要是减少发生雷击线路的绕击闪络率和反击闪络率。降低绕击闪络率主要措施是减小避雷线的保护角;降低反击闪络率的主要措施是增加线路绝缘子和减小杆塔接地电阻。

计算结果表明,涪江大跨越段的雷击闪络率满足要求。对涪江大跨越的雷电性能的分析计算方法可以做为国内同类大跨越线路防雷设计的借鉴。

参考文献

- [1] 李晓岚,尹小根,余仁山,等.基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J].高电压技术,2006,32(3):42-44.
- [2] 郑江,林苗.110~500 kV 输电线路的绕击雷害分析[J].电力建设,2006,27(11):35-36,50.
- [3] 李晓岚.击距系数及基于电气几何模型的输电线路绕击跳闸率计算的研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [5] 司马文霞,陈宁,许高峰,等.高杆塔大跨越输电线路防雷保护[J].重庆大学学报,2002,25(9):25-28.
- [6] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines[S].1997.

作者简介:

佟继春(1978),男,硕士,工程师,从事高压输电线路设计。

(收稿日期:2011-01-13)

(上接第 41 页)

力系统的运行状况,指导电力系统规划设计、设备制造、安装调试和生产管理等各个环节的工作,均较输变电设施可靠性评价规程都有不小的提升。

参考文献

- [1] 邱仕义.电力设备可靠性维修[M].北京:中国电力出版社,2004.

- [2] 谢亮.输变电设备状态检修与可靠性管理的关联研究[C].2009年全国输变电设备状态检修技术交流研讨会论文集,2009:11-12.
- [3] 国家电网公司.输变电设施可靠性管理工作手册(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 国家电网公司.输变电系统可靠性评价实施细则[M].北京:中国电力出版社,2009.

(收稿日期:2011-02-20)

一起典型的保护误动作事故分析

卢天盛, 马彦伟, 李萍萍
(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要:对于微型继电器保护装置,用于零序功率方向判别都是采用自产零序电压和电流,虽然避免了采用外接零序电压电流可能出现的极性错误,但同样可能由于二次回路接线错误导致误判方向。以一实例说明了二次接线错误导致的保护误动作事故,对类似电网安全稳定运行提出了针对性的建议。

关键词:零序;互感;负序

Abstract: For microcomputer-based relay protection device self-produced zero sequence voltage and current are adopted for the discrimination of zero sequence power direction. It avoids the possible polarity mistakes when connecting with zero sequence voltage current, but the misjudgment of direction also may be caused by the wrong secondary circuit wiring. Taking the accident of protection misoperation caused by the wrong small wiring for example, the corresponding suggestions are put forward for the safe and stable operation of the grid.

Key words: zero sequence; mutual induction; negative sequence

中图分类号: TM774 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0042-03

1 保护动作情况

某日 15:07, DS 站及 GD 站主控室事故音响响起, DS 站监控后台屏幕显示“110 kV DS 站 CS 线距离 I 段保护动作,重合闸动作,距离后加速动作”,且 RCS-941A 保护装置液晶屏显示“C 相接地故障, Z1 动作,测距为 1.8 km”; GD 站监控后台屏幕显示“110 kV GD 站 ZG 线零序 II 段保护动作”,且 LFP-941A 保护装置液晶屏显示“BC 相接地故障, L02 动作”。

梯级水电站动作情况为: CSB 电站 ZC 线 151 开关、CF 线 152 开关分别在 0.2 s 和 0.3 s 时候零序 II 段保护动作跳闸, CSB 电站变压器低后备保护(1.5 s 未投方向)动作切除 CSB 变压器,高后备保护由于功率方向指向主变压器(反向)且时间为 2 s 零序各段时间为 4.3 s 故未动作。

梯级水电站五个电站故障前均是每个电站的两台发电机组全部投入运行,故障时除 FS 站 1 号发电机组、ZZ 站 2 号发电机组外所有发电机组均在故障过程中由发电机机械保护跳闸。FS 站 1 号发电机组、ZZ 站 2 号发电机组在故障发生时没有跳闸,经检查为当时这两个水电站为保各自站用变压器而设计,

同时在故障发生期间故障导致的发电机组过速和过电压都没有达到两机组机械保护动作值。

2 事故时系统运行方式

系统当时运行情况如下。

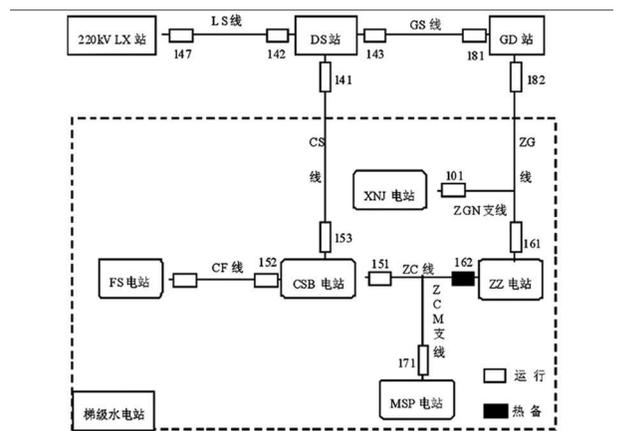


图 1 事故时系统运行方式

在对系统运行情况及录波波形分析后得知: 220 kV LX 站、梯级水电站的 CSB、ZZ、MSP、XNJ、FS 电站主变压器中性点均直接接地, 110 kV DS、GD 站主变压器中性点不接地。故障发生时 CF 线 152、ZC 线 151 向 CSB 送入负荷, CSB 153 通过 CS 线向 DS 供电, ZZ、XNJ 也分别通过 161 和 101 向 GD 供电。

3 事故理论分析

经巡线发现本次动作的故障点在 110 kV CS 线路上离 DS 站 1.8 km 处,为吊车吊树引起线路 C 相接地故障,ZG 线巡线无异常。此时 DS 站 CS 线保护感受到了故障电压和电流,DS 站 141 开关接地距离 I 段保护正确动作跳闸。

DS 站 CS 线 141 开关在启动 60 ms 后接地距离 I 段保护动作,考虑开关跳闸时间 40 ms DS 站 CS 线 141 开关在 100 ms 后彻底断开,CSB 电站 CS 线 153 开关保护整定时间 3 s 保护未动,而 CSB 电站 ZC 线 151 开关、CF 线 152 开关分别在 0.2 s 和 0.3 s 后零序 II 段保护动作跳闸,选相 C 相,都为误动作。故障发生后 1.5 s 时 CSB 电站主变压器低后备复压过流(不带方向)保护动作跳闸才将 CS 线故障点隔离,此时,DS 站 CS 线 141 开关保护检后无压重合闸启动,3.5 s 后重合闸动作并后加速将开关再次跳开。

在 DS 站 CS 线发生接地故障后,由于 ZG 线和 CS 线有 40 多公里为同杆并架线路,CS 线的零序电流将对 ZG 线产生很大的零序互感,在此零序互感作用下,GD 站 ZG 线感受到的零序电流和零序电压在零序保护正方向动作区内且达到定值,因此 GD 站 ZG 线零序 II 段保护在 900 ms(分析 GD 站 ZG 线录波,在故障发生后 100 ms 后 GD 站 ZG 线零序功率方向由区外转向区内,定值 0.8 s)左右零序 II 段保护动作,考虑开关机构跳闸时间 40 ms 后在 940 ms 左右 GD 站 ZG 线 182 跳开。

FS 站从录波装置分析和 MSP 站从线路保护装置录波图分析看出此两站线路保护装置判断故障是在正方向,但零序 II 段保护时限较长(MSP: 3.5 s,FS: 3.5 s),故此两站也未动作。

4 事故录波分析

由于 ZZ 站 2 号发电机在故障发生后 7 分多钟才由运行人员手动切除,可以从 ZZ 站 110 kV 母线电压在发电机切除前一直有电压可以验证 ZG 线确实无接地故障。同时从 GD 及 ZZ 站在 ZG 线跳闸后一直无零序电压也可以验证 ZG 线在整个过程中确实无接地故障。

从 GD 站 ZG 线、ZZ 站 ZG 线、XNJ 站 ZGN 支线录波图可以看出零序电流在 200 ms 后零序电流有明显减小,在 300 ms 后还有一个明显减小,这是由于在 200 ms 时 CSB 站 ZC 线 151 开关跳闸,甩了 MSP 站两台机组,引起零序网络零序阻抗增大,造成 CS 线上零序电流减小,在 ZG 线上的零序互感电流减小,在 300 ms 时 CSB 站 CF 线 152 跳闸,甩了 FS 站两台机组,同样造成 ZG 线上的零序互感电流减小。这就更印证了 ZG 线是由于零序互感引起的跳闸。

从 GD 站、XNJ 站、ZZ 站故障时 60 ms 前后零序功率方向变化情况和 60 ms 后零序功率方向元件均判为正方向也能得出是由于受互感影响的结论,虽然零序功率方向在正方向,但由于零序 II 段保护时间较长(XNJ: 3.6 s,ZZ: 3.1 s),故没有跳闸。

同时,若是 CS 线互感引起 ZG 线跳闸,则相当于是 ZG 线三相电流上叠加了一个与 ZG 线上 I_g 方向相反的感应电流分量,在此感应电流分量作用下将导致 A、B 相电流幅值增大、相间夹角减小,C 相电流减小的效果,录波图上完全符合此特征,也印证了 ZG 线跳闸是由于 CS 线互感引起。

ZZ 和 XNJ 站主变压器复压过流及零序过流时间定值如表 1 所示。

表 1 主变压器复压过流及零序过时间定值

变电站	高后备复压过流	高后备复压过流	零序过流	低后备复压过流
ZZ	1.7 s	1.7 s	4.5 s	指向 10 kV 母线 1.5 s
XNJ	1.7 s	1.7 s	3.9 s	只跳 10 kV 总路 1.4 s

由表 1 可以看出,ZZ 和 XNJ 站主变压器保护均不符合保护动作条件,故在故障过程中均未跳闸,因此 ZZ 和 XNJ 站主变压器中性点仍然接地,这也是在 100~940 ms 时 GD、ZZ 和 XNJ 线路保护仍然感受到零序电流的原因。

各站线路保护零序功率方向及变化如表 2 所示。

表 2 列表表示各站各线路保护在故障时零序方向判定。

5 事故分析结果

此次事故由于 FS、CSB、ZZ 电站线路保护装置型

表 2 线路保护零序功率方向及变化

变电站	线路	所取时限 /ms	$3I_0$ 超前 $3U_0$ 角度 /°	零序功率 方向
	ZC151	0~80	-70	负
		80~200	-70	负
CSB	CF152	0~80	-60	负
		80~300	-70	负
		CS153	0~80	80
		80~1 500	110	正
ZZ	ZG161	0~80	90	正
		80~900	100	正
FS	CF	0~300	120	正
XNJ	ZGN 支 101	0~80	110	正
		100~900	120	正
MSP	ZCM 支 171	0~200	100	正
GD 站	ZG 线 182	0~80	10	负
		80~900	105	正

号为 WXB-87A, 装置内部只能保存最近五次事件, 水电站检修人员在 7 月 9 日已经对线路保护装置进行过试验, 将 7 月 6 日故障及启动记录冲掉, 因此 7 月 6 日的事件在保护装置内已无记录。从 CSB 录波装置打印出的波形图来看 151、152 线路保护零序方向是在区外, 而通过对线路保护装置的测试来看线路保护逻辑和方向判断均无误。

接下来对线路保护装置电流电压回路进行进一步核查, 问题出现在 CSB 站线路保护装置电压外回路接线上, 由于设计是开入线路保护装置只有 A/B/C/N, 而外回路 L 在线路保护端子排上中转了一下没有开入线路保护装置, 但是在 CS 线线路保护装置上从主变压器保护屏转过来的电压来端 L 和 N 与主变压器保护屏接反了, 因此此种接线相当于外接零序 L 开入了线路保护装置的 N, 而实际电压回路的 N 则转走了没有开入保护装置, 结合从 CSB 站录波装置录到的故障时刻电压数值分析并绘制故障时的矢量图, 可以看出故障时刻由于上述原因导致了自产零序电压与外接零序电压反向。CSB 站 ZC 线和 CF 线电压也都是从 CS 线取过去的, 因此会导致这三条线路在零序判方向时候造成自产零序电压反向, 从而导致零序保护反方向误动作。

正常运行时由于 L 与 N 很接近, 因此通过观察采样发现不了此问题。

错误接线图见图 2。

具体矢量图如图 2 所示 (根据故障时 CSB 站录

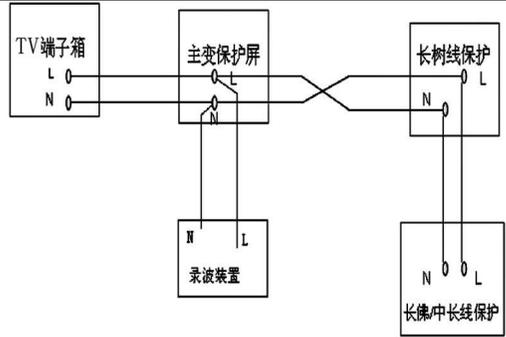


图 2 错误接线图

波装置采集到的 ZC 线 151 数据和角度为例分析, 选取故障后 120 ms 数据进行分析, $U_a = 61.62 \text{ V}$, $U_b = 64.73 \text{ V}$, $U_c = 32.44 \text{ V}$, $U_L = 23.45 \text{ V}$, 相间相位关系为正相序);

图 3 中 U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_L 为故障时 CSBZC 线 151 的大小及相位关系, U_L 为外接零序电压, 接线错误后线路保护电压回路中性点实际漂移到了 N' 点, U_a' 、 U_b' 、 U_c' 为线路保护装置实际进行零序功率方向判别时用于计算自产零序电压的三相电压。

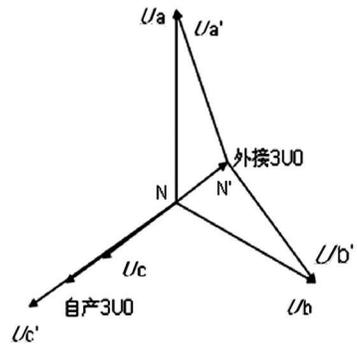


图 3 矢量图

6 总 结

此次事故为一起典型的电压回路接线错误, 因此, 对于任何新投设备, 在送电及年检后应及时对整个电压回路的 L 和 N 进行测试, 如有异常应立即进行检查处理。

同时建议线路保护厂家升级程序, 如增加负序电压闭锁条件可以有效防止同杆并架线路在强磁弱电效应下的零序互感误动作; 同时可以在线路两侧考虑增设纵联保护, 若条件允许可以采用光纤差动保护, 也可以采用与电话载波通道复用的纵联保护通道。

(收稿日期: 2011-01-20)

一起由于定值跑区造成保护误动原因分析及改进措施

曾 丽¹, 胡晶晶², 吴俊美¹, 李 刚¹

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 四川省电力公司超高压公司, 四川 成都 610000)

摘 要:介绍了某变电站 220 kV 线路 11 型微机保护在系统出现小扰动后发生误动事故的概况。通过分析误动保护的故障报告及软件流程, 并结合现场模拟实验, 指出了保护误动的原因是由于拨轮开关接触不良, 造成定值跑区而使高频保护方式从闭锁式变为允许式造成的。结合本次事故发现的问题, 提出了相应的整改措施, 以避免相同事故的再次发生。

关键词: 误动; 高频保护; 定值区; 微机保护; 拨轮

Abstract: A mishandling fault of 11 type microcomputer-based protection of 220 kV line is introduced. Through analyzing the fault report and the software process of misoperation protection, and combining with the simulation experiment, the reason of misoperation protection is pointed out that the contact of thumbwheel is not good which causes fixed set-point not be within the zone and makes the way of high frequency protection from enclosed type to permissive type. In connection with the problems found in the fault, the corresponding rectification measures are proposed to avoid this fault.

Key words: misoperation; high-frequency protection; fixed set-point zone; microcomputer-based protection; thumbwheel

中图分类号: TM773 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0045-03

0 引 言

电力系统中, 高压输电线路由于处在户外且大多所处环境恶劣, 极易发生短路、接地等故障, 这就要求线路保护装置能够快速准确地判断并切除故障。继电保护装置一旦发生保护误动, 将会导致事故范围的扩大, 后果十分严重。造成保护误动的原因多种多样, 现对一起由于定值跑区导致 220 kV 线路高频保护误动的原因进行了详细分析。

1 保护动作情况

德阳 220 kV 某变电站古五东线 263 号开关配置两套微机保护装置, 一套为南瑞的 LFP-901, 一套为许继厂的早期产品 WXH-11 微机保护, 高频保护运行定值区在 1 区, 其运行数年一直状态良好。某日古五东线 263 号开关 A 相跳闸, 随后重合成功。WXH-11 微机保护发出“A 相跳闸”、“重合闸出口”信号。LFP-901 装置有启动报告但未出口。

保护装置跳闸报告:

* * * QD < 24 05 07 25 20 >

30 ms GBLOCK

1 034 ms	CHCK		
5 886 ms	CJ	X=EMAX	
R=EMAX	AN	D=EMAXKm	
CPU1 报告:			
16 ms	GBLOCK	0.64	AN
18 ms	GBLOCK		
2 984 ms	GBLOCK		
DATE	< 24, 05, 07, 25, 20, 338		
TME	I _a	I _b	I _c 3I ₀ U _a U _b U _c 3U ₀
-12	-4.28	-0.71	4.63 0.00 78.0
-13.0	-65.5	-0.3	
...
-2	-5.16	4.44	0.18 -0.18 64.0 -
79.5	13.4	-1.5	
-1	-5.34	2.14	2.84 -0.18 81.0 -
52.3	-29.6	-0.3	
0	-3.56	-1.07	4.44 0.54 74.0 -
12.1	-64.5	-2.5	
1	-0.36	-3.91	4.81 0.89 48.0 31.5
-81.5	-2.1		
2	1.95	-5.69	3.91 0.54 13.4 65.5
-79.0	-0.2		

3	3.73	-6.03	2.14	0.36	-26.5	81.5	
	-55.3	-0.1					
4	4.97	-4.81	-0.54	0.00	-60.3		
	77.5	-14.6	2.1				
5	4.44	-2.31	-3.20	-0.54	-77.5		
	51.3	28.8	2.7				
6	2.67	0.89	-4.63	-0.89	-75.5		
	11.8	64.5	0.5				
7	0.00	3.56	-5.16	-1.07	-51.0		
	30.4	82.0	0.3				
8	-2.48	5.34	-4.28	-0.89	-12.8		
	-65.5	79.0	0.5				
9	-4.44	5.88	-2.14	-0.71	27.3		
	83.0	54.3	-1.1				
10	-5.34	4.63	0.36	-0.18	59.8		
	78.0	14.6	-3.7				
...

对照《WXH-11型微机保护检验规程》，其打印信息含义如下。

- QD 保护启动
- GB₀CK 高频零序出口
- CHCK 重合出口
- CJ 测距

其他 CPU2—CPU4 打印的采样值与此相似。高频保护运行定值区 1 区的高频启动电流为 0.3 A，零序停信电流为 1 A。

2 保护误动原因分析

220 kV 古五东线 263 号开关跳闸时变电站内无任何操作，查看 11 型微机保护动作时刻 CPU1 采样值，单相和零序电流及电压变化都不大，只有 N 相上感受到一个很小的系统扰动，可以判断该线路没有故障，从另一套保护未动作和对侧变电站对应的线路开关未跳闸也可得到证明。从故障时刻采样值可看到，这时的零序电流虽小，但已大于保护的高频启动电流值，使微机保护启动。

由于保护装置是无故障跳闸，因此对保护装置进行了全方位的检查。首先对保护装置外观和保护装置内部、外部端子排连线检查未见异常。然后对保护装置回路的交、直流绝缘检查也正常。对高频保护运行的定值区 1 区定值打印后检查定值正确。同时也

对高频收发信机及通道进行检查均正常。由上述检查可以确认，保护装置误动应该不是外围回路造成的。

结合 11 型微机保护保护动作行为，分析 11 型微机保护 CPU1 高频程序流程图^[1,2]，如图 1 所示（图中与高频保护跳闸无关的流程省略）。

当线路单相接地故障时，保护进入故障判断逻辑，此时如果故障为正方向故障且大于相应定值，则判断 CPU1 定值的控制字 KG 中的 D8 位是 1 还是 0，是 1 表示高频保护为闭锁式，是 0 则是允许式。如果是闭锁式则判断标志字 SXB 是否等于“1”，即收信输入是否连续 5~7 ms 收到过高频信号。如过 SXB = 1，程序则驱动 TXJ 报告 GB₀TX。当保护是允许式时，程序跳过判断 SXB 是否等于“1”，直接驱动 TXJ 报告 GB₀TX。这时程序再次判断高频是否为允许式，如果是，且收到跳频信号，延时确认、报告 GB₀CK，然后选跳。如果高频保护是闭锁式，且这时 SXB = 1 并且未收到闭锁信号，延时确认、报告 GB₀CK，然后选跳。

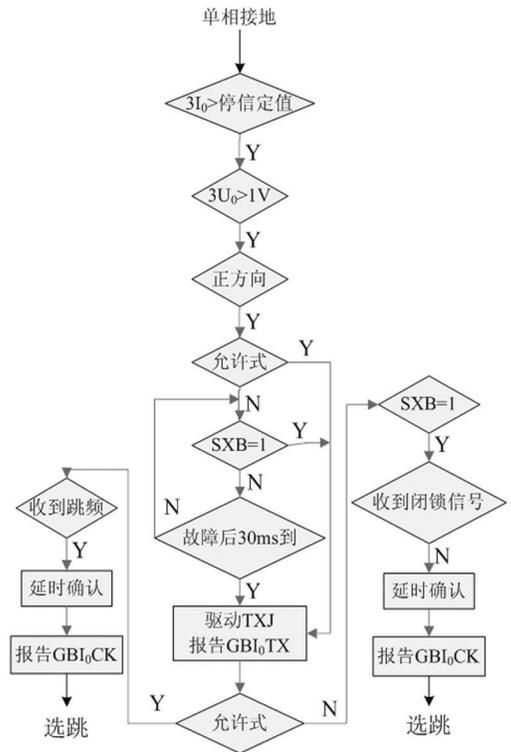


图 1 CPU1 高频保护跳闸流程图

由上述和保护动作报告可以看出，11 型微机保护单相跳闸是高频保护程序启动且动作的，而这其中的关键是高频保护是否是允许式的。因此，应着重分析保护程序中驱动 TXJ 报告 GB₀TX 到报告

GOBACK 的时间长短。

3 模拟实验

在 11 型保护装置高频保护运行定值区 1 区做了停电试验。试验过程中分析 CPU1 的报告发现高频保护停信及出口间的时间有不对应情况, 有时 GOBXTX 动作后 6~8 ms GOBACK 才动作, 但有时 GOBXTX 动作后 2 ms GOBACK 就动作 (这与故障时的现象一致)。根据这一疑点从高频保护跳闸流程图中分析, 当高频保护为闭锁式时, 停信后 2 ms 应不会出口跳闸。由此可以判断此时高频保护没有工作在闭锁式而是在允许式。造成这种结果的原因有两种, 一种是整定定值错误; 另一种就是保护整定值区存在跑区现象。

将高频保护插件其它几区的随机定值取出与运行定值 1 区的定值进行比较, 发现 0 区的随机定值上的控制字 KG=8202 其中第二位的十六进制 2 转化为二进制为 0010, 它表示控制字的 D10-D7 位, 很明显 D8 位是 0, 表示高频保护是允许式。1 区的整定定值控制字为 8303 转化为二进制 D8 位是 1, 表示高频保护是闭锁式, 定值整定正确。

带上通道进行试验, 在 0 号定值区的随机定值下进行试验 (该区的高频零序电流停信门槛值为 0.3 A)。发现在加入与故障时同等大小的电流 0.64 A 的零序故障电流情况下, 高频保护装置在高频通道正

常的情况下要出口, 且停信与出口间的点位相距 2 ms 多次重复试验, 结果一样。将 0 区定值上的控制字改为 8303 所作试验结果为: 保护装置不出口。

11 型微机保护的定值切换方式为拨轮切换式, 其原理图如图 2 所示^[3]。

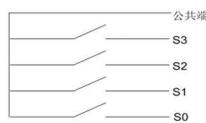
由图 2 可见, 当触点 S0、S1、S2、S3 全部断开时, 定值区在 0 区。检查装置 CPU1 插件中的定值切换拨轮, 发现拨轮的接触电阻较大。拆下拨轮检查发现, 由于 CPU1 长期在 1 区下运行, 且定值区很少进行切换, 拨轮密封不严, 造成灰尘进入使拨轮触点接触不良, 当其触点 S0 接触电阻大于一定数值时, 就会造成定值区在 0 区运行。虽然 11 型微机保护是直接 RAM 里读取定值, 但在试验中发现, 只要将拨轮开关拨动, 无需进行定值固化过程, 定值即被更改。

由上述分析可以断定, 此次误动是由于保护装置感受到外部有一个小的系统扰动 (当时有一条 500 kV 线路发生接地故障), 加上保护定值区在 0 区运行, 而使高频保护为允许式造成了误动。

4 防范措施

在早期的微机保护中拨轮开关是保护定值切换的主要形式, 虽然目前微机保护定值切换已经变换为电子式切区方式, 但保护装置仍然时有跑区现象。

因此, 应对定值跑区现象高度重视, 为了防止定值跑区造成保护再次误动, 应将微机保护装置的每个定值区均整定为正常运行定值, 如有特殊定值区存在, 则应将定值设定在定值跑区后不易到达的定值区 (如 7 区)。且在预试中对于拨轮开关应多次拨动, 以防止灰尘影响。



a 电路图

区号 \ 状态	S3	S2	S1	S0
0	x	x	x	x
1	x	x	x	-
2	x	x	-	x
3	x	x	-	-
4	x	-	x	x
5	x	-	x	-
6	x	-	-	x
7	x	-	-	-
8	-	x	x	x
9	-	x	x	-

×表示触点导通; -表示触点断开。

b 拨轮对应关系

图 2 定值拨轮开关原理图

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心·WXH-11型微机保护检验规程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] WXH-11型微机线路保护装置说明书 [Z]. 许昌继电器厂.
- [3] 国家电力调度通信中心·电力系统继电保护实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

作者简介:

曾丽 (1980), 女, 本科, 工程师, 长期从事电力系统状态检修工作;

胡晶晶 (1979), 男, 硕士, 助工, 长期从事继电保护工作。

(收稿日期: 2011-03-01)

计及加权网络拓扑的备用购买双层决策

张国芳^{1,2}, 刘俊勇^{1,2}, 吕林^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065, 2. 四川省智能电网重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:为反映大电网多市场环境下对电网运输的不确定影响,提出了加权网络拓扑分析下的电力交易对备用服务的购买模型。以备用服务为研究对象,基于线路电抗的加权电网拓扑,考虑关键线路的备用可用率,构造了考虑阻塞风险的备用获取模型,并利用双层规划进行全局优化计算得最优备用分配。该模型通过带阻抗权重的将电网简化为有向加权稀疏连通图,从输电通道裕度角度和发电容量归属建立脆弱深度指标,定量反映不同交易注入下通道受扰程度。上层优化以供电公司效用最大化为目标,下层以备用成本最小化为目标,以通道受扰程度为约束。算例结果表明备用通道分析可方便调度人员明确通道冗余度状况,加大了安全性和经济性。

关键词:备用服务;加权网络拓扑;双层规划;通道裕度

Abstract: In order to reflect the influence of uncertainty on transmission in the large grid and multi-market environment, the trading model of reserve services in the weighted grid is proposed. Based on a weighted network topology, considering the availability of critical lines, the reserve acquisition model with congestion risk is put forward, and bi-level programming is used to optimize the reserve allocation. The model simplifies the grid with impedance weight to the directed weighted connected graph, and establishes the vulnerability indicators from the transmission channel margins and capacity attribution to quantitatively reflect the condition of different channels disturbed after the injection. Upper optimizing goal is maximizing the effectiveness of the power company, while the lower targets are minimizing the purchasing cost as terms of restriction. The example shows that the analyses of reserve channels can help the dispatchers make clear the channel margins, and enhance the safety and economy.

Key words: reserve services; weighted network topology; bi-level programming; channel margins

中图分类号: TM769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0048-05

0 引言

电力系统的快速发展,对电网安全性及可靠性要求越来越高,备用服务作为辅助服务中的一项传统保障方式已被不少学者研究,但随着电力市场开放、电网互联,备用的市场模式研究显得十分重要。多品种交易使得发电商或用户需更加直观、精确地了解网络使用程度,规避信息不透明度和功率流动随意性,合理购买备用成为用户最为关注的问题。

文献[1]介绍了备用定义、分类、定价和获取方式。文献[2-3]以备用容量为对象,采用概率等方法优化购电费用。文献[4-7]以备用电价对象,介绍了旋转备用主要的竞价模式。但都尚未考虑网络阻塞情况,使备用购买变成“可发不可用”。加权网络拓扑作为新兴理论为网络分析提供了全新技术发展空间。文献[8]验证了考虑电网物理特性的加

权网络拓扑分析的可行性。新理论的引用避免了传统的潮流归属计算方法中静态以及无损处理^[9]的问题。

基于加权电网拓扑分析,研究发电机组对潮流贡献,构建一种兼顾输电性和经济性的购电双层优化模型。该双层优化模型的上层以在一定收益下供电公司的风险最小化为目标,下层则以备用成本最小化为目标,综合考虑了负荷的不确定性和备用调用率,结合发电机贡献的影响确定备用交易计划。算例表明通道分析可帮助决策人员明确备用通道冗余度从而制定决策使利益最大化。

1 加权网络拓扑演化

1.1 分权通道拓扑

从图论角度,分析输电网络通道时可不考虑网络元件的特性,可将电力系统抽象为一个由 n 个顶点和 L 条边构成的稀疏连通图 $F=(N, L)$, 其中 N 表示

m 个发电厂和 k 个负荷的顶点集合, L 表示代表支路集合。

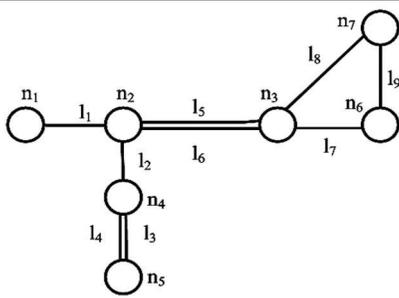


图 1 一电网拓扑结构

1.2 通道电流贡献归属分量

将系统中所有发电机等值成节点注入电流源, 所有负荷等值成阻抗。设第 q 台发电机的输入功率和节点电压分别为 S_{Gq} 和 U_{Gq} , 则发电机 G_q 的等值注入电流 I_{Gq} 为

$$I_{Gq} = (S_{Gq} / U_{Gq})^* \quad (1)$$

$$Z_{Lh} = 1 / Y_{Lh} \quad (2)$$

式中, 符号 “*” 表示共轭; Y_{Lh} 为负荷 L_h 的等值导纳。得到系统的等值模型如图 2 所示。

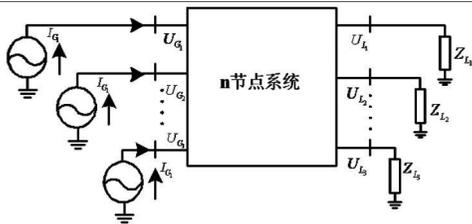


图 2 系统等值模型

系统中输电线路采用 π 型等值电路, 如图 3 所示。图中, $Z_l = r_l + jx_l$ 为线路 l 的等值阻抗; $x_{l0} = x_{l0}$ 为对地电容对应的等值电抗的一半; ΔS_{il0} 、 ΔS_{jl0} 分别为节点 i、j 侧对地支路的复功率损耗; S'_{ij} 和 S''_{ij} 分别为线路 l 的联络支路首末端复功率; S_i 为从节点 i 流入线路 l 首端的复功率; S_j 为从线路 l 末端流入节点 j 的复功率; U_i 和 U_j 为节点 i 和 j 的电压, i 和 j 表示线路 l 的首末端节点号。上述功率和电压向量由稳态潮流解事先确定。

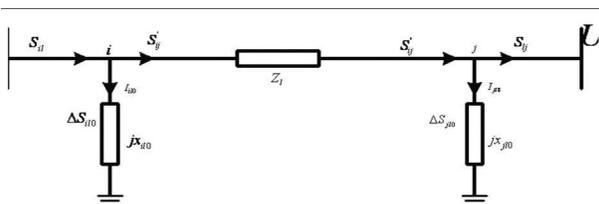


图 3 线路等值模型

发电机 G_q 对线路 l 首端的复功率潮流为

$$S_{iGq} = (I_{iGq} \cdot I_{ij}) Z_{ij}^{*} \quad (3)$$

发电机 G_q 对线路 l 的联络支路首端, 末端潮流

为

$$S'_{ijGq} = S_{iGq} - \Delta S_{ijGq} \quad (4)$$

$$S''_{ijGq} = S'_{ijGq} - \Delta S_{Gq} \quad (5)$$

发电机 G_q 对线路 l 末端的复功率潮流为

$$S_{jGq} = S''_{ijGq} - \Delta S_{jGq} \quad (6)$$

电网实际运行中, 电源节点和负荷节点之间存在多条路径, 电力供应由多个电源节点同时完成。在以上分析的基础上提出了“潮流权数”概念, 从电路理论出发计算出各交易对通道的利用情况, 同时可以衡量节点在网络中的重要度。

$$P_e(i, j) = \sum_{\substack{e \in G \\ f \in L}} \frac{n_{ij}(e)}{n_{ij}} \sqrt{W_x W_c} S^{dt}(i, j) \quad (7)$$

1.3 关键支路

多市场环境, 发电机组或供电公司需要电能, 在电网中的流动情况, 以此来衡量对输电网的使用程度, 为输电费用的合理分配提供理论依据^[10], 也为备用服务提供定价依据, 须进一步明确各发电机在通道内占用的潮流比例。若某一备用交易潮流 (d) 在支路 l 潮流权数超过 ξ 则备用交易对所传输路径影响大, 调用时造成阻塞的可能性也越大, 为关键支路 L_ξ 。

2 双层最优备用容量的确定

发电机组参与备用市场竞争, 同时会产生机会成本。为了降低备用的期望成本, 供电公司和大用户不能只考虑容量或电量竞价, 必须估计备用在实时运行时被使用的可能性和大小。因此备用竞价可表示为 $R_i + xE_i$, 其中 R_i 为容量竞价, E_i 为电量竞价, x 表示备用调用率, 即被调用的备用容量与获取的备用容量之比。为了保证竞价过程的透明性, 系统应在发电商提交竞价前确定 x 。若直接交易传输过程中经过关键线路, 则需考虑额外的线路占用费用 Q 以途经的关键线路条数累加。故系统中备用购买总成本由容量成本和电量成本、关键线路费用三部分构成, 即 $C = C(R) + xC(E) + nQ$ 。

研究对象为长期合同市场中, 备用直接交易市场 and 网购备用市场的组合优化。在此阶段合同市场内可以稳定长期电能价格, 而电量电价按月出清, 与备

用调用率有关,只能基于随机模拟进行估计。因此总购电成本 C 是随机变量。

设电量由暗投标产生,设为 Q_a, Q_b , 则备用市场总收益为

$$B = p_a Q_a + p_b Q_b - C \quad (8)$$

$$\text{其中, } p_a = R_a + xE_a, \quad p_b = R_b + xE_b$$

购电组合的损失 F 是负的收益。这里以购电组合损失的 CVaR 值表示组合风险,则备用市场应适当分配备用容量,指导购买,使整体利益最大化,同时风险最小化。并且优先网购市场,保证系统内大多数用户供电安全,以有效备用为交易限度,危险支路数为影响上限。购电组合策略为 $S = \{Q_a, Q_b\}$, 借助证券投资组合理论,以最小化风险为目标,则采用混合市场中的备用容量采购双层优化模型如下。

$$\begin{cases} \min \text{CVaR}(B) \\ \text{s.t. } E(B) > B_0 \\ S^{\min} < S < S^{\max} \\ \begin{cases} \min p_a Q_a \\ \text{s.t. } Q_{i \min} < Q_i < Q_{i \max} \\ L_i < L_{i \max} \\ \left\{ \mathbb{R} \left\{ \sum_{i=1}^N [p_i + r_i d_i] \geq D(t) \right\} \geq \alpha \right. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\text{CVaR}(B)$ 表示收益 B 的 CVaR 值,计算方法可参见文献 [12], $E(\cdot)$ 表示随机变量的均值; B_0 表示期望最小收益。这里为保证备用交易可行性,规避阻塞风险,在下层优化约束条件中加入关键支路数 L_i , 以及备用需求约束。 r_i 为机组 i 被选中的旋转备用容量; d_i 为机组 i 的状态变量; $\left\{ \mathbb{R} \left\{ \sum_{i=1}^N [p_i + r_i d_i] \geq D(t) \right\} \geq \alpha \right.$ 表示在计及负荷预测误差的情况下,系统所获取的备用容量满足系统安全运行要求的概率; α 为给定的、需要满足系统备用容量要求的置信度水平。

所遇到的问题是:只有市场出清之后,才能得知备用调用量,从而计算采用概率函数进行描述。这种估计基于可获得的历史竞价数据,出清价格以及其他信息,采用统计分析方法进行。

上述双层购电组合模型的第一层表示在一定的收益 B_0 下最小化购电风险。第 2 层供电公司在网络安全传输的前提下最小化备用费用。该模型的决策机制假定上层的决策者供电公司,首先指定购电组合 S 然后下层的决策者供电公司在此前提下做出自己最优的“合理反应”,即备用市场的价格和电量。再

反馈至上层模型,计算在此指定的 P_a, Q_a 下收益 B 和 CVaR 值,因此,这种主从递阶的决策问题比一般的单层决策问题更为复杂。

3 基于粒子群优化算法的模型求解

在上述的双层决策系统中,其最大特点是一个双层的随机优化问题。由于文中备用调用率随机产生,下层决策中也存在随机变量,因此需采用蒙特卡罗模拟求解。它是一类通过随机变量的统计试验和随机模拟来求解物理、数学、经济管理和工程技术领域中的近似解的数值方法,非常适合求解异常复杂。粒子群算法 (PSO) 是基于种群的进化演化算法,具有全局收敛性和随机搜索性,且结构简单控制参数少。设计了一种基于蒙特卡罗模拟和 PSO 算法的求解双层优化问题的 Monte-PSO (简称为 MP 算法) 用来求解该双层优化问题。

3.1 算法介绍

3.1.1 数据抽样模拟

在获得随机变量 x_a, x_b 的概率分布函数的基础上,利用蒙特卡罗随机产生大量的样本值 (x_a, x_b) 样本。

3.1.2 初始化

初始化 PSO 算法中的参数;随机产生下层模型的初始解 (需满足约束条件);随机初始化粒子群中粒子的位置 Y_i 与速度 $V_i, i \in [1, m]$, m 为群体规模 (即粒子个数,其中每个粒子表示一个可行解);将第 i 个粒子的 P_i 设置为该粒子的当前位置, P_g 设置为群体中最佳粒子的位置。

3.1.3 更新粒子位置与速度

在 N 维空间中存在位置向量和速度向量。

$$Y_i^k = (x_i^k, \dots, x_n^k, \dots, x_N^k) \quad (10)$$

$$V_i^k = (v_i^k, \dots, v_n^k, \dots, v_N^k)$$

其中, $y_n^k \in [l_n, u_n]$, $1 \leq n \leq N$, l_n 和 u_n 是位置向量 Y_i^k 第 n 维座标的下限和上限;速度向量 V_i^k 值被限定在 $[V_{\min}^k, V_{\max}^k]$ 之间。在 PSO 算法的每一次迭代过程中,整个种群的所有粒子根据以下两个公式被更新。

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - Y_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - Y_i^k) \quad (11)$$

$$Y_i^{k+1} = Y_i^k + V_i^{k+1}$$

其中, P_i 是第 i 个粒子自身所找到的当前位置; P_g 是

整个粒子群目前找到的最优解; r 和 v 是 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 被称作学习因子, 通常 $c_1 = c_2 = 2$; ω 是加权系数, 一般取值在 $0.1 \sim 0.9$ 之间。粒子群在更新过程中, 粒子速度每一维的取值不超过最大允许值, 粒子位置每一维的座标也限制在允许范围内。同时, P_i 和 P_g 在迭代过程中不断更新, 最后输出的 P_g 就是算法得到的最优解。

3.1.4 适应度

将粒子 i 的位置 Y_i (即上层模型的解) 代入下层模型, 利用传统非线性规划方法求解下层模型, 获得下层模型的最优解 y_i , 即一组 Q_a 和 Q_b 的值。在此基础上就可计算此时的购电收益 B , 可得到此个体 S_i 下的购电收益 B 的分布情况, 进而计算适应度函数中的 $CVaR(B)$ 和 $E(B)$ 。

双层优化模型虽然分为上下 2 层优化问题, 有 2 个目标函数, 但是上层优化才是决策层优化, 是优化的真正目标, 所以 MP 算法的适应度函数中只包含上层优化目标函数。适应度函数定为

$$\Omega(S_i) = CVaR(B) + \varphi \Lambda(B_0 - E(B)) \quad (12)$$

其中, φ 为足够大的正数; $\Lambda(\cdot)$ 为罚函数, 有

$$\Lambda(B_0 - E(B)) = \begin{cases} 0, & B_0 - E(B) \leq 0 \\ B_0 - E(B), & B_0 - E(B) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

罚函数保证了种群中的个体满足上层的不等式约束。适应度 Ω 越小则该策略 S_i 越好。

3.1.5 更新最优解

如果粒子 i 的适应度优于 P_i 的适应度, P_i 更新为该粒子的当前位置 Y_i ; 对应于 P_i 的下层模型最优解 y_{P_i} 被相应更新为 y_i^* 。如果粒子 i 的适应度优于 P_g 的适应度, P_g 更新为该粒子的当前位置 Y_i ; 对应于 P_g 的下层模型最优解 y_{P_g} 被相应更新为 y_i^* 。

3.1.6 终止条件

判断算法收敛准则是否满足, 如果满足, 则输出双层规划模型的最优解 P_g 和 y_{P_g} , 并相应求出上、下层规划的目标函数值, 算法运行结束。如果不满足, 对当前的 P_g 增加一个随机扰动, 更新 P_g 后, 再利用传统优化方法求出对应于 P_g 的下层模型的最优解 y_{P_g} , 再一次更新粒子位置与速度。

3.2 MP 算法流程图

MP 算法流程图见图 4。

4 算例分析

4.1 市场参数设置

采用 6 节点系统的拓扑结构 (如图 5 所示), 网络中有三笔直接交易 (6-3, 1-5, 1-2)。系统的线路参数见表 1。节点功率见表 2, 括号中标注了直接交易的电能。线路潮流见表 3。由于重点不在于网损计算, 则线路潮流为末端潮流。表 4 给出了各发电机对线路有功备用的贡献大小。

列出备用服务的基本报价参数, 如表 2 所示。根

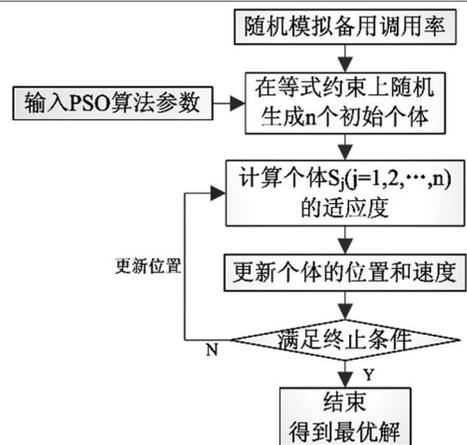


图 4 双层优化流程图

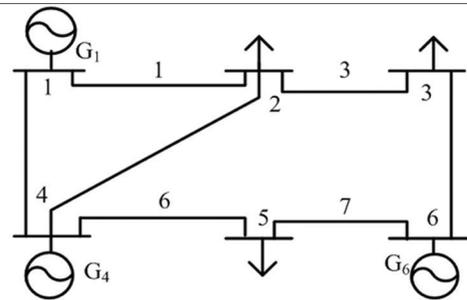


图 5 6 节点系统

表 1 线路参数

线路编号	首末端节点号	$r/p.u.$	$b/p.u.$	$x/p.u.$
1	1-2	0.07	0.01	0.36
2	1-4	0.11	0.01	0.52
3	2-3	0.02	0.02	0.12
4	2-4	0.10	0.01	0.40
5	3-6	0.07	0.00	0.30
6	4-5	0.03	0.01	0.22
7	5-6	0.27	0.02	0.34

表 2 节点功率

节点编号	发电机输出 /MW	负荷功率 /MW
1	86 (35)	0
2	0	60 (20)
3	0	45 (6)
4	40	0
5	0	34 (15)
6	18.6 (6)	0

表 3 线路潮流

线路编号	首末端节点号	有功 /MW	潮流权数
1	1—2	59.6	18.42
2	1—4	22.7	12.89
3	2—3	26.4	16.71
4	2—4	-26.1	17.43
5	3—6	-18.1	19.18
6	4—5	34.7	15.94

表 4 发电机对线路复功率潮流的贡献

线路	G ₁ /MW	G ₂ /MW	G ₃ /MW	合计
1—2	53.6	8.2	0.8	62.6
1—4	29.6	-5.6	-0.6	23.4
2—3	22.6	5.8	-1.8	26.5
2—4	-6.6	-18.7	-1.6	-26.9
3—6	-0.4	-3.7	-14.5	-18.6
4—5	20.4	17.2	-2.6	35.1
5—6	0.2	-0.2	0.7	0.7

表 5 备用电价

线路	关键线路条数	容量价格 / (元 / MW)	电量价格 / (元 / MW)
6—3	1	3.5	2.3
1—5	1	4.0	2.4
1—2	1	4.2	2.7

据关键线路情况,在基本报价中加入费用 $Q=0.06$ 元/条。途经该通道的直接交易备用电价相对较高,体现了高风险性。

4.2 计算结果分析

利用 MP 算法求解双层购电组合模型,当 CVaR 置信系数为 0.9 时,计算得到供电公司和直接交易备用市场上的最优购电组合结果。表 4 中除了应用双层购电模型而得到的最优购电方案(方案 1)外,还列举了其他 2 种典型的购电方案(方案 2、方案 3),与方案 1 做分析比较。

方案 1 应用了本章中所提出的双层购电模型,得到在两个备用市场的最优购电组合。

方案 2 采用传统的购电组合模型,备用作为辅助服务的一项,无偿提供,服从电网公司调度。

表 6 备用购买容量

Option	Q _a /MW	Q _b /MW	Q _c /MW	Q _d /MW
1	10	1.6	1.8	1.3
2	14	2.0	1.9	1.5
3	10	1.5	1.9	1.3

表 7 不同置信度的系统购电费用

置信度	购电费用 /万元
0.80	45.2
0.85	46.5
0.90	47.8
0.95	48.1
1.00	49.4

方案 3 在能量市场上的分配方案与方案 1 一致,

但是均以电能的 10% 采购备用容量。

由表 7 可看出,系统的购买费用随置信度水平的提高而增大。系统可选取适当的置信度水平以达到所期望的系统可靠性和经济性。

通过逐渐改变期望最小收益 B_0 的限制,可以在收益—风险图中画出双层购电模型的有效前沿,如图 6 所示。图 6 也显示了表 6 中不同的组合购电方案在成本—风险图中的位置,其中方案 2 的有效前沿低于方案 1 的有效前沿,而方案 3 不在有效前沿上,这就意味着在同样的风险条件下有其他更好的选择,可以提供更高的收益。当期望收益的要求较大时,为减少备用购买费用,购买量趋近于 0,方案 1、2 的有效前沿趋于一致。该 B_0 —CVaR 有效前沿曲线单调递增,符合市场真实情况。

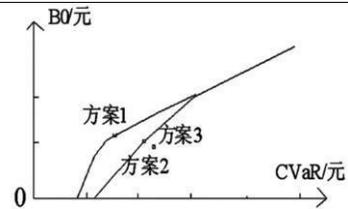


图 6 双层模型的有效前沿

5 结论

(1) 传统备用服务交易模式已不能满足多市场、大电网环境要求,因此提出了加权网络中最优备用购买双层优化模型。

(2) 通过加权网络拓扑分析,更深入地分析各交易对网络的利用程度。通过发电机的供电分配情况解析,进一步明确备用调用的风险程度,极大地扩展了备用电价的成分。

(3) 采用双层最优购电模型进行计算,该模型的上层优化以在一定收益下供电公司和用户风险最小化为目标,下层以备用购买费用最小化为目标,综合考虑了备用调用率和备用可用率的双重不确定风险。算例表明该模型为备用的市场化、备用购电决策和风险管理提供了新的工具和思路。

参考文献

[1] 邓东林,周杰娜,邓松. 电力市场环境下的备用服务问题[J]. 中国西部科技, 2008, 7(31): 58—59.

(下转第 56 页)

如图 3 所示。

由图 3 可知,系统能在 $160 \mu\text{s}$ 左右,即 4 个周期内达到稳定状态,且输出电流和电压的超调较小,稳定后的输出电流和电压均在期望值附近。变压器初级电流连续,初级电压稳定,且两者的波动均较小。输出电流的纹波小于 10%,最大值为 203.97 A,最小值为 187.61 A,平均值约为 195.79 A;输出电压的纹波小于 5%,最大值为 58.898 V,最小值为 58.598 V,平均值约为 58.748 V。输出功率约为 11.5 kW,效率大于 95%,满足设计要求。因此,该系统在所设计参数下的响应具有良好的稳定性、快速性和准确性。

4 结 语

充电系统接入电网对电力系统的正常运行是有影响的,可利用其正面影响平衡日夜间的用电量,对其负面影响可采用所提到的方法加以抑制。而高频功率变压器的设计在电动汽车充电系统中是重点,更是难点,其设计是否合理,直接影响着整个系统的优劣。以 12 kW 的充电系统为例,对高频功率变压器的基本参数进行了理论上的计算,并将计算所得的参数进行 SABER 仿真。仿真结果表明,所设计变压器的各项指标均能够很好地满足充电系统的设计要求。

参考文献

- [1] 牛利勇. 纯电动公交充电系统关键技术研究 [D]. 北京交通大学博士论文, 2008.
- [2] 王勇. 电动汽车充电系统及其控制器的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2009.
- [3] 许陵. 开关电源变压器的设计与制作 [J]. 赣州师范学院学报 (自然科学版), 2009(3): 53-58.
- [4] 唐海燕, 李建泉. DC-DC 变换器中 25 kW 高频功率变压器的设计 [J]. 大功率变流技术, 2010(2): 26-30.
- [5] 藤乐天. 电动汽车充电机 (站) 设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析 [J]. 中国电力, 2008(9): 31-36.
- [7] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源实用技术——设计与应用 (第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [8] Abraham I Pressman, Keith Billings, Taylor Morey. Switching Power Supply Design (Third Edition) [M]. McGraw-Hill, 2009.
- [9] 赵修科. 实用电源技术手册——磁性元器件分册 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman. Transformer and Inductor Design Handbook [M]. CRC Press, 2004.

(收稿日期: 2011-04-18)

(上接第 52 页)

- [2] 张夏平, 宋依群. 基于电力不足概率的互联系统备用量需求研究 [J]. 广东电力, 2010, 23(3): 18-21.
- [3] 黄振伟, 杜松怀, 苏娟. 计及可中断负荷的旋转备用容量机会约束规划模型 [J]. 电力需求侧管理. 2009, 11(1), 24-27.
- [4] 陈杨, 刘俊勇. 单一时段和多时段下区域旋转备用的获取 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 38-45.
- [5] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
- [6] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境最优备用容量的确定 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.
- [7] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力备用市场的竞价模型. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 7-11.

- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] 龚演平, 彭建春. 支路复功率损耗和潮流分量的归属分析 [J]. 电网技术, 2010, 34(5): 93-98.
- [10] 荆朝霞, 段献忠, 文福拴, 等. 在多种交易模式共存的电力市场中确定输电系统使用费的一种实用方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 42-47.
- [11] 彭建春, 江辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.

作者简介:

张国芳 (1985), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力市场与电力系统、电力负荷特性分析。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化系统等方面的研究。

(收稿日期: 2011-02-11)

电动汽车充电系统对电网的影响及其高频变压器的设计

张 燃¹, 陈 磊², 田佳樂², 张昌华²

(1 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2 电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要:首先介绍了电动汽车充电系统对电网正常运行的影响及应对措施, 然后以 12 kW 电动汽车充电系统为例, 在介绍充电系统拓扑结构示意图的基础上, 详细阐述了其高频功率变压器各参数的设计方法, 并对所设计的参数应用 SABER 软件进行仿真。仿真结果表明, 依照所提出的设计方法, 系统的响应具有良好的稳定性、准确性和快速性, 且变换效率大于 95%, 满足充电系统的性能要求。

关键词:电动汽车; 充电系统; 高频功率变压器; SABER

Abstract: The influence of charging system of electric vehicle on the normal operation of power grid is introduced as well as the countermeasures firstly. Taking the topologies of the charging system of 12 kW electric vehicle for example, the design method of each parameter of high-frequency power transformer are described in detail, and the designed parameters have been simulated by SABER. The simulation results show that the system response has a good stability, accuracy and quickness according to the proposed design method, and the conversion efficiency is more than 95%, it can meet the performance requirements of the charging system.

Key words: electric vehicles; charging system; high-frequency power transformer; SABER

中图分类号: TM711 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0053-04

0 引 言

随着全球不可再生能源的紧缺和环境污染问题的日益加重, 与传统的燃油汽车相比, 电动汽车具有节能、环保等方面的显著优势^[1]。而电动汽车的普及, 必将涉及其充电系统的研究, 高频功率变压器是其中不可缺少的器件。与普通的工频变压器相比, 高频功率变压器具有体积小、成本低、方便制作等优点。在 DC-DC 变换电路中, 它起到电气隔离、升高或降低电压、磁耦合传送能量的作用^[2]; 因此, 高频功率变压器的设计将是充电系统中重要的环节和核心的技术, 直接影响到充电系统的可靠性、效率、质量等重要性能指标^[3, 4]。

1 充电系统的拓扑结构对电网的影响及应对措施

1.1 对电网的影响及应对措施

大批量的电动汽车蓄电池接入电网充电将对电力系统正常运行产生一定的影响。正面影响是在用电低谷对动力电池充电时, 可以减少电网峰谷差, 起到削峰填谷的作用, 提高配电系统设施的实际利用

率, 拓宽终端电能消费市场; 负面影响是电动汽车蓄电池充电设备的非线性, 有可能产生谐波污染, 对供电系统的电能质量带来不利影响。目前充电系统谐波治理方法主要有增大单台充电机的滤波电感、减小充电机功率变换单元等效电阻、采用先进的功率因数校正技术代替普通的二极管整流桥、充电站安装电力有源/无源滤波器、协调每个充电站充电机的数量等^[5]。不同的充电系统拓扑结构对电网谐波的影响也不尽相同, 其结构大致上可以分为以下三类^[6]: 不可控整流+斩波器、不可控整流+DC/DC 变换器、PWM 整流+DC/DC 变换器。

第一种结构的主要缺陷是体积大、电网侧电流谐波大和变换效率低等; 其注入电网的 5 次谐波电流含有率为 65% 左右, 电流总畸变率超过 85%, 因此该种结构不适合接入公共电网。第二种结构相比第一种采用了高频功率变换电路, 谐波电流含有率已经有很大的改善, 电流总畸变也低于 30%, 且体积较小, 因此应用较为广泛, 这里也采用这种结构。第三种结构由于采用了 PWM 整流技术, 使得谐波电流和电流总畸变率均可以控制在较低的水平, 但是其成本和复杂度也相应增加了。

1.2 充电机拓扑结构分析

在不可控整流 +DC/DC 变换器中,其 DC/DC 变换器常用的拓扑结构有:推挽式、正激式、反激式、半桥式和全桥式。由于前三种拓扑结构受到输出功率和功率型开关器件的限制,在大功率的电动汽车充电系统中,主要采用半桥式或全桥式拓扑结构^[7]。所设计的电动汽车充电系统额定输出功率 12 kW,因此选择不可控整流 +全桥式的拓扑结构,如图 1 所示。

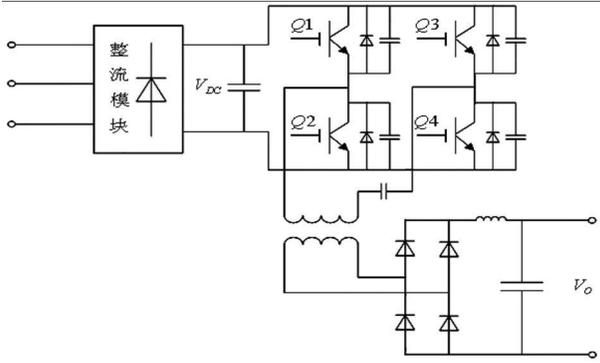


图 1 12 kW 充电系统拓扑结构示意图

其工作过程为:三相交流电经过工频整流模块和滤波电容后得到相对稳定的 537 V 直流母线电压,然后经过全桥逆变为高频脉冲电压,再通过高频变压器进行隔离变换,最后将变压器的次级电压通过高频整流模块和滤波器得到输出可调的直流电。

2 高频功率变压器部分的设计

2.1 变压器设计所需的相关参数

表 1 所需相关参数

名称	额定值 (或范围)	名称	额定值 (或范围)
输出功率 P_0 /kW	12	母线电压 V_{DC} /V	450~620
输出电压 V_0 /V	60	开关频率 f /kHz	40
输出电流 I_0 /A	200	最大占空比 D_{max}	0.4

需要说明的是:在图 1 所示的电路拓扑结构中,如果最大占空比超过 0.5,将会使 Q_1 、 Q_4 导通时施加在变压器初级的伏秒数与 Q_2 、 Q_3 导通时施加在变压器初级的伏秒数不相等,这将导致一个周期内变压器磁心不能回到原点,在若干个周期后,就会出现偏磁饱和现象,由于变压器工作频率很高,因此这个时间会非常的短。磁心饱和时,变压器两端不能承受电压,这将会使 IGBT 两端承受很大的电压和电流,进而导致 IGBT 损坏^[8]。为了避免这种情况导致的伏秒数不相等,因此最大占空比必须小于 0.5,留有 20% 的死区时间,最终确定最大占空比为 0.4。

2.2 变压器的最大输出功率与磁心选择

当母线电压 V_{DC} 最小时,IGBT 的占空比达到最大值 0.4;设变换器效率 η 为 90%,骨架窗口使用系数为 40%;令 A_c 为磁心面积, A_w 为骨架窗口面积,单位为 cm^2 ; D_{ma} 为电流密度,单位为圆密耳每有效值安培; ΔB 为磁通密度增量,单位为 G;则有如下关系式^[9]。

$$P = \frac{0.00078 \Delta B f A_c A_w}{D_{ma}}$$

通常磁心应工作在磁滞回线 ± 2000 G 以内的线性部分。频率为 25 kHz 左右时,磁心损耗很小,磁通允许在 ± 2000 G 范围内变化。随着工作频率的上升,磁心损耗会迅速增大,当频率高于 100 kHz 时,磁通变化范围应控制在 ± 1200 G 甚至 ± 800 G 以下。文中 $f=40$ kHz 所以可取 ± 1500 G,即 $\Delta B=3000$ G;由于过大的电流密度会引起过大的铜耗和温升,通常 D_{ma} 取 500 圆密耳每有效值安培,即 $2.54 \times 10^{-3} cm^2/A$ 。

将数据代入式 (1),得 $A_c A_w = 64.2 cm^4$ 。经计算,磁心 EE100/60/28 能够满足要求,而且留有一定的裕量,因此可以使用该种磁心。

2.3 初级线圈和次级线圈的匝数计算

设每个 IGBT 的饱和和导通压降为 1 V。根据法拉第定律^[10] $E = N_p A_c \frac{\Delta B}{\Delta t} \times 10^{-8}$,则初级线圈匝数 $N_p = \frac{E \Delta t}{A_c \Delta B} \times 10^8$,其中, $E = V_{DC(m in)} - 2$, $\Delta t = 0.4T$,所选磁心 $A_c = 7.6 cm^2$,故得

$$N_p = \frac{(V_{DC(m in)} - 2)}{A_c \Delta B f} \times 0.4 \times 10^8 \quad (2)$$

代入数据,得 $N_p = 19.6$;取整数: $N_p = 20$ 。

设每个高频整流二极管的导通压降为 1 V,次级线圈匝数 N_s 。则

$$V_0 = [(V_{DC(m in)} - 2) \frac{N_s}{N_p} - 2] \frac{2 \Delta t}{T} \quad (3)$$

代入数据,得 $N_s = 3.5$;取整数: $N_s = 4$ 。

2.4 初级线圈和次级线圈的电感量计算

为计算方便假定变压器初级电流为锯齿波,即理想地认为在导通期间储存的能量在截止期间全部消耗完。由于每组 IGBT 在一个 PWM 周期内交互导通,因此计算初级电感量 L_p 可以只以半个 PWM 周期来分析。根据能量守恒定律,有

$$\frac{P_0}{\eta} \times 0.5T = \frac{1}{2} I_p^2 L_p \quad (4)$$

将 $I_p = D_{\max} T (V_{DC(m.in)} - 2) / L_p$ 代入上式, 有

$$L_p = \frac{D_{\max}^2 (V_{DC(m.in)} - 2)^2 \eta}{P_o f} \quad (5)$$

代入数据, 得 $L_p = 60.3 \mu\text{H}$ 。

同理, 次级电感量

$$L_s = \frac{D_{\max}^2 (V_{DC(m.in)} - 2)^2 N_s^2}{P_o N_p^2} \quad (6)$$

代入数据, 得 $L_s = 2.13 \mu\text{H}$ 。

2.5 初级线圈和次级线圈线径的选择

由于 $P_o = 0.9 P_{in}$, 且当母线电压为 $V_{DC(m.in)}$ 时, IGBT 的占空比达到最大值 0.4, 此时初级线圈的占空比为 0.8, 令 I_f 为初级等效平顶脉冲电流。因此有

$$P_{in} = 0.8 (V_{DC(m.in)} - 2) I_f \quad \text{即} \quad I_f = \frac{P_o}{0.72 (V_{DC(m.in)} - 2)}$$

令 I_f 为初级线圈有效值, 根据有效值的定义, 易得 $I_f = I_r \sqrt{0.8}$ 。又 $D_{c.m.a} = 500$, 令 S_p 为初级线径所需的最小截面积, 代入数据并进行量纲转换, 可得 $S_p = 8.43 \text{ mm}^2$ 。令 S_s 为次级线径所需的最小截面积。同理, 代入数据并进行量纲转换, 可得 $S_s = 45.32 \text{ mm}^2$ 。

留有一定的余量, 初级线径可选择直径为 3.6 mm

的漆包线, 次级线径可选择直径为 8.2 mm 漆包线。

3 高频功率变压器的 SABER 仿真

SABER 是美国 Synopsys 公司推出的一款 EDA 软件, 具有大量的电源专用器件和功率电子器件, 提供高精度的电路仿真模型单元库, 同时具有高效的仿真速度和精确的仿真结果, 是电源领域应用最为广泛的一款仿真软件。

3.1 仿真电路

根据所选的线径大小、线圈匝数、磁心面积等参数, 可计算初级绕组的电阻约为 0.98Ω , 次级约为 $17.6 \text{ m}\Omega$ 。将所有参数在仿真模型中对应设置, 仿真电路如图 2 所示。

3.2 仿真结果分析

要使系统具有 12 kW 的额定输出功率, 必须在母线电压最低, 即占空比最大时, 也能输出 12 kW。因此, 仿真时母线电压应该设置为 450 V, 占空比设置为 0.4。调整输出滤波参数, 使输出纹波尽可能的小。截取仿真图形的前 500 μs 系统的联合仿真波形

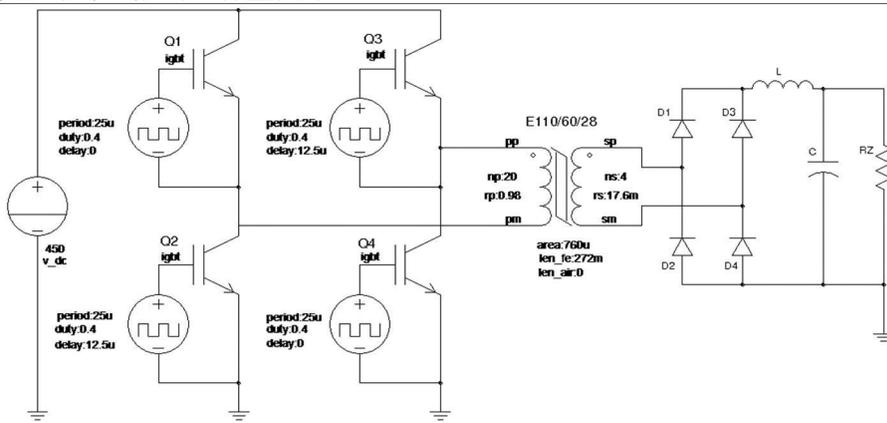


图 2 12 kW 充电系统 SABER 仿真电路图

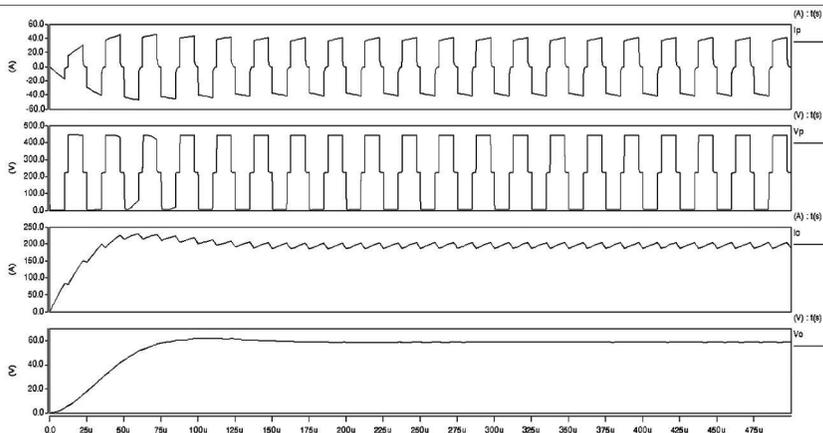


图 3 初级电流、电压, 输出电流、电压仿真波形

如图 3 所示。

由图 3 可知,系统能在 $160 \mu\text{s}$ 左右,即 4 个周期内达到稳定状态,且输出电流和电压的超调较小,稳定后的输出电流和电压均在期望值附近。变压器初级电流连续,初级电压稳定,且两者的波动均较小。输出电流的纹波小于 10%,最大值为 203.97 A,最小值为 187.61 A,平均值约为 195.79 A;输出电压的纹波小于 5%,最大值为 58.898 V,最小值为 58.598 V,平均值约为 58.748 V。输出功率约为 11.5 kW,效率大于 95%,满足设计要求。因此,该系统在所设计参数下的响应具有良好的稳定性、快速性和准确性。

4 结 语

充电系统接入电网对电力系统的正常运行是有影响的,可利用其正面影响平衡日夜间的用电量,对其负面影响可采用所提到的方法加以抑制。而高频功率变压器的设计在电动汽车充电系统中是重点,更是难点,其设计是否合理,直接影响着整个系统的优劣。以 12 kW 的充电系统为例,对高频功率变压器的基本参数进行了理论上的计算,并将计算所得的参数进行 SABER 仿真。仿真结果表明,所设计变压器的各项指标均能够很好地满足充电系统的设计要求。

参考文献

- [1] 牛利勇. 纯电动公交充电系统关键技术研究 [D]. 北京交通大学博士论文, 2008.
- [2] 王勇. 电动汽车充电系统及其控制器的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2009.
- [3] 许陵. 开关电源变压器的设计与制作 [J]. 赣州师范学院学报 (自然科学版), 2009(3): 53-58.
- [4] 唐海燕, 李建泉. DC-DC 变换器中 25 kW 高频功率变压器的设计 [J]. 大功率变流技术, 2010(2): 26-30.
- [5] 藤乐天. 电动汽车充电机 (站) 设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析 [J]. 中国电力, 2008(9): 31-36.
- [7] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源实用技术——设计与应用 (第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [8] Abraham I Pressman, Keith Billings, Taylor Morey. Switching Power Supply Design (Third Edition) [M]. McGraw-Hill, 2009.
- [9] 赵修科. 实用电源技术手册——磁性元器件分册 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman. Transformer and Inductor Design Handbook [M]. CRC Press, 2004.

(收稿日期: 2011-04-18)

(上接第 52 页)

- [2] 张夏平, 宋依群. 基于电力不足概率的互联系统备用需求研究 [J]. 广东电力, 2010, 23(3): 18-21.
- [3] 黄振伟, 杜松怀, 苏娟. 计及可中断负荷的旋转备用容量机会约束规划模型 [J]. 电力需求侧管理. 2009, 11(1), 24-27.
- [4] 陈杨, 刘俊勇. 单一时段和多时段下区域旋转备用的获取 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 38-45.
- [5] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
- [6] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境最优备用容量的确定 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.
- [7] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力备用市场的竞价模型. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 7-11.

- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] 龚演平, 彭建春. 支路复功率损耗和潮流分量的归属分析 [J]. 电网技术, 2010, 34(5): 93-98.
- [10] 荆朝霞, 段献忠, 文福拴, 等. 在多种交易模式共存的电力市场中确定输电系统使用费的一种实用方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 42-47.
- [11] 彭建春, 江辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.

作者简介:

张国芳 (1985), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力市场与电力系统、电力负荷特性分析。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化系统等方面的研究。

(收稿日期: 2011-02-11)

涪江大跨越雷电性能研究

佟继春

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要:采用规程法、电气几何模型 (EGM) 和先导发展模型算法对“±500 kV 宝鸡换流站—德阳换流站直流线路”涪江大跨越的绕击闪络率进行了计算。在电气几何模型算法中, 采用了随杆塔高度变化的击距系数 β 以暴露弧为 0 时对应的雷电流作为雷电的最大绕击电流。分析了地线保护角对绕击闪络率的影响, 结果表明, 绕击闪络率随保护角的减小而减小。对涪江大跨越的雷电性能的分析计算方法可以做为国内同类大跨越线路防雷设计的参考。

关键词:输电线路; 大跨越; 绕击闪络

Abstract: The shielding failure flashover of FuJiang river crossing is calculated by using empirical formula, the improved electro-geometric model (EGM) and leader progress model. The calculations with electro-geometric methods of shielding analysis essentially depend on the joint premises of a lightning stroke distance and of a functional relationship between this stroke distance and the crest current amplitude of return stroke. With the increase of shielding angle and the height of the towers, the shielding failure flashover increases. The result shows that the lightning performance of FuJiang river crossing has reached the requirements.

Key words: transmission line; river crossing; shielding failure flashover

中图分类号: TM863 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0057-04

0 前言

从中国近几年的架空输电线路故障分类统计表明, 在引起高压架空输电线路跳闸的各种因素中, 雷击引起的跳闸次数占 40%~70%。对于 500 kV 线路, 雷击跳闸主要不是雷击杆塔时反击引起的, 而是由于雷电流绕击导线造成的。广东省从 1999 年开始在全省安装了雷电定位系统, 较全面地统计了引起 110~500 kV 线路雷击跳闸的雷电流分布情况。从统计结果来看, 雷击引起跳闸的雷电流大部分都小于各级电压水平的耐雷水平。而这些小于耐雷水平的雷电流若直击于杆塔塔顶或避雷线上时一般不能导致跳闸, 其跳闸的原因只有这些雷电流绕击到导线, 因为直击导线的耐雷水平远低于直击塔顶和避雷线的耐雷水平。因此, 准确计算输电线路绕击跳闸率非常重要, 尤其是塔高很高的大跨越线路 (由于雷击架空输电线路绝缘闪络后, 交流和直流系统的保护动作方式是不同的, 因此交、直流系统对雷电性能指标的要求也不同。

交流输电系统对线路雷电性能用“雷击跳闸率”

作为控制指标, 直流输电系统则用“雷击闪络率”来表征雷电性能)。

目前, 计算绕击的方法主要有以下几种: 规程法、电气几何模型 (EGM)^[1-3] 及其改进算法和先导发展模型算法等。

规程法中的线路绕击率计算公式在工程中的应用起来简单方便, 而且它经过了实践的检验, 对于一般线路的防雷屏蔽设计, 能够满足要求。但是, 其缺点也很明显, 由于规程法中的线路绕击率计算公式是根据多年的运行经验和小电流下的模型试验结果而提出的, 所以带有综合的平均性质, 不能反映具体线路的特点, 无法解释屏蔽失效的现象。

美国的 E. R. Whitehead 等人自 20 世纪 60 年代末期开始进行雷电屏蔽技术的理论研究, 并提出了怀氏电气几何模型 (EGM)。目前在日本、美国、欧洲等国家均采用该方法, 在中国也得到了电力研究人员的普遍认可。

输电线路雷电绕击的先导发展模型是 Rizk 在实验研究的基础上提出的, 该模型认为雷击是由于下行雷电先导和产生于结构物上的上行先导相遇而发生的, 先导发展模型引入吸引半径和侧面吸引距离两个

参数,这两个参数都是雷电流幅值和结构物高度的函数。 R_{izk} 的先导发展模型比较细致地考虑了上下行先导的发展相遇过程,并对该过程进行了初步定量描述,这是输电线路雷电绕击研究方面一个很大的进步。但是,国际上至今尚无先导传播模型计算方法的统一规定,也几乎没有哪个国家把先导传播模型用于工程设计。因此,先导发展模型还不成熟,还需继续研究,目前尚不能直接用于工程计算,其计算结果只能做为参考。而且,它没有考虑当雷电下行先导已经下降到低于输电线路高度时发生的雷击线路现象,因此,它不适用于高杆塔线路的雷电绕击性能估算。

下面对涪江大跨越的绕击闪络率进行计算时主要采用电气几何模型 (EGM) 算法,并与规程法、先导发展模型算法计算结果进行对比分析。

1 电气几何模型 (EGM) 的原理和计算方法

电气几何模型是将雷电的放电特性与线路的结构尺寸联系起来而建立的一种几何分析计算模型。

图 1 显示了雷电绕击线路的电气几何模型。S 点是避雷线, C 点是导线, AA' 为杆塔中心线, θ 是一档线路避雷线对导线的保护角。若雷电先导头部落入 AB 弧面, 放电将击向避雷线, 使导线得到保护, 称 AB 为保护弧。若先导头部落入 BD 弧面, 则击中导线, 即避雷线的屏蔽保护失效而发生绕击, 称 BD 为暴露弧。若先导头部落入 DE 平面, 则击中大地, 故称 DE 平面为大地捕雷面。随着雷电流幅值增大, 暴露弧 BD 逐渐缩小, 当雷电流幅值增大到 I_{max} 时 BD 缩小为 0, 即不再发生绕击, I_{max} 称为最大绕击电流, 相应的击距称为最大击距。

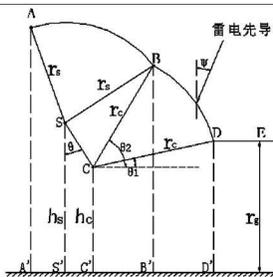


图 1 输电线路绕击的 EGM 示意图

绕击闪络率 P_r 可由下式计算。

$$P_r = \int_{I_{min}}^{I_{max}} X(I) \cdot F(I) dI \quad (1)$$

式中, $X(I)$ 为雷电流 I 下的绕击概率, 可由下式计算。

$$X(I) = \frac{\overline{B'D'}}{A'D'} = \frac{r_c (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{r_c \cos\theta_1 + A'C'}$$

$F(I)$ 为雷电流概率密度。

$$F(I) = \frac{d(1-P)}{dI} = \frac{d(1-10^{-1/88})}{dI} = 0.026166 \times 10^{-1/88}$$

目前, 各国采用的击距公式不完全相同, 这里采用了 IEEE 标准所推荐的击距公式。

$$r_s = 10 I^{0.65} \quad (2)$$

$$r_c = \beta \cdot 10 I^{0.65} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.36 + 0.17 \cdot \ln(43 - y_c) & (y_c < 40 \text{ m}) \\ 0.55 & (y_c \geq 40 \text{ m}) \end{cases}$$

考虑导线工作电压后雷电对导线的击距见式 (4)。

$$r_c = 1.63 \times (5.015 \times I^{0.578} - U_{dc})^{1.125} \quad (4)$$

2 反击闪络率计算

采用行波法对涪江大跨越的反击闪络率进行计算。运行经验表明, 雷击避雷线的档距中间且与导线发生闪络引起跳闸的情况是极罕见的, 可不予考虑, 因此在反击计算中仅考虑雷击杆塔的情况。

雷击塔顶时, 导线上的电压 u_c 为

$$u_c = u_R (1 - k_0) + U_1 k_0 + U_{DC} \quad (5)$$

式中, u_R 为雷击塔顶在导线上形成的感应过电压分量; U_1 为雷击点 (塔顶) 的电压; U_{DC} 为导线上的工作电压; k_0 为避雷线与导线间的几何耦合系数; k_0 为避雷线与导线间考虑避雷线上冲击电晕影响后的耦合系数。

雷击杆塔时, 导线上感应过电压的磁分量比电分量要小得多, 在计算时仅考虑电分量。若忽略导线至地面间场强的变化, 且视为与地面处相同, 则斜角雷电流波作用下杆塔处导线上的感应过电压的电分量为

$$u_R = \frac{60 \alpha H_c}{\beta \cdot c} \ln \frac{H_T + d_R + \beta \cdot ct}{(1 + \beta)(H_T + d_R)} \quad (6)$$

式中, β 为反放电速度与光速 c 的比值, 取为 0.3; H_T 为杆塔高度, m; H_c 为导线的平均高度, m; d_R 为雷击杆塔时迎面先导长度, $d_R = 5 I^{0.65}$ m; α 为雷电流陡度, $kA/\mu s$ 。

3 直流线路雷击闪络率的计算方法

直流输电线路上的工作电压为直流电压, 雷电冲

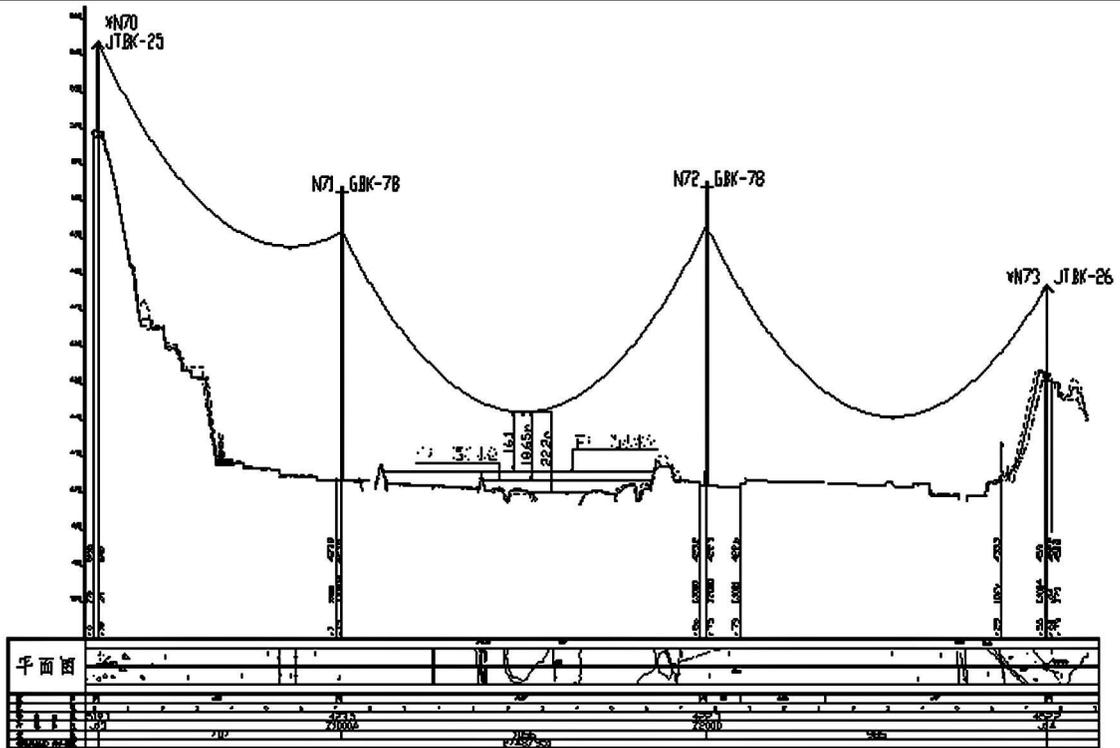


图 2 涪江大跨越平面断面图

击闪络转变为稳定的电弧情况与交流是不同的,没有建弧率的问题。除此之外,线路雷击闪络率的计算方法与交流相同。

大地每平方公里每年的落雷次数 N_g 和年雷电日 T_d 的关系可由式 (7) 确定。

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (7)$$

年平均雷电日为 40 天时,则大地每平方公里的落雷次数 N_g 为 2.78 次。

线路每百公里每年落雷次数 N_s 可由式 (8) 确定。

$$N_s = N_g \cdot \left(\frac{28 \cdot h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (8)$$

式中, h 为杆塔的高度, m ; b 为避雷线间距, m 。

线路每百公里每年因雷击引起的闪络次数 N 可按式 (9) 计算。

$$N = N_s (P_r + g P_1) \quad (9)$$

式中, P_r 为线路的绕击闪络概率; P_1 为超过雷击杆塔顶部时耐雷水平的雷电流概率, g 为击杆率,对于双避雷线线路,平原击杆率为 $1/6$,山丘击杆率为 $1/4$ 。

4 涪江大跨越计算结果分析

涪江大跨越采用的是耐一直一直一耐跨越方式。

跨越断面和铁塔基本参数如下。

导线: $4 \times \text{AACSR} / \text{EST} - 450 / 200$, 计算外径 33.3 mm , 分裂间距 500 mm ;

避雷线: $\text{LBGJ} - 210 - 14 \text{ AC}$, 计算外径 17.5 mm ;

直线塔: 采用 $\text{U}300\text{BP} / 195\text{T}$ 绝缘子, 每串 4×41 片, 铁塔处保护角 -10° ;

锚塔: 采用 $\text{U}400\text{P} / 205$ 绝缘子, 每串 6×54 片;

地形: 丘陵;

海拔高度: $423 \sim 519 \text{ m}$;

接地电阻: 5Ω ;

年平均雷电日: 40 d 。

$N70$ 和 $N73$ 塔为两侧的锚塔, $N71$ 和 $N72$ 塔为大跨越段的直线塔, 有关参数如表 1 所示。

表 1 涪江大跨越杆塔和档距有关参数

塔号	N70	N71	N72	N73
呼称高 /m	25	78	78	26
全高 /m	36	88	88	37
档距 /m	707	1 056	985	

由图 2 可以看出, 大跨越锚塔在两侧山坡上, 跨越塔在涪江两岸的平地上, 以地面倾角 0° 计算, 分析地线保护角与绕击闪络率的关系。

由图 4 可知, 当保护角降到 0° 以下时绕击次数已趋于零。由此可见降低保护角有明显改善线路防止绕击的作用。

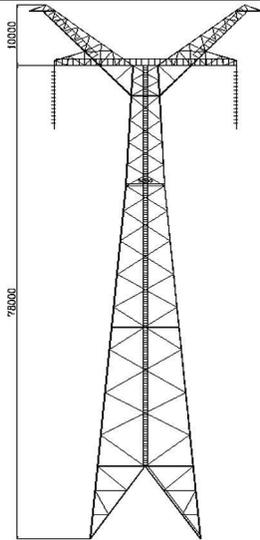


图 3 涪江大跨越直线塔 GBK-78

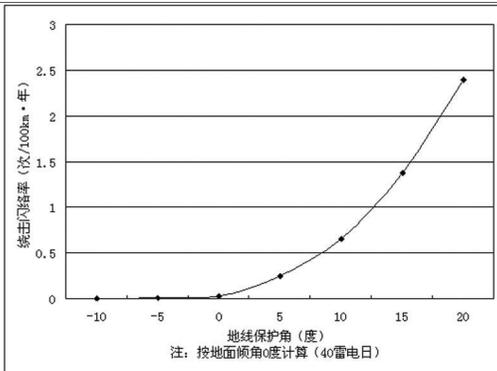


图 4 地线保护角与绕击跳闸率的关系

涪江大跨越塔从铁塔布材、导地线偏移、地线保护角等方面综合考虑,最终按保护角 -10° 设计。

分别按规程法(见《中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620-1997》)、电气几何模型(EGM)和先导发展塔型对涪江大跨越的绕击闪络率进行了计算,综合考虑绕击闪络率和反击闪络率后其雷击闪络其计算结果见表 2。

表 2 各种方法计算涪江大跨越雷击闪络率结果
(闪络率 /100 km·a)

改进电气几何模型 (IEEE 推荐)	改进电气几何模型 (Ericsson)	先导发展模型 (Rizk)	规程法
0.005	0	0	0.143

5 结 论

大跨越线路的防雷保护措施主要是减少发生雷击线路的绕击闪络率和反击闪络率。降低绕击闪络率主要措施是减小避雷线的保护角;降低反击闪络率的主要措施是增加线路绝缘子和减小杆塔接地电阻。

计算结果表明,涪江大跨越段的雷击闪络率满足要求。对涪江大跨越的雷电性能的分析计算方法可以做为国内同类大跨越线路防雷设计的借鉴。

参考文献

- [1] 李晓岚,尹小根,余仁山,等.基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J].高电压技术,2006,32(3):42-44.
- [2] 郑江,林苗.110~500 kV 输电线路的绕击雷害分析[J].电力建设,2006,27(11):35-36,50.
- [3] 李晓岚.击距系数及基于电气几何模型的输电线路绕击跳闸率计算的研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [5] 司马文霞,陈宁,许高峰,等.高杆塔大跨越输电线路防雷保护[J].重庆大学学报,2002,25(9):25-28.
- [6] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines[S].1997.

作者简介:

佟继春(1978),男,硕士,工程师,从事高压输电线路设计。

(收稿日期:2011-01-13)

(上接第 41 页)

力系统的运行状况,指导电力系统规划设计、设备制造、安装调试和生产管理等各个环节的工作,均较输变电设施可靠性评价规程都有不小的提升。

参考文献

- [1] 邱仕义.电力设备可靠性维修[M].北京:中国电力出版社,2004.

- [2] 谢亮.输变电设备状态检修与可靠性管理的关联研究[C].2009年全国输变电设备状态检修技术交流研讨会论文集,2009:11-12.
- [3] 国家电网公司.输变电设施可靠性管理工作手册(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 国家电网公司.输变电系统可靠性评价实施细则[M].北京:中国电力出版社,2009.

(收稿日期:2011-02-20)

降低杆塔冲击接地阻抗方法

蒋平¹, 杨琳²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:降低杆塔接地电阻是减小输电线路雷击事故的重要措施, 分析了接地装置冲击散流特性, 介绍了接地装置冲击接地阻抗各种表示方式及其物理定义及输电线路杆塔接地装置降阻改造方法及建议。

关键词:杆塔接地; 冲击接地电阻; 降阻

Abstract: Reducing the tower impulse grounding resistance is an important way to decrease the transmission line failures caused by lightning stroke. The definition and expression formula of tower impulse grounding resistance are introduced, and the impulse characteristics of grounding device are analyzed. Furthermore, several methods and suggestions for reducing tower impulse grounding resistance are presented.

Key words: tower grounding; impulse grounding resistance; reducing resistance

中图分类号: TM864 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0061-03

0 引言

据统计, 中国跳闸率较高地区的高压线路运行总跳闸次数中因雷击引起的事故次数占 40%~70%, 这一现象在多雷、土壤电阻率高等区域尤为显著。雷击输电线路杆塔或接地线时, 杆塔接地体承担着快速泄散雷电流, 限制塔顶电位, 防止绝缘子反击引起线路跳闸的重要使命。因此, 降低杆塔接地装置的冲击接地电阻是降低输电线路雷击故障的重要途径。

现有输电线路杆塔接地装置运行检修多以测量接地电阻为主, 若接地电阻不合格再进行增加埋设接地导体或采用相应降阻措施。但接地装置冲击特性与工频情况下有较大不同, 若将降低冲击接地电阻简单与降低工频接地电阻方法等同, 往往在工程实施中, 事倍功半。下面介绍接地装置冲击接地电阻各种表示方式及其物理定义, 分析了接地装置冲击散流特性。根据其冲击特性详细介绍了输电线路杆塔接地装置降阻改造方法及注意事项, 可为现场设计、施工人员提供参考。

1 接地装置冲击接地电阻

1.1 冲击接地电阻定义及表示方法

工频故障电流经接地装置向大地散流时, 接地装

置尺寸大一般远小于 50 Hz 工频电流波长 (6 000 km), 整个散流过程可视为似稳电流场处理, 因此, 工频接地电阻一般表示为

$$R = V / I \quad (1)$$

式中, I 为经接地装置向大地泄散的工频电流; V 为因电流 I 在接地装置上产生的相对于无穷远 (电位零点) 处电位升。然而, 这一定义却并不适用于冲击接地电阻。这是因为雷电流为暂态电流波, 如图 1 所示。其中一次雷击电流幅值约为数十 kA, 波头时间约为 8 μ s 等值频率分量在 1 MHz 以内; 持续雷击电流幅值约为数 kA, 波头时间为 0.8 μ s 其等值频率分量在 10 MHz 以内^[1]。因此, 接地体泄散雷电流时, 散流过程只能按时变电流场进行分析。

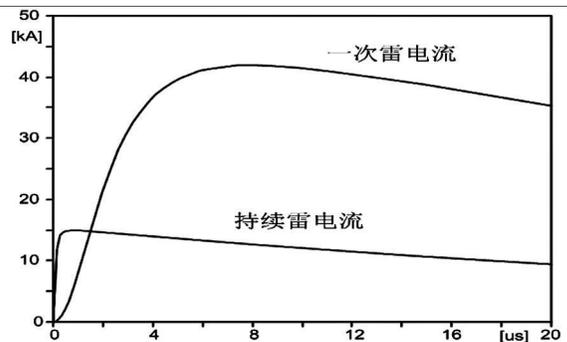


图 1 雷电流波形图

实验室及现场试验表明, 冲击电流经接地装置向大地散流时, 接地装置上电压、电流峰值 (V_p , I_p) 并不

出现在同一时刻,如图 2 所示。

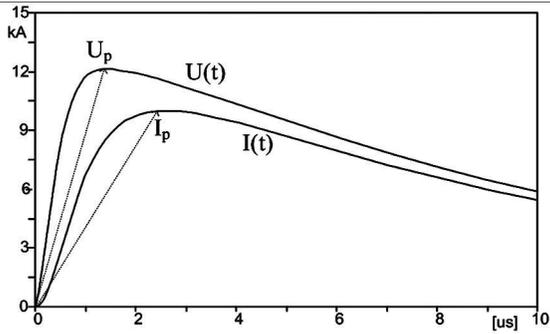


图 2 冲击电流在接地装置上的电压电流

冲击接地电阻共有三种表示方法,其中《DL/T621-1997 交流电气装置的接地》中将冲击接地电阻定义为

$$R = V_p / I_p \quad (2)$$

这一定义并没有实际的物理意义,但它直接表征了冲击电流作用于接地装置时,电流注入点的最大暂态电位升,在工程应用中具有较强的实用价值。

第二种方法将冲击接地电阻表示为动态时变电阻,如式(3)所示。

$$R(t) = V(t) / I(t) \quad (3)$$

该方法有效地表征了接地装置冲击电流作用时,接地装置动态时变特性,但仍没有实际的物理意义。

第三种方法将接地装置上时域电压、电流波形傅里叶变换至频域后,于频域内求取谐波阻抗。

$$Z(k\omega) = U(k\omega) / I(k\omega) \quad (4)$$

谐波阻抗从电磁物理上有效的表征了冲击电流在接地装置上的波过程,但不能反映土壤电离作用^[2]。

1.2 接地装置冲击特性

接地装置冲击电流激励时,其冲击特性受作用于接地体上冲击电流波形、幅值、接地装置形状、尺寸大小、土壤结构及电磁特性等因素影响。主要表现为高幅值电流经接地体散流时,接地体周围土壤电场强度 $E = J\rho$ 将超过土壤临界击穿值,土壤将发生火花放电。此外,冲击电流、电压波在接地体上传播时,接地装置可视为有损传输线,因此,其波的传播过程时一个逐渐衰减的过程,其衰减程度随激励源频率及土壤电导率增加而增加^[3]。

2 降低冲击接地电阻方法

降低杆塔冲击接地电阻主要是增加接地装置泄

散雷电流的通道及接地导体利用效率。

2.1 选择合适的接地体形状及尺寸

传统降低冲击接地电阻的主要方法是增加埋设接地导体数量或长度。就单根水平接地体而言,该方法可有效降低工频接地电阻,但当导体长度增长到一定值后(这一长度为接地体冲击有效长度),随着接地体长度的增加,其工频接地电阻仍持续降低,而冲击接地电阻则维持为一恒定值而不再继续降低,如图 3 所示。

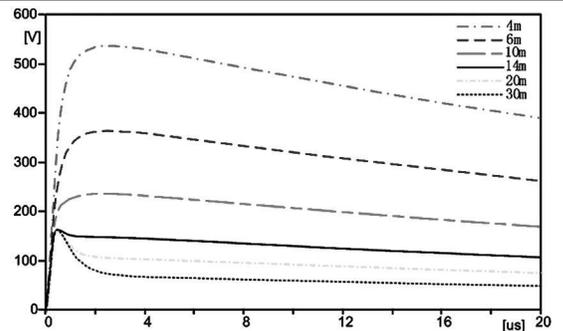


图 3 水平接地体冲击有效散流长度

单根水平接地体单端注入雷电流时,接地体有效长度可按式(5)计算^[5]。

$$l = \frac{6.528(\rho T)^{0.379}}{I_0^{0.097}} \quad (5)$$

式中, ρ 为土壤电阻率; T 为冲击波头时间; I_0 为冲击电流幅值。在进行接地装置形状设计或改造时,接地导体长度不应大于冲击有效长度。此外,接地导体布置形状对冲击电流散流效果也有一定影响,导体布置越密集,由于屏蔽效应的影响,导体利用率越低。常见接地装置布置形状及其利用系统参见文献[4]。

在接地装置泄散雷电流过程中,由于雷电流值极高,将在接地导体周围产生极强电场,当这一电场强度超过土壤耐击穿场强时,接地体周围土壤将产生火花击穿放电,这一过程有利于增加雷电流散流通道,对降低冲击接地电阻的有利作用。图 4 为日本常用的增加土壤火花放电通道的针刺型接地装置结构。

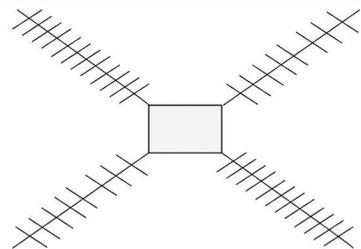


图 4 日本常用带针刺接地极杆塔接地装置

2.2 采用合适的降阻措施

在一些土壤电阻率极高的地区,采用增加埋设接地体的方法已无法显著降低接地电阻,则可采用以下几种方法进行降阻。

2.2.1 添加降阻剂

降阻剂具有电阻率低、扩散和渗透性强的特点,施工时,采用降阻剂替换接地体周围土壤。接地体周围施加降阻剂后,相当于扩大了接地体的有效散流面积,同时消除了接地体与土壤的接触电阻,从而达到降低接地电阻效果。文献 [6] 采用等比例缩小模型试验对接地体添加降阻剂与否情况下进行了冲击试验,试验结果表明:降阻剂对降低接地体冲击接地电阻效果明显,土壤电阻率越高,降阻效果越好。

选择降阻剂时应注意以下问题:

- ①降阻剂本身电阻率要小;
- ②降阻剂对接地导体腐蚀要小;
- ③降阻剂应具有稳定性及长效性;
- ④降阻剂应无污染,无毒性;

⑤施工时,降阻剂应均匀施加,且须保证一定埋深,回填时采用细土夯实,否则将引起接地导体腐蚀的现象。

2.2.2 外引接地

当接地装置地处土壤电阻率很高,其周围或地下深层有较低土壤电阻率的地质结构,可采用深井式接地极或外引接地进行降阻。采用深井式接地极可结合使用降阻剂方法进行降阻,如采用爆破制裂、压力灌降阻剂的方法进行降阻。该方法适合地下深层有金属矿藏或地下水丰富的地区,采用该方法做成的立体结构地网,接地电阻稳定,不受土壤干湿度影响,可取得理想的降阻效果。但该方法投资巨大,且在使用时应注意测量当地土壤结构及土壤电阻率,详细计算后再进行实施。

2.2.3 接地模块的使用

接地模块是采用低电阻率的材料做成模块同接地体连接后埋入土壤中,其作用就是扩大接地体与土壤的有效接触面积。一些接地模块外表结构中有很多空隙,其内部还有供带电离子扩散的通道,相当于让模块与土壤接触更紧密,消除接触电阻并为电流提供可靠的散流通道。

由于接地模块不像降阻剂那样具有渗透和扩散作用,不能改善导体周围的土壤电阻率,其降阻作用受到一定局限。此外,在输电线路杆塔接地装置主要

以泄散雷电流为主,接地模块仍做了雷电通流量测试,其雷电流作用下散流效果及特性还应进一步研究探讨。

3 结 论

降低冲击接地电阻应以增加接地装置散流通道及提高接地导体利用率为主。

接地装置布置形状及尺寸将直接影响接地导体利用率,针对具体环境,具体要求选取合适的布置形状及尺寸将使接地装置设计及改造达到事半功倍的效果。

在接地装置降阻工程实施过程中,应注意施工细节,切勿盲目相信、依赖新技术,新原理。每一种降阻材料、方法都有其不同的特点及优缺点,在使有过程中应结合实地情况,认真分析经济、技术比较,从而正确、合理的使用降阻材料、方法,从而达到理想的降阻效果。

参考文献

- [1] Leonid Greev Impulse Efficiency of Ground Electrodes IEEE Trans on power delivery [J]. 2009, 24(1): 441—451.
- [2] 杨琳, 李建明. 冲击接地电阻测量装置的研制 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 93—96.
- [3] 杨琳, 田晓菲, 李建明. 接地装置暂态特性分析 [J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 1—3.
- [4] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] Jinliang He Yanqing Gao Rong Zeng et al Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current IEEE Trans on power delivery [J]. 2005, 20(2): 1585—1591.
- [6] Youping Tu Jingliang He Rong Zeng Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low-Resistivity Materials [J]. IEEE Tans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1706—1713.
- [7] 郑瑞臣, 李景禄. 关于接地降阻材料的应用研究 [J]. 电瓷避雷器, 2005(5): 43—46.
- [8] 李景禄. 关于接地工程中降阻剂性能的探讨 [J]. 供用电, 2003, 20(1): 35—37.

作者简介:

蒋平 (1977), 男, 工程师, 电力系统及其自动化专业, 现主要从事生产技术管理工作。

(收稿日期: 2011—01—20)

SF₆密度继电器一次异常报警的原因分析

马 春

(德阳电业局变电运行中心, 四川 德阳 618500)

摘 要:分析了 SF₆密度继电器一次异常报警的原因,给出了分析因密度继电器测量温度与 SF₆本身气体温度不一致导致误报警的定量计算方法。

关键词: SF₆密度继电器;温度补偿;报警;定量计算

Abstract: Through analyzing the reason for an abnormal warning of SF₆ gas density relay, the quantitative calculation method is given to analyze the abnormal warning caused by the difference between the temperature measured by SF₆ gas density relay and the temperature of SF₆ itself

Key words: SF₆ gas density relay; temperature compensation; warning; quantitative calculation

中图分类号: TM588 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0064-01

SF₆必须在一定的密度下才能满足充气设备绝缘、灭弧的需要。为保证充气设备的安全运行必须对 SF₆的密度进行实时监测。SF₆密度继电器作为密度测量保护装置,广泛应用于 SF₆充气设备。它通过压力表征 SF₆密度大小,当压力降低到设定值时,可发出低压报警或闭锁信号。

1 现象

入冬以后,德阳电业局变电站某 SF₆断路器密度继电器时常出现清晨发出低压报警信号,现场查看密度继电器指针已触及黄区;上午信号自行解除,指针又恢复到绿区的情况。

2 原因分析

2.1 检查

首先对密度继电器进行了校验,密度继电器动作(发出报警、闭锁)及刻度示值均符合相关技术要求;查看设备运行记录,信号解除后,抄录运行记录时,指针位置(表压 0.58 MPa)虽较额定值(表压 0.60 MPa)偏低,但与常年记录数据一致;对二次回路的检查也未发现异常。

通过以上检查可基本排除密度继电器本身、二次回路短路故障及设备漏气导致低压报警的可能性。

2.2 基于贝特-贝格曼经验公式的分析

SF₆气体的状态在实际应用中常采用贝特-贝格曼(Beate-Bridgman)经验公式。

$$p = 0.58 \times 10^{-3} rT(1+B) - r^2 A \quad (1)$$

$$A = 0.764 \times 10^{-3} (1 - 0.727 \times 10^{-3} r) \quad (2)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3} r(1 - 0.846 \times 10^{-3} r) \quad (3)$$

式中, p 为 SF₆气体的压力, 10^{-1} MPa; r 为 SF₆气体的密度, kg/m^3 ; T 为 SF₆气体的温度, K。

由式(1)可知, SF₆气体的状态可由气体压力、密度和温度三个参数确定。当温度一定后,气体的压力和密度一一对应。因此,实际工作中,密度继电器均通过一定的方式(双金属片、标准密度气体参比等),对气体进行温度补偿(到 20℃)后,利用压力表征 SF₆密度。

充气设备中 SF₆气体的温度受环境、设备内阻、设备运行工况等因素的影响。由状态公式可知,在密度不变的情况下,温度的变化,将导致压力随之变化。受这些因素影响导致的温度变化的平衡时间较压力的平衡时间更长。密度继电器温度补偿装置只能对密度继电器本身感温元件所测温度进行补偿,而感温元件所测温度大多数情况下与 SF₆气体本身的温度并不一致。由此利用压力表征密度将带来一定的误差。这种误差能否引起密度继电器误发报警信号呢?

将式(1)以温度对压力求导

$$dp = 0.58 \times 10^{-3} r(1+B) dT \quad (4)$$

(下转第 86 页)

轴承处汽缸中分面为基准,分多点测半实缸与全实缸标高变化,并在垂弧最大点处用内径千分尺测量钢丝与汽缸洼窝径向间隙,根据各点变化值校核、测绘出汽缸垂弧变化曲线图,如图 1 所示。第二步是钢丝挠度的计算;计算公式如下。

$$F_x = \frac{1.5433}{40} \times (L-X)$$

X——测点到支点的距离;

L——钢丝两支点间的距离。

在计算公式钢丝的挠度时,注意计算的测点要与测量垂弧值的点一一对应。

第三步是扣除钢丝挠度对汽缸垂弧变化曲线的影响,从而得到实际的高中压缸静态垂弧值曲线图(见图 2)。

第四步是以此静态垂弧曲线指导调整隔板、隔板套洼窝中心。

在准确测出由于汽轮机高中压缸自身变形而引起的各隔板中心处垂弧变化值后,以此为指导调整隔板、隔板套洼窝中心,调整各汽封间隙至厂家要求的

下限值或比下限值还小,从而最大限度地减小汽封间隙,提高机组的运行经济性。图 3 是在安装中依据这种方法,最终调整后的高压缸汽封安装记录。机组在运行过程显示出了良好的效果,在机组安全稳定运行的同时,提高了机组运行的经济性。

4 结 语

实践证明,这种方法是可行的而且非常有效的,在工程实践中也取得了很好的效果。当然,随着科学技术的进步,先进、简便的测量工器具的出现及其在工程实施中的广泛应用,如,激光对中仪的使用,也大大简化了对大型汽轮机组汽缸变形测量的方法,提高了测量的准确性。也为安装调整提供了更加准确的依据。

注:参考资料为东方汽轮机厂 300 MW 汽轮机图纸及安装手册。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 64 页)

按表压 0.6 MPa,温度 20℃的状态进行分析。

$$p = 7 \times 10^{-1} \text{ MPa} \quad T = 273 + 20 \text{ K}$$

$$\text{由式 (1)~(3) 得 } r = 45.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{代入式 (4) 得 } dp = 0.029 \text{ dT} \quad (5)$$

密度继电器运行压力与报警压力设定差值大多为 0.05 MPa,由上式可得 dT = 17.2 K。即当 SF₆ 气体温度低于密度继电器感温元件所测温度达到 17.2 K 及以上时,才可引起密度继电器发出低压报警信号。

设备运行发热、太阳光照射等原因, SF₆ 气体温度一般高于密度继电器感温元件所测温度。当密度继电器安装在机构箱内,箱内的加热装置因低温、高湿运行时,有可能出现密度继电器感温元件所测温度高于设备内 SF₆ 气体温度的情况。由于机构箱内的加热装置通常 10℃ 停止加热,加之运行设备温升,温差基本不可能达到 17 K。

德阳电业局低压报警的 SF₆ 断路器密度继电器也设置在机构箱中,因气体实际压力值较额定值低,与报警值之差仅为 0.03 MPa,按式 (5) 计算的温度

差达到 10 K 即可发出低压报警信号。清晨,环境温度低于零度,负荷也不大,设备内 SF₆ 气体温度较低;机构箱内加热装置运行,箱内温度较高,极可能出现 SF₆ 气体温度低于密度继电器感温元件所测温度 10 K 以上的情况,由此导致密度继电器发出低压报警信号。但上午随着环境温度上升、负荷增大、加热装置停运等原因,温差缩小,信号即可自行解除。

3 处理措施

通过补加 SF₆ 气体至断路器额定运行压力,加大引发报警的温度差值以避免误报警的发生。补加 SF₆ 气体后,清晨观察密度继电器指针确有偏低现象,但仍位于绿区,未发报警信号;环境温度上升后指针恢复到额定压力位置。

参考文献

[1] 曹长武等编者. 火力发电厂化学技术监督 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2011-03-16)

地铁牵引站 V/V 牵引变压器 注入系统的谐波和负序分析

童庆刚¹, 汪茂盛²

(1. 攀枝花电业局, 四川 攀枝花 617000; 2. 西昌电业局, 四川 西昌 615000)

摘要: 为了分析牵引供电系统产生的谐波和负序电流所造成的影响, 建立了基于 PSCAD/EMTDC 的典型牵引供电系统和公用电网的模型。在 V/V 接线形式的牵引变压器下, 分析两供电臂机车不同台数运行方式下产生的谐波和负序的影响。

关键词: 牵引供电系统; V/V 接线; 谐波; 负序

Abstract: In order to analyze the influence caused by harmonic and negative sequence generated by traction power supply system, the models of typical traction power supply system and public power grid based on PSCAD/EMTDC are established. The impacts of harmonic and negative sequence of two feeding section locomotives under different operating modes are analyzed in detail based on the V/V traction transformer.

Key words: traction power supply system; V/V connection; harmonic; negative sequence

中图分类号: TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0065-04

0 引言

电力机车牵引负荷为波动性很大的大功率单相整流负荷。由于电力机车的非线性、单相、冲击特性, 电力机车运行过程中会产生大量的谐波和负序电流。且电力机车沿铁路沿线移动用电, 产生的危害比其他谐波源和负序源更为严重和广泛, 如不能得到及时有效的治理, 将注入电力系统, 影响全网^[1]。

电气化铁路的牵引供电制式全部采用单相工频 25 kV 交流制, 牵引站的谐波源主要是电力机车, 电力机车采用单相全波不控或半控整流, 脉动数为 2, 特征谐波为全部奇次谐波。电力机车为单相负荷, 由于其运行的随机性, 会在一定区段内造成电网三相严重失衡且难以调节, 电力机车牵引负荷对于供电系统来说为三相不对称负荷, 将会产生负序电流分量。

首先, 建立基于 PSCAD 的牵引供电系统和公共电网的典型模型。其次, 分析 V/V 接线牵引变压器两供电臂机车不同运行方式下产生的谐波和负序电流的影响。计算了与牵引变电站直接相连的系统变电站母线电压谐波总畸变率和三相不平衡度。

1 牵引供电系统模型及原理分析

1.1 区域电网模型

考虑区域供电能力、负荷特性以及牵引网的特点, 选择攀枝花、西昌区域电网作为分析对象。这个供电区域包含一个 220 kV 变电站, 两个 110 kV 变电站和两个牵引变电站。该区域是一个典型的牵引供电系统网络, 带有相对密集的电气化铁路负荷。可将此视为一个分析牵引供电系统和公用电网间相互作用的典型案例。牵引供电系统和公用电网示意图如图 1 所示。

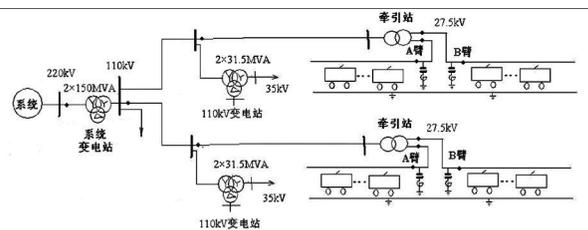


图 1 牵引供电系统和公用电网示意图

220 kV 变电站容量为 150 MVA, 1 号和 2 号牵引变压器均为三相 V/V 接线。1 号牵引站的供电线路总长度为 34 km, 2 号牵引站的供电线路总长度为 20 km。1 号牵引站变压器容量为 $2 \times (20+16)$ MVA, 仿真中设定供电臂相别为 AC/BC。2 号牵引站变压器容量为 $2 \times (16+16)$ MVA, 适当考虑换相, 仿真中设定供电臂相别为 AB/BC。1 号和 2 号牵引站安装了

3、5 次滤波器,按照可滤除 3 次 70% 谐波电流、5 次 20% 谐波电流、7 次 20% 谐波电流考虑。220 kV 变电站其他负荷按照变电容量 50% 考虑,110 kV 变电站负荷按照总变电容量 40% 考虑,功率因数均考虑 0.9。

1.2 电力机车模型

中国现在普遍运行的电力机车为交直型电力机车。交直型电力机车的牵引变压器低压侧采用的是三段半控桥晶闸管相控整流无级调压方式。机车的基本特性、参数和典型工作过程参见文献 [2]。图 2 为 SS6B 交直型电力机车的 PSCAD 仿真模型主电路图。

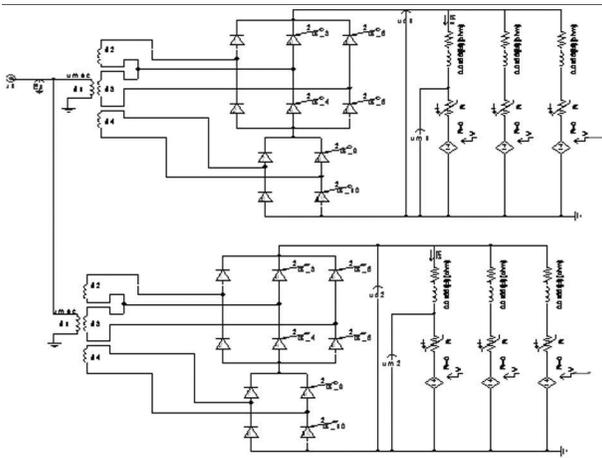


图 2 SS6B 电力机车仿真模型

表 1 列出了 SS6B 型电力机车运行在额定功率下的仿真结果。与文献 [3] 中 SS6B 型电力机车谐波电流统计值进行对比基本一致,说明所建立的 SS6B 型电力机车仿真模型可用于计算。

表 1 SS6B 型电力机车谐波电流仿真结果

谐波次数	1	3	5	7	9	11
百分比 /%	100	24~29	9~15	6~9	2~5	3~4

1.3 牵引变压器模型

1 号和 2 号牵引变压器均采用 V/V 接线形式。电力机车为单相谐波负荷,当通过 V/V 接线牵引变压器的不对称运行后,便在供电系统中产生三相不平衡谐波,有以下特点。

(1) 各次谐波,包括 3 和 3 的倍数次,都经过牵引变压器注入系统,注入系统的特征谐波为全部奇次谐波;

(2) 各次三相不平衡的谐波电流均由谐波序电流组成。各次三相谐波电流的相量和为零,组成闭合三角形,因而不含零序谐波分量。

由 V/V 接线原理图可知, \dot{U}_{a1x1} 与 \dot{U}_{AC} 、 \dot{U}_{x2a2} 与 \dot{U}_{BC} 相当于两台单相 V/V 变压器,变压器高压侧 C 相流过的电流为 A、B 两相电流的叠加。A 供电臂所接电压为 \dot{U}_{AC} , B 供电臂所接电压为 \dot{U}_{BC} 。V/V 接线牵引变压器的电压和电流关系如图 3 所示。

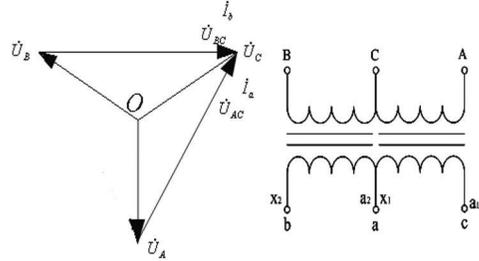


图 3 V/V 接线牵引变压器的电压电流关系

设系统电压为三相对称的正弦波,以供电臂超前相电压 \dot{U}_{AC} 为参考,则两臂 h 次谐波电流的复数形式为

$$\dot{I}_{ah} = I_{ah} e^{j\psi_h} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{bh} = I_{bh} e^{j(\varphi_h - h \times 60^\circ)} \quad (2)$$

式中, ψ_h 和 φ_h 为 a 臂和 b 臂参照于各自供电臂电压的 h 次谐波初相角。C 相的电流为 $\dot{I}_{ch} = -(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh})$ 。设牵引变压器变比为 K,用三相对称分量法求得注入供电系统的谐波电流及序分量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \\ \dot{I}_{ch} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \\ I_{ch} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} \\ e^{-j30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \\ j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

把式 (1) 和 (2) 代入即可得到各次谐波电流的数值和相位。各次电流的数值如下式。

$$I_{h+} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh} \cos[\varphi_h - \psi_h + (h-1)120^\circ]} \sqrt{3}K \quad (4)$$

$$I_{h-} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh} \cos[\varphi_h - \psi_h + (h+1)120^\circ]} \sqrt{3}K \quad (5)$$

$$I_{ah} = I_{ah} / K \quad (6)$$

$$I_{bh} = I_{bh} / K \quad (7)$$

$$I_{ch} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 - 2I_{ah}I_{bh} \cos(\varphi_h - \psi_h + h \times 120^\circ)} / K \quad (8)$$

2 仿真分析

2.1 谐波计算结果

电力机车运行时会产生大量的谐波电流, 这些电流注入系统后会使得系统电压产生畸变, 在所接牵引负荷较重的情况下会引起母线电压畸变率超标。仿真分析中, 选取 1 号和 2 号牵引站分别接 10 台和 5 台机车的重负荷情况, 计算牵引站注入系统的三相电流值, 以及系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压畸变率。

机车运行方式如下。

1 号牵引变电站两臂运行情况: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 4 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 2 台), 100% 功率;

2 号牵引变电站两臂运行情况: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 2 台 (SS4 为 2 台), 100% 功率;

两个牵引变电站注入系统的三相电流数值如表 2 所示。设两供电臂机车在相同触发角下运行, 即 $\psi_{lh} = \varphi_{lh}$ 。1 号和 2 号牵引站注入系统的电流波形如图 4 和图 5 所示。

表 2 牵引变电站注入系统的三相电流值 单位: A

谐波次数		1	3	5	7	9	11
1 号牵引站	A 相	311.6	21.12	36.99	13.93	10.62	7.06
	B 相	193.7	20.14	14.72	12.37	4.63	1.67
	C 相	439.2	5.45	47.47	19.67	6.07	8.66
2 号牵引站	A 相	133.1	13.78	13.6	10.28	7.52	3.94
	B 相	213.4	12.67	22.29	15.25	2.45	5.18
	C 相	93.8	9.17	12.73	8.91	5.55	4.32

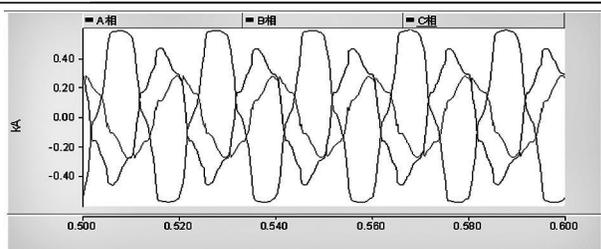


图 4 1 号牵引站注入系统的三相电流波形

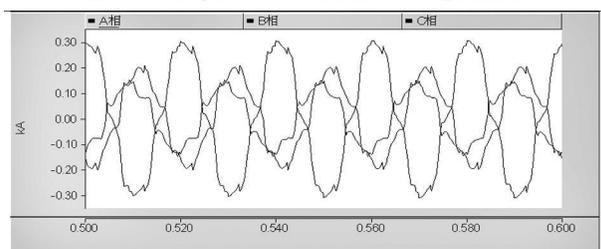


图 5 2 号牵引站注入系统的三相电流波形

文献 [4] 采用保持一臂谐波电流为最大值, 另一臂从零到最大值变化, 取 $I_{lh} = I_{lmax}$, 令 $x = I_{lh} / I_{lmax}$ ($0 \leq x \leq 1$)。牵引臂相别为 AC/BC, 只考虑基波正序和

负序及 C 相各次谐波, 将牵引站注入系统的谐波电流和序电流分为 4 类, 如表 3 所示。

表 3 V/V 牵引变压器注入系统的 4 类谐波电流

	$I_{h*} = I_h / (I_{lmax} \sqrt{3} K)$	相别、序别、次数
1	$I_{h*} = \sqrt{x^2 - x + 1}$	$I_{h-} : h = 3m + 1$
2	$I_{h*} = x + 1$	$I_{h+} : h = 3m + 1$
3	$I_{h*} = \sqrt{3(x^2 + x + 1)}$	$I_{ch} : h = 3m + 1, 3m + 2$
4	$I_{h*} = \sqrt{3}(1 - x)$	$I_{ch} : h = 3m + 3$

对比表 2 中牵引变电站注入系统的三相电流值, 可知仿真计算结果与理论分析得出的结论基本一致, 验证了仿真计算的正确性。

以上的分析均假设牵引站两供电臂的机车在相同触发角下运行, 这种情况在实际系统中很少出现。为考虑各次谐波相位的随机性, 现取两牵引站注入谐波电流的平均值为牵引负荷注入 220 kV 变电站的谐波电流。由此可计算得到系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压谐波总畸变率如表 4 所示。

表 4 系统变电站母线电压谐波总畸变率 单位: %

	A 相	B 相	C 相
110 kV	3.971	3.524	5.426
220 kV	0.588	0.558	0.858

电力机车运行会引起与之直接相连的 110 kV 母线电压谐波总畸变率超标, 与牵引站不直接相连的 220 kV 母线电压也受到影响。因此, 应考虑采取滤波措施。

2.2 不平衡度计算结果

由于电力机车属于单相负荷, 运行时会向系统注入三相不平衡电流, 造成系统三相电压不平衡。仿真分析中, 选取 3 种运行方式, 以此分析不平衡电流对系统电压的影响。运行方式如下。

方式 1: 1 号牵引站: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 4 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 2 台); 2 号牵引站: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 2 台 (SS4 为 2 台);

方式 2: 1 号牵引站: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 0 台; 2 号牵引站: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 0 台;

方式 3: 1 号牵引站: A 臂 0 台, B 臂 4 台 (SS4 为

2 台, SS6 为 2 台); 2 号牵引站: A 臂 0 台, B 臂 2 台 (SS4 为 2 台)。

上述 3 种情况下两个牵引站注入 110 kV 公共连接点的正序和负序电流如表 5 所示。

表 5 牵引站注入的正序和负序电流值 单位: A

机车运行方式	1号牵引站		2号牵引站	
	正序	负序	正序	负序
方式 1	291.775	155.487	129.378	86.178
方式 2	185.556	210.153	78.75	62.46
方式 3	102.505	100.257	62.54	102.42

系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压不平衡度计算值如表 6 所示。

表 6 系统变电站母线电压不平衡度 单位: %

机车方式	220 kV	110 kV
方式 1	0.354	2.623
方式 2	0.489	3.559
方式 3	0.611	4.384

由于电力机车属于单相负荷, 运行时向系统注入大量的负序电流, 上述 3 种运行方式下, 系统变电站 110 kV 母线电压不平衡度均超出国家标准。

在之前的理论分析基础上可利用谐波线电流的数值估算谐波负序分量。

$$I_{h+} = \sqrt{I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 + 2I_{Ah}I_{Bh}\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$I_{h-} = \sqrt{I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 - I_{Ah}I_{Bh}\sqrt{3}} \quad (10)$$

由负序电流的计算公式可知牵引站两臂所接机车在各种运行方式下均会向系统注入大量的负序电流。当一臂电流为最大, 另一臂电流为零, 以及两臂电流都为最大时, 向系统注入的负序基波电流为最大; 而当一臂电流为另一臂的一半时, 负序电流为最

小, 相对值为 $\sqrt{3}/2$ 。

3 结 论

电力机车属于非线性、单相、冲击性负荷, 在电力机车运行过程中产生大量的谐波和负序, 对与之直接相连的供电系统产生较大影响。向枢纽牵引站供电的系统变电站母线电压谐波总畸变率和三相不平衡度将超标。应考虑在系统变电站采取滤波措施。

总结了 V/V 牵引变压器运行时向系统注入谐波电流和序电流的特性。由于牵引变压器本身接线形式使注入系统的电流中含有大量的负序分量, 因此当系统变电站接多个牵引站运行时, 应考虑牵引变压器高压侧的换相使机车负荷均匀地分配在系统各相上, 减小负序电流。

参考文献

- [1] 张直平. 城市电网谐波手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangning, et al. Analysis of Adverse Effects on the Public Power Grid Brought by Traction Power-supply System [C]. Electric Power Conference 2008, IEEE Canada, 1-7.
- [3] 林磊. 电气化铁路对电力系统影响的分析研究 [D]. 浙江大学, 2004.
- [4] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

作者简介:

童庆刚, 男, 工程师, 从事电网运行管理。

汪茂盛, 男, 工程师, 从事电网运行管理。

(收稿日期: 2011-03-16)

智慧电网 节能减碳新利器

所谓「智慧电网」, 简单的说就是具有人工智能的电力供应网, 它能实时机动地整合调配用电供需, 并达到最佳节能的电力管理。智能电网包括了输配电网络、先进电子电表、各式储能设施、信息分析管控软件及电路安全保护机制等。

智慧电网除了能更灵活有效地调配电力供需, 更需利用先进电子电表所提供的实时用电信息, 来改变用户的用电行为模式、节约用电; 另外也透过差异电价, 进一步降低尖峰用电, 避免增建电厂的庞大投资, 因此智慧电网对电力供需双方都有利, 有助于全面大幅节能减碳。AMI 系统除电子电表本身, 更重要的还有电能管理和交易服务、通讯与数据处理服务, 以及连结到用户家中的「智能家电」等新商机。

智慧电网的推动, 由于涉及法规、基础建设及科技应用, 只有结合政府、电力公司及民间企业的力量才能成功。

局部放电超声波检测技术在西藏首座 220 kV 变电站的应用

周勇军¹, 王 军¹, 甘德刚²

(1. 拉萨电业局, 西藏 拉萨 850000; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;)

摘 要:局部放电超声波检测技术作为非电量带电检测技术,能够避免现场复杂电磁环境的影响和干扰,有效地检查出 GIS 内部是否有局部放电产生,判断绝缘性能是否完好。近年来国网公司积极加强带电检测技术在电力生产中的应用与研究,四川电力科学研究院结合援藏契机,与拉萨电业局共同探索与研究超声波检测技术的现场应用。首先分析局部放电超声波检测技术的原理,并在阐述 GIS 不同缺陷的主要特征和识别方法的基础上,对西藏电网首座 220 kV 变电站进行了 GIS 局部放电超声波检测。检测发现该站 220 kV 虎曲 246 线 C 相分支出线水平段存在一定的局放现象。根据检测结果分析,提出了相应的建议以及维修措施。通过检测故障点 SF₆ 气体化学成分发现超声波检测技术能有效确定 GIS 局部放电情况并准确定位。

关键词:西藏; GIS 超声波检测; 局部放电; 金属颗粒

Abstract: Ultrasonic inspection and measurement technique of partial discharge is a non-electrical live-line detection technique which can avoid the complicated on-site electromagnetic interference, detect partial discharge generated inside GIS effectively, and finally judge the insulation condition. In recent years, State Grid has reinforced the application and research of the live-line detection techniques, and working together with Lasha Electric Power Bureau, Sichuan Electric Power Research Institute explores and studies the on-site application of ultrasonic inspection and measurement technique. The principle of ultrasonic inspection and measurement technique of partial discharge is firstly analyzed. Based on the description of main characteristics of different GIS defects and their recognition methods, the ultrasonic inspection and measurement of partial discharge of GIS is carried out in the first 220 kV substation of Tibet. It is found that partial discharge occurs in the outlet of C phase of 220 kV Huqu Line. According to the analysis of detection results, the corresponding suggestions and maintenance measures are proposed subsequently. Through analyzing chemical components of SF₆ in the fault point, it is found that the ultrasonic inspection and measurement technique can effectively determine the partial discharge of GIS and locate it accurately.

Key words: Tibet; GIS; ultrasonic inspection and measurement; partial discharge; metal particle

中图分类号: TM855 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0069-04

0 前 言

SF₆ 气体绝缘组合电器设备 (GIS) 因具有故障低、免维护等特点而在电力系统中被广泛使用。但是 GIS 的特殊性,使得除微水检测等少数试验项目外,现行高压电气设备预防性试验的大多数项目无法用于 GIS 长期以来几乎处于无维护状态^[1]。一旦 GIS 设备内部出现缺陷,一般不容易进行排查。为了缓解拉萨市用电紧张的局面,推动西藏地区的经济发展,220 kV 曲哥变电站作为西藏“十一五”规划的重点工程,已经于 2010 年建成投运。这是西藏电网首座 220 kV 变电站,也是目前世界上高海拔 (3 743 m) 电压等级最高的变电站。考虑到高海拔的外部环境,在

110 kV、220 kV 电压等级均采用了 GIS 设备。

GIS 设备发生局部放电、电晕等缺陷时,会伴随有电、声、光信号的产生^[2,3]。因此目前国内外广泛采用局部放电超声波检测技术等非电量测量法来检测 GIS 故障^[4]。通过收集这些声信号,并根据实际经验加以分析,可以对 GIS 的运行状况进行评估与判断^[5]。通过在西藏首座 220 kV 站开展的 GIS 超声波检测表明,局部放电超声波检测技术能有效地弥补目前 GIS 设备预防性试验方法的不足^[1],及时发现和避免 GIS 事故的发生,保障 GIS 设备的安全稳定运行。

1 局部放电超声波检测的原理

GIS 局部放电超声波检测技术是基于声发射原

理的检测方法。当 GIS 中的缺陷在电压作用下发生局部放电时,局部放电产生的能量使周围 SF₆ 气体的温度骤然升高,从而形成局部过热,所产生的扰动以压力波的形式传播,类型包括纵波、横波和表面波^[6,7,8]。不同的电气设备、环境条件和绝缘状况产生的声波频谱都不相同。GIS 中沿 SF₆ 气体传播的只有纵波,这种超声纵波以某种速度以球面波的形式向四周传播。由于超声波的波长较短,因此它的方向性较强,能量较为集中。当这种波到达 SF₆ 与金属外壳的交界面时,只有一部分透过金属外壳继续传播,大部分被反射或折射。如果把超声传感器紧贴在 GIS 金属壳体的外部,就可接收到局部放电产生的超声波信号。如果缺陷为金属颗粒,则当电场的库仑力超过颗粒的重力时,颗粒就开始上下跳动,从而碰撞金属外壳。每碰撞一次,将发射一宽带瞬时超声脉冲,并在壳体内来回传播。来自这种颗粒的声音信号是颗粒端部的局部放电和颗粒碰撞壳体的混合信号,超声传感器同样也可以进行检测^[8]。

GIS 发生局部放电等缺陷时,其声发射频谱集中在 20~100 kHz。由于超声波检测是非侵入式的,可对局部放电源进行测量且不影响 GIS 正常运行^[9]。在信号采集过程中,声波不但要在某一介质中产生衰减,而且还会在不同媒质界面上产生反射、折射并在波阻抗不匹配的两种界面上产生衰减。因此,信号成分比较复杂且高频部分衰减很快,能够采集到的声信号是比较微弱的。近年来随着传感器技术的发展,使得超声波检测的灵敏度大大提高^[8,10]。

来自不同类型、不同位置和不同大小的缺陷的声信号具有各自的特点,根据这些特点可以对缺陷类型进行识别,甚至进行危险性评估。但其缺点是:声信号的幅值随传感器远离故障点而快速衰减,只有当传感器位于故障点附近时才能获得最大灵敏度^[8,11]。因此,为了寻找缺陷就需要花费较长时间,但正是该缺点使得声测法具有故障定位的能力。

2 GIS 不同种类缺陷的主要特征以及识别方法

GIS 内部发生缺陷的主要形式是自由颗粒、电晕和局部放电等^[18,12,13]。通过对采集信号的有效值、峰

值、有效值与峰值的比例关系、工频频率的相关性、二倍工频频率的相关性等进行分析,可以判断是否存在缺陷。这些缺陷可能是在工厂制造或现场安装过程中产生,也可能是在正常运行中产生的(例如快速接地开关或断路器的操作产生的颗粒)^[14]。颗粒缺陷的信号水平高,信号幅值波动范围大,信号峰值与有效值的比值较大,50 Hz 及 100 Hz 信号含量小;局部放电缺陷的信号水平高,信号幅值波动范围小,信号水平稳定,信号峰值与有效值的比值较大,50 Hz、100 Hz 含量都有,但 100 Hz 信号比 50 Hz 信号高;电晕缺陷的 50 Hz 频率相关性较强,信号峰值与有效值的比值低,信号的频率成分较窄,一般小于 80 kHz。不同缺陷的主要特征如表 1 所示^[8,11]。

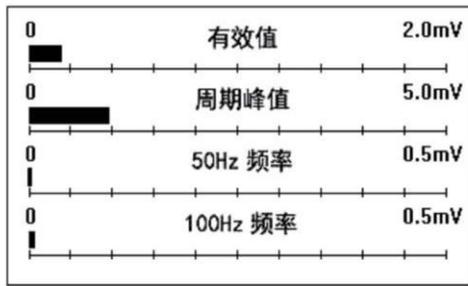
表 1 GIS 不同种类缺陷的主要特征

参 量	缺 陷		
	自由颗粒缺陷	电晕缺陷	局放缺陷
信号水平	高	低	高
峰值/有效值	高	低	高
50 Hz 频率相关性	无	有	有
100 Hz 频率相关性	无	无	有

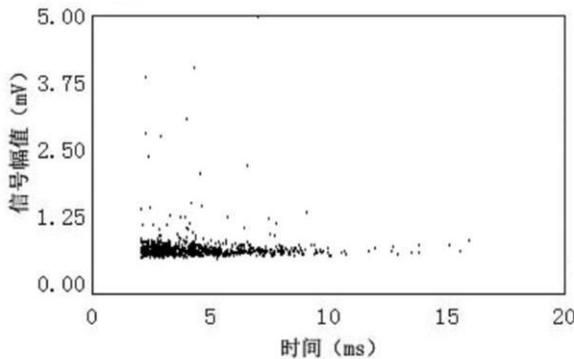
因此针对不同缺陷的信号特点,在利用超声波进行 GIS 故障检测时,应采用不同的测量方式来进行检测。目前的超声波检测系统一般有连续测量方式、脉冲方式以及相位方式等 3 种测量方式^[8,15]。连续测量方式能提供信号的有效值、周期峰值、100 Hz 频率成分以及 50 Hz 频率成分,提供故障判断、识别的初步数据,是快速故障识别的数据来源;脉冲方式反映了颗粒的幅度与飞行时间关系,主要用于自由颗粒的测量,如果在连续测量方式中初步判断可能存在颗粒,可采用脉冲测量方式进行进一步确认;相位方式反映的是放电的幅度与相位关系,相位方式主要用于局部放电和电晕,用来判断测量信号是否和工频周期存在关系。

3 超声波检测技术在西藏 220 kV 变电站的应用

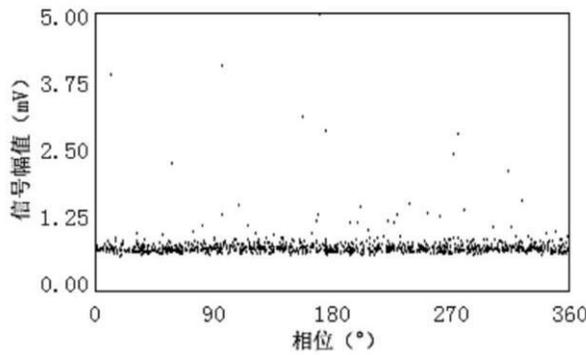
为了保证西藏首座 220 kV 变电站的正常运行,从该站投运后即定期对站内 220 kV GIS 开展局部放电超声波检测。由于 GIS 是 3 相分体的,因此需对每相进行至少 20 个点的测试,位置一般在出线筒侧的下方。在超声波检测时发现 A、B 两相的测试数据和背景信号非常接近。分析认为 A、B 两相中没有发生



(a) 连续测量方式



(b) 脉冲方式

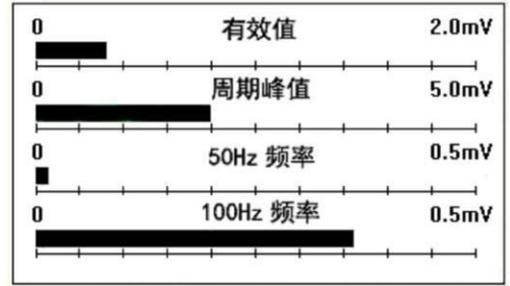


(c) 相位方式

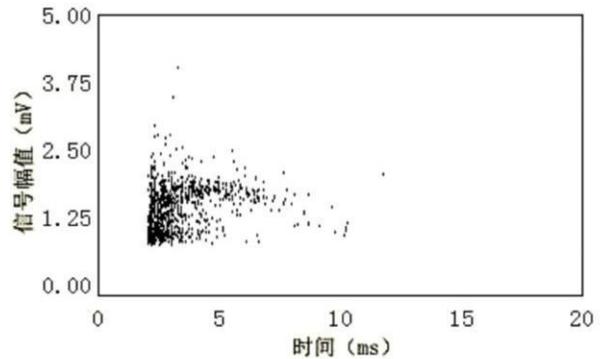
图 1 A 相的超声波测试数据

局部放电现象。图 1 所示为 A 相在三种测量方式下的测试结果。

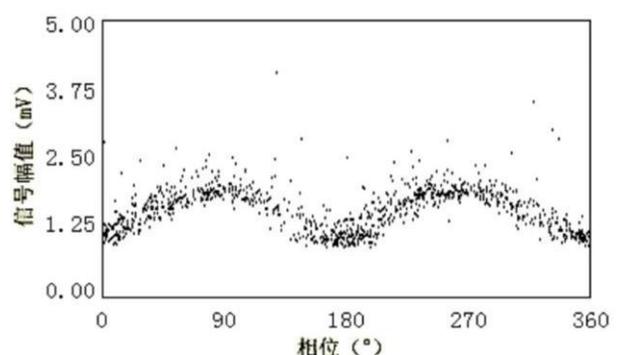
但是在虎曲 246 线 C 相分支出线的水平段在测试过程中发现有较明显的放电信号, 测试结果如图 2 所示。其中 100 Hz 频率成分信号较大。通过对连续测量和相位方式测试数据的综合诊断分析, 可以判定此处存在特征明显的局部放电现象。由于检测到的局部放电信号比较弱, GIS 设备可继续运行, 但需要进行跟踪监测, 一旦测试到的局部放电故障数据存在增长趋势, 建议厂家进行现场检修。而后通过对 C 相分支出线内的 SF₆ 气体进行化学成分检测时, 发现存在有局部放电时 SF₆ 产生的少量特征分解物质, 这样通过化学检测方法证实了超声波检测的测试结果是可靠的, 能有效地确定



(a) 连续测量方式



(b) 脉冲方式



(c) 相位方式

图 2 C 相的超声波测试数据

GIS 内部的局部放电情况。

4 结 论

通过对 GIS 超声波检测原理与 GIS 缺陷识别方法的分析, 以及在西藏首座 220 kV 变电站开展的 GIS 局部放电超声波检测应用表明, 超声波检测技术能在不影响设备正常运行的情况下有效地确定 GIS 局部放电情况并准确定位。

参考文献

- [1] 姚勇, 岳彦峰, 黄兴泉. GIS 超高频 超声波局部放电检测方法的现场应用 [J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 422-424.

[2] 游一捷,黄继,邓巨怡,等.用局部放电超声故障探测仪探测电缆头故障[J].高压电器,2000,18(1):59-60.

[3] 舒乃秋,胡芳,周黎.超声传感技术在电气设备故障诊断中的应用[J].传感器技术,2003,5(22):1-4.

[4] 王建生,邱毓昌.气体绝缘开关设备中局部放电在线监测技术[J].电工电能新技术,2000(4):44-48.

[5] 罗勇芬,黄平,赵文炎,等.多局部放电源的电磁波和声信号时序分析[J].高电压技术,2007,33(8):22-26.

[6] 陆瑾,袁聪波,孙骏,等.变压器局部放电的声电联合检测技术应用[J].华东电力,2006,34(9):78-80.

[7] 罗勇芬,李彦明,刘丽春.变压器局部放电的超声波和射频联合检测技术的现状和发展[J].变压器,2003,40(12):28-30.

[8] 北京兴迪仪器有限公司. AE900型局部放电故障检测仪技术资料[Z].中国:北京兴迪仪器有限公司,2008.

[9] DL/T 555-2004.气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则[S].

[10] 李晨焱,时卫东. GIS局部放电监测中超声波法与超高频法的比较[J].科技经济市场,2006,17(10):23.

[11] 苑舜.全封闭组合电器局部放电超声传播特性及监测问题的研究[J].中国电力,1997,30(1):7-10.

[12] 金立军,张明锐,刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究[J].电工技术学报,2005,20(11):88-92.

[13] 金立军,胡青,邱国海,等. GIS电晕放电监测[J].高电压技术,2005,31(3):25-27.

[14] 金立军,刘卫东. GIS金属颗粒局部放电的实验研究[J].高压电器,2002,38(3):10-13.

[15] Power Diagnostix Corporation. AIA compact Acoustic Insulation Analyzer Use Manual [Z]. Germany: Power diagnostix corporation 2005.

作者简介:

周勇军(1975),男,工程师,从事电力生产技术管理工作。

(收稿日期:2011-04-18)

(上接第 28 页)

作用效果并不明显。

4 结 论

在 Simulink 中搭建单机无穷大系统系统,将其与 SaDE 算法程序相结合,进行了电力系统稳定器的参数优化设计。综合考虑励磁系统和电力系统稳定器的性能,按照 ITAE 准则选择系统的控制目标,把电力系统稳定的参数设计问题转化为带有不等式约束的寻优问题。将在 Simulink 中搭建的无穷大系统进行了对电力系统稳定器作用效果的仿真。仿真结果显示,使用 SaDE 算法优化设计的电力系统稳定器作用效果良好,超过了经 CIPSO 算法优化的电力系统稳定器。自适应差分进化算法是一种具有较好的全局搜索能力和寻优速度的群体智能优化算法。

参考文献

[1] 束洪春. 电力工程信号处理应用 [M]. 北京:科学出版社,2009:197-198.

[2] 李莉.基于遗传算法优化权值的 H^∞ 电力系统稳定器的设计 [D]. 济南:山东大学硕士论文,2007.

[3] A. K. Qin, V. L. Huang, P. N. Suganthan. Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization [J]. IEEE Transaction Evolu-

tionary Computation 2009, 13(2):398-417.

[4] 范国英,郭雷,孙勇,等. BFO-PSO 混合算法的 PSS 参数优化设计 [J]. 电力系统及其自动化学报 2010, 22(6):28-31.

[5] 吴峰,陈维荣,李奇,等.基于粒子群优化算法的 PSS 参数优化 [J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):53-58.

[6] J J Liang, A. K. Qin, Ponnuthurai Nagarathnam, Suganthan, S. Baskar. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE Transaction Evolutionary Computation 2006, 10(3):67-82.

[7] J J Liang, A. K. Qin, Ponnuthurai Nagarathnam, Suganthan, S. Baskar. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE Transaction Evolutionary Computation 2006, 10(3):67-82.

作者简介:

杨祉涵(1985),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定控制。

张雪霞(1979),女,博士研究生,研究方向为群体智能算法、电力系统无功优化等

李奇(1984),男,博士研究生,研究方向为群体智能算法、电力系统稳定控制等。

邓美玉(1987),女,硕士研究生,研究方向为智能电网及新能源应用。

(收稿日期:2011-04-02)

35 kV 电缆头故障分析及处理

柏海峰, 陈 建

(广安电业局, 四川 广安 638550)

摘 要: 主要分析可能导致 35 kV 高压电缆头放电现象的主要原因, 并给出故障处理的几点建议。

关键词: 35 kV 高压电缆; 电缆头; 放电

Abstract: The main reasons which may cause the discharge of 35 kV high-tension cable end are analyzed and the suggestions for the fault treatment are proposed.

Key words: 35 kV high-tension cable; cable end; discharge

中图分类号: TM757 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0073-02

0 概 述

武胜变电站由于原先是一座 35 kV 变电站, 因此改造为 110 kV 变电站设计时由于场地面积不足的原因采用了 35 kV 电缆进线的方式。经过一年多的安全运行, 110 kV 1 号主变压器 35 kV 侧电缆终端头 B 相分支线 1 000 mm 左右处起火燃烧, 分支线电缆护套及电缆主绝缘烧坏, 分支铜芯裸露, 电缆铜芯与电缆铜屏蔽带有放电痕迹。

1 高压电缆头第一次放电经过

110 kV 武胜变电站于 2008 年 8 月投运, 110 kV 1 号主变压器 35 kV 电缆 2008 年 9 月投运。2009 年 9 月, 户外电缆头 B 相有轻微的放电声。2010 年 1 月户外电缆头 B 相有明显的“滋滋”放电声, 夜间可清楚看到 B 相分支线 1 300 mm (第一个雨裙处) 有间断的蓝色电晕。

2010 年 2 月放电声和电晕也越来越明显。2010 年 2 月 28 日凌晨主变压器停电后, 检查电缆的 B 相分支电缆上部护套、雨裙, 在放电处发现电缆护套与绝缘层有气泡、雨裙与分支线护套结合处有一圈黑色的痕迹、雨裙与分支线护套粘连不严密。剥开电缆 B 相分支电缆上部绝缘护套检查电缆绝缘层, 第一雨裙有轻微的黑迹, 绝缘层剥半导体时刀划痕迹较深, 检查电缆其它部位, 没发现其它发黑、变色的现象。

2 高压电缆头第二次放电经过

武胜变电站 110 kV 1 号主变压器 35 kV 电缆发生上述放电现象后, 检修人员分析为电缆护套与绝缘层在气泡周围放电引起的。在电缆运行的初期, 放电很轻微, 随着运行时间的增长和周围环境的 (湿度、污染) 影响, 气泡周围的放电逐渐加剧, 并产生强烈电晕。检修人员为了尽快排除故障及时恢复送电, 于是只对 B 相分支电缆上部绝缘层打磨、涂抹硅胶, 重新收缩分支绝缘护套和雨裙。处理后并再次进行绝缘、泄漏、直流耐压试验合格后电缆投入运行, 放电声、弧光消失。

2010 年 3 月 6 日天气情况: 小雨; 湿度: 95%。上午 10 时 30 分左右, 武胜变电站 110 kV 1 号主变 35 kV 侧电缆终端头再次发生故障——电缆终端头 B 相分支线 1 000 mm 左右处起火燃烧, 现场情况为:

(1) 35 kV 电缆终端头 B 相分支电缆线 1 000 mm 左右处有 150 mm 烧伤痕迹, B 相最下 2 片防雨裙烧损, 烧伤痕迹的两端 (电缆三交叉、电缆分支接线端) 完好;

(2) 电缆终端头至电缆分支线 A、C 相长 1 750 mm、B 相长 1 670 mm, 半导体、铜屏蔽层长 1 000 mm;

(3) 铜屏蔽层、半导体层断面与主绝缘层搭接采用应力带处理, 应力带宽度 10 mm, 且极不均匀;

(4) 电缆终端头三交叉根部电缆钢铠、电缆铜屏蔽接地铜带焊接部牢固, B 相已脱落, 铜屏蔽层、铜带

已变色。

(5) 电缆终端头三交叉上部约 300 mm 处 A 相铜屏蔽层全断裂, B 相部分断裂。

3 事故原因分析

交联电缆热缩终端头的绝缘是整根电缆的软肋, 从系统内发生的电缆故障情况来看, 除外力破坏外, 大多数电缆故障都是发生在终端头电缆屏蔽层断口处, 这跟终端头分支护套的质量、热缩附件、分支排列、内部场强、制作工艺等相关。在做电缆头时, 剥去了屏蔽层, 改变了电缆原有的电场分布, 将产生对绝缘极为不利的切向电场 (沿导线轴向的电力线), 在剥去屏蔽层芯线的电力线向屏蔽层断口处集中, 那么在屏蔽层断口处就是电缆最容易击穿的部位。

根据电缆热缩附件厂家的说明书, 电缆终端头缓和电缆屏蔽端部电场集中措施是应力管, 而不是应力带。应力管与绝缘屏蔽搭盖不少于 20 mm, 以防收缩时应力管与绝缘屏蔽脱离。为尽量使电缆在屏蔽层断口处电场应力分散, 应力管与铜屏蔽层的接触长度要求不小于 20 mm, 短了会使应力管的接触面不足, 应力管上的电力线会传导不足 (因为应力管长度是一定的), 长了会使电场分散区 (段) 减小, 电场分散不足, 一般在 20~25 mm 左右。

应力带的制作工艺就是缠绕, 这种工艺看似简单, 但缠绕的厚度、搭接的均匀度、收边的整齐度极不好掌握, 特别是收边不整齐电场分布将不均匀, 在运行过程中局部的电位高于其他部位, 而产生放电; 电缆终端头制作完毕后, 短时间内, 电缆终端头三叉口的内部形状不会发生变化, 但在三相电缆分支的机械应力下, 会逐步使应力带被挤压变形, 甚至破坏, 形成一个绝缘的薄弱环节, 如果天气不好, 湿度较大, 内部潮气较大, 就容易发生半导体、铜屏蔽层对绝缘层放电, 形成单相接地。

4 电缆头制作习惯性缺陷

从上述事件说明电缆头的制作大有讲究, 可能很小的疏忽就会造成电缆事故, 下面将总结一些在电缆制作过程中经常出现的一些能够导致电缆故障的不规范行为。

(1) 电缆终端头制作时, 没有按照 35 kV 热缩缆

头要求进行制作, 电缆的铜屏蔽层、半导体层切断没有在终端头三交叉上 200~300 mm 处;

(2) 电缆的钢铠、屏蔽层接地不良, 有时没有检查屏蔽层是否有断裂或者没彻底处理断裂处, 有时铜屏蔽层上缠绕的接地铜线焊锡严重氧化却没有处理;

(3) 电缆热缩头应力带施工工艺控制不严, 应力带搭接截面不够, 应力带收边不规则、不平、不整齐;

(4) 绝缘护套热收缩时有气泡未处理;

(5) 电缆三叉口内应填入应力锥, 而有时检修人员只是简单的使用制作电缆余物做填充物, 没有规范的使用应力锥;

(6) 在天气情况不理想制作电缆头时, 电缆三叉口护套有时会进行少量的水汽, 造成主绝缘受潮;

(7) 电缆头固定时, 三相相互交叉, 使电缆头承受过大的机械应力;

(8) 电缆与导体连接不可靠, 致使连接处发热。

5 防范措施

虽然 35 kV 电缆头很容易出现故障, 但是施工人员只要精细施工, 用心去做就能够将事故避免, 下面是防范电缆头发生故障的一些建议。

(1) 电缆终端在安装时要防潮, 不应在雨天、雾天、大风的天气时安装电缆头, 平均气温低于 0℃ 时, 要采取相关加热措施 (如电缆线芯适当加热、套装产品前用热风枪对电缆绝缘表面加热)。

(2) 电缆终端头的制作, 必须有缓和电缆屏蔽端部电场集中的有效措施, 尽量选用应力管电缆终端头附件, 搭接可靠。电缆头制作时要保证有可靠的密封, 因为制作电缆头时电缆外屏蔽切断后会引起切断处电场畸变。绝缘的电气性能要可靠, 半导体屏蔽层要刮干净, 外界的水及导电介质不得侵入, 否则容易引起爬电。对热缩材料进行加热时, 火力不要集中一点, 尽量避免过热使套管变质。加热时应从热缩管的中部均匀加热向两端收缩, 排出管内残留空气。

(3) 热缩电缆终端头长期运行, 电缆绝缘层附近会慢慢变黑, 应加强对电缆终端头的巡视检查, 尤其是三叉口处的灰尘要及时清除, 防患于未然。

(4) 电缆的固定: 电缆头做好后安装接线时, 电缆分支不能多次被弯曲、扭转。电缆头与设备固定连接时, 应尽量顺其自然, 三相之间尽量不要交叉。不

(下接第 94 页)

(4) 单体调试后进入分系统调试前, 须再次对点。在信号显示正常情况下, 可以通过拆线来判读测点对应情况。

(5) 模拟量信号量程就地和 DCS 的必须对应。

(6) 运行设备前, 检查控制逻辑, 保证逻辑的可靠性和正确性。

4 结 论

以上是以南宫生物质发电工程为例简单介绍了在调试过程中的一些原理与处理方法。希望能找出其中的优缺点, 以便吸取教训, 继续发扬优点, 更好地开展以后的调试与试运工作。

参考文献

[1] 吴华斌, 李炳军, 等. 火电工程调试技术手册——热工卷

[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 张明, 王元春, 等. 600 MW 火电机组培训教材——仪控分册 [Z]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[3] 张建宏, 杨雄. 火电厂分散控制系统创新设计与安装调试及检修运行维护实用手册 [M]. 香港: 中国科技文化出版社, 2006.

[4] DL 5009. 1—92 电力建设安全工作规程 (火力发电厂部分) [s].

[5] 陈冀平, 贾元平, 等. 火力发电建设工程启动试运及验收规程 [z].

[6] 冯忠贵, 叶江祺, 等. 火电工程调整试运质量检验及评定标准 [z].

(收稿日期: 2011—01—11)

(上接第 74 页)

能使电缆头承受过大的外部扭力。因此, 电缆从电缆沟穿管时, 一定要在设备连接处的正下方, 垂直并且牢固固定, 不能让电缆下部斜扭。对三芯电缆, 特别是大截面铜芯电缆, 必须保持足够的分相长度, 也就是分支手套尽量靠下安装, 同时, 三相线芯长度一定测量准确, 两个边相不能出现长短腿。对同一个间隔连接双电缆的情况尤其应该注意。否则, 斜扭着的电缆会产生扭转力, 长时间的机械应力可能导致电缆头损坏。

(5) 电缆头与导体连接质量值得注意。因为, 对电缆头要保证电缆与导体连接质量, 首先要结构设计合理, 简单、可靠。负荷电流的传导是靠电缆端子与导体端面的紧密接触完成的, 而不是靠导体上的螺栓。

在选择螺栓材质时, 以不锈钢为好, 铜质螺栓硬度不够, 安装中容易滑扣, 影响连接件的紧固。其次, 在压接接线端子及装配时, 必须保证接线端子平面与出线导体铜端面平行贴合。否则, 紧固螺母时, 首先需克服接线端子平面从倾斜到平行的扭转力, 这就是有时感觉螺母拧得已很紧或已达到规定力矩, 但接线端子平面与导体铜端面的压紧力仍未达到规定值的原因。

最后, 拧紧螺母时, 一定要使用力矩扳手, 按照工艺文件规定的力矩值上好螺母。

(6) 采用新技术新材料, 尽量使用冷缩电缆终端

头, 冷缩电缆终端绝缘性能优异, 耐老化、防腐蚀、密封性能好、抗电痕性能好, 硅橡胶弹性好, 与电缆界面结合紧密, 应力控制与绝缘复合为一体, 有效解决了电缆屏蔽断面处应力集中的问题, 保证电缆的安全运行。

(7) 学习先进的电缆头制作工艺, 加强电缆头制作培训, 严格电缆终端头制作工艺, 保证电缆终端头绝缘的电气性能, 促使电缆运行更加可靠、稳定。

6 结 语

电力电缆终端头的故障, 大多与电缆的终端头的制作和安装有关系。只有不断地加强学习和培训, 不断地采用新工艺、新材料, 严格按照说明书和有关规程、规定去安装、制作电缆头, 才可能保证电力系统安全、稳定、可靠地运行。

参考文献

[1] 郑肇骥, 王琨明. 高压电缆线路 [M]. 北京: 水利电力出版社, 2003.

[2] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[3] 何旭东, 交联聚乙烯电缆绝缘的劣化机理及在线监测方法的研究 [D]. 重庆大学, 1996.

(收稿日期: 2011—01—17)

Nechip 芯片在直流屏远程监测系统中的应用

詹毅¹, 邓平², 刘人礼², 王慧娟¹, 闫斌¹

(1. 电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 611731; 2. 自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘要: 叙述了全球首颗嵌入式高可靠性联网芯片——Nechip 芯片在串口转以太网模块中的应用以及使用此模块完成变电站直流屏远程监测系统的设计。通过此系统, 工作人员通过 WEB 方式即可实现对变电站直流屏系统的远程监测, 既减轻了工作人员的劳动强度、节省了电力企业的运营成本, 也便于及时发现问题, 提出改进措施。

关键词: Nechip 芯片; 串口转以太网模块; 直流屏远程监测系统

Abstract: The first embedded network single chip with high reliability——Nechip in the world is described, which is applied to the serial to Ethernet module and uses this module to accomplish the design of remote monitoring system of DC power supply equipment. With this system, the staff can monitor DC power system in the substation through the Internet. This system both reduces the labor intensity of the staff and saves the operating costs of power enterprises, and it is convenient for finding the problems and proposing the improvement measures.

Key words: Nechip; serial to Ethernet; remote monitoring system of DC power supply equipment

中图分类号: TM769 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0075-04

0 前言

直流电源操作系统在变电站中为控制信号、继电保护、自动装置及事故照明等提供可靠的直流电源, 此外还为各项操作提供可靠的操作电源, 因此直流系统可靠与否, 对变电站的安全运行起着至关重要的作用, 是变电站安全运行的保证。

直流电源操作系统简称直流屏, 传统的直流屏监测系统在底层硬件监测设备的设计上均采用 51 单片机作为模块的主控单元, 处理速度和性能上相对较低。并且通信协议的设计上都基于嵌入式操作系统, 在操作系统上面完成通信协议的设计, 并针对不同的通信芯片来完成不同的驱动程序的开发。使用 Nechip 芯片所设计的串口转以太网模块采用基于 ARM7 的芯片作为主控单元, 无论是处理速度还是存储能力都比 51 单片机有了较大的提高, 而且芯片本身已经集成以太网和完整的网络系统, 既降低了系统开发难度, 也提高了系统的稳定性和安全性, 在设计时只需要完成硬件电路部分的设计, 缩短了系统开发周期。

1 系统整体架构

由于电业局下属辖区内一般有多个变电站直流

电源操作系统需要监测, 所以本系统采用分布式监测的方式进行设计, 客户端应用程序使用 JAVA 语言开发, 采用 B/S 架构, 用户通过 WEB 方式即可实现对变电站直流屏系统的远程访问。即整个系统由分散的小系统构成集中监控的大型系统, 各个串口转以太网模块配合本地直流屏, 收集直流屏的所有数据信息, 依靠上层终端与各个子系统之间的相互通信, 实现系统的协调控制。图 1 为系统整体结构框图。

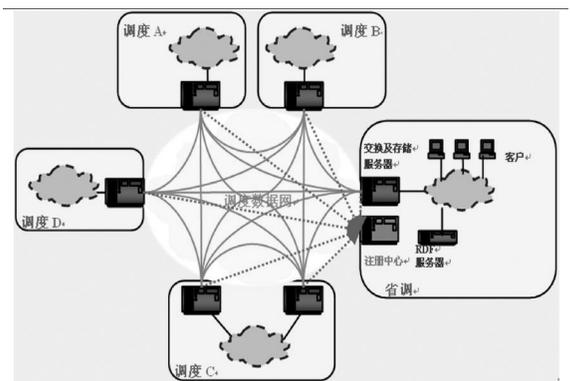


图 1 变电站直流屏远程监测系统结构框图

上层监测服务器首先通过网线连接位于后台监控中心的交换机, 交换机再通过 TCP/IP 通信连接位于各个不同变电站的本地串口转以太网模块, 以实现变电站直流屏系统的数据采集和上传。本地串口转以太网模块通过 RS485 接口与各个直流屏系统进行

通信, 以实现采集数据的本地化处理和数据传输过程中通信协议的转化。工作人员在局域网内通过 WEB 方式远程访问上层监测服务器上的后台应用程序即可实现对下属变电站直流屏系统的数据监测。

系统在实际的工作过程中, 不会因为上层监测服务器与本地串口转以太网模块之间的通信故障或设备故障而影响直流屏系统的正常工作, 充分保证了直流屏系统本身的稳定性和安全性, 并且各变电站子系统独立运行, 互不干扰。上位监测服务器负责为系统管理者了解分析各个直流屏系统的运行状况而设置。

3 串口转以太网模块设计

3.1 Netchip 芯片简介

Netchip 芯片是全球首颗嵌入式高性能、高可靠联网单芯片, 集成以太网和完整网络系统的芯片模块, 可确保在可选最高波特率下双向、全速、不间断传送数据不丢包。Netchip 芯片支持高达 5 路的 RS-232/485/422 接口, 每路串口均带有 DMA 操作功能, 同时芯片带有 10/100 Mbit 以太网、网络自适应和 POE 功能。芯片本身嵌入了多线程多任务实时操作系统, 带有完整智能的 TCP/IP 协议族, 支持 TCP Server/Client 模式, 可以供用户选择不同的工作模式进行系统设计。

Netchip 芯片内核上采用 32 bit 的 ARM7, 工作频率最高可达 70 MHz, 集成 256 K/512 K 字节的 Flash, 256 KB SRAM 存储器, 外部扩展使用 16 位数据总线和 24 位地址总线, 同时支持外挂 SRAM/PSRAM/NOR 存储器, 具备有丰富的外部扩展功能。Netchip 芯片使用 3.3 V 单电源供电, 使用时外接一颗 25 M 的无源晶振即可实现立即工作。

3.2 模块设计

由于 Netchip 芯片本身集成有以太网和完整的网络系统, 因此在系统设计时只需专注于模块硬件接口电路的设计, 一定程度上大大简化了系统设计的复杂程度, 便于开发人员快速地完成与网络相关的系统设计。

串口转以太网模块在设计时分为四个组成部分, 分别为电源模块、CPU 模块、RS485 模块和 RJ45 模块, 为了保证模块稳定性和安全性, RS485 模块和 RJ45 模块均采用通用接口方式进行设计。

RS485 模块使用 MAX3485 芯片作为接口芯片,

完成 RS-485 电平到 TTL 电平的转换, 该芯片使用 3.3 V 电压作为工作电源, 在网络终端使用 120 Ω 的电阻作为匹配电阻。

RJ45 模块使用 H1102 网络变压器芯片作为 Netchip 芯片与 RJ45 接口之间的连接组件, 在两者之间起到信号传输、阻抗匹配、信号杂波抑制和高电压隔离的作用。H1102 芯片的接收、传输两个变压器的中心抽头部分各自使用 3.3 V 电压供电, 为了保证电压信号的稳定, 需要在其引脚上并联 10 μF 的电容; 此外, 由于以太网信号属于差分信号, PCB 走线时采用差分对方式进行走线。

由于其余子模块的工作电压均使用 3.3 V 电压, 因此电源模块的作用是将外接的 9 V/12 V 直流电压转化成 3.3 V 直流电压, 设计上使用 LM7805 和 SPX1117-3.3 芯片完成这部分功能。

CPU 模块使用 Netchip 芯片作为整个硬件模块的核心, 设计时将 3.3 V 电压和 25 M 的无源晶振与 Netchip 的相关引脚进行连接, 同时考虑到输入电压的稳定性, 在芯片的 VCC 端添加一个 0.1 μF 的瓷片电容作为耦合电容。由于 Netchip 芯片集成了串口和以太网功能, 所以只需要将芯片上的串口和以太网信号线与 MAX3485 和 H1102 芯片上的对应引脚进行连接, 同时选用合适的电阻进行阻抗匹配, 即可实现系统功能。选用 Netchip 这种高度集成化的嵌入式芯片, 在一定程度上减轻了系统开发难度, 提高了开发效率。图 2 为串口转以太网模块的硬件结构框图。

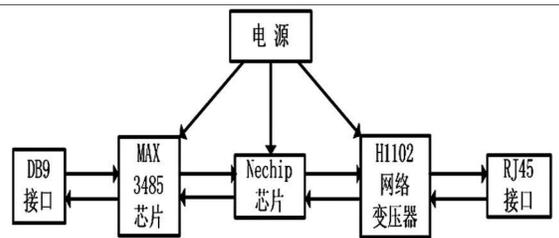


图 2 串口转以太网模块硬件结构框图

4 软件系统设计

由于直流屏系统采用电力系统 CDT 通信规约, 为了实现各个变电站串口转以太网模块采集数据的解码以及上层客户端展示, 软件系统设计时使用 Labwindows/CVI 软件、MySQL 数据库、JAVA 语言编写了相应的数据管理软件和 WEB 应用程序以实现直流屏系统实时数据的解码、存储及远程客户端展

示。数据管理软件将串口转以太网模块传回来的直流屏系统每帧字节数据,依据电力系统 CDT 通信规约进行解码,还原成实际的直流屏显示数据,同时保存在 MySQL 数据库中; JAVA 语言编写的 WEB 应用程序,通过调用数据库中的实时数据,以供局域网内的计算机实现远程访问,从而完成对变电站直流屏系统的远程监测。图 3 为整个系统的软件架构。

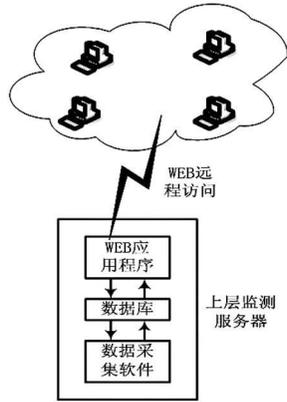


图 3 上层监测服务器软件架构

数据采集软件使用 NI Labwindows/CVI 软件进行开发,将串口转以太网模块接收到的每帧字节数据,依据电力系统 CDT 通信规约,转换成直流屏系统对应的遥测量和遥信量,同时将对应数据保存到 MySQL 数据库中。为了保证解码后数据与每个变电站直流屏系统的一一对应关系,软件在设计上使用串口转以太网模块的 IP 地址作为唯一标识,通过注册不同的 IP 地址,来建立解码数据与直流屏系统之间的映射关系。同时,当每一个串口转以太网模块与上层监测服务器建立网络连接后,数据管理软件上均能显示出当前模块的 IP 地址,以便于监控中心工作人员能及时发现由于网络故障而造成的数据错误。

数据库系统使用 MySQL 数据库进行开发,同时数据库系统作为数据管理软件与 WEB 应用程序的中间件,完成了底层数据与远程 WEB 客户端之间的数据交换。同时,数据库系统具有定期备份的功能,以防止由于系统崩溃而造成的数据丢失,大大提高了系统的稳定性和安全性。

WEB 应用程序使用 JAVA 语言进行开发,采用 B/S 架构,便于用户实现远程访问。同时软件在设计上简洁、大方,符合电力系统工作人员的使用习惯。图 4 为 WEB 应用程序结构框图。

实时数据模块:将串口转以太网模块传送回来的

直流屏系统遥测、遥信量进行前台显示,便于变电站工作人员实时了解其工作情况;同时,将数据存入 MySQL 数据库中,便于历史数据模块的后期分析和处理。

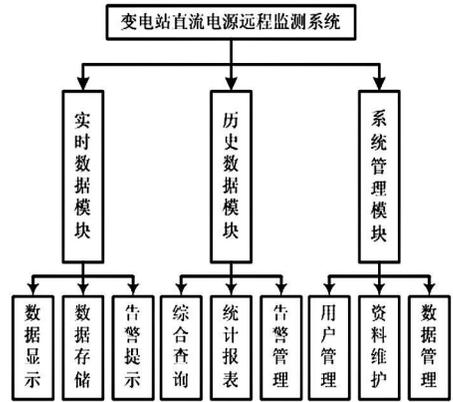


图 4 应用程序结构框图

历史数据模块:对直流屏系统的遥测、遥信量进行全方位、多角度的查询分析,对各类数据进行综合性的查询后,给出图形化的显示,便于工作人员分析直流屏系统的运行情况,及时安排检修。本功能可将变电站直流屏系统故障消除在萌芽状态。

系统管理模块:对系统用户、权限、数据库等基础参数进行设置和管理,使系统适合于具有不同权限的变电站工作人员,同时也便于系统的升级更新。

5 结 论

所论述的直流屏远程监测系统采用集成以太网功能的嵌入式芯片完成了串口转以太网模块的设计,大大简化了设计的复杂程度,提高了开发效率;同时系统采用 B/S 架构设计了后台软件,便于电业局工作人员实现对变电站直流屏系统的远程监测。系统在实际的使用过程中性能稳定,对于直流屏的各种报警信号和数据信息能够做到及时上传、实时显示,很好地完成了项目设计书上的各项要求。

参考文献

- [1] 汪守贵. 变电站直流电源远程监测技术 [J]. 四川电力技术, 2009, 32(1): 88—90.
- [2] 徐艳, 张永志. 变电站直流屏微机监控系统的开发 [J]. 水利电力机械, 2003, 25(6): 46—47.
- [3] 吕勇军, 许晓峰. 基于 C8051F021 的直流电源监控系统 [J]. 仪表技术, 2004(5): 69—71.

(下接第 83 页)

荷完全靠锅炉的蓄热来维持, 所以, 在事故处理时降负荷速度宜快不宜慢, 否则将加大主蒸汽压力、温度降幅及速率, 最后, 造成汽轮机的过度冷却, 同时又影响点火后的恢复, 延长事故处理时间。降负荷速度主要根据主蒸汽压力、温度来控制, 只要压力没有上升的趋势就继续关调门, 直到降至 $8\sim 10$ MPa 的水平。

(2)最低负荷。锅炉跳闸后机组所带低负荷的高低决定了锅炉蒸发量, 也决定了冷却汽轮机的蒸汽量。如负荷过高, 将加大主蒸汽压力、温度降幅及速率。同时, 这一负荷又不能过小, 否则, 由于鼓风将引起汽轮机排汽温度的升高。根据白马电厂的经验, 最低负荷以额定负荷的 10% 左右为宜。

(3)锅炉恢复后升负荷速度。升负荷速度影响着汽轮机金属温度最终的变化情况。锅炉风机启动后, 特别是一次风机启动后, 炉内床料被吹起, 炉内换热急剧加强, 同时为了防止床温下降过快, 将投入一定量的煤, 使压力、温度等都将较快上涨。应合理应用这一优势, 提升机组负荷、温度至缸温对应水平, 减少对汽轮机的过度冷却。以后要按照升温升压曲线控制蒸汽参数, 特别是要考虑燃料与负荷的匹配问题, 在外置床的重新投入时, 防止在恢复的过程中发生超温超压事故。

6 锅炉跳闸不停机注意事项

(1)采取手动关闭调门指令的方式, 迅速减负荷至 $30\sim 50$ MW, 降负荷速度可以控制在 $50\sim 100$ MW/min 左右, 主要根据机前压力, 保证安全门不动作, 并注意防止逆止门动作, 检查高调门、高排门、各疏水门开启正常, 检查轴封汽源的切换。为减小压力

下降幅度, 可以关闭高压加热器汽侧, 除氧器倒辅汽。并加强凝汽器及除氧器水位监视。监视好大机参数, 如主蒸汽温变化不超过规程规定, 否则手动停机。

(2)水位控制: 锅炉跳闸后, 炉内工况, 蒸汽流量、给水流量及压力变化较大, 注意调整给水泵, 控制好汽包水位, 检查关闭各级减温水。

(3)旁路开度过小, 压力太高, 调节级温降就大, 对汽轮机冷却更甚。旁路开度过大, 不利于主再热蒸汽温度的维持, 而且在低负荷时旁路开大了容易使高排逆止门顶不开而使高排温度急剧上涨至超限。

(4)锅炉恢复成功后, 机侧疏水尽量全开, 根据滑压曲线带负荷, 投入高压加热器汽侧, 除氧器倒四抽。尽快带负荷至事故前状态。

7 结 语

对于 300 MW CFB 大型汽包锅炉机组, 跳闸后汽轮机不跳闸时, 只要机炉协调好, 主蒸汽压力、温度可维持在 7 MPa、 490°C 以上的水平, 避免机组跳闸, 减小对汽轮机的寿命损耗, 跳闸后汽轮机不跳闸对汽轮机运行较为安全。事故处理时间短, 经济性更高, 对电网运行更安全, 机组的市场竞争力较强。

参考文献

- [1] 沈士一, 等. 汽轮机原理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.

(收稿日期: 2011-01-11)

(上接第 77 页)

- [4] 李利森, 徐彦. 电力系统用微机监控直流电源 [J]. 电源技术应用, 2001, (7): 47-50.
- [5] Conex top coporation. Nechip datasheet <http://www.conex-top.com>.

作者简介:

詹 毅 (1982), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统自动化、无线传感器网络;

邓 平 (1973), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 电

力系统自动化及电力信息化;

刘人礼 (1969), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 电力系统自动化;

王慧娟 (1986), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统自动化、无线传感器网络;

闫 斌 (1974), 男, 讲师, 研究方向: 电力系统自动化、测试计量技术及仪器。

(收稿日期: 2011-01-11)

600 MW 汽轮发电机定子铁损试验方法探讨

江建明¹, 袁兴惠², 宋功益¹, 李砚海³, 王 涛¹

(1. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072; 2. 四川省水利职业技术学院 四川 都江堰 610000;
3. 成都正和信息咨询有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要:当发电机定子铁心出现异常时,铁损试验是必须进行的一项重要试验。某电厂一台 600 MW 发电机在大修抽转子过程中,发电机转子掉落在定子膛内,为检查发电机定子铁心损坏情况,需进行发电机铁损试验。经过计算,现场 400 V 试验电源不能满足要求,用 6 kV 电源又比较麻烦,研究如何用两台变压器串联提供电源进行铁损试验,同时解决变压器低压侧承受高于其额定电压的绝缘问题。

关键词:铁损试验;试验电源;温差;接地;磁感应强度;单位铁损值

Abstract: When there is abnormal situation occurring in generator stator core, stator iron loss test must be done. When drawing a rotor of 600 MW generator in a power plant, the rotor drops in the stator chamber. To check the damage situation of the generator stator core, it is essential to carry out the stator iron loss test. After the calculation, it is found that 400 V power supply could not meet the test requirements and 6 kV power supply is trouble to be obtained in the power plant. How to use two series transformers to provide power source for stator iron loss test is studied. At the same time, the insulation problem that the low-voltage side of transformer may withstand higher than the rated voltage is solved.

Key words: stator iron loss test; test power supply; temperature difference; grounding; magnetic induction intensity; iron loss per unit weight

中图分类号: TM769 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)03-0078-03

0 概 述

某电厂一台 600 MW 发电机在大修抽转子过程中,转子掉落在定子膛内。为检查发电机定子铁心损坏情况,检查铁心片间是否存在短路,防止运行中因片间短路引起局部过热,甚至威胁到机组的安全运行,需进行发电机定子铁损试验。经过计算,现场 400 V 试验电源不能满足要求,用 6 kV 电源又比较麻烦。若采用调压器调压,调压器容量较大,调压器电压也不可能调得太高,用试验变压器升压更麻烦,不可行。下面介绍用两台相同的变压器副边串联提供电源进行铁损试验,试验于 2010 年 9 月进行。

发电机技术数据:型号 QFSN-600-2-220;额定功率 600 MW;定子电压 22 kV;定子电流 17 495 A;功率因数 0.9;额定转速 3 000 r/min;接线法 2-Y;工作氢压 0.414 MPa;励磁电流 4 387 A;励磁电压 400.1 V;定子铁心长度 6.731 m;定子铁心齿高 0.176 3 m;定子铁心外径 2.625 m;定子铁心内径

1.312 m;通风沟数 83;通风槽宽 0.008 7 m;制造厂家东方电机股份有限公司。

1 试验方法及判断标准

在发电机定子铁心上缠绕励磁绕组,绕组中通入一定的工频电流,使之在铁心内部产生接近饱和状态的交变磁通,通常取激磁磁感应强度为 1~1.2 T,铁心在交变磁通中产生涡流和磁滞损耗,使铁心发热,温度很快升高。同时,使那些铁心中片间绝缘受损或劣化部分产生较大的局部涡流,温度急剧上升,从而找出过热点。

在励磁绕组中通入励磁电流,测量励磁电流、电压和损耗,用红外线热成像仪测量定子铁心温度,计算出温升和温差,同时查找定子铁心局部过热点,把测量、计算结果与允许值进行比较,以判断定子铁心是否受损。

用可以测量电流、电压(量程大于 800 V)、功率的组合仪表每隔 10 min 分别测量一次铁心损耗及电

流、电压值。并用红外热成像仪测量铁心各部位温度；先用红外测温仪测量铁心的冷态温度，合上励磁电源 10 min 后开始用红外测温仪扫描膛内各处温度，找出铁心温度较高与较低的点。以后每隔 15 min 用红外测温仪对铁心温度进行观测，着重观测铁心温度较高与较低的点，直至 90 min 结束。

在磁通密度为 1 T 下，铁心齿部最高温升不应超过 25 K，齿部最大温差不应超过 15 K，定子铁心单位损耗不大于制造厂给定值。

2 铁损试验有关计算公式

计算采用的定子铁心各部尺寸，如图 1 所示。

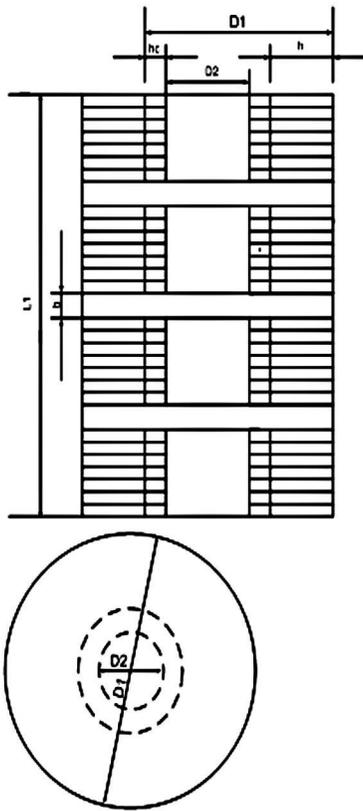


图 1 定子铁心各部示意图

定子铁心轭部截面 S 的计算

$$S=Lh$$

$$L=K(L_1-nb)$$

$$h=(D_1-D_2)/2-h_c$$

式中， L ——定子铁心有效长度，m；

h ——定子铁心轭部高度，m；

K ——定子铁心填充系数，硅钢片间用漆绝缘的取 0.93~0.95；

L_1 ——定子铁心总长，m；

n ——定子铁心通风沟数；

b ——定子铁心通风沟宽，m；

D_1 ——定子铁心外径，m；

D_2 ——定子铁心内径，m；

h_c ——定子铁心齿高，m。

励磁线圈匝数

$$N_r=U_2/(4.44fSB)$$

式中， U_2 ——励磁线圈电源电压，V；

f ——试验电源频率，Hz

B ——试验时铁心轭部磁通密度，T

S ——定子铁心轭部截面， m^2 。

试验要求铁心轭部磁通密度为 1 T，故试验电源

频率为 50 Hz 时，励磁线圈匝数 N_r 应为

$$N_r=45U_2/S \times 10^{-4}$$

励磁线圈的电流 I 及功率 P_r 的计算为

$$I=\pi D_{av}H_0/N_r$$

$$D_{av}=D_1-h$$

3 试验前有关计算结果

试验前需要计算励磁绕组的匝数、励磁电流大小及变压器的容量，计算中用到的基本参数如下。

定子铁心长度：6.731 m；

定子铁心齿高：0.176 3 m；

定子铁心外径：2.625 m；

定子铁心内径：1.312 m；

通风沟数：83；

通风槽宽：0.008 7 m；

铁心压紧系数取 $k=0.95$ ；

定子铁心有效长度： $L=5.703$ m；

定子铁心轭部高度： $h=0.480 5$ m；

铁轭平均直径： $D_{av}=2.144 5$ m；

铁心轭部截面积： $S=L \times h=2.740 3 m^2$ ；

定子铁心重量： $G=3.14 \times 2.144 5 \times 2.740 3 \times 7.8 \times 10^3 = 143.929 \times 10^3$ kg。

规程要求在 1 T 磁密下进行试验，应尽可能接近 1 T，偏离 1 T 较远采用归算的方法误差较大。在磁密为 1 T 的情况下，若励磁电压为 400 V，则励磁线圈匝数： $N_r=45U_2/S \times 10^{-4} = 45 \times 400 \div 2.740 3 \times 10^{-4} = 0.65$ 匝，考虑线路压降，励磁线圈匝数会更小，显

然励磁电压太低,必须增大励磁电压。若取励磁电压为高压(如 6 kV),连线不方便。综合考虑,选用两台变压器副边串联产生 800 V 电压,此时在磁密为 1 T 情况下励磁线圈匝数: $N_r = 45 U_2 / S \times 10^{-4} = 45 \times 800 \div 2.7403 \times 10^{-4} = 1.3$ 匝,考虑线路压降,实际匝数稍低,可取 1 匝。但存在绝缘问题,因为变压器低压边绝缘只能承受 400 V 电压,不能承受 800 V 电压,若将变压器中性点解开且与地断开,在串联点接地,两台变压器低压边对地电压最高电压只有 400 V,就解决了绝缘问题。

励磁线圈电流: $I = 3.14 \times 2.1445 \times 1.8 / 1 \times 102 = 1212.7$ A

测量绕组匝数: 1 匝。

变压器容量: $400 \times 1212.7 = 485.08$ kVA,实际可取 1250 kVA。

4 铁损试验接线图

铁损试验接线如图 2 所示。

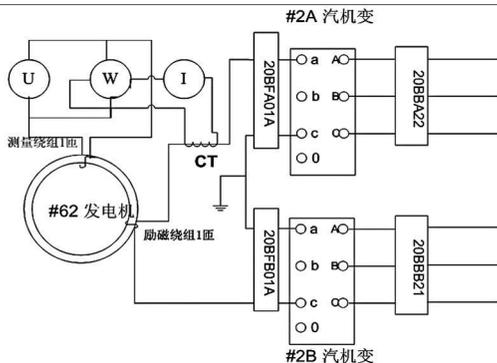


图 2 发电机铁损试验接线图

励磁线圈的试验电源由两台 1250 kVA 厂用低压变压器串联供给,两台变压器低压侧串联部位接地。励磁线圈导线的选择:按 3.5 A/mm² 载流量计算,所需励磁电缆芯线截面积为 $1212.7 / 3.5 = 346.5$ mm²,选用两根 180 mm² 的 400 V 铜芯软电缆双线并绕即可,考虑一定的裕度,可采用三根电缆并联,单根长度约为 200 m。

5 试验过程

5.1 准备工作

对定子各部位进行彻底的清扫,全面检查机座和

铁心,移走所有与试验无关的设备;检查通风沟、端部位置,保证各处无残留金属物件;将定子绕组中性点悬空,用 75 mm² 的铜芯线将定子绕组出口三相短路后一点接地。断开两台相同的厂用变压器低压侧(6000 V/400 V)中性点接地回路,两台厂用变压器高压侧并联、低压侧串联作为试验电源。必要时调整启备变压器档位,调整档位时可望将 400 V 电压调整到 380 V 左右。用截面积为 3×180 mm² 的电缆做为励磁绕组,从电机膛内穿过,通过电机铁心缠绕一匝(如图所示),为了试验期间可能需要的绕组数的变更,励磁电缆头和尾引出长度需留有缠绕定子铁心约 10 m 的余量。励磁线圈缠绕时,在铁心和机座棱角处用厚 5 mm 的绝缘橡皮包绕励磁电缆,并用扎带固定在电缆上。两台厂用变压器低压侧 A、C 相串联接入励磁绕组。进行电缆绝缘电阻测试。测量线圈用 2.5 mm² 的胶质线,在铁心铁心上缠绕一匝作为测量绕组。

将汽轮机变定值调整如下:退出汽轮机变负序过流保护,低压侧开关短延时定值调整为:2000 A, 0.5 s

5.2 试验过程

测量 6 kV I 段和 6 kV II 段电压(相量)差,应接近零(两段 6 kV 均接近空载)。

带电试验时,每隔 10 min 测量一次电气与温度参数,记录在记录表中。

每隔 10 min 记录一次各表计读数;用红外线热成像仪循环扫描定子铁心,随时监测各部位温度,找出高温区进行重点监测。试验过程中,温升控制每 h 不超过 5 K;定子铁心温度不超过 70℃。在下列情况下试验应终止:整个试验持续 90 min 后,或折算到 1 T 时,铁心的最高温升超过 25℃;或折算到 1 T 时,铁心最大齿温差超过 15℃;或试验过程中有局部打火、发红甚至冒烟或振动过大等现象发生。至 90 min 时分别断开两台厂用变压器低压侧、高压侧开关,停止试验。

6 试验结果及分析

铁心通电 90 min 时的电气参数如下。

测量绕组电压: $u_e = 700.67$ V;

(下接第 91 页)

式外,同时还须根据当前机组负荷计算出除氧器调节阀开度,将除氧器调节阀超弛控制关到该开度,时间为 10 s(第 2 种方式中,两台凝结水泵运行方式(2)也应考虑此逻辑)。

采用第 4 种除氧器水位调节方式时,如果两个控制对象共同作用于除氧器水位,很容易出现作用过强,引起过调,使除氧器水位发生震荡。另外,变频自动调节过程中,负荷变化引起凝结水母管压力变化较大,凝结水母管压力影响需要凝结水供水的部分设备正常运行,如低压旁路减温水,低压缸喷水减温,给水泵轴密封等。综合上述 2 个方面,把第 4 种方式优化为泵变频自动调节除氧器水位除氧器调节阀自动调节母管压力方式,压力设定值根据实际负荷自动设定经验值,运行可手动设偏值(为防止运行误操作,压力设定值做高低限制),以维持凝结水母管压力,满足最低压力要求和各用水设备的需求。为避免自动调节母管压力引起除氧器调节阀频繁动作,凝结水流量扰动,设置母管压力调节死区 0.1 MPa。

4 结 语

广安电厂三期 2×600 MW 机组凝结水泵高压变

(上接第 80 页)

励磁绕组电流: $I=1\ 161.7\text{ A}$

励磁绕组功率: $P=268\ 390\text{ W}$

试验时磁通密度的实际值

$B=(45\times 700.67)/(1\times 2\ 740.3)=1.151\text{ T}$

定子铁心轭部单位铁损

$\Delta P_{Fe}=268\ 390/143\ 929\times(1/1.151)^2$

$=1.41\text{ W/kg}$

铁心初试温度平均值为 37.6℃,90 min 时定子铁心最高温度为 43.8℃,最低温度为 38.2℃,平均温度为 42.5℃,铁心最大温升为 6.2 K,最大齿温差为 5.6 K,换算成 1 T 时的单位铁损值为 1.41 W/kg,铁心的最高温升为 4.67 K,最大齿温差为 4.23 K,合格。

7 结 语

频改造中,大量借鉴了当前国内其它火电厂的改造经验,重视变频改造应注意的问题,在电气方案选择上,充分考虑电厂自身情况,采用“一拖一”隔离刀闸通断电源的方式,既节约资金,又能满足生产运行的需求;在保护功能完善上,深入细致,井然有序,保证了改造后凝结水系统运行的安全性和可靠性;控制策略优化上,除氧器水位调节方式灵活多样,自动调节能力强,改善了凝结水系统运行的稳定性,充分发挥了高压变频调节的优势。经过一段时间的运行,其节能降耗效果显著,降低凝泵耗电量 30% 以上,达到了预期的改造目的,值得其他火电厂在高压变频改造时参考和借鉴。

参考文献

- [1] 朱北恒主编. 火电厂热工自动化系统试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

作者简介:

郭伯春(1976),男,四川南充人,四川广安发电有限责任公司热工专业工程师,从事电厂热工仪表及自动装置技术管理与检修方面工作。

(收稿日期: 2011-01-06)

600 MW 汽轮发电机铁损试验采用两台变压器原边并联、副边串联的接线方式提供电源的方法进行试验非常成功,实测电流与计算电流基本一致,同时也解决了两台变压器副边串联后的绝缘问题。该方法实用可行,值得推广应用。

参考文献

- [1] 四川电力试验研究院. 高压电气设备试验方法(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

作者简介:

江建明(1966),1987年毕业于成都科技大学(现为四川大学)电力系统及自动化专业,长期从事电机试验研究工作,高级工程师,1987-2008年在四川电力试验研究院工作。由于电力体制改革,四川电力试验研究院的电机专业划归四川省电力工业调整试验所,本人也随即调入,继续从事电机工作。

(收稿日期: 2011-03-01)

300 MW CFB 机组停炉不停机的实践

江 浩

(四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641005)

摘 要: 论述了 300 MW 循环流化床锅炉机组运行中发生锅炉跳闸对汽轮机安全性的影响, 并以实际经验阐述了停炉不停机的可行性、优势和实践方法。

关键词: 锅炉; 汽轮机; 跳闸; 温度; 优势

Abstract: The influence of boiler tripping on the security of the steam turbine during the operation of 300 MW CFB boiler is discussed. Based on the practical experiences, the feasibility, the advantages and the practice methods of boiler shutdown without stopping turbine are put forward.

Key words: boiler; steam turbine; tripping; temperature; advantage

中图分类号: TM227 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0081-02

0 引 言

锅炉跳闸是火电厂的易发事故, 而且跳闸原因都比较平常, 一般可以很快消除, 但对于 300 MW 及以上的大型机组而言, 发生锅炉跳闸就停汽轮机, 一方面锅炉的余热得不到充分利用, 另一方面大型机组重新启动的成本太高, 恢复到跳闸前状态的时间也较长, 对整个电网的安全运行影响较大。如果能做到跳闸而不停机并保证汽轮机的安全运行, 在较短的时间内恢复到跳闸前的状态, 对于提高大型火力发电机组的经济性及电网的安全性都具有特殊的意义, 并能提高火电厂的市场竞争力。

四川白马循环流化床示范电站采用 ALSTHOM 300 MW CFB 燃煤锅炉、东方汽轮机厂 N300-16.7/537/537/-8 型汽轮机。按照 ALSTHOM 原来的设计, 当锅炉跳闸时, 联锁跳闸汽轮机, 严重滞后了恢复的时间。考虑到循环流化床锅炉具有很大的蓄热, 试运行过程中将该保护暂时取消, 从而实现停炉不停机。

1 循环流化床锅炉的大量蓄热

1.1 锅炉耐火材料具有大量蓄热

循环流化床锅炉在炉膛下部, 旋风分离器、立管、

回料器、外置床等处布置了大量的抗磨耐火材料, 整个锅炉整体的耐火材料重达几千吨, 锅炉跳闸时, 这些耐火材料表面都具有 900℃ 以上的高温。

1.2 炉内床料

整个炉膛内具有上千吨的床料, 即固体粒子, 温度也高达 900℃ 以上, 具有极大的辐射换热能力。

1.3 循环流化床独特的布置方式

该锅炉具有 4 个大型外置床, 外置床内布置了低温过热器、一级中温过热器、二级中温过热器及高温再热器。外置床内充满了从旋风分离器捕捉回收的高温细灰粒子 (900℃ 上)。正常运行时, 在流化风的作用下以 0.3 m/s 的流化速度和蒸汽进行换热。主燃料或锅炉跳闸时, 流化风丢失, 这些高温细灰粒子塌下包覆各受热面。

因此, 相比常规煤粉炉, 循环流化床不仅同样具有大量的金属蓄热, 而且具有耐火材料、床料所含更大的蓄热, 有利保持主、再蒸汽的温度, 为停炉不停机创造了有利条件。

2 锅炉跳闸后的处理方式

2.1 锅炉跳闸后汽轮机即跳闸、发电机与电网解列

这时, 现场处理又有 2 种结果: ①跳闸原因很清楚, 可以马上进行各风机启动, 及时投入燃料运行, 在汽轮机惰走阶段即重新挂闸、冲转、并列、接带负荷,

表 1 锅炉由 300 MW 跳闸时处理过程参数

时间	负荷 /MW	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /℃	再热温度 /℃	高调节级温度 /℃	高压缸温度 /℃	中压缸温度 /℃	高中压胀差 /mm
19:40	305	16.9	535	537	509	509	481	1.78
19:41	298	16.4	534	532	506	506	476	1.78
19:42	226	15.37	522	505	480	502	475	1.56
19:43	116	15.05	507	491	462	487	473	1.60
19:44	49	14.9	504	490	457	484	470	1.65
19:47	51	13.6	499	485	448	475	462	1.62
19:52	34	11.9	500	474	442	460	456	1.49
20:00	52	12.6	526	482	453	458	453	1.28

经过一段时间机组达到跳闸前状态。②锅炉跳闸后不能很快点火,汽轮机跳闸后,投入盘车装置,待锅炉异常消除后汽轮机从静止状态下启动。

2.2 锅炉跳闸后汽轮机不跳闸、发电机仍然并列运行

运行人员以较快的速度将机组有功减至适当水平,维持机组带负荷运行。待锅炉恢复后,机组很快恢复至跳闸前状态。如果锅炉短时不能恢复,汽轮机打闸。

3 锅炉跳闸对汽轮机的影响

无论实行哪种处理方式,锅炉跳闸后的处理过程中,由于汽温的降低及进汽量的减少都会引起缸温的下降,即引起汽轮机的强制冷却。这样,会产生 3 个方面的问题:1)金属材料的温降速率;2)金属材料的温降幅度;3)汽缸上下缸温差。

汽轮机低周疲劳寿命消耗取决于金属材料的温度变化率及温度变化幅度。即汽轮机每次温度变化引起的寿命消耗取决于它的温度变化率及温度变化幅度,温度变化率及温度变化幅度越大,转子内部引起的热应力也越大,循环寿命消耗的百分数也越大,必将缩短汽轮机的使用寿命。汽轮机上下缸温差及内外壁温差过大,将引起汽缸变形而导致通流部分动静间隙发生变化,当温差增大到一定程度使动静间隙消失,造成动静摩擦事故发生。另外,金属温差增大到一定程度使内部热应力超过其屈服极限时,汽缸或转子将发生永久变形。

4 停炉不停机的实践

当锅炉由于某种原因跳闸时,汽轮机立即手动快

减负荷,辅以高压旁路阀开度调节,同时严密监视压力和主、再热蒸汽温度。表 1 为某次锅炉由 300 MW 跳闸时的处理过程参数。

由表可见,锅炉 19:40 跳闸,4 分钟内减负荷到较低负荷,能维持汽轮机温度在控制范围内,而且低负荷下的温度下降缓慢,为锅炉排除故障,重新启动赢得足够时间。19:56 锅炉逐步启动风机,使压力温度都逐步开始回升,逐渐恢复正常。

如果故障前,机组负荷再低一些,将能保证主再热蒸汽温度更高一些,变化率和幅度更小一些,对汽轮机的热冲击就更小一些。

锅炉跳闸时汽轮机跳闸与不跳闸情况下的对比:汽轮机不跳闸带一定负荷时,蒸汽对汽轮机进行的是不间断冷却,而且随着负荷、压力的降低,蒸汽流量减小,对汽轮机的冷却得到缓解。而停机后的重新启动属于极热态启动,在冲转并网时,汽轮机受到蒸汽的突然冷却。而汽轮机跳闸与不跳闸在锅炉恢复阶段汽温的变化幅度基本相当,但汽轮机跳闸时温度变化速率大,因此汽轮机不跳闸由于没有突然冷却的过程,参数变化相对更加平稳,产生变应力不大,对汽轮机较安全。汽轮机跳闸后,要再次冲转、升速,汽轮发电机组要通过临界转速,增大了轴系故障的可能性。而且由于一般此时压力较高,调门波动大,转速波动大,不利于机组的并列。另一方面,停炉不停机只要控制好温度下降幅度及速度,对汽轮机振动基本没有影响。停机后启动耗费的时间长,电量损失大,跳闸不停机无须进行厂用电的切换,从这方面看,不停机的经济性更高。不停机还能够减少一次对电网及发电机的冲击,对发电机及电网的安全运行也有好处。

5 影响汽轮机金属温度的因素

(1)降负荷速度。锅炉跳闸后,由于汽轮机热负

荷完全靠锅炉的蓄热来维持, 所以, 在事故处理时降负荷速度宜快不宜慢, 否则将加大主蒸汽压力、温度降幅及速率, 最后, 造成汽轮机的过度冷却, 同时又影响点火后的恢复, 延长事故处理时间。降负荷速度主要根据主蒸汽压力、温度来控制, 只要压力没有上升的趋势就继续关调门, 直到降至 8~10 MPa 的水平。

(2)最低负荷。锅炉跳闸后机组所带低负荷的高低决定了锅炉蒸发量, 也决定了冷却汽轮机的蒸汽量。如负荷过高, 将加大主蒸汽压力、温度降幅及速率。同时, 这一负荷又不能过小, 否则, 由于鼓风将引起汽轮机排汽温度的升高。根据白马电厂的经验, 最低负荷以额定负荷的 10% 左右为宜。

(3)锅炉恢复后升负荷速度。升负荷速度影响着汽轮机金属温度最终的变化情况。锅炉风机启动后, 特别是一次风机启动后, 炉内床料被吹起, 炉内换热急剧加强, 同时为了防止床温下降过快, 将投入一定量的煤, 使压力、温度等都将较快上涨。应合理应用这一优势, 提升机组负荷、温度至缸温对应水平, 减少对汽轮机的过度冷却。以后要按照升温升压曲线控制蒸汽参数, 特别是要考虑燃料与负荷的匹配问题, 在外置床的重新投入时, 防止在恢复的过程中发生超温超压事故。

6 锅炉跳闸不停机注意事项

(1)采取手动关闭调门指令的方式, 迅速减负荷至 30~50 MW, 降负荷速度可以控制在 50~100 MW/min 左右, 主要根据机前压力, 保证安全门不动作, 并注意防止逆止门动作, 检查高调门、高排门、各疏水门开启正常, 检查轴封汽源的切换。为减小压力

下降幅度, 可以关闭高压加热器汽侧, 除氧器倒辅汽。并加强凝汽器及除氧器水位监视。监视好大机参数, 如主蒸汽温变化不超过规程规定, 否则手动停机。

(2)水位控制: 锅炉跳闸后, 炉内工况, 蒸汽流量、给水流量及压力变化较大, 注意调整给水泵, 控制好汽包水位, 检查关闭各级减温水。

(3)旁路开度过小, 压力太高, 调节级温降就大, 对汽轮机冷却更甚。旁路开度过大, 不利于主再热蒸汽温度的维持, 而且在低负荷时旁路开大了容易使高排逆止门顶不开而使高排温度急剧上涨至超限。

(4)锅炉恢复成功后, 机侧疏水尽量全开, 根据滑压曲线带负荷, 投入高压加热器汽侧, 除氧器倒四抽。尽快带负荷至事故前状态。

7 结 语

对于 300 MW CFB 大型汽包锅炉机组, 跳闸后汽轮机不跳闸时, 只要机炉协调好, 主蒸汽压力、温度可维持在 7 MPa、490℃ 以上的水平, 避免机组跳闸, 减小对汽轮机的寿命损耗, 跳闸后汽轮机不跳闸对汽轮机运行较为安全。事故处理时间短, 经济性更高, 对电网运行更安全, 机组的市场竞争力较强。

参考文献

- [1] 沈士一, 等. 汽轮机原理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.

(收稿日期: 2011-01-11)

(上接第 77 页)

- [4] 李利森, 徐彦. 电力系统用微机监控直流电源 [J]. 电源技术应用, 2001, (7): 47-50.
- [5] Conex top coporation. Nechip datasheet <http://www.conex-top.com>.

作者简介:

詹毅 (1982), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统自动化、无线传感器网络;

邓平 (1973), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 电

力系统自动化及电力信息化;

刘人礼 (1969), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 电力系统自动化;

王慧娟 (1986), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统自动化、无线传感器网络;

闫斌 (1974), 男, 讲师, 研究方向: 电力系统自动化、测试计量技术及仪器。

(收稿日期: 2011-01-11)

消除大型汽轮机汽缸变形影响的一种简便方法

黄国强

(四川电力建设二公司, 四川 成都 610051)

摘要:大型汽轮机组由于其结构特点,高中压外缸自身变形较大。在安装、检修实践中,应将这种变形对机组的隔板中心、汽封间隙的影响降至最低,以提高机组运行的安全性、可靠性和经济性。以国产亚临界 300 MW 机组为例,介绍了一种消除汽缸自身变形影响的简便方法,以期对汽轮机的安装有所帮助。

关键词:汽缸变形;影响;经济性

Abstract: Due to the structure characteristics of large-scale steam turbine high-pressure and intermediate pressure outer casing have been deformed greatly. For improving the safety, reliability and economy of unit operation, the effects of this deformation on diaphragm centre and steam seal should be minimized as far as possible. Taking domestic manufactured 300 MW subcritical turbine for example, a simple method to eliminate the effects of cylinder itself deformation is introduced so as to provide some help for the erection of large-scale turbine.

Key words: cylinder deformation; effect; economy

中图分类号: TK266 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0084-03

0 前言

随着中国汽轮发电机设备制造技术的提高,汽轮机发电设备逐步向高参数、大容量、高经济性的方向发展。随着参数、容量的提高,设备本身的重量和体积也在增大,当然,这也对这些设备的安装工艺和安装精度提出了更高、更严格的要求。由于汽轮机设备制造技术的日臻完善,现场安装、检修对保证设备的安全稳定运行相对变得容易,但是要达到甚至超过机组设计的经济指标,则要求在汽轮机的安装、检修过程中严格控制工艺和精度,将可以预见的装配误差减至最小。特别是高中压缸的汽封间隙的装配,由于其做功占了整个汽轮机的很大一部分,所以控制好汽轮机高中压缸的动静间隙,对提高机组的运行经济性有很大的帮助。

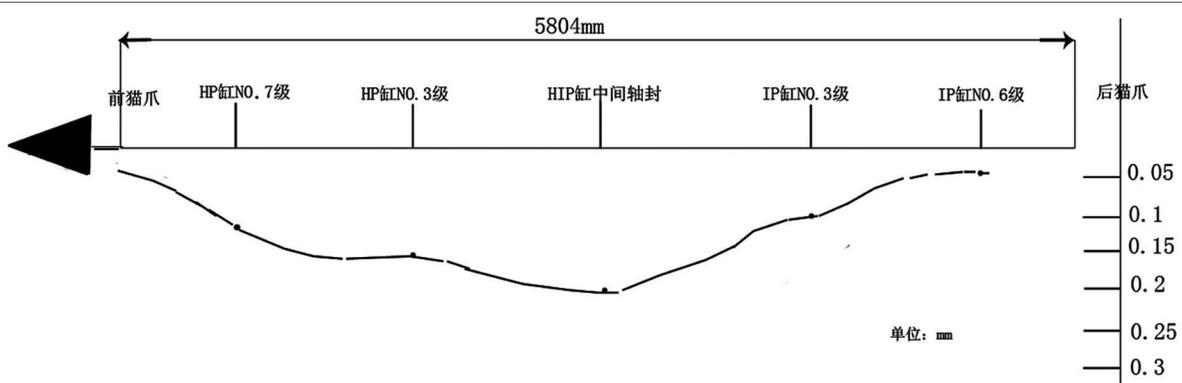
1 影响高中压缸动静间隙的主要因素

在汽轮机安装过程中,影响机组动静间隙的因素主要有三个,一个是设备制造质量,第二个是安装误差,第三个是设备自身的特性影响。随着汽轮机制造技术和制造工艺的提高,安装工具和安装方法的不断

更新、发展,前面两个因素的影响基本上可以降至最低,这里将不对此进行探讨。对于第三个因素,如何用简便可行的办法来消除设备自身特性对安装的影响,从而提高机组的运行经济性,将是下面讨论的重点。

2 高中压缸设备特性

通常情况下,对国产 300 MW 及以上高参数机组,大家都熟知的是汽轮机各转子因本身重量而产生自然挠曲,因此转子的中心线不是一条直线,而是一条曲线,即在自重作用下产生静挠度。但是,随着设备自身体积和重量的增大,汽轮机外缸也会因其重量而产生变形,即它的内部各个隔板中心也不是一条理论上的直线,而是一条曲线(如图 1)。这种由于汽缸自重挠曲变形而引起的实际中心与理论中心之间的差值,称为锤弧差。东方汽轮机厂生产 300 MW 以上亚临界参数汽轮发电机组的高中压缸,由于其 4 支点结构及高中压合缸的特点,其外缸支点间距离大,随着外缸体积的增大,重量也增大,因而变形也较大,如果在安装和检修过程中不对这种变形进行修正,将会对汽轮机组的经济运行产生很大影响。



注:该图是以东方汽轮机厂产 300 MW 亚临界汽轮机为例而绘制。

图 1 汽缸垂弧变化曲线

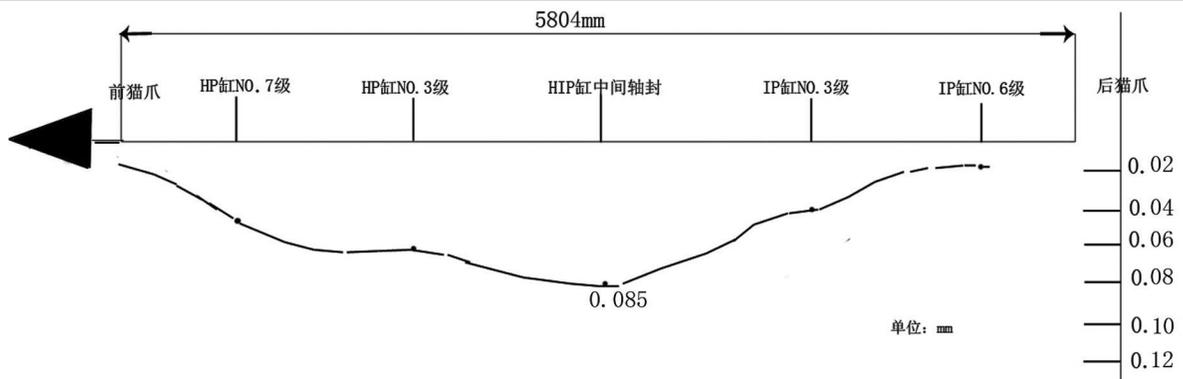
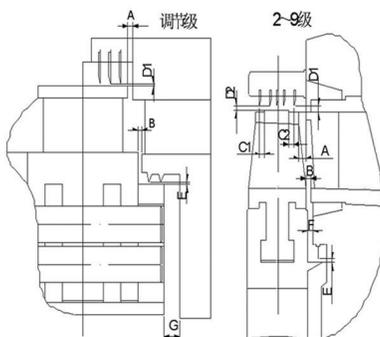


图 2 高中压缸静态垂弧值曲线图



级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
调值①	最大	1.6	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38		
	最小	1.4	1	1	1	1	1	1	1		
安装值	0°	左	1.46	1.02	1.0	1.08	1.02	1.24	1.26	1.08	1.01
		右	1.58	1.14	1.0	0.99	1.02	1.08	1.26	1.08	0.97
	90°	左	1.46	1.02	1.0	1.08	1.02	1.24	1.26	1.08	1.01
		右	1.58	1.14	1.0	0.99	1.02	1.08	1.26	1.08	0.97
级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
调值②	最大	/	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38		
	最小	/	1	1	1	1	1	1	1		
安装值	0°	左	/	1.14	1.02	1.02	1.08	1.02	1.26	1.32	1.02
		右	/	0.98	1.10	0.98	1.02	1.02	1.12	1.26	0.97
	90°	左	/	1.14	1.02	1.02	1.08	1.02	1.26	1.32	1.02
		右	/	0.98	1.10	0.98	1.02	1.02	1.12	1.26	0.97

图 3 国产 300 MW 汽轮机高压缸汽封间隙安装记录

3 消除变形影响的方法与步骤

下面,将介绍一种简便而准确的方法,来测量汽缸变形的锤弧值,以指导修正汽缸隔板中心和汽封间隙的安装和调整,从而在保证机组安全稳定运行的基础上,最大限度地提高汽轮机运行的经济性。

高中压外缸与内部各部件找中心采用半实缸加垂弧修正的方法,以消除由于气缸的变形对隔板中心的影响。通常情况下,厂家资料中不提供汽缸垂弧值。但是,对调整隔板、隔板套洼窝中心,垂弧值又是必须的。所以在汽轮机高中压外缸与导汽管、再热冷、热段等大口径管及中压联合汽阀等较重设备连接时,作半实缸与全实缸的垂弧差试验,以准确获取其垂弧值。

方法的第一步是测量高中压缸内部各隔板中心处的垂弧值。

以前轴承箱油封洼窝和 2 号轴承油封洼窝为起始点拉紧一根 $\Phi 0.5$ mm 钢丝,用精密水准仪以 2 号

轴承处汽缸中分面为基准,分多点测半实缸与全实缸标高变化,并在垂弧最大点处用内径千分尺测量钢丝与汽缸洼窝径向间隙,根据各点变化值校核、测绘出汽缸垂弧变化曲线图,如图 1 所示。第二步是钢丝挠度的计算;计算公式如下。

$$F_x = \frac{1.5433}{40} \times (L-X)$$

X——测点到支点的距离;

L——钢丝两支点间的距离。

在计算公式钢丝的挠度时,注意计算的测点要与测量垂弧值的点一一对应。

第三步是扣除钢丝挠度对汽缸垂弧变化曲线的影响,从而得到实际的高中压缸静态垂弧值曲线图(见图 2)。

第四步是以此静态垂弧曲线指导调整隔板、隔板套洼窝中心。

在准确测出由于汽轮机高中压缸自身变形而引起的各隔板中心处垂弧变化值后,以此为指导调整隔板、隔板套洼窝中心,调整各汽封间隙至厂家要求的

下限值或比下限值还小,从而最大限度地减小汽封间隙,提高机组的运行经济性。图 3 是在安装中依据这种方法,最终调整后的高压缸汽封安装记录。机组在运行过程显示出了良好的效果,在机组安全稳定运行的同时,提高了机组运行的经济性。

4 结 语

实践证明,这种方法是可行的而且非常有效的,在工程实践中也取得了很好的效果。当然,随着科学技术的进步,先进、简便的测量工器具的出现及其在工程实施中的广泛应用,如,激光对中仪的使用,也大大简化了对大型汽轮机组汽缸变形测量的方法,提高了测量的准确性。也为安装调整提供了更加准确的依据。

注:参考资料为东方汽轮机厂 300 MW 汽轮机图纸及安装手册。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 64 页)

按表压 0.6 MPa,温度 20℃的状态进行分析。

$$p = 7 \times 10^{-1} \text{ MPa} \quad T = 273 + 20 \text{ K}$$

$$\text{由式 (1)~(3) 得 } r = 45.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{代入式 (4) 得 } dp = 0.029 \text{ dT} \quad (5)$$

密度继电器运行压力与报警压力设定差值大多为 0.05 MPa,由上式可得 dT = 17.2 K。即当 SF₆ 气体温度低于密度继电器感温元件所测温度达到 17.2 K 及以上时,才可引起密度继电器发出低压报警信号。

设备运行发热、太阳光照射等原因, SF₆ 气体温度一般高于密度继电器感温元件所测温度。当密度继电器安装在机构箱内,箱内的加热装置因低温、高湿运行时,有可能出现密度继电器感温元件所测温度高于设备内 SF₆ 气体温度的情况。由于机构箱内的加热装置通常 10℃ 停止加热,加之运行设备温升,温差基本不可能达到 17 K。

德阳电业局低压报警的 SF₆ 断路器密度继电器也设置在机构箱中,因气体实际压力值较额定值低,与报警值之差仅为 0.03 MPa,按式 (5) 计算的温

差达到 10 K 即可发出低压报警信号。清晨,环境温度低于零度,负荷也不大,设备内 SF₆ 气体温度较低;机构箱内加热装置运行,箱内温度较高,极可能出现 SF₆ 气体温度低于密度继电器感温元件所测温度 10 K 以上的情况,由此导致密度继电器发出低压报警信号。但上午随着环境温度上升、负荷增大、加热装置停运等原因,温差缩小,信号即可自行解除。

3 处理措施

通过补加 SF₆ 气体至断路器额定运行压力,加大引发报警的温度差值以避免误报警的发生。补加 SF₆ 气体后,清晨观察密度继电器指针确有偏低现象,但仍位于绿区,未发报警信号;环境温度上升后指针恢复到额定压力位置。

参考文献

[1] 曹长武等编者. 火力发电厂化学技术监督 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2011-03-16)

火电厂凝结水泵高压变频改造应注意的问题

郭伯春

(四川广安发电有限责任公司, 四川 广安 638000)

摘要:针对当前火电厂凝结水泵高压变频改造现状,从“电气改造方案”、“保护功能”、“控制策略”三个方面,阐述了改造应注意的问题。并以广安电厂 600 MW 机组凝结水泵高压变频改造为例,论证了注意这三方面问题的必要性和可行性。

关键词:凝结水泵;高压变频;改造;电气;保护;控制策略

Abstract: Aiming at the current reforming situation of high-voltage frequency conversion of condensate pump in thermal power plants as viewed from the electrical reforming scheme, protection function and control strategy, the problems needing attention in the reforming are described. Taking high-voltage frequency conversion reforming of condensate pump of 600 MW units in Guang'an Power Plant for example, the necessity and feasibility of the above-mentioned three aspects are demonstrated.

Key words: condensate pump; high-voltage frequency conversion; reforming; electricity; protection; control strategy

中图分类号: TM769 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)03-0087-05

0 前言

近年来,随着国产高压变频器技术的逐步成熟和节能降耗的深入,国内许多火电厂相继进行了凝结水泵高压变频改造。从现有的改造结果来看,在电气改造方案选择上,存在不熟悉各方案特点、选择时盲从跟风现象,保护功能上,存在轻视片面、考虑不周现象,特别是控制策略上,存在对系统了解不够、控制就简等现象,这些现象,导致改造投资金额较大,系统安全性和稳定性不高,自动调节能力较差,未能充分发

挥高压变频能力,节能降耗还有待进一步提高。下面以广安电厂三期工程 2×600 MW 机组凝结水泵高压变频改造为例,分别从电气改造方案、保护功能和控制策略 3 个方面,谈谈火电厂凝结水泵高压变频改造应注意的一些问题。

1 电气改造方案的选择

综合当前国内凝结水泵高压变频改造的成果来看,方案很多,其中最典型的有以下 3 种方案。

1.1 采用“一拖一”,隔离刀闸通断电源

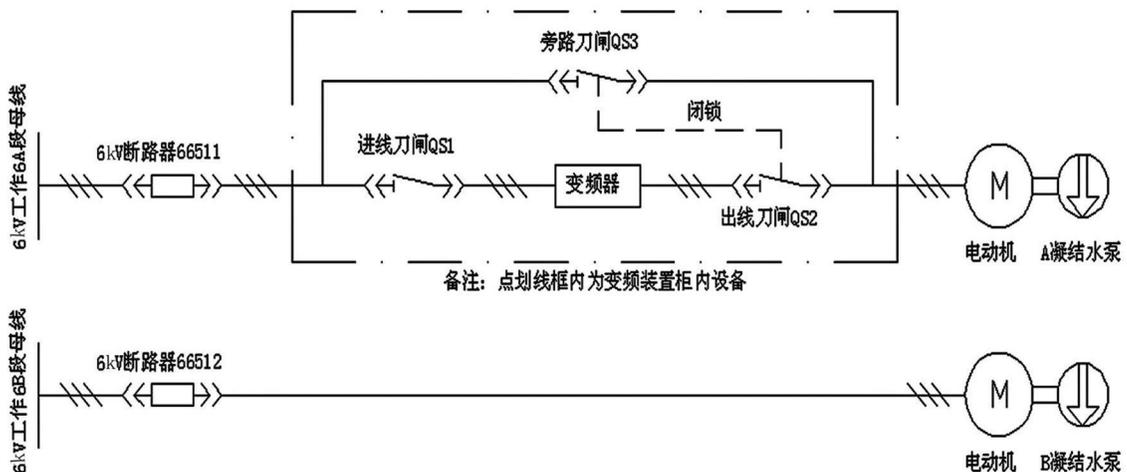


图 1 采用“一拖一”,隔离刀闸通断电源的方式

变频器与电动机的连接方式如图 1 所示, A 凝结水泵采用一套变频器, B 凝结水泵仍保持原来工频运行方式。考虑变频器检修隔离方便和变频器故障带来的负面影响,增加了大旁路刀闸 QS³。

此方案设计简单,采用隔离刀闸通断电源,DCS 系统控制相对较少,节约 DCS 通道,且只新增点划线框内设备,改造费用相对较少。

由于 2 台凝结水泵采用一套变频和一套工频的连接方式,结合其一主一备的运行设计方式, A 凝结水泵会长期处于运行状态,影响其使用寿命。另外,由于采用隔离刀闸通断电源, A 凝结水泵启动前,须就地手动分合相应隔离刀闸。

1.2 采用“一拖二”,隔离刀闸通断电源

变频器与电动机的连接方式如图 2 所示,其实质是由一套变频器加 6 个隔离刀闸组成。利用一套变频器,通过切换隔离刀闸,可分别拖动任意一台凝结水泵电机变频运行,同时具备工频旁路功能,正常方式下一台凝结水泵变频运行,另外一台工频备用。

此方案设计结合 2 台凝结水泵一主一备的运行

设计方式,2 台凝结水泵都能变频运行,使其投入运行方式灵活,检修隔离方便,凝结水系统运行的可靠性得到了很大的提高。

由于采用隔离刀闸通断电源,凝结水泵启动前,须就地手动分合 6 个隔离刀闸,实现其投入运行方式选择,因此操作较为繁琐,另外,增加了隔离刀闸个数,接线方式较为复杂,物资费用有所增加。

1.3 采用“一拖二”,断路器通断电源

变频器与电动机的连接方式如图 3 所示,2 台凝结水泵采用一套变频器,通过 DCS 系统对断路器的切换操作,可实现任意一台凝结水泵变频方式运行,同时具备工频旁路备用功能。正常运行方式下,一台凝结水泵变频运行,同时具备工频旁路备用,另一台工频或变频备用,因此备用泵联动时,具体启动哪种备用方式,由故障点确定。

此方案设计充分结合 2 台凝结水泵一主一备的运行设计方式,2 台凝结水泵不仅能变频运行中切为工频运行,还能将备用泵联动为变频运行方式,使其

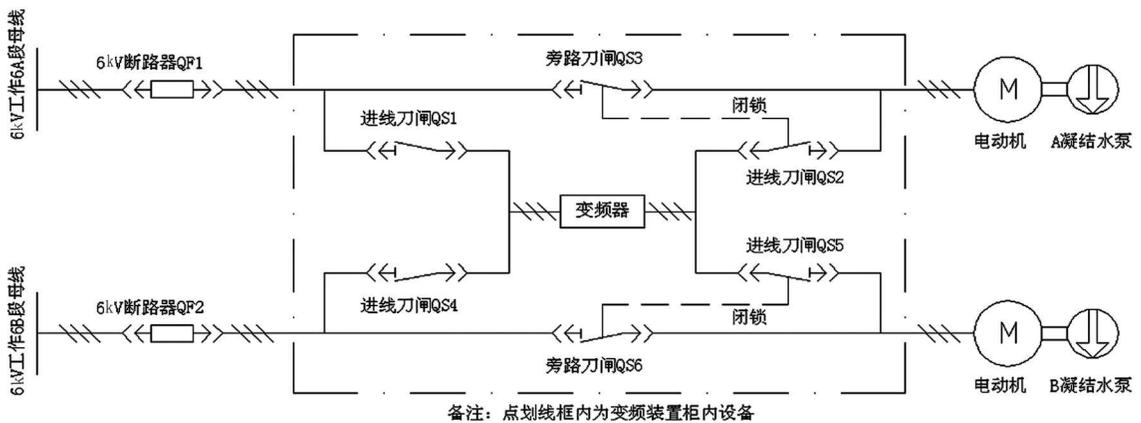


图 2 采用“一拖二”,隔离刀闸通断电源的方式

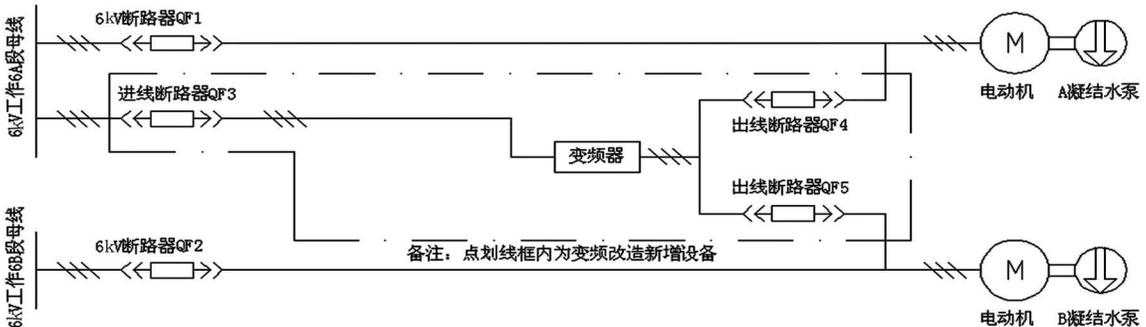


图 3 采用“一拖二”,断路器通断电源的方式

投入运行方式灵活多变,检修隔离方便,凝结水系统运行的可靠性和稳定性得到了极大的提高。

由于采用新增高压断路器来分合电源,DCS 系统须增加对高压断路器的控制,增加相应的 DCS 通道,高压断路器的价格比较昂贵,因此改造费用相对较高。另外由于 2 台凝结水泵投入运行方式很多,其保护逻辑和控制策略较为复杂。

通过对以上 3 种改造方案的比较,结合其各方案的优点和缺点,在凝结水泵高压变频改造时,应注意针对各厂自身情况,经过相关专业技术人员认证,有的放矢,选择适合自己的电气改造方案,避免盲从跟风现象发生。

广安电厂三期 2×600 MW 工程每台机组配置两台凝结水泵,正常运行时一台工作一台备用。单台凝结水泵设计流量 $1\ 628\ \text{m}^3/\text{h}$ 轴功率 $1\ 736\ \text{kW}$, 转速 $1\ 490\ \text{r/min}$ 配套电动机型号为 YKSL2500-4/1130-1, 额定电压 6 kV, 额定功率为 $2\ 500\ \text{kW}$ 。根据广安电厂当前实际情况,经过相关专业技术人员论证,选择了投资相对较少、操作简单的第一种方式,即“一拖一”,隔离刀闸通断电源的方式,电气部分与 DCS 接口清单如表 1。

2 保护功能的完善

凝结水泵高压变频改造,需针对选择的电气改造方案,结合凝结水系统分析,深入考虑对此系统带来的安全性和稳定性方面的影响,完善其保护功能,满足系统长期稳定运行的需要。不要认为只增加了一台变频器,保持原有保护功能不变,只需简单引入其故障保护功能,这样会严重影响凝结水系统的安全稳定性。

在此,结合广安电厂三期 2×600 MW 工程凝结水泵高压变频改造中保护功能完善情况,谈谈在保护功能完善方面应注意的问题,特别是在热工保护方面,保持凝结水泵原有保护功能不变的情况下,另外还须引入以下保护逻辑。

(1) A 泵启动方式判断

变频启动方式: QS1 闭合, QS2 闭合, QS3 断开。

工频启动方式: QS1 断开, QS2 断开, QS3 闭合。

(2) A 泵运行方式判断

变频运行方式: 变频启动方式, 6 kV 断路器已合

闸,变频器运行状态。

工频运行方式: 工频启动方式, 6 kV 断路器已合闸。

(3) A 泵 6 kV 断路器合闸允许条件, 增加 (与原有条件与)

变频启动方式, A 凝结水泵变频器上电允许。

工频启动方式, 保持原有保护逻辑不变。

(4) A 泵 6 kV 断路器跳闸条件, 增加 (与原有条件或)

变频运行方式 (延时 10 s 消失), 变频器重故障, 发脉冲 2 s 泵出口门未开 (关到位未消失) 延时 30 s

非变频运行方式, 保持原有保护逻辑不变。

(5) A 泵 6 kV 断路器手动停允许条件, 增加 (与原有条件与)

非变频运行方式, 延时 10 s

(6) A 泵变频器启动允许条件

变频启动方式, 变频控制在远方, 变频器无重故障, 6 kV 断路器已合闸, 变频器已准备好。

(7) A 泵变频器自启动条件

变频器启动允许条件满足, 泵投备用启 A 泵。

(8) A 泵变频器跳闸条件

变频器重故障。

(9) A 泵变频器报警

6 kV 断路器已合闸, 非变频启动方式或非工频启动方式; 变频器已运行, 非变频启动方式; 变频器轻故障; 变频器重故障。

(10) 泵投备用启 B 泵条件, 增加 (与原有条件或)

A 泵变频运行方式, 泵出口压力低于 $1.5\ \text{MPa}$ 除氧器水位低于 $1\ 800\ \text{mm}$, 凝结水流量低于 $500\ \text{t/h}$ 延时 5 s 泵出口压力低于 $1.35\ \text{MPa}$ 延时 5 s

A 泵非变频运行方式, 保持原有保护逻辑不变。

(11) A 泵出口门自动开条件, 增加 (与原有条件或)

变频运行方式, 延时 10 s 发脉冲 2 s

工频启动方式, 保持原有保护逻辑不变。

(12) A 泵出口门自动关条件, 增加 (与原有条件或)

变频运行方式, 变频器停指令, 发脉冲 2 s

非变频运行方式, 保持原有保护逻辑不变。

表 1 广安电厂三期 2×600 MW 工程 62 号机组凝结水泵高压变频改造与 DCS 系统 I/O 接口清单

类型	电气部分与 DCS 接口的点名				
DI 点	进线刀闸 QS1 状态 变频器已准备好	出线刀闸 QS2 状态 变频器运行状态	旁路刀闸 QS2 状态 变频器轻故障报警	变频器上电允许 变频器重故障	变频器控制在远方
DO 点	变频器启动指令	变频器停止指令	变频器轻故障复位		
AI 点	变频器转速反馈	变频器电流反馈			
AO 点	变频器频率给定				

表 2 广安电厂三期 2×600 MW 工程 62 号机组凝结水泵高压变频改造后除氧器水位调节方式

方式种类	A 泵高压变频调节方式	除氧器调节阀调节方式	两台凝结水泵运行方式
1	手动	手动	(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)
2	手动	自动	(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)
3	自动	手动	(1)
4	自动	自动	(1)

3 控制策略的优化

凝结水泵高压变频改造,在确定了电气改造方案后,其自动控制策略显得尤为重要,它直接关系到凝结水系统运行的稳定性,如果存在对系统了解不够、控制就简等问题,将影响凝结水泵高压变频自动调节的投入,不能充分发挥高压变频器的作用,以至于达不到预期的节能降耗效果。

广安电厂 600 MW 机组凝结水泵高压变频改造,在现场的调试和运行中,发现变频器水位调节照搬改造前的主、副除氧器调节阀水位调节逻辑,存在除氧器水位波动大,凝结水母管压力突变,甚至引起联备用泵等异常现象,针对这些问题,通过对其自动控制策略的完善和优化,使其除氧器水位和凝结水母管压力等重要参数稳定,来满足凝结水系统各种工况的运行要求,节能降耗达到非常满意的效果。

其自动控制策略优化,主要从以下几方面入手。

3.1 变频泵转速流量特性确定

由于采用凝结水泵高压变频转速代替主、副除氧器调节阀开度对除氧器水位调节,试验前,首先应从变频器自身要求和泵轴承润滑角度考虑,确定泵的最低转速,在变频器控制输出上做好低限启动,用来保护变频器和泵体及轴承;然后全开最小流量阀,需了解其转速与流量之间的特性关系,通过试验得出转速流量特性曲线;接着在机组 40% 负荷以上,除氧器调节阀全开,在保证凝结水母管最低压力要求下,尽量降低变频转速;最后综合考虑,得到凝结水泵变频控制转速下限,扩大变频控制可调节范围,充分挖掘其

节能降耗的能力。

3.2 运行调节方式分析

为了优化其控制策略,结合图 1 分析,两台凝结水泵共有 7 种运行方式,分别为

- (1) A 泵变频运行, B 泵停;
- (2) A 泵变频运行, B 泵启;
- (3) A 泵工频运行, B 泵停;
- (4) A 泵工频运行, B 泵启;
- (5) B 泵运行, A 泵停;
- (6) B 泵运行, A 泵变频启;
- (7) B 泵运行, A 泵工频启。

从上述 7 种运行方式看出,只有 (1)、(2)、(6) 的方式涉及 A 凝结水泵变频,其它方式与变频改造前不变,接下来进一步分析在此运行方式上的控制策略。

高压变频改造后,凝结水泵高压变频和主、副除氧器调节阀都能调节除氧器水位,因此除氧器水位调节方式增加,结合两台凝结运行方式,可归纳为如表 2。

3.3 自动控制策略优化

除氧器水位调节方式中(见表 2),4 种调节方式的自动呈递增式布置,各种方式之间相互切换时,应采用调节器输出跟踪,实现除氧器水位调节无扰切换。其中第 1 种和第 2 种方式控制策略与改造前相同,因此,主要针对第 3 种和第 4 种方式的控制策略,做相应的优化和完善。

采用第 3 种除氧器水位调节方式时,由于除氧器调节阀全开,若出现 A 泵变频器重故障等原因联锁备用 B 泵启,会对除氧器水位造成较大的扰动,因此,除了立即把除氧器水位调节方式切换为第 2 种方

式外,同时还须根据当前机组负荷计算出除氧器调节阀开度,将除氧器调节阀超弛控制关到该开度,时间为 10 s(第 2 种方式中,两台凝结水泵运行方式(2)也应考虑此逻辑)。

采用第 4 种除氧器水位调节方式时,如果两个控制对象共同作用于除氧器水位,很容易出现作用过强,引起过调,使除氧器水位发生震荡。另外,变频自动调节过程中,负荷变化引起凝结水母管压力变化较大,凝结水母管压力影响需要凝结水供水的部分设备正常运行,如低压旁路减温水,低压缸喷水减温,给水泵轴密封等。综合上述 2 个方面,把第 4 种方式优化为泵变频自动调节除氧器水位除氧器调节阀自动调节母管压力方式,压力设定值根据实际负荷自动设定经验值,运行可手动设偏值(为防止运行误操作,压力设定值做高低限制),以维持凝结水母管压力,满足最低压力要求和各用水设备的需求。为避免自动调节母管压力引起除氧器调节阀频繁动作,凝结水流量扰动,设置母管压力调节死区 0.1 MPa。

4 结 语

广安电厂三期 2×600 MW 机组凝结水泵高压变

(上接第 80 页)

励磁绕组电流: $I=1\ 161.7\text{ A}$

励磁绕组功率: $P=268\ 390\text{ W}$

试验时磁通密度的实际值

$B=(45\times 700.67)/(1\times 2\ 740.3)=1.151\text{ T}$

定子铁心轭部单位铁损

$\Delta P_{Fe}=268\ 390/143\ 929\times(1/1.151)^2$

$=1.41\text{ W/kg}$

铁心初试温度平均值为 37.6℃, 90 min 时定子铁心最高温度为 43.8℃, 最低温度为 38.2℃, 平均温度为 42.5℃, 铁心最大温升为 6.2 K, 最大齿温差为 5.6 K, 换算成 1 T 时的单位铁损值为 1.41 W/kg, 铁心的最高温升为 4.67 K, 最大齿温差为 4.23 K, 合格。

7 结 语

频改造中,大量借鉴了当前国内其它火电厂的改造经验,重视变频改造应注意的问题,在电气方案选择上,充分考虑电厂自身情况,采用“一拖一”隔离刀闸通断电源的方式,既节约资金,又能满足生产运行的需求;在保护功能完善上,深入细致,井然有序,保证了改造后凝结水系统运行的安全性和可靠性;控制策略优化上,除氧器水位调节方式灵活多样,自动调节能力强,改善了凝结水系统运行的稳定性,充分发挥了高压变频调节的优势。经过一段时间的运行,其节能降耗效果显著,降低凝泵耗电量 30% 以上,达到了预期的改造目的,值得其他火电厂在高压变频改造时参考和借鉴。

参考文献

- [1] 朱北恒主编. 火电厂热工自动化系统试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

作者简介:

郭伯春(1976),男,四川南充人,四川广安发电有限责任公司热工专业工程师,从事电厂热工仪表及自动装置技术管理与检修方面工作。

(收稿日期: 2011-01-06)

600 MW 汽轮发电机铁损试验采用两台变压器原边并联、副边串联的接线方式提供电源的方法进行试验非常成功,实测电流与计算电流基本一致,同时也解决了两台变压器副边串联后的绝缘问题。该方法实用可行,值得推广应用。

参考文献

- [1] 四川电力试验研究院. 高压电气设备试验方法(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

作者简介:

江建明(1966),1987年毕业于成都科技大学(现为四川大学)电力系统及自动化专业,长期从事电机试验研究工作,高级工程师,1987-2008年在四川电力试验研究院工作。由于电力体制改革,四川电力试验研究院的电机专业划归四川省电力工业调整试验所,本人也随即调入,继续从事电机工作。

(收稿日期: 2011-03-01)

浅析生物质工程中的调试问题

李兰芳, 赵伟刚

(四川电力建设三公司成都办事处, 四川 成都 610061)

摘要:随着科技的发展, 提倡环保成为当今世界的主旋律, 因此这种发展资源分布广、环境影响小、可永续利用的生物质等可再生能源, 成为中国能源发展的重要战略, 生物质发电工程便随之陆续建设起来。调试是生物质发电工程投产前不可缺少的环节, 为了方便以后的生物质发电工程能更高速投产, 现将以南宫生物质工程为例, 与各位同行分享该项目在调试阶段的一些原理及故障处理方式。

关键词: 生物质发电; 调试; 分析

Abstract: With the development of science and technology, the environmental protection has become the main theme in the world of nowadays, so the renewable energy sources such as biomass with wide distribution of development resources, small impact on the environment and the sustainable use will be the important strategy of energy development in China, and the power generation projects with biomass will be gradually built up. The commissioning is the essential part of biomass power generation projects before being put into production. In order to facilitate that the future biomass power generation projects can be put into production more rapidly, taking the biomass engineering in Nangong city for example, the principles and the fault treatment methods during the commissioning are proposed for the reference.

Key words: biomass power generation; commissioning; analysis

中图分类号: TM619 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0092-03

0 概述

国能南宫生物质发电工程的锅炉采用丹麦 BWE 技术, 燃烧玉米、稻草秸秆, 额定蒸发量为 130 t/h, 汽轮机采用 N30-8.83/535 型。高压单缸、凝汽式汽轮机, 通过刚性联轴器直接带动发电机。DCS 系统采用山东鲁能控制工程公司的 LN2000 分散控制。

1 蒸汽吹灰

蒸汽吹灰器是通过一定压力和一定温度的蒸汽, 从吹灰器喷口高速喷出, 对积灰受热面进行吹扫, 以达到清除管壁积灰, 提高锅炉热效率的节能设备。

国能南宫生物发电工程锅炉设置有蒸汽吹灰系统, 炉膛采用墙式吹灰器 (11 台), 第三回程采用可伸缩枪式吹灰器 (5 台), 省煤器和烟气冷却器所在回程采用耙式吹灰器 (8 台)。吹灰器的工作蒸汽是由主蒸汽减温减压后获得。

现以 HCB60AT001 长伸缩吹灰器为例, 解释蒸汽吹灰分系统调试时碰到的问题及解决方法。吹灰

器正常运行流程是: 吹灰器启动后, 脱离退到位限位开关; 继续前进, 至到触动进到位限位开关; 再自动后退, 至到触动退到位限位开关。

吹灰器远方启动需要满足的启动条件有: 无 MFT 信号; 吹灰汽源电动阀开到位; 蒸汽母管压力不低于 1 MPa; 燃烧器的运行反馈正常且任一给料机运行。

在吹灰器单体运行正常后进入分系统调试, 此时不能投入吹灰用蒸汽, 需要关闭吹灰汽源电动阀前的手动门。

在运行过程中常常出现的故障及解决方法:

(1) 吹灰器远程启动后, 很多吹灰器出现前进到一半行程时自动退回。

正常吹灰器应为启动后吹扫到进到位, 然后自动后退到退到位。就地启动运行吹灰器时均能走到进到位, 然后退回。经检查发现逻辑设计了急退信号, 在吹灰器运行一半时间时, 发急退信号到吹灰器会使其后退。这是因为急退用时时间过短, 延长急退时间远程启动吹灰器便均能走到进到位。

经检查发现逻辑设计所有急退信号都汇集到一个总急退信号上。急退信号触发后, 所有吹灰器后退

到退到位。虽然蒸汽吹灰系统正常运行时,只有单台吹灰器运行,但急退信号为事故时紧急处理信号,不允许多次触发。故此删除所有吹灰器到急退的汇总,只保留画面上的手动急停信号。

(2)吹灰器远程启动时,经常会报出启动失败信号、超时信号和启动超时信号现象的处理方法:

启动失败信号是由启动指令发出后一定时间内启动完成信号未消失所触发。启动超时信号是由启动指令发出后一定时间内启动未失败且启动未完成时触发。因为两个信号都会使蒸汽吹灰程控中停,所以正常运行中不允许触发此信号。

根据现场实际状况延长吹灰器运行后脱离退到位限位开关用时,吹灰过程中便不会出现启动失败信号;延长了吹灰器运行总时间,吹灰过程中也便不会出现超时信号。

(3)吹灰器单体启停运行正常后,进入程控启动时,发现部分吹灰器不能正常启动的处理方法。

吹灰器不能正常启动主要原因之一可能是吹灰器未脱离退到位限位开关。遇到此问题时建议适当延长启动指令脉冲时间。

2 烟气除尘和疏灰

国能南宫生物发电工程锅炉除尘系统采用布袋除尘系统,包括旋转喷吹型脉冲袋式除尘器实现定时定压差喷吹和在线检修。

布袋除尘采用西门子 S7-300 来实现控制,同时与 LN2000 依靠 modbus 协议来实现数据通讯。

2.1 烟气除尘事故

当烟气除尘因布袋进口温度误动时,将会导致停炉。具体如下:除尘器解列后,除尘旁路一直未打开,过 5 s 后除尘器重新投入。在此期间炉膛负压极度增大或减小导致上料线着火,此时不得不手动停炉。

这种状况下,调用除尘历史曲线分析,如下:除尘曾发生因布袋进口温度误动(1 s 内从 100+ 跳变到 50 000+),导致除尘解列,1 s 内数据恢复。在此期间,除尘旁路始终未打开(当温度跳变时逻辑开旁路阀,布袋进口温度恢复后,逻辑关旁路阀);布袋进口温度恢复后,逻辑要求除尘器打开,但除尘延迟 5 s 之后才完全投入;这样导致了除尘解列 1 s 同时旁路阀关闭,等同于引风机被解列,导致炉膛瞬间正压,炉膛压力跳变 2 000+ kPa;除尘回复后炉膛压力缓缓降

下来,但正压导致上料线着火后连续错误关送风机,炉膛又负压过大;最后停炉。

因布袋进口温度误动,而除尘解列后恢复过慢,在加上锅炉操作员处理不及时均会导致停炉。现场解决方式为取消了除尘解列开除尘旁路阀,改为手动开启。

咨询 PLC 厂家知道 PLC 参加逻辑控制的模拟量信号没有防跳变的功能,而 DCS 实现模拟量的速率报警和坏点判断很容易。通讯来的模拟量可以通过 DCS 增加模拟量品质判断点(DI 点,包括速率报警和坏点判断),再将品质判断点加入逻辑控制中。

2.2 疏灰

当设计疏灰量小于实际疏灰量,会导致气源风机出力不足,为同时保证 2 套旋风分离器和 2 套布袋除尘器的疏灰量,可使用循环吹灰方式。即先吹扫 2 套旋风分离器灰斗的灰(约 8 min),再吹扫 1 号布袋除尘器灰斗的灰(约 10 min),最后再吹扫 2 号布袋除尘器灰斗的灰(约 10 min),依次循环吹扫。这样既保证了合理疏灰,又可避免因设计导致的处理不足问题。

为了更好地保证疏灰的正常,在投入灰斗电加热器的基础上可增加加入灰斗喷吹阀,以保证灰斗不结块。灰斗喷吹阀用气为仪用空气。每套旋风分离器有 1 个灰斗喷吹阀,旋风分离器疏灰投入时,进行喷吹;每套布袋除尘器有 4 个喷吹阀,布袋除尘器疏灰投入时,依次循环喷吹 5 s。

3 故障的防范措施

分系统调试会遇到各种各样的情况,在保证单体运行正常时,还必须读懂逻辑,懂得如何强制和修改不合理的程序,以保证系统的正常运转。一般可以通过以下方式避免问题的发生。

(1)必须要保证测点的接线紧固。所有测点屏蔽必须单方面接地,一般在 DCS 盘柜接地。

(2)模拟量信号有无源和有源之分。压力变送器属于有源设备,须提供 24 V DC 电压。电动调节门的模拟量反馈属于无源设备,不能加入 24 V DC 电压。

(3)DI 信号接入前,须防止串入强电,以防烧毁卡件。设备的运行、停止等反馈信号需设备带电状况下测线路对地电压,以防串入强电。

(4) 单体调试后进入分系统调试前, 须再次对点。在信号显示正常情况下, 可以通过拆线来判读测点对应情况。

(5) 模拟量信号量程就地和 DCS 的必须对应。

(6) 运行设备前, 检查控制逻辑, 保证逻辑的可靠性和正确性。

4 结 论

以上是以南宫生物质发电工程为例简单介绍了在调试过程中的一些原理与处理方法。希望能找出其中的优缺点, 以便吸取教训, 继续发扬优点, 更好地开展以后的调试与试运工作。

参考文献

[1] 吴华斌, 李炳军, 等. 火电工程调试技术手册——热工卷

[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 张明, 王元春, 等. 600 MW 火电机组培训教材——仪控分册 [Z]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[3] 张建宏, 杨雄. 火电厂分散控制系统创新设计与安装调试及检修运行维护实用手册 [M]. 香港: 中国科技文化出版社, 2006.

[4] DL 5009. 1—92 电力建设安全工作规程 (火力发电厂部分) [s].

[5] 陈冀平, 贾元平, 等. 火力发电建设工程启动试运及验收规程 [z].

[6] 冯忠贵, 叶江祺, 等. 火电工程调整试运质量检验及评定标准 [z].

(收稿日期: 2011—01—11)

(上接第 74 页)

能使电缆头承受过大的外部扭力。因此, 电缆从电缆沟穿管时, 一定要在设备连接处的正下方, 垂直并且牢固固定, 不能让电缆下部斜扭。对三芯电缆, 特别是大截面铜芯电缆, 必须保持足够的分相长度, 也就是分支手套尽量靠下安装, 同时, 三相线芯长度一定测量准确, 两个边相不能出现长短腿。对同一个间隔连接双电缆的情况尤其应该注意。否则, 斜扭着的电缆会产生扭转力, 长时间的机械应力可能导致电缆头损坏。

(5) 电缆头与导体连接质量值得注意。因为, 对电缆头要保证电缆与导体连接质量, 首先要结构设计合理, 简单、可靠。负荷电流的传导是靠电缆端子与导体端面的紧密接触完成的, 而不是靠导体上的螺栓。

在选择螺栓材质时, 以不锈钢为好, 铜质螺栓硬度不够, 安装中容易滑扣, 影响连接件的紧固。其次, 在压接接线端子及装配时, 必须保证接线端子平面与出线导体铜端面平行贴合。否则, 紧固螺母时, 首先需克服接线端子平面从倾斜到平行的扭转力, 这就是有时感觉螺母拧得已很紧或已达到规定力矩, 但接线端子平面与导体铜端面的压紧力仍未达到规定值的原因。

最后, 拧紧螺母时, 一定要使用力矩扳手, 按照工艺文件规定的力矩值上好螺母。

(6) 采用新技术新材料, 尽量使用冷缩电缆终端

头, 冷缩电缆终端绝缘性能优异, 耐老化、防腐蚀、密封性能好、抗电痕性能好, 硅橡胶弹性好, 与电缆界面结合紧密, 应力控制与绝缘复合为一体, 有效解决了电缆屏蔽断面处应力集中的问题, 保证电缆的安全运行。

(7) 学习先进的电缆头制作工艺, 加强电缆头制作培训, 严格电缆终端头制作工艺, 保证电缆终端头绝缘的电气性能, 促使电缆运行更加可靠、稳定。

6 结 语

电力电缆终端头的故障, 大多与电缆的终端头的制作和安装有关系。只有不断地加强学习和培训, 不断地采用新工艺、新材料, 严格按照说明书和有关规程、规定去安装、制作电缆头, 才可能保证电力系统安全、稳定、可靠地运行。

参考文献

[1] 郑肇骥, 王琨明. 高压电缆线路 [M]. 北京: 水利电力出版社, 2003.

[2] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[3] 何旭东, 交联聚乙烯电缆绝缘的劣化机理及在线监测方法的研究 [D]. 重庆大学, 1996.

(收稿日期: 2011—01—17)