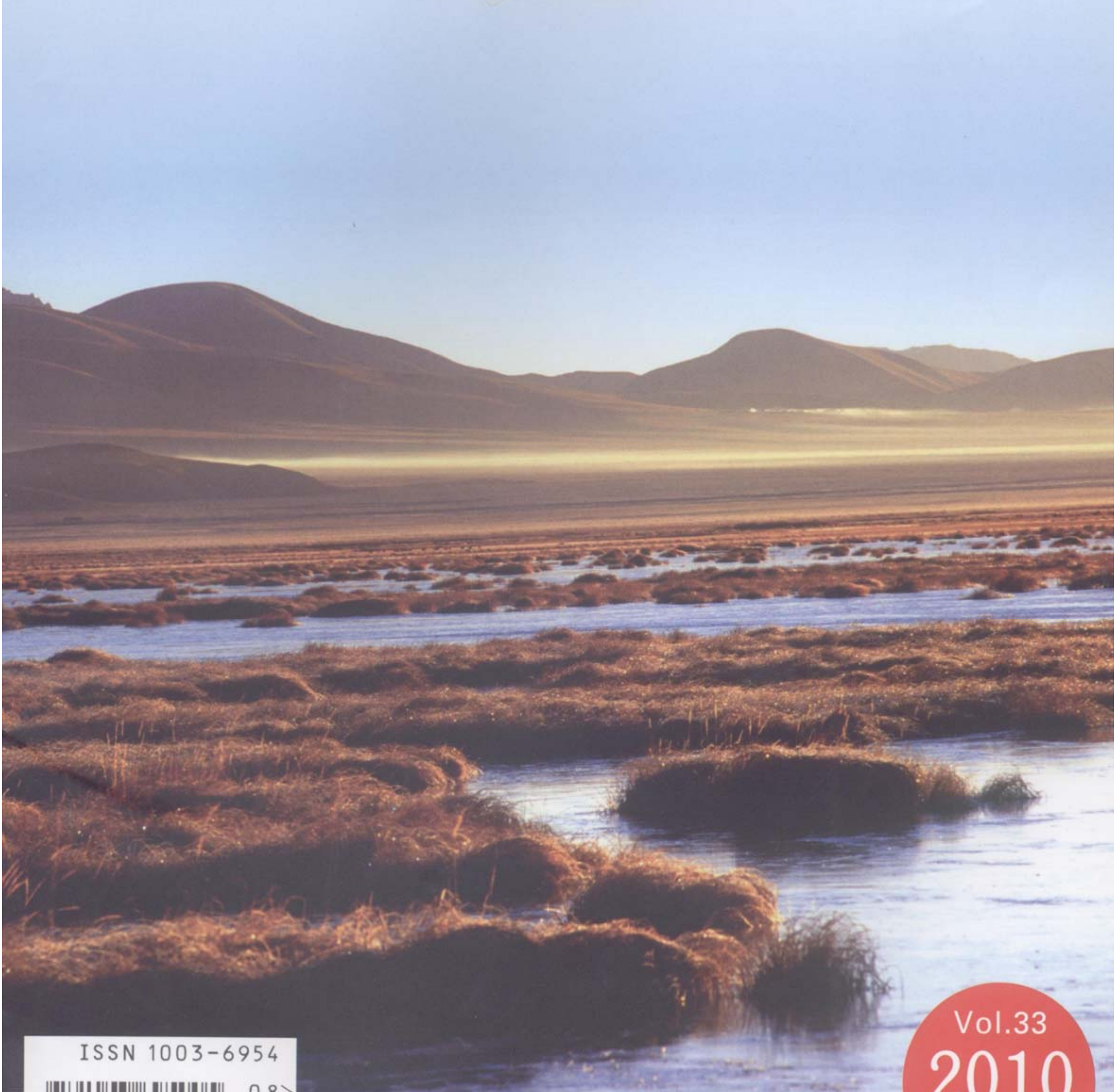
四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

Vol.33
2010
No.4

四川省电机工程学会　四川电力试验研究院

四 川 电 力 技 术
SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊（光盘版）》、《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ—CD规范》执行优秀奖获奖期刊、北极星、中华期刊网入网期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊、中国农村电气化信息网、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊（遴选）数据库》入选期刊

第 4期

2010年 08月 20日

《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 邬小端
李兴源 李建明 严 平
胡 灿 徐 波 唐茂林
韩晓言 谢 舫 甄 威
秘 书 李世平
吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号：

ISSN1003－6954
CN51－1315/TM

2010年第 33卷第 4期（总 208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：cdscdljs@163.com
印 刷：四川明源印务有限责任公司
封面设计：成都宏泰广告有限公司
国内定价：每册 6.00元
[期刊基本参数] CN51－1315/TM＊1978＊b＊A4＊94＊zh＊P＊￥6.00＊4300＊27＊2010－08

目 次

·电网技术·
电力系统低频减载优化整定研究 …… 吴 丹 王晓茹 陈义宣（1）
基于序贯仿真和概率密度分析的四川电网可靠性评估 …… 王 松 杨 树（5）
基于分布式发电的微网系统建模研究 …… 陈亚宁（9）
高压直流输电系统的非线性附加控制器设计 …… 温芯芳 陈 可（13）
一个县级电网 AVC系统的应用和技术特点
…… 何 东 吴端华 洪行旅 等（17）
IEC 60870－5－101/104保护扩展及应用 …… 李明生 唐建中（19）
基于 IEC 61850的数字化变电站技术综述 …… 陈 愚（21）
浅析 110 kV同塔双回输电线路保护装置的配置 …… 陈 平（24）
大容量 10 kV线路保护整定计算及配合 …… 冯成铭 陈 曦（25）
·高电压技术·
变压器分接开关烧蚀对绕组变形测试的影响及仿真研究
…… 范海炉 甘德刚（29）
高压交流输电线路电场生态效应研究…… 张格红 韩耀霞 于 进 等（33）
基于欠补偿原理的电力电缆串联谐振耐压分析
…… 杨新春 李 化 杨 帆（36）
基于谐波小波变换的电力系统谐波检测研究 …… 杨润田 党国营 胡智慧（39）
电缆沟敷设方式下电缆温度场计算模型 …… 周华东（43）
内悬浮抱杆的优化设计…… 王光祥 吴开贤 景文川 等（46）
一种暂态分量故障测距方案 …… 邓 华（48）
·电力市场·
基于优化算法的三相不平衡补偿控制研究 …… 宋芳超 吴章辉 张 竞（53）
集中抄表系统在线损管理中的应用 …… 余柏林（57）
成都市电力市场需求侧管理分析 …… 李 杰 李小莉 刘治新（59）
电网实测负荷建模在德阳五里堆的应用…… 杨 坤 李辛奇 唐永红 等（61）
·技术改进·
双馈异步发电机滞环矢量控制策略的研究
…… 郑 岗 熊列彬 刑桂凤 等（67）
浅析调速器调节参数设定对系统稳定性的影响 …… 赵喜成 燕 京（70）
220 kV母线保护改造技术原则探讨 …… 左可飞 崔明德 李中华 等（74）
兴安直流阀冷系统主过滤器堵塞原因分析及改进建议 …… 田兴旺（80）
水轮发电机定子单相接地的继电保护技术分析
…… 宋全林 桂 林 党晓强（83）
法国 330 MW汽轮机胀差异常的原因分析及应对措施 …… 张德泽（88）
大型锅炉启动投油工况投电场研究 …… 黄 杉（91）
·简讯·
简阳新悦电力器材有限公司简介 …… （16）
封面照片由曾逸农提供

本期责任编辑 程文婷 编辑 吴小冬 刘坤才 刘学昌

CONTENTS

Research on Under－frequency Load Shedding Scheme Optimization for Power System ..... Wu Dan Wang Xiaoru Chen Yixuan(1)
Reliability Evaluation of Sichuan Power System Using Sequential Simulation and Probability Density Analysis..... Wang Song Yang Shu(5)
Research on Modeling of Micro Grid System Based on Distributed Generation ..... Chen Yaning(9)
Design of Nonlinear Additional Controller for HVDC Power System ..... Wen Bifang Chen Ke(13)
Application of AVC System to County Power Grid and Its Technical Characteristics ..... He Dong Wu Duanhua Hong Xinglv et al(17)
Protection Expansion and Application of IEC 60870－5－101/104 Protocol ..... Li Mingsheng Tang Jianzhong(19)
Overview of Digital Substation Technology Based on IEC 61850 ..... Chen Yu(21)
Analysis of Relay Protection Configuration for 110 kV Double－circuit Transmission Lines on the Same Tower..... Chen Ping(24)
Setting Calculation of 10 kV High－capavity Line Protection ..... Feng Chengning Chen Xi(25)
Influence of Tap－changer Ablation on Transformer Winding Distortion Test and Its Simulation Analysis..... Fan Hailu Gan Degang(29)
Research on Ecological Effect of Electric Field of HV AC Transmission Line ..... Zhang Gehong Han Yaoxia Yu Jin et al(33)
Voltage Endurance Analysis of Series Resonance of Power Cable Based on Under－compensation Theory ..... Yang Xinchun Li Hua Yang Fan(36)
Research on Application of Harmonic Wavelet Transform to Harmonic Analysis in Power System ..... Yang Runtian Dang Guoying Hu Zhihui(39)
Calculation Model of Cable Temperature Field under Cable Trench Laying ..... Zhou Huadong(43)
Optimization Design of Internal－suspension Gin Pole ..... Wang Guangxiang Wu Kaixian Jing Wenchuan et al(46)
A Fault Location Method Based on Fault Transient Component..... Deng Hua(48)
Research for Three－Phase Unbalanced Compensation Control Based on Optimization Algorithm ..... Song Fangchao Wu Zhanghui Zhang Jing(53)
Application of Centralized Meter Reading System to Line Loss Management..... Yu Bailin(57)
Analysis on Demand Side Management in Electricity Market of Chengdu ..... Li Jie Li Xiaoli Liu Zhixin(59)
Application of Measured Load Modeling in Power Grid to Wulidui Substation of Deyang ..... Yang Kun Li Xinqi Tang Yonghong et al(61)
Research on Hysteretic Vector Control Strategy of Double－fed Asynchronous Generator..... Zheng Gang Xiong Liebin Xing Guifeng et al(67)
Superficial Discussion on Influence of Adjustable Parameter Setting of Speed Governor on System Stability..... Zhao Xicheng Yan Jing(70)
Discussion on Reformation Fechnique Principle of 220 kV Bus Protection ..... Zuo Kefei Cui Mingde Li Zhonghua et al(74)
Cause Analysis on Filter Blocking in Valve Cooling System of Xing－An HVDC Project and Its Improvement Suggestion ..... Tian Xingwang(80)
Relay Protection Technique Analysis on Single－Phase Earthing for Hydraulic Generator Stator ..... Song Quanlin Gui Lin Dang Xiaoqiang(83)
Cause Analysis on Abnormal Differential Expansion of 330 MW Steam Turbine Imported from France and Its Countermeasures ..... Zhang Deze(88)
Research on Electric Field Being Put into Service under Oil－fired Condition Started by Large－scale Boiler..... Huang Shan(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY
2010 Vol.33 No.4
(Ser.No.208)
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

电力系统低频减载优化整定研究

吴 丹,王晓茹,陈义宣
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:现有单机单负荷整定、实际系统校核的整定模式中,如果出现校核时不满足技术规定要求,就需要手工调整整定值。手工调整难以得到满足要求的整定值,导致在某些系统功率缺额时低频减载过切或欠切。基于将技术规定作为约束的低频减载优化模型,提出了一种新的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法,使得整定的方案在系统校核功率缺额集下满足技术规定的要求。利用 PSS/E仿真软件,进行了对某实际电网的低频减载方案整定,证明了该方法的正确有效,避免了过切或欠切,有效防止了频率崩溃,同时还减小了系统切负荷总量。

关键词:差分算法;低频减载;电力系统仿真软件

Abstract: The actual single—machine model scheme often leads to the final frequency suspension and overshoot in some cases when verifying in actual power system, so it is difficult to meet the technical requirements. A new scheme based on differential evolution considering multi—machine dynamic frequency under a constraint optimization model is proposed by the purpose of making all power deficiency meet technical requirements. Under—frequency load shedding scheme under an actual power system is carried out by the use of PSS/E simulation software, which shows that the method is correct and effective to avoid the frequency overshoot and suspension, effectively preventing the frequency from collapsing, and minimizing the total load shedding.

Key words: differential evolution; under—frequency load shedding; power system simulation software
中图分类号:TM712 **文献标志码**:A **文章编号**:1003—6954(2010)04—0001—04

0 引 言

低频减载装置是电力系统稳定运行的最后一道防线,它力图通过切负荷阻止系统频率的继续下降,从而避免系统出现“频率崩溃”。低频减载装置整定的正确性是影响控制有效性的重要因素。

当前低频减载整定研究主要是依照中国现行电力行业标准 DL 428—91《电力系统自动低频减负荷技术规定》推荐的传统单机带集中负荷模型[1,2]。它将电力系统中多机频率动态行为平均等效为单机系统的动态行为,依据系统平均频率进行低频减载整定。因为没有计及实际电网中功率的扰动导致频率变化随时间和空间分布[3]和负荷点电压的变化对频率动态过程的影响[4],出现了在多机系统校核时不满足技术规定要求的情况,导致某些功率缺额时低频减载欠切或过切。有的整定方法[5,6]是利用暂态时域仿真软件校核已有的低频减载方案,根据经验知识不断人工调整整定值直到满足技术规定要求,工作繁琐。因此设计出计及实际系统动态频率特性,不用人工调整整定值的低频减载整定方法显得尤为重要。

由于低频减载优化整定是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题,该问题没有具体的解析式,因此无法利用解析的优化方法求得低频减载整定值。在借助电力系统仿真软件 PSS/E考虑了频率动态过程具有时空分布的这一特点,利用差分算法搜索低频减载方案,不再需要手工调整整定值,以技术规定对动态频率和稳态频率的要求作为约束,提出了一种新的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法。通过某实际系统低频减载整定,验证了该方法的有效性。

1 低频减载优化模型

在低频减载方案整定过程中,对各种典型运行方式下不同功率缺额值进行仿真,根据电力系统自动低频减负荷技术规定[1],在满足动态频率和稳态频率情况下,对功率缺额集中的所有功率缺额值的切负荷总量要尽量小,提高系统的经济性。数学模型描述如

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90610026)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下。

1.1 目标函数

$$f(x)=\min_{x}\left\{\sum_{i=1}^{N}\left[\sum_{j=1}^{N_{ij}}\left[\left|\triangle P_{ij}^{sh}(x)-\triangle P_{ij}^{shed*}(x)\right|\right]\right]\right\} \quad (1)$$

$$x=[k,\ f_{th(1)},\ t_{th(1)},\triangle P_1,\cdots,\ f_{th(i)},\ t_{th(i)},\ \triangle P_i,\cdots,\ f_{th(k)},\ t_{th(k)},\triangle P_k] \quad (2)$$

式中，x为低频减载整定参数；k为低频减载切负荷总轮次；$f_{th(i)}$为低频减载第 i轮启动频率；$t_{th(i)}$为低频减载第 i轮动作延时；$\triangle P_i$为低频减载第 i轮切负荷量。N为典型运行方式的个数，第 i个方式下考虑 N_{ij}个功率缺额；$\triangle P_{ij}^{sh}$为低频减载的切负荷比列；$\triangle P_{ij}^{shed*}(x)$为功率缺额对应的集中切负荷控制的最小切负荷比例因子。

1.2 典型运行方式及功率缺额集的选择

为简化装置，低频减载装置通常只采集少量就地信息，故其减载量在相当长的时间 (例如 1年)内不变，装置的减载量一旦设置好，就不再随运行方式和故障而改变。因此，优化低频减载参数时应该考虑各种可能出现的运行方式和可能发生的功率缺额故障。

故障集的设置应根据电力系统安全稳定导则[7]和电力系统自动低频减负荷技术规定[1]的要求，并结合实际系统的具体情况，不同运行方式的故障集可能不同。

1.3 $\triangle P_{ij}^{shed*}$ 最优切负荷因子的求取

假设集中切负荷$\triangle P^{shed*}$ (P^{shed*} =切负荷总量 / 总负荷量，是个比例因子)后，稳态频率恰好能恢复到所允许的最小值 f_{ss_min}，且动态频率满足要求，这是保证系统频率稳定的最小切负荷量。如果低频减载装置切除的负荷恰好为 P^{shed*}，这是最理想的效果，与该值偏离越大，造成欠切或过切的可能性就越大。因此低频减载的切负荷比例应该尽量接近与它对应的集中切负荷控制的最小切负荷比例。

计算 P^{shed*}的具体步骤如下。

1) 忽略系统网损及负荷压变效应，根据发电机组和负荷的静态频率特性，预估待切负荷比例$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$ (切除$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$负荷后，稳态频率恰好为 f_{ss_min})。

若系统频率下降至 f_{ss_min}，发电机的总出力 P_G如式 (3)所示。

$$P_G=\sum_{i=1}^{N}\left[P_{G0,i}+\left(\frac{1}{R_i}\right)\left(\frac{P_{Gmax,i}}{f_e}\right)(f_e-f_{ss\_min})\right] \quad (3)$$

其中，N为系统运行的发电机总数；$P_{G0,i}$为第 i台发电机的初始有功出力；R_i为第 i台发电机的调差系数；f_e为系统的额定频率；$P_{Gmax,i}$为第 i台发电机最大有功出力。如果 $P_{G,i}>P_{Gmax,i}$，即发电机出力越限，应修改 $P_{G,i}$，即 $P_{G,i}=P_{Gmax,i}$。

计及负荷的频率调节效应，系统频率下降至 f_{ss_min}，总负荷量 P_L如下。

$$P_L=P_{L0}\left[1-K_D\left(f_e-f_{ss\_min}\right)/f_e\right] \quad (4)$$

其中，P_{L0}为初始总负荷量；K_D为负荷的频率调节效应系数。

计算出 P_G、P_L后，$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$可通过式 (5)求得。

$$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}P_{L0}=P_G-P_L \quad (5)$$

2) 利用暂态稳定仿真程序，计算切除$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$负荷后系统的动态频率 (最大、最小值)和稳态频率，如果动态频率不满足要求或稳态频率不等于 f_{ss_min}，则以$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$为中心点，利用二分法进一步修正$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$，直到稳态频率为 f_{ss_min}且动态频率满足要求。

3) 此时求出$\triangle \bar{P}_{shed}^{*}$的即为$\triangle P^{shed*}$。

1.4 约束条件

在整定低频减载方案时，式 (1)的不等式约束包括切负荷总量、切负荷时间、动态及稳态频率的上下限约束等，具体如下所示。

1) 动作轮次 k一般需要满足一定范围，即

$$k_{min}\leqslant k\leqslant k_{max} \quad (6)$$

2) 第 j轮和 j+1低频减载动作频率阀值之间需有一定间隔，即

$$\left|f_{th(j)}-f_{th(j+1)}\right|\geqslant\sigma_w \quad (7)$$

3) 第 j轮低频减载动作的切负荷量$\triangle P_j$不宜过小或者过大，它需要满足一定的范围，即

$$\triangle P_{min}\leqslant\triangle P_j\leqslant\triangle P_{max} \quad (8)$$

4) 第 j轮低频减载动作的时延 $t_{th(j)}$不宜过长或者过短，即

$$t_{th\_min}\leqslant t_{th(j)}\leqslant t_{th\_max} \quad (9)$$

5) 切负荷总量一般需要在一定范围内，即

$$\sum_{j=1}^{k}\triangle P_j\leqslant\triangle P_{s\_max} \quad (10)$$

6) 当第 i个方式第 j个故障发生时，低频减载动作后的稳态频率 f_{ij}^{ss}需满足终值频率的要求，即

$$f_{ss\_min}\leqslant f_{ij}^{ss}\leqslant f_{ss\_max} \quad (11)$$

第 i个方式第 j个故障发生时，根据规定，低频减载装置动作后，运行系统稳态频率 f_{ij}^{ss}应恢复到不低于 49.5 Hz水平。这里研究的某实际电网属于中、小系统。根据系统正常运行所允许的频率偏差[8]，中、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小系统允许频率偏差值为 ±0.5 Hz。因此，最高稳定频率可设置为 50.5 Hz。

7) 低频减载动作后系统动态频率 f_{ij}^{ss}需在一定范围内，避免发电机的高频或者低频保护动作，即

$$f_{ts_min} \leqslant f_{ij}^{ss} \leqslant f_{ts_max} \quad (12)$$

低频减载动作后系统动态频率 f_{ij}^{ts}需在一定范围内，避免发电机的高频或者低频保护动作。根据规定，频率下降的最低值必须大于低频保护的整定值，并留有不小于 0.3～0.5的裕度。按照要求，所研究的频率最低值取 47.7 Hz。因负荷过切引起恢复时的系统频率过调，其最大值不能超过 51 Hz。

2 低频减载方案优化算法

2.1 PSS/E的 IPLAN语言

电力系统仿真软件 PSS/E中提供了专门用于增强 PTI应用程序功能的编程语言 IPLAN[9]，其为用户提供了一个对 PSS/E进行二次开发的平台。通过 IPLAN语言编制程序，实现对低频减载方案整定，通过 PSS/E强大的时域仿真功能对低频减载方案实施后系统频率的动态过程和稳态频率进行仿真分析，并引入差分算法 (ED)对问题的求解过程进行优化，快速、方便地求得优化解。

2.2 差分算法

差分演化算法是一种快速的演化算法，它采用实数编码，通过变异、交叉和选择获得个体间的差分信息来指导新产生个体的搜索。与其他演化算法相比，它具有结构简单、容易使用、快速和鲁棒性等特点。由于其优良的性能及易于实现等特点，该算法在电力系统中得到了日益广泛的应用[10, 11]。

不失一般性，考虑非线性最小化问题

$$\text{Minimize} \quad f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$
$$l_j \leqslant x_j \leqslant u_j, \; j = 1, 2, \cdots n \quad (13)$$

标准形式的差分算法求解此优化问题的具体步骤如下。

2.2.1 *群体初始化*

设种群规模为 NP，种群中第 G代个体 i表示为 $X_{i,G}$ ($i = 1, 2\cdots n$)，即 $X_{i,G+1} = (x_{1,i,G+1}, x_{2,i,G+1}\cdots x_{n,i,G+1})$，差分算法利用 NP个维数为 n的实数值参数向量作为每一代的种群。通常初始种群 $X_{i,0}$是从决策变量可行域中随机产生，且所有随机初始化种群个体符合均匀概率分布，即

$$X = l + \text{rand}(0,1)\cdot(u - l)$$
$$j = 1, 2\cdots n;\; i = 1, 2, \cdots NP \quad (14)$$

式中，rand(0, 1)为均匀分布在 (0, 1)之间的随机数，用 PSS/E的 RND( )函数生成。

2.2.2 变异

对每个目标向量个体 $X_{i,G}$ ($i=1, 2, \cdots, n$)，从当前 G代中随机选择 3个互不相同的个体，按式 (15)进行变异操作，产生变异个体 $V_{i,G+1}$，即

$$V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F\cdot(X_{r_2,G} - X_{r_3,G})$$
$$r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq I \quad (15)$$

式中，随机选择序号 $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \cdots, NP\}$互不相同，且与目标向量个体序号 i也应不同。变异因子 $F \in [0, 1]$为一个常数，起着控制偏差变量的放大作用。

2.2.3 交叉

交叉操作能够增加种群的多样性。对变异个体 $V_{i,G+1}$和与之对应的目标向量个体 $X_{i,G}$按式 (16)进行交叉操作生成试验向量个体 $U_{i,G+1}$，即

$$U_{i,G+1} = (u_{1,i,G+1}, u_{2,i,G+1}, \cdots u_{n,i,G+1})$$
$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1}, & \text{if rand}(j) \leqslant CR \text{ or } j = \text{rand}(i) \\ x_{j,i,G}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中，rand(j)是 [0, 1]之间的均匀分布；CR是 [0, 1]之间的一个常数，称为交叉概率；rand(i)是 {1, 2, …, n}之间的一个随机整数。

2.2.4 选择

为决定试验向量个体 $U_{i,G+1}$是否会成为下一代种群中的新个体，根据式 (17)将试验向量个体与当前种群中相应的目标向量个体 $X_{i,G}$进行比较，具有较小目标函数值的向量个体将被保留至下一代种群中而成为新个体。

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G+1}, & \text{if } f(U_{i,G+1}) \leqslant f(U_{i,G}) \\ X_{i,G}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

2.3 不等式约束条件处理——罚函数

采用罚函数对式 (11)和式 (12)的不等式约束条件进行处理，即在目标函数中加入惩罚项以反映所得到的解是否在约束范围内，从而使整个问题变为无约束问题。

采用的罚函数形式如下。

$$P_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \in X \\ C_1\cdot N_1 + C_2\cdot N_2 + C_3\cdot N_3 + C_4\cdot N_4 & x \notin X \end{cases} \quad (18)$$

式中，x为优化问题的一个解，式 (2)是 x的详细描述。X为问题的可行解域；C_1、C_2、C_3和 C_4为很大的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正数；N_1 为稳态频率小于最低稳态频率的累计数；N_2 为稳态频率大于最大稳态频率的累计数；N_3 和 N_4 是动态频率大于最大值和小于最小值的累计数。N_1、N_2、N_3 和 N_4 都在仿真过程中不断更新。稳态频率小于最低值的功率缺额故障数越多，N_1 则越大。N_2 同理。N_3 和 N_4 则相同。

采用上述罚函数不仅能反映所得的解是否可行，还能对解的不可行程度进行估计，即解 x不满足的约束条件数目越多，即 N_1、N_2、N_3 和 N_4 的值越大，其不可行度越高，从而惩罚的程度越强。

将罚函数并至目标函数，可得到适应度函数的表达式如下。

$$f_{fit}(x)=\begin{cases} f(x) & x\in X \\ f(x)+C_1\cdot N_1+C_2\cdot N_2+C_3\cdot N_3+C_4\cdot N_4 & x\notin X \end{cases} \quad (19)$$

2.3 低频减载优化整定差分算法

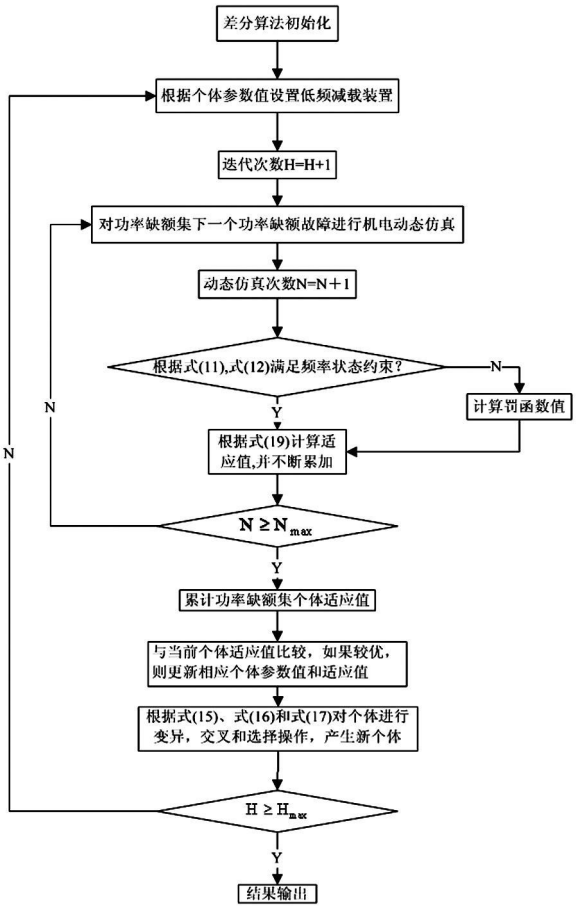


图 1 低频减载方案优化整定差分算法流程

综上所述，使用差分算法先对低频减载方案进行初始化，并对低频减载装置设置相应参数，在预设的缺额故障下进行校验，如果有故障不能满足频率稳定要求，则使用惩罚函数修正目标函数，如果所有故障的频率均满足要求，则校验低频减载方案性能，如果不是最优，则进行下一方案校验，直到满足仿真结束条件。实现低频减载优化整定粒子群算法的计算流程如图 1所示。

3 某实际电网的低频减载优化整定

该电网的主网是 220 kV环网，其负荷量随季节变化而变化，丰大、枯大、丰小、枯小四种典型方式下的发电功率差异巨大。如丰大方式下共有 18台发电机、124个节点、77条非变压支路、104条变压器支路。有功负荷为 2 037.2 MW、无功负荷 513.7 Mvar；发电机有功出力为 2 077.8 MW。在低频减载方案的整定过程中，选取了 26个故障，包括四种典型方式下的最大功率缺额。

在 PSS/E扩展动态仿真过程中，发电机采用 6阶模型，没有考虑调速系统，负荷中没有考虑电动机模型。仿真时间取 30 s积分步长为 0.01 s。

3.1 低频减载目前整定方案

该实际电网目前低频减载方案为快速动作基本轮 7轮，分别为 49.1 Hz、48.9 Hz、48.7 Hz、48.5 Hz、48.3 Hz、48.1 Hz、47.9 Hz时延 0.2 s切负荷比例分别为 5%、7%、7%、7%、7%、7%、10%。特殊轮 1轮，整定值为 49.0 Hz时延 15 s切荷量为 3%。

通过 26个功率缺额值仿真结果表明，目前方案能适应大部分故障情况。但某些故障仍存在不同程度的欠切或过切，频率低于 49.5 Hz的故障有 4个，频率高于 50.5 Hz的故障有 5个，有两个功率缺额值稳态频率甚至达到 51.5 Hz以上，将导致系统频率崩溃。因此动态频率及稳态频率不满足技术规定要求。

3.2 低频减载优化整定方案

优化时，根据低频减载整定原则对式(2)中的低频减载整定参数进行优化。优化整定方案为：基本轮 7轮，分别为 49.0 Hz、48.8 Hz、48.6 Hz、48.4 Hz、48.2 Hz、48.0 Hz、47.8 Hz时延 0.25 s切负荷比例分别为 4%、6%、6%、5.6%、5.4%、6%、6.2%。特殊轮第 1轮，整定值为 49.0 Hz时延 15 s切荷量为 3.9%。特殊轮第 2轮，整定值为 49.5 Hz时延 20 s切负荷量为 2.45%。

实施优化的低频减载方案后，之前将导致频率崩溃的两个功率缺额情况的频率满足技术规定要求，避免了系统频率崩溃。所有功率缺额值的稳态频率都

(下转第 42页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[3] 何益宏,卓放,李红雨,等. Kaiser窗在谐波电流检测中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(1): 9—12.
[4] 薛 惠,杨仁刚. 基于 FFT的高精度谐波检测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106—110.
[5] 薛 惠,杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 49—53.
[6] 王志群,朱守真. 基于 Pisarenko谐波分解的间谐波估算方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72—77.
[7] 兰华,孙量. 基于互高阶谱 Pisarenko方法的间谐波计算 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 24—29.
[8] 丁屹峰,程浩忠等. 基于 Prony算法的谐波和间谐波频谱估计 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94—97.
[9] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis[M]. Proc R. Soc Lond A, 1993(443): 203—205.
[10] Newland D E. Wavelet Analysis of Vibration Part 1: Theory [J]. Trans ASME J Vibration & Acoustic 1994 (116): 409—416.
[11] Pham V L, Wong K P. Antidistortion Method for Wavelet Transform Filter Banks and Nonstationary Power System Waveform Harmonic Analysis [J]. IEE Proceedings On Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 177—182.
[12] 丁屹峰,程浩忠,吕干云,等. 基于 Prony方法的谐波和间谐波频谱估计 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 94—97.

作者简介:

杨润田 (1963—),男,工程师,长期从事电力系统调度运行工作。

(**收稿日期**: 2010—03—19)

(上接第 4页)

稳定在 49.5～50.5 Hz之间,满足系统对频率约束的要求,避免了欠切或过切。切负荷总量也比目前方案少。前面优化方案和目前方案的比较如下表 1所示。

表 1 所提优化方案与目前方案比较

低频减载方案	功率缺额值 (26个)			切负荷总量/MW
	稳态频率在 49.5～50.5 Hz	稳态频率在 49.0～49.5 Hz	稳态频率在 50.5 Hz以上	
目前方案	17	4	5	8 630.14
优化方案	26	0	0	8 182.40

4 结 论

1)借助于电力系统仿真软件实施低频减载方案的整定具有重要的意义,它改变了现有的单机单负荷整定,多机系统校核的整定模式,为低频减载整定提供了一种新的有效方法。

2)提出的计及实际电网动态频率特性的低频减载优化整定差分算法,通过某实际电网的低频减载整定,证明了其有效性。优化后的方案使 26个功率缺额值稳态频率都在 49.5～50.5 Hz之间,满足技术规定对频率稳定要求,系统没有欠切或过切,同时还减小了系统切负荷总量。

参考文献

[1] DL 428—91, 电力系统自动化低频减负荷技术规定 [S].
[2] Anderson P M, Mirheydar M. A Low—order System Frequency Response Model [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(3): 720—729.
[3] 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率-频率动态过程的分析及低频减载装置整定 [D]. 北京:清华大学, 1991.
[4] 时伯年,黄志刚,韩英铎. 并联电容投切对孤立系统低频减载设计的影响 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 41—44.
[5] Western System Coordinating Council WSCC Coordinated Off—nominal Frequency Load Shedding and Restoration Plan, 1997.
[6] CTGRE Task Force 38—02—14. Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Frequency Disturbances Final Report 1999.
[7] DL 755—2001, 电力系统安全稳定导则 [S].
[8] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 浙江大学出版社, 1997.
[9] Power Technologies Inc IPLAN Program Manual PSS/E Brochure New York, NY, USA: Power Technologies Inc 2004.
[10] Storn R, Price K. Differential Evolution—a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11 (4): 341—359.
[11] 袁晓辉,苏安俊,聂浩,等. 差分进化算法在电力系统中的应用研究进展 [J]. 华东电力, 2009, 37 (2): 243—249.

作者简介:

吴 丹 (1985—),女,硕士,研究方向为电力系统安全稳定控制。

(**收稿日期**: 2010—05—12)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高压直流输电系统的非线性附加控制器设计

温莎芳[1],陈 可[2]
(1.中国建筑西南设计研究院,四川 成都 610081; 2.中铁二院电化院,四川 成都 610000)

摘 要:针对包含两条直流传输线路的交直流互联系统,采用状态反馈精确线性化方法与线性系统的变结构控制理论相结合的方法,同时设计了两条直流线路的非线性变结构附加控制器。最后对系统进行仿真,其仿真结果表明所设计控制器能够很好的抑制发电机功角振荡,有效地提高系统的暂态稳定性,达到良好的控制效果。

关键词:高压直流输电;附加控制;非线性;状态反馈精确线化;变结构控制

Abstract: An AC/DC system that includes two DC lines is considered. Based on feedback linearization in nonlinear system and the theory of variable structure control in linear system, two new nonlinear additional controllers are designed at the same time. And the simulation result shows that the controllers can damp the power angel oscillation of generator effectively and improve the stability of AC/DC system, which obtains a better control result.

Key words: HVDC transmission; additional control; nonlinear; feedback linearization; variable structure control
中图分类号:TM763 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)04-0013-04

0 引 言

与交流输电相比,直流输电线路造价低、年电能损失小、输送容量大、短路电流小、带有快速调制功能、它能比交流输电更好地满足西电东送、全国连网等要求。在高压直流输电系统中,基本控制方式下,直流联络线缓冲了一个受扰动的交流系统对另一个交流系统的影响;但它也阻碍了有利于维持交流系统稳定的同步功率的传输。实际上从交流系统看来,直流换流器是一个对频率不敏感的负荷,这可能产生系统摇摆的负阻尼。因此常常需要附加控制来拓展直流联络线的控制能力,以提高交流系统的动态性能。

针对上述问题,则应用非线性理论[1]和变结构控制理论[2],提出了对 HVDC系统中附加控制器的设计和研究。通过仿真表明所设计的控制器鲁棒性强,能有效地提高系统的暂态稳定性,很好地抑制发电机之间相对功角的振荡。

1 HVDC的系统综合数学模型

考察一个如图 1所示的多机系统[3]。

对所仿真的系统图 1中发电机采用二阶模型,假设输入的机械概率恒定,选取其中两台发电机(G1、G2)与另一台发电机 G3的功角和转速差来考察,多机系统的动态模型[3]为式(1)。

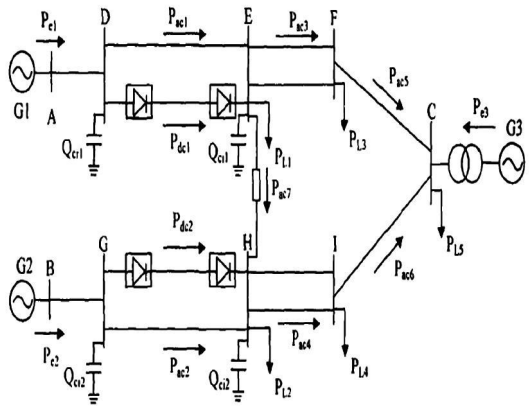


图 1 综合系统模型

$$\begin{cases}\dot{\delta}_{13}=\omega_{13}\\ \dot{\omega}_{13}=\left(\frac{\omega_0}{H_1}p_{m1}\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_1}{H_1}\omega_1\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_1}p_{e1}\frac{\omega_0}{H_3}p_{e3}\right)\\ \dot{\delta}_{23}=\omega_{23}\\ \dot{\omega}_{23}=\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{m2}\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_2}{H_2}\omega_2\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{e2}\frac{\omega_0}{H_3}p_{e3}\right)\\ \dot{p}_{dc1}=\frac{1}{T_{dc1}}(-p_{dc1}+p_{dcref1}+u_{dc1})\\ \dot{p}_{dc2}=\frac{1}{T_{dc2}}(-p_{dc2}+p_{dcref2}+u_{dc2})\end{cases}\quad(1)$$

其中,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{D_1}{H_1}=\frac{D_2}{H_2}=\frac{D_3}{H_3}=\frac{D}{H}=0.3$$

设

$$\begin{aligned}
p_{s1} &= p_{ac1}+p_{dc1}\\
p_{s2} &= p_{ac2}+p_{dc2}\\
p_{s3} &= p_{L5}-p_{ac5}-p_{ac6}\\
p_{ac5} &= p_{ac3}-p_{L3}\\
p_{ac6} &= p_{ac4}-p_{L4}\\
p_{ac3} &= p_{ac1}+p_{dc1}-p_{L1}-p_{ac7}\\
p_{ac4} &= p_{ac2}+p_{dc2}-p_{L2}+p_{ac7}\\
p_{L\Sigma} &= p_{L1}+p_{L2}+p_{L3}+p_{L4}+p_{L5}
\end{aligned}$$

根据设计目的,选取发电机相对运行角的增量作为控制系统的输出。

$$\begin{aligned}
y_1 &= h_1(x)=\delta_{13}-\delta_{130} \qquad (2)\\
y_2 &= h_2(x)=\delta_{23}-\delta_{230}
\end{aligned}$$

把方程(1)、(2)写成仿射非线性方程形式,则为

$$\begin{aligned}
\dot{X} &= f(X)+g_1(X)u_{dc1}+g_2(X)u_{dc2}\\
y_1 &= h_1(X) \qquad (3)\\
y_2 &= h_2(X)
\end{aligned}$$

$$X=[\delta_{13}\quad \omega_{13}\quad \delta_{23}\quad \omega_{23}\quad p_{dc1}\quad p_{dc2}]^T=[x_1\quad x_2\quad x_3\quad x_4\quad x_5\quad x_6]^T$$

其中,

$$f(X)=\begin{bmatrix}
\left(\frac{\omega_0}{H_1}P_{m1}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_1}{H_1}\omega_1-\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_1}p_{s1}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{s3}\right)\\
\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{m2}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_2}{H_2}\omega_2-\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{s2}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{s3}\right)\\
\frac{1}{T_{dc1}}(-p_{dc1}+p_{dcref1})\\
\frac{1}{T_{dc2}}(-p_{dc2}+p_{dcref2})
\end{bmatrix}$$

$$g_1(x)=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad \frac{1}{T_{d1}}\quad 0]^T$$

$$g_2(x)=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad \frac{1}{T_{d2}}]^T$$

2 坐标变换

根据仿射非线性系统相对阶的概念,容易验证系统方程的关系度 $r=[r_1\quad r_2]=[3\quad 3]$,于是可得 $r=r_1+r_2=6=n$(n为关系度总数),即关系度总数等于系统阶数,故精确线性化有解。再根据多输入、多输出精确线性化设计原理及映射坐标选择原则,将原非线性系统通过恰当的坐标变换,进行线性化。可得原系统线性化的坐标变换 $Z=\Phi(X)$为

$$\begin{cases}
z_1=\varphi_1(X)=h_1(X)=\delta_{13}-\delta_{130}\\
z_2=\varphi_2(X)=L_f h_1(X)=f_1=\omega_{13}\\
z_3=\varphi_3(X)=L_f^2 h_1(X)=f_2=\dot{\omega}_{13}=\left(\frac{\omega_0}{H_1}p_{m1}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_1}{H_1}\omega_1-\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_1}p_{s1}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{s3}\right)\\
z_4=\psi_1(X)=h_2(X)=\delta_{23}-\delta_{230} \qquad (4)\\
z_5=\psi_2(X)=L_f h_2(X)=f_3=\omega_{23}\\
z_6=\psi_3(X)=L_f^2 h_2(X)=f_4=\dot{\omega}_{23}=\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{m2}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{m3}\right)-\left(\frac{D_2}{H_2}\omega_2-\frac{D_3}{H_3}\omega_3\right)-\left(\frac{\omega_0}{H_2}p_{s2}-\frac{\omega_0}{H_3}p_{s3}\right)
\end{cases}$$

容易检验向量函数 $\Phi(x)$的 Jacobian矩阵是非奇异的,于是可知所选的坐标变换是一组合格的局部微分同坯。

在坐标变换(4)关系下,系统(3)的状态方程可转化成如下形式。

$$\begin{cases}
\dot{z}_1=z_2\\
\dot{z}_2=z_3\\
\dot{z}_3=v_1\\
\dot{z}_4=z_5\\
\dot{z}_5=z_6\\
\dot{z}_6=v_2
\end{cases} \qquad (5)$$

输出方程为

$$\begin{aligned}
y_1 &= h_1(Z)=z_1\\
y_2 &= h_2(Z)=z_4
\end{aligned}$$

其中,v为同步电机反馈线性化后的“虚拟输入量”,且有

$$\begin{aligned}
v_1 &= -\frac{D}{H}\dot{\omega}_{13}-\frac{1}{T_{d1}}\left(\frac{\omega_0}{H_1}+\frac{\omega_0}{H_3}\right)(-p_{dc1}+p_{dcref1})-\\
&\quad \frac{1}{T_{d1}}\left(\frac{\omega_0}{H_1}+\frac{\omega_0}{H_3}\right)u_{dc1}-\frac{\omega_0}{H_3T_{d2}}(-p_{dc2}+p_{dcref2})-\\
&\quad \frac{\omega_0}{H_3T_{d2}}u_{dc2}-\left(\frac{\omega_0}{H_1}+\frac{\omega_0}{H_3}\right)\dot{p}_{ac1}-\frac{\omega_0}{H_3}\dot{p}_{ac2}\\
v_2 &= -\frac{D}{H}\dot{\omega}_{23}-\frac{1}{T_{d2}}\left(\frac{\omega_0}{H_2}+\frac{\omega_0}{H_3}\right)(-p_{dc2}+p_{dcref2})-\\
&\quad \frac{1}{T_{d2}}\left(\frac{\omega_0}{H_2}+\frac{\omega_0}{H_3}\right)u_{dc2}-\frac{\omega_0}{H_3T_{d1}}(-p_{dc1}+p_{dcref1})-
\end{aligned}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\frac{\omega_0}{H_3 T_{d1}} u_{dc1} - \left(\frac{\omega_0}{H_2} + \frac{\omega_0}{H_3} \right) \cdot p_{ac2} - \frac{\omega_0}{H_3} \cdot p_{ac1}$$

将系统写成状态方程形式，得

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv \\ y = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_4 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

其中，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 滑模控制器的设计

系统 (6)是个标准的线性简约型，对系统 (6)进行滑模控制设计，可把系统 (6)转化为

$$\begin{cases} \dot{Z}_{\mathrm{I}} = A_{11} Z_{\mathrm{I}} + A_{12} Z_{\mathrm{II}} + B_1 v \\ \dot{Z}_{\mathrm{II}} = A_{21} Z_{\mathrm{I}} + A_{22} Z_{\mathrm{II}} + B_2 v \end{cases}$$

其中，

$Z_{\mathrm{I}} = [z_1 \quad z_2 \quad z_3]^{\mathrm{T}}$, $Z_{\mathrm{II}} = [z_4 \quad z_5 \quad z_6]^{\mathrm{T}}$,

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分别取指数趋近率得

$$\dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1, \ \varepsilon_1 > 0, \ k_1 > 0$$

$$\dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2, \ \varepsilon_2 > 0, \ k_2 > 0$$

选取切换函数为

$$s = Cz \quad (7)$$

其中，C为一矩阵。

任取一组期望闭环极点 $\{-2 \pm j, \ -1 \pm j2, \ -1 \pm j\}$，根据极点配置方法，可得出

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 50 & 110 & 121 & 78 & 32 & 8 \end{bmatrix}$$

为了得到更好的动态品质，选取指数趋近律得

$$\dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1, \ \varepsilon_1 > 0, \ k_1 > 0 \quad (8)$$

$$\dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2, \ \varepsilon_2 > 0, \ k_2 > 0$$

可得

$$v_1 = z_5 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 - k_1 s_1 \quad (9)$$

$$v_2 = -50 z_2 - 110 z_3 - 78 z_5 + 32 z_6 - \varepsilon_2 \operatorname{sgn} s_2 - k_2 s_2$$

为了抑制滑模面上抖动，此处采用饱和函数代替式 (9)中的符号函数。

$$\operatorname{sat}(s/\Delta) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ s/\Delta & |s| \leqslant \Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases}$$

所以，式 (9)可写为

$$v_1 = z_5 - \varepsilon_1 \operatorname{sat}(s_1/\Delta) - k_1 s_1$$

$$v_2 = -50 z_2 - 110 z_3 - 78 z_5 + 32 z_6 - \varepsilon_2 \operatorname{sat}(s_2/\Delta) - k_2 s_2$$

4 仿真分析

为了验证所设计非线性附加控制器的有效性，对图 1所示的三机系统进行了动态仿真。系统参数如下：$H_1 = H_2 = 6$, $H_3 = 12$, $\frac{D_1}{H_1} = \frac{D_2}{H_2} = \frac{D_3}{H_3} = \frac{D}{H} = 0.3$, $T_{d1} = 0.1$, $T_{d2} = 0.06$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$, $k_1 = k_2 = 5$, $\Delta = 0.2$, $\omega_0 = 314.16$, $\delta_{130} = 60°$, $\omega_{130} = 0$, $\delta_{230} = 30°$, $\omega_{230} = 0$, $P_{dcref1} = 0.65$, $P_{dcref2} = 0.55$。

在系统运行中，1 s时刻，第一条交流线路 DE中靠近逆变侧的一点发生三相短路，0.15 s后排除故障恢复线路供电，系统的动态响应曲线如图 2、3。

该图为非线性变结构附加控制功角响应曲线，从仿真结果可以看出，控制明显增强了系统的阻尼，在大扰动情况下，对两组相对功角的振荡均起到良好的抑制效果，迅速趋向相应的故障后系统平衡状态，保持系统的稳定性，具有较好的鲁棒性。

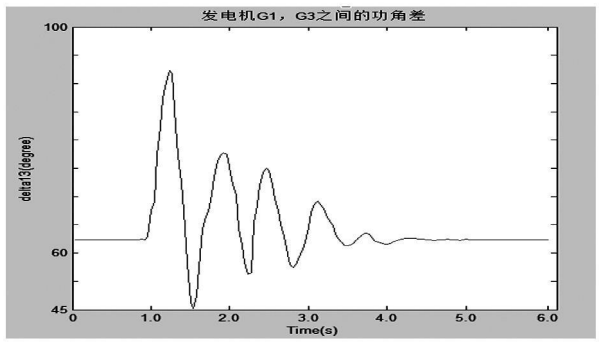


图 2 功角 13响应曲线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

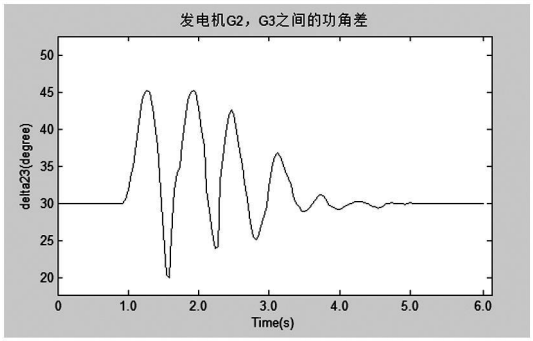


图 3 功角 23响应曲线

5 结 论

采用非线性系统理论以及变结构控制理论相结合，设计出以提高系统暂态稳定性为目标的控制规律。通过对系统进行仿真，所设计的非线性变结构附加控制器在系统受到大的扰动时，能够很好地抑制发电机之间相对功角的振荡，有较强的适应性和鲁棒性，达到良好的控制效果。

参考文献

[1] 卢强，孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京：科学出版社，1993.

[2] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京：科学出版社，1996.

[3] 陈凌云. 高压直流输电系统中非线性控制策略的研究 [D]. 四川大学，2003.

[4] 陈凌云，李兴源，刘红超，邱晓燕. 高压直流输电系统非线性变结构控制器的设计 [J]. 电力系统自动化，2003，27(4)：6－9.

[5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京：科学出版社，1998.

[6] 任震. 高压直流输电 [M]. 重庆：重庆大学出版社，1987.

[7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京：机械工业出版社，2004.

作者简介：

温芯芳 (1985－)，女，江西东乡，硕士研究生，研究方向为非线性变结构控制理论在电力系统中的应用。

(**收稿日期**：2010－04－06)

简阳新悦电力器材有限公司简介

简阳新悦电力器材有限公司 2009与资阳资源电力集团有限公司合资成立为股份制企业。公司位于简阳市贾家镇老成渝路旁，占地面积 8000平方米，是一家专业生产销售电力铁塔、铁附件、金具、加工热镀锌的公司。公司注册资金 200万元人民币，固定资产 600万元，现有员工 70人，我公司具有一流的生产设备和先进的生产工艺。公司于 2009年 11月通过了 GB/T 19001－2008质量管理体系认证。

公司拥有各类生产设备 26台，起吊、运输工具 6台，年生产销售产值 6000余万元。公司始终坚持以“客户的需求、产品的质量、快捷的服务”为企业生存的根本条件，公司全体员工遵循科学、严谨、务实的企业作风，奉行“观念求新、技术领先、管理从严、服务至诚”的经营宗旨。

公司企业文化：言必行，行必果。

我们的追求：事事领先同行。

我们的愿景：做行业第一，创国内一流企业。

公司全体员工真诚期待全国各界朋友与我公司洽谈合作共创辉煌!

联系人：杨 杰

电 话：028－27921888

传 真：028－27926295

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一个县级电网 AVC系统的应用和技术特点

何 东,吴端华,洪行旅,段登伟
(成都电业局,四川 成都 610016)

摘 要:县级电网建立自动电压控制(AVC)系统可以实现电网的无功电压优化协调控制。介绍了一个县级电网 AVC系统的结构、技术特点以及应用情况。该县级电网 AVC系统实现了与上级 AVC系统的协调,又符合本地实际,开发了合理的县级电网 AVC系统的功能模块。实践表明该 AVC系统在县级电网投入运行后取得较好的运行效果。

关键词:电网;自动电压控制;无功;电压

Abstract: The application of automatic voltage control (AVC) system to county power grid is able to realize the optimal and harmonic control of reactive power and voltage in power grid. The framework, technical characteristics and application of AVC system in a county power grid is introduced. The AVC system of the county power grid has realized the coordination with the AVC system of the higher level, and it is also adapted to the local conditions. Reasonable function modules of AVC system in county power grid are also developed. The practice shows that a good operation results can be achieved with the application of AVC system.

Key words: power grid; automatic voltage control; reactive power; voltage
中图分类号:TM761 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0017-02

0 引 言

县级供电企业对电网电压的传统控制手段主要是以时段划分进行定时控制或是调度人员在发现电压越限时凭经验进行简单的调整。为进一步提高电网的电压质量,降低电网网损,实现电网运行在线控制目标,减轻值班人员人工调整电压的劳动强度,开发并研制电网的自动电压控制系统显得十分必要,它为现代电网安全稳定控制提供了先进的技术手段[1-3]。

根据一个县级电网的实际情况,对县级电网 AVC系统的建设进行了研究。该县级电网 AVC系统能够同时满足上级 AVC系统的要求,又符合本地实际,对县级电网 AVC系统存在的问题也进行了分析和论述。

1 县级 AVC系统的建设

1.1 AVC系统概况

自动电压控制(automatic voltage control AVC)是提高电能质量、降低系统网损和提高电压稳定水平的新技术。随着计算机技术的迅猛发展,近年来,AVC技术的研究得到了国内外科研人员和运行人员的重视。

通常 AVC系统采用二级电压控制模式和三级电压控制模式。二级电压控制模式最早由德国莱茵-威斯特伐利电力公司(RWE)提出,其基本思想是周期性进行全网的最优潮流(OPF)计算,得到电压优化控制策略直接下发给发电厂、变电站子站控制设备执行,其控制结构图如图 1。

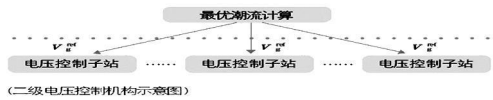


图 1 二级电压控制模式

三级电压控制模式由法国电力公司(EDF)最早提出[4],是一种分级电压控制方案,目前在法国、意大利、比利时、西班牙等国电网中得到较好的应用,国内江苏电网是第一个实现该控制模式的系统,其控制结构图如图 2。

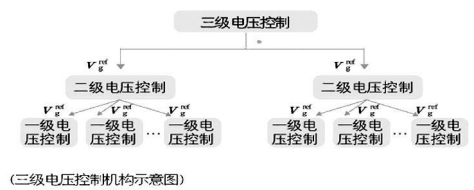


图 2 三级电压控制模式

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在三级控制部分,无功优化软件分为优化和校正两种控制模式。在系统正常运行时使用优化控制模式,根据无功优化计算得到的无功电压控制方案自动对无功电压控制设备 (如发动机、变压器、并联补偿设备等)进行自动控制,降低系统网损。当出现考核母线电压越限时自动切换到校正控制模式,形成控制方案并下发到厂站端以消除越限。

1.2 双流县级电网现状

截止 2009年,双流供电局管辖的 220 kV及以下变电站包括:220 kV变电站 1座、110 kV变电站 8座 (含用户站)、35 kV变电站 7座。根据规划到 2012前将要新投入的变电站有:500 kV九江等变电站、220 kV黄水等变电站、110 kV正兴站、万安站、金桥站等变电站。2009年,双流局最高供电负荷为 460 MW,最高日供电量为 8 800 MW h,2009年完成售电量 2 309 GW h。

双流 AVC系统计划调控的变电站 14座,其中 110 kV变电站 7座,35 kV变电站 7座,总装容量为 6 573 MVA,供电面积 1 034 km^2。35 kV及以上输电线路 15条,线路总长 297 km;10 kV配电线路 121条,线路总长 2 490 km。调控 14座变电站全部接入了远方监控系统,系统具有完善的遥测、遥信、遥控、遥调四遥功能。

2 AVC系统的结构和功能

2.1 县级 AVC系统基本原则

由于无功优化控制管理系统涉及到地区电网的各个方面,横向需联系调度信息管理系统,纵向需联系调度自动化系统,所以系统要求具有安全性、全面性、可靠性、灵活性、模块化设计、易操作性。县级电网 AVC在具备基本 AVC功能的同时,还具备充当地区电网 AVC的子站功能,能够进行局部范围的计算、自动控制。

2.2 系统的结构

县级 AVC系统应从上往下分为三个层次,即决策管理层、业务处理层、设备执行层。不同的层次负责不同逻辑功能,将具体的技术细节对上层屏蔽。通过有效的层次划分,降低系统的复杂度,提高系统的重用性。

2.3 系统的功能

县级 AVC系统要依托现有的调度自动化软件,采集全网实时数据,以全网网损最小为优化目标,以各节点电压合格为约束条件,对电网发生的电压、功率因数越限进行优化管理,生成优化策略和控制命令,并结合负荷趋势预测的结果进行实时控制或给出调整建议。保证全网各节点电压的合格率,并对全网无功配置进行优化控制,达到全网无功潮流最合理流向,使各变电所的电容器和有载变压器分接挡位动作次数尽可能少。实现县级调度自动化系统的 “四遥 ”功能,并与变电站综合自动化系统相结合,减轻调度 (集控中心)值班人员的劳动强度。

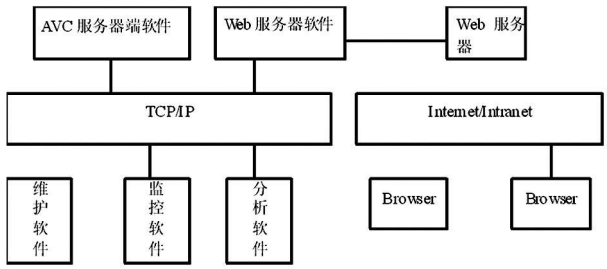


图 3 软件体系结构示意图

为了降低对客户端的硬件要求,实现纯查询用户的客户端零配置,达到满足本系统分布式查询的特点,体系结构采用 Client/Server和 Browser/Server结构相混合的形式。

县级 AVC系统内部的主要软件体系如下。

AVC服务器软件

WEB数据服务器软件

维护软件

监控软件

分析软件

WEB用户浏览器 (Browser)

根据县级电网的实际要求,县级电网 AVC的功能模块如下。

全网无功优化补偿功能:当电网内各级变电站电压处于合格范围内,控制本级电网内无功功率流向合理,达到无功功率分层就地平衡,提高受电功率因数。

全网电压优化调节功能:当无功功率流向合理,某站 10 kV母线电压越限运行,分析同电源、同电压等级变电站和上级变电站的电压情况,决定调节哪一级变压器挡位,以达到尽可能少的变压器分接头挡位调节次数,达到最优调节效果。

电压无功综合优化功能:当变电站 10 kV母线电压越上限时,先调节变压器分接头;越下限时,先投入

(下转第 79页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 贾润芳,孙凤娟. 500 kV变电站 220 kV系统双母线双分段接线方式的施工方案 [J]. 河北电力技术, 2009, 28(2): 11－13.
[5] 刘剑红. 500 kV变电站 220 kV母线保护存在的问题及改进 [J]. 湖北电力, 2008, 32(2): 21－22.
[6] 王世祥,左婧.母线保护双重化改造中注意事项的探讨 [J].继电器, 2008, 36(3): 75－77.
[7] 谭胜兰,张电. 220 kV母线保护改造的技术探讨 [J]. 华东电力, 2006, 31(16): 81－82.
[8] 国家电网公司. 线路保护及辅助装置标准化设计规范 [S]. 2007.
[9] 四川省电力公司. 四川电网 220 kV及以上系统继电保护装置编号命名原则 [S]. 2008.

作者简介:

左可飞 (1972－),男,本科,工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制;

崔明德 (1981－),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制。

(**收稿日期**: 2010－04－19)

(上接第 18页)

电容器。同时预算母线电压和负荷变化,防止无功补偿设备投切振荡。

逆调压功能:根据当前负荷水平,在电压合格范围内,进行全电网分析,实现高峰负荷时电压偏上限运行,低谷时偏下限运行等功能。

图形建模功能:采用开放式图形建模结构,以适应电网主接线变化。

控制信息管理功能:对电压、有功、无功、功率因数等曲线图自动存档并生成各种报表。

统计考核功能:对电网无功设备实际运行情况进行统计,为管理层进行考核提供依据。

语音提示功能:对尚不能接入 AVC的地区或站点,在有人值班的地方设置 AVC子站将控制指标进行语音提示。

3 AVC系统运行情况

从实际运行情况看, AVC系统投运后提高了电压质量,在以下几个方面发挥了明显作用。

1)降损节能效益明显,在县级电网网架基本没变、运行方式基本相同、电量基本相同的条件下,实现了降损节能。

2)减少变压器分接头调节。一般运行情况下, VQC控制下的调挡次数大约是 5～8次 /天。 AVC投入后,调挡次数便大幅下降,调挡次数平均 2. 5次 /天;即使在电网峰谷差和调压压力较大的情况下也只有 4～5次 /天。

3)减轻了调度及监控人员劳动强度。 AVC系统投入运行后,实现了自动调压,从而大大减轻了负荷峰谷交替时段人工劳动强度。

4)提高了电网的安全运行水平。 AVC系统是调控静态无功补偿设备,但它对电网动态运行十分有利,在一定程度上提高了系统无功的动态补偿能力。

4 结 论

总之,在电网无功优化和控制方面 AVC系统是目前技术和管理的发展方向,势必替代目前使用的 VQC装置。在成都双流县级电网已投入使用 AVC系统中无功和电压控制都取得了较好的效果。下一步将逐步在各县级电网建设 AVC系统,最终构成完善的地区电网 AVC系统,以提高整个电网的电压合格率,减少无功传输,优化电网潮流分布,降低网损,同时减轻运行人员的劳动强度。

参考文献

[1] 王 萍.无功电压优化集中控制系统在青岛电网的应用 [J].中国电力, 2007, 40(1): 36－39.
[2] 吴银凤,肖 源,邝先验.地区电网电压无功优化闭环控制系统设计 [J].电气应用, 2007, 26(11): 33－36.
[3] 袁 丁,郭西进.电压无功优化控制系统在地区电网中的应用 [J].电力需求侧管理, 2007, 9(2): 18－20.
[4] 苏辛一,张雪敏,何光宇,等.互联电网自动电压控制系统协调变量设计 [J].电力系统自动化, 2009, 33(14): 22－26.

作者简介:

何 东 (1972－),男,工程师,从事电网运行、调度、继电保护等方面的管理工作。

吴端华 (1964－),女,工程师,从事继电保护方面的管理工作。

洪行旅 (1956－),男,高级工程师,从事电网运行、继电保护和通信自动化方面的管理工作。

段登伟 (1974－),男,博士,高级工程师,从事电力市场和电网运行方面的研究工作。

(**收稿日期**: 2010－03－02)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于 IEC 61850的数字化变电站技术综述

陈 愚
(超高压运行检修公司,四川 成都 610041)

摘 要:基于 IEC 61850的数字化变电站技术已成为变电站自动化系统发展与应用的热点领域。分析了数字化变电站的主要技术特点,讨论了 IEC 61850变电站系列标准、非常规互感器技术、网络通讯的实时性与可靠性和同步化信息技术等数字化变电站的关键技术,简要介绍了三种典型的数字化变电站系统解决方案。

关键词:数字化变电站; IEC 61850;通信;互感器;智能开关

Abstract: Nowadays the research on automation system of substation is focused on the digital substation technology based on IEC 61850. In view of technical basis of digital substation at present, the main technical features of digital substation are analyzed and it is pointed out that the substation standards of IEC 61850, the techniques of non-conventional transformer, the reliability of network communication, the time synchronization of information are the key technologies to implement the digital substation. Finally three typical solution schemes of digital substation system are introduced.

Key words: igital substation; IEC 61850; communication; transformer; intelligent switch

中图分类号: TM631 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-6954(2010)04-0021-03

0 引 言

变电站自动化技术随着计算机技术、网络通讯技术的快速发展取得了长足进步,不断深化的数字化过程是变电站自动化技术发展的主要方向。新一代变电站不仅增强了变电站自动化系统功能,也提高了系统的实时性、可靠性、灵活性和可扩展性,达到了简化维护以及节省系统投资的效果。光电式电流及电压互感器、智能电子装置(intelligent electronic device, IED)等的应用以及按照 IEC 61850系列标准制定的基于高速以太网和 TCP/IP的变电站通信网络系统使得数字化变电站的应用成为可能。

1 数字化变电站的主要技术特点

1.1 系统三层网络结构体系

变电站自动化系统机构经历了由集中式向分布式系统的转变。数字化变电站采用成熟的网络通讯技术和开放式互联规约,依据 IEC 61850标准体系的建模标准,在逻辑结构上分为过程层、间隔层和站控层的三层模型[1],各层次内部与层次之间采用高速网络通信。在这三层中分别接入 2类总线:过程总线以及变电站总线。过程总线主要用于过程层与间隔层之间 TA、TV以及控制数据的交换,变电站总线用于间隔层内部、间隔层之间、间隔层与变电站层之间、变电站层内数据交换。数字化变电站的基本结构及网络信息流如图 1所示。

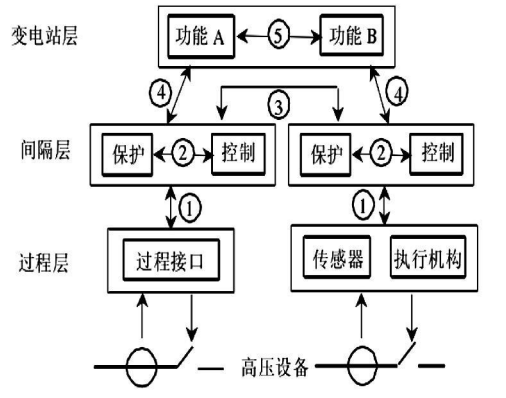


图 1 数字化变电站基本结构及网络信息流

1.2 数据采集数字化

传统的电磁式电流互感器存在绝缘结构复杂和磁饱和问题,而数字化的电流、电压量测系统(光电式互感器或电子式互感器),实现了一、二次系统在电气上的有效隔离,增大了电气量的静态及动态测量范围,提高了测量精度,为变电站信息集成化应用创造了条件。

1.3 紧凑的系统结构

将重量轻、体积小的数字化电气量测系统集成在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

智能开关设备中,进行功能优化组合和设备布置,体现了变电站机电一体化设计理念。测控装置、保护装置、控制操作回路、故障录波装置等作为一次智能设备的一部分,实现了 IED的近过程化(process—close)设计[2]。紧凑的系统功能结构或近过程化设计如图 2所示,LN(logical node)逻辑节点是变电站自动化系统的基本功能单元,IED A中集成了断路器(XCBR)与监视(SCBR)功能,IED B中集成了作为主保护的距离保护(PDIS)与开关操作控制(CSWI)功能,IED C中集成了作为后备保护的过流保护(PTOC)、电压采样(PTTR)与电流采样(CTTR)功能。从图 2中可以看出紧凑化的系统结构有以下特点:① IED数量减少,在装置与系统间采用网络连接减少二次接线;②优化组合变电站自动化功能并将其分配到不同的 IED中;③ IED紧靠过程层,有利于与一次设备配置一体化。

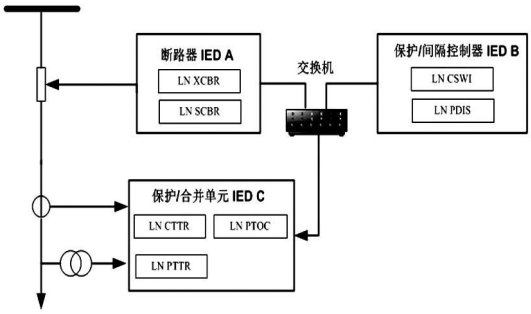


图 2 紧凑的功能结构或近过程化设计

1.4 标准化系统模型

IEC 61850是国际电工委员会制定的“变电站通信网络和系统”系列标准,在定义变电站通信体系、通信数据模型等方面采用了面向对象的方法,为变电站自动化系统建立了标准统一的信息交换模型,主要意义在于:①变电站信息共享,对站内设备采用统一建模,统一规则命名资源,实现变电站内及变电站与监控中心之间的无缝通信;②采用面向对象的建模方法,设备自我描述规则和抽象通信服务接口,并使之成为变电站自动化功能的统一的语法语义标准,来实现变电站智能设备的互操作性;③采用 XML建立变电站、IED、通信系统等模型的描述文档,XML是一种具有简单、高效、开放且可扩展、可移植的标记语言,设备功能、网络连接和系统配置都可采用基于 XML的变电站配置语言进行描述、存储、交换、配置和管理,简化系统的维护、配置和工程实施。

1.5 信息集成化应用

变电站数字化为信息集成化应用创造了有利条件,数字化变电站可以对二次系统装置和数据进行信息集成和功能优化处理,避免了常规变电站存在的硬件配置重复、信息不利于共享和投资成本大等问题。数字化变电站是未来“数字化电网”的功能和信息节点,IEC 61850系列标准将逐步统一电力系统内各信息模型和信息交换模型,消除由于缺乏标准建模和功能异构而导致的信息盲点。

1.6 设备实现状态检修

在数字化变电站中,可以实时有效地获取各种 IED装置的故障和保护动作信息以及电网运行状态数据,实现对交直流回路、信号及操作回路状态的有效监视。数字化变电站几乎不再出现未被监视的功能单元,设备状态特征量的采集无盲区,设备检修策略可以从常规变电站设备的“定期检修”转变成“状态检修”[3],从而大大提高了系统设备的时效性和全员生产效率。

2 数字化变电站的关键技术

2.1 IEC 61850变电站系列标准

IEC 61850是迄今为止最为完善的变电站通信网络和系统的通信标准,适用于分层分布式的变电站自动化系统和智能电子装置,数字化变电站自动化系统的过程层、间隔层和变电站层全面采用了 IEC 61850系列通信标准。该标准主要涵盖了以下 4个方面:①采用面向对象的数据建模方法,定义了基于服务器/客户机结构的数据模型;②从变电站自动化通信系统的通信性能要求出发,定义了变电站自动化系统功能模型;③定义了数据访问机制和向通信协议栈的映射,在变电站层和间隔层之间的网络采用抽象通信服务接口映射到 MMS(IEC 61850—8—1),在间隔层与过程层之间的网络映射成串行单向多点或点对点传输网络(IEC 61850—9—1)或映射成基于 IEEE 802.3标准的过程总线(IEC 61850—9—2);④定义了基于 XML的结构化语言,描述了变电站和自动化系统的拓扑以及 IED结构化数据,为验证互操作性提供了一致性测试。

2.2 非常规传感器技术

将不同于传统的电磁型电流/电压互感器的新型互感器统称为非常规互感器,其中:基于光电效应的互感器称为光学电流/电压互感器(current/voltage

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

transformer with optical sensor, OCT/OVT)或无源式互感器;另一种泛称为电子式电流/电压互感器(electronic current/voltage transformer, ECT/EVT)或有源式互感器。光学电流互感器是利用 Faraday磁光效应测量电流的,光学电压互感器是利用 Pockels电光效应测量电压的。电子式电流互感器主要是采用 Rogowski线圈或小铁心原理,电子式电压互感器多采用分压(电阻或电容)原理。光电式互感器和电子式互感器,与传统的电磁式互感器相比,消除了绝缘结构复杂及磁饱和等问题,并在低压部分通过光纤输出数字信号,提供给二次设备。

由于线性双折射现象及发光源器件发光强度下降、光传输环节引起偏振角变化和不同材料的维尔德常数受外界温度的影响不同等因素,光电式互感器存在测量精度不稳定且有偏差的问题[4]。有源式互感器的主要问题是其工作时需要工作电源。利用激光供电技术对高压侧电子模块进行供电,激光供电器件的稳定性直接影响互感器的使用效果,Rogowski线圈易受电磁干扰,因此在使用中应严格对线圈进行电磁屏蔽。

2.3 实时可靠的网络通讯技术

IEC 61850－9－1标准采用串行点对点模式,IEC 61850－9－2标准采用网络交换机模式[5]。点对点通信模式,间隔层设备采用点对点的方式与相应的合并器连接,光缆附设量大,但投资较小,适合于中小规模变电站。这里主要讨论 IEC 61850－9－2标准网络系统模式,网络系统是数字化变电站的“神经系统”,其实时性和可靠性对变电站自动化系统运行至关重要。网络拓扑结构的可靠性高低和是否采用冗余技术决定着通信网络的可靠性。如图 3所示的网络方案中,每个 IED都配有双网卡,可分别接入两台交换机,过程总线和站级总线都采用环形拓扑,因此该方案可大幅提高系统可靠性。网络系统设计属于优化系统问题,应兼顾经济性和易维护性等因素。

实时性也是变电站通信网络中受关注的焦点问题,IEC 61850对变电站自动化系统的报文性能做了严格详细的规定,依据对时间的要求将报文分为 7大类,其中“快速跳闸报文”和针对保护与控制的“生成数据报文”的时间要求为 3 ms[1]。为验证以太网技术能否满足上述实时性要求,国内外专家学者进行了大量研究,结果表明采用 100 M以太网和多播技术,在正常情况下网络的最大通信延时完全能够满足实时性要求,且有较大的裕度。但在网络发生异常情况(出现数据风暴、更换或增减网络通信设备以及网络中某节点断开等)下网络通信的实时性能否满足要求还需要进一步研究。

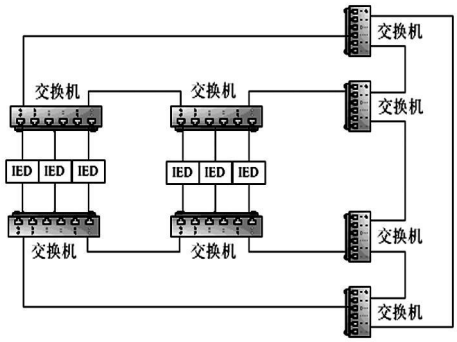


图 3 具有冗余特性的网络通信方案

2.4 同步化信息技术

传统电磁式互感器输出的模拟信号不存在采样时间不同步的问题,但由合并器输出的数字采样信号就必须含有时间信息,使得采样数据的时间同步,以避免相位和幅值产生误差。安装于通信服务器内的全站 GPS接收装置,通过脉冲对时网和通信网络给光电式互感器和各种二次设备对时。变电站总线可采用 SNTP(simple network time protocol)实现不同设备间的采样同步,以 UTC(universal time coordinated)作为时钟同步源,同步误差可以控制在 1ms, 但过程总线的同步误差要求控制在 1μs过程总线必须采用 IEEE 1588标准。1个 IEEE 1588精密时钟系统包括多个节点,每一个节点代表一个时钟,时钟之间经由网络连接。IEEE 1588标准所定义的精确网络同步协议实现了网络中的高度同步,使得在分配控制工作时无须再进行专门的通信同步,从而达到了应用程序执行时间模式与通信时间模式分开的效果。

3 数字化变电站系统解决方案

3.1 准数字化变电站系统方案

站内全部使用传统型一次设备,过程层设备通过硬接线和间隔层设备相连,在间隔层与变电站层之间实现 IEC 61850标准连接。从严格意义上讲,此种系统结构的变电站不是数字化变电站,但间隔层和变电站层之间的通信遵循 IEC 61850协议来实现,在过渡阶段,这种系统有利于新技术、新标准和设备的逐步应用,为将来实现数字化变电站积累经验。

(下转第 66页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结 论

前面介绍了德阳五里堆 220 kV变电站实测负荷建模平台,通过现场采集的扰动数据辨识的综合负荷模型参数与实际负荷特性接近,采用实测负荷模型参数与典型参数进行对比仿真,实测参数的精度高于典型参数。其取得的扰动数据仅为 2009年 12月至 2010年 1月期间的数据,对德阳变电站的负荷辨识,还需要更长时间的扰动数据的积累。为推动四川电网的实测负荷建模工作,建议通过负荷调查,在四川电网更多的负荷变电站安装负荷记录设备,或采利用现有的记录扰动装置,通过长时间的扰动数据积累,建立四川电网实测负荷模型库,为安全准确地计算四川电网外送功率打下坚实基础。

(**收稿日期**: 2010—06—10)

(上接第 23页)

3.2 实用性数字化变电站

该方案采用 IEC 61850协议、ECT/EPT和传统的 SW/CB设备,将变电站的数字化程度提高了一个层次。ECT/EPT通过光纤接入合并器,由合并器对采集的数据进行整理后,按照 IEC 61850协议通过光纤接入过程总线,间隔层设备接收来自过程总线的数据,并将处理后的数据送入变电站总线。一个间隔中的传统开关设备通过硬接线与智能终端相连,智能终端实现模拟开关量/接点信号与数字信号的转换以及操作回路功能,并通过光纤接入过程总线。川内首座数字化变电站——绵阳南塔 110 kV变电站便属于此种类型的数字化变电站。

3.3 完全数字化变电站

采用 ECT/EPT、智能开关设备并遵循 IEC 61850协议的完全型数字化变电站,其过程层、间隔层和变电站层全部实现数字化。过程层的采样、检测和控制全部实现数字化和网络化。目前智能开关设备技术还不够成熟,有待进一步研究开发。

4 结束语

数字化变电站技术的发展与实现得益于通信网络技术、机电一体化技术、高速数字信号处理技术、传感器技术和信息同步化技术等多个领域的研究成果和交叉融合。数字化变电站的建设以及传统变电站的数字化改造是一个长期的、逐步完善、分步实施的过程。IEC 61850标准的实施、非常规互感器的应用和智能开关设备的成熟推动着数字化变电站示范工程的建设,在今后 10年中,数字化变电站已成为变电站自动化发展的主流方向,为“数字化电网”发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] IEC. IEC 61850: Communication networks and systems in substations[S]. 2004

[2] Anderson L, Brunner C. Substation Automation Based on IEC 61850 with New Process—close Technology[C]. IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, 2003.

[3] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特性和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67—71.

[4] 门石,张振华. 新型电流电压传感器技术的应用研究[D]. 北京:华北电力大学, 2001.

[5] 全国电力系统控制及其通讯标准化技术委员会. IEC 61850变电站通讯网络和系统系列标准, 2002.

[6] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850介绍[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61—65.

[7] 朱大新. 数字化变电站综合自动化系统的发展[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20—22.

[8] 曾庆禹,李国龙. 变电站集成技术的发展——现代紧凑型变电站[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 60—67.

(**收稿日期**: 2010—01—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

浅析 110 kV同塔双回输电线路保护装置的配置

陈 平
(西昌电业局,四川 西昌 615000)

摘 要:由于零序阻抗的影响,110 kV同杆双回输电线路采用常规线路保护配置时,当一回线路发生接地故障,另一回线路的保护会产生相继动作的情况,对该保护的动作行为进行了分析,并提出了改进措施。

关键词:110 kV输电线路;同塔双回;零序阻抗;高频保护;纵联差动保护

Abstract: When adopting the conventional scheme of relay protection configuration for 110 kV double-circuit transmission lines on same tower, if a ground fault occurs on one line, the protection of the other line will act later due to the influence of zero-sequence impedance. The line protection tripping behavior is analyzed and the improvement measures are proposed.

Key words: 110 kV transmission line; double-circuit line on same tower; zero-sequence impedance; high-frequency protection; pilot wire protection

中图分类号:TM773 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0024-01

1 问题的提出

目前大多数两端都共母线的 110 kV同塔双回输电线路的继电保护均采用常规的微机继电保护装置。常规的微机继电保护装置主要功能为三段接地及三段相间距离保护、四段零序方向电流保护以及三相一次重合闸装置。由于具有双端电源的两端共母线的 110 kV同塔双回输电线路的零序阻抗受两条线路的运行方式影响较大:是两条线路同时运行;还是一条线路停运、一条线路运行。因此,在具有双端电源的两端共母线的 110 kV同塔双回输电线路互感阻抗的互感系数无法实测的情况下,仅凭经验公式计算的零序方向电流保护第一段的整定值,将无法保证在同塔双回输电线路一回故障跳闸、一回正常运行情况下正常运行线路零序方向电流保护动作行为的正确性。

2 微机继电保护装置不正确动作实例

2.1 事故经过

2004年 10月 27日 7时 47分,110 kV甘洛变电站 110 kV越甘 I回零序 I段、距离 I段动作跳闸,重合闸未动,故障相别 A相,测距 12 km。220 kV越西变电站 110 kV越甘 I回零序 I段动作跳闸,重合成功,故障相别 A相。110 kV甘洛变电站 110 kV越甘 II回零序 I段动作跳闸,重合闸未动,故障相别 A相,测距 130 km。如图 1所示。

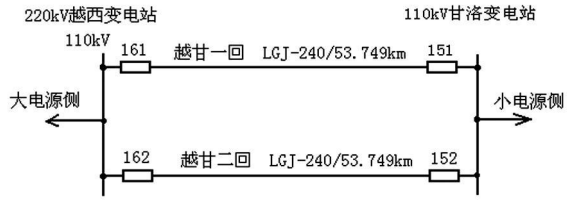


图 1 110 kV同塔双回输电线路故障前运行示意图

2.2 保护动作行为分析

此次故障发生在越甘 I回线 A相。故障后 60 ms越甘 I回 151开关零序 I段、距离 I段动作跳闸(故障零序电流为 14.79 A, I段定值为 4.8 A);在故障后 60 ms这一段时间内,越甘 I回 161开关的最大零序电流为 10.76 A,未达到 I段定值 12.5 A,因此其零序 I段未动作出口跳闸,如图 2所示。

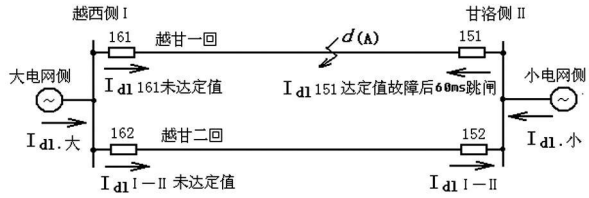


图 2 110 kV越甘 I回故障后 110 kV甘洛变电站 151开关跳闸前的故障电流分布图

在越甘 I回 151开关跳闸后,流过越甘 I回 161开关的零序电流突增至 19.61 A,达到 I段定值 12.5 A,其零序 I段动作在故障后 132 ms时出口跳闸;与此

(下转第 28页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

跳闸隔离故障后送电不成功。

(3)提高了线路重合闸成功率。

(4)满足继电保护速动性、灵敏性、选择性、可靠性的要求。

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:

冯成铭 (1980－),男,四川德阳电业局调度中心,本科,从事电网调度运行与继电保护整定计算工作。

(**收稿日期**: 2010－04－06)

(上接第 24页)

同时,流过越甘 II回 152开关的故障电流反相,由原反方电流变为正方电流,且其电流值由 2.29 A(故障后 60 ms期间电流值)突增至 5.77 A,达到 I段定值 4.8 A,其零序 I段动作在故障后 132 ms时出口跳闸,如图 3所示。

越甘 II回 162开关在故障后 60 ms期间为正向电流,最大 3.18 A,未达 12.5 A定值;在越甘 I回 151开关跳闸后,其电流变为反方向,最大为 7.69 A。因此,越甘 II回 162开关保护不具备动作的条件。

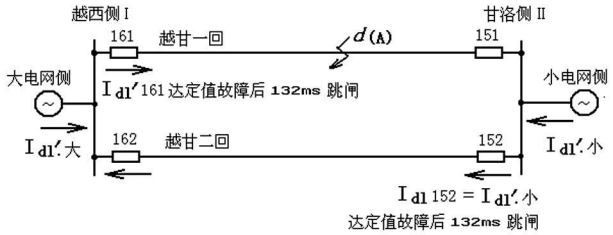


图 3 110 kV越甘Ⅰ回故障后 110 kV甘洛变电站 151开关跳闸后的故障电流分布图

2.3 保护动作行为评价

从以上分析可看出,此次事故故障点在 110 kV越甘Ⅰ回线路上,但越甘 II回 152开关也相继动作跳闸。从保护整定校验软件中模拟上述故障:双回线路一回线单相接地故障,另一回线从甘洛侧提供给故障点的一次电流只有一百几十安,而当故障线路的一侧开关先于另一侧跳闸后,非故障线路提供给故障点的一次电流就达几百安 [输电线路每一回路每单位长度的一相等值零序电抗理论近似值:有架空地线单回线路 $X_0=(2\sim3)X_1$、有架空地线双回线路 $X_0=(3\sim4.7)X_1$]。这种情况是同塔双回输电线路零序阻抗变化所致。因此,零序阻抗对具有双端电源的两端共母线的同塔双回 110 kV线路配置常规微机保护的动作行为影响较大。由于输电线路所经地段的大地电阻率一般是不均匀的,因此,同塔双回 110 kV线路的零序阻抗要通过实测才能得到准确的数值。而在现实工作中实测 110 kV同塔双回输电线路零序阻抗较困难,因此,必须采取以下措施来规避具有双端电源的 110 kV同塔双回输电线路一回线路发生接地故障,另一回线路保护相继动作的情况发生。

3 改进措施

(1)鉴于电网高频保护、纵联差动保护的主要特点,即其保护区只限于本线路,其动作时限不必与相邻元件相配合,而作成全线切除故障都是瞬时的。因此,采用全线速动的高频保护能有效抑制一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作的问题;或采用全线速动的光纤纵差电流保护能更好地解决双端电源 110 kV同塔双回输电线路一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作的问题。

(2)在未采用前述全线速动的快速保护之前,其双端电源的 110 kV同塔双回输电线路的运行方式须作如下调整:即将 110 kV同塔双回输电线路从小电源侧分段运行,并将小电源侧的电站上网线路、纯负荷线路各在一条线路上运行。此种运行方式能暂时解决双端电源 110 kV同塔双回输电线路一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作问题。但有以下不足:一是不能实现上网负荷的就地平衡,即增加了电能损耗;二是小电源侧不能发挥 110 kV同塔双回输电线路互为运行或事故备用的功能,降低了供电可靠性、增大了小电源侧 110kV变电站全站失电的可能性。因此,需尽快对双端电源的 110 kV同塔双回输电线路常规微机保护装置进行改造,配置全线速动的高频保护或纵联差动保护;同时提请设计单位遇与上述电网类似的新建变电站设计时一并考虑配置全线速动的高频保护或纵联差动保护。

作者简介:

陈 平 (1963－),男,高级工程师,工程硕士,从事电力系统继电保护、变电检修管理、电网调度运行管理、供电企业生产技术管理工作。

(**收稿日期**: 2010－04－20)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变压器分接开关烧蚀对绕组变形测试的影响及仿真研究

范海炉[1], 甘德刚[2]
(1.德阳电业局,四川 德阳 618000; 2.四川电力试验研究院,四川 成都 610072)

摘 要:变压器分接开关出现故障甚至烧蚀时会影响变压器绕组的频率响应特性。利用频率响应分析法对某变压器进行绕组变形测试,分析了分接开关烧蚀对绕组变形测试结果的影响。在 Matlab仿真平台上建立了分接开关烧蚀时的绕组等效模型,利用计算机仿真研究了分接开关烧蚀时在不同频率范围内对绕组变形结果的影响程度,为今后分析变压器绕组变形频率响应曲线提供了理论分析手段。

关键词:变压器;分接开关;频率响应分析法;绕组变形;仿真

Abstract: The frequency response characteristic of transformer winding will be affected when faults, especially ablation, occur in tap changer of transformer. The winding distortion test is carried out using the frequency response analysis, and the influence of ablation of tap changer on winding distortion is analyzed. An equivalent model of winding in case of tap changer ablating is established by using Matlab. Simulation is also carried out to reveal the influence under various frequency ranges, and the results provide a theoretical means for winding distortion curve analysis.

Key words: transformer; tap changer; frequency response analysis; winding distortion; simulation

中图分类号:TM403.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2010)04-0029-04

0 前 言

电力变压器是电力系统中最重要的设备之一,其运行状况直接关系着电力系统的安全运行。为适应电网运行和用电设备的需要,变压器需用分接开关进行调压。由于分接开关机构不合理或材质不好或存在其他缺陷,会出现分接开关接触不良或烧蚀等现象,为系统稳定运行带来安全隐患。

当变压器分接开关出现接触不良或烧蚀时,会影响变压器绕组的频率响应特性。由于频率响应分析法具有检测灵敏度高、现场使用方便、可在变压器不吊罩的情况下判断变压器绕组变形等优点,目前已在实际电力生产中得到广泛应用,取得了良好效果[1-4]。理论上认为该方法能够在变压器不吊罩的情况下快速检查出相当于短路阻抗变化 0.2%或者轴向尺寸变化 0.3%的绕组变形现象[5]。结合某变电站发生的一起分接开关烧蚀故障分析了其对绕组变形测试的影响,并在变压器绕组等效模型的基础上对故障进行 Matlab仿真研究,从理论上验证了分接开关烧蚀对绕组变形检测结果的影响,为今后分析变压器绕组变形测试数据提供了理论保障。

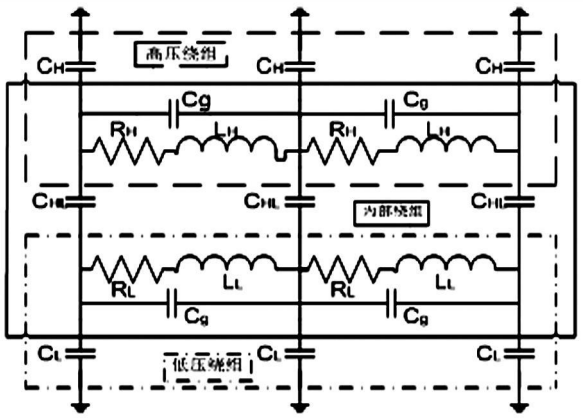
1 频率响应法测试变压器绕组变形的原理

变压器绕组变形是变压器运行过程中的常见故障,据统计由其引起的事故占变压器事故的 25%以上。当频率超过 1 kHz时,每个绕组可视为一个由电阻、电容、电感等分布参数构成的无源线性二端口网络,如图 1所示。该二端口网络是一个电阻电感和电容链,对不同频率的信号源有不同的响应,有其固定的网络特性。当绕组发生了轴向、径向尺寸变化等机械变形现象时势必会改变网络的分布电感、纵向电容以及对地电容等分布参数。因此可以通过测试获得分布参量随频率变化的函数关系来反映变压器绕组结构的特征[6]。

频率响应法是用扫描发生器将一组不同频率的正弦波电压加到变压器绕组的一端然后测量绕组两端的端口特性参数的一种方法。通过分析端口参数的频率图谱特性可以判断绕组的结构特征。如果绕组变形,就会使分布电容和电感发生变化,反映到端口参数的频率图谱也会发生变化。对于同类型的变压器绕组,由于绕组结构的类似性,其测得的频率响应曲线必然具有可比性。因此,故障前后的频率响应

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

曲线能反映出变压器绕组变形的程度,通过对测试结果纵向或横向比较,并综合考虑变压器的运行情况,从而诊断绕组是否存在扭曲、鼓包、位移等变形情况。



其中, C_H、C_L 为单位长度对地分布电容; R为单位长度电阻; C_g 为单位长度分布电容; L为单位长度分布电感

图 1 变压器绕组的等值电路图

2 分接开关烧蚀对绕组变形测试结果的影响

下面结合在四川省发生的一起变压器分接开关烧蚀事例来分析其对绕组变形测试的影响。2008年9月对某变电站 1号主变压器进行绕组变形测试,试验结果如图 2和表 1所示。该变压器为 SL7-8000/36,联结组别: Yd11联结。从高压侧频率响应特性曲线上发现, CA相频率响应曲线与 AB、BC相曲线的拟合很差,相关系数达到严重变形指标[6]。

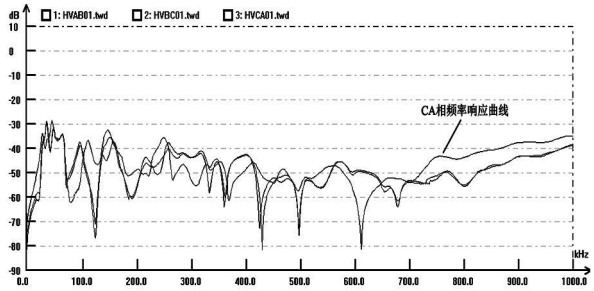


图 2 高压绕组频率响应曲线

表 1 1号主变压器高压绕组相关系数

相关系数	低频段 1～100 kHz	中频段 100～600 kHz	高频段 600～1 000 kHz
BC与 AB	2.20	1.14	2.10
CA与 AB	0.62	0.15	0.40
CA与 BC	0.58	0.17	0.45

由于该主变压器无原始频率响应曲线,所以无法通过变压器前后频率响应特性曲线对比来判断绕组变形程度,只能通过相间比较来判断是否存在绕组变形问题。从图 2中发现 CA相与 AB、BC相频谱曲线在 0～100 kHz之间一致性较好。在 100～600 kHz之间 CA相与 AB、BC相频响曲线相差较大,且 CA相没有明显的波峰和波谷。

通过对该主变压器进行吊芯大修,发现高压绕组 A相分接开关第 1、2档静触头有严重烧黑现象 (绕组变形测试在分接开关 1档),可认为是由于分接开关烧蚀引起绕组频率响应曲线严重变形。

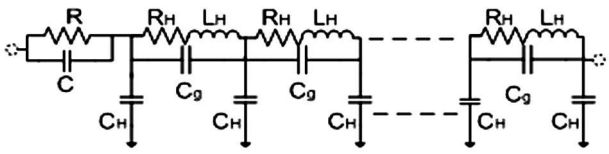
3 分接开关烧蚀影响绕组变形测试结果的理论分析

结合变压器吊芯检查与理论分析,对于带有分接开关的线圈,如果触点烧蚀较大时,在高频小电流通过时,由于油膜的影响,会出现小电流下的接触问题,其等值电路可以认为是一个低阻值电阻和一个电容并联,这样等效电路中的元件参数随之改变,从而影响绕组的整体电路性质。这个电路插在电感电路上时,与各分支电感电容谐振,会产生很多的谐振峰,但由于电阻的存在,无法形成大的谐振。谐振曲线的总轮廓与正常曲线基本重合,从图 2中发现 CA相与 AB、BC相频响曲线在 100～200 kHz之间相差较大, CA相峰值点发生了偏移。并且在 0～600 kHz之间, CA相的频响曲线与其他两相相比,在峰谷处分贝数明显偏小,在 300～700 kHz内 CA曲线分贝数与其他两相明显不同。因此根据分布参数电阻、电感及电容对频率响应特性曲线的影响分析[7], 0～100 kHz频率范围内三相较好的一致性通常表明绕组电感没有发生变化,可以认为是电容和电阻引起了 CA相频响谱曲线与其他两相的差异。电阻的变化导致了曲线的峰谷值点分贝数的改变,而电容的变化则引起了曲线的偏移。

4 分接开关烧蚀情况下的 Matlab仿真研究

为了验证以上分析及现场实际测试情况,利用变压器绕组等效模型[8],对分接开关烧蚀形成的等效电容和电阻模型在 Matlab仿真平台上进行分析,分接开关烧蚀的等效模型可以认为是一个电阻和一个电容并联,如图 3所示。在进行仿真研究时,分别对分接开关烧蚀的等效为电阻、电容以及电阻和电容等情况进行了分析,仿真结果如图 4所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



R为分接开关等效电阻;C为分为接开关等效电容

图 3 分接开关烧蚀时变压器绕组的等值电路图

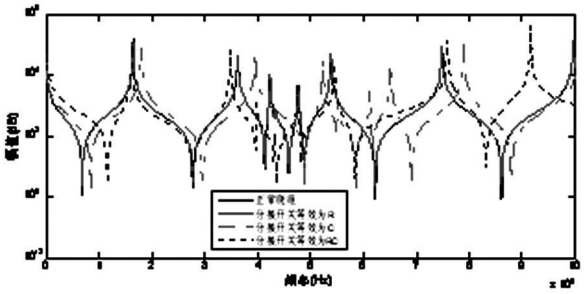


图 4 分接开关烧蚀等效模型的仿真结果

4.1 分接开关等效为电阻时的仿真结果分析

图 5给出了频率在 6.8×104 Hz以及 1.64×105 Hz附近的仿真结果。从图 5中可以看出,当分接开关仅等效为电阻时,电阻会对谐振峰值产生了影响。当仿真模型中存在分接开关等效电阻 R时,仿真曲线比正常绕组略小一些,但其谐振频率并没有发生变化。也就是说,分接开关等效电阻 R对幅频响应曲线只起到衰减的作用,而并不造成谐振频率的偏移。

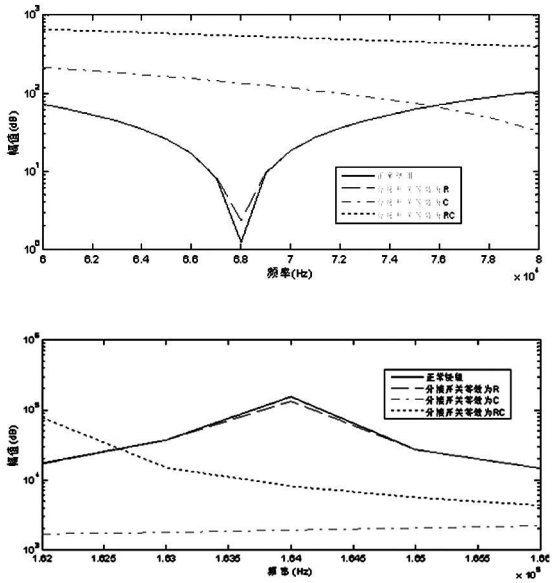


图 5 分接开关等效为电阻时的仿真结果分析

4.2 分接开关等效为电容时的仿真结果分析

图 6给出了频率范围在 0～3×105 Hz以及 4×105～10×105 Hz之间的仿真结果。当分接开关仅等效为电容时,仿真结果表明等效电容 C在高频处对曲线有较大的影响,可理解为频率较低时,电容的容抗很大,电容所在支路相当于开路。

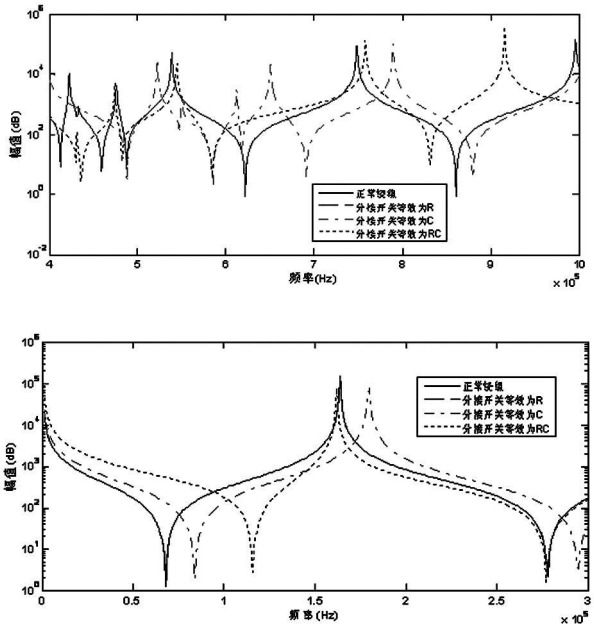


图 6 分接开关等效为电容时的仿真结果分析

4.3 分接开关等效为电阻与电容时的仿真结果分析

从仿真结果图 4中可以看出,在低频段范围内,由于分接开关烧蚀的绕组等效模型中小电阻的存在,使得谐振曲线峰值比正常曲线峰值要小一些,但影响程度不大,两种模型曲线的总轮廓基本重合。而在 100 kHz至 400 kHz频率范围内由于分接开关烧蚀的绕组等效模型中分接开关形成的电容和电阻的影响,使得该模型的曲线的峰值点分贝数产生了变化,谐振曲线发生了偏移,通过对分接开关烧蚀情况下的仿真结果分析,可以清楚地反映分接开关的烧蚀对变压器绕组变形测试结果的影响程度。

5 结 论

通过利用频率响应分析法对某变压器进行绕组变形测试,分析了分接开关烧蚀对绕组变形测试结果的影响。并且在 Matlab仿真平台上建立了分接开关烧蚀时的绕组等效模型,利用计算机仿真研究了分接开关烧蚀等效为电阻及电容时在不同频率范围内对绕组变形结果的影响程度,从理论分析与实际测试结果两个方面验证了分接开关烧蚀对绕组变形产生的影响。因此分析频率响应曲线时应综合考虑其他因素的影响,以免得到误判断的结论。

参考文献

[1] 张孔林.变压器绕组变形测试的研究[J].福建电力与

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电工, 1999, 19(4): 5－7.
[2] 曾雄杰,李福权,等.变压器绕组变形测试的理论分析与现场试验研究 [J].华中电力, 2008, 3(21): 32－35.
[3] 张琛.变压器绕组变形测试方法及应用 [J].变压器, 2007, 44(2): 35－37
[4] 贺春光摘译.在役变压器绕组变形的监测——影响FRA测试的关键因素 [J].国外电力选译, 2006(4): 33－37.
[5] 吴晓东,魏泽民.影响变压器频率响应测试结果的因素分析 [J].电力设备, 2004. 10, 5(10): 60－63.
[6] DL/T 911－2004,电力变压器绕组变形的频率响应分析法 [S].
[7] Syed M. Islam, Gerard Ledwich. Locating Transformer Faults through Sensitivity Analysis of High Frequency Modeling Using Transfer Function Approach[C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Canada, 1996: 38－41.
[8] M. Wang, A. JohnVandermaar, K. D. Srivastava. Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 7(20): 1930－1938.

(收稿日期: 2010－05－13)

(上接第 12页)

性,以确保系统实际运行时的安全性、稳定性及可靠性等,这需要对种类繁多、特性各异的 DER单元及相关单元级控制器进行建模,也需要对微网系统级控制器及管理系统进行建模,建立系统整体运行控制和能量优化管理模型。

4.1 微网单元级

首先需要对微网系统中的各种供热、供电、储能单元及相关单元级控制器进行单元级建模,包括系统各组成单元的数学模型以及可再生能源为初始能源的 DER单元出力的随机模型、储能单元的充放电控制模型等。对以可再生能源为初始能源的 DER单元的能量预测是其中一个重要的方面。准确预测长期、短期甚至超短期太阳能、风能发电单元的发电能力,是合理规划微网系统的基础,也是保证微网系统可靠运行的关键之一。

4.2 微网系统级

微网系统有多种 DER单元的存在,监控系统的控制方式也不完全相同于常规电力系统分层控制的方式,因而需要为各 DER单元间的协调、系统的集成运行开发相应的微网系统级运行控制及能量优化管理软件,如短期甚至超短期的可再生能源的能量预测和负荷需求预测、机组组合、经济调度、实时管理等应用软件。电力电子变换器的控制是微网系统运行控制尤其是动态运行过程中需重点考虑的一个问题。

5 结 论

以上详细介绍了微网的概念、结构、关键性技术,并建立了基于分布式发电的微网系统模型,对微网研究的发展方向提出了可行性的建议。微网技术为分布式发电技术及可再生能源发电技术的整合和利用提供了灵活、高效的平台,是电力产业可持续发展的有效途径,符合当前“节能减排,建设集约型社会”的能源利用方式。

中国应加快发展包括新型能源发电技术、微网运行控制技术和保护协调技术等相关微网关键技术的研究,同时建立示范性工程,研究微网在重要民用设施、防震减灾以及国防工程等方面的应用,开发相应的安全评估和微网规划软件,制订微网并网及自治运行的标准规范。

参考文献

[1] 鲁宗相,王彩霞,等.微电网研究综述 [J].电力系统自动化, 2007, 31(19): 100－107.
[2] 丁明,张颖媛,等.微电网研究中的关键技术 [J].电网技术, 2009, 33(11): 6－11.
[3] 赵宏伟,吴涛涛.基于分布式电源的微网技术 [J].电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 121－128.
[4] Y. Zhu, K. Tomsovic. Development of Models for Analyzing Load－following Performance of Micro Turbines and Fuel Cells[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 1－11.
[5] 雷亚洲, Gordon Lightbody.国外风力发电导则及动态模型简介 [J].电网技术, 2005, 29(12): 27－32.
[6] 王长江.基于 MATLAB的光伏电池通用数学模型 [J].电力科学与工程, 2009, 25(4).
[7] 金晓东,丁明,茆美琴.分布式发电系统中的蓄电池模型 [J].仪器仪表用户, 2008, 15(2): 88－90.

作者简介:

陈亚宁 (1983－),硕士研究生,广西省南宁市供电局。

(收稿日期: 2010－02－03)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大容量 10 kV线路保护整定计算及配合

冯成铭,陈 曦
(德阳电业局,四川 德阳 618000)

摘 要:针对大容量 10 kV线路继电保护的整定计算中存在的用户故障容易顶跳变电站开关、线路瞬时故障跳闸后重合闸不成功、线路无故障试送线路仍然不成功等特殊问题,通过保护方案的调整,避免上述现象的发生。

关键词: 10 kV线路;继电保护;整定计算

Abstract: There are some especial relay protection problems in 10 kV high-capacity lines, such as the fault of users' equipment causing the leapfrog trip of the switch in the substation, the switch reclosing unsuccessfully after the instantaneous fault in the line, and trying to send power unsuccessfully in trouble-free line. The setting calculation of relay protection is improved for 10 kV high-capacity line in order to avoid the above-mentioned phenomenon.

Key words: 10 kV high-capacity line; relay protection; setting calculation

中图分类号: TM772 **文献标志码**: B **文章编号**: 1003-6954(2010)04-0025-04

0 引 言

德阳 10 kV配电线路结构复杂,有的是用户专线,只接一两个用户,类似于输电线路;有的呈放射状,几十台甚至上百台变压器 T接于同一 10 kV线路的各个分支上;有的线路短到几十米,有的线路长到近 10 km;有的线路上配电变压器总容量很小,最大不超过 100 kVA,有的线路上总容量却达到 3~4万 kVA。德阳局大多数 10 kV线路保护只配置三段式电流保护,配置重合闸,无电压及方向元件闭锁,这里提出大容量 10 kV线路保护的整定方案。

1 常规整定方案对涉及 10 kV大容量线路的具体问题

对于 35 kV及以上输电线路而言,一般无 T接负荷,或 T接负荷很少,至多 T接一、两个集中负荷。因此,利用规范的保护整定计算方法,大多数情况都能够计算,一般均满足要求。但对于 10 kV配电线路,线路上一路都 T接配电变压器和用户专用变压器(如图 1),一条 10 kV线路 T接容量有时候上万 kVA,按照常规保护方案进行整定就可能出现如下问题。

(1)用户侧故障时直接顶跳变电站出线开关。按照《继电保护和安全自动装置技术规程》、《3~110 kV电网继电保护装置运行整定规程》,电流 I段定值按躲过本线路末端最大三相短路电流整定,时限整定为 0 s(保护装置只有固有动作时间无人为延时)。按照该原则整定,电流 I段保护范围伸入用户侧,导致变电站开关保护无选择性动作, T接用户故障将引起整条 10 kV线路跳闸,如图 1中的 A、B点发生故障。这是保证了继电保护的灵敏性而牺牲了选择性,后果是造成了整条 10 kV线路全部中止了供电。

(2)变电站 10 kV出线开关检修或故障跳闸后送电不成功。经过检查,线路上确无故障,后经分析因线路检修或者故障跳闸后配电变压器 10 kV丝具和用户 10 kV进线开关仍然在合位,导致电流 I段定值躲不开 T接线路的变压器励磁涌流。常规保护整定方案 10 kV电流 I段保护按照最大运行方式下线路末端三相短路电流来整定的,因此动作电流值往往取得较小,特别是在线路较长(考虑合环带路方式时更长),配电变压器较多时,即系统阻抗较大时,其取值会更小。因此造成一些变电站的 10 kV出线检修或事故隔离故障后送电再跳闸的情况发生。

(3)线路瞬时故障跳闸后重合闸动作不成功。原因还是电流 I段躲不开励磁涌流使变电站开关再次跳闸。容易误以为线路上有永久性故障,耗费大量人力和时间巡线,同时延误了恢复送电时间。

2 调整 10 kV保护整定方案避免上述情况的发生

保护方案调整分为两种情况,第一种针对 10 kV

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

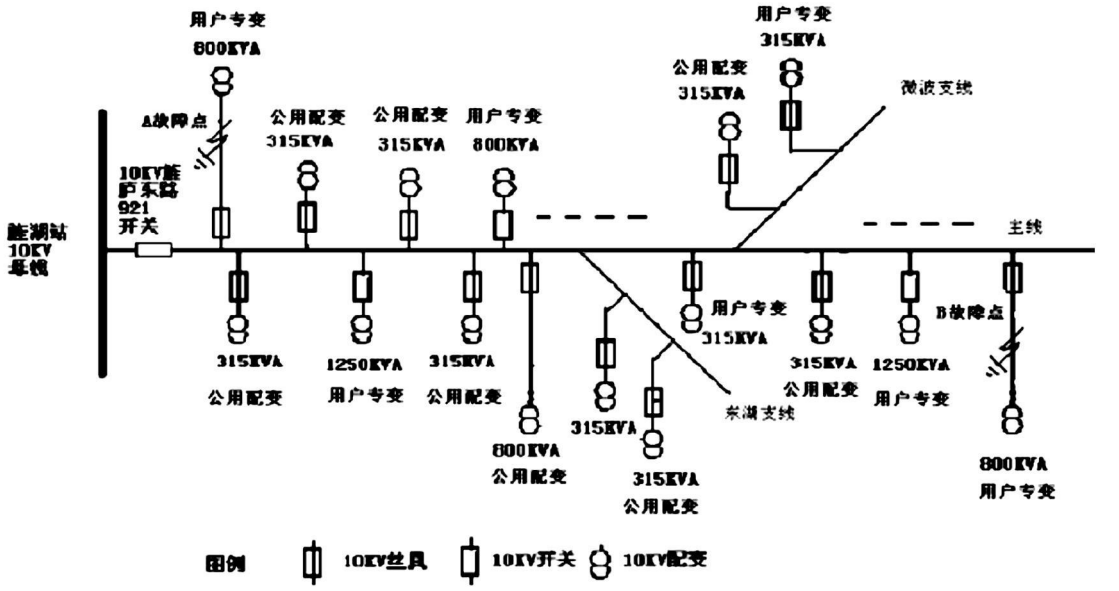


图 1 10 kV旌庐东路接线

短路电流不大,短路电流不会造成变电站开关 TA饱和,第二种针对 10 kV短路电流较大,下面对这 2种情况分别提出整定方案。

(1)在短路电流不大的变电站 10 kV出线开关电流 I段保护增加 0.2 s的时限。电流 II、III段保护仍然按照常规方案整定。

励磁涌流的特征之一就是它的大小随时间而衰减,一开始涌流峰值很大。10 kV线路上一般都是 315～1250 kVA的小型变压器,对于小型变压器,大致经过 7～10个工频周波 (0.14～0.2 s)后,涌流几乎衰减为可以忽略的范围,电流 I段增设 0.2 s时限能躲开涌流,增加该时限的同时,当用户侧有可靠的快速保护 (如电流 I段保护)的情况下能有效地躲过 T接用户故障时的短路电流,避免变电站开关越级跳闸。同时重合闸整定为后加速,加速时间为 0.2 s当线路为瞬时故障,0.2 s的时间可以确保躲开线路励磁涌流,重合成功。同时避免了变电站 10 kV出线开关检修或故障跳闸隔离故障后送电不成功。

该方法会增加故障切除时间,适用于短路电流不是很大,不易造成 TA饱和的 10 kV线路 (对于有 TA饱和情况,保护应在短路开始的 1/4周波前动作)。因此,只要满足短路电流不造成 TA饱和,适当地增加 0.15～0.20 s的时限可以很好地避免由于线路中励磁涌流造成的保护装置误动作。

(2)短路电流较大的变电站调整电流 I段保护定值。

对于短路电流较大的变电站,如德阳电业局的 110 kV旌湖站、德阳站,根据《德阳地调直调电网 2009年度继电保护整定运行方案》,德阳站短路电流高达 28.52 kA,达到德阳站公用线路 TA额定电流 600 A的 47倍,旌湖站短路电流 24.60 kA,达到旌湖站公用线路 TA额定电流 600 A的 41倍,根据相关 TA饱和度的文献资料和厂家资料,饱和电流为额定电流的 20～30倍,在允许的短路电流内,TA能可靠的进行二次变流,保护能可靠动作。如果短路电流达到饱和,1/4周波后 TA二次电流将发生畸变,不能可靠进行二次变流,造成保护距动。110 kV德阳站和旌湖站 10 kV短路电流均超过该值,如果 I段增设 0.2 s时限可能造成 TA饱和保护不出口引起主变压器越级跳闸,造成 10 kV母线失压的严重后果,因此,在短路电流较大的变电站不能采用电流 I段增设 0.2 s时限的方法。

这里提出将电流 I段定值按照躲开线路上变压器励磁涌流来整定的方案,保证最小方式下变电站开关出口处短路有足够的灵敏度,同时满足对 TA饱和度的要求。

以德阳局市区 110 kV旌湖站 10 kV旌庐东路为例进行电流 I段的整定,该线路 TA为 600/5,从客户服务中心提取的资料,线路总容量为 2万 kVA,10 kV旌庐东路主线 2.88 km,架空线型号为 JKLYJ240,东湖支线 1.2 km,架空线型号为 JKLYJ240线路,微波支线 0.7 km,架空线型号为 LGJ120线路。阻抗图如图 2。

1)电流 I段定值整定计算按照躲开变压器最大励磁涌流整定。变压器励磁涌流最大可达到额定电流的 6～8倍,计算如下。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

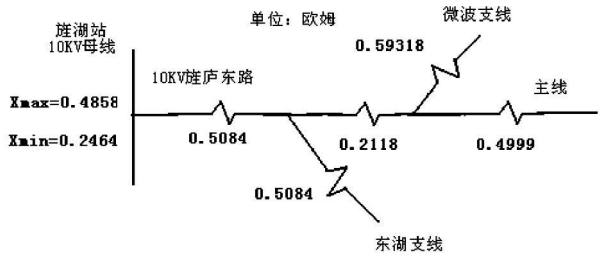


图 2　10 kV旌庐东路阻抗图

额定电流 =20 000 kVA/(10.5 kV×1.732)
=1.099 kA

最大励磁涌流 =额定电流 ×(6～8)
=1.099 kA×(6～8)
=6.598 kA—8.798 kA

保护一次整定值取 8.798 kA。

2)电流 I段灵敏度校验要求满足小方式下变电站开关出口处短路有足够的灵敏度，根据德阳电调〔2009〕36号文中德阳电力系统 2009年各变电站母线归算阻抗图计算最小运行方式下出口短路电流，

最小出口短路电流 =0.866×(10.5/1.732/0.4858)
=10.806 9 kA

灵敏度 =10.806 9 kA/8.798 kA=1.2>1，满足要求。

3)电流 I段 TA饱和度校验根据相关 TA饱和度的厂家资料和文献资料，饱和电流为额定电流的 20～30倍，10 kV旌庐东路 TA为 600/5，饱和电流 =600 A×(20～30)=12～18 kA

整定电流 I段一次值 8.798 kA小于 TA饱和电流 12 kA。

结论：满足 TA饱和电流控制的要求。

按照上述整定，可以有效地躲开励磁涌流对保护的影响，提高线路重合闸成功率，不会出现检修后线路开关送不上。

4)电流 I段保护范围进行计算

最小运行方式下电流 I段保护范围计算：

保护范围百分比 =(0.866×6.06/8.798—0.4858)/(0.4237×2.88)=9.608%

最大运行方式下电流 I段保护范围计算：

保护范围百分比 =(0.866×6.06/8.798—0.2464)/(0.4237×2.88)=30.39%

通过计算 10 kV旌庐东路电流 I段保护范围在小方式下为线路的 9.608%，大方式下为 30.3%。也就是说，I段伸入用户侧设备的范围大幅度缩小，电流 I段保护可以躲开大部分用户故障，当用户故障时，变电站开关电流 I段不启动，避免直接跳变电站开关；当用户故障而用户侧的保护因故无法切除时，再由变电站开关的电流 II、III段切除，实现了保护的选择性。电流 II、III段的整定按照常规整定原则进行整定，阶梯时限在微机保护中△ t取 0.3 s。

3　重合闸与保护的配合

重合闸前加速保护定义：当线路发生故障时，靠近电源侧的保护首先无选择性的瞬时动作于跳闸，然后再借助自动重合闸来纠正这种非选择性的动作。优点是切除故障快。

重合闸后加速保护定义：当线路故障时，首先按正常的继电保护动作时限有选择性的动作于断路器跳闸，然后 ZCH装置动作，将断路器重合，同时将过电流保护的动作时限由后加速继电器解除，当 ZCH作于永久故障线路时过电流保护将无时限地动作于断路器跳闸。

根据重合闸加速的定义，线路故障跳闸后，如果整定为重合闸后加速，跳闸后加速电流 II、III段 0 s动作将使保护躲不开励磁涌流，导致重合不成功；如果是整定为前加速，线路发生故障时，加速电流 II、III段动作，保护无选择性跳，然后靠重合来恢复对正常设备的供电，虽然能较短时间内恢复 10 kV供电，但重合闸动作恢复供电前的 1～2 s内线路出现失压，现在配电网中大多数设备 (含用户设备)低压侧开关带失压脱扣，将使用户断电，需人工将开关合上，影响及时恢复供电。

根据上述对重合闸的分析，提出将 10 kV大容量线路重合闸设置为后加速，加速 II、III段后的时限能躲开变压器励磁涌流，推荐值 0.2 s。如果线路为瞬时故障，重合闸可以躲开励磁涌流重合成功，如果为永久性故障，加速 II、III段可以在 0.2 s的时限切除，减少短路电流时的持续时间。电流 II、III段时限整定为 $t_2=t_1+\triangle t$控制在 0.6 s内。

4　小　结

通过保护整定的调整和重合闸的配合，可以实现如下目标。

(1)大幅度降低用户故障直接顶跳变电站开关的可能性。

(2)避免了变电站 10 kV出线开关检修和故障

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

跳闸隔离故障后送电不成功。

(3)提高了线路重合闸成功率。

(4)满足继电保护速动性、灵敏性、选择性、可靠性的要求。

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:

冯成铭 (1980－),男,四川德阳电业局调度中心,本科,从事电网调度运行与继电保护整定计算工作。

(**收稿日期**: 2010－04－06)

(上接第 24页)

同时,流过越甘 II回 152开关的故障电流反相,由原反方电流变为正方电流,且其电流值由 2.29 A(故障后 60 ms期间电流值)突增至 5.77 A,达到 I段定值 4.8 A,其零序 I段动作在故障后 132 ms时出口跳闸,如图 3所示。

越甘 II回 162开关在故障后 60 ms期间为正向电流,最大 3.18 A,未达 12.5 A定值;在越甘 I回 151开关跳闸后,其电流变为反方向,最大为 7.69 A。因此,越甘 II回 162开关保护不具备动作的条件。

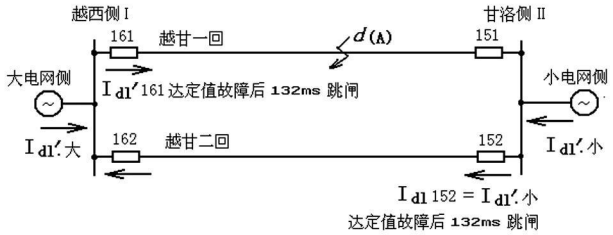


图 3 110 kV越甘 I回故障后 110 kV甘洛变电站 151开关跳闸后的故障电流分布图

2.3 保护动作行为评价

从以上分析可看出,此次事故故障点在 110 kV越甘 I回线路上,但越甘 II回 152开关也相继动作跳闸。从保护整定校验软件中模拟上述故障:双回线路一回线单相接地故障,另一回线从甘洛侧提供给故障点的一次电流只有一百几十安,而当故障线路的一侧开关先于另一侧跳闸后,非故障线路提供给故障点的一次电流就达几百安 [输电线路每一回路每单位长度的一相等值零序电抗理论近似值:有架空地线单回线路 $X_0=(2\sim3)X_1$、有架空地线双回线路 $X_0=(3\sim4.7)X_1$]。这种情况是同塔双回输电线路零序阻抗变化所致。因此,零序阻抗对具有双端电源的两端共母线的同塔双回 110 kV线路配置常规微机保护的动作行为影响较大。由于输电线路所经地段的大地电阻率一般是不均匀的,因此,同塔双回 110 kV线路的零序阻抗要通过实测才能得到准确的数值。而在现实工作中实测 110 kV同塔双回输电线路零序阻抗较困难,因此,必须采取以下措施来规避具有双端电源的 110 kV同塔双回输电线路一回线路发生接地故障,另一回线路保护相继动作的情况发生。

3 改进措施

(1)鉴于电网高频保护、纵联差动保护的主要特点,即其保护区只限于本线路,其动作时限不必与相邻元件相配合,而作成全线切除故障都是瞬时的。因此,采用全线速动的高频保护能有效抑制一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作的问题;或采用全线速动的光纤纵差电流保护能更好地解决双端电源 110 kV同塔双回输电线路一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作的问题。

(2)在未采用前述全线速动的快速保护之前,其双端电源的 110 kV同塔双回输电线路的运行方式须作如下调整:即将 110 kV同塔双回输电线路从小电源侧分段运行,并将小电源侧的电站上网线路、纯负荷线路各在一条线路上运行。此种运行方式能暂时解决双端电源 110 kV同塔双回输电线路一条线路发生接地故障、另一条线路保护相继动作问题。但有以下不足:一是不能实现上网负荷的就地平衡,即增加了电能损耗;二是小电源侧不能发挥 110 kV同塔双回输电线路互为运行或事故备用的功能,降低了供电可靠性、增大了小电源侧 110kV变电站全站失电的可能性。因此,需尽快对双端电源的 110 kV同塔双回输电线路常规微机保护装置进行改造,配置全线速动的高频保护或纵联差动保护;同时提请设计单位遇与上述电网类似的新建变电站设计时一并考虑配置全线速动的高频保护或纵联差动保护。

作者简介:

陈 平 (1963－),男,高级工程师,工程硕士,从事电力系统继电保护、变电检修管理、电网调度运行管理、供电企业生产技术管理工作。

(**收稿日期**: 2010－04－20)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于欠补偿原理的电力电缆串联谐振耐压分析

杨新春,李　化,杨　帆
(成都电业局修试所,四川 成都　610041)

摘　要:通过对串联谐振的基本电路分析和现场试验得出,在电抗器总电抗值不变的情况下,利用一部分电抗器对试品补偿,谐振频率不变,但变频电源的输出电流和输出容量将大大减小。

关键词:串联谐振;电力电缆;变频电源;电抗器;欠补偿

Abstract: By analyzing the fundamental circuit of the series resonance and the field test, the conclusion is obtained that when the total value of the reactors remains the same, the specimen equipment is compensated by some of the reactors, the resonance frequency is unchanged, but the output current and the output capacity of the variable-frequency power sources decrease sharply.

Key words: series resonance; power cable; variable-frequency power sources; reactor; under-compensation

中图分类号:TM864　**文献标志码**:B　**文章编号**:1003-6954(2010)04-0036-03

0　引　言

对如电力电缆和 GIS等大容量试品,若用常规试验变压器做耐压试验,不是电源容量不够,就是试验设备笨重且体积庞大,运输不便且给现场场地带来困难。串联谐振装置利用额定电压较低的试验变压器,可以得到较高的输出电压,用小容量的试验变压器可以对大容量的试品进行交流耐压试验。然而,当容量增大时,试品容抗减小,谐振时流经试品的电流增大,整个串联回路的电流增大,变频电源的输出电流增大,可能会超过变频电源的额定电流,容量瓶颈使得变频电源装置不能满足试验要求。理论与实践证明,通过对试品进行并联补偿,形成基于欠补偿原理的串联谐振电路可以解决这一难题。

1　试验原理分析

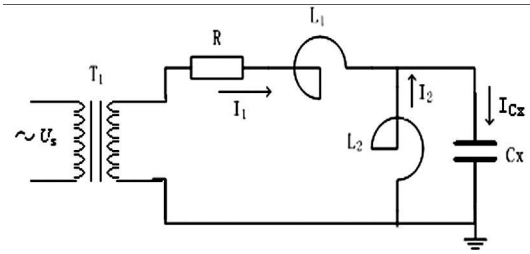
基于欠补偿原理的串联谐振试验一次回路接线如图 1所示,其中 U_s 为变频电源, L_1 为串联电抗器, L_2 为补偿电抗器, C_x 为试品等值电容, R为回路等值电阻。

1.1　谐振频率

电路的谐振频率可通过阻抗计算,回路的阻抗为

$$Z = R + j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2 / j\omega C_x}{j\omega L_2 + 1/j\omega C_x}$$

$$= R + j\frac{\omega L_1 + \omega L_2 - \omega^3 L_1 L_2 C_x}{1 - \omega^2 L_2 C_x} \quad (1)$$



T_1 为励磁变压器; R为回路等效电阻;
L_1、L_2 为电抗器; C_x 为试品

图 1　接线原理图

当阻抗公式 (1)虚部为零时,阻抗最小,电路发生串联谐振,即

$$\frac{\omega L_1 + \omega L_2 - \omega^3 L_1 L_2 C_x}{1 - \omega^2 L_2 C_x} \quad (2)$$

当 $\omega \neq 1/\sqrt{L_2 C_x}$,即并联补偿支路不与试品发生并联谐振,且 $\omega \neq 0$时

$$\omega = 1/\sqrt{L_{eq} C_x} \quad (3)$$

其中, $L_{eq} = L_1 L_2 /(L_1 + L_2)$

当串联谐振时,电路的频率为

$$f = 1/(2\pi \sqrt{L_{eq} C_x}) \quad (4)$$

该谐振频率与电抗值相等的纯串联谐振回路的谐振频率一致,说明当回路中电抗器电感总值保持不变时,并联欠补偿串联谐振电路与纯串联谐振电路的谐振频率不变,即补偿并不影响谐振频率。但欠补偿回路有两个谐振点,欠补偿支路与试品支路有可能产

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生并联谐振,因此,欠补偿回路多了一个谐振点,此点谐振频率为

$$f = 1/(2\pi \sqrt{L_2 C_x}) \tag{5}$$

由于 $L_{eq} < L_2$,故 $f_2 < f$,故欠补偿之回路与试品的并联谐振频率小于发生串联谐振的频率。

1.2 电源的输出电流、电压及容量

在谐振回路中,试品耐压电压一定,故试品电流 I_{Cx}不变。并联电抗器 L_2补偿了部分电容电流,补偿电流为

$$I_2 = \frac{I_{Cx}}{\omega_0^2 L_2 C_x} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} I_{Cx} \tag{6}$$

由于是欠补偿, $I_2 < I_{Cx}$,因此 L_2与被试品组成的并联回路仍然呈容性,与 L_1再构成串联谐振回路口。谐振时,串联支路电源输出电流为

$$I_1 = I_{Cx} - I_2 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_{Cx} \tag{7}$$

可见,与纯串联谐振回路相比,通过欠补偿降低了励磁变的输出电流。

谐振时,电源的输出电压和输出容量分别如下。

$$U_s = \frac{R I_{Cx}}{\omega_0^2 L_1 C_x} = \frac{L_2 R I_{Cx}}{L_1 + L_2} \tag{8}$$

$$S = U_s I_1 = \frac{R I_{Cx}^2}{\omega_0^4 L_1^2 C_x^2} = \frac{L_2^2 R I_{Cx}^2}{(L_1 + L_2)^2} \tag{9}$$

由于回路电阻 R基本不变,谐振时,电源的输出电压和输出容量都会随 L_1的增加而降低,随 L_2的增加而增加。

1.3 谐振电路的品质因素

电路在串联谐振时,电路中电抗器和试品吸收等值异号的无功功率,致使全电路吸收的无功功率为零,即能量在试品和所有电抗之间相互转换,完全补偿。即

$$\frac{1}{2} C U_{Cxm}^2 = \frac{1}{2} L_1 I_{1m}^2 + \frac{1}{2} L_2 I_{2m}^2 \tag{10}$$

根据品质因素的定义

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{谐振时电路中的电磁场总能量}}{\text{谐振时一周期内电路中损耗的能量}}$$

$$= 2\pi \times \frac{\frac{1}{2} C U_{Cxm}^2}{T_0 R I_1^2}$$

$$= \frac{\omega_0^2 C_x L_1^2}{R}$$

$$= \frac{L_1^2}{R L_{eq} \sqrt{L_{eq} C_x}} \tag{11}$$

其中, $U_{Cxm} = \sqrt{2}\omega_0 L_1 I_1$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_x}}$$

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

如定义准品质因素 Q'为试品电压与电源电压之比,则准品质因素 Q'可表示为

$$Q' = \frac{\omega_0 L_1}{R} = \frac{L_1}{R \sqrt{L_{eq} C_x}} \tag{12}$$

而在电抗总值相等的纯串联谐振电路中,品质因素为

$$Q = \frac{L_{eq}}{R \sqrt{L_{eq} C_x}} \tag{13}$$

可见,在并联欠补偿串联谐振电路中,品质因素已经不再反映试品电压与电源输出电压之比,它只能反映一个谐振振荡周期内能量的损失值。并联欠补偿串联谐振电路中试品的电压与电压比值可用准品质因素表示,且准品质因素为电抗总值相等,纯串联谐振电路品质因素的 L_1/L_{eq}倍。可见,通过补偿提高了试品电压与电源电压之比的倍数。

2 实例分析

2.1 试品及试验设备参数

试品为 $YJLW_{02} - 1 \times 1200 mm^2 - 127/220$ 型 XLPE电力电缆,长度为 8.67 km。电缆电容量 0.181 μF/km,单相电缆总电容量 1.57 μF,现场试验电压 180 kV,试验时间 1 h。

采用调频式谐振方式对电缆进行交流耐压试验,变频谐振试验装置的相关参数为:①变频柜单相输出电压 0～350 V,额定输出电流 0～857 A,额定输出功率 300 kW,频率调节范围 25～300 Hz;②励磁变调频范围 25～300 Hz,输出容量 300 kW,最大输入电流 833 A,最大输出电流 74 A;③电抗器额定电压 250 kV,额定电流 25 A,单台电感值 54 H,共有 3台。

2.2 试验方案

试品电容量已知,由于谐振频率须在 25～300 Hz的范围内,根据式(4)可算出:0.18H $< L_{eq} <$ 25.8H,又根据单台电抗器电抗值要求,只有当 $L_{eq} = 54/3$ H时才能满足频率要求。此时,谐振频率为 30.0 Hz。

电抗器可以有以下三种组合方式:①三台电抗器并联后与试品串联,即三并联;②由两台电抗器并联

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后与试品串联,另一台与直接试品并联,即两串一并;③一台电抗器与试品串联,另两台都与试品并联,即一串二并。由于并联支路的补偿作用,励磁变压器在以上三种情况下的输出电流和容量将不同。根据式(6)和式(7),可得出在以上三种情况下支路电流的分布情况如表 1所示。

表 1 电抗器不同组合时支路电流分布

电抗器组合方式	三并联	二串一并	一串二并
试品电流 I_{Cx}/A	53.3	53.3	53.3
并联补偿电流 I_2/A	0	17.7	35.4
输出电流 I_1/A	53.3	35.6	17.9

由表 1可以看出,随着并联支路的增加,并联补偿电流随之增加,励磁变压器的输出电流随之大大减小,节省了电源容量。又考虑到并联支路补偿过多接近全补偿,此时并联谐振频率与串联谐振频率很接近,可计算出仅相差 5.5 Hz试验操作不易控制,影响电路谐振的稳定性,故选用第二种方案较优。

2.3 试验结果

现场应用二串一并的方案,成功地对该电缆进行串联谐振耐压试验,现场试验数据采集如表 2所示,

表 2现场试验数据

相别	A相	B相	C相
实测谐振频率/Hz	31.6	31.6	31.6
理论输出电流 I_1/A	39.3	39.3	39.3
实测输出电流 I_1/A	42.3	40.1	39.3
准品质因素	68.5	71.9	73.6

由表 2可看出,谐振频率、电源输出电流的理论值和实测值很接近,其误差可认为是现场电场干扰、试验回路杂散损耗等诸多实际因素的影响结果。而准品质因素较高,根据式(12)、(13)该准品质因素值应为纯串联谐振时品质因素的 3倍,根据表 2可算出纯串联谐振时品质因素值在 23～25之间,根据文献[6,8],符合现场试验品质因素值在 30以内的规律。

3 结 论

(1)在串并支路总电抗值不变的情况下,并联补偿串联谐振频率不变,但多增加了一个并联谐振点。

(2)随着并联补偿电抗的增加,谐振时电源的输出电压、电流、容量均减小,降低了现场试验对电源的要求。

(3)欠补偿串联谐振电路的品质因素不再反映试品电压与电源输出电压的比值,可引入准品质因素来描述试品电压与电源输出电压的比值,准品质因素为电抗总值相等纯串联谐振电路品质因素的 L_t/L_{eq}倍。

参考文献

[1] 周守昌. 电路原理[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[2] 刘玮,肖勇. 220 kV交联超长电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术,2008,34(4):831－832.

[3] 陶劲松,席成员,贺景亮,等. 湖南 110 kV长距离电缆耐压试验[J]. 高电压技术,2002,11(28):48－49.

[4] 李卫东. 一次调频谐振耐压装置的成功应用[J]. 高压电器,2005,5(41):388－389.

[5] 陈金祥,林一弘,徐升昊. 用调频式串联谐振装置对 GIS进行现场耐压试验[J]. 高压电器,2005,4(39):76－78.

[6] 闫永利,闫军. 工频串联谐振耐压装置现场试验参数配合的计算及调整[J]. 高压电器,2004,5(40):391－393.

[7] 陈忠. 串联谐振耐压试验的现场问题及解决方法[J]. 电网技术,2006(Z1):205－207.

[8] 陈崇源,金玮. 串联谐振装置的调谐分析[J]. 变压器,2002,4(39):20－21.

[9] 慕世友,刘民,冯玉柱,等. 高压交联电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术,2001,104(27):42－43.

[10] 姚翔,陈林,李海生. 高压交联电缆及附件的现场变频谐振试验[J]. 高电压技术,2005,31(11):61－62.

作者简介:

杨新春(1982－),男,汉族,四川资阳人,助理工程师,从事电气试验工作。

(**收稿日期**:2010－04－06)

(上接第 20页)

成并投入使用。101/104规约也已在该局多个变电站和集控中心应用,已成为本局的一个行业标准。到目前为止的运行情况表明,完全达到了预期要求,数据传输的可靠性、及时性、完整性得到极大提高,同时也为将来的电网二次系统信息模型的精细化描述、智能化管理以及保护管理信息系统的建设和其他高级系统功能的应用打下了坚实的基础。

参考文献

[1] DL/T 667－1999,远动设备及系统 第 5部分:传输规约 第 103篇:继电保护设备信息接口配套标准[S]. 北京:中国电力出版社,1999.

[2] DL/T 634.5104－2002,远动设备及系统 第 5104部分:传输规约 采用标准传输协议子集的 IEC 60870－5－101网络访问[S]. 北京:中国电力出版社,2003.

作者简介:

李明生(1971－)男,重庆南川人,课题负责人。

(**收稿日期**:2010－01－19)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

内悬浮抱杆的优化设计

王光祥,吴开贤,景文川,彭宇辉
(四川电力送变电建设公司,四川 成都 610051)

摘 要:经过不断的探索优化设计,四川电力送变电建设公司成功研制了一种适用于山地段特高压铁塔或重冰区铁塔组立、组装高度大、允许起吊负荷大、截面尺寸小、相对重量轻,方便运输和吊装的圆管式内悬浮抱杆;该抱杆采用了圆钢管作为主、辅材,提高了抱杆的受力稳定性能;采用了大型有限元分析软件钢结构单元优化设计,减小了抱杆截面尺寸与重量,便于山区运输和使用;抱杆结构设计中采用直角扇形法兰盘及导向管组合连接方式,连接可靠,方便组装。

关键词:特高压;铁塔;组立;圆管式;内悬浮;抱杆

Abstract: Through the continuous explorations and researches, Sichuan Electric Power Transmission & Transformation Construction Company has successfully developed a special internal-suspension tube-style gin pole, which is suitable for steel tower erection of ultra high-voltage and heavy ice covered area in hilly area with the features of high assembling height, large lifting loads, small section size, relatively light weight and easy for transporting and lifting. The steel tube is adopted as its main and auxiliary materials which improves the force stability of the pole. Meanwhile, the optimization design of steel structure unit adopts the finite element analysis software, thus reduces the weight and the size of cross section of the pole, which is convenient for transporting and usage in mountain areas. In the structure design of the pole, it also adopts the rectangular fan-shaped flange and the combined connection style of the guide pipe which can be connected reliablely and assembled easily.

Key words: ultra-high voltage; steel tower; assembly; tube style; internal suspention; gin pole

中图分类号:TM753 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0046-02

随着输电线路电压等级的提高,铁塔的结构更为复杂,塔材、单基重量以及塔高不断增加,组塔施工难度随之增大,各施工单位积极开展技术创新,探索改进组塔技术和优化设计组塔新技术,并在施工实践中检验、完善,形成了不少切实可行的组塔技术。

四川电力送变电建设公司立足自身的施工特点,仍然从轻便、紧凑、利于组装、结构简单、便于掌握的内悬浮式抱杆组塔技术出发,充分挖掘内悬浮式抱杆在材质、结构型式、连接方式、重量、尺寸等方面的潜力,对其进行优化设计,以期实现内悬浮式抱杆长度较长、断面尺寸及重量相对不大的前提下大幅度提高承载能力,同时尽量降低抱杆的购置使用成本。

1 内悬浮抱杆的长度确定

此次优化的主要目的是为了解决山地段特高压铁塔的组立问题,根据对山地段特高压铁塔的参数分析后,将抱杆的长度配置确定为 38 000 mm。

2 内悬浮抱杆主材截面形式选择分析

应用范围最广的组立铁塔用内悬浮抱杆形式为格构型,其断面一般为正方形,其主材主要有管材式和等边角钢式,到底采用什么形式更加合理,则做了如下分析。

2.1 不考虑风荷载影响的选择分析

为方便方案的比较,抱杆的截面按照等截面考虑,假定一系列规格的主材 (等边角钢式及圆管式,等边角钢边长与圆管直径相等且截面面积相等)组成格构型抱杆,计算其单根主材对自身重心轴线的惯性矩 (J_x)、抱杆单根主材截面面积 (F)、单肢主材的重心距离 (Z_0),并分别求取长细比分别为 90、100、110、120时对应的抱杆断面边宽 C,计算结果及相关参数一并列入表 1。

从表 1可以看出:当抱杆的长细比、主材截面面积和及材质相等,即抱杆承载力相等时,采用圆管时抱杆的断面边宽值大。因此,在不考虑风荷载影响的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 不同规格主材的断面参数等及对应抱杆断面边宽值(此处只展示了部分数据)

主材规格	J_x /mm^4	Z_0 /mm	F /mm^2	l/mm	λ	C /mm
L70×6	377 700	19.5	814.7	38 000	90	924.6
Φ70×3.927	446 151	35.0	814.7	38 000	90	955.4
L70×6	377 700	19.5	814.7	38 000	100	835.8
Φ70×3.927	446 151	35.0	814.7	38 000	100	866.6
L70×6	377 700	19.5	814.7	38 000	110	763.2
Φ70×3.927	446 151	35.0	814.7	38 000	110	793.6
L70×6	377 700	19.5	814.7	38 000	120	702.6
Φ70×3.927	446 151	35.0	814.7	38 000	120	733.4

前提下,从实用性和材料用量等角度看均不宜采用圆管式。

2.2 考虑风荷载影响的选择分析

以上的分析结果显示,抱杆主材截面形式不宜采用圆管式,但此结论并没有考虑风荷载的影响,《特高压铁塔组立施工导则》上规定:选择抱杆时应考虑风载荷的影响。

然而,抱杆作为起重工具,如何计算风荷载的影响,尚无标准可依。为此,优化设计时引入了有限元软件作为受力分析手段,将风荷载按均布荷载考虑,假定在同一地点使用抱杆,抱杆迎风面积为定值,风速为 10 m/s(规程 DL 5009.2—2004规定,6级及以上大风时,不得进行杆塔组立作业;同时在 DL 5009.2—2004附录 B的表 B.12中给出了 5级风的最大风速为 10.7 m/s),然后在有限元软件里建立了抱杆受力模型(主辅材采用角钢和圆管其抱杆所受风荷载存在约 1.6倍的关系,其他工况按相同考虑),软件计算部分结果见表 2所示。

表 2 抱杆计算对照表(考虑风荷载)

	圆管式	等边角钢式
抱杆规格 /mm	750×750×38 000	750×750×38 000
主材 /mm	Φ70×4.588 27/Q345	L70×7/Q345
主材截面面积 /mm^2	942.4	942.4
辅材 /mm	Φ30×1.988 74/Q345	L30×3/Q345
辅材截面面积 /mm^2	174.9	174.9
稳定安全系数	4.03	3.11

从表 2可以看出:考虑风荷载之后,在抱杆断面边宽、主辅材迎风面积和截面面积、受力工况相等的情况下,主辅材采用圆管式具有明显优势,因此宜将抱杆主、辅材截面形式确定为圆管式。

3 抱杆主、辅材材质选择

对于抱杆的材质选择,优化设计时从不同材质抱杆的容许中心压力和重力角度进行了分析。

3.1 不同材质抱杆容许中心压力分析

优化设计时分别对长细比为 90～120材质为 LY12和 Q345的抱杆容许中心压力进行分析后得出:当抱杆的长细比、主材截面面积等参数相等时,采用材质为 Q345的抱杆的容许中心压力是采用材质为 LY12的抱杆的容许中心压力的 2.76～3.19倍。此次抱杆优化设计是针对特高压铁塔的组立,单件最大起吊重量相对常规塔型而言有大幅度提高,所以抱杆的材质选取 Q345对抱杆的承载力大幅度提高很有优势。

3.2 不同材质抱杆主材重力的分析

抱杆的断面宽度大于 900 mm后对运输和施工都很不方便,但抱杆的断面宽度要小于 900 mm,则抱杆的长细比就比较大,然而经分析当抱杆长细比为 90～100,在相等承载条件下,LY12铝抱杆主材重力约为 Q345钢抱杆主材重力的 0.95～1.1倍,当抱杆的长细比大于 98.2时,LY12铝抱杆的主材重力已经大于 Q345钢抱杆的主材重力,并且 LY12的材料价格远高于 Q345钢的材料价格,因此,采用 Q345钢抱杆不但购置成本低,运输成本低,其使用寿命也较 LY12铝抱杆长得多(但需要增加防锈除锈等保养费用),综合技术经济比较,此次优化设计的抱杆材质采用 Q345才经济合理。

从以上两个角度分析此次优化设计的抱杆材质宜选择 Q345。

4 抱杆断面形式选择

国内组立铁塔用抱杆的断面形式均是正方形断面,国外也有采用等边三角形断面的,经采用与 2.1中相似的原理分析得出在相等长细比及承载力条件下,采用等边三角形断面的抱杆边宽要比采用正方形断面的抱杆边宽大得多,多数情况断面的边宽值都大

(下转第 73页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 刘文斌,杜波,胡燕花. 水轮机调速器的运行与技术改造 [J]. 水力发电, 1999(9): 58－60.
[5] 张春丽,李咸善,胡翔勇,等. 水火电联合系统中水轮机及其调速系统对低频振荡的影响 [C]. 湖北省机械工程学会青年分会 2006年年会暨第 2届机械学院院长 (系主任)会议论文集 (下), 2006.
[6] 李光辉,余波,樊玉新,等. 基于可编程自动化控制器的水轮机调速器初探 [J]. 水力发电, 2007, 33(2): 60－62.

(收稿日期: 2010－04－01)

(上接第 47页)

于 900 mm,最大的还超过了 1 100 mm,这对于运输和使用很不方便,只有少数情况断面的边宽值小于 900 mm,但其长细比均接近 120,根据材料的变形特点可知,长细比越大,抱杆的横向变形增长越快,因此抱杆断面形式不宜采用等边三角形。

5 连接方式的设计

经过以上的分析,已经确定了采用钢管作主辅材,分段抱杆间主材的对接连接方式自然选择成熟的法兰盘连接方式,为保证提升抱杆时腰环的正常使用和连接方便且可靠,将其法兰盘设计成直角扇形型式,并且增加设置导向管,使得组装更加方便,连接可靠。主材与辅材的连接采用焊接连接,以避免销钉连接方式易发生在抱杆使用中被剪断而又不易发现的安全隐患。

6 有限元软件的应用

优化设计过程中采用了有限元软件作为计算手段,在 Midas2006有限元软件平台下建立抱杆立体受力模型,交由软件进行了大量的受力分析计算。然而 Midas2006有限元软件的操作是很复杂的,主要是建立抱杆的立体受力模型,不利于现场技术人员掌握,因此还开发了抱杆立体受力模型软件,只要输入受力工况的基本参数即可自动生成抱杆立体受力模型,然后在 Midas2006有限元软件里载入模型文件,即可计算抱杆的杆件应力和抱杆稳定安全系数,软件计算界面之一见图 1所示。

7 结 语

本项目通过对抱杆主辅材截面型式、材质和抱杆结构等方面的经济技术比较,采用大型有限元分析软件对钢结构单元进行设计优化,合理减小了抱杆截面

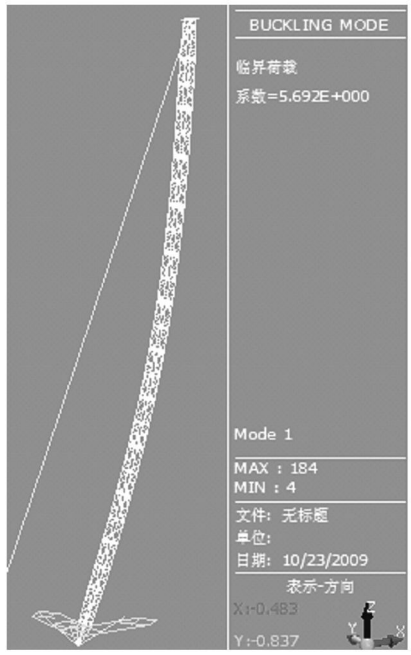


图 1 软件计算界面之一

尺寸与重量,提高了抱杆的承载能力,已在 ±800 kV向上线 (向家坝－上海)和 ±500 kV德宝 (德阳－宝鸡)直流工程以及 ±500 kV葛沪 (葛洲坝－上海)直流改造等工程广泛应用,提高了特高压铁塔组立施工效率,成效显著,并于 2010年 3月 11日顺利通过了四川省电力公司组织的项目验收。

参考文献

[1] 架空送电线路铁塔组立工程手册 [Z]. 北京:中国电力出版社, 2007.
[2] 高压架空输电线路施工技术手册——起重运输部分 [Z]. 北京:水利电力出版社, 1975.
[3] GB 50017－2003,钢结构设计规范 [S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
[4] DL/T 875－2004,输电线路施工机具设计、实验基本要求 [S].
[5] 范钦珊. 工程力学教程 (I) [M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
[6] 张俊光. 公路钢桁桥施工稳定安全系数优化设计 [D]. 西安:长安大学, 2009.

(收稿日期: 2010－04－19)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一种暂态分量故障测距方案

邓 华
(四川省电力公司超高压运检公司,四川 成都 610041)

摘 要:超高压线路故障产生的周期性高频暂态分量在频域上表现为一系列谐波形式,在分析暂态频率特征的基础上,提出了一种基于暂态分量的单端故障测距方案,并分析了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响,针对实际应用中存在的若干问题给出了相应的对策。该方案计算简单,不受故障时刻、运行方式等因素的影响,ATP仿真和Matlab分析验证了该方案有效性。

关键词:电力系统;固有频率;频谱分析;故障测距

Abstract: When a fault occurs in a transmission line, the fault-generated high-frequency components are a series of natural frequencies in frequency domain. Firstly, the natural frequency characteristics of extra high voltage transmission line are analyzed, and then a fault location scheme based on natural frequency is proposed. the effect of reflection coefficients on the source and the fault point are also discussed. finally some solutions are proposed against several problems in practical application. The scheme avoids identifying arrival time of traveling waves and reflecting traveling waves from fault point. it is immune to fault time and operation mode et al. The performance of the proposed scheme is verified by various faults on ATP simulation and Matlab.

Key words: power system; natural frequency; spectrum analysis; fault location

中图分类号:TM835 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2009)04-0048-05

0 引 言

目前,电力系统大多采用阻抗法测量输电线路故障距离,但其测距精度受故障电阻、互感器误差、线路结构不对称、零序参数沿线路分布不均匀等因素影响,实际应用效果不理想,而且不适用于直流输电、带串补电容、T接及部分同杆并架的线路。

早在20世纪50年代,人们就提出通过测量电压、电流行波在故障点及母线之间的传播时间来测量输电线路故障距离。通过十几年的发展,一些新的行波测距原理被提出[1-8],并且得到了实际应用,国产行波测距系统已有数百套在国内外电力系统中投入使用,实际故障测距误差一般在500 m以内[9-10]。对于基于时域行波的测距方法,关键问题是准确识别初始行波的波头,各种干扰及非故障点的行波波头都会影响测距的准确性。双端行波测距需要两端时间精确同步,同时需要远程通信;较双端测距而言,单端行波测距只需要一台装置,投资小,但是波形分析比较复杂,问题集中在如何正确识别来自故障点的反射波,对于电压接近零值时发生的故障,行波测距将失效[1]。

线路故障后的周期性高频暂态分量在频域上表现为一个特定频率的谐波形式,称为固有频率,这一特定频率是固有频率的主频[11]。固有频率是故障距离的函数,利用其可以实现测距功能。文献[12]分析了故障后的固有频率和故障距离之间的关系,文献[13]提出对于线路永久性故障,当断路器跳闸后,提取开关产生的固有主频进行测距,该方法只对永久性故障且TA或TV位于线路侧的输电线路有效;文献[14]提出了利用CVT二次信号的固有主频进行测距,但是需要已知系统的运行方式和确定固有主频。

在分析周期性高频暂态分量频域特征的基础上,提出了一种利用固有率差进行故障测距的方案,讨论了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响,同时给出了固有频率提取方法,针对实际应用中存在的若干问题进行了分析并给出相应的解决方案。

1 长距离输电线路固有频率的特征

线路故障后产生的周期性暂态高频分量中是短路后电磁波在输电线路上传播,并在短路点和电源阻

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

抗之间来回反射而形成的,在频域上表现为一个特定频率 (固有主频)的谐波形式。

1.1 固有频率的产生

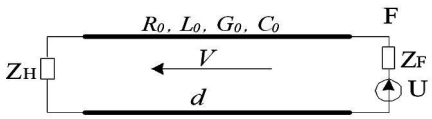


图 1 输电线路分布参数示意图

图 1给出了利用分布参数等值的输电线路故障网络,图中 R_0、L_0、G_0、C_0 分别为输电线路单位长度的电阻、电感、电导和电容, Z_H 为电源阻抗, F为故障点, Z_F 为故障点处阻抗, U为故障前 F点处电压, d为故障距离, V为故障产生的初始行波。

故障产生的初始行波 V沿线路向电源方向传播,然后在 Z_H 处和 F点处发生多次反射,产生一系列具有固有频率的高频分量,固有频率的大小可以通过下式求出[11]。

$$1-\Gamma_1\Gamma_2 e^{-2\omega\tau}=0 \qquad (1)$$

式中, Γ_1 为电源处反射系数, $\Gamma_1=(Z_H-Z_C)/(Z_H+Z_C)$; Γ_2 为故障点处反射系数, $\Gamma_2=(Z_F-Z_C)/(Z_F+Z_C)$; Z_C 为线路波阻抗, $Z_C=[(R_0+j\omega L_0)/(G_0+j\omega C_0)]^{1/2}$; τ为行波传播时间, $\tau=d/v$, v为行波传播速度。

将式 (1)转化为指数形式,可以表示为

$$1-A_1A_2e^{j\theta_1}e^{j\theta_2}e^{-2\omega\tau}=0 \qquad (2)$$

式中: $A_1=|\Gamma_1|$, $A_2=|\Gamma_2|$, $\theta_1=\mathrm{angle}(\Gamma_1)$, $\theta_2=\mathrm{angle}(\Gamma_2)$。

可以看出,式 (2)有无穷多个解,角频率 ω可用下式表示。

$$\omega=\frac{1}{\tau}\ln(\sqrt{A_1A_2})+i\left(\frac{\theta_1+\theta_2+2k\pi}{2\tau}\right)$$
$$k=0,\ \pm1,\ \pm2\cdots \qquad (3)$$

固有频率大小为

$$f=\frac{\mathrm{imag}(\omega)}{2\pi}=\frac{\theta_1+\theta_2+2k\pi}{2\tau\times2\pi}$$
$$k=0,\ \pm1,\ \pm2\cdots \qquad (4)$$

时间衰减系数为

$$\alpha=\left|\frac{1}{\mathrm{real}(\omega)}\right|=\left|\frac{\tau}{\ln(\sqrt{A_1A_2})}\right| \qquad (5)$$

由式 (4)可得,固有频率主频的范围介于 $1/4\tau\sim1/2\tau$之间。图 2给出了线路发生三相短路时的电流信号频谱,从图中可以发现固有频率呈现为固有主频的谐波形式。

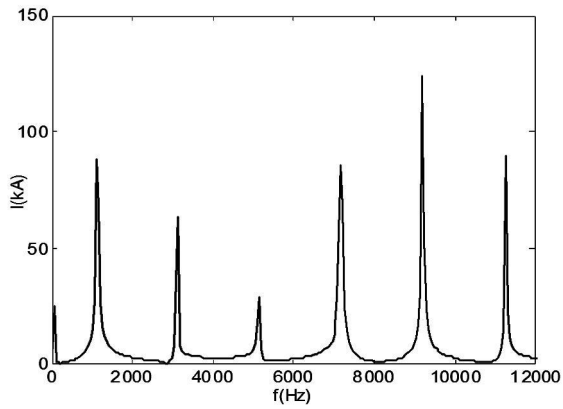


图 2 三相短路时电流信号频谱

1.2 不同故障类型下暂态高频分量的特征

1)三相短路时,短路点两侧的系统是相互隔离的,所以故障点两侧的暂态分量互不影响,所以固有频率也互不影响。

2)两相短路时,两故障相中的短路附加分量大小相等、方向相反,它们在健全相中感应的电动势之和为零,所以对于健全相电流接近于 0,对于故障相,短路点两侧暂态分量互不影响。两相接地故障时,由于 β模量是在两故障相之间传播的,和接地电阻无关,所以 β模量的固有频率特征和两相短路时相同[15]。

3)单相接地故障时,由于健全相中有暂态分量流通,系统两侧的暂态分量会相互影响,线路两侧不仅有本侧的固有频率,同时还有对侧的固有频率。

固有频率的影响因素可参考文献 [16]。

2 测距方案

这里提出了一种利用相邻两个固有频率之差进行故障测距的方案。具体原理如下。

根据式 (4),第 k和 k+1次固有频率可表示为

$$f(k)=\frac{\theta_1(\omega)+\theta_2(\omega)+2k\pi}{2\times2\pi}\times\frac{v}{d} \qquad (6)$$

$$f(k+1)=\frac{\theta_1(\omega)+\theta_2(\omega)+2(k+1)\pi}{2\times2\pi}\times\frac{v}{d} \qquad (7)$$

$$f(k+1)-f(k)=\left(\frac{\theta_1(\omega_{k+1})+\theta_2(\omega_{k+1})+2(k+1)\pi}{2\times2\pi}-\frac{\theta_1(\omega_k)+\theta_2(\omega_k)+2k\pi}{2\times2\pi}\right)\times\frac{v}{d} \qquad (8)$$

$$d=(\theta_1(\omega_{k+1})-\theta_1(\omega_k)+\theta_2(\omega_{k+1})-\theta_2(\omega_k)+2\pi)\times\frac{v}{f(k+1)-f(k)}\times\frac{1}{4\pi} \qquad (9)$$

由式 (9)可知,故障距离与 θ_1、θ_2、v相邻固有频

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率差有关。对于固有频率差可以通过频谱直接获得，当信号频率高于 1 kHz时， v基本趋于稳值，可以利用线路参数计算得到。相间短路时，θ_2是常数，接地故障时，过渡电阻为纯电阻时，θ_2随固有频率变化很小。

对于电源处的反射系数角 θ_1，当电源阻抗为 $Z_H=R_H+j\omega L_H$，θ_1随固有角频率 ω的变化曲线如图 3所示。从图中可以看出随着固有频率的增大，θ_1变化很小，且呈线性变化。

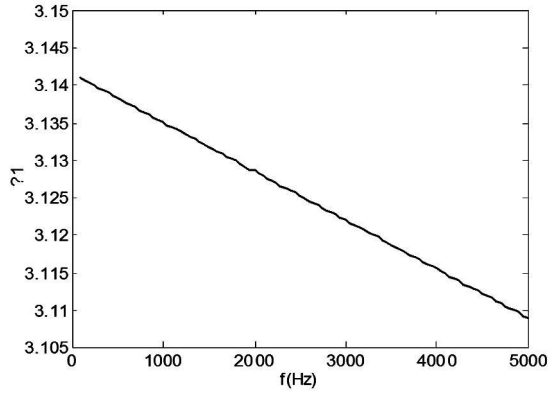


图 3 θ_1与固有频率的关系曲线

根据以上分析，式 (9)可以简化为

$$d=\frac{v}{f(k+1)-f(k)}\times\frac{1}{2} \qquad (10)$$

由式 (10)可得，测距方案不需要已知系统的运行方式和判断固有频率的次数，只要知道两固有频率之间的差就可以测距。而且可以利用任何间隔的固有频率进行测距。

本方案采用电流量采自线路 TV，为了保证故障测距的精度，本方案在进行测距时，分别利用四个相邻的固有频率差值进行计算，若其中某个固有频率差和其他两个差异较大，将其剔除掉，另取一个代替，然后求其平均值。

3 实际应用中若干问题的处理

3.1 波速度的选择

相间短路和接地故障时，行波的传播速度是不同的，由于单位长度零序电感、电容和正序电感、电容有较大的差异，所以线模和地模的固有频率不同。线模分量的固有频率高于零模分量的固有频率，零模分量衰减比线模分量快。

对于相间故障，利用线路正序参数求得的波速度进行测距，单相接地故障时，利用线路零序参数求得的波速度进行测距。

3.2 电压过零故障

线路故障后的周期性高频暂态分量主要是保证短路时刻分布电容上的电压不突变，分布电容中储存的电荷与电压成正比，故在电压接近最大值短路时电容放电产生的高频分量最大，在电压接近于零时短路高频分量最小，但是不为零，因为此时分布电容中电荷虽然为零，但电感中剩余的能量将向分布电容充电[17]。所以故障时刻不会影响固有频率的大小，但是电压接近于零时发生故障，固有频率幅值会减小。

3.3 高阻接地故障

单相高阻接地故障时，故障暂态分量较少，幅值较低，衰减较快，利用 MUSIC算法可以准确提取持续时间较短的固有频率信号。文献 [14]对此进行了详细分析。

3.4 电源出口处发生故障

线路出口发生故障的情况下，此时近故障点侧保护测得的固有频率很高，当其高于采样率的一半时，将无法准确采集到固有频率成分，近故障点侧测距失效，需配合用其他辅助方法测距，但此时远故障点侧保护的固有频率要低很多，可以准确测距。

3.5 单相接地时固有频率的识别

前面已经分析接地故障时，故障点对侧的固有频率会通过健全线路传递到本侧，所以频谱会发生混叠，需要对固有频率进行识别。由于线路之间的互感系数小于 0.5，所以通过比较故障相和健全相的频谱，若故障相频谱对应的固有频率幅值大于健全相频谱该频率的幅值，则该固有频率保留下来，反之，将其剔除。这样就可以将本侧的固有频率提取出来。

3.6 采样信号误差

采样信号会存在一定的误差，主要是因为电磁式 TV采集电流信号时会有传变误差，采用光电流互感器或电子式互感器时可以大大降低传变误差。另外不同的频谱分析工具频谱分辨率会存在差异，采用高分辨率的频谱分析工具可以解决。

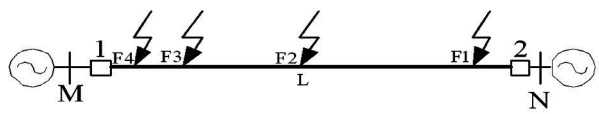


图 4 仿真系统图

4 仿真验证

利用 ATP软件对所提测距算法进行了仿真验证。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 三相短路时的测距结果

故障点	保护 1					保护 2				
	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%
F1	510	518	515	289.768 4	0.079 9	14 900	—	—	10.002 1	0.021 0
F2	990	995	990	150.284 6	0.190 9	990	995	993	150.133 0	0.088 7
F3	2 980	2 985	2 980	49.982 6	0.034 8	590	596	600	250.344 6	0.137 8
F4	—	—	—	—	—	500	500	503	297.470 2	0.177 8

表 2 单相接地时的测距结果

故障点	保护 1					保护 2				
	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%
F1	382	390	385	290.586 7	0.202 3	11 200	—	—	10.005 5	0.055 0
F2	740	748	745	150.555 7	0.370 5	745	740	750	150.422 6	0.281 7
F3	2 245	2 240	2 245	49.953 1	0.093 8	450	440	450	250.912 0	0.368 4
F4	—	—	—	—	—	370	378	375	299.386 0	0.465 1

图 4是仿真系统图,线路参数为: L=300 km, r_1=0.027 Ω/km, L_1=0.886 3 mH/km, C_1=0.012 7 μF/km, r_0=0.195 Ω/km, L_0=2.212 1 mH/km, C_0=0.009 0 μF/km, M侧电源 E_M=500∠50°, R_{M1}=18 Ω, R_{M0}=15 Ω, L_{M1}=0.137 43 H, L_{M0}=0.092 6 H, N侧电源 E_N=495∠20°, R_{N1}=26 Ω, R_{N0}=20 Ω, L_{N1}=0.142 98 H, L_{N0}=0.092 6 H。采样频率为 200 kHz,数据窗长度为一周波 (20 ms),利用 MUSIC算法提取固有频率。故障点位 F1～F4,分别距离母线 M为 290 km、150 km、50 km、2 km。保护安装在 1和 2处。

表 1给出了线路发生三相短路时,利用故障相电流的频谱得到的测距结果,表中 f_1、f_2和 f_3是连续三个固有频率差,计算距离为利用三个频差获得的测距结果的平均值,误差是相对误差。从中可以发现,三相短路时,该方案测距精度很高,当故障点位于电源出口时,由于采样率的限制,保护 1处无法得到固有频差,但保护 2可以准确测距。若故障条件相同,两相短路时的测距结果与三相短路时相同。两相接地时,这是因为 β模量是在两故障相之间传播的, β模量的固有频率与两相短路时是相同的。

这里主要分析一下单相接地故障下的测距结果。表 2给出了线路不同位置发生单相接地故障时的测距结果,过渡电阻为 50 Ω。

表 3给出了 F2点发生经不同过渡电阻单相接地时保护 1处的测距结果。从表 3可以看出随着过渡电阻的增大,固有频率的幅值会降低,但是利用 MUSIC算法仍然可以准确提取固有频率值。

表 3 不同过渡电阻情况下的测距结果

过渡电阻/Ω	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%
0	740	750	746	150.355 3	0.236 9
50	740	748	745	150.555 7	0.370 5
100	735	756	740	150.709 4	0.472 9
200	730	755	743	150.919 2	0.612 8

表 4给出了 F3点发生不同时刻单相接地 (过渡电阻 100 Ω)时保护 1处的测距结果。当故障时刻接近电压过零时,固有频率幅值降低,但不为 0,本方案仍然有效。

表 4 不同故障时刻的测距结果

故障时刻/°	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	计算距离/km	误差/%
90	2 245	2 240	2 245	49.953 1	0.093 8
45	2 235	2 245	2 240	50.027 6	0.055 2
5	2 230	2 270	2 256	49.763 6	0.472 8

5 结 论

以上提出了一种利用周期性暂态高频分量频域特征的单端故障测距方案,讨论了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响,同时给出了固有频率提取方法,对实际应用中波速度的选择,电压过零时故障等问题进行了分析并给出相应对策。

该方案避免了行波测距法中行波波头到达时刻和故障点反射波的识别问题,也无须已知系统运行方式和确定固有主频,原理简单,易于实现。

参考文献

[1] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术 [M].西安:西安交通大学出版社, 1996.

[2] 王志华,尹项根,张小波,等.利用 CVT捕捉电压行波实现故障测距的分析和实践 [J].电力系统自动化, 2004, 28(22): 63－68.

[3] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用暂态电流行波的输电线路故障测距的研究 [J].中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76－80.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 陈平.输电线路现代行波故障测距及其应用研究 [D].西安:西安交通大学, 2003.
[5] 陈平,徐丙垠,葛耀中.一种利用暂态电流行波的输电线路故障测距方法 [J].电力系统自动化, 1999, 23(14): 29－32.
[6] 季涛,薛永端,孙同景, 等.配电线路行波故障测距初探 [J].电力系统自动化, 2005, 29(19): 66－70.
[7] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等.利用 GPS的输电线路行波故障测距研究 [J].电力系统自动化, 1996, 20(12): 37－40.
[8] Mahmoud Gilany, Doaa khalil Ibrahim, EI Sayed Tag El-din, Traveling－wave－based Fault－location Scheme for Multiend－aged Underground Cable System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 82－89.
[9] 徐丙垠,李京,陈平,等.现代行波测距技术及其应用 [J].电力系统自动化, 2001, 25(23): 62－65.
[10] 陈平,徐丙垠,李京,等.现代行波故障测距装置及其运行经验 [J].电力系统自动化, 2003, 27(6): 66－69.
[11] Giovanni Miano Transmission Lines and Lumped Circuits [M]. Academic Press San Diego USA, 2001.
[12] G. W. Swift The Spectra of Fault Induced Transient [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1999, 98(3): 947－950.
[13] Styvaktakis E, Bollen M H J Gu H Y. A Fault Location Technique Using High Frequency Fault Clearing Transient [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(5): 58－60.
[14] 邬林勇,何正友,钱清泉.利用 CVT二次信号的频域行波故障测距方法 [J].电力系统自动化, 2008, 32(8): 73－77.
[15] 黄少锋,王兴国,刘千宽.一种基于固有频率的长距离输电线路保护方案 [J].电力系统自动化, 2008, 32(8): 59－63.
[16] 黄少锋,王兴国.一种基于固有频率的超高压线路相间保护方案 [J].电力系统自动化, 2008, 32(19): 58－62.
[17] 高中德.超高压电网继电保护专题分析 [M].北京:水利电力出版社, 1990.

(收稿日期: 2010－06－01)

(上接第 35页)

工频电场强度,减轻高压交流输电线路可能产生的工频电场生态效应影响。同时由于工频电场强度具有随着距导线距离的增加,电场强度快速下降的特点,输电线路设计阶段合理布置路径,避开居民区,也能有效减小工频电场可能形成的生态效应影响。

4 结 论

(1)对处在电场中的人体感应电流可采用模拟电荷的方法进行近似计算,身高约 1.7 m的人体,工频电场强度 $E_0=4$ kV/m时,通过人体脚的总感应电流仅为 60 μA,其值远低于人体伤害电流 6～9 mA。

(2)当外加工频电场强度 $E_0=4$ kV/m时,人体内部电场强度为 0.176×10^{-3} V/m,其人体内部产生的电场强度远小于高压输电线路产生的电场强度 4×10^{3} V/m,人体内部电场强度对外加电场强度而言是极其微弱的。

(3)当外加工频电场强度 $E_0=4$ kV/m时,人体头部离子移动幅度仅为 8.01×10^{-12} m,其值远小于人体活细胞直径 (平均为 $1-2\times10^{-5}$ m)。

(4)采用增加导线对地高度、合理布置导线方式、架设架空屏蔽线、减小相间距、减小导线分裂间距及减少分裂导线根数等方式,均能有效减少线下工频电场强度,减轻高压交流输电线路可能产生的工频电场生态效应影响。同时合理布置线路路径能有效减轻高压交流输电线路工频电场可能存在的生态效应影响。

参考文献

[1] 邬雄.电场、磁场和电磁场的环境问题 [J].电力环境保护, 2007, 23(4): 8－11.
[2] Friedlander Gordon D. UHV: onward and upward[J]. IEEE Spectrum, 1977, 14(2): 56－65.
[3] Paris L. Future of UHV Transmission Lines[J]. IEEE Spectrum, 1969, 6(9): 44－51.
[4] 邬雄. 1 000 kV交流输电线路电磁环境研究 [J].电力设备, 2005, 6(12): 24－27.
[5] 超高压及特高压输电线路电磁环境研究 [R].杭州:浙江大学, 2006: 58－62.
[6] Knave－B. Electric and Magnetic Fields and Health Outcomes－an overview [J]. Scand－J－Work－Environ－Health, 1994(20): 78－79.
[7] 邬雄,聂定珍,张广州,等.架空送电线路的电磁环境及其污染影响 [J].高电压技术, 2000, 26(5): 24－26.
[8] 邵方殷.输电系统产生的电场和磁场 [M].北京:水力水电出版社, 1984: 8－35.
[9] 粟福珩.高压输电的环境保护 [M].北京:水力水电出版社, 1988: 34－61.
[10] 蒋伟,吴广宁,黄震等.有限元法分析特高压直流线路对人体的影响 [J].高电压技术, 2008, 34(9): 1826－1830.
[11] 李顺元. ±500千伏直流输电线路电场效应及人体感受的研究 [J].电网技术, 1991(2): 25－31.

作者简介:

张格红 (1976－),女,汉族,陕西兴平人,硕士,讲师,主要从事给水排水工程、环境工程的教学、设计工作。

(收稿日期: 2010－03－23)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电网实测负荷建模在德阳五里堆的应用

杨 坤[1],李辛奇[3],唐永红[2],赖小强[3],蒲 维[2]
(1.四川省电力公司,四川 成都 610041; 2.四川电力试验研究院,四川 成都 610072;
3.德阳电业局,四川 德阳 618000)

摘 要:由于电力负荷具有的时变性、随机性、多样性等特点,使得负荷模型建模成为电力系统几个最困难的研究领域之一,四川电网在 2009年开展了负荷建模的理论与实践工作。介绍了德阳五里堆站动态负荷建模平台,应用该平台的测量数据对德阳站进行综合负荷模型辨识,所辨识的实测参数与常规参数进行对比,说明实测负荷模型的精度比典型负荷模型的精度高。

关键词:负荷建模平台;多曲线拟合;综合负荷特性

Abstract: Load modeling has been one of the most difficult problems in power system because of its time-variant and stochastic characteristics. The theoretical researches and some practical work were carried out in Sichuan power grid in 2009. The dynamic load modeling platform in Wulidui Substation of Deyang is firstly introduced, then the field measurement data recorded in this substation are utilized to build the load models. The comparison between the simulation results using the measurement-based load model and the traditional load model indicates the efficiency of the method.

Key words: load modeling platform; multicurve fitting; composite load model characteristic

中图分类号:TM743 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0061-06

0 引 言

发电机、励磁调节器、调速器以及负荷模型参数是直接影响电力系统仿真计算精度的四大参数,励磁、调速系统参数大多采用直接加扰动信息,在电厂进行辨识获得,发电机参数一般由厂家的出厂数据而获得,而负荷参数由于其组成的复杂性、时变性及随机性成为整个电力系统仿真计算中提高精度的瓶颈,使得其他元件模型的精确性难以发挥其应有的作用,从而降低了系统仿真分析的可信程度。目前不管是电力规划部门还是电力调度部门仍沿用传统的基于典型参数的静态模型或者电动机加恒阻抗的动态模型,负荷模型的精度远远不能满足目前电网仿真的需要。为促进实测建模在四川电网的推广应用,提高仿真的可信度,在德阳五里堆 220 kV变电站开展了实测负荷建模工作。五里堆 220 kV站共有三台 120 MVA主变压器,12条 110 kV出线,为德阳地区重要变电站,该站负荷涵盖化工、钢铁、机械、商业、居民等多种负荷,具有综合负荷特性。

1 实测负荷建模平台

1.1 负荷记录装置简介

负荷特性的动态记录装置以工业控制机为主体,实时采集变电站出线电流、母线电压、系统频率、母线开关等信息,当负荷启动条件满足时记录元件启动,进行录波并以特定文件的形式保存在硬盘中。它具有测量准确、实时动态记录的特点,为电力负荷建模提供良好的参考依据。

1.2 实测负荷建模平台

图 1所示为建模平台的框架结构。

远程采集与分析中心是负荷实测建模的核心部分。前置机通过四川省电力公司局域网络收集到有关变电站的负荷特性信息,对数据进行保存。处于四川电力试验研究院的负荷建模工作站读取相关负荷信息,进行数据预处理,然后进行负荷建模。运行方式分析工作站则利用建成的负荷模型进行有关方式下稳定问题的专题研究。各装置采用 Internet局域网进行连接。

2 现场负荷记录装置及数据采集

2.1 德阳五里堆变电站负荷记录装置

负荷记录装置安装在德阳 220 kV变电站 110 kV侧,共采集 7条 110 kV出线以及 1号主变压器总路电流,各出线负荷构成见表 1。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

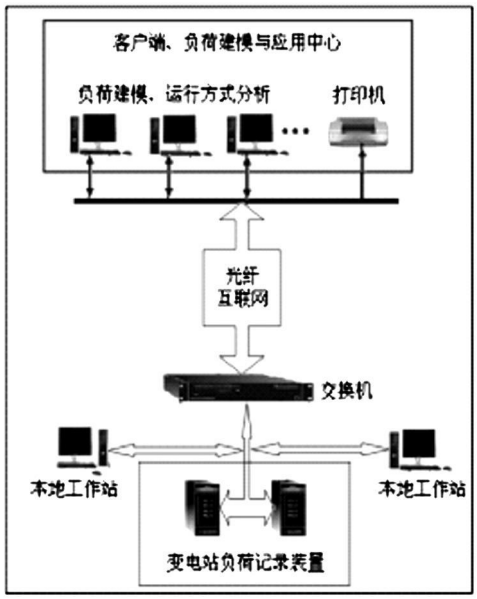


图 1 德阳 220 kV五里堆变电站动态负荷建模平台

表 1 110 kV线路负荷构成

序号	名称	挂接母线	主要负荷构成
1	1号主变压器总路	1	机械工业 20%,化工 25%,钢铁企业 15%,居民 30%,商业 10%
2	五城线	2	钢铁企业 40%,居民 60%
3	五小线	1	化工 20%,机械 60%,居民 20%
4	五高线	2	加工工业 70%,居民 30%
5	五德东线	1	居民 35%,商业 55%,冶金 10%
6	五美线	2	化工 100%
7	五角线	1	钢铁企业 50%,化工 25%,居民 25%
8	五电线	2	机械工业 90%,办公 10%

现场负荷记录装置定值见表 2。

表 2 负荷记录装置定值

序号	定值名称	范围
1	电压额定值 /V	57.74
2	电流额定值 /A	5
3	长期越限时间定值 /s	1
4	A段时间长度 /s	0.4
5	B段时间长度 /s	0.8
6	相位参考基准	1、2、3、4
7	I母电压突变量 /(V/s)	2
8	I母电压突变量 /(V/s)	2

2.2 数据采集及转换

安装的负荷记录装置从 2009年 12月至 2010年 1月,采集到的有效数据共 13条。

应用数据处理程序将实测二进制数据转成负荷建模程序识别的 TUS数据,转换界面如图 2。

3 负荷模型参数辨识

3.1 实测模型参数的获取

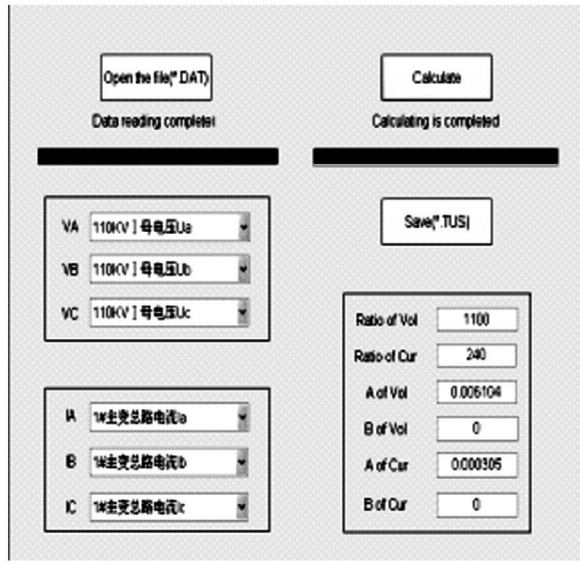


图 2 数据转换界面

运用多曲线拟合法对总路电流、五城线、五德东线、五电线、五高线、五角线及五小线进行辨识,辨识的负荷模型参数见表 3。表 3中 R_s、X_s是电动机定子电阻与电抗; X_m 是电动机励磁电抗; R_r、X_r 是电动机转子电阻与电抗; H是惯性时间常数; A是转速平方系数; B是转速系数; P_p 是静态有功中恒功率比例; P_z是静态有功中恒阻抗比例; Q_p 是静态无功中恒功率比例; Q_z是静态无功中恒阻抗比例。

表 3中 K_{pm}代表综合负荷模型中电机的比例,其中五电线、五角线电机比例达到 40%,而五德东线、五小线、五高线电机比例为 20%多,1号主变压器综合负荷电机比例为 31%。对比表 1中各线路的负荷组成,则认为在该站对负荷进行辨识的结果比较符合实际。

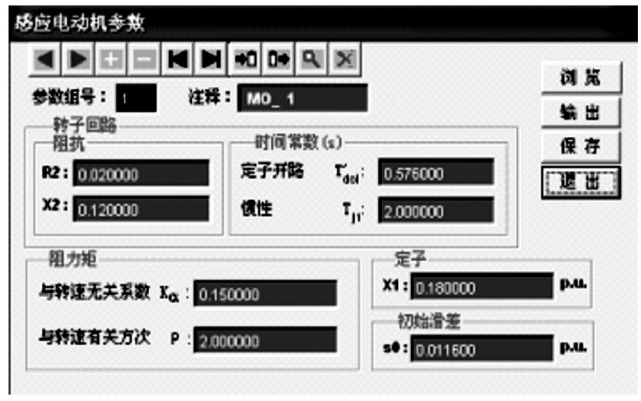


图 3 四川电网仿真用电动机典型参数

3.2 典型参数与实测参数比较

目前四川电网方式计算中负荷模型采用恒阻抗模型加感应电动机,其中电动机比例为 40%,恒阻抗负荷比例为 60%。电动机典型参数如图 3所示。

因为 1号主变压器的数据是几条出线的综合,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 多曲线拟合参数表

辨识参数	1号母线	五城线	五德东线	五电线	五高线	五角线	五小线
R_s	0. 137 3	0. 273 5	0. 151 0	0. 349 0	0. 225 5	0. 291 2	0. 224 5
X_s	0. 168 4	0. 155 5	0. 139 8	0. 179 4	0. 126 0	0. 176 5	0. 139 8
X_m	2. 261 2	2. 557 6	2. 310 6	2. 014 1	2. 585 9	2. 077 6	2. 896 5
R_r	0. 020 4	0. 045 1	0. 024 8	0. 050 6	0. 027 8	0. 040 7	0. 033 6
X_r	0. 163 6	0. 151 5	0. 157 1	0. 108 0	0. 157 1	0. 175 3	0. 142 0
H	0. 649 0	0. 758 8	1. 276 5	1. 398 0	1. 268 6	0. 849 0	1. 433 3
A	0. 316 1	0. 410 2	0. 463 5	0. 576 5	0. 269 0	0. 479 2	0. 253 3
B	0. 854 9	0. 835 3	0. 329 4	0. 529 4	0. 917 6	0. 309 8	0. 070 6
K_{pm}	0. 311 8	0. 326 5	0. 220 6	0. 405 9	0. 261 8	0. 408 8	0. 247 1
M_{lf}	0. 267 1	0. 274 1	0. 212 4	0. 323 5	0. 224 7	0. 339 4	0. 231 8
P_p	0. 316 5	0. 234 9	0. 122 0	0. 319 6	0. 266 3	0. 156 5	0. 294 5
P_z	0. 482 7	0. 394 9	0. 542 4	0. 413 7	0. 238 0	0. 517 3	0. 520 4
Q_p	0. 681 2	1. 384 7	0. 100 0	1. 078 8	0. 298 8	1. 705 9	1. 216 5
Q_z	0. 219 2	0. 363 5	0. 733 7	0. 297 6	0. 802 7	0. 733 7	0. 329 0

所以可以认为此出线的负荷特性代表了此变电站的综合负荷特性,因此选取 1号主变压器的几条数据进行多曲线建模,所选用的数据如表 4所示。

表 4 负荷辨识所用数据

序号	负荷记录设备采集的数据名称	扰动强度 %
a	110 kV I母线－1号主变压器－01－03－07－12－00. TUS	4. 02
b	110 kV I母线－1号主变压器－12－04－17－14－02. TUS	16. 1
c	110 kV I母线－1号主变压器－12－05－11－40－36. TUS	16. 28
d	110 kV I母线－1号主变压器－12－06－15－28－07. TUS	7. 56
e	110 kV I母线－1号主变压器－12－25－07－43－59. TUS	14. 53

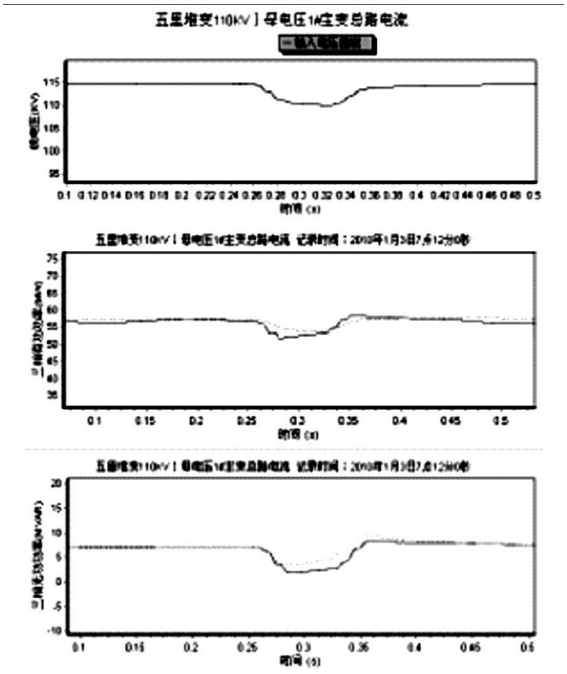


图 4a 典型参数结果

其中数据 b、c为中国电力科学研究院在德宝直流工程系统调试期间进行的两次人工接地试验所获取的扰动数据。多曲线拟合所得参数如表 5所示。

用典型参数和表 5的辨识参数分别对表 4所列五条实测数据进行仿真的结果如图 4和图 5所示,无论从图形还是从误差上都可以看出与典型参数相比辨识出来的参数更能够精确的描述负荷的动态特性。

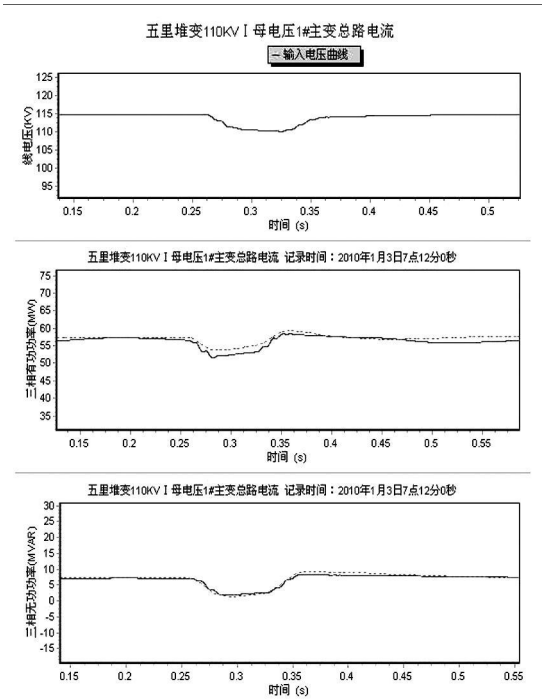


图 5a 辨识参数结果

典型参数误差：active error=0. 007 916, reactive error=0. 040 256, total error=0. 048 172;

辨识参数误差：active error=0. 007 549, reactive error=0. 022 247, total error=0. 029 796。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　1号变压器总路辨识的模型参数

R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A	B	K_{pm}	M_{lf}	P_p	P_z	Q_p	Q_z
0. 137 3	0. 168 4	2. 261 2	0. 020 4	0. 163 6	0. 649 0	0. 316 1	0. 854 9	0. 311 8	0. 267 1	0. 316 5	0. 482 7	0. 681 2	0. 219 2

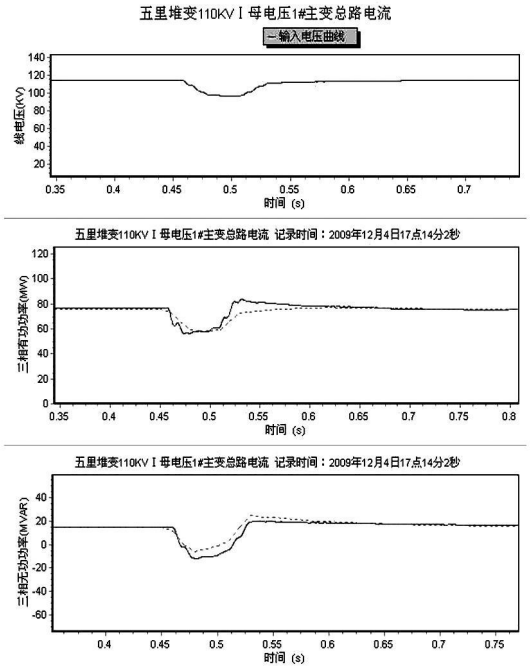


图 4b　典型参数结果

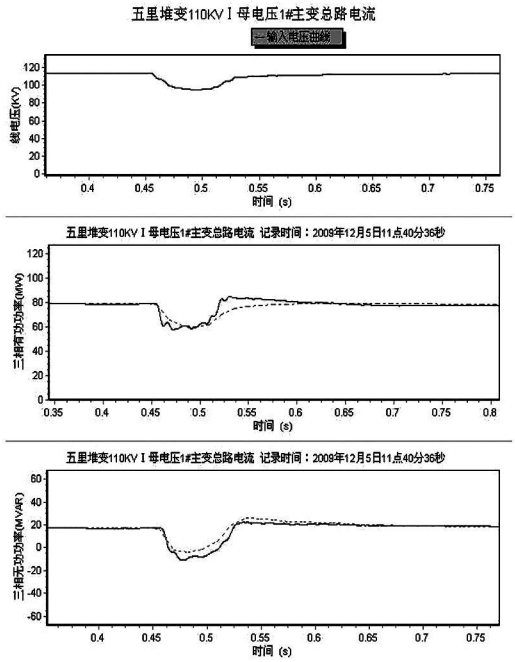


图 4c　典型参数结果

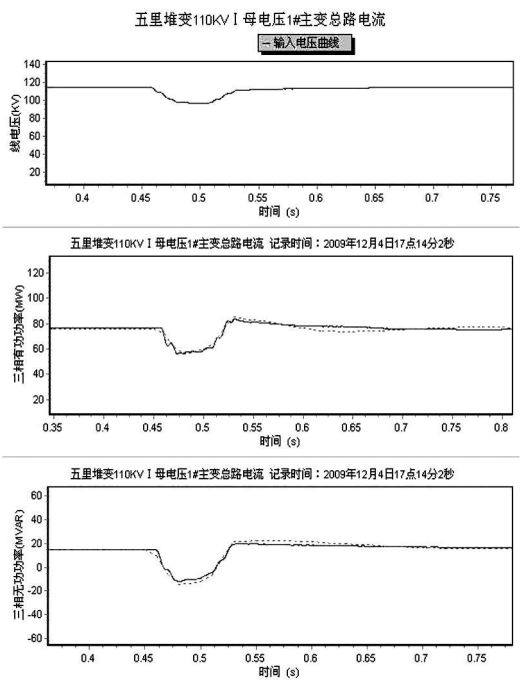


图 5b　辨识参数结果

典型参数误差：active error=0. 013 145, reactive error=0. 057 555, total error=0. 070 700;

辨识参数误差：active error=0. 008 425, reactive error=0. 040 144, total error=0. 048 569。

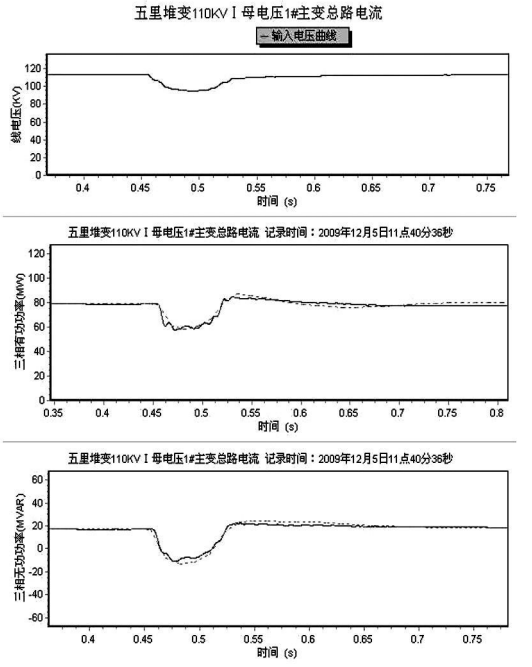


图 5c　辨识参数结果

典型参数误差：active error=0. 011 315, reactive error=0. 042 128, total error=0. 053 443;

辨识参数误差：active error=0. 006 984, reactive error=0. 034 519, total error=0. 041 503。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

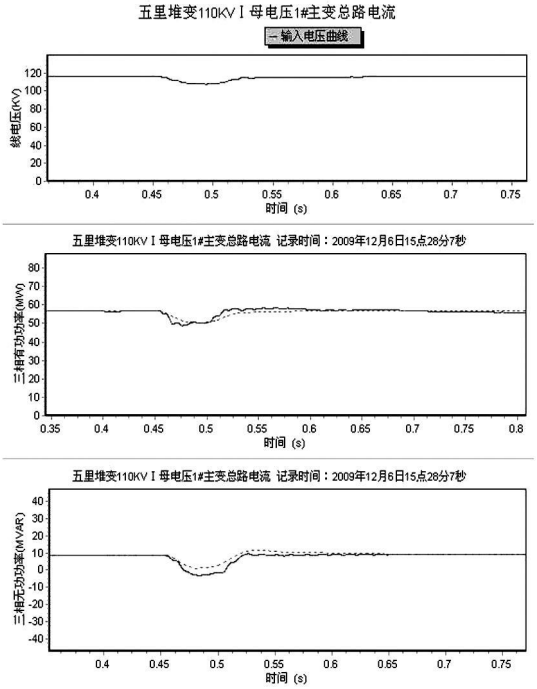


图 4d 典型参数结果

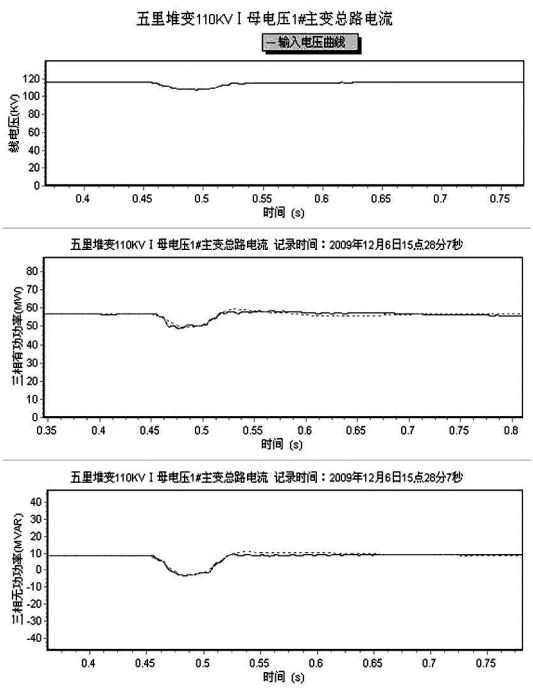


图 5d 辨识参数结果

典型参数误差：active error=0.006 521, reactive error=0.056 126, total error=0.062 647;

辨识参数误差：active error=0.005 917, reactive error=0.029 986, total error=0.035 902。

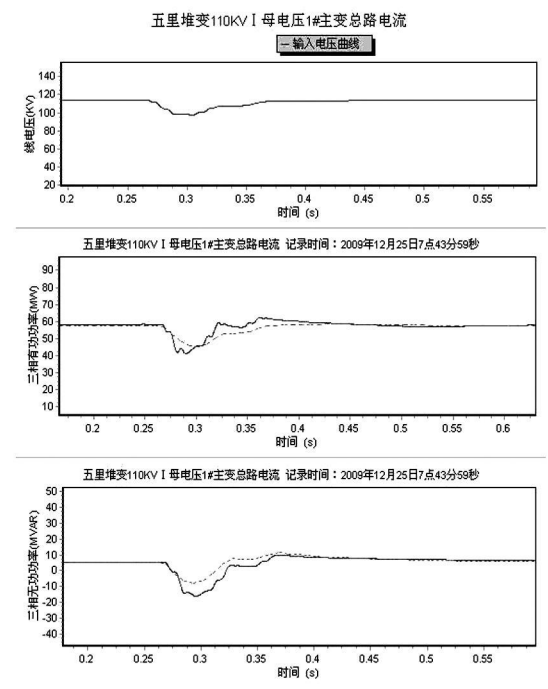


图 4e 典型参数结果

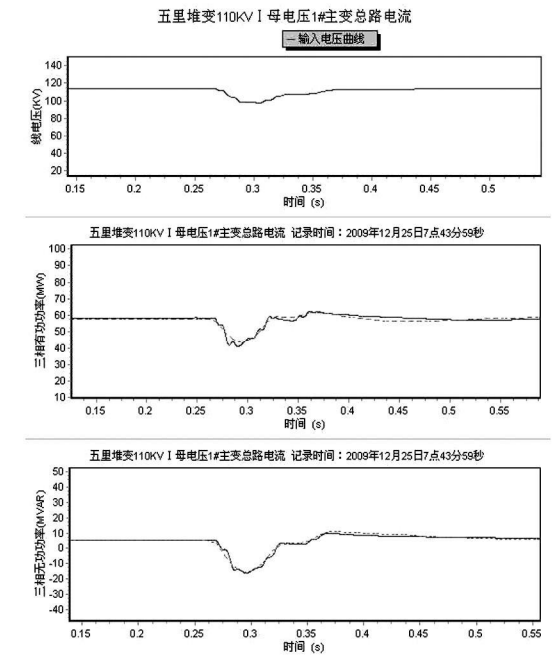


图 5e 辨识参数结果

典型参数误差：active error=0.013 738, reactive error=0.135 135, total error=0.148 873;

辨识参数误差：active error=0.007 865, reactive error=0.059 798, total error=0.067 663。

从上图对比可以看出，当扰动小时，典型参数与辨识参数拟合的波形与实际波形基本一致，但当实际系统扰动大时，典型参数拟合的曲线误差较大，而用多曲线拟合的实测参数误差小，与实际波形一致。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结 论

前面介绍了德阳五里堆 220 kV变电站实测负荷建模平台,通过现场采集的扰动数据辨识的综合负荷模型参数与实际负荷特性接近,采用实测负荷模型参数与典型参数进行对比仿真,实测参数的精度高于典型参数。其取得的扰动数据仅为 2009年 12月至 2010年 1月期间的数据,对德阳变电站的负荷辨识,还需要更长时间的扰动数据的积累。为推动四川电网的实测负荷建模工作,建议通过负荷调查,在四川电网更多的负荷变电站安装负荷记录设备,或采利用现有的记录扰动装置,通过长时间的扰动数据积累,建立四川电网实测负荷模型库,为安全准确地计算四川电网外送功率打下坚实基础。

(**收稿日期**: 2010—06—10)

(上接第 23页)

3.2 实用性数字化变电站

该方案采用 IEC 61850协议、ECT/EPT和传统的 SW/CB设备,将变电站的数字化程度提高了一个层次。ECT/EPT通过光纤接入合并器,由合并器对采集的数据进行整理后,按照 IEC 61850协议通过光纤接入过程总线,间隔层设备接收来自过程总线的数据,并将处理后的数据送入变电站总线。一个间隔中的传统开关设备通过硬接线与智能终端相连,智能终端实现模拟开关量/接点信号与数字信号的转换以及操作回路功能,并通过光纤接入过程总线。川内首座数字化变电站——绵阳南塔 110 kV变电站便属于此种类型的数字化变电站。

3.3 完全数字化变电站

采用 ECT/EPT、智能开关设备并遵循 IEC 61850协议的完全型数字化变电站,其过程层、间隔层和变电站层全部实现数字化。过程层的采样、检测和控制全部实现数字化和网络化。目前智能开关设备技术还不够成熟,有待进一步研究开发。

4 结束语

数字化变电站技术的发展与实现得益于通信网络技术、机电一体化技术、高速数字信号处理技术、传感器技术和信息同步化技术等多个领域的研究成果和交叉融合。数字化变电站的建设以及传统变电站的数字化改造是一个长期的、逐步完善、分步实施的过程。IEC 61850标准的实施、非常规互感器的应用和智能开关设备的成熟推动着数字化变电站示范工程的建设,在今后 10年中,数字化变电站已成为变电站自动化发展的主流方向,为“数字化电网”发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] IEC. IEC 61850: Communication networks and systems in substations[S]. 2004

[2] Anderson L, Brunner C. Substation Automation Based on IEC 61850 with New Process—close Technology[C]. IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, 2003.

[3] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特性和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67—71.

[4] 门石,张振华. 新型电流电压传感器技术的应用研究[D]. 北京:华北电力大学, 2001.

[5] 全国电力系统控制及其通讯标准化技术委员会. IEC 61850变电站通讯网络和系统系列标准, 2002.

[6] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850介绍[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61—65.

[7] 朱大新. 数字化变电站综合自动化系统的发展[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20—22.

[8] 曾庆禹,李国龙. 变电站集成技术的发展——现代紧凑型变电站[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 60—67.

(**收稿日期**: 2010—01—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

浅析调速器调节参数设定对系统稳定性的影响

赵喜成, 燕 京
(大唐碧口水力发电厂, 甘肃 陇南 746412)

摘 要: 水电机组调速器的安全稳定运行对维持电网频率的稳定和安全至关重要, 水轮机调速器调节参数的不当设置将严重影响水电机组调频功能的发挥。由一起电网线路发生相间短路引起调速器动作的行为, 分析调速器调节参数对机组调频和系统安全及稳定性的影响, 探讨了水电机组调速器参数的设置及参数的优化, 提出了相应防范措施。

关键词: 调速器; 参数设定; 系统稳定性

Abstract: The safe and stable operation of speed governor of hydro-power generating unit is important to keep the stablity and safety of the power gird frequency. The improper setting of adjustable parameters of water-turbine speed governor will affect seriously the action of frequency modulation in hydro-power generating unit. The influence of adjustable parameters on the frequency modulation and the system safety and stability is analyzed according to a phase-to-phase fault occurring in grid line which causes the action of speed governor. At the same time, the setting and optimization of the speed governor parameters are discussed, and the relevant precautionary measures are proposed.

Key words: speed governor; parameter setting; system stability

中图分类号: TM712 **文献标志码**: B **文章编号**: 1003-6954(2010)04-0070-04

0 引 言

电力系统运行的主要任务之一, 就是对频率进行监视和控制, 而发电机组的调频功能是维持电网稳定性的重要技术手段。当前, 电网建设如火如荼, 水轮发电机组并入大电网运行成为主要的运行方式, 作为机组频率和机组功率的直接控制设备, 水轮机微机调速器肩负着实现一次调频功能的重要任务, 发电机组的一次调频功能对维持电网频率的稳定有着极其重要的作用, 可以明显提高电网抗功率突变的能力。当电网发生事故、电网出力发生突变时, 将引起电网频率的波动, 而频率波动则意味着电网安全稳定系数的降低和用户电能质量的下降。若机组调频功能不能发挥其应有的作用, 不仅是对电网中保证频率稳定资源的浪费, 而且很难将电网频率的控制水平进一步提高, 所以调速器参数的设定对调频的调节品质影响具有非常重要的意义。

1 水电站机组基本情况

碧口水电站安装 3台相同型号的混流式水轮发电机组, 单机容量 100 MW, 水轮机型号为 HL702-LJ-410。机组最大水头为 86.2 m, 额定水头为 73 m, 最小水头为 57.5 m。单机额定出力 100 MW, 额定转速为 150 r/min。调速器为 WBTD-100步进式调速器, 调速器频率变化范围为 ±0.2 Hz 切"频率模式"运行延时时间为 0.5 s 一次调频频差为 0.05 Hz 功率变化为 6% MW。

2 调节参数对机组一次调频的影响

水轮机调速器是水电厂的重要控制设备, 承担着机组的开停机、负荷调整、转速调整等诸多任务。机组的一次调频的调节控制也由其来完成。机组调节过程的动、静态特性和调节品质与调速器各参数的设置与整定密切相关。调速器可设定的主要调节参数有如下几种[1]: 调速器的人工死区、永态转差系数、形成不同工况下主要调节规律的比例增益、积分增益、微分增益或暂态转差系数、缓冲时间常数、加速度时间常数等。这些调节参数的设置情况, 直接影响到水电机组的调节性能, 参数的不当设置很难使机组的调节发挥其应有的作用。

3 事故现象及分析

2009年某日, 电厂下级线路发生 A、C相间短路, 三相跳闸后, 地区网内机组出力大于系统有功, 系统

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

频率上升,线路保护远传切机动作,电厂失步解列安全自动装置 UFV－2FBK过频切机动作。通过对保护远传切机与安全自动装置动作报告分析,远传切机保护瞬时动作,失步解列 UFV－2FBK安全自动装置过频切机延时 1.14 s动作。远传切机切除厂 2号机组,3号机组带地区孤网运行。

3.1 事故前运行方式

220 kV系统两条母线并列运行,母联 2200开关在合,三台机组通过双回线和电网相连。图 1为电厂系统主接线图。

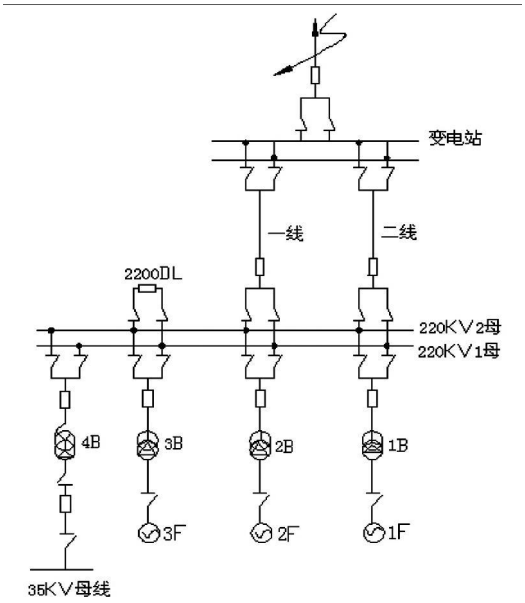


图 1 系统主接线图

事故发生前,2号发电机负荷 100 MW /21 Mvar自励方式运行;3号发电机负荷 100 MW /19 Mvar自励方式运行。母联开关合,220 kV系统双母线并列运行,1FB、4B、12B检修。厂用电:54B带 6 kV,93B带Ⅲ c,63B带 0c、Ⅰc、Ⅱ c。

3.2 事故现象

事故当时,中控蜂鸣器响、警铃响,系统冲击较大,中控出现:“失步解列装置动作”、“线路收发信机启动”、“故障录波器启动”光字牌。

(1)2号机出口 2202开关跳闸,系统频率由 50.02 Hz升至 53.51 Hz,电压由 235 kV降至 233 kV,3号机组有功由 100 MW降至 0 MW,3号机调速器运行至“频率模式”,2号机组甩负荷至空载运行。

(2)检查一回线路 CSC－103A保护“远传切机1”动作,RCS－901B保护启动,RCS－923B辅助保护“A、B、C相过流”动作,UFV－2FBK失步振荡解列装置“过频切机”动作。

(3)送出线路 CSC－103A保护、RCS－901B保护启动,RCS－923B辅助保护“A、B、C相过流”动作。

(4)现地检查 2号机出口 2202开关三相在跳闸位置,开关本体、SF6压力正常。

3.3 事故分析

1)保护动作与安全自动装置行为分析

电厂送出下一级线路发生 A、C相间短路,三相跳闸后,与大网解列,地区孤网运行。地区网内机组出力大于系统有功,系统频率上升,保护远传切机动作,电厂安全自动装置 UFV－2FBK过频切机动作。通过对一回线保护远传切机与安全自动装置动作报告分析,远传切机保护瞬时动作,UFV－2FBK安全自动装置过频切机延时 1.14 s动作。因此,远传切机切除电厂 2号机组,3号机组带地区孤网运行,安全自动装置动作正确。图 2为 2号机出力变化。

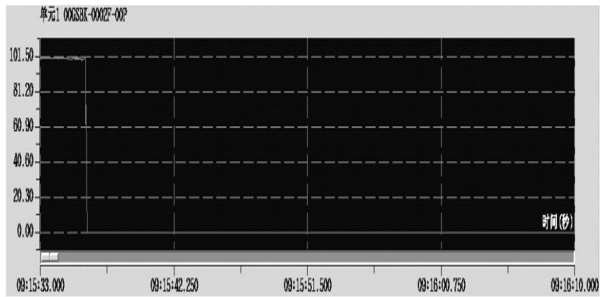


图 2 2号机出力变化

2)3号机组调速器动作行为分析

下级线路事故跳闸后,系统负荷减少,频率上升。从监控系统历史数据分析,3号机组有功由 100 MW突变至 58 MW,图 3为监控系统 3号机出力变化,其下降幅度超过调速器功率测量变送器设定范围,调速器报功率传感器故障信号,调速器由功率模式自动切换为开度模式运行。

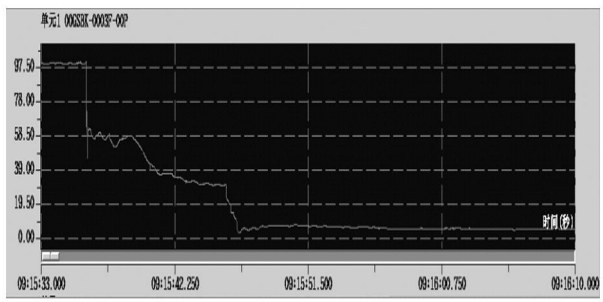


图 3 3号机出力变化

由于频率上升较快,3号机调速器自动切换至频率模式运行,调速器跟踪 50 Hz图 4为 3号机频率变化。

此时,由于网频较高,相当于调速器突然加载大功率扰动,调速器导叶迅速回关,频率下降。

在下降过程中由于受网内近区厂矿负荷和其他

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

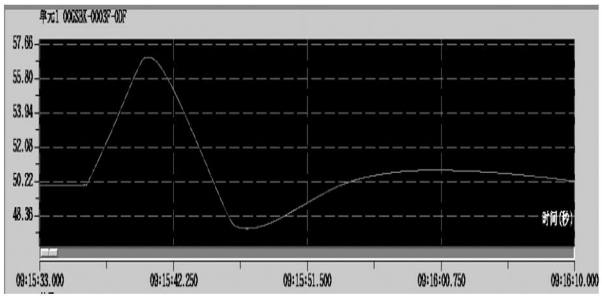


图 4　3号机频率变化

机组的影响，系统频率降低至低频减载动作值，低频减载动作切除系统负荷，频率恢复至 50 Hz左右，系统恢复正常，图 5为网频变化图。

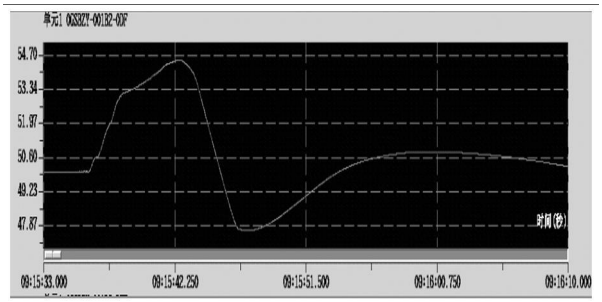


图 5　电网频率变化图

水轮机调速器人工死区、永态转差系数、比例增益、积分增益、微分增益等调节参数和水电机组的一次调频密切相关，各参数的合理整定与优化设置对于机组调节性能的有效发挥至关重要。图 6为调速器的传递框图。

调速器基本参数设置为

bp=4%，kp=200，ki=30，kd=150。

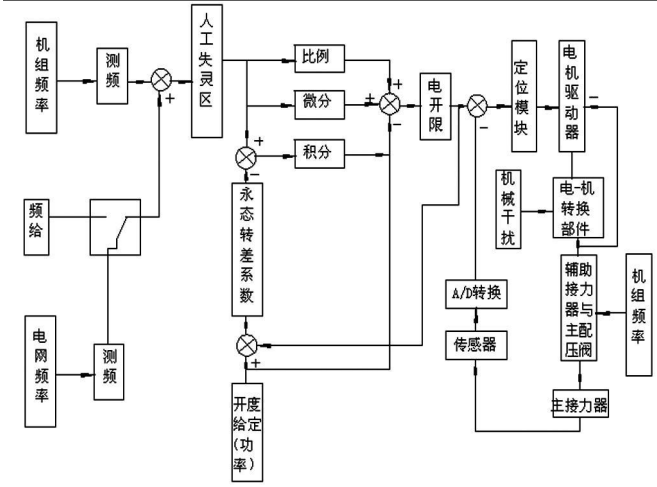


图 6　调速器的传递框图

从整个调节过程分析，结合调速器静特性试验及扰动试验曲线，调速器动作行为正确，这一过程基本符合调速器的调节特性。但是调速器参数设置存在不足。由于功率传感器故障率较高，为防止功率传感器间歇性故障，加入了功率传感器故障判据，为确保此时调速器的稳定调节，又加入了模式切换延时。由于模式切换过程中的延时，使调速器在切往频率模式时滞后明显，频率上升较快，而调速器本身又没有大网和小网运行方式的判据，在孤网下依然运行常规设置参数，各参数不能根据不同方式优化，造成在孤网方式过频时调速器导叶关闭过快，幅度过大，而低频时调节过程时间较长，调节能力不足，造成线路低周减载动作，多切了一定的负荷才维持了电网的稳定。

5　结　语

由这起线路相间短路引起调速器动作的行为可以得出，为了更好地发挥水电站机组的调频作用，确保电网安全，减少损失，进一步加强电网的稳定性，改善电能质量，必须严格控制水轮机调速器人工死区的整定值，根据机组状况和其在电网中的调频、调峰作用合理安排各并网水电机组调速器的永态转差系数。对于决定动态调节品质的其他调节参数，应严格按照相关技术规程的要求对其进行尽可能的优化设置。

新的微机调速器应加入运行于大电网和小电网的判据。当频率变化值超越某一范围时，根据实际电网频率变化量，立即将调速器切换至频率模式运行，降低永态转差系数，确保系统的安全稳定。

对于地区和大电网连接薄弱，特别是只有一条线路连接，当该线路发生故障时，经常发生孤网运行的此类情况，在此时为确保系统安全，防止电网崩溃，必须确保调速器以最快的方式切入频率模式运行，对于模式的切换要无延时。

另外应加强对运行人员的培训，做好事故预想，加大反事故演练的力度，加强反事故演习细节的演练，提高事故分析及处理能力；认真开展对全厂继电保护回路接线、定值及压板投退情况的检查，新安装的保护、临近年检的保护要作为重点检查对象，并且在系统事故时加强与网内相关电站的联系，便于相互间事故分析判断和处理。

参考文献

[1] 李华. 水电机组一次调频性能的测试与分析 [J]. 西北电力技术，2005, 33(1): 20－23.

[2] 黄国祯. 广州蓄能水电厂运行与管理的现代化 [J]. 水电自动化与大坝监测，2002, 26(1): 14－16.

[3] 陈传志. 计算机维修管理系统在广州蓄能水电厂的实施 [J]. 水电自动化与大坝监测，2002, 26(5): 31－34.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] 刘文斌,杜波,胡燕花. 水轮机调速器的运行与技术改造 [J]. 水力发电, 1999(9): 58－60.
[5] 张春丽,李咸善,胡翔勇,等. 水火电联合系统中水轮机及其调速系统对低频振荡的影响 [C]. 湖北省机械工程学会青年分会 2006年年会暨第 2届机械学院院长 (系主任)会议论文集 (下), 2006.
[6] 李光辉,余波,樊玉新,等. 基于可编程自动化控制器的水轮机调速器初探 [J]. 水力发电, 2007, 33(2): 60－62.

(收稿日期: 2010－04－01)

(上接第 47页)

于 900 mm,最大的还超过了 1 100 mm,这对于运输和使用很不方便,只有少数情况断面的边宽值小于 900 mm,但其长细比均接近 120,根据材料的变形特点可知,长细比越大,抱杆的横向变形增长越快,因此抱杆断面形式不宜采用等边三角形。

5 连接方式的设计

经过以上的分析,已经确定了采用钢管作主辅材,分段抱杆间主材的对接连接方式自然选择成熟的法兰盘连接方式,为保证提升抱杆时腰环的正常使用和连接方便且可靠,将其法兰盘设计成直角扇形型式,并且增加设置导向管,使得组装更加方便,连接可靠。主材与辅材的连接采用焊接连接,以避免销钉连接方式易发生在抱杆使用中被剪断而又不易发现的安全隐患。

6 有限元软件的应用

优化设计过程中采用了有限元软件作为计算手段,在 Midas2006有限元软件平台下建立抱杆立体受力模型,交由软件进行了大量的受力分析计算。然而 Midas2006有限元软件的操作是很复杂的,主要是建立抱杆的立体受力模型,不利于现场技术人员掌握,因此还开发了抱杆立体受力模型软件,只要输入受力工况的基本参数即可自动生成抱杆立体受力模型,然后在 Midas2006有限元软件里载入模型文件,即可计算抱杆的杆件应力和抱杆稳定安全系数,软件计算界面之一见图 1所示。

7 结 语

本项目通过对抱杆主辅材截面型式、材质和抱杆结构等方面的经济技术比较,采用大型有限元分析软件对钢结构单元进行设计优化,合理减小了抱杆截面

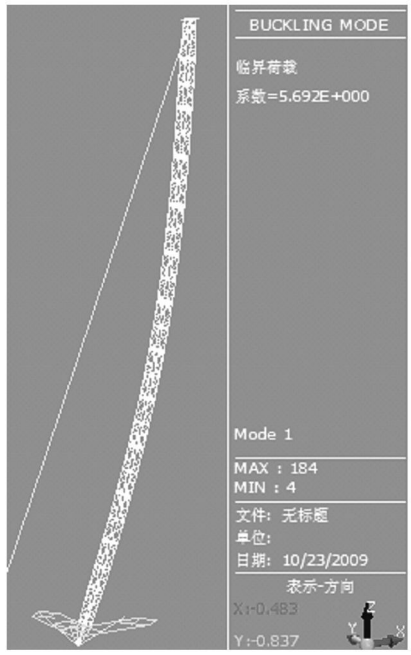


图 1 软件计算界面之一

尺寸与重量,提高了抱杆的承载能力,已在 ±800 kV向上线 (向家坝－上海)和 ±500 kV德宝 (德阳－宝鸡)直流工程以及 ±500 kV葛沪 (葛洲坝－上海)直流改造等工程广泛应用,提高了特高压铁塔组立施工效率,成效显著,并于 2010年 3月 11日顺利通过了四川省电力公司组织的项目验收。

参考文献

[1] 架空送电线路铁塔组立工程手册 [Z]. 北京:中国电力出版社, 2007.
[2] 高压架空输电线路施工技术手册——起重运输部分 [Z]. 北京:水利电力出版社, 1975.
[3] GB 50017－2003,钢结构设计规范 [S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
[4] DL/T 875－2004,输电线路施工机具设计、实验基本要求 [S].
[5] 范钦珊. 工程力学教程 (I) [M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
[6] 张俊光. 公路钢桁桥施工稳定安全系数优化设计 [D]. 西安:长安大学, 2009.

(收稿日期: 2010－04－19)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

220 kV母线保护改造技术原则探讨

左可飞,崔明德,李中华,赵 念
(成都电业局,四川 成都 610000)

摘 要:鉴于四川电网 220 kV电网日益增长的重要性以及部分 220 kV变电站 220 kV母线保护及断路器失灵保护装置超期运行的严峻性,迫切需要对部分 220 kV变电站 220 kV母线保护进行改造。在分析四川某 220 kV变电站双母接线方式下 220 kV母线保护改造方案的基础上,对改造中的直流回路、交流回路、跳闸回路及间隔失灵启动等回路改造技术原则进行了总结分析,以期对四川电网及其他省网 220 kV变电站 220 kV母线保护改造提供一定的参考与指导。

关键词:四川电网;母线保护;失灵启动;保护改造;技术原则

Abstract: In view of the growing importance of Sichuan 220 kV power grid and the seriousness of the extended operation for some of 220 kV bus protection devices in 220 kV substations, it is urgent need to rebuild some 220 kV bus protection. Based on a real 220 kV substation bus protection reformation project, the reformation technical principles for 220 kV bus protection, such as DC loop, AC loop, tripping and start malfunctioning loops in the reformation, are analyzed and summarized, which is expected to provide a reference and guidance for the further bus protection reformation projects in Sichuan power grid or the power gird in other provinces.

Key words: Sichuan power grid; bus protection; breaker malfunction; protection reformation; technical principle

中图分类号:TM771 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0074-06

0 引 言

随着四川地区社会及经济的快速发展,220 kV电网已经成为四川地区的主网,担负着越来越重要的作用,220 kV变电站的母线保护也变得越来越重要。

220 kV母线保护按照标准化设计必须双重化配置,一般按不同厂家配置两套母线差动及断路器失灵保护[1],但有些运行时间较长的站原来只配置了一套保护装置,基本都已达到了运行年限,老化严重,经常发生故障。由于无备件,一旦出现故障则不能及时处理。因此,为保证四川电网的安全稳定运行,某些 220 kV变电站母线保护改造工作也日益提上日程。

文献[2-5]针对具体站的母线改造情况及具体问题,对母线保护改造做了一定分析;文献[6-7]针对母线保护接线及母线保护调试等问题进行了分析,旨在解决调试中出现的具体问题。这里则是结合四川电网某 220 kV变电站 220 kV母线保护改造实施方案,探讨了 220 kV母线保护改造的一些具体技术原则,以期为四川电网及其他省网 220 kV母线保护改造提供一定的技术参考。

1 某变电站 220kV电压等级保护配置

1.1 主变压器保护配置

1号主变压器保护:1号主变压器保护采用南京电力自动化设备总厂生产的 WBZ-1201系列数字式变压器保护装置,共配置 3个屏,其中 1号屏配置有差动保护,高、中、低三侧后备保护;2号屏配置非电量保护(含高压侧失灵启动功能);3号屏配置第二套差动保护。

2号主变压器保护:1号保护屏配置 RCS-978E变压器成套保护、RCS-923CT失灵保护装置;2号保护屏配置 PRS-778变压器成套保护、PRS-761A非电量保护装置。

1.2 220 kV线路保护配置

该站有 4条 220 kV线路,开关编号分别为 263、264、265和 266开关,各保护配置如下。

263开关:南京南瑞 LFP-901A、LFP-902A高压线路保护及 LFP-923C断路器失灵启动及辅助保护;

264开关:南京南瑞 RCS-931AM、南自厂 PSL-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

602(G)高压线路保护及 RCS－923A断路器失灵启动及辅助保护;

265开关:北京四方 CSC－102A、CSC－101A高压线路保护及 CSC－122A断路器辅助保护;

266开关:南京南瑞 RCS－901A、RCS－902A高压线路保护及 RCS－923A断路器失灵启动及辅助保护。

1.3 220 kV母线保护配置

该站 220 kV母线差动及失灵保护配置一套南京电力自动化设备总厂生产的 WMZ－41母线保护装置,运行了 10年,已基本达到运行年限。该次母线保护改造,配置了两套国电南京自动化股份有限公司 SG B750数字式母线保护装置,改造后取消原 WMZ－41母线保护装置。

2 该站 220 kV母线保护改造施工方案

由于各间隔备用保护级电流绕组及备用刀闸接点等不足,经过分析讨论,确定该次改造施工总的指导原则是:在改造施工过程中,原 WMZ－41母线保护继续运行,各间隔停电时,首先完善 1号 SG B750母线保护相关二次回路,待所有间隔二次回路搭接及调试完毕,将 1号 SG B750母线保护投入运行。1号 SG B750母线保护投运后,则安排停用原 WMZ－41母线保护,将其所用的电流、刀闸接点等回路改接到 2号 SG B750母线保护,最终完成两套母线保护的改造工作。

下面具体介绍相关回路的施工方案。

2.1 电流回路

由于各间隔 TV绕组均只有一组备用保护级绕组,按照总的指导原则,在各间隔停电时,首先将该组电流搭接于 1号 SG B750母线保护。待 1号 SG B750母线保护投运后,安排 WMZ－41母线保护停运,将其所用的电流回路改接到 2号 SG B750母线保护,此时,将不再安排停电,电流回路需在带电运行时进行搭接。

2.2 直流及跳闸回路

该站直流电源及跳闸回路不满足标准化设计规范[8],两组直流电源、两套保护跳闸与两组跳闸线圈不满足一一对应原则,因此各间隔停电时,需对各保护间隔直流及跳闸回路进行整改,具体为:1组直流电源由 1号直流馈线屏对应 1号保护屏和 1组操作电源;2组直流电源由 2号直流馈线屏对应 2号保护屏和 2组操作电源;1号保护跳闸作用于 1组跳圈;2号保护跳闸作用于 2组跳圈。

保留 WMZ－41母线保护跳闸回路,两套 SG B750母线保护跳闸回路可以按照停电安排进行顺序搭接,但在进行下一间隔搭接时,对已经完成搭接的间隔二次回路做好安全措施,防止在试验时误跳运行开关。

2.3 失灵启动回路

2.3.1 220 kV线路保护失灵启动回路

263开关两套保护、266开关两套保护、264开关 1号保护 RCS－931AM装置均有备用失灵启动接点,间隔停电时可将备用的该组接点按照一一对应原则,与两套 SG B750母线保护进行搭接。

264开关 2号保护 PSL－602(G)保护装置、265开关两套保护 CSC－102A和 CSC－101A保护装置有备用失灵启动接点,但未引到端子排,因此需在间隔停电时,由装置背板引出备用的一组失灵启动接点,然后再进行失灵回路搭接。

对应于原 WMZ－41母线保护,各间隔保护启动失灵回路暂时不变。

2.3.2 1号主变压器保护高压侧开关失灵启动回路

1号主变压器 WBZ－1201型变压器保护,无足够的跳闸及失灵启动接点,为了保留原来的失灵启动回路,建议在 1号主变压器停电时,将原失灵启动接点进行扩展,既保留原失灵启动回路,也能完善启动两套新母线保护失灵功能。

1号主变压器原失灵启动回路见图 1。

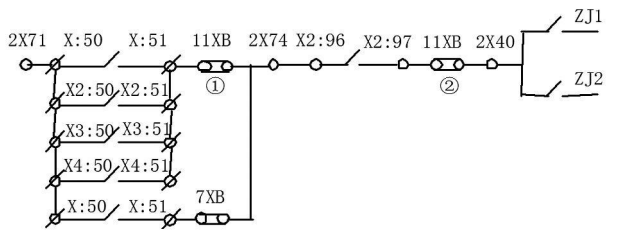


图 1 1号主变压器原失灵启动回路

其中:

(1) 11XB(①)为 1号屏失灵启动硬压板,X:50－X:51为 1号差动保护失灵启动接点;X2:50－X2:51为高后备保护失灵启动接点;X3:50－X3:51为中后备保护失灵启动接点;X4:50－X4:51为低后备保护失灵启动接点;

(2) 7XB为 3号屏失灵启动硬压板,X:50－X:51为 2号差动保护失灵启动接点;

(3) 11XB(②)为 2号屏失灵总启动硬压板 (非电量保护

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

包含高压侧失灵启动功能), **X2:96－X2:97为 2号屏专用失灵启动装置动作接点**;

(4) **ZJ1、ZJ2分别为 I母、II母刀闸位置接点**。

失灵启动接点扩展方案如下。

将原失灵启动回路在 2X71和 2X74分别断开,接入成都智达电力自动控制有限公司生产的 JBK－3932A扩展盒进行扩展。 JBK－3932A扩展盒可扩展 4对无源常开接点,扩展盒原理如图 2所示,扩展回路如图 3所示。

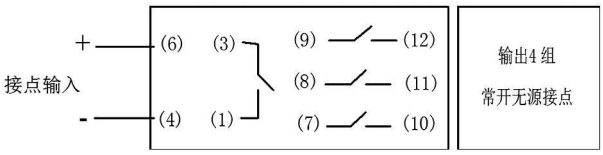


图 2 JBK－3932A无源扩展盒原理

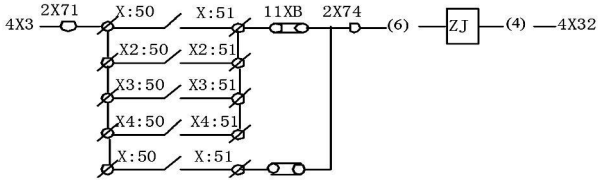
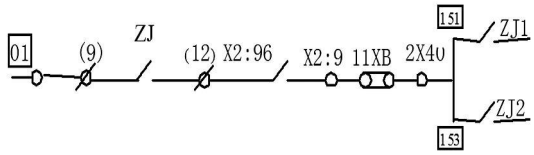


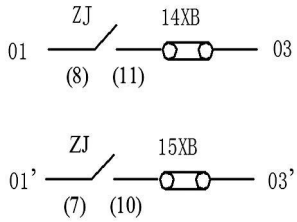
图 3 1号主变压器失灵回路扩展图

其中:ZJ为扩展盒 JBK－3932A; 4X3、4X32为主变压器高压侧开关切换后操作电源正电、负电。

扩展后提供一对接点启动 WMZ－41母线保护失灵,保留原失灵启动回路,如图 4(a);另外提供两对给 SG B750数字式母线保护,完成启动新母线保护失灵功能,如图 4(b)。



(a) 启动 WMZ-41 母线保护失灵回路



(b)启动两套 SG B750母线保护失灵回路

图 4 扩展后接点失灵启动回路

其中:14XB、15XB为新增压板,分别启动 1号、2号 SG B750母线保护失灵压板。

2.3.3 2号主变压器失灵回路

原 2号主变压器高压侧失灵启动母差回路如图 5所示。

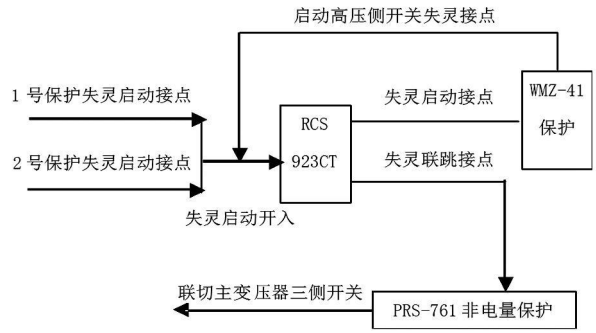


图 5 2号主变压器原失灵启动母差回路

在保证原失灵启动回路不变的情况下,主要有两种方案完善失灵启动新母线保护回路。

方案一:2号主变压器两套保护的失灵启动备用接点直接开入到两套 SG B750母线保护,主变压器高压侧失灵电流判据由母线保护来实现;母差跳闸启动主变压器高压侧开关失灵联切主变压器三侧接点开入 RCS－923CT的启动联跳接点,经电流判据后,再启动联切三侧开关,该回路如图 6所示。

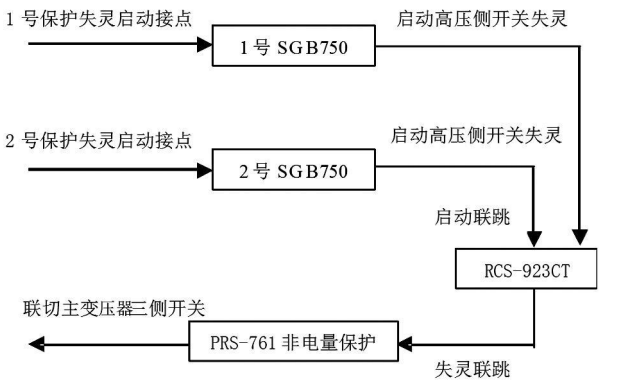


图 6 方案一失灵回路图

方案二:2号主变压器两套保护的失灵启动备用接点直接开入到两套 SG B750母线保护,主变压器高压侧失灵电流判据由母线保护来实现;母差跳闸启动主变压器高压侧失灵联切主变压器三侧接点则直接接入非电量保护装置,然后联切其他两侧开关,此时电流判据也由母线保护实现,该回路如附图 7所示。

综合分析上述两种方案发现,方案一回路虽然比较简单,但在母差保护动作且主变压器高压侧开关失灵时,母差启动主变压器高压侧开关失灵联切主变压器三侧时,电流判据由母线保护和 RCS－923C共同实现,存在时间整定配合问题,且不满足设计要求[1];方案二回路简单清晰,功能明确,满足一一对应的设计原则;另外,还取消了主变压器专用失灵装

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

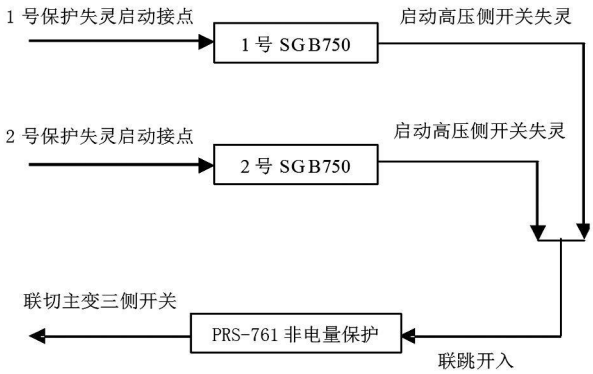


图 7 方案二失灵回路图

备注:主变压器高压侧失灵解除复压闭锁回路未体现在上述各图中。

置 RCS—923CT的失灵启动功能,有两个优点:① 在二次回路方面,采用母线失灵保护电流判据,满足新的标准化设计规范要求[1,8];② 在运行操作方面,可减少值班员操作步骤,减少停电时间,经济性提高。因此,结合母线保护改造停电方案、继保反措及二次回路简单原则,采用方案二实现 2号变失灵启动功能。

2.4 其他回路

2.4.1 刀闸接点

由于各间隔刀闸只存在一对备用接点,因此处理方式与电流回路相同,先搭接 1号 SG B750母线保护,待 WMZ—41母线保护停运后将其所用的刀闸接点改接至 2号 SG B750母线保护。

2.4.2 电压回路

电压回路比较简单,从电压小母线直接将 Ⅰ、Ⅱ段母线电压接入新母线保护即可。

综上所述,根据上述方案在各间隔顺序停电后,1号 SG B750母线保护所有回路均已完善,达到投运条件,可先将 1号新母线保护投运,这样,原 WMZ—41母线保护和 1号 SG B750母线保护将共同作为母线保护。待安排 WMZ—41母线保护停电时,再将 2号 SG B750母线保护回路进行完善,然后投运。WMZ—41母线保护二次回路暂且不动,待线路及主变压器保护安排年检时再将与原母线保护的相关回路剔除,这样工作量可大大减小,而且缩短了间隔停电时间。

3 220 kV母线保护改造施工技术原则

通过第 2节对某 220 kV母线保护改造施工方案的分析,总结 220kV母线保护改造施工的回路改造技术原则如下。

3.1 直流回路整改原则

各间隔保护直流电源整改:1组直流电源,对应于 1号直流馈线屏、1号保护屏和 1组操作电源;2组直流电源,对应于 2号直流馈线屏、2号保护屏和 2组操作电源;

母线保护直流电源整改:1号直流馈线屏对应 1号保护屏;2号直流馈线屏对应 2号保护屏。若编号不一致,新母线保护应按照规范要求进行设计,投运后再对旧母线保护进行整改。

3.2 交流电流回路整改原则

在各间隔开关 TA存在两组备用保护绕组的基础上,可以在间隔停电时进行电流回路搭接,若只存在一组备用绕组,可先进行一套新母线保护回路搭接,另一套新母线保护电流回路采用原母线保护回路电流,待一套新母线保护投运后原母线保护停电时再进行电流回路更改搭接。若无备用绕组,而故障录波装置所用 TA绕组独立,可将故障录波装置串接于某套保护装置之后,再将空余出的 TA绕组接于第一套母线保护。

3.3 跳闸回路整改原则

各间隔保护跳闸回路整改:1号保护作用于 1组跳圈;2号保护作用于 2组跳圈。

母线保护跳闸回路整改:1号母线保护作用于 1组跳圈;2号母线保护作用于 2组跳圈。但在新母线保护投运前必须保证原母线保护同时作用于两个跳闸线圈。若新母线保护投运后随即改造原母线保护,则按照规范整改,否则原母线保护跳双跳圈回路继续保留直至改造。

3.4 失灵启动回路整改原则

失灵启动回路整改总原则是:所有间隔 1号保护启动 1号母线保护;所有间隔 2号保护启动 2号母线保护。失灵电流判别尽量采用母线保护实现。

对于 220 kV线路间隔保护,一般情况下都存在备用的失灵启动接点 (对于没有引出到端子排的情况,可以在该间隔停电时从装置背板配出),采用备用失灵启动接点直接开入到两套新母线保护,取消线路保护屏的断路器失灵启动及辅助保护装置中的失灵启动功能,电流判别由母线保护实现。对于某些保护装置 (如 LFP—900系列)若不能再提供一对出口接点用于新母差启动失灵,则将原启动回路进行重动后再分别供给两套母线保护使用。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于主变压器保护,原则上允许采用其自身专用失灵启动装置启动母差失灵,但两套母线保护的失灵启动回路不得都经过失灵启动装置。当两套保护均有备用接点或者可以通过配置引出的情况,例如上述的 2号主变压器失灵启动方案,可直接开入到新母线保护,取消原主变压器高压侧开关专用失灵启动装置中的失灵启动功能,失灵电流判别由新母线保护实现;母线保护跳闸联切主变压器三侧开关及主变压器高压侧失灵启动联切主变压器三侧开关回路,直接接入非电量保护装置专用失灵联切继电器或备用的可实现联切的继电器。

若主变压器保护其中一套保护或两套保护均不存在备用失灵启动接点时,如前面讨论的 1号主变压器失灵启动方案,此时只能在主变压器保护停电时,将该回路进行重动,重动后的一对接点启动原母差失灵,另一对来完善新母差失灵启动回路。对于母线保护跳闸联切主变压器三侧开关及主变压器高压侧失灵启动联切主变压器三侧开关回路,可以接入专用的主变压器专用失灵启动装置,也可接入非电量保护装置专用失灵联切继电器或备用的可实现联切的继电器。

3.5 二次回路整改要求

(1)两套母线保护的失灵启动回路与跳闸回路均不能公用一根电缆,保证回路独立性;为减少电缆,刀闸接点宜与跳闸回路公用一根电缆;

(2)单切换箱情况下,双套母线保护刀闸接点允许继续取用切换箱;若采用双切换箱,则两套母线保护刀闸接点分别取自两个切换箱。

(3)关于母线保护命名编号与二次回路的统一问题:实际上母线保护的编号原则是根据生产厂家来确定的,运行中进行改造由于无法确认新订保护是否还能满足编号规则,二次回路上不可能完全按照标号规则进行调整,也没有必要。因此只能根据当前保护的编号进行回路完善,以后母线保护变化只变动母线保护编号,相应回路均保持不变。

3.6 典型改造方案

220 kV母线保护根据配置情况及改造回路的复杂情况,一般主要分为以下 3种情况。

情况一:原一套母线保护运行,需新增加一套母线保护装置,但原母线保护不具备失灵电流判别功能(如 BP—2A系列),需保留间隔保护失灵启动装置。

一般情况下间隔保护的失灵启动装置在 1号屏上,间隔停电时该屏应接入 1组直流,1号间隔保护与失灵启动装置配合启动 BP—2A失灵保护,此时不管 BP—2A保护编号,均接入 1组直流,同时作用于两个跳圈。2号间隔保护接入 2组直流,间隔停电时拆除 2号间隔保护启动原母线保护失灵回路,接点直接接入新母线保护,新母线保护接入 2组直流,仅作用于 2组跳圈;

情况二:原一套母线保护运行,需新增加一套母线保护装置,原母线保护具备失灵电流判别功能(如 RCS—915系列)。

在间隔停电时,取消间隔保护屏的失灵电流判据,母线保护编号按照规范确定。将 1号、2号间隔保护动作接点直接接入原母线保护和新母线保护,此时该间隔失灵电流判别由原母线保护完成。

情况三:更换原母线保护装置(例如更换 BP—2A),同时新增一套母线保护。

母线保护编号按照规范确定。在间隔停电时,保持 BP—2A失灵启动回路不动,按照规范接入新母线保护失灵启动回路,假设新母线保护定义为 1号保护,则将 1号间隔保护的第二组失灵启动接点接入新母线保护,新母线保护投入运行后进行原母线保护改造时,再将 2号间隔保护第二组失灵启动接点接入 2号母线保护,同时将原失灵启动回路拆除。

备注:关于保护装置命名原则仅适用于四川电网[9],不具统一性,其他省网可参照执行或根据各省实际情况执行。

4 结 论

结合四川电网某 220 kV变电站 220 kV母线保护改造方案,对 220 kV母线保护改造的一些实施原则进行了探讨,总结了 220 kV母线保护改造的一些技术原则,希望能为以后四川电网及其他省网 220 kV母线保护改造提供一定的参考与指导。

参考文献

[1] 国家电网公司. 变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范[S]. 2008.

[2] 魏威,周虎兵,等. 500 kV孝感变电站 220kV母线保护双重化改造[J]. 湖北电力, 2006, 3(16): 30—32.

[3] 陈宇. 500 kV三官殿变电站 220 kV母线保护的改造[J]. 华东电力, 2009, 37(4): 597—599.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 贾润芳,孙凤娟. 500 kV变电站 220 kV系统双母线双分段接线方式的施工方案 [J]. 河北电力技术, 2009, 28(2): 11－13.
[5] 刘剑红. 500 kV变电站 220 kV母线保护存在的问题及改进 [J]. 湖北电力, 2008, 32(2): 21－22.
[6] 王世祥,左婧.母线保护双重化改造中注意事项的探讨 [J].继电器, 2008, 36(3): 75－77.
[7] 谭胜兰,张电. 220 kV母线保护改造的技术探讨 [J]. 华东电力, 2006, 31(16): 81－82.
[8] 国家电网公司. 线路保护及辅助装置标准化设计规范 [S]. 2007.
[9] 四川省电力公司. 四川电网 220 kV及以上系统继电保护装置编号命名原则 [S]. 2008.

作者简介:

左可飞 (1972－),男,本科,工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制;

崔明德 (1981－),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制。

(**收稿日期**: 2010－04－19)

(上接第 18页)

电容器。同时预算母线电压和负荷变化,防止无功补偿设备投切振荡。

逆调压功能:根据当前负荷水平,在电压合格范围内,进行全电网分析,实现高峰负荷时电压偏上限运行,低谷时偏下限运行等功能。

图形建模功能:采用开放式图形建模结构,以适应电网主接线变化。

控制信息管理功能:对电压、有功、无功、功率因数等曲线图自动存档并生成各种报表。

统计考核功能:对电网无功设备实际运行情况进行统计,为管理层进行考核提供依据。

语音提示功能:对尚不能接入 AVC的地区或站点,在有人值班的地方设置 AVC子站将控制指标进行语音提示。

3 AVC系统运行情况

从实际运行情况看, AVC系统投运后提高了电压质量,在以下几个方面发挥了明显作用。

1)降损节能效益明显,在县级电网网架基本没变、运行方式基本相同、电量基本相同的条件下,实现了降损节能。

2)减少变压器分接头调节。一般运行情况下, VQC控制下的调挡次数大约是 5～8次 /天。 AVC投入后,调挡次数便大幅下降,调挡次数平均 2. 5次 /天;即使在电网峰谷差和调压压力较大的情况下也只有 4～5次 /天。

3)减轻了调度及监控人员劳动强度。 AVC系统投入运行后,实现了自动调压,从而大大减轻了负荷峰谷交替时段人工劳动强度。

4)提高了电网的安全运行水平。 AVC系统是调控静态无功补偿设备,但它对电网动态运行十分有利,在一定程度上提高了系统无功的动态补偿能力。

4 结 论

总之,在电网无功优化和控制方面 AVC系统是目前技术和管理的发展方向,势必替代目前使用的 VQC装置。在成都双流县级电网已投入使用 AVC系统中无功和电压控制都取得了较好的效果。下一步将逐步在各县级电网建设 AVC系统,最终构成完善的地区电网 AVC系统,以提高整个电网的电压合格率,减少无功传输,优化电网潮流分布,降低网损,同时减轻运行人员的劳动强度。

参考文献

[1] 王 萍.无功电压优化集中控制系统在青岛电网的应用 [J].中国电力, 2007, 40(1): 36－39.
[2] 吴银凤,肖 源,邝先验.地区电网电压无功优化闭环控制系统设计 [J].电气应用, 2007, 26(11): 33－36.
[3] 袁 丁,郭西进.电压无功优化控制系统在地区电网中的应用 [J].电力需求侧管理, 2007, 9(2): 18－20.
[4] 苏辛一,张雪敏,何光宇,等.互联电网自动电压控制系统协调变量设计 [J].电力系统自动化, 2009, 33(14): 22－26.

作者简介:

何 东 (1972－),男,工程师,从事电网运行、调度、继电保护等方面的管理工作。

吴端华 (1964－),女,工程师,从事继电保护方面的管理工作。

洪行旅 (1956－),男,高级工程师,从事电网运行、继电保护和通信自动化方面的管理工作。

段登伟 (1974－),男,博士,高级工程师,从事电力市场和电网运行方面的研究工作。

(**收稿日期**: 2010－03－02)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

兴安直流阀冷系统主过滤器堵塞原因分析及改进建议

田兴旺
(中国南方电网超高压输电公司天生桥局,贵州 兴义 562400)

摘 要:根据兴安直流系统发生阀冷系统主过滤器堵塞情况进行总结分析,找出了产生堵塞的原因,并提出了针对性的预防措施及改进建议,以达到避免主过滤器堵塞而导致直流系统停运的目的,提高了兴安直流的直流可靠率,保障了直流系统的安全稳定运行。

关键词:阀冷系统;过滤器;堵塞;改进

Abstract: The reasons for the filter blocking are found out based on the summarization and analyses of filter blocking in valve cooling system of Xing—An HVDC project. In order to prevent the main filter being blocking which will cause the outage of HVDC system, the specific precautionary measures and improvement suggestions are put forward. Therefore, it can improve the reliability of Xing—An HVDC project, and guarantee the safe and stable operation of HVDC system.

Key words: valve cooling system; filter; blocking; improvement

中图分类号:TM732 **文献标志码**:B **文章编号**:1003—6954(2010)04—0080—03

0 引 言

阀冷系统是换流阀的一个重要组成部分,它将阀体各元件的功耗发热量排放到阀厅外,保证晶闸管运行结温在正常范围[1]。冷却系统直接影响到换流阀的安全可靠运行,要求它既要有足够的冷却容量,又要有较高的可靠性。从兴安直流输电工程运行实际情况看,内冷水系统作为一个较薄弱的环节已成为制约直流输电系统可靠性进一步提高的重要因素。阀内冷水主过滤器出现较严重的堵塞,导致内冷水流量降低、主过滤器压差升高、阀塔进出水压差降低,进一步发展后将导致直流系统跳闸,更严重的可能损坏换流阀设备,造成长时间停运。兴安直流自 2008年 12月 01日以来,已多次出现阀冷系统主过滤器堵塞现象,经过多次分析、处理,积累了一些有助于缓解主过滤器堵塞的手段,在此基础上深入分析可能的原因,提出了针对性的预防措施及改进建议。

1 兴安直流阀冷系统主过滤器堵塞情况

1.1 阀冷系统

兴安直流阀冷系统每极可控硅阀配置一套独立的水冷却系统,该系统由两个冷却循环系统组成[2]。

(1)内冷水循环系统:主要由主循环泵、补水泵、补水箱、主管道过滤器、离子交换器、膨胀器、补水箱、逆止阀、冷却水管等组成,通过去离子水对阀进行冷却;

(2)外冷水循环系统:主要由喷淋泵、排污泵、外冷水过滤器、冷却塔及其风扇、软化器、化学处理容器、喷淋水池等组成,通过喷淋塔对内冷水进行冷却。其中在内冷水进水管道上加装有内冷水主过滤器。阀冷配置图及主过滤器位置如图 1所示。

主过滤器进出水侧压力传感器 B106、B107(如图 2所示)的差值可反映主过滤器(如图 3所示)堵塞情况,压差越大堵塞越严重。主过滤器堵塞后,相关定值超过表 1的启动定值后会出现以下可能。

(1)主过滤器压差升高,阀冷系统发告警信号,可能导致主过滤器滤网或阀塔设备损坏;

(2)内冷水流量降低,超过跳闸定值,可能导致跳闸;

(3)阀塔进出水压差降低,流量减小,影响整体冷却效果,严重时损坏设备[3]。

1.2 内冷水堵塞处理情况

从 2008年 12月 1日以来,兴安直流多次出现阀内冷水主过滤器堵塞引起的内冷水流量降低,随后出现主过滤器进出水压差逐渐升高的故障现象,期间多次申请停电处理,采取了如下处理措施。

(1)更换滤网:检查发现主过滤器滤网上有较多杂物且难以清洗干净,使用备品更换了滤网。

(2)临时调整了阀冷定值:将内冷水流量低跳闸

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

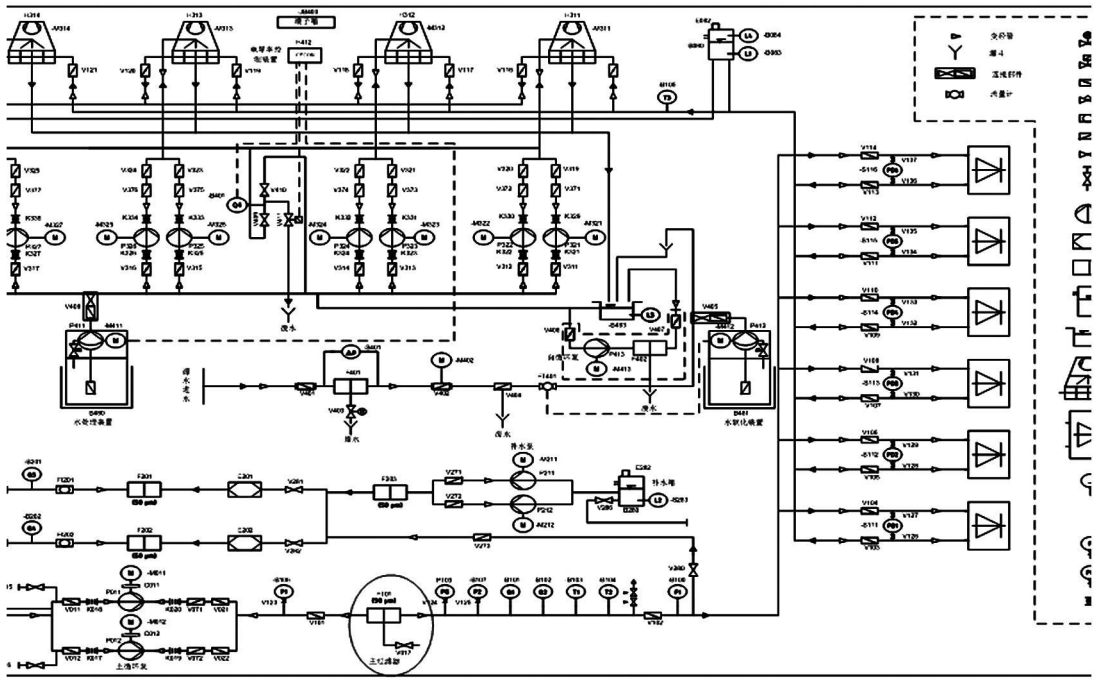


图 1 兴安直流阀冷系统配置图

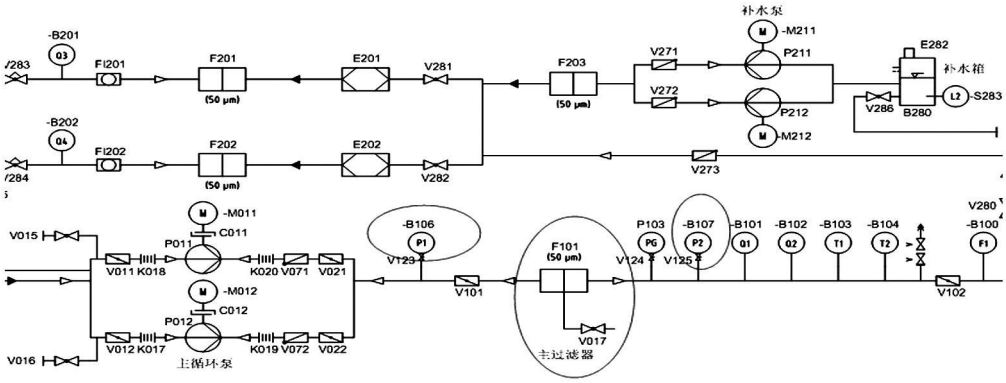


图 2 兴安直流主过滤器差压传感器位置

表 1 主过滤器堵塞相关定值表[2]

描　　述	测量装置编号	启动定值	复归定值	延时
主过滤器压差高告警	B106－B107	4×10^4 Pa	3×10^4 Pa	1 s
内冷水流量低告警	B100	4000 L/min	4100 L/min	10 s
主泵切换时内冷水流量低告警	B100	3700 L/min	4100 L/min	10 s
内冷水流量低跳闸 Ⅰ段	B100	4000 L/min	4100 L/min	20 s
主泵切换时内冷水流量低跳闸 Ⅰ段	B100	3700 L/min	4100 L/min	20 s
内冷水流量低跳闸Ⅱ段	B100	800 L/min	900 L/min	1 s

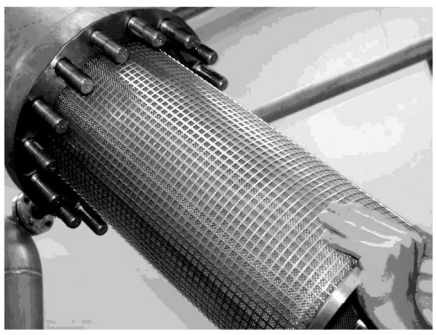


图 3 主过滤器实物图

一段 B100启动定值、复归定值和延时定值均做调整[4]。

(3)清洗滤网:发现主过滤器滤网上堵塞有少部分塑料皮、毛发、垢样等杂质,甚至有碎布。

2 内冷水过滤器堵塞原因分析

结合主过滤器堵塞检查情况,分析得以下结论。

(1)主过滤器滤网内发现的碎布、毛发、垫片、石

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

头等杂质应该是工程阶段遗留于内冷水管内某处“死区”。

(2)在主泵启停过程中,内冷水参数发生变化的诱因作用下,“死区”内部分杂质进入内冷水循环回路,在经过主过滤器时被拦截从而引起过滤器堵塞[5]。

(3)可能的“死区”有:水泵处的“U”形水管处、盲管、膨胀水箱、外冷却塔内的内冷水盘管等。

(4)目前阀内冷水主过滤器堵塞后的处理难点,根本在于主过滤器无冗余设计,另外就是内冷水管路存在盲端或不利于进行反冲洗的地方。

(5)主过滤器上堵塞的垢样需要长期观察是否持续产生。滤网内杂质化学分析结果见表 2。

表 2 滤网水垢样本化验结果

分析项目	滤网杂质成分 /%	备 注
三氧化二铁	4.6	
三氧化二铝	63.37	
氧化钙	3.1	
氧化镁	0.53	
氧化铜	0.040	
氧化锌	0.055	
二氧化铝	2.21	
氧化纳	10.93	
氧化钾	1.23	

3 预防措施及改进建议

根据以上的原因分析,针对性地提出如下预防措施及改进建议。

(1)根据兴安直流的实际情况,考虑到主过滤器压差和主水流量的启动定值,建议更改定值,做到可控、在控,找出较优的运行方式。

(2)彻底清理内冷水主水管道“死区”可能存在杂质。

(3)继续通过化验等技术手段彻底弄清杂物来历,找出原因,为后续工程积累经验[6]。

(4)双重化主过滤器。建议每极配置两台并联的主过滤器 (如图 4),实现冗余配置。

(5)平衡两台主泵的出力。改进主泵进出水管的形状。主泵进出水管与主管连接处一个为 T形、一个为弧形,导致两台主泵的实际出力不完全一样,在主泵切换时,工况差异带来一定的不确定性。建议主泵进出水管参考喷淋泵出水管采取弧形并接的方式 (如图 5),可以消除差异性。

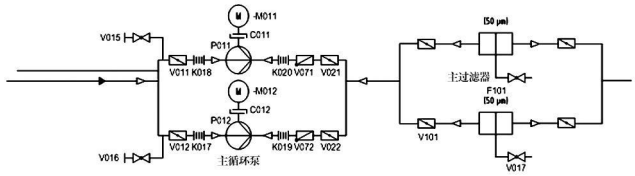


图 4 在主管道上增设一台主过滤器

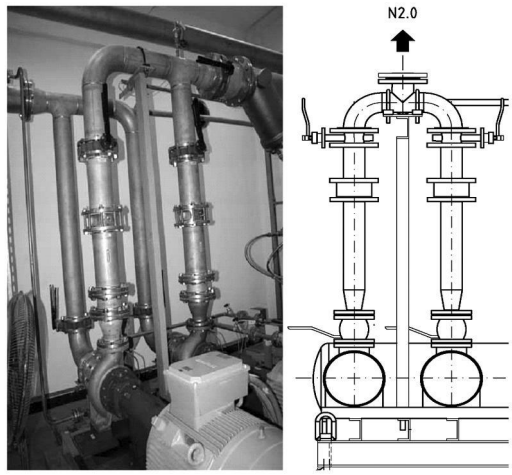


图 5 主泵进出水管改进措施

4 结 语

根据兴安直流系统发生的阀内冷水主过滤器堵塞情况进行总结分析,找出了产生堵塞的原因,并根据实际情况提出了针对性的预防措施及改进建议,以达到避免主过滤器堵塞而导致直流系统停运的目的。提高了兴安直流的直流可靠率,保障了直流系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 赵婉君.直流输电 [M].浙江大学发电教研组直流输电教研组,1982.

[2] Siemens. Gui—Guang Ⅱ Line ±500 kV DC Transmission Project Valve Cooling System Maintenance Manual EB4.121. XS—0[Z]. Siemens/CSG, 2007.

[3] 李和明,李俊卿.汽轮发电机定子冷却水路堵塞时的温度场分析与计算 [J].中国电机工程学,2005,25(21):163—168.

[4] 夏拥,左干清,等.高压直流阀冷系统漏水检测功能的改进 [J].南方电网技术,2009,3(4):53—55.

[5] 邓本飞,孙恒明,曹继丰.高压直流阀冷系统的除垢工艺 [J].南方电网技术,2008,2(3):73—76.

[6] 王远游,郝志杰,林睿.天广直流工程换流阀冷却系统腐蚀与沉积 [J].高电压技术,2006,32(9):80—83.

作者简介:

田兴旺 (1980—),男,工程师,从事高压直流系统运行维护工作。

(**收稿日期:** 2010—03—19)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水轮发电机定子单相接地的继电保护技术分析

宋全林[1], 桂　林[2], 党晓强[2]
(1. 成都电业局双流供电局, 四川 成都　610200; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都　610065)

摘　要: 阐述了水轮发电机定子单相接地保护所涉及的相关内容, 着重对其继电保护的动作方式、双频式保护的基本原理和影响其保护动作的注意因素进行了分析和评述, 同时对注入式保护做了介绍, 最后对前述相关内容以及后续研究做了结论和展望。

关键词: 水轮发电机; 定子单相接地; 继电保护

Abstract: The principle theory of single-phase earthing protection of hydraulic generator stator and its relevant contents are analyzed. The neutral point ground pattern and two-frequency ground protection are the focuses. The schemes for single-phase earthing of hydraulic generator stator are discussed, and the new developing trend for the single-phase earthing is predicted lastly.

Key words: hydraulic generator; single-phase earth fault of stator; relay protection
中图分类号: TM771　**文献标志码**: A　**文章编号**: 1003-6954(2010)04-0083-05

0　引　言

大型水轮发电机在电力系统中有十分重要的地位, 其结构复杂、造价昂贵、铁心检修困难, 一旦遭受损坏, 需要的检修期很长, 将给社会带来很大的经济损失。定子绕组与铁心间的绝缘破坏, 就形成了定子单相接地故障, 这是一种最常见的发电机故障。发电机单机容量的增大, 一般使三相定子绕组对地电容增加, 对应的单相接地电流也增大, 当接地电流大到能在故障点引起电弧时, 将使定子绕组的绝缘和定子铁心烧坏, 容易发展成危害更大的定子绕组相间或匝间短路, 所以大型水轮发电机对定子绕组接地保护的灵敏性和可靠性要求很高。有文献指出, 许多相间短路都是由单相接地发展而来的, 其中有专家组对三峡发电机组提出: "对于单相接地故障, 定子铁心不用修复", 即是说任何对定子铁心的"轻微损坏"也是不允许的[1-2]。

水轮发电机单相接地的 100%保护存在的问题很多, 一般由两部分组成, 一部分由零序电压保护定子绕组的 85%以上, 其余部分由其他原理 (如三次谐波原理或叠加电源方式原理)进行保护。双频式 100%接地保护是定子单相接地的传统保护, 双频式保护是对基波零序电压保护和三次谐波电压保护的统称, 实践证明该保护在选择性、可靠性和灵敏性方面并不令人满意, 其中三次谐波电压保护存在原理上的缺陷, 灵敏度较低, 在运行中存在的问题最多。近些年来外加电源的低频注入式定子单相接地保护逐步普及开来, 它除了能和零序电压保护共同实现 100%保护以外, 还能起到监视绕组绝缘下降作用, 有逐步取代双频式保护配合的趋势[3-8]。下面将围绕水轮发电机定子单相接地保护所涉及的相关内容做了深入的分析、评述和结论。

1　继电保护的动作方式

中国大中型水电厂针对定子单相接地保护动作方式的基本思想可分为两种: 一种为近年新建大型水力发电厂引进国外技术, 如二滩电厂、三峡电厂和广州抽水蓄能电厂的水轮发电机组, 其保护非常谨慎, 为了使定子免遭破坏, 同时避免保护拒动或误动, 由外加电源式保护与零序电压保护配合构成 100%接地保护。保护直接作用于跳闸, 但对系统的供电有冲击, 建设中的小湾、龙滩和溪洛渡等大型水电厂也是按照此思路配制的保护。另一种保护思想动作于信号, 故障机组经转移负荷后平稳停机, 其对系统的供电冲击没有那么大, 对应的机组容量小了很多, 如早些年建设的李家峡电厂、小浪底电厂、葛洲坝电厂和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

天生桥电厂等规模稍小些的水电厂,其保护配制原来多为由基波零序电压保护和三次谐波电压保护构成的双频式保护。接地保护主要考虑的是过电压和铁心的烧损问题:①接地故障电流的大小和持续时间长短将直接影响定子铁心的烧伤程度和修复期;②由于接地故障的存在,会引起接地弧光过电压,可能导致发电机其他位置绝缘的破坏,形成危害严重的相间或匝间短路故障。

定子单相接地保护的动作方式与发电机中性点的接地方式密切相关,中性点接地方式的不同直接影响着接地电流的大小。按照《IEEE guide for generator ground protection》推荐,大容量的发电机中性点接地运行方式就主要有中性点经高阻接地和中性点经消弧线圈接地两种运行方式,水轮发电机中性点的接地方式在欧美以经配电变压器高阻接地为主,中国新建大型水力发电厂多采用配电变压器进行接地,老电厂多采用消弧线圈接地。如果发电机的中性点不接地,那么接地时会产生较大的注入容性接地电流;当中性点采用消弧线圈接地时,由于消弧线圈的电感电流的抵消,接地电流将被减小;中性点采用变压器接地相当于经一个大电阻直接接地,可以避免产生弧光过电压,但会产生很大的接地电流。经消弧线圈接地是国内专家的主流设计,将接地故障电流变小限制在安全范围之内,使得定子铁心免于遭受损坏,可以在发生接地后允许发电机运行一段时间,只报警不跳闸,但可能引起谐振过电压;经变压器接地是国外主流设计,由于流过故障点电流较大,为保证机组安全,就必须瞬间停机灭磁。这在国外系统备用容量充足的情况下是可取的,但对于中国来说,就不能认为是合理的,但同时也应看到经消弧线圈接地的约束条件比较多,这在具体情况时是需要进行谨慎深入考虑的。在中国曾经发生过中性点经配电变压器接地的大型水轮发电机退掉接地保护继续运行的情况。

2 基波零序电压保护

现代大容量水轮发电机组通常按发电机—变压器组单元接线与高压或超高压电网直接相连,由于发电机与系统中其他元件没有电联系,其接地电容电流比较小,通常采用基于零序电压的保护。基波零序电压型保护是在发生单相接地时,通过检测机端或中性点处零序电压来判别接地故障。假设 A相接地发生在定子绕组距中性点 α处,α表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数 (如图 1所示),则机端各相对地电压 $\dot{U}_{dA}$、$\dot{U}_{dB}$、$\dot{U}_{dC}$为

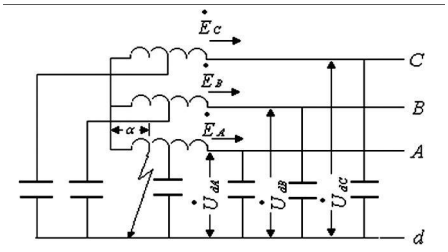


图 1 定子单相接地电路图

$$\dot{U}_{dA}=(1-\alpha)\dot{E}_A \quad (1)$$

$$\dot{U}_{dB}=\dot{E}_B-\alpha\dot{E}_A \quad (2)$$

$$\dot{U}_{dC}=\dot{E}_c-\alpha\dot{E}_A \quad (3)$$

因此故障点的零序电压为

$$\dot{U}_{d0(\alpha)}=\frac{1}{3}(\dot{U}_{dA}+\dot{U}_{dB}+\dot{U}_{dC})=-\alpha\dot{E}_A \quad (4)$$

上式表明,故障点的零序电压将随着故障点位置的不同而改变。当发电机内部单相接地时,由于电压互感器二次开口三角侧的输出电压在机端接地时为 100 V,故障点的零序电压可以表示为

$$U_{d0(\alpha)}=100\alpha(V) \quad (5)$$

由于发电机三相绕组对地电容不完全对称,正常运行时中性点存在位移电压,该方案在中性点附近存在保护死区,并且保护区内经过渡电阻接地时灵敏度不高,所以需要和其他原理共同构成 100%接地保护。保护的动作电压 $U_{d0(\alpha)}$应按躲过正常运行时中性点单相电压互感器或机端三相电压互感器开口三角绕组的最大不平衡电压及三次谐波电压整定。实际测试表明,发电机正常运行时,不平衡零序电压有可能超过 10 V,有时因电压互感器饱和,甚至超过 20 V。继电器内设置三次谐波滤波环节,可以降低整定值,使其主要反映基波的零序电压,提高灵敏度。使用该保护时同时也要校验高压侧系统或高压厂用变压器低压系统发生的单相接地通过耦合电容传递的零序电压,其也有可能引起零序电压保护误动,通常的处理方法是从动作电压整定值及延时两方面与系统接地保护配合。

3 三次谐波电压单相接地保护

由于发电机气隙磁通密度的非正弦分布和铁磁饱和的影响,在定子绕组中要感生一定的三次谐波电

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动势。三次谐波电压定子接地保护原理是基于单相接地故障前后发电机中性点与机端处三次谐波电压变化特点不同构成的，正常运行时中性点三次谐波电压 U_{N3}幅值比机端三次谐波电压幅值 U_{S3}大，而靠近中性点附近定子接地时则 U_{N3}幅值比 U_{S3}幅值小，基于此其与前述零序电压联合共同组成 100% 定子单相接地保护。

如果把发电机的对地电容等效看作集中在发电机的中性点 N和机端 S，且每相的电容大小都是 $0.5C_{0F}$，并将发电机端引出线、升压变压器、厂用变压器以及电压互感器等设备的每相对地电容 C_{0W}也等效在机端，并设三次谐波电动势为 E_3，假定接地发生在 α处，其等值电路如图 2所示。

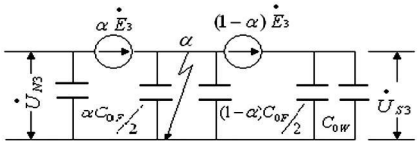


图 2 单相接地时三次谐波电动势分布的等值电路

α表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数，此时不论发电机中性点是否经消弧线圈接地，均近似有如下关系。

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{N3}&=\alpha\dot{E}_3\\ \dot{U}_{S3}&=(1-\alpha)\dot{E}_3\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

$$\text{则，}\frac{|\dot{U}_{S3}|}{|\dot{U}_{N3}|}=\frac{1-\alpha}{\alpha} \tag{7}$$

可以看出当 $\alpha\leqslant 50\%$时，$|\dot{U}_{S3}|\geqslant|\dot{U}_{N3}|$，且越接近中性点，灵敏度越高。三次谐波电压单相接地保护有两种判据，一种是 $|\dot{U}_{N3}|<|\dot{U}_{S3}|$，另一种是 $|K_p\dot{U}_{N3}-\dot{U}_S|>K_b|\dot{U}_{N3}|$，其中 K_p、K_b为调整系数，动作区为中性点侧，保护装置需使用两组电压互感器。后一种判据由于有相对更好的灵敏度和防误动能力，故通常被现场所采用。

水轮发电机在启、停机时刻和运行方式改变较大的时候会引起 $\dot{U}_{N3}$和 $\dot{U}_{S3}$发生较大的改变，从而容易引起其三次谐波电压保护的误动。由于水轮发电机三次谐波电压分布复杂且缺乏规律性，针对不同的机组需要建立的模型不同，理论上缺乏归纳性。因此既要保证发电机在各种工况下三次谐波电压保护的动作灵敏度，又要确保并网前后的动作可靠性，单纯用调试的方法来达到目的是不可能的。目前对应于启、停机时刻造成的误动，一般采取设两套保护，并网前后投切不同的保护，当然这样做增加了保护的投资和复杂程度。已有文献对运行方式变化引起保护误动提出的解决办法是，通过自动跟踪中性点与机端两侧的三次谐波电压采用自适应三次谐波电压相量比差方案和基于三次谐波电压故障分量的定子接地保护，改善效果仍不明显。

变压器铁心磁路的饱和使得各相电动势中存在三次谐波 $\dot{E}_{3H}$对三次谐波电压保护也会产生影响。高低压绕组之间存在耦合电容，设每相为 C_M，每相高低压绕组的电耦合由各匝匝电势 $\dot{E}_{3H}$和匝耦合电容 $\triangle C_M$的分布参数表现出来，文献 [1]中提到对大型水轮发电机三次谐波电压保护而言，C_M的存在所造成的影响可以忽略不计，对于中小型水轮发电机则需要认真对待。具体分析如下，设每相有 $\dot{E}_{3H}$和绕组首末两端为 $C_M/2$，三次谐波零序等效电路如图 3所示，$\dot{E}_{3H}$的存在影响着 $\dot{U}_S$和 $\dot{U}_N$的大小和相位。设 $\dot{E}_{3H}=0$时有 $\dot{U}_{SG}$和 $\dot{U}_{NG}$，$\dot{E}_3=0$时候有 $\dot{U}_{ST}$ $\dot{U}_{nT}$，则实际 $\dot{U}_S$和 $\dot{U}_N$为

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_S&=\dot{U}_{sG}+\dot{U}_{sT}\\ \dot{U}_N&=\dot{U}_{nG}-\dot{U}_{nT}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中，$\dot{U}_{sT}=\dot{U}_{nT}=\dot{\gamma}E_{3H}$

式中，γ为复系数，由图 3中参数 C_M、C_S、C_N、Z决定。

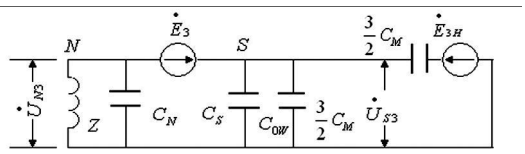


图 3 发电机 −变压器组三次谐波零序等效电路

由式 (8)，在不计机端外接元件对地电容时，则 $C_S=C_N=\frac{3}{2}C_G$（C_G为发电机每相对地电容），这时 $\dot{E}_{3H}$经高低压绕组间耦合电容 C_M传递到发电机的三次谐波零序电压 U_{sT}，完全由下述参数关系决定。

$$U_{ST}=U_{NT}=\gamma E_{3H}=\frac{\frac{3}{2}C_M}{3(C_G+\frac{C_M}{2})}E_{3H}$$

$$=\frac{C_M/2}{C_G+C_M/2}E_{3H} \tag{9}$$

不难看出，$\dot{E}_{3H}$对 $\dot{U}_S$的影响不同于 $\dot{E}_{3H}$对 $\dot{U}_N$的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响，最简单的情况：$Z=\infty$ (发电机中性点绝缘)、$C_N=C_S$有 $\dot{U}_{SG}=\dot{U}_{NG}=\dot{E}_3/2$；由于 $\dot{U}_{3H}$的出现，将有

$$\dot{U}_S=\frac{\dot{E}_3}{2}+\dot{\gamma}\dot{E}_{3H} \quad (10)$$

$$\dot{U}_N=\frac{\dot{E}_3}{2}-\dot{\gamma}\dot{E}_{3H} \quad (11)$$

假设 $\dot{E}_{3H}$与 $\dot{E}_3$同相位，则该发电机在正常运行时，由于 $\dot{E}_{3H}$的影响，已有 $|\dot{U}_S|/|\dot{U}_N|>1.0$，即已满足保护动作条件，保护势必误动。因为 $\dot{E}_{3H}$的大小和相位随变压器铁心工作状态而改变，而铁心工作状态又与变压器运行工况有关，因此，变压器运行工况的改变，将影响 $\dot{U}_S$和 $\dot{U}_N$，可能造成三次谐波电压式定子接地保护误动或拒动，所以 $\dot{E}_{3H}$的影响不容忽视。

4 外加电源方式的定子接地保护

外加电源的注入式发电机定子单相接地保护根据发电机正常情况下整个三相定子回路对地是绝缘的，而发生单相接地故障时对地绝缘被破坏的特征，在发电机定子回路与大地之间外加一个信号电源，在正常情况下，信号电源不产生或很少产生信号电流，发生接地故障后才产生相应频率的接地电流，使保护动作。通常外加低频电源主要是 12.5 Hz和 20 Hz两种，是在发电机定子绕组中性点 (由接地配电变压器或消弧线圈的二次绕组)或机端 (由 TV副方开口三角形)持续地将信号注入到发电机定子的系统，其可以单独完成定子接地的 100%保护。不足之处在于，对电源的可靠性和性能有较高要求，现场调试也比较复杂，中性点接地方式和外加电源内阻的大小会在一定程度上影响保护的灵敏度。外加电源式保护能够独立检测接地故障，不受运行方式影响，且在发电机静止、启停情况下均有保护作用，同时具有灵敏度高和可以进行绝缘监测的突出优点，在许多水轮发电机单相接地保护的技术改造中都有改三次谐波保护为注入式保护的实例。

5 结 语

分析了水轮发电机定子单相接地保护所涉及的基本原理和相关内容，具体针对其中性点的接地方式、零序基波电压保护和三次谐波电压保护以及外加电源的注入式保护做了论述。中性点经消弧线圈接地运行在中国已积累了充分丰富的经验，同时也是适合中国国情的水轮发电机安全运行的有效措施。零序基波电压保护原理简单技术可靠，但其理论上的缺陷使其不能够保护定子的全部范围，与之配合共同完成 100%保护的三次谐波保护存在的问题很多，且难以改进。外加电源的注入式保护具有广泛的应用前景，有取代三次谐波电压保护的趋势。另外对于扩大单元接线的发电机组前面的保护措施都缺乏对定子单相接地故障机的选择性，扩大了故障所影响的范围，同时也不能对单元接线机组的故障点是位于机内或机外进行判别，这方面的技术有待研究，但都还不太成熟，没有推广应用开来。

基于在线监测与故障诊断思想结合智能技术、挖掘新的保护和故障点定位特征量以及先进的故障分析方法是对水轮发电机定子单相接地进行深入研究的前沿，总之，不断追求原理上新的突破，融合借鉴相关领域科技进步的新成就，这是发电机保护也是所有科学技术发展的永恒主题。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 (第 2版) [M]. 北京：中国电力出版社，2002.

[2] 王维俭，王祥珩，王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护 [M]. 北京：中国电力出版社，2006.

[3] 刘宇明，陈伟. 浅谈小浪底水电厂发电机定子单相接地保护 [J]. 水力发电，2004, 30(9)：15－17.

[4] 唐清弟，谭建华. 3ω定子接地保护误动原因分析和对策 [J]. 电力系统自动化，2001, 25(1)：59－61.

[5] 张德胜. 浅析李家峡水电站三次谐波 (3ω)定子接地保护动作不可靠的原因及技改措施 [J]. 青海电力，2005, 24 (1)：24－27.

[6] 夏景祥. 发电机定子接地保护动作分析 [J]. 中国科技信息，2005, 17(20)：124.

[7] 郭爱军. 三次谐波电压型定子接地保护整定计算探讨 [J]. 继电器，2004, 32 (3)：32－38.

[8] 王维俭，鲁华富. 三次谐波电压式定子接地保护的运行和改进 [J]. 中国电力，1995, 28 (11)：46－49, 53.

[9] 张保会，尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京：中国电力出版社，2005.

[10] 王维俭，桂林，毕大强. 大型发电机 －变压器组继电保护的探讨 [J]. 中国电力，2001, 34 (1)：39－44.

[11] 安振山. 大型水轮发电机组中性点接地方式 [J]. 四川

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电力技术, 1998(1): 1—4.
[12] 卢琪,熊伟,行生.提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的研究[J].陕西电力, 2007, 35(6): 42—44.
[13] 党晓强,刘俊勇,刘继春,等. 水轮发电机定子接地的行波差动保护与故障选相研究[J].中国电机工程学报, 2008, 28(7): 74—78.
[14] 党晓强,刘俊勇,杨可,等. 水轮发电机定子单相接地故障行波定位[J].电力系统自动化, 2006, 30(23): 74—78.
[15] 党晓强.大型发电机内部故障在线诊断及其行波应用新原理[D].成都:四川大学博士学位论文, 2006.

作者简介:

宋全林,男,双流供电局调度所主任,从事电力系统调度工作多年,有丰富运行工作经验。

党晓强,男,博士,讲师,从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(**收稿日期**: 2010—03—19)

(上接第 60页)

最理想的是用实时电价,即随时间而变化的电价。

5 成都市电力需求侧管理的措施及建议

近年来,由于成都市电力市场新投机组增多,电力供需形势趋于缓和,需求侧管理不仅是缓解电力紧张的有效手段,更是实现电力工业可持续发展的长远战略。进一步的电力需求侧管理工作仍需政府的支持和重视、电力企业的参与和执行。

(1)做好有序用电宣传和动员

供电企业通过电力销售渠道、相关媒体、95598网站、宣传册等方式,向用电企业宣传需求侧管理知识,告知有序用电工作程序和紧急限电方案。帮助用电企业加强需求侧管理、优化用电方式、指定企业内部的避峰和限电的预案、减少电力消耗、避免产品损失、降低生产成本,提高经济效益和管理水平。

(2)依法有序做好停限电工作

根据电网建设和负荷发展的实际情况,每年重新修订《四川电网限电序位表》、《四川电网紧急限电序位表》。

保证重点企业和居民生活用电。加强公用供电线路负荷管理,对整条线路用户均装由负荷控制装置的,原则上采取限电不拉闸方式。对公用供电线路负荷进行清理,原则上对居民负荷集中、社会影响较大的公用线路进行调整,不列入拉闸序列。

在制定紧急情况下限电预案时,省三电办结合国家宏观调控目标及产业政策,结合全省经济发展目标,结合产业结构调整和可持续发展战略,重点限制“两高一低”企业,优先保证重点增长企业和重点外商投资企业。

(3)加大峰谷电价的调整力度

采用电价的经济杠杆,调整负荷分配,引导用户移峰填谷。

(4)定期召开电力调度信息发布会

定期召开电力调度信息发布会,通报电网运行情况、电力供应情况、拉闸限电情况,争取社会的理解和支持。

6 结 论

从成都市电力市场开展电力需求侧管理情况,得出目前成都市开展电力需求侧管理主要以行政手段为主,市场手段为辅,仍未充分发挥需求侧管理的调节作用,建议不论是电力短缺还是电力过剩,都需在政府的政策支持下,进一步加强需求侧管理工作,积极推进成都市电力市场的良性发展。

参考文献

[1] 孙琳,刘俊勇.基于博弈均衡购电电价的分时电价[J].四川电力技术, 2009, 32(4): 52—56.
[2] 郑斌,王秀丽. 电力市场电价理论的分析与综述(1):边际成本电价理论[C].全国高等学校电力系统及自动化专业第 15届学术年会论文集,武汉: 1999, 1202—1207.
[3] 郑斌,王秀丽.电力市场电价理论的分析与综述(2):竞价机制及转运电价[C].全国高等学校电力系统及自动化专业第 15届学术年会论文集,武汉: 1999, 1208—1215.
[4] 丁宁,吴军基,邹云.基于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—12.
[5] 刘观起,张建,刘瀚.基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J].华北电力大学学报, 2005, 32(3): 23—27.
[6] 吴秋伟,汪蕾,邹云.基于和的分时电价的确定与分析[J].电力需求侧管理, 2003, 5(1): 24—29.
[7] 王广庆.电价理论与务实.北京[M]:中国电力出版社, 1998.

(**收稿日期**: 2010—04—27)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

法国 330 MW 汽轮机胀差异常的原因分析及应对措施

张德泽
(四川巴蜀江油发电厂,四川 江油 621709)

摘 要:四川江油发电厂引进的法国 330 MW 汽轮机组,自 1990年投产以来因汽轮机胀差异常,多次引起机组跳闸。通过对汽轮机胀差异常引起的机组跳闸事故统计,分析找出胀差异常原因,并制定有效措施,确保了机组在正常启动、停机和运行过程中安全稳定运行,减少了机组非计划停运次数。

关键词:汽轮机;汽缸;转子;胀差

Abstract: The 330 MW turboset which was imported form France of Jiangyou Power Plant in Sichuan has tripped several times since it was put into operation in 1990 because of abnormal differential expansion of steam turbine. Through the statistics of tripping accidents caused by abnormal differential expansion of steam turbine, the reasons for abnormal differential expansion are found and analyzed. The effective measures are given to ensure the safe and stable operation of the turboset during the normal starting, shutdown and operation, which also reduces the times of unplanned outages.

Key words: steam turbine; cylinder; rotor; differential expansion

中图分类号:TK263 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0088-04

1 设备概述

1.1 设备的主要技术性能

四川江油电厂 330 MW 汽轮机是于 20世纪 80年代末从法国 ALSTHOM公司引进亚临界、中间一次再热、单轴、双排汽、冲动式、凝器式抽汽轮机组,与 1 004 t/h亚临界、一次中间再热、燃煤强制循环汽包炉和 330 MW 水-氢-氢发电机配套,锅炉与汽轮机热力系统采用单元布置。

1.2 汽缸滑销系统

1.2.1 高、中压缸的死点和膨胀

高、中压缸用跨过高-中压缸轴承箱的两根导杆刚性联接。高压缸与中压缸的绝对膨胀死点设在中压缸后侧的轴承箱上,当缸体温度升高时,高、中压缸由此点向前膨胀,并由高中压缸猫爪在高压缸-中压缸轴承箱和前轴承箱水平面滑动板上滑动。各汽缸也可在各轴承箱上横向膨胀。

1.2.2 低压缸排汽罩(低外缸)

低压缸排汽罩放置在支撑板上,支撑板放在固定于基座的垫板上。低压缸排汽罩从固定于靠中压缸侧基础上的固定垫块向机组后侧轴向膨胀,也可横向膨胀。

1.2.3 低内缸的膨胀

低内缸以凝汽器的中心线为死点,相对排汽罩向前和向后轴向膨胀,也可横向膨胀。

1.2.4 转子的死点和膨胀

推力轴承设在高中压缸之间的轴承箱内,有两根连杆将推力轴承与高压缸前侧猫爪刚性联接,可随同高压缸一起膨胀移动。整个汽轮发电机以推力轴承的推力盘为死点,分别向前和向后膨胀。

2 胀差测量系统

四川巴蜀江油发电厂 330 MW 机组高、中、低压缸各装设了一套缸体胀差测量装置,传感器型号 VF71A、转换器型号 WL173、放大器型号 SM-D,胀差测量探头安装在磁性拖板上,高、中压缸胀差测量拖板安装在缸体上,低压缸胀差测量拖板安装在低、发连轴器外壳上,通过检测拖板位移量,经转换器、放大器、二次仪表(GMA柜内 SM卡件),完成对缸体胀差的测量。

3 汽轮机胀差异常事故统计及分析

四川江油电厂 330 MW 汽轮机自 1990年投运以来,因汽轮机胀差造成机组跳闸或延迟开机等情况时有发生,分析其原因有如下情况。

1) 2×330 MW 汽轮机由控制信号误发引起的汽

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轮机胀差异常共五次；

2) 2×330 MW 汽轮机由控制设备缺陷引起的汽轮机胀差异常约七次；

3) 2×330 MW 汽轮机由运行操作不当引起的汽轮机胀差异常约五次。

表 1 汽轮机组胀差异常统计(1990— 2008**年**)

项 目	原 因		
	信号误发	设备缺陷	运行操作不当
31号机组	1992 年高缸胀差信号误发一次	1991 年汽温参数(主汽或再热汽温)异常造成低缸胀差保护动作两次 1992 年低缸胀差大保护动作两次	1991 年低缸胀差大保护动作一次 1992 年低缸胀差大保护动作一次 2007 年低缸胀差大保护动作一次 2008年开机汽轮机低缸胀差异常报警
32号机组	1992 年高缸胀差信号误发一次 1993 年高缸胀差信号误发一次 1995年高缸、低缸胀差信号误发各一次	1991 年低缸胀差大保护动作一次	

通过对四川江油电厂法国 330 MW 汽轮机胀差异常统计，可以看出，法国 330 MW 汽轮发电机组在开始投运五年内因汽轮机胀差信号误发造成汽轮机保护动作次数较多，经过技术攻关，且经过试验将胀差保护逻辑修改后，杜绝了机组正常运行期间胀差保护误动。自 1996年以后汽轮机胀差异常存在原因是机组设备缺陷和开机过程中运行操作不当引起，为了确保法国 330 MW 机组运行的安全性、可靠性、经济性，通过分析论证，采取了相应的技术措施，使汽轮机胀差变化处于可控、在控范围。

4 胀差变化的影响因素

300 MW 等级的汽轮机胀差变化，当机组正常运行时，由于汽缸和转子温度趋于稳定，一般情况变化很小。但在机组参与电网调峰时、负荷变化率较大时，胀差指示会有较大变化，所以分析汽轮机胀差的影响因素查找汽轮机胀差异常原因，以便采取切实有效措施，控制汽轮机胀差的异常变化。

4.1 测量回路的检查

胀差测量回路是由探头、前置器和卡件组成，现场设备无明显受损现象；前置器工作环境温度为 40 ℃左右，符合要求；前置器工作电压稳定、无波动。

根据胀差测量原理和现场数据可推算出零点间隙位置，再与探头的原始安装零点间隙位置相比较，以判断胀差探头安装位置与测量回路是否正常。如果推算出的零点间隙位置与原始数据存在偏差，则说明胀差探头所测量的胀差值非实际值，探头或测量回路可能存在故障；否则说明胀差的增大不是由于探头安装及测量回路出现故障所致。

4.2 胀差大小的影响因素

汽轮机在启动、停机及运行过程中，胀差的大小与下列因素有关。

4.2.1 负荷变化速度

当负荷变化时，汽轮机各级蒸汽流量发生变化，特别是在低负荷范围内，各级蒸汽温度的变化较大，负荷增长速度越快，蒸汽温升速度越快，与金属表面之间的温差越大，汽缸和转子温升速度的差别越大。负荷增加速度加快，则正胀差增大；反之将出现负胀差；如果机组在某一负荷下稳定运行，其胀差将随时间增长而减小，最后稳定在某一数值。

4.2.2 蒸汽温升速度

机组在启动或正常运行过程中主蒸汽温度变化，则将影响各级蒸汽温度，主蒸汽温升速度越快，汽缸与转子之间的胀差越大；反之将出现负胀差。

4.2.3 轴封供汽温度

汽轮机的轴封体是嵌在汽缸的两端，其膨胀对汽缸轴向长度几乎没有影响，但转子轴封段的膨胀却影响转子的膨胀，因而使正胀差增大。由于轴封段占转子长度较小，故对总胀差影响较小，可是轴封处局部胀差比较大。如果轴封供汽温度过高，可能使轴封的轴向间隙消失，动静部分发生摩擦。如轴封供汽温度低于轴封金属温度，则情况相反，轴封处的局部胀差为负值。为避免轴封处出现过大的正胀差和负胀差，轴封供汽温度应略高于轴封金属温度，且热态启动时应先向轴封供汽后抽真空，以免大量冷空气从轴封处漏入而出现较大的局部负胀差 。

4.2.4 摩擦鼓风损失

在机组启动和低负荷阶段，蒸汽流量较小，中低压级内会产生较大的鼓风摩擦损失 (与转速三次方

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成正比),损失产生的热量被蒸汽吸收,使其温度升高。由于叶轮直接与蒸汽相摩擦,因此转子温度比汽缸温度高,故出现正胀差。随着转速升高,转子摩擦鼓风损失产生的热量相应加大,但此时由于流量增加,使产生鼓风损失的级数相应减少,因此每千克蒸汽吸收摩擦鼓风损失产生的热量先随转速升高而增大,后随转速升高而减小,对胀差的影响也逐渐减小。

4.2.5 排汽温度

由于排汽缸对应的转子轴端露出在汽缸外,因此排汽温度变化主要影响排汽缸的膨胀量。随着排汽温度升高,排汽缸的膨胀量比对应转子的膨胀量大,使低压缸的相对胀差较小。如果排汽温度的升高是由于凝汽器内压力升高而引起的。为了保持机组的转速或功率不变,进汽量需相应增加,从而引起高压缸胀差增大。

4.2.6 转子回转(泊桑)效应

转子在旋转时,产生很大的离心力,转子材料在离心力的作用下沿径向产生弹性伸长,从而使轴向长度缩短,故在相同加热条件下,转子的轴向膨胀量较静止时小,因而对胀差产生影响。

汽缸和法兰螺栓加热装置(江油发电厂法国 330 MW 汽轮机无汽缸、法兰加热装置)在汽轮机启动时必须在汽缸夹层中通以适当的蒸汽,否则将会出现较大的正胀差。

5 解决方案及效果分析

5.1 选择合理的启动参数

根据法国 330 MW 汽轮机汽缸最高缸温,特别是冷态开机过程中当锅炉点火后通过调整锅炉燃烧,维持再热蒸汽温度稳定在 340℃,避免蒸汽温度大幅波动,是控制胀差异常的最有利手段。为此可从以下几方面采取措施。

(1)由于天然气资源短缺及国家环保要求,为了冷态开机顺利进行,综合平衡后,法国 330 MW 机组停运时力争降低锅炉粉仓粉位均在 5 m以下;由此就大大减少了开机过程给粉机启停次数,主蒸汽、再热蒸汽温度控制达到稳定可靠,汽轮机胀差有效控制。经过近几年实践,法国 330 MW 机组因汽轮机胀差异常停机次数已大幅度减少。

(2)在法国 330 MW 机组停运时对锅炉过热器及再热蒸汽减温水电动隔离门、调节门进行解体检修、碾磨,必要时更换新门,确保开机或事故情况减温水量足够,确保锅炉蒸汽温度控制稳定。

(3)开机过程中,为提高汽轮机缸温水平,及时投运汽轮机保安系统进行高中低压缸暖机。

5.2 制定合适的升温、升压曲线

制定合适的升温、升压曲线,开停机过程中严格执行。

5.3 控制汽轮机升速速度及定速暖机时间

法国 330 MW 汽轮机冷态启动升速速率为 100 r/min热态启动升速率为 500 r/min;当汽轮机冲转升速至 980 r/min进行低速暖机 20 min,当汽轮机高压缸温度达到允许值时才又升速至 3 000 r/min进行高速暖机 20 min后并网,机组并网带 30～45 MW 负荷时进行投运汽轮机高压缸运行,汽轮发电机低负荷即 80～120 MW 暖机 30 min以提高汽轮机缸温水平,避免低压缸胀差大幅飚升,此时机炉参数必须匹配一致,根据汽轮机胀差变化逐步地、小幅度地提高主蒸汽、再热汽温度以及缓慢增加机组负荷等办法,运行人员随时监控汽轮机的胀差、各轴瓦振动和轴承温度、串轴等变化情况,特别应严密监视汽轮机低压缸胀差的变化情况,必要时可以稳定机组负荷来提高汽轮机缸温,达到将汽轮机胀差变化控制在允许范围内;只有在此阶段严格控制胀差异常变化,才能确保开机顺利进行。对法国 330 MW 汽轮机冷态开机近 20年摸索,已经形成了一套严格的规范操作程序,特别近 10年内的历次操作中已相当有效。

5.4 及时调整汽轮机真空度

当汽轮机真空太高情况时可停运真空泵降低真空度,可以根据凝汽器排汽温度确定真空泵停运时间。经过近几年实践摸索,特别是机组低负荷 30～50 MW 时,当汽轮机排汽温度较低时,可以采取停运真空泵的办法,提高凝汽器背压,但是当排汽温度升至 60℃,必须立即投运真空泵提高真空,达到抑制汽轮机低压缸胀差快速攀升,如此循环使用,该方法在实践中有效。

5.5 轴封供汽使用适当

控制轴封母管温度在 110～120℃之间。当轴封温度异常时,及时联系热控检修来人处理,使轴封母管温度控制在有效范围内;特别在汽轮机热态启动时投用高温轴封汽是必要的,轴封供汽应和汽缸温度匹配,且必须充分暖管,这对防止转子轴封段受热冲击和阻止高中压负胀差的增大都是有利的。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.6 对法国 330 MW汽轮机胀差标准适当修改

通过对法国 330 MW汽轮机至 1990年投产运行后发现,汽轮机胀差控制标准是可以适当将胀差报警值减小,胀差跳闸值不变,以达到对汽轮机胀差的有效的可控、在控范围。

6 结 论

四川江油发电厂的法国 330 MW机组运行 20年以来,汽轮机胀差异常曾多次出现,概括其原因主要是在机组启动过程中经常出现,特别在机组冷态启动时容易出现,因法国 330 MW汽轮机采用中低缸启动方式,当开机过程中主蒸汽、再热蒸汽温度控制不好,在汽轮机冲转或者低负荷运行时间较短等情况 (无论是设备异常或运行人员操作)造成汽轮机暖机时间不充分时,以及轴封供汽参数高,使转子在轴向方向的膨胀程度比汽缸的膨胀程度大,都将造成汽轮机胀差异常增大,特别是汽轮机低缸胀差异常增大,造成汽轮机停机事故;因胀差值异常停机后 (非测量原因)只有采取停机冷却降低胀差的措施,严重影响汽轮发电机组运行经济性;针对汽轮机胀差异常变化,应高度重视,认真分析引起胀差异常变化的原因,一个一个的排查,采取有效措施控制。当在机组启动、停机和运行过程中,要对设备系统及机组的运行参数进行认真的检查、监视和控制,特别是开机过程汽轮机和锅炉之间参数要协调配合一致,当机组初负荷运行时,采用逐步地、小幅度地提高主汽、再热蒸汽温度和缓慢增加机组负荷等办法来提高汽轮机缸温水平,只有当汽轮机缸温提高到 200℃以上 (主要是中缸外缸下部 1/2处金属温度)时,机组加负荷时汽轮机胀差变化才稳定可以控制。当单元机组的各项参数指标控制在合格范围内时,才能确保汽轮发电机组运行的可靠性、安全性、经济性,达到延长汽轮机的使用寿命的目的。

(**收稿日期**: 2010—02—10)

(上接第 45页)

计算出的载流量值与 IEC 60287标准法计算值的误差在 5%以内,且变化趋势一致。因此,本模型具有较高的准确性和可靠性。

对于含有外部热源的电缆区域, IEC 60287标准法没有给出相关计算公式,无法对该类情况进行分析。因此,与基于 IEC 60287标准的电缆温度场计算法相比,当模型参数发生变化时,本模型可方便地通过修改相关参数得到与实际条件相对应的仿真结果,具有较强的实用性。

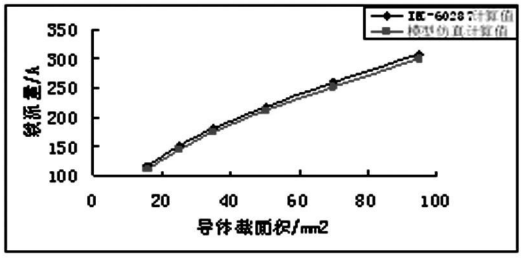


图 4 不同导体截面两种方法对比分析

5 结 论

基于电缆沟敷设方式下电力电缆的广泛应用,根据传热学的基本原理,利用二分法,建立了基于有限元法的电缆载温度场计算模型。实例表明,该方法能够根据实际情况对模型参数进行修改,具有计算精度高、建模简单方便的优点,对优化电缆沟电缆敷设方案具有较高的理论指导意义。

参考文献

[1] 赵中原, 吕征宇, 段乃欣, 等. 交联聚乙烯电缆局部放电在线监测系统研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 59—62.

[2] DOWNES J, LEUNG H Y. Distributed Temperature Sensing Worldwide Power Circuit Monitoring Application [C]. 2004 International Conference on Power System Technology POWERCON, Singapore, 2004: 1804—1809.

[3] LI H J. Estimation of Thermal Parameters and Prediction of Temperature Rise in Crane Power Cables [C]. // IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, May 2004, 151(3): 335—360.

[4] 赵建华, 袁宏水, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 52—54.

[5] 刘英, 曹晓珑. 电力电缆在线测温及载流量监测的研究进展与应用 [J]. 输配电技术, 2007, 4(11): 11—14.

[6] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[7] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1998.

[8] 孟凡凤, 李香龙, 徐燕飞, 等. 地下直埋电缆温度场和载流量的数值计算 [J]. 绝缘材料, 2006, 39(4): 59—61.

(**收稿日期**: 20010—05—10)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大型锅炉启动投油工况投电场研究

黄 杉
(国电成都金堂发电有限公司,四川 成都 610051)

摘 要:针对锅炉启动过程中按常规投电场导致排放效果差、时间长、污染大等问题,提出了根据燃烧调整、烟气温度大于酸露点温度裕度 30℃即投入电场,实际运行情况证明该运行方式安全有效,大幅度减少锅炉启动排放量。

关键词:锅炉启动;减少排放;油粉混燃;投电场顺序

Abstract: Aiming at the problems about bad emission effect, long time and serious pollution when electric field being put into service in the conventional order during boiler startup, it is proposed that the electric filed should be put into service according to combustion adjustment and when flue gas temperature is 30℃ higher than acid dew point temperature. It is different from the normal order but it works safely and effectively in the actual operation. And this method can reduce dust emission nearly 80% for each boiler startup.

Key words: boiler startup; reducing dust emission; combined firing of oil and pulverized coal; sequence of electric fields being put into service

中图分类号:TK227 **文献标志码**:B **文章编号**:1003-6954(2010)04-0092-03

一般火电厂投入电除尘器都对锅炉是否存在燃油助燃有严格的要求,比如启动过程中要等给粉机投入 80%以上并且油枪退出 50%才允许投入电除尘器;正常运行中一旦投入油枪稳燃就要退出末极电场(通常是三电场甚至二电场)。类似的规定究其原因多是根据安装设备时厂家为防止阴极线、阳极板、料位计积灰结垢而制订,这样的规定大大延误了达标排放时间,特别是启动过程中投粉后 6个小时左右才能投入电除尘,大量的粉尘直接排入大气,造成的环境污染大、排放效果差。随着中国对环保排放的标准日益提高,公众的环保意识越来越强,对火电厂(尤其是像嘉陵成都电厂,紧邻成都市二环路)如果仍按前述落后的技术要求指导生产,势必无法满足当前社会对环保的需求。对嘉陵电厂 420 t/h锅炉投油工况下投电场进行讨论、研究,正是为在实际生产中能够满足各种负荷的要求,有效地改善火电厂排放效果,降低企业环保压力。

1 设备概况

嘉陵电厂装有四台俄制 420 t/h超高压煤粉炉,每台锅炉配有两台卧式除尘器并联运行。每台除尘器布置原为单室三电场,后于 2006年为配合脱硫工程增加为单室四电场,输灰系统也改造为正压浓相输灰,除尘效率提高至 99.5%。

嘉陵电厂一个单元以两台炉配一台汽轮机,启动时采用一台锅炉点火与汽轮机进行滑参数启动,按单炉额定蒸发量带电负荷;而另一台锅炉点火升温、升压至额定参数后并入汽轮机正常运行。由于启动时间长,尤其是第二台锅炉定参数启动蒸汽排放噪音大,一般安排第二天启动。虽然每台锅炉都配有除尘器,但只要有一台没有投入,烟囱就冒黑烟,排放效果很不理想,附近居民多次因此堵塞厂门,社会影响差,企业压力大。

2 投油工况投电场分析

锅炉在启动初期全油工况下,由于炉膛温度低、调整不当,柴油有可能燃烧不充分,使烟气中带油,但嘉陵电厂采用 0号轻柴油,与其他用重油的电厂相比易于点燃、燃尽,只要调整合适,启动初期全油工况烟囱基本不冒黑烟,电除尘的灰斗、仓泵料位计也不会积油垢、误发信号。

锅炉在油粉混燃工况下,设备厂家所担心的阴极线、阳极板、料位计积灰结垢主要取决于烟尘的粘附力。烟尘的粘附力主要来源于尘粒的毛细粘附力的作用,烟气中的水分、SO_3等具有凝聚性的物质容易让尘粒与尘粒之间、尘粒与容器表面形成粘附。烟尘

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

具有粘附性,可使细小颗粒凝聚成较大的颗粒,有利于提高除尘效率,但是相应烟尘容易在电极上积垢,出现电晕线肥大和极板烟尘堆积等情况,降低除尘效率。影响除尘效率最直接的是带电粉尘在静电力的作用下向阳极板趋进过程中由电场引起的沿电场方向运动速度——带电粉尘趋进速度,速度越大,在阳极板上沉积的粉尘就越多,除尘效率越高。同时烟气中粉尘比电阻也是影响除尘效果的重要指标,如果低于比电阻 10^4 Ω·cm烟尘导电性太好,到达集尘极后放电太快而被推回到气流中,除尘效率很低;比电阻超过临界值 5×10^{10} Ω·cm时,电晕电流通过烟尘层就会受到限制,由于烟尘的绝缘性,烟尘到达集尘极后仍保持原电荷状态。烟尘积累到一定程度时,由于集尘极放电,使电流异常,二次电压明显降低,产生“反电晕”,阻碍了尘粒向集尘极的正常移动,除尘效率急剧下降。烟气中影响除尘效果的这几项粉尘特性指标是否因为油粉混燃而较纯粉工况下有了较大变化而影响电除尘器运行需要实验数据说明。同样锅炉流量为 420 t/h的株洲电厂曾针对五种不同油粉混燃比例工况进行试验,结果证明粉尘的粘附性并没有较大变化,仍属于中等粘附性以下。在株洲电厂的试验中直接决定电除尘效率的带电粉尘趋进速度值在五种混燃工况下偏差不超过 1.3%,除尘效率都在 98% (最高 99.7%)以上;五种混燃工况下烟尘比电阻 (2.2×10^4 ~4×10^6 Ω·cm)也处于电除尘器适用的范围之内,属于良好易除类。

在启动初期及油粉混燃工况下,对于除尘设备(包括尾部烟道)而言,最大的不利因素是温度低。嘉陵电厂锅炉正常排烟温度 137℃,而启动初期即便在投入除尘器蒸汽加热、电加热系统情况下,电场内部温度也仅在 65℃左右,只比烟气酸露点温度高 20多度,离防腐蚀防积灰要求的温度高于酸露点 30℃的裕度有些差距。在刚启动时冷空气对电场有一定的冷却,随着油枪逐步投入,燃烧基本建立烟温升高除尘器本体温度可以恢复到接近 65℃;当烟气温度超过 65℃,除尘器本体电加热基本不起作用,本体温度将随烟气温度升高而升高。

锅炉在进入全煤粉燃烧工况后,电除尘器投入是理所当然,不在这里讨论范围之内,至于某些厂家要求在油枪退完后一个小时再投电除尘的提法,没有明确的依据,可以不用考虑。

3 可行性及安全分析

通过对影响电除尘设备运行效率的带电粉尘趋进速度、烟尘比电阻、烟尘粘附力、烟气温度因素分析,可以得到一个结论:在燃烧基本正常的情况下,电除尘器能否及时投入主要取决于烟气温度是否超过烟气酸露点决定的。基于这个结论,只要在启动中能够尽快提高烟温,最好是高于酸露点有 30℃的裕度,则完全可以在投油工况下投入电场,甚至随锅炉启动而投入。像株洲电厂具有邻炉热风加热系统,在点火前投入邻炉热风加热本炉及电除尘可以使排烟温度达到 90~100℃,已经满足高于烟气酸露点有 30℃的裕度,可以随着给粉机投入而启用电场。

电除尘器内部存在可燃性气体时,如果与烟气中的过量空气混合达到一定的浓度和温度条件又有火花产生情况下也会发生爆燃的危险,但这种危险发生的条件并不容易满足:①一氧化碳可燃物燃点高达 608℃,在电场内部难于满足;②油气燃点虽然只有 80℃左右,但只有在油枪雾化效果太差,燃烧极不正常情况下才会产生;③电场内部火花一般在 5 kV以上产生,初投电场一般不会参数太高。因此在油粉混燃工况下投电场,只要油枪雾化好,燃烧调整适当,是完全可以避免电除尘器内部发生爆燃。

当嘉陵锅炉正常运行时,炉膛出口烟温达到 1 108~1 115℃,即便低于 70%负荷时需要投入稳燃油枪时炉膛温度也有 985℃。在这种燃烧环境中只要保证过量空气系数,最底层的稳燃油枪是完全可以充分燃烧的,不影响烟尘特性,这与株洲电厂实验结果相符合。也就是说当锅炉正常运行中由于煤质或者消缺的原因投油枪时完全可以不用退出末级电场;尤其是当入炉煤灰分超标、挥发份低导致烟气中粉尘浓度增加时需要保持电除尘高效运行以避免排放不达标。

综上所述,电除尘器在油粉混燃工况下投电场是完全可行的,设备安全是可以充分保证的。

4 运行调整措施及注意事项

2005年以来,嘉陵电厂为了减少机组启动期间粉尘排放,开始在油粉混燃工况试投电场,为了保证电除尘器能高效、安全投运,参考其他电厂的经验,拟

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定以下几方面措施、注意事项来规范运行人员操作。

(1)尽量提高排烟温度

嘉陵电厂没有邻炉热风加热系统,提高排烟温度只有从其他方面着手。电除尘的加热系统要在启动前尽早投入,最好在点火 12小时前投入让本体温度加热到 60℃;锅炉点火时先启动一套引、送风机,适度关小风机档板,减少过量空气系数,避免风量过大使排烟温度降低过多;全部投入暖风器,使暖风器后风温度达到 60℃。

(2)及时调整让柴油充分燃烧

每一只油枪点火前都要确认点火装置正常,在点火装置打火后开油枪,以免柴油未燃就进入炉膛;油母管压力以压力调阀开度 20%时油压 3 MPa为宜(通过回油门调整),点火初期每一只油枪油阀开度以母管压力下降 0.2～0.3 MPa,随着升温升压情况逐渐开大,要确保雾化良好,配风充足;油枪必须是点火装置点燃,禁止引燃。

(3)投入电场条件以及调整参数

当锅炉排烟温度达到 70℃,给粉机投入四台,燃烧良好,可以投第一级电场;随给粉机投入,排烟温度达到 80℃,可以依次投入后几级电场。

当电场内部发生闪络时电流会急剧增加,大幅波动,气体压力和温度急剧升高,如果此时烟气中油气或一氧化碳浓度处于一定范围则有爆燃的可能,因此电场投入初期参数设置以电场能正常起晕同时不发生严重闪络为参考,电场投入初期二次电压可以设置为 40～45 kV,二次电流 100 mA左右。

(4)避免油灰粘附影响正压输灰

在实际生产中,嘉陵电厂电除尘器在油粉混燃工况下,也出现过多次油灰粘附料位计现象,出现的频率、严重程度和煤质以及运行班组燃烧调整有关,在作者所在值很少出现类似情况。一旦出现油灰粘附料位计现象则会影响相应的仓泵程控输灰,这种情况需要及时通知司炉人员调整燃烧,除尘值班人员采取手动控制仓泵输灰,随输灰次数增加,料位计粘附物一般比较容易脱落。2006年电除尘器增加为单室四电场后,正压输灰系统也改造为浓相输灰,仓泵程控输灰不仅可以靠料位计发信,还可以设置成定时输灰;料位计粘附不再会影响正压输灰,而且料位计粘附现象也越来越罕见。

(5)根据具体情况调整投运电场顺序

投电场一般而言按烟气流向依次投入。这和嘉陵电厂末级电场除尘的细度有关,三、四电场均为鱼骨针,所收集的粉尘输送到细灰库。正常运行中,一旦一、二电场停运则三、四电场会因为烟气粉尘浓度太大而无法维持。但启动初期粉尘浓度并不高,约为正常的四分之一,三、四电场也可以单独提前投入。2008年 12月至 2009年 6月,嘉陵电厂电除尘的 11和 14号炉四电场由于灰量少,下灰不畅而多次在灰斗上方形成积灰搭棚,导致四电场输出短路无法投入。为解决棚灰需要增加人工振打砧板,在运行方式上采取首先投入四电场的方法来增加灰量、加快灰流动以避免发生棚灰。经过半年内对启动过程中先投入三或四电场的实验观察,电场设备正常,避免了灰斗棚灰,启动中烟囱排放效果同样良好。

在正常运行中,当粉尘特性变化而使四电场输灰间隔太长时,在保证脱硫入口粉尘不超标的前提下,运行人员可以灵活调整三、四电场参数,以使对应灰斗、仓泵、灰管保持一定的输灰量,便于输灰顺畅。

5 总 结

自嘉陵电厂开始在油粉混燃工况试投电场以来,每次锅炉启动烟囱冒黑烟时间较以往大幅度缩短 2～3 h,少向大气排放粉尘 40～50 t,嘉陵电厂四台锅炉按年启动 40次计算则全年可减少排放粉尘近 2 000 t,带来较大的环境改善,减少了企业压力,取得明显的社会效益,由于减少排放粉尘也减少了引风机叶轮磨损,有利于延长设备寿命。

参考文献

[1] 宋晓东, 刘强. 烟尘特性对电除尘器性能的影响分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2003(3): 41－44.

[2] 胡志光. 电除尘器运行及维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[3] 喻文标, 蒋韶峰. 电除尘器低负荷投油工况下的投入问题研究[J]. 华中电力, 2003, 16(6): 15－18.

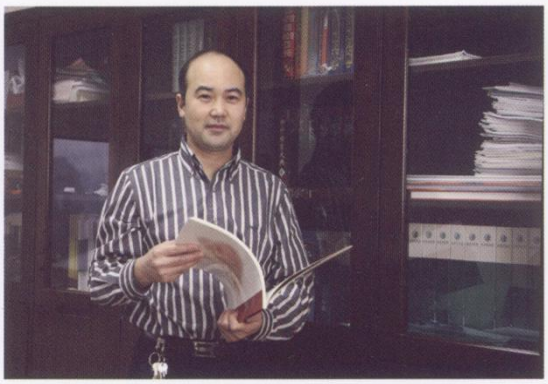
(**收稿日期**: 2010－03－19)

欢迎投稿 欢迎订阅

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

达州电业局

局长、党委副书记周桦



党委书记、副局长何惧熊

达州电业局是国家电网四川省电力公司下属特（Ⅱ）型供电企业，承担达州市五县一市一区供电任务。

长期以来，达州电业局坚持“安全第一、预防为主、综合治理”方针，践行“相互关爱、共保平安”理念，以安全、优质、可靠的电能服务达州市“三步走”发展战略。目前以500kV变电站、华蓥山电厂和东岳电厂为电源点，南、中、北部220kV 环网，中心区域220kV双环网供电的坚强达州电网已基本形成。

面对新形势、新任务、新要求，达州电业局将加强“三个建设”，深化“两个转变”，为建设“一强三优”现代企业，共建“平安达州、和谐达州”再创辉煌、再立新功。

四川省电力公司总经理王抒祥
调研化工业区用电情况

深入推进标准化建设

电网建设如火如荼

未雨绸缪抗灾害

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

乐山电力股份有限公司
LESHAN ELECTRIC POWER CO., LTD.

乐山电力股份有限公司是于1988年3月8日成立的中国第一家电力股份制企业。1993年4月26日，公司股票在上交所挂牌交易。截至2009年期末，总资产达33.356亿元。

乐山电力下辖6个分厂、分公司，10个控股企业。公司拥有相对完整的电力系统，网上电站（厂）、用户分布在乐山市和眉山市的8个区、市、县。担负着乐山市中区生活、商业、部份工业供水和乐山市中区、五通桥区生活、商业、部份工业供气；公司进军新能源产业，由公司控股的乐电天威3000吨/年多晶硅项目建成投产。乐山电力现已发展成为一家以电力为主，同时经营多晶硅生产销售、燃气、自来水、宾馆、煤矿的上市公司。

乐山电力创建22年来，积极践行“诚信、规范、务实、价值、创新”理念，充分发挥人才、技术管理等方面的优势，以科学发展观为统领，大力开发电源，加强电网建设和经营管理，加强燃气、自来水、煤业、宾馆业市场拓展和优质服务，不断提高经济效益；公司积极推行现代企业制度，严格按照股份制规范化运作，不断加强内部规范管理，促进了公司可持续发展。

乐山电力大楼

近年来，公司先后获得中国电力学会“中国电力企业200强”、“全国电力企业经营业绩安全信用AAA级单位”、中国水利协会“全国优秀水利企业”、“全国先进劳动争议调解组织”、“全国和谐劳动关系优秀企业”、“全国文体活动先进单位”、“全国模范职工之家”、“全国安康杯竞赛活动优胜企业”、水利部“地方电力先进企业”、“四川省工业企业最大规模500强”、“四川省工业企业最佳效益200强”、“电力、热力的生产和供应业最大规模20强”和“电力、热力的生产和供应业最佳效益20强”、“四川省大中型企业500强”、“四川省五一劳动奖状”、“四川省水电系统先进单位”、四川省“重合同守信誉企业”、“四川省先进法人单位”、“栋梁工程扶贫助学先进单位”、“四川省栋梁工程社会实践基地”、“四川省级地电行业文明服务示范单位（窗口）”荣誉，为乐山经济社会发展做出了积极贡献。

1 2
3 4

1 乌瞰多晶硅工厂
2 城市天然气供应储备站
3 城市自来水厂水处理车间
4 110kV峨眉夏荷变电站

刊号：ISSN1003-6954 CN51-1315/TM　广告经营许可证号：5100004000578　公开发行　国内定价6.00元/期