

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.34
2011
No.1

《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

2011年第 34卷第 1期(总 211期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdscdlj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* Y6.00* 4300* 27*

2011-02

目 次

·基金栏目·

德宝工程紧急直流功率支援策略研究 贺 洋 (1)

基于向量比较原理的唯一稳态消谐法及在消除中性点接地电力系统铁磁谐振中的应用

..... 冯 平 王尔智 王维俊 (5)

电铁谐波对风电场的影响 张新伟 晁 勤 康建东等 (8)

山区超高压输电线路地线金具的磨损研究 唐 波 杨 暘 孟遂民 (13)

·电网技术·

带并联电抗器的超高压输电线路单相故障性质识别新判据

..... 戚 琦 吕飞鹏 (16)

地区电网孤网运行的高频控制研究 胡仁祥 晁 勤 焦 莉等 (21)

基于变论域模糊 PID控制的同步发电机励磁研究

..... 揭海宝 康积涛 李 平 (24)

基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定 严居斌 (28)

用户谐波发射水平补偿增量回归评估法 张 鹏 刘 燕 (33)

城市电网规划中负荷同时率的选择技术研究

..... 田怀源 周步祥 冯燕禧等 (38)

关于 RCS-931超高压输电线路保护启动元件的探索 夏 天 吴俊美 (42)

分布式发电对配电网继电保护和重合闸的影响

..... 刘 林 李建兵 刘靖涛等 (44)

配电网中接地故障检测新思路 王 智 (46)

电力职业技能鉴定网上训练系统设计与实现 高 英 (49)

·高电压技术·

六氟化硫回收净化处理系统的应用研究 刘红志 彭 柯 (52)

架空送电线路基础上拔稳定计算公式的修正 王高益 (56)

三峡地区超高压输电线路气候特征简析与灾害性天气预报系统的实现

..... 王 辉 宋雪峰 陈 达等 (58)

输电线路防雷措施效果浅析 刘安伟 王琼晶 (61)

变电站电压异常原因判断及处理方法 杨秀蓉 (65)

变压器温度监测方法及常见故障浅析 刘祖惠 (68)

220 kV耐张串复合绝缘子运行情况分析 许文荣 何庆文 黄梓容 (71)

无人值班变电站运行管理模式现状分析及发展探讨 熊 茜 唐 睿 (74)

220 kV变电站主变压器重瓦斯保护动作事故分析 罗贤举 (77)

铁塔主材更换装置的设计应用 王光祥 景文川 (80)

·发电技术·

330 MW机组锅炉结焦原因分析及对策 卢广宇 (83)

410 t/h锅炉提效达标治理与优化 刘新旺 (87)

水轮发电机定子单相接地的继电保护技术 宋全林 桂 林 党晓强 (91)

·简讯·

《四川电力技术》投稿须知 (27)

日本大力扶持太阳能发电 (82)

封面照片由蒋志为提供

CONTENTS

| | |
|--|---|
| Research on Emergency DC Power Support Strategy in Debao Project | He Yang(1) |
| Unique Steady-state Elimination Method Based on Vector Comparison Method and Its Application to Ferroresonance Elimination in Neutral Grounding System | Feng Ping Wang Erzhi Wang Weijun(5) |
| Influence of Electrified Railway Harmonic on Wind Farm | Zhang Xinwei Chao Qin Kang Jiandong et al(8) |
| Wearing Research of Ground Wire Hardware for EHV Transmission Line in Mountainous Area | Tang Bo Yang Yang Meng Sun in(13) |
| A New Criterion for Determining Fault Type in Adaptive Single-phase Reclosing for Shunt Compensated EHV Transmission Lines | Qi Qi Lü Feipeng(16) |
| Research on High-frequency Control in Isolated Grid Operation of Regional Power Grid | Hu Renxiang Chao Qin Jiao Li et al(21) |
| Research on Synchronous Generator Excitation Based on Variable Universe Fuzzy PID Control | Jie Haobao Kang Jitao Li Ping(24) |
| Determination of Disturbance Source for Short-term Power Quality Based on Disturbance Power Method | Yan Jubin(28) |
| Assessment of Customer Harmonic Emission Level Based on Compensated Increment Regression Method | Zhang Peng Liu Yan(33) |
| Selection Technique Research on Load Simultaneity Factor in Urban Power Grid Planning | Tian Huaoyuan Zhou Buxiang Feng Yanxi et al(38) |
| Exploration on Start-up Component of RCS-931 EHV Transmission Line Protection | Xia Tian Wu Junmei(42) |
| Influence of Distributed Generation on Relay Protection and Reclose of Distribution Network | Liu Lin Li Jianbing Liu Jingtiao et al(44) |
| New Idea of Earth Fault Detection in Distribution Network | Wang Zhixi(46) |
| Design and Implementation of Network Training System of Vocational Skill Identification in Power Enterprise | Gao Ying(49) |
| Application Research of SE Recycling Reuse and Purifying System | Liu Hongzhi Peng Ke(52) |
| Amendment for Calculation Formula of Uplift Stability of Overhead Transmission Line Foundation | Wang Gaoyi(56) |
| Superficial Analysis on Climatic Characteristics of EHV Transmission Line in Three Gorges Area and Implementation of Disaster Weather Forecasting System | Wang Hui Song Xuefeng Chen Da et al(58) |
| Superficial Analysis on Effect of Protection Measures against Lightning for Transmission Line | Liu Anwei Wang Qiongjin(61) |
| Cause Judgment for Abnormal Voltage in Substation and Its Solution | Yang Xijun(65) |
| Superficial Analysis on Monitoring Method of Transformer Temperature and Its Common Faults | Liu Zuhui(68) |
| Analysis on Operating Condition of 220 kV Composite Insulators in Tension Strings | Xu Wenrong He Qingwen Huang Ziron(71) |
| Analysis on Operation Management of Unattended Substation and Discussion on Its Development | Xiong Qian Tang Ru(74) |
| Analysis of Malfunction Accident in Heavy Gas Protection of Main Transformer in 220 kV Substation | Luo Xiangju(77) |
| Design and Application of Replacement Device for Principal Material of Steel Tower | Wang Guangxiang Jing Wenchuan(80) |
| Cause Analysis on Slag Buildup of 330 MW Boiler and Its Countermeasures | Lu Guangyu(83) |
| Treatment and Optimization of Enhancing Efficiency of 410 t/h Boiler | Liu Xinwan(87) |
| Relaying Protection Technique of Stator Single-phase Grounding for Hydraulic Generator | Song Quanlin Gui Lin Dang Xiaojian(91) |

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2011 Vol 34 No. 1
(Jan. No. 211)

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

德宝工程紧急直流功率支援策略研究

贺 洋

(重庆市电力公司永川供电局, 重庆 永川 402160)

摘 要:以直流输电线路异步联接的两个交流系统为模型,分析了紧急直流功率支援的机理。通过将其等效为一个单机无穷大系统,利用扩展等面积法则推理可知,系统正摆时提升直流功率,回摆时回降直流功率可分别达到吸收和补偿交流系统中有功过剩和缺额的目的,提高系统的暂态性能。在此结论上,针对德宝直流异步联接的四川—西北电网 2010 年丰大方式,在 BPA 仿真平台上研究了四川电网交流线路短路故障、无故障切机、无故障甩负荷情况下的德宝紧急直流功率支援策略。研究表明,对于交流线路短路故障,宜采用大方式调制策略;而对于无故障切机和无故障甩负荷故障,则应采用功率回降(或提升)结合大方式调制的策略。

关键词:德宝直流;紧急直流功率支援;功率提升/回降;大方式调制;功角稳定

Abstract The mechanism of emergency DC power support (EDCPS) is analyzed based on a model which two AC systems are connected by a HVDC link. This model can be equivalent to one machine infinite bus (OMIB) system, and the extended equal area criterion (EEAC) shows that step-up (or step down) DC power when it swings up (or swings down) can absorb (or compensate) active power in AC system which can enhance the transient stability of the system. Based on this conclusion, the summer peak case in 2010 of Sichuan—Xibei Power Grid connected by Debao HVDC link is studied, including short-circuit fault of AC lines, trouble-free machine cutting and trouble-free load rejection in Sichuan Power Grid. The results prove that the high level modulation fits for the first fault, while the strategy combining power back down (or upgrade) with high level modulation is suitable for the latter two faults.

Key words Debao HVDC link; emergency DC power support; power upgrade/back down; high level modulation; angle stability

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0001-04

0 引 言

中国能源分布和负荷发展在地域上的不平衡决定了电网的发展战略是“西电东送、南北互供、全国联网”。高压直流输电以其经济、灵活、高度快速可控等优点在远距离大容量输电及大型电网互联中发挥着越来越重要的作用^[1-3]。

四川具有丰富的水电资源,水电厂装机容量占四川电网总装机容量 63% 以上,并处于“西电东送”送端最西部,电力外送通道十分紧张。另外,四川电网负荷峰谷差较大,丰水期由于火电调峰容量有限,水电被迫弃水调峰,运行经济性差,而枯水期由于火电装机不足,不得不拉闸限电。500 kV 德阳—宝鸡直流工程将“丰枯”矛盾突出的四川电网与以火电为主

的西北电网互联,它不仅增加了一个川电外送通道,减少四川丰水期弃水,还可以达到“水火相济”的目的。

除了在经济效益方面大有裨益,从电网安全稳定性的角度出发,德宝直流也有积极作用。直流系统可以隔离交流故障,抑制低频振荡,特别是在稳定方面,由于高压直流输电系统快速高度可控,并具有一定的过负荷特性能力,在交流系统出现大扰动的情况下,可以通过附加直流调制功能快速吸收或补偿所连交流系统中的功率过剩或缺额,提高系统的暂态稳定性,起到紧急功率支援的作用。

下面首先分析了简单异步电网直流紧急功率支援的机理。在此基础上,利用 BPA 仿真平台针对德宝直流的紧急功率支援策略进行了研究。以四川—西北电网 2010 年丰大运行方式为例,考虑了四川电网出现交流系统三相短路、无故障切机、无故障甩负荷 3 种故障类型情况下德宝直流不同紧急功率支援

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA13B01);
国家电网公司科技项目

策略对四川电网(送端系统)稳定的影响。对比了直流功率提升/回降、大方式调制、直流功率提升/回降+大方式调制等 3 种紧急功率支援策略。仿真结果表明:不同类型故障具有不同的紧急功率支援策略,对于交流线路短路故障,易采用大方式调制策略;而对于无故障切机和无故障甩负荷故障,则应采用功率回降(或提升)结合大方式调制的策略。

1 紧急直流功率支援机理分析

1.1 紧急直流功率支援定义

紧急直流功率支援是指,在交流系统发生大干扰时,从两端的交流系统中提取反映系统异常(例如发电幅度的功率变化、频率突变等)的信号加入 HVDC 的附加控制器,利用直流系统的过负荷特性,使之快速吸收或补偿所连交流系统中的功率过剩或缺额,尽可能地维持交流系统的功角、频率稳定,起到紧急功率支援的作用^[4-8]。

1.2 异步电网区域振荡数学模型

通过直流异步连接的两个交流系统如图 1 所示。

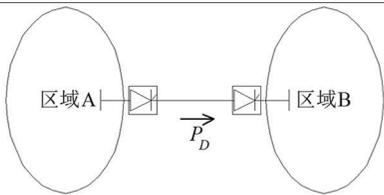


图 1 异步交流电力系统

在经典模型下,区域 A 和区域 B 机电暂态过程可以分别用如下微分方程描述^[9-10]。

$$\begin{cases} M_A \frac{d\omega_A}{dt} = \sum_{i \in A} (P_{mi} - P_{ei}) - P_D \\ \frac{d\delta_A}{dt} = \omega_A \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_B \frac{d\omega_B}{dt} = \sum_{j \in B} (P_{mj} - P_{ej}) + P_D \\ \frac{d\delta_B}{dt} = \omega_B \end{cases} \quad (2)$$

其中, M_A 、 M_B 和 δ_A 、 δ_B 分别为区域 A 和区域 B 的等值惯性时间常数和惯性中心下的广义加速度。 P_D 为直联络线传输功率(不考虑直流输电功率损耗)。

用式(1)减去式(2)可以得到等值为单机无穷大系统的转子运动方程。

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{AB}}{dt} = \frac{P_{Am} - P_{Ae} - P_D}{M_A} - \frac{P_{Bm} - P_{Be} + P_D}{M_B} \\ \frac{d\delta_{AB}}{dt} = \omega_{AB} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } P_{Am} &= \sum_{i \in A} P_{mi}, & P_{Ae} &= \sum_{i \in A} P_{ei}, \\ P_{Bm} &= \sum_{j \in B} P_{mj}, & P_{Be} &= \sum_{j \in B} P_{ej} \end{aligned}$$

1.3 机理分析

由式(3)进一步推导可得

$$\frac{d^2\delta_{AB}}{dt^2} = \left\{ \frac{P_{Am}}{M_A} - \frac{P_{Bm}}{M_B} \right\} - \left\{ \left(\frac{P_{Ae}}{M_A} - \frac{P_{Be}}{M_B} \right) + \left(\frac{P_D}{M_A} + \frac{P_D}{M_B} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\text{令 } P_m = \frac{P_{Am}}{M_A} - \frac{P_{Bm}}{M_B}, \quad P_e = \left(\frac{P_{Ae}}{M_A} - \frac{P_{Be}}{M_B} \right) + \left(\frac{P_D}{M_A} + \frac{P_D}{M_B} \right).$$

P_m 可以看成是归一化的机械功率, P_e 可以看成是归一化的修正电磁功率。前者与直流线路的输送功率无关,后者则随直流线路输送功率的变化而变化。调节直流功率相当于迅速修正了系统的电磁功率,修正的电磁功率 $\Delta P_e = \Delta P_D \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)$ 。

由扩展等面积法(EEAC)可知,系统在故障后每一个振荡周期将分为 4 个阶段:①正向加速(此时 $P_m > P_e, \dot{\omega}_{AB} > 0, \omega_{AB} > 0$);②正向减速(此时 $P_m < P_e, \dot{\omega}_{AB} < 0, \omega_{AB} > 0$);③反向加速(此时 $P_m < P_e, \dot{\omega}_{AB} < 0, \omega_{AB} < 0$);④反向减速(此时 $P_m > P_e, \dot{\omega}_{AB} > 0, \omega_{AB} < 0$)。

在正向加速和正向减速过程中,如果提升直流输送功率,可使 P_e 增加(向上平移了 ΔP_e),即减小了正摆的加速面积,增加了正摆的减速面积。同理,在反向加速和反向减速过程中,如果回降直流功率,可使 P_e 减小(向下平移了 ΔP_e),即减小了回摆的加速面积,增加了回摆的减速面积(如图 2)。

也就是说,当 $\omega_{AB} > 0$ 时,提升直流功率,当 $\omega_{AB} < 0$ 时,回降直流功率可以减小区域间的振荡,提高系统的暂态性能,使系统尽快恢复到故障后的稳定运行状态。

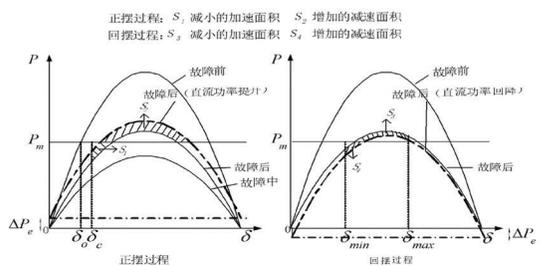


图 2 紧急直流功率支援原理

2 德宝直流紧急功率支援对四川电网的影响

四川电网与西北电网通过德宝直流异步联接,其

结构类似于图 1 模型。德宝直流双极输送容量 3 000 MW, 如果考虑其 1.1 倍的长期过载能力和 1.5 倍的短时过载能力, 将对四川电网的稳定产生较大影响。因此, 研究德宝直流在负担传输任务的同时如何通过其附加控制器提高四川电网的稳定性, 特别是在大扰动下德宝直流的紧急功率支援策略具有重大意义^[11-13]。

采用 BPA 软件作为仿真平台, 电网数据为 2010 年四川—西北电网丰大运行方式 (此时, 德宝直流单极运行, 由四川向西北送电 1 500 MW)。其中发电机采用次暂态详细模型, 并考虑励磁调节器、调速器的动态作用。德宝直流系统采用详细模型, 控制方式为定功率控制。

针对德宝紧急直流功率支援对四川电网稳定的影响, 分别考察了交流线路三相短路、无故障切机、无故障甩负荷 3 种故障类型。

研究的直流紧急功率支援策略包括:

(1) 功率提升/回降, 即在故障后根据交流系统有用剩余或不足来提升或回降直流功率。

(2) 大方式调制, 即通过交流线路的功率或者电流信号对直流功率进行调制。大方式调制框图及参数分别如图 3 和表 1。

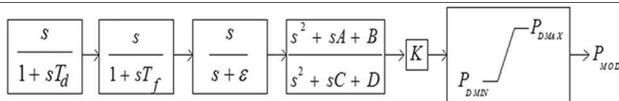


图 3 大方式调制控制器结构

表 1 大方式调制控制器参数

| T_d | T_f | ϵ | A | B | C | D | K | P_{MN} | P_{MAX} |
|-------|-------|------------|---|---|---|---|---|----------|-----------|
| 0.1 | 0.1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 750 | 2 250 |

(3) 功率提升/回降+大方式调制。

其中, 功率提升/回降都是在故障后 0.1 s 后开始动作, 大方式调制输入信号均选自黄岩—万县 500 kV 交流线路功率信号, 黄万线是四川电网外送电交流通道。

2.1 交流线路故障

故障假设 1: 2 s 时刻, 洪沟—板桥双回 500 kV 线路其中一回在洪沟母线出口处出现三相短路, 0.1 s 后此回线路跳开。

选取广安 1 号机组功角曲线作为考察对象 (此机组位于黄万线附近, 且离德宝直流较近), 对比了无附加控制、功率提升、大方式调制、功率提升+大方式调制 4 种情况, 直流功率提升量按额定值的 50% 计算, 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 功率提升 (曲线 2) 对于首摆几乎没

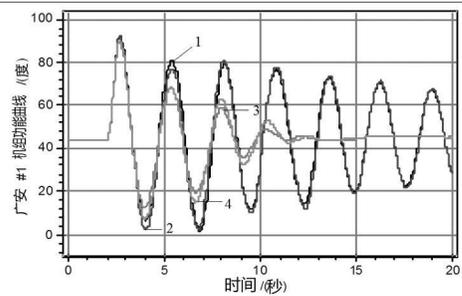


图 4 交流线路故障情况下不同紧急直流功率支援策略比较有改善作用, 大方式调制 (曲线 3) 和功率提升+大方式调制 (曲线 4) 对于首摆的改善也不明显。这是因为在故障期间, 四川机组因为电磁功率外送受阻而加速, 此时迫切需要提升德宝直流输送功率, 但由于换流站电压跌落到 0.8 pu 以下, 低压限流器 (VDCOL) 工作, 达不到提升直流功率的目的。在故障清除后, 虽然直流功率迅速恢复并提升, 但这个时候系统第一摆加速过程已经快要过去, 提升功率相对于时间积分的面积并不大。尽管如此, 大方式调制对于系统的后续摆却有较大改善, 由于大方式调制的输入信号是四川交流外送通道黄万线上的功率信号, 因此可以反映四川机组相对于西北机组的振荡情况, 正摆期间 ($\omega_{AB} > 0$) 提升直流功率, 回摆期间 ($\omega_{AB} < 0$) 回降直流功率, 符合直流紧急功率支援的机理, 因此效果较好。而单纯的功率提升只是在正摆期间有利, 在回摆期间起副作用, 因此曲线 2 甚至在回摆时效果恶化, 曲线 4 的效果也不及曲线 3。

2.2 无故障切机

故障假设 2: 2 s 时刻, 二滩 1 号机组在无故障情况下退出运行 (二滩机组单机容量 550 MW)。

选取广安 1 号机组功角曲线作为考察对象, 对比了无附加控制、功率回降、大方式调制、功率回降+大方式调制 4 种情况, 直流功率回降量按损失发电容量 (550 MW) 计算, 仿真结果如图 5 所示。

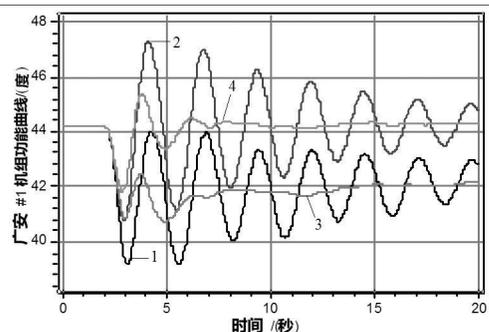


图 5 无故障切机情况下不同紧急直流功率支援策略比较

由图 5 可知, 由于故障后, 四川电网不仅会发生振荡, 还将有 550 MW 的功率缺额。单纯采用功率回

降(曲线 2)策略,可以弥补这一缺额,使故障后的稳定平衡点接近于故障前的稳定平衡点,对系统的首摆改善明显,但由于只有在回摆期间有利,振荡幅度依然很大。大方式调制(曲线 3)对首摆也有明显改善,而且对后续摆也有很好的阻尼作用,但是由于无法弥补故障后四川电网的功率缺额,稳定平衡点会发生改变,系统的波动较大。功率回降+大方式调制(曲线 4)不仅对系统首摆最有利,而且对后续摆阻尼作用也很好,且基本维持故障前稳定平衡点,对稳定的改善最大。

2.3 无故障甩负荷

故障假设 3, 2 s 时刻,系统在无故障情况下甩开五里堆和二重负荷(五里堆和二重负荷合计 320 MW)。

选取广安 1 号机组功角曲线为考察对象,对比了无附加控制、功率提升、大方式调制、功率提升+大方式调制 4 种情况,直流功率提升量按甩开负荷容量(320 MW)计算,仿真结果如图 6 所示。

无故障甩负荷与无故障切机类似,由图 6 可知,由于故障后,四川电网不仅会发生振荡,还将有 320 MW 的功率剩余。功率提升(曲线 2)策略仅能改善首摆效果,吸收剩余有功,使得故障后的稳定平衡点接近于故障前的稳定平衡点。大方式调制(曲线 3)能对系统首摆和后续摆的改善都很明显,但是四川电网的有功剩余使得故障后的稳定平衡点发生改变。功率提升+大方式调制(曲线 4)不仅能将四川电网剩余有功外送,使故障后的稳定平衡点尽可能不变,又对系统首摆最为有利,且在振荡过程中有很好的阻尼效果。

急功率支援对四川电网在不同类型故障下的影响进行了研究。得到结论如下。

(1)直流功率紧急支援不是简单的直流功率提升/回降,应该由交流系统中的有功功率变化(剩余或者缺额)而定。要达到直流紧急功率支援的目的,应该在整流端机组相对于逆变端机组加速(或减速)时提升(或回降)直流功率,这相当于吸收(或补充)交流系统中的有功剩余(或缺额),这样可以提高系统首摆的稳定裕度,并改善后续摆的阻尼。

(2)不同类型故障,由于有功平衡情况不同,对应有不同的直流紧急功率支援策略。单纯采用直流功率/回降策略对于首摆有一定好处,但是在回摆(或正摆)时会起副作用,因此不能增加后续摆的阻尼。大方式调制策略对首摆和阻尼都有较好效果,但是如果系统在故障后有有功剩余(或缺额)时,这种紧急功率支援策略由于故障后的稳定平衡点与故障前的稳定平衡点有一定偏差,系统的振荡依然较大,因此仅适用于故障后无有功剩余(或缺额)的故障。功率提升/回降+大方式调制策略可以维持稳定平衡点基本不变,使系统振荡大大减小,对于系统的首摆又最为有利,且在整个振荡过程中都有较好的阻尼,但对于故障后无有功剩余(或缺额)的故障反而会恶化后续摆的阻尼。

(3)直流功率的提升还受到 VDCOL 参数的影响,当换流站母线电压降低到 VDCOL 的启动阈值以下时,不能期望通过直流系统提高系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Hammons T J, Woodford D, Loughtan M, et al. Role of HVDC Transmission in Future Energy Development [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(2): 10-25.
- [3] 舒印彪. 中国直流输电的现状及展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
- [4] 谢惠藩, 张尧, 夏成军. 特高压紧急直流功率支援策略研究 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 1-7.
- [5] Nikamal Femandopulle. Improved Dynamic Security Assessment for AC/DC Power Systems Using Energy Functions [J]. IEEE Transactions on power systems, 2003, 28(4): 1470-1477.

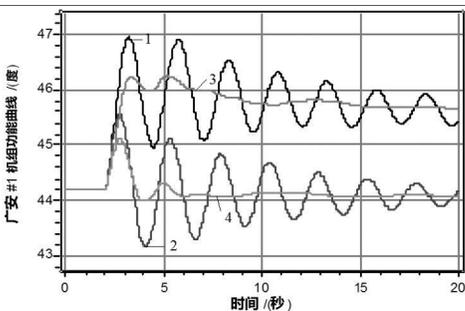


图 6 无故障甩负荷情况下不同紧急直流功率支援策略比较

3 结论

以上分析推导了直流紧急功率支援的机理,并针对 2010 年四川—西北电网丰大运行方式德宝直流紧

(下转第 32 页)

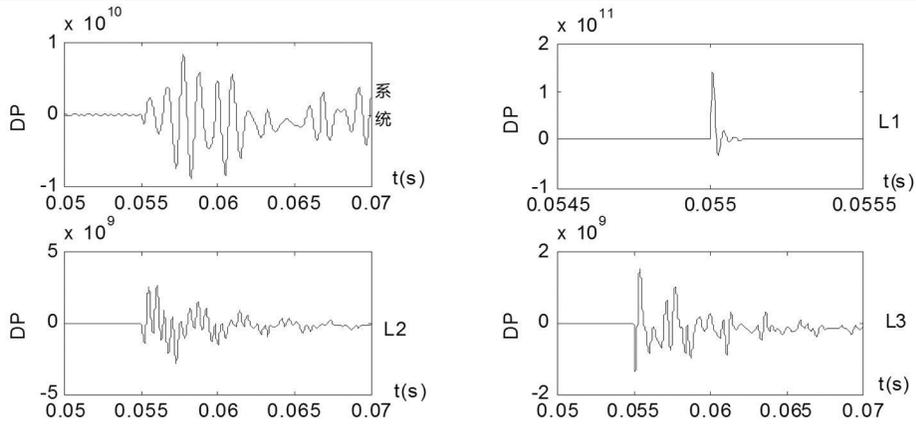


图 8 L₁ 支路出口处三相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

4 结 语

随着电力市场的不断完善,电力部门不仅要满足用户对电力数量不断增长的需求,还必须满足较高电能质量的要求。深入分析和研究电能质量问题,探询在一定条件下发生电能质量扰动的因果关系,找到扰动源,明确责任和义务,是电力工业适应市场竞争和可持续发展所必须的。采用了扰动功率法对电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动进行扰动源的判定。通过仿真分析,取得了较好的效果。

参考文献

[1] Dugan R C, Mcgranaghan M F, Beaty H W. Electrical Power Systems Quality [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
 [2] 严干贵, 姜齐荣, 黄民聪. 未来的用户电力技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 62-67.

[3] Nara K, Hasegawa O, Yama T, et al. Forwarding to Future Power Delivery System [C]. In: Proceeding of IEEE ICHQP IX. Orlando (USA); 2000, 8-18.
 [4] Mancao R T. Power Quality Monitoring of a Distribution System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 1136-1140.
 [5] 胡铭, 陈珩. 电能质量及分析方法综述 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
 [6] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
 [7] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18, 33.
 [8] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, Soward J C. A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1081-1086.

(收稿日期: 2010-11-14)

(上接第 4 页)

[6] 任景. 交直流互联系统送端孤网运行时频率稳定问题研究 [D]. 成都: 四川大学, 2008.
 [7] S Corsi A, Danelli M, Pozzi. Emergency-stability Controls through HVDC Links [C]. Power Engineering Society Summer Meeting Chicago-USA, 2002(2): 774-779.
 [8] Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC Transient Response and Recovery Strategies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1995-2001.
 [9] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.

[10] 房大中, 杨晓东, 宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器 [J]. 电力系统自动化, 2002, 25(5): 21-27.
 [11] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流系统中直流调制的协调优化 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
 [12] 郭小江, 卜广全, 马世英, 等. 西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略 [J]. 电网技术, 2009, 33(2): 56-61.
 [13] 金小明, 李兴源, 刘红超, 等. 南方电网多馈入与交流并联系统的稳定与控制研究 [R]. 成都: 四川大学, 2002.

(收稿日期: 2010-11-19)

基于向量比较原理的唯一稳态消谐法 及在消除中性点接地电力系统铁磁谐振中的应用

冯平^{1,2}, 王尔智², 王维俊¹

(1. 解放军后勤工程学院机械电气工程系, 重庆 401311; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110178)

摘要: 唯一稳态消谐法是近年出现的消除非线性系统谐振新的分析方法。该方法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解, 并且该系统具有唯一的稳态, 则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。将这一方法应用在消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的分析中, 以向量比较原理为工具, 得到了相应的消谐条件。其结果表明, 消除谐振的条件可以用一个常数矩阵的 Hurwitz 条件来决定, 并用数值模拟进行验证, 表明结果正确, 同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

关键词: 电力系统; 铁磁谐振; 中性点接地系统; 非线性系统; 唯一稳态消谐法

Abstract: Unique steady-state elimination method is a new method for eliminating resonance in nonlinear system presented recently. Its basic idea is that if there is a normal (non-resonance) solution for the system, and the steady state of the system is unique, then the corresponding conditions are the conditions for eliminating resonance. This new method is applied to analyze the elimination of ferroresonance in neutral grounding system. Based on vector comparison method, the conditions for eliminating this ferroresonance are obtained, which can be determined by the Hurwitz conditions of some constant matrixes. The conclusions are proved correct by numerical simulation, and it shows the effectiveness of unique steady-state elimination method.

Key words: power system; ferroresonance; neutral grounding system; nonlinear system; unique steady-state elimination method

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0005-03

0 概述

在 110~220 kV 等中性点接地电力系统中, 经常发生断口电容与电压互感器形成的铁磁谐振, 给电力系统造成很大的危害。围绕这种谐振的机理及消除方法, 国内外进行了广泛的研究^[1-2]。

从方法上看, 目前对这种铁磁谐振问题所主要采用的方法有如下几种。第一是实验研究^[3-4], 即通过大量的实验数据得到各种经验结论。第二是进行数值模拟和仿真^[5-6]。通过建立模型, 在大范围内改变参数, 通过计算机计算得到或验证参数的范围。第三是理论研究^[7,8], 即对这种谐振建立相应的数学模型, 通过对模型的理论分析, 了解这种谐振的机理, 并且寻找消除谐振的方法。这 3 种方法中, 理论分析具有决定性的意义, 主要有作图法^[1,8]、谐波平衡法^[5,6]、平面相图法^[4]、幅频法、描述函数法^[1-3]、非

线性动态系统理论^[4,7]等。但由于该问题数学上的复杂性, 目前采用的都是各种近似的方法, 得到的结论和试验数据往往有一定的差距。因此, 提出和发展新的分析铁磁谐振的方法, 并对该问题进行更深入的分析是很有意义的。

唯一稳态消谐法是近年出现的消除非线性系统谐振新的分析方法^[9]。该方法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解, 并且该系统具有唯一的稳态, 则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。将这一方法应用在消除中性点接地电力系统铁磁谐振的分析中, 以向量比较原理为工具, 得到了相应的消谐条件。其结果表明, 消除谐振的条件可以用一个常数矩阵的 Hurwitz 条件来决定, 并用数值模拟进行验证, 表明结果正确, 同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

1 等效电路及其数学模型

以图 1 的电路作为中性点接地电力系统铁磁谐

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50477050)

振的模型^[1]。

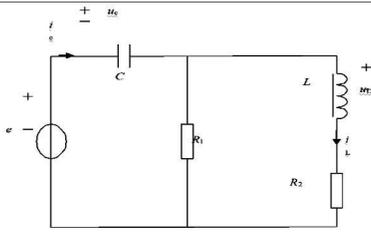


图 1 铁磁谐振等效电路

图 1 中, $e = \sqrt{2}E_s \sin \omega t$ 是 50 Hz 等效正弦交流电源; R_1 和 R_2 是互感器铁心的等效电阻; L 为等效非线性电感; C 为线路等效电容, 各量的参考方向如图。

基准值为^[3]对所研究的 220 kV 系统, 三相电压 $V_{base} = 220$ kV, 单相电压 $V_{base} = 127$ kV, 单相视在功率 $S_{base} = 100$ VA, 角频率 $\omega_{base} = 314$ (rad/s), 阻抗的基准值为 $R_{base} = 16$ M Ω , $C_{base} = 1 / (R_{base} \times \omega_{base}) = 1 / (5.06 \times 10^{10})$ F。

互感器磁链与电流关系由一个三阶代数方程表示如下。

$$i = a\psi + b\psi^3 \quad (1)$$

式中, ψ 为互感器磁链, 此处取: $a = 3.42$, $b = 0.41$ 。

对于式 (1) 表示的非线性电感, 可以用分段折线来近似, 当 $|\psi| \leq 0.5$, 取 $i = 3.42\psi$; 当 $|\psi| \geq 0.5$, 取 $i = 8.8088\psi - 4.0412$ 。

对应于图 1, 按照图中的参考方向, 可以得到电路的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = e(t) - R_2 i(\psi) - u_C(t) = e(t) - R_2 i(\psi) - q/C \\ \frac{dq}{dt} = i(\psi) + [e(t) - u_C(t)]/R_1 = i(\psi) + [e(t) - q/C]/R_1 \end{cases} \quad (2)$$

归一化后电路的微分方程可表示如下。

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{1}{R(C_s + C_g)} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C_s + C_g} (a\psi + b\psi^3) = -\sqrt{2}\omega E \frac{C_s}{C_s + C_g} \sin \omega t \quad (3)$$

可以证明, 电路至少存在一个以 T 为周期的解^[11]。

对于方程式 (2), 设其任意两个有界解为

$$\{\Psi, q\}, \{\Psi^*, q^*\}$$

并令

$$\Delta\Psi = \Psi - \Psi^*, \Delta q = q - q^*$$

于是可以得到增量状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta\psi}{dt} \\ \frac{d\Delta q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_2 K_L(t) & -1/C \\ K_L(t) & -1/CR_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\psi \\ \Delta q \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,

$$K_{Lmin} \leq \frac{i_1 - i_2}{\Psi_1 - \Psi_2} = K_L(t) \leq K_{Lmax}$$

考虑式 (4) 的一般形式

$$dX/dt = A(t)X \quad (5)$$

$$X = (x_{ij})_{1 \times n}, A(t) = (a_{ij}(t))_{n \times n}$$

显然, 如果式 (5) 的零解 $X = 0$ 是全局渐进稳定的, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X\| \rightarrow 0$$

则图 1 所示电路的稳态唯一, 即系统的不谐振条件。

下面推导消除系统谐振条件。

2 电路唯一稳态的条件 (消除谐振条件) 的求取

唯一稳态消谐法是近年出现的消除非线性系统谐振新的分析方法^[9]。该方法的基本思想是如果非线性系统存在一个非谐振的正常解, 并且该系统具有唯一的稳态, 则此时对应的条件就是系统不发生谐振的条件。按照这一方法, 对于图 1 和状态方程 (3), 大量实验和运行经验表明其有多个稳态解, 其中最常见稳态解, 就是没有发生谐振时, 对应于系统正常工作状态的稳态解。系统的其他非正常的稳态解, 则是由于扰动, 引起 C 与 L 之间的铁磁谐振造成的稳态解。显然这些非正常的稳态解对于系统是有利的, 如果能够使经扰动后的非正常稳态解趋于正常的稳态解, 即使系统的稳态解唯一, 那就可以达到消除系统铁磁谐振的目的。这样, 消除铁磁谐振的问题此时就转化为求系统的唯一稳态的问题。

为了求得系统的唯一稳态, 首先, 给出如下引理。

引理 1: 连续向量 $F(X, t)$ 是拟单调增的, 如果 $y_i = z_i, y_j \geq z_j (j \neq i), f_i(Y, t) \geq f_i(Z, t)$ 成立。

引理 2^[12]: 如向量 $R(t)$ 满足微分不等式

$$dR(t)/dt \leq F(R, t), R(t_0) \leq X_0$$

向量 $P(t)$ 是微分方程 $dX/dt = F(X, t), X(t_0) = X_0$ 的最大解, 并且 $F(X, t)$ 是拟单调增的, 则有

$$R(t) \leq P(t)$$

于是, 有如下的定理 1。

定理 1: 对于式 (5), 如果有两个常数阵

$$P = (p_{ij})_{n \times n} \text{ 和 } Q = (q_{ij})_{n \times n}$$

满足

$$p_{ij} \leq a_{ij}(t) \leq q_{ij}$$

以如下方式构造矩阵 M

$$M = (m_{ij})_{n \times n}$$

其中,

$$m_{ij} = \max\{|p_{ij}|, |q_{ij}|\}$$

$$m_{ii} = q_{ii}$$

则式(4)有唯一稳态的充分条件是 M 为 Hurwitz 阵。

证明:考虑如下的方程

$$dZ(t)/dt = MZ(t) \quad (6)$$

定义记号:

$$D_A(t) = \text{diag}[a_{11}(t), \dots, a_{nn}(t)],$$

$$D(t) = \text{diag}[m_{11}(t), \dots, m_{nn}(t)]$$

$$A(t) = D_A(t) + (A(t) - D_A(t))$$

矩阵: |.....|

为相应矩阵取绝对值后所得的矩阵对式(6),有

$$X(t) = e^{\int_0^t A(\tau) d\tau} X_0 + \int_0^t e^{\int_0^\tau A(\tau) d\tau} [A(\tau) - D_A(\tau)] X(\tau) d\tau$$

由记号,有

$$(|A(t) - D(t)|) \leq M - D(t)$$

$$D_A(t) \leq D(t)$$

于是有

$$(|X(t)|) \leq e^{\int_0^t D_A(\tau) d\tau} (|X_0|) + \int_0^t e^{\int_0^\tau D_A(\xi) d\xi} (|A(\tau) - D(\tau)|) (|X(\tau)|) d\tau$$

$$\leq e^{\int_0^t D_A(\tau) d\tau} (|X_0|) + \int_0^t e^{\int_0^\tau D_A(\xi) d\xi}$$

$$(|M - D(\tau)|) (|x(\tau)|) d\tau \equiv Y(t)$$

显然 Y(t) 对 t 连续,于是有

$$dY(t)/dt = D(t) Y(t) + [M - D(t)] Y(t)$$

$$\leq D(t) Y(t) + [M - D(t)] Y(t) = M Y(t)$$

则由引理 2 有

$$Y(t) \leq Z(t) \text{ 和 } (|X(t)|) \leq Y(t) \leq Z(t)$$

如果 M 是 Hurwitz 阵, 则式(6)的零解是全局渐进稳定的, 即式(5)的零解也是全局渐进稳定的, 式(2)有唯一稳态。证毕。

下面根据定理 1 推导消除谐振的条件。

对比式(4)、式(5), 显然, 有

$$A(t) = \begin{bmatrix} -R_2 K_L(t) & -1/C \\ K_L(t) & -1/CR_1 \end{bmatrix}$$

由定理 1, A(t) 其对应的 M 矩阵, 得到图 1 所示的铁磁谐振电路不发生谐振的条件为定理 2。

定理 2: 对于图 1 所示电路, 其不发生谐振的条

件为

$$-2RK_L(t) < 0$$

$$-2/CR_1 < 0$$

$$-2R_2 K_L(t) + |K_L(t) - 1/C| < 0$$

$$-2/CR_1 + |K_L(t) - 1/C| < 0$$

根据文献[6]取参数(均为标么值) E=1, a=3.42, b=0.41, C=0.5, 3.42 < K_L < 8.8 角频率为 1, 代入定理 2 得到当 R_2 > 2.0, 0 < R_1 < 0.5 时, 没有铁磁谐振发生。

3 数值模拟与讨论

下面取不同的参数, 在不同的初始条件下, 对电路进行模拟仿真, 以检验电路是否发生谐振。初始条件顺序为: 磁链, 电容电荷, 时间, 初始条件按文献[6]选定。

通过模拟结果表明, 如果电路参数满足定理 2 的条件, 则电路无论在何种初始条件下, 虽然经过非常复杂的振荡过程, 其稳态都将是唯一的, 最终所有解都将趋近正常解, 不会出现铁磁谐振, 验证了其给出的条件的正确性。

其中一组数据的振荡过程如下。

初始条件: $\psi^0 = 2.4, q^0 = 1.4, t^0 = 0$

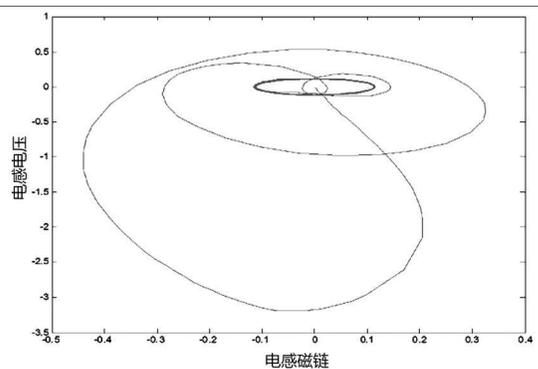


图 2 电路稳态相图

其结果可以用于消除谐振的设备计算中, 只是参数将发生改变。

所采用的电路虽然是集中参数电路, 但实际应用时, 可以根据具体的线路长度等将分布参数集中为等效电路, 这是目前电力系统谐振分析的有效做法, 可见诸于相关文献[1-3]。

4 结论

(下转第 20 页)

续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均远小于整定值;而当发生瞬时性故障时,连续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均大于整定值。根据判断流程,故算法可以可靠地判断故障性质。

8 结 论

根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了提取瞬时性故障时恢复电压自由分量的算法,并应用 Prony 曲线拟合算法在短数据窗内获取自由分量的幅值,作为判断故障性质的依据。该判据具有简单、数据窗短、灵敏度高和基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响的优点。

参考文献

[1] 曹芬,何奔腾.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法[J].电力系统自动化,2009,33(23):55-59.

[2] 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,2007.

[3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.

[4] 刘浩芳,王增平,徐岩,等.带并联电抗器的超特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J].电网

技术,2006,30(18):30-34.

[5] Ge Yaosheng Sui Fonghai Xiao Yuan Prediction Methods for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[6] Fitton D S, W Dunn R, Aggarwal R K, et al. Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 748-756.

[7] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, et al. Neural-network Based Adaptive Autoreclosure Technique for EHV Transmission systems [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 155-160.

[8] 蔡超豪.基于小波分析的自适应重合闸[J].继电器,1999,27(2):21-23.

[9] 成敬周,张举.基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J].继电器,2005,33(7):21-25,49.

[10] 舒亮,贾磊,郑士普,等.超高压线路潜供电弧电压的频率特性分析.西安交通大学学报,2007,41(6):712-716

[11] J F Hauer C J Demeure L L Scharf Initial Results in Power Analysis of Power System Response Signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1990, 5(1): 80-89.

[12] 伍凌云,李兴源,孙衢,等.基于 Prony 辨识的复杂交直流系统次同步振荡特性分析[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):155-160.

(收稿日期:2010-09-15)

(上接第 7 页)

根据唯一稳态消谐法基本思想,利用向量比较原理,分析了消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的参数条件,得到了相应的消谐条件。同时通过数值模拟进行验证,表明结果正确,同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

参考文献

[1] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.

[2] 张纬敏,高玉明.电力系统过电压与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,1988.

[3] 郑盛琼,陈维贤,鲁铁成.110~220 kV 变电所中互感器引起的铁磁谐振及吸能消谐[J].高压电器,1996,18(6):26-30.

[4] T. Henriksen How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models [J]. IEEE Trans

on Power Delivery, 2002, 17(2): 516-522.

[5] 李兴斌,王晨新.断路器均压电容引起的铁磁谐振分析[J].东北电力技术,1994,24(9):39-43.

[6] 贾红琴.电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制[J].高电压技术,2000,43(1):69-70.

[7] 石峰.110~220 kV 变电站空母线铁磁谐振的分析[J].湖南电力,2001,15(1):14-16.

[8] Yunge Li Wei Shi A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-grounded Substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1009-1014.

[9] 冯平,王尔智.中性点接地电力系统三相铁磁谐振理论分析[J].电工技术学报,2004,23(4):35-39.

[10] 尤秉礼.常微分方程补充教程[M].北京:人民教育出版社,1981.

[11] 冯平.一种混沌分析与抑制方法及其在电力系统铁磁谐振中的应用[D].沈阳:沈阳工业大学博士论文,2010.

[12] 杨开宇.矩阵分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

(收稿日期:2010-10-12)

电铁谐波对风电场的影响

张新伟¹, 晁 勤¹, 康建东², 常喜强³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:结合电铁牵引负荷的谐波特性与包含大量异步风电机组的风电场中升压站低压侧谐振点频带较宽的特点, 针对新疆部分地区电网在同一点同时接入电气化铁路和风电场的情况, 从理论上分析了电铁谐波对风电场运行特性的影响, 并在仿真软件中搭建了新疆某地区电网模型, 对风电场投运风机数量不同时电铁牵引负荷在不同工况下可能引发风电场升压站低压母线处谐振现象进行了仿真分析和评估, 提出了减小电铁谐波对风电场影响的建议和措施, 具有一定的实际意义。

关键词:电气化铁路; 不平衡谐波; 异步风电机组; 谐振

Abstract: Combining the harmonic characteristics of electrified railway traction load with the characteristics that low-pressure side of booster plant in wind farm which contains a large amount of asynchronous wind turbine generators holds wide-frequency channel of resonance point and aiming at the phenomenon that electrified railway and wind farm connect with power grid at the same point and at the same time in some area of Xinjiang the influence of electrified railway harmonic on the operation features of wind farm is analyzed theoretically. The grid model for a area in Xinjiang is established in the simulation software the resonance phenomena at LV busbar of booster plant are analyzed and evaluated which may be caused under different operating condition when the number of running wind generators are variable. And the suggestions and measures are proposed to reduce the influence of electrified railway harmonic on wind farm, which has some practical significance.

Key words: electrified railway; unbalance harmonic; asynchronous wind turbine generator; resonance

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0008-05

0 引 言

随着越来越多的大型风电场并网运行, 在部分地区的风电场周围伴随有铁路的穿越。电力牵引技术大大促进了铁路的发展, 电气化铁路已成为现阶段铁路建设发展的主要方向。现在的研究者主要是对电铁牵引负荷的谐波特性和风电场的并网运行分别进行研究。文献 [1-3] 详细分析了电铁谐波的特点及其在高压电网中的渗透特性以及对常规电网电能质量及电力设备的影响, 但并没有涉及对含有风电场的地区电网中风电系统的影响; 文献 [4-6] 对风电场的运行特性及并网可靠性进行了研究, 但并未考虑电铁谐波对风电场的影响。电气化铁路的供电可靠性要求电铁牵引站需接入高压电网, 而其穿越的风区的风电场也根据电网情况接入该地区的高压电网, 这样就会在同一地点既接入了风电场, 又接入了电气化铁

路牵引站。在风资源丰富新疆有大量的风电场投运, 伴随着兰新二线电气化铁路建设, 部分地区出现了电气化铁路与风电场集中接入电网的情况。与电力系统中其他谐波源相比, 电铁负荷具有不同的谐波特性。在风电场与电铁牵引负荷集中接入的地区电网, 电铁负荷在运行过程中产生的谐波注入风电场将对风电场的运行特性造成较大影响, 电铁谐波对风电场影响的研究具有紧迫性和一定的实际意义。

1 不平衡谐波电流的序量分析

用 $\dot{i}_{A V}$ 、 $\dot{i}_{B V}$ 、 $\dot{i}_{C V}$ 分别表示 V 次谐波电流的幅值, $\Delta \dot{i}_{B V}$ 、 $\Delta \dot{i}_{C V}$ 分别表示 V 次谐波的 B、C 相电流与 A 相电流的幅值偏差, $\varphi_{A 1}$ 、 $\varphi_{B 1}$ 、 $\varphi_{C 1}$ 分别表示基波的初始相角, $\varphi_{A V}$ 、 $\varphi_{B V}$ 、 $\varphi_{C V}$ 分别表示 V 次谐波相对于基波的初始相角, $\Delta \varphi_{B V}$ 、 $\Delta \varphi_{C V}$ 分别表示 V 次谐波的 B、C 相电流相对于平衡状态下 B、C 相电流的相角偏

基金项目:新疆教育厅重点项目 (XJEDU2008162)

差,基波、谐波电流的相角如图 1 所示。

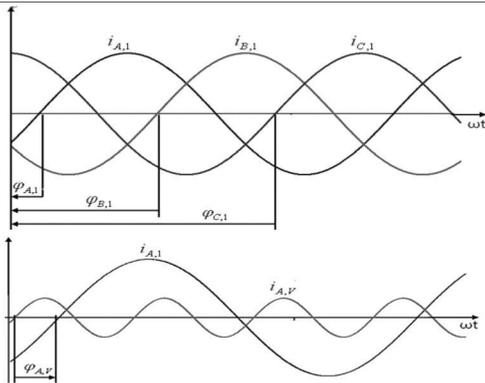


图 1 基波、谐波电流的相角

基波电流在时域表达式如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,1}(t) = \dot{i}_{A,1} \sin(\omega t + \varphi_{A,1}) \\ \dot{i}_{B,1}(t) = \dot{i}_{B,1} \sin(\omega t + \varphi_{B,1}) \\ \dot{i}_{C,1}(t) = \dot{i}_{C,1} \sin(\omega t + \varphi_{C,1}) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 可以写成式 (2) 的形式。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,1}(t) = \dot{i}_{A,1} \sin(\omega t + \varphi_{A,1}) \\ \dot{i}_{B,1}(t) = (\dot{i}_{A,1} + \Delta \dot{i}_{B,1}) \sin(\omega t + \varphi_{A,1} - 120^\circ + \Delta \varphi_{B,1}) \\ \dot{i}_{C,1}(t) = (\dot{i}_{A,1} + \Delta \dot{i}_{C,1}) \sin(\omega t + \varphi_{A,1} - 240^\circ + \Delta \varphi_{C,1}) \end{cases} \quad (2)$$

V 次谐波的时域表达式如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} \dot{i}_{A,V}(t) = \dot{i}_{A,V} \sin(V \cdot (\omega t + \varphi_{A,1}) + \varphi_{A,V}) \\ \dot{i}_{B,V}(t) = (\dot{i}_{A,V} + \Delta \dot{i}_{B,V}) \sin(V(\omega t + \varphi_{A,1} - 120^\circ + \Delta \varphi_{B,1}) + \varphi_{A,V} + \Delta \varphi_{B,V}) \\ \dot{i}_{C,V}(t) = (\dot{i}_{A,V} + \Delta \dot{i}_{C,V}) \sin(V(\omega t + \varphi_{A,1} - 240^\circ + \Delta \varphi_{C,1}) + \varphi_{A,V} + \Delta \varphi_{C,V}) \end{cases} \quad (3)$$

利用对称分量法,各相电流可以分解为正序、负序、零序分量,计算公式如式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{+,V} \\ \dot{i}_{-,V} \\ \dot{i}_{0,V} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_{A,V} \\ \dot{i}_{B,V} \\ \dot{i}_{C,V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $a = e^{j120^\circ}$ 。

当三相电流平衡,即 $\Delta \dot{i}_{B,V} = \Delta \dot{i}_{C,V} = 0, \Delta \varphi_{B,V} = \Delta \varphi_{C,V} = 0$ 时,由式 (3)、式 (4) 可得:当 $V=1, 4, 7, \dots$

时,电流只有正序分量;当 $V=2, 5, 8, \dots$ 时,电流只有负序分量;当 $V=3, 6, 9, \dots$ 时,电流只有零序分量。

三相电流不平衡,即 $\Delta \varphi_{B,V}, \Delta \varphi_{C,V} \neq 0$ 时,基波电流的相位差将对谐波电流的序分量产生较大影响。通过式 (3)、式 (4) 计算可得:当基波电流相角偏差 $\pm 5^\circ$ 时,3 次谐波中含有 16% 的正序分量和 14% 的负序分量,6 次谐波中含有 33% 的正序分量和 24% 的负序分量;当基波电流相角偏差 $\pm 20^\circ$ 时,6 次谐波的相角差为 120° ,此时的谐波电流是对称的,只含有正序分量。

由以上分析可知,电网接带不对称负荷时,3K 次谐波会含有正序分量和负序分量,其含有率随着基波电流相角差的变化而变化^[7]。当基波电流相角偏差到一定数值时,3K 次谐波中只含有正序分量或者负序分量,此时 3K 次谐波不受电网中变压器接线形式的影响,可在电网中任意流动^[8]。

2 电铁牵引负荷的谐波特点

2.1 电铁谐波的特性分析

电气化铁路是电力系统中典型的三相不对称谐波源,它与其他非线性负荷相比具有不同的负荷特性。电铁负荷产生的谐波具有的一些明显特点^[9-10]如下。

(1) 随机波动性:谐波电流随基波负荷剧烈波动,范围巨大。

(2) 相位分布广泛:谐波向量在复平面内四个象限上出现。

(3) 高压渗透性:电气化铁道牵引供电系统是为数不多的高压用户,其产生的电能污染可以通过高压系统向全网渗透,不受变压器接线方式的阻碍。

(4) 稳态奇次性:大量运行的交一直流型电力机车属于单相整流非线性负荷,在稳态运行时只产生奇次谐波。

(5) 暂态偶次性:电力机车在启动与过分区空载投入时会产生远高于额定电流的励磁涌流。励磁涌流不仅含有奇次谐波,还含有各偶次谐波,其中二次谐波含量最大。

电铁负荷产生的奇次谐波是其特征分量,偶次谐波畸变量相对较小,是非特征分量。谐波电流中以 3、5、7 次谐波为主,尤以 3 次谐波电流最大,严重时可达额定电流的 20% 以上。

2.2 电铁谐波的序量规律

电铁牵引负荷运行过程中稳态谐波的序量规律随着牵引变压器接线形式的不同而不同。对于 SCOTT 接线牵引变压器和阻抗匹配平衡牵引变压器,只要两个供电臂都有负荷,则这两种牵引变电所注入系统的谐波电流的序量规律为^[11]

4K + 1 次谐波 —— 主要是正序分量;

4K - 1 次谐波 —— 主要是负序分量;

这一规律也适用于 3 倍数的奇次谐波。

对于 YNd11 接线和 V/V 接线的牵引变压器,谐波电流的序量规律为

6K + 1 次谐波 —— 主要是正序分量;

6K - 1 次谐波 —— 主要是负序分量;

6K ± 3 次谐波 —— 正序分量和负序分量大致相等。

不论采用哪种接线形式的牵引变压器,电铁负荷产生的三相不平衡 3K 次谐波主要是正序分量和负序分量,不论变压器中性点是否接地或变压器是否有 Δ 绕组,3K 次谐波不受任何阻拦,在电网中随处流动。

3 电铁谐波对风电场的影响

与电力系统中水电、火电等常规电源相比,风电场的一个显著特点是大量风力发电机组并列运行。风能的能量密度较低,风电机组的单机容量相对较小,为了更加充分地利用风能,获得较大的发电容量,风电场由大量风电机组并列运行。经过对新疆部分已投运的风电场进行现场调研,异步风电机组在运行过程中向电网发出有功的同时还从系统中吸收大量的无功功率。为了维持风电场 PCC 点处的电压稳定,平衡系统无功功率,通常在风机出口处装设补偿电容器组。风电机组和补偿电容器组的投入和退出运行是同步的。由于风能的不确定性,风电机组(补偿电容器组)投入数量也是随机变化的,即风电场的等效阻抗变化范围较大,所以风电场升压站低压侧母线的谐振频率会随着风机投运数量的变化而变化。

目前国内普遍采用的是韶山系列电力机车,由于采用了大功率整流装置,这一系列的电力机车在运行过程中会产生大量的三相不平衡谐波,三相不平衡谐波不受风电场内变压器接线形式的限制,很容易注入风电场,对风电场中的变压器、风电机组及补偿电容

器组造成影响,如图 2 所示。

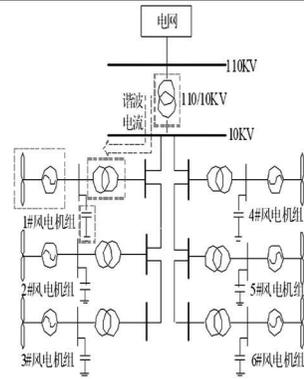


图 2 风电场结构示意图

(1)电铁谐波对风电场中变压器的影响:对于风电场中风机出口处的箱式变压器和风电场升压站主变压器,电铁谐波的注入会增加变压器的铜耗和铁耗,并随频率的增大而增大。谐波损耗产生的局部过热会降低变压器的绝缘寿命。当附加损耗达到一定值时,需要降低出力运行。若变压器绕组的电抗和电容器组发生串联谐振时,将产生谐波过电压,使局部放电增加,加速绝缘老化。严重时还会发生绝缘击穿事故^[12]。

(2)电铁谐波对风电机组的影响:电铁谐波注入风电场会造成风电机组的附加损耗、附加振动、噪声和谐波过电压^[13]。当风电机组中谐波电流的频率接近发电机零部件的固有振动频率时,可能引起风电机组的强烈机械振动。

(3)电铁谐波对风电场中补偿电容器组的影响:谐波会增加补偿电容器组的介质损耗,使温升增高,从而降低其寿命。电容器组有可能造成谐振或者谐波电流放大,造成电容器组的过电流跳闸或损坏^[14]。与其对应的风机将退出运行,造成风电场的出力不确定性增大。电气化铁路与风电场集中接入地区电网后,风电场的运行特性就受到风速和电铁牵引负荷的双重影响,加剧了风电出力的波动性和随机性。

4 仿真分析

新疆某地区电网如图 3 所示,新能源风电场、水利厅风电场、盐湖电铁牵引站均通过 110 kV 输电线路集中接入 220 kV 盐湖变电站。新能源风电场总装机 45 MW,共 30 台额定容量 1.5 MW 的双馈式风电机组;水利厅风电场总装机 33 MW,共 44 台额定容量 750 kW 定速异步风电机组。两风电场的升压站

主变压器均采用 YNd11 接线。盐湖牵引站采用 V/V 接线的牵引变压器,其供电的铁路段运行的是韶山 4 型电力机车。该电力机车采用相控调压方式,最大功率 6.4 MW。仿真时电铁牵引负荷的各次谐波电流含有率取自电铁相关试验得到的典型数据。

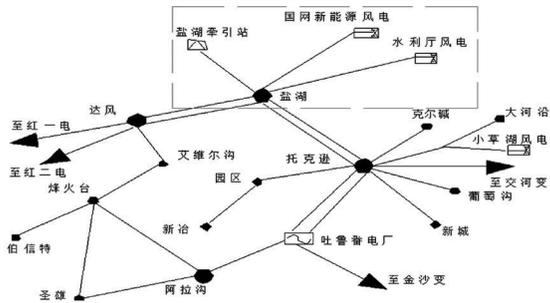


图 3 地区电网示意图

在电力系统仿真计算软件 DlgSILENT 中搭建该地区电网模型,分别对盐湖牵引站 a 供电臂接带一台满载的电力机车, b 供电臂空载,电力机车在稳态运行时和闭合主断路器及电力机车经过分区停时的暂态过程中产生的谐波对风电场运行特性的影响进行仿真分析。

4.1 电铁稳态谐波引起风电场内部谐振仿真

电铁牵引负荷在稳态运行过程中主要产生奇次三相不平衡谐波。仿真分析时对水利厅风电场升压站低压母线处进行 22 次频率扫描,每次扫描时比前一次多投运两台风电机组(补偿电容器组),得到的投运风机数量和风电场低压侧并联谐振频率的关系曲线如图 4 所示。

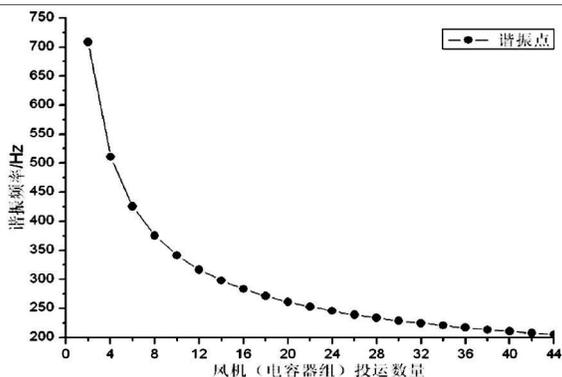


图 4 风电场升压站低压侧谐振点仿真曲线

由图 4 可以看出投运的风电机组(补偿电容器组)越多,谐振频率就越小。运行风电场有 22 台风电机组(补偿电容器组)运行,网侧分别接带谐波含量相同的三相对称负荷与电铁牵引负荷时,风电场升压站低压母线处各次谐波含有率的仿真计算结果如图 5、图 6 所示。

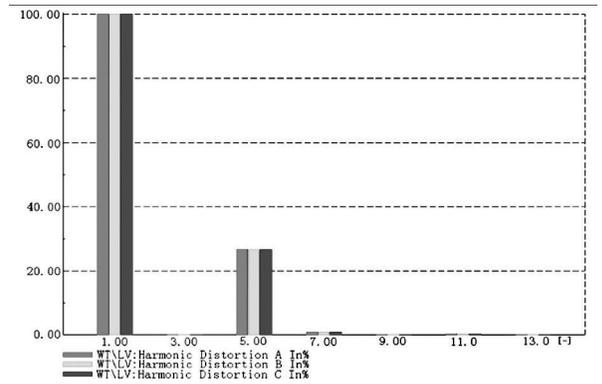


图 5 三相对称谐波注入升压站低压侧谐波含有率

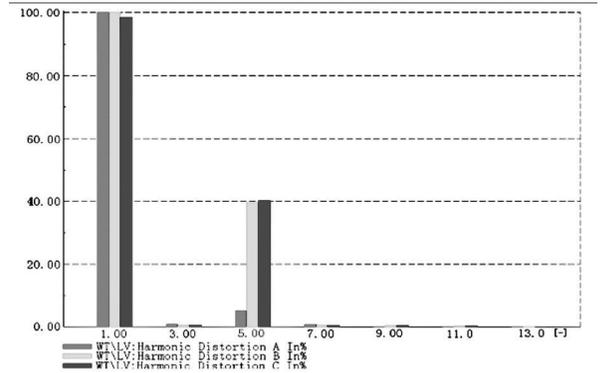


图 6 电铁谐波注入升压站低压侧谐波含有率

通过图 5 可以看出,当网侧接带与电铁负荷谐波含量相同的三相对称负荷时,风电场升压站低压母线处 3K 次谐波含有率为 0,这是因为三相平衡 3K 次谐波主要是零序分量,而风电场升压站采用 YNd11 接线的变压器,阻断了零序电流的流电路径,使网侧 3K 次谐波无法注入风电场。由于发生了频率为 250 Hz 的谐振,升压站低压侧 5 次谐波含有率约为 27%,基波和各次谐波电流均三相对称。由图 6 可以看出,当网侧接带电铁牵引负荷时,不平衡 3K 次谐波不受变压器接线形式的影响会注入风电场。谐振时 B、C 相 5 次谐波含有率约为 40%,远大于三相平衡 5 次谐波含有率。

4.2 电铁暂态谐波引起风电场内部谐振仿真

在电力机车的不同工作阶段中,谐波含量有时会有很大区别。在合主断路器及电力机车经过分区停时,由于机车主变压器磁通不能突变,发生励磁涌流现象。此时,根据主断路器合闸时刻电压初相角的不同,各次谐波的含量变化比较大,馈线电流波形关于横轴不对称,出现间断角且电流波形有尖顶,不仅产生奇次谐波还会产生偶次谐波^[15, 16]。偶次谐波含量相对较小,但注入风电场后如果引起谐振,就有可能造成补偿电容器组的跳闸和风机停运。当水利厅风电场有 14 台风电机组(电容器组)运行,电铁牵引负

荷主断路器合闸时,风电场升压站低压母线处谐波电压序分量值(pu)和各次谐波含有率仿真计算结果分别如图 7、图 8 所示。

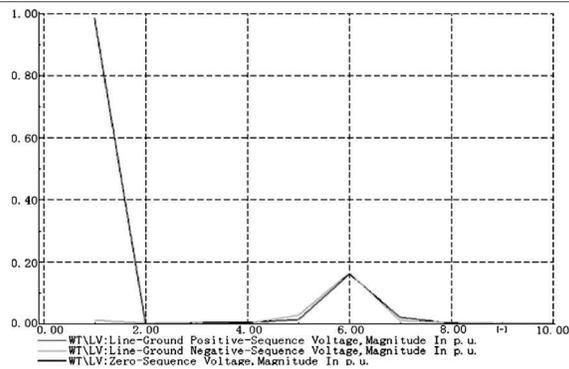


图 7 风电场升压站低压母线各次谐波电压序分量

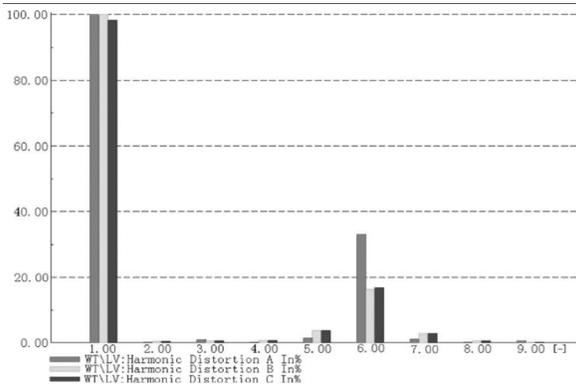


图 8 风电场升压站低压侧各次谐波含有率

由图 7、图 8 可以看出电力机车启动时升压站低压母线处发生了谐振,谐振频率约为 300 Hz,6 次谐波电压正序、负序分量近似相等,零序分量为零,A 相谐波含有率为 32.976%。风电场的谐振点较多且随机变化,在电力机车启动过程中产生的少量偶次谐波注入风电场有可能引发谐振,影响风电场运行特性。

5 结论

包含大量异步风力发电机组的风电场升压站低压侧谐振点频带较宽,谐振频率随着风电机组(补偿电容器组)投运数量的变化而变化。而电铁牵引负荷在不同的工作阶段中会产生谐波幅值、相角以及注入时刻是不确定的,这些谐波注入风电场后很可能引起谐振,造成风电机组跳闸,风电场出力波动。为减小电铁谐波对风电场运行特性的影响,一方面,可以采用在运行过程中产生谐波相对较少的新型电力机车,如动车组;另一方面,对于已投运的风电场应在电铁负荷接入系统后风电场重新进行谐波评估,必要时加装相应的补偿滤波装置;对于待建的风电场,应合理

设计电容器容量,可在串联电抗器上设置多个抽头,组成不同容量的并补装置,进行量化级排列组合调整^[17],也可采用 SVC、STATCOM 等无功补偿装置,或者安装已经实现有功、无功解耦控制的双馈式或者直驱式风电机组,尽量减小电铁谐波对风电场的影响。

参考文献

- [1] 周小涵. 电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究 [J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 41-43.
- [2] 贺建闽, 黄治清. 电气化铁路同次谐波电流叠加 [J]. 供用电, 2004, 15(8): 146-153.
- [3] 董祥, 李群湛. 适用于电气化铁路的无功谐波电流检测方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 32-35.
- [4] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-28.
- [5] 赵海翔, 张义斌. 用于计算风电机组并网运行引起全电网电压波动的电流源等效法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 77-80.
- [6] 黄守道. 风电机组并网问题研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(2): 17-22.
- [7] Klaus-Dieter Detmann and Steffen Schostan. Wind Turbine Harmonics Caused by Unbalanced Grid Currents [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 14(6).
- [8] 徐淑文, 栾兆文. 对电气化铁路所产生谐波的研究 [J]. 电力电容器, 2007, 28(3): 40-45.
- [9] 朱刘柱. 电气化铁路对电网电能质量的影响 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [10] 周逊泉. 电力牵引系统供电方式及其负荷对电能质量影响的分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [11] 于立珺. 电气化铁路导致电能质量问题的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [12] 高琳. 电铁谐波和负序对变压器保护影响的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [13] 李锋, 陆一川. 大规模风力发电对电力系统的影响 [J]. 中国电力, 2006, 39(11): 80-84.
- [14] 聂静静. 高速电气化铁路谐波的仿真计算与分析 [J]. 福建电力与电工, 2008, 28(1): 8-11.
- [15] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 13-16.
- [16] 熊丽霞. 浙赣电气化铁路牵引负荷特性分析 [J]. 江西电力, 2009, 33(2): 27-29.
- [17] 姚金雄, 张涛. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施 [J]. 电网技术, 2008, 32(9): 61-65.

(收稿日期: 2010-10-18)

山区超高压输电线路地线金具的磨损研究

唐波¹, 杨暘², 孟遂民¹

(1 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2 三峡大学机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对山区超高压输电线路地线金具磨损的现象, 列出地线金具磨损信息, 分析磨损原因, 列出现有解决方法, 并提出了一种耐磨金具改进方案, 供借鉴。

关键词: 输电线路; 地线金具; 磨损原因

Abstract: Aiming at the wearing phenomenon of ground wire hardware of EHV transmission lines in the mountainous areas, the wearing information of ground wire hardware is listed. The wearing reasons are analyzed, the existing solutions are presented, and an improvement scheme of antiwear ground wire hardware is proposed, which provides a reference for the similar engineering project.

Key words: transmission line; ground wire hardware; wearing reason

中图分类号: TM754 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0013-03

由于超高压输电线路输送距离往往较远, 不可避免的要经过众多复杂的地形, 因此对山区输电线路的监测维护任务往往更加艰巨。近年来某地所维护的山区 500 kV 输电线路在运行过程中, 相继发现架空地线悬垂线夹船体挂轴及直角环磨损的危急缺陷, 而这种问题在东北、华北、湖北、青海、福建等地区均有发现, 反映了超高压输电线路地线金具结构耐磨性能上尚存在一定的问题, 需要进一步改进和完善。下面首先列出了某地地线磨损统计情况, 分析了磨损的原因, 列出现有一些解决方法, 并提出了一种耐磨金具的改进方案, 供借鉴。

1 地线磨损数据

1.1 磨损百分比统计

通过某地统计的地线线夹磨损数据 (见表 1) 可知地线挂轴磨损其最大磨损处达到 70%, 而 U 型环

最大磨损处达到 53%, 都已经大大超过了悬垂线夹的安全裕度, 遇到恶劣气象时随时有发生断线夹掉线的可能, 而这类故障通常都是永久性的事故, 轻则造成跳闸停电, 重则可能烧断导线或避雷线, 严重威胁电网的安全。

1.2 磨损位置分布统计

地线金具组合一般要求可以沿顺线路和垂直线路方向灵活转动, 同时悬垂长度以越短越好。线路中易产生磨损的 XGU 型地线悬垂线夹由 U 形螺丝与直角环连接, 直角环与悬垂线夹挂板连接, 悬垂线夹挂板与悬垂线夹船体挂轴相连, 形成以 U 形螺丝、U 形直角环和线夹挂板为臂的上下 3 点绞接连接方式。经检查地线线夹金具的磨损点主要分布在以下 3 个地方, 具体分布位置如图 1 所示。

1.3 磨损位置地形统计

以上磨损严重地线线夹所处地形如表 2 所示, 同

表 1 某地地线线夹磨损情况统计表

| 名称 | 数值 | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 单位 /cm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 凸轴磨损量 /cm | 0.88 | 0.81 | 0.78 | 0.83 | 1.05 | 0.92 | 1.13 | 0.87 | 0.98 | 1.02 | 1.18 | 0.86 | 1.09 |
| 凸轴原直径 /cm | 1.60 | 1.59 | 1.59 | 1.58 | 1.72 | 1.72 | 1.68 | 1.72 | 1.71 | 1.68 | 1.69 | 1.71 | 1.68 |
| 磨损百分比 /% | 55 | 51 | 49 | 53 | 61 | 53 | 67 | 51 | 57 | 61 | 70 | 50 | 65 |
| U 型螺丝磨损量 /cm | 1.11 | 1.04 | 1.02 | 1.08 | 1.06 | 1.14 | 1.02 | 0.58 | 1.07 | 0.68 | 0.89 | 0.12 | 0.45 |
| U 型螺丝原径 /cm | 2.26 | 2.23 | 2.24 | 2.04 | 2.23 | 2.22 | 2.25 | 2.21 | 2.22 | 2.23 | 2.25 | 2.22 | 2.24 |
| 磨损百分比 /% | 49 | 47 | 46 | 53 | 48 | 51 | 45 | 26 | 48 | 30 | 40 | 5 | 20 |

基金项目: 宜昌市科学技术研究与开发项目 (A2010-302-09)

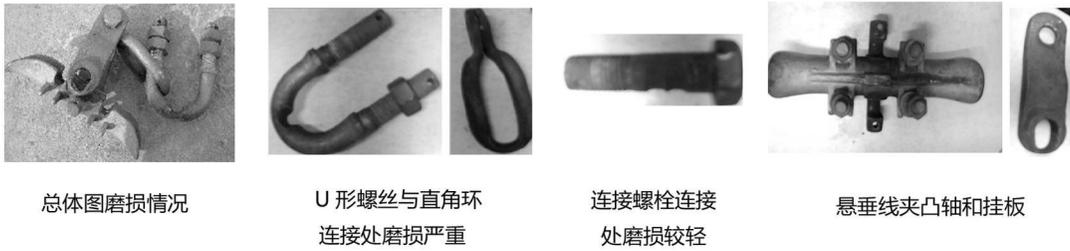


图 1 悬垂线夹挂板与船体挂轴间的磨损

时参考文献 [1] 中线夹磨损位置数据, 可发现如下规律: ①跨越山沟、跨峡谷地方易磨损; ②连续上下山段地线线夹易磨损; ③山顶地线线夹容易磨损; ④两侧档距悬殊的地线线夹易磨损; ⑤两侧高差悬殊地线线夹易磨损; ⑥受上拔力大的地线线夹易磨损。

表 2 某地地线线夹磨损地形统计表

| 磨损地形 | 跨越山沟 | 连续上坡 | 连续下坡 | 跨峡谷 | 山头 |
|--------|------|------|------|-----|----|
| 发生磨损次数 | 4 | 3 | 2 | 3 | 1 |

2 线夹磨损原因分析

输电线路在运行中, 不仅承受正常运行应力的作用, 而且还要承受由于振动引起的附加应力的作用。这个由振动引起的附加应力, 虽然比正常运行应力小得多, 但由于是频繁出现的交变弯曲应力, 长时间和周期性的振动, 将成地线及金具的疲劳损坏, 甚至断线事故。其中直角环与 U 型螺丝间的磨损主要是由于顺线路方向的偏转运动和横线路方向的风偏运动 (如表 3) 造成的; 直角环与悬垂线夹挂板之间的螺栓主要起中间连接作用, 运动幅度及频率要小很多, 因此接触位置磨损较轻; 悬垂线夹和船体挂轴之间主要受到顺线路方向的偏转运动造成磨损。表 3 列出了偏转角及风偏角的相应计算公式^[2], 从偏转角公式可以看出线夹两侧出口角度相差越大, 同等条件下线夹偏转角度越大, 运动磨损量也越大, 从风偏角公式可以看出水平档距越大, 垂直档距越小, 自重越小, 风压越大, 相同条件下风偏角越大, 磨损量也越大。

而引起地线金具偏转运动和风偏运动的成因较多, 主要体现在以下几个方面: ①环境原因。超高压架空输电线路多处于高山峻岭, 气候复杂, 其线路杆塔沿山谷沟壑走向, 档距大小不均, 大多为微气象区线路, 具有风速大、风向和风速变化频繁等特点。架空输电线路长年在大气中运行, 承受着风、昼夜温差、冰、雷电、雨等气象变化的影响, 主要引起架空线载荷和悬挂曲线长度发生变化, 使架空线的张力、弧垂随

之改变, 进而带动地线金具的频繁晃动, 使得地线金具产生磨损。②线路设计参数选择原因。导线选型、设计档距、悬挂高度、运行张力等都将影响线路的防振水平, 进而影响地线金具的磨损。③金具设计制造原因。金具材料一般采用铸铁和锻压钢, 连接处为干摩擦易磨损, 虽然表面有镀锌保护层, 倘若一旦镀锌层磨穿, 再加雨水的锈蚀, 会加速金具的磨损。

3 现有处理方法

线路长期运行实践表明, 现有的常规地线线夹总体上性能合理, 其机械性能、电气性能均能满足运行要求。但在某些地段却存在着严重磨损的情况, 针对这种情况, 国内主要解决方法有: ①采用耐磨金具系列产品, 这些金具耐磨主要是通过增大增粗外形尺寸的方法来延长使用寿命, 同时采用喷涂技术来提高金具的防腐性能, 但并没有改变干摩擦的本质, 并且以上统计的磨损金具中已经使用的是耐磨金具, 因此这种方法需要进一步改进。②采用双线夹布置形式^[3], 这种方法由于采用了两个线夹, 因此可以减少单个线夹挂轴的磨损, 但上面的 U 型螺丝连接处磨损并没有改善。③采用预绞丝线夹, 该线夹应力分布均匀、抗疲劳性强、使用寿命延长、电气性能良好, 是一种应用前景广泛的线夹, 国家“两型三新”也大力推广使用, 但该线夹的缺点对现有线路进行改造时高空安装不方便, 需要熟练工, 劳动强度大, 上端连接部分仍旧会磨损。④加装防振装置。减少金具运动进而减少磨损。⑤对金具使用润滑装置, 在金具连接位置添加 MoS₂ 锂基润滑脂^[4], 将干摩擦变为边界润滑, 可大幅降低金具磨损量, 但由于地线金具是敞开体系, 在自然界恶劣气象条件下润滑剂容易失效, 实际维护难度大。⑥对金具材料进行热处理, 有文献对挂板或挂轴进行碳氮共渗低温回火热处理^[4], 实验表明金具磨损量大幅减小, 这是一种可以尝试的方案。⑦将直线串改建为耐张串, 可解决线夹磨损问

表 3 偏转角及风偏角计算方法

| 编号 | 计算公式 | 附图 |
|-------------|---|----|
| 1 偏转角 计算 | $\beta = \arctan[(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)/2]$ $\theta_1, \theta_2 \text{ 为线夹出口角}$ $\beta \text{ 为线夹偏转角}$ | |
| 2 风偏角 计算 | $\varphi = \arctan \frac{P_d + P_j/2}{G_d + G_j/2} = \arctan \frac{\gamma_1 A l_h + P_j/2}{\gamma_1 A l_v + G_j/2}$ $\gamma_1, \gamma_2 \text{ 为导线的自重比载和风压比载}$ $l_h, l_v \text{ 为该基杆塔的水平档距和垂直档距}$ $A \text{ 为导线的截面积}$ | |

题,但需要对铁塔横担和塔头进行改造,成本较高。

4 提出改进方案

针对 XGU-3 型地线悬垂金具磨损情况 (如图 2),特提出以下改进方法。①针对磨损点 1,将 U 型螺丝与直角挂环的连接方式改为螺栓连接方式,增大接触面积,同时在螺栓连接处添加自润滑轴套减少金具间的磨损,这种轴套承载力高、耐高温、耐冲击、耐水蚀、自润滑能力强,不需要额外添加润滑剂,特别适合环境恶劣不宜维护的场所。同时为了满足以前 U 型螺丝与直角环可以同时进顺线路和横线路方向的运动,这里特别设计了类似十字挂轴的装置,使得改进型金具可以满足横线路和顺线路方向的运动,同时全部采用螺栓连接形式,方便添加自润滑轴套。②针对磨损点 2 因为直角挂环与挂板仅作为一个中间连接环节,磨损并不严重,这里只需添加自润滑轴套即可。③针对磨损点 3 将中心回转式线夹换为提包式线夹,使得线夹转动落后于地线的偏转,减少金具运动,同时在连接处添加自润滑轴套减少磨损。④参照相关文献,对金具材料进行碳氮共渗低温回火热处理来减少金具间的磨损。最终生成的改进型金具示意图如图 2 所示,并根据该图制成样品,在南京线路器材厂进行强度检测例行试验,结果表明该试件满足强度使用要求,但耐磨性能需要进行大量的耐磨试验来验证,同时外观结构尺寸可以进一步优化,本设计已申报国家实用新型专利。

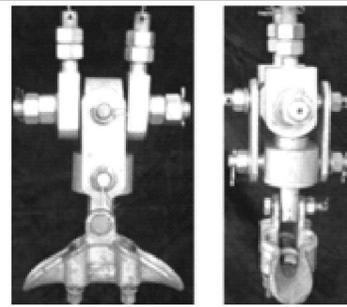


图 2 地线金具改进实物图

非常复杂,再加上中心回转式线夹在挂板与开口销间装有平垫片,地线金具悬挂点往往很高,使地线金具磨损故障往往很难发现,而这种故障一旦发生,将带来掉线的严重事故,因此需要引起超高压运行单位的高度重视,在年度大修中应加入对地线金具的检查项目,建立相应台账,加强对易磨损地区的检测维护工作^[5],及时发现及时处理,并积极开展耐磨金具的研究工作,提高超高压输电线路安全运行的可靠性。

参考文献

- [1] 张学哲,林立新,袁利红. 浅析山区输电线路悬垂线夹的磨损 [J]. 华北电力技术, 2000 (11): 29-31.
- [2] 孟遂民,孔伟. 架空输电线路设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 洪延风,楼晓岩. 500 kV 昌房紧凑型线路避雷线磨损的分析与处理 [J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 127-128.
- [4] 潘丹青. 500 kV 线路架空地线悬垂线夹磨损及预防措施的探讨 [J]. 东北电力技术, 1998(8): 12-19.
- [5] 陈启银. 悬垂线夹磨损引发的架空避雷线掉线及防范 [J]. 电力安全技术, 2004, 6(4): 32.

(收稿日期: 2010-09-25)

5 结 语

由于山区超高压输电线路所处的气象环境条件

带并联电抗器的超高压输电线路 单相故障性质识别新判据

戚琦, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了通过将间隔半个工频周期的恢复电压瞬时值相加消除工频分量,并应用 Prony 曲线拟合算法获取瞬时性故障时恢复电压自由衰减分量的幅值的方法。应用获得的自由衰减分量幅值区分故障类型。理论分析和仿真实验表明该判据具有较高的可靠性和灵敏度。

关键词:单相自适应重合闸;并联电抗器;超高压输电线路;Prony 曲线拟合

Abstract: According to the different periodicity of recovery voltage in permanent fault and transient fault a novel method to distinguish fault type is proposed. The method eliminates the system frequency component through adding the instantaneous value of recovery voltage at half a cycle interval firstly and then uses Prony fit method to obtain the amplitude of the free decay component of recovery voltage in transient fault. The obtained amplitude can be used to distinguish fault type. Theoretical analysis and simulation results show that the criterion has a higher reliability and sensitivity.

Key words: single-phase adaptive reclosure; shunt reactor; extra-high voltage transmission line; Prony fit

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0016-05

0 引言

自动重合闸技术因其消除瞬时性故障的能力,被广泛应用于输电线路,有效地提高了系统稳定性。然而,当发生永久性故障时,重合闸会导致系统再次受到故障的冲击,降低超高压系统的运行稳定性。为了避免重合闸于永久性故障,自适应重合闸技术被提出并得到了国内外学者大量的研究^[1-9]。

在中国 220 kV 以及以上的电压等级输电线路中,断路器通常都具有分相操作能力。为了提高供电连续性,在线路发生单相故障时,在系统允许范围内可两相运行一段时间。所以单相重合闸广泛应用于超高压线路。

自适应重合闸的核心是区分瞬时性故障和永久性故障。现有故障性质区分的原理大致可以分为基于恢复电压和基于故障电弧瞬时特性两大类。文献[6-9]应用小波或 ANN (artificial neural networks) 技术提取二次电弧电压判断故障特性,算法较复杂且由于故障电弧电压较小具有较强的随机性,在现场使用中的可信度有待验证。

为了限制工频过电压、补偿容性无功和抑制潜供

电流,高压线路通常装有并联电抗器。装有并联电抗器的高压输电线路,瞬时性单相短路故障时恢复电压具有拍频特性^[2];而永久性单相短路故障时恢复电压只含工频分量。应用恢复电压的拍频特性,文献[1]提出了通过积分滤除工频分量判断方法,数据窗与两分量的初相角有关,最短为一个工频周期;文献[3]提出的算法数据窗较长,约为半个拍频周期。文献[4]应用恢复电压工频分量和自由分量具有不同周期性的特点,消除工频分量,数据窗为 2 个工频周期。下面基于恢复电压工频分量和自由分量不同的周期,提出了新判断算法,算法应用 Prony 曲线拟合算法^[11-12]求取自由分量幅值,数据窗在一个工频周期内,且具有较强的抑制噪声能力,灵敏度高,可靠性强。

1 单相故障恢复电压特性

发生单相故障后,故障相断路器断开,健全相继续运行。由于健全相和故障相线路间存在静电耦合和电磁耦合现象,故障相线路上感应出恢复电压。

用 T 型集中参数线路等效分布参数线路,故障相电压分布如图 1 所示。

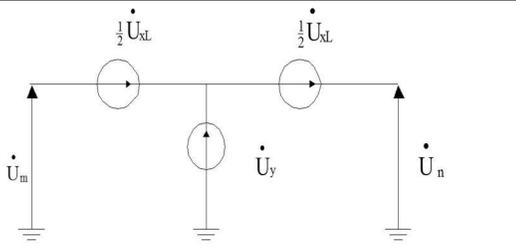


图 1 故障相恢复电压分布

其中, U_y 为静电耦合电压, U_y 与线路长度无关, 是对地电压; U_{kL} 为电磁耦合电压, 与线路长度成正比, 方向是沿导线方向。静电耦合电压和电磁耦合电压的计算方法在文献 [2] 中有详细的推导过程, 限于篇幅, 在此不做赘述。

在装有并联电抗器的超高压线路上, 发生单相瞬时性短路故障时, 潜供电弧彻底熄灭后, 由于线路储能元件能量释放不完全, 恢复电压除了工频分量外, 还包含一个自由衰减分量。发生瞬时性单相短路故障时, 恢复电压可用式 (1) 表示。

$$u_i(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 e^{-t/\tau} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (1)$$

式中, U_0 、 ω_0 、 Φ_0 和 U_1 、 ω_1 、 Φ_1 分别为工频电压分量和自由电压分量的幅值、角频率和初相角, τ 为自由分量衰减时间常数。自由分量的幅值 U_1 受开关动作和故障位置等因素的影响, 变化较大。大量现场试验表明自由分量幅值通常接近或高于工频分量 [2]。文献 [10] 中给出了自由分量衰减时间常数和自由分量频率的计算方法。计算和实测表明, 自由分量衰减时间常数通常在 1 s 左右, 自由振荡分量频率通常在 30 ~ 40 Hz 左右 [2]。

发生单相永久性接地短路时, 由于故障点一直存在, 线路上的储能元件能迅速释放, 所以永久性故障时恢复电压不含自由振荡分量 [3]。此外, 因为故障点一直存在, 线路对地电容能可靠放电, 所以静电耦合电压可以忽略。恢复电压由电磁耦合电压、故障位置和过渡电阻决定, 可用一个工频量表示。

2 新判据原理

发生瞬时性故障时, 故障相的恢复电压由工频分量和自由衰减分量组成。发生永久性故障时, 故障相的恢复电压仅包含工频分量。根据两种性质故障时, 恢复电压周期性不同的特点, 提出了区分两种性质故障的判据。

忽略自由分量衰减系数, 瞬时性故障时恢复电压瞬时值表达式为

$$u_i'(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (2)$$

式中, U_0 、 ω_0 、 Φ_0 和 U_1 、 ω_1 、 Φ_1 分别为恢复电压和工频分量和自由分量的幅值、角频率和初相角。

间隔一个工频周期的恢复电压差值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{i1}' &= u_i'(t) - u_i'(t + T_0) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad - U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 + \Phi_0) - U_1 \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \\ &= -2U_1 \sin(\omega_1 T_0 / 2) \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \omega_1 T_0 / 2 + \pi / 2) \quad (3) \end{aligned}$$

间隔 1/2 工频周期的恢复电压和值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{i2}' &= u_i'(t) + u_i'(t + T_0 / 2) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad + U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 / 2 + \Phi_0) + U_1 \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 / 2 + \Phi_1) \\ &= 2U_1 \cos(\omega_1 T_0 / 4) \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \omega_1 T_0 / 4) \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $\Delta u_{i1}'$ 和 $\Delta u_{i2}'$ 均为正弦量, 幅值分别为 $2U_1 |\sin(\omega_1 T_0 / 2)|$ 和 $2U_1 |\cos(\omega_1 T_0 / 4)|$, 角频率均为 ω_1 。当 $\omega_1 \neq \omega_0$ 时, $\Delta u_{i1}'$ 和 $\Delta u_{i2}'$ 的幅值均不等于 0。

根据以上分析可知, $\Delta u_{i1}'$ 或 $\Delta u_{i2}'$ 的值是否为 0 可以作为区分瞬时性故障和永久性故障的判据。

3 新判据提出

理论上, 可用特征量的绝对值 $|\Delta u_{i1}'|$ 或 $|\Delta u_{i2}'|$ 的瞬时值作为区分故障性质的判据。以设定采用频率计算特征量, 当特征量的瞬时值大于整定值时, 就判定故障为瞬时性故障。瞬时性故障的特征量是以 $T_1 / 2$ 为周期的周期函数, 所以若 $|\Delta u_{i1}'|$ 作为判断量, 判断最长时间为 $T_0 + T_1 / 2$ 用 $|\Delta u_{i2}'|$ 作为判断量, 则判断最长时间为 $T_0 / 2 + T_1 / 2$ 。但该判据是通过单个时刻的特征量值为依据, 可靠性不足。

文献 [1] 用积分法获得的判据量, 可以理解为是文中 $|\Delta u_{i2}'|$ 一个工频周期的算术平均值。用算术平均值作判断量不及用最大值作判断量灵敏度高。

下面拟用曲线拟合法获取特征量幅值, 用特征值幅值作为判断量。曲线拟合法利用了一段时间的特征量信息, 可抑制噪声信号的影响, 有较高的可靠性。

上一节的分析中, 忽略了瞬时性故障时恢复电压自由分量的时间衰减因子。为了找到最适合的曲线拟合法, 下面用包含时间衰减因子的恢复电压进行分析。

间隔一个工频周期的恢复电压差值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{t_1} &= u_t(t) - u_t(t + T_0) \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \Phi_0) + U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \\ &\quad - U_0 \sin(\omega_0 t + \omega_0 T_0 + \Phi_0) - U_1 e^{-\frac{t+T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\sin(\omega_1 t + \Phi_1) - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \omega_1 T_0 + \Phi_1) \right] \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \sin(\omega_1 t + \Phi_1) - \left[e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \cos(\omega_1 T_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 t + \Phi_1) \sin(\omega_1 T_0) \right] \right\} \\ &= U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \left[1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0) \right] \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \right. \\ &\quad \left. - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 T_0) \cos(\omega_1 t + \Phi_1) \right\} \\ &= U_1 \sqrt{\left[1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0) \right]^2 + \left[e^{-\frac{T_0}{\tau}} \sin(\omega_1 T_0) \right]^2} \\ &\quad \times e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \\ &= U_1 \sqrt{1 + e^{-\frac{2T_0}{\tau}} - 2e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\psi = -\arctan \left[\frac{e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)}{1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0)} \right] \quad (6)$$

同理可推导出间隔 1/2 工频周期的恢复电压和值为

$$\begin{aligned} \Delta u_{t_2} &= u_t(t) + u_t(t + T_0 / 2) \\ &= U_1 \sqrt{1 + e^{-\frac{2T_0}{\tau}} + 2e^{-\frac{T_0}{\tau}} \cos(\omega_1 T_0 / 2)} \\ &\quad \times e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \Phi_1 + \psi) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,

$$\psi = \arctan \left[\frac{e^{-\frac{T_0}{2\tau}} \sin(\omega_1 T_0 / 2)}{1 + e^{-\frac{T_0}{2\tau}} \cos(\omega_1 T_0 / 2)} \right] \quad (8)$$

可见 Δu_{t_1} 和 Δu_{t_2} 均是含有衰减因子的正弦量。

综合比较各种曲线拟合算法,发现用 Prony 算法拟合包含衰减因子的正弦量模型,能在较短的时间内得到较精确的上述特征量幅值。

4 Prony 曲线拟合算法简介

Prony 曲线拟合算法用一组含衰减因子的余弦量拟合信号数据。设信号 $x(n)$ 的 P 阶 Prony 模型如下式所示。

$$x(n) = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (9)$$

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (10)$$

$$z_i = \exp[(\delta_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (11)$$

其中, A_i 为幅值; θ_i 为初相位; δ_i 为衰减因子; f_i 为频率; Δt 为采样间隔。

Prony 模型参数计算分为两步,首先计算衰减因子和频率,再计算幅值和初相位。

(1) 计算衰减因子和频率

用信号采样值,构造如下方程组。

$$\begin{bmatrix} x(p-1) & x(p-2) & \dots & x(0) \\ x(p-0) & x(p-1) & \dots & x(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(N-2) & x(N-3) & \dots & x(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(p+0) \\ x(p+1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

当 $N > 2p$ 时,该线性方程组的解取最小二乘解。用该线性方程组的解 $[a_1, a_2, \dots, a_p]^T$ 构建多项式方程得

$$z^p - (a_1 z^{p-1} + a_2 z^{p-2} + \dots + a_p) = 0 \quad (13)$$

将该多项式方程在复数域的解代入式 (14) 可以计算出 Prony 模型中的衰减因子和频率。

$$\begin{cases} \delta_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \frac{\arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)]}{2\pi \Delta t} \end{cases} \quad (14)$$

(2) 计算幅值和初相位

用步骤 (1) 的多项式方程的解和采用数据构造如下方程组。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z & z & \dots & z \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z^{N-1} & z^{N-1} & \dots & z^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

当 $N > 2p$ 时,该线性方程组的解取最小二乘解。将该方程组在复数域的解代入式 (16) 可以计算出 Prony 模型中的幅值和初相位。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)] \end{cases} \quad (16)$$

由上节推导可知,特征量 Δu_{t_1} 和 Δu_{t_2} 可以用一阶 Prony 模型拟合。为了抑制信号中的噪声,提高计算精度,实际应用中数据采样频率不应低于 1 kHz,采样数据窗设为一个工频周期。数据采样频率越高,计算结果可靠性越高。

5 判据灵敏性分析

瞬时性故障特征量 Δu_1 和 Δu_2 的幅值都是自由分量频率 f 和衰减时间常数 τ 的函数。为了便于分析,取衰减时间常数 τ 为定值 1 s 。当 $0 < f < f_1$ 时, u_1 的幅值大于 0, 且以近似正弦规律变化。设 u_1 的幅值为 $k_1 U_1$, u_2 的幅值为 $k_2 U_1$ 。 k_1 和 k_2 随 f 变化的曲线如图 2 所示。

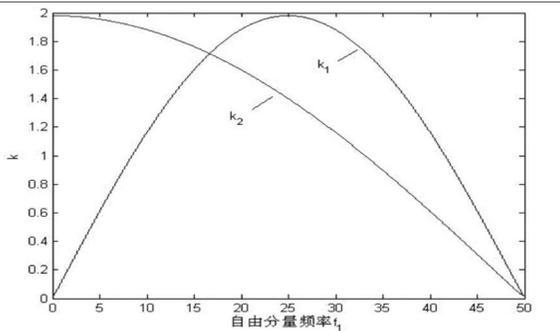


图 2 k 随自由分量频率变化的曲线

当 $25\text{ Hz} < f < 50\text{ Hz}$ 时, Δu_1 和 Δu_2 单调递减。当 $f = 49\text{ Hz}$ 时, $k_1 = 0.1259$ 。当 $0 < f < 50\text{ Hz}$ 时, Δu_1 单调递减。当 $f = 49\text{ Hz}$ 时, $k_2 = 0.0653$ 。当 $25\text{ Hz} < f < 50\text{ Hz}$ 时, k_1 和 k_2 相差不大, 都有足够的灵敏度。由于获取 Δu_2 幅值的数据窗较 Δu_1 短 $T_0/2$, 所以选择 Δu_2 的幅值作为判断量。

6 整定计算与故障性质判断流程

实验和计算表明瞬时性故障时恢复电压自由分量的频率在 $30 \sim 40\text{ Hz}$ ^[2], 所以整定值可以用频率为 49 Hz 时 k_2 的值计算。整定值计算表达式为

$$U_{DZ} = k_2 \times U_1 \quad (17)$$

式中, U_1 为最大负荷条件下两相运行时故障相恢复电压的工频分量幅值。

该判据必须用于二次电弧熄灭后。为了提高判据可靠性,判断流程中通过连续两次的采样数据计算结果判断故障性质。具体判断流程如图 3 所示。

7 实例系统仿真和结果分析

7.1 仿真模型参数

为了验证以上判据的有效性,应用 Matlab/Simulink 对重庆市万县至龙泉 500 kV 输电系统^[3]进行了

仿真。模型如图 4 所示。输电系统参数如下。M 端系统: $X_{m1} = 49.34\ \Omega$, $X_{m0} = 41.34\ \Omega$ 。N 端系统: $X_{n1} = 46.03\ \Omega$, $X_{n0} = 103.36\ \Omega$ 。输电线路参数: $R_1 = 0.0195\ \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1675\ \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9134\ \text{mH}/\text{km}$, $L_0 = 2.719\ \text{mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.014\ \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.00834\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。并联电抗器电抗 $X_L = 1680.56\ \Omega$ 。中性点电抗 $X_N = 434\ \Omega$ 。

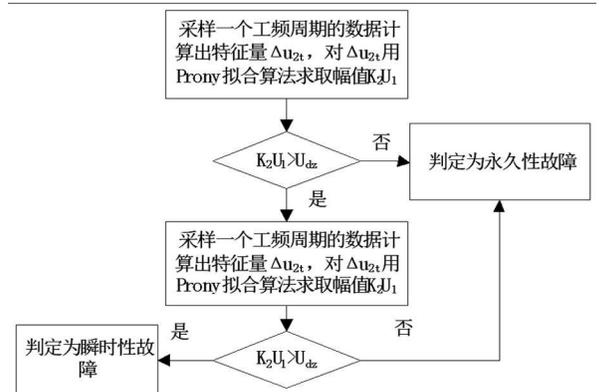


图 3 故障性质判断流程



图 4 500 kV 输电系统

7.2 仿真结果及分析

针对图 4 系统,分别对在线路不同位置和不同过渡电阻发生单相短路永久性故障和发生瞬时性故障进行了大量的仿真。表 1 列出了部分仿真结果数据。数据表明,当发生永久性故障时,应由所提出算法连

表 1 仿真结果

| 故障位置 / % | 过渡电阻 / Ω | 第一次计算 Δu_2 幅值 | 第二次计算 Δu_2 幅值 | 整定值 / kV | 故障性质判断结果 |
|----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
| 20 | 0 | 0.216 3 | 0.212 5 | 3.983 3 | 永久 |
| | 100 | 0.011 6 | 0.011 4 | 3.983 3 | 永久 |
| | 200 | 0.006 2 | 0.006 1 | 3.983 3 | 永久 |
| | 500 | 0.000 1 | 0.000 1 | 3.983 3 | 永久 |
| | 瞬时 | 11.326 3 | 11.143 2 | 3.983 3 | 瞬时 |
| | 50 | 0 | 0.184 4 | 0.177 5 | 3.983 3 |
| 100 | | 0.000 3 | 0.000 3 | 3.983 3 | 永久 |
| 200 | | 0.000 2 | 0.000 2 | 3.983 3 | 永久 |
| 500 | | 0.000 1 | 0.000 1 | 3.983 3 | 永久 |
| 瞬时 | | 11.613 7 | 11.516 3 | 3.983 3 | 瞬时 |
| 70 | | 0 | 0.175 7 | 0.168 2 | 3.983 3 |
| | 100 | 0.000 1 | 0.000 1 | 3.983 3 | 永久 |
| | 200 | 0.000 1 | 0.000 1 | 3.983 3 | 永久 |
| | 500 | 0.000 1 | 0.000 1 | 3.983 3 | 永久 |
| | 瞬时 | 11.428 3 | 11.343 5 | 3.983 3 | 瞬时 |

续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均远小于整定值;而当发生瞬时性故障时,连续两次计算得到的 Δu_{t_i} 的幅值均大于整定值。根据判断流程,故算法可以可靠地判断故障性质。

8 结 论

根据带并联电抗器的超高压输电线路发生瞬时性和永久性单相短路故障时,故障相恢复电压周期性不同特点,提出了提取瞬时性故障时恢复电压自由分量的算法,并应用 Prony 曲线拟合算法在短数据窗内获取自由分量的幅值,作为判断故障性质的依据。该判据具有简单、数据窗短、灵敏度高和基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响的优点。

参考文献

[1] 曹芬,何奔腾.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法[J].电力系统自动化,2009,33(23):55-59.

[2] 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,2007.

[3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.

[4] 刘浩芳,王增平,徐岩,等.带并联电抗器的超特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J].电网

技术,2006,30(18):30-34.

[5] Ge Yaosheng Sui Fonghai Xiao Yuan Prediction Methods for Preventing Single-phase Reclosing on Permanent Fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[6] Fitton D S, W Dunn R, Aggarwal R K, et al. Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines Using Artificial Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 748-756.

[7] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, et al. Neural-network Based Adaptive Autoreclosure Technique for EHV Transmission systems [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 155-160.

[8] 蔡超豪.基于小波分析的自适应重合闸[J].继电器,1999,27(2):21-23.

[9] 成敬周,张举.基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J].继电器,2005,33(7):21-25,49.

[10] 舒亮,贾磊,郑士普,等.超高压线路潜供电弧电压的频率特性分析.西安交通大学学报,2007,41(6):712-716

[11] J F Hauer C J Demeure L L Scharf Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1990, 5(1): 80-89.

[12] 伍凌云,李兴源,孙衢,等.基于 Prony 辨识的复杂交直流系统次同步振荡特性分析[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(3):155-160.

(收稿日期:2010-09-15)

(上接第 7 页)

根据唯一稳态消谐法基本思想,利用向量比较原理,分析了消除中性点接地电力系统的铁磁谐振的参数条件,得到了相应的消谐条件。同时通过数值模拟进行验证,表明结果正确,同时也说明唯一稳态消谐法的有效性。

参考文献

[1] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.

[2] 张纬敏,高玉明.电力系统过电压与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,1988.

[3] 郑盛琼,陈维贤,鲁铁成.110~220 kV 变电所中互感器引起的铁磁谐振及吸能消谐[J].高压电器,1996,18(6):26-30.

[4] T. Henriksen How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models [J]. IEEE Trans

on Power Delivery, 2002, 17(2): 516-522.

[5] 李兴斌,王晨新.断路器均压电容引起的铁磁谐振分析[J].东北电力技术,1994,24(9):39-43.

[6] 贾红琴.电磁式 PT 所致铁磁谐振过电压分析及抑制[J].高电压技术,2000,43(1):69-70.

[7] 石峰.110~220 kV 变电站空母线铁磁谐振的分析[J].湖南电力,2001,15(1):14-16.

[8] Yunge Li Wei Shi A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-grounded Substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1009-1014.

[9] 冯平,王尔智.中性点接地电力系统三相铁磁谐振理论分析[J].电工技术学报,2004,23(4):35-39.

[10] 尤秉礼.常微分方程补充教程[M].北京:人民教育出版社,1981.

[11] 冯平.一种混沌分析与抑制方法及其在电力系统铁磁谐振中的应用[D].沈阳:沈阳工业大学博士论文,2010.

[12] 杨开宇.矩阵分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

(收稿日期:2010-10-12)

地区电网孤网运行的高频控制研究

胡仁祥¹, 晁勤¹, 焦莉², 常喜强³, 姚秀萍³

(1. 新疆大学, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 陕西省电力公司, 陕西 西安 710004;

3. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:针对新疆电网阿勒泰地区系统发生与主系统解列后产生的高频问题,进行了地区电网频率动态过程的仿真研究,对该地区的高频切机方案进行了分析。计算结果表明:不同的切机方式对地区电网的频率恢复影响很大。该结果可为电力相关部门在针对此类事故时,提供可靠依据。

关键词:电力系统;频率稳定;切机方式

Abstract: Aiming at the high-frequency problem after the power grid of Altay region splitting off from the main power grid of Xinjiang, the dynamic process simulation of frequency for regional power grid is carried out and the high-frequency tripping approaches are analyzed. The calculation results show that the different tripping methods have a great influence on frequency recovery in regional power grid. The results can provide a reference for the relevant department in response to such accidents.

Key words: power system; frequency stability; tripping approach

中图分类号: 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0021-03

0 引言

频率是电力系统的重要参数,也是衡量电能质量的主要指标之一^[9]。当电力系统受到大机组跳闸、联络线跳线或者大容量负荷投切等扰动时,由于系统有功功率平衡遭到破坏,将引起系统频率发生变化继而发生频率动态过程。当系统频率变化较大时,将会给电力系统带来明显的不利影响,甚至导致频率稳定破坏事故的发生。所以《电力工业技术管理法规》中规定频率允许偏差范围在 0.2~0.5 Hz 之间。

地区电力系统频率动态过程分析是研究从主系统解列后孤立系统的运行、高频切机、低频减载方案的设计与评价及各种调频调压措施的作用等工作的基础^[12]。2010 年 10 月哈安双回 750 kV 交流的投运,新疆电网将与西北电网联网运行,构成西电东送的网络结构。随着阿勒泰地区大规模风电接入电网,若此时风电与水电同时大发,阿勒泰地区电网也将向新疆主网输送功率。但阿勒泰地区电网与新疆核心电网联系薄弱,仅经过一回单回 220 kV 线路联络。送电通道一旦出现交流解列,阿勒泰电网剩余功率较大,将会引起阿勒泰电网高频问题。因此阿勒泰电网的安全稳定问题和控制问题变得越来越重要。

下面重点讨论了新疆电网阿勒泰地区中风电与水电大发,同时向新疆主网输送 100 MW 和 50 MW 时,阿勒泰电网与新疆主网发生解列,研究不同的切机方式对稳定阿勒泰电网的频率影响。

1 电力系统功率频率特性^[9]

电力系统功率频率特性是指系统有功功率不平衡时频率的变化特性,它是负荷频率特性、发电机频率特性以及电压影响的综合结果。通常将其分为功率频率静态特性和功率频率动态特性,分别描述有功功率变化之后频率的状态和变化过程。其中功率频率静态特性是指稳态下系统的有功功率和频率的关系,主要取决于负荷和机组的功率频率静态特性;功率频率动态特性是指电力系统受扰动后,系统由于有功功率平衡遭到破坏所引起系统频率发生变化,频率从正常状态过渡到另一个稳定值所经历的时间过程。

2 阿勒泰电网介绍

阿勒泰地区电网通过 220 kV 克齐线或 110 kV 福和线与新疆主电网联络运行。最高运行电压等级 220 kV,形成以北屯为中心东至青河县,南至福海县,西至哈巴河县、吉木乃县,覆盖了全地区六县一市,

110 kV 线路供电半径达 240 km 的电网。阿勒泰地区电网公司所属发电厂总装机容量为 608.2 MW, 其中火电 12 MW、水电 299.2 MW、风电 297 MW。

阿勒泰电网示意图见图 1。

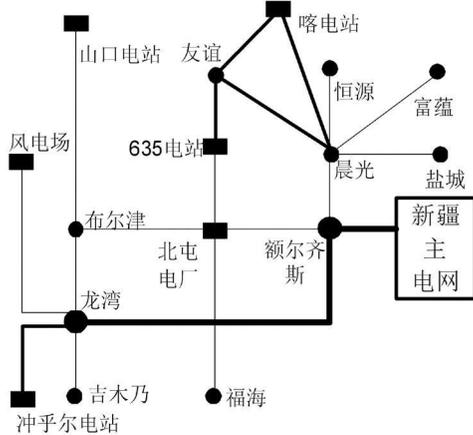


图 1 阿勒泰电网地理接线示意图

3 阿勒泰电网孤网高频切机方式

新疆电网阿勒泰地区中风电与水电大发, 同时向新疆主网输送 100 MW 和 50 MW 时, 阿勒泰电网与新疆主网发生解列, 产生高频问题。针对此高频问题列出以下 4 种切机方式。

- 方式一: 切相等容量的风电。
- 方式二: 切相等容量的水电。
- 方式三: 切相等容量时, 风电和水电各一半。
- 方式四: 切风电、水电和火电机组。

故障仿真设置: 1.0 s 克齐线的额尔齐斯侧发生三相永久短路, 1.12 s 切除克齐线。同时, 在故障发生后, 延时 0.3 s 切除相等容量机组出力。

3.1 阿勒泰电网外送 100 MW

只考虑负荷特性情况下, 不同的切机方式对阿勒泰电网频率与额尔齐斯电压变化如图 2 与图 3 所示。

从图 2 可以看出, 4 种切机方式均能将电网的频率恢复到其允许偏差范围之内。但从图中也可以看出, 切水电机组时, 产生的冲击频率最大, 而后频率一直稳定在 50.78 Hz; 切风电与水电机组时, 产生的冲击频率其次, 但频率一直处于下降的趋势; 切风电、水电与火电机组时, 频率变化幅度小, 而且能较快稳定; 只有当切风电机组时, 产生冲击频率最低, 而且能最快的将频率稳定到 50.02 Hz。对于外送 100 MW 来说, 孤网时是最佳的切机方案。

从图 3 可知, 4 种切机方式也均能将额尔齐斯

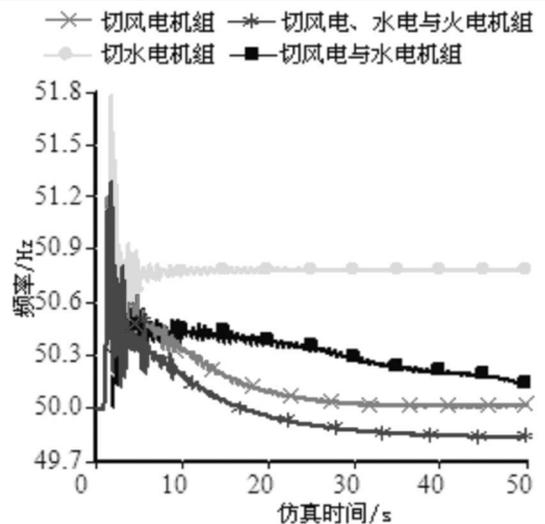


图 2 切出 100 MW 时阿勒泰电网频率

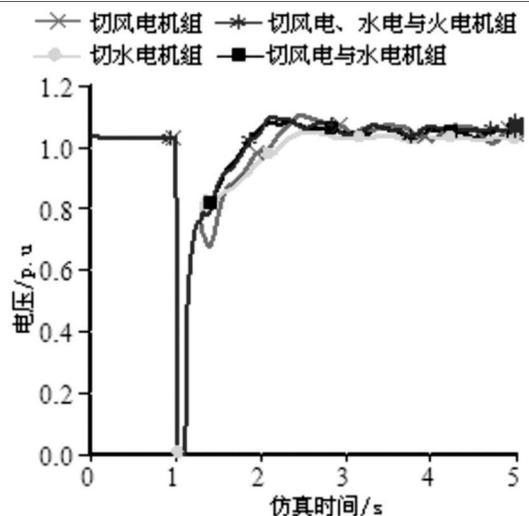


图 3 切出 100 MW 时额尔齐斯电压

的电压快速恢复到其允许偏差范围之内。具体数据如表 1 所示。

表 1 频率与电压具体数据

| 切机方式 | 频率 / Hz | | 电压恢复到 1.0 p.u 用时 / s |
|------|---------|-------|-------------------------|
| | 最高 | 恢复 | |
| 一 | 51.38 | 50.02 | 2.12 |
| 二 | 51.77 | 50.78 | 2.24 |
| 三 | 51.41 | 50.14 | 1.80 |
| 四 | 51.36 | 49.84 | 1.82 |

从图 2 知, 当只考虑负荷特性时, 切风电机组时, 频率恢复得最快, 也是最平稳的。故以切风电机组为例将火电与水电发电机的调速器也考虑进来, 仿真结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 只要考虑发电机的调速器时, 阿勒泰电网的频率就呈现振荡, 而且振荡是发散的。而当不考虑负荷特性和只考虑负荷特性时, 电网的频率都能快速稳定下来。从图可知, 考虑负荷特性

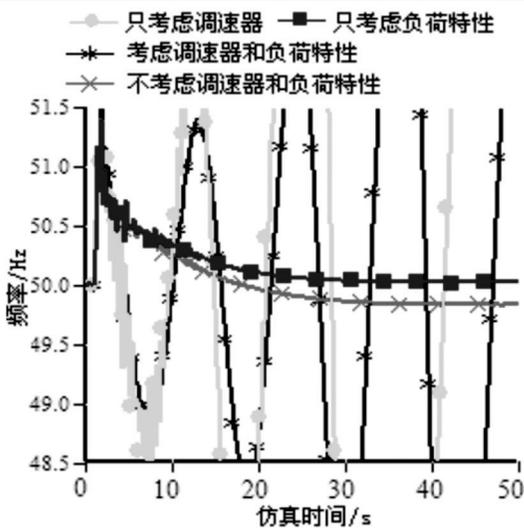


图 4 切出 100 MW 时阿勒泰电网频率

比不考虑负荷特性电网频率恢复得更好,更接近电网额定频率。

3.2 阿勒泰电网外送 50 MW

只考虑负荷特性情况下,不同的切机方式对阿勒泰电网频率与额尔斯齐电压变化如图 5 与图 6 所示。

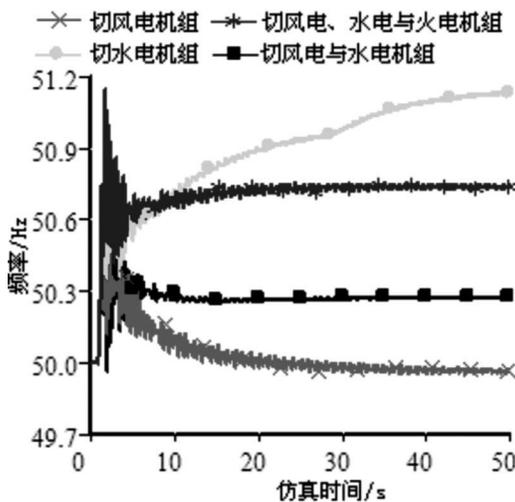


图 5 切出 50 MW 时阿勒泰电网频率

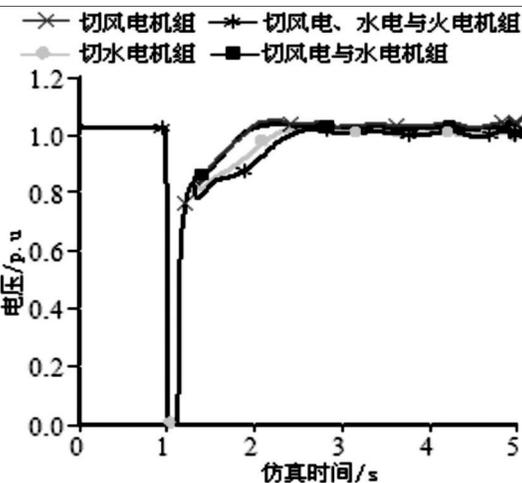


图 6 切出 50 MW 时额尔齐斯电压

从图 5 可知,当切水电机组时,电网的频率一直处于快速上升,最终频率不可控。而其余 3 种切机方式,电网的频率都能快速地稳定在电网规定的频率范围以内。但从 3 种切机方式的比较结果可以得出,切风电机组时,频率恢复后,最接近额定频率。

从图 6 还可以看出,切风电机组时,电压恢复得也是最快,只用了 1.87 s 电压就恢复到基准值。具体数据如表 2 所示。

表 2 频率与电压具体数据

| 切机方式 | 频率 / Hz | | 电压恢复到 1.0 pu 用时 / s |
|------|---------|-------|---------------------|
| | 最高 | 恢复 | |
| 一 | 50.89 | 49.96 | 1.87 |
| 二 | 51.13 | 51.12 | 2.24 |
| 三 | 51.02 | 50.27 | 1.88 |
| 四 | 51.15 | 50.73 | 3.94 |

从图 5 知,当只考虑负荷特性时,切风电机组时,频率能快速恢复到最接近电网额定频率。所以又以切风电机组为例将火电与水电发电机的调速器也考虑进来,仿真结果如图 7 所示。

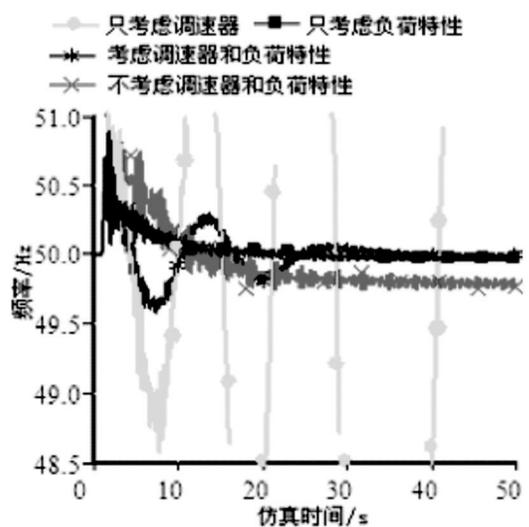


图 7 切出 50 MW 时阿勒泰电网频率

从图 7 中可以看出,当只考虑调速器时,电网的频率振荡最厉害,而且是快速地发散振荡,最终可导致阿勒泰电网频率崩溃。当考虑调速器和负荷特性后,电网频率会在前 30 s 发生大幅度振荡,而后才稳定下来。而当两者皆不考虑时,频率会在前 30 s 发生小幅度振荡,而后频率稳定在电网额定频率以下。当只考虑负荷特性时,电网的频率恢复得最好,最接近电网的额定频率。

3.3 小结

(1) 从外送 100 MW 和外送 50 MW 阿勒泰电网 (下转第 51 页)

Web 实现技术,效率较高,这一点正符合了考试系统所要求的实时性,ASP 自身的安全性,再加上实现模式的特点,完全能够达到考试系统的稳定性。

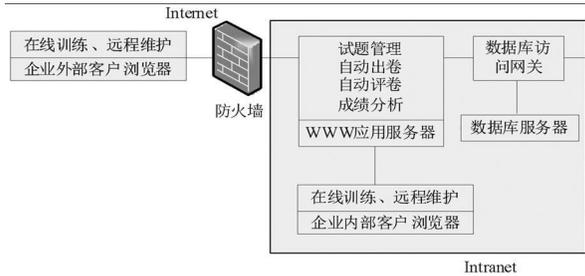


图 1 在线培训系统的结构

一个基于网络的职业技能鉴定网上训练系统,实现了企业员工的在线培训、测试等应用与管理的数据化,包括各模块设计,模块流程、数据库的建立、代码与算法设计。根据本系统业务分析,实现用于企业各类考试信息发布的信息中心子系统,用于员工的训练和自我测试的考试子系统,用于员工个人信息等登记、查看、账号密码修改的个人信息子系统,用于管理员对系统内数据的分析、查看、资料更新等工作后台管理子系统。

5 结 语

电力职业技能鉴定网上训练系统正是结合当前电力企业实际,旨在探索一种以互联网为基础的需求

(上接第 23 页)

发生孤网后的高频切机仿真计算可以看出,当只考虑负荷特性时,切风电机组时,电网的频率恢复最快,也最接近电网的额定频率。

(2)影响切机方式的因素:①外送功率(联络线上的功率);②水电、火电与风电机组,不同的组合切机;③是否考虑发电机调速器;④是否考虑负荷特性。

4 结 语

针对新疆电网阿勒泰地区在外送电能时,发生解列故障,使阿勒泰电网变成孤网后的高频问题,通过仿真计算出最佳的切机方式来稳定该地区的频率和电压,为以后相关部门的工作提出一点借鉴。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全

性培训模式。通过这种新的模式,使生产岗位员工可以不受时间、空间、地域限制,随时、随地通过网络完成培训任务,都能得到同等的培训机会,在不影响企业生产的情况下,进行低成本的专业提升学习。

参考文献

[1] 靳向阳.《SQL 语言艺术》[M].北京:电子工业出版社,2008.

[2] 美 Michael Otey Denielle Otey Microsoft SQL Server 2005 开发指南[M].北京:清华大学出版社,2007.

[3] 朱德利. Microsoft SQL Server 2005 数据库管理与应用高手修炼指南[M].北京:电子工业出版社,2007.

[4] 程志,桂占吉. Web 挖掘的方法及教育应用[J]. 中国电化教育,2006(7):98-101.

[5] 彭四明,王明,柳祥云.数据挖掘技术在互联网时代的应用[J]. 广东自动化与信息工程,2001(4):52-55.

[6] 谢希仁.计算机网络(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2001.

[7] 萨师煊,王珊.数据库系统概论[M].北京:高等教育出版社,2001.

[8] 梁毅,李玲.技能鉴定题库的使用与实践[J]. 中国电力教育,2007(S2):423-424.

[9] 刘宏.加快推进电力行业职业技能鉴定工作[J]. 中国电力企业管理,2000(4):41-42.

(收稿日期:2010-11-23)

稳定导则[M].北京:中国电力出版社,2001.

[2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则[M].北京:中国电力出版社,2000.

[3] 徐衍会,贺仁睦,孔祥云,等.调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响[J]. 现代电力,2006,23(6):6-9.

[4] 李飏.火电机组 OPC 超速保护动作特性分析[J]. 电力安全技术,2005,7(12):21-22.

[5] 吴琛,李文云,杨强,等.云南省电网高频率问题与火电机组 OPC 功能协调配合研究[J]. 云南电力技术,2005,33(6):1-3.

[6] 吴琛,李玲芳.云南电网主网高周切机方案研究[J]. 云南电力技术,2008,36(1):1-4.

[7] 周川梅,孙斌.贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(19):29-32,57.

[8] 蔡邠.电力系统频率(第二版)[M].北京:中国电力出版社,1999:21-49.

[9] 陈珩.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,1995:223-229.

(收稿日期:2010-10-12)

基于变论域模糊 PID 控制的同步发电机励磁研究

揭海宝, 康积涛, 李 平

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:同步发电机励磁系统是一个时变、非线性、强干扰、模型十分复杂的系统,应用传统的控制方法往往难于达到满意的控制效果。变论域自适应模糊控制具有对模型无准确要求、响应快速、精度高、鲁棒性好、适应性强等优点。将变论域自适应模糊控制器应用于同步发电机的励磁调节与控制中,首先详细地论述了控制器的结构设计、伸缩因子的选择方法,然后给出了具体的控制算法;最后给出的仿真结果表明该控制算法在同步发电机励磁控制中切实可行,效果令人满意。

关键词:变论域;同步发电机;模糊控制;励磁控制器

Abstract: Excitation system of synchronous generator is a typical nonlinear and time-varying system with strong disturbance, high uncertainty and model complexity. It is difficult to achieve a good performance by traditional control methods. Adaptive fuzzy control method based on variable universe has the advantages such as no need for exact models, fast response, high precision and strong robustness. The variable universe adaptive fuzzy controller is applied to the excitation regulation and control of synchronous generator. Firstly, the corresponding structure design and the extension factor selection of the controller are provided in detail, and then the control law is given. Finally, the simulation results prove that the control scheme is reliable and effective.

Key words: variable universe; synchronous generator; fuzzy control; excitation control

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0024-04

0 引 言

同步发电机是一种典型的“时变、非线性、强干扰、模型复杂”的系统^[1],对它的控制问题一直吸引着控制领域的专家、学者的研究,而且也取得了一定的进展和研究成果,但至今也没有一个公认的系统模型,这给那些依赖系统模型进行控制的方法带来了困难。长期以来在同步发电机的励磁控制算法中普遍采用的是 PID 控制,由于系统模型经常发生变化,受外界影响较大,因此常规的 PID 控制在实际运行当中需要经常手动调节参数,这给励磁控制带来了极大的不便,而且控制效果也不甚理想。

为了改善这种状况,许多专家学者先后提出了采用非线性控制、智能控制方法应用于励磁控制系统中,其仿真和实验的控制效果确实有了一定的改善,但是它们大大增加了控制系统的复杂程度;模糊 PID 控制由于结构简单,工业化应用较为广泛,因此可借鉴度高,近年来受到很多学者们的关注。

常规的模糊 PID 控制系统由于量化因子、比例因

子和论域的固定化,在实际的控制过程中不能很好地满足调节范围和控制精度;文献 [2] 中首次提出了变论域的思想,并指出在规则形式不变的情况下,论域随着误差变小而收缩,随着误差的变大而增大,从而提高了控制系统的调节范围和控制精度。变论域模糊 PID 控制器实际上就是一种在线根据误差调整论域的自适应模糊 PID 控制器。基于这种思想,结合同步发电机励磁控制的要求,下面将变论域自适应模糊控制应用于同步发电机励磁控制中。

1 变论域模糊 PID 励磁控制器设计

同步发电机的励磁控制主要包含励磁控制器、功率单元、同步发电机、测量单元等,这里以同步发电机的电压调节为例,探讨如何将变论域模糊 PID 控制器应用于该系统。下面首先给出同步发电机励磁控制系统的结构框图,如图 1 所示。

1.1 控制器结构设计

利用变论域模糊 PID 控制器的优势,设计基于变论域模糊 PID 控制的电压调节器结构如图 2 所示。

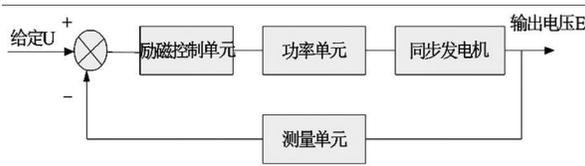


图 1 同步发电机经典电压调节框图

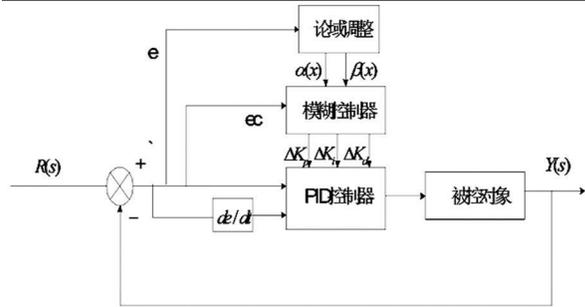


图 2 变论域模糊 PD 励磁控制器框图

为了达到满意的控制精度,定义: $[-e_0, e_0]$ 为输入变量 e 的基本论域; $[-e_c, e_c]$ 为输入变量 e_c 的基本论域; $[-k_p, k_p]$ 为输出变量 k_p 的基本论域; $[-k_i, k_i]$ 为输出变量 k_i 的基本论域; $[-k_d, k_d]$ 为输出变量 k_d 的基本论域。为简单起见统一为 $X_p = [-E_p, E_p]$, $p=1, 2$ 分别为输入变量 X_p ($p=1, 2$) 的基本论域; $Y_q = [-K_q, K_q]$, $q=1, 2, 3$ 分别为输出变量 Y_q ($q=1, 2, 3$) 的基本论域; $A_i = \{a_{ij} | 1 \leq j \leq m$ (这里 m 为 7) 为 X_p 上的模糊划分; $B_i = \{b_j | 1 \leq j \leq m$ 为 Y_q 上的模糊划分, 则结合模糊推理规则:

如果 x_i 是 a_{1j} 且 x_2 是 a_{2j} 那么 y_1 就是 b_{j-1} , y_2 就是 b_j , y_3 就是 b_{j+1} 。此时有

$$y(x_1, x_2) = F(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^7 \prod_{i=1}^2 a_{ij}(x_i) y_j$$

1.2 伸缩因子的选择^[3]

所谓变论域是指论域可以分别随着输入变量和输出变量的变化而自行调整, 即论域 X_p 和 Y_q 可以分别随着变量 x_p 和 y_q 的变化而自行调整, 推广记为: 输入变量是基本论域 $X(x) = [-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$, 输出变量是基本论域 $Y(y) = [-\beta(y)K, \beta(y)K]$, 其中 $\alpha(x)$ 与 $\beta(y)$ 叫做论域的伸缩因子, E 表示输入变量 e 和 e_c , K 表示输出变量 k_p , k_i 和 k_d , 相对于变论域而言, 原来的论域叫做初始论域。一般地, 伸缩因子满足对称性、避零性、单调性、协调性、正规性, 常见的函数有:

$$\alpha(x) = \left[\frac{|x|}{E} \right]^\tau + \epsilon > 0 \quad \epsilon \text{ 为充分小的正数};$$

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx} \quad \lambda \in (0, 1), k > 0;$$

$$\beta(t) = K_i \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad K_i \text{ 为比例常数。}$$

$\alpha(x)$ 表示输入变量论域的伸缩因子, $\beta(x)$ 表示

输出变量论域的伸缩因子。

文中对于输入论域的伸缩因子, 选用 $\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx}$ ($\lambda \in (0, 1)$, $k > 0$); 这里取 $\lambda = 0.6$, $k = 0.5$; x 表示输入变量 e 或 e_c , 亦即 $\alpha(e) = 1 - 0.6e^{-0.5e^2}$, $\alpha(e_c) = 1 - 0.6e^{-0.5e_c^2}$ 。

对于输出论域的伸缩因子, 考虑 k_p , k_i 和 k_d 对控制性能的影响, 采用原则: 输出变量 k_p 和 k_i 的伸缩因子应具有与误差的单调一致性, 而输出变量 k_d 的伸缩因子则具有与误差的单调反向性。亦即输出论域的伸缩因子应使得输出变量 k_p 和 k_i 适当大, k_d 适当小。为此选取输出变量 k_p 和 k_i 的论域伸缩因子为 $\beta_1 = 2|e|$, $\beta_2 = \frac{1}{|e| + 0.7}$, 亦即 $\beta_p = 2|e|$, β_d

$$= 2|e|, \beta_i = \frac{1}{|e| + 0.7}$$

论域的伸缩变化如图 3 所示。

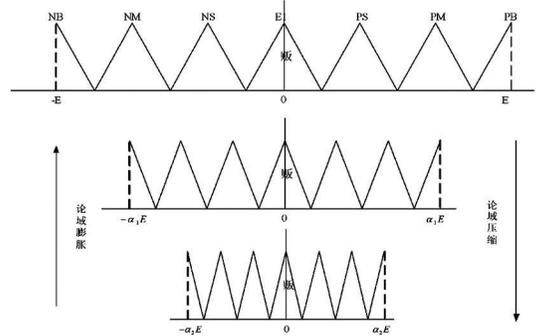


图 3 论域的伸缩变化示意图

2 仿真实验

为了检验所设计的变论域模糊 PID 控制器的控制性能及效果, 采用 Matlab 软件对其进行仿真测试; 并对常规 PID 励磁控制器、模糊 PID 励磁控制器以及变论域模糊 PID 励磁控制器进行了仿真对比, 其中控制系统各个部分的参数设置如下。

同步发电机: $T_{d0} = 6 \text{ s}$, $K_F = 1.0$;

电压测量单元: $T_R = 0.02 \text{ s}$, $K_R = 1.0$;

功率单元: $T_Z = 0.3 \text{ s}$, $K_Z = 1.0$ 。

这里采用粒子群算法对 PID 控制初始参数进行了优化, 经过编程实现得到粒子群优化的 PID 初始参数值为

$$k_p = 199.325, k_i = 10.128, k_d = 29.638$$

2.1 参数未变时的仿真对比

采用阶跃信号模拟发电机空载起励磁进行仿真,

这时系统参数如上所设置, 仿真结果如图 4 所示。

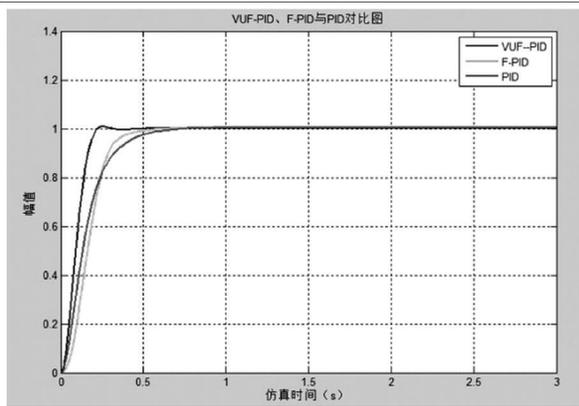


图 4 系统参数未变时励磁控制仿真图

从响应结果粗略看来, 显然可以发现模糊 PID 控制 (F-PID) 以及变论域模糊 PID (VUF-PID) 具有更快的响应速度; 当然, 此时的 PID 控制似乎完全可以满足控制系统的性能要求, 无论是从上升时间、超调量还是稳态误差都控制得较好, 仔细分析其原因, 不难发现主要有两个原因: 一是通过使用了 PSO 优化算法来优化 PID 的控制参数, 所得到的控制参数应该是具有很好控制效果的 PID 参数; 二是被控对象 (励磁系统) 所采用的是简化后的精确的数学模型表述, 也就是说被控对象在仿真过程中丝毫没有发生变化。但是, 这两种情况在实际的工况中是不可能存在的, 实际的工况中被控对象是不可避免的要受外界环境的变化而改变的, 并且外界环境有时还会发生恶劣的变化, 扰动突然增加等等。

2.2 参数发生变化时的仿真对比

为了进一步显示变论域模糊 PID 控制器的优势, 模拟实际的运行环境, 不妨假设系统的状态发生了如下改变, 其中 T_{d0} 由原来的 6 s 变为 12 s T_R 由原来的 0.02 s 变为 0.08 s 这时再来看看它们各自的控制效果, 这个假定的实现只需要在 Simulink 仿真环境下改变同步发电机的传递函数即实现, 改变后的仿真结果如图 5 所示。

将以上所有仿真指标列于表 1, 根据以上仿真指标可以看出: 一方面, 采用模糊控制与 PID 控制相结合, 充分发挥了各自的优势, 即系统响应不但具有很高的稳态精度, 而且具有较快的响应速度和较小的超调量。另一方面, 采用变论域的方法, 由于对模糊控制器本身进行了优化调整, 使得控制效果较模糊 PID 具有更好的快速性, 并且对超调也有较强的抑制能力。

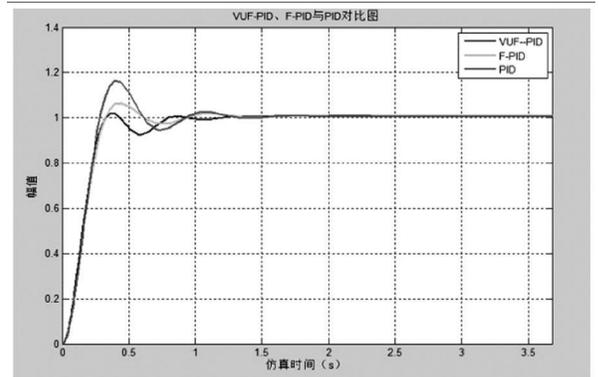


图 5 $T_{d0}=12\text{ s}$ $T_R=0.08\text{ s}$ 时的励磁控制仿真对比图

表 1 算法间性能指标对照表

| 性能指标 | 控制算法 | | |
|----------------|--------|----------------|---------------------|
| | 常规 PID | 模糊 PID (F-PID) | 变论域模糊 PID (VUF-PID) |
| 调节时间 t/s | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| 超调 $\delta/\%$ | 18.72 | 7.43 | 2.56 |
| 静态误差 $e_s/\%$ | 0.03 | 0.01 | 0.008 |

为了测试变论域模糊 PID 励磁控制器的稳定性, 不妨假设系统参数再次发生变化, T_{d0} 由原来的 6 s 变为 25 s T_R 由原来的 0.02 s 变为 0.08 s 这时再来看看它们各自的控制效果, 再次改变后的仿真结果如图 6 所示。

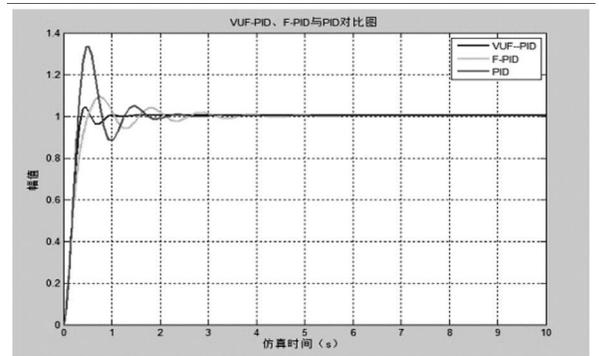


图 6 $T_{d0}=25\text{ s}$ $T_R=0.08\text{ s}$ 时的励磁控制仿真对比图

结合上图和表 2 所示的各个算法性能指标对照, 从中不难看出, 此时常规 PID 励磁控制器由于超调量远大于 10%, 这是在电力系统中不允许存在的, 因此, 此时的常规 PID 励磁控制器不能达到控制系统要求。相比较而言, 模糊 PID 励磁控制器较常规 PID 励磁控制器具有超调量小、稳定精度高的优点, 但响应速度略慢于常规 PID 励磁控制, 而与此同时, 变论域模糊 PID 励磁控制器不仅具有超调量小, 稳定精度高的优点, 而且响应速度也是三者中最快的, 可以看到, 变论域模糊 PID 励磁控制器在实际运行环境中具有很好的控制效果和更强的鲁棒性。

表 2 算法间性能指标对照表

| 性能指标 | 控制算法 | | |
|----------------|--------|-------------------|------------------------|
| | 常规 PID | 模糊 PID (F-PID) | 变论域模糊 PID (VUF-PID) |
| 调节时间 t/s | 3.5 | 4.8 | 1.8 |
| 超调 $\delta/\%$ | 36.27 | 9.26 | 2.87 |
| 静态误差 $e_s/\%$ | 0.04 | 0.02 | 0.01 |

3 结 论

变论域模糊自调整 PID 励磁控制器采用模糊推理方法对参数进行在线调整,以满足不同工况对控制参数的不同要求,仿真结果表明,它与经典 PID 励磁控制器和传统的模糊 PID 励磁控制器相比,在改善

系统动态品质及对系统参数发生改变时的鲁棒性^[4]均优于常规 PID 励磁控制器,在实际应用中有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状与走向 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(4): 142-145.
- [2] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器 [J]. 中国科学 (E 辑), 1999, 29(1): 10-20.
- [3] 李洪兴. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制 [J]. 中国科学 (E 辑), 2002, 32(2): 211-223.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

(收稿日期: 2010-10-12)

《四川电力技术》投稿须知

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

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

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

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

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

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

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

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

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

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

来稿请寄:四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072 电话: (028)87082036, 87082037 E-mail: cdscdljs@163.com

基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定

严居斌

(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要:采用扰动功率法对电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动进行扰动源的判定,对公共连接点的各个支路,其扰动功率初始峰值极性作为扰动方向判定的依据,极性不同的支路为扰动源所在的支路。仿真结果表明,该方法对判定电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动的扰动源有较好的效果。

关键词:短期扰动;扰动功率;扰动源

Abstract: The determination of disturbance source of short-term power quality is put forward by using disturbance power method. Polarity of the initial peak of disturbance power is the basis for the determination of disturbance direction. Disturbance source is located in the branchings whose polarity is different. The simulation results indicate that it is useful to recognize disturbance source of voltage swell, voltage sag and voltage interruption with this method.

Key words: short-term disturbances; disturbance power; disturbance source

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0029-05

0 引言

随着用电设备技术的更新,尤其是数控技术广泛用于工业生产,用户对供电系统的电压质量提出了更高的要求。目前,中国的电力市场已逐步实施,随着电力市场的逐步完善,电力部门不但要解决电力用户对电能质量的投诉,提高电能质量满足用户的需要,还要加强电能质量监督管理,发现电能质量问题后要深入研究,找到电能质量扰动的扰动源,即判定扰动方向,从而明确责任,对扰动源负荷进行惩罚,并督促其提高电能质量;是系统责任的电能质量问题一定要认真分析,找到扰动原因,最终为用户提供安全、可靠、清洁的电力能源。

电力系统短期扰动分析在电能质量分析中占有重要的地位^[1-7]。文献[8]利用扰动能量流对电压骤降、充电暂态进行扰动方向的判定。对于一个电力网络,在一负荷支路发生故障或接入扰动负荷将引起公共连接点的各支路潮流发生变化。扰动发生后的瞬时功率和正常情况下的瞬时功率之差定义为扰动功率。扰动功率在时间上的积分定为扰动能量。扰动能量法通过扰动能量的正负来判断扰动的方向。扰动能量法能够将扰动支路和非扰动支路区别开来,但系统侧的扰动能量表现为不确定性,有正有负。有时

是一负荷支路发生扰动,但系统侧的扰动能量也与其同号,因而不能判定扰动是负荷支路还是系统造成的。对电压骤升、短时停电等短期扰动方向判定很少有文章介绍。

下面将采用扰动功率法对电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动进行扰动源的判定。对公共连接点的各个支路,其扰动功率初始峰值极性作为扰动方向判定的依据,极性不同的支路为扰动源所在的支路。

1 短期电能质量扰动方向判定

1.1 短期电能质量扰动

短期电能质量扰动包括电压骤升、电压骤降和短时停电,是指电压或电流有效值发生变化且持续时间为 0.5 个工频周期~1 min 的电磁扰动现象。引起短期电压变化的原因是系统故障、需要高启动电流的大型负荷的接入或电力布线接头处有断续的松动等。如连于公共连接点的一支路中部发生 A 相接地故障,故障持续时间为 10 s 公共连接点 A 相将发生电压骤降扰动, B 相和 C 相发生电压骤升,故障点 A 相发生短时停电。

对于公共连接点 (point of common coupling PCC),若发生短期电能质量扰动,连接到公共连接点

的各个支路的电流都要发生变化。短期扰动对公共连接点各支路电流有重要影响,甚至改变电流流向,从而也影响公共连接点的电压。但从实验及实际情况可知,单从支路电流或公共连接点电压并不能判断电能质量扰动来自哪条支路。公共连接点各支路电流和公共连接点电压的变化必将引起各支路功率的变化。下面从功率的角度研究短期扰动的方向判定。

1.2 短期电能质量扰动方向判定

1.2.1 扰动功率和扰动复功率

扰动功率 (disturbance power DP) 定义为连接于公共连接点的某一支路发生电能质量扰动后各支路扰动时刻瞬时功率与稳态瞬时功率之差,即

$$DP(t) = p(t) - p_s(t) \quad (1)$$

其中, $p(t)$ 为故障时刻瞬时功率; $p_s(t)$ 为稳态瞬时功率。

正弦电路的复功率为

$$\bar{S} = P + jQ = UI \angle \Phi = \dot{U} \dot{I}^* \quad (2)$$

其中, P 为有功功率; Q 为无功功率; Φ 为电压与电流向量的相位夹角值; \dot{U} 为电压向量; \dot{I}^* 为电流向量 \dot{I} 的共轭向量。

扰动复功率定义为正弦电路的结构或负荷发生变化后公共连接点各支路复功率的变化值,即

$$DS = \bar{S}_2 - \bar{S}_1 \quad (3)$$

其中, \bar{S}_2 为变化后的复功率; \bar{S}_1 为变化前的复功率。

对于正弦电路,扰动功率初始峰值极性与扰动复功率的相位有关。

1.2.2 短期扰动的方向判定

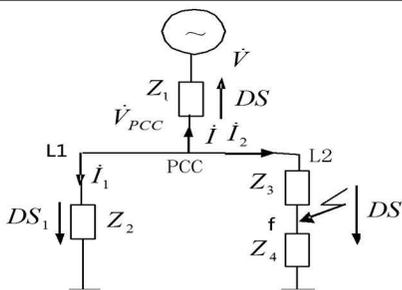


图 1 短期扰动模拟电路图

短期电能质量扰动主要由短路故障引起。短路故障可用图 1 的电路模拟,假设连接到公共连接点的一条支路在线路末端 f 点发生三相接地短路故障。图中 Z_1 为系统阻抗, Z_2 为支路 L_1 的线路和负荷阻抗, Z_3 为支路 L_2 的线路阻抗, Z_4 为支路 L_2 的负荷阻抗, f 为短路点。

f 点短路前,

$$Z = Z_1 + \frac{Z_2(Z_3 + Z_4)}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \quad (4)$$

$$\dot{I} = -\frac{\dot{V}}{Z}, \dot{I}_1 = -\dot{I} \cdot \frac{Z_3 + Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4}$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{I} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \quad (5)$$

$$\dot{V}_{PCC} = Z_2 \dot{I}_1 \quad (6)$$

$$\bar{S} = \dot{V}_{PCC} \dot{I}^*, \bar{S}_1 = \dot{V}_{PCC} \dot{I}_1^*, \bar{S}_2 = \dot{V}_{PCC} \dot{I}_2^* \quad (7)$$

f 点短路后, $Z_4 = 0$,

$$Z' = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (8)$$

$$\dot{I}' = -\frac{\dot{V}}{Z'}, \dot{I}'_1 = -\dot{I}' \cdot \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}' \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \quad (9)$$

$$\dot{V}'_{PCC} = Z_2 \dot{I}'_1 \quad (10)$$

$$\bar{S}' = \dot{V}'_{PCC} \dot{I}'^*, \bar{S}'_1 = \dot{V}'_{PCC} \dot{I}'_1^*, \bar{S}'_2 = \dot{V}'_{PCC} \dot{I}'_2^* \quad (11)$$

故系统侧和各负荷支路的扰动复功率分别为

$$DS = \bar{S}' - \bar{S} \quad DS_1 = \bar{S}'_1 - \bar{S}_1, DS_2 = \bar{S}'_2 - \bar{S}_2 \quad (12)$$

Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 分别取不同的值时,由式 (12) 得出各负荷支路和系统侧扰动复功率幅值及相角见表 1,扰动复功率的参考方向以从公共连接点流出为正, $\dot{V} = \angle 0^\circ$ 。

由表 1 可知,扰动源支路的扰动复功率的相位为负,非扰动源支路和系统侧扰动复功率相位为正,因此可以判断扰动方向。实际系统中并不是纯正弦系统,所以并不能求得扰动复功率。扰动功率初始峰值极性与扰动复功率相位有关,因此可从扰动功率初始峰值极性来判断扰动源的位置。

2 仿真分析

图 2 为一放射性电力系统电路图。 Z_s 、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 为系统阻抗和线路阻抗, L_1 、 L_2 和 L_3 为连接于 PCC 的三条负荷支路。 f 为短路点,位于支路 L_1 的线路中部。下面对 PCC 发生电能质量扰动后系统侧和各负荷支路的扰动功率进行分析。扰动功率以流出 PCC 点为正。

如果在 f 点发生 A 相接地短路故障,并在 0.07 s 后故障解除,则 PCC 处将出现短期电能质量扰动,即

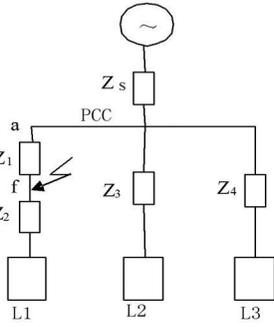


图 2 短路故障仿真电路图

A 相电压骤降、B 相和 C 相电压骤升。系统侧、各负荷支路扰动功率波形见图 3。

由图 3 可知，支路 L₁ 的扰动功率初始峰值为正，

系统侧和支路 L₂、L₃ 的扰动功率初始峰值为负，可判定扰动源在支路 L₁，与实际情况相同。

如果在 f 点发生 A、B 两相接地短路故障，并在 0.07 s 后故障解除，则 PCC 处 A、B 相电压骤降、C 相电压骤升。系统侧、各负荷支路扰动功率波形见图 4。

由图 4 可知，支路 L₁ 的扰动功率初始峰值为正，系统侧和支路 L₂、L₃ 的扰动功率初始峰值为负，可判定扰动源在支路 L₁，与实际情况相同。

如果在 f 点发生三相接地短路故障，并在 0.07 s 后故障解除，则在 PCC 处 A、B 和 C 相电压骤降。系统侧、各负荷支路扰动功率波形见图 5。

表 1 短期扰动模拟结果

| 名称 | 数值 | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Z ₁ | 0.3+0.5j | 0.3+0.5j | 0.2+0.5j | 0.2+0.5j |
| Z ₂ | 9+4j | 9+4j | 10+5j | 10+5j |
| Z ₃ | 0.1+0.4j | 0.1+0.4j | 0.1+0.5j | 0.1+0.5j |
| Z ₄ | 11+5j | 11-5j | 9+4j | 9-4j |
| DS ₁ | 0.0624+0.0278j | 0.0671+0.0298j | 0.0504+0.0252j | 0.0554+0.0277j |
| ψ ₁ / (°) | 23.9625 | 23.9625 | 26.5651 | 26.5651 |
| DS ₂ | -0.0382-0.3683j | -0.0310-0.4266j | -0.0128-0.4066j | -0.0004-0.4782j |
| ψ ₂ / (°) | -95.9196 | -94.1503 | -91.8038 | -90.0486 |
| DS | -0.0243+0.3406j | -0.0361+0.3968j | -0.0376+0.3814j | -0.0550+0.4505j |
| ψ / (°) | 94.0728 | 95.2003 | 95.6311 | 96.9631 |

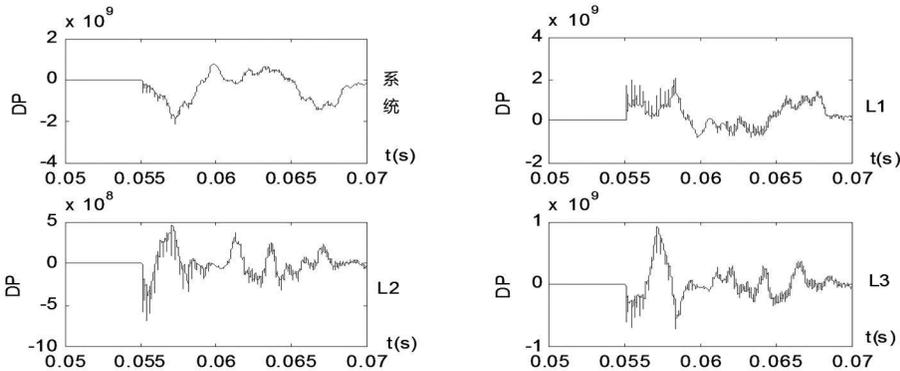


图 3 A 相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

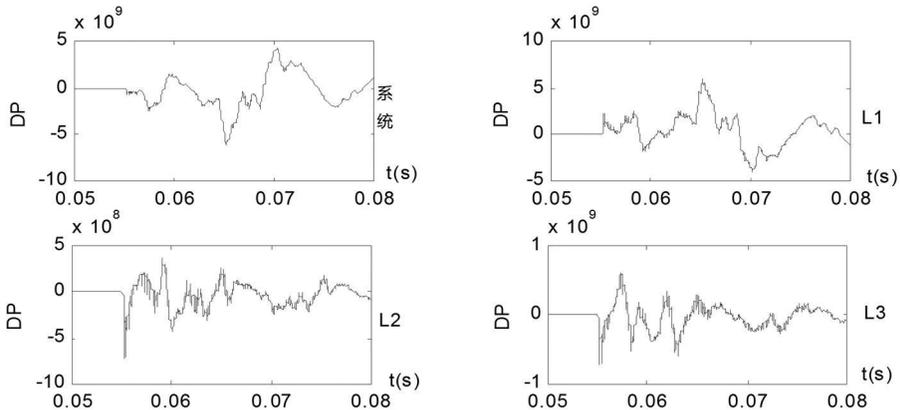


图 4 A、B 两相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

由图 5 可知,支路 L_1 的扰动功率初始峰值为正,系统侧和支路 L_2 、 L_3 的扰动功率初始峰值为负,可判断扰动源在支路 L_1 ,与实际情况相同。

如果在 L_1 支路出口处 a 点发生 A 相接地短路故障,并在 0.07 s 后故障解除,则在 PCC 处 A 相出现短时停电, B、C 相电压骤升。系统侧、各负荷支路扰动功率波形见图 6。

由图 6 可知,支路 L_1 的扰动功率初始峰值为正,系统侧和支路 L_2 、 L_3 的扰动功率初始峰值为负,可判

断扰动源在支路 L_1 ,与实际情况相同。

如果在 L_1 支路出口处 a 点发生 A、B 两相接地短路故障或三相接地故障,并在 0.07 s 后故障解除,则在 PCC 处出现短时停电。同样可判断扰动源在支路 L_1 。A、B 两相接地短路时系统侧、各负荷支路扰动功率波形见图 7;三相接地短路时系统侧、各负荷支路扰动功率波形分别见图 8。

因此用扰动功率法能够判断电压骤升、电压骤降、短时停电和暂态等电能质量扰动的扰动方向。

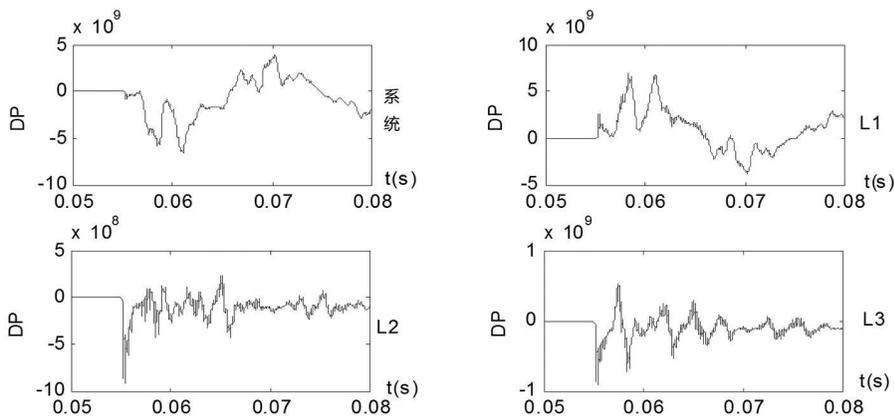


图 5 三相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

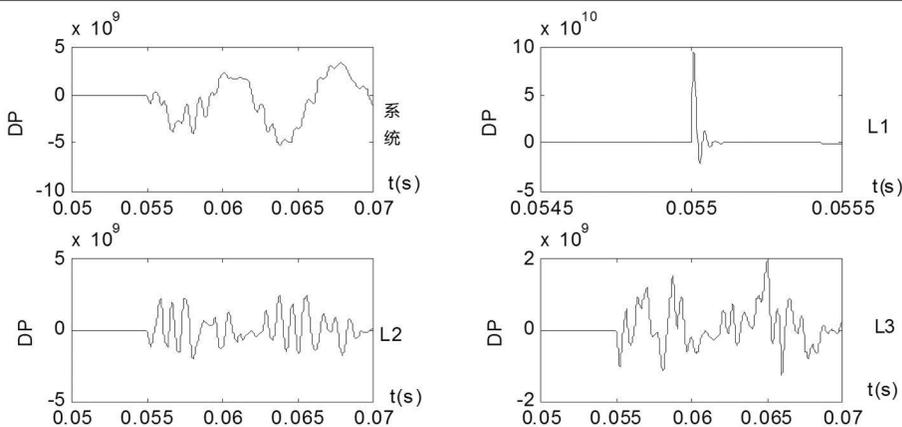


图 6 L_1 支路出口处 A 相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

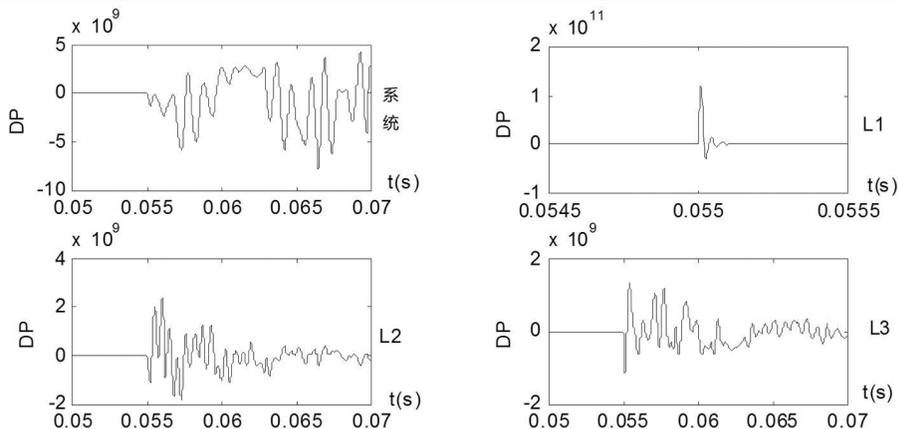


图 7 L_1 支路出口处 A、B 两相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

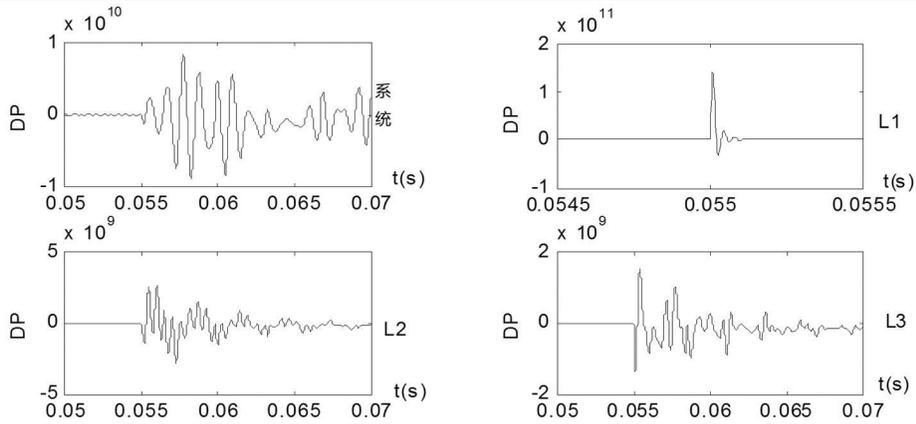


图 8 L₁ 支路出口处三相接地短路系统侧和各负荷支路扰动功率

4 结 语

随着电力市场的不断完善,电力部门不仅要满足用户对电力数量不断增长的需求,还必须满足较高电能质量的要求。深入分析和研究电能质量问题,探询在一定条件下发生电能质量扰动的因果关系,找到扰动源,明确责任和义务,是电力工业适应市场竞争和可持续发展所必须的。采用了扰动功率法对电压骤升、电压骤降、短时停电等短期电能质量扰动进行扰动源的判定。通过仿真分析,取得了较好的效果。

参考文献

[1] Dugan R C, Mcgranaghan M F, Beaty H W. Electrical Power Systems Quality [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
 [2] 严干贵, 姜齐荣, 黄民聪. 未来的用户电力技术 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 62-67.

[3] Nara K, Hasegawa Oyama T et al. Forwarding to Future Power Delivery System [C]. In: Proceeding of IEEE ICHQP IX. Orlando (USA); 2000, 8-18.
 [4] Mancao R T. Power Quality Monitoring of a Distribution System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 1136-1140.
 [5] 胡铭, 陈珩. 电能质量及分析方法综述 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
 [6] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
 [7] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18, 33.
 [8] Parsons A C, Grady W M, Powers E J, Soward J C. A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1081-1086.

(收稿日期: 2010-11-14)

(上接第 4 页)

[6] 任景. 交直流互联系统送端孤网运行时频率稳定问题研究 [D]. 成都: 四川大学, 2008.
 [7] S Corsi A, Danelli M, Pozzi. Emergency-stability Controls through HVDC Links [C]. Power Engineering Society Summer Meeting Chicago-USA, 2002(2): 774-779.
 [8] Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC Transient Response and Recovery Strategies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4): 1995-2001.
 [9] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.

[10] 房大中, 杨晓东, 宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器 [J]. 电力系统自动化, 2002, 25(5): 21-27.
 [11] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流系统中直流调制的协调优化 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
 [12] 郭小江, 卜广全, 马世英, 等. 西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略 [J]. 电网技术, 2009, 33(2): 56-61.
 [13] 金小明, 李兴源, 刘红超, 等. 南方电网多馈入与交流并联系统的稳定与控制研究 [R]. 成都: 四川大学, 2002.

(收稿日期: 2010-11-19)

用户谐波发射水平补偿增量回归评估法

张 鹏, 刘 燕

(成都电业局都江堰供电局, 四川 都江堰 611830)

摘 要:提出用户和系统在公共连接点 (point of common coupling PCC) 的谐波发射水平补偿增量回归估计法。利用系统谐波阻抗一元回归模型能平滑波动且无自变量相关性引起误差的特点, 提出一种系统谐波补偿方法, 降低系统谐波的干扰, 近似消除系统谐波, 以此估计系统谐波阻抗。根据国际电工委员会最新技术报告中关于用户谐波发射水平的定义和所得系统谐波阻抗, 评估用户谐波发射水平, 该方法不再基于传统方法中关于阻抗和谐波源大小关系的假设条件。对理论模型和实际工程算例的仿真证明所提方法的正确性和有效性。

关键词:谐波阻抗; 谐波发射水平; 增量等效电路; 补偿增量回归; 非干预式

Abstract: A novel method to estimate the harmonic emission level of the system and the customer side at the point of common coupling (PCC) is proposed in a power grid by means of the compensated increment regression method. Based on the traits that the unary regression model for the system harmonic impedance can smooth the fluctuations without the error caused by the correlation of independent variables and reduce the estimated error by the system harmonic, an approach to eliminate the system harmonic components from the harmonic data measured at PCC is presented. The system harmonic impedance can be estimated by the harmonic voltage and current without system harmonic elements. According to the estimated system harmonic impedance and the latest technical report made by the international electrotechnical commission, the customer harmonic emission level can be evaluated to get rid of the hypothesis about the relationship of impedances and harmonic sources of the system and customer side. The simulation results of the laboratory simulation and the field test demonstrate that the proposed method is valid and accurate.

Key words: harmonic impedances; harmonic emission level; increment equivalent circuit; compensated increment regression; non-invasive

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0033-05

0 引 言

现代电网中非线性负荷大量投入, 造成严重的电网谐波污染, 不仅危害电网安全, 而且极大影响相邻用户^[1-2], 准确评估用户谐波发射水平是构筑绿色友好智能电网的重要内容之一^[3]。评估用户谐波发射水平的难点^[4]在于准确区分公共连接点 (point of common coupling PCC) 处检测到的谐波扰动中系统和用户各自的贡献量。从系统扰动水平看, 谐波发射水平通常以谐波电压为测度。现有方法^[5-16]通常将其转化为谐波阻抗估计。

已有谐波阻抗估计法包括干预式法^[16]和非干预式法^[5-15]。干预式法为主动法, 通过向系统注入谐波 (间谐波) 电流, 或断开某支路来估计系统谐波阻抗, 该方法需通过提高注入系统的扰动水平来抑制系

统谐波的影响, 可能影响系统正常运行; 非干预式法为被动法, 通过测量 PCC 点谐波电压、电流值估计系统谐波阻抗, 可评估系统谐波阻抗, 是国内外较认同的方法。国内外学者对系统谐波阻抗估计开展了大量研究, 提出的方法主要有: ①波动量法^[7-9], 根据测量到的谐波电压波动量与谐波电流波动量之间的比值符号进行估计, 当系统谐波波动较小时估计精度较高, 但系统侧谐波波动剧烈时, 不能准确估计; ②线性回归法^[10-13], 在假设系统谐波平稳随机且含量少的条件下, 通过诺顿等效电路原理建立回归方程求解系统谐波阻抗, 但系统谐波的随机波动对评估结果影响较大; ③随机矢量协方差法^[14], 在已知用户谐波阻抗远大于系统谐波阻抗且用户侧谐波占主导的前提下, 弱化系统谐波变化的影响, 能较精确求解系统谐波阻抗, 但其先验条件在实际中难以满足。

由于系统侧谐波由接入该系统的多个非线性谐波源叠加而成,从统计意义上看各谐波源相互独立,产生的谐波变化可能相互抵消,而谐波阻抗线性回归模型中的回归系数对系统侧谐波有平滑效果,因此立足于系统谐波阻抗一元回归模型无二元回归模型中自变量相关性干扰的优点,针对其投影确定系统谐波变化和系统谐波本身存在波动造成的估计误差,建立谐波增量电路模型和系统谐波阻抗增量回归方程,抑制系统谐波变化的影响。再根据增量回归方程判定系统谐波增量,用其对增量回归模型进行补偿修正,消除系统谐波干扰,提高系统谐波阻抗估计精度。

根据求得的系统谐波阻抗并结合国际电工委员会(International Electrotechnical Commission IEC) 61000-3-6 关于用户谐波发射水平的定义^[17],评估用户谐波发射水平,无需系统谐波阻抗远小于用户谐波阻抗和用户侧谐波占支配地位的假设,提高评估方法的适应性。仿真和实际测试证明了所提方法的准确性和有效性。

1 系统谐波阻抗一元回归法及其不足

评估 PCC 点系统谐波阻抗和用户谐波发射水平的戴维南等效电路如图 1^[1, 5-16, 18], \dot{U}_s 、 \dot{U}_c 分别为系统侧和用户侧谐波电压源; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧等值谐波阻抗; \dot{U}_{PCC} 、 \dot{I}_{PCC} 为 PCC 点谐波电压和电流测量值。

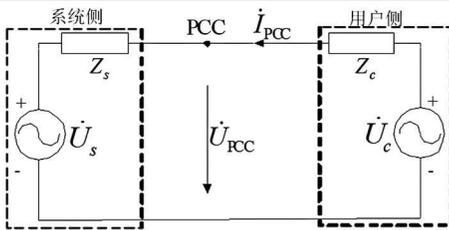


图 1 电力系统戴维南等效电路

系统谐波阻抗一元回归模型^[10]如式(1),式中 \dot{U}_{PCC} 为 PCC 点测量值 \dot{U}_{PCC} 对 \dot{I}_{PCC} 的投影,如式(2),其中 $\varphi_{U_{PCC}}$ 和 $\varphi_{I_{PCC}}$ 分别为 PCC 点谐波电压、电流相角测量值。 \dot{U}_{PCC} 和 \dot{I}_{PCC} 为回归样本点, \dot{U}_s 和 Z_s 为回归系数。

$$\dot{U}_{PCC} = \dot{U}_s + \dot{I}_{PCC} Z_s \quad (1)$$

$$\dot{U}_{PCC} = U_{PCC} \angle (\varphi_{U_{PCC}} - \varphi_{I_{PCC}}) \quad (2)$$

回归系数平稳随机是精确建立回归模型的关键条件,当不满足此条件将减弱回归自变量 (\dot{I}_{PCC}) 与因变量 (\dot{U}_{PCC}) 之间的相关性,导致回归精度下降。回归系数 Z_s 取决于系统短路容量,与运行方式等有关,可认为其变化缓慢,对短时间进行估计时可不考虑其变化,认为满足精确建立回归模型的条件。

从回归系数 \dot{U}_s 上分析,根据式(2)、(3)知,当 \dot{U}_{PCC} 投影到 \dot{I}_{PCC} 计算时,由于负荷的时变特性, Z_c 和 \dot{U}_c 变化引起参考点 $\varphi_{I_{PCC}}$ 不恒定,使 \dot{U}_{PCC} 投影后作相应变化,导致 \dot{U}_{PCC} 中 \dot{U}_s 分量作波动变化不满足平稳随机的条件。即使在 \dot{U}_s 恒定不变的情况下,由于投影计算将导致其产生波动,特别是在系统侧谐波较大的情况下,其值变化尤为剧烈,将导致较大 Z_s 估计误差。

$$\dot{U}_{PCC} = (Z_s \dot{U}_c + Z_c \dot{U}_s) / (Z_c + Z_s) \quad (3)$$

$$\dot{I}_{PCC} = (\dot{U}_c - \dot{U}_s) / (Z_c + Z_s)$$

投影计算导致回归系数非平稳随机造成的误差是系统谐波阻抗一元回归模型固有的缺陷所致。再者 \dot{U}_s 本身由 PCC 点系统侧所有非线性负荷决定,其本身也在作一定的变化也将导致估计 Z_s 误差。故如何消除系统谐波干扰是系统谐波阻抗一元回归方法提高估计精度的关键。

系统谐波中高次谐波含量少,不影响其谐波阻抗评估精度,而低次谐波电压电流矢量为扇形或某个区域内分布,其相角不发生跳变。两个相邻电压电流矢量之间的差值定义为增量,其模值必定小于其实际矢量模值。因此根据谐波增量小于实际取值的特点,提出增量等效电路及系统谐波阻抗增量回归方法。

2 增量等效电路与增量回归方程

2.1 增量等效电路

实际电力系统中,由于运行方式变化和非线性负荷波动可能引起 PCC 点谐波电压和谐波电流变化,其变化量 $\Delta \dot{U}_{PCC(i)}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC(i)}$ 定义为增量,即 PCC 点处谐波电压电流相邻两次取值的差,如式(4)、(5)所示,下标 i 和 $i-1$ 分别表示相邻样本点序列。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{PCC(i)} &= \dot{U}_{PCC(i)} - \dot{U}_{PCC(i-1)} \\ &= \frac{Z_s (\dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)}) + Z_c (\dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)})}{Z_c + Z_s} \quad (4) \\ &= \frac{Z_s \Delta \dot{U}_{c(i)} + Z_c \Delta \dot{U}_{s(i)}}{Z_c + Z_s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{PCC(i)} &= \dot{I}_{PCC(i)} - \dot{I}_{PCC(i-1)} \\ &= \frac{(\dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)}) - (\dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)})}{Z_c + Z_s} \quad (5) \\ &= \frac{\Delta \dot{U}_{c(i)} - \Delta \dot{U}_{s(i)}}{Z_c + Z_s} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{c(i)} &= \dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)} \\ \Delta \dot{U}_{s(i)} &= \dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\Delta \dot{U}_{s(i)}$ 、 $\Delta \dot{U}_{c(i)}$ 为系统侧和用户侧的谐波电压增量。根据电路原理, 用户谐波阻抗 Z_c 变化的可等效为用户侧谐波电压源的增量, 并 Z_s 变化很小, 因此, 考虑系统和用户侧参数同时变化时, 可将参数变化量等效为系统和用户谐波电压源增量。根据式 (4)、(5), 并结合电路原理知识可以建立 PCC 点处谐波增量等效电路, 如图 2 所示。

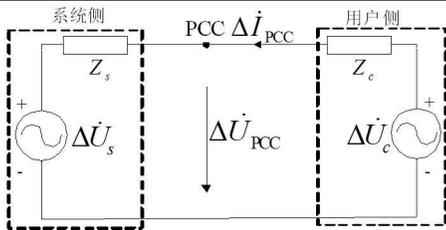


图 2 谐波增量等效电路

2.2 系统谐波阻抗增量回归方程

根据图 2 可列出系统谐波阻抗增量回归方程, 如式 (7) 所示。

$$\Delta \dot{U}_{PCC} = \Delta \dot{U}_s + Z_s \Delta \dot{I}_{PCC} \quad (7)$$

以 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 为参考向量, 按实虚部展开, 得

$$\begin{aligned} \Delta U_{PCCx} &= \Delta U_{sx} + Z_{sx} \Delta I_{PCC} \\ \Delta U_{PCCy} &= \Delta U_{sy} + Z_{sy} \Delta I_{PCC} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 下标 x 、 y 分别代表实虚部。因此根据式 (8) 建立回归方程, 分别作最小二乘法估计^[19], 可求解得背景谐波增量和系统侧谐波阻抗的均值, 如式 (9)。

$$\begin{aligned} \bar{\Delta U}_s &= \bar{\Delta U}_{sx} + j \bar{\Delta U}_{sy} \\ \bar{Z}_s &= \bar{Z}_{sx} + j \bar{Z}_{sy} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 由系统侧和用户侧谐波源增量决定, 虽然 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 向 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 作投影, 同理将会导致 $\Delta \dot{U}_s$ 变化, 影响 Z_s 估计的精度, 但 ΔU_s 小于 U_s , 故由 $\Delta \dot{U}_s$ 造成的误差小, 能够提高 Z_s 估计的精度。如何消除 $\Delta \dot{U}_s$ 干扰是进一步提高 Z_s 估计精度的关键, 具体原理和方法见下节。

3 系统谐波阻抗补偿增量回归估计

通过对图 2 电路推导可得 PCC 点处电流增量为

$$\Delta \dot{I}_{PCC} = \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{Z_s} - \frac{\Delta \dot{U}_s}{Z_s} \quad (10)$$

从式 (7)、(10) 可知 $\Delta \dot{U}_s$ 对 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 的贡献量, 如果消去此部分贡献量则可消去系统侧谐波的影响。基于此, 可以通过初次回归得到的 $\bar{\Delta U}_s$ 和 \bar{Z}_s 对测定 PCC 点谐波电压电流增量补偿修正, 近似得到无系统侧谐波增量影响的 PCC 点处的谐波电压电流增量 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 如式 (11)。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{PCC} &= \Delta \dot{U}_{PCC} - \bar{\Delta U}_s \\ \Delta \dot{I}_{PCC} &= \Delta \dot{I}_{PCC} - \frac{\bar{\Delta U}_s}{\bar{Z}_s} \end{aligned} \quad (11)$$

系统谐波电压增量等效两个部分, 即均值部分 $\bar{\Delta U}_s$ 和波动部分 $\epsilon_{\Delta \dot{U}_s}$ 。通过补偿修正后得到 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 能够消除 $\bar{\Delta U}_s$ 部分, 且根据式 (8) 作最小二乘估计 Z_s 时, 回归模型有平滑作用能够弱化 $\epsilon_{\Delta \dot{U}_s}$ 影响, 因此通过补偿背景谐波增量回归 Z_s 方法能消除系统谐波的影响, 提高估计精确度。

这里作补充说明, 根据回归方程 (1) 求解的系统谐波电压同样可以作类似式 (11) 的补偿修正, 消除系统谐波电压带来的估计误差, 但根据式 (1) 求解的背景谐波电压和系统谐波阻抗误差大, 作补偿修正无意义。

4 用户谐波发射水平估计

文献 [8-14] 提出的通过系统谐波阻抗计算用户谐波电压发射水平是基于 Z_s 远小于 Z_c 且用户谐波占支配地位的假设, 缩小了用户谐波电压发射水平

评估的范围。IEC 61000-3-6 最新技术报告定义用户谐波电压发射水平 U_{c-PCC} : 非线性负荷投入前后 PCC 点处谐波电压向量差的模值, 其向量差定义为为用户谐波电压发射向量 $\dot{U}_{c-PCC}^{[17]}$ 。根据图 1 电路, 其中 \dot{U}_s 和 \dot{U}_{PCC} 分别为负荷投入前后的 PCC 点谐波电压向量, 因此结合电路知识可得 \dot{U}_{c-PCC} :

$$\dot{U}_{c-PCC} = \dot{U}_{PCC} - \dot{U}_s = Z_s \dot{I}_{PCC} \quad (12)$$

IEC 61000-3-6 技术报告认为, 当用户谐波电压发射水平低于相关规定的谐波发射限制时, 其能够有效控制谐波污染。IEC 61000-3-6 技术报告定义谐波发射水平的优点在于估计用户谐波电压发射水平时, 无需再考虑 Z_c 和用户侧谐波含量是否占主导性的特点, 提高了工程实用性。

5 用户谐波发射水平估计过程

基于补偿增量回归法估计用户谐波电压发射水平过程如下。

- (1) 在 PCC 点测量得到 \dot{U}_{PCC} 、 \dot{I}_{PCC} 样本点, 根据式 (4)、式 (5) 计算 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$;
- (2) 作 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 向 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 投影得到回归样本点;
- (3) 根据式 (8) 初次回归计算出 $\Delta \dot{U}_s$ 和 \dot{Z}_s ;
- (4) 根据式 (11), 由步骤 (3) 中计算得到的 $\Delta \dot{U}_s$ 和 \dot{Z}_s 对步骤 (2) 中的回归样本点作修正, 得到近似消除统谐波电压增量后的 PCC 点处谐波电压电流增量 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$;
- (5) 根据回归方程 (8) 和步骤 (4) 中计算得到的 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 估计系统侧谐波阻抗 Z_s ;
- (6) 根据式 (11) 和步骤 (5) 估计出的 Z_s 计算用户谐波电压发射水平 U_{c-PCC} 。

6 实验电路仿真分析

根据图 1 搭建实验仿真模型。

- (1) U_c 均值为 173.03 V, 做 $\pm 20\%$ 随机波动, U_s 相角作参考相角恒为 0° ; 为了反映不同系统谐波含量的仿真结果, U_s 均值为 17.2 V 的 k 倍 (k 取 2.2, 1.8, 1.6, 1.5, 1.2, 1.0, 0.7, 0.5, 0.3), 做 $\pm 5\%$ 的随机

波动, \dot{U}_s 相角初始值为 50° ; 在整个估计时段内做 20% 正弦半波变化。

(2) Z_c 恒为 $0.62 + j1.03 \Omega$; Z_s 幅值和相角的初始值分别为 0.12Ω 和 65° , 在整个估计时段内分别做 20% 和 10% 正弦半波变化。

在 PCC 点处抽样 10 000 个样本点做作滑动递推计算。9 种系统谐波含量由 $\Delta \dot{U}_s$ 相对 \dot{U}_{PCC} 百分比表示 (分别对应不同的 k 值), 下用两种方法 (方法 1 基于式 (1) 的原始系统谐波阻抗一元回归模型, 方法 2 为所提出的补偿增量回归模型) 计算得到系统谐波阻抗模值相角最大误差, 以及用户谐波发射水平 95% 值概率误差, 分别如表 1 所示。

从表 1 看出, 系统谐波阻抗一元回归模型估计精度受系统谐波影响较大, 特别是在系统谐波较大时, 误差增大更为明显。而所提出的补偿增量回归模型方法, 能够有效消除系统谐波的干扰, 在同一系统谐波含量水平下, 提高了 Z_s 的估计精度。

由式 (11) 知用户谐波电压发射水平最大误差与 Z_s 模值最大误差相同, 故不再赘述。从 U_{c-PCC} 的 95% 概率值估计误差可见, 所提方法明显提高了用户谐波电压发射水平的估计精度。特别是在 \dot{U}_s 比 \dot{U}_{PCC} 为 83% 时, 其 95% 概率值误差分为 4.68% , 较方法 1 提高了 20.5 倍。

表 1 Z_s 和 U_{c-PCC} 估计结果误差对比

| 仿真 算例 | $\frac{\dot{U}_s}{\dot{U}_{PCC}}$ | Z_s 模值最大 | | Z_s 相角最大 | | U_{c-PCC} 95% 概 | |
|----------|-----------------------------------|------------|-------|------------|-------|-------------------|------|
| | | 误差 / % | | 误差 / % | | 率值误差 / % | |
| | | 方法 1 | 方法 2 | 方法 1 | 方法 2 | 方法 1 | 方法 2 |
| 1 | 83% | 114.1 | 11.97 | 24.96 | 15.30 | 95.56 | 4.68 |
| 2 | 81% | 96.40 | 11.75 | 24.16 | 14.25 | 80.96 | 4.79 |
| 3 | 79% | 73.31 | 11.57 | 22.38 | 12.64 | 61.58 | 4.93 |
| 4 | 76% | 54.20 | 11.39 | 19.93 | 11.26 | 45.23 | 4.96 |
| 5 | 73% | 43.53 | 11.32 | 17.97 | 10.28 | 36.01 | 4.82 |
| 6 | 71% | 34.42 | 10.94 | 15.82 | 9.36 | 28.01 | 4.42 |
| 7 | 68% | 26.75 | 10.13 | 13.55 | 8.23 | 21.20 | 3.99 |
| 8 | 66% | 23.44 | 9.69 | 12.39 | 7.66 | 18.20 | 3.71 |
| 9 | 60% | 15.38 | 8.27 | 9.00 | 6.04 | 10.84 | 2.89 |

7 实际工程应用

实测数据来自直流电弧炉用户的 150 kV 母线, 采样频率为 6 400 Hz 每分钟对采样数据进行快速傅里叶变换获得各次谐波的测量值。所测某日连续 10 h 内负荷运行时的 PCC 处 13 次谐波电压和电流波形

如图 3 所示,其中 1 h 停机数据可作系统谐波分析,图中横坐标为采样时间 t

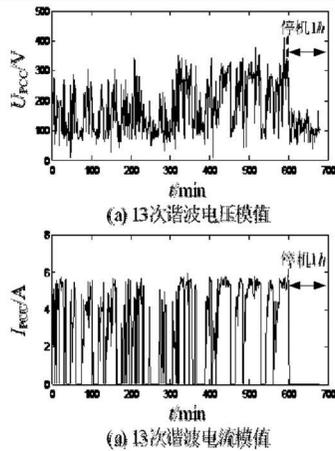


图 3 PCC 处 13 次谐波电压电流波形

分别采用上节中两种方法对 PCC 处 13 次谐波数据作滑动计算,系统谐波阻抗计算结果如图 4 所示。

从图 4 阻抗模值图看出系统谐波阻抗一元回归法估计值波动剧烈,而所提出的补偿增量回归模型法的估计值较平稳。由于系统侧谐波阻抗模值短时间内变化较小,因此基于补偿增量回归模型法方法在阻抗模值估计上更为合理。

从系统谐波阻抗相角上分析,系统谐波阻抗一元回归法和补偿增量回归法估计最大值分别为 91.18° 和 73.92° ,而文献 [20] 指出 Z_s 相角绝对值不超过 85° ,说明所提方法对 Z_s 相角有很好的估计。

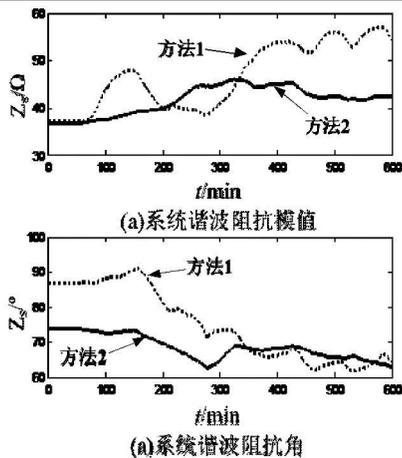


图 4 系统 13 次谐波阻抗估计值

根据式 (12),用方法 1 和方法 2 对实测数据进行分析,分别计算用户在 PCC 点处 13 次谐波发射水平和系统谐波电压模值的 95% 概率值,结果如表 2 所示。

实测数据中负荷停止运行时的 13 次谐波电压可

表 2 U_{c-PCC} 和 U_s 的 95% 概率值计算结果对比

| 谐波电压 /V | 方法 1 | 方法 2 |
|-------------|--------|--------|
| U_{c-PCC} | 303.12 | 244.70 |
| U_s | 173.64 | 158.65 |

以作系统谐波电压分析,计算其 95% 概率值为 163.94 V 。对比表中的数据,知所提方法计算出的 U_s 是最接近这一结果,从而证明对用户谐波电压发射水平 95% 概率值 244.70 V 结果的准确性。

为了进一步证明所提方法的准确性,比较两种方法估计的 \dot{U}_s 和测量得到的 \dot{U}_s 散点图,如图 5 所示。所提方法估计出的系统谐波电压和负荷停机运行时的谐波电压模值相角在同一个范围,而方法 1 部分估计值相角发生跳变到第 3 现象,从而再次证明所提方法准确可信。

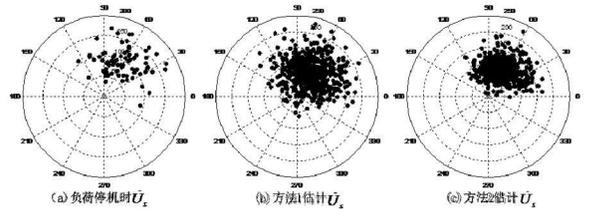


图 5 \dot{U}_s 散点极坐标图

7 结 论

1) 立足于系统谐波在非干预式法估计系统谐波阻抗时引起的误差,根据谐波增量弱化系统谐波影响的原理,提出了增量等效电路和系统谐波阻抗增量回归模型,在此基础上进一步提出了补偿系统谐波分量的方法,近似消除系统谐波的干扰,提高估计系统谐波阻抗的准确度。

2) 根据 IEC 6100-3-6 最新技术报告计算用户谐波发射水平,不再基于用户谐波阻抗远大于系统谐波阻抗和用户谐波源占支配地位的假设,提高了实用性。

3) 仿真和实际工程测试证明所提方法的有效性和准确性。所提方法准确估计系统谐波阻抗不仅可用于用户谐波电压发射水平估计,还对电力滤波器合理设计有指导意义。

4) 如何通过用户谐波发射向量准确求取用户在 PCC 点处的贡献量,即划分出系统和用户的谐波责任,以及如何通过智能电网中的电能质量检测设备估计用户谐波电压发射水平,都是进一步值得研究的课题。

(下转第 41 页)

参考文献

- [1] 孙旭,任震.空间负荷预测在城市电网规划中的应用[J].继电器,2005,33(14):79-81.
- [2] 程浩忠,张焰.电力网络规划的方法与应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002,27-53.
- [3] 何善瑾.上海电力系统最大负荷同时率分析[J].供用电,2008,25(1):13-15.
- [4] 朱振伟,方鸽飞,王国福,等.电网夏季气象敏感负荷特性分析[J].华东电力,2008,36(9):53-58.
- [5] 杜栋,庞庆华.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [6] 杨志欣.基于模糊-神经网络的电力系统短期负荷预测.[D].广东:广东工业大学,2005.
- [7] Willis H L. Power Distribution Planning Reference Book [M]. Marcel Dekker Inc 1997.
- [8] Willis H L Northcote Green J E D. Spatial Electric Load Forecasting [J]. A Tutorial Review Proceeding of the IEEE, 1983, 71(2): 1215-1220.
- [9] Chiclana F Herrera F Herrera V Viedma E. Integrating Three Representation models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations [J]. Fuzzy Sets and System, 1998, 33-48.

(收稿日期 2010-09-15)

(上接第 37 页)

参考文献

- [1] 杨洪耕,王磊.基于拉盖尔多项式的非线性负荷谐波发射水平估计[J].中国电机工程学报,2005,25(7):81-85.
- [2] A. McEachern W. M. Grady W. A. Moncrief et al Revenue and Harmonics: An Evolution of Some Proposed Rate Structures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 474-482.
- [3] 龚华麟,肖先勇.非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(8):30-34.
- [4] 周林,张凤,栗秋华,等.配电网中谐波源定位方法综述[J].高电压技术,2007,33(5):103-108.
- [5] Wilsun Xu Yilu Liu. A method for Determining Customer and Utility Harmonic Contribution at the Point of Common Coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [6] 刘秀玲,王洪瑞,王永青,等.临界阻抗法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统自动化,2007,31(14):76-80.
- [7] H Yang P Pirotte A Robert Harmonic Emission Levels of Industrial Loads Statistical Assessment [C]. CIGRE Conference on Large High Voltage Electric Systems Paris France 1996, 36-306.
- [8] 张安安,杨洪耕.基于畸变波形同步分层估计谐波阻抗的探讨[J].电力系统自动化,2003,27(9):41-44.
- [9] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等.基于主导波分量筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2010,30(4):22-27.
- [10] 车权,杨洪耕.基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(4):39-42.
- [11] 张巍,杨洪耕.基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(6):50-53.
- [12] 黄舜,徐永海.基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的估计方法[J].中国电机工程学报,2007,27(1):93-97.
- [13] 刘凡,司马文霞,车权,等.基于改进 Madaline 网络的谐波发射水平估计[J].高电压技术,2006,32(10):91-93.
- [14] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等.基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J].电力系统自动化,2009,33(7):27-31.
- [15] T. Pfajfar B. Blazic I. Papic. Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 425-433.
- [16] 刘秀玲,王洪瑞.电网谐波阻抗的测量及其修正[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(2):55-59.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC) Subcommittee 77A. Electromagnetic Compatibility (EMC) - part 3-6: Limits - assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems [R]. United Kingdom: British Standards Institution, 2008.
- [18] E. Thunberg L. Soder A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [19] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:北京中国人民大学出版社,2001,18-28.
- [20] 程浩忠,艾芊,张志刚,等.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006,229-230.

(收稿日期:2010-10-19)

城市电网规划中负荷同时率的选择技术研究

田怀源, 周步祥, 冯燕禧, 梁建宾

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 负荷同时率是电力系统规划中的一个重要参数。首先介绍了电力系统现状负荷同时率的影响因素以及现状负荷同时率计算分析方法, 并且计算出了各级负荷同时率, 由此分析了在缺少部分低压数据时综合负荷同时率的准确性; 其次结合空间负荷预测以及负荷特性, 提出了在城市电网规划中规划负荷同时率的计算分析方法。

关键词: 同时率; 空间负荷预测; 负荷特性

Abstract: Load simultaneity factor is an important parameter in power system planning. Firstly, the factors influencing the load simultaneity factor in power system are introduced as well as the calculation and analysis methods of load simultaneity factor, and then the load simultaneity factor at all levels are calculated, which analyzes the accuracy of comprehensive load simultaneity factor when lacking part of low voltage data. Secondly, combined with spatial load forecasting and load characteristics, the calculation and analysis methods of the load simultaneity factor are proposed in urban power grid planning.

Key words: simultaneity factor; spatial load forecasting; load characteristics

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0038-04

0 引言

在电力系统中, 负荷的最大值之和总是大于和的最大值, 这是由于整个电力系统的用户, 每个用户不大可能同时在一个时刻达到用电量的最大值, 反映这一个不等关系的一个系数就被称为同时率。即: 同时率就是电力系统综合最高负荷与电力系统各组成单位的绝对最高负荷之和的比率。

$$\text{同时率}(\%) = \frac{\text{电力系统综合负荷}(\text{kW})}{\text{电力系统各组成单位的绝对最高负荷之和}(\text{kW})} \times 100\%$$

在电力系统规划设计中, 同时率是一个非常重要的指标, 它可以帮助规划人员对分区进行更准确的负荷预测。城市电网规划中采用空间负荷预测时, 各个分地块负荷值最后要合并叠加起来得到分区总的终期负荷值, 由于存在一个负荷同时率的问题, 对于不同类型的负荷不能直接把它们简单相加, 因此需要将不同类型的负荷按负荷特性曲线相加, 从而得到分区负荷值, 进而通过灰色预测法得到最大负荷。

1 影响同时率变化因素的定性分析

负荷同时率是电力负荷的特征之一, 也是电力系统负荷规划过程中的一个重要参数。负荷同时率是

小于等于 1 的正数, 其大小受经济社会发展、负荷构成、季节温度变化等因素的影响, 不同系统有不同的负荷同时率值。分析的主要目的是要对这些影响因素对负荷同时率变化的影响有一个综合定性的评估。

1.1 经济社会发展对同时率变化的影响

经济发展对同时率变化的影响主要体现在国民经济总量以及各产业结构, 而产业结构则通过其用电结构影响负荷同时率的变化; 社会发展则主要体现在城镇化率、人均可支配收入等。

1.2 负荷构成对同时率变化的影响

一个电力系统总是具有不同的负荷, 由于每种负荷使用范围和目的的不同, 各自的变化规律也不相同, 对负荷同时率有着不同的影响。负荷可以分为城市居民负荷、工业负荷、农村负荷以及其他负荷。

城市居民负荷具有经常的年增长以及明显的季节性波动和日变化的特点, 直接影响系统峰值负荷的变化, 但其影响程度取决于城市居民负荷在系统中所占的比重。在中国, 随着人民生活水平的提高, 电热器、空调、电冰箱等敏感于气候的家用电器日益广泛的应用, 使居民负荷变化对系统峰值负荷变化的影响越来越大。

相对来说, 工业负荷占总负荷比重较大, 且一般可视为受气候影响较小的负荷。一方面由于工业负荷本身基础很大, 另一方面由于三班连续生产, 因此

这类负荷变动较小,属于较稳定的负荷。

农村负荷主要体现在农业用电对系统负荷的影响,仅需要注意的是农忙期间,特别是夏季生产排灌用电,其时间不长,但负荷集中,容易造成用电紧张。

其他负荷所占比重较小,虽然也都有各自的不同特点,但对整个系统负荷影响不大。

1.3 季节温度变化对同时率变化的影响

季节温度变化等因素对负荷同时率的影响,主要体现在气象因素变化时对气象敏感负荷的影响,当温度升高时,气象敏感负荷随之上升;湿度、气压增大时,气象负荷下降;辐射强度和风速增大时,气象负荷增大。

气象敏感负荷随相对湿度变化的规律(其他气象条件不变):当相对湿度处于 40%~95%敏感区间时,气象敏感负荷随相对湿度的变化显著,随相对湿度的增大而减小。

气象敏感负荷随气压变化的规律(其他气象条件不变):当气压处于 99 500~101 500 Pa 敏感区间时,气象敏感负荷随气压的变化显著,随气压的增大而减小。

气象敏感负荷随风速变化的规律(其他气象条件不变):当风速处于 2~6 m/s 敏感区间时,气象敏感负荷随风速的变化显著,随风速的增大而增大。

气象敏感负荷随辐射强度变化的规律(其他气象条件不变):当辐射强度处于 1~4 J/m²敏感区间时,气象敏感负荷随辐射强度的变化显著,随辐射强度的增大而增大。

综合以上分析可以看出,经济社会发展、负荷构成、季节温度变化等因素主要通过影响负荷峰值和负荷稳定性来影响负荷同时率的变化。

2 现状负荷同时率的分析

2.1 各级负荷同时率的计算

由于城区配电电压等级为 220 kV、110 kV、10 kV 和 0.38/0.22 kV,逐步取消 35 kV 电压等级,并且无 0.38/0.22 kV 电压等级的负荷实测数据,此次针对 110 kV 变电站 10 kV 负荷的同时率、220 kV 变电站 110 kV 负荷的同时率、各分区中 220 kV 负荷的同时率和整个系统中各分区间负荷同时率进行分析。

某电力系统最大负荷同时率计算示意图如图 1 所示。

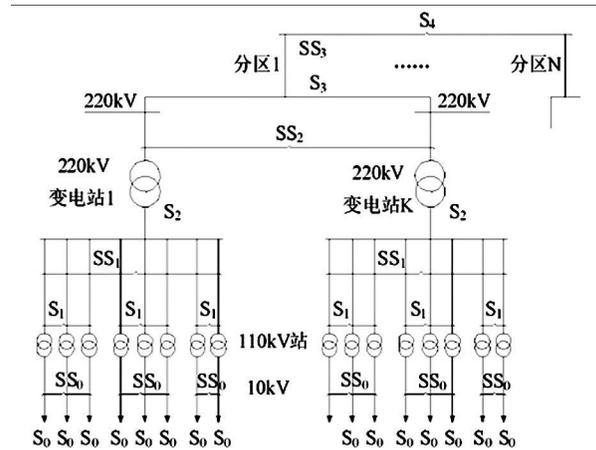


图 1 某电力系统最大负荷同时率计算示意图

图 1 中, S_0 为 110 kV 变电站 10 kV 侧一台变压器的最大负荷;

$\sum S_0$ 为一座 110 kV 变电站 10 kV 侧的最大负荷之和;

S_1 为一座 110 kV 变电站的综合最大负荷;

$\sum S_1$ 为一座 220 kV 变电站所供 110 kV 变电站的最大负荷之和;

S_2 为一座 220 kV 变电站所供 110 kV 变电站的最大综合负荷;

$\sum S_2$ 为分区中各 220 kV 变电站的最大负荷之和;

S_3 为分区中各 220 kV 变电站的最大综合负荷;

$\sum S_3$ 为各分区的最大负荷之和;

S_4 为各分区的综合负荷,全系统负荷。

负荷同时率可分为以下 4 级。

(1) 110 kV 变电站 110 kV 侧对 10 kV 的负荷同时率 T_1 为 $S_1 / \sum S_0$ 。

(2) 220 kV 变电站对 110 kV 变电站的负荷同时率 T_2 为 $S_2 / \sum S_1$ 。

(3) 分区内各 220 kV 变电站的负荷同时率 T_3 为 $S_3 / \sum S_2$ 。

(4) 各分区间的负荷同时率 T_4 为 $S_4 / \sum S_3$ 。

从 10 kV 起,层层分析,进行同级 24 h 负荷值相加,求出电力系统各组成单位的绝对最高负荷和综合负荷得到各级负荷同时率。

2.2 计算结果分析

可计算得到某电力系统最大综合负荷同时率 $T = T_1 T_2 T_3 T_4$ 。

由于缺少 380 V 电压等级的负荷资料,未能分析该电压等级的同时率 T_0 ,使综合负荷同时率 T 的值

偏高。

3 电力系统规划中负荷同时率的计算分析

3.1 空间负荷预测

3.1.1 分区及土地使用类的划分

以某城区为例,按城市总体规划,将该城区划分为 N 个分区,根据城市控制性详细规划每个分区又被细分为许多的小地块,对于每个小地块,其用地性质、占地面积以及容积率规划中已经做了详细选定。

各地块按规划中用地性质共分为 12 类,分别为商业文化体育用地 $C_1 \sim C_4$, 医疗文化用地 $C_5 \sim C_n$, 一类工业用地 M_1 , 二类工业用地 M_2 , 三类工业用地 M_3 , 仓储用地 W , 铁路用地 T_r , 港口用地 T_1 , 机场用地 T_2 , 市政公用设施用地 U , 居民用地 R , 其他用地 Y 。

3.1.2 地块的负荷计算

根据规划中的地块数据就能得出每个地块与规划相适应的终期负荷预测值。

$$L_i = S_i \times R_i \times P_i$$

式中, L_i 为第 i 个地块的终期负荷预测值; S_i 为第 i 个地块的用地面积; R_i 为第 i 个地块的建筑容积率; P_i 为第 i 个地块的终期负荷密度。 S_i 和 R_i 都可以直接在分区控制性详细规划资料中取得,而 P_i 是根据这个地块的用地性质取值,不同的用地对应于不同的终期负荷密度值。

3.2 负荷特性分析

如 3.1 节所述,各地块按用地性质共分为 12 类,负荷数据的筛选可按下面步骤进行^[1, 2]。

(1)剔除各类用户星期六及星期日的的数据。

(2)尽可能用星期三及星期四的数据。

(3)在星期三及星期四的数据量不够大时,再利用星期五的数据。

(4)考虑到某地区季节差异较小的影响,以夏季时段为代表。

这样就可保证获得较为典型的负荷特性。由于所提供的资料数据量很大,因此所求得的负荷特性具有统计规律。

每个用户每隔半个小时就有一个负荷记录数据,每个用户每天有 48 个负荷点,即 $P = (P_0, P_{0.5}, P_1 \sim P_{2.5}, P_{2.5.5})$, 这 48 个负荷点事实上就是一个离散的负荷特性,这里称之为负荷特性向量,简称负荷特性,下面所提到的负荷特性均是指这种含有 48 个负荷点的

负荷特性向量。将属于同一类的用户各天的负荷特性相加求和(即将对应的负荷点相加),再将所得结果进行归一化处理(即将相加后所得的 48 个负荷点同时除以最高负荷点),可得到这一类用户的单位负荷特性,将此单位负荷特性的 48 个负荷点用直角坐标描述出来,并用折线连起来就得到这类用户的单位负荷特性曲线。

3.3 负荷预测结果

3.3.1 分区负荷预测结果

设第 i 类负荷为 L_i , 负荷特性为 K_i (是一向量), 第 j 类负荷为 L_j , 负荷特性为 K_j 。将这两类负荷按负荷特性相加即为 $L_{sum} = L_i \times K_i + L_j \times K_j$, 再将向量 L_{sum} 的 48 个分量中的最大分量作为第 i 类负荷 L_i 与第 j 类负荷 L_j 按负荷特性相加的和,这实际上也就是考虑了同时率的问题。利用上述的不同类负荷的典型负荷特性曲线,把每一个地块的负荷按其相应的负荷特性曲线分成 48 个时段,然后在每一个时段上对各个地块的负荷进行相加,这样就能得出一条新的合并后的分区日负荷曲线。那么这条新曲线的最大值就是所要求的分区终期负荷预测值。

3.3.2 最大负荷预测结果

根据负荷特性预测了 N 个分区的负荷,由于分区负荷同时率变化不大,参考 2.1 节中的分区负荷同时率 T_i , 利用灰色预测法预测出未来的分区负荷同时率 T 从而得到城市最大负荷: $L = T \times (L_{sum 1} + L_{sum 2} + \dots + L_{sum n})$ 。

4 结 语

负荷同时率受诸多因素的影响,不同系统有不同的负荷同时率值。以往,受运行数据采集方式的限制,分析计算得到的负荷同时率值,与实际值相比误差较大,在做负荷规划时,数据的误差直接影响到变电容量的计算进而影响变电站布点。

前面对负荷同时率的现状和预测进行了详尽的描述,通过现状计算和分析,说明负荷同时率可以得到较准确数值。提出了负荷同时率在城市电网规划中的应用步骤,把负荷同时率的重点放在与空间负荷预测及负荷特性相结合的方法计算上,同时采用灰色预测法预测分区负荷同时率,进而得出最大负荷,使得负荷同时率的计算更加准确合理。

参考文献

- [1] 孙旭,任震.空间负荷预测在城市电网规划中的应用[J].继电器,2005,33(14):79-81.
- [2] 程浩忠,张焰.电力网络规划的方法与应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002,27-53.
- [3] 何善瑾.上海电力系统最大负荷同时率分析[J].供用电,2008,25(1):13-15.
- [4] 朱振伟,方鸽飞,王国福,等.电网夏季气象敏感负荷特性分析[J].华东电力,2008,36(9):53-58.
- [5] 杜栋,庞庆华.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [6] 杨志欣.基于模糊-神经网络的电力系统短期负荷预测.[D].广东:广东工业大学,2005.
- [7] Willis H L. Power Distribution Planning Reference Book [M]. Marcel Dekker Inc 1997.
- [8] Willis H L Northcote Green J E D. Spatial Electric Load Forecasting [J]. A Tutorial Review Proceeding of the IEEE, 1983, 71(2): 1215-1220.
- [9] Chiclana F Herrera F Herrera Viedma E. Integrating Three Representation models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations [J]. Fuzzy Sets and System, 1998, 33-48.

(收稿日期 2010-09-15)

(上接第 37 页)

参考文献

- [1] 杨洪耕,王磊.基于拉盖尔多项式的非线性负荷谐波发射水平估计[J].中国电机工程学报,2005,25(7):81-85.
- [2] A. McEachern W. M. Grady W. A. Moncrief et al Revenue and Harmonics: An Evolution of Some Proposed Rate Structures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 474-482.
- [3] 龚华麟,肖先勇.非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(8):30-34.
- [4] 周林,张凤,栗秋华,等.配电网中谐波源定位方法综述[J].高电压技术,2007,33(5):103-108.
- [5] Wilsun Xu Yilu Liu. A method for Determining Customer and Utility Harmonic Contribution at the Point of Common Coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [6] 刘秀玲,王洪瑞,王永青,等.临界阻抗法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统自动化,2007,31(14):76-80.
- [7] H Yang P Pirotte A Robert Harmonic Emission Levels of Industrial Loads Statistical Assessment [C]. CIGRE Conference on Large High Voltage Electric Systems Paris France 1996, 36-306.
- [8] 张安安,杨洪耕.基于畸变波形同步分层估计谐波阻抗的探讨[J].电力系统自动化,2003,27(9):41-44.
- [9] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等.基于主导波分量筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2010,30(4):22-27.
- [10] 车权,杨洪耕.基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(4):39-42.
- [11] 张巍,杨洪耕.基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(6):50-53.
- [12] 黄舜,徐永海.基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的估计方法[J].中国电机工程学报,2007,27(1):93-97.
- [13] 刘凡,司马文霞,车权,等.基于改进 Madaline 网络的谐波发射水平估计[J].高电压技术,2006,32(10):91-93.
- [14] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等.基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J].电力系统自动化,2009,33(7):27-31.
- [15] T. Pfajfar B. Blazic I. Papic. Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 425-433.
- [16] 刘秀玲,王洪瑞.电网谐波阻抗的测量及其修正[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(2):55-59.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC) Subcommittee 77A. Electromagnetic Compatibility (EMC) - part 3-6: Limits - assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems [R]. United Kingdom: British Standards Institution, 2008.
- [18] E. Thunberg L. Soder A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [19] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:北京中国人民大学出版社,2001,18-28.
- [20] 程浩忠,艾芊,张志刚,等.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006,229-230.

(收稿日期:2010-10-19)

关于 RCS-931 超高压输电线路保护启动元件的探索

夏 天, 吴俊美

(德阳电业局变电检修中心继电保护所, 四川 德阳 618000)

摘 要: 启动元件是构成现代微机保护装置的一部分, 提高启动元件的动作可靠性和快速性, 有利于提高系统的暂态稳定性。介绍了 RCS-931 超高压输电线路保护启动元件基本情况, 从某 500 kV 变电站一次保护装置光纤纵差误动探讨了装置技术说明书中未阐明的一种启动元件“内部远跳”, 强调了启动元件对于微机保护的重要性。最后, 提出了避免出现此种误动的措施。

关键词: 光纤纵差; 启动元件; 误动

Abstract: The start-up components are a part of the modern microcomputer protection device. Enhancing its reliability and rapidity is benefit for improving the system transient stability. The basic conditions about start-up components of RCS-931 for the extra high voltage (EHV) transmission line are introduced. A start-up component called the internal long jump which is not introduced in the technical specification is studied in a malfunction of fiber-optical longitudinal differential protection in a 500 kV substation. The importance of the start-up components for the microcomputer protection is stressed. At last, the measures to avoid such malfunctions are proposed.

Key words: fiber-optical longitudinal differential protection; start-up component; malfunction

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0042-02

0 引 言

为保证电网安全稳定运行, 在线路任一点发生故障时, 要求线路保护能快速、可靠跳闸, 超高压线路一般配置两套全线速动的纵联保护作为主保护。为防止继电保护拒动, 在配置纵联保护通道时, 考虑到光纤通信传输突出的优点, 大部分新建超高压线路保护都至少采用了一套光纤通道。RCS-931 系列超高压线路成套保护装置 (以下简称 RCS-931) 作为南瑞继保电气有限公司推出的主力产品, 在全国广泛使用。

对于保护装置而言, 启动元件动作开放出口继电器正电源, 主要起到了在系统正常运行时闭锁保护, 而在系统发生异常时, 使微机保护进入故障处理程序的作用, 从而提高了装置工作的可靠性。启动元件在整个超高压线路微机保护中占据非常重要的地位。RCS-931 概括起来有两类启动元件, 第一类启动元件仅使用本侧电气量或开关量, 第二类启动元件需使用对侧信息。在 RCS-931 技术说明书中详细描述了 6 类启动元件, 然而某 500 kV 变电站一起光纤纵差保护动作引起了对 RCS-931 保护装置总启动元

件的探索。

1 动作概况

某 500 kV 1 号变电站线路运行方式如图 1。

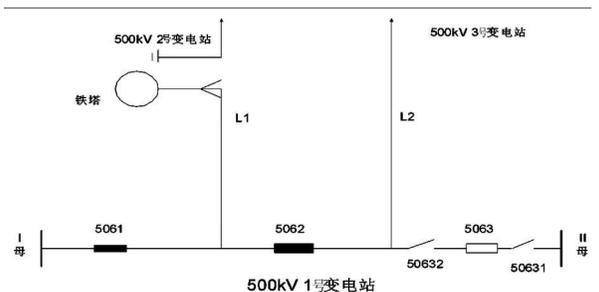


图 1 线路运行方式图

L1 线在铁塔处解开, 线路侧接地。5061、5062 开关合闸位置, 5063 开关分闸位置。L1 线保护配置为 RCS-931 与 PSL-602G。为保证 L1 线铁塔段故障时能快速切除故障, L1 线路保护 RCS-931 投入运行。500 kV 2 号变电站侧对 L1 线路保护进行调试时, 造成 500 kV 1 号变电站 L1 线路保护 RCS-931 光纤电流纵差动作, 跳开 5061、5062 开关, 造成 500 kV 3 号变电站与 500 kV 1 号变电站解环。

动作报告如表 1。

表 1 动作报告表

| 名称 | 结果 |
|------------|--------|
| 故障相别 | C |
| 动作相对时间 /ms | 00005 |
| 动作元件 | 电流差动元件 |
| 故障相电流 /A | 000.00 |
| 故障零序电流 /A | 000.00 |
| 故障差动电流 /A | 014.11 |

2 动作过程分析

L1 线 500 kV 1 号变电站侧无故障相电流、故障零序电流, 可知 L1 线路铁塔段无故障, 故障差动电流完全由 500 kV 2 号变电站侧保护装置提供, 并且高达 14.11 A, 超过差动电流定值。RCS-931 系列光纤纵差保护动作出口的充分条件为: ①本侧启动元件动作; ②本侧差动元件动作; ③收到对侧“差动动作”允许信号。动作逻辑如图 2。

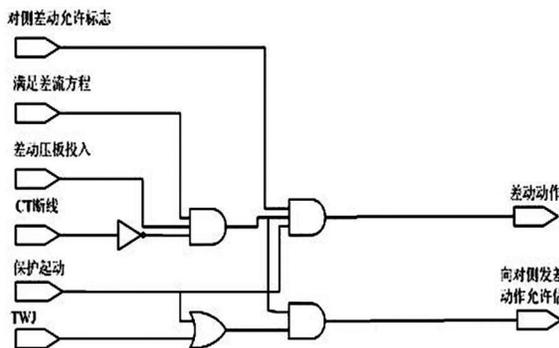


图 2 动作逻辑图

RCS-931 系列保护启动元件有 6 种: ①电流变化量启动; ②零序过流元件启动; ③位置不对应启动; ④低电压元件启动; ⑤对侧远跳信号启动; ⑥过流跳闸启动。

启动元件 1、2、6 为电流量启动元件, 该电流量为本侧线路电流或零序电流。启动元件 3 在本侧开关偷跳时动作; 启动元件 4 发生区内三相故障, 弱电源侧电流启动元件可能不动作, 本侧收到对侧的“差动动作”允许信号, 若差动元件动作相关相、相间电压小于 65% 额定电压, 低电压元件启动。启动元件 5, 当本侧收到对侧的“远跳”信号且定值中“远跳受本侧控制”置“0”时动作。

本侧故障相电流及零序电流为零, 故启动元件 1、2、6 不动作。本侧无故障, 三相电压正常, 虽然收到了对侧的允许信号, 但由于本侧三相电压正常, 启动元件 4 不动作。本侧开关未偷跳, 启动元件 3 不动

作。未收到远跳信号同时本侧定值“远跳受本侧控制”置“1”, 启动元件 5 不动作。按图 2 动作逻辑推断, 500 kV 1 号变电站线路 L1 保护装置启动元件不动作, 光纤纵差保护动作条件不满足, 不能动作出口跳闸。可见, 本次 RCS-931 光纤纵差保护动作, 说明 RCS-931 系列应当还有另外一种启动元件。

3 试验方案

根据以上分析, 提出下面两种试验方案对保护进行检查。

方案 1: 两侧保护仅投入“光纤纵差”, 两侧开关合位。

500 kV 2 号变电站侧模拟单相接地故障, 500 kV 1 号变电站侧加入正常电压。500 kV 1 号变电站侧装置动作情况为: ①本侧启动元件不动作; ②本侧差动继电器动作, 差动电流为对侧所加故障电流; ③收到 500 kV 2 号变电站侧“差动动作”允许信号。500 kV 2 号变电站侧装置动作情况为: ①本侧启动元件动作; ②本侧差动继电器动作, 差动电流为本侧所加故障电流; ③未收到 500 kV 1 号变电站侧“差动动作”允许信号。两侧差动保护均不动作, 报“长期有差流”告警信号。

方案 2: 500 kV 2 号变电站侧保护投入主保护及后备保护, 500 kV 1 号变电站投入主保护, 两侧开关合位。

500 kV 2 号变电站侧模拟单相接地故障, 500 kV 1 号变电站加入正常电压。500 kV 2 号变电站侧动作元件为接地距离元件和电流差动元件; 500 kV 1 号变电站侧动作元件为电流差动元件, 与本次误动报文相同。动作顺序为: 在 500 kV 2 号变电站侧接地距离元件动作后, 两侧电流差动元件同时动作。

比较两种试验方案, 关键是 500 kV 1 号变电站启动元件能否动作。若能动作则 500 kV 1 号变电站侧差动保护动作同时向 500 kV 2 号变电站侧发“差动动作”允许信号, 保证 500 kV 2 号变电站侧差动保护动作。方案 1 与方案 2 区别在于 500 kV 2 号变电站侧保护装置是否动作。当 500 kV 2 号变电站侧后备保护动作后, 两侧电流差动元件立即动作。可见, RCS-931 系列保护存在另外一种启动元件为“保护动作信号”, 该信号与“远跳”一样, 通过光纤通道传

(下转第 60 页)

支架更换、“3+1”插花、倒 V 串等一系列防冰改造工程,对图 3 中秭归、长阳等重冰区特殊区段进行了相应的防冰改造,改造后三峡出线整体防冰能力得到了有效提升。

2 实时气象灾害监测、预报、信息处理与显示网页式服务系统的建立

在充分分析上述气候特征的基础上,与气象部门合作,进行了相关软件设计和开发,建立了一套实时气象灾害监测、预报、信息处理与显示网页式服务系统。系统包括气象信息传输处理、气象数据库管理、灾害性天气预报和气象信息 WEB 发布等部分。系统运行稳定可靠,资料处理准确及时,自动监测能力较强,自动化程度高。

同时建立信息传输网络,气象信息自动监测入网,实时查询;充分利用天气雷达、气象卫星全方位、立体实时监测获取的详尽的气象信息,弥补测站分布不足;开发实时气象信息入网组织、显示网页,数据动态管理。

3 主要成果和结论

①在系统性地收集整理三峡地区超高压输电线

路沿线气象资料的基础上,从三峡地区超高压输电线路附近气候概况、分时段气候特征、输电线路所经地区对输电线路有影响的主要气象灾害等诸多方面开展分析研究,形成专业的三峡地区气候报告,得出了多项超高压输电线路有实用价值的结论。

②建立了信息应用平台,实现了气象信息自动监测入网,实时查询等功能;充分利用天气雷达、气象卫星和自动气象站组成的立体气象监测网详尽的气象信息,以及收集传输沿线区域温度、降水、风向、风力和闪电定位为主的实时气象资料。

③基于宜昌市气象局已经建立的并行机群和 MM5 中尺度数值模式,建立了一套适合三峡区域的预报系统。输电线路沿线灾害性天气预报软件能定时启动 MM5 中尺度预报模式运行结果,实时从数据库自动获取数据,预报结论自动输出并存储到数据库,通过系统网页平台显示使用。

参考文献

- [1] 刘俊国,等.最优化 ASP.NET[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [2] 启明工作室. ASP.NET+SQLserver 网络应用系统开发与实例[M].北京:人民邮电出版社,2005.

(收稿日期:2010-10-05)

(上接第 43 页)

向对侧。当本侧保护装置动作后,立即向对侧发送“保护动作信号”,对侧保护装置收到该信号后立即去启动保护装置。为了区分,则把它定义为“内部远跳”。

本次保护误动原因为:500 kV 2 号变电站侧后备保护动作,向 500 kV 1 号变电站发送“内部远跳”,500 kV 1 号变电站保护收到“内部远跳”后,差动保护动作同时向 500 kV 2 号变电站侧发送“差动动作”允许信号,500 kV 2 号变电站侧差动保护随即动作。该启动元件类似于高频保护中的“本保护动作停信/发信”元件,作用在于只要对侧保护装置动作,立即通过光纤通道向本侧发送“内部远跳”信号启动本侧保护,保证本侧光纤纵差保护动作出口切除故障。

4 总结

此次保护误动,暴露了一些问题。对保护装置的

一些隐藏逻辑还未掌握,需要在保护装置调试时细心观察,及时发现动作逻辑与保护技术说明书的差异。光纤保护需要两侧保护进行配合,特别是跨地区线路,保护人员分属不同单位,可以加强沟通,加强通道联调。为了避免发生类似误动,可以向调度部门申请退出光纤纵差保护,利用距离 I 段快速切除故障;也可以投入光纤纵差保护并将两侧保护装置通道自环,保证了线路 L1 铁塔段故障时可以快速切除故障,同时也不受对侧的影响,增强了电网供电可靠性。

参考文献

- [1] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-931 型超高压线路微机保护装置技术和使用说明书[Z].

(收稿日期:2010-10-18)

分布式发电对配电网继电保护和重合闸的影响

刘 林, 李建兵, 刘靖涛, 甘立勇

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:近年来,分布式发电技术的研究越来越受到世界各国的重视。大量分布式发电的并网运行将深刻影响现有配电网的结构、以及配电网中短路电流的大小、流向及分布。主要分析配网故障时,分布式电源对继电保护的影响,以及与自动重合闸之间的配合问题。

关键词:分布式发电;配电网;继电保护;重合闸

Abstract: For the past few years more and more countries take distributed generation into account. However, running with distributed generation will affect the structure of distribution network as well as the magnitude, the flow direction and distribution of short-circuit current in distribution network. The influence of distributed generation on relay protection is analyzed when faults occurring in distribution network, as well as the coordination between distributed generation and reclose in distribution network.

Key words: distributed generation (DG); distribution network; relay protection; reclose

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0044-02

0 引 言

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,对能源的需求也在不断增加,发展可再生能源将是大势所趋。提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的利用,是中国经济和社会快速发展过程中必须解决的问题。

分布式发电技术是一门新兴技术。目前,大电网与分布式发电相结合被世界许多能源、电力专家公认为是能够节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式,是 21 世纪电力工业的发展方向^[1]。但同时,由于分布式电源的接入,将给传统的配电网带来一系列的技术问题。

1 分布式发电概念

所谓的分布式发电(distributed generation, DG)通常指光伏发电、风能发电、燃料电池发电,燃气轮机、微型燃气轮机等以天然气或氢气为燃料的新型发电技术。近年来,随着竞争性的零售电力市场的出现和新型分布式电源技术研究的突破性进展,又引起了对分布式电源新一轮的更广泛关注,分布式电源与电力系统的优势互补使得其在电力行业得以迅速的渗

透。

2 分布式发电对配电网继电保护影响

由于分布式电源的引入,使得配电系统从传统的单电源辐射式网络变为双端或多端有源网络,导致故障发生时原有配电网电流保护出现保护范围过大、误动、灵敏度降低等问题。

2.1 配电网保护的配置情况

配电网馈线保护一般配置为传统的三段式电流保护,即电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护。电流速断保护是反映电流升高而不带时限动作的一种电流保护,它是按照躲开下一条线路出口处最大短路电流来整定的,不能保护线路的全长。限时电流速断保护范围不超出下一条线路速断保护的范,而动作时限则比下一条线路的速断保护高出一个时间阶段。如图 1 所示,根据系统配置要

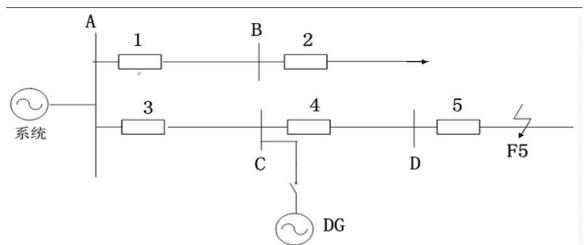


图 1 分布式电源使保护范围过大

求, 电流速断保护的动作为 0 s 限时电流速断保护的动作为 0.5 s 分布式电源投入延时 0.5 s

2.2 分布式电源使保护范围过大

如图 1 所示, F5 处发生短路故障。在 DG 接入之前, 保护 4 感受到的是系统提供的故障电流, DG 接入之后, 保护 4 将感受到 DG 提供的助增电流, 这样保护范围外短路时保护 4 仍然感受到较大电流, 导致本线路保护范围过大。

2.3 分布式电源引起所在线路保护误动作

如图 2 所示, 分布式电源所在馈线 F4 处短路故障时, 由于 DG 的助增作用, 故障点的短路电流增大, 造成各个保护的保护区延伸, 失去选择性。由于 DG 的接入, 使得流过保护 4 的电流比未接入 DG 时增大, 并且随着 DG 容量的增加, 保护检测到的电流有可能大于整定值, 使得保护误动作。

相邻馈线 F1 处发生短路故障时, DG 通过母线向故障点提供反向短路电流。DG 的存在不仅使得故障点的电流增大, 该馈线上的保护超范围误动作, 而且有可能引起 DG 所在馈线保护的误动作。由于保护 3 并不具有识别故障方向的能力, 当相邻线路发生三相短路故障时, 保护 3 将检测到 DG 提供的反向电流, 此时保护 3 可能误动, 造成 DG 所在的正常运行线路中断供电。故障点离母线越近, 短路电流越大, 保护越有可能发生误动, 造成 DG 所在线路的无故障跳闸。

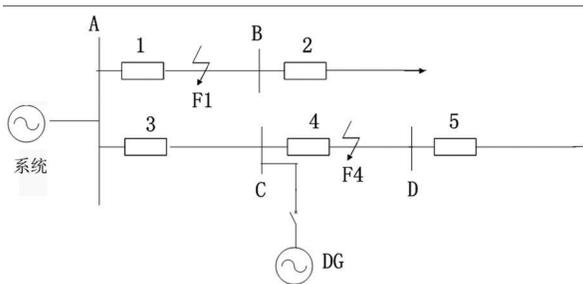


图 2 分布式电源降低保护灵敏度和引起所在线路保护误动作

2.4 分布式电源降低保护灵敏度

如图 2 所示, DG 引入之前, 故障点的短路电流只由系统提供, DG 引入之后, DG 和系统都会对故障点提供短路电流。如图 3 和图 4 所示的仿真波形, 线路 F4 在 0.2 s 发生短路故障, 持续时间为 0.05 s 时, 由于有 DG 的接入, 它将向故障点提供短路电流。因此与原配电网相比, 在接入 DG 的情况下, 故障点上游保护 3 检测到的故障电流比未接入 DG 时小, 灵敏度将变低。随着 DG 容量的增大, 保护 3 检测到的故

障电流迅速减小, 过电流保护灵敏度将明显降低。

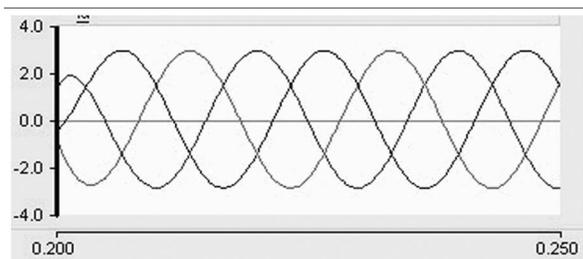


图 3 F4 故障时, 流过保护 3 的电流 (未接入 DG)

3 分布式发电对自动重合闸的影响

在电力系统中发生的故障大多数都是瞬时性故障, 因此重合闸在电力系统中应用得非常广泛。重合闸的动作时限一般为 0.5 s 最短可以达到 0.2 s 这样就加大了故障时 DG 系统的解列难度, 若增加自动重合闸时限, 则会降低供电可靠性, 两者之间存在明显的矛盾。文献 [2] 分析了以“重合器 + 分段器”为主构成的配电网馈线自动化的几种方式, 提出了一种新的实用的配电方式, 既可以减少故障时的停电时间和短路电流对线路的冲击次数, 又易于实现保护时间的配合。

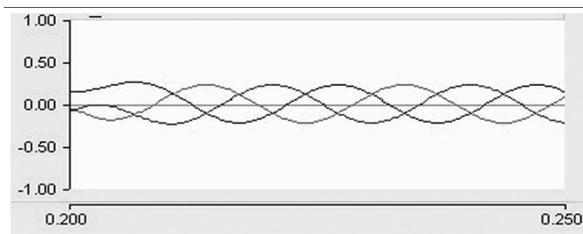


图 4 F4 故障时, 流过保护 3 的电流 (接入 DG)

分布式电源接入后, 若故障出现在系统电源进线段, 则有可能在自动重合闸动作时造成非同期重合闸, 会对配电网系统、特别是对分布式电源产生冲击和破坏 [3]。若故障点位于非系统电源进线处, 分布式电源和系统电源仍然保持电气联系, 则自动重合闸动作时不存在非同期重合闸的问题, 如果故障能够快速切除则分布式电源有可能连续运行, 此时可以减少 DG 机组不必要的切除。文献 [4] 分析了自同期重合闸在分布式发电并网系统中的应用可行性, 通过分析和仿真, 得出了关于以下几点结论。

(1) 自同期合闸时, 对于次暂态电抗相近的分布式电源, 随着容量的增加, 冲击电流越小; 分布式电源接入点距离变电所低压母线越远时, 冲击电流越小,

(下转第 79 页)

(2)干扰源成因分析:变电站的干扰是复杂多变的,很难像拿出故障录波来证明故障电流的存在一样有力的证据来证明干扰的存在。但是可以通过现象去分析和判断。①保护人员对主变压器本体重瓦斯启动跳闸回路进行了认真检查排除了回路接线错误的可能性。②干扰是在 110 kV 母线流过故障电流时出现,而非电量保护控制电缆刚好处在 110 kV 母线底下电缆沟。当 110 kV 母线流过故障电流时将在母线周围产生磁场,对周围的回路进行切割产生感应电,致使非电量保护用的电缆芯产生暂态电压,使重瓦斯保护误动作。③第一次和第二次故障主变压器本体重瓦斯动作的情况也不同,第一次是信号掉牌及跳 901 开关。第二次只是信号掉牌,与两次故障电流的大小有着一定的联系。假如是回路有错误,应该不会出现前后不同的情况。

4 技术整改措施

(1)更换非电量保护出口继电器插件,因为出口继电器动作电压不满足规程要求(规程要求经长回路的出口继电器的动作电压要求大于 50%额定电压小于 70%额定电压)。

(2)做好控制电缆的屏蔽层接地。

(3)更换插件后,按照新投运设备的要求,继电保护人员重新对非电量保护装置做全面的检验,尤其

(上接第 45 页)

采用自同期合闸可行性越高,多个分布式电源接入系统,除距离变电所低压母线最近的分布式电源冲击电流较大,不推荐采用自同期合闸外,其余位置的 DG 都适合采用自同期合闸;

(2)对于逆变型分布式电源,并网逆变器很关键,电流瞬时值反馈可以实现合闸并网条件;

(3)采用“后加速”方式时,从技术的角度是可以实现的,但将使配电网的保护变得复杂。

4 结 论

分布式电源接入配电网后势必会改变配电网的拓扑结构和潮流方向,使原来简单的单电源辐射型网络变成复杂的多电源网络。现有的基于单端电源系统设计的配电系统保护和自动重合闸装置也必须

是干扰脉冲对主变压器重瓦斯保护影响的试验,并进行开出传动试验。检验合格后,非电量重瓦斯保护方可投入运行。

5 结 论

本次重瓦斯保护动作是受到 110 kV PS 线接地故障的干扰,非电量保护用的电缆芯产生暂态电压而引起的。对本次特殊故障情况下保护动作行为的分析,有益于今后类似故障情况下保护动作行为的快速准确判断,具有一定的借鉴价值。

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [3] 李火元. 电力系统继电保护与自动装置 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [4] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护技术问答(第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编(第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.

(收稿日期: 2010-09-09)

做出相应的调整,否则由于分布式电源的存在必定使保护出现拒动、误动等问题,影响保护的选择性和灵敏性,甚至对配电系统及设备的安全稳定运行造成破坏。

参考文献

- [1] 朱成章. 发展直燃式空调机对电力工业的作用 [J]. 华东电力, 2000, 28(5): 27-28.
- [2] 孙福杰,何俊佳,邹积岩. 基于重合器和分段器的 10 kV 环网供电技术的研究及应用 [J]. 电网技术, 2007, 24(7): 33-36.
- [3] 袁超,吴刚. 分布式发电系统继电保护技术 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 100-102.
- [4] 谢昊,卢继平. 重合闸在分布式发电条件下的应用分析 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007(2): 30-33.

(收稿日期: 2010-10-15)

配电网中接地故障检测新思路

王 智

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:提出一种新的适用于中性点不接地或非直接接地配电系统的接地故障检测算法。该方法是基于故障时由暂态电压和暂态电流计算而得到的暂态阻抗,然后根据暂态阻抗计算出的接地电容来实现接地故障的检测。利用 Matlab/Simulink 仿真,模拟了 3 种不同故障条件下的仿真过程,验证了该方法的可行性。最后阐述了测量误差减小的方法以及判定故障整定值的确定。

关键词:配电系统;暂态阻抗;接地电容;接地故障

Abstract: A new algorithm of earth fault detection is proposed which is suitable for neutral point unearthed or indirectly earthed distribution system. This method is based on transient impedance which is calculated by transient voltage and transient current. Then the detection of earth fault is realized using earth capacitance calculated based on transient impedance. The simulation process is under three different fault conditions by using Matlab/Simulink. The results prove that the method is feasible. At last, a method is proposed to overcome the errors and the setting is determined if the feeder is faulted or not.

Key words: distribution system; transient impedance; earth capacitance; earth fault

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0046-03

在配电网系统中单相接地故障发生的概率很高,当中性点不接地系统中发生单相接地时,故障相的对地电容被短路,故障点流过全系统对地电容电流^[1],单相接地故障的电流值主要取决于接地电容的大小。当发生单相接地后,故障相对地电压降低,非故障相对地电压升高,暂态电容电流由两部分组成:故障相放电电容电流和非故障相充电电容电流。前者衰减很快,其振荡频率可高达数千赫兹。后者衰减较慢,其振荡频率也较低,仅数百赫兹。前者的幅值很小,仅为后者幅值的 5%~10%^[2-3]。当中性点不接地系统中发生单相接地时,故障电流很小,可能会减小传统继电器的灵敏度。然而暂态电容电流提供了可能的故障信息,可以被用来作为基于暂态信息的故障检测。因此,通过测量暂态电容的值可以判断线路是否发生了接地故障。单相接地暂态电流的分布如图 1 所示。

换等^[4,5]。通过上述变换都可以变换为:零模量、第 1 模量、第 2 模量。这 3 种模变换的零模量都是相同的,其零模量变换的表达式如下。

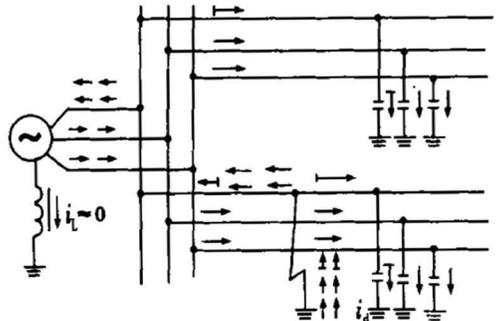


图 1 单相接地暂态电流分布图

$$v(t)_0 = \frac{1}{3} [v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)] \quad (1)$$

$$i(t)_0 = \frac{1}{3} [i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)] \quad (2)$$

当线路正常运行时,电压和电流的零模量值为零。反之,线路发生接地故障时,电压和电流的零模量值不再为零,因而可以利用其作为接地故障的判断依据。

1.2 仿真模型的建立

为了验证该方法的可行性,采用图 2 所示系统仿真模型进行仿真说明。用 Simulink 对图 2 所示的配电网进行仿真,并用 Matlab 进行算法的验证。

1 基于暂态阻抗的接地故障检测

1.1 相模变换在暂态保护中的应用

在电力系统中三相线路之间存在着复杂的电磁耦合关系,为了简化计算可以利用相模变换技术等等效成 3 个独立的模量计算。目前在继电保护中常采用的变换有:Clark 变换、Karrenbauer 变换、W edepohl 变

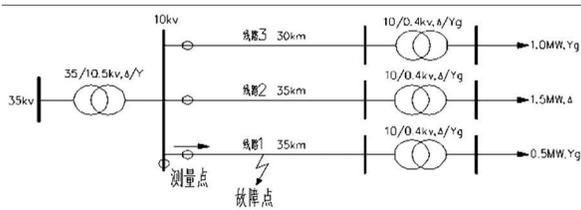
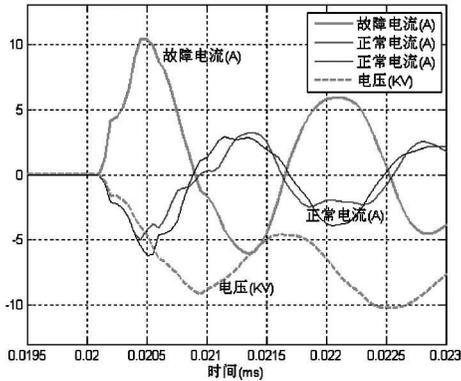


图 2 仿真的配电网



(故障时刻 20 ms 1 Ω 故障电阻, 42.9% 故障距离)

图 3 测量点电压和电流零模量的波形

通过 Simulink 对图 2 所示的配电网进行仿真后得到测量点的电压和电流的零模量波形如图 3 所示。由图 3 可知,所有的非故障线路的电流零模量波形基本上是相同的,但是故障线路的电流零模量波形就完全不同了。线路发生接地故障后,暂态发生在其随后的几个毫秒内。在所有不同的故障条件下(不同的故障时间、故障电阻和故障距离),通过仿真的结果观察可以得到:一个 8 ms 的暂态窗口足可以提取出暂态频率。由 powergui 模块中的 FFT(快速傅里叶变换)分析可知,暂态主频为 625 Hz 即暂态的主周期为 1.6 ms。在此周期内,计算电压和电流的零模量值,并由电压和故障电流的零模量比值计算出暂态阻抗。由于正弦信号波形的平均值为零,所以采用信号的平均值以消除更高频率信号的影响。为了确保极性相同,在这里只计算信号在此周期内前半周期的平均值^[6],其平均电压、平均电流、平均阻抗的计算公式如下所示。

$$V_0 = \frac{\sum_{k=1}^N v_{0,k}}{N} \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{\sum_{k=1}^N i_{0,k}}{N} \quad (4)$$

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (5)$$

其中, $v_{0,k}$ 为采样时刻 k 时的瞬时电压零模量值,由式 (1) 计算可得, $i_{0,k}$ 为采样时刻 k 时的瞬时电流零

模量值,由式 (2) 计算可得, N 为前半周期的采样个数,仿真中的离散采样周期为 $50 \mu s$ 。

由于故障电流是由流过其他未发生接地故障的并联线路的接地电容电流组成,所以计算暂态阻抗的大小主要取决于其他未发生接地故障的并联线路的接地电容^[6],接地电容的大小取决于线路的类型和长度。网络中的其他阻抗比接地电容小得多,因而可以被忽略。

因此,对于故障线路,计算阻抗就等于其他未发生接地故障的并联线路的容抗;而对于正常线路,计算阻抗就等于其线路本身的接地电容的容抗。根据图 1 和图 2 可知,由于故障电流的方向和测量的方向相反,所以故障线路的计算阻抗为负值,这也验证了方向性技术。

所提出的算法是基于接地电容的计算,根据暂态主频和计算阻抗,由式 (6) 可以计算出接地电容。

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f Z_0} \quad (6)$$

其中, f 为暂态主频; Z_0 为由式 (5) 计算出的平均阻抗。

对于图 3 所示的仿真波形,其各计算值见表 1 (暂态主频 $f = 625 \text{ Hz}$ 电压 $V_0 = -4.937 \text{ kV}$)。

表 1 各条线路各电气量计算值

| | 故障线路 1 | 正常线路 2 | 正常线路 3 |
|--------|--------|--------|--------|
| 电流 /A | 5.923 | -3.294 | -2.624 |
| 阻抗 /kΩ | -0.834 | 1.499 | 1.882 |
| 电容 /μF | -0.306 | 0.170 | 0.135 |

由于该算法存在一些误差,比如:忽略了网络的其他阻抗、采样频率的影响、放电暂态频率的影响,所以计算出的电容并不是很精确。为了减小这些误差,提出了使用计算电容和线路总电容的比值作为线路是否发生故障的判据,其计算式如下。

$$K = \frac{C_{0,f}}{C_{0,z}} \quad (7)$$

电容是和线路的长度成正比的。本仿真模型中,各线路的长度分别为 35 km、35 km、30 km,总长度为 100 km,因此,可以算出各线路分别在正常和故障条件下的比值 K (见表 2)。

表 2 各线路在正常和故障条件下的比值 K

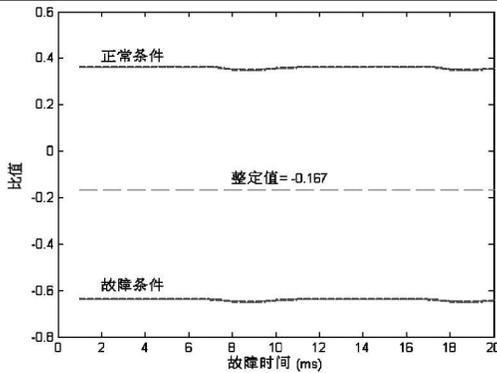
| | 线路 1 | 线路 2 | 线路 3 |
|------|-------|-------|-------|
| 正常条件 | 0.35 | 0.35 | 0.30 |
| 故障条件 | -0.65 | -0.65 | -0.70 |

对于同一线路而言,正常条件下和故障条件下比

值的模之和等于 1。本仿真模型中,由计算可知线路的总电容为 $0.475 \mu\text{F}$,通过该算法可以计算出线路 1 在正常条件下的比值为 0.358 在故障条件下的比值为 -0.643 。由上述各线路分别在正常和故障条件下的比值 K 可得,正常条件下的平均比值为 0.333,故障条件下的平均比值为 -0.667 。对于中性点非直接接地的情况,暂态情况基本上和中性点不接地的情况一样。

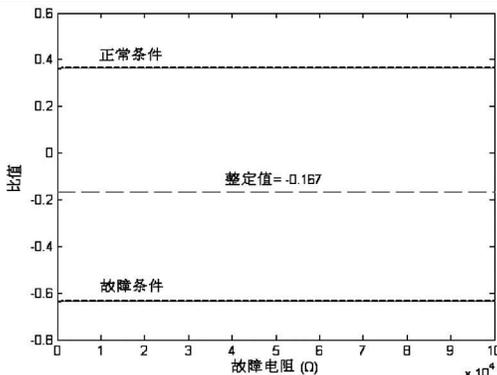
2 结果分析和整定值的确定

图 4 为线路 1 在正常和故障条件下的比值随故障时刻变化的波形,图 5 为比值随故障电阻变化的波形,图 6 为比值随故障距离变化的波形。



(1Ω 故障电阻, 42.9% 故障距离)

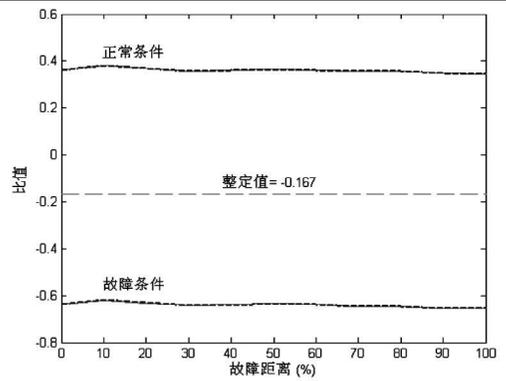
图 4 比值随故障时刻的变化



(故障时刻 20 ms 42.9% 故障距离)

图 5 比值随故障电阻的变化

对于中性点非直接接地的系统,正常和故障条件下的比值变化波形几乎和上面的变化波形是一样的。比值的整定值就取介于正常和故障条件下比值的中间值,正常和故障条件下的比值分别为 0.333、 -0.667 ,所以整定值为 -0.167 。整定值的极限值为 0 和 -0.5 ,前者对应于网络只有两条线路的情况,后者对应于网络有很多条线路的情况。所以,整定值总是为负数。



(故障时刻 20 ms 1Ω 故障电阻)

图 6 比值随故障距离的变化

由图 4、5、6 可知,正常和故障条件下的比值之间还有很大的间隙,这个间隙足够可以包括其他的误差原因引起不正确的更大或更小的比值,因而本算法可以有效地使用。

在本仿真系统中,故障条件下平均比值的模是正常条件下平均比值的模的 2 倍,这和网络的线路条数相关。在故障条件下,有 1 条故障线路和 2 条正常线路,所以平均值的模值之间存在一个因子 2。当选择一个合适的整定值时,该算法就不会受网络中线路数目的多少而影响。整定值取为 -0.25 时,就可以适用于不同的配电网结构中。

3 结 语

提出了一种新的基于暂态阻抗的接地故障检测方法,它适用于中性点不接地或非直接接地系统中。该算法是基于暂态主频的确定,在暂态主周期内计算暂态容抗,从而可以算出接地电容。在故障条件下,故障线路中计算出的接地电容等于其他与之并联的所有非故障线路的接地电容之和;在正常条件下,其计算出的接地电容就等于线路本身的接地电容。本算法通过 Simulink 建立仿真模型,并由 Matlab 计算了在各种故障条件下的可行性。为了减小误差的影响,提出使用计算电容和线路总电容的比值作为线路是否发生故障的判据。正常和故障条件下的比值之间还有很大的间隙,这个间隙足够可以包括其他的误差原因引起不正确的更大或更小的比值。整定值的极限值为 0 和 -0.5 ,取其平均值 -0.25 ,则可以适用于不同的配电网结构中。

参考文献

(下转第 55 页)

表 1 净化处理前六氟化硫分析结果

| 检测项目 | 回收单位 | 成都电业局 | 二台山变电站 | 古城变电站 | 标准值 |
|----------------------------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 六氟化硫质量分数 /% | | 99.8953 | 99.8913 | 99.8918 | ≥ 99.9 |
| 空气质量分数 /% | | 0.0724 | 0.0825 | 0.0711 | ≤ 0.04 |
| 四氟化碳质量分数 /% | | 0.0316 | 0.0253 | 0.0365 | ≤ 0.04 |
| 水分质量分数 / (mg/kg) | | 3.2 | 4.6 | 2.8 | ≤ 5 |
| 酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg) | | 0.13 | 0.15 | 0.15 | ≤ 0.2 |
| 可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg) | | 0.8 | 0.8 | 0.6 | ≤ 1.0 |
| 矿物油质量分数 / (mg/kg) | | 2.5 | 3.4 | 2.1 | ≤ 4 |

表 2 净化处理后六氟化硫分析结果

| 检测项目 | 回收单位 | 成都电业局 | 二台山变电站 | 古城变电站 | 标准值 |
|----------------------------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 六氟化硫质量分数 /% | | 99.9925 | 99.9816 | 99.9870 | ≥ 99.9 |
| 空气质量分数 /% | | 0.0038 | 0.0169 | 0.0071 | ≤ 0.04 |
| 四氟化碳质量分数 /% | | 0.0027 | 0.0007 | 0.0056 | ≤ 0.04 |
| 水分质量分数 / (mg/kg) | | 2.0 | 4.1 | 2.1 | ≤ 5 |
| 酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg) | | 0.08 | 0.11 | 0.08 | ≤ 0.2 |
| 可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg) | | 0.3 | 0.7 | 0.3 | ≤ 1.0 |
| 矿物油质量分数 / (mg/kg) | | 0.6 | 2.9 | 0.6 | ≤ 4 |

4 结论

六氟化硫气体回收净化处理工作,应综合考虑工作安全、是否符合国家相关规定、运行成本与工期要求等诸多问题。

四川省电力公司六氟化硫气体净化处理系统,可使运行过的六氟化硫气体处理达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)要求,配合专业的六氟化硫回收回收设备和六氟化硫辅助回收回收设备,可以高效安全地完成六氟化硫回收回收工作,具有良好的经济效益和社会效益。

四川省电力公司在六氟化硫回收净化处理工作中形成了“分散回收、集中处理”的管理模式。即检修前回收气体,回收后的气体集中由处理中心处理,经检验达标后回充使用。通过“分散回收、集中处理”的管理,可以实现四川省电力公司六氟化硫设备检修气体的全面回收、全面处理和全面回用。既保证设备检修后的气体质量,又节约大量成本,同时保护本地区环境。

参考文献

- [1] 孟玉婵,朱芳菲. 电气设备用六氟化硫的检测与监督 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 李建基, 高压开关设备使用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘英卫, 钟世强, 祁炯, 等. 六氟化硫气体回收处理技术及设备 [J]. 电力设备, 2008, 9(8): 14-17.

(收稿日期: 2010-12-01)

(上接第 48 页)

- [1] 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.
- [2] M. Lehtonen and T. Hakola. Neutral Earthing and Power System Protection—Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks [M]. Vassa Finland: ABB Transmitt Oy, 1996.
- [3] S. Hanninen, M. Lehtonen, T. Hakola, E. Antila, J. Strm and S. Ingman. Characteristics of Earth Faults in Power Systems with a Compensated or an Unearthed Neutral [J]. CIGRE, June 1997, 2161-2165.

- [4] 王安定, 葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 15-25.
- [5] 和敬涵, 范瑜, 薄志谦, 等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 115-120.
- [6] R. Kaczmarek, W.-Y. Huang and P. Bastard. Equivalent Circuit Application to a Phase to Ground Fault Detection in Distribution Networks Without Voltage Measurements [J]. SUPELEC, France, 2004, 481-485.

(收稿日期: 2010-09-15)

电力职业技能鉴定网上训练系统的设计与实现

高 英

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 对网络训练的概念、优势、国内外研究现状和发展趋势进行了简单介绍。对基于 Web 的网络训练系统的相关技术进行了阐述, 包括 C/S 两层的结构模式、B/S 三层的结构模式、流行的 ASP 网页技术、Microsoft SQL Server²⁰⁰⁰ 数据库管理系统和 Web 技术。最后对电力职业技能鉴定网上训练系统进行了概述, 对该系统的主要内容作了初步介绍。

关键词: 职业技能鉴定; 网络培训; C/S 结构; B/S 结构; 数据库; Web 技术

Abstract: The concept of network training is briefly described as well as its advantages, research status at home and abroad and development trend. Web-based technologies related to network training system are also described, including the C/S two-layer structure model, B/S three-layer structure model, the popular ASP web technology, Microsoft SQL Server²⁰⁰⁰ database management system and Web technology. Finally, the network training system of vocational skills in power enterprises is summarized, and the main elements of the system are generally introduced.

Key words: vocational skill identification; network training; C/S structures; B/S structures; databases; Web technology

中图分类号: TM769 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0049-03

随着互联网的普及, 网络技术、宽带技术及计算机应用技术的飞速发展, 有效地辅助了教育技术, 诞生了网络教育。网络教育作为一种新的教学手段, 充分利用了最新的多媒体技术、计算机技术、网络技术, 使教学材料的展现越趋灵活、生动、形象, 使教育、教学能够跨越时间、空间的限制, 具有很大的交互性和灵活性, 是新形势下指导学员自主式学习最有力的工具, 越来越受到企业和员工的青睐。

网络培训平台, 又称在线培训平台、培训管理系统等。支持基于 Web 的网络培训的支撑平台通常由三大平台组成, 即: 学习、培训、管理平台。随着计算机技术和互联网技术的高速发展, 互联网上的各种应用程序应运而生, 网络培训就是目前网络应用的一个重要发展方向。网络培训是一种新型的培训模式。这种培训模式以网络课程为依托, 以现代培训思想为理论指导, 以现代信息技术为实施手段, 利用先进的计算机网络技术进行培训, 网络课程是网络培训的重要载体, 其设计开发既要充分发挥网络技术的优势, 又应该符合现代培训思想。

1 进行网络训练的优势

首先, 建立网上训练系统, 利用网络进行网上训

练和网上测试, 可以为生产岗位员工提供个性化学习的条件。互联网的建立, 为教育、教学开辟了新的途径, 汇集大量先进的教学资源和信息资源, 便于学员学习和提高。网上相关的教学内容与学习方式以及考试等都可以按需、因人而异, 自主选择性强, 学员的主观能动性和个人潜能可以得到充分发挥, 同时不受时间和空间的限制, 从而实现个性化学习。

利用网络进行职业技能鉴定网上训练和网上测试, 方便了企业管理, 减少了工学矛盾和企业员工培训及测试的成本支出。

利用网络进行职业技能鉴定网上训练和网上测试, 可以充分利用教学信息资源, 实现网络共享, 促进教学资源、教学素材的挖掘利用, 使教育资源共享变为现实。网络化的教学素材共享, 还能促进专业间素材交互利用和交叉发展、提高教学质量, 有利于专业人才培养, 也有利于促进教育社会化和学习全员化。

2 网络训练的国内外研究现状及发展趋势

在国外发达国家中, 越来越多的人选择半工半读或在职学习方式。在国内, 越来越多的在职员工对新技术的革新需求很是迫切, 他们中的许多人工作、休息不定时。然而通过网络进行培训, 突破了时间、地

域、场所的限制,满足了这类人的学习需求。特别是先进网络技术与通俗的计算机软件应用技术的结合,使满足网络培训的需求成为可能。

中国政府十分重视网络教育。国务院 1999 年 1 月转发教育部制订的“面向 21 世纪培训振兴行动计划”中,明确提出实施现代远程培训工程,并在第三次全国培训工作会议上,提出在 2010 年初步实现高等教育大众化的目标,建立现代远程教育网络,构建终身培训体系。国家对培训信息基础设施投入很大的人力物力,建成中国培训科研网(CER-NET),并开展地区性区域培训信息网络建设和校园网络建设。随着清华大学等试点大学网络教育的快速发展,远程培训也逐步成为一个倍受人们关注的领域。目前中国各试点学校初步摸索出一套网上办学的模式,开发出一批网上课程和培训资源,初步形成校内基于校园网的多媒体培训与校外远程培训同时进行并相互融合的开放式网络化办学格局,为接下来的企业网络化再培训机制奠定了较为完善的理论与实践基础。

3 网络训练系统的相关技术

3.1 系统的体系结构

基于 Web 的培训教育系统的开发,目前有两种结构模式:一种是 C/S (Client Server 简称 C/S) 两层结构模式,另一种是 B/S (Browser/Server 简称 B/S) 三层结构模式。

基于 Web 的 B/S 模式是针对两层结构改进而来的。B/S 模式是以 Web 技术为基础的新型的 MIS 系统平台模式。把传统 C/S 模式中的服务器部分分解为一个数据服务器与一个或多个应用服务器,从而构成一个三层结构的客户服务器体系网。在 B/S 的三层结构模式中,它将系统处理负载分别分布在 Web 服务器、应用程序服务器和数据库服务器上。

B/S 架构体系随着 Internet 的快速发展和 Web 技术的日益成熟,目前已成为分布式计算处理的网络系统的主流,它较好地解决了 C/S 模式的体系结构的不足,实现了分布式的、动态的、跨平台的、交互式的、易于集成和扩展的操作。

3.2 关于 ASP 技术

当前流行的网页技术有: HTML、DHTML、Java、JavaScript、CGI、ASP 等,其中 Microsoft 的 Active Server Pages 具有运行速度快、数据库操作功能强大等特

性,受到了许多开发者的青睐。

ASP (Active Server Pages) 是微软开发的基于 Windows NT Server 和 IIS 服务器端脚本运行环境,利用它可以产生和运行动态的、交互的、高性能的 Web 服务应用程序。ASP 的主要特性是能够把 HTML、VBScript、JavaScript 等脚本语言和 ActiveX Server Component (ActiveX 服务器组件) 等有机地组合在一起,形成一个能够在服务器上运行的应用程序,并按用户要求专门制作的标准 HTML 页面送给客户端浏览器。

3.3 关于 Microsoft SQL Server 2000 技术

Microsoft SQL Server 2000 是微软公司开发的新一代数据库管理系统,作为 Windows 数据库家族中出类拔萃的成员,SQL Server 2000 这种关系型数据库管理系统能够满足各种类型的企业客户和独立软件供应商构建商业应用程序的需要。根据客户的反映和需求,SQL Server 2000 在可伸缩性、可用性和可管理性等方面有了显著的改进和提高。

3.4 关于 Web

Web 是 WWW (World Wide Web) 的简称,又称万维网,是建立在客户机/服务器 (Client/Server) 模型之上,以 HTML 和 HTTP 协议为基础,能够提供面向各种 Internet 服务的、一致的用户界面的一种信息服务系统。

4 职业技能鉴定网上训练系统概述

随着《职业技能鉴定工作规则》、《职业技能鉴定实施办法》、《职业资格证书制度建设若干意见》的出台,国家全面启动了职业技能鉴定工作,实行了职业资格证书制度,这使得传统行业之间的竞争焦点不再是资金、技术等传统资源,而是职工素质与知识型、技能型和创新型人才的竞争。

本系统要求实现在线培训和考试系统的基本功能,从试题管理、自动出卷、自动评卷、成绩分析均由系统自动完成。以电力行业职业技能鉴定网上训练的需求出发,同时从系统的安全性和易维护性考虑,选择 Web 实现技术,即将系统做成一种 B/S 模式,可以让用户通过浏览器直接访问位于服务器上的试题以及对系统进行远程维护,如图 1 所示。服务器程序的实现技术有多种,本系统选用当前比较流行的网络编程技术 ASP 作为主要实现手段,ASP 作为一种

Web 实现技术,效率较高,这一点正符合了考试系统所要求的实时性,ASP 自身的安全性,再加上实现模式的特点,完全能够达到考试系统的稳定性。

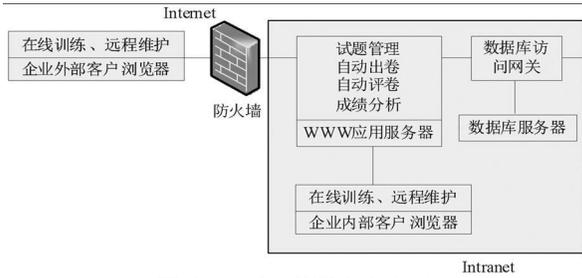


图 1 在线培训系统的结构

一个基于网络的职业技能鉴定网上训练系统,实现了企业员工的在线培训、测试等应用与管理的数据化,包括各模块设计,模块流程、数据库的建立、代码与算法设计。根据本系统业务分析,实现用于企业各类考试信息发布的信息中心子系统,用于员工的训练和自我测试的考试子系统,用于员工个人信息等登记、查看、账号密码修改的个人信息子系统,用于管理员对系统内数据的分析、查看、资料更新等工作后台管理子系统。

5 结 语

电力职业技能鉴定网上训练系统正是结合当前电力企业实际,旨在探索一种以互联网为基础的需求

性培训模式。通过这种新的模式,使生产岗位员工可以不受时间、空间、地域限制,随时、随地通过网络完成培训任务,都能得到同等的培训机会,在不影响企业生产的情况下,进行低成本的专业提升学习。

参考文献

- [1] 靳向阳.《SQL 语言艺术》[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [2] 美 Michael Otey Denielle Otey Microsoft SQL Server 2005 开发指南[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 朱德利. Microsoft SQL Server 2005 数据库管理与应用高手修炼指南[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [4] 程志,桂占吉. Web 挖掘的方法及教育应用[J].中国电化教育,2006(7):98-101.
- [5] 彭四明,王明,柳祥云.数据挖掘技术在互联网时代的应用[J].广东自动化与信息工程,2001(4):52-55.
- [6] 谢希仁.计算机网络(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [7] 萨师煊,王珊.数据库系统概论[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 梁毅,李玲.技能鉴定题库的使用与实践[J].中国电力教育,2007(S2):423-424.
- [9] 刘宏.加快推进电力行业职业技能鉴定工作[J].中国电力企业管理,2000(4):41-42.

(收稿日期:2010-11-23)

(上接第 23 页)

发生孤网后的高频切机仿真计算可以看出,当只考虑负荷特性时,切风电机组时,电网的频率恢复最快,也最接近电网的额定频率。

(2)影响切机方式的因素:①外送功率(联络线上的功率);②水电、火电与风电机组,不同的组合切机;③是否考虑发电机调速器;④是否考虑负荷特性。

4 结 语

针对新疆电网阿勒泰地区在外送电能时,发生解列故障,使阿勒泰电网变成孤网后的高频问题,通过仿真计算出最佳的切机方式来稳定该地区的频率和电压,为以后相关部门的工作提出一点借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会.电力系统安全

- 稳定导则[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会.电力系统安全稳定控制技术导则[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 徐衍会,贺仁睦,孔祥云,等.调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响[J].现代电力,2006,23(6):6-9.
- [4] 李飏.火电机组 OPC 超速保护动作特性分析[J].电力安全技术,2005,7(12):21-22.
- [5] 吴琛,李文云,杨强,等.云南省电网高频率问题与火电机组 OPC 功能协调配合研究[J].云南电力技术,2005,33(6):1-3.
- [6] 吴琛,李玲芳.云南电网主网高周切机方案研究[J].云南电力技术,2008,36(1):1-4.
- [7] 周川梅,孙斌.贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究[J].电力系统保护与控制,2008,36(19):29-32,57.
- [8] 蔡邠.电力系统频率(第二版)[M].北京:中国电力出版社,1999:21-49.
- [9] 陈珩.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,1995:223-229.

(收稿日期:2010-10-12)

六氟化硫回收回充净化处理系统的应用研究

刘红志¹, 彭 柯²

(1 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

摘 要:探讨了六氟化硫回收回充净化处理存在的一些问题,介绍了四川省电力公司六氟化硫回收回充净化处理系统在保证回收率、提高回收回充速度、防污染及空气分离、气体净化等方面的优势。

关键词:六氟化硫;回收回充;净化处理

Abstract: The problems existing in SF₆ gas recycling reuse and purifying are discussed. The advantages of SF₆ recycling reuse and purifying system in Sichuan Electric Power Corporation are briefly introduced, which can guarantee the recycling rate, the efficiency of recycling, the reuse process, air protection, gas separation, gas purifying and so on.

Key words: SF₆; reclaiming and reuse; purifying system

中图分类号: TM934 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0052-04

0 引 言

六氟化硫(SF₆)是一种具有优良绝缘性能的无色、无味、无毒的不燃气体,且灭弧性能优异,因而被广泛作为电气设备中的保护气体使用^[1]。

当设备正常动作而产生电弧或异常局部放电时,由于在高温高压的气室中还有少量的水蒸气,六氟化硫气体会分解为一些有剧毒和强腐蚀性物质(HF和SO₂、SOF₂、SOF₄、S₂O₂F₄等),这些物质会腐蚀设备内部金属元件,对设备和人身的安全都有着不同程度的危害。

六氟化硫也是《京都议定书》中规定减排的 6 种温室气体之一,是所有温室气体中破坏程度最高、存在时间最久的一种气体,其增温潜力约是 CO₂ 的 23 900 倍,且在空气中能够存在 3 200 多年^[2]。

随着电力工业的迅速发展和技术装备水平的提高,大量的六氟化硫断路器及全封闭组合电器不断投入建设和运行。截止目前,最早的六氟化硫电气设备使用期限已超过 20 多年,有的已进行检修,但大多数将逐步进入检修周期,有大量的六氟化硫需要回收处理,六氟化硫气体的回收、利用及防止环境污染是急需解决的课题。

1 常见回收回充净化处理的问题^[3]

目前国内外六氟化硫回收回充净化处理设备普

遍存在六氟化硫气体回收效率不高、回收速度慢、污染严重以及空气难分离、气体净化难以达到国家六氟化硫新气标准要求等技术难题。

1.1 指标检测不全面

中国规定充入电气设备中的六氟化硫气体必须经过严格测试,达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)规定的 8 项指标。目前,采用集中回收、回充和处理于一体的设备进行现场回收、处理和回充的工作方式,虽然简化了程序,但是受到时间和地点的限制,8 项指标多数不能全部检测。

目前,中国绝大多数企业对现场回收回充处理气体只经过主要指标(如湿度和气相色谱)检验合格即回充入设备中。但是,这种操作方式是没有国家相关标准的支持。

1.2 处理回收率低

目前采用的绝大多数回收回充处理设备对空气的处理效果很差,需要大量排气,导致处理回收率很低。有些处理设备虽然采用液氮冷却,在现场处理时可能会达到空气分离所需的温度,但处理回收率也只能达到 90% 左右。并且,处理过程中直排入大气的气体中夹带着有毒的分解产物,对现场工作人员和环境都会产生不良影响。

1.3 处理后的灌瓶效率低

回收回充处理设备通常采用高压灌瓶方式,灌瓶效率受环境影响很大,一般额定 50 kg 的钢瓶只能灌装 20 kg 左右。有些处理设备采用冷凝后利用高度

差灌瓶的方式,这存在着自重不能克服钢瓶内压力进而无法灌瓶的问题。如果采用小型压缩机加增压器从大储液罐中抽入气体以增加压力灌瓶的方式,则有可能使大罐中的空气回溶入已固化处理后的六氟化硫,使经固化处理后再次液化的六氟化硫中空气含量上升。即使采用加气压的方法,也无法彻底解决灌瓶的问题。

1.4 处理后的回充存在安全问题

目前一些市售六氟化硫回收回充设备采用简易给钢瓶外装加热套的方式来完成回充功能,这可能会使六氟化硫液体直接回充入设备,由蒸发而形成的低温六氟化硫会导致设备短时的温差变形,可能使设备密封失效,造成泄漏。更为严重的是,加热根本不能使钢瓶中的合格六氟化硫液体变成气体回充,过度受热甚至可能烧焦钢瓶表面,并使钢瓶内压力升高,存在严重的安全隐患。

现场进行气体处理时,必定有部分尾气需要排放。非专业处理中心没有专门用于净化处理六氟化硫气体的场所,各使用单位也缺少专用气体净化处理设备,操作人员的安全仅依靠数量有限的防护服,在现场直接作业可能因为通风等原因危及作业人员身体健康。

有些采用液氮冷却的处理设备,由于液氮本身属于危险化学品,在吊装、储运和使用方面也存在一系列安全问题。

2 六氟化硫气体回收回充净化处理系统

四川省电力公司六氟化硫气体回收回充净化处理系统是由六氟化硫净化处理系统和六氟化硫回收回充设备组成。主要的操作模式是通过六氟化硫回收回充设备将电气设备中的六氟化硫运行气体回收,经六氟化硫净化处理系统处理合格后,再通过六氟化硫回收回充设备回充到电气设备中。

2.1 六氟化硫净化处理系统

四川省电力公司对 SFCL-I 型六氟化硫气体处理系统进行了应用研究,有效地解决了处理后气体不

达标的问题,对分散回收后的气体经集中处理后达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)要求。

2.1.1 系统组成

处理系统由原气气化单元、净化处理单元、动力单元、尾气深冷分离处理单元等组成。

原气气化单元包含钢瓶倒转装置和专用气化装置。钢瓶倒转装置的作用是使钢瓶中的六氟化硫液体流出。专用气化装置的作用是把流入的六氟化硫液体快速转化为六氟化硫气体进入净化处理单元。

净化处理单元的作用是去除六氟化硫中的低氟化物、固体杂质和部分空气。

动力单元的作用是将净化处理单元中处理过的气体用压缩机打入设备自身的空分装置中,进行液态灌钢瓶。将分离出来的六氟化硫空气混合气打入尾气深冷分离单元深冷容器。

尾气深冷分离处理单元则是对经空气分离出来的尾气提纯。

2.1.2 工作流程

处理系统工作流程图如图 1 所示。

(1) 一次处理流程

钢瓶在原气气化单元被倒转装置倒转后,通过带手动球阀的压力软管连接到净化缓冲处理单元。

钢瓶内的低温、高压六氟化硫液体经净化缓冲处理单元换热后变成常温气态,缓冲后减压到 0.6 MPa 左右,流向净化缓冲处理单元吸附塔内,将运行后的六氟化硫中的分解产物及水分等杂质吸附后,通过动力单元压缩机打向深冷单元中进行进一步的空气分离提纯。

同时,利用动力单元间歇抽出深冷单元顶部分离的尾气,并存储在动力单元储气罐内准备进行二次处理。

当深冷单元的尾气分离过程达到设定值后,利用低温液泵将深冷容器内的低温液体抽至钢瓶内。

(2) 二次处理流程

当动力单元储气罐的压力达到一定值后,储气罐内的六氟化硫通过带手动球阀的压力软管流入净化缓冲处理单元缓冲罐,由动力单元重新打入深冷单元



图 1 处理系统工作流程图

分离容器中,深冷固化后经净化缓冲处理单元碱液罐,排放二次尾气并抽真空。再将尾气深冷单元的固态六氟化硫回温液化后,利用低温液泵将深冷容器内的低温液体抽至钢瓶内。

2.1.3 系统优点

(1) 组合使用变压吸附、空气分离技术,并首次采用机械制冷式尾气深冷分离技术,确保尾气被完全分离,使处理后的气体达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)要求。

(2) 机械制冷式尾气深冷分离技术操作简便、安全,维护方便,仅需供自来水、380 V 用电即可保证长时间连续运转。

(3) 净化处理单元具有吸附剂再生和再生尾气无毒化处理功能。

(4) 可单独处理六氟化硫废气,也可与目前各类现有的国内外回收回充设备配套使用。

(5) 结构设计合理,一用一备的主吸附塔确保设备能连续处理六氟化硫废气。

(6) 辅助吸附塔是对主吸附塔进行再生的装置,真正达到六氟化硫处理过程中的零排放,且再生设备能不停机即可再生主吸附剂,提高设备的使用效率。

(7) 辅助吸附塔可对深冷尾气分离单元中的气体最终处理,实现“零污染”。

(8) 功能强大的无油活塞压缩机,处理能力达到 50 kg/h 以上。

(9) 处理回收率 $\geq 95\%$ 。

(10) 在线纯度和湿度检测仪表可实时监测处理的质量。

2.2 六氟化硫回收回充设备

四川省电力公司六氟化硫处理中心配套的专业六氟化硫回收回充设备和六氟化硫辅助回收回充设备,很好地解决了回收回充效率不高、速度慢等问题。

2.2.1 功能

设备由回收管路、回充管路及抽真空管路组成。可完成以下功能:设备及钢瓶抽真空功能、六氟化硫气体回收功能、六氟化硫气体回充功能。

气体回收功能:电气设备内低压六氟化硫气体经入口过滤减压阀初步滤除水分及大颗粒杂质,减压至压缩机入口缓冲罐,进入六氟化硫专用无油活塞式压缩机压缩为高压气体,经辅助回收回充设备冷却,灌瓶以液态储存。

气体回充功能:钢瓶内合格的六氟化硫液体经辅

助回收回充设备加热气化,气体经减压后回充到电气设备中。

钢瓶、设备抽真空功能:利用真空泵对相关工作管路抽真空。

2.2.2 优点

(1) 考虑周全的抽真空回路,确保系统中任一部位均可被完全抽真空,做到回收回充过程中空气对六氟化硫气体的“污染”最小化。系统中任何管路、通道均可被完全抽真空,尽量减少回收回充过程中空气的带入。

(2) 吸附罐内吸附剂再生回路,连接上处理系统的处理单元后,能够使处理能力已减弱的吸附剂得到及时的再生,或者在彻底处理前抽出吸附罐内的低氟化物在处理单元中的碱液罐中进行处理,确保对环境的零污染。

(3) 空分装置进一步确保回收过程中空气对六氟化硫气体的“污染”最小化。

(4) 回收过程全无油,进口活塞式无油压缩机运行稳定。

(5) 解决了高温回收和低温回充难题,灌瓶和回充能力达到 50 kg/h。

3 应用

四川省电力公司六氟化硫处理中心设置六氟化硫气体分析实验室和六氟化硫气体处理车间。

六氟化硫气体分析实验室占地面积 40 m²,配备六氟化硫新气验收 8 项指标检测仪器,包括:气相色谱仪、精密露点仪、分解产物分析仪、分光光度计、氟离子浓度计和毒性试验需要的仪器等,可完成六氟化硫新气和处理后气体的分析。

六氟化硫处理车间占地面积 200 m²,分为待处理气体存储区、处理设备操作区、待检气体存储区和称重区等,车间配备泄漏报警装置和通风装置。

目前,已多次完成回收、回充和净化处理任务,包括成都电业局六氟化硫废气净化处理,德阳电业局古城变电站 110 kV 断路器六氟化硫回收净化处理和阿坝电力公司二台山变电站 110 kV GIS 断路器六氟化硫回收净化处理及回充等工作。回收净化六氟化硫气体 2 126 kg 处理后的气体达到《工业六氟化硫》规定的新气标准要求,处理回收率达到 95.4%。分析数据见表 1 和表 2。

表 1 净化处理前六氟化硫分析结果

| 检测项目 | 回收单位 | 成都电业局 | 二台山变电站 | 古城变电站 | 标准值 |
|----------------------------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 六氟化硫质量分数 /% | | 99.8953 | 99.8913 | 99.8918 | ≥ 99.9 |
| 空气质量分数 /% | | 0.0724 | 0.0825 | 0.0711 | ≤ 0.04 |
| 四氟化碳质量分数 /% | | 0.0316 | 0.0253 | 0.0365 | ≤ 0.04 |
| 水分质量分数 / (mg/kg) | | 3.2 | 4.6 | 2.8 | ≤ 5 |
| 酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg) | | 0.13 | 0.15 | 0.15 | ≤ 0.2 |
| 可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg) | | 0.8 | 0.8 | 0.6 | ≤ 1.0 |
| 矿物油质量分数 / (mg/kg) | | 2.5 | 3.4 | 2.1 | ≤ 4 |

表 2 净化处理后六氟化硫分析结果

| 检测项目 | 回收单位 | 成都电业局 | 二台山变电站 | 古城变电站 | 标准值 |
|----------------------------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 六氟化硫质量分数 /% | | 99.9925 | 99.9816 | 99.9870 | ≥ 99.9 |
| 空气质量分数 /% | | 0.0038 | 0.0169 | 0.0071 | ≤ 0.04 |
| 四氟化碳质量分数 /% | | 0.0027 | 0.0007 | 0.0056 | ≤ 0.04 |
| 水分质量分数 / (mg/kg) | | 2.0 | 4.1 | 2.1 | ≤ 5 |
| 酸度 (以 HF 计) 质量分数 / (mg/kg) | | 0.08 | 0.11 | 0.08 | ≤ 0.2 |
| 可水解氟化物 (以 HF 计) / (mg/kg) | | 0.3 | 0.7 | 0.3 | ≤ 1.0 |
| 矿物油质量分数 / (mg/kg) | | 0.6 | 2.9 | 0.6 | ≤ 4 |

4 结论

六氟化硫气体回收净化处理工作,应综合考虑工作安全、是否符合国家相关规定、运行成本与工期要求等诸多问题。

四川省电力公司六氟化硫气体净化处理系统,可使运行过的六氟化硫气体处理达到《工业六氟化硫》(GB/T 12022-2006)要求,配合专业的六氟化硫回收回收设备和六氟化硫辅助回收回收设备,可以高效安全地完成六氟化硫回收回收工作,具有良好的经济效益和社会效益。

四川省电力公司在六氟化硫回收净化处理工作中形成了“分散回收、集中处理”的管理模式。即检修前回收气体,回收后的气体集中由处理中心处理,经检验达标后回充使用。通过“分散回收、集中处理”的管理,可以实现四川省电力公司六氟化硫设备检修气体的全面回收、全面处理和全面回用。既保证设备检修后的气体质量,又节约大量成本,同时保护本地区环境。

参考文献

- [1] 孟玉婵,朱芳菲. 电气设备用六氟化硫的检测与监督 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 李建基, 高压开关设备使用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘英卫, 钟世强, 祁炯, 等. 六氟化硫气体回收处理技术及设备 [J]. 电力设备, 2008, 9(8): 14-17.

(收稿日期: 2010-12-01)

(上接第 48 页)

- [1] 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.
- [2] M. Lehtonen and T. Hakola. Neutral Earthing and Power System Protection—Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks [M]. Vassa Finland: ABB Transmitt Oy, 1996.
- [3] S. Hanninen, M. Lehtonen, T. Hakola, E. Antila, J. Strm and S. Ingman. Characteristics of Earth Faults in Power Systems with a Compensated or an Unearthed Neutral [J]. CIGRE 97, June 1997, 2161-2165.

- [4] 王安定, 葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 15-25.
- [5] 和敬涵, 范瑜, 薄志谦, 等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 115-120.
- [6] R. Kaczmarek, W.-Y. Huang and P. Bastard. Equivalent Circuit Application to a Phase to Ground Fault Detection in Distribution Networks Without Voltage Measurements [J]. SUPELEC, France, 2004, 481-485.

(收稿日期: 2010-09-15)

架空送电线路基础上拔稳定计算公式的修正

王高益

(海南电力设计研究院, 海南 海口 570203)

摘要:通过对《电力工程高压送电线路设计手册(第二版)》和《架空送电线路基础设计技术规定》(DL/T 5219-2005)的对比与分析,同时结合山西院基础设计程序 Tfd2006 的编制原理,发现《架空送电线路基础设计技术规定》中上拔稳定计算公式中个别参数的表述有误,需要对其进行修正,以供同行参考设计。

关键词:送电线路;基础;上拔稳定;公式;修正

Abstract: Through comparing and analyzing "Design Manual for High-voltage Transmission Line in Power Engineering (Second Edition)" and "Technical Regulation for Designing Foundation of Overhead Transmission Lines" (DL/T 5219-2005), and combined with the principle of the basic design process Tfd2006 by Shanxi Electric Power Research Institute it is found that the expressions of several parameters in the formula for calculating uplift stability in "Technical Regulation for Designing Foundation of Overhead Transmission Lines" are wrong. The amendments are carried out for your reference.

Key words: transmission line; foundation; uplift stability; formula; amendment

中图分类号: TM745 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0056-02

0 前言

上拔稳定是输电线路杆塔基础设计的一项重要内容,按照现行的基础设计规程《架空送电线路基础设计技术规定》(DL/T 5219-2005),其基础上拔稳定根据抗拔土体的状态分为剪切法和土重法两种,两种方法所采用的计算公式均对基础的埋置深度表述有误,使计算出来的基础抗上拔力比实际的偏大,有可能出现通过 Tfd2006 程序计算满足的铁塔基础不满足真正的抗拔要求(备注:在原有设计裕度不大的情况下),为避免因上拔不够导致工程事故,特提出将计算公式中的基础埋置深度进行修正。

1 基础的设计原理和计算模型

1.1 剪切法基础的设计原理和计算模型

采用剪切法设计的基础,其抗拔承载力由基础自重和土体破裂面剪切阻力的竖向分量组成(见图 1)。

剪切法的计算公式为

$$[T] = \gamma_E \gamma_0 (0.4 A_1 c_w h_1^2 + 0.8 A_2 \gamma_s h_1^3) + Q_f \quad (1)$$

由于该型基础以天然不扰动土作为抗拔土体,因此在上拔稳定计算时计算上拔深度应扣除表层非原

状土层的厚度 h_0 ,当地面为植土或耕土层时,一般取为 0.3 m;另外,采用该法设计基础时,上拔稳定的计算深度还应扣除基础底板的高度 Δh 也就是说,采用剪切法设计的基础,其上拔稳定的计算深度 h_1 应是基础埋置深度 h_t 减去 $h_0 + \Delta h$ (即 $h_1 = h_t - h_0 - \Delta h$),而不是基础埋置深度 h_t ,设计采用修正公式(2)进行抗拔稳定计算。

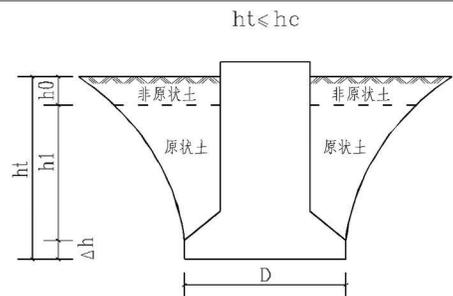


图 1 剪切法计算上拔稳定

$$[T] = \gamma_E \gamma_0 (0.4 A_1 c_w h_1^2 + 0.8 A_2 \gamma_s h_1^3) + Q_f \quad (2)$$

1.2 土重法基础的设计原理和计算模型

采用土重法设计的基础,其抗拔承载力主要由基础自重和基础底板上方上拔角范围内土体重量组成(见图 2)。

土重法的计算公式为(如方形底板)

$$[T] = \gamma_E \gamma_s \gamma_{01} [h_t (B^2 + 2Bh_t \tan \alpha + \frac{4}{3} h_t^2 \tan^2 \alpha) - \Delta V_1 - V_0] + Q_f \quad (3)$$

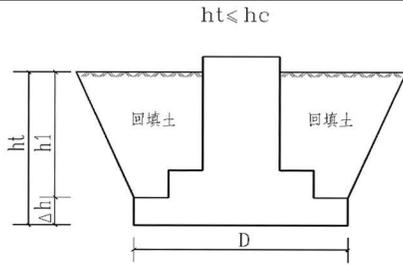


图 2 土重法计算上拔稳定

由于该型基础是埋置于预先挖好的基坑内并用回填土夯实,它是以扰动的回填土构成抗拔土体来保持基础的上拔稳定,计算回填土是从底板台阶上部开始,按上拔角向四周扩展的倒土锥体形成的体积,而不是从底板台阶下部开始计算,因此在上拔稳定计算时计算上拔深度应扣除基础底板的高度 Δh 也就是说,采用土重法设计的基础,其上拔稳定的计算深度 h_1 应是基础埋置深度 h_t 减去 Δh (即 $h_1 = h_t - \Delta h$),而不是基础埋置深度 h_t ,设计采用修正公式(4)进行抗拔稳定计算。

$$[T] = \gamma_E \gamma_s \gamma_{01} \left[h_1 (B^2 + 2Bh_1 \tan \alpha + \frac{4}{3} h_1^2 \tan^2 \alpha) - \Delta V_t - V_0 \right] + Q_f \quad (4)$$

2 计算实例

为了能直观地体现这个参数对基础抗拔力的影响,特以计算实例来对上拔稳定计算公式修正前后作对比分析,并利用时下全国大部分设计院所使用的基础设计程序 Tfd2006 加以验证,根据验证的结果,从而说明修正上拔稳定计算公式的合理性、必要性和迫切性。

(1)例如某一铁塔的基础设计资料如下。

基础作用力:上拔力 $T_E = 238.0 \text{ kN}$, 水平力 $T_x = 20.5 \text{ kN}$, $T_y = 17.6 \text{ kN}$;

工程地质:土壤重度 $\gamma_s = 16 \text{ kN/m}^3$, 上拔角 $\alpha = 18^\circ$, 土的内摩擦角 $\Phi = 20^\circ$, 土壤凝聚力 $c = 28 \text{ kPa}$, 土壤实际饱和度 $S_r = 39\%$, 扰动土厚度 $h_0 = 300 \text{ mm}$, 无地下水;

铁塔参数:直线塔,正面根开 $= 5500 \text{ mm}$, 侧面根开 $= 5500 \text{ mm}$;

剪切法基础尺寸:基础埋深 $h_t = 2500 \text{ mm}$, 底板直径 $D = 1800 \text{ mm}$, 主柱直径 $= 800 \text{ mm}$, 主柱高度 $= 2100 \text{ mm}$, 主柱露头 $= 200 \text{ mm}$, 圆台高度 $= 500 \text{ mm}$, 底板高度 $= 100 \text{ mm}$;

土重法基础尺寸:基础埋深 $h_t = 2300 \text{ mm}$, 底板宽度 $B = 2000 \text{ mm}$, 主柱宽度 $= 800 \text{ mm}$, 主柱高度 $= 2000 \text{ mm}$, 主柱露头 $= 300 \text{ mm}$, 上部台阶 [1]宽 $= 300 \text{ mm}$, 上部台阶 [1]高 $= 300 \text{ mm}$, 底板台阶 [2]宽 $= 300 \text{ mm}$, 底板台阶 [2]高 $= 300 \text{ mm}$;

(2)根据上述已知条件,可分别计算出采用剪切法和土重法时的基础允许抗上拔力。

1)剪切法基础允许抗上拔力

修正前采用公式(1)计算,得出

$$[T] = (0.4 \times 2.25 \times 38.2 \times 2 \times 2.5^2 + 0.8 \times 0.62 \times 16 \times 2.5^3) + 44.13 = 383.01 \text{ kN}$$

修正后采用公式(2)计算,得出

$$[T] = (0.4 \times 2.25 \times 38.2 \times 2 \times 2.1^2 + 0.8 \times 0.62 \times 16 \times 2.1^3) + 44.13 = 269.24 \text{ kN}$$

运用 Tfd2006 程序计算得出的结果见图 3。

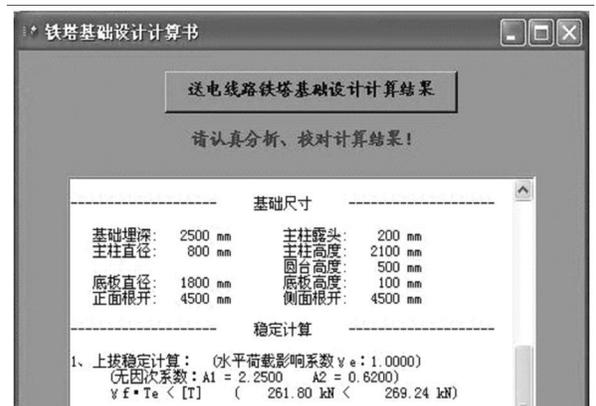


图 3 剪切法 Tfd2006 程序计算结果

由计算结果可以看出,剪切法修正后计算得出的基础抗上拔力与 Tfd2006 程序的计算结果吻合,这个数值是基础实际允许的抗上拔力,同时可以发现,修正前计算得出的基础抗上拔力远远大于修正后的值,是修正后的 1.42 倍。因此,在设计基础时,如果以修正前的基础抗上拔力为依据,势必造成因上拔力不够而导致杆塔倾倒的情况发生。

2)土重法基础允许抗上拔力

修正前采用公式(3)计算,得出

$$[T] = 16 \times [2.3 \times (4 + 2.9893 + 0.7446) - 1.676] + 67.49 = 325.28 \text{ kN}$$

修正后采用公式(4)计算,得出

$$[T] = 16 \times [2 \times (4 + 2.6 + 0.5631) - 1.676] + 67.49 = 269.88 \text{ kN}$$

运用 Tfd2006 程序计算得出的结果见图 4。

由计算结果可以看出,土重法修正后计算得出的

(下转第 86 页)

烟煤,从而根本上解决高负荷运行时炉内大量、严重的结焦问题,改善锅炉安全运行状况及提高锅炉热效率。

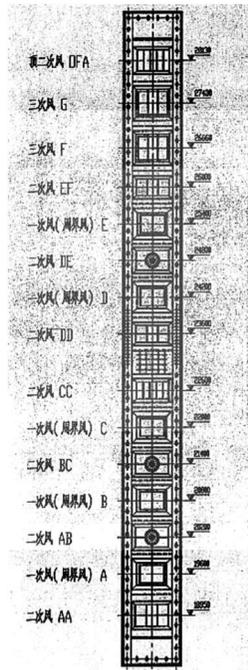


图 1 燃烧器一、二次风间隔布置简图

4 结 语

锅炉结焦是一个复杂的物理化学过程,它与燃料煤种、炉膛结构、运行氧量、炉内空气动力场及温度场、燃烧切圆直径、风煤配合、吹灰使用、燃烧器布置方式等许多因素有关,通过对锅炉结焦原因进行具体分析,针对性地采取有效措施治理改造,可大大减轻炉膛结焦的程度,避免炉内大量结焦、结大焦而危及锅炉安全运行,并由此改善锅炉运行状况,提高运行安全性及锅炉热效率。

本次锅炉改造的成功经验,对大型火电机组节能及优化运行具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 容奎恩,袁振福,刘志敏,等. 电站锅炉原理 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

[2] 华东电机工程学会. 锅炉设备及其系统 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.

(收稿日期: 2010-10-12)

(上接第 57 页)

基础抗上拔力与 Tfd2006 程序的计算结果吻合,这个数值是基础实际允许的抗上拔力,同时可以发现,修正前计算得出的基础抗上拔力远远大于修正后的值,是修正后的 1.21 倍。因此,在设计基础时,如果以修正前的基础抗上拔力为依据,势必造成因上拔力不够而导致杆塔倾倒的情况发生。

行,如果设计时按照现行《架空送电线路基础设计技术规定》中 h_1 的意思表述,计算出来的基础上拔力将远远大于基础的实际抗拔力,在设计裕度不大的情况下,基础将因上拔力不足影响杆塔的安全运行,按照所提理论表述对基础上拔稳定计算公式进行修正,才真正符合基础设计剪切法和土重法的计算原理。

参考文献

[1] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 (第二版) [Z]. 北京:中国电力出版社, 2003.

[2] 鲁先龙,程永锋,张宇. 输电线路杆塔原状土基础抗拔力承载力计算探讨 [D]. 中国电机工程学会论文集, 2007.

[3] 王学明. 送电线路掏挖基础抗拔力理论计算公式推导 [D]. 中国电机工程学会论文集, 2007.

[4] DL/T 5219-2005, 架空送电线路基础设计技术规定 [S].

(收稿日期: 2010-09-06)

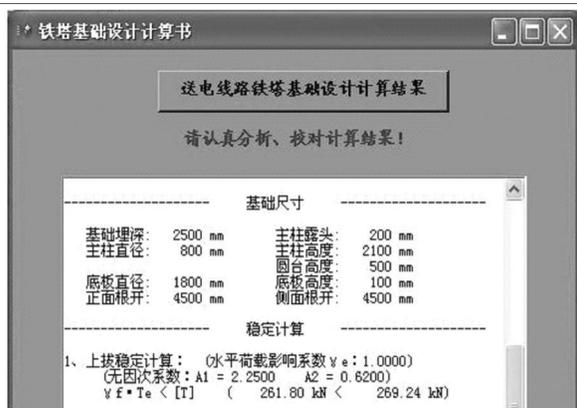


图 4 土重法 Tfd2006 程序计算结果

3 结 论

基础的上拔稳定关系到输电线路的安全稳定运

三峡地区超高压输电线路气候特征简析 与灾害性天气预报系统的实现

王 辉¹, 宋雪峰², 陈 达², 方 权²

(¹ 武汉大学电气工程学院, 湖北 宜昌 443002; ² 湖北超高压输变电公司宜昌输电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 在系统收集整理三峡地区超高压输电线路沿线气象资料的基础上, 从三峡地区超高压输电线路附近气候概况、对输电线路有影响的主要气象灾害等方面开展分析研究。在此基础上, 设计建立三峡地区超高压输电线路灾害性天气实时监测预报系统, 以提高线路故障气象分析评估水平及运行管理水平。

关键词: 三峡地区输电线路; 气候特征; 气象灾害; 实时监测预报

Abstract: Based on the meteorological data collected along the extra high voltage (EHV) transmission lines in Three Gorges area the climate overview near EHV transmission lines in Three Gorges area and the main meteorological disasters on transmission lines are analyzed and studied. On this basis the system of real-time monitoring and forecasting disaster weather is designed for EHV transmission lines in Three Gorges area which improves the evaluation and operation management level of meteorological analyses for transmission line faults.

Key words: transmission lines in Three Gorges area; climatic characteristics; meteorological disasters; real-time monitoring and forecasting

中图分类号: TM732 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)01-0058-03

0 引 言

随着社会发展, 气象灾害对电力生产的影响越来越明显, 2008 年年初三峡地区的雨雪冰冻天气就给电力设施造成了巨大破坏。宜昌是全国电力外送的辐射中心, 境内有三峡、葛洲坝、隔河岩、水布垭电厂出口及川渝与华中联网的数十条 500 kV 超高压输电线路, 线路长度 2 865 km, 是全国电能交换的平台, 输电线路出现故障可能破坏整个主网的稳定性, 给电网安全带来威胁。

三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区多为高海拔地形和小气候区域, 常受低温雨雪、大雾天气的影响, 导致电线覆冰严重, 舞动造成线路损坏, 或引起线路污(雾)闪跳闸; 雷击引起线路跳闸; 强降水造成线路杆塔基础附近山体滑坡及泥石流等等。

因此, 针对超高压输电线路, 开展影响电力送出沿线的气候背景分析, 建立气象监测预警系统和信息应用平台, 更准确地获取相关气象数据, 进行输电线路气象灾害预警, 对提高输电线路故障气象分析评估水平及运行管理水平具有重要意义。

1 三峡地区超高压输电线路微气候特征分析

1.1 三峡地区超高压输电线路气候概况

三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区属北亚热带季风湿润气候, 全年气候温和, 雨量丰沛, 日照充足, 四季分明, 雨热同季。由于地形地势因素影响, 各地气候有较大差异, 立体气候特色明显。各地年平均气温 13~18℃。年平均降雨量 990~1 450 mm, 最大年降雨量出现在南部的长阳, 为 1 934.1 mm。其地理分布具有南部大于北部, 西部大于东部的特点。最小年降雨量出现在东部的枝江, 为 663.4 mm。年降水平均变率为 14%~18%。年日照时数为 1 300~1 900 h。

1.2 线路所经地区对输电线路有影响的主要气象灾害

1.2.1 暴雨

气象上把 24 小时日降水量大于等于 50 mm 定义为一个暴雨日。统计三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区各气象站多年降水资料发现, 该地区暴雨日均出现在 4~10 月, 其多年平均年暴雨日数的空间分布有南部较其他地区为多、东西部接近和中部最少的特点。多年平均暴雨日数的时间分布图(图 1)表

明,该地区具有明显的雨热同季的天气特点。该地区 7 月是气温最高的月份,恰好此时年平均暴雨日数也出现峰值,7 月年平均暴雨日数多达 6.6 d。最少月份是 10 月仅 0.7 d。其分布具有与气温同步的显著特点,季节上,夏季 7 月多于 8 月,春季 4 月多于秋季 10 月。

2008 年 7 月 20 日至 7 月 27 日,宜昌地区普降暴雨,造成宜昌输电公司所辖 500 kV 三江 I、II、III 回以及万龙 I、II 回线路 8 基杆塔基础边坡坍塌;2010 年 7 月 23 日,宜昌市夷陵区和三峡坝区遭受 6 个多小时特大暴雨袭击,降雨量达到 214 mm,致使在此区域的 500 kV 万龙 I、II 回等 9 条线路 14 基杆塔基础及护坡遭受暴雨冲刷,出现边坡坍塌现象。因此,应当根据三峡地区暴雨的特点进行相应的防范措施,尤其是 7 月、8 月暴雨多发月,应加强对杆塔基础边坡的巡视和监护,确保输电线路安全稳定运行。

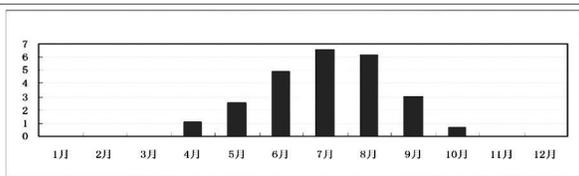


图 1 三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区多年平均年暴雨日数时间分布(单位:日)

1.2.2 雷暴

由多年年平均雷暴日数分布图(图 2)可以看出,位于西南部的长阳县多年年平均雷暴日数最多,全年雷暴日数多达 43.1 d。而紧邻江汉平原的枝江市多年年平均雷暴日数为该地区最少,只有 29.2 d。其总体分布特点为:西部较东部为多,南部较北部为多。



图 2 多年年平均雷暴日数分布

雷暴在该地区一年 12 个月中均可出现。7—8 月为雷暴多发月份,出现概率分别为 26.4% 和 23.5%。12 月和 1 月为全年雷暴出现最少月份,出现概率分别为 0.2% 和 0.4%。

对应到超高压输电线路路上,线路雷击跳闸次数与

雷暴日数量存在着明显的正相关关系。以 2009 年为例,2009 年全年三峡近区超高压线路共发生雷击跳闸 17 次,雷暴多发月份 7 月和 8 月分别跳闸 4 次和 10 次;而雷暴最少月份 1 月和 12 月无雷击跳闸。

近年来,宜昌地区的雷电活动呈逐年上升之势,而三峡电力外送的任务又是重中之重,三峡出线因先天设计防雷水平较低,电网安全时刻会受到雷电威胁,因此在加强防雷治理工作的同时,更应加强与周边气象环境的联系,确保电网安全。

1.2.3 大雪

由三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区大雪统计分析可得出如下结论。

①该地区 500 kV 线路所经地区各站从建站到 2007 年多年平均 2.7 a 出现 1 次大雪。其多年平均年出现频率的地理空间分布如图 3 所示。其年出现频率具有明显的东部大于西部、南部大于北部的显著特征。

②在大雪的情况下,该地区最大日雨雪量为 27.2 mm,出现在长阳。

③三峡地区 500 kV 超高压输电线路所经地区大雪日最大积雪深度为 31 cm,出现在宜都市。该地区日最大积雪深度的平均值为 15.3 cm。

④该地区大雪日极端最低气温为 -7.5℃。

⑤该地区大雪日极端最低气温多年平均值为 -5.1℃。



图 3 多年年均大雪概率空间分布

2004 年底至 2005 年春 500 kV 三龙 I、II、III 回以及万龙 I、II 回等三峡出线由于受雨雪、雨淞等恶劣天气的影响,出现了地线支架屈服、地线滑移掉线、导线严重断股、绝缘子覆冰闪络等线路故障,造成了部分线路设备损坏和多次中断送电,严重威胁电网安全运行。2008 年 1 月,宜昌地区再次遭遇大范围大强度的暴风雪,三峡出线出现线路冰闪两次、地线防振锤损坏等故障。针对这两次冰灾事故,进行了地线

支架更换、“3+1”插花、倒 V 串等一系列防冰改造工程,对图 3 中秭归、长阳等重冰区特殊区段进行了相应的防冰改造,改造后三峡出线整体防冰能力得到了有效提升。

2 实时气象灾害监测、预报、信息处理与显示网页式服务系统的建立

在充分分析上述气候特征的基础上,与气象部门合作,进行了相关软件设计和开发,建立了一套实时气象灾害监测、预报、信息处理与显示网页式服务系统。系统包括气象信息传输处理、气象数据库管理、灾害性天气预报和气象信息 WEB 发布等部分。系统运行稳定可靠,资料处理准确及时,自动监测能力较强,自动化程度高。

同时建立信息传输网络,气象信息自动监测入网,实时查询;充分利用天气雷达、气象卫星全方位、立体实时监测获取的详尽的气象信息,弥补测站分布不足;开发实时气象信息入网组织、显示网页,数据动态管理。

3 主要成果和结论

①在系统性地收集整理三峡地区超高压输电线

路沿线气象资料的基础上,从三峡地区超高压输电线路附近气候概况、分时段气候特征、输电线路所经地区对输电线路有影响的主要气象灾害等诸多方面开展分析研究,形成专业的三峡地区气候报告,得出了多项超高压输电线路有实用价值的结论。

②建立了信息应用平台,实现了气象信息自动监测入网,实时查询等功能;充分利用天气雷达、气象卫星和自动气象站组成的立体气象监测网详尽的气象信息,以及收集传输沿线区域温度、降水、风向、风力和闪电定位为主的实时气象资料。

③基于宜昌市气象局已经建立的并行机群和 MM5 中尺度数值模式,建立了一套适合三峡区域的预报系统。输电线路沿线灾害性天气预报软件能定时启动 MM5 中尺度预报模式运行结果,实时从数据库自动获取数据,预报结论自动输出并存储到数据库,通过系统网页平台显示使用。

参考文献

- [1] 刘俊国,等.最优化 ASP.NET[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [2] 启明工作室. ASP.NET+SQLserver 网络应用系统开发与实例[M].北京:人民邮电出版社,2005.

(收稿日期:2010-10-05)

(上接第 43 页)

向对侧。当本侧保护装置动作后,立即向对侧发送“保护动作信号”,对侧保护装置收到该信号后立即去启动保护装置。为了区分,则把它定义为“内部远跳”。

本次保护误动原因为:500 kV 2 号变电站侧后备保护动作,向 500 kV 1 号变电站发送“内部远跳”,500 kV 1 号变电站保护收到“内部远跳”后,差动保护动作同时向 500 kV 2 号变电站侧发送“差动动作”允许信号,500 kV 2 号变电站侧差动保护随即动作。该启动元件类似于高频保护中的“本保护动作停信/发信”元件,作用在于只要对侧保护装置动作,立即通过光纤通道向本侧发送“内部远跳”信号启动本侧保护,保证本侧光纤纵差保护动作出口切除故障。

4 总结

此次保护误动,暴露了一些问题。对保护装置的

一些隐藏逻辑还未掌握,需要在保护装置调试时细心观察,及时发现动作逻辑与保护技术说明书的差异。光纤保护需要两侧保护进行配合,特别是跨地区线路,保护人员分属不同单位,可以加强沟通,加强通道联调。为了避免发生类似误动,可以向调度部门申请退出光纤纵差保护,利用距离 I 段快速切除故障;也可以投入光纤纵差保护并将两侧保护装置通道自环,保证了线路 L1 铁塔段故障时可以快速切除故障,同时也不受对侧的影响,增强了电网供电可靠性。

参考文献

- [1] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-931 型超高压线路微机保护装置技术和使用说明书[Z].

(收稿日期:2010-10-18)

输电线路防雷措施效果浅析

刘安伟, 王琼晶

(泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘要:通过对四川省某地区近年来输电线路遭受的雷击跳闸情况进行分析,并评估已采用的各种防雷措施,总结出了提高输电线路耐雷水平,降低线路跳闸率的一些实践经验。

关键词:输电线路;雷击跳闸;防雷措施

Abstract: Based on the analyses of lightning trip-out in transmission lines in a district of Sichuan province in recent years the different adopted protection measures against lightning are evaluated and some practical experiences are summarized about improving lightning withstand level and reducing the trip-out rate of transmission line

Key words: transmission line; lightning trip-out; protection measures against lightning

中图分类号: TM **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0061-04

2007年至2010年,四川省某市管辖范围内共发生了71次35 kV及以上的输电线路雷击跳闸事故,其中35 kV线路46次,占总雷击跳闸次数的64.8%;110 kV线路19次,占雷击跳闸次数的26.7%;220 kV线路6次,占雷击跳闸次数的8.5%。

在71次雷击事故中,感应雷、绕击雷、反击雷各占一定的比例,泸州电业局从2007年起采取了多种防雷措施,利用大修技改的机会进行全方位改造,以求降低输电线路的雷击跳闸次数。下面力求对目前已采取的防雷措施进行统计分析,通过实际案例对比优劣,总结出各种防雷措施的适用范围。

1 输电线路运行现状

该地区输电线路在运行中存在着以下几个薄弱环节:①线路运行时间较长,线路老化严重,其中运行30年以上的线路有8条,运行10~20年的线路有5条,尤其是35 kV输电线路普遍为老旧线路,雷击跳闸率极高;②部分35 kV线路没有架设架空避雷线,缺少避雷线的屏蔽作用,杆塔及线路完全暴露在雷电的环境中,线路遭受雷电直击的概率极高;③部分输电线路防雷设计考虑比较保守,比如很多同塔双回的220 kV输电线路的避雷线保护角均为 15° ,导致线路的绕击率相当高;④该地区地形较为起伏,北部为丘陵地形,南部为山地地形,大部分线路的杆塔沿着山顶、半坡架设,或者是丘陵地形当中的相对突出点,位

于容易遭受雷击的位置。

2 输电线路雷击跳闸类型

经过统计分析该地区从2007年至今的输电线路跳闸情况,引起线路跳闸雷击形式主要有以下几种。

(1)绕击类跳闸,其故障点的特点为线路架设有架空避雷线,故障点的接地电阻合格,故障点为单基单相或相邻两基同相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较小,故障点所处地形一般为山顶边坡等易绕击地形,故障相一般为水平排列的边相或垂直排列的中、上相。此类跳闸多出现在110 kV、220 kV线路当中;

(2)反击类跳闸,其故障点的特点为故障点的接地电阻不合格,故障点为一基多相或多基多相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较大,故障相一般为水平排列的中相或垂直排列的中、下相。此类跳闸在35~220 kV线路当中均有出现;

(3)感应雷跳闸,其故障点的特点为线路未架设架空避雷线,故障点的接地电阻合格,故障点为一基多相或单相,跳闸时故障点附近的雷电流幅值较大,故障相一般为水平排列的边相或垂直排列的上相,且多发生在35 kV及以下电压等级的输电线路。

3 典型雷击跳闸及防雷措施浅析

3.1 35 kV新况南线跳闸情况及改造措施

35 kV 新况南线自 2007 年以来共因雷击跳闸 10 次,占 35 kV 线路雷击跳闸总数的 21.7%。表 1 为 35 kV 新况南线 2007 年至今的雷击跳闸次数汇总。

表 1 35 kV 新况南线跳闸情况

| 跳闸年份 | 跳闸时间 | 年跳闸总次数 |
|--------|------------|--------|
| 2007 年 | 4-2 0:25 | 6 |
| | 6-29 6:20 | |
| | 7-6 2:55 | |
| | 7-8 21:25 | |
| | 7-16 20:55 | |
| 2008 年 | 8-23 14:35 | 2 |
| | 7-27 23:36 | |
| 2009 年 | 8-1 0:14 | 2 |
| | 8-28 23:15 | |
| 2010 年 | 8-28 23:30 | 2 |

从表 1 中可以看出 35 kV 新况南线在 2008 年之前几乎逢雷必跳,为了降低线路的雷击跳闸率,提高供电可靠性,2008 年 7 月对该线路进行了大规模改造,全线架设了架空避雷线,在 2009 年、2010 年的跳闸次数比往年少了很多。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有分流作用,以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;通过对导线的耦合作用可以减小线路绝缘子的电压;对导线的屏蔽作用还可以降低导线上的感应过电压。对于那些没有架空避雷线的 35 kV 线路,威胁它们的主要是感应雷,而限制感应雷的最有效手段就是全线架设架空避雷线。架设架空避雷线后的感应过电压如式 (1) 所示。

$$U_i = (1 - k)U_i \quad (1)$$

式中, K 为耦合地线或避雷线对导线的耦合系数; U_i 为没有架空避雷线时的感应过电压; U_i' 为架设了架空避雷线之后的感应过电压。

通过式 (1) 看出,由于地线对导线的耦合作用,导线上的感应电压将下降。架空避雷线的存在使导线上的感应雷过电压是没有架空地线时的 $(1 \sim k)$ 倍,耦合系数 k 越大,导线上的感应过电压越小。

3.2 35 kV 洞胡线跳闸情况及改造措施

35 kV 洞胡线自 2007 年以来共因雷击跳闸 7 次,占 35 kV 线路雷击跳闸总数的 15.2%。表 2 为 35 kV 洞胡线 2007 年至今的所有雷击跳闸汇总。

从表 2 中可以看出,绕击的比例为 5%,反击的比例为 0%,感应雷的比例为 95%。因此,35 kV 洞胡线雷击跳闸的主要形式为感应雷跳闸。

从表 2 中还可以看出 35 kV 洞胡线在 2010 年的

雷击次数比往年同期高出了很多,而 2010 年的雷电活动强度并没有 2009 年高,其中一个重要原因就是 2009 年该线路进行改造时在 45 号、46 号、52 号、53 号、54 号、55 号上安装了雷电接闪器。由于 35 kV 洞胡线 3 号~60 号没有架空避雷线,安装的雷电接闪器使得雷电击杆率比往年高了很多,造成了该线路在 2010 年的雷击跳闸率明显增加。并且通过 2010 年的数据可以看出,遭受雷击的杆塔均不是安装了接闪器的杆塔本身,而是其相邻的杆塔,这就说明了雷电接闪器只可以保护安装的杆塔本身,而其相邻的杆塔无法保护。

由于雷电接闪器以及各种类型避雷针都是通过牺牲自我的原理来保护线路,吸引空气中的雷电流到自身间接提高了线路被反击、感应雷击中的风险。原本 35 kV 线路的耐雷水平就比较低,安装了避雷针就相当于增大了线路吸引雷电的能力。因此,雷电接闪器以及各种类型避雷针千万不可随意安装,尤其是对于耐雷水平相对较低的 35 kV 线路更是要慎之又慎。

3.3 35 kV 新况北线雷击跳闸情况

2010 年 6 月 19 日 01:35,35 kV 新况北线跳闸,重合闸不成功。经过故障巡视发现 35 kV 新况北线 9 号杆三相绝缘子遭到雷击,10 号杆也有两相绝缘子遭到雷击,其中 9 号杆中相导线处球头挂环被融化脱落造成接地短路故障,导致重合闸不成功。

经过调查发现 35 kV 新况北线 9 号杆面向大号侧右杆接地引下线被盗,造成该基杆的接地电阻不合格,从现场的情况来看,此次跳闸为多基多相雷击跳闸,符合反击跳闸的故障特征。改善接地电阻可以说是输电线路防雷措施中最常用、最广泛应用的措施。首先,降低接地电阻是防止线路反击跳闸的最有效手段,反击过电压的表达式见式 (2)。

$$U_i = \frac{U_{50\%}}{(1-k)\beta R_{ch} + (\frac{h_a}{h_t} - k)\beta \frac{L_t}{\tau_f} + (1 - \frac{h_g}{h_c} k_0) \frac{h_c}{\tau_f}} \quad (2)$$

式中, $U_{50\%}$ 为绝缘子串的 50% 冲击放电电压; k 为导线、地线间的耦合系数; β 为杆塔分流系数; R_{ch} 为杆塔冲击接地电阻; L_t 为杆塔等值电感; h_a 为导线横担高度; h_t 为杆塔总高度; τ_f 为雷电流波头长度; h_g 为地线平均高度; h_c 为导线平均高度; k_0 为导线与地线间的几何耦合系数。

由式 (2) 可以得知,在线路绝缘水平已经固定的情况下,降低杆塔冲击接地电阻 R_{ch} 是最直接的方法。降低接地电阻的方法多种多样,需要因地制宜,

表 2 35 kV 洞胡线跳闸情况

| 统计年份 | 跳闸时间 | 故障点 / 号 | 故障相别 | 雷击定性 | 故障点总计 |
|------|---|---------|---------|------|-------|
| 2007 | 8-25 23: 50 | 41 | 三相 | 感应雷 | 3 |
| | | 42 | 中相、右边相 | 感应雷 | |
| | | 63 | 右边相 | 感应雷 | |
| 2008 | 8-1 1: 15 | 58 | 左边相、右边相 | 感应雷 | 1 |
| 2009 | 7-14 3: 20 8-28 23: 55 | 16 | 右边相、左边相 | 感应雷 | 3 |
| | | 21 | 右边相 | 感应雷 | |
| | | 22 | 左边相、右边相 | 感应雷 | |
| 2010 | 6-19 0: 40 7-7 23: 35 7-21 23: 05 8-2 18: 10 | 25 | 中相 | 感应雷 | 13 |
| | | 46 | 三相 | 感应雷 | |
| | | 2 | 上线 | 绕击 | |
| | | 22 | 三相 | 感应雷 | |
| | | 46 | 中相 | 感应雷 | |
| | | 60 | 中相、右边相 | 感应雷 | |
| | | 8 | 右边相 | 感应雷 | |
| | | 18 | 中相、右边相 | 感应雷 | |
| | | 22 | 三相 | 感应雷 | |
| | | 50 | 右边相 | 感应雷 | |
| 51 | 中相、右边相 | 感应雷 | | | |
| 57 | 右边相 | 感应雷 | | | |
| 59 | 右边相 | 感应雷 | | | |

目前泸州电业局一直坚持采用的两种降阻方式是：外引接地方式，也就是俗话说的接地引下线暗改明；以及加装石墨接地模块的方法。以上两种方式中，外引接地方式在 110 kV 及以上电压等级线路中已经普遍展开，取得了非常好的实际应用效果。加装石墨接地模块目前已在 35~220 kV 线路中推广，效果比较明显，并且石墨接地模块具有轻便、安装方法简单、灵活等诸多优点。

其他各种类型的防雷措施，比如避雷器、避雷针、接闪器等等，都是建立在杆塔接地电阻合格的基础之上。避雷针、避雷线是将保护范围内的雷电吸引到自己身上，通过接地装置安全导入地中。避雷针、避雷线是引雷针、引雷线，通过牺牲自身，保护一定范围内的物体在此空间内不受雷击。为了使雷电流能顺利下泄，避雷针、避雷线的接地体一定要满足要求。

3.4 220 kV 纳叙一、二线雷击跳闸情况及改造措施

220 kV 纳叙一、二线为该局 2009 年新投运的 220 kV 同塔双回线路，全线均位于泸州南部的山区之中，属于多雷区域。由于该线路的设计时间为 2007 年，对于防雷措施的考虑不够周全，全线直线塔避雷线对上导线的保护角均为 22° 左右，部分直线转角塔的避雷线保护角度数甚至达到了 30° 以上。而经过 2009 年的统计分析，220 kV 纳叙一、二线在以线路为中心半径 1 km 的范围内共落雷 1 274 次，处

于极其容易遭受雷击的区段，在进行防雷设计时应当将线路的保护角设计为 10° 以下。

2009 年全年，220 kV 纳叙一、二线共发生 4 次雷击跳闸，均为绕击形式，故障点均为中、上相。

2010 年，该局在 220 kV 纳叙一、二线上安装了 2 组线路避雷器、8 组雷电接闪器。2010 年 1 月至今共发生 2 次雷击跳闸，2 次均为绕击形式。2 处故障点均不在避雷器、接闪器的保护范围之内。

因此，雷电接闪器、避雷器对于防止线路绕击跳闸还是有作用的，前提是一定要保证杆塔的接地电阻合格。2010 年该局在该线路上安装了雷电接闪器之后跳闸次数减少了 50% 就是一个很好的证明。

从 U_A 表达式可知，绕击时导线上电压幅值随雷电流 I 的增加而增加，若超过线路绝缘子串的，则绝缘子串将闪络。绕击耐雷水平 I_k 可令 $U_A = U_{50\%}$ 来计算，即

$$I_k = U_{50\%} \frac{2Z_s + Z_c}{Z_s Z_c}$$

中国现行标准建议也可以根据 $U_A \approx 100 I$ 来近似估算线路绕击时的耐雷水平，因而有

$$I_k = \frac{U_{50\%}}{100} \quad (3)$$

由上式可以求出 110 kV、220 kV 线路绕击式耐雷水平分别只有 7、12 kA。因此线路的绕击耐雷水平是很低的，要提高线路的绕击耐雷水平只能通过以

下几种途径:一是增加线路的绝缘,比如增加一到两片绝缘子;二是增大避雷线的保护角,部分重要的电源线路采用 0° 甚至负保护角;三是采取其他防雷措施,比如在易击段线路上安装避雷器等防绕击装置。就目前的情况来说,线路投运以后杆塔的形式已经固定,无法再增加线路绝缘、增大避雷线保护角,采取其他防雷措施成为最简单有效的方法。泸州电业局在 220 kV 纳叙一、二线上取得一定的成功经验后,决定采取进一步的防雷措施,在线路上安装防绕击避雷针、加装线路避雷器,以期能够更加减少雷击跳闸次数。

4 输电线路防雷保护措施的适用性总结

4.1 架设避雷线

架设避雷线是输电线路防雷保护有效措施。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有分流作用,可以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;此外,通过对导线的耦合作用可以减小线路绝缘子的电压;其次对导线的屏蔽作用还可以降低导线上的感应过电压。从该局的实际运行经验中可以看出,架设避雷线对于耐雷水平较低的 35 kV 线路尤其重要。而对于 110 kV 及以上电压等级线路,从前面的分析可以看出,绕击已经成为威胁 110 kV 及以上线路的主要雷击形式,因此在条件允许的情况下尽可能地增大线路的保护角是非常有必要的,新建的 110 kV、220 kV 同塔双回线路最好是都能够采用 0° 甚至负保护角。

4.2 降低杆塔接地电阻

降低杆塔接地电阻可以减小雷击杆塔时的电位升高,这是配合架设避雷线所采取的一项有效措施。在土壤电阻率低的地区,应充分利用铁塔、钢筋混凝土杆的自然接地电阻。在高土壤电阻率的地区,用一般方法很难降低电阻时,可采用多根放射形接地体,或采用有效的降阻剂降低接地电阻值。目前该局已经将降低接地电阻作为一项运行的基本工作来做,一切的防雷措施都必须建立在接地电阻合格的基础之上。在运行工作中,加装线路杆塔石墨接地、水泥杆接地引下线暗改明均为日常的工作内容。

4.3 安装线路避雷器等其他防雷装置

对于 110 kV 及以上电压等级输电线路,绕击跳闸为主要的雷击跳闸类型,在保证接地电阻合格的情况下,采取安装线路避雷器等其他装置成为了主要的

防绕击措施。目前该局安装的防雷装置有线路避雷器、雷电接闪器、可控避雷针,这 3 种装置当中,避雷器的使用经验已经比较丰富,效果也比较好,但是安装比较麻烦。雷电接闪器的安装比较简单,但是在原理上只能防直击雷,无法防反击雷,使用经验也只有一年。可控避雷针是近年来推出的一种新式防雷装置,从原理上分析可以防绕击和反击,但是使用经验仍然为零,其效果有待验证。

4.4 合理选择输电线路路径

大量运行经验表明,线路遭受雷击往往集中于线路的某些地段,称之为选择性雷击区,或称为易击区。线路若能避开易击区,或对易击区线段加强保护,则是防止雷害的根本措施。因此作为运行单位在日常工作中一定要注意特殊区段的清理建档工作。

5 结 语

架空线的防雷工作是一项长期复杂的系统工程,架空输电线路防雷设计的目的就是提高线路的耐雷水平,降低线路的雷击跳闸率,确保电网的安全运行。在考虑线路防雷方式时,应考虑到线路遭受雷击的类型,进行相应的防雷设计保护,同时应全面考虑线路的重要程度、系统运行方式、线路经过地区雷电活动强弱、地形地貌特点、土壤电阻率的高低条件,结合当地原有线路的运行经验,综合比较,因地制宜,采取合理的防雷保护措施。

参考文献

- [1] 胡毅. 输电线路运行故障分析与防治 [J]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 63—121.
- [2] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册第二版 [Z]. 北京: 中国电力出版社, 121—145.
- [3] DL/T 620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [4] 陈文旺. 浅谈电力系统输电线路与防雷措施 [J]. 机电信息, 2009, 36 (246): 105—106.
- [5] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [6] 沈培坤, 刘顺喜. 防雷与接地装置 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [7] 叶清泉, 林闻达. 输电线路防雷处理 [J]. 中国科技信息, 2008(21): 169—170.
- [8] 张鹏, 陈宇民. 110 kV 输电线路防雷分析 [J]. 云南电力技术, 2008, 36(5): 17—19. (收稿日期: 2010—10—10)

变电站电压异常原因判断及处理方法

杨秀蓉

(自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘要:对变电站电压异常的表现形式及电压异常的判断、处理方法进行了系统的分析、归纳、总结,供变电运行和电网调度运行人员参考,以提高变电站电压异常故障处理的效率,避免设备因电压异常跳闸及损坏等扩大事故的发生。

关键词:电压;异常;判断;处理

Abstract: The abnormal phenomenon of voltage in the substation are analyzed and summarized as well as the judgment and solutions of abnormal voltage. It gives a reference for the running and dispatching personnel to improve the efficiency of dealing with the failures caused by abnormal voltage and to prevent severe accidents such as equipment tripping and damages caused by abnormal voltage.

Key words: voltage; abnormal phenomenon; judgment; solution

中图分类号: TM811 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0065-03

因雷击、操作、谐振过电压及设备老化等造成电气一次设备接地、断线或短路故障,或因电压二次测量回路断开或短路等引起变电站电压异常的情况非常普遍。变电运行和调度运行值班人员由于对电压异常原因判断失误,处理延迟,引起变电站母线设备长时间过电压,导致主变压器间隙过电压保护动作跳闸或变电设备绝缘因过电压而击穿爆炸的情况时有发生。因此,掌握变电站电压异常的表现形式及其判断和解决方法,快速隔离电压异常故障,避免设备因电压异常跳闸及损坏等扩大事故的发生,对变电运行和电网调度运行均至关重要。

1 变电站电压异常的表现形式

目前,变电站基本实现无人值守,可在调度端 MMI 和中心监控站显示某变电站各电压等级的一个线电压和三个相电压值,中心监控站可接收变电站保护动作跳闸及设备异常报警等自动化信息,变电运行值班人员可进行远程监控和开关远方拉合闸单一操作。在监控中心站和电网调度中心,变电运行和电网调度人员接收到的电压异常信号一般有以下 3 种表现形式。

(1) 变电站各电压等级母线电压均异常:表现为变电站的各电压等级母线电压均异常,并发出各电压等级电压异常的告警信号。此种现象一般发生在单电源供电的末端变电站。

(2) 变电站某一电压等级母线电压异常且母线

不接地:表现为变电站的某一个电压等级母线电压异常,三相电压值不平衡,与额定电压值不符,有的相电压升高,有的相电压降低,其他电压等级的母线三相电压正常。

(3) 变电站某一电压等级母线电压异常且母线接地:母线接地一般表现在不接地或经消弧线圈接地的电力系统中。表现为变电站发出“某一电压等级母线接地”告警信号,同时该母线电压异常三相电压值不平衡,与额定电压值不符,有的相电压升高,有的相电压降低,其他电压等级的母线三相电压正常。

2 变电站电压异常的判断及处理

2.1 变电站全站电压异常的判断及处理

现象:变电站出现各等级电压均异常,且没有“母线接地”信号。此种现象一般发生在单电源供电的末端变电站,首先考虑高压侧一次设备故障,一般不考虑电压二次回路故障。高压侧一次设备故障情况主要考虑以下两方面。

(1) 变电站电源进线单相或两相断线且不接地。

判断:调度端 MMI 上或中心监控站监控屏上检查变电站各侧母线电压显示为一相升高、两相降低,或者一相降低、两相升高,高压电源进线三相电流采样值有一相或两相电流为零或大大减少,则可初步判断为进线存在单相或两相断线。

处理:①如果变电站为单电源供电,则可在中心站直接断开变电站电源进线两侧断路器,快速切除故障;②如果变电站为一供一备电源方式,则可在中心

站通过备自投方式将故障线路切换至备用线路运行,快速切除故障。

(2)变电站高压进线及母线设备故障,如进线侧至高压侧母线引流线断线且不接地,进线开关、刀闸损坏等。

判断:调度端 MMI 上或中心监控站监控屏上检查变电站各侧母线电压显示为一相升高、两相降低,或者一相降低、两相升高,电源进线三相电流采样值均正常,则初步判断为变电站高压进线及母线设备故障引起的电压异常。

处理:立即到变电站对高压进线开关、刀闸、母线及引流线等进行检查。如发现有断线或损坏等,则直接断开变电站电源进线断路器及两侧隔离开关,快速隔离故障。

2.2 变电站某一电压等级母线电压异常且母线不接地的判断及处理

针对这类电压异常,首先要判断是否是测量回路故障,排除了此类故障后,再考虑是一次设备故障或是运行参数异常。用线电压值可以很好地将两者区分开来。凡是 TV 或其二次回路故障,相关的线电压值都会变小,在调度端 MMI 上或中心监控站监控屏上可直观地判断。

2.2.1 测量回路故障

判断:①调度端 MMI 上或中心监控站监控屏上检查电压异常所在母线电压的线电压,如果三线电压均变小,则初步判断为该电压等级的母线 TV 测量回路故障;②检查相电压,如果一相电压降低或降为零,另两相电压正常,报出“电压回路断线”信号,则为 TV 二次保险熔断或空气开关跳闸;如果一相电压降低或降为零,另两相电压正常,同时报出“接地信号和电压回路断线”信号,则初步判断为 TV 一次保险熔断。

处理:①根据初步判断,检查相应母线 TV 高、低压熔断器或空气开关的完好性,快速排除熔断器熔断或空气开关跳闸故障;②如果熔断器或空气开关均处于完好,则应检查二次电压回路接线是否存在断线、短路或接线错误、电压表计异常等。

2.2.2 一次设备故障

判断:变电站某一电压等级母线电压异常且母线不接地的一次设备故障,主要由电压异常母线所供线路断线引起。在调度端 MMI 上或中心监控站监控屏上检查异常母线电压显示为一相升高、两相降低,或

者一相降低、两相升高,检查电压异常母线上某一出线一相或两相电流减小或为零,其他一相或两相基本正常或相对减小,则初步判断为该出线存在单相或两相断线故障。

处理:根据初步判断,直接拉开该出线。如果母线电压恢复正常,则故障排除。如果母线电压未恢复正常,采取逐一试拉馈线仍是处理一次设备故障引起的电压异常的主要手段。

2.2.3 一次设备及二次测量回路均有故障

判断:常见的有一相高压熔丝熔断及一相接地同时出现,当熔断相与接地相是同一相时,接地熔断相可能升高,也可能降低,其余两相升高。当接地相与熔断相是异相时,接地相为零,熔断相可能升高,也可能降低,另一相升高。

处理:一次设备故障与测量回路故障同时出现时,首先要将一次设备故障排除,再处理测量回路的故障,方法同前。

2.2.4 电网运行参数异常的判断及处理

(1) 谐振

判断:电压一般显示为一相升高、两相降低,或者一相降低、两相升高或三相电压异常升高,表计可能达到满刻度,三相电压基本平衡,一般不会发出“母线接地”信号。如果出现以下四者之一,则可初步判断出现系统谐振:①合空载母线;②出现跳合闸或接地故障;③大面积甩负荷;④三相电压均升高,且表计指示不稳定有摆动现象。

处理:①合空载母线产生的谐振,则投入任一馈线,谐振现象就可消除;②改变系统参数,可采用将电网解列或并列方法来实现,可采取断开充电断路器,投入母线上的线路,投入母线等方式来改变接线方式;投入母线上的备用变压器或所用变压器;将 TV 开口三角侧短接;投、切电容器或电抗器等方法。

(2) 消弧线圈脱谐度过低及系统不平衡电压过大

判断:系统电压三相基本平衡,但不平衡电压 $3U_0$ 过大。

处理:任意将一条馈线拉闸,电压异常消失,然后再将该馈线合闸,电压异常不再出现。

(3) 操作过电压

判断:如果在分、合空载线路,切除空载变压器或并联电抗器操作,或非对称故障分闸和振荡解列以及操作时产生电弧接地时出现三相电压过高,则初步判定为操作过电压。

处理:系统通过安装一些装置,如在开关与保护设备间加装氧化锌避雷器和 R-C 阻容吸收装置来抑制操作过电压。在日常操作中,防止操作过电压最有效的办法就是合理安排操作程序,不发生误操作。

2.3 变电站某一电压等级母线电压异常且母线接地的判断及处理

2.3.1 母线 TV 高压熔丝熔断

判断:如果变电站某一电压等级母线 TV 一相电压降低或降为零,另两相电压正常,同时报出“接地信号和电压回路断线”信号,则初步判断为该母线 TV 一相高压熔丝熔断。

处理:检查并更换该母线 TV 熔断相的高压熔丝。

2.3.2 线路单相接地

判断:①如果变电站某一电压母线 TV 一相电压为 0,其余两相相电压升高为线电压,并发出“母线接地”信号,则初步判断为该母线上所接出线存在单相完全接地。②如果变电站某一电压母线 TV 一相电压升高、两相降低,或者一相降低、两相升高,且表计指示不稳定有摆动现象,并发出“母线接地”信号,则初步判断为该母线上所接出线存在单相不完全接地。

处理:线路单相接地在 35 kV 及以下不接地或经消弧线圈接地的电力系统中是最常见的接地故障,单相接地时,一般保护装置不动作。为提高故障处理效率,缩小停电范围,保证重要客户安全可靠供电,处理单相接地故障应遵循以下步骤。

①按照线路接地保护指示信号查找。如母线接地同时,有线路保护动作跳闸并重合闸动作成功后,接地信号依然存在,则接地点在动作跳闸并重合的线路上,应快速断开该线路开关进行隔离。

②分割网络,选出故障网络(注意防止电网并列)。如果故障变电站为一供一备方式供电,在断开主电源的同时,应采取自备装置自动投入备用电源供电。

③分列母线,查出故障母线(但必须保证每段母线均有电源)。如变电站采用单母线并列运行,两段母线上均有电源,则发生母线接地时,可将分段开关断开,查出故障母线。

④拉路试验,排查接地线路。按照线路供电重要性,依次拉开工作过的、次要用户和重要用户、有保电任务的线路。馈线有多个分段断路器的,由负荷侧向电源侧逐一试拉,先主线后支线,确定故障线段。

一般而言,母线接地很罕见。当每一条馈线都试拉过,而电压异常并未消失时,就要考虑是不是出现多重故障了。对于多重故障,如同相不同馈线同时接地、异相不同馈线同时不完全接地等,判断处理的方法会比较复杂。若馈线能形成手拉手接线,则将每一条线路转由其他母线供电,看看是否引起其他母线接地,来判断该线路是否接地;若没有手拉手接线,则要将该母线所有馈线都拉闸,来确定是不是母线故障,若不是母线故障,再逐一试送馈线,确定故障线路。

2.3.3 三相熔丝熔断且线路单相接地

判断:三相电压为零,未发母线接地信号。

处理:先按熔丝熔断进行检查处理。再到开关室听母线是否有电晕放电声,如有则说明有接地故障,就要先处理接地故障,再处理 TV 熔丝熔断故障。

2.3.4 消弧线圈档位不适当

判断:如果消弧线圈档位调档后,三相电压不平衡,但差别不大,发出母线接地信号,且相关变电所的电压都不一致,则判断为消弧线圈档位不适当。

处理:调整消弧线圈至合适档位。

3 结 语

随着电网的快速发展,智能化程度越来越高,变电站电气设备基本实现了远方监控。但在远方操作方面,还需要进一步更新观念,充分利用先进的设备和手段,特别在变电站电压出现异常需要进行拉路试验时,采用在中心监控站进行远方拉路试验,将大大提高故障处理效率,有效降低因电压异常造成主变压器间隙过电压保护动作跳闸及电气设备损坏的概率,确保电网安全运行。另外,采用线路开关安装三相 TA,可以通过线路三相电流采样值辅助判断线路断线或接地故障,大大降低拉路试验造成的非故障线路停电的概率,提高供电可靠性。

参考文献

- [1] 周泽存主编.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 湖南电力学校主编.发电厂变电所电气设备[M].北京:水利电力出版社,1983.
- [3] 四川电力系统调度管理规程[Z].2008.

(收稿日期:2010-10-20)

变压器温度监测方法及常见故障浅析

刘祖惠

(成都电业局, 四川 成都 610041)

摘要:对变压器温度监测方法进行了介绍,对遇到的故障进行了分析并提出了改进方法。

关键词:变压器测温;传感器;复合传感器

Abstract: The monitoring method of transformer temperature is introduced, the occurring faults are analyzed and the improvements are proposed.

Key words: temperature measurement of transformer; sensor; compound transducer

中图分类号: TM835 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0068-03

变压器是变电站重要设备之一。变压器运行时,其绕组和铁心的电能损耗都将转变为热能,为了有效地监测变压器温度,防止变压器的绝缘老化,延长变压器的运行寿命,必须采用更先进更可靠的监测手段。下面着重阐述独立式电阻传感器测温和压力式温控器测温的原理以及复合式传感器温控器和绕组温度指示控制器在变电站的运用及运行中几种常见故障。

波动形式表现出来,其波长的范围极广,从短波、X光、紫外光、可见光、红外光一直到电磁波。而在温度测量中主要是可见光和红外光,因为此类能量被接收以后,多转变为热能,使物体的温度升高,所以一般就称为热辐射。

非接触测温的特点是感温元件不与被测对象相接触,而是通过辐射进行热交换,故可避免接触式测温法的缺点,具有较高的测温上限。此外,非接触测温法热惯性小,可达千分之一秒。

1 温度及其测量

温度是衡量物体冷热程度的物理量。温度的测量是利用某些材料或元件的性能随温度变化的特性,通过测量该性能参数从而达到测量温度的目的。

温度测量有两种基本形式:接触式测量和非接触式测量。

1.1 接触式测量

接触式测量是以“处于同一平衡状态下的物体具有相同温度”的原理为基础,测量时仪表的触头要与被测物处于热平衡状态,显示结果才准确。

接触式的特点是测温元件直接与被测对象相接触,两者之间进行充分的热交换,最后达到热平衡,这时感温元件的某一物理参数的量值就代表了被测对象的温度值。

1.2 非接触式测量

非接触测温主要是利用光辐射来测量物体温度。任何物体受热后都有一部分的热能转变为辐射能,温度越高,则发射到周围空间的能量就越多。辐射能以

2 变压器温度的监测

变压器温度的测试主要是接触式测温。测试方法有以下几种。

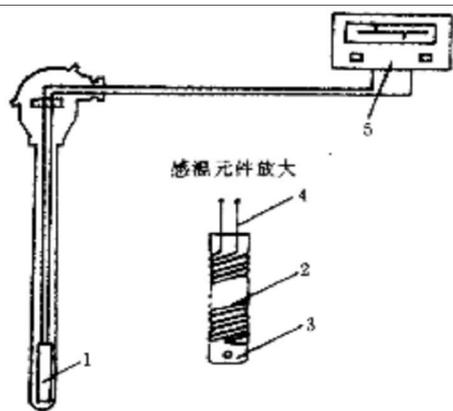
2.1 独立式电阻传感器测温

独立式电阻传感器测温主要用于变压器上层油温的测量。

传感器:是指将感受到的物理量、化学量等信息,按照一定规律转换成便于测量和传输的信号的装置。

独立式电阻传感器的结构:由热电阻、绝缘套管、保护套管、接线盒及接线盒盖组成。

独立式电阻传感器测温工作原理:采用热电阻作为测温元件,利用金属导体的电阻值随温度变化而改变的特性来进行温度测量的。纯金属及多数合金的电阻率随温度升高而增加,即具有正的温度系数。在一定温度范围内,电阻-温度关系是线性的。温度的变化,可导致金属导体电阻的变化。这样,只要测出电阻值的变化,就可达到测量温度的目的。



1 为感温元件; 2 为铂丝; 3 为骨架;
4 为引出线; 5 为显示仪表

图 1 热电阻的作用原理

电阻与温度的关系可用下式表示为

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_0 (t - t_0)]$$

R_t 为温度 t 时的电阻值; R_0 为温度 t_0 时的电阻值; t_0 为起始温度, 一般规定为 0°C ; α_0 为温度系数 (以 0°C 为起始温度);

独立式电阻传感器测温常见的故障有: ①热电阻电阻丝之间短路或接地; ②热电阻电阻丝断开; ③保护套管内有积水或污物, 局部短路; ④电阻元件于接线盒间引出导线断路; ⑤连接导线接触不良使电阻值增大, 或有局部短路等。

2.2 压力式温控器测温

压力式温控器的结构及原理: 由充满感温物质的温包、传压毛细管及盘簧管构成。温包内充填的感温物质有气体、液体或液体蒸气等。测温时, 温包置于被测介质中, 温包内的感温物质因温度升高, 其体积膨胀, 压力增大, 从而使盘簧管变形, 借助齿轮或杠杆转动机构传动, 由指针指示出相应的温度值。同时驱动微动开关输出电信号。这些微动开关分别用于控制变压器冷却系统、温高报警系统、温高跳闸系统, 达到监控变压器温升的目的。

随着变电站综合自动化系统的广泛运用, 变压器温度测量不仅要有本体温度的显示, 还要有数据远传到数百米远的控制室里, 在计算机上显示出来。压力式温控器及电接点仅完成本体温度监控功能, 而远方微机监测及越限报警等功能则需要加装非电量电量转换变送器后再进行 A/D 转换, 送到监控微机进行数据处理。

2.3 含复合式传感器的温度指示控制器的测温

复合传感器的温度指示控制器的构成是在压力式温度控制器温包结构上增加一套热电阻装置。温

度遥测方式常见有两种形式: 一种是将 Pt100 铂电阻信号从温控器的接线上引出, 通过控制电缆将温度信号远传到数百米远的控制室里, 经温度变送器转换为电压 ($0\sim 5\text{ V}$) 或电流 ($4\sim 20\text{ mA}$) 输出方式; 另一种是在油温指示控制器内嵌装一个温度变送器, 直接输出电压 ($0\sim 5\text{ V}$) 或电流 ($4\sim 20\text{ mA}$) 信号, 这些信号再送至模拟量数据采集装置进行数据处理, 处理后的数据送监控机计算、标度系数处理, 还原显示油温的摄氏温度数值。实现了变电站远方监测变压器的油温。

2.4 绕组温控仪测温

变压器内部绕组是温度最高的部件, 当负载增加时绕组的温度迅速升高。因此, 为了能够全面地测控变压器内部的温度参数, 绕组温度也是重要的测量环节。由于绕组的高压原因, 直接在绕组附近放置探测器非常危险, 因此通常采用间接系统来进行测量。

绕组温控仪采用“热模拟”的方法间接测量变压器绕组温度的原理。变压器绕组温度 T_1 等于变压器上层油温 T_2 以及绕组对油的温升 ΔT 之和, 即 $T_1 = T_2 + \Delta T$ 。当温包受热时, 感温包内的感温介质受热膨胀体积随之产生增量, 这个体积增量通过毛细管传递到仪表内的弹性元件, 使之产生一个相对位移, 这个位移经机构放大后, 便可指示变压器上层油温的温度 T_2 。当变压器带上负荷后, 通过变压器的电流互感器 (一般有专用绕组) 二次绕组电流, 经匹配器调整后, 形成与负荷成正比的加热电流, 流经嵌装的电热原件, 电热原件产生的热量使感温介质产生附加膨胀, 从而使弹性元件产生附加位移, 这个位移量就反映变压器负荷电流对绕组的温升 ΔT 。因此, 在变压器加载后, 测量元件的位移是由变压器上层油温和变压器加载的电流所决定的, 这样就反映了变压器上层油温和绕组对油的温升之和, 即变压器的绕组温度。

3 变压器远方测温

变压器远方测温可以分为两种类型, 一类是通过热电阻信号进行数据远传。其热电阻可以是单独的传感器, 也可以在本体温控仪的传感器中采用复合结构, 通过温度变送器将非电量转换为电量送至主控室的监控盘上。另一类是用电信号进行远传。即温度变送器安装在温控仪内部, 常见于绕组温控仪。其结构是跟随压力式温控仪的指针转动, 带动一个滑线电

阻器,这一电阻值的变化,作为温度变送器的输入。

无论是热电阻信号通过温度变送器进行数据远传,还是电信号进行数据远传,它们都要向数采单元提供直流模拟信号,通过信号变换电路、放大电路、非线性校正或开方运算电路、A/D 转换和驱动电路、数显驱动电路、V/I 转换器以及调节触点电路实现 A/D 转换,最终在站端机上还原为温度值。

远方测温原理框图如图 2。

4 变压器测温中遇到的几种常见故障

1) 变压器在运行时,本体温度显示正确,而微机监控窗口数据显示不稳定,出现“天文”数量级跳变或根本不能正常工作的现象。

对出现这种现象的变电站,经过观察分析发现变电站周围有发射塔,使周围环境有很强的电磁污染和各种高频干扰信号,加之国产温控仪自身电磁兼容特性差、抗干扰能力不强等原因,造成了本体温度显示正确,而微机监控窗口数据显示不稳定,出现“天文”数量级跳变或根本不能正常工作的现象。站内温度变送器由早期数字温度表进行转换,其输入电路基本无抗干扰考虑造成。把测温变送器使用的抗干扰能力差的三端输入形式改为四端输入,增加变送器(数表)输入抗干扰能力,使其能在较强高频信号干扰下正常工作。同时还采取了把变送器模拟量输出传输改用单芯屏蔽加总屏蔽电缆等措施,初步取得了效果。

2) 新安装后不久的温控仪本体温度指示不能随温度的变化而变化,而远方温度指示正确。

在现场,认真查找原因,发现温包与毛细管接头处被折了死拐或毛细管中间有被踩扁现象,这样就影响了温包内的感温介质随温度变化体积随之变化的

传递,使指针在刻度盘上指示的数据不能正确反映温度。通过对安装单位与检修队人员的培训,使他们在安装与检修时注意这一方面问题。

3) 某 220 kV 变电站主变压器绕组温度本体指示及远方监控机数据均为 142℃,分装于两侧的两只上层油温表指示同为 50℃。

经查:高压侧,保护及测量 TA 电流为正常值 200 A(变流比为 750/5),测温绕组专用 TA 变流比为 600/5,二次电流为 5 A。鉴于保护及测量 TA 绕组电流 200 A 相同,为正常值,选 600/5 的测温绕组正常二次值应为 1.66 A,现场测得电流为 5 A,其值显然为异常偏大,以 5 A 电流作为绕组温度的辅助加热条件,显然将引起温度计示值急剧增加。出现绕组测温 TA 电流增大 3 倍的可能性一般有两种:① 主变压器 220 kV B 相专用 TA 绕组误将 200/5 抽头作为 600/5 引出。② B 相专用 TA 绕组出现层间匝间短路故障。经主变压器 B 相套管吊心检查,故障原因为本应 600/5 变流比误接 200/5 抽头。

4) 110 kV 机场变电站投运不久,即经常发生监控机上 2 台主变压器温度 130℃,挡位无论实际多少都显 19 挡。

现场发现:该站 2 台主变压器测温、测挡 4 个非电量经转换后直接引入监控主机模拟通道板(4 个模拟量输入,又有 com 参考点),则任一信号受干扰,4 个量均互受牵连极限反映。针对机场附近电台、机站、通信设备等发射的高频电磁信号极其丰富的特点,提出了两项改进建设。

(1) 将温度变送器更换为“四线制”输入式,增强输入电路完全补偿能力。

(2) 主变压器端子箱至主控室传输电缆全部更换为单芯屏蔽加总屏蔽的铜芯电缆,为此,干扰信号得到有效抑制,所有非电量监测得以正常工作。

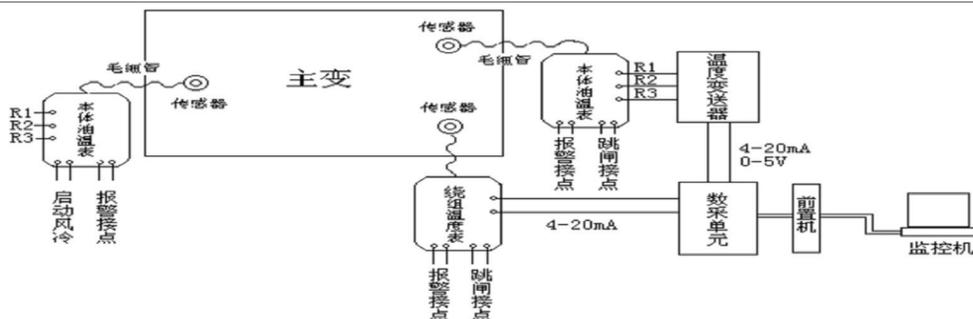


图 2 远方测温原理框图

(下转第 90 页)

表 5 炉效率标定试验

| | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| $W_{ar} / \%$ | 6.2 | 6.2 | 6.2 |
| $V_{daf} / \%$ | 23.77 | 23.77 | 23.77 |
| $N_d / \%$ | 1.02 | 1.02 | 1.02 |
| $C_d / \%$ | 60.45 | 60.45 | 60.45 |
| $H_d / \%$ | 3.64 | 3.64 | 3.64 |
| $A_d / \%$ | 28.10 | 28.10 | 28.10 |
| $Q_{net, ar} / \text{kJ/kg}$ | 20604 | 20604 | 20604 |
| $C_{th} / \%$ | 1.26 | 1.94 | 1.45 |
| $C_{lz} / \%$ | 16.15 | 7.99 | 7.62 |
| $q_f / \%$ | 1.33 | 1.14 | 0.93 |
| $t / ^\circ\text{C}$ | 138.3 | 130 | 130.2 |
| 进口氧量 / % | 6.08 | — | — |
| 出口氧量 / % | 6.75 | 4.56 | 5.10 |
| $q_e / \%$ | 6.52 | 5.20 | 5.38 |
| $q_f / \%$ | 0.23 | 0.21 | 0.21 |
| $De / (\text{t/h})$ | 410 | 410 | 410 |
| 实际蒸发量 / (t/h) | 410 | 400 | 400 |
| $q_g / \%$ | 0.59 | 0.61 | 0.61 |
| 锅炉效率 / % | 91.33 | 92.84 | 92.87 |

表 6 工况 1 空预器漏风率

| 序号 | 项 目 | 数值 |
|----|------------|------|
| 1 | 进口烟气氧量 / % | 6.08 |
| 2 | 出口烟气氧量 / % | 6.75 |
| 3 | 空预器漏风率 / % | 4.23 |

(上接第 70 页)

5) 复合传感器与主变压器传感器孔靴的匹配。

近几年成都电业局所建武侯、安顺桥等 7 个变电站选用了(重庆)ABB 主变压器,其配套用了国内某厂家的温控仪,调试中发现,实验室检定合格的温控仪经现场安装后,无论油温或绕组均存在监控机数值小于本体温控仪数值。且随“负荷”愈重,有温差愈大趋势。经反复检查并卸掉传感器护套,发现主变压器传感器孔深与复合传感器不匹配,致使嵌套在气体温包上部的 Pt100 热电阻有近 1/2 位置不能全部进入油面下,而暴露在箱盖外,使其“本体”与“远方”取样不在同一个条件下。为此将变压器传感器孔洞,复合传感器各部分尺寸绘图传真给厂家,并提出压缩复

表 7 检修前后比对

| | 2009 年总部 | 2010 年新力 | 前后对比 |
|---------|----------|----------|--------|
| 炉效 / % | 89.58 | 92.34 | +2.76 |
| 漏风率 / % | 21.4 | 4.23 | -17.17 |

$$\text{改造前每小时耗煤} = 3.29 \times 10^5 (3454 - 901) / 0.8958 \times 19840 = 47.26 \text{ t/h}$$

$$\text{改造后每小时耗煤} = 3.29 \times 10^5 (3454 - 901) / 0.9234 \times 19840 = 45.84 \text{ t/h}$$

$$\text{年经济效益} = (47.26 - 45.84) \times 4370 \times 550 = 341.297 \text{ 万元}$$

9 结 语

随着节能环保理念的普及,采用节能高效技术改造老旧设备逐渐增多。通过对 4 号炉尾部受热面治理与优化后,锅炉的排烟温度大幅度降低,漏风率下降明显,锅炉热效率得到有效提升,满足了烟气脱硫及除尘器改造需求,取得了可观的经济效益,提前实现了总部三年炉效达标治理目标。

参考文献

- [1] 西安电力学校编. 热工学基础 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

(收稿日期: 2010-09-27)

合传感器尺寸,改进装配的技改方案。厂家积极响应,改换工艺工装,生产出新复合传感器(同时全部更换了与 ABB 变压器配套的温控仪)。

参考文献

- [1] 变电站综合自动化实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 变电站综合自动化实用技术 1 000 问 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 变压器温度控制器使用说明书 [Z].
- [4] 温度测量与仪表维修问答 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.

(收稿日期: 2010-09-28)

220 kV 耐张串复合绝缘子运行情况分析

许文荣, 何庆文, 黄梓容

(东莞市高能电气股份有限公司, 广东 东莞 523128)

摘要:总结了广东电网复合绝缘子应用于耐张串的运行情况,对运行后 220 kV 耐张串复合绝缘子进行抽样试验,并对抽样试验结果进行了分析。讨论了耐张串复合绝缘子使用中担心的主要问题,对今后耐张串复合绝缘子的设计、选型及运行提出建议。

关键词:复合绝缘子;耐张串;运行试验;建议

Abstract: The operating condition of composite insulators used in tension strings in Guangdong power grid is summarized. The sampling test is carried out for the running 220 kV tension strings with composite insulator and the results of the sampling test are analyzed. The major problems concerned in the usage of tension string with composite insulators are discussed. Finally, the recommendations for the design, mode selection and operation of tension string with composite insulator are proposed.

Key words: composite insulator; tension string; operation test; recommendation

中图分类号: TM853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0071-03

中国电网自 20 世纪 80 年代开始使用复合绝缘子,复合绝缘子以其重量轻、防污闪性能好等优点在中国电力线路中已得到越来越广泛的应用。至今为止,中国输变电设备中已成功地使用了复合绝缘子约 200 万支,大幅降低了输变电设备的跳闸率,极大地提高了输变电设备安全运行可靠性;近几年,在国家重点输变电工程中,已越来越多地应用高电压、特高压、大吨位的交直流复合绝缘子。如 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程,向家坝—上海及云南—广州 ±800 kV 特高压直流输电示范工程已大量使用复合绝缘子。

目前国内复合绝缘子主要使用在直线塔上做悬垂串、跳线串和 V 型串,各运行部门对于复合绝缘子是否能够用于耐张串仍持怀疑态度。参考文献 [1] 也明确指出“耐张串宜选用玻璃绝缘子或瓷绝缘子,不宜使用复合绝缘子”。但运行单位根据需要还是在耐张串上使用复合绝缘子,特别是在 220 kV 及以下线路广泛应用,早在 1993 年复合绝缘子就开始被应用于 220 kV 线路耐张串(黑龙江电网)且运行状况良好^[2]。下面介绍广东电网耐张串复合绝缘子使用及运行情况,分析了运行后 220 kV 耐张串复合绝缘子试验,讨论了目前耐张串复合绝缘子使用中担心的主要问题。

1 耐张串复合绝缘子运行经验

国外复合绝缘子应用并未区分悬垂串和耐张串,

只是耐张串在运行中因导线舞动时承受负荷比悬垂串大,因此选用额定机械负荷较大的复合绝缘子。如北美复合绝缘子在耐张串上的使用比率约为 18%。国内虽然一直未系统研究和推广耐张串复合绝缘子,但运行单位根据实际需要在耐张串上使用复合绝缘子,积累了宝贵运行经验。据不完全统计,调研 18 个省市中有 7 个省已使用 500 kV 耐张串复合绝缘子,总计 1 094 支,最长运行年限 16 a,运行情况良好。2002 年 500 kV 惠汕甲线试用 60 支国产耐张串复合绝缘子,运行 4 a 后 4 支样品抽样试验结果满足参考文献 [3] 的要求,特别是抽取的 4 支耐张串复合绝缘子破坏负荷为 403~418 kN,与挂网前破坏负荷 412~415 kN 相比,说明运行该批耐张串复合绝缘子运行 4 a 后其机械强度没有明显下降。

广东省积极尝试使用耐张串复合绝缘子,特别是在 220 kV 及以下线路。耐张串复合绝缘子使用量达 58 824 支,占运行复合绝缘子总数 154 819 支的 38%,其中 500 kV 90 支(占运行 500 kV 复合绝缘子的 1.8%)、220 kV 6 444 支(占运行 220 kV 复合绝缘子的 15%)、110 kV 52 320 支(占运行 110 kV 复合绝缘子的 48.9%),呈现电压等级越低,耐张串复合绝缘子使用量越高。这些运行经验为今后耐张串复合绝缘子的设计及选型积累了宝贵经验。

2 耐张串复合绝缘子运行后抽样试验

表 1 广东省 116 支运行后耐张串复合绝缘子详细统计情况

| 数量 / 支 | 端部金具工艺 | | 护套成型工艺 | | 运行年限 N/a | |
|--------|--------|----|--------|----|----------|--------|
| | 外楔 | 压接 | 套装 | 注射 | N < 10 | N ≥ 10 |
| 116 | 90 | 26 | 83 | 33 | 26 | 90 |

表 2 广东省 116 支运行后耐张串复合绝缘子抽样试验结果

| 试验项目 | 试品数量 / 支 | 试验结果 |
|---------------------|----------|--|
| 憎水性试验 | 116 | 运行年限 N > 10 HC2~HC6; 运行年限 N < 10 HC1~HC4 |
| 工频湿耐受电压试验 | 116 | 工频 1 m in 湿耐受试验均通过 |
| 水煮试验、 陡波冲击耐受电压试验 | 20 | 通过 |
| 密封性能试验 | 20 | 65% SML/1 m in 渗透时间 20 m in; 通过 |
| 机械负荷破坏试验 | 116 | 外楔工艺: 平均破坏负荷 139 kN, 标准偏差 15.4% 压接工艺: 平均破坏负荷 176 kN, 标准偏差 7.5% |
| 伞套材料试验 | 13 | 套装工艺: 撕裂强度 4.2~8.9 kN/m; 拉伸强度 3~5.3 MPa 拉伸伸长率 51%~104% 注射工艺: 撕裂强度 8.6~14.8 kN/m; 拉伸强度 5.3~6.2 MPa 拉伸伸长率 105%~108% |

2006 年 6 月到 2006 年 9 月, 选取广东省 116 支运行后 220 kV/100 kN 耐张串复合绝缘子进行抽样试验。这些耐张串复合绝缘子端部金具有外楔和压接工艺; 护套成型工艺有挤包护套和整体注射成型工艺; 最长安全运行时间 13 a。116 支运行后耐张串复合绝缘子详细统计情况见表 1。

2.1 试验结果

上述试品按照参考文献 [3] 进行抽样试验, 试验结果见表 2。

2.2 结果分析

(1) 憎水性试验结果表明, 除个别运行时间超过 10 a 的产品超过 HC5 外, 大部分憎水性能良好, 满足参考文献 [3] 的要求仍能继续挂网运行。

(2) 工频湿耐受电压试验、水煮试验、陡波冲击耐受电压试验、密封性能试验及机械负荷破坏试验结果表明, 经过长期挂网运行的耐张串复合绝缘子其电气和机械性能满足参考文献 [3] 的要求仍能继续挂网运行。

(3) 伞套材料试验结果表明早期套装工艺因产品长时间挂网运行, 伞套材料机械性能出现下降现象, 改进后的注射工艺伞套材料仍保持较好的机械性能。

(4) 试验结果综合表明, 长时间挂网运行的耐张串复合绝缘子的电气性能和机械性能仍满足参考文献 [3] 的要求, 且整体注射工艺、压接工艺机械和电气性能较优。与长时间挂网直线串复合绝缘子相比, 其机械和电气性能相当, 并无明显的区别。

3 耐张串复合绝缘子使用担心的问题

3.1 运行经验不足

国内耐张串复合绝缘子一直未推广使用, 但各省运行部门根据实际需要积极试用耐张串复合绝缘子, 1993 年黑龙江鸡梨线试用 220 kV 耐张串复合绝缘子; 2002 年惠汕甲线试用了 60 支 500 kV 耐张串复合绝缘子; 2005 年龙政线试用了 64 支 500 kV 耐张串直流复合绝缘子; 且呈现电压等级越低, 耐张串复合绝缘子所占比例越大。据不完全统计, 广东电网耐张串复合绝缘子使用量达 58 824 支, 占运行复合绝缘子总数 154 819 支的 38%, 且已经有 21 万支/a 的运行经验, 运行情况良好, 截止目前未发生机械强度下降导致断串或耐张塔断线或倒塔事故^[4]。

3.2 不准攀爬造成维护和施工的不便

耐张串复合绝缘子其材料为高温硫化橡胶, 采用棒形结构, 伞径较小, 与瓷或玻璃绝缘子存在明显差异。因此参考文献 [3] 明确规定“禁止踩踏绝缘子伞套”, 操作人员不能沿着绝缘子表面从铁塔端到达耐张串导线端, 这给线路检修和维护确实带来了一些不便。由于复合绝缘子与瓷和玻璃绝缘子不同, 无需清扫和零值检测, 因此复合绝缘子一般不需要每年检修。如果确实需要到达耐张串复合绝缘子的导线端工作 (如检查导线、修补导线或更换闪络的复合绝缘子等), 作业人员可以通过多种方法到达导线端: ①用软梯 (或飞车) 通过避雷线进入耐张串导线端进行检修, 作业完毕再由控制绳操作员用绳子牵引, 使作业人员在软梯上沿避雷线滑回铁塔端。②用绝缘硬梯通过软绳与挂钩, 一端挂在铁塔侧的线路金具, 另一端挂钩在导线联板的相关附件上, 检修人员通过硬梯到达导线端进行检修维护。③使用软梯, 把软梯搭

钩在铁塔横担和绝缘子导线侧联板附件上,检修人员通过软梯到达导线侧进行检修,作业完毕通过软体返回铁塔端。利用以上方法,广东电网公司进行了多次耐张串复合绝缘子的检修作业。耐张串复合绝缘子的维护和施工问题可以得到很好的解决,不应成为耐张串复合绝缘子使用的忧虑问题。

3.3 动态载荷下的复杂受力、机械强度下降问题

耐张串受力以拉伸负荷为主,当有风或有冰附着时还要承受风载和冰载,在这种复杂的受力条件下,线路可能会出现导线舞动、次档距振动和微风振动等动态载荷。目前国内外对此问题较少深入研究,参考文献 [5] 对 220 kV 线路复合绝缘子耐张串的动载荷计算结论认为:①导线舞动时,绝缘子耐张串的受力值随舞动幅值的增大,呈线性增长趋势。当舞动峰一峰值达到较大的 7.85 m 时,绝缘子受力增长为初始值的约 1.8 倍。可考虑以 2 倍作为舞动时绝缘子耐张串受力的增长倍数。②考虑风速脉动性的动态风作用下,绝缘子耐张串的受力最大约为仅考虑静态平均风速时的 1.8 倍。③根据计算结果,建议按照设计最大静态载荷的 2 倍确定复合绝缘子耐张串的最大动载荷。④基于现有的复合绝缘子耐张串的运行经验,考虑运行中出现的最大动态载荷,复合绝缘子完全可以应用于输电线路耐张串。

参考文献 [6] 对 D30 mm 芯棒、1 455 mm 长度的复合绝缘子在不同拉伸负荷下进行了 0.1 Hz 或 0.2 Hz 频率、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ 扭转角度的单、双联绝缘子串动态扭转试验,结果表明,经 127 800 次拉扭组合试验后,端部连接为压接式的试品机械破坏负荷平均降低约 5%。武汉高压研究所对国内主要企业的复合相间间隔棒进行了弯曲疲劳和大屈曲试验,试验后各厂家产品的型式试验性能均合格,复合绝缘子的抗弯曲性能未受影响,对交、直流 500 kV 复合绝缘子以双联悬垂串、耐张串形式分别进行了 30 Hz 频率、3 000 万次的振动试验,试验后其机械性能未受影响。上述各种极端试验研究表明,对于耐张串实际运行中所可能出现的拉伸、扭转、弯曲、振动等各种载荷,复合绝缘子均能承受,且机械性能受影响较小^[7]。

因此合理地选取耐张串并联串数和复合绝缘子的机械强度,则复合绝缘子完全能够应用于耐张塔。

3.4 其他,如有关技术文件限制使用

参考文献 [1] 中明确指出“耐张串宜选用玻璃绝缘子或瓷绝缘子,不宜使用复合绝缘子”。但随着各

运行单位积极试用和研究,积累了丰富的运行经验;复合绝缘子制造技术水平的提高、运行可靠性及对复合绝缘子整体技术水平认识的提高,从技术可靠性和经济性上两方面考虑,相关技术文件不应成为耐张串复合绝缘子推广使用的限制条件。

4 结 论

① 220 kV 耐张串复合绝缘子运行经验、运行后抽样试验结果,表明 220 kV 耐张串复合绝缘子运行情况良好,运行后各项性能均仍良好;220 kV 耐张串复合绝缘子在污秽地区推广使用是可行的。

②目前耐张串复合绝缘子使用主要担心的运行经验不足、不准攀爬造成维护和施工的不便、担心动态载荷下的复杂受力、机械强度下降等问题通过各方的研究解决,不应成为耐张串复合绝缘子推广使用的忧虑。

③耐张串复合绝缘子的端部金具采用压接方式,护套成型工艺采用整体注射成型技术,建议按照设计最大静态载荷的 2 倍确定复合绝缘子耐张串的最大动载荷,可以通过增加并联串数或提高机械等级增大安全裕度。

④耐张串复合绝缘子与悬垂串复合绝缘子一样,需要加强运行维护和抽检工作。

参 考 文 献

- [1] 广东省广电集团公司. 广东省广电集团公司悬式绝缘子选型及爬电比距配置导则 [Z]. 广州: 广东省广电集团公司, 2004.
- [2] 陈刚, 蔡炜, 肖国英, 等. 复合绝缘子在耐张串上的使用 [J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 16-17.
- [3] DL/T 864-2004. 标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 樊灵孟, 肖勇, 等. 广东电网污秽地区耐张串试用复合绝缘子运行情况分析 [J]. 电网技术, 2006, 30(12): 37-41.
- [5] 刘平原, 尹成, 等. 220 kV 线路复合绝缘子耐张串的动载荷计算 [J]. 广东电力, 2008, 21(6): 15-19.
- [6] 沈庆河. 山东电网复合绝缘子的应用 [C]. 复合绝缘子运行特性及可靠性技术研讨会论文集. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [7] 张锐, 吴光亚. 直流复合绝缘子在耐张串上的应用及试验分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 129-131.

(收稿日期: 2010-10-08)

无人值班变电站运行管理模式现状分析及发展探讨

熊 茜, 唐 睿

(成都电业局, 四川 成都 610061)

摘 要:分析了成都城区无人值班变电站的现状和发展,指出了当前无人值班管理模式存在的问题,提出了“集中监控、分区操作”的管理模式和实施方案,并论证了其具有的优势。

关键词:变电站;无人值班;管理

Abstract: The current situation and development trends of unattended substation are analyzed in Chengdu urban area. The shortages of the current unattended management mode are pointed out. The management mode and implementing scheme of centralized monitoring and regional operation is proposed whose advantages and feasibility have been demonstrated.

Key words: substation; unattended; management

中图分类号: TM732 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0074-03

随着电网的迅速发展,无论是变电站数目还是值班队伍都在迅速增加,致使电力企业成本上升、经济效益下降。为此,各电业局都积极开展了变电站无人值班的实践。无人值班的实施,通过改变变电站管理模式,使得“减员增效”得以成功实现。但任何管理模式在发展过程中,必然存在一些问题和矛盾,需要在改进中不断完善。如果不彻底地解决这些矛盾,将会严重影响无人值班变电站的发展乃至整个电网的安全稳定运行。

1 城区无人值班变电站的现状和发展

1.1 无人值班变电站的现状

2006年年底,成都电业局城区供电局进行了机构改革,将原来的属地化管理模式改革为专业化管理模式,在整合原城区 4 个供电局变电站运行管理资源的基础上,变电运行管理所正式挂牌成立。作为成都局唯一的变电运行专业管理车间,承担着成都市区 4 个监控中心、9 座 220 kV 变电站、43 座 110 kV 变电站的运行维护和日常管理工作。

成都电业局无人值班变电站的建设及改造工作发展较快,自 1994 年开始第一座无人值班变电站改造以来,到 2008 年 8 月,成都城区的全部 43 座 110 kV 变电站和 3 座 220 kV 变电站已实现无人值班。46 座无人值班变电站按属地化管理的模式,分属青羊、金牛、锦江、高新监控中心管辖,监控中心设于原

城区 4 个供电局办公楼内,负责辖区范围内变电站的远方运行监视和遥控操作、无人值班变电站现场的巡视维护、设备定期试验轮换及操作和事故处理。成都城区无人值班站的现状见表 1。

表 1 成都城区无人值班站的现状

| 监控中心 | 管辖无人值班站数量 | | 小计 |
|------|-----------|----------|----|
| | 220 kV 站 | 110 kV 站 | |
| 青羊监控 | 2 | 8 | 10 |
| 锦江监控 | 1 | 10 | 11 |
| 金牛监控 | | 12 | 12 |
| 高新监控 | | 13 | 13 |
| 小计 | 3 | 43 | 46 |

表 2 2010 年成都城区无人值班站的属地化规划

| 监控中心 | 管辖无人值班站数量 | | 小计 |
|-------|-----------|----------|----|
| | 220 kV 站 | 110 kV 站 | |
| 青羊监控 | 2 | 7 | 9 |
| 金牛集控站 | 2 | 5 | 7 |
| 锦江监控 | 2 | 9 | 11 |
| 蓉东集控站 | 2 | 5 | 7 |
| 金牛监控 | 1 | 12 | 11 |
| 东郊集控站 | 2 | 7 | 9 |
| 高新监控 | 2 | 10 | 12 |
| 石墙集控站 | 2 | 6 | 8 |
| 发展集控站 | 1 | 6 | 7 |
| 小计 | 16 | 65 | 81 |

1.2 无人值班变电站的发展规划

按照四川省电力公司的变电站无人值班改造规划,到 2009 年,成都城区现有的 6 座有人值班 220 kV 变电站都将完成无人值班改造,实现无人值班。同时根据成都电业局“十一五”规划,到 2010 年,成都城

区还将新投 29 座变电站, 变电管理所管辖的变电站数量将增至 81 座, 并全部实现无人值班。

按照属地化管理模式下的规划, 这 81 座变电站将分属 9 个监控中心 (或集控站) 管辖, 分别是原有的青羊、金牛、锦江、高新监控中心及需新增的发展、石墙、金牛、东郊、蓉东集控站。详细情况参见表 2。

2 当前管理模式存在的问题

2.1 运行班组长的任务和压力与岗位要求不相匹配

随着监控中心管辖的变电站日益增多, 值班员的监盘、巡视、操作三大任务更加繁重。由于点多面广, 监控中心经常出现多个站点同时有工作的情况, 运行班组内任务的分派、人员的协调职责就压在值班长的肩上。这使得值班长的压力越来越大, 需要综合分析协调的要求越来越高, 这与值长岗位的定位不相吻合, 且大多数值长都不具备在更全面、更全局的层面上思考分析问题的视界和能力, 很多时候的布置安排就不够周到。若该项工作交由监控主任负责, 又势必给他们造成沉重的负担。

2.2 人员分工自然固化

当前监控中心运行的现状已经出现自然将监盘、巡视、操作人员分别固化的现象。一个运行班中, 年龄大些、身体稍弱、反应不够敏捷的人员往往长期被安排在监控中心负责监盘及与调度联系。年纪轻、身体好、反应快的人员长期承担现场的操作、巡视等任务。这虽然是根据人员素质作出的合理安排, 但长期将人员固化, 在现有的运行模式要求下不利于人员综合素质的提高, 不利于人才的培训。

2.3 远距离管理难度大

由于各变电站、监控中心相对于变电管理所本部距离较远, 管理层和班组之间的信息沟通、联系的难度加大。管理层对各班组的情况掌握不及时, 容易造成各班组对规章制度理解不统一, 规范行为较困难, 执行力下降。因此必须根据远距离管理的特点, 建立和完善适合当前形式的管理模式和流程。

2.4 变电运行工作易产生“低强度疲劳”

变电运行的专业特点决定了其工作标准高、工作内容枯燥、工作环境单调, 而专业的重要性又要求运行人员随时保持清醒的头脑, 注意力集中, 精神高度紧张, 使得人员容易产生“低强度疲劳”, 对工作产生厌倦情绪。变电运行的岗位不具有吸引力。要改变这种形式, 必须对工作模式进行一定程度的优化调整。

2.5 220 kV 站实现无人值班后重点不突出

到 2009 年年底, 成都城区在运的 220 kV 变电站均要实现无人值班。220 kV 变电站纳入监控中心后, 按照属地化管理的方式, 其远方监控即与众多 110 kV 站一并进行。9 座 220 kV 站中有 3 座投运 15 年以上, 最老的 220 kV 变电站现已运行 28 年。这些老站在运行中设备较易出现缺陷, 各种故障信号也与 110 kV 站有所不同, 按属地化方式进行远方监视, 不利于突出重点。而 220 kV 变电站是城区负荷供应的枢纽, 处于提纲挈领的重要地位。对 220 kV 变电站的监盘与运行维护还应重点加强, 才有利于电网的安全稳定运行。

2006 年年底, 成都电业局对城区的管理体制进行了改革, 从属地化管理变为专业化管理。改革的目的是为了适应当前电网发展的需要, 实现企业向专业化、精细化、集约化管理的方向发展。现在对无人值班站的管理模式, 是原来属地化管理的基础上实行的模式, 属地化管理模式的简单重复, 已不能适应当前专业化、精细化管理的需求, 无法实现集约化管理的方式, 没有充分利用和整合资源, 不能发挥规模效应。

因此, 变电运行管理所实行无人值班站管理模式的调整, 引入专业化、精细化管理的方式已是势在必行。

3 成都城区无人值班站管理模式探讨

3.1 实行“集中监控、分区操作”的运行管理模式

为更好地集中整合资源, 充分利用专业化管理的优势, 对于无人值班变电站的管理, 可采用将监控班与操作队分开, 实行“集中监控、分区操作”的运行管理方式。监控班与操作队为平行的不同班组, 一个监控班可对应多个操作队。

监控班重点负责无人值班变电站的运行监视、监控、信息收集、记录、分析及汇报、调令的接收及转发、无人值班变电站的电压及无功管理的调控操作、拉合开关的单一操作等。

操作队负责无人值班站的巡视维护、现场操作及事故处理、设备定期试验轮换、工作许可及总结、设备验收及新投异动等现场工作。操作队正常情况下不再承担无人值班变电站的实时运行监视、监控工作。

3.2 成都城区无人值班站管理模式设想

到十一五末, 成都城区的 81 座无人值班变电站管理可成立 2 个监控班, 一个主要负责 16 座 220 kV 变电站的监控管理, 另一个主要负责 64 座 110 kV 变

电站的监控管理。

操作队按照地域范围分区域成立,对 81 座无人值班变电站管理可成立 7 个操作队。操作队的设立将不再完全遵照原监控中心的管理区域,在划分管辖的变电站时,以地域邻近操作队驻地为主,同时兼顾各操作队之间所管变电站的平衡。在原青羊、金牛、锦江、高新 4 个监控中心的原址成立 4 个操作队。新增的 3 个操作队按区域设置在常规 220 kV 昭觉、石墙、发展变电站内,以利于对站端情况的快速反应和处理。每个操作队分别管理 10~13 座无人值班变电站。详细情况参见表 3。

表 3 2010 年成都城区无人值班站的操作队规划

| 序号 | 操作队 | 管辖变电站数量 | | 小计 |
|----|-----|----------|----------|----|
| | | 220 kV 站 | 110 kV 站 | |
| 1 | 青羊 | 2 | 10 | 12 |
| 2 | 锦江 | 3 | 10 | 13 |
| 3 | 金牛 | 2 | 10 | 12 |
| 4 | 高新 | 2 | 8 | 10 |
| 5 | 昭觉 | 2 | 10 | 12 |
| 6 | 石墙 | 2 | 8 | 10 |
| 7 | 发展 | 3 | 9 | 12 |
| 合计 | | 16 | 65 | 81 |

4 “集中监控、分区操作”模式的优点

4.1 有利于人力资源的整合与优化配置

实行“集中监控、分区操作”模式,有利于人力资源的整合与优化配置。

按四川省电力公司无人值班站定员标准(220 kV 站:4 人/站,110 kV 站:2.6 人/站),成都变电运行管理所 81 座变电站定员为 $4 \times 16 + 2.6 \times 65 = 233$ 人。

按原属地化模式下规划的 9 个监控中心(集控站)设置,每个班组至少需要 27 名运行人员(每个班组配置管理人员 3 名,4 个运行班每班 6 人),全所共需运行人员 243 名,大大超出定员标准。

按专业化模式规划的 2 个监控班(每个监控配置管理人员 2 名,4 个值每班 3 名),7 个操作队(每个操作队配置管理人员 3 名,4 个操作班每班 6 名),另外全所综合备员 6 名来设置,全所共需运行人员 223 人,将比属地化规划模式节省 20 名运行人员,并且少于省公司定员标准 10 人。

4.2 有利于专业化、精细化的管理

实行“集中监控、分区操作”模式,还有利于专业化、精细化的管理。

监控班主要负责系统和无人值班站远方的运行

监视和控制,220 kV 监控班和 110 kV 监控班分开,能各自突出重点,分层次管理。操作队则负责站端的工作。因分工更细,使班组管理人员的协调范围缩小,能更好地集中人员和精力做好责任范围的事情。

4.3 有利于人员的培训和使用

实行“集中监控、分区操作”模式,会使分工越来越细,工种越来越专业,符合当前专业化、精细化的管理要求。

随着变电站的不断投入,各种新技术、新知识的不断运用,一个运行人员要掌握所有的技术要求难度越来越大,将运行监控和操作人员分开更有利于各自的专长发挥,也能让运行人员更精通自身业务,将会提高变电管理所的整体运行水平。另外,由于分工更细、更专业,掌握的知识面在一个时期相对减少,岗位要求相对降低,也可以缩短新人员的培训周期,让新人员更快满足上岗条件,同时满足安全运行的需要。

4.4 有利于解决“低强度疲劳问题”

操作队的值班方式类似于配网抢修班,除白天正常上班外,夜间留守部分人员在值班室,其余人员可回家休息,留守人员因没有监盘职责,没有工作任务时也可在值班室休息,这样能最大程度地避免“低强度疲劳”的产生。

5 结束语

变电站采取无人值班,不只是为了减少生产人员及其降低生产成本,更是提高电网的科技发展水平和科学管理水平,加快电网发展的问题。而在现行的无人值班管理模式,是在属地化管理方式上的简单重复,与发展不相适应。因此,实行“集中监控、分区操作”的管理模式,才能发挥专业化管理后带来的资源优势、技术优势,体现出规模效益,适应电网的快速发展,保证电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 叶永奎,麻国.探索无人值班(少人值守)向集控运行转变的管理模式[J].水电自动化与大坝监测,2008,32(2):31-33.
- [2] 黄颖,夏骏.变电站无人值班操作模式的改进[J].大众用电,2008(3):26-27.
- [3] 张龙,董勤伟.变电生产管理新型模式探索与实践[J].电力安全技术,2005,1(7):5-7.

(收稿日期:2010-10-11)

220 kV 变电站主变压器重瓦斯保护动作事故分析

罗贤举

(玉林供电局, 广西 玉林 537000)

摘要: 针对某 220 kV 变电站主变压器重瓦斯保护受到 110 kV 线路保护故障干扰的误动行为, 详细介绍了事故的经过, 充分利用从该变电站收集到的包括线路保护装置、主变压器非电量保护装置以及故障录波装置的录波报告, 对主变压器重瓦斯保护、110 kV 线路保护的動作时序和故障录波报告进行详细分析, 同时通过对一、二次设备进行事故后细致检查、试验, 得出了造成此次主变压器重瓦斯保护误动的主要原因, 提出了相应的防范和整改措施。分析过程具有一定的借鉴价值。

关键词: 重瓦斯保护; 一次设备; 二次设备; 干扰

Abstract: According to the malfunction of heavy gas protection of one 220 kV main transformer caused by the interference of one 110 kV line protection malfunction, the process of the accident is introduced in detail. Using the recording reports of line protection device, non-electricity protection device of main transformer and fault recorder collected from the substation, the heavy gas protection of main transformer, time sequence of 110 kV line protection actions and the fault recorder report are analyzed in detail. The primary equipment and secondary equipment are also inspected and tested carefully after the malfunction. Then, the main reasons that caused the malfunction of heavy gas protection are given, and the relevant prevention measures and solutions are presented. The analysis process has some value for reference.

Key words: heavy gas protection; primary equipment; secondary equipment; interference

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0077-03

0 引言

2009 年 8 月 12 日 16:25, 某 220 kV 变电站 1 号主变压器重瓦斯保护动作, 切除了 1 号主变压器 10 kV 侧 901 开关。16:36, 经调度下令, 值班员合上 1 号主变压器 10 kV 侧 901 开关, 8 月 12 日 17:00, 事故喇叭响, 后台机发出“1 号主变压器本体重瓦斯动作”、“901 开关出口跳闸”, 但经值班员现场检查, 901 开关在合闸位置。

1 事故前变电站的运行方式

220 kV 某变电站有 1 台 220 kV 主变压器, 2 条 220 kV 线路, 110 kV 线路若干, 10 kV 线路若干。事故前, 220 kV 双母线并列运行, 2053 开关、1 号主变压器 220 kV 侧 2001 开关运行在 I 母, 2052 开关运行在 II 母; 110 kV 双母线并列运行, 1 号主变压器 110 kV 侧 101 开关运行在 I 母, 110 kV PS 线 107 开关运行在 II 母; 10 kV 单母分段运行, 1 号主变压器 10 kV

侧 901 开关运行在 I 段。

2 事故经过及处理情况

2.1 事故发生经过

(1) 2009 年 8 月 12 日 16:25, 事故喇叭响, 主控室后台机发出“1 号主变压器本体重瓦斯动作”、“107 开关保护跳闸”、“901 开关出口跳闸”、“107 开关重合闸动作”, 运行人员检查 1 号主变压器保护屏, 发现本体保护装置发出“本体信号”、“本体跳闸”信号, 10 kV 操作箱出现“保护跳闸”信号, 110 kV PS 线 107 开关保护装置显示“保护跳闸”、“重合闸”信号, 运行人员现场检查, 发现 901 开关在分闸位置, 107 开关、2001 开关、101 开关在合闸位置, 检查 10 kV 设备未发现异常, 检查 1 号主变压器本体未发现异常, 瓦斯继电器未发现气体。故障信息显示: 110 kV PS 线 107 开关零序 II 段动作, U、W 两相接地故障, 故障距离 13.18 km。当时天气为雷雨天气。

(2) 2009 年 8 月 12 日 16:36, 调度下令合上 1 号主变压器 10 kV 侧 901 开关。16:38, 变电站值班员

合上 901 开关。

(3) 2009 年 8 月 12 日 17:00, 事故喇叭响, 后台机发出“1 号主变压器本体重瓦斯动作”、“107 开关保护跳闸”、“901 开关出口跳闸”、“107 开关重合闸动作”, 检查 1 号主变压器保护屏, 发现本体保护装置发出“本体信号”、“本体跳闸”, 10 kV 操作箱无信号, 107 开关保护装置显示“保护跳闸”、“重合闸”信号。

现场检查 107 开关在分闸位置, 901 开关、2001 开关、101 开关在合闸位置, 检查 10 kV 设备未发现异常, 1 号主变压器本体未发现异常, 瓦斯继电器未发现气体。故障信息显示: 110 kV PS 线 107 开关距离 I 段动作, W 相接地故障, 故障距离 5.18 km。当时天气为雷雨天气。

2.2 检查处理情况

(1) 2009 年 8 月 12 日 20:10 检修人员到达现场, 对设备进行检查处理。

① 对一次设备检查处理: 初步检查主变压器和其连接出线的设备外观, 未发现异常, 瓦斯继电器无气体。因当时 1 号主变压器 10 kV 侧 901 开关已恢复运行, 加上正在下大雨, 没能对主变压器进行停电检查、试验, 1 号主变压器在运行状态。

② 对二次设备检查处理: 核对保护装置的保护信息与运行记录一致, 初步核对二次接线无异常。因当时 1 号主变压器已运行, 没能对 1 号主变压器保护进行检查、校验。

(2) 8 月 13 日 12:10, 天气稍晴, 1 号主变压器由运行转检修, 检修人员第二次到现场, 对事故原因进行调查, 对 1 号主变压器及其保护装置进行检查、试验。

① 一次设备检查、试验情况: 外观检查, 主变压器本体和各连接线外观正常, 瓦斯继电器无气体、无放电痕迹; 对主变压器本体油取样色谱分析, 未发现异常; 对 901 开关进行了回路接触电阻、开关动作特性、绝缘电阻和交流耐压试验, 均在合格范围, 未发现异常; 该变电站地网测试记录情况: 地网导通测试时间为 2008 年 3 月 23 日, 导通良好; 地网接地电阻测试时间为 2005 年 3 月 8 日, 阻值 0.49Ω (设计要求值 $\leq 0.77 \Omega$)。结论: 未发现 1 号主变压器及 901 开关异常, 可投入运行。

② 二次设备检查、试验情况: 检查主变压器非电量保护二次接线, 现场与图纸相符; 检查主变压器本

体瓦斯继电器内无气体, 接点动作可靠, 模拟瓦斯继电器动作能可靠跳主变压器三侧开关; 检查非电量保护控制电缆芯对芯和芯对地绝缘, 绝缘电阻大于 $500 \text{ m}\Omega$, 绝缘良好; 检查主变压器保护控制电缆屏蔽层两端接地良好; 在主变压器本体重瓦斯启动回路接入 200 ms 的干扰脉冲, 动作情况如表 1。

表 1 干扰脉冲对重瓦斯保护的影响情况

| 序号 | 干扰脉冲值 /V | 干扰脉冲时间 /ms | 信号继电器动作情况 | 开关跳闸情况 |
|----|----------|------------|-----------|----------------|
| 1 | 78 | 200 | 动作 | 未动作 |
| 2 | 80 | 200 | 动作 | 未动作 |
| 3 | 96 | 200 | 动作 | 901 跳闸 |
| 4 | 104 | 200 | 动作 | 2001B 相跳闸 |
| 5 | 106 | 200 | 动作 | 2001W 相、101 跳闸 |
| 6 | 112 | 200 | 动作 | 2001U 相跳闸 |

备注: 后台信号及录波开关均接瓦斯继电器动作信号继电器接点, 而不是出口继电器接点。

3 事故原因分析

(1) 故障原因分析^[1]: 2009 年 08 月 12 日 16:25, 110 kV PS 线 107 开关零序 II 段保护动作跳闸, U、W 相接地故障, 重合成功。2009 年 08 月 12 日 17:00, 110 kV PS 线 107 开关距离 I 段保护动作跳闸, W 相接地故障, 重合不成功。PS 线两次故障在主变压器本体重瓦斯启动回路上出现了干扰, 结合故障录波和模拟加压进行分析, 第一次干扰源是出现在 PS 线第一次故障启动后 290 ms 左右, 第二次干扰源是出现在是 PS 线第二次故障启动后 200 ms 左右, 时间上可比性不大。第一次故障电流持续的时间为 1000 ms 左右。第二次故障电流持续的时间为 200 ms 左右。并且第一次故障为 U、W 接地故障, 故障电流为第二次 W 相接地故障电流的 2 倍左右。无论是从时间上还是从强度上来说第一次都要比第二次来得更强烈, 也就是说第一次干扰的强度要大, 干扰脉冲的幅值刚好在 96 V 至 104 V 之间, 致使 1 号主变压器本体重瓦斯信号继电器动作掉牌和 901 开关跳闸。第二次干扰脉冲的幅值在 96 V 以下, 只是造成本体重瓦斯信号继电器动作掉牌, 没有造成开关跳闸。由以上分析可得出 1 号主变压器保护重瓦斯动作跳 901 开关动作, 是因为受到 110 kV PS 线接地故障的干扰, 非电量保护用的电缆芯产生暂态电压, 使重瓦斯保护误动^[2-5]。

(2)干扰源成因分析:变电站的干扰是复杂多变的,很难像拿出故障录波来证明故障电流的存在一样有力的证据来证明干扰的存在。但是可以通过现象去分析和判断。①保护人员对主变压器本体重瓦斯启动跳闸回路进行了认真检查排除了回路接线错误的可能性。②干扰是在 110 kV 母线流过故障电流时出现,而非电量保护控制电缆刚好处在 110 kV 母线底下电缆沟。当 110 kV 母线流过故障电流时将在母线周围产生磁场,对周围的回路进行切割产生感应电,致使非电量保护用的电缆芯产生暂态电压,使重瓦斯保护误动作。③第一次和第二次故障主变压器本体重瓦斯动作的情况也不同,第一次是信号掉牌及跳 901 开关。第二次只是信号掉牌,与两次故障电流的大小有着一定的联系。假如是回路有错误,应该不会出现前后不同的情况。

4 技术整改措施

(1)更换非电量保护出口继电器插件,因为出口继电器动作电压不满足规程要求(规程要求经长回路的出口继电器的动作电压要求大于 50%额定电压小于 70%额定电压)。

(2)做好控制电缆的屏蔽层接地。

(3)更换插件后,按照新投运设备的要求,继电保护人员重新对非电量保护装置做全面的检验,尤其

(上接第 45 页)

采用自同期合闸可行性越高,多个分布式电源接入系统,除距离变电所低压母线最近的分布式电源冲击电流较大,不推荐采用自同期合闸外,其余位置的 DG 都适合采用自同期合闸;

(2)对于逆变型分布式电源,并网逆变器很关键,电流瞬时值反馈可以实现合闸并网条件;

(3)采用“后加速”方式时,从技术的角度是可以实现的,但将使配电网的保护变得复杂。

4 结 论

分布式电源接入配电网后势必会改变配电网的拓扑结构和潮流方向,使原来简单的单电源辐射型网络变成复杂的多电源网络。现有的基于单端电源系统设计的配电系统保护和自动重合闸装置也必须

是干扰脉冲对主变压器重瓦斯保护影响的试验,并进行开出传动试验。检验合格后,非电量重瓦斯保护方可投入运行。

5 结 论

本次重瓦斯保护动作是受到 110 kV PS 线接地故障的干扰,非电量保护用的电缆芯产生暂态电压而引起的。对本次特殊故障情况下保护动作行为的分析,有益于今后类似故障情况下保护动作行为的快速准确判断,具有一定的借鉴价值。

参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [3] 李火元. 电力系统继电保护与自动装置 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [4] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护技术问答(第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编(第二版) [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.

(收稿日期: 2010-09-09)

做出相应的调整,否则由于分布式电源的存在必定使保护出现拒动、误动等问题,影响保护的选择性和灵敏性,甚至对配电系统及设备的安全稳定运行造成破坏。

参考文献

- [1] 朱成章. 发展直燃式空调机对电力工业的作用 [J]. 华东电力, 2000, 28(5): 27-28.
- [2] 孙福杰,何俊佳,邹积岩. 基于重合器和分段器的 10 kV 环网供电技术的研究及应用 [J]. 电网技术, 2007, 24(7): 33-36.
- [3] 袁超,吴刚. 分布式发电系统继电保护技术 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 100-102.
- [4] 谢昊,卢继平. 重合闸在分布式发电条件下的应用分析 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007(2): 30-33.

(收稿日期: 2010-10-15)

铁塔主材更换装置的设计应用

王光祥, 景文川

(四川电力送变电建设公司, 四川 成都 610051)

摘要:随着输电线路的发展建设以及输电线路所处地质、地形条件越来越复杂, 难免遇到山体垮塌、地震等自然灾害或人为破坏造成铁塔受损, 需要更换铁塔主材。四川电力送变电建设公司依托 500 kV 九石线抢险工程, 成功设计应用了铁塔主材更换装置。该装置具有额定承载能力大、结构简单、单件重量轻、方便运输和使用、数字化系统受力监控、安全可靠等特点。

关键词: 抢险; 铁塔主材; 更换装置; 设计

Abstract: As the development of transmission line construction as well as more and more complexity of the geological and geographical conditions near the lines, the steel tower becomes slant or inclined, which is inevitably caused by human destruction or natural disasters such as mountain sliding and earthquake etc., so it needs to be straightened. Sichuan Electrical Power Transmission & Transformation Construction Company has successfully designed a hydraulic straightening system for straightening the steel towers according to the emergency construction project of 500 kV Jiushi transmission line. This system has a large rated load-carrying capacity and simple structure, its single component is light and is convenient for transportation and usage, and it can monitor the stresses of digital system with safety and reliability.

Key words: emergency relief; principal materials of steel tower; replacement device; design

中图分类号: TM753 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0080-03

1 设计任务的产生

作为四川甘孜州电能输出枢纽, 500 kV 九石线承担着电力输送重要负荷。2009 年 10 月 12 日晚, 由于 500 kV 九石线 N1037 塔位大号侧 50 m 处左上侧山体崩塌, 造成 N1037 号铁塔 (B 腿 2 段主材完全消失、铁塔主要依靠 A、C、D 三个腿主材支撑且 A 腿主材严重变形等)、基础 (B 腿) 及导线 (左下相) 严重受损, 铁塔倾斜并随时面临倒塔的危险, 造成了巨大的经济损失, 特别是对地方经济影响很大, 因此抢险工作迫在眉睫。其中, 更换铁塔主材是抢险的关键任务之一。

以往更换铁塔主材的方法一般是采用组立铁塔所用的抱杆对铁塔进行临时支撑, 抱杆上端悬挂链条葫芦, 将待更换铁塔主材的受力通过链条葫芦传递到抱杆上, 然后进行铁塔主材的更换。对于铁塔负荷不大的情况下, 这种方法确实是方便可行的, 然而此次抢险的 N1037 号铁塔负荷非常大, 若仍然采用此方法, 则存在很大的安全风险等问题。为了此次任务安全、快速的完成, 也为今后科学抢险打下坚实的基础,

公司确定了安全、规范的铁塔主材更换装置设计任务。

2 总体设计思路及成果摘要

确立了设计任务后, 首先进行了总体设计思路的分析。

1) 此次设计是为了将待更换铁塔主材的受力安全平稳地转移到铁塔主材更换装置上。

2) 铁塔主材更换装置的结构应当简单紧凑, 更换装置必须沿主材方向布置, 由于待更换铁塔主材长度较长, 因此中间段应采用格构式结构, 简称为格构段。

3) 格构段两端安装于待更换铁塔主材的上下相邻段主材上, 其连接点必须设计合理的连接装置。

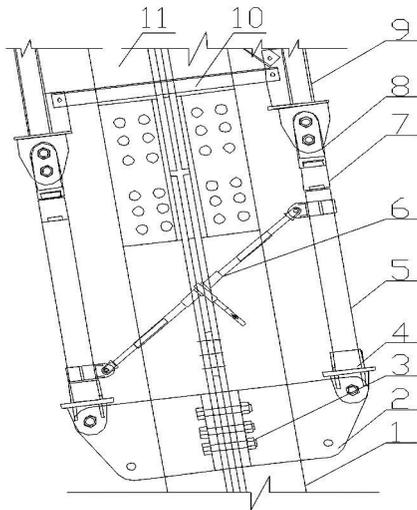
4) 将待更换铁塔主材的受力转移到铁塔主材更换装置上需要加力, 加力设备宜采用液压加力方式, 并实现系统受力的数字化监控。

5) 应设置调节长度的机构, 提高铁塔主材更换装置的长度适应性。

6) 结构的单件及总体重量应尽可能轻, 以方便运输和使用。

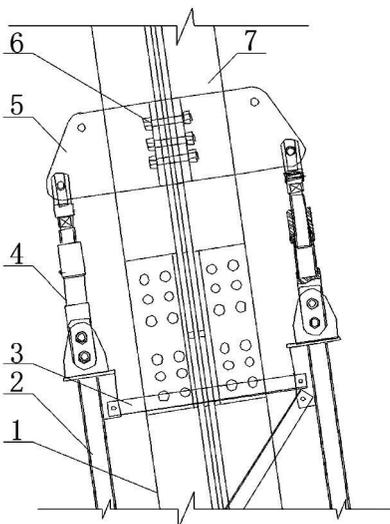
在总体设计思路的指引下, 四川电力送变电建设

公司成功设计应用了铁塔主材更换装置,此装置由角钢卡具、缸座、液压缸、压力传感器、连接耳、格构段、调节杆、角钢卡具顺次连接组成,其结构见图 1、图 2 所示。



1 为待更换铁塔主材下端相邻主材; 2 为角钢卡具; 3 为连接螺栓; 4 为缸座; 5 为液压缸; 6 为调节丝杠; 7 为压力传感器; 8 为连接耳; 9 为格构段主材; 10 为格构段辅材; 11 为待更换铁塔主材

图 1 更换装置下端结构及布置示意图



1 为待更换铁塔主材; 2 为格构段主材; 3 为格构段辅材; 4 为调节杆; 5 为角钢卡具; 6 为连接螺栓; 7 为待更换铁塔主材上端相邻主材

图 2 更换装置上端结构及布置示意图

3 格构段的设计

根据设计总体思路,对于格构段的设计,从以下几个方面进行了分析。

3.1 格构段的断面型式及尺寸选择

该格构段的设计原理与抱杆设计同理,在“内悬浮抱杆的优化设计”中已经对等边三角形与正方形断面抱杆相比较,得出结论:当抱杆长度为定值,要获得相等的长细比,采用等边三角形断面的格构段边宽要大得多,所以格构段的断面采用正方形的更为合理。因此,此次设计直接应用此设计结论,将格构段的断面型式确定为正方形。

待更换铁塔主材及上下相邻段主材肢宽均为 200 mm,双主材组合的最大断面尺寸为 416 mm,考虑拆装铁塔主材的操作空间并结合设计经验,直接将格构段断面尺寸(相邻主材中心距)确定为 800 mm。

3.2 格构段材质的选择

同样,在“内悬浮抱杆的优化设计”中得出结论:当抱杆段规格相同时,材质采用 Q345 钢材较 LY12 铝其承载能力将大幅度提高,此次的设计负荷非常大,因此,格构段材质选择 Q345 钢材。

3.3 格构段主辅材截面型式及连接方式选择

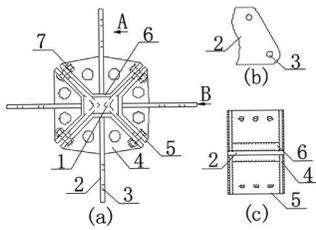
由于对铁塔主材更换装置加力只能分别对格构段主材施加,格构段的受力性能将受到格构段主材截面型式的影响,若主材截面各个方向的惯性矩相等将有利于结构稳定,因此,格构段主材截面型式采用圆管式。

铁塔主材更换装置的格构段安装必然要受到铁塔塔材的影响,但整个过程均不允许破坏铁塔的平衡状态,主材更换装置发挥作用前不允许拆除任何铁塔塔材,因此格构段必须设计成分体式,其主材间的连接采用直角扇形法兰盘的连接方式。对于格构段辅材,为了方便加工、减少连接附件等,其格构段辅材选择角钢型式,与格构段主材的连接采用螺栓连接方式。

4 角钢卡具的设计

格构段与铁塔主材间的连接需要设计连接装置(将其命名为角钢卡具)。格构段采用正方形断面型式,即格构段有 4 根主材,因此,角钢卡具需要提供 4 个与格构段主材连接的连接点。又有待更换铁塔主材及其上下段相邻主材均为双主材布置,根据受力特点和操作方便的要求,宜将 4 个连接点设置在角钢平分线及其垂线方向上,最后再根据格构段的断面尺寸等设计得到角钢卡具,角钢卡具由卡具支撑耳、卡具筋板、卡具侧板、卡具底板焊接而成,其结构和布置见图 3 所示,其中图 3(b)为图 3(a)中的 A 向示意图,

图 3(c)为图 3(a)中的 B 向示意图。



1 为铁塔主材角钢; 2 为卡具支撑耳; 3 为连接孔; 4 为卡具筋板; 5 为卡具侧板; 6 为卡具底板; 7 为连接螺栓

图 3 角钢卡具结构及布置示意图

5 液压工具的选择及连接方式确定

将待更换铁塔主材的受力转移到铁塔主材更换装置上需要加力, 但无法实现对更换装置中心加力, 只能对格构段的 4 根主材分别加力。为了保证格构段的受力良好, 对 4 根主材施加的力必须同步, 因此, 采用同步千斤顶, 其特点是设计有安全保压装置, 内置卸压阀防止过载, 以利于保护千斤顶和安全操作。

为了减少高空作业和方便操作, 同步千斤顶设置在更换装置的底部, 通过设计的缸座连接在下端的角钢卡具上, 缸座结构及布置见图 1 所示。

6 系统受力数字化监控

为了能够监控系统的受力情况, 系统设置了数字

压力传感器, 将其安装在千斤顶活塞顶端, 并通过连接耳与格构段连接, 见图 1 所示。

7 调节杆的设计

为了使得铁塔主材更换装置的长度可以调节, 利用丝杠原理设计了调节杆, 安装在格构段上端与角钢卡具之间, 见图 1 所示。

8 结 语

铁塔主材更换装置设计加工完成后, 于 2009 年 12 月 12 日在抢险现场成功完成了铁塔主材快速安全的更换工作, 为科学抢险发挥了巨大的作用。

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.

(收稿日期: 2010—09—20)

日本大力扶持太阳能发电

太阳能发电, 指利用光电池, 把太阳的光直接转化成电力, 又称太阳能发电。

为促进太阳能产业的民间投资和消费, 日本政府于 2008 年制定《低碳社会行动计划》, 提出到 2020 年太阳能发电量增加 10 倍, 到 2030 年增加 40 倍的目标。日本经济产业省还从 2009 年 4 月起实施住宅用太阳能发电补贴制度, 同年 11 月起实施太阳能发电电力购买制度。

根据这一制度, 电力公司有义务以固定价格购入家庭或单位利用太阳能发电后产生的剩余电量, 2010 年作为起始年, 收购标准为家庭用电每度 48 日元, 办公或工厂用电每度 24 日元。

受这些优惠政策刺激, 2009 年度日本国内太阳能电池出厂量超过 600 MW, 是 2008 年度的 2.6 倍, 太阳能发电系统的国内市场规模达到 3 900 亿日元, 仅次于德国和意大利。

全球光伏行业权威杂志 Photon 的统计显示, 2009 年全球太阳能电池市场份额排名前三的分别为美国的 First Solar 中国的尚德和日本的夏普, 日本企业京瓷公司也跻身前 10 名。

此外, 核能在日本也被广泛利用, 核能发电量约占全部发电量的 30%, 利用石油煤炭天然气的发电量约占 50% 至 60%, 水力发电约占 8%, 地热等新能源发电目前只占 1% 左右。

330 MW 机组锅炉结焦原因分析及对策

卢广宇

(大唐桂冠合山发电公司, 广西 合山 546501)

摘要:为提高机组运行的安全性和经济性,分析造成锅炉结焦的主要原因是入炉煤灰熔点偏低,运行氧量不足,燃烧切圆直径过大,火焰刷墙,风粉配合不佳及卫燃带敷设面积过大,燃烧器布置方式与燃用煤种不相适应。解决的对策是合理掺配燃用煤种,提高入炉煤灰熔点,保持充足的运行氧量,采用合适的燃烧切圆直径,减少卫燃带敷设面积,将燃烧器改为一次风集中布置方式;改造后 1 号炉运行稳定,消除了炉内大量结焦、结大焦现象。结论:保持充足的运行氧量及采用合适燃烧切圆直径,将燃烧器改为一次风集中布置方式是解决锅炉严重结焦的主要途径。

关键词: 330 MW 机组; 锅炉结焦; 运行氧量; 燃烧器改造

Abstract: In order to improve the security and economical efficiency of unit operation, the main cause of slag buildup is analyzed that is low ash fusion temperature of the as fired coal, lacking oxygen content, too large diameter of firing tangential circle, flame brushing against wall, poor cooperation of pulverized coal and air flow, too large refractory belt area, and the layout of burner incompatible with burning coal. The countermeasures are proposed that is blending burning coal in a reasonable way, increasing ash fusion temperature of the as fired coal, maintaining adequate oxygen content, using appropriate diameter of firing tangential circle, reducing the area of refractory belt, and adopting concentrated disposal of primary air for burner. After the transformation, the operation of No. 1 furnace is stable, and the phenomenon of slag buildup and large coke is eliminated. So the above-mentioned is the major way to solve the serious slag buildup of boiler.

Key words: 330 MW unit; slag buildup; oxygen content; burner retrofit

中图分类号: TK228 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0083-04

0 引言

合山发电公司 2×330 MW 机组锅炉为东方锅炉厂设计制造的 DG1004/18.5-II 1 型亚临界压力,一次中间再热,自然循环,单炉膛,尾部双烟道结构,采用挡板调节再热汽温,固态排渣,全钢架悬吊结构,平衡通风,半露天岛式布置。锅炉燃烧系统为固定直流式煤粉燃烧器,四角布置、切向燃烧,假想切圆直径为 D790 mm。燃烧器配制粉系统形式为钢球磨中间储仓式热风送粉系统,共 4 台磨煤机,干燥剂为热风加乏气再循环热风送粉。

燃烧器设计采用一、二次风间隔布置方式,每角共布置 15 层喷口。共设有 5 层一次风喷口,一层燃尽风喷口,7 层二次风喷口(其中 3 层布置有燃油装置),2 层三次风喷口、顶二次风方向反切 15°,A、B 层改造后一次风采用横置钝体直流燃烧器,C、D、E 层一次风均采用百叶窗式水平浓淡燃烧器,燃用设计煤种为混合煤(50%贵州煤与 50%合山煤)。

机组自 2004 年 9 月投产以来炉膛结焦问题一直未能有效解决,表现在高负荷运行时多次发生掉大焦引起锅炉灭火,MFT 动作停炉事故,如仅 2009 年 10 月至 2010 年 3 月,2 号炉就发生五起掉大焦引起 MFT 动作停炉事故。炉膛结焦使水冷壁传热热阻增加,水冷壁吸热不足,锅炉出力降低,炉内换热减弱导致炉膛出口烟温上升,排烟温度升高,燃烧损失增大,结焦严重影响锅炉运行的安全性和经济性,因此对造成锅炉结焦的主要原因进行分析,采取有效措施治理改造,以提高机组运行安全性和经济性。

1 原因分析

1.1 燃用煤质的影响

锅炉燃用煤种设计值:低位发热量 $Q_{net} = 18\,840$ kJ/kg 挥发分 $V_{daf} = 23.1\%$,灰分 $A = 34.8\%$,实际混合煤低位发热量平均值约 17 000 kJ/kg 灰分平均值 A 约 39.5%,挥发分平均值 V_{daf} 约 16.5%,混合煤低位发热量低于设计值 1 840 kJ/kg 挥发分低于设计

值约 6.5%，灰分高于设计值约 4.5%。合山煤是典型高灰、高硫、高水份、低热值的（三高一低）劣质烟煤，由于贵州烟煤难以采购，1、2号炉主要燃用煤种为贵州无烟煤与合山本地煤，贵州无烟煤挥发分低、不易着火且燃尽度极差。挥发分偏低使煤粉引燃困难，着火推迟，燃烧不稳，煤粉难以燃尽，灰分高使煤的燃尽度变差，可燃质相对减少，发热量降低，受热面积灰结渣增加，根据对实际入炉煤灰熔点的化验结果表明，灰的软化温度 $ST=1\ 150\sim 1\ 268\ ^\circ\text{C}$ ，即 ST 最低为 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ ，最高为 $1\ 268\ ^\circ\text{C}$ ，平均值约为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 左右，国内一般以煤的灰熔点高低判断结渣的倾向程度，当 $ST<1\ 350\ ^\circ\text{C}$ 为强结渣性煤种， $ST>1\ 350\ ^\circ\text{C}$ 为弱结渣性煤种，实际入炉煤灰熔点只有 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 左右，远低于 $1\ 350\ ^\circ\text{C}$ ，属于强结渣性煤种，入炉煤灰熔点偏低使结渣的倾向大大增加，是锅炉结焦的一个重要原因。

1.2 运行氧量的影响

炉内运行氧量对锅炉结焦有举足轻重的影响，增加运行氧量可大大减轻炉膛结焦，但氧量过大使炉膛温度下降，燃烧不稳， NO_x 排放量增加，尾部受热面低温腐蚀严重，排烟热损失增大，锅炉效率下降；由于 1、2号炉空气预热器堵灰较重，烟气差压大，满负荷运行引风机开度高于 90% 才能维持炉膛负压，经实测 1、2号炉满负荷运行平均氧量为 4.2% 左右，而 DCS 显示却为 5% 左右，锅炉燃烧理论表明，最佳运行氧量应达到 4.3%~4.5%，燃烧中存在氧量不足现象，由此产生还原性气氛使灰熔点降低而加剧结焦形成。

1.3 燃烧切圆的影响

1、2号炉四角切向燃烧，设计假想切圆直径为 $D790\ \text{mm}$ ，根据广西电科院对 1、2号炉冷态空气动力场试验结果表明，1号炉假想切圆直径为 $10\ \text{m}$ ，2号炉假想切圆直径为 $9\ \text{m}$ 左右，分别是设计假想切圆直径的 12、11 倍左右，切圆过大使火焰刷墙程度增加且一次风煤粉气流因补气条件差而受到邻组喷嘴气流冲击，易偏转贴墙而引起结焦；通过模拟炉内射流流场结果来看，炉膛内高温气流主要分布在四面水冷壁附近，停炉检查发现燃烧器区域水冷壁管被气流冲刷、管壁减薄现象，说明存在燃烧切圆过大，气流刷墙严重。

1.4 风粉配合的影响

1、2号炉运行中均存在多台给粉机给粉不均匀、

下粉不畅的问题，所用给粉机为国产叶轮式给粉机，目前国产叶轮式给粉机普遍存在这一现象，使燃烧器各角喷口一次风粉气流煤粉浓度分配不均匀，加上一二次风速不平，势必造成有些燃烧器缺风，有些燃烧器缺煤的现象，使燃烧器偏离最佳工况工作；燃烧器的负荷分配直接影响炉内空气动力场及温度场，当风粉分配不均时，就会产生炉膛火焰偏斜，局部区域热负荷过高；炉内有些区域或有的角燃烧相对缺风，有的却多风富氧燃烧，即存在粉少风多、粉多风少的现象，这样煤粉浓度高、缺氧燃烧的区域就会产生还原性气氛，使灰熔点降低而加剧结焦形成。

1.5 敷设卫燃带的影响

1、2号炉大修中在燃烧器区域四面水冷壁各敷设了 $163.8\ \text{m}^2$ 卫燃带，在三次风喷口上部敷设了 $83\ \text{m}^2$ 卫燃带。虽然敷设卫燃带减少了燃烧器区域水冷壁吸热程度，提高了炉膛温度，火焰中心上移，有利于提高汽温及燃烧稳定性，但由此也加剧了结焦的形成，特别是燃用灰熔点低的煤种，处于熔融状态的煤粉气流冲刷水冷壁或卫燃带并在上面粘结沉积，形成焦块，卫燃带表面粗糙及隔热作用还会加剧结焦的形成，使焦块连成一大片；当焦块过重落下就会砸坏冷灰斗及发生灭火停炉事故，严重威胁锅炉的安全运行。

1.6 燃烧器布置方式的影响

1号炉大修中对燃烧器进行了改造，2号炉由于各种原因没有对燃烧器改造，燃烧器仍采用一、二次风间隔布置方式，与目前燃用的低挥发分、高灰分、低热值的混合劣质煤种明显不相适应。通过对比就是最好的证明，因为目前 1号炉与 2号炉有很多相同点：炉膛结构、燃用煤种及掺烧比例相同，运行氧量为 4.2%~5%，煤粉细度 R_{90} 为 4.5% 左右，一次风速基本保持在 $22\sim 26\ \text{m/s}$ 风速与目前燃用的煤种相适应，两炉都存在多台给粉机下粉不畅的问题，卫燃带敷设面积与位置基本相同，1号炉燃烧器改造之前与 2号炉同样存在高负荷运行大量结焦及因掉大焦引起 MFT 动作停炉现象，改造后两台炉高负荷运行结果却大相径庭：1号炉只有轻微结焦，2号炉仍大量结焦、结大焦。因此可排除由上述相同因素造成 2号炉结焦为主要原因，主要原因是燃烧切圆过大、火焰刷墙；燃烧器采用一、二次风间隔布置方式与目前燃用煤种不相适应；由于一、二次风混合过快，所需着火热大而燃用煤种又是挥发分极低、燃尽性极差的劣质烟煤，大量的煤粉颗粒只是到达水冷壁附近才开始燃

烧,原来在火焰中心区未燃尽的碳再进一步燃烧就会造成水冷壁附近热负荷高,并形成缺氧区,缺氧燃烧结果使煤粉难以燃尽及还原性气氛增加,使灰熔点降低,熔融的灰渣粘附在卫燃带或水冷壁上形成焦块,使炉内发生大量结焦。

2 解决对策

2.1 合理掺配燃用煤种

煤种问题是产生结焦的主要原因之一,因此应根据锅炉设计煤种进行燃煤的组织 and 选用,确保煤质的相对稳定,尽量降低其焦结性及粘结性指标,使入炉煤灰熔点控制在 1350°C 以上;实际运行中若燃煤煤质发生较大的变化,应进行必要的燃烧特性评价,同时要作好运行调整,确定合理的掺烧比例,以达到提高灰熔点、降低灰粘度的目的,避免炉膛出现大面积结焦。

2.2 保持合适的运行氧量及加强受热面吹灰

运行氧量充足使煤粉能充分燃烧,并使炉膛壁面处的烟温降低,炉壁处的沉积物减少,使水冷壁结焦的趋势减少;运行氧量不足,炉内还原性气氛增加,灰熔点降低导致结焦发生,应保证炉内实际运行氧量达 $4.5\% \sim 5\%$,以抑制还原性气氛,防止结焦。由于 1、2 号炉空气预热器堵灰较重,应在停炉时对预热器蓄热元件进行清洗或更换,并加强对空气预热器吹灰力度,维持炉膛负压,保证炉内供给氧量充足。

运行中应严格吹灰操作,坚持每班次对炉膛、过热器、再热器及烟道吹灰一次,保证受热面干净,减少结焦。

2.3 采用合适的燃烧切圆直径

1 号炉燃烧器改造中,为减少炉内贴壁气流存在,将一次风切圆改为对冲布置,二次风假想切圆直径改为 $D760\text{ mm}$,三次风假想切圆与二次风方向一致,切圆直径改为 $D600\text{ mm}$,这样切圆缩小后可减少炉内气流刷墙程度,合适的切圆直径会获得较为理想的炉内空气动力工况,有利于气流在炉内形成旋转火球,高温烟气补充到燃烧器射流根部,使着火稳定,防止气流偏斜贴壁而结焦。

2.4 保持良好的风煤配合

解决给粉机给粉不均匀、下粉不畅的问题,避免燃烧器各角喷口风粉分配不均,炉膛火焰偏斜,局部区域热负荷过高;保持良好的炉内空气动力场及温度

场,避免在燃烧器喷口及水冷壁附近形成还原性气氛,造成局部严重的结焦。由于燃用煤种为劣质烟煤,为稳定煤粉气流燃烧,减少着火热,应推迟二次风与一次风过早混合,以保证空气与煤粉的良好混合。

2.5 合适的卫燃带敷设面积

卫燃带敷设过多增加了炉膛热负荷,加剧了结焦的形成,使火焰中心上移,炉膛出口烟温升高,考虑到汽温低及对燃烧稳定性的影响,可将卫燃带分割布置,将连成一体卫燃带纵横分割成许多格子式的独立小块,以防止渣块在卫燃带上蔓延开来,连成一片过重落下,砸坏冷灰斗及造成 MFT 动作停炉事故。

2.6 燃烧器改为一次风喷口集中布置方式

根据中国长期燃用无烟煤及劣质贫煤的实践经验,燃烧器一般都采用一次风集中布置方式。1 号炉燃烧器改造是将 2 层一次风喷口集中布置,并采用一次风切圆对冲布置,而二次风喷口采用分层布置方式,由于一次风在向火面,一次风可以直接吸收上游射流的辐射和湍流传热,二次风布置在一次风的外侧,可减缓一次风气流的刷墙程度,从而减轻水冷壁结焦。一次风集中布置方式由于燃烧集中,煤粉浓度较高,所需着火热小,着火条件好,相对提高了着火区温度,有利于保持较高的炉温。二次风采用分层布置,一、二次风喷口保持较大的距离,以推迟一、二次风混合,待一次风煤粉气流着火稳定后再高速喷入二次风,使二次风卷吸的高温烟气与煤粉气流强烈扰动混合,有利于在燃烧器出口某一位置形成局部的“三高”区(高氧量、高温、高煤粉浓度),使煤粉尽量燃烧完全,由此大大减少了不完全燃烧所产生的还原性气氛,减轻了炉膛结焦,因而一次风集中布置适用于低挥发分、难着火及难以燃尽的劣质烟煤,2 号炉目前燃烧器布置方式只适用于燃烧挥发分较高的烟煤(如图 1 所示)。

3 改造效果

实践表明,1 号炉燃烧器改造后,炉底排渣基本上是较细的、均匀的渣灰,焦结现象很少,消除了改造前炉内大量结焦、结大焦现象。改造运行 2 年以来燃烧效果良好,未发生掉大焦引起锅炉灭火事故,锅炉热效率也明显提高,因此建议对 2 号炉燃烧器进行改造,采用较小的燃烧切圆直径以避免火焰刷墙,并将燃烧器改为一次风集中布置方式,以适应燃用的劣质

烟煤,从而根本上解决高负荷运行时炉内大量、严重的结焦问题,改善锅炉安全运行状况及提高锅炉热效率。

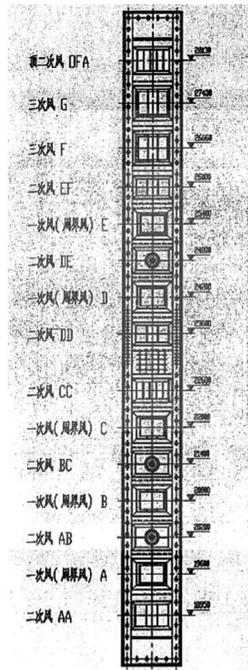


图 1 燃烧器一、二次风间隔布置简图

4 结 语

锅炉结焦是一个复杂的物理化学过程,它与燃料煤种、炉膛结构、运行氧量、炉内空气动力场及温度场、燃烧切圆直径、风煤配合、吹灰使用、燃烧器布置方式等许多因素有关,通过对锅炉结焦原因进行具体分析,针对性地采取有效措施治理改造,可大大减轻炉膛结焦的程度,避免炉内大量结焦、结大焦而危及锅炉安全运行,并由此改善锅炉运行状况,提高运行安全性及锅炉热效率。

本次锅炉改造的成功经验,对大型火电机组节能及优化运行具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 容奎恩,袁振福,刘志敏,等. 电站锅炉原理 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

[2] 华东电机工程学会. 锅炉设备及其系统 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.

(收稿日期: 2010-10-12)

(上接第 57 页)

基础抗上拔力与 Tfd2006 程序的计算结果吻合,这个数值是基础实际允许的抗上拔力,同时可以发现,修正前计算得出的基础抗上拔力远远大于修正后的值,是修正后的 1.21 倍。因此,在设计基础时,如果以修正前的基础抗上拔力为依据,势必造成因上拔力不够而导致杆塔倾倒的情况发生。

行,如果设计时按照现行《架空送电线路基础设计技术规定》中 h_1 的意思表述,计算出来的基础上拔力将远远大于基础的实际抗拔力,在设计裕度不大的情况下,基础将因上拔力不足影响杆塔的安全运行,按照所提理论表述对基础上拔稳定计算公式进行修正,才真正符合基础设计剪切法和土重法的计算原理。

参考文献

[1] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 (第二版) [Z]. 北京:中国电力出版社, 2003.

[2] 鲁先龙,程永锋,张宇. 输电线路杆塔原状土基础抗拔力承载力计算探讨 [D]. 中国电机工程学会论文集, 2007.

[3] 王学明. 送电线路掏挖基础抗拔力理论计算公式推导 [D]. 中国电机工程学会论文集, 2007.

[4] DL/T 5219-2005, 架空送电线路基础设计技术规定 [S].

(收稿日期: 2010-09-06)

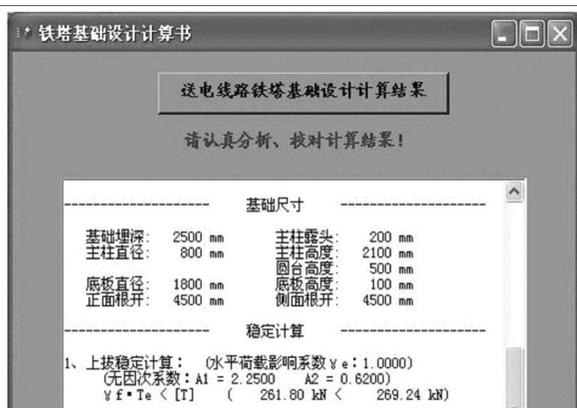


图 4 土重法 Tfd2006 程序计算结果

3 结 论

基础的上拔稳定关系到输电线路的安全稳定运

410 t/h 锅炉提效达标治理与优化

刘新旺

(中国石化资产公司安庆分公司, 安徽 安庆 246015)

摘要:通过对安庆分公司热电部 4 号炉尾部受热面的治理与优化, 采用螺旋翅片管和螺旋槽管进行省煤器和空气预热器的设计改造。锅炉效率提高 2.76%, 漏风率下降 17.17%。为在役同类型高能耗老旧锅炉机组提效改造提供了借鉴。

关键词:排烟温度;漏风;治理;优化

Abstract: Through controlling and optimizing the heating surface at the end of No. 4 boiler in Thermal Power Plant of Anqing Branch Company, the design and transformation of the economizer and air preheater are carried out using spiral fin tube and spiral grooved tube. The efficiency of boiler is improved by 2.76%, the rate of air leakage drops 17.17%. It gives a reference for the efficiency transformation of old boiler of the same type which is in service with high energy consumption.

Key words: exhaust gas temperature; air leakage; treatment; optimization

中图分类号: TK228 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0087-04

0 前言

安庆分公司热电部 4 号炉系武汉锅炉厂生产的 WGZ410/100-11 型自然循环煤粉锅炉。制粉系统采用中间仓储式热风送粉, 燃烧系统采用四角布置直流燃烧器。锅炉同时用于发电和供热。锅炉设计煤种为烟煤。

自 1990 年 4 号炉投产运行近 20 年, 锅炉排烟温度一直高于设计值。投运之初, 锅炉排烟温度比设计值高约 20℃, 目前, 锅炉的排烟温度平均达到了 180℃, 夏天最高可达到 190℃, 远大于 150.1℃ 设计值。过高的排烟温度不仅使锅炉效率长期不能达标, 而且对后期石灰石-石膏湿法脱硫项目的正常运行造成影响, 无法满足节能环保及安全生产要求。在设备方面, 高温空气预热器一直未曾更换过, 也存在着严重的堵管及漏风问题。

2007 年年底 4 号炉燃烧器改造之际, 为降排烟温度, 燃烧器中心下移了 400 mm, 三次风喷口与上二风喷口对调, 结果收效甚微。2009 年 7 月中国石化总部锅炉性能测试 4 号炉热效率为 88.58%, 严重影响了机组的运行经济性。

为落实总部提出的三年炉效达标治理目标, 从根本上解决 4 号炉排烟温度偏高和漏风等问题, 热电部 2010 年 2 月委托武汉华是公司能源环境有限对 4 号

炉省煤器和空预器进行尾部受热面的设计改造。

1 尾部受热面简介

4 号炉省煤器装在尾部竖井中, 分高温与低温两级布置, 两级间有一次前、后交叉。工质逆流自下向上。高、低温省煤器在烟道宽度上分成左右对称两部分, 另外, 由于空气通道的原因, 低温级省煤器又分前后对称的两部分, 给水自左右两侧引入低温级省煤器进口集箱, 经四组错列布置的 D32×4 mm 蛇形管逆流向上, 分别引入 4 只低温省煤器出口集箱, 再由 8 根 D108×8 mm 的管子从炉外前后交叉引入高温省煤器的左右两只高温省煤器进口集箱, 经两组错列布置的 D32×4 mm 蛇形管逆流, 分别引入高温省煤器出口集箱, 最后经两根 D219×16 mm 的管子引到锅筒。高、低省煤器通过空心梁, 支撑在护板上。

与省煤器相间布置有管式空气预热器, 管子规格为 D40×1.5 mm, S₁=40 mm, S₂=60 mm 叉排布置。空气预热器分两级布置, 分别为高温空预器与低温空预器, 高温空预器一个行程, 低温空预器两个行程, 两行程间有连通箱连接。由于结构的要求, 高温空预器在水平断面上烟道分为两部分, 低温空预器分为四部分。空气从低温空预器两侧墙引入, 从高温空预器前后墙引出, 与烟气逆向流动。

空气预热器内烟气在管子内纵向冲刷受热面,空气在管外横向冲刷受热面,两级预热器沿锅炉宽度方向,分成 6 个管箱,这样高温空预器共 12 个管箱,低温空预器两行程,共 24 个管箱。

2 存在的问题

(1) 查阅 4 号炉 2009 年 1—7 月 (9—12 月停炉备用) 炉效测试报告发现,除元月外炉效、漏风率均未达标。统计数据见表 1。

表 1 4 号炉三项指标统计

| 月度 | 炉效 /% | 漏风率 /% | 排烟温度 /°C |
|----|-------|--------|----------|
| 1 | 90.17 | 19.43 | 135 |
| 2 | 89.35 | 21.97 | 134 |
| 3 | 89.02 | 35.5 | 133 |
| 4 | 89.14 | 21.75 | 160 |
| 5 | 88.42 | 22.98 | 172 |
| 6 | 88.81 | 21.71 | 172 |
| 7 | 89.17 | 20.56 | 174 |

数据来源:热电部 2009 年度生产月报

(2) 查阅 2009 年 6 月 1—7 日一周 4 号炉运行日志,高负荷时排烟温度平均 185°C,最高达到 194°C。见表 2。

表 2 一周排烟温度记录

| 日期 | 负荷 / (t/h) | 排烟温度 /°C |
|------------|------------|----------|
| 2009-06-01 | 405 | 188/178 |
| 2009-06-02 | 393 | 187/176 |
| 2009-06-03 | 399 | 190/179 |
| 2009-06-04 | 387 | 188/180 |
| 2009-06-05 | 397 | 194/185 |
| 2009-06-06 | 370 | 194/182 |
| 2009-06-07 | 354 | 187/177 |

(3) 4 号炉与 6 号炉为同类型同蒸发量同煤种锅炉,具有较强的可比性,现将 4、6 号炉尾部受热面比较如下,4 号炉尾部设计受热面积明显不足,见表 3。

表 3 4、6 号炉尾部受热面积比较

| 名称 | 4 号炉 | 6 号炉 | 差 |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| 低温省煤器 /m ² | 1 004 | 1 939 | -935 |
| 高温空预器 /m ² | 8 299 | 9 450 | -1 151 |
| 低温空预器 /m ² | 12 575 | 13 793 | -1 218 |

3 改造思路与技术原理

降低排烟温度最有效的方法是增加省煤器的布置,由于 4 号炉尾部受热面竖井结构空间的限制,整

体布置结构无法变动,多布置省煤器管和空预器管难度大。根据作业部 4 号锅炉尾部受热面检修改造方案讨论会纪要精神,武汉华是能源环境工程有限公司设计并做经济技术比较,在保持锅炉尾部构架不变的情况下,低温省煤器整个管组采用螺旋翅片管,保持省煤器集箱位置固定不动;空预器选用螺旋槽管是比较合适的选择。

4 号炉在停炉检查发现,由于高温空预器炉前侧管箱堵塞较为严重,造成炉后侧烟气流量增大,对锅炉尾部炉后侧省煤器管排冲刷,致使省煤器管磨损加剧;高温空预器炉后侧管箱管口处磨损严重,导致漏风,摸底试验锅炉甲、乙两侧高温空预器的漏风率分别达 7.2%、29.7%。考虑运行近 20 年的实际,高中温端预热器整体更换。

采用螺旋翅片管省煤器和螺旋槽管空预器,主要是强化烟气侧的热交换。省煤器规格 D32×4 管壁较薄, $d_e/d_i \leq 2$, 可将圆筒壁简化成平壁计算。如图 1 平壁的厚度为 δ 导热系数为 λ 。平壁的一侧有由同样材料制成的肋片,该侧的表面积为 F_2 (包括肋的表面积和肋与肋之间平壁本身的表面积)。而另一侧是光面壁,其表面积为 F_1 , 流过光面热流体的放热系数为 α_1 , 温度为 t_{f1} ; 流过肋面的冷流体的放热系数为 α_2 , 温度为 t_{f2} ; 相应的壁内外表面温度假定分别恒定为 t_{w1} 和 t_{w2} , 且 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。

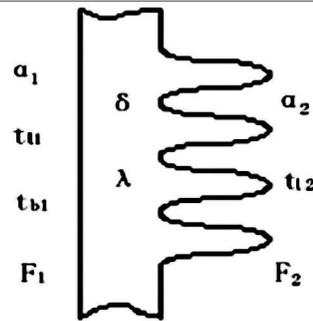


图 1 螺旋翅片管示意图

分析平壁基础上肋壁的传热方程式,得到肋壁的总热量为

$$Q_{肋} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{1}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}} (t_{f1} - t_{f2}) \quad (1)$$

如果不加肋片,即两边都是平壁时,则 $F_1 = F_2$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{1}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}} (t_{f1} - t_{f2}) \quad (2)$$

比较式 (1) 和式 (2), 两式分母中的前两项都相

等,只有第三项不等。使用了肋片,故 $F_2 > F_1$,所以第三项相比是 $\frac{1}{\alpha_2 F_1} > \frac{1}{\alpha_2 F_2}$,因而 $Q_{肋} > Q$ 。这就是说加肋片后传热增强。

从上式可以知道,为了强化传热将光管省煤器制成螺旋翅片管省煤器,光管空预器制成螺旋槽管空预器,是增加传热的一个有效措施。

4 改造性检修

1)更换在运行中磨损的高温省煤器右侧进口 12 屏管排,原结构尺寸不变;周围结构空间的限制,低温省煤器整体布置结构不变,整个管组采用螺旋翅片管,省煤器集箱使用原设备,位置不变。低温省煤器更换后传热面积由原来的 $1\,004\text{ m}^2$ 增加到 $2\,923\text{ m}^2$ 。

2)为强化烟气侧传热,延长烟气流程,采用内螺旋管空气预热器对高温空气预热器 12 组管箱和低温空气预热器 12 组管箱整体更换。低温热段空预器传热面积由 $12\,575\text{ m}^2$ 增加到 $14\,234\text{ m}^2$,高温空预器传热面积由 $8\,299\text{ m}^2$ 增加到 $9\,958\text{ m}^2$ 。保持原大修支撑结构不变,低温空预器上层管箱高度稍做变化,便于检修、密封和装卸。

3)由于更换要求和管箱拆装过程中损坏等原因,空气预热器区域护板和杂件在改造中也进行更换。高温空气预热器的进口烟气膨胀节更换。

5 优化性检修

1)为优化制粉系统运行,大修集中围绕提高粗粉分离器的分离效率,重点处理折向门损坏部件,核对中心桶高度及杂物的清理。将制粉系统三次风门拆除,增装可调缩孔。

2)一次风测速装置更新为船形一次元件,取代老式靠背管测量元件,提高测量精度。

3)尾部受热面激波吹灰完善性检修。

4)消除炉本体与制粉系统漏风。经治理,消除了炉本体及制粉系统主要漏风点:

- ①水封槽插板腐蚀漏风检修;
- ②三次风燃烧器上方四角水冷壁管排漏风堵塞;
- ③变形的一、二、三次风喷口修复或更换;
- ④炉顶密封泄漏更新,消除穿墙管漏风;
- ⑤烟气系统膨胀节漏风检修或更新;

⑥制粉系统弯头等磨损管线检修或更换,消除系统漏风。

6 运行优化调试

1)通过三次风可调缩孔对四角三次风调平。

2)启动送风机再次对尾部受热面查漏消缺。

3)送引风机入口门开度核对调整,一二次风风速现场与 DCS 核对并调平;燃烧器周界风针对性调整。

4)粗粉分离器折向门开度核对,一致性调整锁定;系统各风门挡板现场与 DCS 标定核对。

7 治理效果检查

1)2010 年 6 月 21 日大修后启动运行,记录锅炉满负荷时尾部受热面参数如表 4。

表 4 410 t/h 负荷尾部受热面参数比对

| 名称 | 设计 | | 运行(双磨) | |
|-------|------------|------------|------------|------------|
| | 进口烟温 /℃ | 出口烟温 /℃ | 进口烟温 /℃ | 出口烟温 /℃ |
| 高温省煤器 | 600 | 463.5 | 593 | 433 |
| 高温空预器 | 463.5 | 336 | 433 | 356 |
| 低温省煤器 | 336 | 264.8 | 356 | 238 |
| 低温预热器 | 264.8 | 132 | 238 | 138 |

尽管设计煤种与运行煤种以及运行工况存在差异,但是尾部受热面运行参数与设计值仍较相近,达到设计效果。

2)2010 年 7 月 7 日安徽新力公司对 4 号炉进行了常用煤种满负荷 3 个工况热效率及空预器漏风率的测试,试验结果达到了设计改造目标。详见表 5 和表 6。

3)2009 年 7 月总部 4 号炉炉效和漏风标定与 2010 年 7 月安徽新力 4 号炉炉效和漏风标定比对情况分析,改造检修后炉效提高 2.76%,尾部受热面的漏风率下降 17.17%,见表 7。

8 经济效益

以 2009 年 4 号炉运行时间等为基准,按锅炉蒸发量 329 t/h 蒸汽参数 530°C ,压力 9.5 MPa 燃煤低位发热量 $19\,840\text{ J/g}$ 年运行 $4\,370\text{ h}$ 煤价 550 元/t 计,查焓熵图用正平衡法计算。

表 5 炉效率标定试验

| | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| $W_{ar} / \%$ | 6.2 | 6.2 | 6.2 |
| $V_{daf} / \%$ | 23.77 | 23.77 | 23.77 |
| $N_d / \%$ | 1.02 | 1.02 | 1.02 |
| $C_d / \%$ | 60.45 | 60.45 | 60.45 |
| $H_d / \%$ | 3.64 | 3.64 | 3.64 |
| $A_d / \%$ | 28.10 | 28.10 | 28.10 |
| $Q_{net, ar} / \text{kJ/kg}$ | 20604 | 20604 | 20604 |
| $C_{th} / \%$ | 1.26 | 1.94 | 1.45 |
| $C_{lz} / \%$ | 16.15 | 7.99 | 7.62 |
| $q_f / \%$ | 1.33 | 1.14 | 0.93 |
| $t / ^\circ\text{C}$ | 138.3 | 130 | 130.2 |
| 进口氧量 / % | 6.08 | — | — |
| 出口氧量 / % | 6.75 | 4.56 | 5.10 |
| $q_e / \%$ | 6.52 | 5.20 | 5.38 |
| $q_f / \%$ | 0.23 | 0.21 | 0.21 |
| $De / (\text{t/h})$ | 410 | 410 | 410 |
| 实际蒸发量 / (t/h) | 410 | 400 | 400 |
| $q_g / \%$ | 0.59 | 0.61 | 0.61 |
| 锅炉效率 / % | 91.33 | 92.84 | 92.87 |

表 6 工况 1 空预器漏风率

| 序号 | 项 目 | 数值 |
|----|------------|------|
| 1 | 进口烟气氧量 / % | 6.08 |
| 2 | 出口烟气氧量 / % | 6.75 |
| 3 | 空预器漏风率 / % | 4.23 |

(上接第 70 页)

5) 复合传感器与主变压器传感器孔靴的匹配。

近几年成都电业局所建武侯、安顺桥等 7 个变电站选用了(重庆)ABB 主变压器,其配套用了国内某厂家的温控仪,调试中发现,实验室检定合格的温控仪经现场安装后,无论油温或绕组均存在监控机数值小于本体温控仪数值。且随“负荷”愈重,有温差愈大趋势。经反复检查并卸掉传感器护套,发现主变压器传感器孔深与复合传感器不匹配,致使嵌套在气体温包上部的 Pt100 热电阻有近 1/2 位置不能全部进入油面下,而暴露在箱盖外,使其“本体”与“远方”取样不在同一个条件下。为此将变压器传感器孔洞,复合传感器各部分尺寸绘图传真给厂家,并提出压缩复

表 7 检修前后比对

| | 2009 年总部 | 2010 年新力 | 前后对比 |
|---------|----------|----------|--------|
| 炉效 / % | 89.58 | 92.34 | +2.76 |
| 漏风率 / % | 21.4 | 4.23 | -17.17 |

改造前每小时耗煤 $= 3.29 \times 10^5 (3454 - 901) / 0.8958 \times 19840 = 47.26 \text{ t/h}$

改造后每小时耗煤 $= 3.29 \times 10^5 (3454 - 901) / 0.9234 \times 19840 = 45.84 \text{ t/h}$

年经济效益 $= (47.26 - 45.84) \times 4370 \times 550 = 341.297 \text{ 万元}$ 。

9 结 语

随着节能环保理念的普及,采用节能高效技术改造老旧设备逐渐增多。通过对 4 号炉尾部受热面治理与优化后,锅炉的排烟温度大幅度降低,漏风率下降明显,锅炉热效率得到有效提升,满足了烟气脱硫及除尘器改造需求,取得了可观的经济效益,提前实现了总部三年炉效达标治理目标。

参考文献

- [1] 西安电力学校编. 热工学基础 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

(收稿日期: 2010-09-27)

合传感器尺寸,改进装配的技改方案。厂家积极响应,改换工艺工装,生产出新复合传感器(同时全部更换了与 ABB 变压器配套的温控仪)。

参考文献

- [1] 变电站综合自动化实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 变电站综合自动化实用技术 1000 问 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 变压器温度控制器使用说明书 [Z].
- [4] 温度测量与仪表维修问答 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.

(收稿日期: 2010-09-28)

水轮发电机定子单相接地的继电保护技术

宋全林¹, 桂林², 党晓强²

(1 成都电业局双流供电局调度所, 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動作方式、双频式保护的基本原理和影響其保护動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 relaying protection and its relevant contents for stator single-phase grounding of hydraulic generator are analysis. The neutral point ground pattern and two-frequency grounding protection are the focuses. The selective schemes for generator single-phase grounding are discussed, and the new development trend for the single-phase grounding is predicted lastly.

Key words: hydraulic generator; stator single-phase grounding; relaying protection

中图分类号: TM623.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0092-04

水轮发电机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]。

1 继电保护的動作方式

中国大中型水电厂针对定子单相接地保护動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、葛洲坝电厂和天生桥电厂等规模稍小些的水电厂,其保护配制原来多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;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;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動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。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

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

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

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

因此故障点的零序电压为

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

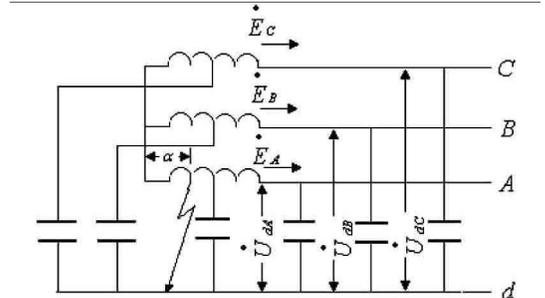


图 1 定子单相接地电路图

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

$$\dot{U}_{d0(\alpha)} = 100\alpha \text{ (V)} \quad (5)$$

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。保护的動作电压 $U_{d0(\alpha)}$ 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,在定子绕组中要产生一定的三次谐波电动势。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 E₃, 假定接地发生在 α 处, 其等值电路如图 2 所示。

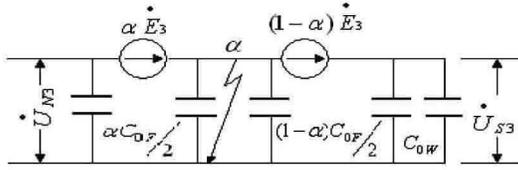


图 2 单相接地时三次谐波电动势分布的等值电路

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。

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

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

可以看出当 α ≤ 50% 时, |U_{S3}| ≥ |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 |U_{N3}| < |U_{S3}|, 另一种是 |K_pU_{N3} - U_S| > K_b|U_{N3}|, 其中 K_p、K_b 为调整系数, 动作区为中性点侧 20% ~ 50%, 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。

水轮发电机在起停机时刻和运行方式改变较大的时候会引起 U_{N3} 和 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 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 E_{3H} 和匝耦合电容 ΔC_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: 设每相有 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, E_{3H} 的存在影响 U_S 和 U_N 的大小和相位。设 E_{3H} = 0 时有 U_G 和 U_{nG}, E₃ = 0 时候有 U_{st} 和 U_{nT}, 则实际 U_S 和 U_N 为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_S &= \dot{U}_G + \dot{U}_{st} \\ \dot{U}_N &= \dot{U}_{nG} - \dot{U}_{nT} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, U_{st} = U_{nT} = γ E_{3H}

式中, γ 为复系数, 由图 3 中参数 C_M、C_S、C_N、Z 决定。

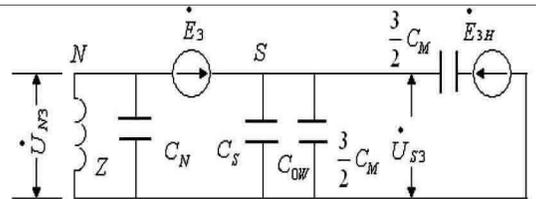


图 3 发电机—变压器组三次谐波零序等效电路

由式 (8), 在不计机端外接元件对地电容时, 则 C_S = C_N = 3/2 C_G (C_G 为发电机每相对地电容), 这时 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。

$$\begin{aligned} U_{st} = U_{nT} = \gamma E_{3H} &= \frac{\frac{3}{2} C_M}{3(C_G + \frac{C_M}{2})} E_{3H} \\ &= \frac{C_M / 2}{C_G + C_M / 2} E_{3H} \end{aligned} \quad (9)$$

不难看出, E_{3H} 对 U_S 的影响不同于 E_{3H} 对 U_N 的影响, 最简单的情况: Z = ∞ (发电机中性点绝缘)、C_N = C_S 有 U_G = U_{nG} = E₃/2; 由于 E_{3H} 的出现, 将有

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

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

假设 E_{3H} 与 E₃ 同相位, 则该发电机在正常运行时, 由于 E_{3H} 的影响, 已有 |U_S| / |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的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,这方面的技术在研究,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. 3 ω 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(3 ω) 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. 大型发电机一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, 356(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行波应用新原理 [D]. 成都:四川大学, 2006.

(收稿日期: 2010-09-10)

四川省电机工程学会2011年新春团拜会

四川省电机工程学会

—2011年迎春团拜会暨常务理事会

2011年1月19日，四川省电机工程学会在成都名雅山庄召开了2011年新春团拜会暨常务理事会。

四川省电机工程学会理事长、省电力公司副总经理王平与总工程师张伟参加了团拜会，他们向到会的100余位新老领导、专家、各专（工）委会代表致以新春的祝贺。王平理事长介绍了四川电力的发展情况，希望四川省电机工程学会提高学术交流和科普工作的质量和实效，增强学会工作的社会责任感，把学会工作做得更好。

会议由副理事长刘俊勇主持。会上还作了《四川省电网“十二五”规划》、《智能电网》及《太阳能》的专题发言。

下午，四川省电机工程学会召开了第六届十一次常务理事会，学会副理事长兼秘书长张伟作了换届准备工作报告；秘书处向常务理事报告了2010年学会工作总结和2011年的工作计划、学会评选2010年度先进集体和先进个人的情况和学会经费使用情况。与会代表交流了经验和体会，对学会工作的热点和难点问题发表了意见和提出了建议，对学会的换届准备工作踊跃发言，建言献策。原则同意各个报告。

最后，王平理事长作了总结发言。要求做好学会换届工作，希望通过学会换届，增强学会的功能，创新履行学会的职责，完成学会任务；要加强学会建设，会员服务，服务“十二五”规定的中心任务，发挥学会优势、创新发展、促进和谐；要调动和发挥专（工）委会、分会和会员的积极性，加强学术交流。举办形式多样、高质量学术交流活动，围绕特高压、交直流输变电在四川电网的建设以及智能电网、环保节能减排、低碳时代的电力发展开展活动；要办好学术期刊；要开拓和创新咨询工作，发挥学术、技术专长，为四川电力工业发展，为四川社会进步、经济建设提供形式多样的咨询和技术服务。学会要把握好机遇，努力创建学术权威的学会、严谨求实的学会、开拓创新的学会、团结和谐的学会。

