

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

# 四川電力技术

## SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网四川省电力公司内江供电公司

ISSN 1003-6954



9 771003 695142

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院



# 四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网四川省电力公司内江供电公司

ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.37  
2014  
No.5

《四川电力技术》  
编辑委员会名单

主任委员 王平  
副主任委员 张伟  
刘俊勇  
委员  
(按姓氏笔画为序)  
方文弟 王卓 白家棣  
刘勇 朱白桦 朱国俊  
朱康 邓亚军 鄢小端  
李兴源 李建明 严平  
胡灿 徐波 唐茂林  
韩晓言 谢舫 甄威  
秘书 李世平  
吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954  
CN51-1315/TM

2014年第37卷第5期(总233期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主编:胡灿

副主编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发行:四川电力科学研究院情报室

地址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传真:(028)87082036

E-mail:cdscdljs@163.com

印刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM\* 1978\*

b\* A4\* 94\* zh\* P\* ¥6.00\* 4300\* 22\*

2014-10

目次

• 基金项目 •  
500 kV 重冰区同塔双回路垂直线间距离设计探讨 ..... 张驰 张海平 周亮(1)  
“疆电入川”工程对四川电网的影响研究 ..... 蒋乐 魏震波 刘俊勇 胡国强 陈虎 刘洋(5)  
新疆电网全数字仿真系统的建设及思考 ..... 钟显 樊艳芳 常喜强 王衡(9)  
变电站视频质量诊断系统的应用研究 ..... 朱元全 王印松 常政威(15)  
• 高压技术 •  
特高压交流输电线路重覆冰区地线支架设计研究分析 ..... 周唯 李澄宇 李力 梁明(19)  
某500 kV 变电站直流融冰装置35 kV 管母故障分析 ..... 郭飞 邓元实 刘益岑 蓝彬恒(24)  
高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制 ..... 王敏华 康积涛 裴超志(27)  
两例500 kV CVT 异常分析及日常运行监视探讨 ..... 代英俊(32)  
• 智能变电站 •  
智能变电站SCD智能比对软件的设计与实现 ..... 郑永康 陈吉 童晓阳 刘明忠 陈沧杨 庄先涛(36)  
智能变电站监控与视频系统联动方式研究 ..... 廖小君 黄忠胜 吕飞鹏(42)  
罗氏线圈电子式互感器软件积分中高次谐波问题研究 ..... 叶有名 刘明忠(46)  
• 电网技术 •  
利用移相变压器提高川渝断面输电能力的研究 ..... 陈刚 丁理杰 汤凡 滕予非 魏巍(49)  
变压器有载调压分接开关动作特性交流测试技术的研究与应用 ..... 何良 苏明虹 李健(55)  
基于旋转多圆柱的多功能人工气候试验室水滴参数分析方法研究 ..... 贺兴容 蒋一平 蒋兴良 胡建林(59)  
集群接入的风电场联络线单相重合策略研究 ..... 辛超山 吕盼(64)  
万州电网AVC系统遥控成功率低问题探讨 ..... 王小波 张长春 刘钢(68)  
一种基于DSP的变压器绕组温度测量 ..... 刘翔宇 杨明(72)  
电缆终端绝缘击穿原因分析及对策探讨 ..... 刘丰(75)  
储能电机时间继电器对重合闸的影响 ..... 李文泉 尚振华(78)  
10 kV XLPE 电缆本体缺陷电场仿真分析 ..... 张轩 杨延霞(82)  
基于MAS的调峰权交易模型 ..... 李安均 陈川(86)  
四川电力消费特征分析研究 ..... 贺星棋 鲜其军 严平(91)

**CONTENTS**

Discussion on Vertical Clearance Distance Design between the Conductors at Different Phases of 500 kV Double Circuit Transmission Line in Heavy Icing Area .....	Zhang Chi Zhang Haiping Zhou Liang(1)
Study on Influence of "Power Transmission Project from Xinjiang to Sichuan" on Sichuan Power Grid .....	Jiang Le Wei Zhenbo Liu Junyong Hu Guoqiang Chen Hu Liu Yang(5)
Construction and Thinking of Digital Simulation System in XinJiang Power Grid .....	Zhong Xian Fan Yanfang Chang Xiqiang Wang Heng(9)
Application Research on Video Quality Diagnosis System in Substations .....	Zhu Yuanquan Wang Yinsong Chang Zhengwei(15)
Research and Analysis on Ground Wire Support Design in Heavy Icing Area of UHV AC Transmission Line .....	Zhou Wei Li Chengyu Li Li Liang Ming(19)
Fault Analysis for 35 kV Pipe Type Busbar of DC De-icer in 500 kV Substation .....	Guo Fei Deng Yuanshi Liu Yicen Lan Binluan(24)
Time Domain Simulation Analysis and Control about Subsynchronous Oscillation in HVDC Transmission .....	Wang Minhua Kang Jitao Pei Chaozhi(27)
Two Abnormal Cases Analysis on 500 kV CVT and Discussion on Its Daily Operation and Monitoring .....	Dai Yingjun(32)
Design and Implementation of Intelligent Checking Software for SCD in Smart Substation Based on IEC 61850 .....	Zheng Yongkang Chen Ji Tong Xiaoyang Liu Mingzhong Chen Cangyang Zhuang Xiantao(36)
Research on Linkage between Supervision Control and Video System in Smart Substation .....	Liao Xiaojun Huang Zhongsheng Lü Feipeng(42)
Research on High Order Harmonic in Software Integrator of Rogowski Coil Electronic Transducer .....	Ye Youming Liu Mingzhong(46)
Research on Improving Transfer Capability in Tie-line of Sichuan - Chongqing Power Grid by Phase-shifting Transformer .....	Chen Gang Ding Lijie Tang Fan Teng Yufei Wei Wei(49)
Research and Application of AC Testing Technology for Operating Characteristics of On-load Tap-changer of Transformer .....	He Liang Su Minghong Li Jian(55)
Research on Analysis Method of Droplets Parameters Based on Rotating Multicylinder in Multifunctional Artificial Climate Chamber .....	He Xingrong Jiang Yiping Jiang Xingliang Hu Jianlin(59)
Research on Single-phase Reclosing Strategy for Wind Farm Transmission Line with Cluster Access .....	Xin Chaoshan Lu Pan(64)
Discussion on Low Success Rate of Remote Control for AVC System in Wanzhou Power Grid .....	Wang Xiaobo Zhang Changchun Liu Gang(68)
Temperature Measurement of Transformer Winding Based on DSP .....	Liu Xiangyu Yang Ming(72)
Causes Analysis on Insulation Breakdown of Cable Terminal and Discussion of Its Countermeasures .....	Liu Feng(75)
Influence of Time Relay of Energy Storage Motor on Reclosing .....	Li Wenquan Shang Zhenhua(78)
Analysis of Electric Field Simulation for Defects of 10 kV XLPE Cable .....	Zhang Xuan Yang Yanxia(82)
Transaction Model of Peak Regulation Right Based on MAS .....	Li Anjun Chen Chuan(86)
Analysis and Research on Characteristics of Electric Power Consumption in Sichuan Province .....	He Xingqi Xian Qijun Yan Ping(91)

**SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY**

2014 Vol. 37 No. 5  
(Ser. No. 233)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 24, Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China  
Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering  
Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY

# 500 kV 重冰区同塔双回路垂直线间距离设计探讨

张 驰 张海平 周 亮

(四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610016)

**摘 要:** 为保证导线间和导地线间不同期脱冰的静态接近电气安全距离,通过对典型 5 档线路不均匀冰模型在不同工况下所要求的垂直线间距离进行计算,讨论了在不同档距情况下上层导地线覆冰状态校验条件,并给出了垂直线间距离推荐值,可为 500 kV 重冰区同塔双回路塔头设计提供参考。

**关键词:** 重冰区;同塔双回线路;不均匀冰静态弧垂;垂直线间距离;塔头设计

**Abstract:** The application of video monitoring system to the auxiliary system in smart substation is introduced, and the application situation of intelligent linkage between video monitoring system and substation supervision control system are introduced too. The main way at present adopted by video monitoring system and supervision control system in smart substation is discussed, and 5 feasible intelligent linkage modes are given. The different ways are studied and analyzed as viewed from the input mode, the application mode, the economy, the reliability and the applicability and so on, and thus the application prospects of different ways of linkage are put forward. A combined linkage with good practicality for the advanced application of video linkage in smart substation is proposed, which has been successfully applied to 110 kV smart substation.

**Key words:** smart substation; video monitoring; SCADA system; intelligent linkage

中图分类号: TM853 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0001-04

## 0 引 言

西部川、滇、藏地区蕴藏着丰富的水电资源,但这些地区自然环境恶劣、人文社会环境复杂。随着水电送出线路的增多,线路走廊资源日渐稀缺,以致于传统上采用单回路架设的高海拔、重覆冰线路也有了采用同塔双回架设的要求。

目前 500 kV 重冰区同塔双回线路在国内尚无应用实例,其瓶颈问题主要是无法准确把握不同工况下导地线脱冰跳跃高度和横摆距离规律,因而缺乏重冰区同塔双回线路铁塔外形尺寸设计的指导原则。近年来,国内外学者通过模拟试验和数值分析等方法对导地线脱冰响应进行了大量研究<sup>[1-13]</sup>,得出了很多具有工程实用价值的结论。文献[13]采用有限元方法对各种脱冰工况下导线脱冰动力响应进行研究,得出了导线冰跳高度工程实用简化计算公式( $H = 1.85 \Delta f$ ,  $\Delta f$  是导线脱冰前后静止状态下的弧垂之差)。据上述公式计算等档距 500 m 的典型 7 档耐张段在脱冰率为 80% 的情况下,任意单档导线冰跳高度都将达到 25 m 以上<sup>[12]</sup>。鉴于冰跳高度

很大,垂直排列的导地线为避免在档距中央瞬间动态接近闪络,在塔头布置时主要靠足够的水平位移来保证脱冰动态接近安全<sup>[14]</sup>。

按照《重覆冰架空送电线路设计技术规程》(以下简称重冰规程) 10.0.4 条规定,“重覆冰线路导线和地线在档距中央的距离除满足过电压保护要求外,还要校验导线和地线不同期脱冰时的静态接近距离,此距离不应小于线路操作电压的间隙值”。因此,垂直排列的重冰区双回路塔上下层导地线之间还需留有足够的垂直线间距离以保证静态接近安全。针对上述校验,规程中仅对下层导线给出了校验条件,而未对上层导地线的覆冰状态进行规定,计算发现上层导地线覆冰状态对导地线垂直线间距离的影响与下层导线相当,因此,有必要对上层导地线不同覆冰工况下所要求的垂直线间安全距离进行讨论,从而确定不同期脱冰时上层导地线覆冰状态,为 500 kV 重冰区同塔双回线路塔头设计提供参考。

## 1 不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移计算

计算不均匀冰时上下层导地线之间静态接近安

基金项目: 国家电网公司基建新技术科技项目(SXYM2012-FS2-03)

全距离需先计算可不均匀冰情况下耐张段内各档静态弧垂,而静态弧垂计算实质即为不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移值计算。

耐张段架线时,各档导线水平应力相等,直线塔的悬垂绝缘子串垂直。当外界气象条件变化时(非架线工况),由于档距及高差不等或者外力(冰、风等)荷载在各档的不均匀分布,造成耐张段内各档应力有差别,进而使导线上出现纵向不平衡张力,致使悬垂绝缘子串出现偏移或导线在线夹内滑动现象<sup>[15]</sup>。重冰区线路不均匀覆脱冰是引起不平衡张力的主要原因。不均匀冰导线应力和悬垂绝缘子串偏移值可通过以下公式进行精确迭代计算<sup>[16]</sup>

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos^2 \beta_i (1 + \frac{\gamma_i^2 l_i^2}{8 \sigma_i^2})} \left\{ \begin{aligned} & \frac{l_i \cos \beta_i}{24} \times [ \frac{\gamma_m}{\sigma_m} ]^2 - ( \frac{\gamma_i}{\delta_i} )^2 ] \\ & \times ( \frac{\sigma_i - \sigma_m}{E \cos \beta_i} ] + \alpha ( t + \Delta t_m - t_m ) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_{i+1} = [ \frac{G_i}{2A} + \frac{\gamma_i l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} + \frac{\sigma_i h_i}{l_i} ] + \frac{\sigma_i}{\delta_i} \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} \div ( \frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} ) \quad (2)$$

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \Delta l_1 + \Delta l_2 \cdots + \Delta l_n \quad (3)$$

式中  $l_i$  为档距(m);  $\beta_i$  为高差角(°);  $\alpha$  为膨胀系数(1/°C);  $E$  为弹性系数;  $t_m$  为架线时气温(°C);  $\sigma_m$  为应力(N/mm<sup>2</sup>);  $\Delta t_m$  为考虑初伸长降温等效温度(°C);  $\gamma_m$  为比载(N/cm·mm<sup>2</sup>);  $t$  为不均匀冰时气温(°C);  $\sigma_i$  为应力(N/mm<sup>2</sup>);  $\gamma_i$  为比载(N/cm·mm<sup>2</sup>);  $\Delta l_i$  为档距增量(m);  $A$  为导线截面,mm<sup>2</sup>;  $h_i$  为高差,μm;  $\lambda_i$  为悬垂绝缘子串长,μm;  $G_i$  为荷载,N。

## 2 重冰区同塔双回典型 5 档线路不均匀冰计算模型

按重冰规程 5.0.2 条,重冰区耐张段不宜超过 3 km。因此本次研究以 5 个等档距连续档(档距分别为 300 m、400 m、500 m、600 m)覆冰为模型,中间档脱冰弧垂变化最大,因此以中间档(第 3 档)为校核档对直线塔垂直线间距离进行研究。

外部边界条件:导线为 4 × LGJ - 500/45,地线为 2 根 OPGW - 150。导线采用“VVV”垂直排列方式,N 串垂直方向串长 5.7 m,串重为 1 100 kg。考虑海拔高度为 2 500 m,相间工频电压间隙值 2.6 m 相间操作过电压间隙值 5.5 m。

• 2 •

对上下层导地线的覆冰状态主要考虑如下 3 种工况。

工况 1:考虑上层导(地)线弧垂为所有档 100% 均匀覆冰弧垂,下层导线脱冰弧垂取值为:校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 1。

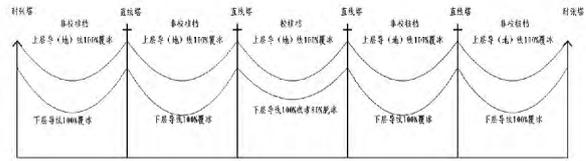


图 1 工况 1 上下层导地线的覆冰状态

工况 2:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 80% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 2。

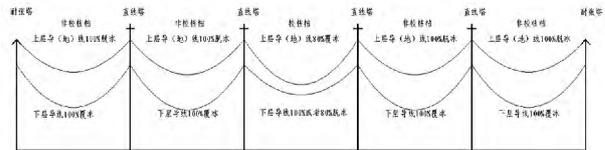


图 2 工况 2 上下层导地线的覆冰状态

工况 3:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 100% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。其示意图如图 3。

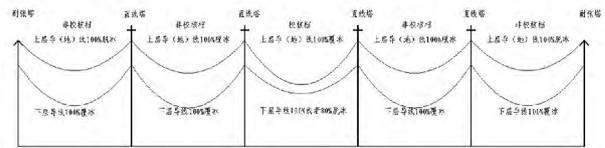


图 3 工况 3 上下层导地线的覆冰状态

## 3 重冰区同塔双回典型 5 档线路直线塔垂直线间距离计算

工况 1:考虑上层导(地)线弧垂为所有档 100% 均匀覆冰弧垂,下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。经上述工况计算,其垂直线间距离要求如表 1。

工况 2:考虑上层导(地)线弧垂为校核档 80% 均匀覆冰,其余档均 100% 脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰 100% 或脱冰 80%,其余档均 100% 覆冰。经上述工况计算,其垂直线间距离要求如表 2。

表1 工况1 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线均匀覆冰弧垂/m	8.3	15.2	23.5	33.7
上层导线均匀覆冰弧垂/m	16.1	25.2	36.3	49.8
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	11.6	16.5	21.4	24.6
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	2.05	4.75	6.85	6.75
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	10.2	13.8	17.2	19.2
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	0.65	2.05	2.65	1.35

注: 以上弧垂包括串长。

表2 工况2 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线不均匀覆冰最大弧垂/m	10.5	18.4	26.4	36.2
上层导线不均匀覆冰最大弧垂/m	21.2	34.2	47.1	60.9
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	16.7	25.5	32.2	35.7
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	4.25	7.95	9.75	9.25
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	15.3	22.8	28	30.3
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	2.85	5.25	5.55	3.85

注: 以上弧垂包括串长。

工况3: 考虑上层导(地)线弧垂为校核档100%均匀覆冰,其余档均100%脱冰时弧垂;下层导线脱冰弧垂取值为校核档分别脱冰100%或脱冰80%,其余档均100%覆冰。经上述工况计算,其垂直线间距离要求如表3。

表3 工况3 垂直线间距离要求值

工 况	档距/m			
	300	400	500	600
地线不均匀覆冰最大弧垂/m	11.2	18.8	26.7	36.5
上层导线不均匀覆冰最大弧垂/m	22.1	35.5	48.5	62.1
下层导线脱冰 100% 弧垂/m	10.0	14.2	20.4	30.7
下层导线脱冰 100% 要求层间距/m	17.6	26.8	33.6	36.9
下层导线脱冰 100% 要求地线支架高度/m	4.95	8.35	10.05	9.55
下层导线脱冰 80% 弧垂/m	11.4	16.9	24.6	36.1
下层导线脱冰 80% 要求层间距/m	16.2	24.1	29.4	31.5
下层导线脱冰 80% 要求地线支架高度/m	3.55	5.65	5.85	4.15

注: 以上弧垂包括串长。

按重冰规程,下层导线校核条件为校核档脱冰

率不低于设计冰重的80%,为避免极端条件控制塔头,同时满足规程要求,则层间距取下层导线脱冰100%和80%时计算值的平均。此外,由于重冰区线路铁塔呼称高都较高,地线所处环境最为恶劣,为保证地线冰凌过载情况下与上相导线之间的电气安全距离,地线支架高度取下层导线脱冰100%计算值。根据上述3种工况计算结果如下。

档距为300m时,直线塔导线垂直线间距离在3种工况下分别应取10.9m、16m、16.9m;地线支架高度分别应取2.05m、4.25m、4.95m。工况1不同期脱冰静态接近要求导线间垂直距离仅10.9m,地线支架高度仅2.05m。按此条件布置塔头,则层高完全由间隙圆控制,则中相导线和地线、上下相导线之间由于冰跳高度的不确定性仍然存在电气安全风险。同时考虑到重冰区线路一般在高海拔山区走线,连续档档距仅300m的概率很小,因此300m左右档距的连续档直线塔层高和地线支架高度不应按工况1计算取值,建议直线塔层高按工况2计算取值,地线支架高度按工况3计算取值。

档距为400m时,直线塔导线垂直线间距离在3种工况下分别应取15.15m、21.2m、25.45m;地线支架高度分别应取4.75m、7.95m、8.35m。若按单独考虑工况2或者工况3计算取值,则塔头尺寸完全由不同期脱冰静态接近要求值控制,此时塔头尺寸过大,铁塔结构安全性得不到保证。若按工况1计算取值,该值比300m档距要求值还略小。因此400m左右档距的连续档直线塔层高和地线支架高度建议按工况1和工况2统一考虑计算取值。

档距500m为时,直线塔导线垂直线间距离在3种工况下分别应取19.3m、30.1m、31.5m;地线支架高度分别应取5.85m、9.75m、10.05m。若按单独考虑工况2或者工况3计算取值,则塔头尺寸过大,铁塔结构安全性得不到保证。因此500m左右档距的连续档直线塔层高建议按工况1计算取值。建议地线支架高度按工况1和工况2统一考虑计算取值。同理,档距为600m时若按单独考虑工况2或者工况3计算取值,则塔头尺寸过大,铁塔结构安全性得不到保证。因此600m左右档距的连续档直线塔层高建议按工况1计算取值;地线支架高度按工况1和工况2统一考虑计算取值。

综上所述,在文中典型5档线路不均匀冰计算模型和研究边界条件下,各档距的不同期脱冰上层导线覆冰状态校核条件和塔头控制尺寸推荐如表4。

表 4 各档距条件下塔头控制尺寸推荐值

项 目	档距/m			
	300	400	500	600
地线覆冰状态 校核条件	校核档 100% 覆冰,其余档 100% 脱冰	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值
上层导线覆冰 状态校核条件	校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰	所有档均匀覆冰和校核档 80% 覆冰,其余档 100% 脱冰时平均值	所有档均匀覆冰	所有档均匀覆冰
导线间垂直线间 离(层间距)/m	16.5	18.5	20	22
地线支架高度/m	5.0	6.5	8	8

## 4 结 论

(1) 通过建立典型 5 档线路不均匀冰计算模型,计算得出等档距 300 m、400 m、500 m 和 600 m 在导线 3 种不同覆冰工况下所要求的垂直线间距离(见表 1~表 3)。

(2) 综合考虑重冰区工程应用情况和铁塔结构安全性,同时结合不同工况下垂直线间距离计算值,推荐了实际工程中不同档距下上层导线或地线覆冰状态校验条件(见表 4)。

(3) 给出了 300 m、400 m、500 m 和 600 m 档距下导线间垂直线间距离和地线支架高度推荐值(见表 4),为 500 kV 重冰区同塔双回线路塔头设计提供参考。

### 参考文献

[1] V. T. Morgan, D. A. Swift. Jump Height of Overhead - Line Conductors after the Sudden Release of Ice loads [J]. *Electric Engineers, Proceedings of the Institution of*, 111( 10): 1736 - 1746.

[2] J. R. Stewart. Ice as an Influence on Compact Line Phase spacing [C]. *Proceedings of IWAIS, Hanover, New Hampshire*, 1983: 77 - 82.

[3] G. McClure. J. Rousselet. R. Beauchemin. Simulation of Ice - shedding on Electrical Transmission Lines Using ADINA [J]. *Computer and Structures*, 1993( 47): 523 - 536.

[4] M. Roshan Fekr. G. McClure. Numerical Modeling of the Dynamic Response of Ice - shedding on Electric Transmission Lines [J]. *Atmospheric Research*, 1998 ( 46): 1 - 11.

[5] T. Kalman. M. Farzaneh. G. McClure. Numerical Analysis of the Dynamic Defects of Shock - load - induced Ice

Shedding on Overhead Ground Wires [J]. *Computers & Structures* 2007( 85): 375 - 384.

[6] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.

[7] 晏致涛, 李正良, 汪之松. 重冰区输电塔 - 线体系脱冰振动的数值模拟 [J]. *工程力学* 2010 27( 1): 209 - 214.

[8] 陈勇, 胡伟, 王黎明, 等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究 [J]. *中国电机工程学报* 2009 29( 28): 115 - 121.

[9] 胡伟, 陈勇, 蔡炜, 等. 1 000 kV 交流同塔双回输电线路导线脱冰跳跃特性 [J]. *高电压技术* 2010 36( 1): 275 - 280.

[10] 易文渊. 特高压输电塔线体系脱冰动力响应数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[11] 夏正春. 特高压输电线的覆冰舞动及脱冰跳跃研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[12] 陈科全, 严波, 郭跃明, 等. 超高压输电线路脱冰动力响应数值模拟 [J]. *重庆大学学报* 2009 32( 5): 544 - 549.

[13] 严波, 郭跃明, 陈科全, 等. 架空输电线路脱冰跳跃高度的计算公式 [J]. *重庆大学学报* 2009 32( 11): 1306 - 1310.

[14] DL/T 5440 - 2009, 重覆冰架空输电线路设计技术规范 [S]. 中国电力出版社, 2009.

[15] 刘庆丰. 输电线路不平衡张力分析与计算 [J]. *电力自动化设备* 2006 26( 1): 93 - 95.

[16] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第 2 版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

### 作者简介:

张 驰(1973), 本科, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、高海拔重冰区输电技术;

张海平(1985), 硕士, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、特高压输电技术;

周 亮(1980), 硕士, 工程师, 研究方向为高电压技术与绝缘配合、特高压输电技术。

(收稿日期: 2014 - 08 - 12)

# “疆电入川”工程对四川电网的影响研究

蒋乐<sup>1,2,3</sup> 魏震波<sup>1,2</sup> 刘俊勇<sup>1,2</sup> 胡国强<sup>3</sup> 陈虎<sup>3</sup> 刘洋<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省智能电网重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** “疆电外送”工程的实现, 四川电网结构枢纽的确立, 及四川电网丰枯时节电力电量的落差, 蕴育了“疆电入川”工程的实施。该工程在实现“西电东输”大格局优化与解决四川电力电量平衡问题的同时, 势必对四川电网造成影响。在分析了疆电外送工程与四川电网现状基础上, 对疆电入川的电力电量平衡问题、短路电流水平问题进行了深入研究。研究表明: 该工程能有效解决四川电力“丰余枯缺”结构性矛盾, 且实现“外送接力”作用; 参考当前四川电网(特别是成都电网)短路水平, 该工程对四川电网短路电流水平影响不大, 但仍需要采取相关限流措施; 研究成果可为“疆电入川”工程的实施提供了理论支撑。

**关键词:** 疆电外送; 四川电网; 疆电入川; 电力电量平衡; 短路电流水平

**Abstract:** The implementation of "power transmission project from Xinjiang to Sichuan" is created by the realization of "electricity delivery project from Xinjiang", the constructional characteristics of Sichuan power grid and the drops during high and low water flow period. This project will optimize the pattern of "power delivery from the west to the east" and make the balance of Sichuan electricity, but it will also have influence on Sichuan power grid. The power balance and short-circuit current level are studied on the basis of the existing analyses of electricity delivery project from Xinjiang and the development of Sichuan power grid. The results show that: the implementation of the project can effectively solve the constructional problem, surplus in the high water flow period and destitute in the low water flow period of Sichuan power grid, and although it has been-  
sity impacts on the short-circuit current level of Sichuan power grid considering the current situation, it still needs to adopt the relevant measures to limit the flow. The research achievements would be a reference for the implementation of "power transmission project from Xinjiang to Sichuan".

**Key words:** electricity delivery from Xinjiang; Sichuan power grid; power transmission from Xinjiang to Sichuan; power balance; short-circuit current level

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0005-04

## 0 引言

“疆电外送”<sup>[1,2]</sup>作为既已实现,且未来发展潜力巨大的能源优化配置工作已视为国家战略发展规划。而与之相邻的四川电网作为国家枢纽电网<sup>[3]</sup>,“西电东输”工程的大量投运保证了其有能力成为中转站,实现电力资源的“接力外送”;加之以水电为主的四川电网,丰枯期电量存在较大落差,部分时段有一定电量缺额,“丰余枯缺”结构性矛盾凸出。“疆电入川”孕育而生。

然而,伴随“疆电入川”特高压直流项目投运,势必将会对四川电网造成较大影响,特别是成都电网。主要问题包括有:①电力电量平衡问题<sup>[4]</sup>,如电力建设规划、电量的消纳与结算;②电磁环网问题<sup>[5-8]</sup>,如已处较高短路电流水平的电网现状,原有开关设备的遮断容量能否满足系统的要求;③电网经济与安全问题,如电网运管费用的增加,故障影响与损失加重,通信线路的电磁感应危害加大,及铁塔接触电压、跨步电压增大带来的安全问题等。因此,解析“疆电入川”特高压直流输电工程<sup>[9]</sup>对四川电网的影响,特别是电力电量平衡问题与短路电流水平分析<sup>[10]</sup>显得尤为重要。

基金项目: 863 计划项目(2014AA051901); 国家自然科学基金项目——国(地区)合作与交流项目(51261130472); 国家自然科学基金项目——面上项目(51377111)

# 1 “疆电外送”工程与四川电网现状分析

## 1.1 “疆电外送”工程

随着750 kV新疆与西北联网工程的成功投运,新疆电网正式并入全国电网,实现了“煤从空中走、电送全中国”的大跨越。当前,哈密—河南±800 kV和淮东—重庆±1 100 kV两条特高压直流工程的投建,预计每年可向外送电17 500 MW,进而缓解内地用电紧张局面。其中,淮东—重庆±1 100 kV直流工程还将成为全球电压等级最高、输送容量最大、输电距离最长的直流输电工程。“疆电外送”意义重大。首先,近年来火电连年亏损使电力企业失去投资火电的动力和能力。火电投资下降过快可能导致今后几年火电装机不足,造成“硬缺电”。作为发电主力军的火电增速下降,无疑将对整体供电形势造成影响。而中国电力消费主要集中在东、中部地区,中、东部地区占全国用电比重达近70%,未来这一特点也不会根本改变。因此,特高压“疆电外送”无疑是保障国家能源安全的重要手段;其次,对于新疆自身的发展而言,建设能源大通道,集约开发新疆各类能源,就地转化为电力,有利于新疆资源优势转化,事关国家能源安全、产业布局和新疆跨越式发展。

## 1.2 四川电网现状分析

近年来,四川电源与电网建设初具规模,跨区联网交换能力大幅提升。然而,“丰余枯缺”结构性问题仍然明显,以2010年四川电网实际情况为例,外送电量20 050 GWh(含二滩送重庆电网3 730 GWh),外购电量3 580 GWh。造成上述“既卖电又买电”现象的问题在于以下3点。

(1) 电力供需受季节与气候影响较大,对电网吞吐能力和联网要求较高。

受到电源结构和水火电源空间分布的影响,丰水期都有大量的电力自西向东送往负荷中心并向区外送,枯水期则更多是依靠煤电和外来电源,以水电为主的电力供需形势受季节与气候影响较大,对电网吞吐能力和与外区联网要求较高。近年来枯水期供电能力不足,电煤和外购电成为影响冬季电力电量平衡的关键因素。

(2) 四川500 kV、220 kV电网已具规模,但电网高低两端网架发展有所滞后。

一方面与外区大量电力交换能力受到限制,电网稳定水平较低,丰水期水电存在弃水调峰、经济性差,更高等级电网(交直流特高压电网)亟待早日建成投产;另一方面110 kV以下配电网建设有所滞后,配电网网架和供电能力有待进一步加强。

(3) 电源和电网的发展有待于进一步加强协调配合、共同有序推进。

随着电源特别是水电开发建设速度加快,四川电网建设相对滞后,部分送电通道出现瓶颈。随着厂网分开的电力体制改革已基本完成,电源项目主体多元化的格局已经形成。新形势下,根据市场和电网条件,正确引导电源项目合理布局、规范有序发展,确保电力系统安全可靠,以及系统整体最优的难度较大。

综合分析,四川电网受季节与气候的变化,输送电通道瓶颈及部分城市负荷中心峰谷差异大等问题影响,决定了未来四川电网需要进一步加强省际电网的互联发展。

# 2 “疆电入川”工程对四川电网的影响

## 2.1 电力电量平衡分析

根据四川省“十二五”能源发展规划,四川省全社会用电量年均增长12.6%,全省最大负荷年均增长14.4%。参照2011年四川电网电力电量实际情况,现对2012年全网电力电量平衡进行预测,相关计算公式如下。

$$\Delta P_D = 1.03P_{DC} - (P_R + \Delta P_S) \quad (1)$$

其中,  $\Delta P_D$  为电力余缺;  $P_{NC}$  为需要装机容量;  $P_R$  为综合可调容量;  $\Delta P_S$  为受阻电力。

$$P_R = P_{Inst} - P_M - \Delta P_S - \Delta P_{Sur} \quad (2)$$

其中,  $P_{Inst}$  为期初统调装机容量;  $P_M$  为检修容量;  $P_{Sur}$  为空闲容量。

$$\Delta P_{Sur} = P_{Im} - P_{Ex} \quad (3)$$

其中,  $P_{Im}$  为输入电力;  $P_{Ex}$  为输出电力。

$$\Delta Q_S = Q_C - Q_G \quad (4)$$

其中,  $\Delta Q_S$  为电量自然盈亏;  $Q_C$  为全社会用电量;  $Q_G$  为全网发电量。

电力电量预测结果如表1所示。

对表1中的电力预测部分进行分析,见图1所示。

从图1中可以看出,全网2012年全年大部分月份(除4、10、11月)都存在一定电力缺额,主要集中在

表 1 2012 年四川电网电力电量平衡预测表(单位: MW、GWh)

分项内容	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
本年装机容量	38 984	39 256	39 410	40 684	41 154	41 192	41 868	42 000	42 000	42 680	43 450	44 250	44 250
新增统调装机容量	272	154	1 274	470	38	676	132	0	680	770	800	2 025	7 291
可调容量	25 164	25 190	22 861	23 196	22 948	24 128	26 188	26 555	25 752	23 873	27 802	27 582	27 802
最大需求负荷	261 470	246 590	246 020	240 900	230 780	264 320	250 190	289 430	264 500	224 250	264 500	287 500	289 430
平衡电力余缺	-17 670	-2 090	-24 790	-16 170	-8 230	-30 970	4 180	-32 570	-14 910	7 750	5 590	-20 300	-32 570
用电量	13 070	12 290	13 790	12 660	12 570	12 360	13 400	14 490	12 600	13 060	13 650	14 860	158 800
水电电量	5 650	5 480	5 600	5 520	8 400	13 000	15 370	14 760	13 500	12 000	8 800	7 130	115 200
电煤约束火电量	5 080	4 750	5 080	4 910	3 390	2 810	3 390	3 390	1 870	1 930	3 740	6 290	46 620
自然盈亏	-2 340	-2 060	-3 120	-2 230	-790	3 440	5 360	365	2 77	870	-1 100	-1 440	3 030
丰期净富余						3 440	5 360	3 650	2 770	870			16 090
平衡枯期净缺电	-2 340	-2 060	-3 120	-2 230	-790						-1 100	-1 440	-13 070

表 2 2015 年四川电网电力电量平衡预测表(单位: MW、GWh)

	电量	最大需求负荷	备用率	备用量	需要装机容量	外送电	总装机容量
合计	272 000	51 250	0.3	15 432	527 932	234 000	88 200

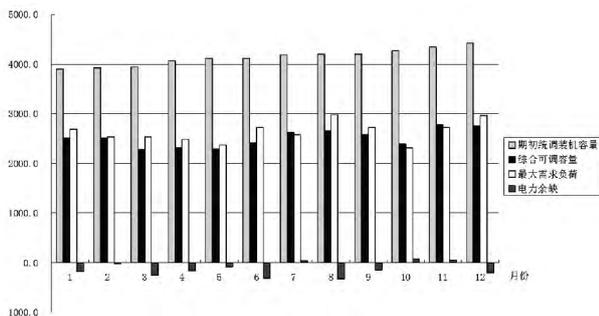


图 1 2012 年电力平衡图

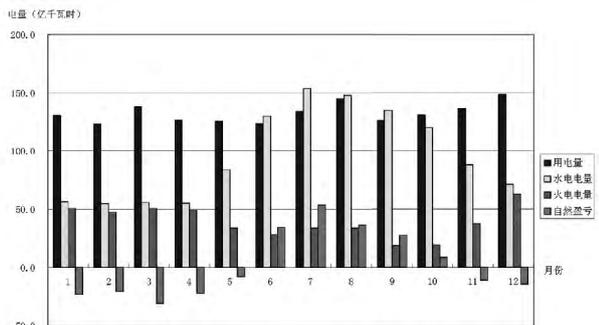


图 2 2012 年电量平衡图

在枯水期与负荷高峰期,最大缺额为 -3 257MW。

对表 1 中的电量预测部分进行分析,见图 2 所示。

全网电量自然盈亏 3 030 GWh,丰期净富余 16 090 GWh,枯期净缺电 13 070 GWh,净缺电月份 11 月至 5 月。

上述结果表明:除负荷日益增长,造成负荷高峰期电力不足外,四川电力“丰余枯缺”结构性矛盾日益凸显,加强区域电网互联强度势在必行。

根据规划,对 2015 年电力电量情况进行预测。

按规划,到 2015 年,四川电网全网电力平衡问题已能得到基本解决,且有一定余力。但考虑到四川电网丰、枯水电变化的影响,“丰余枯缺”问题仍然存在的可能,及全国能源结构优化——“西电东输”的需要,“疆电入川”项目的实施不仅能有效解决四川电力结构性问题,更有利于国家能源大格局的优化。按照“疆电入川”规划,拟建通道将向成都地区输送功率约 11 000 MW,即能实现“消纳疆电,自身平衡,外送接力”的目的。

## 2.2 短路电流水平分析

随着雅安—重庆—皖南交流特高压的投运,以及四川西部水电资源的大力开发和四川中东部电网 500 kV 变电站的增加,使得各站点间的电气距离进一步缩短,导致了已处较高水平的四川电网各站点短路电流水平进一步升高,甚至部分站点水平超过了对应母线开关的最大遮断容量。现利用 BPA 程序对 2015 年四川电网 500 kV 以上变电站(如图 3 所示)短路电流水平进行模拟计算。计算结果如下。

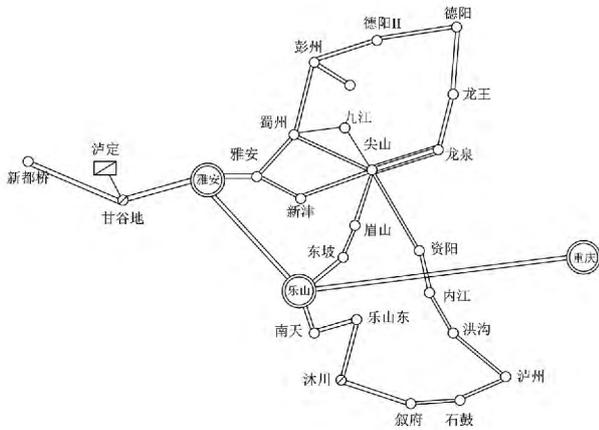


图 3 四川电网 500 kV 站示意图

(1) 2015 年四川电网,在没有采取任何限制短路电流措施的情况下,四川电网两个交流特高压变电站 1 000 kV 母线最大短路电流仅约 26.497 kA,远小于 50 kA 的遮断容量。

(2) 500 kV 侧电网短路电流水平中,东坡变电站的 500 kV 母线三相短路电流超过了遮断容量 63 kA,其余交流特高压变电站 500 kV 母线和 500 kV 变电站高压侧母线的短路电流均小于 63 kA。其中乐山特高压中压侧 500 kV 母线的三相短路电流为 61.383 kA,已接近开关遮断容量,裕度较小。

(3) 220 kV 侧电网短路电流水平中,东坡变电站的 220 kV 母线三相、单相短路电流均超过遮断容量 50 kA,乐山变电站的 220 kV 母线三相短路电流超过了遮断容量,其余 500 kV 变电站 220 kV 母线侧的短路电流均小于 50 kA。

(4) 四川电网各个换流站大多因为直接连接于大型水电站,所以母线短路电流较大,最大为 54.922 kA,最小为 36.720 kA,各个换流站均是单相短路电流高于三相短路电流。

(5) 2015 年四川电网短路电流计算结果中,共有 11 个变电站或换流站的母线短路电流水平高于

50 kA,具体如表 3 中第 2、3 列所示。

考虑“疆电入川”项目主供方向为成都电网,计算 2015 年四川电网 500 kV 以上站点短路电流水平,且对比工程实施前其中已处较高水平站点,如表 3 中第 4、5 列所示。

表 3 短路电流高于 50 kA 的 500 kV 以上站点(单位:kA)

站名	直流投运前		直流投运后	
	三相短路	单相短路	三相短路	单相短路
乐山特高压	61.383	56.545	61.566	56.709
洪沟	52.747	39.881	52.862	39.965
龙泉	53.920	46.071	54.195	46.266
蜀州	51.294	43.131	51.548	43.271
尖山	58.397	51.558	58.707	51.800
东坡	63.575	57.639	63.781	58.407
乐山	50.362	54.268	50.427	54.536
雅安	50.161	48.292	50.260	48.456
雅安	51.936	40.449	52.066	40.506
西昌	53.899	53.603	53.916	53.617
锦屏换流站	48.033	54.922	48.045	54.934
复龙换流站	42.887	51.881	42.895	51.889

结果表明:在不改变四川水电、火电机组容量的情况下,“疆电入川”项目工程投运对 2015 年四川电网 500 kV 以上各站点短路电流水平的影响很小,无明显“助长”作用。相比较于交流输电方式,采用直流输电方式将新疆的富裕电力输送到四川电网,并不会增大四川电网的短路电流水平。由于直流输电线路的电流是按给定值控制的,因此被互联的两端交流系统的短路容量不致由于互联而增大。但是如果用交流线路将两个交流系统互联,则将出现因短路容量增大,导致断路器的遮断容量不足而需要更换,或者增设限流装置,以限制短路电流等。

### 3 结 语

在分析了“疆电外送”与四川电网现状基础上,就“疆电入川”工程对四川电网可能存在影响进行了研究,主要结论如下。

(1) “疆电入川”项目的实施能有效提升“西电东输”大格局资源优化配置,且解决了四川电网枯期存在一定电力缺额的问题;

(下转第 71 页)

由 70.27% 提高到 91.15%。

表 3 2014 年 1 月至 3 月 AVC 成功率情况

设备	AVC 遥控次数	遥控失败次数	成功率 /%	解决方法
福祿变电站 2 号电容器	275	24	91.27	主站接收硬信号
云龙变电站 1 号主变压器	254	27	89.37	采用数据网络通道
梁平变电站 2 号电容器	316	9	91.15	采用数据网络通道

在对 AVC 系统遥控成功率进行探讨时,分析报文是一个很好的手段,通过报文分析,基本上可以判断出问题的原因。

由于 AVC 系统遥控成功率的提高,使得调控中心人工遥控的次数大大减少,减轻工作量,提高了工作效率,也提高了电网电压合格率,保证电网安全运行。

参考文献

[1] 张勇军,林建熙,杨银国. 电力系统无功电压调控配合研究综述[J]. 电网技术 2012, 36(3): 101-106.

[2] 黄益庄. 变电站自动化技术的发展方向[J]. 继电器,

(上接第 8 页)

(2) “疆电入川”项目工程投运后,在不改变四川水电、火电机容量的情况下,对 2015 年四川电网 500 kV 以上各站点短路电流水平的影响很小。采用直流输电方式将新疆的富裕电力输送到四川电网,并不会增大四川电网的短路电流水平;

(3) 当前,随着交流特高压工程的逐步建设,新增大电源的不断接入,各地区电网存在 500 kV、220 kV 环网问题,将导致四川电网各站点短路电流水平将不断增大,甚至某些站点的短路电流已经或者可能超过对应母线开关的最大遮断容量,需要对四川电网 500 kV 各站点采取有效限制短路电流的措施。

参考文献

[1] 本刊编辑部. “疆电外送”特高压直流前期正式启动[J]. 华北电力技术 2011(8): 4.

[2] 新疆电力公司. “疆电外送”工程打造能源输出空中大通道[OL]. 国家电网公司, <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/gsyw/yxfc/07/277399.shtml> [2012-07-30].

[3] 陈虎,张英敏,贺洋,等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.

[4] 张粒子,王睿,金允剑,等. 基于跨省发电权交易的“疆

2008, 36(6): 1-3.

[3] 张士勇,陈春,贾大昌,等. 应用 101(104) 规约的“电网调度自动化系统”在现场调试维护中的关键技术分析[J]. 电力系统保护与控制 2011, 39(5): 148-152.

[4] 中华人民共和国国家能源局. DL/T 634. 5104-2009 远动设备及系统 第 5-104 部分 传输规约采用标准传输协议集的 IEC 60870-5-101 网络访问[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[5] 王奕. 无功自动调节系统遥控成功率较低的原因分析和改进[J]. 电力设备 2007, 8(7): 61-63.

[6] 周鹤鹤,刘康军. 电网 AVC 系统存在的问题及改进措施[J]. 电工技术 2010(10): 29-30.

作者简介:

王小波(1986), 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

张长春(1982) 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

刘钢(1986) 硕士研究生, 助工, 研究方向为电力系统调度自动化。

(收稿日期: 2013-04-08)

电外送”交易模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 69-74.

[5] 刘楠,唐晓俊,张文朝,等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136.

[6] 白宏坤,李干生. 关于电磁环网若开环方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制 2010, 38(2): 60-63.

[7] 王强,李建. 四川西部电网解环分区运行研究[J]. 华中电力 2008, 21(4): 12-14.

[8] 杨冬,刘玉田,牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制 2009, 37(22): 62-67.

[9] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备 2012, 32(7): 10-14.

[10] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社 2007.

作者简介:

蒋乐(1975), 博士研究生, 高级工程师, 从事特超高压输电技术与电力系统分析工作与研究;

魏震波(1978), 博士, 讲师, 从事电力系统安全稳定分析与控制、电力市场、智能电网及相关计算机应用等研究;

刘俊勇(1963), 教授, 博导, 研究方向为电力系统分析及电力市场研究。

(收稿日期: 2014-07-28)

# 新疆电网全数字仿真系统的建设及思考

钟 显<sup>1</sup> 樊艳芳<sup>1</sup> 常喜强<sup>2</sup> 王 衡<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘 要:** 随着新疆电网的发展日益庞大,全网形成了 750-220 kV 主网架。伴随着风电、光伏等新能源的接入、哈密—郑州(±800 kV)特高压直流输电的投运及准东—川渝(±1100 kV)特高压直流输电的建设,整个新疆电网的运行也更为复杂。为了提高新疆电网安全稳定运行的能力,建设电网全数字仿真系统对新疆电网进行仿真模拟,并且对电网全数字仿真系统的仿真精度和可信度也提出了更高的要求。为此,介绍了新疆电网全数字仿真实验中的建设、新能源特性的仿真等研究,并对电网仿真系统中的海量数据提出了云技术数据管理中心和视景仿真应用于全数字仿真系统可视化处理的思路。

**关键词:** 电力系统; 数字仿真; 实时仿真; 云技术; 视景仿真

**Abstract:** Along with the rapid development of XinJiang power grid, 750~220 kV main grid is formed. With the new energy such as wind and photovoltaic connected to power grid, the operation of HaMi-ZhengZhou(±800 kV) UHVDC and the construction of ZhunDong-ChuanYu(±1100 kV) UHVDC, the grid operation in XinJiang becomes more complex. In order to improve the ability of safe and stable operation of XinJiang power grid, the digital simulation system is established for the simulation of XinJiang power grid, and the higher requirements for the accuracy and reliability of this system are also put forward. Therefore, the construction of digital simulation system and the researches on the characteristics of new energy are introduced. Also, the data management center with cloud technology and visual simulation are proposed to be applied to the visualization processing for the large amount of data in digital simulation system.

**Key words:** power system; digital simulation; real-time simulation; cloud technology; visual simulation

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0009-06

## 0 引 言

随新疆电网的大发展,融入风电、光伏等新能源,传统的方法对电网运行进行分析和监测难以满足要求。加上互联系统中含有交直流输电线路,而且广泛应用了电力电子装置,电网的稳控运行更复杂<sup>[1]</sup>。目前,新疆电网形成了 750~220 kV 的主网架和 UHVDC(哈密—郑州±800 kV)的投运,加上 750 kV 超高压交流输电建设将发展构成环网。整个新疆电网的复杂程度更高,对新疆电网的安全稳定运行水平、规划预测能力及调度控制等提出了更高的技术要求。建设新疆对电网全数字仿真实验中心,实现有效的仿真和分析研究,对新疆电网甚至是全国电网的安全、可靠、经济运行都有着重要意义<sup>[2]</sup>。

## 1 电力系统全数字仿真系统的概况

电力系统全数字仿真系统(下面称全数字仿真系统)是电力系统实时仿真技术经历了动态模拟仿真、数模混合实时仿真系统后,发展的一项新的仿真技术。20 世纪 90 年代初,随数字信号处理器(DSP)的兴起,加拿大 RTDS 公司首先推出的实时仿真系统(RTDS)。随后法国电力公司(EDF)开发的有实时和非实时仿真系统(ARENE)、加拿大魁北克水电研究所研发的数字实时仿真器(HYPER-SIM)、深圳殷图科技发展有限公司开发的数字动态实时仿真系统(DDRST)及中国电科院研发的全数字实时仿真装置(ADPSS)<sup>[2]</sup>。它们都是依托各种设备为硬件平台,采用 CPU 并行处理技术。通过软件在 CPU 上运行来模拟电力元件,基于这个特点给

基金项目: 1. 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2011105); 2. 国家自然科学基金项目(51367016)

未来元件仿真带来了发展空间<sup>[1]</sup>。

目前,全数字仿真系统依托计算机技术、建模技术以及数值算法的发展,开展了电力系统的电网分析计算,使得硬件处理速度更快,模型、参数更准确和适应性更强。另外,全数字仿真系统在实现基本仿真的同时,需要更深的发展大规模实时与超实时仿真、在线应用,实现全过程动态模拟仿真,使仿真可信度与精度更高、功能性与综合性更强。

## 2 数字仿真系统关键技术

### 2.1 分网并行计算技术

在大规模复杂的交直流电网中为实现实时与超实时仿真,应用分网并行计算技术提高了仿真能力。由于仿真中没有网络的实际接线,针对变电站中刀闸、开关的影响难以模拟,通过把厂站的拓扑结构与电网中变化的拓扑结合分析来考虑刀闸、开关的动作影响;电网运行时设备的投切、参数变化及母线的分裂与合并等变化,均可采用并行仿真模式,可更真实地模拟电力系统运行。比如机电-电磁混合仿真,不再单纯地进行机电与电磁仿真,避免了较大的误差<sup>[3,4]</sup>。但文献(1)提出,由于 CPU 并行处理技术的应用,相应地它们之间的通信、数据交换及不同模型的算法等因素,因而数值不稳定成了仿真规模的限制。电力系统分网并行计算示意图如图 1 所示。

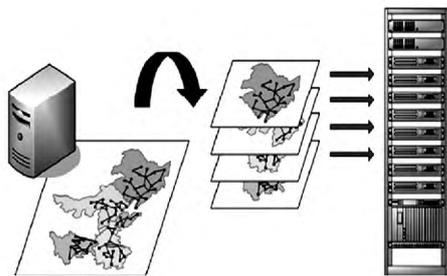


图 1 电力系统分网并行计算示意图

### 2.2 系统辨识技术

系统辨识(system identification),即“动态建模”,也就是利用被控制系统的输入、输出数据,经计算机数据处理后,估计出系统的数学模型。在电力系统仿真中,通过系统辨识技术中的参数辨识,来检验模型是否正确(或者接近)描述了原系统。即模型输入/输出是否充分接近原型系统的输入/输出

行为。这样检验了仿真模型在多大程度反应真实系统,有助于提高全数字仿真系统的准确性与可信度。

## 3 典型的全数字仿真系统的功能比较

目前主要应用典型的全数字仿真系统是 RDTs、HYPERsIM 及 ADPSS 系统,介绍如下。

1) RTDS 系统以电磁暂态仿真为研究,既可进行继电保护装置及控制系统的闭环测试,也可进行大规模的动态模拟仿真分析。具有友好的界面支持,给学习人员提供方法、工具<sup>[7]</sup>;

2) HYPERsIM 系统既可实现机电暂态、电磁暂态的实时仿真,也可进行装置实验,但目前对于二者的混合仿真却实现不了<sup>[1,2]</sup>;

3) ADPSS 系统可实现机电暂态与电磁暂态的实时、离线仿真,还可实现机电暂态的分网并行计算、继电保护试验;它利用 EMS 和 SCADA 系统接收测得的实时数据,处理后连接至继电保护、PSS 等装置实现闭环测试,它与 MATLAB 的联合性很强,可自定义完成功能任务<sup>[5,6]</sup>。

对 RDTs、HYPERsIM 及 ADPSS 系统的技术功能进行比较,如表 1 所示<sup>[1,5,6]</sup>。

根据表中 3 种典型系统的比较可知,在全数字仿真系统实现基本功能的前提下,ADPSS 系统突出特点是能够进行大规模的机电暂态仿真、机电-电磁混合仿真;在实现电网安全自动(安全稳定)装置的协调控制策略研究中,ADPSS 系统实现的效果则更优;励磁系统仿真和装置试验中,ADPSS 系统具有丰富的励磁系统仿真模型。包括直流励磁机、交流励磁机和静止励磁系统等 30 多种同步发电机的励磁系统模型,在中国可以进行绝大部分励磁系统的模拟仿真,满足电网稳定计算的要求;在其他方面的应用也更广泛。而对于 RDTs 与 HYPERsIM 系统,它们实现机电暂态仿真的规模要小;机电-电磁混合仿真、机网协调功能也无法实现。

## 4 新疆电网全数字仿真系统的建设

### 4.1 新疆电网全数字仿真系统的构建

新疆电网全数字仿真系统在硬件上提出了高要

求,以 ADPSS 装置为核心设备,加上 40 台高性能的计算服务器、8 台数据服务器、6 台应用服务器、1 个磁盘阵列和 12 台 PC 终端机构成的机群。利用机群和并行计算技术实现大规模复杂交、直流的电磁暂态和机电暂态仿真、电磁-机电暂态混合仿真及对外接物理装置进行仿真实验。高性能的机群服务用户还还可由需求扩展节点,容易实现;并可以把数据网与管理网络分离,提高了网络的传输速度与可用性。新疆电网全数字仿真系统数据管理采用 PSDB 电网计算数据管理系统,来实现规划与调度数据的统一,协同调试运行方式。通过基础数据与应用数据平台,能够协同多地部门异地共同维护和管理电网各类数据,实现调度运行和电网规划的相关计算分析。PSDB 电网计算数据管理系统如图 2 所示。



图 2 PSDB 电网计算数据管理系统

#### 4.2 新疆电网全数字仿真系统的研究

目前,新疆电网全数字仿真系统实现功能有全数字仿真实验、综合仿真应用及全过程仿真安全评估 3 个方面。针对仿真,该仿真系统进行了风电并网中 SVC 并列运行仿真。

当前新疆电网投入大量的 SVC 装置,实际上由于系统电压波动,SVC 协调控制系统响应时间慢,协调性、可靠性和稳定性能差,严重影响 SVC 装置功能发挥,从而影响了风电发展。在新疆全数字仿真系统仿真中应用发电厂并列运行机组的调差理论,对并列运行的 SVC 进行仿真。图 4 是在模拟风电场 35 kV 低压侧把 1 号与 2 号 SVC 装置并列运行,当 SVC 无调差情况下进行阶跃性扰动时电流的输出曲线。由图 4 可见,两台 SVC 无功补偿装置不具有进行相互协调的调节能力,故系统无法进行平衡运行。

表 1 数字仿真实验中心 3 种系统的比较

项 目	RTDS	HYPERSIM	ADPSS
电网协调功能	无	无	需开发
在线数据接口	无	无	有
潮流计算	有	有	有
机电暂态仿真	小规模	中等规模	大规模
电磁暂态仿真	有	有	有
机电-电磁混合仿真	无	无	有
用户自定义模型接口	有	有	有
MATLAB 接口	有	有	有
物理装置接口	有	有	有
电网分析计算功能	有	有	有
电力系统数学模型验证研究	有	有	有
电力系统故障的再现和分析	有	有	有
继电保护和自动(安全稳定)装置的检验和试验研究	有	有	有
励磁系统仿真和装置的试验研究	有	有	有
新技术、新设备进行检测和试验	有	有	有
网络划分	有	有	有
电网安全自动(安全稳定)装置的协调控制策略研究	有	有	有(效果好)
交直流混合仿真	可以	可以	可以
硬件结构	多个 DSP 芯片并行计算	SGI 服务器或 PC	集群计算机
硬件升级费用	购买新 RACK 费用高	更换高性能服务器费用较高	增机群服务器和网卡费用低
实时性	最好	好	好
图形化界面	英文界面	英文界面	中文界面
应用情况	大规模的仿真、高压直流模拟、交流暂态网络分析、测试继保装置及安全自动装置	电磁暂态仿真、装置试验、直流系统的动态性仿真	大规模交、直流模拟机电暂态分网并行计算、电磁暂态仿真、继电保护试验

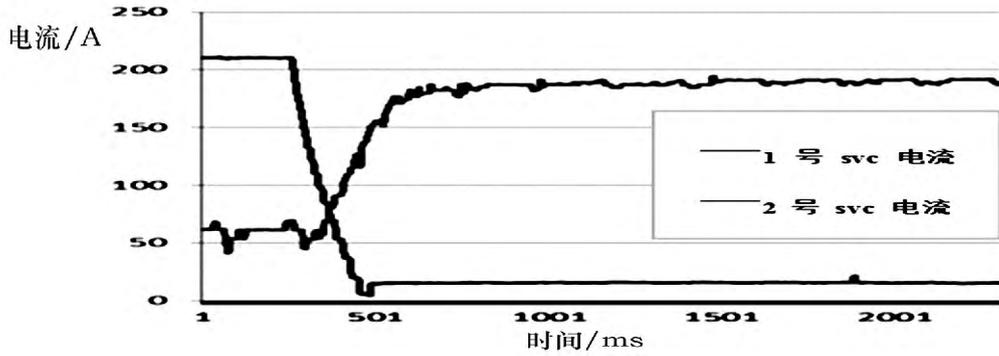


图 3 无调差时阶跃扰动并列运行时 SVC 电流输出

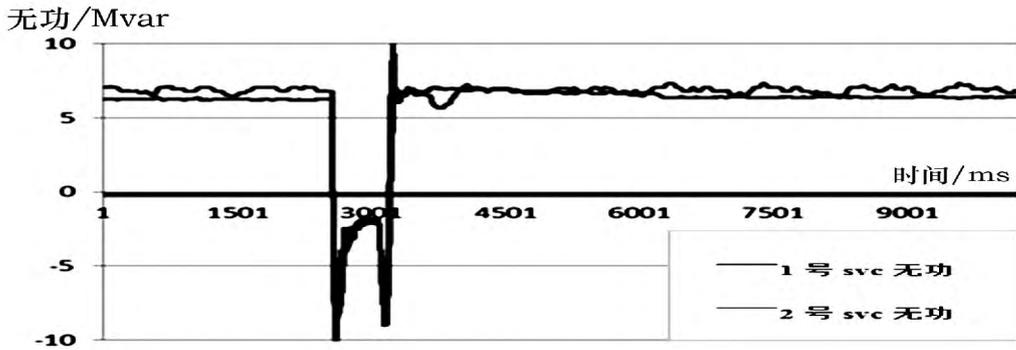


图 4 有调差时并列运行 SVC 的无功输出

图 4 是 2 台 SVC 无功补偿装置在故障前以恒调差为 5% 时进行并列运行。当模拟风电场并网点 110 kV 高压侧发生短路故障, 110 kV 电压突然跌落到 0.4(p. u.) 时, 并网点处于低电压状态, 此时 SVC 无功补偿装置发出正确的动作且进行及时电压调整, 因此保证 SVC 合理动作。故障消除后 2 台 SVC 无功补偿装置都能恢复稳定, 进行并列运行。

由上看出, 仿真中解决了 SVC 调差系数的难题。并且, 在新疆华电十三间房风电场进行了现场测试验证, 验证了在并列运行的 SVC 设置合理调差时提供合理的电压波动阻尼, 并实现 SVC 无功装置合理的无功分配能力。

此外, 一方面应用该系统还进行了大规模交直流混联系统的仿真分析。如图 5 所示, 新疆电网建设了新疆与西北主网的 750 kV 的第二通道工程及哈郑直流输电线路。

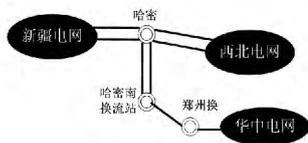


图 5 接线图

应用新疆电网全数字仿真系统建立了包含

(±800 kV) 哈郑直流在内的交直流混联系统的仿真模型, 进行了交、直流混联系统的潮流、暂态稳定及暂态稳定的仿真研究, 得知了混联电网的特性。并对哈郑直流模型还进行了单极闭锁故障、双极闭锁故障的仿真, 研究了系统中的稳定性, 并综合评估分析后, 应用于运行的大电网。

另一方面, 该系统实现了数据中心与协同计算。该系统的数据中心是将仿真实验数据、实时运行数据进行规划、研究, 并建立了数据中心维护机制, 定期进行维护、校核; 为了实现多级调度机构异地并行的数据管理以及联合方式计算。首先对新疆地区分区, 再对每一个地区的元件参数, 比如发电机、变压器及输电线路的参数通过仿真软件进行校核, 对不同电压等级进行数据分压处理。再利用调度数据管理平台进行统一整理, 形成原始的数据库。对处理好的数据通过协同计算, 与国网调度系统的数据中心平台实现对接、分割, 通过分布联合工作, 提高效率和管理水平。

最后, 应用该系统进行了风电的低电压穿越、电力系统故障的分析与反演、安全自动装置的协调控制策略研究、继电保护和自动装置的检验和试验研究等。

## 5 全数字仿真系统建设应用的几点思考

### (1) 数据中心的升级处理——云技术

目前全国各电网应用全数字仿真系统是建立数据中心对自身的数据进行存储,需要硬件上配备高性能的服务器构成 PC 机群;对数据的管理需要采用数据管理软件进行管理应用。再就是地域性因素导致设备维护分散,数据管理不集中及消耗大量的人力资源。云技术在信息技术的处理能力方面强大,采用多个用户计算服务的方式,为用户提供计算力、各种软件服务和存储空间。可见该技术善于数据存储和计算服务功能。

基于电网全数字仿真系统中数据中心的问题,借鉴目前云计算技术在谷歌、雅虎等搜索引擎中处理海量数据的应用,来对全数字仿真系统的数据进行云技术处理。用户可以通过云数据中的节点获取数据,比如说进行仿真试验、安全评估及与调度配合进行任务的分配和资源管理等。云结构如图 6 所示。

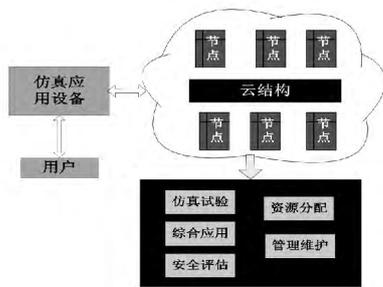


图 6 云结构

首先,形成自己的数据云。就是用大量的服务器形成大规模用户终端系统进行应用服务,对数据应用多副本纠错,结构相同的节点可进行交替,保证数据的可靠性;接着是数据的存储。数据包括实时监测数据和仿真数据,在这两类数据中,可对每一类的公共数据统一某一节点进行存储。如发电机、变压器及线路的参数模型数据,对各个地区的数据进行节点分开存储。当进一步进行数据分类时,可分为正常运行、故障的实测数据及仿真试验验证的数据等;再就是,数据的管理维护。在数据服务平台上,可设置访问权限,不同的部门设置不同的访问等级。如国调部门可以调用全国各地区的数据,而省调只能访问到新疆电网的数据和共享的数据资源,地调的权限则更低。当不同的地区间访问时,可以通过访问申请或设置其他账号来访问,并且在各个

地区通过云对自己的数据进行更新处理。以访问日志的形式监管云数据库的访问及流动情况;最后,需要加强数据安全和保密措施。

### (2) 可视化的深度处理——视景仿真

随着电网调度自动化的发展,通过具有可视化的 EMS 系统对电网进行监测管理。因而可视化技术不断研究发展。根据这一思路,可应用可视化技术在全数字仿真系统实现仿真过程的直观逼近模拟。

如全网的潮流动态图中,依据视景仿真形成潮流三维图。首先,建立三维模型。建立发电机、输电线路、变压器、母线等设备及拓扑结构的其他信息模型数据,为了增强效果还可以建立地理图的模型数据;接着应用图像图形处理技术,构造出电网的三维地理接线图;再就是仿真的再现。实时监测数据在仿真系统进行试验验证时,不仅形成三维潮流的动态画面,还显示电气设备的运行状态。并且,利用拼接技术进行仿真图形的缩放处理,调出厂站及变压器的接线情况。当仿真过程中进行故障分析,可以进行预警、警告的可视化显示。视景仿真模块图如图 7 所示。

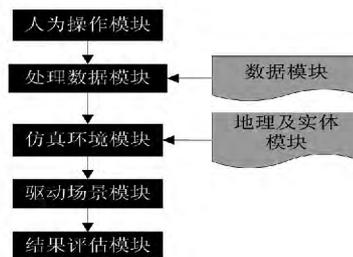


图 7 视景仿真模块

它包含人为操作模块,能提供仿真界面环境,在窗口观察、显示重要数据功能;数据模块可分为实时数据和仿真数据。该模块把获取的数据进行处理,归类、筛选、过滤;仿真环境模块是导入仿真的地理图及实体图,显示模拟的三维仿真环境;驱动场景模块是模拟环境的动态化驱动;结果评估模块将仿真数据与正常或故障运行时的数据比对,进行验证和试验,显示评估结果。可见,视景仿真更能真实逼近的模拟仿真,视觉上给人强烈的冲击,使调度人员快速获取电网运行状态,提高工作效率。

### (3) 智能化仿真分析报告

由全数字仿真系统知道,它能够进行电网分析一系列功能的试验与验证。至于仿真数据的

分析,需要人为的通过波形、数据等的分析得出结论。当电网变得更加复杂及需要处理的数据较多时,人为的因素可能影响到工作效率和质量。因此,提出了全数字仿真智能化仿真分析报告的自动生成思路。

智能化仿真分析就是自动的分析仿真结果而生成报告文件。比如,在励磁系统仿真和装置的试验研究中。首先是数据的获取,将电网中实际运行的励磁系统通过励磁方式、控制方式及发电机 PSS 稳定性进行分类,利用实时监测获取数据,如发电机在不同的出力时,对应的定子电压、电流、转子电流是多大以及相序参数。并且,对发电机在正常运行及受到干扰情况下,通过功角稳定性分析,哪些情况下失稳,哪些情况下稳定。这时所获取的各项数据是相对比较精确的,也就是在一个特定的范围内能保证励磁系统的正常工作,因而形成一个梯度的数据库;接着数据分析,比如在发电机功角稳定性分析中,正常运行能保证系统中的节点电压幅值、频率大小以及功率传输为稳定值;受到扰动时功角发生变化,严重时导致发电机失步等分析结果形成典型的分析文件。并且,对于发电机失稳时,建议应该采取怎样的操作措施也提出在分析报告文件中。因而对各种分析形成分析报告文件库。

这样,在全数字仿真对励磁系统模型进行试验验证时,就可以直接得到模型参数与实际参数的差别,并且通过智能化分析直观地看到分析结果。此外,在电力系统故障的分析与反演等其他研究中,同样建立数据库和分析文件库进行智能化分析。智能化分析结构如图 8 所示。

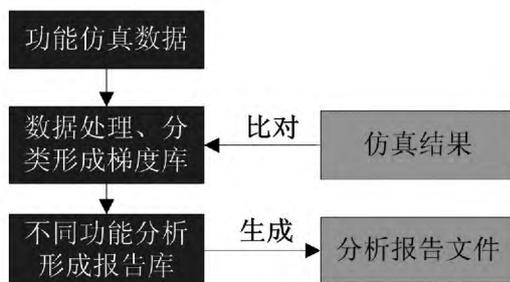


图 8 智能化分析结构

#### (4) 与继电保护故障信息系统的配合

当运行的电网发生故障时,在 SCADA/EMS 平台取得实时数据,全数字仿真系统是进行故障的分析和实现该故障的再现;而继电保护故障信息系统(下面称保信系统)是将数据进行过滤、筛选,智能

分析故障并作出处理决策。发现两者可以依据实时数据进行分析,但处理侧重点不一样,因而形成两个系统在功能上配合的思路。对于实时监测的故障数据,利用全数字仿真系统分析和反演验证后,再进行数据的分类、过滤及筛选,建立保信系统的数据信息;而保信系统在对故障分析处理作出决策后,反过来可利用全数字仿真系统来验证处理决策是否正确,能否恢复电网的正常运行。两者相互配合,对调度人员提供详细分析依据的同时,在电网安全运行及实时监测系统建设中提供子系统,从而有力支撑电网的稳定运行。

此外,还可以建立调度人员培训平台,通过截取数据对负荷预测、厂站监控及模拟真实环境仿真等一系列培训;多直流输电系统的仿真、风光储能系统的建设及负荷模型的搭建方面可以利用全数字仿真系统进行更深的研究。因而不断完善全数字仿真系统的功能建设,有助于提高调度一体化的能力水平。

## 6 结 论

电力系统全数字仿真系统对于电力系统的运行与安全监测发挥着重要作用。仿真系统与故障信息系统、安全评估预警系统以及安全稳定控制测试系统一起共同作用,构建了大电网的运行仿真、实时监测及安全评估等功能。新疆电网全数字仿真系统需要创新提升、完善建设,实现从电网规划到生产运行、科研研发应用服务一体的全数字仿真中心。基于该仿真系统建设的思考,提出了云技术、视景仿真技术、智能化分析及保信系统间的配合等应用的新思路。无论通过什么方式完善全数字仿真系统功能建设,在如今的大电网发展中,都具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 16(17): 66-70.
- [2] 李升健, 于伟城, 黄灿英. 电力系统实时数字仿真技术及其应用综述[J]. 江西电力, 2012, 36(5): 73-76.
- [3] 田芳, 李亚楼, 周孝信. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
- [4] 田芳, 董春晖, 李亚楼, 等. 电力系统运行及安全监控仿真系统的研究与开发[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 80-86.

(下转第 45 页)

难度大,投资较大。

适用性比较:硬接点适合于常规站或者不具备通信能力的视频监控系统;GOOSE 联动方式适用性好,能应用于任何监控系统与视频监控系统;MMS 联动适用于具有 61850 通信能力的视频监控系统;一体化联动方式则适用性较差,对于已经建成的智能站不适用,适合于新建智能站并采用一体化设计的系统。

#### 4 一种组合式智能联动方式应用

根据上述联动方式的比较,考虑到目前智能变电站的发展情况,采用 GOOSE 联动方式是较为灵活、可靠性较高、易实现、投资较少的一种方式,并且适用性广,可适用于任何智能站不同的监控和视频监控系统。为了实现更强的功能,可将智能终端 GOOSE 联动和测控 GOOSE 联动进行组合联动,这样既可以实现断路器和隔离开关位置变位联动(如因保护跳闸等),也可以实现遥控时预先进行摄像头定位,从而实现监控系统和视频监视系统的联动高级应用,目前该种联动方式已在 110 kV 实训智能变电站得到了良好应用,实现了顺控联动(预先定位)、仿真培训变位联动、油位告警联动等功能。

#### 参考文献

- [1] 苏永春,辛建波,龚晓波. 数字化变电站保护与视频系统联动控制方案[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 33-37.
- [2] 徐胜朋,姜利,袁建学. 利用变电站远程视频系统实现安全监控[J]. 电力系统通信, 2008, 29(190): 15-21.
- [3] 黄敏,乐坚浩,王志毅. 220 kV 变电站远程视频监控中心系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 69-71.
- [4] 娄源利,龚晓波,胡敏强,等. 与 GOOSE 通信联动的数字化变电站遥视系统的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 69-71.
- [5] 龚晓波,吴在军,胡敏强,等. 与 GOOSE 联动的数字化变电站遥视系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 94-98.

#### 作者简介:

廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事继电保护方面研究及信息系统方面的研究;

黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护和智能变电站二次系统方面的研究;

吕飞鹏(1968), 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统方面的研究。

(收稿日期: 2014-06-03)

(上接第 14 页)

- [5] 郝晓平. 电力系统实时数字仿真技术及应用发展[J]. 湖北电力, 2009, 33(4): 7-9.
- [6] 叶廷路, 王晓蔚, 高骏. 电力系统全数字仿真装置在河北电网的应用调试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 105-108.
- [7] 柳勇军, 梁旭, 阎勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 39-42.
- [8] Kosterev DN, Taylor CW, Mittelstadt WA. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage[J]. IEEE Trans. Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [9] 张晋华, 刘云, 印永华. 特高压交/直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2008, 31(23): 1-5.
- [10] 杜瑾. 云计算在军事仿真中的应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(25): 6995-6997.
- [11] 田芳, 宋瑞华, 周孝信, 等. 全数字实时仿真装置与直流输电控制保护装置的闭环仿真试验及分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 57-62.
- [12] Tian Fang, Li Yalou, Zhou Xiaoxin, and et al. Research, Development and Application of Advanced Digital Power System Simulator(ADPSS) [C]. The International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, Japan, 2008.

- [13] 刘钟淇. 风力发电系统中的实时数字仿真技术[J]. 风能产业, 2010(3): 46-51.
- [14] 张松树, 陈勇, 李芳, 等. 电力系统运行方式计算协同系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 270-274.
- [15] 赵林, 王丽丽, 刘艳, 等. 电网实时监控可视化技术研究与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 538-543.
- [16] 刘健, 谢旭, 牛四清, 等. 电网调控仿真培训系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 127-131.
- [17] 程斌, 刘峥, 杨林. 基于视景仿真技术的飞行训练过程仿真再现方法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增): 379-382.

#### 作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

樊艳芳(1971), 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

常喜强(1976), 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王衡(1984), 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-14)

# 变电站视频质量诊断系统的应用研究

朱元全<sup>1</sup>, 王印松<sup>1</sup>, 常政威<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 随着变电站视频监控系统覆盖面的不断扩大, 如果仅靠人工逐个排查摄像头的工作状态是否正常, 工作量巨大耗时且实时性、可靠性无法保证。视频质量诊断系统为这一难题提供了一个较好的解决途径。视频质量诊断系统不仅可以减少运维人员的劳动量, 而且对已诊断出故障的监控点给出合理的维修建议。首先对视频质量诊断系统作了简要介绍, 然后对国网四川省电力公司使用的视频质量诊断系统的应用做了较为详细的分析, 并针对系统应用的结果给变电站运维人员提供启迪和建议。

**关键词:** 变电站视频监控; 质量诊断系统; 监控点; 系统应用

**Abstract:** With the expanding coverage of video surveillance system in substations, it is a heavy and time-consuming work for the staff to check the working condition artificially of all the cameras one by one. Besides, the real time and reliability cannot be guaranteed. A good solution for this problem has been offered by using video quality diagnostic system. Video quality diagnostic system can only reduce the labor of the operation and maintenance staff, but also give the reasonable maintenance advice for the fault monitoring points which have been diagnosed. Firstly a brief introduction about video quality diagnostic system is given. Then a more detailed analysis is made for the application of video quality diagnostic system used by Sichuan Electric Power Company. The enlightenment and suggestions are given to the operation and maintenance staff in substations aiming at the results of system applications.

**Key words:** substation video surveillance; quality diagnostic system; monitoring point; system application

中图分类号: TM763 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0015-04

## 0 引言

变电站的无人值守是电网运行发展的必然趋势<sup>[1]</sup>, 导致对变电站远程监控的要求越来越高。由于变电站运行环境复杂多变以及摄像头长时间运行损耗导致监控画面故障时有发生。然而, 随着变电站运维要求的不断提高以及视频监控点的覆盖面越来越大, 仅靠监控中心工作人员自身对视频监控画面逐个排查的传统视频监控模式不仅加大运维人员的劳动强度, 而且它还是低效、滞后、不可靠的运维模式<sup>[2]</sup>。

视频质量诊断系统为此提供了一个较好的解决方案, 它采用视频图像分析的方法来检测监控系统中存在的各种视频常见故障并且能按照诊断预案对摄像机、存储系统进行自动检测, 并记录所有的检测结果<sup>[3]</sup>。诊断系统采用轮巡的方式, 可以在短时间

基金项目: 国网四川省电力公司 2014 年科技项目

内对大量的前端设备进行检测。目前不同的企业和科研院所对视频质量诊断系统做了深入的研究并将其应用在日常的监控工作中, 这大大降低了监控人员的负担, 提高了监控的质量。同样地, 国网四川省电力公司对其辖属变电站应用了视频质量诊断系统, 为快速发现视频信号故障、保障系统可用能用发挥了巨大的作用。

首先简述了变电站使用视频质量诊断系统的必要性, 对视频质量诊断系统的结构和功能作了简要介绍, 最后重点分析国网四川省电力公司使用的视频质量诊断系统的应用情况。

## 1 视频质量诊断系统结构及其拓扑图

视频质量诊断系统是一套图像质量分析、诊断与预警系统, 通过对前端设备传回的码流进行解码以及图像质量评估, 对视频图像中存在的质量问题进行判断和告警, 并记录检测结果<sup>[4]</sup>。

视频质量诊断系统的拓扑图组成如图 1 所示,质量诊断服务器从前端编码设备取流,是一种无损伤检测,它的接入不需要改变已经组建好的监控网络以及系统。

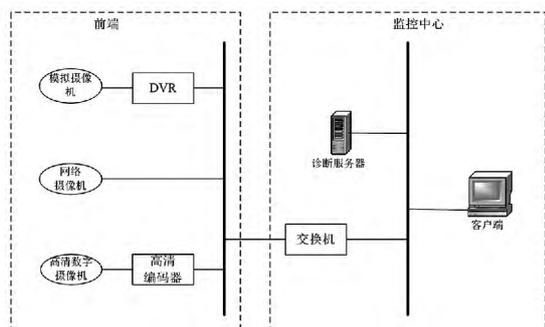


图 1 视频质量诊断拓扑图组成

## 2 视频质量诊断系统检测的故障类型

国网四川省电力公司使用的诊断系统能够检测出多种视频故障,对目前已诊断出的故障类型会附上相应的诊断图片以及维修建议。

(1) 信号丢失: 诊断由于前端设备损坏或者传输环节故障引起的信号丢失现象,包括黑屏、白屏、叠加文字屏等。系统诊断为信号丢失的诊断图片如图 2(a) 所示。系统给出的维修建议是检查摄像机是否工作,模拟传输线是否接触良好。

(2) 图像模糊: 诊断由于聚焦不准引起图像物体边缘不清晰的情况。系统诊断为图像模糊的诊断图片如图 2(b) 所示。系统给出的维修建议是检查镜头调焦控制是否正常,确定摄像机架设位置是否合适。

(3) 对比度: 诊断由于摄像机镜头蒙上灰尘、水汽、人为遮挡、或者内部故障,造成图像的对比度低而“发蒙”的情况。系统诊断为对比度异常的诊断图片如图 2(c) 所示。系统给出的维修建议是确定是否因为恶劣天气原因,确定摄像机架设位置是否合适,检测镜头是否干净。

(4) 图像过亮/暗: 诊断由于摄像机增益异常、曝光不当、强光照射等各种原因引起画面过亮/暗。系统诊断为图像过暗的诊断图片如图 2(d) 所示。系统给出的维修建议是确认是否为光线问题,检查摄像机是否正常曝光。

(5) 图像偏色: 诊断由于色彩平衡出现故障、视

频线路接触不良、信号干扰等原因造成的视频画面发生色偏,甚至某种颜色缺失的故障。系统诊断为图像偏色的诊断图片如图 2(e) 所示。系统给出的维修建议是检查传输线是否正常接插,检查摄像机是否能输出正常图像。

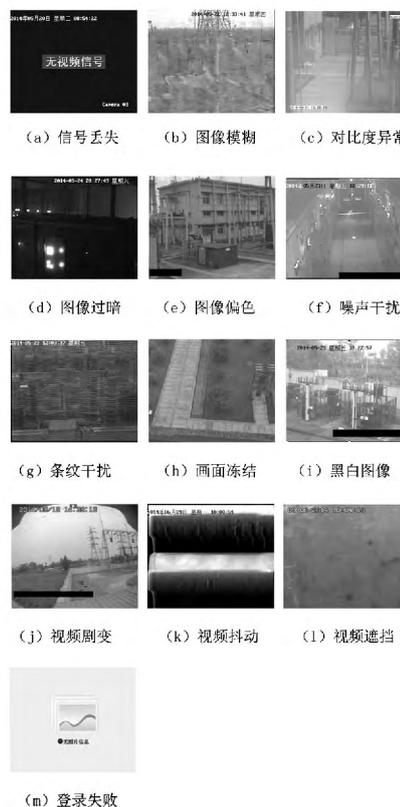


图 2 故障类型的诊断图片

(6) 噪声干扰: 诊断由于视频信号干扰、线路接触不良、光照不足等引起的点状、尖刺等图像质量故障。系统诊断为噪声干扰的诊断图片如图 2(f) 所示。系统给出的维修建议是确定是否光线太暗。

(7) 条纹干扰: 诊断由于线路老化、接触不良、线路干扰(工频、音频、高频信号)导致的横条、波纹等带状、网状等噪声故障。系统诊断为条纹干扰的诊断图片如图 2(g) 所示。系统给出的维修建议是确定设备接地问题。

(8) 画面冻结: 诊断由于传输系统异常导致的画面冻结的故障,一般表现为画面静止不动,包括时标 OSD 部分不动。系统诊断为画面冻结的诊断图片如图 2(h) 所示。系统给出的维修建议是拍摄画面是否固定不变。

(9) 黑白图像: 诊断由于摄像机日夜功能模式切换异常、图像信号强度弱等原因造成的图像颜色

为黑白的异常情况。系统诊断为黑白图像的诊断图片如图 2(i) 所示。系统给出的维修建议是摄像机是否配置为红外模式、黑白模式。

(10) 视频剧变: 诊断摄像机视频信号异常或受到干扰导致视频图像剧烈变化的故障, 一般表现为画面不停闪烁、跳变、画面扭曲等。系统诊断为视频剧变的诊断图片如图 2(j) 所示。系统给出的维修建议是检测设备旁边是否有干扰源, 确定设备接触良好, 检测摄像机曝光是否正常。

(11) 视频抖动: 诊断摄像机信号受到干扰或者摄像机安装不牢固导致图像不停抖动的故障。系统诊断为视频抖动的诊断图片如图 2(k) 所示。系统给出的维修建议是确定摄像头是否安装牢固。

(12) 场景变更: 诊断摄像机因为人为或环境原因导致摄像头被偏转、摄像头被遮挡、摄像机的角度或位置发生变化而导致的场景变更的情况。

(13) 视频遮挡: 诊断监控点视频镜头被全部遮挡出现的异常情况, 通常表现为画面黑暗、对比度低。系统诊断为视频遮挡的诊断图片如图 2(l) 所示。系统给出的维修建议是确定摄像机镜头是否被物体遮牢。

(14) 云台失控: 诊断由于球机年久失修、云台转动失效等的检测。

(15) 登陆失败: 诊断由于摄像机网络原因或用户名密码端口等错误造成登录摄像机失败的情况。系统诊断为登录失败的截取图片如图 2(m) 所示。系统给出的维修建议是检查网络、码流是否正常。

(16) 取流异常: 诊断由于摄像机网络原因或前端监控点异常等导致无法从摄像机上取到视频流的异常情况。其诊断图片与登陆失败相同, 如图 2(m) 所示。系统给出的维修建议是检查网络是否正常。

### 3 视频质量诊断系统的应用分析

#### 3.1 一个具体的诊断结果分析

视频质量诊断系统对于一个具体的已完成的诊断任务, 运维人员可以单击“查看详情”来查看其诊断详情, 以图 3 为例。

依次单击右上方的“基本信息”、“诊断结果”和“诊断项目”可以查看详细的诊断结果。以上面捕捉到的画面为例, 其“基本信息”、“诊断结果”和“诊断项目”分别如图 4 所示。



图 3 诊断结果



图 4 诊断结果详情

基本信息中给出了相对应的网络摄像机的监控点名称、IP 地址、端口号、通道号、设备类型、供应厂商以及监控区域等信息; 诊断结果中给出了相对应的网络摄像机的状态、诊断时间、详情(即诊断结果)、维修建议等; 诊断项目中给出了相对应的网络摄像机进行诊断时对于以上的 17 种故障类型的各自状态以及得分。这个诊断系统有报警阈值模板, 工作人员可根据截取的诊断图片和诊断结果进行灵活地调整, 让其更好地适应变电站这一特殊的运行环境。在当前的阈值模板下, 图 3 的诊断结果为条纹干扰, 给出的维修建议是确定设备接地问题。

#### 3.2 一段时间内诊断任务的统计分析

下面是从 2013 年 6 月开始使用到 2014 年 2 月 28 日期间诊断系统的应用结果统计分析, 如图 5 所示。

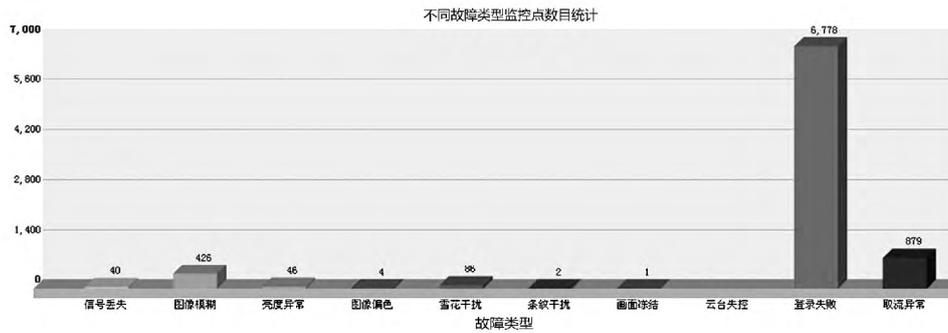


图 5 2013 年 6 月 1 日至 2014 年 2 月 28 日的  
统计分析柱状图

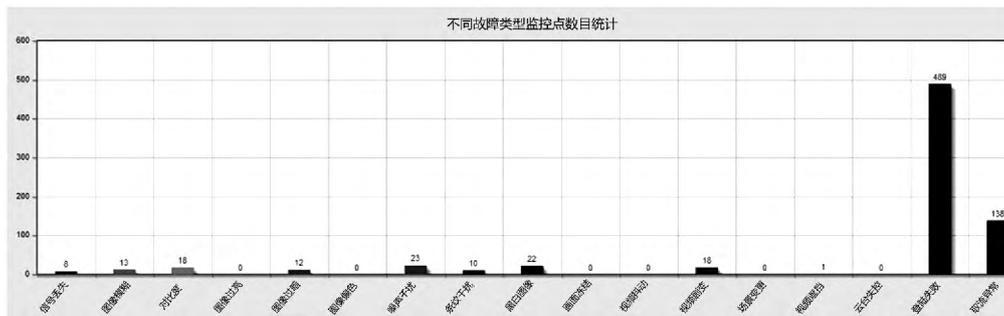


图 6 2014 年 4 月 23 日至 2014 年 5 月 23 日的  
统计分析柱状图

可以看出:除登录失败和取流异常(图 5 中的最后两个统计项,由于网络等原因不能正常进行诊断的情况)外,图像模糊占其余故障类型的 70% 以上;雪花干扰、亮度异常、信号丢失等异常类型逐次递减。这说明由聚焦不准引起的图像模糊是变电站众多监控点经常发生的故障,需要引起变电站运维人员的特别注意。

为了更好地服务于变电站日常监控工作,对诊断系统进行了一些优化。接下来是系统优化后,从 2014 年 4 月 23 日至 2014 年 5 月 23 日这一个月期间诊断系统应用结果的统计分析,如图 6 所示。

可以看出:系统升级更新后,首先,故障类型的分类有了变化:雪花干扰改名为噪声干扰;亮度异常分为亮度过亮、亮度过暗两项指标;新增对比度、黑白图像、视频抖动、视频剧变、场景变更、视频遮挡等 6 个诊断指标。其次,从 2014 年 4 月 23 日至 2014 年 5 月 23 日这一个月月的诊断结果来看,除由摄像机网络等原因引起的登录失败和取流异常外,信号丢失、图像模糊、对比度、图像过暗、噪声干扰、条纹干扰、黑白图像、视频剧变等诊断结果均有出现,即被诊断出的异常故障类型呈多元化趋势。这说明诊断系统更新升级以后,可以更好地适应变电站复杂多

变的运行环境。与以前的诊断系统相比,能更好地为使用该诊断系统的工作人员提供变电站内各监控点的工作状况,为检修和维护工作提供良好的依据。

另外,诊断结果本身可能是多种故障类型的叠加,如图 7 所示。



(a) 对比度 + 图像过暗 + 噪声干扰 (b) 黑白图像 + 噪声干扰

图 7 诊断结果为多种故障类型的叠加

这说明可能有多种故障导致了上述情况的发生,运维人员需要对引起故障的原因进行逐一排查。

## 4 结 论

变电站采用视频质量诊断系统将运维人员从繁重的工作负担中解脱出来,提高变电站作业效率。然而,如何减少诊断的误诊率成为开发人员和系统检测人员面临的重要问题。目前开展的工作是希望通过模拟多种视频故障从而对诊断系统进行有效地检测。

(下转第 23 页)

表 11 铁塔不均匀覆冰要求的最小地线支架高

脱冰率 /%	冰区 /m	脱冰跳跃接近方式	直线塔地线支架高/m	耐张塔地线支架高 /m	耐张塔、直线塔平均地线支架高度 /m
70%		静态	≥ -2.8	≥5.6	≥3.6
		动态	≥1.6	-	≥7.8
80%	20	静态	≥ -0.5	≥5.8	≥5.2
		动态	≥5.7	-	≥11.3
100%		静态	≥5	≥6.1	≥10.1
		动态	≥14.9	-	≥19.7

注: 上表中导线间水平位移 ΔS = 0。

### 5 小 结

综上所述, 15 mm 冰区导线不均匀覆冰导线地线动、静态接近间距的要求对杆塔布置不起控制作用。20 mm 冰区导线地线动、静态接近要求的最小地线支架高度汇总于表 11。从表 11 中可以看出无论是孤立档、连续档第 1 档、连续档中间档脱冰后要求的地线支架高均随着脱冰率的增加而增加, 脱冰率的选择对地线支架高的选择影响较大, 《1 000 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50665 - 2011) 并未对重覆冰区校核导线地线动静接近时的脱冰率做出明确规定, 参考《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440 - 2009) 对重覆冰线路脱冰率的规定“330 kV 及以上重冰区线路可选不小于设计冰重的 80%, 中冰区线路可选不小于设计冰重的 70%”, 并结合已建 500 kV、750 kV、±800 kV 交直流线路设计运行经验, 南方地区覆冰类型主要为雨淞覆冰, 雨淞附着力强, 发生整档完全脱冰的概率极低, 因此校核导线地线动静接近时 20 mm 中冰区按 70% 脱冰率考虑取值, 重冰区按 80% 脱冰率考虑取值<sup>[4-5]</sup>。

表 11 中数据亦反应出导线脱冰动态接近对地线支架高度影响更大。脱冰率 80% 条件下, 20 mm 重冰区直线塔地线支架高度 ≥5.7 m, 耐张塔地线支架高 ≥11.3 m (配合的直线塔支架高 5.7 m) 时, 可满足导线地线动态接近的间距要求。

(上接第 18 页)

#### 参考文献

[1] 吕瑞明. 变电站智能视频监控系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[2] 高杨. 视频质量诊断算法研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

[3] 任和, 陈兆俊. 基于视频分析的视频质量检测系统实现[J]. 中国铁路, 2013(7): 85 - 87.

[4] 方芳. 基于智能监控系统的视频图像质量检测的研究

综上所述, 结合国内外以及西南电力设计院多年重冰区设计、运行经验, 特高压交流线路工程的导线不均匀覆冰动静接近的工况下, 15 mm、20 mm 冰区地线支架设计可以不考虑导线地线间的水平位移。

#### 参考文献

[1] 赵彪, 孙河, 刘姜玲. 特高压交流试验示范工程的经济性[J]. 电力建设, 2009, 30(11): 24 - 26.

[2] Huang D C, Shu Y B, Ruan J J, et al. Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555 - 583.

[3] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16 - 18.

[4] Q/DG 1 - A010 - 2008. 1 000 kV 交流架空输电线路设计技术导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[5] DL/T 5440 - 2009. 重冰区架空输电线路设计技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家能源局, 2009.

#### 作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

李澄宇(1963), 本科, 高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

李 力(1963), 本科, 教授级高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

梁 明(1973), 本科, 高级工程师, 从事输电线路技术设计工作。

(收稿日期: 2014 - 05 - 29)

与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

#### 作者简介:

朱元全(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为变电站视频质量诊断相关技术研究;

王印松(1967), 博士, 教授, 主要研究方向为先进控制策略及其在电力系统中的应用、清洁能源发电控制技术;

常政威(1981), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网技术研究。

(收稿日期: 2014 - 06 - 24)

# 特高压交流输电线路重覆冰区 地线支架设计研究分析

周 唯 李澄宇 李 力 梁 明  
(西南电力设计院 四川 成都 610021)

**摘 要:** 根据重覆冰地区线路工程的设计经验和数据分析,对正在设计的特高压交流输电线路重覆冰区脱冰跳跃特性进行了研究。分析了不同档距、不均匀覆冰时的导地线静态和动态的接近情况,提出了特高压交流输电线路重覆冰区导地线的脱冰跳跃分析结论及重覆冰区杆塔地线支架布置要求,为后续工程设计提供参考。

**关键词:** 特高压; 交流输电线路; 重覆冰区; 数据分析

**Abstract:** Based on the design experiences and data analysis of transmission line projects in heavy icing area, the ice-shedding characteristics on UHV AC transmission lines which are in design now in heavy ice area are studied. According to the analysis of static and dynamic distance in ice-shedding jump of conductor lines, the analysis conclusion of ice-shedding characteristics on UHV AC transmission lines is proposed as well as the arrangement requirements for ground wire support of pole and tower in heavy icing area, which provides a valuable reference for the design of follow-up projects.

**Key words:** ultra high voltage (UHV); AC transmission lines; heavy icing area; data analysis

中图分类号: TM752 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0019-05

## 0 引 言

中国资源分布集中在西南、西北区域,远离东部经济能源中心。采用特高压交流输电技术,能实现远距离、大容量的电能传输。为缓解中国负荷中心和发电能源分布不均衡、输电容量日益提高和线路走廊日趋紧张的问题,中国需大力发展特高压交直流输电<sup>[1-2]</sup>。中国 1 000 kV 交流输电试验示范工程已建成投运,同时拟建多个特高压交流输变电工程。“十二五”期间,国家电网公司规划投资 5 000 亿元,将建设特高压输电线路 40 000 km、变电(换流)容量 430 GVA,到 2015 年建成“三纵三横”特高压交流骨干网架和 11 回特高压直流输电工程,形成大规模“西电东送”、“北电南送”的能源配置格局<sup>[3]</sup>。这里将研究特高压交流输电线路重覆冰区导地线的脱冰跳跃特性及对地线布置的影响,并根据数据分析结果,为重冰区杆塔的地线支架设计提供参考,从而提高重冰区杆塔的安全运行可靠性。

## 1 重覆冰区导地线型号

目前中国拟建和在建特高压交流输电线路工程

重覆冰区主要为 20 mm 冰区,导线选用 8 分裂 JL/G1A-630/55 钢芯铝绞线,分裂距离为 400 mm。地线选用 JLB20A-240 铝包钢绞线。

表 1 导地线主要技术参数

项目	导线	地线
导线型号	JL/G1A-630/55	JLB20A-240
钢截面积/mm <sup>2</sup>	56.31	179.07
铝截面积/mm <sup>2</sup>	639.92	59.69
总截面/mm <sup>2</sup>	696.22	238.76
铝钢截面比	11.36	0.33
外径/mm	34.30	20
单位质量/(kg·km <sup>-1</sup> )	2 206.4	1 595.5
计算拉断力/kN	1 64.310	260.01
20℃ 直流电阻/ (Ω·km <sup>-1</sup> )	0.0452	0.3601
弹性模量/ (N·mm <sup>-2</sup> )	65 000	147 200
温度系数/(1 <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	20.5 × 10 <sup>-6</sup>	13.0 × 10 <sup>-6</sup>

## 2 重覆冰区导地线的接近闪络及解决方法

从已有重覆冰线路地区的长期运行经验可知,

导地线的接近闪络主要有以下原因: 地线因覆冰或脱冰不均匀而产生较大的不平衡张力, 因地线线夹握力不足造成地线滑移, 弧垂增大, 从而造成导地线在档距中央静态接近闪络; 导线较地线先期脱冰, 相导线升高, 造成导地线在档距中央静态接近闪络; 在融冰阶段, 导线上冰凌突然脱落引起其跳跃, 造成导地线在档距中央动态接近闪络。

对于第 1 种情况, 可采用强握力的地线线夹或双线夹予以解决。对于后两种情况, 则需研究导地线水平位移及地线支架高度的合理取值, 以保证重覆冰地区线路脱冰状况下导地线之间的必要间隙。

### 3 不均匀覆冰时导地线档中的静态接近

线路不均匀覆冰时, 不同档距的组合是影响档

距中导地线不均匀覆冰静态接近的一个重要因素, 参照超高压重冰线路设计经验及单回路特高压交流线路工程的杆塔排位情况, 采用连续 7 档中间档脱冰的组合计算方法, 对直线塔进行计算分析。耐张塔按孤立档脱冰、连续档第 1 档脱冰两种情况进行计算分析。

#### 3.1 导地线不均匀覆冰档中静态接近的计算

特高压交流线路工程的重覆冰区段线路海拔均在 1 800 m 以下, 导线不均匀覆冰时, 档距中导地线静态接近需要满足的中心间距 7.25 m, 即操作过电压间隙值 6.7 m + 分裂导线组合半径 0.55 m。按连续 7 档杆塔中间档脱冰模型, 模拟计算出在不均匀覆冰情况下为保证导地线间静态接近的间隙要求, 及在不同脱冰率下的塔上最小垂直间距  $S_V$ 。

表 2 不均匀覆冰时直线塔上要求的最小垂直间距

项目	考虑风偏垂直线间距离 / m	未考虑风偏垂直线间距离 / m					
		脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%	脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%
档距 / m	操作间隙 $S_2$ / m						
200	7.25	-3.52	-3.16	-2.61	-3.47	-3.19	-2.62
400	7.25	-2.16	-1.09	1.25	-2.21	-1.16	1.14
500	7.25	-2.23	-0.48	3.29	-2.19	-0.59	3.11
600	7.25	-2.62	-0.23	5.26	-2.68	-0.36	4.99
700	7.25	-4.89	-1.88	5.29	-4.96	-1.99	4.96
800	7.25	-8.86	-5.53	2.68	-8.89	-5.61	2.35

表 3 不均匀覆冰时要求耐张塔的最小垂直间距

项目	考虑风偏垂直线间距离 / m	未考虑风偏垂直线间距离 / m					
		脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%	脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%
档距 / m	操作间隙 $S_2$ / m						
200	7.25	7.11	7.19	7.59	7.12	7.19	7.59
300	7.25	5.89	6.08	6.39	5.89	6.11	6.39
400	7.25	4.08	4.29	4.56	4.11	4.31	4.59
500	7.25	1.69	1.89	2.16	1.69	1.89	2.19
600	7.25	-1.33	-1.24	-0.82	-1.35	-1.29	-0.88
700	7.25	-4.84	-4.65	-4.36	-4.92	-4.73	-4.39

表 4 不均匀覆冰时要求耐张塔 - 直线塔上的最小平均垂直间距

项目	考虑风偏垂直线间距离 / m	未考虑风偏垂直线间距离 / m					
		脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%	脱冰率 70%	脱冰率 80%	脱冰率 100%
档距 / m	操作间隙 $S_2$ / m						
400	7.25	3.73	4.65	6.85	3.69	4.59	6.72
500	7.25	3.89	5.46	8.85	3.88	5.35	8.65
600	7.25	3.38	5.55	10.45	3.39	5.45	10.26
700	7.25	1.51	4.45	10.35	1.48	4.09	10.11
800	7.25	-2.14	0.68	7.68	-2.14	0.65	7.52

在不考虑导线和地线的水平偏移影响的情况下,分析计算出导地线不均匀覆冰档中静态接近要求的塔上最小垂直间距  $S_V$  的变化规律:对于孤立档的  $S_V$ ;随着档距的增加,  $S_V$  要求值逐步减小;相同档距下,  $S_V$  要求值随着脱冰率的增加而增加。对于连续档的  $S_V$ ;随着档距的增加,  $S_V$  要求值先增大后减小;相同档距下,  $S_V$  要求值随着脱冰率的增加而增加。

结合拟建的特高压交流线路的重冰区杆塔规划及排位情况,考虑最大档距 600 m,最小孤立档 300 m,70%、80%、100%脱冰率的条件下,导地线不均匀覆冰静态接近时,对塔上地线支架高的要求值见表5,确定重冰区杆塔地线支架高度时需同时满足表5要求值。

表5 不均匀覆冰静态接近对地线支架高的要求值

脱冰率 /%	直线塔地线 支架高/m	耐张塔地线 支架高/m	耐张塔、直线 塔平均地线 支架高度 /m
70	$\geq -2.5$	$\geq 5.9$	$\geq 3.9$
80	$\geq -0.2$	$\geq 6.1$	$\geq 5.6$
100	$\geq 5.3$	$\geq 6.4$	$\geq 10.5$

### 3.2 水平位移 $\Delta S$ 对导地线间最小垂直间距 $S_V$ 的影响

杆塔规划时由于防雷保护角的要求及导线动态脱冰的间距要求,导地线间往往需考虑一定的水平位移,在导地线不均匀覆冰静态接近时计入  $\Delta S$  水平位移因素,有利于更合理的选择地线支架高度。

20 mm 重冰区孤立档档距 300 m,连续档档距 600 m,脱冰 80% 时最小垂直间距  $S_V$  与水平位移  $\Delta S$  的关系如图1。

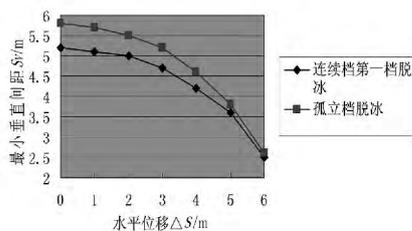


图1 20 mm 冰区水平位移  $\Delta S$  与导地线间最小垂直间距  $S_V$  的关系

由图1可以看出随水平位移  $\Delta S$  的增大,导地线间最小垂直间距呈加速递减的趋势,在水平位移  $\Delta S$  小于 4 m 时,最小垂直间距  $S_V$  变化并不明显。

## 4 不均匀覆冰时导地线脱冰跳跃档距中的动态接近

### 4.1 脱冰动力响应数值模拟方法

为准确掌握 1 000 kV 交流特高压送电线路重覆冰区导地线脱冰后的动力响应问题。通过采用有限元软件建立典型耐张段输电线路覆冰及脱冰的有限元计算模型,计算模拟几种典型耐张段线路在不同脱冰工况下导地线的动力响应。

表6 孤立档、连续档脱冰跳跃高度比较表

档距 /m	耐张段	脱冰率			
		50%	60%	80%	100%
500	孤立档	1.52	1.94	2.95	4.72
	连续档	10.41	13.04	18.9	25.43
600	孤立档	1.43	1.71	2.66	4.37
	连续档	13.96	17.53	25.71	35.44
700	孤立档	1.47	1.85	2.88	4.22
	连续档	15.57	19.66	29.27	41.39

表7 孤立档、连续档横向摆动幅值比较表

档距 /m	脱冰率 /%	脱冰后最大摆幅 /m	
		孤立档	连续档
500	50	0.53	0.58
	60	0.62	0.76
	80	0.73	1.25
600	100	0.59	2.22
	50	0.84	0.65
	60	0.98	0.89
700	80	1.16	1.53
	100	0.47	2.98
	50	1.15	0.58
700	60	1.33	0.83
	80	1.57	1.56
	100	0.41	3.41

注: 风速  $V = 10$  m/s。

通过模拟计算分析,孤立档的脱冰跳跃高度远远小于连续档,横向摆动幅值在脱冰率较大的情况下小于或接近于连续档。因此,不均匀覆冰时导线脱冰跳跃档距中的动态接近计算可不考虑孤立档的计算。

### 4.2 不均匀覆冰时导地线脱冰跳跃档距中的动态接近计算

目前特高压交流输电线路的重覆冰区段海拔高度均在 1 800 m 以下,导线不均匀覆冰时,档距中导地线动态接近需要满足的中心间距为 3.85 m(工频电压间隙值 3.3 m + 分裂导线组合半径 0.55 m)。

表 8 不均匀覆冰时直线塔上要求的最小垂直间距

档距 /m	工频间隙 S <sub>1</sub> /m	横向摆动幅值 B/m			脱冰跳跃高度 H/m			最小垂直间距 S <sub>v</sub> /m		
		脱冰率/%			脱冰率/%			脱冰率/%		
		70	80	100	70	80	100	70	80	100
200	3.85	0.33	0.38	0.49	2.79	3.29	4.26	-5.90	-5.50	-4.50
400	3.85	0.99	1.19	1.75	10.50	12.50	16.20	-1.50	0.47	4.28
500	3.85	1.29	1.65	2.56	14.90	17.80	24.00	0.52	3.29	9.56
600	3.85	1.48	1.99	3.42	19.10	23.10	32.30	1.66	5.76	14.90
700	3.85	1.53	2.13	3.92	21.60	26.80	38.80	0.38	5.53	17.60
800	3.85	1.14	1.76	3.98	21.70	27.50	41.30	-3.60	2.13	15.90

表 9 不均匀覆冰时要求耐张塔 - 直线塔上的最小平均垂直间距

档距 /m	工频间隙 S <sub>1</sub> /m	横向摆动幅值 B/m			脱冰跳跃高度 H/m			最小垂直间距 S <sub>v</sub> /m		
		脱冰率/%			脱冰率/%			脱冰率/%		
		70	80	100	70	80	100	70	80	100
400	3.85	0.96	1.13	1.69	10.80	12.30	16.10	4.49	6.05	9.78
500	3.85	1.28	1.58	2.42	15.20	17.80	23.60	6.53	9.09	14.90
600	3.85	1.49	1.89	3.16	19.50	23.20	31.40	7.79	11.40	19.70
700	3.85	1.38	1.92	3.53	22.20	26.70	37.30	6.99	11.50	22.10
800	3.85	0.99	1.43	3.41	23.30	27.80	39.70	3.93	8.60	20.40

按 7 档连续档模型中间档脱冰, 计算出不同脱冰率、档距组合下的导线跳跃高度、横向摆幅、塔上最小垂直间距 S<sub>v</sub>。

在不考虑导线和地线的水平偏移影响的情况下, 导地线不均匀覆冰档中动态接近要求的塔上最小垂直间距 S<sub>v</sub> 的变化规律: 导线脱冰跳跃高度、横向摆动幅值随着档距的增加而增加, S<sub>v</sub> 要求值先增大后减小; 相同档距下, S<sub>v</sub> 要求值随着脱冰率的增加而增加。

结合拟建的特高压交流线路的重冰区杆塔规划及排位情况, 考虑最大档距 600 m, 最小孤立档 300 m, 70%、80%、100% 脱冰率的条件下, 导地线不均匀覆冰动态接近时, 对塔上地线支架高的要求值见表 10。

表 10 不均匀覆冰动态接近对地线支架高的要求值

脱冰率 /%	直线塔地线 支架高/m	耐张塔地线 支架高/m	耐张塔、直线 塔平均地线支 架高度/m
70%	≥1.6	-	≥7.8
80%	≥5.7	-	≥11.3
100%	≥14.9	-	≥19.7

#### 4.3 动态脱冰情况水平位移 ΔS 对导地线间最小垂直间距 S<sub>v</sub> 的影响

杆塔规划时由于防雷保护角的要求及导线动态脱冰的间距要求, 导地线间往往需考虑一定的水平位移, 在导地线不均匀覆冰动态接近时计入 ΔS 水平位移因素, 有利于更合理的选择地线支架高度。

20 mm 重冰区, 连续档档距 600 m, 脱冰 80% 时最小垂直间距 S<sub>v</sub> 与水平位移 ΔS 的关系如图 2 所示。

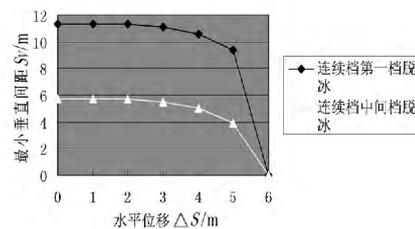


图 2 20 mm 冰区水平位移 ΔS 与导地线间最小垂直间距 S<sub>v</sub> 的关系

由图 2 可以看出随水平位移 ΔS 的增大, 导地线间最小垂直间距呈加速递减的趋势; 在水平位移 ΔS 小于 2 m 时, 由于导线脱冰横向摆动的影响, 最小垂直间距 S<sub>v</sub> 并未减小; ΔS 在 2~4 m 区间, S<sub>v</sub> 数值变化不明显; 当 ΔS 取 6 m 时, 此时距离已大于工频电压间隙、横向摆幅、导线组合半径之和, 因此理论上地线支架高度可以取 0。

表 11 铁塔不均匀覆冰要求的最小地线支架高

脱冰率 /%	冰区 /m	脱冰跳跃接近方式	直线塔地线支架高/m	耐张塔地线支架高 /m	耐张塔、直线塔平均地线支架高度 /m
70%		静态	$\geq -2.8$	$\geq 5.6$	$\geq 3.6$
		动态	$\geq 1.6$	-	$\geq 7.8$
80%	20	静态	$\geq -0.5$	$\geq 5.8$	$\geq 5.2$
		动态	$\geq 5.7$	-	$\geq 11.3$
100%		静态	$\geq 5$	$\geq 6.1$	$\geq 10.1$
		动态	$\geq 14.9$	-	$\geq 19.7$

注: 上表中导线间水平位移  $\Delta S = 0$ 。

## 5 小 结

综上所述, 15 mm 冰区导线不均匀覆冰导线地线动、静态接近间距的要求对杆塔布置不起控制作用。20 mm 冰区导线地线动、静态接近要求的最小地线支架高度汇总于表 11。从表 11 中可以看出无论是孤立档、连续档第 1 档、连续档中间档脱冰后要求的地线支架高均随着脱冰率的增加而增加, 脱冰率的选择对地线支架高的选择影响较大, 《1 000 kV 架空输电线路设计规范》(GB 50665-2011) 并未对重覆冰区校核导线地线动静接近时的脱冰率做出明确规定, 参考《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440-2009) 对重覆冰线路脱冰率的规定“330 kV 及以上重冰区线路可选不小于设计冰重的 80%, 中冰区线路可选不小于设计冰重的 70%”, 并结合已建 500 kV、750 kV、±800 kV 交直流线路设计运行经验, 南方地区覆冰类型主要为雨淞覆冰, 雨淞附着力强, 发生整档完全脱冰的概率极低, 因此校核导线地线动静接近时 20 mm 中冰区按 70% 脱冰率考虑取值, 重冰区按 80% 脱冰率考虑取值<sup>[4-5]</sup>。

表 11 中数据亦反应出导线脱冰动态接近对地线支架高度影响更大。脱冰率 80% 条件下, 20 mm 重冰区直线塔地线支架高度  $\geq 5.7$  m, 耐张塔地线支架高  $\geq 11.3$  m (配合的直线塔支架高 5.7 m) 时, 可满足导线地线动态接近的间距要求。

(上接第 18 页)

### 参考文献

- [1] 吕瑞明. 变电站智能视频监控系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [2] 高杨. 视频质量诊断算法研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [3] 任和, 陈兆俊. 基于视频分析的视频质量检测系统实现[J]. 中国铁路, 2013(7): 85-87.
- [4] 方芳. 基于智能监控系统的视频图像质量检测的研究

综上所述, 结合国内外以及西南电力设计院多年重冰区设计、运行经验, 特高压交流线路工程的导线不均匀覆冰动静接近的工况下, 15 mm、20 mm 冰区地线支架设计可以不考虑导线地线间的水平位移。

### 参考文献

- [1] 赵彪, 孙河, 刘姜玲. 特高压交流试验示范工程的经济性[J]. 电力建设, 2009, 30(11): 24-26.
- [2] Huang D C, Shu Y B, Ruan J J, et al. Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555-583.
- [3] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18.
- [4] Q/DG 1-A010-2008. 1 000 kV 交流架空输电线路设计技术导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [5] DL/T 5440-2009. 重冰区架空输电线路设计技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家能源局, 2009.

### 作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

李澄宇(1963), 本科, 高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

李 力(1963), 本科, 教授级高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

梁 明(1973), 本科, 高级工程师, 从事输电线路技术设计工作。

(收稿日期: 2014-05-29)

与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

### 作者简介:

朱元全(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为变电站视频质量诊断相关技术研究;

王印松(1967), 博士, 教授, 主要研究方向为先进控制策略及其在电力系统中的应用、清洁能源发电控制技术;

常政威(1981), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网技术研究。

(收稿日期: 2014-06-24)

# 某 500 kV 变电站直流融冰装置 35 kV 管母故障分析

郭 飞<sup>1</sup>, 邓元实<sup>2</sup>, 刘益岑<sup>2</sup>, 蓝彬桓<sup>2,3</sup>

(1. 国网四川省电力公司都江堰市供电分公司, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 3. 重庆大学, 重庆 400044)

**摘 要:** 某 500 kV 变电站装设的直流融冰装置在 2014 年融冰时发生 35 kV 交流侧管母及绝缘烧毁事故, 事后相关部门对故障装置进行了细致的交流耐压试验, 通过结合试验现象、数据以及相关电路模型, 确定了故障产生的原因主要是管母铜带缠绕方式存在隐患, 并提出了相应的改进措施。此案例对中国其他类似的直流融冰装置故障分析具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 融冰装置; 35 kV 管母; 交流耐压试验; 故障分析

**Abstract:** The pipe type busbar and insulation of DC de-icer installed in 35 kV AC sides were burned down during the ice melting in 2014 in a 500 kV substation. After the accident, plenty of AC voltage withstand tests are carried out by the relevant departments. Through combining the experimental phenomena, test data and the related circuit model, it is determined that the fault is mainly caused by the defects among the winding way of copper strips and some corresponding improvement measures are put forward, which is of significance for the fault analysis of other similar DC de-icer in China.

**Key words:** de-icing equipment; 35 kV pipe type busbar; AC withstand voltage test; fault analysis

中图分类号: TM855 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)05-0024-03

## 0 引 言

覆冰灾害是电网安全运行的严重威胁, 为了降低覆冰对输电线路的危害, 采用融冰装置对线路进行融冰是一种较为有效的手段, 但随着投入的融冰装置的长期运行, 其自身也可能会出现故障。案例中的 500 kV 站内融冰管母于 2012 年初投入使用, 当年完成了对 5 条次线路的融冰操作, 未发现融冰装置异常现象。2014 年 1 月, 该 500 kV 变电站进行直流融冰时 35 kV 交流侧管母绝缘护套烧损, 2 月 12 日该变电站站融冰时该段管母再次出现着火、冒烟、鼓包等异常现象。7 月, 电科院、检修公司会同南京南瑞、融冰绝缘管母生产厂家江苏维尔电气有限公司等技术人员共同对出现故障的管母进行了相关试验, 并对故障绝缘管母段进行了解体检査<sup>[1]</sup>。

## 1 基本情况及试验内容

### 1.1 管母布置情况

该 500 kV 变电站 35 kV 侧至融冰换流器之间采用交流绝缘管母线连接, 绝缘管母长度约 150 m, 绝缘管母设有铜屏蔽层, 铜屏蔽层单点接地。铜带采用 0.1 mm 厚、约 25 mm 宽铜箔以间绕方式在现场人工绕制。对部分绝缘管母解剖结果表明, 铜带匝间距在 3 ~ 40 mm 之间不等, 其布置示意图如图 1 所示, 铜带的下方铺设设有半导电层。



图 1 35 kV 绝缘管母的绕制图

### 1.2 相关试验内容

为全面详细地探究管母故障的原因, 在测试融冰装置的绝缘电阻后对其进行了 5 种交流耐压试验<sup>[1-3]</sup>。相关试验具体内容及试验结果如下。

#### 1.2.1 耐压试验前绝缘电阻测试

绝缘电阻测试主要测试 35 kV 交流融冰绝缘管母主绝缘对地绝缘电阻。测试仪器为 KYORITSU KEW 3121A 型 2 500 kV 绝缘电阻表。测试数据如表 1 所示。单从绝缘电阻的测量结果来看, 无法判断故障的原因。

表 1 主绝缘电阻 /MΩ

A 相	B 相	C 相
16 000	19 000	18 000

1.2.2 35 kV 交流侧管母主绝缘耐压试验

为确定是否为主绝缘造成的故障,首先用串联谐振装置分别对 35 kV 侧交流融冰管母 A、B、C 三相主绝缘开展了耐压试验,并测量记录了铜屏蔽层接地电流。其中试验电压 34 kV(1.7  $U_N$ ),耐压时间为 0.5 小时。试验数据与试验现象如表 2。

表 2 交流耐压时铜屏蔽层接地电流

	A 相	B 相	C 相
铜屏蔽层接地电流/A	0.538	0.521	0.515

对 A、C 相施加 34 kV 电压,耐压半小时后未发现鼓包、冒泡现象。对 B 相施加 34 kV 电压,未半小时已发现 B 相管母出现新的鼓包,并在此次耐压试验前已有的一个破损处冒出浓烟,此时红外显示最高温度为 172.6 °C。完成耐压试验后,再次测量 B 相管母主绝缘电阻为 17 000 MΩ。判断此次故障 B 相主绝缘已被破坏。

解体电缆后发现,烧蚀主要集中在铜屏蔽层边缘,铜屏蔽层边沿有明显发热痕迹,且沿边的半导体带已烧蚀,并有部分蔓延到对侧铜屏蔽层。管母烧蚀部位基本都位于半导体层,且基本沿通道边缘蔓延。

1.2.3 屏蔽层伏安特性试验

为确定此故障是否可能为屏蔽层存在缺陷,再次对 35 kV 交流融冰管母 A 相管母施加试验电压。试验初始电压 5 kV,以 1 kV 为步长增长到 34 kV。当电压加至 11 kV 时开始冒烟,此时输出电流和屏蔽层接地电流分别为 0.43 A 和 0.166 A;当外加电压达到 17 kV 时,开始出现明火,此时输出试验电流和铜屏蔽层接地电流分别为 0.65 A 和 0.277 A。测得的相关数据如表 3 所示。

试验电流与铜屏蔽层接地电流曲线伏安特性曲线如图 2 所示。

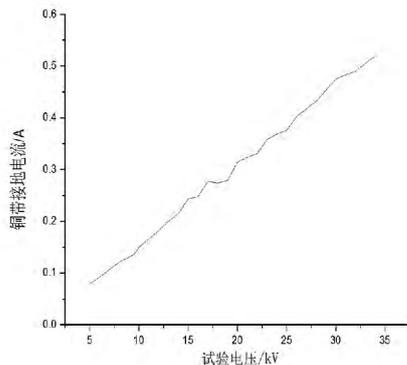


图 2 A 相融冰管母试验电压与接地电流曲线

表 3 管母屏蔽层伏安特性试验结果表

输出试验电压/kV	输出试验电流/A	铜屏蔽层接地电流/A	备注
5	0.22	0.788	
6	0.25	0.920	
7	0.29	0.107	
8	0.32	0.121	
9.5	0.35	0.136	
10	0.39	0.150	
11	0.43	0.166	开始冒烟
12	0.46	0.182	
13	0.50	0.200	
14	0.53	0.215	
15	0.56	0.243	
16	0.61	0.248	
17	0.65	0.277	出现明火
18	0.67	0.274	
19	0.70	0.279	
20	0.75	0.314	
21	0.787	0.324	
22	0.80	0.331	
23	0.88	0.358	
24	0.89	0.368	
25	0.92	0.376	
26	0.97	0.402	
28	1.20	0.432	
30	1.80	0.475	
31	1.13	0.483	
32	1.28	0.490	
34	1.24	0.520	

1.2.4 不同屏蔽层间绕方式进行交流耐压试验

通过前述试验分析,初步推断可能是屏蔽层铜带的布置存在隐患,造成了此起故障,为验证这一推断,设计了不同间绕方式下的交流耐压试验<sup>[6]</sup>。间绕方式如图 1 所示,搭盖缠绕方式如图 3 所示,将整个管母均用铜带缠绕。

(1) 首先是在间绕方式下进行试验:剥开一段 A 相绝缘管母外护套和聚四氟乙烯带,露出铜屏蔽层。然后进行 34 kV 交流耐压试验,并用红外热像仪和紫外放电检测仪对铜屏蔽层进行观察。铜屏蔽

层间隙初始温度为 33.8 °C ,随着耐压试验进行 ,铜屏蔽层间隙温度上升至 149.7 °C ,出现明显高温点并伴有冒烟现象。同时 ,紫外测试测得发热部位伴随大量放电现象。<sup>[7]</sup>

(2) 然后在带间隙搭盖缠绕方式下进行试验 ,剥开另一段 A 相绝缘管母外护套和聚四氟乙烯带 ,用铜屏蔽层包裹这段铜屏蔽层 ,确保铜屏蔽层之间没有间隙。此后试验步骤与间绕方式相同。铜屏蔽层间隙初始温度为 38 °C ,加压到与间绕方式相同时间时 ,铜屏蔽层间隙温度为 40 °C ,并未出现明显高温点。



图3 搭盖缠绕方式

### 1.2.5 去除铜带及铜带存在尖端凸出情况下的耐压试验

(1) 将故障段的铜带去除 ,两端的铜带分别接地 ,此时同样将电缆加压至 34 kV ,故障段电缆没有发现明显的发热和表面放电现象。

(2) 在半导体层上重新绕制新铜丝后的耐压试验 :在故障最严重处重新用裸铜线密集绕制 ,并将绕制的铜丝一端接地 ,并加压至 34 kV ,未发现明显的发热和放电现象。

(3) 为验证不均匀电场对放电的影响 ,在电缆的无故障段解剖一段后将铜带裸露 ,并在铜带的不同部位上各开两个具备尖端放电特征的小口 ,加压至 34 kV 后 ,未发现明显的升温 and 放电现象。

## 2 故障原因分析及结论

根据上述试验的现象和数据结果分析故障的形成机理如下。

(1) 间绕的铜带致使其与半导体层之间形成纵向电势

铜带采用间绕方式 ,形成铜带 - 半导体层 - 铜带的表面。由于铜带单端接地 ,使铜带基本上保持零地位( 管线加 34 kV 电压时 ,铜带上电压为 0.5 V 左右) ,而铜带间隙的半导体层没有直接接地 ,设半导体层上 A 点到铜带上的 B 点的电阻为  $R_x$  ,等效电路图如图 4 所示。

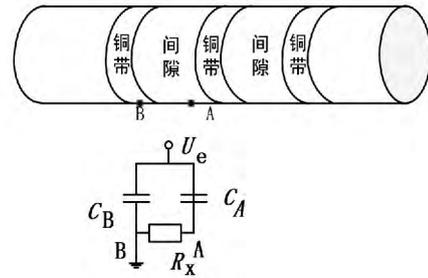


图4 采用间绕方式的铜屏蔽层与半导体层等效电路

$$U_{AB} = \frac{U_e R_x}{\sqrt{\frac{1}{(\omega C_A)^2} + R_x^2}} = \frac{U_e}{\sqrt{\frac{1}{(\omega C_A R_x)^2} + 1}} \quad (1)$$

由式(1)可知 ,随着  $R_x$  的增大 ,A、B 两点之间的电压  $U_{AB}$  也随之增大。

(2) 半导体层 - 铜带层的场强分布不均诱发局部放电

经解体发现 ,由于采用手工绕制 ,半导体层和铜带绕制的工艺差 ,存在褶皱多、与半导体层之间接触不紧密等问题 ,使得半导体层 - 铜带的表面场强极不均匀。同时 ,由于半导体层的劣化 ,致使其电阻率分布不均 ,局部电阻率出现不正常的升高 ,致使其与铜带之间的电阻  $R_x$  增大 ,进而导致  $U_{AB}$  增大。当  $U_{AB}$  增大到一定程度时就会在临近铜带的半导体层上发生半导体层向铜带的放电。

(3) 半导体层和热缩管阻燃性差是导致故障扩大、烧毁的原因

由于局部放电在半导体层积聚能量 ,使半导体层上出现了局部高温点 ,由于半导体层和热缩管均没有采用阻燃性材料 ,在高温作用下局部开始出现火花甚至燃烧现象 ,进而导致半导体层大面积烧损。

综合上述分析可知 ,此故障产生的根本原因在于铜带缠绕不当 ,诱发了局部放电 ,再加之外层包裹材料阻热性差 ,导致热量无法散失而不断聚集最终导致绝缘和管母起火继而烧毁。

## 3 改进措施与建议

根据上述试验结果和故障分析 ,为防止此类事故的再次发生 ,应采取以下技术措施。

(1) 铜屏蔽层和半导体层的绕制工艺必须严格按照绝缘管母铜屏蔽层采用叠绕方式缠绕 ,并且铜屏蔽层不宜采用多点接地方式。

(下转第 31 页)

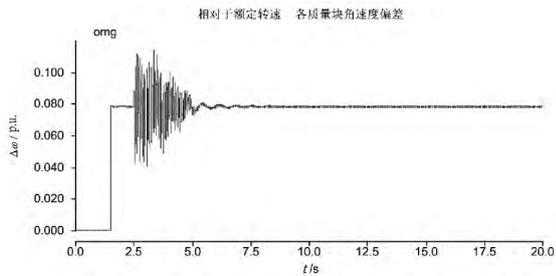


图 16 加入 SSDC 相对于额定转速,各质量块角速度偏差示意图

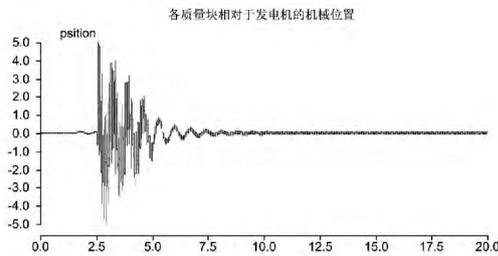


图 17 各质量块相对于发电机的机械位置示意图

参考文献

[1] 张运洲, 张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述 [N]. 国家电网报, 2006-36-38(1).

[2] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望 [J]. 中国电力, 2004, 37(1): 1-6.

[3] 于立宏. 能源资源替代战略研究 [M]. 北京: 中国时代经济出版社, 2008: 14-16.

[4] Hsu YY, Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using an Artificial Neural Network [J]. IEEE Trans. on EC. 1992, 7(4): 684-690.

[5] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡 [J]. 电力系统自动化, 1989(5): 22-27.

[6] 于达仁, 徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 35-39.

[7] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System For the Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEE proceedings, 1989, 136(2): 78-86.

[8] R. J. Piwko, E. VLarsen. HVDC System Control for Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(7): 2203-2211.

[9] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005(1): 87-91.

[10] 杨秀, 王西田, 陈陈. 基于  $H_{\infty}$  鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(9): 57-61.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士研究生, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-08)

5 结 论

通过上述时域仿真分析, 得出下列结论。

(1) HVDC 系统的不正当控制将会引发次同步振荡现象, 这将会引发系统发生故障乃至造成发电机损坏。

(2) 通过对发电机转速度进行 FFT 分析可得, 系统发生次同步的最大振荡频率为 15.6 Hz。

(3) 设计的次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的, 也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

(上接第 26 页)

(2) 外护套、热缩管要采用阻燃性材料。

(3) 加强对同类绝缘管母的排查整改, 整改后的绝缘管母投运前必须做检测试验, 主要包括绝缘性能及红外检测、半导体层的理化试验、半导体层和热缩管的防水、阻燃性检测等<sup>[5]</sup>。

参考文献

[1] 张真涛, 张斌, 邢文涛, 等. 变压器绝缘管母护套烧损故障分析及处理 [J]. 河南电力, 2012(3): 23-24.

[2] 赵宇, 刘青, 高援利, 等. 高压 XLPE 电缆线路局部放电测试系统应用研究 [J]. 电力设备, 2008(9): 45-49.

[3] 郑云海, 吴奇宝, 何华琴, 等. 全绝缘母线局部放电检测与分析诊断 [J]. 绝缘材料, 2010(4): 63-66.

[4] 陈卫中. 35 kV 及以上主变压器状态检修的探讨 [J]. 浙江电力, 1999(5): 40-42.

[5] 电力工业部. 电力设备预防性试验规程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

[6] 丁树峰. 轧制变压器铜带边部处理技术 [J]. 机械设计与制造, 2006(8): 98-100.

[7] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 97-98.

(收稿日期: 2014-08-14)

# 高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制

王敏华 康积涛 裴超志

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 电力系统输电过程中有一定概率产生次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO), 这种振荡极易造成汽轮发电机组的大轴损毁, 准确分析系统的次同步振荡特性对其防止和抑制有重要意义。高压直流输电由于其闭环控制的影响, 也会使系统产生次同步振荡现象。因此研究高压直流次同步振荡及其抑制措施问题具有重要的意义。以 CIGRE 高压直流输电模型为基础, 结合 IEEE 第一谐振模型, 搭建高压直流输电系统, 然后对其发电机电磁转矩、各轴段转矩进行分析。最后通过相位补偿原理设计 SSDC 进行抑制次同步振荡。

**关键词:** 次同步振荡; 高压直流输电; 次同步阻尼控制器

**Abstract:** There is a certain risk of subsynchronous oscillation (SSO) in the process of power system transmission, and it is easy to damage the shaft of turbo generator, so the accurate analysis of oscillation characteristics is of great significance for the prevention and suppression of SSO. Because of the influence of its close loop control, high voltage direct current (HVDC) transmission will also make the system produce the subsynchronous oscillation. Therefore, it is very important to research subsynchronous oscillation problem caused by HVDC and its control measures. Based on CIGRE HVDC model and combined with the first subsynchronous resonance (SSR) model of IEEE, HVDC subsynchronous oscillation system is established, and then the each shaft of electromagnetic torque and the torque in generator are analyzed. Finally, SSDC is designed by phase compensation principle to suppress subsynchronous oscillation.

**Key words:** subsynchronous oscillation; high voltage direct current transmission; synchronous damping controller

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0027-05

## 0 引言

中国的能源资源非常丰富,但其分配极不均衡,煤炭资源 80%集中在西部和北部,水资源 80%集中在西南地区。但另一方面,随着中国经济的快速发展,用电负荷急剧增加,尤其是中国的东部经济发达地区,这一现状决定了必须采用大容量、超高压、远距离输电。<sup>[1]</sup>

高压直流输电具备损耗小、可以限制短路电流、线路造价低等优点,因而在远距离、大容量输电方面具有不可替代的优势。越来越多的电力系统采用交、直流互联电网<sup>[2-3]</sup>,由于大型受端电网的形成,近年来的系统规划已开始出现多条直流和多条交流线路并列运行的多馈入交直流混合输电系统。

但是高压直流输电(HVDC)线路和汽轮发电机组之间的相互作用会引起发电机轴系与电气系统以一个或多个低于同步频率交换能量而损坏的现象,

从而引发次同步振荡现象。次同步振荡是一类严重的系统稳定性问题,不但会使系统产生振荡现象,而且极易造成汽轮发电机组的大轴损毁<sup>[2]</sup>。如何采取有效的措施抑制次同步振荡是电力系统中一项重要的研究内容。

文献[4]采用人工神经网络法对扭振系统的特征值进行实时分析,可用于在线分析次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO);文献[5]采用多变量频域法对次同步振荡进行分析,可反映出发电机轴的不对称性;文献[6]采用开环系统频率特性法对汽轮机调节系统的 SSO 特性进行分析;文献[7]基于模态控制理论,利用特征值法设计次同步振荡抑制器(subsynchronous damping controller, SSDC);文献[8]提出了一种基于传递函数的波特图设计 SSDC 参数的方法;文献[9]提出了与遗传算法相结合的 SSDC 设计;文献[10]提出了基于  $H_{\infty}$  控制理论的 SSDC,提高了 SSDC 的在线计算速度,并使其具有一定的鲁棒性。

基于测试信号法,下面先介绍高压直流次同步振荡发生的原理,然后分析高压直流次同步振荡进行时域分析,最后根据高压直流次同步振荡抑制机理,设计 SSDC,抑制次同步振荡。最后利用 PSCAD/EMTDC 软件在 IEEE 第一标准模型基础上,对其抑制效果进行了仿真验证。

### 1 高压直流次同步振荡机理

以图 1 所示的简化 HVDC 系统模型为例分析 HVDC 引发 SSO 时系统状态量的变化过程, HVDC 整流侧在定电流或者定功率控制时引起的次同步振荡问题的状态量的变化过程见图 2。若与整流站紧密耦合的发电机上转子机械角速度施加一个微小扰动  $\Delta\theta$  ( $\Delta\omega$ ), 则将导致机端电压 (即图 2 中的换流站换流母线电压处  $U \angle \theta_U$ ) 的相位  $\theta_U$  和幅值  $U$  产生扰动, 经交流线路从而该扰动传递到整流站换流母线上。现代的 HVDC 系统中换流器普遍采用 EPC 方式, 对应于换流母线电压相位的扰动, 换流阀触发角  $\alpha$  将产生相同的扰动 ( $\Delta\alpha$ ), 因此换相电压幅值以及触发角的改变, 将会引起直流母线电压的  $U_d$  扰动, 而该扰动会引起直流电流  $I_d$  的变化, 并进一步导致直流功率发生的变化 ( $\Delta P_d$ )。这两者的作用将导致直流电压和电流偏离平衡状态, 而 HVDC 定电流控制将感应这种偏差并加以快速校正和调整, 但是往往不能消除 ( $\Delta I_d$ ), 从而导致电流功率变化为  $\Delta I_d$  ( $\Delta P_d$ )。直流功率的变化通过交流网络的传递将导致交流功率变化  $\Delta P_d'$ , 从而导致发电机电磁力矩变化  $\Delta T_e$ , 而  $\Delta T_e$  的变化又会最终又反馈作用于机组轴系。如果发电机转速的变化  $\Delta\omega$  与引起的电气转矩变化量相位滞后超过  $90^\circ$ , 则会形成一种正反馈性质的轴系扭振相互作用,  $\Delta T_e$  不断助增扰动幅值,  $\Delta T_e$  会进一步增大初始扰动  $\Delta\theta$  ( $\Delta\omega$ ), 就会出现电气负阻尼。一旦该电气负阻尼超过发电机组轴系所提供的正机械阻尼, 就出现 HVDC 控制系统引起的轴系扭振不稳定。

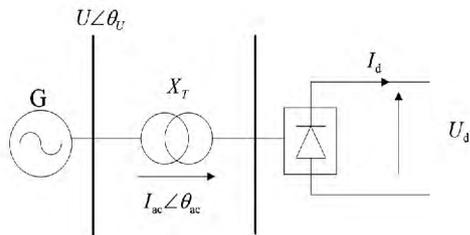


图 1 准稳态模型所依据的换流器电路结构

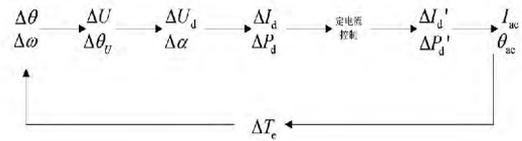


图 2 HVDC 引发次同步振荡系统状态量变化过程

### 2 高压直流次同步振荡抑制机理

SSDC 作为抑制 SSO 有效而经济的手段, 其控制性能受反馈信号的选取和控制方法的确定的影响, 同时还应考虑其与其他设备控制特性的协调。在文献 [11] 中关于 SSO 产生机理的更全面解释中提到, 负阻尼的实质是电磁转矩偏差对转子初始扰动产生助增作用, 也就是说电磁转矩偏差与发电机轴系转速偏差之间的相位大于  $90^\circ$ , 因此可以采用与 PSS 抑制低频振荡的原理相似的相位校正 (phase correction, PC) 来阻尼 SSO。也就是以发电机转速偏差或者频率偏差信号为反馈信号, 经过放大和相位校正处理, 其输出信号通过换流站控制回路提供一个附加的电磁转矩, 使其与原有电磁转矩偏差的合成量与转速偏差之间的相位小于  $90^\circ$  (如图 3 所示), 使整个系统呈现出正的电气阻尼。

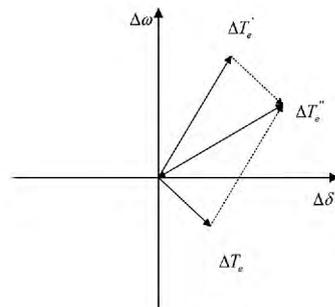


图 3 电气转矩的向量关系图

### 3 HVDC 次同步振荡分析

#### 3.1 HVDC 次同步振荡模型

如图 4 所示为含 HVDC 电力系统的典型简化模型, 该模型包含存在次同步振荡现象的待研机组 (图中虚框所示), 交流网络部分用无穷大电源 S1 和等值阻抗的串联组合与整流侧连接, 无穷大电源 S2 为逆变侧的受端系统。

该系统模型发电机及轴系模型的参数均采用 IEEE 第一谐振模型的参数, 直流部分采用 CIGER HVDC 标准模型, S1 和 S2 的额定频率均为 60 Hz, 端

电压为 26 kV ,发电机的额定容量为 892.4 MVA ,直流额定输送功率为 1 000 MW ,额定电压为 500 kV。

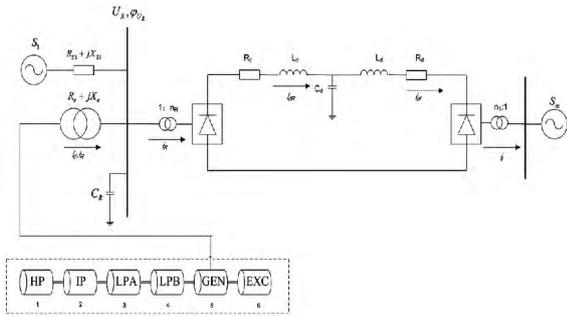


图4 含 HVDC 次同步振荡的典型简化模型

### 3.2 系统时域仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 4 的仿真模型 ,发电机轴系采用 6 轴段模型 ,机械阻尼设为 0。待系统进入稳态后 ,在发电机出线上于 2.5 s 时给出三相接地故障 ,故障持续 0.05 s 后切除 ,仿真时间为 20 s ,发电机各个轴系质块扭矩将发生次同步振荡。

对发电机转速偏差进行 FFT 分析得到其各频率分量的幅值情况 ,如图 5 所示 ,可以看出幅值较高的频率均对应于发电机轴系的轴系振荡模式。其中幅值最高的为 16 Hz ,其次为 32 Hz ,25 Hz 和 20 Hz 分量的幅值大小相近 ,而 1 Hz 和 47 Hz 分量的幅值非常小 ,可以忽略。

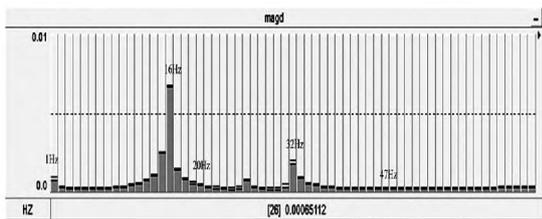


图5 发电机转速 FFT 分析

对发电机各质量块相对于发电机的机械位置和相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差进行仿真分析 ,如图 6 和 7 所示 ,各质量块相对于发电机的机械位置明显处于振荡状态 ,而且呈增大的趋势。相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差发散的趋势非常明显 ,这些都表明了次同步振荡对发电机组危害相当严重。

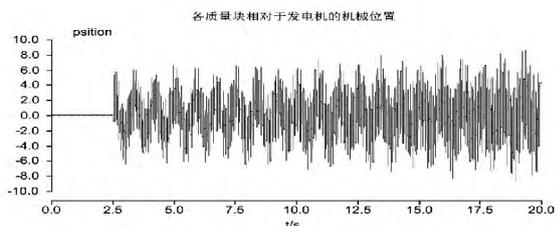


图6 各质量块相对于发电机的机械位置

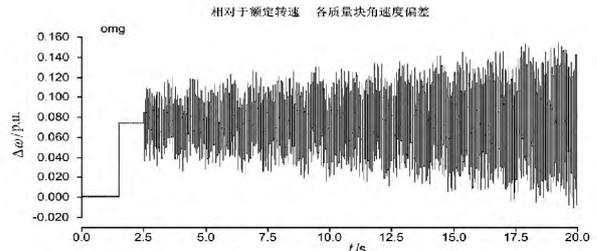


图7 相对于额定转速度 ,各质量块角速度偏差

对发电机各轴段的扭矩、发电机转速度、电磁转矩进行仿真分析。如图 6 至图 7 得 ,在 2.5 s 施加扰动后 ,发电机各轴段的扭矩呈现发散现象 ,发电机转速与发电机电磁转矩呈现不稳定状态 ,系统发生次同步振荡。

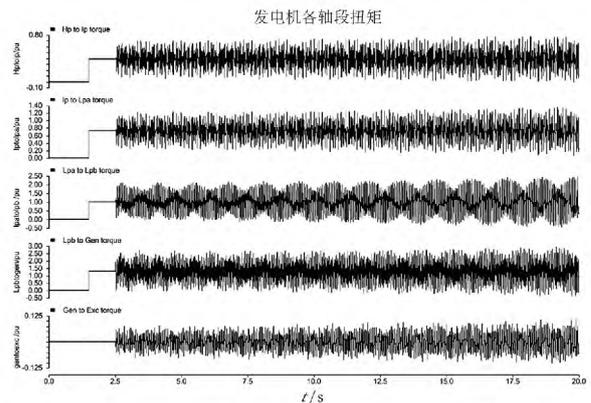


图8 发电机发生故障时各轴段间的扭矩

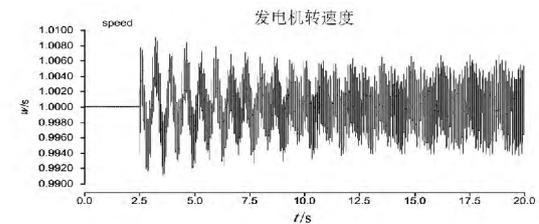


图9 发电机转速运行示意图

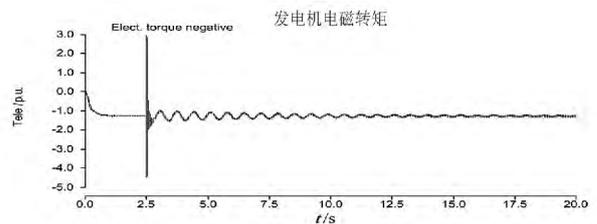


图10 发电机电磁转矩示意图

## 4 HVDC 次同步振荡控制器设计

### 4.1 控制器 SSDC 设计原理

SSDC 抑制 SSO 时需要向发电机组提供一个足够大的正阻尼力矩才能抑制发电机发散的转速振荡 ,因此 SSDC 的控制策略为 :当发电机转速减小

时,在 SSDC 的作用下 HVDC 的直流电流参考值减小,由于换流器的快速响应特性,直流功率减小,则发电机输出的电磁功率也将减小。对恒定的输入机械功率,电磁功率的增加将导致转子动能的增加,从而使得转子转速增加;反之,发电机转速减小时 HVDC 定电流参考值增加,则直流功率增加,发电机的电磁功率增加,从而使发电机转子减速。在 HVDC 换流器的快速响应特性下,通过 SSDC 的这种控制策略能增强发电机组的次同步振荡阻尼,达到抑制系统次同步振荡的目的。

#### 4.2 控制器 SSDC 设计方案

以图 4 建立的模型为研究对象,其中转子轴系 6 个轴段构成 6 个轴段对应转子轴系 6 个扭振模式,除去一个刚体模式,进行 SSO 分析的有 5 个扭振模式,轴系的机械扭振模态频率分别为 15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz、47.45 Hz。由于在 47.45 Hz 处,该模态近似为等幅振荡模式,由于该分量所占比重非常小,所以在设计阻尼控制器时只考虑前 4 个扭振模式。

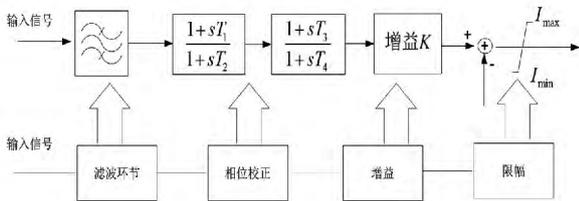


图 11 SSDC 结构示意图

这里 SSDC 采用以发电机的转速偏差  $\Delta\omega$  作为反馈信号,采用分模态控制的方法,经过 4 阶 Butterworth 滤波器,通过相位补偿环节补偿负阻尼所需要的相位差,最后经幅值增益和限幅环节得到电流补偿量,将输出信号叠加至直流电流的整定值信号中,共同作为定电流控制器的输入信号,消除已产生的次同步振荡。

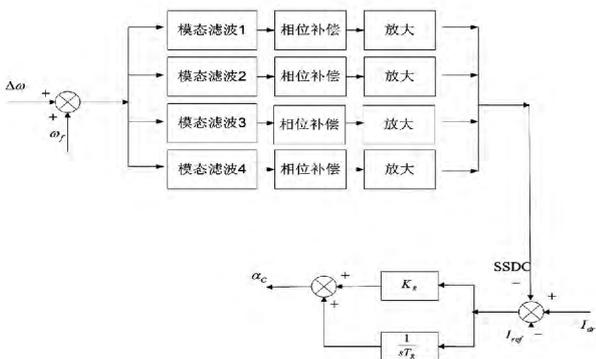


图 12 发电机转速偏差为反馈信号的多模态阻尼控制器

SSDC 各个模式的滤波及相补环节如表 1。

表 1 SSDC 参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m / (^\circ)$	环节个数	放大倍数
1	14 ~ 17	15.71	37.0	2	10
2	19 ~ 22	20.21	47.5	2	10
3	24 ~ 27	25.55	41.5	2	10
4	31 ~ 34	32.25	50	2	10

#### 4.3 控制器 SSDC 抑制效果仿真分析

为进一步验证加入 SSDC 后,抑制次同步振荡的有效性,对图 4 所示模型加入 SSDC 进行仿真分析。待系统进入稳态后,在发电机出线上于 2.5 s 时给出三相接地故障,故障持续 0.05 s 后切除,仿真时间为 20 s。

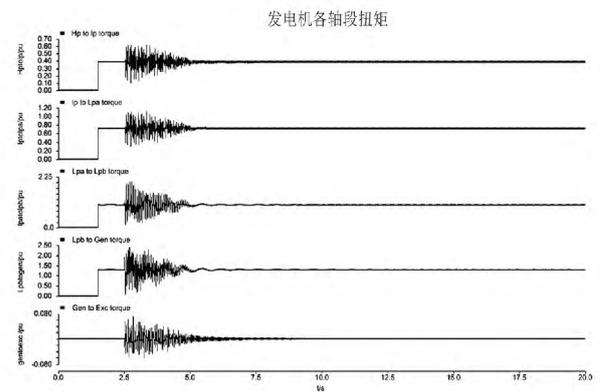


图 13 加入 SSDC 时发电机发生故障时各轴段间的扭矩

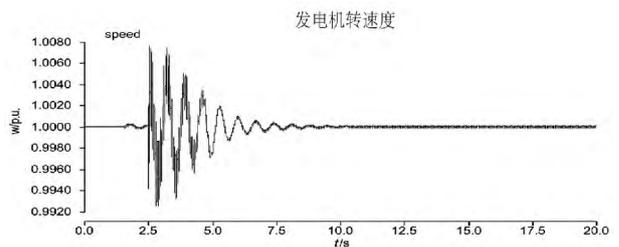


图 14 加入 SSDC 时发电机转速示意图

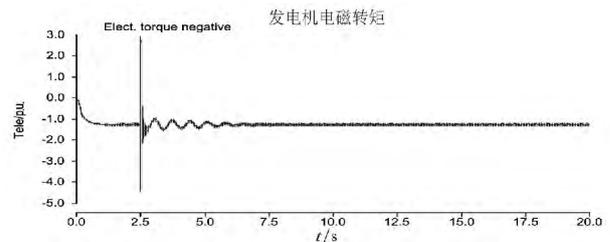


图 15 加入 SSDC 时发电机电磁转矩示意图

由图 13 至图 17 可得,发电机各轴段扭矩、电磁转矩及发电机转速等振荡都得到明显的收敛,次同步振荡得到了抑制。

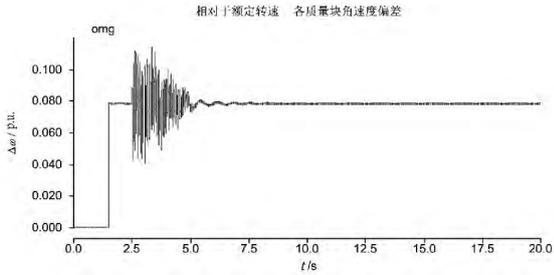


图 16 加入 SSDC 相对于额定转速,各质量块角速度偏差示意图

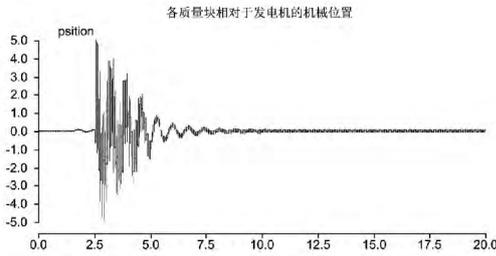


图 17 各质量块相对于发电机的机械位置示意图

### 5 结 论

通过上述时域仿真分析,得出下列结论。

(1) HVDC 系统的不正当控制将会引发次同步振荡现象,这将会引发系统发生故障乃至造成发电机损坏。

(2) 通过对发电机转速度进行 FFT 分析可得,系统发生次同步的最大振荡频率为 15.6 Hz。

(3) 设计的次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的,也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

(上接第 26 页)

(2) 外护套、热缩管要采用阻燃性材料。

(3) 加强对同类绝缘管母的排查整改,整改后的绝缘管母投运前必须做检测试验,主要包括绝缘性能及红外检测、半导体层的理化试验、半导体层和热缩管的防水、阻燃性检测等<sup>[5]</sup>。

#### 参考文献

[1] 张真涛,张斌,邢文涛,等. 变压器绝缘管母护套烧损故障分析及处理[J]. 河南电力, 2012(3): 23-24.

[2] 赵宇,刘青,高援利,等. 高压 XLPE 电缆线路局部放电测试系统应用研究[J]. 电力设备, 2008(9): 45-49.

#### 参考文献

[1] 张运洲,张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述[N]. 国家电网报, 2006-36-38(1).

[2] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望[J]. 中国电力, 2004, 37(1): 1-6.

[3] 于立宏. 能源资源替代战略研究[M]. 北京: 中国时代经济出版社, 2008: 14-16.

[4] Hsu YY, Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using an Artificial Neural Network[J]. IEEE Trans. on EC, 1992, 7(4): 684-690.

[5] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡[J]. 电力系统自动化, 1989(5): 22-27.

[6] 于达仁,徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振的影响[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(4): 35-39.

[7] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System For the Damping of Subsynchronous Oscillations[J]. IEE proceedings, 1989, 136(2): 78-86.

[8] R. J. Piwko, E. VLarsen. HVDC System Control for Damping of Subsynchronous Oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(7): 2203-2211.

[9] 江全元,程时杰,曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2005(1): 87-91.

[10] 杨秀,王西田,陈陈. 基于 H $\infty$  鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 57-61.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士研究生, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-08)

[3] 郑云海,吴奇宝,何华琴,等. 全绝缘母线局部放电检测与分析诊断[J]. 绝缘材料, 2010(4): 63-66.

[4] 陈卫中. 35 kV 及以上主变压器状态检修的探讨[J]. 浙江电力, 1999(5): 40-42.

[5] 电力工业部. 电力设备预防性试验规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

[6] 丁树峰. 轧制变压器铜带边部处理技术[J]. 机械设计与制造, 2006(8): 98-100.

[7] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 97-98.

(收稿日期: 2014-08-14)

# 两例 500 kV CVT 异常分析及 日常运行监视探讨

代英俊

(国网四川省电力公司检修公司自贡运维分部,四川 自贡 643010)

**摘要:**对500 kV叙府变电站两例500 kV线路电容式电压互感器(CVT)的电容量及介损异常增长原因进行分析,分析得出CVT内部元件击穿导致电容量及介损异常增长。通过返厂对故障CVT进行试验及解体检查,证明了由于原材料及制造工艺水平导致了CVT内部电容元件击穿。最后对500 kV CVT出厂试验、例行试验及日常运维监视进行了探讨。

**关键词:**电容式电压互感器(CVT);介损;电容量;击穿

**Abstract:** The causes for the abnormal growth in capacitance and dielectric loss of capacitor voltage transformer ( CVT) in two 500 kV transmission lines at 500 kV Xufu substation are analyzed ,and the analysis shows that the abnormal growth in capacitance and dielectric loss are due to the breakdown of internal components in CVT. Through the testing and disassembling inspection on the fault CVT which is returned to the factory ,it is proved that the breakdown of internal capacitance components in CVT is caused by raw materials and manufacturing process. Finally ,the routine test ,daily operation and monitoring for 500 kV CTV are discussed.

**Key words:** capacitor voltage transformer ( CVT) ; dielectric loss; capacitance; breakdown

中图分类号: TM451 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2014) 05 - 0032 - 04

## 0 引言

相比传统电磁式电压互感器(TV),电容式电压互感器(CVT)由于结构简单,造价低等特点广泛应用于110kV及以上电网系统。但是CVT的设计受制造水平、工艺水平、原材料以及运行条件等多种因素的限制,使其在运行过程中易发生电容元件击穿等故障。CVT故障的发生不仅会影响测量计量准确度,严重时甚至可能导致贯穿性击穿造成爆炸、起火等恶性事故<sup>[1-3]</sup>。为防止上述事故的发生,在深入分析两例500 kV CVT异常的基础上,对500 kV CVT日常运行维护进行探讨。

## 1 CVT工作原理

电容式电压互感器(CVT)由电容分压器和电磁单元两部分组成,其设计和相互连接使电磁单元的二次电压实质上正比与一次电压,且相位差在连接方向正确时接近于零<sup>[4]</sup>。其电气原理图如图1所示。

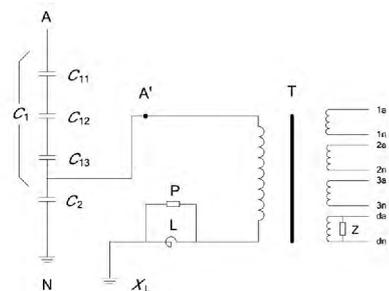


图1 500 kV CVT 电气原理图

图中,  $C_1$  由  $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{13}$  组成电容分压器的高压电容器,  $C_2$  为电容分压器的中压电容器; 500 kV CVT 共有3节瓷套,  $C_{11}$  在上节瓷套中;  $C_{12}$  在中节瓷套中;  $C_{13}$  和  $C_2$  在下节瓷套中并由法兰和电磁部分连接在一起; T 为中间变压器, P 为保护装置, L 为补偿电抗器; Z 为阻尼装置。1a - 1n, 2a - 2n, 3a - 3n 为二次绕组作为保护、计量以及测量用, da - dn 为剩余绕组。

由电容器分压原理可知

$$U_2 = \frac{U_p C_1}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

式中,  $U_2$  为电容分压器的中压电容器的电压;  $U_p$  为

表1 500 kV 甲线 CVT A 相现场试验数据及出厂试验数据

	2014年2月		出厂值		C/%
	容量/nF	介损/tanδ%	容量/nF	介损/tanδ%	
C <sub>11</sub>	15.29	1.204	14.47	0.060	5.67
C <sub>12</sub>	14.73	0.181	14.53	0.060	1.38
C <sub>13</sub> 及 C <sub>2</sub>	15.77	0.194	15.63	0.055	0.90

注: C 为电容量初值变化

表2 500 kV 乙线 CVT C 相现场试验数据及出厂试验数据

	2014年2月		出厂值		C/%
	容量/nF	介损/tanδ%	容量/nF	介损/tanδ%	
C <sub>11</sub>	14.96	0.397	14.47	0.060	3.39
C <sub>12</sub>	14.79	0.253	14.48	0.060	2.14
C <sub>13</sub> 及 C <sub>2</sub>	16.06	0.257	15.71	0.058	2.23

系统一次相电压。

500 kV 乙线 CVT C 相电压变化为

$$(5\ 053.25 - 4\ 954.84) / 4\ 954.84 = 2.59\%$$

表3 500 kV 甲、乙线 CVT 电容量试验数据

设备	试验值/pF	出厂值/pF
500 kV 甲线 CVT A 相	5 083.82	4 952.67
500 kV 乙线 CVT C 相	5 083.25	4 954.84

为了判断 CVT 内部电容元件是否存在击穿现象,查阅 500 kV 甲、乙线线路历史电压数据如下(见表 4、表 5)。

表4 500 kV 甲线每月 1 日 0 点电压

日期	U <sub>A</sub> /kV	U <sub>B</sub> /kV	U <sub>C</sub> /kV	U/%
2013-03-01	308.65	305.58	306.31	1.00
2013-04-01	308.95	305.46	306.01	1.14
2013-05-01	309.53	305.81	306.60	1.22
2013-06-01	308.07	305.93	306.89	0.70
2013-07-01	306.89	304.22	305.72	0.88
2013-08-01	307.48	304.26	305.14	1.06
2013-09-01	308.07	303.67	304.84	1.45
2013-10-01	310.41	305.43	305.72	1.63
2013-11-01	310.70	305.22	305.72	1.80
2013-12-01	311.23	305.31	305.68	1.94
2014-01-01	311.88	304.55	304.55	2.41
2014-02-01	312.76	305.14	304.84	2.60

注: U 为相间电压最大不平衡率。

## 2 现场试验

2014年2月,对500 kV 叙府变电站500 kV 甲、乙线线路 CVT 进行例行试验。试验发现500 kV 甲线线路 CVT A 相上节、500 kV 乙线线路 CVT C 相介损值及电容量与出厂试验数据相比均有增长异常情况,试验数据见表1及表2所示,均超过 CVT 状态检修规程的注意值(介损 tanδ% ≤ 0.25,电容量初值变化不超过 ± 2%)<sup>[5]</sup>。

## 3 故障分析

现场试验时由于 C<sub>13</sub> 与 C<sub>2</sub> 在下节瓷套中并由法兰和电磁部分连接在一起,因此测量的是 C<sub>13</sub> 与 C<sub>2</sub> 串联总电容量。

根据电容串联可知 CVT 总电容量 C 为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{11}} + \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3} \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_{13}} + \frac{1}{C_2} \quad (3)$$

$$C = \frac{C_{11}C_{12} + C_{12}C_3 + C_{11}C_3}{C_{11} + C_{12} + C_3} \quad (4)$$

利用出厂值与现场试验值计算 500 kV 甲、乙线 CVT 总电容量见表 3。

由 CVT 工作原理可知,当 CVT 内部击穿电容量变化会引起一次或二次电压的变化,因此 500 kV 甲线 CVT A 相电压变化为

$$(5\ 083.82 - 4\ 952.67) / 4\ 952.67 = 2.64\%$$

表5 500 kV 乙线每月1日0点电压

日期	$U_A/kV$	$U_B/kV$	$U_C/kV$	$U/\%$
2013-03-01	306.01	307.19	308.07	0.67
2013-04-01	—	—	—	—
2013-05-01	306.89	308.36	308.95	0.67
2013-06-01	305.72	307.77	309.24	1.14
2013-07-01	304.55	306.60	308.07	1.14
2013-08-01	303.67	306.60	309.24	1.80
2013-09-01	304.67	306.60	310.41	1.85
2013-10-01	305.72	308.65	311.88	1.98
2013-11-01	305.31	309.24	311.88	2.11
2013-12-01	303.93	307.77	311.00	2.27
2014-01-01	303.34	307.48	310.70	2.37
2014-02-01	303.16	307.56	311.16	2.57

注:2013年4月1日500 kV 乙线停电,故无电压数据。

相间电压最大不平衡率为

$$U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \quad (5)$$

截至2014年2月:500 kV 甲线A相电压最大不平衡率为2.60%,与计算的电压变化2.64%基本一致;500 kV 乙线C相电压最大不平衡率为2.57%,与计算的电压变化2.59%基本一致。初步判断为CVT内部 $C_1$ 电容单元击穿导致一次电压升高。

通过表4及表5分析发现500 kV 甲线A相电压、500 kV 乙线C相电压比其他两相电压偏高且电压逐渐增高,同时相间电压最大不平衡率呈现逐渐增大趋势,与现场试验500 kV 甲线线路CVT A相

表6 500 kV 甲线 CVT A 相返厂数据及出厂试验数据

	返厂试验值		出厂值		$C/\%$
	容量/nF	介损/ $\tan\delta\%$	容量/nF	介损/ $\tan\delta\%$	
$C_{11}$	15.51	0.471	14.47	0.060	7.19
$C_{12}$	14.76	0.083	14.48	0.060	1.93
$C_{13}$	18.74	0.064	18.65	0.056	0.48
$C_2$	95.77	0.075	95.58	0.055	0.20

表7 500 kV 乙线 CVT C 相返厂数据及出厂试验数据

	返厂试验值		出厂值		$C/\%$
	容量/nF	介损/ $\tan\delta\%$	容量/nF	介损/ $\tan\delta\%$	
$C_{11}$	14.98	0.125	14.47	0.060	3.52
$C_{12}$	14.81	0.108	14.53	0.060	1.93
$C_{13}$	19.11	0.137	18.72	0.056	2.08
$C_2$	97.10	0.073	96.81	0.055	0.30

上节、500 kV 乙线线路 CVT C 相介损及电容量与出厂试验数据相比均有异常增长情况一致;从而排除了试验干扰导致试验数据错误的可能,间接证明了 CVT 内部电容元件击穿的判断是正确的。于是申请对故障 CVT 进行更换,避免了因 CVT 内部故障而可能引起事故的扩大。

发现缺陷的两只 CVT 型号为 TYD14-500/ $\sqrt{3}$ -0.005H,于2011年12月出厂,2011年6月投运。根据 CVT 的结构和工作原理,电容分压器部分承受电压较高,电容元件在高电压长期作用下局部场强集中易发生损坏。目前电容分压器电容元件普遍采用的是膜纸复合介质,其介损主要取决于膜与纸的成分中存在的无机物质及在生产加工过程中加入的添加剂等<sup>[6]</sup>。瓷套管质量、设计水平、原材料、制造业,干燥处理工艺等都将影响 CVT 的正常运行。

#### 4 解体检查

为了查明故障原因,返厂对故障 CVT 进行解体检查,解体前试验数据如下(见表6、表7)。

将 CVT 分压器解体,把芯子从套管中取出。对分压器的元件逐一进行2.15 kV 的直流耐压检查,检测出甲线 CVT A 相(解体检查)发现从上往下数第55、71、74、75、77、80、82号元件击穿,共7只元件击穿;乙线 C 相互感器上节分压器从上往下数第36、48、50只元件击穿,共3只元件击穿。

根据现场解剖的情况可以判断此次互感器故障

的原因是:元件极板铜引出片边缘毛刺清理不干净,局部场强集中导致元件击穿。由于元件极板铜引出片的制造采用冲压的方式,铜引出片边缘容易产生毛刺,铜引出片冲压后必须对边缘进行清理,清理时若不注意,可能会使铜引出片的边缘有极少的毛刺产生,局部场强集中,毛刺有可能会产生低能局部放电,在电场的长期作用下导致部分元件击穿。由于是  $C_1$  元件击穿,  $C_1$  电容量变大,  $C_1$  阻抗变小,导致二次输出电压偏高。

## 5 防范措施

500 kV CVT 内部故障以电容元件击穿为主,由于内部元件击穿是一个逐步缓慢发展的过程,若早期出现的内部元件击穿故障未及时处理,将有可能导致 CVT 内部元件逐渐击穿导致继电保护误动作、设备爆炸等事故。因此,为了及早发现 CVT 内部缺陷,提出以下几点建议。

1) 110 kV (66 kV) ~ 500 kV 互感器在出厂试验时,局部放电试验的测量时间延长到 5 min<sup>[7]</sup>。

2) CVT 例行试验时,不仅要关注 CVT 介损值,更要关注电容量的变化并结合历次试验数据纵向、横向比较综合分析,即使电容量变化未超出规程规定值,但其变化已明显大于其余几节时,应引起足够注意<sup>[8]</sup>;对于电容量变化量接近或达到 2% 的 CVT 应查阅其历史电压数据,以每月 1 日 0 点或 15 日 0 点相间电压最大不平衡率进行对比分析(参见表 3 与表 4)。

3) 应及时处理或更换已确认存在严重缺陷的电压互感器;对介质损耗因数上升或怀疑存在缺陷的电压互感器,应缩短试验周期,进行跟踪检查和析,以查明原因<sup>[9]</sup>。

4) 随着 500 kV 变电站无人值守的稳步推进对设备运行监视提出了更高的要求。由于 CVT 是全密封设备,除发生渗漏油、异常声响等较易发现的故障外,内部故障一般不易发现,由 CVT 工作原理可知其内部故障可导致运行中的 CVT 一次或二次电压异常,实际运行中可监视 CVT 一次与二次电压,可以较早的发现 CVT 的异常情况。

5) 定期抄录一次、二次电压以及开口电压  $3U_0$ ,以每月 1 日 0 点或 15 日 0 点为宜,计算其最大相间电压不平衡率以便跟踪分析。国家电网公司《110

(66) kV ~ 500 kV 互感器运行规范》中第二十一条明确了电容式电压互感器二次电压异常现象及引起的主要原因<sup>[10]</sup>。若监测到三相相间电压最大不平衡率超过 2%,为排除 CVT 二次回路压降或者故障导致二次电压异常,应立即通知二次继电保护人员从 CVT 端子箱直接测量二次电压以便准确测试 CVT 二次电压值;若判断确为 CVT 内部元件击穿,应尽快申请停电对 CVT 进行诊断性试验。

## 6 结 语

简述了 500 kV 叙府变电站两只 CVT 同时出现电容量及介损异常增加的现象,结合返厂试验及解体检查情况分析得出:由于原材料或制造工艺致使 CVT 内部电容元件在持续电压作用下局部场强集中,最终导致电容元件击穿;电容元件击穿不仅导致电容量增加,同时也会引起介损异常变化。最后对 CVT 出厂试验、例行试验以及日常 CVT 日常运维监视进行了探讨。

### 参考文献

- [1] 印华,王勇,宋伟,等. 电容式电压互感器常见故障及原因分析[J]. 电工技术, 2007(10): 70-71.
- [2] 张霖. 电容式电压互感器的特点及存在的问题[J]. 江苏机电工程, 2000, 19(1): 35-36.
- [3] 孙鹏举. 500 kV 变电站电容式电压互感器故障原因分析及经验教训[J]. 电力设备, 2008, 9(10): 65-67.
- [4] GB 4703—2007, 电容式电压互感器[S].
- [5] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程[S].
- [6] 唐铁英,徐建文. 电容式电压互感器潜伏性故障发现及原因分析[J]. 中国电力教育, 2011(18): 130-131.
- [7] 国家电网公司. 十八项电网重大反事故措施(修订版)[S].
- [8] 郭丽娟,徐宇军. 500 kV 电容式电压互感器介损超标原因分析及处理[J]. 广西电力, 2009(10): 27-28.
- [9] 国家电网公司. 预防 110(66) kV ~ 500 kV 互感器事故措施[S].
- [10] 国家电网公司. 110(66) ~ 500 kV 互感器运行规范[S].

作者简介:

代英俊(1987), 助理工程师, 从事 500 kV 电网高压试验工作。

(收稿日期: 2014-05-04)

# 智能变电站 SCD 智能比对软件的设计与实现

郑永康<sup>1</sup> 陈吉<sup>2</sup> 童晓阳<sup>3</sup> 刘明忠<sup>1</sup> 陈沧杨<sup>1</sup> 庄先涛<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 常州铁道高等职业技术学校 江苏 常州 213011; 3. 西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610041)

**摘要:** 为了使生产厂家 SCD 和设计院虚端子表文件的虚端子保持一致,设计了一种智能变电站的 SCD 智能比对软件,它实现了解析 SCD 文件、解读虚端子表 Excel 文件、为两种文档中设备描述建立映射表、形成 SCD 侧与 Excel 侧两种虚连接、自动比对两种虚连接、显示比对结果、生成比对报告等功能模块。研究了对两侧设备描述的中文字符串智能比较、形成两侧虚连接、自动比对两侧虚连接等关键技术。该软件已在多个智能变电站调试中获得了成功应用,提高了系统调试的准确性与工作效率。

**关键词:** IEC 61850; 智能变电站; SCD; 虚端子; 比对

**Abstract:** In order to keep the virtual terminators of substation configuration description (SCD) consistent with Excel files, a checking software based on IEC 61850 is developed to find whether the SCD reached the design intention. The functions of the system include reading and traversing SCD file, parsing the Excel files, intelligently matching the device descriptions in SCD and Excel, creating the virtual connections of SCD and Excel files, automatically comparing the virtual connections, displaying the checking results, and creating the checking report. The key technologies are given, such as the intelligent matching method of the device descriptions and the comparison of virtual connections with forward and reverse direction. The software has been successfully applied to several substations, which greatly improves the accuracy and work efficiency of system configuration and testing.

**Key words:** IEC 61850; smart substation; substation configuration description (SCD); virtual terminator; checking

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0036-06

## 0 引言

近几年来,智能变电站自动化系统逐步得到许多应用<sup>[1~7]</sup>。设备的设计方式已转变为以变电站配置描述(substation configuration description SCD)为主的配置方式,它向设备的设计、调试、运行维护提出了新的挑战。文献[5]提出了利用 SCD 生成远动系统装置定义的通用方法。文献[6]研究了从 SCD 向 CIM/E 模型转换的方案。文献[7]研制了基于 IEC61850 各种保护装置的在线协同测试系统。

传统保护装置以开入开出、交流输入端子到端子的电缆硬连接处理输入与输出信号,智能变电站通过网络通信传输 GOOSE、SV 等信号实现设备之间的联系。国内各生产厂家统一引入虚端子<sup>[8~9]</sup>,形成设备之间的虚连接,包括发送设备、发送端虚端子号、接收设备、接收端虚端子号等信息。目前设计

院或集成商主要以虚端子表(Excel 文件)设计 GOOSE、SV 输入虚端子,表达其原始的设计意图。生产厂家或集成商依照虚端子表文件,在 SCD、IED Inputs ExtRef 子元素中予以表达。

目前,由于设计院的虚端子表文件与生产厂家的 SCD 在虚端子配置上存在许多不一致性,影响了设备虚端子配置的正确性。因此需要设计一种 SCD 智能比对软件,将 SCD 与虚端子表文件中各虚端子信息进行一一比对,检查其正确性。

## 1 问题的提出

在 SCD 文档中,各厂家用 IED、LN0 Inputs 的多条 ExtRef 子元素描述其输入虚端子以及对应的内部虚端子号 intAddr,用 iedName 表示发送设备编号,用 6 个子项 daName、doName、ldIns、lnClass、lnInst、prefix 联合表达发送虚端子号。1 个虚连接例

子如下。

```
< LNO desc = "" inst = "" lnClass = "LLNO" >
< Inputs desc = "" >
< ExtRef daName = "instMag. i" doName =
"Vol" iedName = "MM1101A" intAddr = "SVLD/SV-
INGGIO1. AIn1. instMag. i" ldInst = "MU01" lnClass
="TVTR" lnInst = "1" prefix = "MUA1" / >
.....
< /Inputs >
< /LNO >
```

目前各设计院的虚端子表文件格式与内容各不相同。一种常见的虚连接格式有接收端名称(中文)、接收端虚端子号、信息描述、对侧装置(中文)、对侧装置虚端子号等。从理论上讲,如果设计院定义了标准的虚端子规范,SCD 严格按照设计院虚端子表来配置 SCD 的 Inputs,就不存在一致性问题。但是事实上,有 4 种原因导致 SCD 与虚端子表 Excel 文件之间虚端子的确存在许多不一致地方,如下。

1) 各设计院的虚端子表文件有各自的中文表

述习惯与方式,表的各列含义不尽相同、不规范。

2) 设计院设计人员缺乏对 SCD 知识的了解。设计院用接收设备、发送设备的中文名称分别表示接收与发送设备,而 SCD 的 Inputs 是用设备英文名称 iedName 表示发送设备。因此,虚端子表文件中接收与发送设备的中文名称与 SCD 的 Inputs 中发送设备英文名称,不是直接的一一对应关系,需要做映射。除了设备名,双方设计人员设计接收与发送虚端子号时不小心写错,就容易造成不一致。

3) 设计院设计人员有时为了简洁描述,在 Excel 文件采用“适用于…”等简化字样,表示多个相似线路、变压器装置之间的相似虚端子内容。一种典型虚端子表文件的格式及其简化表达方式如表 1 所示。其中有两种简化表达,第 1 种表示西里线路合并单元的 GOOSE 开入同样适用于热水塘、团结线路合并单元,SCD 设计人员应根据这句话,复制生成热水塘、团结合并单元中相似的输入 GOOSE 虚端子,把接收设备、发送设备名中“西里”分别换成“热水塘”、“团结”,但虚端子号不需要变动。第 2 种简约表达说明主变压器相关虚连接适用于 1 号、2 号主变压器,需

表 1 一种典型的 Exeel 虚端子文件的格式及其简化表示方式

接收端名称	接收端虚端子号	信息描述	对侧装置	对侧装置虚端子号
110 kV 母联保护测控合一装置(GML122MCE-11)				
110 kV 母联测控 SV 输入				
110 kV 母联测控 SV 输入	SVLD/SVINTCTR18. Amp. instMag. i	A 相测量电流	110 kV 母联合并单元	MU01/MATCTR1. Amp. instMag. i
110 kV 母联测控 SV 输入	SVLD/SVINTCTR19. Amp. instMag. i	B 相测量电流	110 kV 母联合并单元	MU01/MBTCTR1. Amp. instMag. i
110 kV 母联测控 GOOSE 输入				
110 kV 母联测控 GOOSE 开入	PI/GOINGGIO10. SPCS01. stVal	同步状态异常	110 kV 母联合并单元	RPIT/GOAlmGGIO1. Alm1503. stVal
110 kV 母联测控 GOOSE 开入	PI/GOINGGIO14. SPCS01. stVal	合并单元检修状态	110 kV 母联合并单元	RPIT/GOAlmGGIO1. Alm1500. stVal
110 kV 西里线路合并单元(适用于 110 kV 西里、热水塘、团结线路合并单元)(简化表达 1)				
西里线路合并单元 GOOSE 开入	RPIT/GOINGGIO1. DPCS0274. stVal		110 kV 西里线路智能终端	RPIT/XSWI1. Pos. stVal
西里线路合并单元 GOOSE 开入	RPIT/GOINGGIO1. DPCS0275. stVal		110 kV 西里线路智能终端	RPIT/XSWI2. Pos. stVal
主变压器保护 A(适用于 1 号、2 号主变压器)(简化表达 2)				
主变压器保护 A SV 输入	SVLD/SVINPATCTR1. Amp1. instMag. i		主变压器高压侧合并单元 A	MU01/PATCTR1. Amp. instMag. i
主变压器保护 A SV 输入	SVLD/SVINPATCTR1. Amp2. instMag. i		主变压器高压侧合并单元 A	MU01/PATCTR2. Amp. instMag. i

要重生成变压器1号、2号的相似虚连接,把其中“主变保护”分别替换成“1号主变压器保护”和“2号主变压器保护”字样。厂家设计人员需根据Excel的简化表达,配置SCD中相关设备的类似虚端子。

4) 在虚端子表Excel文件中接收、发送设备(对侧装置)两列设备名均采用中文名称,由于习惯不同,设计院定义的设备中文名称与SCD中IED中文描述不完全一样,例如,Excel侧发送设备名为“110千伏西里线路智能终端”,SCD侧设备中文描述为“110 kV 西里线智能终端”,前者用千伏、线路,后者用kV、线,在“终端”后加了设备型号DBU814。虽然两种设备名是指同一个设备,但是造成两侧表达却不一致。

目前各厂家的SCD配置工具没有提供对SCD与虚端子表文件的智能自动比对功能。

## 2 SCD智能比对软件的工作原理

SCD智能比对软件先要分别形成SCD侧与Excel侧虚连接,再做一一比对,找出不一致地方。关键点有两个:1) 需从SCD获取各虚连接、读取IED设备名描述desc,再读取Excel文件中接收端与发送端设备中文名称,把Excel侧设备中文名智能映射为SCD侧设备名描述,才能形成与SCD侧类似的Excel侧虚连接;2) 在获得两侧虚连接后,进行正向与反向比对,找出两侧不一致及其细节,向双方人员指出错误,以便纠正。

这里研发的智能变电站SCD智能比对软件首先读取SCD,解析每个IED的设备编号、中文描述等属性,再沿某IED节点逐层遍历直到LN0的Inputs子节点,解析出其有效的虚连接,再搜索LN0与其它LN节点,找到各数据对象DOI,获得其属性desc作为发送虚端子号与内部虚端子号的信息描述,形成SCD侧虚连接,保存到SCD侧虚连接链表,并在界面上以列表显示这些SCD侧虚连接。

然后一次性读取多个虚端子表文件,解析其内容,获取原始虚连接记录,获得全站所有设备中文名称。再解读其中的简化表述,正确地扩展为虚连接。将Excel侧每个设备中文名称与SCD侧所有设备描述逐一进行比较,找到与其最匹配的那个SCD侧设备描述,建立Excel侧设备中文名称与SCD侧设备描述的映射表。

根据解读后的Excel虚连接和映射表,将Excel侧接收端与发送端设备的中文名称换成SCD侧设备描述,得到SCD侧该设备的编号,再加上Excel原有的接收端(发送端)虚端子号等,生成了比对用的Excel侧虚连接。

将每个SCD侧虚连接与Excel侧虚连接逐一做正向、反向比对,得到4种比对结果,即比对成功、SCD中有而Excel中没有虚连接、Excel中有而SCD中没有虚连接、只有接收端或发送端虚端子号没有匹配上虚连接,在界面上以表格分类显示它们。设计了形成比对报告模块,将4种比对结果、SCD中原始虚连接、Excel中原始虚连接等分别保存到比对报告Excel文件的各个工作表,以便查看与检查该次比对结果。当采用比对软件发现SCD与Excel虚端子表文件的不一致地方,修改和纠正SCD或Excel文件中错误,再做比对,循环检查直到完成。

SCD智能比对软件的流程图如图1所示。



图1 SCD智能比对软件的流程图

## 3 功能设计

SCD智能比对软件有5个子系统,分别是读取

SCD 及形成 SCD 虚连接、读取 Excel 文件与制作映射表、比对 SCD 与 Excel 两侧虚连接、分类显示比对结果、生成比对结果报告等。SCD 智能比对软件的功能树如图 2 所示。

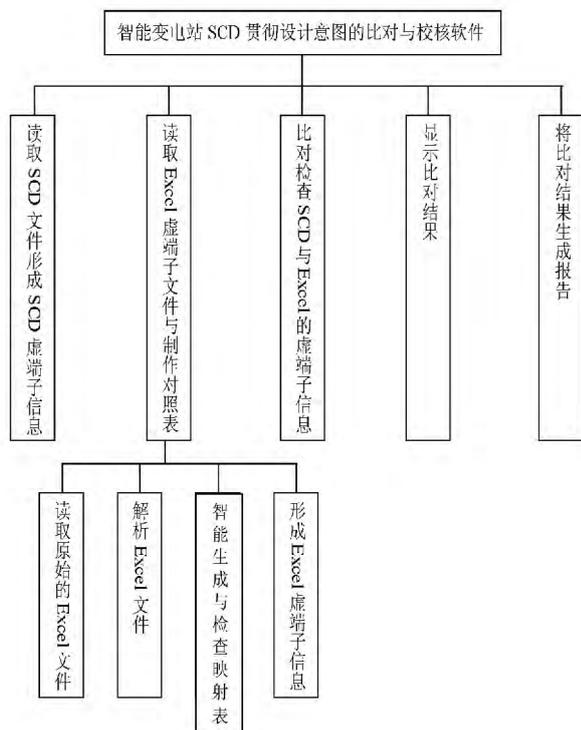


图 2 SCD 智能比对软件的功能树

读取 SCD 及形成 SCD 虚连接子系统实现: 1) 选取 1 个 SCD 文件, 解析 SCD 得到各 IED 的设备编号、设备描述等属性、各虚端子号的信息描述; 2) 将解析后 IED 信息显示在界面上, 能够查找某设备的基本信息; 3) 读取各设备 Inputs 中各虚连接, 将它们显示在界面上, 可排序, 能够定位查看。

读取 Excel 文件与制作映射表子系统实现: 1) 一次性读取 1 个或多个 Excel 虚端子表文件, 将它们显示在界面的表格中; 2) 解析 Excel 文件中那些简化表达的文字, 解读与扩展, 形成虚连接; 3) 从解析、解读的虚端子中接收端、发送端设备两列, 提取该 Excel 文件中所有设备的中文名称, 将每个依次与 SCD 侧 IED 设备描述一一智能比较, 找到最接近的 SCD 侧设备描述, 给出匹配度, 形成两侧设备名映射表; 4) 形成和显示 Excel 侧虚连接。比对 SCD 与 Excel 两侧虚连接子系统是把 SCD 侧虚连接与 Excel 侧逐条做正向比对, 找到与它匹配的虚连接, 然后做反向比对, 即将 Excel 侧与 SCD 侧虚连接比对, 最后形成 4 种比对结果。

分类显示比对结果子系统实现以表格显示 4 种

比对结果。对于只有接收端或发送端虚端子号没有匹配上的两侧虚连接, 用不同背景色突出对照显示出两侧虚端子号不一致的细节, 以便纠正。

生成比对结果报告子系统将 4 种比对结果、SCD 侧虚连接、Excel 中原始虚连接等 6 类结果输出到某比对报告文件(Excel 文件)。

## 4 关键技术

### 4.1 解析 SCD、形成虚连接及优化搜索

SCD 属于 xml 文件, 不易直接分析。需从 SCD 获取所有 IED 的设备名编号及其中文描述, 获取各 IED 的 Inputs 中各虚端子。为了方便地浏览 SCD 各条虚连接的虚端子号、了解其含义、查找出错的虚连接, 需给出每条 SCD 侧虚连接中每个接收虚端子号、发送端虚端子号的信息描述。

先遍历每个 IED 节点, 得到设备编号及其描述, 再由 IED 到 LD 逐层找到 Inputs 子节点, 得到各虚端子信息, 将其中 6 项子项组合成发送端虚端子号, 保存到 SCD 侧虚连接链表。再读取各 LN 的各 DOI 子节点, 的属性 desc, 作为接收端或发送端虚端子号描述, 保存到 DOI 的 desc 链表。对每个 SCD 虚连接的接收端与发送端虚端子号, 遍历 DOI 的 desc 链表, 查找相应虚端子号描述。

这里存在一个优化设计问题, 因为查找目标虚端子号描述的次数非常多, 比如某 SCD 有 3 760 条虚连接, 139 437 个数据对象 DOI, 就可能产生几千万次查找, 非常消耗时间。查找虚端子描述的优化方法是在解析 SCD 文件时, 获取每个 IED 节点后, 马上针对该 IED 中各虚连接的接收端虚端子号, 就在本 IED 的 DOI 遍历查找其描述。而发送端虚端子号描述只能等到全部 IED 遍历后才做查找。这样可在一定程度加快了查找各虚端子号描述的速度。

### 4.2 解读虚端子表 Excel 文件及其设计意图

读取与解析 Excel 虚端子文件包括一次性读取多个 Excel 文件、解析与解读虚端子、智能生成映射表、形成比对用 Excel 侧虚连接等功能。

如前所述, 设计院设计人员对多个相似设备具有相似虚端子的情况, 采用简化表达。比如在一组 GOOSE 输入虚端子的上方, 加上“220 kV 晴朗线路测控装置(适用于 220 kV 晴朗、色尔古 I、色尔古 II 线路测控装置)”等简化文字, 程序就要解读此类文

字,首先生成 220 kV 晴朗线路测控装置的 GOOSE 输入虚端子,然后再把其中“晴朗”替换为“色尔古 I (II)”,为色尔古 I、色尔古 II 线路测控装置新增相似 GOOSE 虚端子。

#### 4.3 SCD 与 Excel 两侧设备中文名智能匹配算法

SCD 中虚连接包括发送端与接收端设备编号, Excel 虚端子表文件包含发送端与接收端中文名称。需要先把 Excel 侧发送与接收端中文名称映射为 SCD 侧设备中文描述,建立 Excel 侧设备中文名称与 SCD 侧设备描述的映射表,进而把 Excel 侧设备中文名称映射为 SCD 侧设备编号,才能形成比对用 Excel 侧虚连接,进行两侧比对。

SCD 与 Excel 两侧设备中文名智能匹配是把某 Excel 侧设备中文名(含有中文、字母、数字)当作为源串,把所有 SCD 侧设备描述当作目标串进行比较。采用 2 种方法融合匹配。算法 1 是对传统 GST 比对算法的改进,在计算匹配度时增大了较长“公共子串”所占权重,使其比较短“公共子串”更容易被匹配上,有效避免了传统 GST 算法存在的有较短“公共子串”时的匹配度可能比有较长“公共子串”大的问题。算法 2 先采用判断源串与目标串中每个字符是中文双字节字符还是字母或数字,再不管顺序找到两个串中相同字符个数,用它去除两个串中较短串长度,作为第 1 匹配度。再考虑源串和各目标串中数字(字母)出现的先后顺序,尤其是首数字与字母和末数字与字母是否相同。当发现源串与某目标串的数字或字母的顺序分别匹配上,增大辅助匹配度。将第 1 匹配度和辅助匹配度进行加权求值,得到两个字符串最后的匹配度。这样可得到源串与 SCD 侧所有设备描述的匹配度,将它们排序,匹配度最大的目标串为最终匹配上的 SCD 侧设备描述。

由于 SCD 与 Excel 设计人员在设备名称表述有一定差异,同一名称或关键词表达有所不同,比如 Excel 虚端子表文件使用“千伏”、“一”、“二”、“母差”分别与 SCD 中“kV”、“1”、“2”、“母线”是等价的。上述智能比较方法未必有效,因此增加了手工匹配策略,手工制作一些常见关键词等价替换关系,在字符串比较时将 Excel 侧设备中文名做关键词替换,帮助形成合适的两侧设备描述映射表。

多次实验表明本智能字符串自动比较方法与策略有较高的正确率,达到 90% 以上。匹配度数值能较真实反映源串与多个目标串的匹配程度。对匹配

不准确的映射项允许在界面手工修正。

#### 4.4 自动比对、分类显示比对结果

分别形成 SCD 侧与 Excel 侧虚连接后,自动地将两侧虚连接进行正向与反向比对。提供手工同步比对检查手段,即选中某条 SCD 虚连接时,在界面右侧可同步显示与之匹配的 Excel 侧虚连接,如果没有找到完全匹配,则在信息栏显示与 SCD 侧虚连接具有相同虚端子号的 Excel 侧相近虚连接。

形成 4 种比对结果,将它们在 4 个表格中分类成组表示。尤其是对于只有接收端或发送端虚端子号没有匹配上虚连接的比对结果,每组比对结果分成两行进行显示,分别表示 SCD 侧与 Excel 侧虚连接,对未匹配上虚端子号用不同背景色上下对照显示,以提醒操作者该错误的存在。

#### 4.5 形成比对结果报告

除了在界面上显示比对结果,还能形成比对结果报告文件,把比对结果数据保存到一个比对结果 Excel 文件的多个工作表中,以便在比对过程中查找比对出错原因、形成最终的比对报告。实现方法是调用微软提供的访问 Excel 文件的 OLE 接口函数。一般采用向每个单元格写入数据方式,但该做法的效率很低。例如将几 M 的数据写入 Excel 文件时,往往需要十几分钟才能完成。这里采用内存拷贝方式,即先将比对结果数据写入一个字符串数组,再把该字符串以复制方式送入 Excel 工作表的目标区域,再调用 Excel 工作表的粘帖接口函数 Paste,一次性写入 Excel 文件。现在实现了只需 2 分钟左右完成一次比对结果报告的形成。

## 5 软件运行效果与分析

### 5.1 运行效果

设计的 SCD 智能比对软件实现了各子功能。比对结果的运行界面之一如图 3 所示。第 4 种比对结果每 2 行以不同背景颜色突出显示两侧只有接收端或发送端虚端子号不一致细节,如第 1 行 SCD 侧: PIO/DevGOIN1GGIO1. DPCS03. stVal,第 2 行 Excel 侧: PIO/DevIN1GGIO1. DPCS03. stVal。两侧接收虚端子号不一致。

软件已在四川省多个变电站调试工作中得到运用,取得了良好的调试效果,发挥较大的作用。如果利用现有厂家 SCD 配置工具查找 SCD 侧虚端子,再



图 3 本软件中显示各比对结果的运行界面

人工查看 Excel 虚端子文件进行校核,几乎很难完成 SCD 文件与 Excel 虚端子表文件比对任务。因为现有 SCD 软件查找 SCD 侧虚端子的操作较繁琐,两侧虚端子信息的数量往往有几千条,靠人工比对需要很长时间,很容易发生漏判、误判,工作效率很低。系统能够准确比对、指出不一致、错误的细节,直到找出所有可能出错的地方。运用本软件对某变电站近 3 000 条虚连接的 SCD 比对与修改,只用了几天就完成一次性比对出 300 多条 SCD 与 Excel 虚端子表文件不一致与错误的地方。

### 5.2 比对出错的原因分析

通过多个智能变电站的许多次 SCD 比对调试,发现几类出错原因如下。

1) 对于 SCD 中有而 Excel 中没有虚连接、Excel 中有而 SCD 中没有虚连接情况,说明 Excel 虚端子文件或 SCD 侧有些虚端子不完整。

2) 由于设计人员的粗心大意、笔误,会将 Excel 中设备名写错,比如设备名本应是“2 号主变压器本体智能终端 1”,误写成“1 号变压器本体智能接口单元 2”。把虚端子号写错或大小写不对,比如 SCD 侧接收端虚端子号为 PI01/GOINGGIO2. SPCS06. stVal, Excel 侧却写成 PI01/GOINGGIO2. SPCS01. stVal。

3) SCD 与 Excel 两侧对虚端子号的引用路径、对各层数据属性的表达方式不一样导致两侧不一致,比如 SCD 侧: GO/BinInGGIO0. DPCS02. stVal, 而 Excel 侧: MU/GOI. BinInGGIO0. DPCS02. stVal。

## 6 结论

软件自 2012 年 8 月以来已经在多个智能变电站的调试中得到了成功运用,已经实现了对集成商的 SCD 与 Excel 虚端子表文件比对功能,通过智能中文字符串比较、自动比对两侧虚连接等工作,能够发现 SCD 与 Excel 两侧虚端子不一致地方与错误细节,大大提高了比对的效率和准确性,有力促进了智能变电站中 SCD 贯彻设计意图的检查与实施。

由于各设计院的 Excel 虚端子表文件格式不统一,给比对造成一些困难,解决此问题的最好方法是由 SCD 工具将 SCD 配置与虚端子设计一体化,用 SCD 工具直接配置 Inputs 各虚端子,不再从 Excel 虚端子表文件读取虚端子。而这项工作还在研发中,其完善还有个过程。因此在一段时间内,仍需由设计院用 Excel 虚端子表文件定义虚端子,因此仍有必要对 SCD 和 Excel 虚端子表文件进行智能化比对,检查两者一致性,保证设备的正常运行。

### 参考文献

[1] IEC 61850-6, Communication Networks and Systems in Substations: Part 6 Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs. [S].

(下转第 58 页)

### 3 判断方法及应注意的问题

(1) 有载分接开关在切换过程中,过渡电阻发生规律性的变化,回路电流值亦发生规律性变化,通过检测电流值判定分接开关进入和退出“桥接”的顺序、“桥接”过程时间  $t_2$ 、三相最大不同步时间等。由于分接开关的前半桥过渡电阻工作时间  $t_1$ 、后半桥过渡电阻工作时间  $t_3$  与过渡电阻“桥接”时间  $t_2$  是由机械机构的角度来固化的,相互间存在固定的时间关系,测量出任一时间满足试验参数即可证明其他过渡电阻工作时间满足试验要求。

(2) 当试验电压较低时,测得的电流波形可能会出现不圆滑的区域,但只要电流不出现回零现象,应判断为有载分接开关动作过程正常,各工作触头、过渡电阻回路接触状态良好。

(3) 电流波形出现长时间零值区域或频繁过零现象,应判断为分接开关切换过程对应的触头接触不良或过渡电阻断线。但当试验电压较低时,上述结论准确性不高,应使用高电压、大电流试验方法进行验证。

4) 有载调压消弧线圈分接开关动作特性测试,由于其存在空气间隙,交流测试只能使用零序法接线测试,试验电流较大,级差电流被淹没在测试电流中,不能显示过渡电阻“桥接”处的变化,应采用电流连续性分析和判断分接开关交换过程的正确性。

\*\*\*\*\*

(上接第 41 页)

[2] 国家电网公司. 智能变电站技术导则[S]. 北京: 国家电网公司 2009.

[3] 林知明, 蒋士林. 基于 SCL 模型的配置工具的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 82 - 85.

[4] A. Apostolov, D. Tholomier. Simplifying the Configuration of Multifunctional Protection Relays [C]. Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005, College Station, TX, United states: 281 - 286.

[5] 孟正华. 智能变电站虚端子设计初探[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(7): 138 - 140.

[6] 张海东, 张鸿, 宋鑫, 等. SCD 模型到 CIM/E 模型的转换方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 91 -

### 4 结 论

直流法测试有载分接开关的动作特性,由于存在测试电压低、使用范围窄、波形解析解不唯一等问题,使得技术人员对测试波形持不同意见,往往导致漏判误判。交流法具有测试电压高、符合变压器实际运行工况,能反映分接开关切换过程中每一瞬间的通流状态,解析结论唯一,能可靠地反映开关切换过程中的技术状态。在现场试验中,两种测试方法应配合使用。

#### 参考文献

[1] 冯仲民. 有载分接开关的应用[M]. 北京: 中国电力出版社 2004.

[2] 张德明. 有载分接开关国内现状及发展动向[J]. 变压器 2000, 37(1): 36 - 39.

[3] 陈敢峰, 姚集新. 变压器分接开关实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2002.

[4] 梁之林. 变压器有载调压开关交、直流测试波形分析[J]. 吉林电力 2007, 35(4): 31 - 33.

[5] 王世阁, 钊洪壁. 电力变压器故障分析与技术改进[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[6] 吉锋. 有载分接开关直流波形测试及其判断[J]. 变压器 2007, 44(1): 55 - 57.

[7] 张锋. 有载分接开关触头烧损事故的分析及预防[J]. 变压器 2003, 40(4): 30 - 31.

(收稿日期: 2014 - 06 - 05)

95.

[7] 宋杰, 靳希, 鲍伟, 等. 基于 IEC61850 的智能继电保护装置协同测试系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 59 - 63, 68.

[8] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 124 - 127.

[9] Q/GDW 396 - 2009, IEC 61850 工程继电保护应用模型[S].

#### 作者简介:

郑永康(1977), 博士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站二次系统、继电保护、自动化。

(收稿日期: 2014 - 06 - 26)

# 智能变电站监控与视频系统联动方式研究

廖小君<sup>1</sup>, 黄忠胜<sup>1</sup>, 吕飞鹏<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072; 2. 四川大学, 四川 成都 610065)

**摘要:** 介绍了智能变电站生产辅助系统中视频监视系统的应用情况, 对视频监视系统和变电站监控系统的智能联动应用情况进行了介绍。探讨了目前视频监视系统和智能变电站监控系统联动采用的主要方式, 提出了 5 种可行的智能联动模式, 对不同模式实现研究分析, 从实现智能联动的输入方式、应用方式、经济性、可靠性、适用性等方面进行分析, 提出了不同联动方式的适用前景, 并对智能变电站的视频联动高级应用提出了一种实用性良好的组合联动方式, 并成功应用于 110 kV 智能变电站中。

**关键词:** 智能变电站; 视频监控; SCADA 系统; 智能联动

**Abstract:** The application of video monitoring system to the auxiliary system in smart substation is introduced, and the application situation of intelligent linkage between video monitoring system and substation supervision control system are introduced too. The main way at present adopted by video monitoring system and supervision control system in smart substation is discussed, and 5 feasible intelligent linkage modes are given. The different ways are studied and analyzed as viewed from the input mode, the application mode, the economy, the reliability and the applicability and so on, and thus the application prospects of different ways of linkage are put forward. A combined linkage with good practicality for the advanced application of video linkage in smart substation is proposed, which has been successfully applied to 110 kV smart substation.

**Key words:** smart substation; video monitoring; SCADA system; intelligent linkage

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0042-04

## 0 引言

智能变电站的生产辅助控制系统作为智能变电站的重要组成部分起到越来越重要的作用, 其中视频监视系统起到了非常重要的作用<sup>[1, 2]</sup>。一体化系统设计是目前生产辅助系统的发展趋势, 目前视频监控与其他辅助系统的结合较为紧密, 也实现了一些联动, 如门禁系统、通风系统、照明等<sup>[3]</sup>。为适应智能变电站的高级应用, 目前有一些视频监控系统与变电站的监控系统 SCADA 系统进行了一些联动, 实现断路器操作、隔离开关操作时能够将视频监控系统的摄像头进行联动进行监视, 实现顺控等的联动监视。

变电站监控系统与视频系统的智能联动对于无人值班变电站和智能变电站的运维是非常有意义的, 对于智能变电站的顺控操作, 虽然 SCADA 系统能够通过各种位置信号判断操作是否正确, 但对于监控人员而言如果能够在顺控操作或者远方操作时直接能

通过视频看到断路器和隔离开关分合位置信号, 甚至分合过程, 这无疑能提高操作的安全性。同时, 对于事故跳闸后, 如果能够快速定位于故障断路器, 或者相关故障设备, 则便于监控人员更快、更准地对事故进行分析确认, 提高事故处理速度和准确度。

## 1 目前监控与视频联动模式介绍

目前监控与视频联动的主要模式是针对智能变电站, 利用监控系统的 GOOSE (generic object oriented substation event) 信号进行信息沟通实现联动, 文献 [4] 将变电站遥视系统和数字化变电站的 GOOSE 通信网络结合在一起, 详细介绍了通过中间件或通信服务器实现与遥视系统联动的两套方案。文献 [5] 则对方案中的关键技术如映射关系的建立、GOOSE 报文的捕获、GOOSE 报文的解析和信息安全防护等进行了深入研究。智能联动的关联内容目前主要有两大类: 断路器和隔离开关变位联动; 事故变位联动。

## 2 监控系统与视频智能联动方式探讨

变电站监控系统与视频系统进行联动方式,根据作用形式可分为直接方式和间接方式。直接方式是指监控系统直接和视频监控系统进行信息交换实现智能联动,间接方式指视频系统通过其他信号间接与监控系统进行关联联动,如通过测控装置、通过 GOOSE 相关信息、通过 MMS 相关信息、五防系统等等。以下对各种联动方式可能的实现方法分别进行分析。

### 2.1 硬接点关联方式

对于一些不具备数字化信息采集的视频监控系统,或者对于常规变电站,采用硬接点方式通过开入变化关联实现间接联动是一种最简单、经济的实现方式。

对于断路器变位联动,将断路器和隔离开关的位置辅助接点通过二次电缆接入视频监控系统,视频监控系统通过预设位置与硬接点开入进行关联,这样在监控系统进行断路器和隔离开关操作时则能够将视频画面直接与断路器和隔离开关进行联动。

对于事故变位联动,则将需要进行视频联动监视的事故动作信号硬接点接入到视频监控系统,如油温高告警、漏油告警等可将相应的摄像头进行关联设置,在发生上述信号时摄像头可直接显示相关油温、油位等情况,实现方式示意图如图 1 所示。

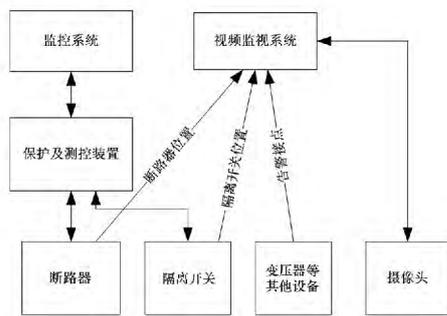


图 1 硬接点联动方式

### 2.2 智能终端 GOOSE 关联方式

采用硬接点方式,将增加许多二次电缆,因此接线复杂,一些信号可能需经过重动扩展,增加了系统实现的难度,降低了可靠性。对于智能变电站而已,由于断路器位置、非电量信息等等是通过各间隔的智能终端或者本体智能终端采集,以 GOOSE 信号的数字化方式通过光纤通道发送给需要的智能设备,如测控、保护等等,从而实现了信息的有效共享

和数字化、光纤化、网络化传输。对于视频监控系统而已,作为智能变电站的一种智能装置,只要具备 GOOSE 接口,则能够通过 GOOSE 网络接收到硬接点一样的变位信息,就可以实现相同断路器开关变位联动和事故联动。实现方式示意图如图 2 所示。

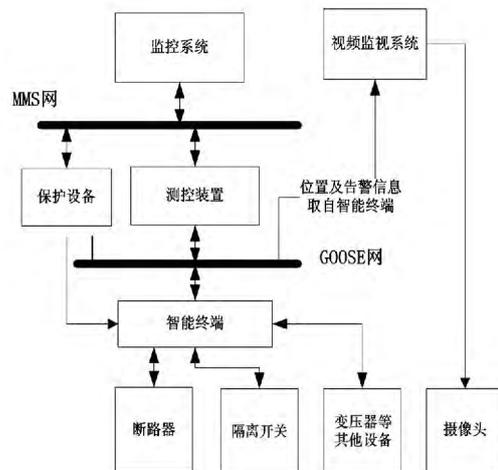


图 2 智能终端 GOOSE 联动方式

### 2.3 测控及保护等 GOOSE 关联方式

变电站监控系统进行断路器和隔离开关的远方遥控是通过测控装置发送 GOOSE 控制命令来进行的,因此通过测控装置的 GOOSE 信息可实现遥控的智能联动。对于保护动作的断路器变位跳闸,其动作命令也是通过 GOOSE 命令到智能终端的,因此也可以通过保护的 GOOSE 跳闸命令实现断路器跳闸的智能联动。

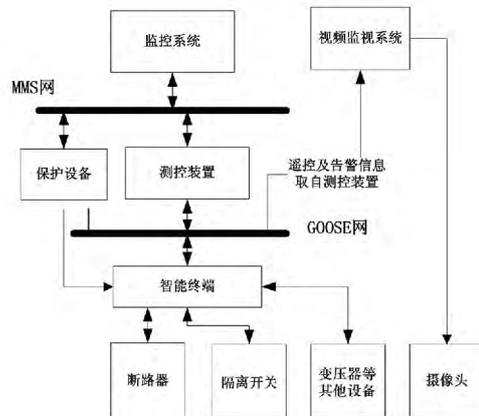


图 3 测控装置 GOOSE 联动方式

此种方式需视频监控系统接收测控装置或者保护的 GOOSE 遥控命令或者 GOOSE 跳闸命令,并与相关的断路器或隔离开关对象相对应的摄像头进行预设关联。由于目前保护跳闸多采用点对点方式,因此该方式并不适合于进行保护跳闸联动。实现方

式示意图如图 3 所示。

采用此种方式相对于采用智能终端通过断路器位置或者隔离开关位置 GOOSE 信息进行联动能够在断路器或者隔离开关进行分合前就将摄像头提前将位置调整好,这样能更好地监视到分合过程,尤其对于隔离开关很直观,但这种方式对于不通过测控装置的手动操作则不能实现,另外对于保护分合闸也不能进行监视。

### 2.4 通过 MMS 关联方式

监控系统与测控及保护进行通信通过 MMS 网络,通过 61850 报文方式进行信息交换。因此,视频监控如果具备 MMS 的 61850 相关的通信能力,则可以通过 MMS 网络接收测控装置的位置遥信信息或者监控系统的遥控信息以及保护的動作遥信信息等等。

此种方式根据接收的 MMS 信息类型,可实现位置变位联动、事故关联联动,也可以实现与监控系统通过 MMS 的直接联动,这种方式是实现监控系统和视频系统直接联动的最易实现的方式,也是目前监控和视频系统直接联动的主要方式。

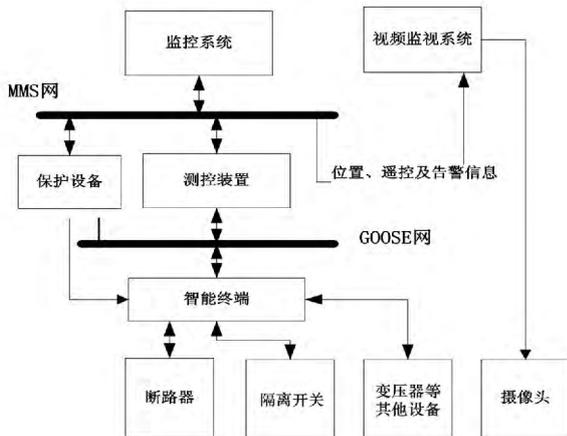


图 4 通过 MMS 联动方式

采用此种方式,需要视频系统同测控、保护进行 MMS 通信,一些视频系统不具备 61850 的通信接口,因此该种方式在通信接口上需进行开发。

### 2.5 监控系统与视频系统一体化关联方式

目前,智能变电站的一体化设计成为一种趋势,采用此种方式,监控系统直接和视频监视系统进行信息的交互,并根据需要进行联动的内容进行联动控制,由于监控系统是遥控的发起方,亦是各种信号收集的平台,因此能够很方便地实现如前所述的遥信(位置和告警)变位联动、遥控联动及其他高级联

动。其示意图如图 5 所示。

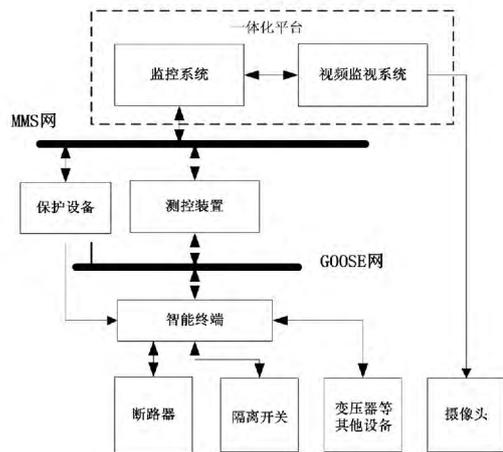


图 5 一体化关联方式

采用此种方式,需监控系统和视频监视系统进行信息交互,由于监控和视频监视系统往往为不同厂家,因此需进行协同开发,开发难度较大。

## 3 各种方式比较

根据上述智能变电站监控系统和视频监视系统的 5 种实现联动方式分析,对各种方式的优缺点进行比较。

**接口方式比较:**除硬接点外,其余 4 种方式均采用数字化、信息化接口方式。接口通用性方面,采用 GOOSE 通信方式通用性最好,宜实现;采用 MMS 和一体化进行通信方式,通用性较差,需单独进行开发,较难实现。

**可靠性比较:**硬接点方式采用电缆方式,由于电缆经过开关场,易受干扰,可靠性较差;采用 GOOSE 方式,经过的中间环节较少,且 GOOSE 采用光纤进行数字信号传输,因此可靠性较高。采用 MMS 和一体化联动方式,涉及到多个环节和系统,因此可靠性比 GOOSE 方式稍差。

**功能扩展应用:**采用硬接点方式最不灵活,难以扩展和维护,且只能实现位置和信号变位联动;采用智能终端的 GOOSE 和测控装置的 GOOSE 联动方式只能分别对应遥信变位联动和遥控联动,扩展性一般;采用 MMS 和一体化联动能实现多种方式联动,扩展性良好。

**经济性比较:**采用硬接点和 GOOSE 方式经济性较好,开发难度小;采用 MMS 和一体化方式,开发

难度大,投资较大。

适用性比较:硬接点适合于常规站或者不具备通信能力的视频监控系统;GOOSE 联动方式适用性好,能应用于任何监控系统与视频监控系统;MMS 联动适用于具有 61850 通信能力的视频监控系统;一体化联动方式则适用性较差,对于已经建成的智能站不适用,适合于新建智能站并采用一体化设计的系统。

#### 4 一种组合式智能联动方式应用

根据上述联动方式的比较,考虑到目前智能变电站的发展情况,采用 GOOSE 联动方式是较为灵活、可靠性较高、易实现、投资较少的一种方式,并且适用性广,可适用于任何智能站不同的监控和视频监控系统。为了实现更强的功能,可将智能终端 GOOSE 联动和测控 GOOSE 联动进行组合联动,这样既可以实现断路器和隔离开关位置变位联动(如因保护跳闸等),也可以实现遥控时预先进行摄像头定位,从而实现监控系统和视频监视系统的联动高级应用,目前该种联动方式已在 110 kV 实训智能变电站得到了良好应用,实现了顺控联动(预先定位)、仿真培训变位联动、油位告警联动等功能。

#### 参考文献

- [1] 苏永春,辛建波,龚晓波. 数字化变电站保护与视频系统联动控制方案[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 33-37.
- [2] 徐胜朋,姜利,袁建学. 利用变电站远程视频系统实现安全监控[J]. 电力系统通信, 2008, 29(190): 15-21.
- [3] 黄敏,乐坚浩,王志毅. 220 kV 变电站远程视频监控中心系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 69-71.
- [4] 娄源利,龚晓波,胡敏强,等. 与 GOOSE 通信联动的数字化变电站遥视系统的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 69-71.
- [5] 龚晓波,吴在军,胡敏强,等. 与 GOOSE 联动的数字化变电站遥视系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 94-98.

#### 作者简介:

廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事继电保护方面研究及信息系统方面的研究;

黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护和智能变电站二次系统方面的研究;

吕飞鹏(1968), 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统方面的研究。

(收稿日期: 2014-06-03)

(上接第 14 页)

- [5] 郝晓平. 电力系统实时数字仿真技术及应用发展[J]. 湖北电力, 2009, 33(4): 7-9.
- [6] 叶廷路, 王晓蔚, 高骏. 电力系统全数字仿真装置在河北电网的应用调试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 105-108.
- [7] 柳勇军, 梁旭, 阎勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 39-42.
- [8] Kosterev DN, Taylor CW, Mittelstadt WA. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage[J]. IEEE Trans. Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [9] 张晋华, 刘云, 印永华. 特高压交/直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2008, 31(23): 1-5.
- [10] 杜瑾. 云计算在军事仿真中的应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(25): 6995-6997.
- [11] 田芳, 宋瑞华, 周孝信, 等. 全数字实时仿真装置与直流输电控制保护装置的闭环仿真试验及分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 57-62.
- [12] Tian Fang, Li Yalou, Zhou Xiaoxin, and et al. Research, Development and Application of Advanced Digital Power System Simulator(ADPSS) [C]. The International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, Japan, 2008.

- [13] 刘钟淇. 风力发电系统中的实时数字仿真技术[J]. 风能产业, 2010(3): 46-51.
- [14] 张松树, 陈勇, 李芳, 等. 电力系统运行方式计算协同系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 270-274.
- [15] 赵林, 王丽丽, 刘艳, 等. 电网实时监控可视化技术研究与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 538-543.
- [16] 刘健, 谢旭, 牛四清, 等. 电网调控仿真培训系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 127-131.
- [17] 程斌, 刘峥, 杨林. 基于视景仿真技术的飞行训练过程仿真再现方法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增): 379-382.

#### 作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

樊艳芳(1971), 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

常喜强(1976), 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王衡(1984), 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2014-04-14)

# 罗氏线圈电子式互感器软件积分 中高次谐波问题研究

叶有名<sup>1</sup>, 刘明忠<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 目前在智能变电站中,应用较多的是罗氏线圈电子式互感器。在对信号进行积分还原过程中,由于硬件积分存在精度以及器件寿命等问题,所以目前许多厂家依旧采用软件积分的方式来实现,由于软件积分是一种离散积分器,因此其积分特性必然会受到采样频率与高次谐波带宽之间的限制。通过某一变电站投运过程中的事故及虚拟仿真,针对目前软件积分存在的一些问题进行深入研究,得出软件积分中,高次谐波还原的带宽限制条件,以期解决目前由于软件积分还原所带来的一些问题。

**关键词:** 罗氏线圈; 软件积分; 高次谐波; 仿真测试; 离散积分; 带宽限制

**Abstract:** At present, Rogowski coil electronic current transformer is widely applied in smart substation. During the reduction of signal integration, there are some problems such as accuracy and device lifetime in hardware integration, so many manufacturers now still adopt software integration. Because the software integration is a kind of discrete integrator, its characteristics is inevitably restricted by sampling frequency and high order harmonic bandwidth. According to an accident happened in the process of being put into operation in a substation, the existing problems of software integration are analyzed by virtual simulation, and the bandwidth constraints for the reduction of high order harmonic in software integration are obtained, which is hoping to solve the problems caused by the reduction of software integration.

**Key words:** Rogowski coil; software integrator; high order harmonic; simulation test; discrete integral; bandwidth limit

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0046-03

## 0 引言

基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器由于其优越的无饱和性,在目前的智能变电站保护、测量及计量数据获取中获得了广泛的应用。罗氏线圈通过测量感应电势获得一次电流变化率,然后再通过积分还原获得一次电流的值。目前流行的积分还原方法,有硬件还原法和软件还原法,硬件积分由于受模拟器件影响,在精度、可靠性、功耗等方面,存在较大问题。软件积分由于易于实现,稳定性、精度等方面的优势,在罗氏线圈电子式电流互感器的信号还原方面获得了广泛的应用。

然而软件积分还原过程中,由于使用离散采样值对一次值进行还原,因此采样频率决定了电流互感器传变频带,高次谐波的传变还原问题是决定了软件积分的还原能力和传输带宽。下面使用主流电子式互感器作为原型,来研究高次谐波的软件

积分还原问题。

## 1 罗氏线圈的基本原理分析

罗氏线圈是由非磁性材料为骨架构成的空心线圈,二次绕在非磁性骨架上(见图 1),采用 PCB 布线技术,保证了互感系数  $M$  的稳定和线圈的重复性。无铁磁材料使罗氏线圈线性度良好,不饱和也无磁滞现象。因此,空心线圈具有优良的稳态性能和暂态响应。

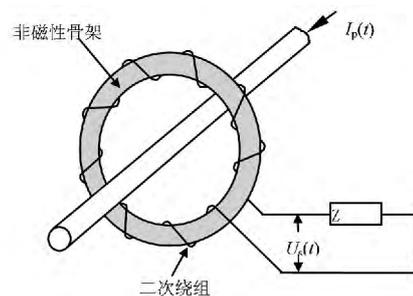


图 1 罗氏线圈工作原理

当罗氏线圈负荷为高阻抗  $Z$  时,空心线圈应用安培环路定理及法拉第电磁感应定律,线圈的输出电压是穿过线圈的一次电流  $I_p(t)$  的函数。

令线圈感应电势为  $e(t)$ ,由于阻抗  $Z$  足够大,则  $U_s(t) \approx e(t)$  近似公式为

$$e(t) \approx \mu_0 \cdot N \cdot A \cdot \frac{di_p(t)}{dt} \quad (1)$$

式中  $\mu_0$  为真空导磁率;  $N$  为匝数密度;  $A$  为单匝面积。

罗氏线圈的等效电路如图2所示。

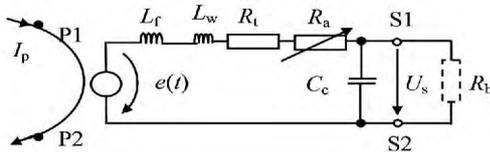


图2 电压输出罗氏线圈电流互感器等效电路

$e(t)$  为空心线圈的电势;  $L_f$  为二次绕组的漏电感;  $L_w$  为引线的电感;  $L$  为  $L_f$  与  $L_w$  之和;  $R_l$  为二次绕组和引线的总电阻;  $U_s(t)$  为需校正的输出电压;  $R_a$  为校正电阻(任选);  $Z$  为负荷阻抗,或  $R_b$  为功率因数为1的负荷阻抗;  $C_c$  为电缆的等效电容;  $P_1, P_2$  为一次端子,  $S_1, S_2$  为二次端子。

电阻  $R_a$  是任选的,供校正调节用。也可采用在铭牌上标出校正系数。电阻  $R_a$  或校正系数是用于补偿线圈骨架尺寸和匝数的制造偏差。它们也使传感器与电子装置能有互换性。

以下公式依据图2等效电路为

$$\underline{E} = j\omega \cdot M \cdot \underline{I}_p$$

$$\underline{U}_s = \frac{R_b}{R_l + R_a + R_b + j\omega L} \cdot \underline{E}$$

$$\underline{U}_s = \frac{R_b}{R_l + R_a + R_b + j\omega L} \cdot j\omega \cdot M \cdot \underline{I}_p$$

$R_b \rightarrow \infty$  时

$$\underline{U}_s = \underline{E} = j\omega \cdot M \cdot \underline{I}_p \quad \underline{I}_p = -j \frac{\underline{E}}{\omega \cdot M}$$

## 2 电子式互感器软件积分

### 2.1 电子式互感器硬件积分

罗氏线圈原理因为其天生的微分特性所以其输出不再是一个正比于一次电流的信号,所以其一般都是配合着积分器的应用来实现电子式互感器的信号输出。由于实际的运算放大器普遍存在输入偏置电压,所以理想积分器的输出会很快饱和至电源电压值。为了解决这一问题,所以一般会采用有损积

分器(见图3)来实现硬件积分。

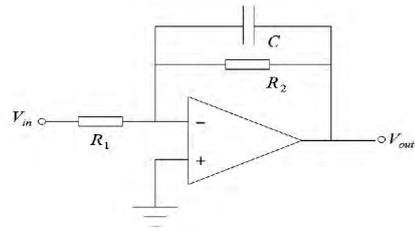


图3 有损积分器

### 2.2 电子式互感器软件积分

为了提高精度和降低采集模块的功耗,可以考虑在合并单元采用软件积分的方式对罗氏线圈的输出信号进行还原。最简单的实现方式是基于硬件积分的原型,通过离散化导出软件积分的系统函数<sup>[6,7]</sup>。连续  $s$  域到离散  $z$  域的映射关系有两种,分别是冲激响应不变法和双线性变化法。采用冲激响应不变法时,相角误差随着谐波次数的增加而增加,高频情况下波形失真严重,导致积分算法不收敛。为了保持模拟积分器的原有特性,考虑采用双线性变化法。

首先用  $\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$  代替  $s$  代入式

$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1+sR_2C} \quad (2)$$

$T$  为抽样周期,得到  $z$  域系统函数为

$$H(z) = \frac{R_2 T}{R_1} \cdot \frac{z^{-1} + 1}{(T - R_2 C) z^{-1} + T + 2R_2 C} \quad (3)$$

进而推算得幅频特性、相频特性如下。

假设  $a = T - R_2 C$ ,  $b = T + 2R_2 C$ ,幅频特性公式为

$$|H(e^{j\omega})| = \frac{R_2 T}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{(1 + \cos\omega)^2 + \sin^2\omega}}{\sqrt{(b + a\cos\omega)^2 + (a\sin\omega)^2}} \quad (4)$$

相频特性公式为

$$\Phi(e^{j\omega}) = \arctan(\sin\omega / (1 + \cos\omega)) - \arctan(a\sin\omega / (b + a\sin\omega)) \quad (5)$$

式中  $\omega = 2\pi fs/f$  为归一化频率,  $f_s$  为采样频率。

假设  $T = 100\mu s$ ,代入电阻、电容的实际值,得到相频特性图如图4。

## 3 罗氏线圈原理电子式互感器高频信号由于微积分过程导致异常分析

### 3.1 高次谐波微积分后异常分析

某220 kV智能变电站采用的独立式罗氏线圈

原理的电子式互感器采用合并单元软件积分。

在对短线路充电的过程中,由于电容电流的影响产生高次谐波电流,根据事后 RTDS 的仿真试验大概产生的谐波次数在 5 000 Hz 到 10 000 Hz 之间,也就是对于工频来说谐波大约是 100 次谐波到 200 次谐波,也就意味着在罗氏线圈微分后高次谐波被放大了 100 到 200 倍之间,直接的影响就是合并单元在积分后由于高次谐波的失真使得高次谐波变成了偏向于时间轴一侧的衰减直流波形,造成母差保护的误动。

具体波形图 5 所示。

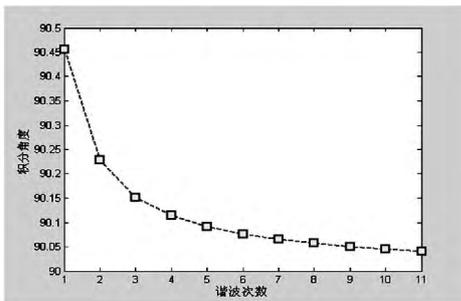


图 4 软件积分相频特性波形

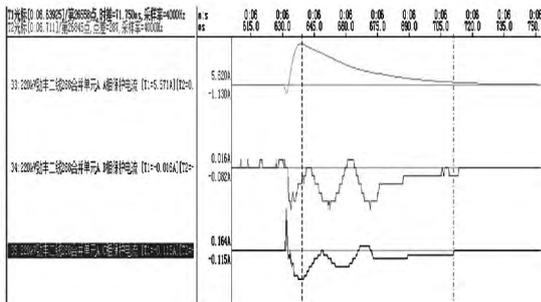


图 5 短线路充电放大波形

### 3.2 软件积分中的高次谐波影响分析

为了研究电学电子式互感器罗氏线圈高次谐波的软件积分影响,搭建以下测试平台,被测试合并单元为 200 点采样系统。

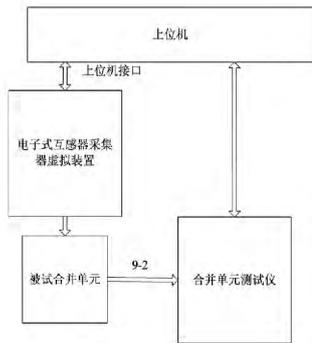


图 6 软件积分仿真模拟测试系统

上位机负责模拟电子式互感器的高次谐波的理

想微分,以及接受合并单元测试仪的分析数据。

电子式互感器采集器模拟装置负责按照电子式互感器实际采集器的报文发送数据。被测试合并单元采用与实际运行相同的合并单元。

合并单元测试仪负责接收被测试合并单元的 9-2 数据,并打包给上位机。

测试都采用基波叠加等量高次谐波的方式,为了防止由于采样溢出所导致积分畸变,所以测试含量均为 10% 的额定电流。

测试结果如图 7~13 所示。

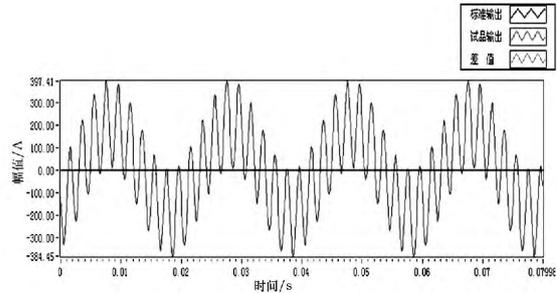


图 7 10% 的基波 45 度角叠加 10% 的 10 次谐波含量

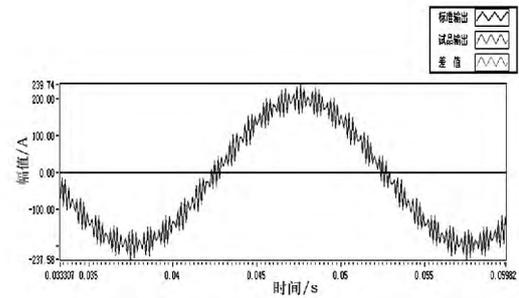


图 8 10% 的基波 30 度角叠加 10% 的 90 次谐波含量

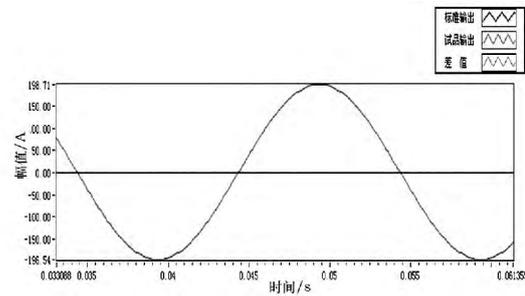


图 9 10% 的基波 30 度角叠加 10% 的 100 次谐波含量

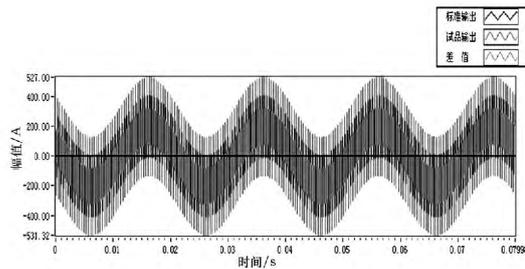


图 10 10% 的基波 45 度角叠加 10% 的 150 次谐波含量  
(下转第 54 页)

[6] LEE R. L. , BESHIR M. J. Planning Aspects of 525 kV Phase Shifters and Static var Compensators for the Mead - Phoenix and Mead - Adelanto Transmission Projects in the Southwestern U. S. [C]. ICPST'94 , Beijing ,China , 1994: 970 - 978.

[7] CARLINI E. M. , MANDUZIO G. , BONMANN D. Power Flow Control on the Italian Network by Means of Phase - shifting Transformers [C]. CIGRE Session 2006 ,C2 - 206 Paris: CIGRE 2006: 1 - 12.

[8] VERBOOMEN J. , VAN H. D. , SCHAVEMAKER P. H. , et al. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications [C]. 2005 International Conference on Future Power Systems , Amsterdam , 2005: 1 - 6.

[9] BELIVANIS M. , BELL K. R. W. Use of Phase - shifting Transformers on the Transmission Network in Great Britain [C]. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) , Cardiff , Wales , 2010: 1 - 5.

[10] IEEE Std C57.135 - 2011 , IEEE Guide for the Applica-

tion , Specification , and Testing of Phase - shifting Transformers [S].

[11] 吴增泊 , 郭翠钰. 大容量移相变压器的设计 [J]. 电气制造 , 2013( 11) : 26 - 29.

[12] 李文平 , 陈志伟. 出口美国大容量移相变压器的研制 [J]. 电力设备 , 2007 , 8( 8) : 21 - 23.

[13] 郝帅 , 高沁翔 , 伏松平 , 等. 合理利用线路的移相变压器选址问题研究 [J]. 微计算机信息 , 2009 , 25( 3 - 2) : 305 - 306 , 182.

[14] 曲祖义 , 廖华兴 , 于继来 , 等. 消除线路过载现象的移相变压器选址问题研究 [J]. 电网技术 , 2002 , 26( 12) : 30 - 32 , 44.

[15] PSASP 6. 282 基础数据库用户手册 [R]. 中国电力科学研究院.

作者简介:

陈刚(1985), 博士, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2014 - 06 - 09)

(上接第 48 页)

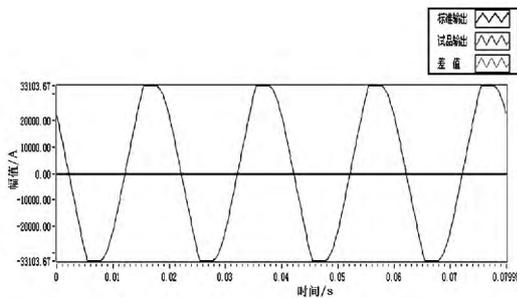


图 11 10% 的基波 45 度角叠加 10% 的 199 次谐波含量

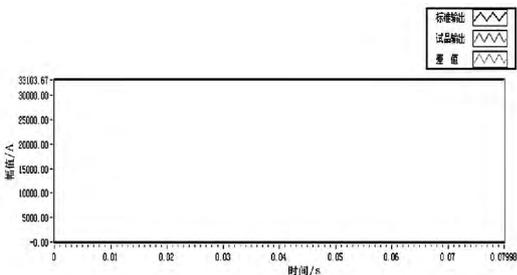


图 12 10% 的基波 0 度角叠加 10% 的 200 次谐波含量

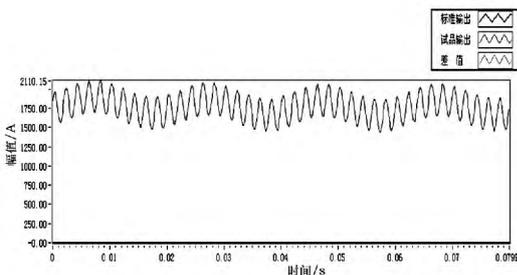


图 13 10% 的基波 60 度角叠加 10% 的 210 次谐波含量

根据测试结果, 在 200 点采样情况下的软件积分, 当频率在 150 次谐波以下时, 对基波基本不产生太大影响, 当频率接近 200 次谐波时开始对基波产生比较大的影响, 199 次谐波由于频率混叠的影响完全变成了基波并且放大的基波, 200 次谐波时, 完全偏向于时间轴一侧并溢出。200 次谐波以上也会偏向时间轴一侧, 但可以与软件积分的衰减回路达到一种稳定状态。

## 4 结 论

可采用带宽限制与采样速率相配合的办法, 如为保证 13 次谐波的不失真, 带宽至少应放置在 2 kHz, 400 次谐波以上基本已经不可能进入采样了, 所以按照前述仿真参数, 如将采样速率提高至每周波 400 点以上, 再采用软件积分, 应可以很好解决高次谐波的频率混叠所导致的积分后采样失真现象。为防止软件积分所导致的失真现象, 截止频率应与采样速率之间进行配合来实现。如采样速率为 200 点的采样系统, 其带宽截止频率最好不应超过 1 kHz。

(收稿日期: 2014 - 07 - 25)

# 利用移相变压器提高川渝断面输电能力的研究

陈刚, 丁理杰, 汤凡, 滕予非, 魏巍

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610072)

**摘要:** 川渝断面的洪板双回和黄万双回潮流分布不均, 极大地限制了四川电网交流外送能力。对利用加装移相变压器(简称移相器)改善洪板双回和黄万双回的潮流分布, 从而提高川渝断面输电极限的可行性进行了初步分析。首先, 调研了移相器在国内外的应用与研究情况。其次, 简要介绍移相器的分类和基本原理、选址原则以及容量设计方法。最后, 利用 PSASP 软件, 对移相器在川渝断面应用的可行性进行了分析。研究表明, 移相器能够显著提高川渝断面的输电极限, 同时对改善 500 kV 站点的短路电流也有一定的作用。

**关键词:** 移相变压器; 川渝断面; 潮流; 输电极限

**Abstract:** The power flow between Hong - Ban lines and Huang - Wang lines in tie - line between Sichuan and Chongqing power grids is uneven , which extremely limits the transmission capability of Sichuan power grid. The feasibility of changing power flow distribution and improving the transmission capability of the tie - line by utilizing phase - shifting transformers ( PSTs) is analyzed. Firstly , the applications and researches of PST at home and abroad are presented. Then , the working principle , rules of location selection and capacity design method are introduced briefly. Finally , the application of PST is analyzed by PSASP. Simulations results show that the PST can significantly improve the transmission capability of tie - line between Sichuan and Chongqing power grids. At the same time , the short - circuit current of 500 kV buses is also reduced.

**Key words:** phase - shifting transformer; tie - line of Sichuan - Chongqing power grid; power flow; transmission limit

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)05 - 0049 - 06

## 0 引言

四川电网仅通过由 500 kV 洪沟—板桥双回(简称洪板双回)和 500 kV 黄岩—万县双回(简称黄万双回)构成的川渝断面与华中电网交流互联。“十二五”期间, 随着以向家坝、溪洛渡等为代表的大型水电站的投运, 川渝断面输电极限极大地限制了四川水电的送出。提高川渝断面的输电极限已经成为四川电网甚至华中电网重点关注的问题之一。

移相变压器( phase - shifting transformer , PST) , 简称移相器, 可以实现按照一定方向和一定功率的潮流控制, 改变环网潮流分布, 进而达到避免输电线路或变压器主设备过负荷的情况, 提高供电可靠性, 并实现合理分配线路潮流以提高输电断面功率的目的<sup>[1]</sup>。此外, 文献[2]指出, 移相器对于降低短路电流也有一定的作用, 文献[3]指出基于晶闸管技术的静止移相器还能提高系统稳定性, 通过恰当的控制手段实现对系统振荡的抑制。

川渝断面输电能力受限的根本原因是洪板双回和黄万双回潮流分布不均, 潮流不均导致洪板双回过早达到稳定极限, 而黄万双回潮流很小得不到充分利用, 极大地限制了川渝断面的输电能力。雅安—武汉 1 000 kV 交流特高压建成后, 将缓解川电外送的压力, 然而, 受施工难度和其他不可抗拒因数的影响, 工程进度存在较大的不确定性。因此, 从充分利用现有网架资源的角度出发, 研究配置移相器改善潮流分布, 进而提高川渝断面的输电能力具有重要意义。

首先对移相器在世界各地的应用与研究情况进行调研, 并简单介绍移相器的基本原理、选址原则以及设计方法, 最后对移相器在川渝断面应用的可行性进行了分析。基于 PSASP 的仿真研究结果表明, 移相器能够显著提高川渝断面的输电能力; 同时, 对改善 500 kV 洪沟站的短路电流也有一定的作用。

## 1 移相器的应用与研究现状

有关移相器的认知最早始于 20 世纪 30 年代。

之后的若干年间,北美、日本以及欧洲多个国家如瑞典、荷兰、德国等的学者和工程师们进行了大量研究,并实现了移相器在电网中的实际应用。截止到目前,世界上已有几十台移相器应用的记录。典型的移相器应用记录可归纳如表 1 所示。

从表 1 可以看到,国外的移相器应用已经相当成熟,各个电压等级均有了应用的记录。基于这些工程应用经验,IEEE 已经形成了移相器的标准<sup>[10]</sup>,为移相器的应用技术条件、设备规范和现场试验要求等提供了指导。

表 1 移相器的应用情况

年代	国家	电压 /kV	容量 /MVA	工程简介
1930	美国	66	30	解决 66 kV 和 132 kV 电磁环网潮流分布问题 <sup>[4]</sup>
1984	日本	275	—	控制环网潮流,降低网损,消除过负荷 <sup>[5]</sup>
1995	美国	525	650	控制线路潮流,充分利用线路输电能力 <sup>[6]</sup>
2003	意大利	400	1 630	优化从法国到意大利的输电潮流 <sup>[7]</sup>
2003	荷兰	380	1 000	荷兰到德国和比利时的联络线潮流分布 <sup>[8]</sup>
2009	英国	400	2 000	提高北部到南部的输电能力 <sup>[9]</sup>

目前,生产移相器的厂家主要有西门子、ABB、依林、Alstom、Cooper 等。在国内,保定天威保变电气股份有限公司是唯一拥有自主知识产权和供货经验的厂家,主要供货美国、加拿大等海外国家<sup>[11-12]</sup>。然而,保定天威保变电气目前的供货记录最高电压等级为 220 kV,不确定是否有生产 500 kV 等级移相器的能力。

## 2 移相器的基本原理

### 2.1 移相器的移相原理

根据对电压幅值和相角的调节效果不同,移相器可分为纵向、横向和斜向三种<sup>[3]</sup>。纵向移相器在线路中串入与输入电压相同或反相的附加电势,以改变电压幅值,而不能改变相位。横向移相器在线路中串入与输入电压正交的附加电势,可同时实现对幅值和相位的调节。横向移相器虽然既可以调节电压的大小也可以调节电压的相位,但其补偿电压只有一个自由度,调节方式不够灵活。为此,斜向移

相器应运而生,它可以灵活地调节电压的幅值和相位,得到了广泛的应用。下面以斜向移相器为例对移相器的基本原理进行简单说明。

如图 1 所示,移相器一般由串联变压器和并联变压器两部分组成<sup>[2]</sup>。串联变压器为 Y/Δ 联接,并联变压器为 Y/Y 联接,且中性点接地。串联变压器的原边绕组与线路串联,中间抽头连接到并联变压器的原边绕组。并联变压器与线路并联,副边绕组带有极性选择器  $K_{ZF}$  并具有分接头控制,与串联变压器的副边绕组相连,连接的相序对应关系为 A→C、B→A、C→B。

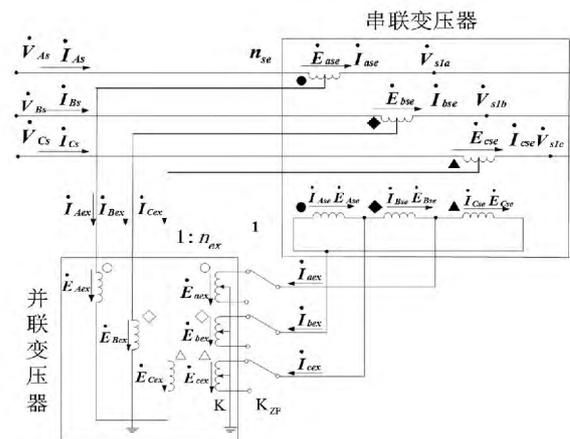


图 1 典型移相器的原理接线图

移相器运行时,并联变压器为串联变压器提供励磁,在串联变压器的原边绕组提供了一个相比移相器接入点送端系统侧相电压  $\dot{V}_{AS}$  超前或滞后  $90^\circ$  (由极性选择器  $K_{ZF}$  控制) 的附加电压  $\dot{E}_{ase}$ ,如图 2 所示。

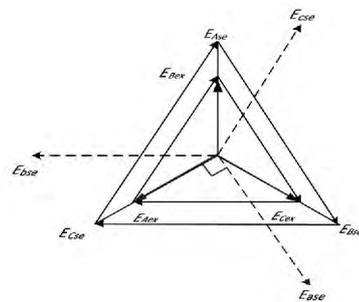


图 2 移相器各变压器绕组电压相位关系图

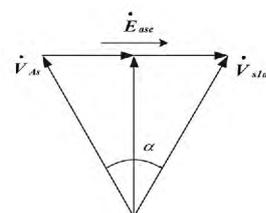


图 3 移相原理图

从而,使移相器的输出电压  $\dot{V}_{sla}$  与输入电压  $\dot{V}_{As}$  之间产生了相位差  $\alpha$  (大小由并联单元副边分接头控制),如图3所示<sup>[11]</sup>,达到改变电压相位的目的。

### 2.2 移相器的等值模型

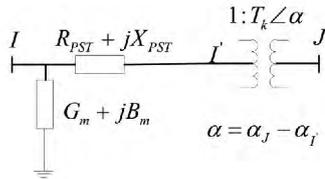


图4 PSASP中移相器仿真等值模型示意图

在进行仿真时,移相器可用漏抗  $Z_{PST}$  串联一个变比为复数的理想变压器来模拟,其等值图如图4所示<sup>[15]</sup>。在仿真时,通常设置  $G_m$  和  $B_m$  为无穷大,  $R_{PST}$  为0,即忽略激磁电导、激磁电纳以及漏电阻,变比通常设置为1,输入的控制角  $\alpha$  为不考虑损耗时的理想值  $\alpha = \alpha_J - \alpha_I$ ,考虑漏抗  $Z_{PST} = jX_{PST}$  后,移相器实际的调整角度  $\alpha' = \alpha_J - \alpha_I$  跟仿真输入的  $\alpha$  会有一定的差异。

### 2.3 移相器控制线路潮流

对于两端输电系统,设受端母线的电压相角为0,则线路传输功率为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta \quad (1)$$

式中  $U_1$ 、 $U_2$  分别为送、受端的电压幅值; $\delta$  为送端电压相角; $X_L$  为线路阻抗。

当线路中串联有如图4所示的移相器时,线路传输的功率为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L + X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \quad (2)$$

从式(2)可知:1)移相器的串入,改变了线路传输功率的大小,若送端和受端还有其他线路相连,则移相器改变了潮流在两回线路上的分布;2)移相器使得送受电两端能够用更小的相角差传输相同的功率,并且两端传送功率的最大值降低;3)移相器引入的漏电抗  $X_{pst}$  相当于在线路中串联了一个电抗,增大了移相器安装母线与系统的电气距离,可以降低安装位置的短路电流。

## 3 移相器的设计

### 3.1 移相器的选址

文献[13]、[14]对移相器的选址问题进行了研究,综合分析可知,在进行移相器的选址时,需要考

虑如下几个指标:1)安装移相器后潮流的改变量;2)线路潮流变化关于移相器调节幅度的灵敏度。其中指标1直接体现了移相器的效果,指标2则体现了移相器的效率,对于改变相同的潮流,需要移相的角度越小,移相器的损耗越小。

当然,在实际应用时,还需要综合考虑出线间隔、变电站建设场地等因素,需要针对实际问题进行具体分析。

### 3.2 移相器容量的选择

移相器的容量即为所在线路的极限传输容量,根据文献[3]的分析结论,串联变压器和并联变压器的容量相同。设配置移相器的线路极限传输容量为移相器的空载移相角调节范围为  $\pm \alpha$ ,则并联和串联变压器的容量为<sup>[3]</sup>

$$S_{并} = S_{串} = S \sin \alpha \quad (3)$$

由于通常  $\alpha$  较小,可知,并联变压器和串联变压器的容量远小于移相器的总容量。

## 4 移相器在川渝断面的应用分析

川渝断面由南部通道洪板双回和北部通道黄万双回构成,实现四川电网与华中主网的交流互联,如图5所示。

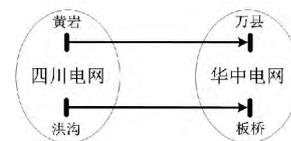


图5 川渝断面输电示意图

由于四川的水电主要集中在西部和南部,重庆的负荷集中在南部,使得四川水电主要通过南部通道送至重庆南部负荷中心。进一步仿真分析表明,在同等负荷条件下,增加川西南水电开机会增加洪板线的潮流,进而增大洪板线和黄万线的潮流;增加渝北火电开机会限制北部通道的潮流,同样会增大洪板线和黄万线的潮流,并且渝北火电对川渝断面的潮流分布的影响更大。其原因是渝北火电的开机相当于在北部通道的受端增加了一个大的电源,从而限制北部通道的潮流传输;川西南水电的开机相当于在南部通道送端增加大电源,从而进一步增大南部通道的潮流水平。最终导致洪板双回严重过载,限制川渝断面的输电极限,给四川水电的送出带来了极大的压力。与此同时,黄万双回潮流过轻,

500 kV 线路得不到充分利用,造成了资源的浪费。以 PSASP 软件为仿真工具,研究通过装配移相器改善潮流分布情况,提高黄万线的利用率,进而提高川渝断面的送出能力。

#### 4.1 移相器安装位置的选择

按照前面给出的移相器安装位置选择原则,分别模拟在洪板双回、黄万双回加装移相器,仿真结果分别如表 2 和表 3 所示。仿真中忽略电阻,漏电抗选择与相邻的 500 kV 主变压器正序电抗一致。

表 2 洪板双回洪沟侧加装移相器

控制角 / (°)	实际移相角 / (°)	潮流/MW			
		洪板双回	黄万双回	转移量	转移比 / %
无	—	2 677	1 327	—	—
-1	-13.3	2 101	1 873	576	21.5
-3	-14.7	2 034	1 938	643	24.0
-5	-16.3	1 969	2 001	708	26.5

表 3 黄万双回黄岩侧加装移相器

控制角 / (°)	实际移相角 / (°)	潮流/MW			
		洪板双回	黄万双回	转移量	转移比 / %
无	—	2 677	1 327	—	—
10	1.8	2 602	1 395	75	2.8
15	5.7	2 436	1 556	241	9.0
17	7.3	2 370	1 618	307	11.5
18	8.0	2 338	1 650	339	12.7
19	8.8	2 306	1 681	371	13.9

从表 2 和表 3 可以看到,加装移相器后实际的移相角与设置的控制角不同,这是由于等值漏抗的滞后作用。当洪板线加移相器时,由于移相器移相目标本来就是滞后角度,等值漏抗恰好起正作用,因此移相器仅需要很小的角度就能实现较好的潮流转移结果;而在黄万线安装时,需要移相器移相目标为超前一定角度,这时漏抗起反作用,需要较大的移相角才能实现潮流的转移。洪板线洪沟侧加装移相器时,移相器改变相同角度时引起的潮流转移量远大于在黄万线黄岩侧安装的情况,因此移相器更适合配置在洪板双回洪沟侧。

#### 4.2 移相器的容量设计

按照洪板线单回热稳极限 1 900 MW 设计移相器的容量,移相器的额定功率可选择为 2 000 MVA。根据前面分析,洪沟侧的移相器不需要太大的移相

角就能够取得很好的潮流转移效果,设计移相角为  $\pm 10^\circ$ ,则串联和并联电压的容量均为  $2\ 000 \times \sin 10^\circ = 347\ \text{MVA}$ ,可设计为 350 MVA。由于远期洪板线可能更换为耐热导线,单回容量为 3 000 MW,此时按照移相器设计容量 3 200 MVA,串联变压器和并联变压器的容量同理可计算为 555 MVA,可设计为 560 MVA。

#### 4.3 2013 年丰大典型方式数据校核

对加装移相器后的控制效果进行校核,采用 2013 年丰大数据的仿真结果如表 4 所示。

表 4 洪板双回洪沟侧加装移相器热稳定分析(2013)

控制角 / (°)	潮流/MW		洪板线 N-1		川渝断面外送能力/MW
	洪板双回	黄万双回	洪板线 /MW	潮流转移比 / %	
无	2 677	1 327	2 305	86.1	3 300
-1	2 101	1 873	1 564	74.4	4 830
-3	2 034	1 938	1 521	74.8	4 960
-5	1 969	2 001	1 481	75.2	5 094

表 4 中,双回线路的潮流转移比按式(4)计算为

$$\lambda = \frac{P'_1}{P_1 + P_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $P_1$  和  $P_2$  分别为两条线路传输的功率; $P'_1$  为双回线路中一回线路 N-1 后,另一回线路传输的功率(假设第二回线路 N-1)。

根据式(4)得到双回线路 N-1 后的潮流转移比,若已知单回线路的传输极限,可得到双回线路满足 N-1 后不超过热稳极限的传输能力  $P_1 + P_2 = \lambda P'_1$ ,进而根据构成输电断面的线路间的潮流比得到整个断面的输电能力。

从表 4 可以看到,不加移相器时,洪板线 N-1 后的潮流转移比达到 86.1%;洪板线与黄万线的潮流比为 2:1。按照洪板线单回 1 900 MW 的能力计算,川渝断面的外送能力仅为  $1\ 900 \div 86.1\% \times (1/2 + 1) = 3\ 310\ \text{MW}$ 。加装移相器后,洪板线 N-1 后潮流转移比显著降低,川渝断面外送能力提升至 5 090 MW。因此,移相器能够显著改善断面的潮流分布,提高断面的输电能力。

“十二五”期间,随着四川电网网架结构不断加强,以及以锦屏、向家坝、溪洛渡为代表的大型电站的投运,导致四川电网 500 kV 母线的短路电流急剧增加,部分母线 500 kV 开关已经逼近遮断容量,威胁电网安全运行。根据电网发展规划,未来 5 年四

川电网抑制短路电流的工作将十分紧迫。

从图 4 所示的移相器等值电路可以看到,移相器可视为在线路中串联了一个电抗  $X_{PST}$  (忽略  $R_{PST}$ ) 和只改变相位的变压器。电抗  $X_{PST}$  的接入将改善系统的短路电流。基于 PSASP 的仿真结果表明,洪板双回有无移相器时四川电网短路电流超过 45 kA 的 500 kV 站点如图 6 所示。可以看到,加装移相器后,洪沟站的短路电流有明显下降,其他站点短路电流也有一定程度的降低。

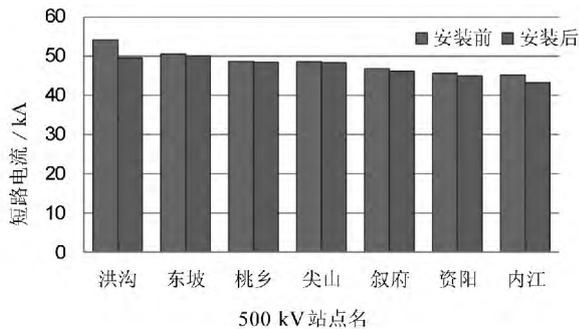


图 6 洪板双回洪沟侧加装移相器前后短路电流对比(2013)

#### 4.4 2015 年丰大方式数据校核

随着重庆负荷增加,重庆北部大型火电机组的投运,洪板双回和黄万双回的潮流比呈现逐渐拉大的趋势,2015 年丰大方式计算仿真结果如表 5 所示。

从表 5 可以看到,2015 年洪板双回和黄万双回的潮流比达到 5:1,洪板线输电压力更大,同时黄万线利用率更低,造成川渝断面的外送静稳极限仅有 2 641 MW。配置移相器后,洪板双回和黄万双回的潮流比降为约 1.6:1,川渝断面的外送能力可提高至 4 167 MW,较未加装移相器提高约 1 500 MW,很好的改善了川渝断面的潮流分布不均问题,提高了外送能力。

表 5 洪板双回洪沟侧加装移相器热稳定分析(2015)

控制角 / (°)	潮流 / MW		洪板线 N-1		川渝断面外送能力 / MW
	洪板双回	黄万双回	洪板线 / MW	潮流转移比 / %	
无	3 204	642	2 765	86.3	2 641
-1	2 504	1 307	1 862	76.4	3 785
-3	2 450	1 383	1 817	74.2	4 005
-5	2 382	1 500	1 772	74.3	4 167

同时,四川电网短路电流超过 45 kA 的 500 kV 站点在加装移相器前后的短路电流变化情况如图 7 所示。可以看到,洪沟站短路电流依然有 1.5 kA 的下降,其他站点的短路电流都有一定程度的降低。

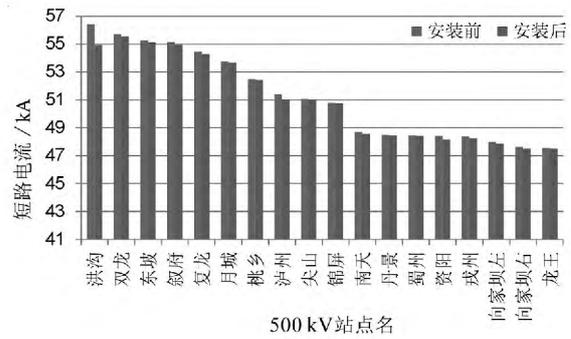


图 7 洪板双回洪沟侧加装移相器后短路电流对比(2015)

## 5 结 论

前面概述了移相器在世界各地的应用与研究情况,分析了移相器的基本原理,给出了移相器的选址以及容量设计方法。最后,对移相器应用于川渝断面以改善四川电网的外送能力的可行性进行了分析,有以下几点结论。

- (1) 移相器在国外已经有较多的应用,但 500 kV 应用实例不多,且国内厂商未见有生产 500 kV 等级移相器的能力;
- (2) 移相器能够显著改变线路潮流分布,并且装在洪板线效果优于装在黄万线;
- (3) 线路加装移相器后,洪板双回 N-1 后潮流转移比降低,在不改变开机方式的条件下,川渝断面输电能力可提高至 5 090 MW,提升约 1 800 MW;
- (4) 线路加装移相器后,由于移相器漏抗在一定程度上可视为串抗,系统短路电流水平降低。

### 参考文献

- [1] 徐征雄,张文涛,王刚,等. 利用移相器控制东北电网并行线路潮流的研究[J]. 电网技术,1996,20(4): 6-10.
- [2] 赵学强,郭明星. 华东电网安装移相变压器的研究[J]. 华东电力,2006,34(11): 32-34.
- [3] 倪尚谦. 特高压静止移相器的基本设计与电磁暂态研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院,2013.
- [4] LYMAN W. J., NORTH J. R. Application of Large Phase-shifting Transformer on an Interconnected System Loop[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1938, 57(10): 579-588.
- [5] OGAHARA, R., KAWAURA, Y., IWAMOTO, S. Using Phase Shifters for Power Flow Adjustment Following Large-scale Generation Loss [C]. IEEE PES General Meeting, Canada, 2013: 1-5.

[6] LEE R. L. , BESHIR M. J. Planning Aspects of 525 kV Phase Shifters and Static var Compensators for the Mead - Phoenix and Mead - Adelanto Transmission Projects in the Southwestern U. S. [C]. ICPST'94 , Beijing ,China , 1994: 970 - 978.

[7] CARLINI E. M. , MANDUZIO G. , BONMANN D. Power Flow Control on the Italian Network by Means of Phase - shifting Transformers [C]. CIGRE Session 2006 ,C2 - 206 Paris: CIGRE 2006: 1 - 12.

[8] VERBOOMEN J. , VAN H. D. , SCHAVEMAKER P. H. , et al. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications [C]. 2005 International Conference on Future Power Systems , Amsterdam , 2005: 1 - 6.

[9] BELIVANIS M. , BELL K. R. W. Use of Phase - shifting Transformers on the Transmission Network in Great Britain [C]. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) , Cardiff , Wales , 2010: 1 - 5.

[10] IEEE Std C57.135 - 2011 , IEEE Guide for the Applica-

tion , Specification , and Testing of Phase - shifting Transformers [S].

[11] 吴增泊 , 郭翠钰. 大容量移相变压器的设计 [J]. 电气制造 , 2013( 11) : 26 - 29.

[12] 李文平 , 陈志伟. 出口美国大容量移相变压器的研制 [J]. 电力设备 , 2007 , 8( 8) : 21 - 23.

[13] 郝帅 , 高沁翔 , 伏松平 , 等. 合理利用线路的移相变压器选址问题研究 [J]. 微计算机信息 , 2009 , 25( 3 - 2) : 305 - 306 , 182.

[14] 曲祖义 , 廖华兴 , 于继来 , 等. 消除线路过载现象的移相变压器选址问题研究 [J]. 电网技术 , 2002 , 26( 12) : 30 - 32 , 44.

[15] PSASP 6.282 基础数据库用户手册 [R]. 中国电力科学研究院.

作者简介:

陈刚(1985), 博士, 工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2014 - 06 - 09)

(上接第 48 页)

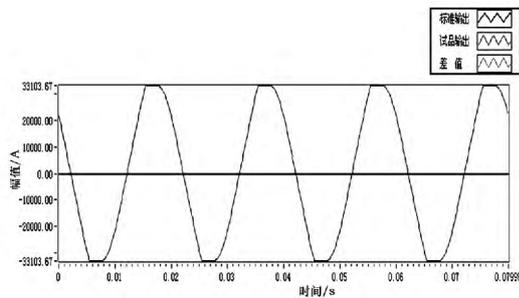


图 11 10% 的基波 45 度角叠加 10% 的 199 次谐波含量

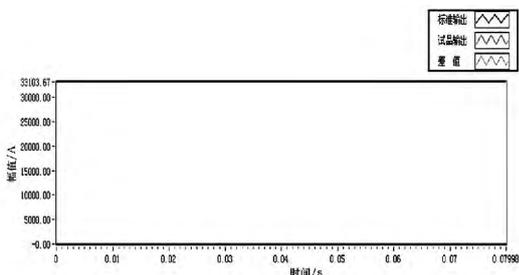


图 12 10% 的基波 0 度角叠加 10% 的 200 次谐波含量

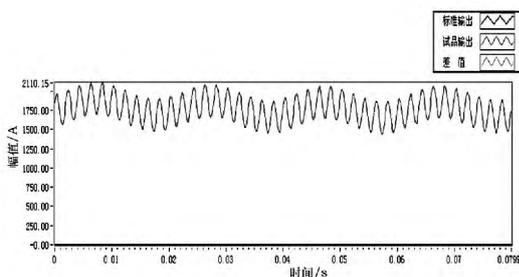


图 13 10% 的基波 60 度角叠加 10% 的 210 次谐波含量

根据测试结果,在 200 点采样情况下的软件积分,当频率在 150 次谐波以下时,对基波基本不产生太大影响,当频率接近 200 次谐波时开始对基波产生比较大的影响,199 次谐波由于频率混叠的影响完全变成了基波并且放大的基波,200 次谐波时,完全偏向于时间轴一侧并溢出。200 次谐波以上也会偏向时间轴一侧,但可以与软件积分的衰减回路达到一种稳定状态。

## 4 结 论

可采用带宽限制与采样速率相配合的办法,如为保证 13 次谐波的不失真,带宽至少应放置在 2 kHz,400 次谐波以上基本已经不可能进入采样了,所以按照前述仿真参数,如将采样速率提高至每周波 400 点以上,再采用软件积分,应可以很好解决高次谐波的频率混叠所导致的积分后采样失真现象。为防止软件积分所导致的失真现象,截止频率应与采样速率之间进行配合来实现。如采样速率为 200 点的采样系统,其带宽截止频率最好不应超过 1 kHz。

(收稿日期: 2014 - 07 - 25)

# 变压器有载调压分接开关动作特性交流测试 技术的研究与应用

何 良<sup>1</sup> 苏明虹<sup>1</sup> 李 健<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司眉山供电公司, 四川 眉山 620010)

**摘 要:** 针对变压器有载分接开关动作特性测试, 提出了一种新的测试方法。模拟变压器的运行状态, 对变压器有载分接开关动作特性作采用交流测试技术, 从根本上解决了现场分接开关切换过程的动作特性不能准确判定、多种接线组别变压器分接开关动作特性不能测试等问题。

**关键词:** 有载调压; 分接开关; 动作特性

**Abstract:** Aiming at the operating characteristic testing of on-load tap-changer of transformer, a new testing method is proposed. The operation condition of transformer is simulated, and AC testing technology is adopted for the operating characteristics of on-load tap-changer. A thoroughly solution is provided for some problems, for instance, the operating characteristics of tap-changer during switching in site cannot be determined accurately and the operating characteristics of tap-changer of transformer in several wire connection groups cannot be tested.

**Key words:** on-load voltage regulation; tap changing switch; operating characteristic

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0055-04

## 0 引 言

电力变压器是电网的主要设备之一, 有载分接开关的工作状态将直接影响变压器的运行安全。近年来有载分接开关的故障越来越多<sup>[1-3]</sup>, 因此在进行安装、检修时, 要对其进行相关试验, 以确保变压器的长期安全运行。

有载分接开关动作特性测试是一个重要的试验项目, 通过所测得的过渡波形可以看出切换开关能否正常动作, 从而判断有载分接开关是否存在异常。20 世纪 90 年代初, 电力行业普遍采用直流法测试有载分接开关的动作特性, 但由于直流测试电压较低, 导致对有异常的开关波形解析分歧较大<sup>[4]</sup>。测试仪器虽经多次改进, 然而受测试条件、仪器性能等多方面的限制, 技术人员对分接开关动作特性波形各抒己见, 分接开关故障的漏判率、误判率较高, 往往导致新建项目或预防性试验后的变压器不能按期投入运行, 甚至因直流测试波形不理想, 将有载调压变压器改为无载调压变压器运行。

近年来, 交流法测试有载分接开关动作特性得

到了发展, 其测试电压较高, 更符合变压器实际运行工况, 能反映分接开关切换过程中每一瞬间的流通状态。下面所研究的交流测试技术, 能对各种接线变压器的有载分接开关进行动作特性测试, 试验结果一致性好, 解析解唯一, 可以清晰地反映有载分接开关工作过程, 有效判断开关故障。

## 1 有载分接开关动作特性测试原理

有载分接开关是在带负载的情况下变换分接位置, 采用过渡电路的结构, 满足切换过程中负载回路不开路及分接间不短路的两个基本要求。在“架桥”、“桥接”、“拆桥”过程中, 串入回路的过渡电阻有规律地变化, 测试回路中电流亦有规律改变, 将这一变化波形记录下来, 同时测量出动作参数, 并与标准波形、设计要求进行比较, 则能判断出有载分接开关的动作是否存在异常<sup>[5-7]</sup>。

所研究的分接开关交流测试技术原理如图 1 所示, 通过单相输入、裂相输出三相标准电源, 可向被试变压器施加单相或三相工频交流电压, 测试变压器接近于空载运行状态下的分接开关切换过程, 高

速采集分接开关切换全过程的电压、电流并进行解析 根据各触头工作顺序、过渡时间、过渡电阻等 判断分接开关的动作是否出现异常。

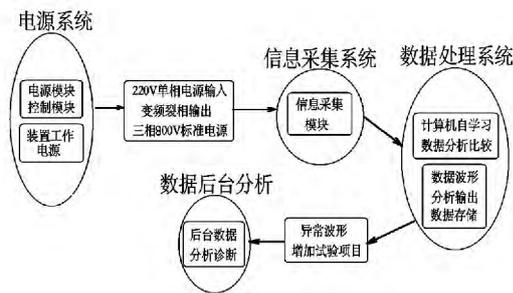


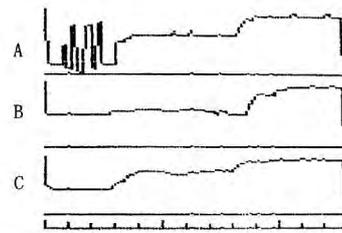
图 1 分接开关交流测试技术原理

对于动作特性波形异常的分接开关,交流测试装置提供多种测试方法复测验证,若现场试验设备允许,可进行外电源高压单相法(额定电压及以下)、外电源大电流零序法等多种模拟工况运行条件下的开关动作特性测试。

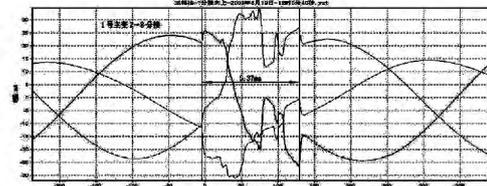
## 2 现场应用实例

案例 1:某变压器采用 V 型有载分接开关,投运前进行交接试验,使用直流法测试其动作特性,如图 2(a)所示,可以看出三相切换过程均异常,缺少“桥接”过程,开关动作过程不明显不完整。换用交流法进行测试,如图 2(b)所示,三相过渡过程明显,两竖线间为“桥接”过程,时间大约为 5.37 ms,过渡电阻进入与退出“桥接”过程的瞬间,三相电流发生突变,其“桥接”相电流量突变幅值较大,其他两相则较小且大小相等方向相反。

直流法测试的波形并不能完整明显反映分接开



(a) 直流法测试波形



(b) 交流法测试波形

图 2 V 型有载分接开关动作特性测试波形的切换过程,甚至带来误判认为该有载分接开关存在故障。交流法测试的波形反映了两侧过渡电阻工作的连续性,中间跳跃部分是开关过渡电阻“桥接”时的电流突变过程,三相过渡过程明显。该变压器以交流测试的波形及数据投入运行。

案例 2:某 500 kV 日产单相变压器 M 型有载分接开关,使用直流法测试其动作特性,测试电流大幅变化,无法采集到分接开关动作波形。使用交流法进行测试,如图 3 所示,过渡波形正常,无断流现象,“桥接”时长 20 ms,与制造商提供的试验数据相符,有载分接开关切换过程无异常。

案例 3:对某 110 kV 变电站 1 号主变压器有载分接开关进行动作特性测试。直流法测试结果如图 4(a)所示,A 相“桥接”过程不明显,“拆桥”过程存在明显的断流现象,持续时间将近 40 ms,可能存在后半桥过渡电阻断线情况;B 相动作波形较为完整,

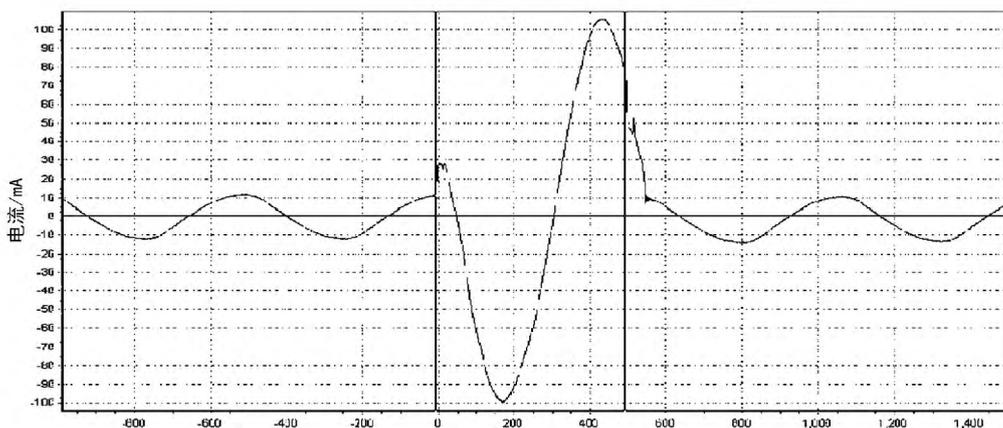


图 3 单相变压器 M 型有载分接开关动作特性测试波形

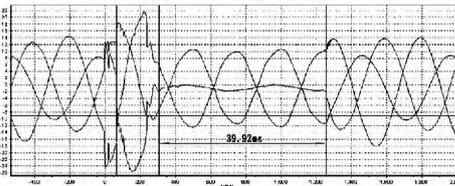
只是在“桥接”过程中存在断续、振荡现象; C 相则缺少“桥接”过程, 动作波形不完整。直流法测试结果能初步判断该有载分接开关切换过程异常, 可能存在过渡电阻断线现象。

使用交流法进行复测, 三相法测试波形如图 4 (b) 所示, A 相“拆桥”过程存在断流现象, 持续时间 39.92 ms, B、C 相动作波形正常, 表明 A 相后半桥过渡电阻断线。零序法测试波形如图 4 (c) 所示, 可以看出过渡电阻断线现象明显, 断线时长与三相法相近。

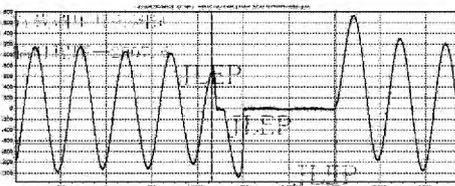
本案例是人为设置的有载分接开关 A 相过渡电阻单侧断线故障, 交、直流法测试结果均表明存在异常, 然而直流法测试结果解析解不唯一, 现场测试中两种测试方法应配合使用。



(a) 直流法测试波形



(b) 交流法测试波形 (三相法)

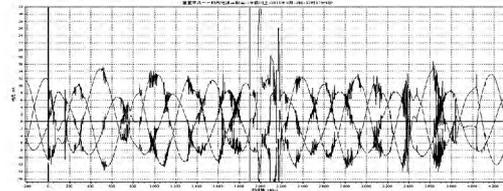


(c) 交流法测试波形 (零序法)

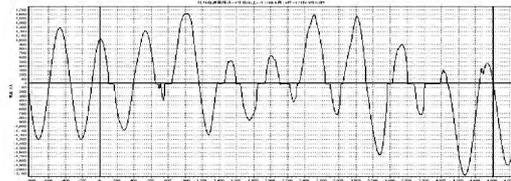
图 4 有载分接开关过渡电阻断线情况  
动作特性测试波形

案例 4: 某变电站变压器进行试验, 用直流法测试有载分接开关动作特性测试, 发现测试波形异常, 但不能判定分接开关缺陷所在, 制造厂家解释直流法测试波形不能反映分接开关存在质量问题, 应根据交流法测试结果进行综合判定。三相法测试波形如图 5 (a) 所示, 可以看出在 180 ms 的切换时间内, 三相电流波形连续振荡并发生回零现象, 从 1 分接至 8 分接波形相似; 零序法测试波形如图 5 (b) 所

示, 电流无规律振荡, 出现 16 次电流回零, 最长回零时长 7.92 ms。根据交流法测试结果初步判断为分接开关正极性侧接触不良。对有载分接开关进行吊芯检查后, 发现极性开关正极性侧触头安装角度不正, 导致切换过程中极性开关接触点频繁跳跃, 吊芯检查结果与交流法测试结果相符。



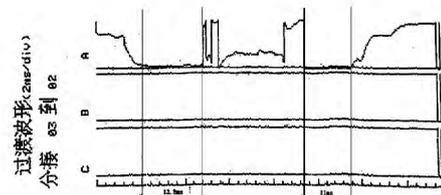
(a) 交流法测试波形 (三相法)



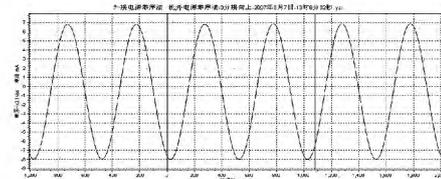
(b) 交流法测试波形 (零序法)

图 5 分接开关极性开关接触不良测试波形

案例 5: 对某有载分接开关进行动作特性测试, 直流法测试波形如图 6 (a) 所示, 可以看出 A 相在切换过程中出现两次电流过零现象, 时长分别为 13.8 ms、11 ms, 初步判断为分接开关接触不良。交流法测试结果如图 6 (b) 所示, A 相切换过程中电流连续, 动作过程正常, 分接开关无异常。这可能是由于直流法测试电压太低, 无法消除油膜等带来的接触不良的影响, 往往会带来误判, 而交流法测试电压高, 更能反映切换过程中每一瞬间的通流状态。



(a) 直流法测试波形



(b) 交流法测试波形

图 6 分接开关动作特性测试波形

### 3 判断方法及应注意的问题

(1) 有载分接开关在切换过程中,过渡电阻发生规律性的变化,回路电流值亦发生规律性变化,通过检测电流值判定分接开关进入和退出“桥接”的顺序、“桥接”过程时间  $t_2$ 、三相最大不同步时间等。由于分接开关的前半桥过渡电阻工作时间  $t_1$ 、后半桥过渡电阻工作时间  $t_3$  与过渡电阻“桥接”时间  $t_2$  是由机械机构的角度来固化的,相互间存在固定的时间关系,测量出任一时间满足试验参数即可证明其他过渡电阻工作时间满足试验要求。

(2) 当试验电压较低时,测得的电流波形可能会出现不圆滑的区域,但只要电流不出现回零现象,应判断为有载分接开关动作过程正常,各工作触头、过渡电阻回路接触状态良好。

(3) 电流波形出现长时间零值区域或频繁过零现象,应判断为分接开关切换过程对应的触头接触不良或过渡电阻断线。但当试验电压较低时,上述结论准确性不高,应使用高电压、大电流试验方法进行验证。

4) 有载调压消弧线圈分接开关动作特性测试,由于其存在空气间隙,交流测试只能使用零序法接线测试,试验电流较大,级差电流被淹没在测试电流中,不能显示过渡电阻“桥接”处的变化,应采用电流连续性分析和判断分接开关交换过程的正确性。

\*\*\*\*\*

(上接第 41 页)

[2] 国家电网公司. 智能变电站技术导则[S]. 北京: 国家电网公司 2009.

[3] 林知明, 蒋士林. 基于 SCL 模型的配置工具的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 82 - 85.

[4] A. Apostolov, D. Tholomier. Simplifying the Configuration of Multifunctional Protection Relays [C]. Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005, College Station, TX, United states: 281 - 286.

[5] 孟正华. 智能变电站虚端子设计初探[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(7): 138 - 140.

[6] 张海东, 张鸿, 宋鑫, 等. SCD 模型到 CIM/E 模型的转换方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 91 -

### 4 结 论

直流法测试有载分接开关的动作特性,由于存在测试电压低、使用范围窄、波形解析解不唯一等问题,使得技术人员对测试波形持不同意见,往往导致漏判误判。交流法具有测试电压高、符合变压器实际运行工况,能反映分接开关切换过程中每一瞬间的通流状态,解析结论唯一,能可靠地反映开关切换过程中的技术状态。在现场试验中,两种测试方法应配合使用。

#### 参考文献

[1] 冯仲民. 有载分接开关的应用[M]. 北京: 中国电力出版社 2004.

[2] 张德明. 有载分接开关国内现状及发展动向[J]. 变压器 2000, 37(1): 36 - 39.

[3] 陈敢峰, 姚集新. 变压器分接开关实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2002.

[4] 梁之林. 变压器有载调压开关交、直流测试波形分析[J]. 吉林电力 2007, 35(4): 31 - 33.

[5] 王世阁, 钊洪壁. 电力变压器故障分析与技术改进[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[6] 吉锋. 有载分接开关直流波形测试及其判断[J]. 变压器 2007, 44(1): 55 - 57.

[7] 张锋. 有载分接开关触头烧损事故的分析及预防[J]. 变压器 2003, 40(4): 30 - 31.

(收稿日期: 2014 - 06 - 05)

95.

[7] 宋杰, 靳希, 鲍伟, 等. 基于 IEC61850 的智能继电保护装置协同测试系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 59 - 63, 68.

[8] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 124 - 127.

[9] Q/GDW 396 - 2009, IEC 61850 工程继电保护应用模型[S].

#### 作者简介:

郑永康(1977), 博士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站二次系统、继电保护、自动化。

(收稿日期: 2014 - 06 - 26)

# 基于旋转多圆柱的多功能人工气候试验室 水滴参数分析方法研究

贺兴容<sup>1</sup> 蒋一平<sup>1</sup> 蒋兴良<sup>2</sup> 胡建林<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 阐述了基于旋转多圆柱测量仪的多功能人工气候试验室水滴参数分析方法。对于二维圆柱的水滴碰撞特性进行了计算分析;对二维旋转圆柱的霜状冰结冰过程进行了数值模拟;根据水滴参数对旋转圆柱结冰量的影响,结合数学逼近的方法,利用试验所得到的数据对计算方法进行验证。结果表明:计算方法是正确的,可以实现对水滴参数的测量。

**关键词:** 旋转多圆柱测量仪;水滴参数;分析方法

**Abstract:** An analysis method of droplets parameters in multifunctional artificial climate chamber is presented based on rotating multicylinder measuring instrument. The impingement characteristics of the droplets in the two - dimension cylinder are calculated , and the rime ice accumulation in the two - dimension rotating cylinder is numerically simulated. According to the influence of droplets parameters on the icing accumulation of rotating cylinder and the mathematical approach methods , the calculation method is verified by the obtained results. Eventually , the results indicate that the proposed method is correct and can realize the measurement of droplets parameters.

**Key words:** rotating multicylinder measuring instrument; droplets parameters; analysis method

中图分类号: X830 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)05 - 0059 - 05

## 0 引言

在多功能人工气候试验室中进行覆冰试验水滴参数液态水含量( $w$ )和平均体积直径( $d$ )对于覆冰试验的冰形成有重要影响。进行覆冰试验的研究,开展导线防冰、抗冰试验,必须对水滴参数进行测量,从而对覆冰参数进行校正,确定真实覆冰试验条件。

水滴参数测量方法可以归为积冰法、热线法和液滴统计法三类。积冰法的应用仪旋转多圆柱为典型代表。热线法以 Johnson - Williams 热线仪为代表,液滴统计法以滑板式水滴收集器、光学测量仪为典型代表。旋转多圆柱测量仪成本低,而且测量精度可靠。下面引入试探法的思想,结合线性回归的数学逼近方法进行数据分析,可以快速分析出水滴参数。

## 1 旋转多圆柱结构和工作原理

图1为旋转多圆柱测量仪装配示意图。它的结构比较简单:一般由多个圆柱段装配而成,每个圆柱段直径不同,在进行覆冰试验时,将各圆柱段安装在一个由电机驱动的旋转圆盘上,安装在测量区域中,严格保证其轴线垂直于水流方向。当电机带动多个圆柱段以一定速度绕轴心运动时,圆柱表面收集的过冷却水滴会均匀地在其表面结冰,由于圆柱体始终保持旋转,因此结冰后的圆柱体仍然保持圆柱形,便于测量各圆柱结冰后的尺寸。试验结束后收回,拆下各个圆柱段,分别取下其工作段的积冰样本,进行称重,由各工作段的结冰量结果分析计算液态水含量和液滴直径大小。

采用旋转多圆柱测量仪的思路是:通过测量结冰量的结果,可以根据积冰量计算的原理反向推算出水滴参数。圆柱结冰量 $m$ 与自由水流速度 $V_0$ 、环

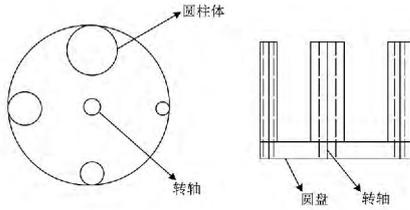


图1 旋转多圆柱测量装配示意图

环境温度  $t_0$ 、环境压强  $p_0$ 、结冰时间  $t$ 、圆柱初始直径  $D$ 、圆柱长度  $L$  以及两个水滴参数  $w$  和  $d$  的非线性关系为

$$m = f(V_0, t_0, p_0, t, D, L, w, d)$$

当旋转多圆柱测量仪由  $N$  个圆柱段装配而成时,各圆柱段的结冰量与结冰试验条件的非线性关系如下。

$$\begin{cases} m_1 = f(V_0, t_0, p_0, t, D_1, L_1, w, d) \\ m_2 = f(V_0, t_0, p_0, t, D_2, L_2, w, d) \\ \vdots \\ m_N = f(V_0, t_0, p_0, t, D_N, L_N, w, d) \end{cases}$$

各圆柱工作段结冰量  $m_i (i = 1 \sim N)$  及结冰条件  $V_0, t_0, p_0, t$  均为人工多功能气候试验室的测量值。实际运用中为提高测量精度,一般选择  $N \geq 3$ ,此时,  $w$  和  $d$  的求解成为一个超静态问题。

根据旋转多圆柱结冰测量结果的分析多功能人工气候试验室水滴参数的工作主要分为两大部分:  
①实现旋转圆柱积冰过程的数值模拟;②利用试探法通过回归分析实现超静态方程组的最佳逼近求解。

## 2 圆柱水滴的碰撞计算

输电线路覆冰现象的发生是由于前方来流中携带的过冷却水滴,碰撞在导线表面引起的,因此进行覆冰计算的首要工作就是水滴碰撞情况的计算研究。

分析计算必须分为以下两步。

第1步:用解析法求解水滴从  $x = -\infty, y = y_0$  处以与气流相同的速度  $V_0$  到达  $x = x_1$  时的速度和轨迹坐标。

第2步:用数值分析法计算水滴从  $x = x_1, y = y_1$  开始水滴的运动轨迹、速度及与圆柱体碰撞的切线,从而确定切线轨迹,进行水滴碰撞特性的评估。

模拟假设:①不考虑圆柱体的边缘效应,将结冰

做二维问题考虑;②由于圆柱旋转速度较慢,可忽略对水滴碰撞特性的影响;③气流场不受过冷却水滴运动的影响;④水滴在运动过程中无相变,一直保持球形;⑤水滴温度和物性在计算过程中保持不变。

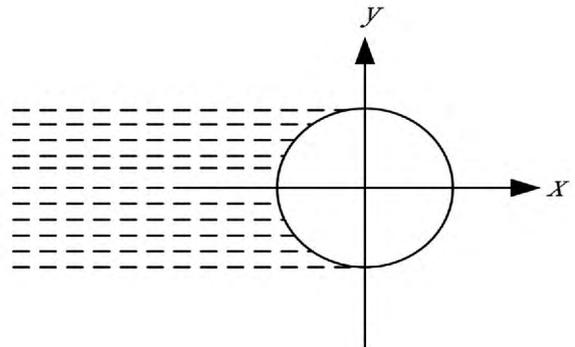


图2 坐标系中圆柱表面水滴碰撞轨迹示意图

### 2.1 初始条件的计算

对随气流运动的水滴进行受力分析,忽略水滴重力和浮力、加速的水滴表面的涡旋耗散、液滴的诱导质量等小量级因素的影响,那么水滴主要受空气粘性阻力的作用。在图2所示的坐标系中,建立运动方程为

$$\begin{cases} dx_x/d\tau = \frac{1}{k} \times \frac{c_F R_e}{24} (u_x - v_x) \\ dv_y/d\tau = \frac{1}{k} \times \frac{c_F R_e}{24} (u_y - v_y) \end{cases} \quad (1)$$

在旋转多圆柱体覆冰的过程中,水滴质量一般很小,且气流的速度不大,一般在  $0 \sim 3$  m/s 之间,则水滴的雷诺数 ( $R_e = \rho_a |V - U| d / \mu$ ) 不可能太大。很显然在  $y$  值很大时,携带水滴的气流远离圆柱体,几乎不受圆柱体阻滞力的影响;此外,由于已经忽略重力对水滴产生的影响,因此,可以认为水滴与气流的速度差  $|V - U|$  非常小。根据水滴与气流相对运动的雷诺数定义可知  $c_F R_e / 24 = 1$ ,从而可得运动方程为

$$\begin{cases} dv_x/d\tau = (u_x - v_x) / k \\ dv_y/d\tau = (u_y - v_y) / k \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u_x, u_y, v_x, v_y$  分别表示空气和水滴在  $x, y$  方向相对于自由来流的分量,  $v_x = dx/d\tau, v_y = dy/d\tau$ ;  $d\tau$  为运动速度为  $V_0$  的水滴前进圆柱体半径  $R$  的距离所需要的单位时间,  $d\tau = V_0 t / R$ ;  $k$  为水滴惯性参数  $k = \rho_w V_0 d^2 / (18\mu R)$ ;  $t$  为水滴运动时间;  $R$  为圆柱体半径;  $d$  为水滴直径;  $\mu$  为空气动力粘度;  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水滴和空气的密度;  $V$  和  $U$  分别为水滴和气流的速度矢量。

圆柱体周围的气流场速度用势流公式计算,并按幂级数展开为

$$\begin{cases} u_x = 1 + \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = 1 - \frac{1}{x^2} \frac{1}{[1 + (y/x)^2]^2} \\ - \frac{y^2}{x^4} \frac{1}{[1 + (y/x)^2]^2} \\ = 1 - \frac{1}{x^2} + \frac{3y^2}{x^4} - \frac{5y^4}{x^6} + \dots \\ + (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)y^{2(n-1)}}{x^{2n}} + \dots \\ u_y = -\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2} = -\frac{2y}{x^3} + \frac{4y^3}{x^5} - \frac{6y^5}{x^7} + \dots \\ + (-1)^n \frac{2ny^{2n-1}}{x^{2n+1}} + \dots \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)的  $u_x$ 、 $u_y$  代入式(2)中,对方程组分别积分并略去  $(k/x^3)$  的高阶项,可得

$$\begin{cases} v_x = [1 - f(x/k)/x^2] + \{(k/x^3) \dots\} \\ v_y = y_0 \{ [1 - f(x/k)]/kx^2 + (2/x^5)(1 - 2y_0^2) \} \\ y = y_0 [1 + f(x/k)/x^2 + (1 - y_0^2)/x^4] \\ f(x/k) = 1 - 2!(k/x) + 3!(k/x)^2 \\ - 4!(k/x)^3 + \dots + (-1)^{n-1} n! (k/x)^{n-1} + \dots \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为计算水滴运动轨迹初始条件的解析解。用式(4)可分析计算任一  $k$  值下水滴从无穷远处运行到距圆柱体截面中心距离为  $x = x_1$  处水滴的速度及位置。

### 2.2 水滴碰撞特性的评估

设  $\tau(=w_0/L) = 0$  时刻,气流位于以上分析计算结果  $x = x_1$  处。此时,气流已受扰动,水滴随气流沿  $X$  轴正方向运动过程中,轨迹和速度已发生变化,设初始条件为

$$\begin{cases} v_x(x_1, y_1, \rho) = v_1 \\ v_y(x_2, y_2, \rho) = v_2 \\ u_x(x_1, y_1, \rho) = u_1 \\ u_y(x_2, y_2, \rho) = u_1 \end{cases} \quad (5)$$

用分步积分法,可得任意时刻水滴速度及轨迹坐标。所有与圆柱相切的水滴轨迹中与圆柱相切的轨迹的  $Y$  坐标可确定水滴在圆柱体的碰撞特性。

## 3 旋转圆柱霜状结冰计算

在多功能人工气候试验室中进行覆冰试验时温

度较低,旋转圆柱体工作时表面结霜状冰。由于圆柱绕转轴做匀速运动,可以认为与圆柱迎风面发生碰撞的过冷却水滴在其表面均匀结冰,而使其外形一直保持为圆柱不变,霜状冰在圆柱外一层一层累积起来,圆柱的直径不断增加。

结霜状冰圆柱表面的局部热流关系如图3所示。

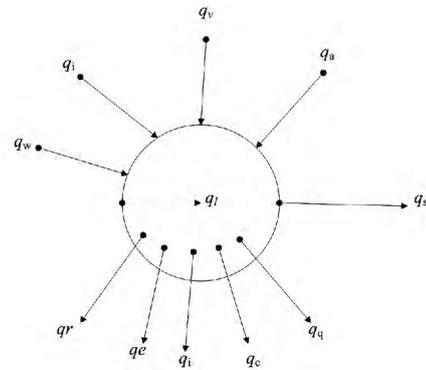


图3 结霜状冰圆柱表面的热流

圆柱表面的霜状冰结冰过程分为3个步骤:首先收集的水由环境温度  $t_a$  降至  $0^\circ\text{C}$ ;然后在  $0^\circ\text{C}$  下,所有的收集水凝结成冰,放出凝结潜热;最后  $0^\circ\text{C}$  的冰降至表面温度  $t_s$ ,对外放热,也可能有部分冰在温度  $t_s$  下发生升华。因此结霜状冰的圆柱表面的热流有

(1) 对流热损失  $q_c$  与  $q_q$

$$q_c = 2\pi Rh(T_s - T_a) \quad (6)$$

$$q_q = 2\pi Rh_p(T_s - T_a) \quad (7)$$

式中  $h$  和  $h_p$  分别是覆冰自然对流和强制对流的换热系数  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_a$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $T_s$  是覆冰动态平衡时固态冰表面温度,在湿增长过程中  $T_s = 273.15 \text{ K}$ ,而干增长过程中  $T_s < 273.15 \text{ K}$ 。

(2) 液水蒸发或冰升华产生的潜热损失  $q_e$

由液态水蒸发或冰的升华产生的潜热损失  $q_e$  为

$$q_e = 2\pi Rx [e(T_s) - e(T_a)] \quad (8)$$

式中  $e(T)$  表示温度为  $T$  时覆冰表面的水面或冰面的饱和水压,  $\text{kPa}$ ;  $x$  为蒸发或升华系数,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ 。

(3) 加热收集水到  $0^\circ\text{C}$  的热流  $q_l$

$$q_l = 2R\alpha_1\alpha_2v\omega c_w T_F(T_F - T_a) \quad (9)$$

式中  $c_w$  为水的比热  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\alpha_1$  为碰撞率;  $\alpha_2$  为捕获率;  $v$  为气流速度,  $\text{m/s}$ ;  $w$  为液态水含量,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $T_F$  为水滴凝结温度,  $\text{K}$ 。

(4) 水离开冰面带走热损失  $q_r$

$$q_l = 2R\alpha_1\alpha_2\omega v(1 - \alpha_3)(T_s - T_a) \quad (10)$$

式中  $\alpha_3$  为水滴冻结率。

(5) 空气摩擦加热  $q_v$

$$q_v = 2h_p r_c v^2 / 2c_a \quad (11)$$

式中  $r_c$  为圆柱体表面局部恢复系数;  $c_a$  为空气比热。

(6) 冰由 0 °C 冷却到表面温度时对表面加热

$q_a$

$$q_a = 2R\alpha_1\alpha_2\alpha_3\omega v c_i [(T_s + T_s) / 2] (T_F - T_s) \quad (12)$$

式中  $c_i$  为冰在膜温度下的比热。

(7) 收集水在 0 °C 结冰时释放的潜热  $q_i$

$$q_i = 2R\alpha_1\omega\alpha_2\alpha_3 v L_f \quad (13)$$

式中  $L_f$  为冰融化潜热 J/kg。

(8) 水滴动能引起的温升  $q_w$

$$q_w = \alpha_1\alpha_2\omega R v^3 \quad (14)$$

(9) 表面向外辐射热流  $q_s$

(10) 向内部的导热热流  $q_1$

由于表面温度  $t_s$  较低,向外辐射的散热热流  $q_s$  较小。可以忽略不计;冰层可以看作绝热材料,导热损失的热流  $q_1$  亦可忽略,所有热流的单位均为 J/(m<sup>2</sup>·s)。

圆柱体表面热流局部热平衡关系为

$$q_v + q_a + q_i + q_w = q_l + q_c + q_q + q_s + q_r \quad (15)$$

将上述公式(6)~(14)代入公式(15)中,设圆柱体覆冰在迎风面增长,且忽略水滴反弹的影响,即取  $\alpha_2 = 1$  并取温度的单位为 °C,则热平衡方程及其参量分析式为

$$\alpha_1\alpha_3\omega v L_f + h_p r_c v^2 / 2c_a + (\alpha\omega v) v^2 / 2 + \alpha_1\alpha_3\omega v c_i (T_F - T_a) = \alpha_1\omega v c_w (T_F - T_a) + \pi \{ (T_s - T_a) (h + h_p) + \chi [e(T_s - T_a)] \} + \alpha_1\omega v c_w (1 - \alpha_3) (T_s - T_a) \quad (16)$$

$I_m = \alpha_1\omega v$  为圆柱体最大覆冰强度,它表示单位时间(s)、单位面积(m<sup>2</sup>)圆柱体表面的覆冰量, g/(m<sup>2</sup>·s)。

与水滴运动方程类似,已知时间段内的结冰量计算是一个常微分的初值问题。可以对旋转圆柱体霜状结冰质量进行数值求解。

#### 4 旋转多圆柱数据分析与试验验证

由旋转圆柱的结冰特性分析可知,在常见的结

冰条件的范围内,结冰量  $m$  与液态水  $w$  含量由近似线性的关系。由于旋转多圆柱测量仪的各段圆柱暴露在相同的  $w$  环境下,所以当估计准确时,结冰量计算值  $m$  与测量值  $m^*$  的比例关系近似地反映了  $w$  估计值和实际值之间的比例关系。故试探法的核心思想如下。

①先假设 2 个较小的  $w$  和  $d$  的初值;②根据已知结冰条件,计算各个圆柱体上的结冰量  $m_i$ ;③由  $N$  个圆柱体工作段结冰量值和计算值得到  $N$  个坐标点( $m_i^*, m_i$ ),对其进行过原点的线性回归分析,计算回归线的斜率  $k_1$  以及线性相关系数  $r_i$ ;④给  $d$  一个微小的增量 5 μm,重复步骤②的计算,如果线性相关系数  $r_i$  增加,则继续增大  $d$  值;当线性相关系数  $r_i$  开始减小,则做步骤⑤;⑤如果回归线斜率与 1 相差不大,则估计的  $w$  即为所求结果;否则以  $w/k_1$  为新一轮计算的  $w$  估计值,重复步骤②进行新一轮试探。

最终由试探法逐步逼近,即可得到使各个圆柱体工作段的结冰量测量结果  $m_i^*$  与计算结果  $m_i$  具有最佳直线拟合效果的水滴参数  $w$  和  $d$ 。

#### 4.1 试验验证

表 1 第 1 次试验各圆柱体参数分析结果

圆柱体	直径 /m	长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	冰重 /g
1	0.042 68	0.102	0.013 64	54.64
2	0.034 9	0.102	0.011 18	48.36
3	0.029 5	0.102	0.009 44	42.10
4	0.025 1	0.102	0.008 04	38.86

试验条件:结冰时间为 18 000 s,风速为 3 m/s,气压为 98.7 kPa,环境温度为 -5 °C ~ -7 °C,冰表面温度为 0 °C。

由各个圆柱体工作段结冰量的结冰量计算值  $m$  与测量值  $m^*$  的线性拟合直线如图 4。

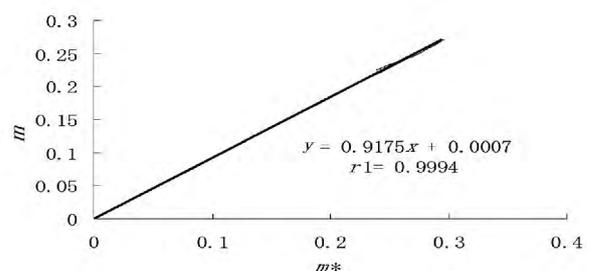


图 4 第 1 次结冰量计算值与监测值的线性拟合直线

其中相关系数  $r_1$  为 0.999 4,其值接近 1,表示线性相关程度很高。由此可以得到:水滴直径  $d$  为

50 μm 液态水含量为 3.2 g/m<sup>3</sup>。

控制多功能人工气候试验室的覆冰参数与第一次的试验条件基本一致,再进行一次试验,得到试验数据如表 2。

表 2 第 2 次试验各圆柱体参数分析结果

圆柱体	直径 /m	长度 /m	面积 /m <sup>2</sup>	冰重 /g
1	0.042 68	0.102	0.013 64	60.71
2	0.034 9	0.102	0.011 18	48.97
3	0.029 5	0.102	0.009 44	39.92
4	0.025 1	0.102	0.008 04	37.54

由各个圆柱体工作段结冰量的结冰量计算值  $m$  与测量值  $m^*$  的线性拟合直线如图 5。

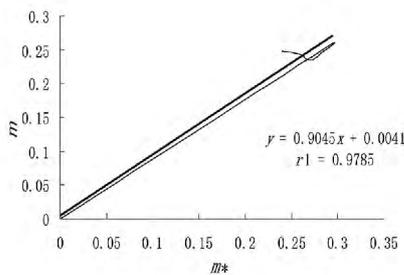


图 5 第 1 次试验结冰量计算值与测量值线性拟合直线  
相关系数  $r_1$  为 0.9785,其值接近 1。

## 5 总 结

所提出的旋转多圆柱测量仪水滴参数分析方法,可以在试验过程中对圆柱水滴碰撞轨迹、圆柱局部结冰状态和水滴参数进行分析,能够满足中国对于多功能人工气候试验室覆冰试验的要求。通过与试验所得数据进行对比,验证了所提出方法的正确性。

### 参考文献

[1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社,2001.

[2] 孙才新,司马文霞,舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社,2002.

[3] 蒋兴良,张志劲,胡建林,等. 高海拔下不同伞形结构 750 kV 合成绝缘子短样交流覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12): 159-164.

[4] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学,1997.

[5] Al-Hamoudi I Y. Performance of High Voltage Insulators under Heavy Natural Icing Conditions [C]. Proceedings

of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance [S. l. ], 1995: 25-31.

[6] Farzaneh M, J. Zhang and C. Volat. Effect of Insulator Diameter on AC Flashover Voltage of an Ice-covered Insulator String [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 26(1): 34-41.

[7] Lambeth P J. Variable Voltage Application for Insulator Icing Tests [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1988, 3(4): 2103-2111.

[8] Jiang Xingliang, Shaohua Wang, Zhang Zhijin, et al. Study on AC Flashover Performance and Discharge Process of Polluted and Iced IEC Standard Suspension Insulator String [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 472-480.

[9] Farzaneh M, Baker T. Insulator Icing Test Methods and Procedures: A Position Paper Prepared by the IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2002, 18(10): 1503-1515.

[10] 蒋兴良,苑吉河,孙才新. 绝缘子覆冰及其电气试验方法探讨[J]. 高电压技术,2005,31(5): 4-6.

[11] IEEE Std. 4-1995, IEEE standard techniques for high voltage testing [S].

[12] GB/T 4585-2004, 交流系统用高压绝缘子人工覆冰试验[S].

[13] Ramos N G, Campillo R M T, Naito K. A Study on the Characteristics of Various Conductive Contaminants Accumulated on High Voltage Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1842-1850.

[14] Zhou J G, Dong G, Imakoma T, et al. Contamination Performance of Outer-rib Type Suspension Insulators [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Yokohama, Japan, 2002, 3: 2185-2190.

[15] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、覆冰、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 115-120.

[16] 司马文霞,蒋兴良,武利会,等. 低气压下覆冰染污 10 kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7): 122-126.

[17] 蒋兴良,武利会,司马文霞,等. 低气压下 XZP/XZWP<sub>4</sub>-160 直流绝缘子覆冰闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6): 111-115.

(收稿日期: 2014-07-02)

# 集群接入的风电场联络线单相重合策略研究

辛超山, 吕盼

(国网新疆经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 自动重合闸技术被广泛应用在输电线路中,是保证电力系统安全稳定运行的重要措施之一。对于集群风电场,研究表明,二次电弧长时间无法熄灭是造成风电场联络线单相重合闸失败的重要原因,重合不成功,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响相邻风电场。从潜供电流入手,在分析了线路数学模型的基础上,结合风电特性,提出了抑制潜供电流,缩短熄弧时间的方法,在一定程度上提高了单相重合的成功率。

**关键词:** 风电;送出线路;重合闸

**Abstract:** Automatic reclosing technology is widely used in transmission lines, and it is one of the important measures to ensure the safe and stable operation of power system. For grid-connected large-scale wind farms, the researches show that the important reason for the failure of single-phase reclosing of tie line is that secondary arc cannot extinguish for a long time. The failure of reclosing not only impacts on the wind farm, but also affects the adjacent wind farm. Based on the analysis of mathematical model of tie line and combined with the characteristics of wind power, a method that can inhibit the arc current and shorten the extinguishing time of secondary arc is proposed, which could improve the success rate of single-phase reclosing to a certain extent.

**Key words:** wind power; outgoing transmission lines; reclosing

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0064-04

## 0 引言

能源危机已受到世界各国的高度关注,大力发展可再生能源已成为目前社会的当务之急。风电作为中国基本能源政策对缓解能源供应、改善能源结构、保护环境、实现和谐社会和电力工业可持续发展具有重大意义,加快可再生清洁能源的发展和高效利用已成为中国能源领域的重点发展战略之一。

由于受风能资源的影响,风电场运行方式多变使风电场集群的故障特性具有特殊性,常规故障分析如叠加原理不适应,无法进行数学分析<sup>[1-3]</sup>。随着风电高渗透接入和单元容量的增加,不考虑风电的运行特性及其影响,按常规线路配置保护及重合闸(一般重合闸不投或采用单相重合闸),容易导致保护误动、配合困难,导致风电机组不必要的切机,既影响风电场的经济效益也会影响系统的安全稳定运行,且难以实现电网故障时的电源支持。从近年来的运行情况来看,如果风电场并网专用线路发生故障,具备无功支撑及低电压穿越能力的风电场运

行工况不同,故障性质不同,重合的效果也大不相同。如果重合策略不合理,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响电网及其他相邻并网风电场,而风电场的集群特性还可能放大这种影响,导致事故扩大,严重影响风电场及系统的安全稳定运行。随着风电场集群规模及系统中风电容量的不断增大,合理的重合闸策略已成为保证风电场及其接入系统稳定运行的前提。下面旨在依据集群风电场的运行特点和研究风电场故障穿越动态特性的基础上,研究适应风电场集群运行特点的重合闸策略。

风电场故障特性随运行方式、风电机组类型而变。在风电场故障特性及相关保护方面,国内外学者已进行了大量研究,取得了一定的研究成果。而与风电相关的重合闸研究方面对分布式发电系统中重合闸技术的研究较多<sup>[4-6]</sup>。文献[7]研究了影响双侧有源线路重合闸的主要因素,分析了准同期重合闸方式的可行性。文献[8]剖析了风电场侧保护重合闸采用检同期方式难以动作成功的原因,提出了风电场并网联络线重合闸的合理配合方式。文献[9]详细分析了大规模风电场对保护和重合闸的影

响,提出了相关建议措施。

下面将重点对集群风电场联络线的单相重合闸展开研究,从潜供电流入手,在分析了线路数学模型的基础上,结合风电特性,提出了抑制潜供电流,缩短熄弧时间的方法,在一定程度上提高了单相重合的成功率。

## 1 线路数学模型分析

如图1所示,假设输电线路c相发生单相接地故障,故障后c相两侧断路器跳开。但是由于故障相和正常相之间存在电感耦合和电容耦合,另一方面,线路此时非全相运行,正常相还将持续流过电流,通过线路间互感在故障相产生互感电势 $E_M$ ,然后通过故障相对地电容 $C_0$ 由故障点形成互感电流。电容电流和互感电流之和称为潜供电流。

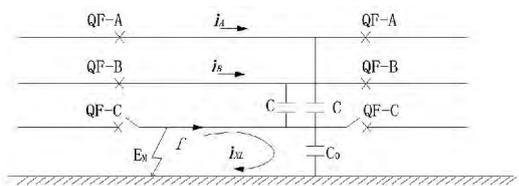


图1 潜供电流原理图

根据图1推导潜供电流数学模型,为简化模型,不考虑非故障相对地电容、故障相电阻及有功泄漏。故障相电压 $\dot{U}$ 和电流 $i$ 偏微分方程为

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial l} = j\omega L \dot{I} + j\omega M(\dot{I}_A + \dot{I}_B) \quad (1)$$

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial l} = j\omega C_0 \dot{U} + j\omega \times 2C [\dot{U} - \frac{1}{2}(\dot{U}_A + \dot{U}_B)] \quad (2)$$

式中 $U$ 为故障相电压; $I$ 为c相故障电流; $l$ 为线路长度,以下均相同不再复述。

设电弧电阻不计,短路点位于 $x$ 处,在前半段 $0-x$ 处有

$$(始端) \dot{U} = \dot{U}_1, \dot{I} = \dot{I}_1 = 0$$

$$(末端) \dot{U} = \dot{U}_x = 0, \dot{I} = \dot{I}_x$$

将边界条件带入推导得

$$0 = \dot{U}_1 chyx + \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} (1 - chyx) - \frac{M}{L} Z_C \dot{I}_{A+B} shyx \quad (3)$$

$$\dot{I}'_x = -\frac{\dot{U}_x}{Z_C} shy + \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} shyx + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} (chyx - 1) \quad (4)$$

两式联立得

$$\dot{I}'_x = \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} shyx + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} (\frac{1}{chyx} - 1) \quad (5)$$

该式只能求解左半边提供的潜供电流,同理有后半部分量为

$$\dot{I}''_x = \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} thy(1-x) + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} [1 - \frac{1}{chy(l-x)}] \quad (6)$$

总的潜供电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_x &= \dot{I}'_x + \dot{I}''_x \\ &= \frac{2C}{\sqrt{L(C_0 + 2C)}} \dot{U}_{A+B} [thyx + thyx(1-x)] + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} \\ & \quad [\frac{1}{chyx} - \frac{1}{chy(1-x)}] \end{aligned} \quad (7)$$

由该表达式可知,组成潜供电流的两部分不仅与线路参数有关,还与故障位置相关,前一分量耦合电容占主导,与线路长度呈线性关系;后一分量由相间互感耦合决定,不仅与线路参数有关,还与线路传送功率及故障位置有关。

潜供电弧熄灭瞬间在弧道上产生的电压叫做恢复电压。如果恢复电压上升快、幅值高,就会使弧道重燃,研究表明潜供电流和恢复电压是影响电弧熄灭的两个主要因素。

## 2 集群风电场重合动态特性分析

图2是某地区集群风电场接入电网地理接线图。以图中风电场A为例,假设送出线路发生单相接地故障,仿真验证其重合不成功对电网的冲击。220kV送出线路1s发生单相接地故障,1.05s保护速断,2.5s单相重合,重合失败后2.6s风电场跳三相脱网的动态过程。

如果风电场并网专用线路发生故障,具备无功支撑及低电压穿越能力的风电场运行工况不同,故

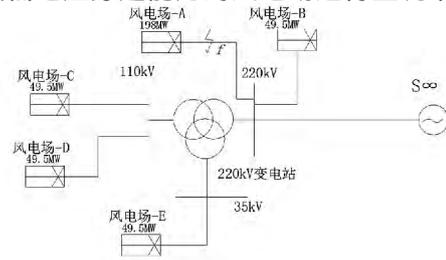


图2 地理接线示意图

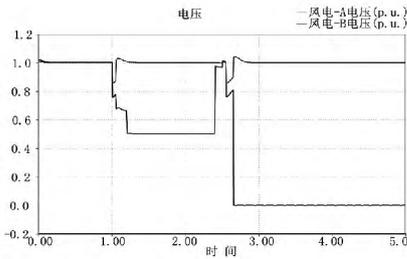


图 3 风电场 A、B 母线电压曲线

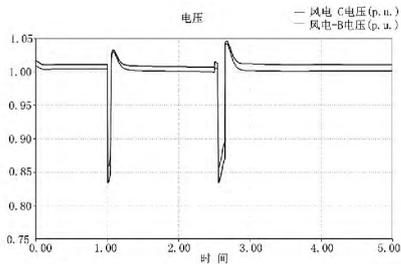


图 4 风电场 B、C 母线电压曲线

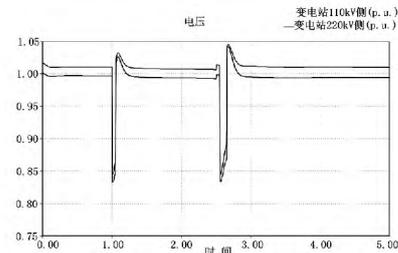


图 5 220 kV 变电站母线电压曲线

障性质不同,重合的效果也大不相同。仿真结果表明,如果重合策略不合理,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响电网及其他相邻并网风电场,而风电场的集群特性还可能放大这种影响,极端情况下可能导致集群脱网事故。

现有风电场送出线路重合配置与常规电源无异,单相自动重合闸都是固定时限的,整定值的选取考虑电弧熄灭时间、绝缘强度的恢复、以及两侧保护的动作时间。综合考虑一般取  $0.6 \sim 1.5 \text{ s}^{[10]}$ 。故障点的电弧熄灭时间不但与线路参数有关,还与故障点的风速、电弧长度、潜供电流等因素有关,因此恶劣天气条件下二次电弧长时间无法熄灭会极大增加重合失败的可能。

### 3 重合措施分析与仿真

#### 3.1 重合措施分析

条件不同电弧熄灭时间也不同,当输电线路在恶劣天气条件下,如雨、雾等潮湿天气发生单相接地

故障,两侧断路器跳开后很长时间二次电弧无法熄灭,在线路参数固定的前提下,如何降低潜供电流是决定单相重合成功率的决定因素。针对集群接入的风电场恶劣条件下单相重合成功率不高的原因,提出以下解决措施。

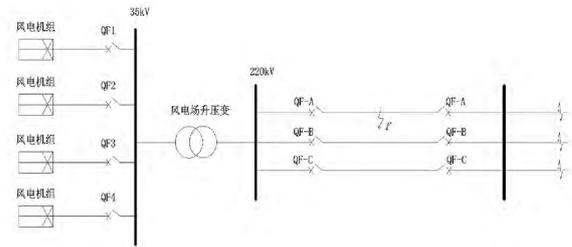


图 6 单相重合策略示意图

根据前述数学分析,式(7)中潜供电流由两部分组成,前一分量耦合电容占主导,与线路长度呈线性关系;后一分量由相间互感耦合决定,不仅与线路参数有关,还与线路传送功率有关,如若在故障同时限制风电场出力,就能达到降低潜供电流,加速电弧熄灭的目的。

因此提出的重合策略为:当送出线路 f 点发生单相接地故障,两侧断路器 QF - A 断开后,风电场侧集电线路 QF1 断开。通过限制风电场出力,从而减小联络线的功率传送,达到抑制潜供电流,使电弧快速熄灭,重合时 QF - A 重合成功后 QF1 通过检同期并入电网。而风电场是由若干条集电线路组成,这为重合策略的实施提供了可能。

#### 3.2 重合策略仿真验证

以图 2 为例搭建仿真模型,采用 PSASP 仿真软件分析风电场 A 联络线路故障后,通过限制风电场出力达到降低潜供电流的目的。

风电场 A 总容量 198 MW,通过一条 220 kV 送出线路接入一座 220 kV 变电站。送出线路 1 s 发生单相接地故障,1.02 s 保护速断,2.5 s 单相重合,分别仿真送出线路传输功率为 198 MW 和 180 MW,约限制出力 20 MW 情况下线路潜供电流值。

潜供电流值取故障后 0.1 s 时  $I_A$  的值。其值由软件报表输出,单位为标么值。有名值由下列公式可算出。

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3}U_A}$$

$$I = I_{A^*} \cdot I_A$$

潜供电流标么值:  $I_{A^*} = 0.02371$

潜供电流值:  $I = 0.023\ 71 \times 251.02 = 5.951\ 6\ \text{A}$

不同线路长度下潜供电流值如表 1 所示。

表 1 潜供电流计算值 /A

联络线长度 /km	传输容量	
	198 MW	180 MW
50	5.951 6	4.846 8
100	12.99	10.019

仿真结果表明,风电场故障时,在非全相运行期间通过限制风电场出力能在一定程度上降低潜供电流,从而加速电弧熄灭。

现有单相重合闸都为固定时限,整定值的设定综合考虑了电弧熄灭时间及其绝缘恢复时间,因而成功率较高。而恶劣天气严重影响熄弧时间,极大地增加了重合失败的可能性,该重合策略能在恶劣外界条件的情况下,通过抑制潜供电流加速熄弧,提高重合成功率。但同时该方法具有一定局限性,在风电满发且天气条件恶劣时效果明显。

该方案通过切机的方式来限制潜供电流,与现有风电场并网规程不相符,但如若重合失败,不但该风电场脱网,极端情况下可能导致附近风电场群脱网,给电网带来灾难性的后果。而如若对风电场小部分主动切机来抑制潜供电流,不但对电网影响微乎其微,而且达到了提高重合成功率的目的,从这一点出发,该方法具有一定的借鉴意义。

## 4 结 论

两侧断路器跳开后很长时间二次电弧无法熄灭,是造成联络线单相重合闸失败的主要原因,从理论上分析了联络线潜供电流的数学模型,提出了在非全相运行期间通过限制风电场出力达到抑制潜供电流,加速电弧熄灭的目的,虽然具有局限性,但在特定情况下有一定的借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 何世恩,董新洲.大规模风电机组脱网原因分析及对策[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137,144.
- [2] HE Shi-en, WANG Wei-zhou, JIA Huai-sen, et al. Integration of Wind Power into Gansu Grid and Its Operation[C]. The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN, Nanjing, April 5-7, 2009.
- [3] 徐玮,杨玉林,李政光.甘肃酒泉大规模风电参与电力市场模式及其消纳方案[J].电网技术,2010,34(6):71-77.
- [4] 张保会,王进,李光辉.具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J].电力系统自动化设备,2012,32(3):1-6.
- [5] 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,2007,30(3):30-34.
- [6] 赵月灵,李华忠,孙鸣.分布式电源接入对变电站距离保护及重合闸的影响[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):217-221.
- [7] 夏成军,代文良,邱桂华,等.提高110 kV电网供电可靠性的重合闸方式研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(11):133-137.
- [8] 宋少群,付超,张兰英,等.风电场并网联络线重合闸的合理配合方式[J].电力系统自动化,2010,34(20):77-80.
- [9] He Shien, Suonan Jiale, Kang Xiaoning, et al. Impacts of Large-scale Wind Power Grid Integration on Relay Protection and Countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 136-142.
- [10] 贺家李,李永丽,董新洲,等.电力系统继电保护原理(4版)[M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

辛超山(1989),硕士,从事电网规划相关工作。

(收稿日期:2014-06-26)

## 川藏联网启动安全调试监督

2014年9月11~17日,根据川藏联网工程建设指挥部要求,国网四川省电力公司提前介入工程安装调试阶段的技术监督工作。

本次监督严格依据国网四川电力18项反措《物资采购标准——高海拔外绝缘配置技术规范》和《高原地区电网运维技术要求》等技术标准开展。

转自《西南电力报》

# 万州电网 AVC 系统遥控成功率低问题探讨

王小波 张长春 刘 钢  
(万州供电公司 重庆 万州 404000)

**摘要:** 首先介绍了 AVC 系统控制原理;接着针对万州电网 AVC 系统遥控成功率低的问题,结合具体变电站设备遥控失败的现象(如遥控返校错误、未收到变位动作、遥控执行失败等),以分析报文为手段,讨论失败的原因;最后提出解决方法,并将其方法用于其他厂站设备研究,大大提高万州电网 AVC 系统遥控成功率。

**关键词:** AVC 系统;控制原理;变电站;遥控成功率;报文

**Abstract:** Firstly, the control theory of automatic voltage control (AVC) system is introduced. Then aiming at the low success rate of remote control in AVC system, the reasons are discussed by means of message analysis considering the remote control failures of substation equipment. At last, the solutions are put forward and applied to the equipment research in other power plants and substations, which greatly improves the success rate of remote control for AVC system in Wanzhu power grid.

**Key words:** automatic voltage control system; control theory; substation; success rate of remote control; message

中图分类号: 763 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0068-04

## 0 引言

重庆万州电网监控区现有 28 座变电站,其中 220 kV 变电站 12 座、110 kV 变电站 8 座和 35 kV 变电站 8 座,已经全部实现无人值班,并由万州供电公司调控中心负责监控工作。万州电网 AVC 系统是在调控一体化系统 IES-600 平台的基础上建设和完善的,主要功能在于通过改变电网中可控无功电源的出力、无功补偿设备的投切、变压器分接头的调整来协调上级调度完成电压无功的分层控制,从而达到提高电压合格率和降低网损的目的<sup>[1]</sup>。目前该系统已运行一年有余,运行比较稳定,但在运行中发现某些厂站设备遥控成功率不高的问题。为了提高 AVC 系统遥控成功率,保证系统更加稳定运行,万州供电公司组织运检部和调控中心相关专业技术人员对此问题进行研究和解决。

## 1 AVC 系统控制原理

AVC 系统原理图如图 1 所示。AVC 系统从 SCADA 侧获取实时数据,并对数据进行滤波,进行网络拓扑分析,对网络进行动态分区,自动生成监控点,根据当前电压情况和关口功率因数情况,再根据

灵敏度计算结果,查找可以使用的控制设备,产生控制方案,启动遥控操作。遥控命令由前置机系统下发,通过串行通道或数据网通道到达变电站远动总控,再到间隔测控装置,最后经过断路器执行机构对断路器进行实际拉合。

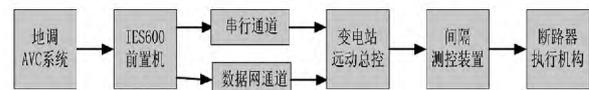


图 1 AVC 系统控制原理图

## 2 存在问题分析

AVC 系统遥控出口是通过前置机出口。遥控操作分为 3 个步骤:遥控预置、遥控命令、遥控执行,任何一步不成功都将会造成遥控失败,可能是主站设置问题、通道问题、站端总控设置问题、测控装置问题、断路器执行机构闭锁问题等,归结起来:遥控失败的原因主要在于遥控返校超时、遥控返校错误、遥控执行失败、未收到变位动作等。

下面以万州电网 AVC 系统 2013 年 7 月至 12 月遥控成功率比较低的几个典型设备进行分析。如表 1 所示。

从表 1 可以看出,造成以上设备遥控成功率低

的原因主要包括遥控返校错误、遥控执行失败、未收到变位动作 3 种现象。下面将一一对这 3 种问题进行分析和研究。

表 1 2013 年 7 月至 12 月 AVC 成功率情况

设备	AVC 遥控次数	遥控失败次数	成功率 /%	失败原因
七桥变电站 2 号主变压器	812	315	72.05	遥控返校错误
福祿变电站 1 号电容器	30	16	46.67	未收到变位
福祿变电站 2 号电容器	15	7	68.18	未收到变位
龙都变电站 1 号主变压器	102	23	81.60	遥控执行失败
龙都变电站 2 号主变压器	118	21	84.89	遥控执行失败
云龙变电站 1 号主变压器	341	120	64.84	遥控执行失败
梁平变电站 2 号电容器	27	11	70.27	遥控执行失败

### 3 遥控返校错误原因分析和改进

#### 3.1 遥控返校错误常见原因<sup>[2]</sup>

(1) 测控屏上远方/就地操作把手处于就地位置。此时遥控回路不通,会导致遥控返校错误。

(2) 通道原因。通道误码率高时,会导致主站不能正确接收厂站遥控返校报文。

(3) 设备处于闭锁操作状态。当设备满足逻辑闭锁条件时,会导致设备遥控返校错误。

#### 3.2 七桥变电站 2 号主变压器问题分析

七桥变电站 1 号主变压器遥控成功率在 95% 以上,可以排除通道原因;经值班人员核实,主变压器测控屏上远方/就地操作把手处于远方位置。前两种原因均排除,很有可能是第 3 种原因造成,设备处于闭锁操作状态。

经二次班人员到现场核实 2 号主变压器未处于闭锁状态,但是两台主变压器遥调间隔设置为 10 s。主站人员在人机界面上对七桥变电站 2 号主变压器做 10 次遥控返校。间隔时间为 5 s 时,9 次遥控返校错误;间隔时间为 10 s 时,9 次遥控正确。AVC 系统两台主变压器遥调间隔时间设置为 5 s,当 1 号主变压器遥调成功后 5 s 过后对 2 号主变压器进行遥调,由于变电站设置为 10 s,此时 2 号主变压器还处于闭锁状态,因此返校错误。以 2014 年 1 月 10

日 16 时 03 分 19 秒的报文为例进行说明。

(1) 主站对 2 号主变压器下发选择命令

主站 -> 厂站: 16:03:19 68 0E 8C 0A 74 88 2E  
01 06 00 01 00 14 60 00 82

(2) 厂站向主站返回错误的返校命令

厂站 -> 主站: 16:03:19 68 0E 74 88 8E 0A 2E  
01 47 00 01 00 14 60 00 82

由以上报文可知:主站向厂站发送报文 06(激活),厂站本应返回报文 07(激活确认),但主站接收的是传输原因为 47(未知的信息对象地址)<sup>[3-4]</sup>的拒绝报文,因而返校错误。

#### 3.3 七桥变电站 2 号主变压器解决措施

由以上分析可知,造成七桥变电站 2 号主变压器遥调成功率低的问题在于是 AVC 系统并列运行的主变压器间隔时间小于厂站设置的间隔时间。由于厂站主变压器遥调间隔设置为 10 s 不能更改,只有将主站间隔 5 s 修改为 10 s。修改后,七桥变电站 2 号主变压器遥控成功率大大提高。2014 年 1 月到 3 月有显著提高,由之前的 72.05% 提高到 93.4%。

### 4 未收到变位动作原因分析和改进

调度主站在规定时间内(一般是 30 s)没有收到厂站上传的变位遥信,就判定为未收到变位动作,当 AVC 系统连续对某设备 3 次操作未成功时,将会闭锁该设备<sup>[5]</sup>。下面以福祿变电站 1 号电容器为例进行分析。

#### 4.1 福祿站 1 号电容器问题分析

AVC 系统对福祿变电站 1 号电容器进行遥控,每次均返校正确,但经常收不到变位信息,如图 2 所示。

由图 2 的事项查看器可以看出,执行遥控命令时,30 s 未收到变位信息,系统就会判未到变位动作。但实际上遥控命令执行 60 s 左右后,变位信息上传,开关发生变位。如图 3 所示。

针对福祿变电站 1 号电容器未收到变位动作的问题。主站人员对遥控返校报文进行分析。如表 2 所示。

0000A2(10) = 162, 0003D9(10) = 985。由于主站遥信从 0 开始,厂站遥信从 1 开始,则 00A2(10) 对应的主站的 162 - 1 = 161 点, 0003D9(10) 对应的主站的 985 - 1 = 984 点。

从以上报文分析得出:遥控返校正确,执行命令也正常发出,变位信号也及时上传,但 1 点 29 分 50

历史事项	事项类型	发生时间	厂站名	部件名称	具体内容	操作者类别	操作者
遥控操作类	遥控操作类	2014/01/05 01:30:16.897	35kV福祿站	万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关	对万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关进行遥控,未收到变位动作	系统自动	操作人:AUTO_CTRL,监护人:
遥控操作类	遥控操作类	2014/01/05 01:29:46.603	35kV福祿站	万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关	对万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关下达遥控执行命令	系统自动	操作人:AUTO_CTRL,监护人:
遥控操作类	遥控操作类	2014/01/05 01:29:46.443	35kV福祿站	万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关	对万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关进行遥控,返校正确	系统自动	操作人:AUTO_CTRL,监护人:
遥控操作类	遥控操作类	2014/01/05 01:29:44.590	35kV福祿站	万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关	对万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关下达遥控(选择)命令	系统自动	操作人:AUTO_CTRL,监护人:

图 2 2014 年 1 月 5 日福祿变电站遥控操作事项

历史事项	事项类型	发生时间	厂站名	部件名称	具体内容
开关事项	开关事项	2014/01/05 01:30:52.512	35kV福祿站	万州35kV福祿站10kV#1电容器951开关	合闸

图 3 2014 年 1 月 5 日福祿变电站关变位事项

表 2 遥控报文分析

遥控流程	报 文
遥控前置	68 0E 96 0A A2 89 2E 01 06 00 01 00 14 60 00 82
遥控返校	68 0E A4 89 98 0A 2E 01 07 00 01 00 14 60 00 82
执行下发	68 0E 98 0A A6 89 2E 01 06 00 01 00 14 60 00 02
厂站返回	68 0E A6 89 9A 0A 2E 01 07 00 01 00 14 60 00 02
变位信号	68 0E 12 46 B0 01 01 01 03 00 01 00 A2 00 00 02
变位信号	68 0E 12 46 B0 01 01 01 03 00 01 00 D9 03 00 02

厂站第一次上传变位信号时间:01:29:50:23  
厂站第二次上传变位信号时间:01:30:52:51

秒上传的变位信号对应的地址是 161 点,但主站通信表 1 号电容器合位是定义在 984 点,161 号点能及时收到变位信号。60 s 过后,1 点 30 分 52 秒:984 点接收到变位信号。由二次班到现场核实 161 点是硬信号,984 点是软信号。

经分析得出结论可知:造成福祿变电站 1 号电容器主要原因在于主站接收的是软信号,没有接收硬信号。

#### 4.2 福祿变电站 1 号电容器解决措施

将主站软信号点(984)删除,添加硬信号点(161)。修改后,福祿变电站 1 号电容器遥控成功率大大提高。2014 年 1 月到 3 月有显著提高,由之前的 4.67% 提高到 91.23%。

### 5 遥控执行失败原因分析和改进

#### 5.1 遥控执行失败的主要原因<sup>[6]</sup>

• 70 •

(1) 遥控电源断开。当遥控电源断开时,遥控点的执行继电器处于失电状态,不能执行遥控点的开合操作,会导致遥控执行失败。

(2) 出口执行继电器不能正确动作。一般有两种原因,一是执行继电器失电,二是继电器损坏,均会导致遥控执行失败。

(3) 通道原因。下行通道质量问题。

#### 5.2 龙都主变电站问题分析

经检修公司值班人员核实,龙都变电站两台主变压器遥控电源均正常,出口继电器均能正确动作,那主要原因可能在于通道原因。

龙都变电站有串行和调度数据网两种通道,但串行通道长期处于主通道,由于串行通道可靠性不高,且传输数据质量不好,主变压器遥控成功率低的问题可能是通道原因造成。

于是主站人员将龙都变电站调度数据网通道切为主通道进行观察。从 2014 年 1 月份开始,龙都变电站两台主变压器遥调成功率都有所提高,据统计 2014 年 1 月 1 号主变压器成功率达到 92.6%,2 号主变压器高达 94.48%。

## 6 结 论

自动化主站和二次班人员通过 AVC 系统七桥变电站、福祿变电站、龙都变电站问题的探讨,解决了七桥变电站 2 号主变压器、福祿变电站 1 号电容器、龙都变电站主变压器遥控成功率低的问题,并以此类推,将此研究方法用于其他厂站设备遥控成功率研究,各设备遥控成功率均大大提高,如表 3 所示。从表 3 可以看出,福祿变电站 2 号电容器由 68.18% 提高到 91.27%,云龙变电站 1 号主变压器由 64.84% 提高到 89.37%,梁平变电站 2 号电容器

由 70.27% 提高到 91.15%。

表 3 2014 年 1 月至 3 月 AVC 成功率情况

设备	AVC 遥控次数	遥控失败次数	成功率 /%	解决方法
福祿变电站 2 号电容器	275	24	91.27	主站接收硬信号
云龙变电站 1 号主变压器	254	27	89.37	采用数据网络通道
梁平变电站 2 号电容器	316	9	91.15	采用数据网络通道

在对 AVC 系统遥控成功率进行探讨时,分析报文是一个很好的手段,通过报文分析,基本上可以判断出问题的原因。

由于 AVC 系统遥控成功率的提高,使得调控中心人工遥控的次数大大减少,减轻工作量,提高了工作效率,也提高了电网电压合格率,保证电网安全运行。

参考文献

[1] 张勇军,林建熙,杨银国. 电力系统无功电压调控配合研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 101-106.

[2] 黄益庄. 变电站自动化技术的发展方向[J]. 继电器,

(上接第 8 页)

(2) “疆电入川”项目工程投运后,在不改变四川水电、火电机容量的情况下,对 2015 年四川电网 500 kV 以上各站点短路电流水平的影响很小。采用直流输电方式将新疆的富裕电力输送到四川电网,并不会增大四川电网的短路电流水平;

(3) 当前,随着交流特高压工程的逐步建设,新增大电源的不断接入,各地区电网存在 500 kV、220 kV 环网问题,将导致四川电网各站点短路电流水平将不断增大,甚至某些站点的短路电流已经或者可能超过对应母线开关的最大遮断容量,需要对四川电网 500 kV 各站点采取有效限制短路电流的措施。

参考文献

[1] 本刊编辑部. “疆电外送”特高压直流前期正式启动[J]. 华北电力技术, 2011(8): 4.

[2] 新疆电力公司. “疆电外送”工程打造能源输出空中大通道[OL]. 国家电网公司, <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/gsyw/yxfc/07/277399.shtml> [2012-07-30].

[3] 陈虎,张英敏,贺洋,等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.

[4] 张粒子,王睿,金允剑,等. 基于跨省发电权交易的“疆

2008, 36(6): 1-3.

[3] 张士勇,陈春,贾大昌,等. 应用 101(104) 规约的“电网调度自动化系统”在现场调试维护中的关键技术分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 148-152.

[4] 中华人民共和国国家能源局. DL/T 634. 5104-2009 远动设备及系统 第 5-104 部分 传输规约采用标准传输协议集的 IEC 60870-5-101 网络访问[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[5] 王奕. 无功自动调节系统遥控成功率较低的原因分析和改进[J]. 电力设备, 2007, 8(7): 61-63.

[6] 周鹤鹤,刘康军. 电网 AVC 系统存在的问题及改进措施[J]. 电工技术, 2010(10): 29-30.

作者简介:

王小波(1986), 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

张长春(1982) 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

刘钢(1986) 硕士研究生, 助工, 研究方向为电力系统调度自动化。

(收稿日期: 2013-04-08)

电外送”交易模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 69-74.

[5] 刘楠,唐晓俊,张文朝,等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136.

[6] 白宏坤,李干生. 关于电磁环网若开环方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 60-63.

[7] 王强,李建. 四川西部电网解环分区运行研究[J]. 华中电力, 2008, 21(4): 12-14.

[8] 杨冬,刘玉田,牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.

[9] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.

[10] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介:

蒋乐(1975), 博士研究生, 高级工程师, 从事特超高压输电技术与电力系统分析工作与研究;

魏震波(1978), 博士, 讲师, 从事电力系统安全稳定分析与控制、电力市场、智能电网及相关计算机应用等研究;

刘俊勇(1963), 教授, 博导, 研究方向为电力系统分析及电力市场研究。

(收稿日期: 2014-07-28)

# 一种基于 DSP 的变压器绕组温度测量

刘翔宇 杨 明

( 国网成都供电公司变电检修工区 ,四川 成都 610041)

**摘 要:** 在传统的压力式油温温度计的基础上,采用 DSP( digital signal processing) 对绕组温度模拟计算,将传统的加热元件数字化、智能化改造,满足智能电网的要求,实际运行中准确模拟出绕组温度具有较高的实用价值。

**关键词:** 温包; 油温温度; 绕组测温; 电热元件; 匹配器; 动作接点; 热电阻 Pt100; DSP

**Abstract:** Based on the traditional pressure type oil temperature controller ,digital signal processing ( DSP) is adopted to simulate and calculate the winding temperature. The traditional heating element is digitized and intelligentized to meet the requirements of the smart grid. This method is quite useful to measure the winding temperature precisely in the actual operation.

**Key words:** thermometer bulb; oil temperature; winding temperature measurement; electrothermal element; matching device; operating contact; thermal resistance Pt100; digital signal processing

中图分类号: TM933 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954( 2014) 05 - 0072 - 03

## 0 引 言

变压器运行中,如果遇到短路、过载、环境温度过高或冷却通风不够等情况时,会造成变压器过热。当绕组温度超过绝缘耐受温度时会使绝缘破坏,是导致变压器寿命缩短的主要原因之一。作为变压器运行工况监测的重要参数,油温及绕组温度的测量关系到运行中的变压器风冷投入、温高报警、温度过高跳闸等保护的正常动作。

由于目前变压器测温系统均采用压力式温度计。绕组温度的直接测量需要解决高电压隔离的问题,是一项世界级难题,国内外绝大部分变电站均采用热模拟方法间接测量变压器绕组温度。绕组温度由变压器顶层油温使仪表内弹性波纹管产生对应的角位移量,叠加仪表内发热元件产生的角位移量,从而指示变压器绕组温度,发热元件通过匹配器及变压器 TA 二次侧负载情况变化而补偿不同的铜油温差。

基于热模拟方式的绕组温度测量方式,由于通过 TA 二次侧电流对加热元件进行加热,根据铜油温差曲线产生模拟温升,这种方式受环境温度影响很大,特别是变压器轻载、重载不同的工况下,变压器周围的空气温度会有 30 ~ 40 °C 的差异,导致加热温包在不同环境温度下产生的加热温升差异很大,绕组温度测量误差很大,在成都电网某 220 kV 变电站重载运行工况下绕组温度误差达 15 °C,同时,由

于温度计安装于变压器本体,震动较大,传统的微动开关受震动影响大,误动及损坏概率很大,特别是目前大多数 220 kV 强油循环变压器,温度投入跳闸接点后这个问题日趋显著。

## 1 压力式温度计测量原理

### 1.1 压力式温度计测量原理

压力式温度计,主要由弹性元件、毛细管、温包和微动开关组成。当温包受热时,温包内感温介质受热膨胀所产生的体积增量,通过毛细管传递到弹性元件上,使弹性元件产生一个位移,这个位移经机构放大后指示出被测温度并带动微动开关,从而控制冷却系统、温度高报警、温度高跳闸的投入或退出。压力式温度计内部结构如图 1 所示。

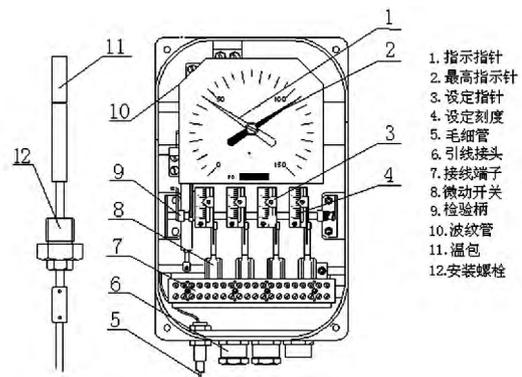


图 1 压力式温度计内部结构

### 1.2 变压器用绕组温度计测量原理

绕组温度的监测,当前国内外绝大部分变电站均采用热模拟的方法间接测量。所谓热模拟是用一个流经电热元件的加热电流所产生的附加温升,当这个附加温升调整到等同于铜油温差时就可以间接获得变压器绕组温度,也就是变压器绕组温度  $T_1$  等于变压器上层油温  $T_2$  以及绕组对油的温升  $\Delta T$  之和,即  $T_1 = T_2 + \Delta T$ 。目前,获取绕组温度的方式是校验前计算并调整好加热电流,即利用在变压器容量、额定电压、额定负荷电流和铜油温差手动计算出加热电流,利用标准源通过匹配器输出加热电流对绕组温度计进行校验。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  $\Delta T$ 。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。全部通过人工进行计算、调整、校验。绕组温度计测温原理如图 2 所示。

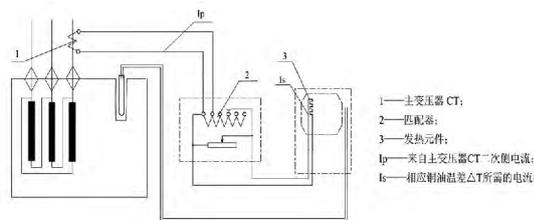


图 2 绕组温度计测温原理

## 2 变压器用绕组温度计应用现状

在实际使用中发现,基于热模拟实验间接测温的绕组温度计存在因环境温度变化以及匹配电阻长期工作发热变质而导致的测量不正确的问题。原因在于元件的加热过程是在温度计内部直接进行,存在与外部热交换的过程,当环境温度较低时加热效果达不到整定值,环境温度较高时加热效果又远远超出整定值。更重要的是匹配电阻长期发热造成调节触点氧化导致电阻值升高,分流作用减小,加热电流进一步偏离正常值。因此绕组温度计的指示值无法正确反应绕组的运行温度,同时由于温度指示的

影响会使得风冷启动、温高报警、温高跳闸等节点不能正确动作。由于绕组温度是实时进入 SCADA 系统的,而调度人员和运行人员都通过综合数据网来监视绕组温度的,因此如果绕组温度指示不正确,可能使调度人员做出错误判断,影响电网的安全稳定运行。

## 3 基于 DSP 技术的绕组温度监测

采用以数字信号处理器(digital signal processing, DSP)为核心控制芯片,专用的数字信号处理芯片 Freescale 公司的 16 位 DSP,在时钟频率 80 MHz 下,有着 40 MIPS 的指令执行进度,能够满足温度实时监测及通讯的目的。通过热电阻作为传感器,进行基本油温温度测量。热电阻的工作原理是基于热电效应。如铂电阻,其特点是精度高、稳定性好、性能可靠,尤其是抗氧化性能很强。铂在很宽的温度范围内约 1 200 °C 以下都能保证上述特性。中国已采用 IEC 标准制作工业铂电阻。按 IEC 标准,使用温度已扩大到 -200 ~ 850 °C,初始电阻有 100 Ω 和 50 Ω 两种,以常用的 Pt100 为例作为感温元件。利用护套将 Pt100 从传感器到温度计这部分保护,从而不容易遭到外界的破坏。

### 3.1 系统硬件设计

图 3 是系统的硬件框图,其中 A/D 用于采集 Pt100 的电阻信号,经 DSP 转换为电流值,TA 二次电流经隔离后同样经 A/D 转换为电流值送给 DSP,EEPROM 存储铜油温差曲线值供绕组温度计计算使用, RAM 用于历史温度值记录,RS232、RS485 及 mA 输出。

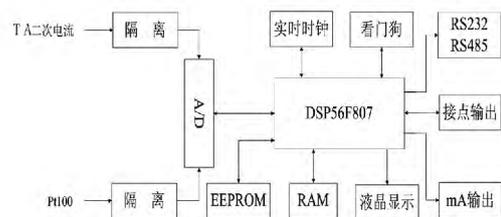


图 3 油温温度计工作原理

### 3.2 绕组温度计的工作原理

图 4 是绕组温度计工作原理流程图,其中变压器的油温温度通过感温元件 Pt100,经隔离后到 A/D 转换将 Pt100 的电阻信号转换为电流值,然后送到 DSP;绕组平均温升则是,首先变压器 TA 二次电

流通过隔离, 然后到 A/D 转换将大电流转换为小电流值后送到 DSP, 与 EEPROM 存储的铜油温差曲线值进行比较计算, 在 DSP 中绕组平均温升与油温温度进行叠加, 叠加后的电流值 mA 输出供测控装置使用和液晶显示。当温度到达接点预定设定值, 则接点闭合输出。同时 RAM 对变压器的温度进行统计、累加, 反映变压器在温度过高区间运行的时间, 对变压器运行温度区间进行有效统计。并且可以通过 RS232、RS485 串口直接读取温度实时数值和历史数值。

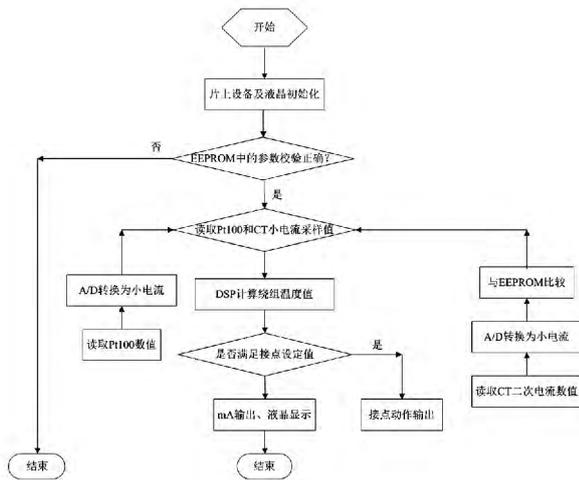


图 4 绕组温度计工作原理流程

## 4 绕组温度计检定

温度计检定项目包括外观检查、示值误差、设定误差、切换差、稳定性、绝缘电阻、绝缘强度等项目。绕组温度计检定在一般温度计的检定项目基础上, 需增加绕组平均温升试验。根据以上检定项目, 基于 DSP 技术的绕组温度在检定前需收集相关数据并进行计算整定, 具体检定接线如图 5 所示。

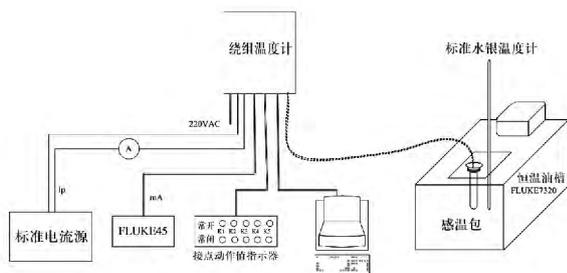


图 5 绕组温度计检定接线

为了保证在整定过程中对接点整定的可靠性及准确性, 温度计在整个试验过程中表头应垂直安装,

温包必须全部浸没, 引长管浸没不得小于管长的  $1/3 \sim 2/3$ , 温度计均要求表头和温包之间的高度差不得大于 1 m, 由于现场应用的接点会使用在风冷全停延时跳闸回路及温高跳闸回路, 因此要求接点的动作值能真实反映变压器的温度, 在读取接点动作值的时候应读取和被试表温包位于同一恒温油槽内的标准水银温度计或 Pt100 标准铂电阻。

绕组温度计接点可根据现场启动风冷、温高报警、温高跳闸的要求进行整定, 当温度指示达到整定值时接点闭合动作。

接点动作值设定完毕后, 测试接点动作误差时, 除信号电路和试验点外, 采用与示值基本误差试验相同的试验条件、试验设备和标准仪表, 测试点按照标准设定点进行, 具体方法是将被测试温度计和标准二等水银温度计或标准 Pt100 铂电阻插在恒温槽中, 并将被试温度计的端子接到信号电路中, 然后均匀改变恒温槽温度 (温度变化率应不大于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) 使接点产生闭合或断开的切换动作 (信号电路接通或断开), 在动作的瞬间记录标准水银温度计或标准 Pt100 铂电阻的示值, 即为接点正行程或反行程的上切换值或下切换值。在同一测试点上, 上切换值设定点的差值即为接点动作误差; 上切换值与下切换值的差值即为接点切换差。接点动作误差和切换差在各试验点上就接点闭合和断开各试验一次。

绕组温度计热模拟试验如下。

例: 某 220 kV 变电站, 变压器的额定容量为 180 000 kVA, 额定电压为 220 kV, TA 变比为 600/5, 绕组温度计接于 220 kV 侧 B 相 TA, 绕组平均温升  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 则计算如下。

$$P = UI$$

$$I = P/U = 180\ 000 / (1.732 \times 220) = 472.391$$

(A)

$$\text{二次额定电流 } I_p = 472.391 / 120 = 3.937(\text{A})$$

$$\text{根据公式: } Y = X^2 A$$

式中  $Y$  为温升  $\Delta T$ ;  $X$  为 TA 二次额定电流。

$$\text{则: } 20 = 3.937^2 A$$

$$A = 1.29$$

先将温包浸入恒定在  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温油槽中, 待绕组温度计稳定后读取温度计示值  $T_1$ , 然后将  $I_p$ 、温升  $\Delta T$  和  $A$  的数值分别置入温度计内 EEPROM

(下转第 81 页)

引起足够思想重视,对隐患缺陷早发现早处理。只有运维好所有一、二次设备,将运维盲区风险降低到最小,才能真正掌控系统安全;③强化继电器备品备件管理,便于出现事故时及时抢修,缩短故障时间;④强化设备验收监管,提高产品质量或者改善设备原理,将机械拨轮式继电器改为数控式继电器,更为可靠;⑤改善继电器的安装位置,安装在便于观察且不易受到外部损坏干扰的位置。

参考文献

[1] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 310.  
[2] RCS-921C型断路器失灵保护及自动重合闸装置技

(上接第74页)

中,待温度计示值稳定45 min后读取 $T_2$ ,  $T_2$ 与 $T_1$ 的差值即为热模拟装置的附加温升。

稳定性试验(此项目为型式试验):首先温度计在承受24 h、150℃的试验,然后在温饱处于交变温度差大于100℃且出现频率不小于50%(每一个变化周期不得超过24 h)的情况下连续工作1 000 h,试验后温度计示值基本误差、示值回差、环境温度影响、接点动作误差及切换差应合格。

绝缘电阻试验:用额定直流电压为500 V的绝缘电阻表分别测量温度计电接点端子之间、电接点端子与接地端子之间的绝缘电阻应不小于20 MΩ。

绝缘强度试验:试验应在高压侧电源容量不小于2 500 VA的高压试验装置上进行。输出接点短接后对地施加2 kV、历时1 min的正弦交流电压,漏电流设定为10 mA,应无击穿或闪络现象。

5 结 论

1) 基于DSP绕组温度计,采用了RAM可以对变压器的运行温度区间进行统计、累加,反映变压器在温度过高区间运行的时间,为合理经济地安排变压器的运行、检修提供依据,特别是在目前电力系统普遍延长检修周期,全系统推广状态检修的趋势下,这套变压器测温系统将发挥更大作用。

2) DSP绕组温度计采用Pt100作为感温元件,精度高、稳定性好、性能可靠,尤其是耐氧化性能很强。铂电阻在很宽的温度范围内约1 200℃以下都能保证上述特性。也不会因Pt100出现故障而发生接点误动的现象。

术说明书[Z].

[3] 国家电网公司人力资源部. 生产技能人员职业能力培训通用教材二次回路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 118.  
[4] CSC-103E数字式超高压线路保护装置说明书[Z].  
[5] WDLK-862G微机断路器保护装置技术说明书[Z].  
[6] 西安西电开关电气有限公司550 kV HGIS原理接线图[Z].

作者简介:

李文泉(1987),大学本科,主要从事变电运维和二次检修工作;

尚振华(1972),大学本科,主要从事变电运维、安全管理工作。

(收稿日期:2014-04-26)

3) 绕组温度计减少了温度补偿回路,因此不会发生因温度补偿回路故障引起远传与本体数据不一致,温度高报警、温度高跳闸误动,严重时会导致跳变压器开关等严重后果。

4) DSP绕组温度计安装于变压器端子箱内,起到了有效的防震作用,现场配线简单,调试方便。

5) DSP绕组温度计采用Pt100作为感温元件,避免因环境温度的影响而发生测量误差。

6) 可以避免出现绕组温度计匹配电阻长期发热造成调节触点氧化导致电阻值升高、分流作用减小、加热电流进一步偏离正常值的问题。

7) DSP绕组温度计采用EEPROM存储铜油温差曲线值,取代了传统的加热元件,能更加准确地反映变压器内部工作情况。

参考文献

[1] JJG 310-2002 压力式温度计[S].  
[2] JJG 874-2007 温度指示控制仪[S].  
[3] JB/T 8450-2005 变压器用绕组温控器[S].  
[4] Q/GDW 440-2010 油浸式变压器测温装置现场校准规范[S].  
[5] 徐科军,马修水,李晓林. 传感器与检测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

作者简介:

刘翔宇(1981),硕士研究生,工程师,变电检修工区变电一次技术I岗;

杨明(1982),大学,技师,从事电测仪表、热工、电能质量监测等方面的工作。

(收稿日期:2014-05-05)

# 电缆终端绝缘击穿原因分析及对策探讨

刘 丰

(四川江口水力发电(集团)厂,四川 宣汉 636150)

**摘要:**介绍了35 kV单芯交联聚乙烯电缆在四川江口水力发电(集团)厂的运用情况。从电和热两方面对电缆终端头屏蔽层断口处绝缘频遭破坏的原因进行了分析,探讨了克服绝缘快速老化击穿的方法。

**关键词:**电缆终端;绝缘击穿;老化因素;故障诊断

**Abstract:** The application of 35 kV single-core XLPE cable in Jiangkou Hydropower Co. Ltd is introduced. The reasons for the frequently destruction of insulation in the fracture on cable terminal head shield are analyzed from both electrical and thermal insulation, and some countermeasures to overcome the insulation breakdown caused by fast insulation aging are discussed.

**Key words:** cable terminal; insulation breakdown; aging factor; fault diagnosis

中图分类号:TM853 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2014)05-0075-03

## 0 引言

四川江口水力发电(集团)厂位于四川省宣汉县城东北1 km处,电厂总装机容量 $3 \times 17$  MW,以110 kV和35 kV两个电压等级输电线路接入系统,担负调频(峰)、基荷任务,也可作调相运行,于1992年5月投产发电。35 kV开关站设在室内,采用35 kV单芯交联聚乙烯电缆(型号YJV<sub>30</sub>-120)出线上网。

## 1 电缆故障情况

厂内35 kV出电缆终端头最初采用瓷质环氧浇注,此类电缆头的优点是使用经久耐用、寿命长,缺点是制作工期长、工艺复杂、受现场制作条件限制多,且重量大,上架困难。随着新材料新技术的出现,原瓷质环氧浇注电缆头逐步被冷、热缩电缆头取代,冷、热缩电缆头制作工艺简单,现场制作方便、工期短,电缆头重量轻,上架劳动强度低。因此,自1992年以后,(集团)厂35 kV新增出电缆终端逐步被热缩电缆头取代(采用两端接地)。

在运行过程中,热缩电缆头的缺陷逐渐暴露,即易造成热缩电缆终端头铜辫接地处电缆绝缘老化击穿(见图1),在(集团)厂5回35 kV出电缆热缩电缆头中,每年都有此类情况发生(户内、外均有)。2013年4月15日,一回上国网35 kV出电缆A

相(室外)终端头接地铜辫处绝缘老化击穿;2013年4月26日,一回供铁厂35 kV出电缆B相(室内)终端头接地铜辫处绝缘老化击穿。故障发生后,造成电网35 kV线路被迫停运检修,电力输送减少。针对此类故障,通常的处理办法是将电缆终端头大约1 m的故障部分切除,再重新制作新的电缆头。如重复数次,电缆长度逐渐减小,最终导致电缆因余量不足而做中接头将其接长,或重新购置新的电缆。



图1 电缆绝缘老化击穿部位(铜辫接地处)

## 2 35 kV单芯电缆热缩终端头制作过程

35 kV单芯交联聚乙烯电缆横截面分布(见图2),从外至内依次为外层护套、钢铠、内层护套、铜屏蔽带、外半导体层、线芯绝缘、内半导体层、铜芯线。在热缩式终端头制作过程中,首先是在距电缆终端头大约800 mm处,将电缆外层护套、钢铠、内层护套切除;剥下铜屏蔽带,留下100 mm左右铜带后,将多余铜带切除,用工具将电缆端部至屏蔽断口

20 mm 处之间的外半导体层切掉,露出线芯绝缘;将电缆端部大约 40 mm 线芯绝缘切除,做好应力锥,套上线鼻子压紧,将剩余铜屏蔽带沿钢铠端面做翻领,包住钢铠;压上接地铜辫(铜屏蔽层与钢铠连接在一起接地)固定并焊接(锡焊)可靠(见图 3);用酒精清洗线芯绝缘,缠绕应力疏散胶,套上应力管热缩,套上绝缘管热缩,在端子处填充密封胶,套上密封管热缩,纵剖面(见图 4);套上防雨裙热缩,试验合格,制作完成。



图 2 故障电缆横切面分布

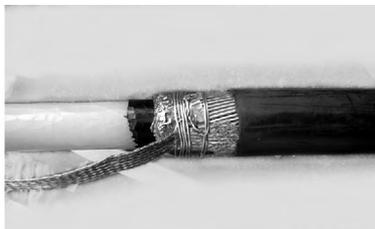


图 3 电缆屏蔽层接地



图 4 套装应力管

### 3 故障原因分析

#### 3.1 屏蔽层断口电场分布发生改变

35 kV 单芯高压电缆每相线芯外均有一接地铜屏蔽层,输送负荷的芯线与接地屏蔽层之间形成径向分布的均匀电场,无轴向电场分布。在制作电缆终端头时,接线端子至接地铜辫焊接处之间的铜屏蔽层被切除,形成一个屏蔽断口,电场分布发生改变,产生了轴向电场分量(沿导线轴向的电力线),电场向屏蔽层断口集中,此部位电力线分布也最密

集,电场强度高,电力线分布如图 5 所示。

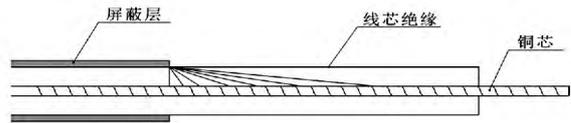


图 5 屏蔽层断口处电力线分布图

屏蔽层端部接地处线芯绝缘长期处在高电场强度环境下工作,此电场强度比电缆芯线其他绝缘材料所处工作环境电场强度要高,加速了屏蔽层断口线芯绝缘的老化,使其更易被击穿。另外,35 kV 为中性点不接地系统,当发生单相接地时,其相电压升至线电压,屏蔽层断口处电场强度将大幅提升,加速了断口处绝缘老化击穿进程。

#### 3.2 感应电流发热

35 kV 高压单芯电缆通电运行时,在屏蔽层会形成感应电压,且随电缆长度和负荷的增加而增加。在线路发生短路故障、遭受操作过电压和雷电侵入波时,屏蔽层内会产生更高的感应电压,甚至击穿护层绝缘,造成人身和设备安全事故。如果屏蔽层两端直接接地,在屏蔽层与地之间形成回路,就产生感应电流,其大小可达线路负荷电流的 40% 以上,使整个电缆金属屏蔽层发热,产生电能损耗,加速电缆绝缘热老化速度。(集团)厂现在运 5 回 35 kV 电缆(大约 100 m 长)均采用两端直接接地,经试验检测发现,屏蔽层感应电流随复合电流的增大而增大,如表 1 所示。由于焊接原因,接地铜辫与屏蔽断口处的接触电阻较大,当感应电流经过焊接处时,将产生焦耳效应致其发热,加速接地处线芯绝缘的热老化速度。

表 1 线芯负荷电流与屏蔽层感应电流的关系

负荷电流 / A	35	79	160	250
感应电流 / A	15	38	76	82

以上两种原因,相互作用,加速电缆屏蔽层断口处线芯绝缘老化,形成绝缘薄弱点,当遇到某一过电压冲击时,此处绝缘易击穿,导致接地故障。

### 4 对策探讨

#### 4.1 加装均压罩,改变电场分布

在电缆屏蔽断口处加装金属材质的均压罩(见图 6)或均压环,用于分散屏蔽层断口绝缘处集中的电力线。均压罩成喇叭形状,底部内卷部分与电缆

屏蔽层紧密连接在一起,改变屏蔽层断口(铜辫接地处)的电场分布,增大径向电场分量,降低轴向电场分量,降低屏蔽层断口处线芯绝缘所处位置的电场强度,减缓屏蔽层电老化速度,达到延长电缆使用寿命的目的。考虑到安装固定均压罩之后,妨碍应力管、绝缘管(加热收缩)安装工作的开展,可以改装均压环(针对35 kV单芯YJV30-120型电缆,见图7)。在制作电缆终端过程中,将事先加工好的连接片(2片,用金属材料制作)头部与接地铜辫一起均匀地搭接在一起,并固定焊接,之后加装应力管热缩,加装绝缘管热缩,从电缆接线端子处套入圆环(金属材料制作)和绝缘支架,经电气试验合格后,将电缆上架固定,铜辫接地,将连接片尾部沿虚线处折叠与电缆轴向成45°角,并与圆环连接,再将圆环和绝缘支架连接,均压环安装工作完成,整体成喇叭形状。

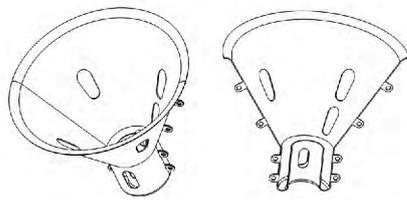


图6 均压罩构想图

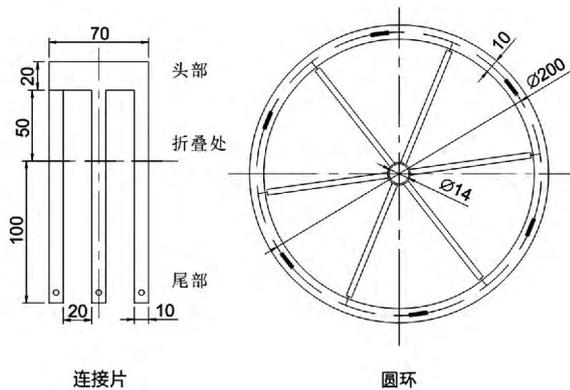


图7 均压环及绝缘支架构想图

#### 4.2 加装保护器,降低或切断流经接地铜辫的工频感应电流

如图8所示,将电缆一端接地线直接接地,另一端经保护器接地。保护器为一压敏电阻,护器上的感应电压较低时,保护器呈高电阻状态,阻断接地回路,限制流经接地铜辫的工频感应电流;当感应电压较高时,保护器呈低电阻状态,接地回路导通,避免电缆遭受短路电流及内、外过电压冲击时,在金属屏蔽层产生的感应冲击过电压,使电缆金属屏蔽层所产生的工频感应电流和过电压均得到限制,降低电缆正常运行时铜辫焊接处的发热,减缓电缆绝缘热老化速度,有效延长电缆的绝缘寿命。

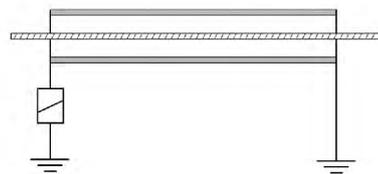


图8 电缆屏蔽层一端经保护器接地

## 5 结 论

(1) 从电和热两方面分析了35 kV热缩电缆头终端绝缘击穿的原因,提出电缆头终端因电场不均匀分布和环流热效应联合作用是加速绝缘老化主因,可为相关类似故障分析提供参考。

(2) 针对热缩电缆头终端绝缘易击穿这一实际问题,提出了加装均压罩和接地保护器的方案,为解决该类型设备运维中的问题提供了有效的方法,可延长设备寿命,降低故障发生率。

(3) 所设计的均压罩在35 kV电缆运维应用中取得良好的效果。但对于不同电压等级、不同型号电缆,需结合施工工艺、实际运行工况作进一步的优化设计。

作者简介:

刘 丰(1966),电气工程师,大学文化,副总工程师,主要从事水电技术及安全工作。

(收稿日期:2014-05-09)

欢迎订阅

欢迎投稿

# 储能电机时间继电器对重合闸的影响

李文泉,尚振华

(国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041)

**摘要:**自动重合闸是保障供电可靠性的重要手段之一,但在某些特定情况下,需闭锁重合闸,以免对系统和设备造成不必要的冲击。通过断路器储能电机时间继电器对重合闸影响的研究,得出储能电机打压超时继电器滑丝故障会造成压力低闭锁重合闸的开入和重合闸充电灯不亮的结论,会留下隐患,对变电运维提出改进措施。

**关键词:**重合闸;时间继电器;低压闭锁;弹簧操动机构;变电运行

**Abstract:** Automatic reclosing is one of the important methods to ensure the reliability of power supply, but in some specific situations it is necessary to block automatic reclosing to protect power system and devices against the unnecessary shocking. By studying the influences of time relay of energy storage motor in circuit breaker on automatic reclosing, it is concluded that the slipped fault of time-out relay of energy storage motor can result in the opening of low-voltage lockout reclosing and the charging light of reclosing out of work, which may have some hidden troubles. The improvement measures of substation operation and maintenance is put forward.

**Key words:** reclosing; time relay; low-voltage lockout; spring operation mechanism; substation operation

中图分类号: TM774 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)04-0078-04

## 0 引言

随着经济的快速发展和精益化转型,对电力需求越来越大,对供电可靠性和稳定性要求越来越高,以 500 kV 为骨干网架的输电系统正在逐步完善。据统计,90% 的线路故障均为雷击、鸟害引起的瞬时故障,单相重合闸成功概率可达到 80%,大大提高了供电可靠性<sup>[1]</sup>。但若重合于线路永久故障,将使断路器再一次开断短路电流,严重恶化断路器工作环境。当出现手动跳闸、TJR 继电器动作或者储能压力低等情况时,需闭锁重合闸。基于 500 kV 线路断路器重合闸单跳单重试验时液压断路器压力低闭锁重合闸,深入分析储能电机时间继电器对重合闸的影响。

## 1 重合闸充放电和启动方式

500 kV 系统断路器一般采用单相重合闸,充电时间整定为 15 s: 即单相故障,断路器单相跳闸,重合单相,重合不成功跳三相不再重合;相间故障,断路器三相跳闸,不重合。

### 1.1 重合闸充放电条件

为优化断路器的工作条件,避免不必要的重合给系统带来再次冲击,当满足闭锁条件时,重合闸装置需放电闭锁。重合闸放电条件列举如下(或门条件)<sup>[2]</sup>: ①重合闸起动前压力不足,经延时 400 ms 后“放电”;②重合闸方式在退出位置,或者重合闸投入控制字置“0”时“放电”;③单重位置,如果三相跳闸位置均动作或收到三跳命令或本保护装置三跳,则重合闸“放电”;④收到外部闭锁重合闸信号时立即“放电”;⑤合闸脉冲发出的同时“放电”;⑥失灵保护、死区保护、不一致保护、充电保护动作时立即“放电”;⑦收到外部发变三跳信号时立即“放电”;⑧对于后合重合闸,当单重或三重时间已到,但后合重合延时未到,这之间如再收到线路保护的跳闸信号,立即放电不重合。这可以确保先合断路器合于故障时,后合断路器不再重合。

为避免多次重合,必须在“充电”准备完成后才能起动合闸回路。重合闸充电条件(与门条件): ①跳闸位置继电器 TWJ 不动作或线路有电流;②保护未起动;③不满足重合闸放电条件。

### 1.2 重合闸启动方式

重合闸一般有两种启动方式<sup>[3]</sup>: 位置不对应启

动和保护启动。绝大多数情况下,都是先由保护动作发出过跳闸命令后,才需要重合闸发合闸命令,因此重合闸可由保护启动。当保护装置发出单相跳闸命令且检查到该相线路无电流时启动重合闸,这种方式叫做保护启动重合闸。由保护启动重合闸的方式在开关偷跳时无法启动重合闸。设置不对应启动重合闸,用于纠正断路器偷跳行为,即跳闸位置继电器动作( $TWJ=1$ ),证明断路器处于断开位置,而控制开关在合闸后位置,说明开关原来处于合闸位置,这两个位置不对应,启动重合闸的方式叫做“不对应启动重合闸”。

线路单相故障,保护选相动作后跳开故障相断路器,此时断路器保护收到线路保护单相跳闸开入,若无闭锁条件,则应启动断路器重合闸。断路器分、合闸均依靠储能碟簧实现(以液压弹簧操作机构为例)。当液压压力降低到打压值时,接通电机打压,高压油通过储能活塞推动碟簧储能。如果在断路器分合闸过程中出现慢分、慢合,电弧不易熄灭,可能引发断路器灭弧室爆炸,损坏设备甚至影响系统稳定性,所以当液压压力不足时,需依次闭锁重合闸、合闸和分闸,严禁断路器在储能不足的情况下分合闸操作。

## 2 电机储能时间继电器对重合闸的影响

### 2.1 问题描述

在对 500 kV 线路带开关的年检试验中做断路器重合闸单跳单重试验时,发现重合闸正确动作,但经 15 s 充电时间后,断路器保护屏上的充电灯未亮,开入量检查时发现压力低闭锁重合闸开入为 1(线路保护双套配置均为 CSC-103E 和 CSC-125A 组屏;断路器保护为 WDLK-862G;断路器为西安西电开关电气有限公司的液压储能弹簧操作机构产品,型号为: LW13A-550/Y。所有试验量均正确)。经现场检查,外部二次回路接线完全正确, SF<sub>6</sub> 气体压力在正常范围内。在断路器机构弹簧观察窗处发现,弹簧位置处于储能与未储能之间,就地汇控柜上,“A 相电机过流、过时”告警光字牌亮,按下控制面板的 RESET 键后,电机开始打压至完成储能,就地汇控柜上“A 相电机过流、过时”告警光字牌灭,断路器保护屏上重合闸充电灯亮,压力低闭锁重合闸开入为 0,恢复正常运行。

### 2.2 压力低闭锁重合闸

液压储能弹簧操作机构断路器,当液压压力降

低到 44.7 MPa 时,储能限位结点 33 hb 常开触点闭合接通电机回路打压储能,当液压压力升高到 52.9 MPa 时,储能限位结点 33 hb 断开,切断电机回路,停止打压;当液压压力降低到 44.4 MPa 时,压力低闭锁重合闸(OCO);当液压压力降低到 40.8 MPa 时,闭锁断路器合闸回路(CO);当液压压力降低到 38.1 MPa 时,闭锁分闸回路(OC)<sup>[6]</sup>。

WDLK-862G 断路器保护装置操作箱设置压力低闭锁重合闸继电器 21YJJ,与断路器三相液压压力低闭锁重合闸 OCO 结点串联在回路中(如图 1 所示)<sup>[4-5]</sup>。断路器液压压力在正常范围内时,三相 OCO 动断触点闭合,21YJJ 励磁;当断路器任一相液压压力降低到闭锁重合闸值时,其 OCO 动断触点打开,切断电源使 21YJJ 继电器失磁,其动断触点经光耦引入断路器保护装置,使压力低闭锁重合闸开入量为 1,重合闸装置放电,充电灯熄灭。

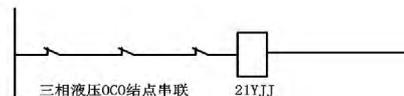


图 1 压力低闭锁重合闸回路

### 2.3 问题分析

根据断路器保护压力低闭锁重合闸开入为 1,可知断路器液压机构储能未完成,其压力低闭锁重合闸 OCO 常闭结点断开致 21YJJ 继电器失磁闭锁重合闸,即压力低闭锁重合闸开入为 1 导致断路器保护屏充电灯在达到充电时间后仍然不亮。

接下来需分析断路器未完成储能的原因。就地汇控柜告警面板上“A 相电机过流、过时”告警灯亮,查阅西安开关厂的断路器就地告警回路图纸,就地汇控柜“A 相电机过流、过时”告警灯回路由 49MAX 继电器的 43、44 常开触点接通。由图 2 电机保护回路可知,49MAX 由电机打压时间继电器 48T 的 67、68 延时闭合触点和电机过流保护继电器(电机热继电器) 49MA 的 97、98 触点并联接通<sup>[6]</sup>,并经自身 13、14 常开触点实现自保持,所以当发生电机过流、打压超时后,需手动复归电机才能继续完成打压储能。经以上分析可判断,电机时间继电器 48T 或热继电器 49MA 动作致 49MAX 继电器励磁,接通了告警回路,并在储能完成之前切断了电机回路,引发压力低闭锁重合闸事故。

最后需判断 48T 和 49MA 的动作情况,并分析其动作原因。由图 3 电机控制回路和图 4 电机回路可知,当机构液压压力降低到打压定值(44.9 MPa)时,储能限位结点 33hb 触点闭合,给继电器 88MA

励磁,同时储能电机打压时间继电器 48T 开始计时。88MA 继电器励磁后,其动合触点 1、2 和 3、4 接通储能电机电源回路,电机运转进行打压储能,当储能完成后(液压压力上升到 52.9 MPa),33hb 触点返回,切断电机控制回路,88MA 继电器失磁,其动断触点断开切断电机回路,电机停止打压且时间继电器 48T 计时自动清零。如果电机打压超时或者电机过流,48T 的 67、68 延时闭合触点和电机过流保护继电器 49MA 的 97、98 触点并联后,给 49MAX 继电器励磁,其 32、33 动断触点打开,切断电机控制回路,继电器 88MA 失磁,其动合触点断开切断电机回路,实现了了对电动机的保护。

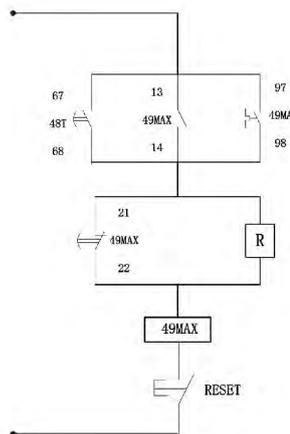


图 2 电机保护回路

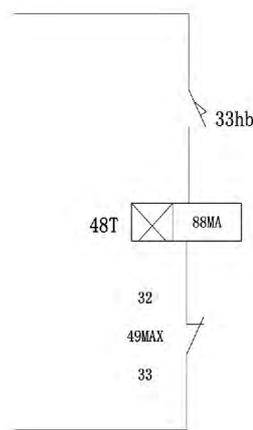


图 3 电机控制回路

经现场检查,发现电机热继电器 49MA 未动作,时间继电器 48T 为机械拨轮式设定,无任何外观异常,时间整定在 30 s,与定值相符,最大可整定时间为 150 s。保护人员随即对时间继电器 48T 的延时闭合触点做测试校验,发现其实际时间延时只有 7 s 左右,与整定时间刻度不符,存在滑丝。这就意味着,电机打压储能还未完成,而时间继电器 48T 的 67、68 延时闭合触点经 7 s 延时后就闭合了,致使继电器 49MAX 励磁,提前切断了储能电机回路,造成

断路器液压压力不足,机构压力低闭锁重合闸 OCO 常闭触点断开,使 21YJJ 失磁,其常闭触点经光耦开入断路器保护致“压力低闭锁重合闸”开入为 1,重合闸装置放电闭锁,即使经过 15 s 重合闸充电时间,保护屏上重合闸充电灯仍然熄灭。更换合格继电器后,恢复正常。

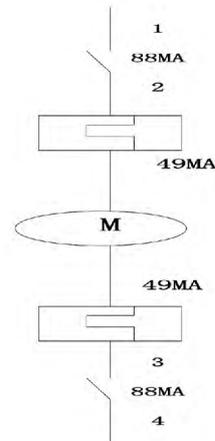


图 4 电机回路

### 3 结论和改进

综上所述,由于电机打压时间继电器 48T 滑丝故障,导致提前切断了电机回路,造成了压力低闭锁重合闸的开入和重合闸充电灯熄灭。电机打压和重合闸存在时间配合关系。如果达到重合闸充电时间,电机仍未完成储能,或者时间继电器动作切断电机回路,则会使压力低闭锁重合闸一直开入,此时如果线路单相故障,将导致三相跳闸不重合,严重影响供电可靠性。电机时间继电器整定时间应大于重合闸 15 s 充电时间,以保证电机完成储能。

此类机械拨轮式时间继电器滑丝故障,无明显外观异常,即使发生了设备异常故障,也难以在设备巡视时及时发现,造成较大隐患。现阶段变电运维管理思想,往往只关注断路器、避雷器等大型一次设备的 SF<sub>6</sub> 压力、动作次数、泄漏电流等数值的抄录和变化,通常易忽视如时间继电器等小部件二次数值类继电器的校验测试及检查、对比分析。且此类小部件继电器故障较为少见,安装位置较为隐蔽,更难以引起运维人员注意和重视。

针对此类故障引发的严重后果和现阶段运维管理思想的制约,提出以下几点改进措施。①完善变电站基础资料原始值的存档,定期抄录数值类继电器数值,认真开展“日对比、周分析、月总结”工作;②强化小部件继电器的巡视运维和定期校验工作,

引起足够思想重视,对隐患缺陷早发现早处理。只有运维好所有一、二次设备,将运维盲区风险降低到最小,才能真正掌控系统安全;③强化继电器备品备件管理,便于出现事故时及时抢修,缩短故障时间;④强化设备验收监管,提高产品质量或者改善设备原理,将机械拨轮式继电器改为数控式继电器,更为可靠;⑤改善继电器的安装位置,安装在便于观察且不易受到外部损坏干扰的位置。

参考文献

[1] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 310.

[2] RCS-921C 型断路器失灵保护及自动重合闸装置技

(上接第 74 页)

中,待温度计示值稳定 45 min 后读取  $T_2$ ,  $T_2$  与  $T_1$  的差值即为热模拟装置的附加温升。

稳定性试验(此项目为型式试验):首先温度计在承受 24 h、150 °C 的试验,然后在温饱处于交变温度差大于 100 °C 且出现频率不小于 50% (每一个变化周期不得超过 24 h) 的情况下连续工作 1 000 h,试验后温度计示值基本误差、示值回差、环境温度影响、接点动作误差及切换差应合格。

绝缘电阻试验:用额定直流电压为 500 V 的绝缘电阻表分别测量温度计电接点端子之间、电接点端子与接地端子之间的绝缘电阻应不小于 20 MΩ。

绝缘强度试验:试验应在高压侧电源容量不小于 2 500 VA 的高压试验装置上进行。输出接点短接后对地施加 2 kV、历时 1 min 的正弦交流电压,漏电流设定为 10 mA,应无击穿或闪络现象。

5 结 论

1) 基于 DSP 绕组温度计,采用了 RAM 可以对变压器的运行温度区间进行统计、累加,反映变压器在温度过高区间运行的时间,为合理经济地安排变压器的运行、检修提供依据,特别是在目前电力系统普遍延长检修周期,全系统推广状态检修的趋势下,这套变压器测温系统将发挥更大作用。

2) DSP 绕组温度计采用 Pt100 作为感温元件,精度高、稳定性好、性能可靠,尤其是耐氧化性能很强。铂电阻在很宽的温度范围内约 1 200 °C 以下都能保证上述特性。也不会因 Pt100 出现故障而发生接点误动的现象。

术说明书[Z].

[3] 国家电网公司人力资源部. 生产技能人员职业能力培训通用教材二次回路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 118.

[4] CSC-103E 数字式超高压线路保护装置说明书[Z].

[5] WDLK-862G 微机断路器保护装置技术说明书[Z].

[6] 西安西电开关电气有限公司 550 kV HGIS 原理接线图[Z].

作者简介:

李文泉(1987),大学本科,主要从事变电运维和二次检修工作;

尚振华(1972),大学本科,主要从事变电运维、安全管理工作。

(收稿日期: 2014-04-26)

3) 绕组温度计减少了温度补偿回路,因此不会发生因温度补偿回路故障引起远传与本体数据不一致,温度高报警、温度高跳闸误动,严重时会导致跳变压器开关等严重后果。

4) DSP 绕组温度计安装于变压器端子箱内,起到了有效的防震作用,现场配线简单,调试方便。

5) DSP 绕组温度计采用 Pt100 作为感温元件,避免因环境温度的影响而发生测量误差。

6) 可以避免出现绕组温度计匹配电阻长期发热造成调节触点氧化导致电阻值升高、分流作用减小、加热电流进一步偏离正常值的问题。

7) DSP 绕组温度计采用 EEPROM 存储铜油温差曲线值,取代了传统的加热元件,能更加准确地反映变压器内部工作情况。

参考文献

[1] JJG 310-2002 压力式温度计[S].

[2] JJG 874-2007 温度指示控制仪[S].

[3] JB/T 8450-2005 变压器用绕组温控器[S].

[4] Q/GDW 440-2010 油浸式变压器测温装置现场校准规范[S].

[5] 徐科军,马修水,李晓林. 传感器与检测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

作者简介:

刘翔宇(1981),硕士研究生,工程师,变电检修工区变电一次技术 I 岗;

杨明(1982),大学,技师,从事电测仪表、热工、电能质量监测等方面的工作。

(收稿日期: 2014-05-05)

# 10 kV XLPE 电缆本体缺陷电场仿真分析

张 轩, 杨延霞

( 国网西安供电公司 陕西 西安 710300)

**摘 要:** 为了研究 10 kV XLPE 电缆本体受伤电场情况, 防止电缆缺陷局部放电电场发展导致电缆接头击穿, 通过分析 XLPE 电缆主要缺陷类型及原因来确定引起电缆故障的主要类型故障, 然后利用有限元分析方法对电缆本体受伤情况电场进行仿真研究, 最后根据仿真结果得出结论: 在电缆本体空洞插入铁丝会造成电场畸变, 严重时会造成绝缘击穿, 为今后电缆线路故障分析提供参考。

**关键词:** 10 kV 电缆; 本体缺陷; 绝缘击穿; 有限元法

**Abstract:** In order to study the electric field when there are defects in 10 kV XLPE cable and prevent the electric field development of partial discharge caused by cable defects leading to cable connector breakdown, the main defect types and reasons of XLPE cable are analyzed to determine the main types of cable fault. And then ANSYS is used to study and simulate the electric field of cable body defect. Finally, based on the simulation results it is concluded that inserting the iron wire into the cable can cause the electric field distortion and seriously it can cause insulation breakdown, which can provide a reference for the future study of cable line fault.

**Key words:** 10 kV XLPE cable; cable body defect; insulation breakdown; finite element method

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)04 - 0082 - 04

## 0 引 言

随着经济的持续发展, 城市电力基础设施建设持续飞速发展。由于在节省线路走廊、美化城市环境等方面的优势, 电力电缆已在主要城市得到了广泛地使用<sup>[1]</sup>。但是, 由于电力电缆故障, 所造成电力部门的经济损失是不可小视的, 一方面故障后的维修要消耗大量的财力、人力、物力, 另一方面, 造成电量销售也将减少, 甚至还给相关行业带来一定的经济损失, 如交通、居民生活正常运转的影响, 以及影响信息传送、企业生产等行业的正常运转<sup>[2]</sup>。由南方某城市近 5 年来发生的电缆类故障在总故障中所占比例超过 50%, 2012 年电缆类故障占比达 57%。掌握电缆运行状态, 及时发现和修复故障隐患, 对降低城市地区 10 kV 电缆故障率, 保障供电可靠性具有重要意义。

对电缆故障的统计表明, 其原因以外力破坏和电缆接头故障为主。研究表明, 导致电缆接头故障主要是安装时工艺问题导致接头存在缺陷。有接头缺陷的电缆投入运行后, 缺陷部位电场集中, 发生局

部放电 (partial discharge, PD); 放电发展最后导致接头击穿。因此配电网电缆维护中, 及时检测出电缆缺陷, 防止电缆局部放电发展导致接头击穿, 成为一种可行的提高配电网电缆运行可靠性的有效方法。

下面将运用有限元分析方法对电缆本体受伤情况进行具体电场仿真分析, 以得到进一步结论, 为电缆线路故障分析提供参考。

## 1 XLPE 电缆主要缺陷类型及其原因

### (1) 电缆绝缘老化

对于 10 kV XLPE 电缆的老化原因, 一般认为电树枝、水树枝、热老化的发生, 导致电缆及其附件绝缘性能的降低, 且出现频率较高<sup>[3]</sup>。

### (2) 电缆机械损伤

机械损伤的原因主要是直接受外力作用、敷设过程造成的损坏、自然力造成的损坏等几个方面<sup>[2]</sup>。

直接外力作用造成的机械损伤主要是指电缆的铅护套 (铝) 裂损, 其裂损的原因则是施工和交通运输所造成的损坏 (行驶车辆的振动或冲击性负荷)。

电缆铺设中造成的损坏主要是指在铺设中受拉伸或弯曲过大而造成电缆绝缘和护套的损坏。特别是一些需穿管的电缆,管口两端的曲率半径太小导致管口部位绝缘击穿事故频繁发生;另外是以管口边缘作支点,造成了电缆绝缘严重的内部损坏。

自然力会造成电缆护套裂损,是因为内部绝缘胶膨胀作用和中间接头或终端头受自然力所造成的。其原因是电缆的自然膨胀和土壤下沉过度所形成的过大拉力拉断中间接头或导体以及终端头瓷套,使电缆附件因受力而断裂或者破损等。

### (3) 施工质量低

电力电缆线路敷设施工时受施工的环境条件、气候条件以及施工设备和人员素质条件限制,可能会导致出现电缆中端或者终端接头进水、电缆弯曲半径偏小、电缆附件内部进入杂质和附件安装误差等施工质量低的情况,这都会形成电缆受潮、电缆金属屏蔽层崩裂或电缆本体机械应力内伤等施工失误,引发电缆早期运行故障。统计数据显示此类故障占电缆总故障的 12%,其中绝大部分施工质量问题是可以避免的<sup>[4]</sup>。

### (4) 过电压或过负荷

过电压<sup>[2]</sup>引起绝缘击穿:在电力系统中出现的雷电过电压和内部过电压均可导致电缆绝缘击穿,这在过电压保护不完善的电缆线路中也会发生。经过对实际事故分析发现,许多户外终端头事故是由雷电过电压引起的,另外,当电力系统中故障发生时,会引起系统电流增加,当电缆绝缘存有缺陷时,则容易在绝缘薄弱环节发生击穿事故。

过负荷导致电缆绝缘损坏:电缆设备一次性投资较大,一旦投入运行,就不会轻易中断。然而,随着经济发展步伐的加快,已投入运行的电缆经常处于临界满负荷运行状态,长期满负荷或经常超负荷运行的电缆会造成电缆绝缘老化等现象。如果电缆运行环境恶化,将会加速电缆劣化进程,导致电缆缺陷发展为故障。尤其是制作工艺不良的电缆,电缆的局部温度上升很快,易发生绝缘击穿事故。

### (5) 生产工艺不合格

电缆制造过程中,原材料要经过高温高压,冷却、轧制成型工艺等工序,如果选用的原材料达不到生产纯度质量等生产要求,或在高温高压中温度压力达不到要求、反应不是很完全、混有杂质,都可能降低的电缆绝缘层绝缘性能。这样的电缆运行一定

时间,容易发生击穿等故障。

### 6) 鼠蚁虫害的破坏

在电缆敷设的地区存在白蚁、老鼠等,这些害畜对电缆产生危害,蛀坏外护套甚至绝缘层,这些都会造成电缆故障。

## 2 电缆故障分析

造成故障率逐年上升的原因主要有两个<sup>[5]</sup>:①市政施工的增加。由于该地区近年来经济发展,城市建设项目的大量上马,部分施工单位缺乏电缆保护意识,施工时野蛮操作,对电缆线路造成了破坏。②电缆进入老化。

据统计,电缆设备的故障率与使用时间有明显关系,故障率与时间相关曲线称浴盆曲线,见图 1。曲线可以分为 3 个段:A 称为早期故障区,为设备投入初期,故障率在最初期达到最大值,很大程度上是由于后续制造工艺或材料质地的缺陷所致;B 称为随机故障区,为设备运行期,故障率随着时间的变化比较平缓,是由于运行中的异常情况所引起的;C 称为老化所致故障区,为设备运行末期,故障率随使用时间的增加而增大。中国电缆是在 20 世纪 80 年代前后开始投入运行的,这一部分电缆到目前为止已经超过或者接近 30 年,进入了电缆运行的末期,因此故障率会有一定程度增加。

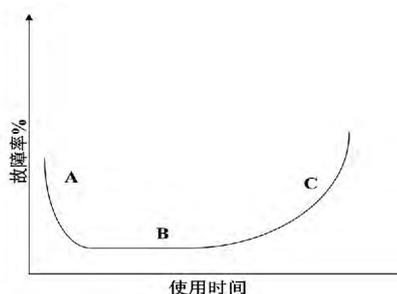


图 1 浴盆曲线

机械损伤、鼠蚁虫害、过电压这 3 类电缆故障发生原因具有一定的突然性,并且从缺陷的产生到引发电缆故障的时间间隔往往很短,使得故障的突发性强、不可控性大。对于这 3 类缺陷较难实现实时检测和故障预测。因此该类缺陷不作为本项目的研究范围。对其他几类故障发生原因中,绝缘系统含有杂质,会使绝缘更易产生局部放电,加剧绝缘材料水树枝与电树枝的产生,加速电缆的老化。同

时在过电压或者过负荷情况下,也更容易会使杂质缺陷发展成故障。

由相关研究数据可得到,在电缆本体故障、电缆附件故障中,电缆的本体故障率大约占了 30%。这是由于电缆接头制作工艺的好坏是保证其质量的关键,其主要原因是电缆接头、终端在制作过程中,必须剥去一段电缆屏蔽层,在制作的过程中可能会对电缆本体绝缘造成损坏,从而使电缆本体绝缘处的电场集中,电场分布极不均匀,这种不均匀的电场分布会产生对绝缘极为不利的切向电场,导致了屏蔽末端处的电场强度急剧增大。随着运行时间的增加,该处会出现放电现象,最终导致绝缘击穿<sup>[6-7]</sup>。因此,电缆接头、终端在电缆绝缘方面具有很大的重要性。随着交联聚乙烯电缆投运时间增长,运行经验积累,对电缆缺陷的认识也日益加深,同时对于电缆接头、终端等附件在制作过程中主绝缘部分产生的缺陷问题的关注度愈来愈高。下面就电缆本体在制作过程中出现的典型性缺陷作为对象展开相关方面的研究。

### 3 10 kV 配电网电缆缺陷电场仿真分析

#### 3.1 电缆终端电场可按静电场进行分析

在波长为 3 000 km 工频为 50 Hz 的交流电压下,电缆受损本体电极间电压随时间的变化是比较缓慢的,极间的绝缘距离远比相应电磁波的波长小得多。即使在电压变化较快的 1.2/50  $\mu$ s 雷电冲击电压作用下,由零升到幅值电压的时间内,虽只行进了几百米距离,但仍远远大于电气设备的尺寸(除高压输电线和有长导线的线圈类设备外)。

因此,在任一瞬间的电场电缆终端都可以近似地认为是稳定的,可以通过静电场来分析<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 分析工具及算法

对静电场分布规律的研究,通常希望能够定量计算绝缘各部位的电位和电场强度。然而由于各部分的电极形状、介质分布(场边界条件)是更复杂的计算,往往会面临着很多困难,除了一些简单几何形状的电极和介质分布外,一般很难用解析计算方法求解,甚至不可能有解决方案。工程常用简化电极形状来近似表达,来估算场域中某部分的解(主要是最大场强值)。近年来,由于计算机的普遍使用,静电场数值计算方法得到了广泛应用,一些更复杂

的边界静电场问题也都能获得比较满意的数值解。

基于变分原理,有限元法借鉴差分格式思想而发展起来。静电场的能量可表示为待定电位函数及其导数的积分式,根据差分法的离散化方法,对积分区域(即求解场域)  $D$  将它划分为有限个子区域(称为单元)  $e$ 。然后用这些离散的单元,使静电场能量近似地表示为有限个节点电位的函数。这样,求静电场能量极值的变分问题就简化为多元函数的极值问题,而后者通常归结为有限元方程。最后结合方程组的具体特点,利用适当的代数方法,求得各节点电位,就实现了基于变分离散原理解有限元法,与有限差分法求解边值问题的处理方法有所类似。依据变分原理,它首先把所求解的边值问题转化为相应的变分问题,然后利用剖分插值将变分问题离散化为普通多元函数的极值问题,最终归结为一组多元的代数方程组,解之即得待求边值问题的数值解<sup>[9-10]</sup>。

#### 3.3 模型建立及剖分

由于仿真的电缆为轴对称圆柱坐标结构,因此,在进行建模和分析时,采用二维轴向剖面模型,分析时引入轴向三维考虑因素进行分析。这里的分析对象按实际运行电缆结构建立物理模型。分析中,电缆芯和金属罩施加的电压为  $1.00 \times 10^5$  V,接地、半导电屏蔽和有限域边界为 0.00 V。

计算依据为

$$10 \text{ kV} \times 1.10 \times 2^{1/2} / 3^{1/2} = 1.00 \times 10^5 \text{ V}$$

其中,10 kV 为运行的额定电压;1.10 为输电首末端电压差  $2^{1/2}$  为有效值与峰值换算系数,  $1/3^{1/2}$  为相电压与线电压换算系数。

分析中材料的相对介电常数如表 1 所示。

### 4 仿真与结果分析

根据某实际运行的电缆结构,建立电缆本体受损模型。电缆上的孔直径约为 1.5 mm,深度为 4 mm。分别模拟直接加电压、在孔中插入平头铜丝加电压,以及在孔中插入削尖的铜丝加电压时的电场变化。

(1) 电缆本体只存在孔洞,孔中不含其他杂质,建立模型,如图 2 所示。

表 1 材料的相对介电常数

空气	接头	铜芯	电缆主绝缘层	半导体层	铝合金罩	电缆外护套
1.00	10 000	10 000	2.25	100	10 000	4.15
连接管	均压套	屏蔽层	预制接头主绝缘层	预制接头半导体层	半导体带	整体绝缘层
10 000	10 000	10 000	2.78	100	100	2.78

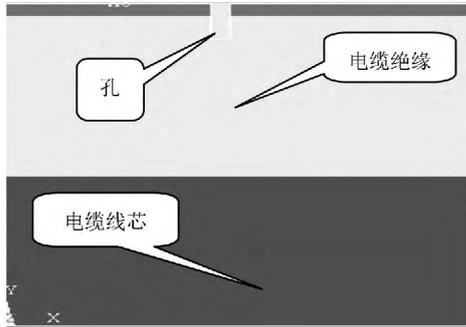


图 2 电缆本体存在孔洞模型

经过仿真计算的结果如图 3,孔洞处的电场变化剧烈,在孔底处场强达到较大值为 10 644 V/mm。

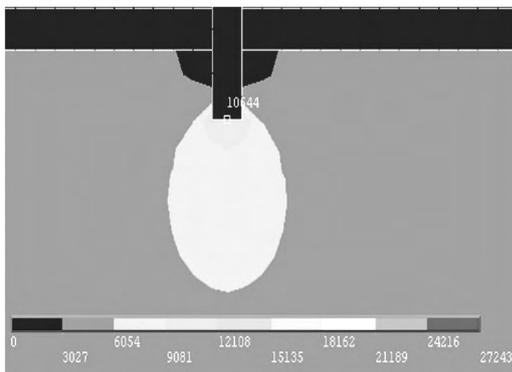


图 3 电缆本体孔洞处的局部电场  
(孔底电场 10 644 V/mm)

(2) 电缆本体存在孔洞,将平头铜丝插入孔中,建立模型,如图 4 所示。

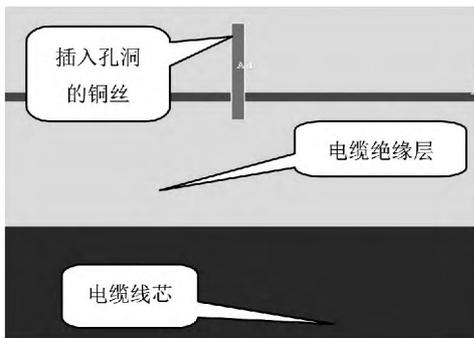


图 4 平头铜丝插入电缆孔洞模型

经过计算的结果如图 5,孔洞处的电场变化剧烈,在孔底处场强达到较大值为 8 251 V/mm。

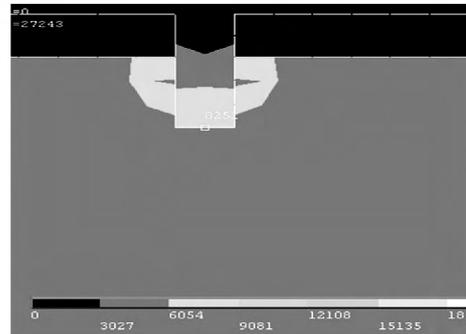


图 5 电缆本体孔洞处的局部电场  
(孔底电场 8 251 V/mm)

3) 电缆本体存在孔洞,将尖头铜丝插入孔中,建立模型,如图 6 所示。

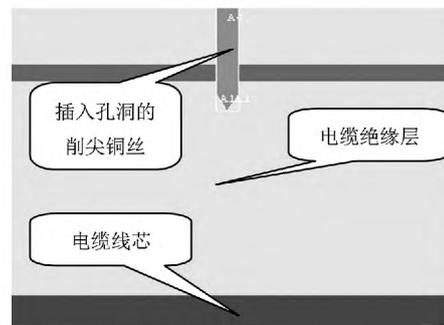


图 6 尖头铜丝插入电缆孔洞模型

经过计算的结果如图 7,最大电场为 20 869 V/mm,电场畸变发生在导线尖头处。

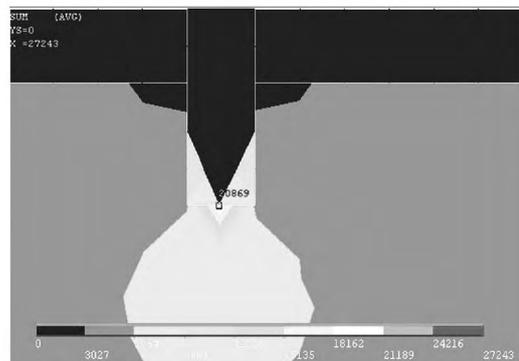


图 7 电缆本体孔洞处的局部电场  
(孔底电场 20 869 V/mm)

#### 4) 结果分析

电缆本体存在孔隙,而在孔中只有空气没有其

(下转第 90 页)

同时,保证了电网安全可靠经济运行,使发电公司社会效益最大化,充分体现了这种分布式调峰手段更适应未来电力市场下的发展。

参考文献

[1] 赵岩. 机组调峰在电力市场交易中问题探讨[J]. 华东电力, 2001(10): 29-32.

[2] 彭显刚, 张聪慧, 王星华, 等. LNG 调峰电厂负荷优化分配的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 84-87.

[3] 张宇波, 罗先觉, 邹晓松, 等. 发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23.

[4] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧管理的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43.

[5] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.

[6] 高志华, 任震, 黄雯莹. 电力市场中调峰权及其交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 88-92.

[7] 程瑜, 张粒子, 郑华. 基于多 Agent 协同技术的用电需求预测系统的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 50-54.

[8] 王成山, 余旭阳. 基于 Multi-Agent 系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 1-5.

[9] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-50.

[10] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 40-46.

[11] 丁淑英. 电力生产成本计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[12] 方韬, 李才华, 张粒子. 发电企业环境成本研究[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 16-20.

作者简介:

李安均(1987), 研究生, 主要从事变电站运行与维护工作。

(收稿日期: 2014-05-20)

(上接第 85 页)

他杂质, 可能会引起电场畸变, 随导线所加电压的增加, 孔底的电场强度会随之增加, 在电压较低时, 孔隙电场强度不大, 将不会有局部放电现象, 当增加电缆负载电压时, 孔底电场强度也会变大, 当比空气击穿场强时, 就造成了局部放电的发生。

将平头铜丝插入孔洞中, 电场畸变的程度比只存在孔的电缆大, 但由于铜作为良导体, 改善了孔中的电场, 使电场趋于均匀, 增加其产生局部放电的可能性。

尖头铜丝插入孔洞时, 电场畸变最强烈, 铜丝尖头处模拟计算中电场达到了 20 000 V/mm 以上, 是因为尖头周围存在空气, 会产生强烈的局部放电。

5 结 论

根据仿真计算结果, 进行缺陷模拟试验。在试验中制作相同缺陷, 对缺陷电缆施加工作电压, 通过局部放电检测设备和红外成像温度检测设备对电缆的运行情况进行检测。通过试验来验证仿真计算结果, 并能掌握其故障过程中的检测数据, 可作为今后电缆检测中的参考数据, 对缺陷及早发现, 及时预防; 获取不同缺陷导致故障的放电痕迹, 寻找其差异, 为今后电缆线路故障分析提供参考依据。

参考文献

[1] 史传卿. 电力电缆讲座第三讲[J]. 供用电, 2001, 18(5): 53-56.

[2] 陈成伟. 10 kV XLPE 电缆振荡波试验电压研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[3] 吴倩, 刘毅刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘老化及其诊断技术述评[J]. 广东电网, 2003, 16(4): 1-6.

[4] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.

[5] 陈秋, 孙正凯, 王伟. 10 kV 配网电缆故障分析及防范措施[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 16(12): 76-78.

[6] 韩轩, 马永其. 高压交联电缆终端预制橡胶应力锥的研究进展[J]. 绝缘材料, 2007, 40(4): 12-17.

[7] 马自伟, 贾江波, 查玮, 等. 10 kV XLPE 电缆终端电场分布与调整[J]. 高压电器, 2007, 8(43): 304-306.

[8] 解广润. 高压静电场[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.

[9] 金天雄, 金石男, 江平开, 等. 有限元法与田口方法相结合模拟研究交联聚乙烯电缆绝缘中的水树现象[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 45-48.

[10] 李晓伟. 35 kV 电缆终端应力锥硅橡胶注射模具计算机辅助设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.

作者简介:

张 轩(1986), 主要研究方向为电网运行及维护。

(收稿日期: 2014-05-15)

# 基于 MAS 的调峰权交易模型

李安均 陈 川

( 国网南充供电公司 四川 南充 637000)

**摘 要:** 根据调峰权的特点,提出了基于多代理系统(multi-agent system, MAS)的调峰权交易模型。该模型以所有发电公司的效益最优为优化目标,分别提出了发电公司 Agent 社会效益最大的交易模型和发电公司内部调峰成本最小的优化模型,并介绍了各级调峰 Agent 的功能和作用。通过算例分析表明,所提出的基于 MAS 调峰权交易模型是可行的、有效的。

**关键词:** 调峰权; 多代理系统; 交易

**Abstract:** A transaction model of peak regulation right based on multi-agent system (MAS) is proposed according to the property of peak regulation right. In this model, the benefit optimization of all power generation companies is taken as the best goal, and the transaction model of largest social benefit of power generation company agent and the optimization model of minimum peak regulation cost inside power generation company are put forward respectively. And the function and roles of peaking agent in each level are introduced. Example analysis shows the feasibility and validity of the proposed transaction model of peak regulation right based on MAS.

**Key words:** peak regulation right; multi-agent system; transaction

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0086-05

## 0 引 言

近年来,随着社会经济的高速发展、人民生活水平的不断提高,同时节能调度实施方案要求高耗能、低效率火电机组停机发电,使电力系统失去了相当部分的停机调峰能力,然而电网负荷峰谷差逐年增长,日益增大的负荷峰谷差严重影响电力系统的安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。目前电网的调峰手段主要从负荷侧和发电侧这两方面着手。负荷侧调峰主要采取“先错峰、后避峰、再负控限荷、最后拉路”的调峰管理方法。虽然负荷侧调峰管理减小电网负荷峰谷差,但给停电给电力用户的生产生活带来极大的不便。发电侧调峰主要是控制调峰机组的启停状态,但在电网负荷低谷时期,部分向下调峰调解能力弱的调峰机组被迫停运,调峰机组的被迫停运会造成电网在负荷高峰时期系统的发电容量不能满足电力负荷的需要。由于各发电企业参与上网电价的竞价是相互独立的,使得各发电企业之间缺乏有效的沟通,从而使得部分调峰机组的调峰性能不能有效充分发挥。

为解决上述调峰机组调峰能力得不到充分利用的问题,在调峰电力市场中,建立一种有效的调峰交易模式。此模型是在尽可能满足电力用户用电需求的基础之上,针对不同调峰机组的调峰性能,建立一个合理的竞价平台,即,调峰机组通过相互购买调峰权,使调峰机组的调峰性能得到最大的发挥,有效避免不合理的深度调峰或被迫停机调峰,在鼓励发电企业发电的同时,还能鼓励调峰机组积极参与电网调峰,缓解电网调峰的压力。提高电网运行的效率<sup>[4,5]</sup>。调峰权是指在电力负荷低谷时期,调节能力大的发电机组在满足自身调峰任务的基础之上,通过向调节能力不足的机组出售多余的调峰容量,不但获得额外的收益,还能避免调节能力不足的机组频繁启停,提高机组的寿命周期<sup>[6]</sup>。

随着调峰权概念的引入,电网调峰也会发生一些新的改变,例如:电网调峰的分层化和分布化,这使得传统的调峰手段很难适应新的变化,由于多代理系统(multi-agent system, MAS)具有分布、快速、高效、解决复杂问题的特征,将使其能够更好地适应电网调峰的变化。MAS是由多个 Agent 通过共同合作来构成的一个体系。MAS的基本单元是 Agent,

各 Agent 可以在调峰市场中相互服务、相互协同,并共同完成各自的任务,各 Agent 具有自主性、高效性、交互性的特点<sup>[7-8]</sup>。

所提出的基于 MAS 的调峰权交易机制,讨论了基于 MAS 的调峰权在电力市场中的竞价结构。同时针对上级 Agent 调峰竞价与下级 Agent 调峰竞价,分别提出了发电机组 Agent 与同级 Agent 的调峰竞价策略以及发电机组 Agent 自身的调峰量优化策略。通过算例表明基于 MAS 的调峰权交易机制,不但符合电网运行发展的特征,还能够在电力市场环境 下,推动电网调峰的发展。

### 1 基于 MAS 的调峰权交易机制结构

文献 [6] 提出的调峰权虽然为调峰机组购售调峰容量提供了一种有效的交易方式,但文献中并没有提出调峰权交易具体的流程和结构,为此,设计了一种基于 MAS 的调峰权交易模型<sup>[9]</sup>。其具体流程如下。

基于 MAS 的调峰权交易模型结构原理如图 1 所示,包括上级电力调峰市场 Agent、发电公司调峰 Agent、发电机组调峰 Agent 等 3 层。

1) 电力调峰市场 Agent。根据各高级调峰 Agent 反馈的调峰数据,制定调峰权交易计划,确定各发电公司的调峰权交易价格及交易调峰容量。同时将结果反馈给各高级调峰 Agent,为其下一步决策交易提供参考依据。

2) 发电公司调峰 Agent。根据上级调峰 Agent 反馈的数据结合旗下发电机组 Agent 提供的数据来调整调峰权交易计划,并及时把调整后的交易计划上报上级调峰 Agent。在调峰权交易成功后,发电公司调峰 Agent 以调峰成本最小化优化策略对发电机组 Agent 进行调度。

3) 发电机组 Agent 根据自身状态向发电公司调峰 Agent 提供的数据,根据上级 Agent 的调度计划参与电网的调峰。

针对电力市场的上层调峰 Agent 竞价和下层调峰 Agent 竞价体系,分别提出发电公司调峰 Agent 与同级调峰 Agent 的经济效益最大化、发电公司调峰 Agent 与机组 Agent 的调峰成本最小化的调峰权交易模型,使发电公司的效益最大化。



图 1 基于 MAS 的调峰权交易模型体系

### 2 调峰权交易模式

#### 2.1 调峰权交易模型

根据电力系统运行的实际情况对参与调峰权交易的发电企业进行配对,配对目的是使调峰权交易产生的社会效益最大化<sup>[4,5]</sup>。

假设调峰权交易市场中有  $n$  个调峰权买方和  $m$  个调峰权卖方。第  $i$  个买方申报的调峰权电量购买量和报价分别为  $Q_{B-i}$  和  $P_{B-i}$ ,第  $j$  个卖方申报的调峰权电量出售量和报价分别为  $Q_{S-j}$  和  $P_{S-j}$ 。假设调峰权买家  $i$  和调峰权卖家  $j$  的调峰权交易量为  $Q_{ij}$ ,对应的调峰权交易价格为  $P_{ij}$ ,则消费者剩余为  $(P_{B-i} - P_{ij}) Q_{ij}$ ,生产者剩余为  $(P_{ij} - P_{S-j}) Q_{ij}$ 。

调峰权交易不能忽略交易成本,甚至某些调峰权交易由于不能通过安全校核而使交易成本无限增大,因此,应考虑每个发电成员相互之间的交易成本。设调峰权买家  $i$  和调峰权卖家  $j$  之间的交易成本为  $C_{ij}$ ,由此构成  $n \times m$  的交易成本矩阵  $C$ 。其中,交易成本  $C_{ij}$  的数学表达式为

$$C_{ij} = m_{ij} \rho_t \tag{1}$$

式中  $m_{ij}$  为边际网损系数; $\rho_t$  为单位时间段  $t$  内的调峰电价。 $\rho_t$  的数学表达式为

$$\rho_t = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \rho_n \tag{2}$$

式中  $\rho_n$  表示过去  $m$  个时间段中第  $n$  时间段的调峰电价。

所以调峰权交易的社会效益为

$$E_{ij} = (P_{B-i} - P_{ij}) Q_{ij} + (P_{ij} - P_{S-j}) Q_{ij} - C_{ij} Q_{ij}$$

$$= (P_{B-i} - P_{S-i} - C_{ij}) Q_{ij} \quad (3)$$

由式(3)可知,在调峰权交易当中所产生的社会效益与其成交价格无关,为了保证调峰权交易的公平公正性,使调峰权买家和调峰权卖家的效益值相等,其成交价格  $P_{ij}$  应为双方报价的平均值,其数学表达式为

$$P_{ij} = \frac{P_{B-i} + P_{S-i}}{2} \quad (4)$$

调峰权交易的目标是使所有发电成员的社会总效益最大,因此,调峰权交易的目标函数为

$$\text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (5)$$

约束条件为

$$E_{ij} = (P_{B-i} - P_{S-i} - C_{ij}) Q_{ij} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_{ij} \leq Q_{B-i} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq Q_{S-i} \quad (8)$$

式(6)为卖方  $j$  与买方  $i$  之间调峰权交易产生的期望社会效益;式(7)为第  $j$  个卖方申报的调峰权电量出售量约束;式(8)为第  $i$  个买方申报的调峰权电量购买量约束。

由于电力行业的特殊性,各发电公司提供的出力是实时变化的。同时为了保证电力系统安全可靠的运行,在进行调峰权交易时还需要满足以下几个约束。

$$\sum_{k=1}^{m+n} P_k = P_{load} \quad (9)$$

$$V_{k-\min} \leq V_k \leq V_{k-\max} \quad (10)$$

$$F_{l-\min} \leq F_l \leq F_{l-\max} \quad (11)$$

式(9)为功率平衡约束,其中  $P_k$  为第  $k$  个发电公司在调峰权交易结束后的出力;  $P_{load}$  为电网的需求量;式(10)为节点电压约束,其中  $V_k$  为节点  $k$  的电压,  $V_{k-\min}$  和  $V_{k-\max}$  分别为节点  $k$  的最小电压值和最大电压值;式(11)为线路潮流约束,其中  $F_l$  为调峰权交易后线路  $l$  的输送功率,  $F_{l-\min}$  和  $F_{l-\max}$  分别为线路  $l$  的最小输送功率和最大输送功率。

## 2.2 各上级调峰 Agent 的具体功能

上级电力调峰市场 Agent 具体功能如下。

1) 接收参加调峰权交易的各发电公司 Agent 申报交易类型(买方或卖方)、调峰权报价和交易容量。

2) 根据获得的数据,估算交易成本,进行配对。

3) 对交易结果的安全性、可靠性进行分析。

4) 将交易结果反馈给各发电公司调峰 Agent。

各发电公司调峰 Agent 具体功能如下。

1) 接收电力调峰市场 Agent 的询问并提供调峰权报价和交易容量。

2) 向上级电力调峰市场 Agent 提供的调峰权交易的相关数据。

3) 根据上级电力调峰市场 Agent 反馈获得的交易计划,结合各机组 Agent 实际情况,预测发电公司可能提供或需要购买的调峰容量、调峰电价等。

## 3 发电成本优化策略

### 3.1 发电成本模型

假设调峰市场上有  $N$  家发电公司参与调峰权竞价。发电公司可以降低常规机组出力,使机组进入深度调峰(深度调峰是指发电机组超过基本调峰范围进行的调峰)运行方式来获取更多的调峰容量。从经济性方面,来考虑发电公司参与电网调峰问题,可将优化目标定义为发电公司机组深度调峰费用最小<sup>[10-12]</sup>。发电公司机组的深度调峰费用可从机组煤耗特性、机组寿命损耗和机组单位发电容量补偿费用等多方面来考虑。这里取其中某个发电公司的第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 台机组的发电成本为

$$C_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_{etpi} \quad (12)$$

式中,  $C_i$  表示第  $i$  台机组的深度调峰费用;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别表示第  $i$  台机组的成本函数系数;  $d_i$  表示第  $i$  台机组在深度调峰时的经济补偿系数;  $P_{etpi}$  表示第  $i$  台常规机组有偿调峰容量。

考虑到调峰市场的不确定性,发电公司作为一个自负盈亏的企业,发电公司为了自身利润的最大化,在调峰权竞价时一般都会在自身成本函数费用的基础上加上一定的比例因子  $\lambda$ ,则该台机组的成本函数为

$$C_i = (1 + \lambda_i) (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_{etpi}) \quad (13)$$

因此,在满足约束条件下,发电公司 Agent 成本最小化目标为

$$\min \sum_{i=1}^N C_i \quad (14)$$

其约束条件仍需满足式(9)~式(11)。

### 3.2 发电公司中各 Agent 的具体功能

发电公司协调级 Agent 具体功能如下。

1) 接收发电公司 Agent 的调峰指令,并反馈给

各发电机组 Agent。

2) 接收各发电机组 Agent 发电预测数据、运行成本、发电机组的报价和各种运行约束参数上报给发电公司 Agent。

发电机组 Agent 具体功能如下。

1) 预测本机组 Agent 每生产单位电能所需发电成本,并上报上级 Agent。

2) 预测本机组 Agent 现阶段可以提供的最大、最小电能,并上报上级 Agent。

3) 时刻对发电机组的运行状态进行监视,及时上报上级 Agent,对发电机组进行实时控制。

4) 保证发电机组安全稳定的运行。

5) 接受上级 Agent 的调峰交易指令后,发出相应的电能。

## 4 算例分析

### 4.1 发电公司 Agent 与同级 Agent 最优化调峰权竞价策略分析

假设有 8 家发电公司参与电网调峰权竞价,其中有 3 家公司出售调峰权,5 家公司需要购买调峰权。各发电公司的竞标报价如表 1 所示。

表 1 各发电公司调峰权交易申报情况

公司名称	买卖方向	调峰权容量 /MW	调峰权报价/(元·MW <sup>-1</sup> )
公司 1	买	100	375
公司 2	买	150	374
公司 3	卖	100	380
公司 4	买	50	378
公司 5	卖	200	376
公司 6	卖	200	378
公司 7	买	150	379
公司 8	买	50	375

按照效益最优模型进行交易时,调峰权交易配对的结果如表 2 所示。

表 2 调峰权交易配对情况

卖方	买方	调峰权成交容量 /MW	调峰权成家价格/(元·MW <sup>-1</sup> )	社会效益 /元
公司 3	公司 1	100	380	12 000
公司 5	公司 2	150	378	15 000
公司 5	公司 8	50	377	6 600
公司 6	公司 4	50	378	7 000
公司 6	公司 7	150	379	16 500

从表 2 可以看出,公司 1 从公司 3 处购得 100 MW 调峰权,公司 3 从公司 1 处获得 38 000 元的调峰补偿,产生的社会效益为 12 000 元;公司 2 和公司 8 分别从公司 5 购得 150 MW 和 50 MW 的调峰权,公司 5 分别从公司 2 和公司 8 处获得 56 700 元、18 850 元的调峰补偿,产生的社会效益分别为 15 000 元、6 600 元;公司 4 和公司 7 分别从公司 6 购得 50 MW 和 150 MW 的调峰权,公司 6 分别从公司 4 和公司 7 处获得 1 890 元、56 850 元的调峰补偿,产生的社会效益分别为 7 000 元、16 500 元。

### 4.2 发电公司成本优化分析

以发电公司 3 为例,公司通过报价策略获得的调峰权出售容量为 50 MW,电网的负荷需求和公司的内部电力需求之和 85 MW。发电公司中有 30 MW 和 60 MW 机组各两台,其参数分别如表 3 所示。

表 3 发电公司各机组经济参数和出力限制

	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
a	0.20	0.25	0.28	0.30
b	35.20	33.40	36.10	37.60
c	0	0	0	0
最大出力 /MW	30	30	60	60

按照各机组参数,根据发电成本优化策略可以求得各机组的最优出力,如表 4 所示。

表 4 发电公司各机组最优出力

	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
出力 /MW	20	22	45	48
成本/(美元·MW <sup>-1</sup> )	1 546	1 543	1 634	1 638

从表 4 可以看出所有的机组都处于开机的状态,所有的机组都按照成本和实际需求进行供电,达到降低发电公司成本的目的。

## 5 结 论

所提出的基于 MAS 的调峰权交易模型,充分体现了 MAS 在新的调峰环境中的优势。虽然各发电公司调峰 Agent 所获得的信息和决策是相互独立的,但通过上级调峰 Agent 社会效益最大化和发电公司内部调峰成本最小化的调峰权交易模型,在满足各 Agent 在不同的调峰需求充分考虑电网特性的

同时,保证了电网安全可靠经济运行,使发电公司社会效益最大化,充分体现了这种分布式调峰手段更适应未来电力市场下的发展。

参考文献

[1] 赵岩. 机组调峰在电力市场交易中问题探讨[J]. 华东电力, 2001(10): 29-32.

[2] 彭显刚, 张聪慧, 王星华, 等. LNG 调峰电厂负荷优化分配的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 84-87.

[3] 张宇波, 罗先觉, 邹晓松, 等. 发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 18-23.

[4] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧管理的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43.

[5] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.

[6] 高志华, 任震, 黄雯莹. 电力市场中调峰权及其交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 88-92.

[7] 程瑜, 张粒子, 郑华. 基于多 Agent 协同技术的用电需求预测系统的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 50-54.

[8] 王成山, 余旭阳. 基于 Multi-Agent 系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 1-5.

[9] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-50.

[10] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 40-46.

[11] 丁淑英. 电力生产成本计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[12] 方韬, 李才华, 张粒子. 发电企业环境成本研究[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 16-20.

作者简介:

李安均(1987), 研究生, 主要从事变电站运行与维护工作。

(收稿日期: 2014-05-20)

(上接第 85 页)

他杂质, 可能会引起电场畸变, 随导线所加电压的增加, 孔底的电场强度会随之增加, 在电压较低时, 孔隙电场强度不大, 将不会有局部放电现象, 当增加电缆负载电压时, 孔底电场强度也会变大, 当比空气击穿场强时, 就造成了局部放电的发生。

将平头铜丝插入孔洞中, 电场畸变的程度比只存在孔的电缆大, 但由于铜作为良导体, 改善了孔中的电场, 使电场趋于均匀, 增加其产生局部放电的可能性。

尖头铜丝插入孔洞时, 电场畸变最强烈, 铜丝尖头处模拟计算中电场达到了 20 000 V/mm 以上, 是因为尖头周围存在空气, 会产生强烈的局部放电。

5 结 论

根据仿真计算结果, 进行缺陷模拟试验。在试验中制作相同缺陷, 对缺陷电缆施加工作电压, 通过局部放电检测设备和红外成像温度检测设备对电缆的运行情况进行检测。通过试验来验证仿真计算结果, 并能掌握其故障过程中的检测数据, 可作为今后电缆检测中的参考数据, 对缺陷及早发现, 及时预防; 获取不同缺陷导致故障的放电痕迹, 寻找其差异, 为今后电缆线路故障分析提供参考依据。

参考文献

[1] 史传卿. 电力电缆讲座第三讲[J]. 供用电, 2001, 18(5): 53-56.

[2] 陈成伟. 10 kV XLPE 电缆振荡波试验电压研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[3] 吴倩, 刘毅刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘老化及其诊断技术述评[J]. 广东电网, 2003, 16(4): 1-6.

[4] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.

[5] 陈秋, 孙正凯, 王伟. 10 kV 配网电缆故障分析及防范措施[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 16(12): 76-78.

[6] 韩轩, 马永其. 高压交联电缆终端预制橡胶应力锥的研究进展[J]. 绝缘材料, 2007, 40(4): 12-17.

[7] 马自伟, 贾江波, 查玮, 等. 10 kV XLPE 电缆终端电场分布与调整[J]. 高压电器, 2007, 8(43): 304-306.

[8] 解广润. 高压静电场[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.

[9] 金天雄, 金石男, 江平开, 等. 有限元法与田口方法相结合模拟研究交联聚乙烯电缆绝缘中的水树现象[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 45-48.

[10] 李晓伟. 35 kV 电缆终端应力锥硅橡胶注射模具计算机辅助设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.

作者简介:

张 轩(1986), 主要研究方向为电网运行及维护。

(收稿日期: 2014-05-15)

# 四川电力消费特征分析研究

贺星棋, 鲜其军, 严平

(国网四川省电力公司, 四川成都 610041)

**摘要:** 以2007—2011年统计数据为样本,在对四川省的电力消费总体情况进行分析的基础上,对影响四川省电力消费的诸多因素、四川省电力消费特征、四川省电力消费占能源消费比重提高的原因和影响进行了研究,研究结果对于提高电网运营质量和经营效率、进一步开拓电力市场具有一定参考价值。

**关键词:** 电力消费; 能源消费; 产业结构; 四川省

**Abstract:** Taking the statistic data from 2007 to 2011 as the sample and based on the analysis of the overall electric power consumption situation in Sichuan province, the factors which can affect Sichuan electric power consumption, the characteristics of energy consumption and the reasons for the increasing proportion of energy consumption are studied. The results have a certain reference value for improving the operation quality and management efficiency of Sichuan power grid, also for the further development of electricity market.

**Key words:** electric power consumption; energy consumption; industrial structure; Sichuan province

中图分类号: T 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0091-04

## 0 引言

电力作为经济社会发展的基础性能源和重要清洁能源之一,为工业化和城镇化快速发展提供了支撑,为节能减排战略的贯彻落实提供了渠道,为主导产业和优势产业的迅速壮大提供了保障。然而,随着四川省工业化和城镇化进程的发展,能源消费结构调整的不断推进,电力消费需求也呈现显著变化的特征。下面根据“十一五”时期以来的电量消费统计数据,分析了影响四川省电力消费的诸多因素和特征,研究了电力消费占能源消费比重提高的原因和影响,对于提高电力公司电网运营质量和经营效率、进一步开拓电力市场具有积极的参考意义。

## 1 电力消费总体情况

“十一五”时期,全省电力消费呈现稳步增长趋势,全社会用电量从2007年的117 751 GWh增加到2011年的175 144 GWh,年平均增长9.75%<sup>[1,2]</sup>。电力消费占能源消费的比重存在小幅波动,但总体保持在30%以上。其中2011年比重最高,为35.12%,2008年比重最低,仅为31.65%<sup>[3]</sup>。可见四川省仍

以煤品燃料为主要能源,电力消费比重随着节能减排和产业结构升级有提高的趋势。

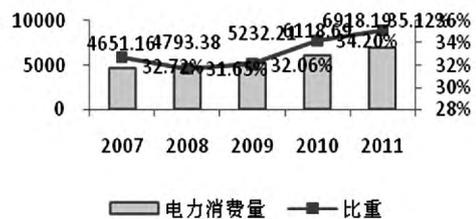


图1 电力消费占能源消费比重

从三次产业结构看,第一产业电力消费占能源消费比重呈现下降趋势,从2007年的0.55%下降到0.23%。这主要与农业生产的特殊性有关,农业生产受降水量、温度、土地、种子、化肥、人工和机械等要素影响,与电力消费关系不大。第二产业电力消费增长趋势与全社会用电量保持同步性,比重从2007年的23.98%上升到25.79%,其中工业用电量占第二产业比重最大,且呈现上升趋势,主要由于电力是工业的重要生产和投入要素,工业生产很大程度上依赖于电力,因此有必要对工业内部行业结构进行更进一步研究。第三产业电力消费占能源消费比重较稳定,从2007年的3.24%小幅上升到2011年的3.68%,主要由于第三产业的产品都是以服务为主,电力只是作为必要的但占比很小的投入要素。

从电力消费的行业现状和变化趋势看,2011年,工业用电为124 522 GWh,占全社会用电量的71.10%。其中,制造业用电量占比最高,为91 727 GWh,且呈现波动上升趋势,占比由2007年的50.69%上升到2011年的52.37%;农、林、牧、渔业、交通运输、仓储和邮政业、信息传输、计算机服务和软件业、居民、房地产、商务及居民服务业四大行业所占全社会用电量的比重较为稳定,一直维持在0.5%至2.5%之间,波动的幅度也较小,其中农、林、牧、渔业比重有所降低。公共事业及管理组织、建筑业电力消费占全社会用电量比重较为稳定,保持在2%至6%之间,其中采矿业、商业、住宿和餐饮业比重有所上升;同期城乡居民用电量占能源消费比重比较稳定,呈现小幅上升的趋势,但占全社会用电量的比重自2008年起却有逐步下降的趋势,这主要是由于节能家电的大力推广减少了居民用电浪费,从而导致城乡居民用电量占全社会用电量比重有所下降。

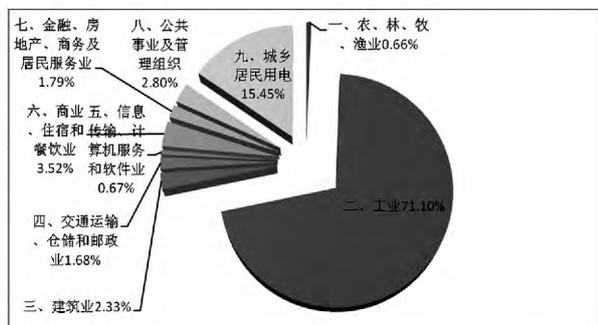


图2 2011年电力消费行业结构

## 2 四川电力消费的特征分析

### 2.1 电力消费增长较快

电力消费涉及到生产生活的各个方面,与其他能源品种相比,其消费增长率较快。2011年的电力消费量达到175 144 GWh,较上年增长13.07%。而煤品燃料和天然气的消费量受到供应量管制影响,呈现出负增长,分别为-5.13%和-11.58%。电力撬动系数从2007年的0.81下降到2011年的0.38,说明了电力消费增速较其他能源消费增速快,电力对经济增长的贡献度逐步提高。

### 2.2 电力“大进大出”趋势明显

四川电力调入量和调出量都呈现增长趋势,“大进大出”趋势越来越明显。电力调入量从2007

年的1 424 000 t标准煤增加到2011年的3 859 200 t标准煤,累计增长171.01%。而电力调出量从2007年的335.20万吨标准煤增加到2011年的8 030 400 t万吨标准煤,累计增长139.57%。而同期煤炭和石油却呈现出明显的“大进小出”趋势;天然气呈现出“小进大出”趋势。

电力消费的“大进大出”一方面反映了四川电力生产能力在逐年提升,在丰水期存在较多余电,另一方面也说明了在高峰期和11月份至次年3月的枯水期四川电力供应紧张,需要通过外调电力才能保证经济社会的正常运行。因此,四川省的电力消费总体上呈现“丰余枯缺”状况,需要通过建立电力交换大平台,坚持对外开拓电力市场和寻找电源相结合,以保证四川电力市场平稳运行。

### 2.3 电力消费比重正逐年提高

从能源消费品种结构来看,煤品燃料比重正在下降,而电力消费比重正在逐步上升。

电力是四川能源品种结构中的第二大能源,电力消费占能源消费的比重从2007年的32.72%上升到2011年的35.12%。而煤品燃料在能源消费总量中的比重呈现下降趋势,从2007年的52.22%下降到2011年的44.63%。这两类能源的相对变化,一方面意味着四川节能减排取得显著成就,一次能源消费比重正逐步减少;另一方面意味着随着经济社会的发展,能源消费结构正在发生改变,以水电为主的清洁能源在能源消费中的比重正在日益提升。从电力撬动系数的上升也能说明电力消费比重在逐步提高。

### 2.4 电力消费主要集中在攀枝花、成都及其周边地区

与全国各省市相比,四川省全社会用电量占全国的比重由2007年的3.62%上升到提高到2011年的3.72%。

从四川省内来看,攀枝花是钢铁、钒钛、能源基地和新兴工业城市,工业在国民经济结构中占比较大,导致其用电量在21个州市中排名第二。成都及其周边地区的工业化水平较高,城镇体系相对完善,人口较多,是四川省电力消费的主要地区,占电力消费的50%以上。电力消费受到工业化、城镇化、人口因素和工业结构等因素的综合影响,而成都及其周边的地区一直是四川经济和社会发展的核心,其用电需求很大,该地区成为了电力消费的主要地区。

因此,充分保障成都及其周边地区的生产生活用电和攀枝花地区工业生产,对保障四川电力平稳运行具有重要意义。

### 2.5 工业是电力消费的主体

工业是电力消费的主体,2011年工业用电量达到124 522 GWh,占全社会用电量的71.10%。建筑业、交通运输、仓储和邮政业、农、林、牧、渔业和信息技术、计算机服务和软件业等行业用电量都较少。而在工业用电中,制造业用电量为91 727 GWh,占全社会用电量的52.37%,尤其是化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业用电量较多。因此,工业作为电力消费的主体,意味着工业是保障四川电力平稳运行的重点行业,也是节能减排的重点行业。

### 2.6 制造业比重最大且呈现进一步上升趋势

四川全社会用电量中制造业比重最高,保持在50%左右,由2007年的50.69%上升到52.37%,且随着四川“十二五”规划提出坚持走新型工业化道路,以产业高端化高新化为方向,做强做优做大工业,加快建设现代加工制造业基地等战略定位的提出,制造业占全社会用电量的比重将有进一步上升的趋势。

## 3 电力消费比重提高的原因分析

### 3.1 经济发展水平逐步提高是电力消费比重上升的根本原因

用电量是一个地区经济发展的晴雨表,是经济运行的风向标,经济发展与电力消费密切相关。

从全省电力消费看,在不考虑其他要素投入情况下,经济总量与用电量呈现显著正相关,相关系数达0.74,电力消费弹性系数从2007年的0.77上升到2011年的1.78,说明经济增长对电力的依赖程度在逐步增加。这会带来电力消费总量的增加,在能源消费总量一定的情况下,电力消费占能源消费的比重必然上升,而其他能源消费比重则相应下降。而从各市州电力消费来看,经济总量较大的市州,其电力消费总量也较多。如2011年,成都、乐山和德阳的经济总量分别为6950.58亿元、918.06亿元和1137.45亿元,其电力消费分别为38 582 GWh、20 303 GWh和10 228 GWh。

### 3.2 工业化加速发展是电力消费比重上升的直接动力

工业是电力消费的主要部门,与四川资源禀赋优势相适应的包括装备制造、能源电力、油气化工、钒钛钢铁、汽车制造等产业,处于快速发展时期,除了满足全省的需求外,还通过不断开拓国内市场,实现自身增长,这必然带动工业用电量的大幅增加。2011年,工业用电量占行业用电量的84.09%,工业化与电力消费比重呈现正向相关性,工业增加值增长22.3%,带动电力消费增长了13%,工业化率对电力消费的弹性系数达到了0.59。

### 3.3 城镇化加速推进是电力消费比重上升的重要推力

城镇化的加速发展需要电力作为重要支撑,因此城镇化加速推进是电力消费比重上升的重要推力。城镇化进程的加快,导致城市建设规模扩大,城市空间急剧膨胀,城市基础设施的完善,客观上增加了各种水泥、钢铁、玻璃、铝合金等建筑材料投入,增加了电力消费。同时,人口向城镇集中,需要增加供水、供气、市容环境卫生、园林绿化的维护与运行成本,需要大量的电力投入作为保障,客观上也增加了电力消费比重。2011年,四川城镇化增长了1.65%,带动电力消费增长了13%,城镇化率对电力消费的弹性系数达到了7.88。

### 3.4 节能减排战略实施是电力消费比重上升的有力保障

节能减排战略在减少环境污染,提高能源利用效率方面起到了重要作用,使得电力这一可再生的清洁能源在能源消费中的比重逐步上升。为减少温室气体排放,国家实行了节能减排战略,下达了节能减排目标,限制了“三高”行业发展。政策调控的目标是节约能源、降低能源消耗、减少污染物排放,必然会减少污染较重的化石能源生产与消费,鼓励清洁能源发展。目前风能、生物能、地热能等清洁能源开发成本和入网价格相对较高,使其投资收益率较低,没有形成规模经济。而水电行业开发成本相对较低,具有良好的经济社会价值,使得电力在四川能源消费结构的地位日益凸显。因次,受节能减排政策影响,电力消费占能源消费的比重逐步上升。加之单位GDP能耗自2007年的1.48 t/万元标准煤下降到2011年的1.22 t/万元标准煤,而单位GDP电耗从2007年的0.151 t/万元标准煤降低到2011年的0.149 t/万元标准煤,下降较小。可以说节能减排战略下电力下降幅度小于其他能源费下降幅度,即电力消费在整个能源消费中的比重有上升的趋势。

### 3.5 水能资源开发利用为电力消费比重上升提供了坚实基础

水能资源的开发符合四川资源禀赋优势,具有生态、环保、可持续的特点,为电力消费占能源消费比重上升提供了坚实基础。全省水能资源理论蕴藏量10 MW及以上河流共781条,水能资源理论蕴藏量143 520 MW,技术可开发量120 040 MW,经济可开发量1 032 710 MW。而开发水能资源也具有优势:①水能资源本身是一种可再生能源,利用水流产生的能量时无需再消耗其他动力能源,具有启动和操作灵活、发电成本低、发电效益高的特点。②水力工程建设是一个综合性的工程,具有一定的旅游价值,利用库区水力资源可以有效改善航道,进行大规模渔业养殖,对库区灌溉和下游防洪起到重要作用。③水能资源开发利用符合国家节能减排战略。这些水能资源开发的优势,导致了四川高度重视水电发展,大大提高了电力生产和保障能力,使生产生活对电力的依赖逐步增加,从而导致电力消费增加和电力消费占能源消费比重的相对上升。2011年电力消费占能源消费比重已升至35.12%。

## 4 电力消费占能源消费比重提高的影响分析

### 4.1 有利于改善能源消费结构,减少污染排放

电力消费占能源消费比重提高,意味着电力与生产生活各个方面的联系将会更加紧密,生产生活在对电力的依赖将会进一步加大。一方面,从绝对量来讲意味着电力消费总量在逐步增加,而电力是清洁能源之一,具有环保、可持续的特征,电力的消费和使用不会造成环境污染,将有效地改善环境污染问题。另一方面,从相对量来讲意味着电力消费增长较快,而其他能源消费增长较慢,相应的废水、废气和固定废物的排放将会减少,将有利于四川加强生态文明建设,保持四川经济社会的永续发展,为努力建设美丽中国做出应有贡献。

### 4.2 有利于引导行业合理用电,促进产业结构调整

电力作为产业部门重要投入要素之一,为政府调整产业结构,促进经济发展方式转变提供了便利。特别是在电力占能源消费比重逐步提高的同时,产业部门对电力依赖逐渐加大,为贯彻落实产业政策提供了有效路径。一方面,属于政府产业政策规定限制发展的高电耗、高投入、低产出的产业部门,可以通过用电总量控制、提高电价、限时供电等方式,

促使企业对机器设备、生产流程和管理方式进行整改和更新,使之围绕节能减排目标和相关的节能减排任务进行生产安排,使政府的产业政策能够得到有效的贯彻落实。另一方面,对涉及信息技术、生物技术、新材料等技术密集、资金密集的高新技术产业,政府则可以通过优惠电价、提高电力保障能力、提高电网效率等措施保障其科研、生产的顺利完成,以促进四川高新技术的快速发展。因此,电力消费比重的提高,为四川落实产业政策和引导行业合理用电提供了保障。

### 4.3 有利于发挥比较优势,优化电力资源配置

四川省水力资源丰富,电力消费占能源消费比重上升意味着对水电投资开发力度进一步加大,符合四川比较优势,将产生良好的经济效益,促进区域经济持续增长。一方面,四川省水电资源的开发利用,形成了集群发展格局,主要集中在阿坝北部、阿坝东部、绵阳、甘孜中东部、甘孜南部、凉山、雅安等7个地区,这有利于形成当地重要支柱产业,促进上下游关联产业的互动发展,最终带动区域经济增长。另一方面,通过具有比较优势的、低成本的电力上网销售又可以优化电力资源配置,为其他区域经济发展提供电力保障。因此,电力消费比重上升有利于充分发挥比较优势,促进电力资源优化配置。

### 4.4 有利于电网改造升级,从而提高电网质量

电力消费比重提高有利于加快电网升级,促进电源和电网协调发展。一方面,电网改造升级可以优化输电供电系统网络结构,促进各市州形成区域间联网,提高电网运行的经济性,从而有利于建设布局优化、结构合理、联系紧密、城乡协调、安全可靠、覆盖全省的输配电体系。另一方面,电网改造升级有利于对外构筑坚强智能的全国电力资源配置大平台,实现跨省区跨流域的水火互济、购送灵活、交换方便的电力保障系统,逐步形成“东接三华、西纳新藏、北联西北、南通云贵”的全国电力交换大枢纽。

#### 参考文献

- [1] 国家电网公司发展策划部. 2011年统计资料汇编[R]. 2012.
- [2] 四川省电力公司年鉴编纂委员会. 四川省电力公司年鉴-2012[M]. 北京: 方志出版社, 2012.
- [3] 四川省统计局. 四川统计年鉴-2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

(收稿日期: 2014-06-12)



# 北京科锐

智融电网 引领创想

## 轻松节约每一秒



## 实用型 配电自动化方案

20年专注于故障指示器研发制造，拥有原理发明专利和多项实用新型专利；累计销售200余万只，出口亚洲、欧洲和美洲等国际市场；故障指示器——采用自适应智能判据，准确、稳定、可靠、免维护。自动甄别短路和接地故障；故障自动定位系统——应用先进的通信技术，实现故障点准确定位。融合电流监测功能，满足更高层次的应用需求，构成实用的配电自动化解决方案。

(专利号：ZL2008-20000411.0、专利号：ZL2008-2-0000412.5、专利号：ZL95-1-08848.3、国际专利主分类号：G01R 31/02)

### SFI/FI 系列故障指示器 CR-FLS 故障定位系统



010-62981321

TEL  
WWW

www.creat-da.com.cn

北京科锐配电自动化股份有限公司  
Creative Distribution Automation Co., Ltd.

客户免费服务热线：800-810-8283



# 国网四川省电力公司内江供电公司

国网内江供电公司是四川省电力公司直属的特二型国有全资供电企业，担负着内江市市中区、东兴区、资中县、威远县、隆昌县的电网建设运行、维护检修与电能营销等任务，下辖县级供电企业4个。供电面积为4223km<sup>2</sup>，供电人口426万。

截止2013年底，公司有35kV及以上变电站59座，主变压器96台，总容量359.67万千伏安。35kV及以上输电线路124条。

公司荣获四川省“五一”劳动奖状，保持全国文明单位称号；被评为省公司“安全生产3000天先进单位”、“2013年度安全生产先进单位”；共产党员服务队被评为“全国工人先锋号”。

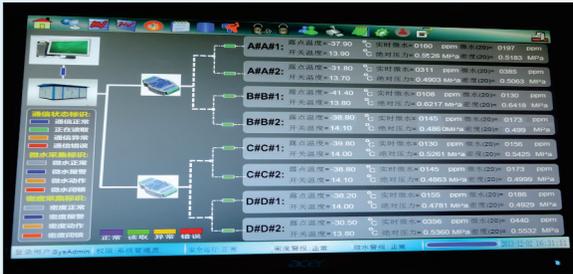


2014年1月7日四川省电力公司副总经理刘勇为内江供电公司颁奖



## RDWS100系列SF6气体密度和微水在线监测系统

能够在线监测SF6电气设备的SF6气体密度和SF6气体微水，因而能对SF6电气设备做出在线监测与故障诊断，可在线显示SF6电气设备的SF6气体密度，当SF6电气设备发生漏气时能够及时报警及闭锁；可在线显示SF6电气设备内部SF6气体微水，当SF6电气设备的SF6气体微水超标时能够及时报警。利用标准化的压力计算检测出是否存在突发的和微小的泄露，而在线露点测量为操作人员随时警示水分状态，保证电网安全运行。



### 系统主要特点:

- 1、不但可以测量露点，同时还能测量压力和温度，进而计算出包括SF6密度在内的其它四个参量，对评估SF6绝缘状态提供了很好的依据。
- 2、采用乐研独创的专利技术，真实反映SF6电气设备内部的微水。
- 3、采用标准的通讯方式，符合IEC61850通讯要求。
- 4、具备自动校准功能，自动纠正零点偏差，以保证测量的准确性。

### 主要技术指标:

- 1、压力测量: 0.00MPa~1.000 MPa, 优于±0.5%FS
- 2、密度测量: 0.00MPa~1.000 MPa, 优于±1.5%FS
- 3、露点测量: -80°C~20°C, ±2°C
- 4、湿度测量: 10~10,000 PPMv, 优于±5%FS
- 5、温度测量: -40~80°C, ±1°C
- 6、微水报警: 软件中可以任意设置; 密度报警闭锁: 软件中可以任意设置
- 7、密封性能: 漏气率 $\leq 1 \times 10^{-8}$  mbar.l/s (氦气检漏), 定量检漏年泄露率<0.5%
- 8、通讯方式: RS485接口, MODBUS通讯协议, 通过IED可以实现IEC61850
- 9、监测点数: 不限
- 10、抗电强度外壳与电源间: >2000V
- 11、电磁兼容特性: 快速瞬变脉冲群GB/T17626.4-1999 3级
- 12、雷击(浪涌): GB/T17626.5-1999 3级

**成功案例有: 德阳、银川、乌鲁木齐、长春、荆州……等多家供电公司。**

## RDM型远传式SF6气体密度继电器

RDM系列远传式SF6气体密度继电器是机械与电子的完美有机结合，机械部分实现密度显示、报警、闭锁功能；电子部分可将密度、压力、温度等信息实时采集、远距离传输。采用最新的微机技术及精确的SF6气体压力和温度之间关系的数学模型，选用高性能的数字智能式压力、温度传感器，使电网实现在线监测SF6电气设备的密度，实现设备状态检修，确保SF6电气设备的安全运行，满足国家智能化电网建设要求。

### 主要技术性能

精度等级: 机械部分为: 2.5级 (-40°C~60°C) ;

电子部分为: 1.5级 (-40°C~60°C)。

测量范围: -0.1~0.9Mpa。

工作电源: 10V~30V (DC24V时2mA电流)。

抗振性能: 200m/s<sup>2</sup>。

抗冲击性能: 500 m/s<sup>2</sup>。

外壳防护等级: IP65。

密封性能:  $5.0 \times 10^{-9}$  mbar.l/s。

触点容量: AC/DC 250V 1000VA/500W。

环境温度: -40°C~+60°C。

通信方式: RS485、4-20mA、CAN、HART协议等。配合我公司集线器，符合IEC61850通讯要求。



## RDF系列SF6气体密度继电器自动校验装配接头

一款非常经典的专利产品，会改变人们的工作方式



符合国网公司新十八项反措要求

全国5000多套的成功运行经验

自动校验，具有防止校验误操作的功能

密封性能:  $\leq 1 \times 10^{-8}$  mbar.l/s (氦气检验) ;

抗振性能: 30m/s<sup>2</sup> ;

抗冲击性能: 100g ;

工作环境: 温度为-60°C~+80°C,

相对湿度 $\leq 95\%$  RH ;

外壳防护等级: IP65。

**乐研电气——拥有100多项专利技术，引领创新，创造卓越！出口欧美，多家国际电力巨头供应商。**

诚征全国代理商



ISO9001质量体系认证证书

400 - 8818 - 755



国电西高

电力测试领航者!

国电创造辉煌 西高点亮未来

www.gdxgs.com

## GDTF 系列

### 变频串联谐振耐压试验装置

DL/T 849.6 - 2004

#### 适用范围

- 6kV-500kV的交流耐压试验  
(电缆、变压器、GIS、开关、互感器等)
- 各种火力、水力发电机的交流耐压试验

#### 产品特点

- 具有过压、过流、闪络等保护功能
- 全自、手动、自动调谐手动升压模式
- DSP平台技术，友好的人机交换界面
- 具备调谐、分段加压和计时、运行状态功能
- 大屏幕触摸液晶屏，具备模式切换、故障提示功能



GDYZ-301 氧化锌避雷器测试仪



GDKC-6A 高压开关动特性测试仪



GDYD 智能耐压试验装置



GDVLF 超低频高压发生器

国电西高旗下子站:

www.HIPOT.cn | www.SF6TEST.cn | www.CTTEST.cn | www.DCTEST.cn

国电西高合作网络媒体

www.cchv.cn

中国高压试验网



武汉国电西高电气有限公司  
HV HIPOT ELECTRIC CO., LTD.

电话: 027-65605916  
传真: 027-65606183

邮箱: whgdxgs@163.com  
地址: 武汉市东西湖区金银潭现代企业城B区7栋



# 四川电力建设二公司

SICHUAN NO.2 ELECTRIC POWER CONSTRUCTION COMPANY



南充市生活垃圾焚烧发电厂



中电福溪 (2x600MW) 超临界电厂



印度纳加酋 (2x600MW) 火电厂



二滩 ~ 普提 II 回  $\pi$  接进米易500千伏线路工程



在建的华能重庆两江2X470MW燃机电厂

四川电力建设二公司创建于1958年，注册资本金11023万元，总资产超过6亿元，是具有电力工程施工总承包一级、承装、修、试电力设施许可证一级资质的国有大型一档企业。可承接各类火电站、风力电站、太阳能电站、核电站和各种电压等级的送电线路和变电站工程施工总承包。同时具有房屋建筑工程施工总承包二级、机电设备安装工程专业承包一级、起重设备安装工程专业承包一级、钢结构工程专业承包二级、电力工程调试乙级、一级金属试验室、一级土建试验室、一级焊工考核培训中心和中国进出口企业资格证。公司还是较早取得了ISO9001质量管理体系、职业健康安全管理体系、ISO14001环境管理体系及完善计量检测体系认证的企业之一。

56年来，公司共完成80多项常规火电站，装机总容量超过1500万千瓦，地域涉及全国16省市，并在洁净能源、电网建设等领域取得一定成绩。公司在不断巩固国内市场的同时，还进军国际火电工程建设，足迹遍布东南亚和南美市场。公司以其良好的社会信誉和卓越的工程业绩，受到各方及国内外专家的高度赞誉和一致好评。

地址：四川省成都市成华区槐树店路38号 邮编：610051

电话：028-68681818 传真：028-68681000

网址：www.scepcc2.com 电子邮箱：scdj2gs@163.com

背景图片为海南文昌风力发电厂

# 自贡电力设计院

主控室



自贡电力设计院设立于1962年，1993年晋升为国家乙级电力工程勘察设计单位。2003年取得国家发展和改革委员会批准的工程咨询乙级资质证书。

目前，我院有高级工程师16名；工程师22名；其中：注册电气工程师3名，一级注册结构师1名，二级注册结构师1名，注册造价师2名，注册咨询师6名，二级注册建筑师2名。

我院至今共完成220KV电压等级中型项目的勘测设计和咨询评估项目共140余项。新建220KV变电站25座；改、扩建220KV变电站54座/次；新建220KV输电线路58条，共计1910公里；新建、扩建110KV变电站75座；新建110KV输电线路49条，共计1350余公里。



总平面两阶布置





# 体验EX热成像的世界

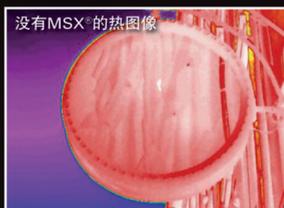


## FLIR EX系列

用于快速执行电气和机械检查的热像仪



具有MSX®的热图像



没有MSX®的热图像

FLIR MSX 技术令FLIRT600, T400, Exx, Ex 系列热像仪获得的热图像内的细节纤毫毕现。



检测保险丝过热



更多其他型号供您选择.....

- 检测潜在问题，快速评估损耗，执行预防性检查
- 发现能源损耗和不良隔热
- 生成报告，利用易用软件对所做发现进行分析和归档
- 带有MSX®功能获取超精确、清晰的热图像
- 4种不同型号可选：E4 / E5 / E6 / E8

# 8800元起售



\*可在www.flir.com进行产品注册后享有

FLIR 中国公司总部:

前视红外光电科技(上海)有限公司

全国咨询热线: 400-683-1958

邮箱: info@flir.cn

www.flir.com

FLIR 授权经销商:

成都英孚德科贸有限公司

咨询电话: 028-8525 0223/8525 9930

邮箱: xdr\_xiejun@163.com

www.cdnfrared.com

图片仅供说明之用，显示图像可能不代表该热像仪的实际分辨率。