

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

国家电网自贡电业局



四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.35

2012

No.1

《四川电力技术》
编辑委员会名单

主任委员 王 平
副主任委员 张 伟
 刘俊勇
委 员
 (按姓氏笔画为序)
方文弟 王 卓 白家棣
刘 勇 朱白桦 朱国俊
朱 康 邓亚军 邬小端
李兴源 李建明 严 平
胡 灿 徐 波 唐茂林
韩晓言 谢 舫 甄 威
秘 书 李世平
 吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2012 年第 35 卷第 1 期(总 217 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdsedljs@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* 26*

2012-02

目 次

· 电力稳定技术 ·

- 一种改进的保护协调配合方法及其仿真研究 张 燃(1)
模块化多电平储能单元改善并网风电场稳定性研究 张振华 冯 涛(6)
基于线性和非线性混合预测的改进连续潮流法 李 林 康积涛(9)
搜寻者优化算法在含风电机组系统最优潮流中的应用
..... 冯 跃 李明翔 黄彦全(12)
自贡电网无功补偿及其优化 刘代顺 常建磊(16)
新疆电网频率的时空分布分析 吴茂乾 陈 江 王 筱 等(19)
二滩水电站 5 号机组负荷波动原因分析及处理 吴建荣 王秀梅(22)
一例双馈发电机的并网故障分析 袁 炜 胡文胜 赵 宇(24)
电能质量数据压缩算法研究 杨超颖(26)
电能计量装置故障分析与差错电量计算 万忠兵(31)
电能计量在线监测系统应用实例及分析 李 剑(34)

· 电力调度技术 ·

- 调度运行过程管理系统的设计与应用 刘青丽 尹 琦 任 铃(39)
基于模糊理论的配电网电压层级优化的应用 冯 景 周步祥 林 楠(43)
东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源点的可行性分析
..... 袁 川 刘俊勇 张国松 等(48)
锦屏水电站枯期运行方式浅析 李金明 季苏蕾 窦学刚 等(54)
可中断负荷参与系统备用研究综述 孔祥清 雷 霞 刘庆伟 等(57)
基于电网安全稳定运行前提下的梯级水电站优化调度新探讨
..... 陈 策 袁明友 黄 强 等(61)
母线负荷预测的实用算法 陈小平(66)
基于光传感器技术的 500 kV 交直流输电线路盐密在线监测研究及对比分析
..... 范 强 蒋 丽(69)

· 高电压技术 ·

- 对 500 kV 断路器膜纸绝缘均压电容介质损耗试验探讨 文 剑(73)
电压互感器二次回路 N600 多点接地查找及处理 钟文华(77)
提高变电站一次设备预防性试验效率的可行方法 汪 立 刘代祥(80)
基于两起故障实例的 500 kV CVT 故障原因对比分析
..... 杨 洋 覃 伟 许 强 等(83)
成都地区输变电工程电磁环境影响分析及其防护对策 南 方 姜南希(85)
水轮发电机组集电环温度过高原因分析及技改措施
..... 向春见 顾 轩 李友安(89)
高压加热器跳闸对超临界机组的影响及处理 薛森贤(92)
- 简讯 ·
《四川电力技术》投稿须知 (5)
四川电科院高压所组织召开《“四图”编制研究》和《±400 kV 拉萨换流站
高电压设备试验技术研究》项目评审会 (94)

CONTENTS

An Improved Protection Coordination Method and Its Simulation Research	Zhang Ran (1)
Research on Stability of Grid - connected Wind Farms Improved by Modular Multilevel Energy Storage Unit	Zhang Zhenhua Feng Tao (6)
Improved Continuation Power Flow Method Based on Linear and Nonlinear Hybrid Prediction	Li Lin Kang Jitao (9)
Application of Seeker Optimization Algorithm to Optimal Power Flow for Power System with Wind Turbine Generator System	Feng Yue Li Mingxiang Huang Yanquan (12)
Reactive Power Compensation and Its Optimization in Zigong Power Grid	Liu Daishun Chang Jianlei (16)
Analysis on Temporal and Spatial Distribution of Frequency in Xinjiang Power Grid	Wu Maoqian Chen Jiang Wang Xiao et al (19)
Cause Analysis for Load Fluctuation of No. 5 Unit and Its Treatment in Ertan Hydropower Station	Wu Jianrong Wang Xiumei (22)
Analysis on Grid Interconnection Failure of Double - fed Induction Generator	Yuan Wei Hu Wensheng Zhao Yu (24)
Research on Algorithm for Date Compression of Power Quality	Yang Chaoying (26)
Fault Analysis of Electrical Energy Metering Device and Calculation of Error Quantity of Electricity	Wan Zhongbing (31)
Application Cases and Analysis of Online Monitoring System of Electrical Energy Metering	Li Jian (34)
Design and Application of Dispatching Process Management System	Liu Qingli Yin Qi Ren Ling (39)
Optimization of Voltage Level of Distribution Network Based on Fuzzy Theory	Feng Jing Zhou Buxiang Lin Nan (43)
Feasibility Analysis of Dong Xiguan Power Plant as a Black Start Power Point for Suining - Nanchong Power Grid	Yuan Chuan Liu Junyong Zhang Guosong et al (48)
Superficial Analysis on Operating Mode in Low Water Period of Jinping Hydropower Station	Li Jinming Ji Sulei Dou Xuegang et al (54)
Summary of Interruptible Load Participating in System Reserve	Kong Xiangqing Lei Xia Liu Qingwei et al (57)
New Discussion on Optimal Dispatching of Cascade Hydropower Stations Based on Safe and Stable Operation of Power Grid	Chen Ce Yuan Mingyou Huang Qiang et al (61)
A Practical Algorithm of Bus Load Forecasting	Chen Xiaoping (66)
Research on Online Monitoring of Salt Density in 500 kV AC/DC Transmission Line Based on Light Sensor Technology and Its Comparison Analysis	Fan Qiang Jiang Li (69)
Discussion on Dielectric Loss Test of 500 kV Circuit - breaker Equalizing Capacitor with Film and Paper Insulation	Wen Jian (73)
Searching and Treatment for Multipoint Earthing of N600 in Secondary Circuit of Voltage Transformer	Zhong Wenhua (77)
Feasible Method for Efficiency Improvement of Preventive Test of Primary Equipment in Substation	Wang Li Liu Daixiang (80)
Comparison and Analysis of Fault Causes for 500 kV Capacitor Voltage Transformer Based on Two Cases	Yang Yang Qin Wei Xu Qiang et al (83)
Analysis on Electromagnetic Environment Impact of Power Transmission and Transformation Project in Chengdu and Its Prevention Strategy	Nan Fang Jiang Nanxi (85)
Cause Analysis for Overheating of Collecting Ring of Water - turbine Generator Set and Its Technical Transformation Measures	Xiang Chunjian Gu Xuan Li Youan (89)
Influence of HV Heater Tripping on Supercritical Unit and Its Treatment	Xue Senxian (92)

**SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY**

2012 Vol. 35 No. 1
(Jan. No. 217)

Bimonthly, Started in 1978

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

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering
Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

一种改进的保护协调配合方法及其仿真研究

张 燃

(四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要:提出了一种用于继电保护协调配合计算的时间灵敏度优化配合方法,该方法以时间级差约束违背数、故障持续时间、灵敏度约束违背数和配合对动作时间差与时间级差之差的加权和作为保护系统协调配合的优化目标,并采用速度跟踪粒子群算法对其进行优化计算。以一个配电网反时限过流保护配合为算例进行了计算和分析,其结果表明TSOC方法可根据系统特点和整定需要方便、量化地对继电保护性能选择进行适当折衷,具有很好的实用性和有效性。

关键词:保护协调配合;粒子群优化;反时限过流保护

Abstract: A time sensitivity optimal coordination (TSOC) method for relay protection coordination calculation is presented. It utilizes the weighted sum of time difference constraint violations, fault durative time, sensitivity constraint violations and operation time difference for protection pairs as optimal goals, and uses velocity tracking particle swarm optimization (VTPSO) for optimization calculation. Based on this method, an example of protection coordination of inverse definite minimum time lag overcurrent relays is calculated and analyzed, whose results prove that the TSOC method can compromise protection operation performance conveniently and quantitatively with system characteristics and requirements, and the value of its objective function also can act as the evaluating indicator of protection settings.

Key words: protection coordination; particle swarm optimization; inverse definite minimum time lag overcurrent protection

中图分类号:TM762 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0001-05

0 引 言

为满足电网对继电保护提出的可靠性、选择性、灵敏性和速动性要求,需要科学整定保护装置的定值,保证保护间的协调配合。然而随着电网规模的扩大,接线和运行方式日趋复杂,特别是大小环网相互重叠、长短线交错连接的状况,使后备保护定值相互依赖,构成配合关系环,难以合理配置;另外,近年来分布式发电逐渐兴起,其投退的不确定性也使保护配合十分复杂。因此,研究保护协调配合的计算和校验方法已成为一个亟待解决的问题。

国内外学者针对该问题已进行了大量研究^[1-4],特别是香港科技大学的So C. W.在其博士论文中提出一种保护配合TCM(time coordination method)方法^[5],并对其进行了细致的分析和计算。这里在TCM方法基础上进行改进,探讨了一种时间灵敏度优化配合(time sensitivity optimal coordination,TSOC)方法及其优化算法,并以一个配电网反时限过流保护配合为算例进行了仿真和分析,仿真结果表明该方法

可根据系统特点和整定需要方便、量化地对保护性能选择进行适当折衷,具有很好的实用性和有效性。

1 时间灵敏度优化配合方法

保护协调配合研究从系统整体角度出发,建立数学模型,将全系统保护的协调配合问题转化为一组优化公式和约束条件来处理^[6-11]。

1.1 TSOC方法

选取继电保护时间级差约束违背数、故障持续时间、灵敏度约束违背数和配合对动作时间差与时间级差之差作为优化目标,以继电保护设备特性参数设置值作为TSOC方法的决策变量。

1.1.1 时间级差约束违背数

为使故障发生时保护动作具有选择性,停电范围尽量缩小,应满足保护配合对上游继电器与下游继电器动作时间之差大于给定的时间级差。故障时所有配合对时间级差违背数总和越小,则继电保护协调配合的综合性能越好。对于系统故障 i ,配合保护对 j 的上、下游保护装置动作时间之差定义为

$$CM_{ij} = T_{up_{ij}} - T_{down_{ij}} \quad (1)$$

其中 $T_{up_{ij}}、T_{down_{ij}}$ 为故障 i 时配合对 j 上、下游继电器的动作时间, 定义时间级差约束违背数为

$$Num_vio_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } CM_{ij} < grading_margin \\ 0 & \text{if } CM_{ij} > grading_margin \end{cases} \quad (2)$$

其中 $grading_margin$ 指时间级差, 即保护配合对各自动作时间之差的最小值, 考虑继电器操作、断路器动作、安全级差等, 则选取固定的 0.4 s 。

考虑系统所有故障中全体保护协调配合, 可得到时间级差约束违背总数为

$$G_1(R) = \sum_i \sum_j Num_vio_{ij} \quad (3)$$

其中 R 表示继电保护特性参数设置值, 即优化的决策变量。

1.1.2 故障持续时间

从系统发生故障到保护设备完全切断故障需要一定的时间, 而短路电流持续时间越长, 造成的后果越严重。以故障持续时间作为系统快速性指标进行优化, 以达到使故障对系统的破坏最小的目的。

设故障 i 的故障时间为 $Fault_time_i$, 该故障发生危害率为 P_i , 然后把所有故障情况相加得到一个故障时间的数学期望值。

$$G_2(R) = \sum_i (Fault_time_i \times P_i) \quad (4)$$

1.1.3 灵敏度约束违背数

在后备保护之间, 只有当动作时限和灵敏系数都相互配合时, 才能切实地保证动作的选择性。灵敏度相互配合的要求是: 对同一故障点而言, 要求越靠近故障点的保护应具有越高的灵敏度, 即在故障 i 发生时, 对于保护配合对 j 需满足

$$K_{lm_up_{ij}} > K_{lm_down_{ij}} > K_{lm_lim} \quad (5)$$

其中 $K_{lm_up_{ij}}$ 和 $K_{lm_down_{ij}}$ 分别为故障 i 情况配合对 j 的上游和下游继电器的动作灵敏度; K_{lm_lim} 为灵敏度最小值, 一般取 1.2 。与时间级差约束违背数类似, 可定义灵敏度约束违背数及其总数为

$$Num_lm_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } K_{lm_up_{ij}} > K_{lm_down_{ij}} \\ 0 & \text{if } K_{lm_up_{ij}} \leq K_{lm_down_{ij}} \end{cases} \quad (6)$$

$$G_3(R) = \sum_i \sum_j Num_lm_{ij} \quad (7)$$

1.1.4 保护配合对动作时间差与时间级差的差

在保证大于时间级差的情况下, 为了保证保护设备的速动性, 配合对动作时间差应尽可能的小, 因此将各种故障情况下保护配合对的动作时间差与时间

配合级差的差值总和最小作为一个优化目标。对所有故障和所有的保护配合对, 该总和为

$$G_4(R) = \sum_i \sum_j |CM_{ij} - grading_margin| \quad (8)$$

将以上 4 个指标的加权平均作为目标函数, 可得到一个无条件单目标优化模型。

$$G(R) = \min\{\alpha G_1(R)^\mu + \beta G_2(R) + \gamma G_3(R)^\theta + \lambda G_4(R)\} \quad (9)$$

其中 $\alpha、\beta、\gamma、\lambda$ 称为权重系数, 在 0 到 1 之间取值, 分别代表了协调配合计算过程中对 4 个指标的偏好程度, 满足 $\alpha + \beta + \gamma + \lambda = 1$, 可以根据不同对象、不同情况对其进行设定, 从而能够方便、量化地根据不同特性系统特点和整定要求以及继保工程师的经验, 对继电保护性能选择进行适当折衷。

1.2 优化方法

继电保护协调配合是典型动态环境下的复杂优化问题, 选用文献 [12] 中所提出的速度跟踪粒子群优化算法求取式 (9) 的最优解, 可克服传统算法收敛速度慢和易陷入局部最小的缺陷。

2 仿真算例及分析

2.1 仿真算例

文献 [13] 介绍了一种基于混杂 Petri 网的保护建模与仿真方法, 利用该方法建立如图 1 所示的简单配电网作为算例进行研究, 各母线电压等级在图中标出, 系统参数见文献 [5]。

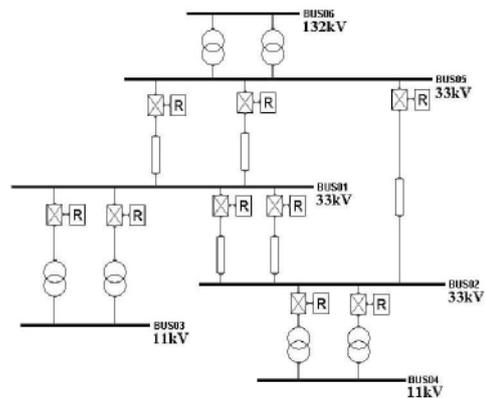


图1 保护协调配合算例模型

为了更明显地体现优化算法的效果, 算例中采用时间整定为连续函数的反时限过流保护 (inverse definite minimum time lag overcurrent relay, IDMTL OC) 作为保护设备。根据 IEEE C37.112-1996 和 IEC 255-3 标准, 当故障电流恒定不变时, IDMTL OC 的动作时间计算公式为

$$t(I) = \frac{A \times TM}{(I^p - 1)} \quad (10)$$

其中 $A=0.14$; $p=0.02$; TM 为时间整定系数; I 为故障电流 I_{fault} 与保护启动电流定值的比, 即

$$I = \frac{I_{fault}}{CSM \times CT_ratio \times Relay_rating} \quad (11)$$

其中 $CSM \times CT_ratio \times Relay_rating$ 为启动电流值。

如果故障电流在保护装置启动后、动作前发生了改变, 其动作时间满足

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (12)$$

其中 T_0 为继电器实际动作时间。

2.2 计算结果

给定两组权重系数: 如整定时要求尽可能保证保护准确配合, 选择 $\alpha=0.4$ $\beta=0.1$ $\gamma=0.4$ $\lambda=0.1$, 称为权重(1); 如果要求保护设备快速动作, 选择 $\alpha=0.1$ $\beta=0.3$ $\gamma=0.1$ $\lambda=0.5$ 称为权重(2)。

计算过程考虑母线 BUS01、BUS02、BUS03 及

BUS04 发生三相短路故障情况, 根据各母线电压等级, 确定其故障危害率分别为 1/3、1/3、1/6 和 1/6。短路故障发生时, 仅考虑故障电流, 不计负载电流。根据反时限保护的特性和短路计算结果具体化目标函数, 并对速度跟踪粒子群优化算法参数进行初始化, 设置粒子群规模为 20, 最大迭代次数为 500, 加速和惯性因子分别设置为 $c_1 = c_2 = 2$, $\mu_{max} = 0.8$, $\mu_{min} = 0.2$, 其他参数按默认设置, 分别对权重(1)和权重(2)两种情况进行计算, 结果如表 1 到表 4 所示。

2.3 结果分析

由表 1 到表 4 所示的整定结果, 可以得到: ①设置权重为 $\alpha=0.4$ $\beta=0.1$ $\gamma=0.4$ $\lambda=0.1$, 主要是以保护设备时间和灵敏度的准确配合为目标, 通过优化可得表 1 所示的定值, 并计算得到表 2 所示各故障下保护设备的动作时间和灵敏度, 可以看出时间约束违背系数和灵敏度约束违背系数均为 0, 即保证了各条母线发生三相短路故障时 IDMTL OC 都能正确动作;

表 1 计算结果 ($\alpha=0.4$ $\beta=0.1$ $\gamma=0.4$ $\lambda=0.1$)

定值	R02-04 I	R02-04 II	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	R01-03 II
TM	0.01	0.01	0.18	0.13	0.22	0.22	0.19	0.03	0.01
CSM	0.86	0.86	0.36	0.71	1.06	1.06	1.50	1.33	0.98

表 2 动作时间 (T_{op} , 单位:s) 和灵敏度 (K_{lm}) ($\alpha=0.4$ $\beta=0.1$ $\gamma=0.4$ $\lambda=0.1$)

故障点	项目	R02-04 I	R02-04 II	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	R01-03 II
BUS01	T_{op}	-	-	1.06	1.01	0.72	0.72	1.50	-	-
	K_{lm}	-	-	3.31	2.48	8.39	8.39	2.36	-	-
BUS02	T_{op}	-	-	0.48	0.39	1.02	1.02	0.91	-	-
	K_{lm}	-	-	13.60	10.20	4.54	4.54	4.11	-	-
BUS03	T_{op}	-	-	1.40	1.47	0.83	0.83	2.24	0.09	0.02
	K_{lm}	-	-	2.50	1.87	6.33	6.33	1.78	8.83	11.39
BUS04	T_{op}	0.03	0.03	0.53	0.43	1.19	1.19	1.07	-	-
	K_{lm}	12.99	12.99	11.01	8.26	3.67	3.67	3.33	-	-

表 3 计算结果 ($\alpha=0.1$ $\beta=0.3$ $\gamma=0.1$ $\lambda=0.5$)

定值	R02-04 I	R02-04 II	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	R01-03 II
TM	0.01	0.01	0.02	0.04	0.12	0.12	0.07	0.01	0.01
CSM	1.22	1.22	0.57	0.77	0.98	0.98	1.72	1.03	1.14

表 4 动作时间 (T_{op} , 单位:s) 和灵敏度 (K_{lm}) ($\alpha=0.1$ $\beta=0.3$ $\gamma=0.1$ $\lambda=0.5$)

故障点	项目	R02-04 I	R02-04 II	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	R01-03 II
BUS01	T_{op}	-	-	0.17	0.29	0.37	0.37	0.69	-	-
	K_{lm}	-	-	2.05	2.29	9.10	9.10	2.05	-	-
BUS02	T_{op}	-	-	0.06	0.11	0.51	0.51	0.39	-	-
	K_{lm}	-	-	8.43	9.42	4.92	4.92	3.58	-	-
BUS03	T_{op}	-	-	0.28	0.44	0.42	0.42	1.15	0.02	0.01
	K_{lm}	-	-	1.55	1.73	6.87	6.87	1.55	11.43	9.75
BUS04	T_{op}	0.02	0.02	0.06	0.12	0.59	0.59	0.47	-	-
	K_{lm}	9.12	9.12	6.82	7.62	3.99	3.99	2.89	-	-

表5 过渡运行方式下各保护的動作时间(单位:s)和灵敏度

项目	R02-04 I	R02-04 II	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	约束违背
T_{op}	-	-	1.82	2.22	0.94	0.94	3.55	0.07	0
K_{lm}	-	-	2.02	1.52	5.12	5.12	1.44	13.94	0

表6 网络结构改变情况下的各保動作时间

项目	R01-02 I	R01-02 II	R05-01 I	R05-01 II	R05-02	R01-03 I	R01-03 II	约束违背
T^-	1.40	1.47	0.83	0.83	2.24	0.09	0.02	0
T^+	1.82	2.22	0.94	0.94	3.55	0.07	-	0
T_a	1.81	2.21	0.94	0.94	3.53	0.08	-	0

②而设置权重为 $\alpha=0.1$ $\beta=0.3$ $\gamma=0.1$ $\lambda=0.5$,主要是考虑缩短保护動作时间和配合时间差,以尽快切除故障,由表4所示,保护動作时间和配合时间差均较权重(1)情况有一定缩短,且保证了灵敏度的正确配合,但在BUS03和BUS04故障时,某些配合对的動作时间差达不到0.4s的要求。

2.4 定值校验

在图1所示算例系统的各保护模型中设置表1所示的整定值,并设置母线BUS03三相永久性短路故障进行定值校验,故障开始时间为0.2s,可得到如图2所示各保护流过的电流波形。

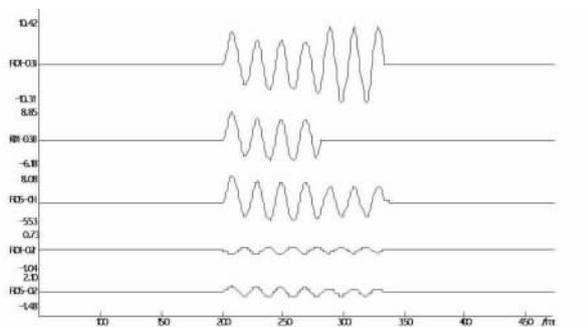


图2 各保护处的电流波形

从图2可以看出,故障发生后,流过各保护的电流均突然增大,保护R01-03 II延时最短(如表2所示),经断路器延时后于0.272ms切断线路LINE01-03 II,系统结构演变为图3所示的过渡运行方式。与LINE01-03 II平行的LINE01-03 I电流增大,而系统中其他线路电流均有所减小,从而使保护R01-03 I加速动作,切断故障母线BUS03,此后各线路电流恢复正常,其IDMTL OC保护由于未达到延时时间返回。

由仿真过程中可以看出,各保护中流过的电流由于网络结构改变而重新分配,在定值校验中应予以考虑。设保护装置在网络结构改变前流过的故障电流和延时时间分别为 I^- 和 $T^-(I^-)$,动作后故障电流和延时时间分别为 I^+ 和 $T^+(I^+)$,忽略暂态过程,根据

式(12)可得

$$\int_0^{T_c} \frac{1}{T^-(I^-)} dt + \int_{T_c}^{T_a} \frac{1}{T^+(I^+)} dt = 1 \quad (13)$$

其中 T_c 和 T_a 表示网络结构改变时间和保护实际延时时间,变换式(13)得

$$T_a = T^+ - T_c + T_c \frac{T^+}{T^-} \quad (14)$$

式(14)即为在IDMTL OC保护中故障电流改变时的延时时间计算公式。表5为在图3所示过渡运行方式下各保护的動作时间和灵敏度及其约束违背数,表6为网络结构发生改变时各保护動作时间及其约束违背数,可见,在两种情况下时间级差和灵敏度都可准确配合,满足选择、灵敏、可靠和快速性要求,协调配合的目标函数值可作为整定值评价的指标。

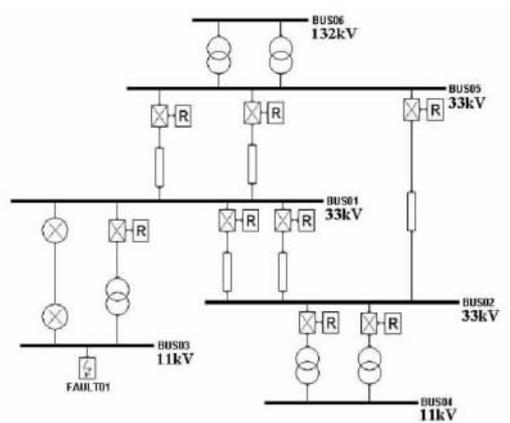


图3 过渡运行方式

3 结 语

(1) 提出了一种用于继电保护协调配合计算的时间灵敏度优化配合方法,该方法以时间级差约束违背数、故障持续时间、灵敏度约束违背数和配合对動作时间差与时间级差之差的加权和作为保护系统协调配合的优化目标,并采用速度跟踪粒子群算法对其进行优化计算。

(2) 以一个配电网反时限过流保护配合为算例

进行了计算和分析,其结果表明TSOC方法可根据系统特点和整定需要方便、量化地对继电保护性能选择进行适当折衷,具有很好的实用性和有效性;其目标函数值也可作为整定值评价的指标。

参考文献

- [1] IEEE PSRC Workin Group. Computer Aided Coordination of Line Protection Schemes [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991, 6(2): 575 - 583.
- [2] Lee S J, Yoon S H, Yoon M C, et al. An Expert System for Protective Relay Setting of Transmission Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 15(2): 1202 - 1208.
- [3] Bijoy C. An On - line Relay Coordination Algorithm for Adaptive Protection Using Linear Programming Technique [J]. IEEE Trans. On PWRD, 1996, 11(1): 165 - 171.
- [4] Urdaneta A J, et al. Coordination of Directional Overcurrent Relay Timing Using Linear Programming [J]. IEEE Trans. On PWRD, 1996, 11(1): 122 - 129.
- [5] So C W. Intelligent Protection Coordination System [D]. The Hong Kong Polytechnic University, 2001.
- [6] So C W, Li K K, Li K T, et al. Application of Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination [C]. IEE 6th International Conference on Developments in Power System Protection, UK, Nottingham, 1997.
- [7] So C W, Li K K. Time Coordination Method for Power System Protection by Evolutionary Algorithm [C]. IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Arizona, Phoenix, 1999.
- [8] So C W, Li K K. Overcurrent Relay Coordination by Evolutionary Programming [J]. International Journal of Electric Power System Research, 2000, 53(2): 83 - 90.
- [9] So C W, Li K K. Protection Relay Coordination on Ring - fed Distribution Network with Distributed Generations [C]. Proceedings of IEEE TENCON'02, Beijing, China, 2002.
- [10] So C W, Li K K. Intelligent Method for Protection Coordination [C]. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), Hong Kong, 2004.
- [11] So C W, Li K K. The Influence of Time Coordination Method on Supply Reliability [C]. Conference Record of Industry Applications Conference, 2000.
- [12] 杜新伟, 刘涤尘, 李媛. 基于新型小波神经网络的电力故障回放技术 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 84 - 88.
- [13] 杜新伟, 刘涤尘, 袁荣湘, 等. 虚拟继电保护柔性建模仿真系统的研究 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 55 - 60.

(收稿日期:2011-09-20)

《四川电力技术》投稿须知

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

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按GB 7713-1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过6000字(包括图表所占篇幅)为宜。

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

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

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

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

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

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

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

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

来稿请寄:四川省成都市青华路24号《四川电力技术》编辑部收

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

模块化多电平储能单元改善并网风电场稳定性研究

张振华¹, 冯涛²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 由于风能的随机性, 风电场存在输出功率和连接点电压波动的问题, 为提高风电并网稳定性, 提出一种基于模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑和超级电容结合的储能单元结构。利用拟合函数建立风机数学模型, 分析了基于异步发电机风电系统的运行特性; 利用逆系统方法将 MMC 变流器等效电路模型进行线性解耦, 对于解耦后子系统设计了以平滑有功功率和稳定接入点电压为目标的控制器。在 Matlab/Simulink 中搭建了在随机风波动时的仿真模型。仿真结果表明, 基于 MMC 和超级电容的储能单元具有快速的有功和无功补偿能力, 电网吸收的有功功率维持恒定, 接入点电压稳定在额定值, 从而降低了风速变化对电网的冲击, 提高了风电并网的稳定性。

关键词: 风力发电; 模块化多电平变流器; 超级电容; 储能单元; 逆系统方法

Abstract: The randomness of wind energy leads to the problem of fluctuation for both wind power and voltage. In order to enhance the stability of a grid-connected wind farm, a kind of energy storage unit based on modular multilevel converter (MMC) and super capacitor is presented. After establishing the mathematical model of wind turbine, the operation characteristics of wind power based on induction generator are analyzed. Inverse system method is developed to decouple the modular multilevel converter model and design the controllers for smoothing the output active power and stabilizing the voltage of the connected point. A simulation model is established with Matlab/Simulink. The simulation results show that the energy storage unit can rapidly compensate active power and reactive power of wind power. The power absorbed by the grid maintains constant and the voltage is kept at the setting value, which greatly enhances the power quality and the stability of wind power grid integration.

Key words: wind power; modular multilevel converter; super capacitor; energy storage unit; inverse system method

中图分类号: TK83 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0006-03

0 引言

随着风电的大规模发展, 其在电网中所占比重越来越大。由于风具有间歇性, 风电机组输出稳定性差, 影响电网电能质量, 甚至可能危及电网的稳定运行, 因此需研究风电运行特点并提高并网运行的稳定性。常见的解决方法是利用储能装置来抑制功率的波动^[1-5]。超级电容由于具有大功率密度、材料无污染和循环使用等优点, 成为了一种较理想的储能载体, 得到广泛研究^[6-8]。选择超级电容作为储能元件, 将其和模块化多电平变流器相结合, 作为功率调节单元, 对风电机组进行功率补偿。选择模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC), 是由于它模块化的设计能灵活地适应各种电压等级和容量要求, 同时输出多电平能有效改善电压波形, 降低谐波污染^[9]。

在给出储能单元结构和风机模型后, 在对变流器

进行功率解耦的基础上, 设计抑制风电输出功率波动和连接点电压波动的控制策略, 仿真结果证明了该策略的有效性。

1 基于 MMC 储能单元的并网风电系统

储能单元与风电结合的系统如图 1 所示。

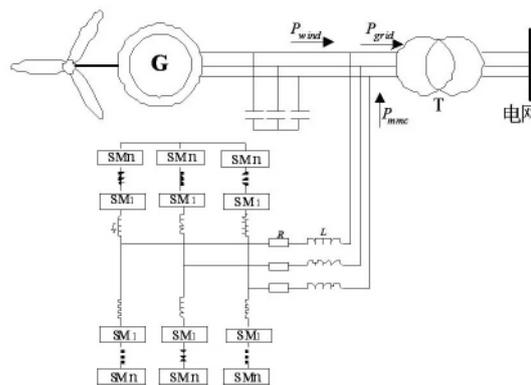


图 1 储能单元连接风电系统

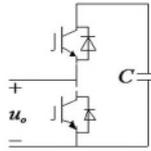


图2 子模块

图1中风电机组采用异步发电机组,并联电容器组是为异步电机的启动和运行提供一定的无功支撑。基于MMC和超级电容的储能单元并联接入低压母线侧。 P_{wind} 为风电系统输出功率, P_{mmc} 为储能单元输出功率, P_{grid} 为电网吸收的功率。

对于风机,当设定 V 为风速, R 为风轮半径, ρ 为空气密度, β 为桨距角, ω 为风轮转速时,其模型按照式(1)建立^[7]。

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V^3 \quad (1)$$

$$C_p = 0.22(116/\alpha - 0.4\beta - 5) \exp(-12.5/\alpha) \quad (2)$$

$$\alpha = 1/(1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1)) \quad (3)$$

其中,叶尖速比 $\lambda = \omega R/V$;功率系数 C_p 是反映风力机效率的重要参数,它是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的非线性函数,拟合函数为式(2)、(3)所示,这里采用定桨距角风力机(β 一定)。

MMC每相有上下两个桥臂,每个桥臂由多子模块级联而成。每个子模块由两个开关器件和一个电容组成,如图2所示,由于需要储能,子模块中的电容选择为超级电容。MMC每时刻每相上下同时投入模块数目之和相同,电抗 L_s 是为了抑制相间环流。MMC储能单元的功率调节作用是通过每个子模块中超级电容的充放电来完成的。当风速高的时候,对超级电容充电,将一部分能量储存在MMC储能单元中;当风速低的时候,MMC储能单元通过电容放电,释放能量,从而保证风电送入电网的功率平滑。在实际运行时,超级电容是在满足耐压时在一定范围进行充放电,既保证有功功率吞吐的能力,又能保证超级电容的安全长期运行。

2 储能单元的控制策略

储能单元能量存储在级联子模块的超级电容中,需要通过MMC变流器来进行吸收和释放这种转换,故需研究MMC变流器的模型。当取母线电压矢量为参考矢量,且 d 轴与它始终重合时,在图1所示参考方向时,得到 dq 旋转坐标系下数学模型。

$$\begin{cases} u_d - e_d = (Lp + R) i_d - \omega L i_q \\ u_q - e_q = \omega L i_d + (Lp + R) i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_d, u_q 为MMC逆变电压的 dq 分量; e_d, e_q 为电网电压的 dq 分量; i_d, i_q 为储能单元注入并联节点电流的 dq 分量; p 为微分算子。

电抗 L 是MMC储能单元和电网交换能量的纽带,也起到滤波的作用,但同时造成了功率的耦合。为保证储能单元能够快速调节功率,利用逆系统方法,对上述系统进行解耦^[10,11]。为便于描述,将上式写成状态变量表达式。

$$\begin{cases} u_1 - e_d = (Lp + R) x_1 - \omega L x_2 \\ u_2 - e_q = \omega L x_1 + (Lp + R) x_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中,取 $[x_1, x_2] = [i_d, i_q]$, $[u_1, u_2] = [u_d, u_q]$, $[y_1, y_2] = [i_d, i_q]$ 。

式(5)表征的是一个非线性的受控对象,可以构造该对象的逆系统,通过与原系统串联将其改造为具有线性传递关系的伪线性系统,从而利用线性系统原理设计控制器。先对输出变量求取一阶导数得

$$\begin{cases} py_1 = px_1 = (u_1 - Rx_1 + \omega Lx_2 - e_d) / L \\ py_2 = px_2 = (u_2 - \omega Lx_1 - Rx_2 - e_q) / L \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中已经显含输入变量,故不需要进一步对输出变量求导,可解得逆系统模型。

$$\begin{cases} u_1 = Lpy_1 + Rx_1 - \omega Lx_2 + e_d \\ u_2 = Lpy_2 + \omega Lx_1 + Rx_2 + e_q \end{cases} \quad (7)$$

对于式(7)逆系统,设定其输入变量 $[v_1, v_2] = [py_1, py_2]$,输出变量为 $[u_1, u_2]$ 。这样将式(7)逆系统和式(5)原系统串联,两者构成如图3所示的伪线性复合系统,使得原来耦合的系统等价于两个一阶积分的线性子系统,如图4所示。

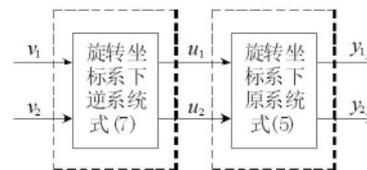


图3 逆系统与原系统串联

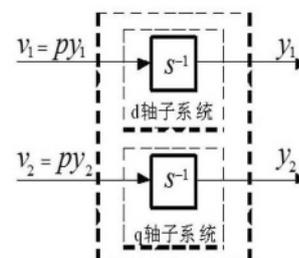


图4 解耦系统

为对图4伪线性系统设计控制器,先对储能单元的控制目标进行研究。对于异步电机而言,其输出有功和吸收的无功随风速的大小波动,而无功的波动又会导致节点电压的波动,为保证风电系统输出的稳定性,储能单元需同时具有有功和无功功率的补偿能力。考虑到实际风电场风机的分散性,为便于集中控制,储能单元并联于风电场出口侧低压母线,故设定储能单元的调节目标是平滑电网吸收的有功功率和稳定风电低压母线的节点电压。图5所示为系统的控制框图。外环控制结构如图5所示,其中 V_{mref} 为电网额定相电压的幅值,它与节点电压的实际幅值作差,通过PI控制器得到内环无功电流的指令值 i_{qref} ; P_{ref} 为电网吸收有功的指令值,一般选取为一定时间内预测风速的平均值对应的风电有功出力,它与 P_{grid} 作差并通过PI控制器得到内环有功电流指令值 I_{dref} ,而为提高有功控制的响应速度,在其中叠加了前馈控制环节得到的有功电流预估值。在得到 i_{dref} 、 i_{qref} 后,对于MMC变流器而言,其控制目标是要实现上述补偿电流指令值的快速跟踪,以完成有功和无功功率的补偿,故逆系统的输入变量 v_1 、 v_2 应为指令值和实际值的误差,即 $i_{dref} - i_d$ 、 $i_{qref} - i_q$,同时为确保消除误差,引入PI控制器,故最终控制结构如图5。

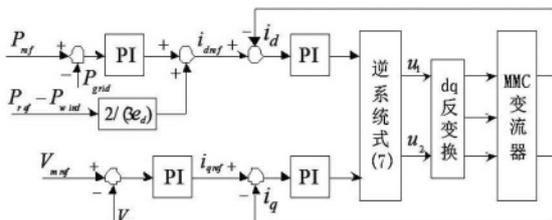


图5 整体控制框图

对于MMC变流器,要求正常工作时各子模块电容电压能均衡,这里利用文献[12]的调制策略和文献[9]的均压策略。

3 算例仿真

在Matlab/Simulink中搭建仿真模型。对于风电机组,采用电容器组对其按有功功率的15%进行无功补偿。风电场采用定桨距恒速风力发电机组,将风电场内机组等值为一台额定输出功率10MW的风电机组,输出电压为3.3kV/50Hz。然后通过升压变压器,经线路接入35kV电网。对于MMC储能单元,设定每相有40个子模块,即每个桥臂有20个,每个子模块中电容可由超级电容组构成,等效电容值为2F,耐压为500V,设定其初始电压为350V,工作电压

范围为300~450V。限流电抗 $L_s = 4$ mH,连接电抗 $L_s = 5.5$ mH,等效电阻 $R = 0.25 \Omega$ 。

仿真中取一定时间内风速信号的平均值作为风速预测值来确定储能单元有功功率的指令值,图6为5s内风速变化情况,图7为风电场输出有功功率和电网吸收有功功率的对比,图8为加入储能单元后风电并网接入点电压波形的标么值,图9为MMC储能单元子模块电容电压。

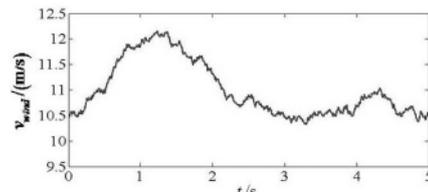


图6 短时间内风速变化情况

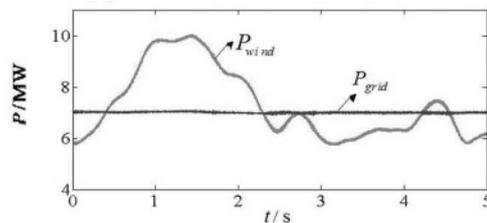


图7 储能单元对风电出力的平滑效果对比

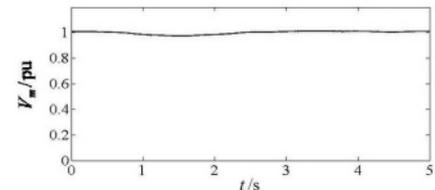


图8 公共连接点的电压标么值

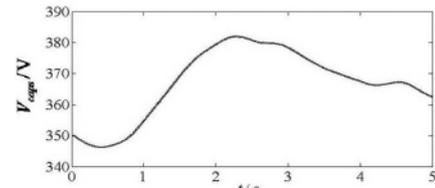


图9 储能单元子模块的电容电压

从储能单元并接入风电后仿真波形看出,当风速变化时,风电机组输出的有功功率也会跟随风速波动,但由于系统惯性的影响,有功功率的变化稍滞后于风速的变化;同时由风机模型知有功功率与风速的三次方成正比,当风速在不大的范围变化时,有功功率的波动会较大,图示在6MW到10MW之间,而这时根据预测风速平均值设定的有功功率指令值为7MW,故要求储能单元具有足够的功率吞吐容量;而风速波动的随机性要求储能单元能够快速地进行有功调节。图示电网吸收有功功率能稳定在设定值7MW,表明储能单元具有快速平滑风电输出的能力。在储

(下转第53页)

4 结 论

介绍了东西关电厂黑启动方案的理论依据和实施过程,并且分析了不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣,为运行人员选择黑启动电源提供了理论依据。运用PSCAD对黑启动过程中的发电机带空载长线的过电压进行了仿真,仿真验证了黑启动方案的可行性。最后通过黑启动试验的成功,说明东西关电厂可以作为南充遂宁电网的黑启动电源点。

参考文献

[1] 熊惠敏,房鑫炎,郁惟慵,等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.

[2] 陈湘君. 广州蓄能水电厂作为广东电网黑启动电源的可行性方案[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 42-44.

[3] 鲁丽娟. 实现电力系统黑启动的基本条件[J]. 电力安

(上接第8页)

能单元调节有功功率时,各子模块超级电容电压在充放电过程中也能保持均衡。图示风电接入点电压标么值能稳定在1附近,说明储能单元也具有快速的无功补偿能力,能满足有功功率波动时对无功功率的需求。储能单元可以实现有功和无功的快速综合补偿,从而大大降低风速波动对电网稳定性的冲击,也有利于风电机组自身的平稳运行。

4 结 论

对于采用异步电机的风电系统,在风速变化时,其输出有功功率会波动,导致吸收的无功功率发生变化,连接点的电压也随之改变,故储能单元需要具有有功和无功的综合补偿能力。超级电容具有大功率密度,能够循环使用,故成为一种合适的储能载体,而MMC作为一种模块化级联拓扑,其多电平电压输出不会对电网电能质量造成影响,将两者结合作为储能单元,仿真表明,其对风电系统具有灵活快速的功率调节能力,能平滑风电机组有功输出,稳定接入点交流电压,较大幅度提高了风电场并网运行稳定性。

参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

全技术, 2009, 11(12): 54-58.

[4] 李苏宁. 黑启动试验时发电机组运行方式的配置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 104-107.

[5] 于永海,许健. 水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[6] 程刚. 葛洲坝二江电厂机组黑启动实践与分析[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 42-46.

[7] 沙锡林,陈新方,游赞培,等. 贯流式水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[8] T. Nagata, H. Sasaki. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 2(17): 457-462.

[9] C. Y. Teo, W. Shen. Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 2(15): 646-653.

[10] S. Lee, S. Lim and B. Ahn. Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-criteria[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 3(13): 1156-1163.

(收稿日期:2011-09-15)

[3] 张占奎,王德意,迟永宁,等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42, 47.

[4] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(3): 5-8.

[5] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.

[6] Laxman Maharjan, Shigenori Inoue, Hirofumi Akagi. A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter with Star Configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.

[7] 郭学英,金晓林. 基于超级电容器的风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电工电气, 2010(10): 1-5.

[8] 侯世英,房勇,曾建兴,等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.

[9] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.

[10] 刘陆洲,肖建,王嵩. 感应电机的新型神经网络广义逆系统解耦控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(z1): 72-77.

[11] 黄崇鑫,王奔,邹超,等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 52-55, 70.

[12] 屠卿瑞,徐政,姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.

(收稿日期:2011-09-30)

基于线性和非线性混合预测的改进连续潮流法

李 林 康积涛

(西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031)

摘 要:提出了一种改进的连续潮流法求取电力系统的 PV 曲线。该方法采用线性和非线性的混合预测,解决了常规非线性预测在 PV 曲线下半支的问题,有效地改善了连续潮流法的性能。采用自动变步长提高了程序的效率。该方法应用于 IEEE 39 节点测试系统,取得理想的效果,从而验证了该方法的有效性和快速性。

关键词:电压稳定;连续潮流;PV 曲线;非线性预测

Abstract: An improved continuation power flow method is proposed to trace the PV curve of power systems. This method with linear and nonlinear hybrid predictor solves the conventional nonlinear prediction in the second half of the branch of PV curve, which improves the performance of continuation power flow method effectively. Automatic variable-step size is used to improve the efficiency of the program. The desired results are obtained with the proposed method applied to the IEEE 39 bus test systems, which demonstrates the validity and efficiency of the proposed method.

Key words: voltage stability; continuation power flow; PV curve; nonlinear prediction

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0009-03

连续潮流法是一种基于负荷的变化和发电机的功率分配而追踪电力系统静态行为的一种有效的工具^[1-4]。在电力系统静态电压稳定分析中,通常利用连续潮流法绘制 PV 曲线来反映负荷点的临界电压和极限功率。连续潮流法是通过引入负荷参数采用预估校正技术,在 PV 曲线的每一点反复迭代,计算出准确的潮流解,它主要由 4 部分组成:参数化、预测、校正和步长控制。参数化是避免在功率极限处潮流方程的雅各比矩阵奇异,文献[4]、[5]指出弧长参数化比局部参数化更具有鲁棒性;预测是为了找到一个潮流解的近似值,为下一步校正时解潮流方程提供一个初始值,预测值与实际值越接近,校正过程的迭代次数就越少。文献[6]通过对潮流方程的变换,摆脱了对负荷参数的依赖,改善了连续潮流法的收敛性,由于其预测环节仍要解线性方程组,降低了计算的效率;文献[7]采用非线性拉格朗日插值法预测,在 PV 曲线功率极限处可以采取较大步长,减少计算时间,但是在 PV 曲线下半支部分其预测解与实际解的接近程度不太理想。

为了提高计算效率,提出了基于线性和非线性混合预测的改进算法。该算法在 PV 曲线上半支和下半支的功率极限附近采用非线性预测,剩下部分采用割线预测。该方法在 IEEE 39 节点系统和其他方法作了比较,体现了其有效性和快速性。

1 连续潮流法说明

1.1 电力系统潮流方程

一般地,在静态输电计算中,极坐标系统下的潮流方程可用式(1)表示为

$$\begin{aligned} P_{Gi0}(1 + \lambda n_{Gi}) - P_{Li0}(1 + \lambda n_{PLi}) - P_i(V, \theta) &= 0 \\ G_{Gi0} - Q_{Li0}(1 + \lambda n_{QLi}) - Q_i(V, \theta) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 λ 表示发电机和负荷的增长参数,即为负荷因子; n_{Gi} 、 n_{PLi} 分别表示发电机和负荷有功、无功增长的方向向量; P_{Gi0} 、 Q_{Gi0} 为节点的发电机出力; P_{Li0} 、 Q_{Li0} 为节点 i 的负荷; $P_i(V, \theta)$ 、 $Q_i(V, \theta)$ 分别表示节点的有功和无功,其具体表达式如下。

$$\begin{aligned} P_i(V, \theta) &= V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i(V, \theta) &= V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, V_i 是节点的电压幅值; θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 的电压相角差值; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的网络导纳矩阵的实部和虚部。

1.2 非线性预测

非线性预测方法主要由一个多项式函数逼近 PV 曲线上已知解,当多项式函数确定后,对于一个给定的步长,下一个解则可以利用外推技术来预测。如图 1 所示,通过 3 个潮流实际解 1、2、3,利用非线性预测

得到预估解4。最常用的多项式逼近方法是拉格朗日插值法。

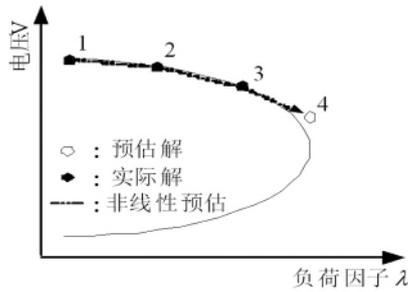


图1 非线性预测示意图

根据已知的实际潮流解,预估解就可以由拉格朗日多项式插值的多项式逼近获得。拉格朗日多项式可以由式(3)给出。

$$P(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) L_k(x) \quad (3)$$

其中 $P(x)$ 为拉格朗日插值多项式; x_k 为已知的潮流解; $L_k(x)$ 为拉格朗日插值系数; n 为多项式的阶数。若已知 $n+1$ 个点,则拉格朗日插值系数表示如下。

$$L_k(x) = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^n \frac{x - x_m}{x_k - x_m} \quad (4)$$

由于电力系统 PV 曲线近似二次函数,通常预估通过拉格朗日二次插值多项式获得^[7]。

给定一个弧长 s_{j+1} ,由式(3)能求出第 $j+1$ 步的预估值。例如,图1中已知3个潮流解 $(s_1, x(s_1))$ 、 $(s_2, x(s_2))$ 、 $(s_3, x(s_3))$,可以通过拉格朗日二次插值多项式来估计第4个潮流解 $(s_4, \hat{x}(s_4))$ 。取一个适当的步长 Δs ,则

$$s_4 = s_3 + \Delta s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(s_4) &= \sum_{k=0}^2 L_{j-k}(s) x(s_{j-k}) = \frac{(s_4 - s_2)(s_4 - s_1)}{(s_3 - s_2)(s_3 - s_1)} x(s_3) \\ &+ \frac{(s_4 - s_1)(s_4 - s_3)}{(s_2 - s_1)(s_2 - s_3)} x(s_2) + \frac{(s_4 - s_2)(s_4 - s_3)}{(s_1 - s_2)(s_1 - s_3)} x(s_1) \end{aligned} \quad (6)$$

1.3 已有的非线性预测算法说明

采用拉格朗日非线性方法预测,在 PV 曲线功率极限处可以采用较大的步长加快计算速率,然而研究表明非线性预测对于 PV 曲线的下半支部分并不是有效,因为非线性应用的是弧长与状态变量的关系。如图2所示,可观察出曲线是关于A点对称的,而实际系统中很多节点的电压幅值与 PV 曲线下半支弧长的关系不同于与上半支弧长的关系。

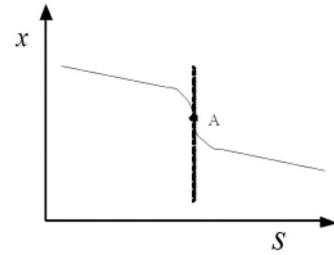


图2 弧长和状态变量的关系图

2 改进的连续潮流法

针对以前方法的不足做了如下改进:把 PV 曲线分为两个区域,如图3所示。区域I为 PV 曲线上半支和下半支的功率极限附近,由于非线性预测具有较好的鲁棒性和非线性,并且弧长与 PV 曲线的上半支有近似二次函数的关系,因此采用二阶拉格朗日插值法预测具有较高的精度和速度。区域II为 PV 曲线剩下部分,利用割线法预估,避免了第2.3中说明的非线性预测的问题。区域I向区域II过渡时,由阈值 β 控制。当在曲线下半支 $|\Delta x / \Delta \lambda| \leq \beta$ 时,区域I向区域II过渡。

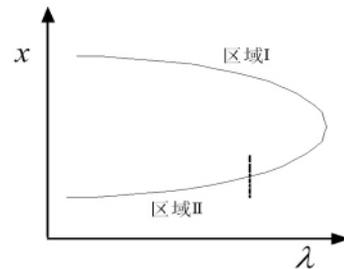


图3 PV 曲线区域图

步长控制是连续潮流法中的一个关键环节,步长过小将造成预估校正步数太多,步长过大将使得校正过程收敛缓慢甚至发散。理想的情况下是,步长应该随着曲线的曲率大小进行自适应调节:潮流解曲线在曲率小的部分,即平坦部分采用较大的步长,在曲率大的部分采用较小的步长。这里利用曲线上紧挨着的两点 (x^j, λ^j) 和 (x^{j-1}, λ^{j-1}) 来控制步长,其表达式为

$$h = a \times e^{(-b \times MAX)} \quad (7)$$

式中 $MAX = \max(|V^j - V^{j-1}|)$,其中 V 为状态变量中 x 节点电压的幅值; a 、 b 是系数。从式(7)中可以看出,曲线在曲率小的部分,电压幅值变化较大,此时步长取值较小;在曲率大的部分,电压幅值变化较小,步长取值较大,这样步长的大小就根据曲线曲率的大小自动变化。

3 算例分析

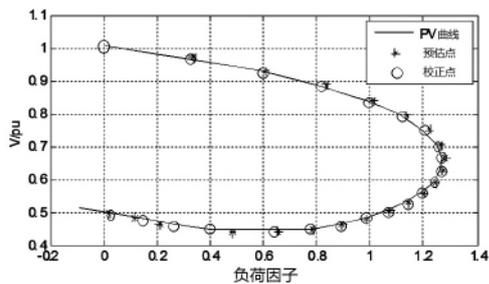
用 IEEE 39 节点测试系统对改进的连续潮流法进行了效率评估。所有仿真没有考虑发电机无功限制,所有的负荷和发电机的有功和无功按同一比例增长,负荷为恒功率模型,并且保持功率因数不变。

为了方便,把方法定义如下。

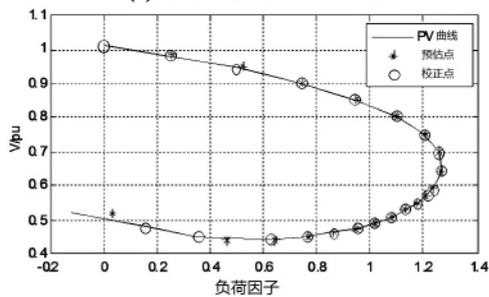
方法 A: 切线法;

方法 B: 非线性法;

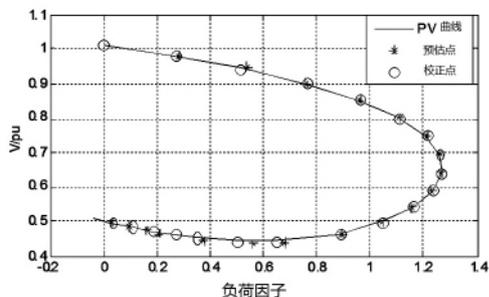
方法 C: 改进方法,步长控制采用式(7),在区域 I 中采用非线性拉格朗日插值法时,式中 a, b 分别取 0.5 和 2.5;在区域 II 中采用割线法时,式中 a, b 分别取 0.4 和 3;区域 I 向区域 II 过渡时的阈值 β 取 1.12。



(a)方法 A 绘制 PV 曲线



(b)方法 B 绘制 PV 曲线



(c)方法 C 绘制 PV 曲线

图 4 IEEE 39 节点母线 12 的 PV 曲线图

图 4 显示了 IEEE 39 节点系统在节点 31 的 PV 曲线,图中 (a)、(b)、(c) 分别表示用方法 A、B、C 绘制的 PV 曲线。从图中可以观察到,在 PV 曲线的功

率极限处 C 方法和 D 方法所得的预估点与相应的校正点非常接近,说明利用非线性预测曲线曲率大的部分具有很好的鲁棒性。

表 1 比较了 A、B、C 3 种方法 CPU 的计算时间,其中 R_A, R_B 分别表示了其他方法相对于 A、B 方法 CPU 计算时间的比率。从表中可以看出方法 C 相对于方法 A、B 分别减少了 CPU 时间的 35.7%、6.5%。图 5 显示了绘制曲线每步所需要的迭代次数,从图中可以看出 A、B、C 3 种方法绘制曲线的步数分别为 22、21、20 步;采用了非线性预测法的 B、C 方法在曲线极限功率处的迭代次数最多达 3 次,在曲线的下半支仍采用 B 方法导致迭代次数增加,达到了 5 次,这就是由于曲线在下半支的弧长与状态变量的关系不同于上半支弧长与状态变量的关系。

表 1 IEEE 39 节点系统 CPU 时间比较

方法	CPU 时间/s	R_A	R_B
A	1.066	1.000	1.470
B	0.725	0.680	1.000
C	0.685	0.643	0.945

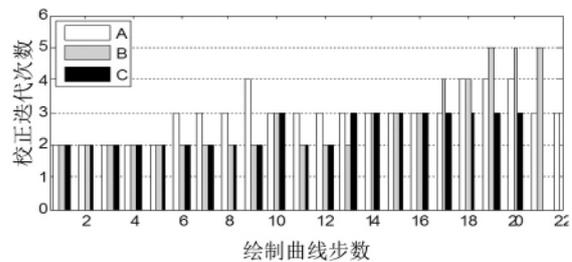


图 5 绘制曲线步数和校正迭代次数关系图

4 结论

对求解 PV 曲线的连续潮流法进行了改进。通过线性和非线性的混合预测,解决了常规非线性预测在 PV 曲线下半支的问题,有效地改善了连续潮流法的性能。采用自动变步长提高了程序的效率。通过 IEEE 39 节点测试系统的算例分析,表明了该方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] Okumura k., Terai k., Kishima A., Solution of Ill - conditioned Load Flow Equation by Homotopy Continuation method [J]. Circuits and Systems. IEEE International Symposium ,1991(5): 2897 - 2899.

[2] Ajarapu V., Christy C. The Continuation Power Flow: a

(下转第 38 页)

针对该问题发生的时间为2008年5月12日,并且该压降发生突变的前后,正好发生在5月12日14:28地震前后,因此,推测地震引起该超差现象。初步推断:地震导致TV二次回路中的某接点或线路松动、接触不良或受损,引起TV二次回路压降突然增大,超出规定范围。因此,首先对被监测TV二次回路的各个接点及线路进行排查,同时进行加固处理;经过对该TV二次回路所有接点进行加固处理后,被监测TV二次回路压降回复正常值,即,与发生突变前一致。经过上述现场排查,得出该故障情况的结论是:地震导致TV二次回路中的接点松动、接触不良或受损。现场处理后,线路回复正常。

4.2 应用实例2

截取了电能计量在线监测系统在110 kV龙台变电站在2008年5月12日13:26至2008年5月13日06:27的运行数据,如表2所示。该监测数据显示“5.12”地震期间,电能表12305553运行稳定、误差良好。

5 结 语

通过电能计量在线监测系统的实践应用,改善了目前存在对电能计量装置的检测手段落后、单一、整个二次回路的监测和故障检测困难、提高电能计量准确性及电量追补的科学性等问题;减少了电能计量外勤工作人员的大量现场校验工作,提高了工作效率;减少了变电站运行设备的停电检测时间;实现了电能

计量装置管理无纸化,提高了计量装置运行状况监测和维护管理水平,进一步保证电能计量装置的安全性、准确性、可靠性。

不过目前该电能计量在线监测系统在实际应用还存在不足,如系统单台设备监测容量偏小,可扩展(如可监测30条线路),以实现单台监测设备对厂站内的所有计量装置进行监测,提高系统适用性。目前,系统母线TV切换功能为手动切换,需人为辅助操作,该功能还有改进空间,应能实现系统自动识别、切换,达到真正的自动切换目的。

同时,随着智能电网的建设,网络化、数字化、智能化将是针对智能电网智能量测系统的计量装置的电能计量在线监测系统的发展趋势。

参考文献

- [1] DL/T 448-2000 电能计量装置技术管理规程 [S].
- [2] SD 109-1983 电能计量装置检验规程 [S].
- [3] 白洋. 电能计量装置远程校验监测系统 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(7): 30-32.
- [4] 鹿凯华, 赵斌. 关口电能计量装置误差的实时监测 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2008(4): 50-52.
- [5] 卢树峰. 关口电能计量装置的现状分析与思考 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(8): 21-23, 8.
- [6] 罗志坤, 滕马胜, 万全. 高压电能计量装置远程校验与监测系统及其应用 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(2): 172-175.

(收稿日期:2011-10-20)

(上接第11页)

- Tool for Steady State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [3] Canizares C. A., Alvarado F. L.. Point of Collapse and Continuation Methods for Large ac/dc Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
 - [4] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu. CP-FLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634
 - [5] S. H. Li, H. D. Chiang. Nonlinear Predictors and Hybrid

Corrector for Fast Continuation Power Flow [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2008, 2(3): 341-345.

- [6] 蔡伟程, 代静. 对求取电力系统PV曲线的连续潮流法的改进 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 82-85.
- [7] Mori H., Yamada S.. Continuation Power Flow with the Nonlinear Predictor of the Lagrange's Polynomial Interpolation Formula [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, 2: 1133-1138.

(收稿日期:2011-09-30)

搜寻者优化算法在含风电机组系统最优潮流中的应用

冯 跃,李明翔,黄彦全

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:针对风力发电机组并网后电力系统的最优潮流(OPF)问题,将搜寻者优化算法(SOA)应用到最优潮流计算模型之中。通过分析风力发电机的稳态数学模型,根据功率守恒原理,得到异步风电机组有功无功出力的表达式,考虑到风电机组的特点,将其作为电压静特性节点处理。建立综合系统经济性和安全性的最优潮流计算的目标函数,该目标函数由网损和静态电压稳定裕度两部分组成,并将搜寻者优化算法运用到最优潮流模型的求解中,并制定该算法的计算流程。算例表明,提出的模型和算法是可行的。

关键词:搜寻者优化算法;最优潮流;风电机组;PQ节点;网损;电压稳定裕度

Abstract: To obtain optimal power flow (OPF) of power system with wind turbine generator system, seeker optimization algorithm (SOA) is used for the solution. By analyzing the steady-state mathematical model of wind generator, the active power and reactive power expressions of asynchronous wind turbine generators are obtained according to power conservation principle. Wind turbine generators are treated as static joints in voltage because of their distinctive characteristics. Integrating with economy and security, the OPF optimization objective function is established, which consists of power loss and static voltage stability margin. SOA is adopted in solving this new OPF model in terms of the corresponding calculation process. The calculation result shows that the proposed model and algorithm are feasible.

Key words: seeker optimization algorithm; optimal power flow; wind turbine generator system; PQ node; power loss; voltage stability margin

中图分类号:TM744 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0012-04

随着中国能源结构的不断调整,风力发电装机容量逐步加大。风能具有随机性、间歇性和不可调度性的特点,这些特点决定了大型风电场并网后对电力系统的影响^[1-4]。最优潮流法广泛应用于电力生产中,对系统的经济效益和社会效益有重要影响^[5-6]。

含风电机组系统最优潮流(optimal power flow, OPF)计算的关键是如何正确建立异步风力发电机模型,将机组模型与系统最优潮流模型相结合。在稳态分析中,由于风力发电机的转差率变化不大,可近似认为转差率为一个常数,从而把风电机组视为一个PQ节点或建立PQ模型时考虑风电场对无功限制节点电压的影响^[7]。文献[8]反映了随着电力市场的发展和电网规模的扩大,电力市场的竞争机制,环保的制约以及电力企业追求电网经济效益的驱使,使电网运行在电压稳定裕度很低的工作点,带来电网电压可能失稳的安全隐患。因此,在最优潮流中考虑电压稳定约束十分必要。

在简化异步发电机稳态等效电路的基础上,提出一种基于搜寻者优化算法(seeker optimization algo-

rithm, SOA)的含风电机组静态最优潮流算法。假设不同风速下风机的机械功率与风力发电机电磁有功功率相等,同时以经济性和安全性为最优潮流优化目标,运用搜寻者优化算法对模型进行求解。并通过算例验证了该方法的有效性。

1 风电机组的稳态数学模型

目前风力发电机多为异步发电机,异步发电机在超同步速运行情况下以发电方式运行,发出有功功率的同时,需要吸收无功功率以建立磁场,其等效电路见图1^[9]。图1中, r_1 、 x_1 分别为定子绕组电阻和漏抗; r_2 、 x_2 分别为转子绕组电阻和漏抗; r_m 、 x_m 分别为励磁支路电阻和漏抗; s 为转差率。

由于 $x_m \geq x_1$,忽略定子电阻和铁心的功率损耗,将励磁支路移至电路首端,得到简化的异步风力发电机等值电路,如图2所示^[10]。

根据图2所示电路,可得到风电机组有功功率和无功功率的表达式为

$$P_e = - \frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (1)$$

$$Q_e = - \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m) s^2}{r_2 x_m s} P_e \quad (2)$$

式中 $x_k = x_1 + x_2$; U 为机端电压。

由式(1)、式(2)可见,发电机输出有功功率 P_e 和吸收无功功率 Q_e 与机端电压 U 、转差率 s 有关。

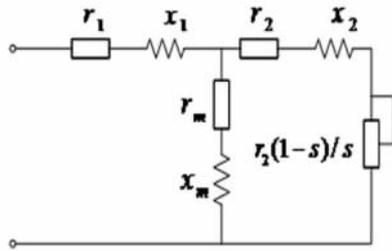


图1 异步风力发电机等效电路

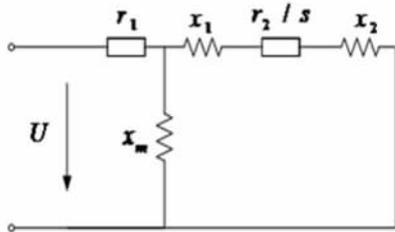


图2 异步风力发电机简化模型

风机的原动力是不可控的,其发电状态及出力大小取决于风速状况。风电机组的输出机械功率与其轮毂高度处的风速之间的关系如下^[11]。

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ 0.5AC_p \rho v^3 & v_i \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_o \end{cases} \quad (3)$$

式中 A 为扫风面积; C_p 为效率系数; ρ 为空气密度; v_i 为风机切入风速; v_o 为风机切出风速; v_r 为风机额定风速; P_r 为风机额定输出功率。

图3为风电机组输出功率与风速的关系曲线^[12]。从图3可知,风电机组有3种运行工况,即额定运行、停机、欠额定运行。

风速一定时,由式(3)可以确定风力发电机组输出的机械功率。忽略损耗,根据功率守恒原理,可设风机的机械功率与风电机组有功功率相等^[9]。

$$P_e = P \quad (4)$$

由式(3)和式(4)求得风力发电机有功功率,再由式(2)求得风力发电机的无功功率。

2 SOA 在含风电机组最优潮流中的应用

2.1 最优潮流数学模型的研究

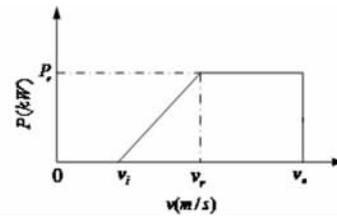


图3 风力机机械功率曲线

可以把最优潮流问题描述为:在电力系统有功潮流分布、系统结构参数及负荷状况给定情况下,以(平衡节点除外)发电机有功功率、发电机机端电压幅值和可调变压器分接头位置、无功补偿容量值等作为控制变量,以平衡节点有功功率、发电机无功出力、负荷节点电压幅值等作为状态变量,在满足约束条件的前提下,使系统的某一种或者几种性能指标(如系统总的发电成本、系统总的有功网损等)达到最优^[13]。

2.2 最优潮流综合优化目标函数

从经济性和安全性两个角度来衡量最优潮流计算的优劣,经济性体现在减小系统网损方面,安全性体现在改善系统静态电压稳定裕度方面。衡量系统静态电压稳定裕度的指标很多^[14],如潮流雅克比矩阵最小奇异值指标、负荷裕度指标、 L 指标等,这里选择雅克比矩阵最小奇异值指标来表征配电系统的静态电压稳定性。从而建立以有功网损最小、静态电压稳定裕度最大为目标函数的多目标最优潮流计算模型,使最优潮流优化结果达到同时提高系统运行经济性和电网电压稳定性的目的。

所采用的最优潮流数学模型为^[8]

$$\begin{cases} \min F(u, x) = [f_1(u, x) \quad f_2(u, x)] \\ s. t. \quad g(u, x) = 0 \\ h(u, x) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_1(u, x) = p_{loss} \quad (6)$$

$$f_2(u, x) = -\delta_{min} \quad (7)$$

式中 $p_{loss}(u, x) = \sum_{i, j \in NL} (P_{ij} + P_{ji})$, NL 为所有支路集合; $\delta_{min} = \min\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r\}$ 为收敛潮流的雅克比矩阵最小奇异值。

目标函数中包含 $f_1(u, x)$ 和 $f_2(u, x)$ 两个子目标,分别为系统有功网损和静态电压稳定裕度。该最优潮流模型中,由于子目标函数之间量纲不同,不能直接进行加权。为了使不同的子目标函数具有可比性,需要对目标函数进行如下归一化处理。

$$\begin{cases} f'_1(u, x) = \frac{p_{loss}}{P_o} \\ f'_2(u, x) = \frac{\delta_o}{\delta_{min}} \end{cases} \quad (8)$$

经过归一化处理的两个目标函数,经加权处理可转化为以下的单目标函数。

$$\min F(u, x) = w_1 f'_1(u, x) + w_2 f'_2(u, x) \quad (9)$$

式中 w_1 和 w_2 为权重,反映对电网运行经济性和电压稳定性的偏好,且 $w_1 + w_2 = 1$ 。

2.3 约束条件

进行最优潮流计算的约束条件如下^[15]。

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in N_i \quad (10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in N_{pq} \quad (11)$$

$$V_{G_{\min}} \leq V_G \leq V_{G_{\max}} \quad (12)$$

$$K_{L_{\min}} \leq K_L \leq K_{L_{\max}} \quad (13)$$

$$Q_{C_{\min}} \leq Q_C \leq Q_{C_{\max}} \quad (14)$$

$$V_{L_{\min}} \leq V_L \leq V_{L_{\max}} \quad (15)$$

$$Q_{G_{\min}} \leq Q_G \leq Q_{G_{\max}} \quad (16)$$

$$S_L \leq S_{L_{\max}} \quad (17)$$

式中 $x^T = [Q_C, V_G, K_L]$ 为控制变量,分别为无功补偿容量值、发电机机端电压幅值和可调变压器变比; $\mu^T = [P_{ref}, V_L, Q_G]$ 为状态变量,分别为平衡节点有功功率、负荷节点电压幅值、发电机无功出力; P_i 和 Q_i 为除平衡节点外各节点的注入有功、无功功率; V_i 为节点 i 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 为节点 i 到节点 j 的支路电导、电纳和电压相角差; N_i 为除平衡节点外所有节点集合; N_{pq} 为 PQ 节点集合; S_L 为支路通过的功率。

2.4 潮流计算中风电机组的处理

如前所述,将风电机组作为电压静特性节点(PQ节点)来处理。对应风电机组节点 m 的功率方程可以写为^[16]

$$\Delta P_m = P_m - V_m \sum_{j \in N_i} V_j (G_{mj} \cos \theta_{mj} + B_{mj} \sin \theta_{mj}) = 0 \quad (18)$$

$$\Delta Q_m = Q_m - V_m \sum_{j \in N_i} V_j (G_{mj} \sin \theta_{mj} - B_{mj} \cos \theta_{mj}) = 0 \quad (19)$$

式中 P_m 和 Q_m 为风电机组的有功和无功出力。

2.5 搜寻者优化算法

在 SOA 中^[15],搜索队伍是进化算法中的种群或智能群体,每个搜寻者就是种群内的个体或称为智能体,其在搜索空间所处的位置就是优化问题的一个解。假设所求的是最小化问题的解,第 i ($0 \leq i \leq D$) 个搜寻者的当前位置为 $\overline{x_i(k)} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM}]$,个体历史最佳位置为 $\overline{p_{i,best}}$ 和邻域历史最佳位置 $\overline{g_{i,best}}$ 。其中 D 为种群数, M 为搜索空间维数。邻域可以有多种定义,将种群按搜寻者的索引号平均分成

3 个子种群,属于同一子种群的所有搜寻者组成一个邻域。

SOA 求解含风电的最优潮流解的流程如下: ① 输入电网原始参数、SOA 算法参数、控制变量参数; ② 采用风电机组参数计算出不同风速下风电机组发出的有功功率和无功功率; ③ 初始化种群,设 $k=0, k_{\max}$; ④ 初始化在可行域随机产生 D 个初始位置 $\{\overline{x_i(k)} \mid \overline{x_i(k)} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM}], i=1, 2, \dots, D, k=0\}$,若 $k \leq k_{\max}$,继续下列步骤; ⑤ 计算每个位置的综合优化目标函数值、有功网损和电压稳定裕度,对种群个体作适应度评估; ⑥ 通过 SOA 中的搜索方向和步长公式,计算每一个个体 i 在每一维 j 的搜索方向和步长; ⑦ 根据 SOA 算法策略,更新每个搜寻者的位置; ⑧ $k=k+1$; ⑨ 如果满足停止条件($k > k_{\max}$),停止搜索;否则,返回第⑤步。

为实现子种群间的信息共享,在每次迭代中,处理完第⑤步后,进行子种群间的社会学习,即每个子群两个最差个体的当前位置替换成另外两个子群最佳个体的当前位置。

3 仿真结果与分析

这里采用如下算例,24 台风力发电机组成的风电机组通过升压变压器^[18]接入到 IEEE 30 节点标准测试系统的 26 节点处,技术参数如表 1 所示^[11],额定容量为 24×600 kW,机端额定电压为 690 V,切入风速、额定风速和切出风速分别为 5、8 和 22 m/s, Weibull 分布参数和分别为 8.5 和 2.0。风电机组地区空气密度为 1.2245 kg/m³,风机的扫掠面积为 1840 m²^[9],效率系数 C_p 取 0.593 ^[19]。SOA 的参数取:子种群数为 3,迭代次数 100,种群规模 24,独立试验次数 10,偏好因子分别为 0.7 和 0.3 ^[17]。

表 1 风电机组的电气参数

参数	x_1/Ω	x_2/Ω	r_2/Ω	x_m/Ω	s_N
数值	0.076 2	0.232 89	0.007 59	3.447 97	-0.004

表 2 表明:如果风电机组的转差率为常数,风电机组随着风速的增大,发出的有功功率和吸收的有功功率都在增加,电压的稳定裕度也在增大。

图 4 表明:随着风速的逐渐增大,系统有功网损总体趋势下降。图 5 表明:随着风速的逐渐增大,系统电压稳定裕度总体趋势上升。

表2 最优潮流运算结果

风速 (m/s)	风电机组 有功/MW	风电机组 无功/Mvar	26节点 电压/p. u.	网损 /MW	电压稳 定裕度
1~5	0.000 0	0.000 0	1.000 4	7.551 7	0.247 2
5.0	2.004 0	-1.459 2	1.009 1	7.302 5	0.248 8
5.5	2.666 4	-1.941 6	0.978 2	7.180 8	0.251 5
6.0	3.463 2	-2.520 0	0.938 3	6.920 0	0.253 2
6.5	4.404 0	-3.204 0	0.981 5	6.902 9	0.253 5
7.0	5.498 4	-4.003 2	0.974 6	6.872 6	0.259 5
7.5	6.763 2	-4.922 4	0.942 6	6.781 0	0.267 5
8.0	8.208 0	-5.973 6	0.950 5	6.706 7	0.269 8
8~22	14.400 0	-10.480 8	0.921 2	6.675 2	0.272 4

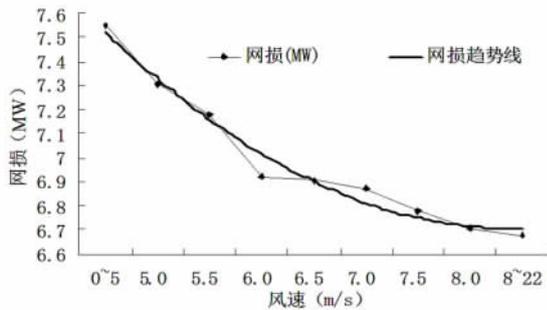


图4 不同风速下系统有功网损状况

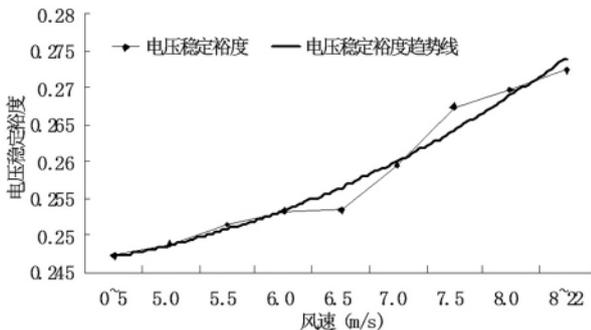


图5 不同风速下系统电压稳定裕度状况

从而说明风电机组额定运行有利于系统潮流优化, 有功网损的减少和电压稳定裕度的增大。

4 结 论

根据前面的分析和算例结果表明: ①根据异步风力发电机的特性,对风电机组做了简化处理,从而简化了含风电机组系统最优潮流计算; ②将搜寻者优化算法运用到含风电机组的系统最优潮流计算之中,算例证明了所采用的模型和方法是可行的。

参考文献

[1] 施鹏飞. 风力发电的进展和趋势[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 86-90.
 [2] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电

场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
 [3] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.
 [4] WU Xue-guang, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Application of Models of the Wind Energy Conversion System to Wind Power Dynamic Analysis [C]///International Conference on Power System Technology, 1998: 1406-1411.
 [5] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.
 [6] 余娟, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 146-151.
 [7] CHEN Z, SPOONER E. Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 148-154.
 [8] 张倩. 搜寻者优化算法在电力系统最优潮流中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
 [9] 顾承红, 艾芊. 基于改进内点法的含风电场的系统最优潮流计算[J]. 中国电力, 2007, 40(1): 89-93.
 [10] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
 [11] Andrés E, Feijóo, José Cidrás. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
 [12] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
 [13] 杨艳. 基于微分进化算法的电力系统最优潮流[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
 [14] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电力系统电压稳定性的研究现状[J]. 电网技术, 1995, 19(4): 20-24.
 [15] 陈维荣, 张倩, 王劲草, 等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 64-67.
 [16] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.
 [17] 姜素华. 现代电力系统优化模型及其相关算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
 [18] 刘长道. 鄱阳湖风电系统并网运行仿真分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
 [19] 吴红斌. 基于风力机特性的风电机组潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 22-25.

(收稿日期: 2011-08-30)

自贡电网无功补偿及其优化

刘代顺, 常建磊

(自贡供电局, 四川 自贡 643000)

摘要:近年来,随着电网容量的增加,对电网无功功率补偿的要求也日益明显。无功功率如同有功功率一样,是保证电力系统电能质量、降低电网损耗以及系统安全运行所不可缺少的重要组成部分。对四川自贡电网的无功补偿现状作简要分析,在分析电容器、调相机和各种静止补偿器的工作原理基础上比较其各自的优缺点。最后,针对当前无功补偿的薄弱环节——长线路补偿问题进行了定量分析。所做研究对无功功率平衡及补偿方式的优化对电力系统降损节能有一定的指导意义。

关键词:无功功率补偿;长线路;静止补偿器;优化

Abstract: With the rapid development of power grid recently, the needs for reactive power compensation also increase a lot. Like active power, the reactive power plays a key role in guaranteeing the power quality of power system, reducing the power loss in grid and ensuring the safety of whole power system. According to the brief analysis on reactive power compensation of Zigong Power Grid in Sichuan, the advantages and disadvantages of capacitors, rotary condensers and various static var compensators are given based on the analysis of their operating principles. Aiming at the weak points of reactive power compensation, namely compensation on long transmission line, a detailed analysis is given with pictures and tables. It is useful in reactive power equilibrium and compensation optimization, as well as in loss reduction and energy conservation.

Key words: reactive power compensation; long transmission line; static var compensator (SVC); optimization

中图分类号:TM451.2 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0016-03

近年来,由于电网容量的增加,电网无功功率的要求也日益明显。无功功率如同有功功率电源一样,是保证电力系统电能质量、降低电网损耗以及保障系统安全运行的重要因素。系统中无功功率不平衡,轻则导致系统电压下降,重则会导致设备损坏、系统解列^[1-2]。此外,系统的功率因数和电压降低,会使电气设备得不到充分利用,促使网络传输能力下降,损耗增加。因此,无功功率平衡对电力系统降损节能有着极其重要的意义。

电力系统中无功功率主要体现在两类电力系统元件上,即电力变压器和输电线路。变压器中的无功功率损耗可分为两个部分,即励磁支路损耗和绕组漏抗损耗。对单级变压器的网络而言,满载时约为它额定容量的百分之几。但在多电压等级网络中,变压器的无功功率相当可观。某五级变压网络(10/220 kV升压,220/110,110/35,35/10,10/0.4 kV降压)中变压器的损耗统计如表1。输电线路上的无功功率也包含两个部分,即并联电纳和串联电抗中的无功功率损耗。并联电纳中的无功呈容性,即是充电功率,与线路上的电压成正比。而串联电抗中这种损耗与复合

电流的平方成正比,呈感性。

表1 某五级变压网络中变压器损耗统计^[2]

变压器损耗	①	②
励磁支路损耗	7%	7%
绕组漏抗损耗	50%	12.50%
总损耗	57%	19.50%
变压器损耗/变压器负荷	57/100	39/100

①所有变压器都满载;②所有变压器都半载。

线路作为电力系统的一个元件究竟是消耗容性或感性的无功是不能肯定的。若按自然功率的概念,当输电线路功率大于自然功率时,线路消耗的感性无功;当输电线路功率小于自然功率时,线路消耗的容性无功。

1 四川自贡电网的无功补偿情况

截至2010年年底,自贡电网现有变电容量1906.5 MVA,主变压器52台。其中220 kV主变压器7台,主变压器总容量930 MVA;并联电容器容量为56.112 Mvar;110 kV主变压器26台,主变压器总容量968.5 MVA;110 kV电网容性装置配置容量76.6 Mvar;35

kV 主变压器 19 台,主变压器总容量为 108 MVA ,
35kV 电网容性装置配置容量 6.504 Mvar。

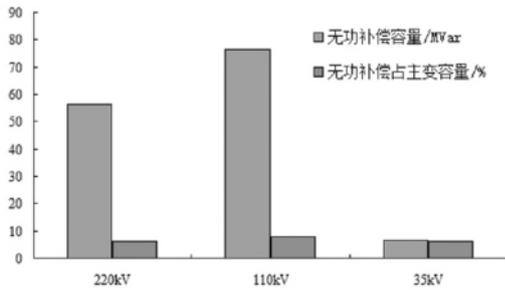


图1 自贡电网主变压器无功补偿统计

随着负荷快速增长,部分变电站高峰负荷时主变压器高压侧功率因数达不到 0.95,变电站无功补偿容量不足。无功补偿容量不足同样也导致电网电压控制困难,负荷中心无功平衡脆弱,特别是荣县地区负荷增长较快,无功不足更突出。向家岭电网不能实现无功分层就地平衡,电压降明显增大。

2 无功功率补偿的措施

电力系统中的有功功率主要集中在各类发电厂中的发电机。无功功率电源除发电机外,还有电容器、调相机和静止补偿器等,分散在各变电站(所)。供应有功功率和电能必须消耗能源,但无功功率电源一旦设置后,就可随时使用而不再有其他经常性费用。此外,系统中的无功功率损耗远大于有功功率损耗,且无功补偿措施需要是多种方法相结合。

2.1 发电机

正常运行状态下的发电机总受一定条件,如定子绕组温升、励磁绕组温升、原动机功率等的约束。这些约束条件决定了发电机组发出的有功功率和无功功率有一定的限额。

定子绕组温升决定了定子绕组电流,也就决定了发电机的视在功率。在发电机额定电压 U_N 下运行时,约束条件体现在其运行点不得超出以 O 点为圆心,以 OC 为半径的圆弧。励磁绕组温升决定了励磁绕组的电流,决定发电机的空载电动势,即空载电势不得大于 E_{qN} ,约束条件体现在其运行点不得超出以 O' 点为圆心,以 O'B 为半径的圆弧。原动机和定子端部温升约束条件分别体现在线段 BC 和 AB。发电机的运行范围即四边形 ABCD 内,产生的无功功率有限,大部分时间需要外部进行补偿。

2.2 电容器和调相机

并联电容器是常用的无功补偿措施,它只能向系

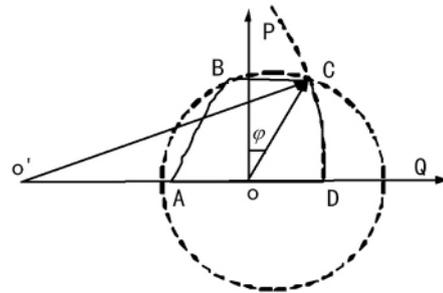


图2 发电机运行极限图^[2]

统提供感性无功功率,功率的大小与其端电压的平方成正比。调相机与发电机工作原理类似,但不同在于其相当于只能发无功功率的发电机。调相机发出的无功与励磁状态有关,过励磁运行时向系统供应感性无功功率;欠励磁时吸取感性无功功率。

2.3 静止补偿器和静止调相机

静止补偿器全称是静止无功功率补偿器(SVC),主要有 TCR 型、TSC 型和 SR 型。

TCR 型补偿器由多个不可控的电容器构成,如图 3(a) 所示,图中与电容串联的电感则与其构成串联谐振电路,兼作高次谐波的滤波器。TSC 型补偿器如图 3(b) 所示,其工作原理相对简单,仅以晶闸管开关取代了常规电容器的机械开关。图 3(c) 中 SR 型补偿器的滤波回路与 TCR 型相似,与饱和电抗器相串联的电容则用以校正饱和电抗器的伏安特性。

调相机、TCR 型和 SR 型补偿器可以发出感性和容性无功功率,而电容器和 TSC 型补偿器只能发出容性而不能发出感性无功。从控制方式和灵活性而言,调相机和 TCR 型补偿器较优。从反应速度看,三类静止补偿器则较优,其他方面详见表 2 所示。因此,选择无功补偿装置应综合考虑各特性,做到既经济又有效。

2.4 并联电抗器

对电力网络中的感性无功功率,并联电抗器显然不是电源,而是负荷,但在一些电力系统中确实装有这种设施,用以吸收系统轻载或空载时线路上过剩的感性无功功率。

3 无功功率补偿的优化

由第一节对自贡电网无功补偿现状分析可知,无功补偿主要集中在各变电站(所),对荣县某负荷增长较快的长线路,无功功率补偿显著不足。现定量分析其补偿方式^[4-5]如下。

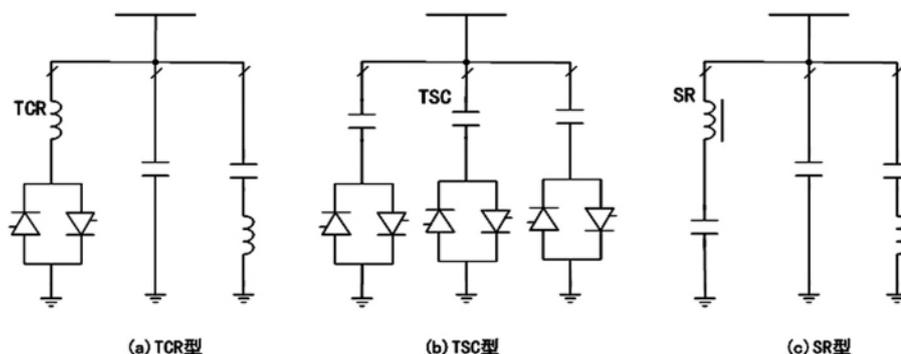


图3 静止补偿器原理图

表2 电容器、调相机和静止补偿器的特性比较

特性	电容器	调相机	SVC		
			TCR型	TSC型	SR型
调节方式	超前	超前/滞后	超前/滞后	超前	超前/滞后
控制方式	不连续	连续	连续	不连续	连续
灵活性	差	好	很好	好	差
反应速度	快	慢	很快	快	快
调节精度	差	好	很好	差	好
单位容量投资	低	高	中等	中等	中等
维护检修	方便	不方便	方便	方便	不常维修

3.1 单点补偿方式

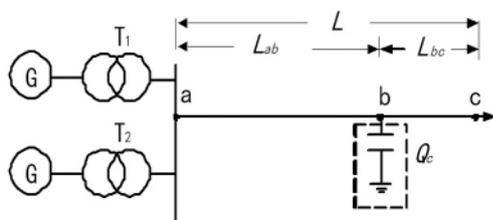


图4 长线路单点补偿示意图

假定线路全长 L ，单位长度的无功负荷密度 Q_0 ，若在距线路起点距离为 L_{ab} 补偿容量为 Q_c 的无功功率补偿点，由补偿点至线路末端，即 L_{bc} 无功潮流为

$$Q_{L_{bc}} = (L - L_{ab}) Q_0 \quad (1)$$

由起始点至补偿点，即前段 L_{ab} 无功潮流为

$$Q_{L_{ab}} = (L - L_{ab}) Q_0 - Q_c \quad (2)$$

补偿后，电力网络中损耗减小的数值可表示为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 - \Delta P_2 = \int_0^{L_c} r \frac{Q_{L_{bc}}^2}{U^2} dL_{ab} - \int_0^{L_c} r \frac{Q_{L_{ab}}^2}{U^2} dL_{ab} \\ &= \frac{r}{U^2} \left\{ \int_0^{L_c} Q_0 (L - L_{ab})^2 dL_{ab} - \int_0^{L_c} [(L - L_{ab}) \right. \\ &\quad \left. Q_0 - Q_c]^2 dL_{ab} \right\} = \frac{r}{U^2} \int_0^{L_c} [2(L - L_{ab}) Q_0 Q_c - \\ &\quad Q_c^2] dL_{ab} = \frac{r Q_c L_c}{U^2} [2L Q_0 - Q_0 L_c - Q_c] \quad (3) \end{aligned}$$

对 ΔP 求极值，可令在偏导数 $\partial \Delta P / \partial Q_c = 0$ ，且 $\Delta P / \partial L_c = 0$ ，可得

$$\begin{cases} 2L Q_0 - Q_0 L_c - 2Q_c = 0 \\ 2L Q_0 - 2Q_0 L_c - Q_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由上式可解出， $Q_c = 2L Q_0 / 3 = 2Q_R / 3$ ， $L_c = 2L / 3$ ， Q_R 为全网线路所需补偿无功功率，即当 Q_c 和 L_c 满足上述条件时，补偿效果最好，线损下降最大。在此情况下

$$\text{补偿度: } K_c = \frac{Q_c}{L Q_0} = \frac{2}{3} = 66.7\%$$

线损下降率:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_1} = \frac{\Delta P}{\int_0^{L_c} \frac{(L - L_{ab})^2 Q_0^2}{U^2} r dL_{ab}} = \frac{8}{9} = 88.9\%$$

3.2 多点补偿方式

为优化线路无功功率补偿，下面讨论多点补偿方式下的补偿情况。由图5(c)及单点补偿推导方法可得无功功率多点补偿的计算式。

第 i 组补偿器安装位置为

$$L_{ci} = \frac{2i}{2n+1} L \quad (5)$$

每一组补偿器的最佳补偿容量和总补偿容量分别为

$$Q_{ci} = \frac{2L Q_0}{2n+1} = \frac{2Q_R}{2n+1} \quad (6)$$

$$Q_c = \sum_{i=1}^n Q_{ci} = \frac{2n Q_R}{2n+1} \quad (7)$$

其中 Q_R 为线路所需无功补偿总容量。此补偿情况
(下转第42页)

表1 调度运行过程管理系统应用对比

	日志输入次数 (方式)	记录输入操作平均 时间/min	编辑交接 班平均时 间/min	查找记录 平均时间 /min
原来的工作方式	手写 后输入 电脑,共 计2次	3 × 15	3 × 10	3
使用调度运行过程管理系统	在业务办 理中自动 生成,共 计0次	3 × 5	3 × 5	0.5

计划书管理、继电保护管理、方式管理、检修申请管理等16项调度管理功能,优化了现有电网调度的管理模式,强化了电网调度的过程化管理,最大限度地减

少了在管理过程中的人为因素的随意性,实现了调度运行专业生产管理流程的集中和统一。

但是该系统的开发和应用仍处于初级阶段,下一步打算:①实现与调度EMS系统接口,共享信息资源;②进一步完善系统术语库,提高系统的智能化水平。

参考文献

- [1] 罗宏超,赵园,任建云. 基于工作流的设备批准书与启动方案及保护定值单在OMS系统中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(18): 131-133.
- [2] 王毅. 面向事件的电网调度日志系统研究与开发[J]. 华东电力, 2009, 37(5): 783-785.

(收稿日期:2011-10-10)

(上接第18页)

下,补偿度和线路损耗下降率分别为

$$K_c = \frac{Q_c}{Q_R} = \frac{2n}{2n+1} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta P\% = \left(1 - \frac{1}{(2n+1)^2}\right) \times 100\% \quad (9)$$

单点补偿和多点补偿方式下,网络中线路无功功率潮流分布与无补偿的情况如图5所示。 LQ_0 为长线路总的无功负荷。

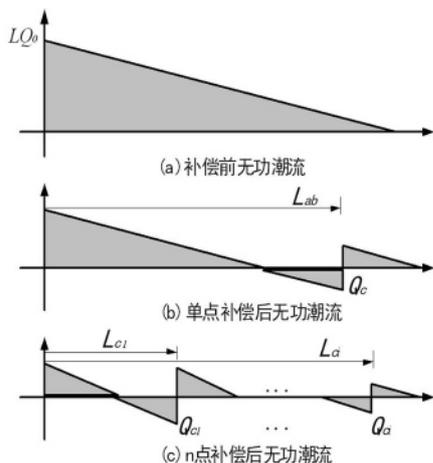


图5 补偿前后无功潮流分布图

计算了单点、两点、三点和五点补偿的补偿位置、容量、补偿度和线损下降率。单点补偿时,补偿度和线损下降率可分别达66.67%和88.89%;而两点补偿时,补偿度和线损下降率仅改变13.33%和6.11%。补偿点超过两点,补偿的经济性显著下降,详见表3。

4 结论

通过四川自贡电网运行经验和对无功补偿现状的

表3 线路无功功率补偿方案分析

补偿点	①	②	③	④
单点补偿	0.67	0.67	66.67	88.89
两点补偿	0.40	0.40	80.00	96.00
三点补偿	0.29	0.29	85.71	97.96
五点补偿	0.18	0.18	90.91	99.17

①补偿点距离线路始端位置/线路总长(多点给出 L_{ci}/L);②各补偿点的补偿容量/总补偿容量;③无功功率补偿度(%);④线路损耗下降率(%)。

简要分析,指出系统运行的薄弱环节——无功功率补偿,尤其是长线路的无功功率补偿。在分析各类无功功率补偿装置工作原理的基础上,对比其各自的优缺点,有利于无功补偿装置的合理配置。在传统电容器组补偿基础上,应合理引入各类可连续控制的静止补偿器。针对线路补偿问题,详细讨论了单点补偿和多点补偿的补偿效果,对线路无功功率补偿提供了量化参考依据,一般线路单点补偿可到线损下降80%左右,随着补偿点的增多,线损下降率降低速度显著放缓。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 刘从洪,邓晓林. 10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 40-42.
- [4] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿使用技术[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [5] 杜兵. 智能配电网无功优化应用研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 34-36.

(收稿日期:2011-11-30)

新疆电网频率的时空分布分析

吴茂乾¹ 陈江² 王筱¹ 赖国辉¹ 常喜强³ 晁勤¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 奎屯市电业局, 新疆 奎屯 833200;
3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 电网频率是衡量电能质量好坏的重要指标之一。同时也是研究系统运行方式、设计低频减载方案以及评价各种调频调压措施等工作的基础。主要针对 2011 年新疆电网通过新投运 750 kV 线路与西北电网联网与不联网时, 新疆电网出现功率变化及西北电网出现大功率缺额时, 对新疆电网频率的时空分布特性影响进行了仿真分析, 并对这两种情况下新疆电网频率的时空分布特性给电网安全带来的影响, 尤其是低频减载方案的影响进行了探讨比较。

关键词: 750 kV 线路; 孤网; 时空分布; 低频减载

Abstract: One of the important indexes to measure the power quality is grid frequency. Also it is the base to study the system operating mode, design the frequency load shedding scheme and evaluate the measures of frequency modulation and voltage regulation. The impact on temporal and spatial distribution characteristics of frequency in Xinjiang Power Grid when there is power change in Xinjiang Power Grid and there is high power shortage in Northwest Power Grid during the interconnection between these two grids or not by the new 750 kV line are analyzed and simulated. The impact of temporal and spatial distribution characteristics of frequency in Xinjiang Power Grid on the grid security, especially the impact on low-frequency load shedding scheme in both cases are discussed and compared.

Key words: 750 kV line; isolated network; temporal and spatial distribution; low-frequency load shedding

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0019-03

0 引言

近几年随着电力生产和电力供应这个大系统的不断扩大和增强, 电力系统的频率特性也日趋复杂。同时系统对频率的要求也越来越严格, 电网频率的好坏将直接影响到系统运行的各个环节。当电力系统受到联络线跳闸、大机组跳闸或者大容量负荷投切等扰动时, 由于系统原有的功率平衡遭到破坏, 引起系统频率发生变化。当系统的频率变化较大而超出其允许范围时将会给电力系统带来明显的不利影响, 甚至导致频率失稳而发生频率崩溃现象, 影响电网的安全稳定运行和可靠性。低频减载作为保障电网安全运行中的最后一道防线, 是防止电力系统发生频率崩溃的紧急控制措施。因此, 正确认识电力系统的频率特性是整定低频减载方案、研究系统运行方式、确定系统的网架结构和评价各种调频调压措施等工作的基础。虽然随着电力行业的不断发展与加强, 互联电网系统的容量也在不断的增加, 发生全局性频率崩溃的概率几乎很小, 但一旦发生将会使整个电网崩溃。

下面从 2011 年新疆电网通过新投运 750 kV 线路与西北电网联网, 与全国形成了一个大的互联电网这方面来探讨联网与不联网对新疆电网频率的时空分布特性的影响。并对这两种情况下新疆电网频率的时空分布特性给电网安全带来的影响, 尤其是低频减载方案的影响进行了探讨比较。从而为新疆电力相关部门采取相关的措施提供依据, 减小电网频率振荡对电网的影响, 保证用户用电的可靠。

1 电网的频率特性

1.1 电网频率特性的基本概念

电网的频率特性是指系统中的有功功率平衡遭到破坏时而引起的频率变化特性, 它分为静态频率特性和动态频率特性。电网的静态频率特性强调的是电网频率的一种状态, 而电网动态频率特性则强调的是频率变化的过程。电网的频率特性主要是由发电机的频率特性和负荷的频率特性及电压影响综合作用的结果。静态频率特性取决于负荷的静态频率特性和发电机的静态频率特性, 常以频率特性系数 K

表示,其中包括负荷静态频率特性系数 K_L 和发电机静态频率特性 K_G 。

$$K = K_L + \rho K_G$$

式中 ρ 为备用容量系数,它是系统总开机容量与总开机出力(包括厂用电及网损)之比。频率的动态特性是指电力系统受到扰动后,系统由于功率平衡遭到破坏而引起系统频率发生变化,从而使系统频率从正常状态过渡到另一个稳定值所经历的时间过程。它与系统的备用容量、负荷的频率调节效应及系统内旋转机械的惯性时间等因数有关,系统的惯性时间常数越大,频率变化过程所经历的时间越长。

1.2 电网频率的时空分布特性

电力系统的时空分布特性^[12]通常是指互联大电网在发生有功缺额扰动之后,不仅不同地点频率变化的幅值不同,而且各地频率变化量达到最大值的时间也不同,使频率呈现出明显的时空分布特性。频率的时空分布特性是互联大电网区别于简单网络分析结果的重要特征之一。

2 电网频率特性的影响因素

当电力系统遭受有功功率缺额扰动后,一方面通过负荷的频率调节效应来减小功率需求;另一方面,通过调用系统发电机组的旋转备用容量增大系统出力来提高电网的频率,使频率恢复到允许的范围内。在这个调节的过程当中系统频率的变化涉及到电网结构、发电机运行方程及其参数、调速器模型及旋转备用、励磁调节模型和负荷调节模型。因此,发生有功缺额故障后,系统原有的有功功率平衡状态被打破,各发电机组将按其同步功率分担发电缺额,并释放转子储存的部分惯性动能。转子动能的消耗将使机组转速下降,系统频率降低。

影响系统功率频率过程的因素主要集中在故障扰动地点、发电机组模型及其参数、调速器调节特性、旋转备用容量及其分布和负荷特性等几个因数上。

3 新疆电网频率的时空分布特性仿真算例分析

2011年新疆电网通过新投运了750 kV线路与西北电网联网,使得新疆电网与全国实现联网,形成了一个大的互联网,从某种意义上虽然提高了新疆电

网运行的可靠性,但同时也会给新疆电网频率的时空分布特性造成了一定的影响。为了讨论联网与不联网给新疆电网频率的时空分布特性所带来的影响,对此通过实际的例子进行了仿真分析。

以新疆电网红雁池二电厂有功脱落380 MW,陕西铜川电厂有功脱落1 000 MW、甘肃张掖电厂有功脱落500 MW和甘肃崇信电厂有功脱落1 000 MW为例对新疆电网频率的时空分布特性进行了仿真分析。

如图1~4所示。图中A、B分别代表新疆电网与西北电网联网和未联网的条件下新疆电网内部发生相同功率缺额的情况(新疆电网红雁池二电厂有功脱落380 MW);C代表新疆电网与西北电网联网条件下西北电网出现大功率缺额(陕西铜川电厂有功脱落1 000 MW、甘肃张掖电厂有功脱落500 MW和甘肃崇信电厂有功脱落100 MW)的情况。

由图1~4中对A、B两种情况下进行了比较和分析可知,当新疆电网出现相同有功功率缺额时,A、B两种情况下对新疆电网中同一发电厂的频率动态响应影响程度不同。在A种情况下,新疆电网各区域发电厂的频率变化特性要比在B种情况下的好很多。这是由于在A种情况下由于与西北电网联网增大了整个电网的容量,所以当新疆电网出现有功功率缺额时,A种情况下对新疆电网频率的影响要比在B种情况下的小得多。但是当出现C种情况时,对新疆电网各区域的发电厂频率的影响却很大,由图1~4可知,最低达到49.648 Hz。

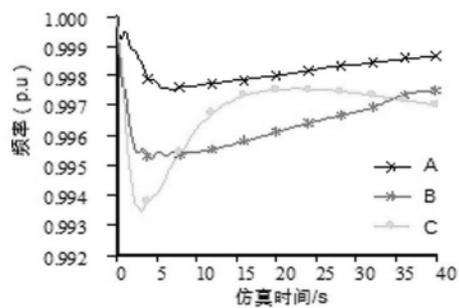


图1 天光电厂频率动态响应曲线

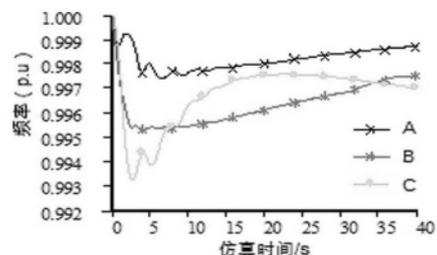


图2 玛纳斯电厂频率动态响应曲线

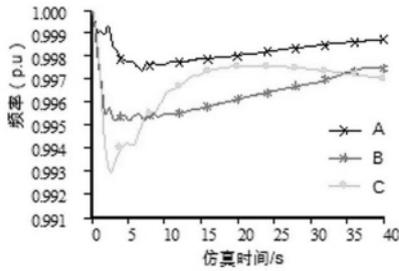


图3 库车电厂频率动态响应曲线

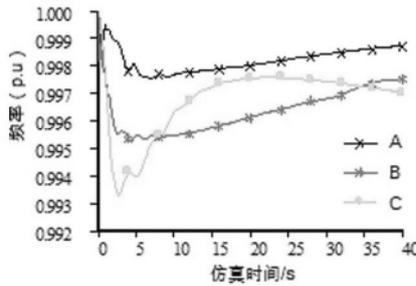


图4 红雁池二电厂频率动态响应曲线

由图5可知,当新疆电网运行在A种情况下时,不同地方电厂频率的动态响应曲线不同。这主要体现在各电厂的频率变化的幅值和其频率变化量达到最大值的时间不同。如表1所示。

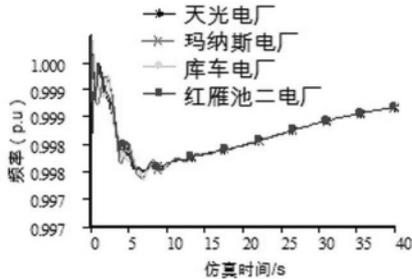


图5 A种情况下频率动态响应曲线

表1 电网运行在A种情况下各电厂的频率响应

电厂	频率最小值/p. u.	时间/s
天光电厂	0.997 52	6.77
玛纳斯电厂	0.997 39	6.58
库车电厂	0.997 35	6.82
红雁池二电厂	0.997 50	6.68

从表1中可以看出,当新疆电网运行在A种情况下时,库车电厂的频率可降低至到0.997 35 p. u.,其时间用了6.82 s;而玛纳斯电厂在6.58 s时其频率就降至到最低点,这说明在电网中某点出现有功功率缺额时,同一电网中不同区域电厂频率响应程度不同,这充分体现了频率的时空分布特性。由于各地区的频率特性不同,它与传统认为的全网频率特性一致相矛盾,而会影响到全网的低频减载方案,使新疆电

网的安全稳定运行受到挑战。

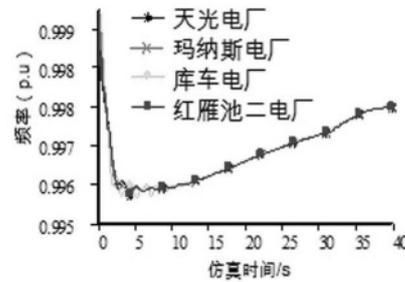


图6 B种情况下频率动态响应曲线

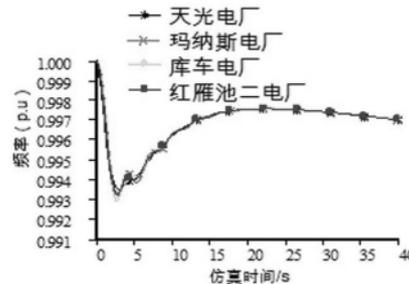


图7 C种情况下频率动态响应曲线

由图6和图7可知,当新疆电网运行在B、C这两种情况下时,其情况和图5中的一样。如表2和3所示。

表2 电网运行在B种情况下各电厂的频率响应

电厂	频率最小值/p. u.	时间/s
天光电厂	0.995 20	4.26
玛纳斯电厂	0.995 29	4.02
库车电厂	0.995 17	5.03
红雁池二电厂	0.995 23	4.24

表3 电网运行在C种情况下各电厂的频率响应

电厂	频率最小值/p. u.	时间/s
天光电厂	0.993 47	3.03
玛纳斯电厂	0.993 23	2.65
库车电厂	0.992 96	2.53
红雁池二电厂	0.993 28	2.63

4 结 语

由上面的图和表可知,当新疆电网孤网运行时,在新疆电网出现有功功率缺额条件下,不同地方电厂频率的动态响应程度不同,且各电厂的频率变化的幅值和其频率变化量达到最大值的时间也不同。同时当新疆电网与西北联网时,新疆电网出现相同功率缺额时,会在一定程度上提高新疆电网频率的稳定性,但是当西北电网出现大功率缺额时,会对新疆电

(下转第72页)

测点盐密值变化与交流监测点也有所不同,交流线路邻近几天的盐密值变化均较为平滑,直流线路却是呈波动变化。

3 结论及展望

±500 kV 德宝线 0064 号、0387 号杆塔、500 kV 坡山二线 012 号杆塔、500 kV 资洪一线 043 号杆塔 4 个监测点盐密数据与当地气象数据分析结果表明,盐密值变化与天气变化具有很好的一致性,利用光传感器盐密在线监测装置可以实现交、直流线路盐密值实时在线测取,能准确反映现场污秽环境。交、直流线路盐密分析结果表明,直流线路盐密增长速度高于交流线路,与以往研究结论一致。下一步,会每三个月对交、直流线路监测点盐密值进行对比分析,并记录分析结果,直到盐密值达到饱和。从而确定四川典型地理环境下交、直流线路积污特性,掌握四川地区交、直流线路积污规律。

参考文献

[1] 宿志一,刘燕生.我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J].电网技术 2004,28(10):13-17.

[2] 高海峰,樊灵孟,李庆峰,等.±500 kV 高肇直流线路绝缘子积污特性对比分析.高电压技术 2010,36(3):672-677.

[3] 宿志一.北方内陆地区线路悬式绝缘子串的直流自然积污特性[R].北京:中国电力科学研究院,1990.

[4] Su Z, Liang X, Yin Y, et al. Outdoor Insulation Selection Method of HVDC Lines [C]. //14th International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, China [s. n.], 2007.

[5] 吴光亚,宋伟,蔡炜,等.光谱法检测输变电设备盐密的实验室研究[J].高电压技术 2001,27(5):57-58.

[6] 谢强,朱瑞刚,熊鹏.晋中地区输电线路微气象及盐密监测系统应用[J].电网技术 2010,159(2):21-23.

(收稿日期:2011-11-21)

(上接第 21 页)

网频率的动态响应产生严重的影响,甚至会影响到新疆电网的低频减载方案。因此,要采取合适的措施来防止这种事故的发生,近一步提高新疆电网频率的安全稳定性。

参考文献

[1] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等.微电网孤网运行时的频率特性分析[J].电力系统自动化 2011,35(9):36-41.

[2] 熊小付,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J].中国电机工程学报 2005,25(19):48-51.

[3] 赵庆波,曾鸣,刘敏,等.电力市场中的负荷频率控制方案研究[J].中国电机工程学报 2002,22(11):45-50.

[4] 曾启明,陈伟乐,谢志堂,等.电力系统频率新的跟踪算法[J].中国电机工程学报 2005,25(19):48-51.

[5] 赵强,张丽,王琦,等.系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J].电网技术 2011,35(3):69-73.

[6] 王合帧,李向容,陈栋新.电网频率特性及负荷反馈 df/dt 的实测分析[J].电网技术 1995,19(12):43-47.

[7] 肖遥,孟·让·柯洛德.电力系统频率测量误差成因分析[J].电网技术 2002,26(1):29-42.

[8] 秦明亮,杨秀朝.减少低频减载方案过切的措施的研究[J].电网技术 2002,26(2):83-86.

[9] 赵强,王丽敏,刘肇旭.全国电网互联系统频率特性及低

频减载方案[J].电网技术 2009,33(8):35-40.

[10] 陈桥平,蔡泽洋,李爱民,等.互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J].中国电力,2009,42(8):1-5.

[11] 古丽扎提·海拉提,加码力汗·库马什,常喜强.新疆地区电网频率特性仿真分析[J].中国电力,2008,43(8):45-48.

[12] 周海峰,倪腊琴,徐泰山.电力系统功率频率动态特性研究[J].电网技术 2009(16):58-62.

[13] 张恒旭,庄佩沁,祝瑞金,等.大受端电网频率稳定性研究[J].华东电力 2009(10):1644-1649.

[14] 云雷,刘涤尘,张琳,等.负荷特性对跨区大电网低频振荡的影响研究[J].电力自动化设备 2009,29(8):41-45.

[15] 张忠林.关于电网频率若干问题的浅析[J].东北电力技术 1996(10):16-20,12.

[16] 赵勇,胡剑琛,顾志东,等.海南电网孤网运行时的频率特性分析[J].南方电网技术 2009,3(5):27-30.

[17] Bin Qiu, Yiyu Liu. Lan-based Control for Load Shedding [J]. IEEE Computer Applications in Power 2002,12:38-43

[18] Under-frequency Load Shedding Relay Application Guide [R]. Salt Lake City, UT, USA: Western Systems Coordinating Council, 1974.

(收稿日期:2011-10-17)

二滩水电站 5 号机组负荷波动原因分析及处理

吴建荣, 王秀梅

(二滩水力发电厂, 四川 攀枝花 617100)

摘要:分析了机组调速器控制系统、调速器机械部分、励磁系统以及故障录波数据,归纳出二滩电站 5 号机组接连发生多次负荷波动的变化趋势与规律,总结出调速器机械液压回路的卡阻与负荷波动之间的关系;同时介绍了出现该问题时应思考的几个方面及处理的具体方法,为处理类似问题提供借鉴。

关键词:二滩水电站; 调速器; 负荷波动; 分析

Abstract: The control system and mechanical part of unit governor, excitation system and fault recorder data are analyzed, the trend and rules of load fluctuations for No. 5 unit of Ertan Hydropower Station are summarized, and the relationship between the jamming of mechanical hydraulic circuit of governor and the load fluctuation is summarized too. Several aspects which should be considered when this problem occurring and the specific methods for treatment are introduced, which provides a reference for dealing with similar issues.

Key words: Ertan Hydropower Station; governor; load fluctuation; analysis

中图分类号: TV732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0022-02

0 前言

二滩水电站总装机容量 3 300 MW, 6 台单机容量 550 MW 机组, 1999 年 12 月全部投产发电, 是 20 世纪建成投产的最大水电站。其调速器控制系统和机械部分最初采用的是瑞士 HYDRO VEVEY 公司产品, 投入运行后调速器控制系统部分存在诸多问题, 部分功能不能完全满足电网的发展要求。2003 年开始将控制系统更换为武汉事达的 WT-SPLC-STARs 型产品, 由两套完全相同的数字式调速器头组成, 互为备用, 2007 年完成所有更换改造。2009 年 8 月 4 日至 7 日 5 号机组先后发生 5 次大负荷波动, 直接威胁到设备及电网的安全。

1 机组负荷波动现象

5 号机组负荷波动发生后, 分别从计算机监控系统、机组故障录波装置、调速器控制系统取相关数据, 因 5 次现象类似, 故选取典型代表所示。

从图 1 可以看出 5 号机组有功、无功发生异常波动时, 其励磁电压、励磁电流、机组无功波动的趋势与其他 5 台机组相反, 而当时 4 号与 5 号机组都与二普二线相连。且从当时的故障录波数据还可以看到励

磁电压的突变与机组有功、无功的波动变化几乎同时发生。从图 2 可以看出在无任何调节指令的状态下, 导叶最先自行波动, 从而引起功率波动。

2 原因分析

2.1 机组励磁系统和故障录波数据综合分析

5 号机组发生有功、无功波动时, 500 kV 线路电压、无功均正常; 5 号机组波动的趋势与其他机组相反; 机端电压无明显改变。这些说明 5 号机组励磁电压的突变并不是励磁系统电压调节功能造成, 而是其励磁系统内的 PSS 功能单元引起的反调现象。但按 PSS 反调试验的数据规律看, 正常 PSS 反调不应引起机组无功功率如此大的波动, 并且正常 PSS 反调引起的无功波动变化略滞后有功变化。而从所有数据波形看每次有功、无功的波动趋势完全一致, 由此判断 5 号机组发生波动的原因来自于机组本身。是由于机组原动机功率的突变, 造成了机组运行功角的变化, 从而引起了无功功率的大幅波动。

2.2 机组调速器控制系统和机械部分综合分析

从 5 次波动现象及数据上分析, 有一共同特点即: 无任何调节指令下导叶开度最先打开, 调速器控制系统随之响应给出回关的电转信号进行控制, 但失效, 进而增大电转的回关信号达 5 VDC 以上(最大电

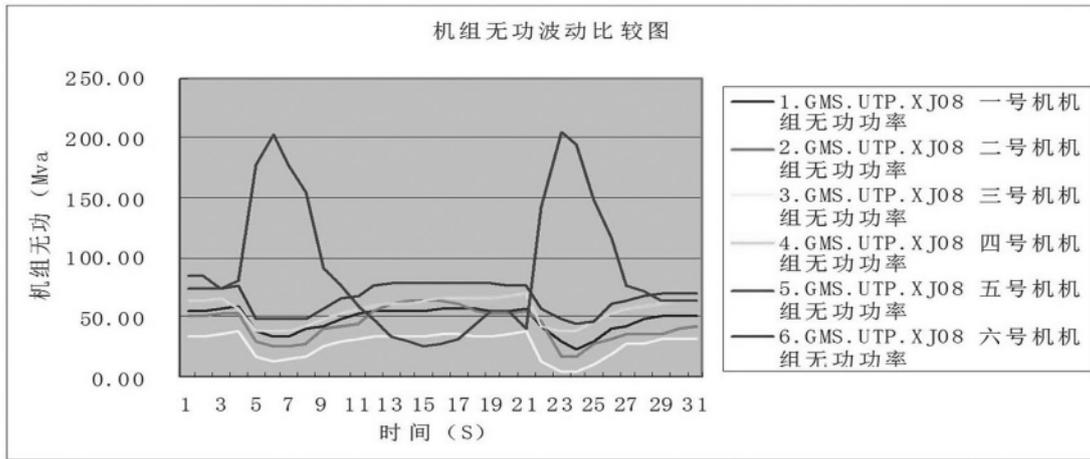


图1 全厂机组无功功率比较图

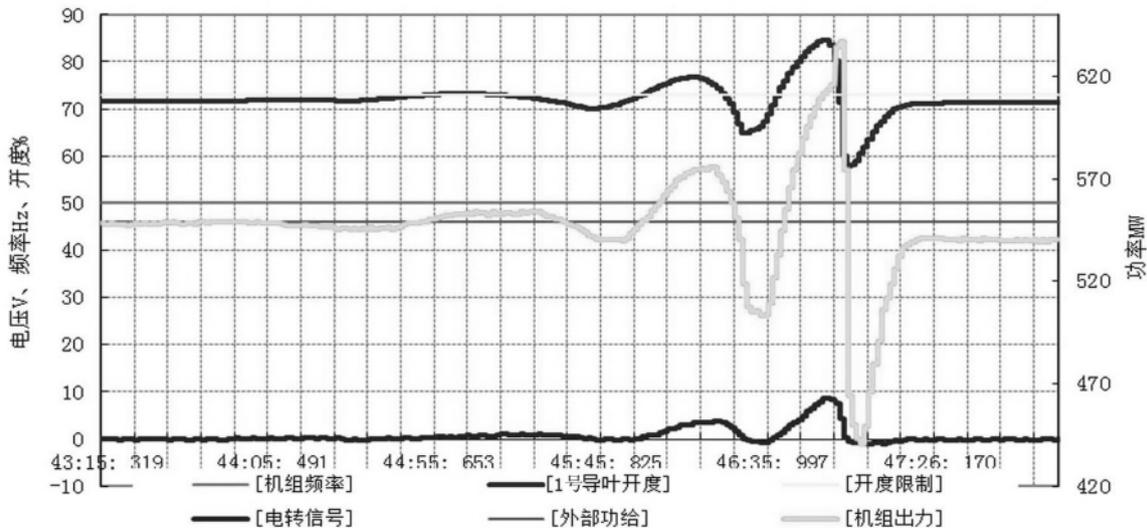


图2 5号机组有功波动波形图

压 10 V ,正常调节时 70 MW 的负荷阶跃对应电转电压约 1 V) ,才有效将机组出力“拉回”与功率给定一致。表现出控制指令与执行结果完全相反的结果。调速器控制部分在 2009 年年度小修后 ,持续正常运行 3 个多月。波动发生 2 次后 ,将调速器控制部分由 A 套切换为 B 套运行 ,该现象仍又发生 3 次。因此可基本排除调速器控制部分引发该事件的可能。

这表明 5 号机调速器的液压系统发生不稳定性堵塞、或卡阻、或电液转换器部分的不稳定性方向偏移导致调速器控制系统的执行元件(液压系统) 未能及时有效执行调速器的电气控制指令的可能性最大。因此应着重检查调速器机械系统较易发生卡阻部位 ,如电转的喷嘴、主配压阀上的节流孔等。

3 检查处理

5 号机组停机后分别对调速器控制系统的各重

要元器件、接线进行了检查和测验 ,均未发现任何异常。对调速器电液转换器上的喷嘴、主配压阀的节流孔进行了检查 ,发现中间接力器及喷嘴有明显的积碳油污 ,先采取了用高压气吹扫喷嘴、对主配压阀的节流阀进行清洗、更换油过滤器滤芯等处理措施。后通过多次快速全行程开关导叶操作 ,借此对电 - 液转换液压回路存在的流窜杂质通过油流的快速循环流达到冲洗效果。

经过上述处理后 ,5 号机组一直运行正常 ,缺陷得以消除。

4 结 语

机组调速器系统控制机组有功负荷的调节和频率控制 ,其调节品质和调节性能与电网的安全稳定运行密切相关 ,通常发生有功负荷波动时 ,会伴随无功

(下转第 76 页)

表3 介损超标高电压试验结果

NO	设置电压 /V	实测电压 /kV	电容量 /nF	tgδ /%
01	10000	9.844	1.212	0.587
02	20000	19.69	1.210	0.381
03	30000	29.51	1.209	0.255
04	40000	39.34	1.204	0.205
05	50000	49.17	1.204	0.183
06	60000	58.99	1.204	0.181
07	70000	68.80	1.204	0.186
08	80000	78.56	1.204	0.190
09	90000	88.32	1.204	0.199
10	80000	78.52	1.204	0.192
11	70000	68.74	1.204	0.186
12	60000	58.94	1.204	0.178
13	50000	49.13	1.204	0.180
14	40000	39.32	1.205	0.201
15	30000	49.13	1.204	0.253
16	20000	19.68	1.210	0.369
17	10000	9.840	1.212	0.561

注: 试品名称: AI-6000M 正接线 测量日期: 2010/10/20
10:40 频率设置: 50±1 Hz

试验结果见表3。

从上面数据可以看到电容量与电压变化的关系不大,但是随着电压的升高其介质损耗呈现明显的下降趋势,原来在低电压(10 kV)试验电压下介质损耗tgδ高达0.57%,随着试验电压升高其介质损耗下降明显,当电压升高到50 kV及以上后tgδ下降到合格范围,当试验电压升高到60 kV时,介质损耗tgδ最低,但是当试验电压继续升高后其介质损耗也约有上升,但变化幅度不大,其值也在《规程》范围内。4) 试验结果图形

试验采用 AI-6000M 电质损耗测试仪:

AI-6000H 2010/10/20 10:40 50±1Hz

22℃,试验结果见图2。

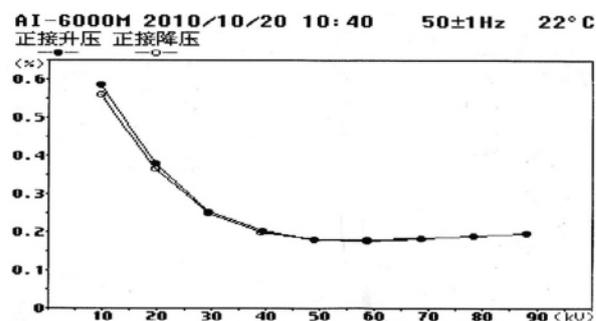


图2 试验结果图

5) 数据分析

从电压上升曲线上看,电压从10 kV到50 kV,介损从0.587%急剧下降到0.183%,这是均压电容内部绝缘材料的Garton效应引起的介损剧烈变化,当极性分子达到平衡,介质损耗趋于稳定,随着电压的继续升高,介损略有增大,这是由于表面泄漏引起的介损增大。

下降曲线是上升曲线的逆过程,但两条曲线一般不会完全重合,但试验值的变化趋势基本相同。

3 结论

对于运行中的500 kV及以上断路器均压介损试验,采用常规加压10 kV,正接法试验。由于Garton效应的影响,经常出现介损值超过国家《规程》规定(膜纸复合绝缘电容量不超过0.2%)的现象,当低电压下tgδ在除了仪器自身精度影响和试验方法的影响不符合规程要求(大于0.2%)时,此种情况下可进行额定电压下的复测,复测值如符合10 kV的要求,可继续投入运行。

(收稿日期:2011-09-16)

(上接第23页)

负荷的同步变化,因此分析机组负荷波动原因时在实际工作中往往需从以下几个方面入手:①结合机组或线路故障录波装置通过分析机组励磁控制系统的波形图,查找是否有来自电网的干扰因素;②分析调速器控制系统部分硬件存在的问题及可能造成的后果,软件是否存在逻辑控制缺陷;③分析调速器机械部分是否存在发卡或堵塞等导致负荷波动的因素;④停机后有针对性地检查控制系统或机械部分软硬件存在的问题;⑤必要时应通过相关模拟试验进行功能验证,如检查调速器电转信号动作方向、机械零位检查

与调整、并网后负荷增减试验等。

此次缺陷能及时有效地得以解决,正是基于对数据的综合仔细分析后作出了有针对性的检查处理。

参考文献

- [1] 魏守平. 水轮机控制工程[J]. 电力系统自动化, 2005(12): 82-82.
- [2] 谭中美, 刘小改. 二滩水电站调速器控制系统改造[J]. 水电站机电技术, 2005, 28(1): 64-65.
- [3] 魏守平, 王雅军, 罗萍. 数字式电液调速器的功率调节[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003(4): 20-22.

(收稿日期:2011-11-07)

一例双馈发电机的并网故障分析

袁 炜 胡文胜 赵 宇

(许昌许继风电科技公司 河南 许昌 461000)

摘 要:变流器与双馈发电机的配置不兼容,导致了发电机出现空载并网故障。变流器的 Park 变换是以发电机定转子绕组的分布顺序为参考坐标系的。定转子绕组分布顺序与 Park 变换的计算方法不兼容,引起了发电机故障。通过改变发电机的定转子的接线顺序,可以使双方兼容,解决了故障。

关键词:变流器;双馈发电机;并网;Park 变换

Abstract: The configuration of converter and that of double-fed induction generator are not compatible, so it leads to no-load grid interconnection failure. The Park's transformation of converter is based on the stator and rotor winding order as the reference coordinate system. The proposed failure is caused because the stator and rotor winding order are not compatible with the calculation method of Park's transformation. By changing the wiring order of the generator stator and rotor winding, the failure is resolved.

Key words: converter; double-fed induction generator; grid interconnection; Park's transformation

中图分类号:TM315 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0024-02

0 引 言

双馈发电机的并网过程复杂,分为空载励磁、检测定子电压、断路器合闸、发电机并网运行等几个阶段。在运行中,变流器的配置、发电机的配置两者必须兼容。

如果变流器的软件配置与发电机的配置不兼容,可能导致定子电压不能满足电网要求,发电机无法并网,或者并网后对发电机造成损害。

1 故障现象

2011 年 7 月,采用 A 厂家的变流器、B 厂家的发电机,某工厂进行 2.0 MW 双馈型风力发电机的全功率实验。

全功率实验,分为空载运行、并网运行两个阶段。空载时,变流器为转子提供励磁,使得发电机的定子感应出满足电网要求的电压。当检测到定子电压、电网电压同步后,进行发电机并网操作,通过对转速、功率的调节,进行并网运行控制。

在实验过程中,先后出现了定子电压与电网电压频率、相位不同步的现象。

1.1 频率不同步

采用 A 厂家的变流器、B 厂家的发电机,通过设置变流器的参数,进行机组的空载励磁实验。

在实验中,通过示波器检测定子电压,发现定子电压的频率约为 36.7 Hz,也就是频率不同步。

1.2 相位不同步

发现频率不同步后,工作人员改变了发电机的转子接线相序,将 a-b-c 换为 b-a-c,频率不同步的问题解决了,但随后又出现了相位不同步的现象。

利用示波器测定子电压,频率同步,幅值也正常。但是,定子电压的相位与电网电压始终存在偏差。

2 故障原因查找

2.1 变流器的空载励磁原理

A 厂家的变流器,其空载励磁控制原理如下:采用矢量控制方案,外环(电压环)采用开环控制,内环(电流环)采用闭环控制的方式,如图 1 所示。

图 1 中,首先对电网电压信息进行检测,经坐标变换后,可以获得电网电压的幅值 u_m 及相角 θ_u 。 $u_{\alpha 2}^*$ 、 $u_{\beta 2}^*$ 经 SVPWM 调制后,调节转子励磁电流,使得发电机的定子输出电压满足并网要求^[1-2]。

这种控制方案的优点是,结构简单,只需要一个 PI 控制器;缺点是,一旦定子电压出现故障,无法对

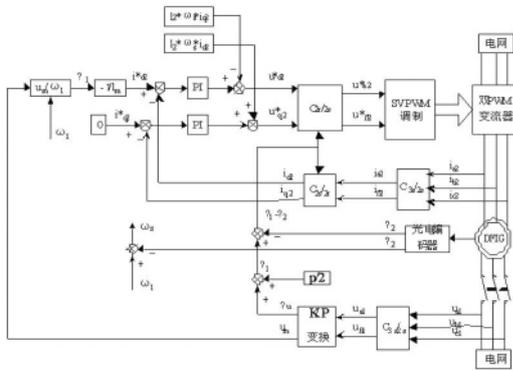


图1 变流器的空载励磁控制原理图

外环的电压进行自动调整。

2.2 变流器算法对发电机配置的要求

A 厂家变流器在设计时,是以这种标准来设计软件算法的。

(1) 发电机的配置

从轴伸端看,转子逆时针旋转,此种双馈发电机(double-fed induction generator, DFIG)的物理模型如图2所示。

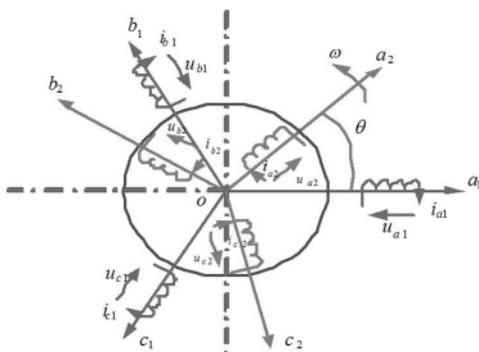


图2 DFIG 的物理模型

图2中,定子电压、电流正方向按照发电机惯例,转子电压、电流正方向按照电动机惯例。定子三相绕组轴线 a₁、b₁、c₁ 在空间上是固定的,以 a₁ 轴为坐标参考轴。转子绕组轴线 a₂、b₂、c₂ 随转子旋转, a₂ 与 a₁ 轴间的电角度 θ 为空间角位移变量。

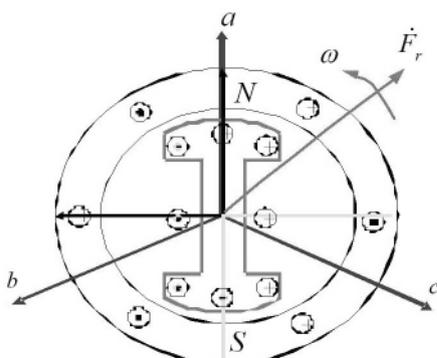


图3 DFIG 的电磁转换示意图

DFIG 的电磁转换原理如图3所示,空载运行时,变流器为转子提供励磁电压,定子感应出电压。

A 厂家的变流器要求:从轴伸端看,定子绕组为逆时针排列,转子合成磁势 \dot{F}_r 以 50 Hz 逆时针旋转,依次切割定子的 a-b-c 绕组,定子感应出正序的电压、电流。

(2) 变流器 d-q 变换的配置

d-q 坐标变换即 park 变换^[3], a-b-c 到 d-q 坐标变换的变换矩阵有多种,影响变换矩阵的因素有以下几方面:① a-b-c 坐标系的排列顺序, a-b-c 三相绕组可以按照顺时针或逆时针排列;② d-q 轴的相对位置,有些惯例选取 d 轴超前 q 轴,有些则选取 q 轴超前 d 轴 90°;③ d-q 坐标系的旋转方向,有些惯例选取顺时针旋转,有些则为逆时针旋转。

只有在发电机绕组 a-b-c 的配置与变流器 d-q 变换的配置一致时,变流器才能正常工作。

2.3 发电机的实际配置

B 厂家的发电机配置情况:从轴伸端看,定转子绕组 a-b-c 均为顺时针排列。

这样, B 厂家的发电机定转子绕组顺序不符合 A 厂家变流器的设计要求。变流器的 d-q 变换不会得到直流分量,而会得到二倍频的交流分量。

2.4 频率不同步的原因

定子电压频率不同步的原因是:从轴伸端看, B 厂家的发电机转子绕组 a-b-c 为顺时针排列,转子交流绕组流过的励磁电流相序出错,造成转子合成磁势 \dot{F}_r 为 36.7 Hz 左右,如图5所示。

A 厂家的变流器则要求,从轴伸端看,定子绕组为逆时针排列,转子合成磁势 \dot{F}_r 以 50 Hz 逆时针旋转。

可以得到对转子电流的要求如下:①三相基波合成磁动势的转向取决于电流的相序,总是从超前的电流相转向滞后的电流相。因此,转子电流的相序应为负序;②转子逆时针旋转,转子电流的频率应为 50 Hz 与转子机械频率之差;③转子电流的幅值应满足电网电压的要求。

试验中,发电机的同步转速为 1 500 r/min,空载转速为 1 300 r/min,转子合成磁势 \dot{F}_r 的频率约为 $f = 43.33 + f_{ir} = 50 \text{ Hz}$, $f_{ir} = 6.67 \text{ Hz}$ 。如图4所示。

(下转第30页)

- [7] mer Nezh Gerek ,Dogan Gökhan Ece. 2 - D Analysis and Compression of Power Quality Event Data [J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2004 ,19(2) : 791 - 798.
- [8] mer Nezh Gerek ,Dogan Gökhan Ece. Compression of Power Quality Event Data Using 2D Representation [J]. Electric Power Systems Research 2008 ,78(6) : 1047 - 1052.
- [9] 鲍文,周瑞,刘金福. 基于二维提升小波的火电厂周期性数据压缩算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(29):96-101.
- [10] 王永玉,孙衢,袁超伟. 基于整数小波变换和SPIHT编码的录波数据压缩算法[J]. 继电器 2008,36(11):50-54.
- [11] 郝蔓钊. 电能质量监测数据的数据压缩[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [12] 高山. 基于小波包变换的多级树集合分裂编码算法研究[D]. 西安:西安科技大学,2009.
- [13] 刘毅,周维维,冯浩. 电能质量监测网录波数据压缩方法[J]. 电网技术 2010,34(4):199-203.
- [14] 柯慧. 电能质量数据压缩算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [15] 胡志坤,何志敏,安庆,等. 基于二维DCT的电能质量监测数据压缩方法[J]. 中南大学学报,2011,42(4):1021-1027.
- [16] 郑伟彦,吴为麟. 基于混合小波包的电能质量数据压缩算法[J]. 电工电能新技术 2010,29(3):8-11.
- [17] 丁屹峰,程浩忠,占勇,等. 基于PQDIF格式压缩的电能质量数据模型[J]. 继电器 2005,33(7):55-58.
- [18] 朱宏涛. 电网数据采集系统建模与数据压缩品质影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(收稿日期:2011-10-08)

(上接第25页)

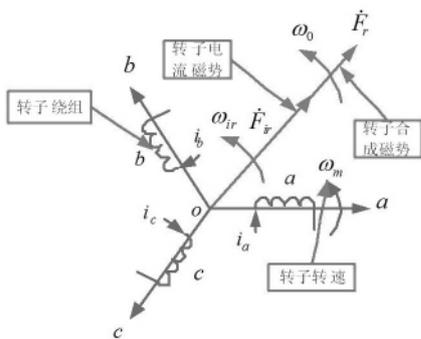


图4 正常时转子合成磁势的原理

发电机的并网故障如图5所示,转子合成磁势

\dot{F}_r 的频率约为 $f = 43.33 - 6.67 = 36.66$ Hz,感应出的定子电压频率约为 36.66 Hz。

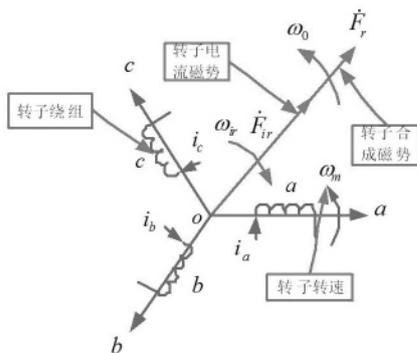


图5 非正常时转子合成磁势的原理

此时,只要调换任意两根转子接线,就可使转子

合成磁势 \dot{F}_r 频率正常。

2.5 相位不同步的原因

定子电压的相位控制是分两步完成的。

第一步,通过PLL测量电网电压的相角 θ_u ,计算转子旋转后的相角 $\theta_2'' = \int_0^t \omega_m dt$,使得转子电压相角

$\theta_{ru} = \theta_u + \pi/2 - \theta_2''$,这就是频率控制的原理。

第二步,计算出定子电压的相角 θ_{su} 、电网电压的相角 θ_u ,然后取其差值 $\theta_{offset} = \theta_u - \theta_{su}$ 即是补偿相角。取 $\theta_{ru} = \theta_u + \pi/2 - \theta_2'' + \theta_{offset}$,这个相角即可使定子电压的相位同步。

变流器从第一步进入第二步,是有条件的,那就是变流器先检测定子电压的 d 、 q 分量是否满足要求。

从轴伸端看,B厂家的发电机转子绕组 a-b-c 为顺时针排列,定子电压为负序,经 $d-q$ 变换后的为二倍频正弦,不能满足变流器进入第二步的条件。变流器始终停留在第一步,而不能进入第二步进行相位同步操作。任意调换定子的两根接线后,相位不同步的问题得以解决。

3 结 语

分析了一例双馈发电机的实验故障,总结出变流器的软件配置与双馈发电机配置两者的兼容非常重要。如果变流器的软件配置与发电机的配置不兼容,可能导致发电机无法并网,或者并网后对发电机造成损害。

参考文献

- [1] 苑国锋,柴建云,李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报 2005,25(8):90-94.
- [2] 郎永强. 交流励磁双馈电机风力发电系统控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [3] 王永,沈颂华,关森. 新颖的基于电压空间矢量三相双向整流器的研究[J]. 电工技术学报 2006,21(1):104-110.

(收稿日期:2011-08-31)

电能质量数据压缩算法研究

杨超颖

(山西电力科学研究院,山西太原 030001)

摘要:首先总结了常见的 4 种数据压缩基本方法,即霍夫曼(Huffman)编码、算术编码、LZ 系列编码以及基于小波分析的数据压缩法。重点分析了当前研究和应用比较广泛的 3 种数据压缩综合算法,即基于离散小波变换、多级树集合分裂(SPIHT)编码和算术编码相结合的数据压缩方法、基于 PQzip 技术的数据压缩算法和 Zlib 数据压缩算法,并比较了各自的适用条件及优缺点。最后给出了电能质量数据压缩算法选用的建议。

关键词:数据压缩;算术编码;SPIHT 编码;PQzip;Zlib

Abstract: Four common algorithms for data compression are summarized firstly, i. e., Huffman coding, arithmetic coding, LZ series coding, and data compression method based on wavelet analysis. Meanwhile, three integrated data compression methods that are current focus of the research and applied widely are analyzed, that is, data compression method based on discrete wavelet transform (DWT), set partitioning in hierarchical tree (SPIHT) coding and arithmetic coding, data compression method based on PQzip technology and data compression method with Zlib. Then, their applicable conditions, advantages and disadvantages are compared. Finally, the recommendations for selection of data compression algorithms of power quality are given.

Key words: data compression; arithmetic coding; SPIHT coding; PQzip; Zlib

中图分类号:TM714.3 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0026-05

0 引言

随着电能质量监测系统规模的发展,监测点的设置越来越多,监测装置记录与分析的数据存储和有效传输已成为监测系统高效运行的瓶颈之一。为此,应采取对数据进行压缩,以减少数据存储的空间与传输量,保证传输速度,使电能质量监测系统高效运行。

数据压缩按照压缩的失真度分为有损压缩和无损压缩,有损压缩算法主要有脉冲编码、预测编码以及变换域编码算法等。考虑到数据的特殊性,在电力系统相关数据压缩中主要采用无损压缩算法,包括自适应霍夫曼编码(Huffman 编码)、LZ 系列编码、算术编码、游程编码、RAY-Period 压缩编码等算法。对于电能质量数据压缩问题的研究是近年来的一个热点。文献[1-2]基于小波变换,采取阈值方法处理小波系数,取得了一定的压缩效果。文献[3-4]基于小波包变换并结合最优小波基的选择来实现电能质量数据压缩。但上述方法得到的压缩比仍较低,维持在几倍至十几倍,且无法控制压缩性能。文献[5-6]提出了基于提升格式的电能质量数据压缩和重

构算法,提高了运算速度,适合于实时压缩。针对电力系统信号的周期性特点,文献[7-9]进一步挖掘了此类信号的循环冗余性,按整数倍周期将一维电能质量数据转换为二维矩阵,利用二维小波变换进行数据的压缩,取得了较好的压缩性能。文献[10]采用了图像压缩领域的多级树集合分裂(SPIHT)编码来实现一维数据的压缩,但没有讨论压缩码率与压缩性能的关系,且压缩性能不佳,信噪比在 30 dB 以上时,压缩比只有 30 以下。此外,PQzip 与 Zlib 算法等在电能质量数据压缩中也得到广泛应用。

将首先介绍数据压缩的 4 种基本算法,然后对目前电能质量数据压缩的综合算法进行分析,进而提出电能质量数据压缩算法选用的建议。

1 电能质量数据压缩基本方法

1.1 Huffman 编码

Huffman 编码是一种常用的压缩编码方法。它的基本原理是频繁与较少使用的数据分别用较短与较长的代码代替,每个数据的代码各不相同。

Huffman 压缩编码作为一种高效的变长编码方

式 码长取决于字符的概率,在源数据中出现概率越高的符号,相应的码长越短;反之,相应的码长越长,从而在整体上缩短了源数据包含信息的比特数,达到用尽可能少的码字表示源数据。Huffman 压缩编码是接近压缩比上限的一种较好的编码方法。

1.2 算术编码

算术编码是一种无失真的编码方法,能有效地压缩信息冗余度,属于熵编码的一种。其基本原理是:根据信息可能发现的不同符号序列的概率,把 [0,1] 区间划分为互不重叠可反映各符号序列概率的子区间,使每个子区间内的任意一个实数都可以用来表示对应的符号序列,这个数就是该符号序列所对应的码字。对信息进行算术编码时首先需建立信息概率表,然后需对信息发出的符号序列进行扫描编码。通过这两个过程即可实现对信息的编码压缩。

1.3 LZ 系列编码

LZ 系列算法包括 LZ77、LZ78 以及 LZW 算法等,其中 LZ77 和 LZ78 是 LZ 系列的基础算法,这两个算法在字典的构造和实现上代表了两种完全不同的思想^[11]。

LZW 的压缩基本原理是,通过分析源数据流,在编码的同时不断更新,自适应地生成一个串表,后续的数据就可以同串表中的数据相匹配。由于这个生成的串表不需要随着压缩的数据一同传输,而是能够根据压缩的数据在解压缩的时候重新动态地生成一模一样的串表,从而进一步提高了压缩的效率。

1.4 基于小波分析的数据压缩法

基于小波的数据压缩方法包括有多分辨率分析方法、Mallat 算法、小波变换、小波包变换和多级树集合分割编码相结合的方法等。这些数据压缩方法在电力系统中也得到了广泛的应用。

其中,小波包变换能够为信号提供一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,并且能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应的频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时-频分辨率。文献 [12] 详细分析了小波包变换和多级树集合分割编码相结合的方法。

2 电能质量数据压缩综合算法

2.1 基于离散小波变换、SPIHT 与算术编码相结合的数据压缩方法

为满足电能质量监测网存储与传输海量录波数据的需要,文献 [13] 提出了提升格式的二维离散小波变换、SPIHT 编码与算术编码相结合的数据压缩方法。该算法的实现原理如下图 1 所示。

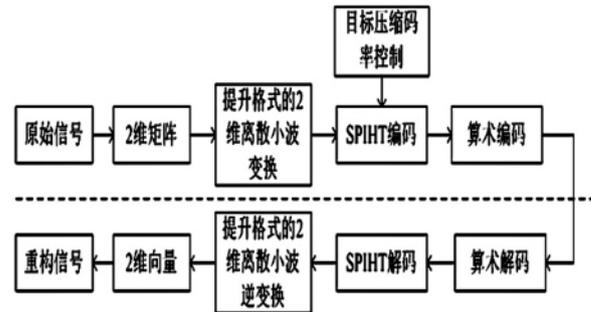


图 1 电能质量数据压缩与重构方法

首先,将采集的一维电能质量数据按整数倍周期排列为二维矩阵,利用图像压缩的方法对电能质量录波数据进行压缩。在 SPIHT 编码中,小波系数按重要性从大到小的顺序被编码,达到目标压缩码率便立即结束编码,因此可以根据电能质量监测网的通信状况来控制压缩码率,实现对压缩性能的控制;且 SPIHT 编码对不重要的小波系数及其不重要的后代节点都不进行编码,提高了编码效率。最后,对 SPIHT 编码输出的数据进行算术编码,可进一步提高压缩比。重构是压缩的逆向过程。

对常见的电能质量扰动信号(谐波、凹陷、中断、震荡、脉冲)进行的压缩研究表明,在压缩码率 $R = 0.5$ bit/pel 时,各类电能质量信号的压缩比都达到了 115 倍以上。在如此高的压缩比且含有 10 dB 强度的高斯白噪声的情况下,重构信号的信噪比也达到了 32 dB 以上。

另外,此数据压缩方法能灵活地调节压缩性。压缩码率越高,压缩比越低,信噪比越高,均方误差也越小。因此,可以根据电能质量监测网的通信状况,通过控制压缩码率来调节压缩比。当通信状况较好时,可提高压缩码率,传输较多的数据量,此时重构信号的信噪比较高,能较准确地记录原始信号的特征;当通信状况较差时,可降低压缩码率,传输较少的数据量,此时重构信号的信噪比较低,但仍能记录原始信号的大概特征。

2.2 基于 PQzip 技术的数据压缩算法

PQzip 是一种先进的电能质量数据压缩技术,主要应用于以色列 Elspec 公司开发的 G4400 电能质量监测装置中。PQzip 技术中所采用的基于 FFT 变换

的有损压缩算法是当今应用广泛的一种方法,该方法精度较高,功能较多,使用方便,特别适用于正弦波的情况。但FFT是在整个时域内的积分,只能适用于确定性的平稳信号(如谐波),对时变非平稳信号却难以充分描述。

基于PQzip技术,文献[14]采用FFT和小波包变换两种方法相结合实现了数据压缩。对于染噪信号,为有效提取信号的特征量,首先利用小波阈值法去噪,再对其进行二进小波变换检测信号:如果检测到的信号为稳态或稳态扰动,采用FFT变换对信号进行压缩,得到相应的频谱,记录原始信号中不同的频率分量;如果检测到的信号为暂态扰动,则采用小波包变换进行压缩,对小波包各层分解系数进行阈值处理,保留与信号奇异性相关的点,忽略一部分与信号奇异性无关的点。最后利用LZW编码对经过有损压缩后存储的数据进一步无损压缩,实现更有效的压缩效果。

对5种常见的暂态扰动信号以及4种稳态扰动信号的仿真分析表明^[14],对于同一稳态扰动信号,PQzip的压缩率(CR)最小,压缩效果最好,而小波变换算法CR明显大于PQzip和所提算法,说明了FFT算法在稳态以及稳态扰动信号压缩方面具有无可比拟的优越性;对于同一暂态扰动信号,小波算法的CR最大,压缩效果最差,PQzip所采用的FFT算法和所提算法的CR较为接近,这是由于小波包变换对扰动数据进行压缩时,不仅对小波包低频系数进行阈值处理,而且对高频系数同样进行阈值处理,是一种比小波变换更为精细的变换方法,其压缩效果优于小波变换的压缩方法。

电能质量信号在不同方法下的均方根误差(RMSE)结果分析表明,PQzip所采用的FFT算法在稳态信号压缩时,RMSE很小,保持在 10^{-4} 数量级以上,但在处理暂态信号时,压缩率只有 10^{-3} 数量级;小波变换算法在进行压缩时,RMSE基本都保持在 10^{-3} 数量级;而所提算法的RMSE在处理无论是稳态还是暂态信号时,RMSE都保持在 10^{-4} 数量级上,压缩后的重构信号可以较好地保留原始信号的特性。综上分析可得,电能质量信号不管是稳态、稳态扰动还是暂态扰动,采用所提算法,即基于FFT和小波包变换压缩法,在保证原始信号局部特性的基础上,能有效地压缩数据,并且取得令人满意的压缩效果。

2.3 Zlib数据压缩算法

Zlib压缩算法是一种基于字典的无损压缩算法,应用于PQDIF压缩数据。该算法采用了统计模型和字典模型,有机地结合了Huffman树编码法和LZ77编码法的优点,使压缩效果更好。

Zlib算法继承了字典压缩算法的思想,将此思想与滑动窗口(在内存中开辟的一个固定长度的缓冲区)相结合,把滑动窗口看成是字符的字典,找出超前察看缓冲区(与滑动窗口的缓冲区相邻)中能与滑动窗口的字符串相匹配的最长的字符串,并将此串按照LZ77编码法进行编码。当两个缓冲区中没有相匹配的字符时,便采用自适应的Huffman编码法进行编码,在编码的过程中将已编好的压缩码实时地写入压缩文件中。也就是说,Zlib算法将长度不同的符号串编码成一个个新单词,形成一本短语词典的索引,然后用索引来检索数据,并用字典的编码代替符号串以达到压缩目的。解码过程是编码的逆过程,同样用到了Huffman算法和LZ77算法的编码算法,解码过程与编码过程相似。

根据某省级数据中心建设规划,为了最大限度地保护现有投资,该省将PQView数据库作为基础数据库,PQView软件本身提供了数据采集功能、数据管理功能及数据分析功能。PQView数据库中数据存储采用PQDIF格式,对稳态数据及事件的录波数据进行压缩的算法采用ZLib,此算法的压缩效率非常高。对于纯数据文件2.04 MB,压缩后13.5 kb,压缩率为99.4%;纯数据文件1.00 MB,压缩后7.23 kb,压缩率为99.3%;纯数据文件454 kb,压缩后3.81 kb,压缩率为99.2%;纯数据文件221 kb,压缩后为99%;对于文本+数据文件,原文件大小为228 kb,压缩后2.62 kb,压缩率为99%;原文件大小为3.14 MB,压缩后为21.4 kb,压缩率为99.4%。文件的容量越大,ZLib算法的效率就越高。

2.4 电能质量数据压缩其他综合算法

目前,对电能质量数据压缩方法的研究有很多,文献[15]基于二维DCT的电能质量监测数据压缩方法,该方法仿真结果表明,当均方误差为3.89%时,压缩比可以达到82.8%。文献[16]基于混合小波包的电能质量数据压缩算法,对于电能质量事件数据的压缩性能优于传统小波/小波包变换。文献[10]基于整数小波变换和SPIHT编码的录波数据压缩算法,其整数小波变换运算速度快,节约内存,易于DSP实现;SPIHT编码方法形成的码流易于实现可变码

率,也能达到一定的压缩性能。文献[17]基于 PQDIF 格式压缩的电能质量数据模型,是基于 Zlib 的数据压缩技术,采用此数据模型基于 Web 技术的电能质量监测和分析系统已投入运行。这些数据压缩法都具有自己的优缺点和使用条件。第三节着重分析比较目前被投入实际使用和研究广泛的 3 种数据压缩方法。

3 电能质量数据压缩 3 种方法的分析比较

基于二维离散小波变换、SPIHT 并结合算术编码方法的数据压缩方法对电能质量数据进行压缩。在较高的压缩比时仍能保证较高的信噪比,信号的特征基本得到了保留;压缩性能可以根据电能质量监测网的通信状况灵活调节,避免了因为通信线路上传输的数据量过大而造成的数据丢失或严重滞后,监测中心能及时地监测、分析电能质量状况。提出的方法能较好地解决电能质量监测网对海量录波数据进行存储与传输的问题。

基于 PQzip 技术的数据压缩算法结合了 FFT 和小波包变换压缩的优点,即 FFT 具有良好的频域特性和小波变换具有更高的时频分辨率,并有很好的抗噪性,可以自动检测扰动信号并进行分类:对稳态以及稳态扰动信号采用 FFT,对暂态信号采用小波包变换进行压缩。与 PQzip 以及小波变换算法相比较,抗噪性能好,还可以在保证原始信号局部特性的基础上,获得更好的压缩效果,CR 较小,并且其 RMSE 也保持在 10⁻⁴ 级别以上,取较满意的压缩结果。该算法在实际应用中,若忽略扰动、畸变和直流分量的影响,在工程运用中,可以广泛采用。

基于 Zlib 的数据压缩法是一项成熟的压缩算法,Zlib 是一个免费、通用、不受任何法律阻碍的、无损的数据压缩开发库,而且还是跨平台的。与其他无损压缩算法相比,Zlib 压缩算法能够压缩更多形式的数据,并且具有同 winzip 和 winrar 等商业软件相比毫不逊色的压缩率,并且使用了很少的系统资源,对各种数据提供很好的压缩效果。如果经常使用 Zlib 库压缩特定类型的数据,可以使用有针对性的策略,提高压缩效率和性能。尽管 Zlib 只支持 deflate 压缩算法,压缩倍数比所提到的其他算法大,但在实际运用中还是很广泛,运用方便简单。

4 结 语

在简要总结几种典型的电能质量数据压缩基本方法的基础上,着重分析了目前研究和较为广泛的数据压缩法,并比较了各个方法的适用条件及优缺点。若以较少的数据质量损失存储大量的数据,从而获得很高的压缩率,若考虑使用有损压缩,忽略压缩过程中损耗的数据,建议考虑使用 PQzip 数据压缩法,该方法能提供过去的所有与电能质量相关的数据,不论其重要程度怎样,任何时间的数据都被存储;若考虑使用无损压缩算法,根据以上的分析,建议使用 Zlib 库,对数据进行压缩,这是目前使用比较广泛成熟的压缩方法;若考虑压缩性能中的压缩比,以及误差精度,所提的基于离散小波变换、SPIHT 编码、算术编码相结合数据压缩法是目前数据压缩研究领域取得较好效果的方法。

这 3 种数据压缩法都有各自的特点,根据不同的实际需求,选择适合的电能质量数据压缩法,达到预期的数据压缩效果。但它们都有各自的影响因素,如 PQzip 数据压缩法,实际电力系统中,电能质量信号会存在各种扰动和畸变,有时还会受到直流分量的影响,而且这些扰动和畸变很多时候会同时出现。在实际应用时,影响数据压缩的因素有数据量、采样率、电能质量问题和 AD 性能等,都应当在算法中将这些因素都考虑进去,使得算法更加合理实用^[18]。因此在对各种数据压缩算法进行改进研究时要综合考虑各方面的影响因素从而达到提高压缩仪器精确度的目的。

参考文献

- [1] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, D. K. Sahoo, et al. Power Quality Disturbance Data Compression, Detection, and Classification Using Integrated Spline Wavelet and S-Transform [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(2): 595-600.
- [2] 刘应梅,白晓民,易裕,等.基于最小极大法的电力扰动信号压缩[J].电网技术,2004,28(3):33-37.
- [3] 成敬周,张举勇.基于小波包分析的录波数据压缩原理[J].电力自动化设备,2004,24(7):53-56.
- [4] 潘文霞,李春林,史林军.基于最佳小波包基的电能质量暂态数据压缩[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(3):50-54.
- [5] 闫常友,杨奇逊,刘万顺.基于提升格式的实时数据压缩和重构算法[J].中国电机工程学报,2005,25(9):6-10.
- [6] 王学伟,孙金凤,王琳.基于整数小波变换的 Ray-Period 压缩算法[J].电网技术,2008,32(7):46-50.

- [7] mer Nezih Gerek ,Dogan Gökhan Ece. 2 - D Analysis and Compression of Power Quality Event Data [J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2004 ,19(2) : 791 - 798.
- [8] mer Nezih Gerek ,Dogan Gökhan Ece. Compression of Power Quality Event Data Using 2D Representation [J]. Electric Power Systems Research 2008 ,78(6) : 1047 - 1052.
- [9] 鲍文,周瑞,刘金福. 基于二维提升小波的火电厂周期性数据压缩算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(29):96-101.
- [10] 王永玉,孙衢,袁超伟. 基于整数小波变换和SPIHT编码的录波数据压缩算法[J]. 继电器 2008,36(11):50-54.
- [11] 郝蔓钊. 电能质量监测数据的数据压缩[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [12] 高山. 基于小波包变换的多级树集合分裂编码算法研究[D]. 西安:西安科技大学,2009.
- [13] 刘毅,周维维,冯浩. 电能质量监测网录波数据压缩方法[J]. 电网技术 2010,34(4):199-203.
- [14] 柯慧. 电能质量数据压缩算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [15] 胡志坤,何志敏,安庆,等. 基于二维DCT的电能质量监测数据压缩方法[J]. 中南大学学报,2011,42(4):1021-1027.
- [16] 郑伟彦,吴为麟. 基于混合小波包的电能质量数据压缩算法[J]. 电工电能新技术 2010,29(3):8-11.
- [17] 丁屹峰,程浩忠,占勇,等. 基于PQDIF格式压缩的电能质量数据模型[J]. 继电器 2005,33(7):55-58.
- [18] 朱宏涛. 电网数据采集系统建模与数据压缩品质影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

(收稿日期:2011-10-08)

(上接第25页)

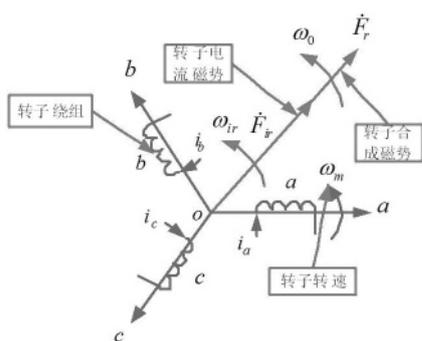


图4 正常时转子合成磁势的原理

发电机的并网故障如图5所示,转子合成磁势

\dot{F}_r 的频率约为 $f = 43.33 - 6.67 = 36.66$ Hz,感应出的定子电压频率约为 36.66 Hz。

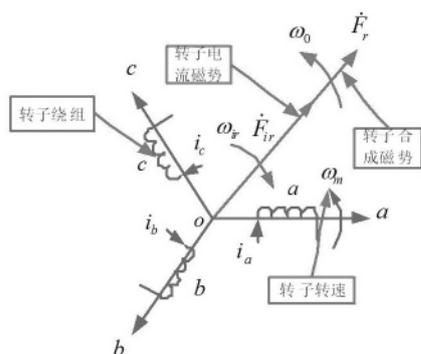


图5 非正常时转子合成磁势的原理

此时,只要调换任意两根转子接线,就可使转子

合成磁势 \dot{F}_r 频率正常。

2.5 相位不同步的原因

定子电压的相位控制是分两步完成的。

第一步,通过PLL测量电网电压的相角 θ_u ,计算转子旋转后的相角 $\theta_2'' = \int_0^t \omega_m dt$,使得转子电压相角

$\theta_{ru} = \theta_u + \pi/2 - \theta_2''$,这就是频率控制的原理。

第二步,计算出定子电压的相角 θ_{su} 、电网电压的相角 θ_u ,然后取其差值 $\theta_{offset} = \theta_u - \theta_{su}$ 即是补偿相角。取 $\theta_{ru} = \theta_u + \pi/2 - \theta_2'' + \theta_{offset}$,这个相角即可使定子电压的相位同步。

变流器从第一步进入第二步,是有条件的,那就是变流器先检测定子电压的 d 、 q 分量是否满足要求。

从轴伸端看,B厂家的发电机转子绕组 a-b-c 为顺时针排列,定子电压为负序,经 $d-q$ 变换后的为二倍频正弦,不能满足变流器进入第二步的条件。变流器始终停留在第一步,而不能进入第二步进行相位同步操作。任意调换定子的两根接线后,相位不同步的问题得以解决。

3 结 语

分析了一例双馈发电机的实验故障,总结出变流器的软件配置与双馈发电机配置两者的兼容非常重要。如果变流器的软件配置与发电机的配置不兼容,可能导致发电机无法并网,或者并网后对发电机造成损害。

参考文献

- [1] 苑国锋,柴建云,李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报 2005,25(8):90-94.
- [2] 郎永强. 交流励磁双馈电机风力发电系统控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [3] 王永,沈颂华,关森. 新颖的基于电压空间矢量三相双向整流器的研究[J]. 电工技术学报 2006,21(1):104-110.

(收稿日期:2011-08-31)

电能计量装置故障分析与差错电量计算

万忠兵

(广安电业局 四川 广安 638000)

摘要:根据现场实测一例 10 kV 高压三相三线电能计量装置的误接线数据,通过分析其错误接线方式,归纳实际的错误接线分析方法,并求出无需具体功率因数值的更正电量,使差错电量的计算更加准确。

关键词:电能计量装置; 错误接线分析; 功率因数; 电量计算

Abstract: Based on the data of faulty wiring of a 10 kV HV three-phase three-wire electrical energy metering device measured in the field, the analysis methods of faulty wiring are summed up by analyzing the faulty wiring, and the corrective quantity of electricity is calculated without specific power factor, which makes the calculation of error quantity of electricity more accurate.

Key words: electrical energy metering device; faulty wiring analysis; power factor; electricity quantity calculation

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0031-03

0 引言

电能计量装置是供用双方进行贸易结算的依据,由电能表、计量用电压、电流互感器及其二次回路、电能计量柜等构成。电能计量装置接线正确、装置本身误差合格是电能计量装置实现准确计量的两个必要条件。电能计量装置本身误差经检定后方可投入使用,在运行过程中由误差引起的计量差错较少,影响电量也较小。电能计量装置接线错误引起的电量差错较大,需对故障及时分析处理,并准确退补差错电量。下面以一例 10 kV 高压三相三线计量的大客户计量装置错误接线为例,总结计量差错分析方法,准确计算不用具体功率因数的故障期间正确电量。

1 计量差错实例

广安市一施工用电负荷,采用 10 kV 供电,安装有两台 500 kVA 变压器,两台变压器并列方式运行,计量点分别设置在两台变压器高压侧,采用三相两元件高压组合互感器方式计量,其接线方式与计量方式如图 1。

低压无功是两套无功集中自动补偿,补偿屏上显示为滞后 0.98 ~ 1.0。

2 故障分析

2.1 相量图绘制

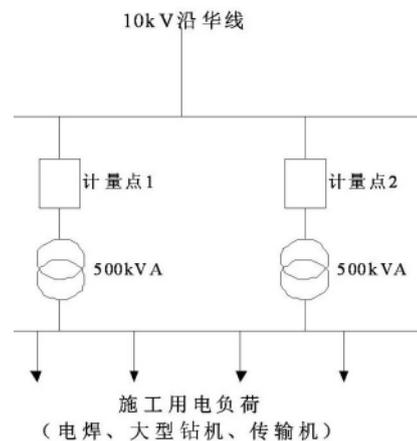


图1 客户主接线与计量点设置图
根据测试数据分析,画出两个计量点的相量图如下。

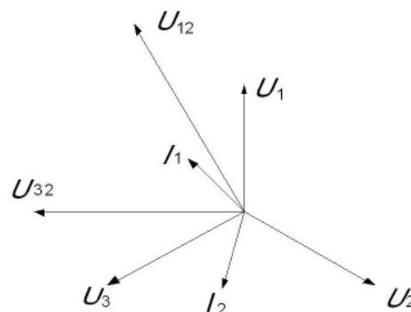


图2 计量点1相量图

2.2 故障接线情况分析

根据已知条件,计量点采用组合互感器计量,电

表1 2011年4月25日现场检测两计量点数据

计量点	U_{12}/V	U_{32}/V	I_1/A	I_2/A	$U_{12} \wedge I_1$	$U_{32} \wedge I_2$	$U_{12} \wedge U_{32}$
计量点1	103.49	103.88	1.21	1.22	342.5°	283.4°	300.5°
计量点2	102.89	103.11	1.20	1.22	45.2°	345.8°	300.2°

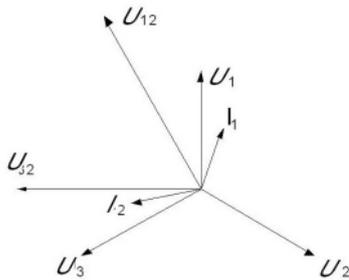


图3 计量点2相量图

压幅值正常,电压不存在极性接反的情况,负载性质为感性,分析两计量点的相量图,初步判定计量点1相量图异常,计量点2相量图正常。

由于该用户采用两台变压器并列运行方式,由于变压器型号、规格、参数均相同,低压侧采用单母线的接线方式,两台计量装置计量的功率应基本相同,电流、电压的相位、幅值应基本相同。

由于负载的性质为感性, $\cos\Phi = 0.98$ 左右,电流应滞后相电压 14° 左右,计量点1的相量图中,两相电流均不满足以上条件,初步分析为电流极性接反。根据以上假定,绘出两相电流均接反的相量图如图4。

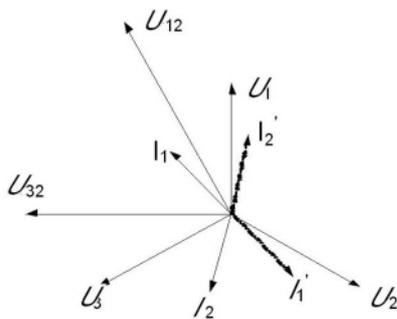


图4 电流极性反接相量图

从上图中可以看出 I_1' 滞后 U_2 约 15° 左右, I_2' 滞后 U_1 约 15° 左右,满足负载为感性约 15° 的条件。由于计量点采用三相两元件的计量方式, I_1' 与 U_2 为同相电流电压, I_2' 与 U_1 为同相电流电压, U_3 无电流,故确定 U_3 为 V 相电压。由于已知测试的相序为正相序, U_3 为 V 相电压,则电压的接入顺序为 WUV。根据 I_1' 与 U_2 为同相电流电压,可以确定第一元件为 U 相电流反相接入。同理,可以确定第二元件为 W 相电流反相接入。

根据上述分析,绘制出故障情况下对应的相量图

如图5。

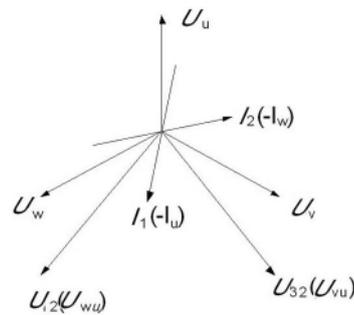


图5 错误接线相量图

2.3 相量图分析方法小结

相量图分析法是用现场实测的三相电压电流相量图中各相电压电流的相序、相位关系,以及已知的电力负荷性质,分析判定电能表实际接线方式的方法。结合以上实例分析,三相三线电能表接线相量分析方法主要有以下步骤。

2.3.1 电能表回路参数测试

①电压:应测试电能表的三个线电压,判定电压是否正常,有无失压或反极性。

②电流:应测试电能表两个元件的电流,判定电流是否正常,有无分流或断相。

③相位角:应测试第一元件电压、电流,第二元件电压、电流的相位关系。为了确定相序,还需要测试第一元件电压与第二元件电流(也可以选第二元件电压对第一元件电流)的相位关系,通过同一电流对两个元件电压的相位差,判定电能表电压的接入相序。当第一元件电压与第二元件电流的相位角减去第二元件电压与第二元件电流的相位角等于 300° 时为正相序,等于 60° 时为逆相序。

2.3.2 相量图绘制

①绘制基准电压相量图:根据电压极性不反的正相序和逆相序的6种电压接入情况,加在元件上的电压相量始终位于两个相电压的相量之间,其基准电压相量图如下。

正相序基准电压相量图如图6,无论电压是按 UVW、VWU、WUV 相序接入,均可按图6画出准电压相量图。

逆相序基准电压相量图如图7,无论电压是按

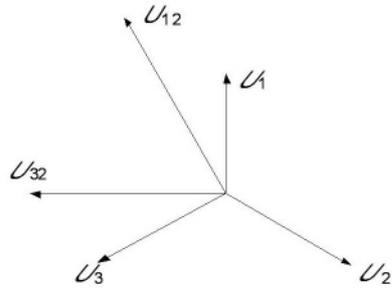


图6 正相序基准电压相量图

UWV、VUW、WVU 相序接入,均可按图7画出基准电压相量图。

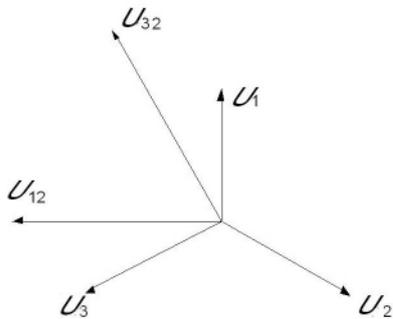


图7 正相序基准电压相量图

②绘制电流相位图:根据现场实测的各元件的电流与电压的相位关系,在正相序或逆相序基准电压相量图上绘制出电流、电压的相量图。相量图绘制时,应以各元件的电压为基准,顺时针方向旋转至相应的角度,并标注相应的元件编号。

2.3.3 故障情况分析

由于中性点绝缘系统采用三相两元件的计量方式,无V相电流,根据已知的功率因数性质,电流与同相电压应符合已知的功率因数角度的要求,由此可以确定无电流相为V相电压。V相确定后,根据已知的相序,可以确定其他相电压的接入情况。根据电流电压的相位关系,即可确定电流的接入情况。

3 差错电量计算

通过对故障情况的分析,可由误接线时功率计算表达式和正确接线时功率计算表达式求得更正系数,通过更正数即可求出差错电量。但更正系数中均有功率因数角相关的函数参数,用户的功率因数是随着负荷变化而变化,不是一个恒定值,从而使更正系数有一定的误差,计算出的电量与实际消耗电量存在差别。

高供高计电能计量装置能同时计量有功电能和无功电能,在计量装置误接线时,有功电能和无功电能同时出现计量差错,可以根据有功电能误接线时功率计算表达式和无功电能误接线时功率计算表达式以及有功电能、无功电能读数求得较准确的实际消耗电量,计量过程中约去功率因数,从而消除功率因数带来的误差影响。

由更正系数的定义和功率三角形可推出以下公式。

$$G_P = P_{正} / P_{误} = W_{P正} / W_{P误} \quad (1)$$

$$G_Q = Q_{正} / Q_{误} = W_{Q正} / W_{Q误} \quad (2)$$

$$\text{tg}\varphi = Q_{正} / P_{正} = W_{Q正} / W_{P正} \quad (3)$$

上述故障情况中,电压接入顺序为WUV,第一元件为U相电流反相接入,第二元件为W相电流反相接入。错误接线的功率表达式为

$$P_{误} = U_{wu} I_u \cos(330^\circ + \Phi) + U_{uw} I_w \cos(270^\circ + \Phi) \\ = 1/2 UI \cos(\sqrt{3} \cos\varphi + 3 \sin\varphi) \quad (4)$$

$$P_{正} = U_{uv} I_u \cos(30^\circ + \Phi) + U_{vw} I_w \cos(30^\circ - \Phi) \\ = \sqrt{3} UI \cos\varphi \quad (5)$$

更正系数为

$$G_P = P_{正} / P_{误} = \sqrt{3} UI \cos\varphi / (1/2 UI \cos(\sqrt{3} \cos\varphi + 3 \sin\varphi)) = \frac{2}{1 + \sqrt{3} \text{tg}\varphi} \quad (6)$$

无功电能由电压滞后90°获得,则由相量图可知

$$Q_{误} = U_{wu} I_u \cos(240^\circ + \varphi) + U_{vw} I_w \cos(180^\circ + \varphi) \\ = 1/2 UI \cos(\sqrt{3} \sin\varphi - 3 \cos\varphi) \quad (7)$$

$$Q_{正} = U_{uv} I_u \cos(60^\circ - \Phi) + U_{vw} I_w \cos(120^\circ - \Phi) \\ = \sqrt{3} UI \sin\varphi \quad (8)$$

更正系数为

$$G_Q = Q_{正} / Q_{误} = \sqrt{3} UI \sin\varphi / (1/2 UI \cos(\sqrt{3} \sin\varphi - 3 \cos\varphi)) = \frac{2}{1 - \sqrt{3} \text{ctg}\varphi} \quad (9)$$

将式(1)代入式(6)得

$$W_{P正} / W_{P误} = \frac{2}{1 - \sqrt{3} \text{tg}\varphi} \quad (10)$$

将式(3)代入式(10)得

$$W_{P正} = 2 W_{P误} - \sqrt{3} W_{Q正} \quad (11)$$

将式(2)代入式(9)得

$$W_{Q正} / W_{Q误} = \frac{2}{1 - \sqrt{3} \text{ctg}\varphi} \quad (12)$$

(下转第56页)

数据带回模型的约束条件中,将使计算结果更趋合理。

(3) 锦屏1、2级电站总共有14台大容量机组,调节范围大,运行方式灵活,在出力分配上应结合机组的效率区和振动区,结合水库水位控制及来水情况,科学优化分配机组负荷,降低耗水率。

(4) 实际运行中,同级电站的各机组效率不可能完全相同,若据实际情况带入各机组效率,让效率高的机组优先带负荷运行,也能使模型得到优化。

(5) 在事故情况或调度要求紧急调频情况下,可优先将负荷分配给2级机组短时运行,发挥2级的日调节库容的作用。

该部分主要提出了锦屏电站总负荷在1、2级站内机组分配的一种计算模型,使之能计算出各机组的最优负荷分配,并提出了对计算模型的改进意见,以期能在站内AGC的原理设计中起到一定的参考作用。

2 结 语

做好锦屏电站投运后枯期运行分析对保证电力系统安全和在满足系统各项指标的前提下最大程度节约水资源,从而充分发挥电站效益有着非常重要的意义。仅在一定条件下做了研究尝试。电站投产后枯期运行时锦屏1、2级电站负荷不统一安排情况下的优化调度等问题还需实际验证分析。

参考文献

- [1] 田开华,王旭东.二滩水电站枯水期经济运行及改善方法探讨[J].水电站机电技术,2005,28(5):54-55.
- [2] 孟祥萍,高嫵.电力系统分析[M].北京:高等教育出版社,2004.

(收稿日期:2011-10-17)

(上接第33页)

将式(3)代入式(12)得

$$W_{Q正} = 2W_{Q误} + \sqrt{3}W_{P正} \quad (13)$$

将式(11)和式(13)联合求解得

$$W_{P正} = W_{P误}/2 - \sqrt{3}W_{Q误}/2 \quad (14)$$

$$W_{Q正} = W_{Q误}/2 + \sqrt{3}W_{P误}/2 \quad (15)$$

由于错误接线情况下的有功电能和无功电能可以根据实际抄见电量计算,正确电量即可根据抄见有功和无功电量计算得出,消除了功率因数不恒定的影响,保证差错电量计算的准确性。

若按计量点2记录的加权平均功率因素0.92值代入更正系数计算故障期间的正确电量为

$$\begin{aligned} W_{P正} &= G_P \times W_{P误} \\ &= \frac{2}{1 - \sqrt{3}\text{tg}\varphi} \times W_{P误} \\ &= 251\,488 \text{ kWh} \\ W_{Q正} &= G_P \times W_{Q误} \\ &= \frac{2}{1 - \sqrt{3}\text{ctg}\varphi} \times W_{Q误} \\ &= 55\,162 \text{ kvar} \end{aligned}$$

用上述计算出的电量反推回去计算该线路的损耗为3.79%,与全年累计线损损率3.12%相差较大。

按错误计量期间的实际计量的有功电量和无功电量计算故障期间的正确电量为

$$\begin{aligned} W_{P正} &= W_{P误}/2 - \sqrt{3}W_{Q误}/2 \\ &= 267\,485 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{Q正} &= W_{Q误}/2 + \sqrt{3}W_{P误}/2 \\ &= 43\,744 \text{ kvar} \end{aligned}$$

用上述计算出的电量反推回去计算该线路的损耗为3.20%,与全年累计线损损率3.12%非常接近,故此方法计算值更接近实际值。

4 结 语

通过对10 kV高压三相三线计量装置现场测试电流、电压、相位的测试数据,采用相量图分析方法,可以确定计量装置接线的接入情况,并可推算出故障情况下的差错更正系数。通过更正系数的公式代换计算,采用故障期间的错误有功电量和无功电量计算出故障期间的正确有功电量和无功电量,减少了由于功率因数不恒定带来的电量计算影响,电量的计算更加准确。

参考文献

- [1] 鲍卫东.电能计量装置接线差错时电量计算方法探讨[J].电测与仪表,2007,44(6):26-30,23.
- [2] 孟凡利,祝素云,李红艳.运行中电能计量装置错误接线检测与分析[M].北京:中国电力出版社,2006.

(收稿日期:2011-11-07)

电能计量在线监测系统应用实例及分析

李 剑

(四川省电力公司资阳公司 四川 资阳 641300)

摘 要:通过简要介绍目前电能计量检定的实际生产水平和发展趋势,引出电能计量在线监测系统;进一步介绍了电能计量在线监测系统的组成和关键技术;详细介绍了电能计量在线监测系统主要功能的实现原理。通过数据收集,介绍了电能计量在线监测系统在110 kV龙台变电站的应用实例。

关键词:计量装置;电能表;互感器;电压降;在线监测

Abstract: The actual production level and the development trends of current electrical energy metering and examination are briefly described, and then the online monitoring system of electrical energy metering is introduced. Furthermore, the components and key technologies of online monitoring system of electrical energy metering are introduced as well as its realization principles of main functions in detail. Through data collection, the application examples of online monitoring system of electric energy metering in 110 kV Longtai Substation are introduced.

Key words: metering device; kilowatt-hour meter; transformer; voltage drop; online monitoring

中图分类号:TM930.9 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0034-05

0 引言

随着中国国民经济的快速发展,同时随着中国电力工业的快速发展,社会对供电的可靠性和电能质量提出了更高的要求。要保证电网的长期安全稳定运行,必须在提高电网管理水平的时候,也加强电网建设。电能计量装置的检定记录是电网运行技术经济指标核算的基础,更是贸易双方结算电费的法定依据。因此,对电能计量装置的管理工作也是尤为重要;电能计量装置管理的目的是为了保证电能计量值的准确、统一和电能计量装置运行的安全可靠。为保证计量准确,必须按照SD 109-1983《电能计量装置检验规程》和DL/T 448-2000《电能计量装置技术管理规程》进行检验。

1 电能计量检定实际生产力和今后的发展方向

电能计量装置包括各种类型电能表、计量用电压互感器(简称TV)及其二次回路、计量用电流互感器(简称TA)及其二次回路、电能计量柜(箱)等。各类电能计量装置应配置的电能表、互感器的准确度等级不应低于规程要求值。如:I类电能计量装置配置

0.2S或0.5S级有功电能表,0.2级TV,0.2S级TA;II类电能计量装置配置0.5S级电能表,0.2级TV,0.2S级TA;III类电能计量装置配置1.0级电能表,0.5级TV,0.5S级TA;规程对各类电能计量装置现场检验做出了严格的规定。如:I类电能表至少每3个月现场检验一次,II类电能表至少每6个月现场检验一次,III类电能表至少每年现场检验一次;高压互感器每10年现场检验一次,当现场检验互感器误差超差时,应查明原因,制订更换或改造计划,尽快解决,时间不得超过下一次主设备任务检修完成日期;运行中的电压互感器二次回路电压降应定期进行检验,对35 kV及以上电压互感器二次回路电压降,至少每两年检验一次,当二次回路负荷超过互感器额定二次负荷或二次回路电压降超差时应及时查明原因,并在一个月内处理。

电力公司目前采用的对计量器具的测试大多数采取实验室校验后投入现场使用,但是这种方法目前来看有如下的一些弊端。

(1) 试验室和现场的情况有很大的不同,如温湿度等,导致一些设备现场测试结果和实验室测试结果有很大不同。

(2) 试验室无法得出设备现场实际带负载情况,如电压互感器、电流互感器的负荷不停变化,而实验室检定互感器时用固定的负载来模拟现场负载。

(3) 试验室无法得到适时电压互感器二次压降值。

同时,当需要现场校验电流、电压互感器误差时,需要停电操作,同时所需携带设备笨重,接线复杂,工作量大;且还具有检定人员出现操作错误时易造成的安全事故。为此,所介绍的电能计量在线监测系统应用和吸收了计算机、传感器、通信和网络、数字信号处理以及智能诊断等技术的最新成果,可实现计量设备检定从传统方式向优化决策的转变,实现计量设备的状态监测和基于状态的优化检修方案,减少停电试验工作量和维护费用,提高系统供电可靠性,提高设备维护效率,以及及时发现设备故障,减少突发性事故损失等。电能计量装置在线监测应是今后计量检定工作的发展方向。

2 电能计量在线监测系统简介

电能计量在线监测系统是一种针对电能计量装置管理工作而开发设计的自动化工具;实现了实时在线地实现对电能表的远程校验、TV特性参数以及二次回路的监测、TA特性参数以及二次回路的监测,并且在主站可以将所有数据进行集中管理。通过应用电能计量在线监测系统,计量管理人员就可以及时发现计量装置的故障,并立即通知处理,而且系统能够记录故障发生时的负荷曲线。当计量装置误差超限时,计量管理人员也更容易及时发现、及时处理。

电能计量在线监测系统主要由两个组成部分:现场监测终端和主站管理中心。整个电能计量在线监测系统分层设计,每层之间采用标准的通讯或接口协议,每层的功能标准化、模块化,每个模块完成特定的功能,可根据需要增加或减少模块,模块可即插即用,使系统有很高的可靠性和很大的组网和扩展灵活性。

2.1 现场监测终端

实现对现场各个接入的电能计量点的校验信号采集、分析处理、结果存储,并支持本地/远程通讯,可实现与本地/远程计算机进行数据传输、参数修改、远程遥控等。

2.2 主站管理中心

作为系统远程控制中心,对现场终端监测数据、测试参数及远程测试的统一管理中心,也可作为主站web发布数据服务器,为数据的web网络共享提供数据源。

2.3 同步测量技术

由于测量二次压降时,TV二次侧的电压采集与仪表侧的电压采集一般不在一个现场终端上,因此需要不同终端同步进行采集。

2.4 安全性及可靠性

(1) 为保证一次运行设备的安全,电能计量在线监测系统在它与一次系统的连接环节上采取了隔离及保护措施。

(2) 电流交流测量回路选用自行设计的穿心式电流互感器,通过磁耦合方式测量一次电流,与一次系统没有电的联系并不改变一次系统原有的接线方式。

(3) 穿心式电流互感器一次穿心引线与二次线圈间有足够的耐操作冲击和雷冲击的水平,而且从交流测量回路进入电子电路部分有放电保护管保护电子电路部分免受过电压的侵害,因此,即使一次发生闪电事故,也不会影响损坏在线监测系统。

(4) 电压交流测量回路选用自行设计的高精度隔离电压互感器测量系统电压,为防止接入测量TV的一次和二次侧发生短路事故,在一次侧加入保险丝,二次侧加入限流阻抗。

2.5 可靠性设计

(1) 电能计量在线监测系统可靠性设计的关键,除了前面谈到的电流互感器系统的设计外,电磁兼容的设计是不可忽视的环节。

(2) 在测量微弱信号时,互感器本体对空间磁场以及互感器二次绕组对杂散电容有相当的敏感度,会直接影响测量的稳定度,为此在传感器电磁屏蔽环节采取专门的措施。

(3) 信号传输线采用双层屏蔽电缆。

(4) 电源系统采取了隔离、屏蔽与滤波措施。

(5) 现场采集终端采用软硬件WATCHDOG技术。

3 主要功能介绍

3.1 技术简介

电能计量在线监测系统采用高集成设计,其所有监测功能模块(除主站管理计算机及软件外)均集中在一个标准计量屏柜中;通过敷设各种信号电缆,将被监测回路的各种信号引入到系统终端中进行采集;该设计使得系统现场监测终端结构紧凑、现场安装方便,具有很高的可靠性和稳定性。电能计量在线监测

系统需采集的信号有: TA 二次电流信号、TA 二次端电压信号、TV 二次端电压信号、电能表端电压信号、电能表电脉冲信号。如图 1 所示。

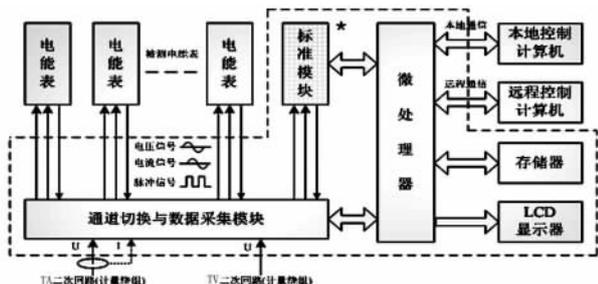


图 1 电能计量在线监测系统原理框图

3.2 TV 二次压降在线监测

在发电厂和变电站中,从现场装设的电压互感器到控制室内的电度表之间的二次连接导线往往较长,且中间往往有各种开关、继电器触点、端子排等,这些都存在一定的电阻值。随着运行时间的增加,由于老化、锈蚀等原因,电阻还会不断加大。如果二次所接表计、继保装置及其他负荷较重,负荷电流也较大,同时还有负载功率因数、接线方式、外磁场在二次回路中感生的电势等都会影响和产生 TV 二次回路的电压降。实际运行中,这部分压降造成的误差往往比电能表和电压互感器本身的误差大的多,以至严重影响电能计量的准确性。根据 DL 448 - 2000 《电能计量装置管理规程》中规定:电压互感器二次回路的压降值,对于 I 类及 II 类计量装置不能超过 0.2%,对于以下的计量装置不能超过 0.5%。其方法如图 2 所示。

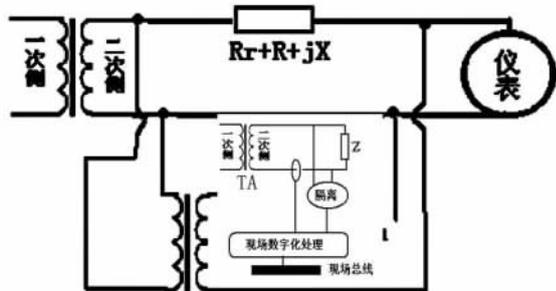


图 2 压降测试原理

该方法的原理是用一个高等级的标准电压互感器把 TV 侧的电压隔离后与仪表侧电压组成侧差回路,然后把差压信号送入校验仪,由校验仪测出二次压降的比差、角差,此方法具有数据测试稳定、精度较高的特点。与人工测试方法不同的只是系统将临时拖放的测试电缆以布线的方式固定下来,通过其内部

专用的电路模块来完成电压的测量和比较计算。电压引入端设计了过流保护措施。

3.3 TA 二次负荷测试

TA 二次负荷测试原理见图 3。

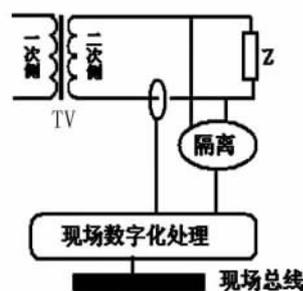


图 3 TA 二次负荷测试原理

通过高精度的穿心式电流互感器来测量二次电流 I ,并通过敷设信号电缆至 TA 二次端子箱采集 TA 二次端电压 U ,由公式 $S = U \times I$ 计算出 TA 实际二次负荷及相应的负荷功率因数。

3.4 电能表校验

对电能表误差的测试方法采取目前常用的标准比较法,即校验时将被检表的电压和电流信号进行切换使校准表与其相同,通过比较被检表与标准表的电能脉冲信号来计算被检表的误差。采用内置高精度标准表,现场将被监测电能表的脉冲引入系统脉冲端口,经信号整形和预处理后,被测电表的脉冲送入微处理器与系统内部的标准电能脉冲进行比较、计算,得到电能表的误差。测试原理如图 4 所示。

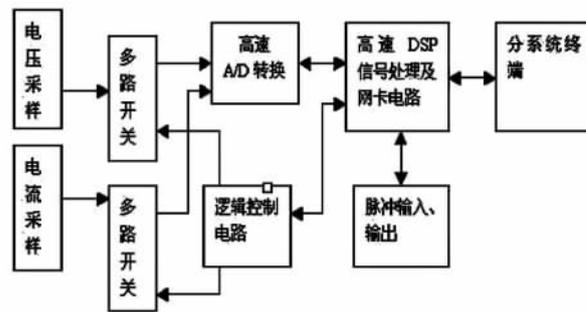


图 4 电能表误差测试原理

4 应用实例说明

4.1 应用实例 1

收集了电能计量在线监测系统在 110 kV 龙台变电站的运行数据,如表 1 所示。该监测数据显示(数据记录间隔为 1 小时),在 2008 年 5 月 12 日 14:26 前(地震前),监测的 TV 二次回路压降值正常,但,

表1 龙台变电站实测数据1

监测时间	A相		B相		C相	
	压降/V	相位差/°	压降/V	相位差/°	压降/V	相位差/°
2008/05/12 13:26	0.122	5.62	0.172	-0.88	0.169	6.23
2008/05/12 14:26	0.145	5.35	0.175	-0.95	0.152	6.38
2008/05/12 15:28	0.472	-18.38	0.496	-17.08	0.487	-19.03
2008/05/12 16:28	0.507	-19.21	0.592	-19.12	0.507	-20.13
2008/05/12 17:27	0.509	-20.08	0.587	-19.07	0.509	-20.15
2008/05/12 18:26	0.505	-20.07	0.586	-19.06	0.505	-20.17
2008/05/12 19:26	0.511	-20.11	0.587	-19.07	0.508	-20.28
2008/05/12 20:26	0.509	-20.07	0.589	-19.11	0.503	-20.22
2008/05/12 21:26	0.510	-20.09	0.591	-19.33	0.503	-20.23
2008/05/12 22:26	0.511	-20.03	0.592	-19.09	0.502	-20.21
2008/05/12 23:26	0.509	-20.05	0.591	-19.04	0.507	-20.22
2008/05/13 00:27	0.507	-20.07	0.587	-19.44	0.505	-20.14
2008/05/13 01:27	0.507	-20.09	0.589	-19.27	0.505	-20.23
2008/05/13 02:27	0.509	-20.05	0.587	-19.09	0.506	-20.25
2008/05/13 03:27	0.510	-20.07	0.587	-19.06	0.505	-20.22
2008/05/13 04:27	0.509	-20.08	0.589	-19.28	0.509	-20.21
2008/05/13 05:27	0.508	-20.03	0.587	-19.13	0.505	-20.23
2008/05/13 06:27	0.507	-20.05	0.591	-19.24	0.503	-20.12

龙台变电站 电能计量在线监测系统监测的压降数据: 对应电能表 12305553

表2 龙台变电站实测数据2

监测时间	电压/V			电流/A			有功误差/%
	A相	B相	C相	A相	B相	C相	
2008/05/12 13:26	60.3	60.2	60.3	2.05	2.01	2.06	0.071
2008/05/12 14:26	59.7	59.6	59.3	1.23	1.23	1.23	0.052
2008/05/12 15:28	59.5	59.7	59.5	1.67	1.55	1.62	0.063
2008/05/12 16:28	59.6	59.8	59.4	2.13	2.01	2.09	0.044
2008/05/12 17:27	59.4	59.6	59.5	1.89	1.78	1.83	0.076
2008/05/12 18:26	59.5	59.7	59.5	1.54	1.63	1.57	0.036
2008/05/12 19:26	59.4	59.5	59.5	1.01	1.08	1.06	0.077
2008/05/12 20:26	59.5	59.4	59.5	0.95	0.89	0.98	0.065
2008/05/12 21:26	59.7	59.5	59.6	1.74	1.80	1.77	0.071
2008/05/12 22:26	59.4	59.6	59.3	1.65	1.71	1.74	0.087
2008/05/12 23:26	59.6	59.8	59.6	2.32	2.33	2.26	0.056
2008/05/13 00:27	59.7	59.6	59.5	1.86	1.81	1.88	0.045
2008/05/13 01:27	59.4	59.5	59.7	1.55	1.43	1.54	0.056
2008/05/13 02:27	59.6	59.7	59.8	1.67	1.61	1.76	0.043
2008/05/13 03:27	59.9	59.7	59.3	2.12	2.32	2.28	0.076
2008/05/13 04:27	59.3	59.5	59.5	2.44	2.34	2.54	0.078
2008/05/13 05:27	59.7	59.4	59.6	1.86	1.91	1.97	0.093
2008/05/13 06:27	59.5	59.8	59.3	1.43	1.38	1.39	0.066

龙台变电站 电能计量在线监测系统监测的电能表误差数据: 对应电能表 12305553

2008年5月12日15:28以后,监测的TV二次回路 压降值发生突变,且明显超出规定门限。

针对该问题发生的时间为2008年5月12日,并且该压降发生突变的前后,正好发生在5月12日14:28地震前后,因此,推测地震引起该超差现象。初步推断:地震导致TV二次回路中的某接点或线路松动、接触不良或受损,引起TV二次回路压降突然增大,超出规定范围。因此,首先对被监测TV二次回路的各个接点及线路进行排查,同时进行加固处理;经过对该TV二次回路所有接点进行加固处理后,被监测TV二次回路压降回复正常值,即,与发生突变前一致。经过上述现场排查,得出该故障情况的结论是:地震导致TV二次回路中的接点松动、接触不良或受损。现场处理后,线路回复正常。

4.2 应用实例2

截取了电能计量在线监测系统在110 kV龙台变电站在2008年5月12日13:26至2008年5月13日06:27的运行数据,如表2所示。该监测数据显示“5.12”地震期间,电能表12305553运行稳定、误差良好。

5 结 语

通过电能计量在线监测系统的实践应用,改善了目前存在对电能计量装置的检测手段落后、单一、整个二次回路的监测和故障检测困难、提高电能计量准确性及电量追补的科学性等问题;减少了电能计量外勤工作人员的大量现场校验工作,提高了工作效率;减少了变电站运行设备的停电检测时间;实现了电能

计量装置管理无纸化,提高了计量装置运行状况监测和维护管理水平,进一步保证电能计量装置的安全性、准确性、可靠性。

不过目前该电能计量在线监测系统在实际应用还存在不足,如系统单台设备监测容量偏小,可扩展(如可监测30条线路),以实现单台监测设备对厂站内的所有计量装置进行监测,提高系统适用性。目前,系统母线TV切换功能为手动切换,需人为辅助操作,该功能还有改进空间,应能实现系统自动识别、切换,达到真正的自动切换目的。

同时,随着智能电网的建设,网络化、数字化、智能化将是针对智能电网智能量测系统的计量装置的电能计量在线监测系统的发展趋势。

参考文献

- [1] DL/T 448-2000 电能计量装置技术管理规程 [S].
- [2] SD 109-1983 电能计量装置检验规程 [S].
- [3] 白洋. 电能计量装置远程校验监测系统 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(7): 30-32.
- [4] 鹿凯华, 赵斌. 关口电能计量装置误差的实时监测 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2008(4): 50-52.
- [5] 卢树峰. 关口电能计量装置的现状分析与思考 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(8): 21-23, 8.
- [6] 罗志坤, 滕马胜, 万全. 高压电能计量装置远程校验与监测系统及其应用 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(2): 172-175.

(收稿日期:2011-10-20)

(上接第11页)

- Tool for Steady State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [3] Canizares C. A., Alvarado F. L.. Point of Collapse and Continuation Methods for Large ac/dc Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
 - [4] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu. CP-FLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634
 - [5] S. H. Li, H. D. Chiang. Nonlinear Predictors and Hybrid

Corrector for Fast Continuation Power Flow [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2008, 2(3): 341-345.

- [6] 蔡伟程, 代静. 对求取电力系统PV曲线的连续潮流法的改进 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 82-85.
- [7] Mori H., Yamada S.. Continuation Power Flow with the Nonlinear Predictor of the Lagrange's Polynomial Interpolation Formula [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, 2: 1133-1138.

(收稿日期:2011-09-30)

调度运行过程管理系统的设计与应用

刘青丽,尹琦,任铃
(德阳电业局,四川德阳 618000)

摘要:从系统设计、系统主要功能等方面介绍了调度运行过程管理系统,系统采用 workflow 平台、停电检修打包管理、模块关联等创新技术,具有较大的应用价值和推广价值。实际运行情况表明,该系统可以降低调度运行值班员劳动强度,提高调度工作的效率,有效地防止误调度事故的发生。

关键词:调度运行过程管理系统;调度运行;工作流;关联

Abstract: As viewed from the design and main functions, the dispatching process management system is introduced. The system uses the innovative technologies such as work flow platform, package management to maintenance outage and module association, which has a greater application and promotion value. The actual operation shows that the system can reduce the labor intensity for dispatching personnel, improve the dispatching efficiency, and effectively prevent the occurrence of false dispatch.

Key words: dispatching process management system; dispatching operation; work flow; association

中图分类号:TM734 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0039-04

随着经济快速发展和电网规模的不断扩大,电力调度作为电网运行管理、倒闸操作和事故处理的指挥机构,调度各专业人员的工作量越来越大。德阳电网目前实现了值班记录电子化,调度指令票系统得到应用。但是各种记录、报表没有建立关联,指令票系统的数据没有被共享。数据的统计和分析工作量大,调度人员需要花费大量精力,且效率低下,容易产生差错。同时,调度运行与调度方式、保护等专业之间各业务系统相互独立,信息共享程度不高,信息交换缺乏专业、高效的平台。可见,当前调度运行管理的复杂程度和繁琐程度愈来愈不适应工作的发展。

调度运行过程管理系统围绕调度运行专业的相关业务,对其进行流程管理,实现了与原调度指令票系统的整合。建立调度运行专业与调度其他各专业的 workflow 平台。在业务的流转和执行过程中,各专业人员能够进行实时浏览和办理相关工作,而管理人员随时可通过该系统实时掌握工作的进展状况,可以对整个业务流程进行实时监督。通过关联技术系统自动生成与调度运行专业相关的各项记录和报表。因此,该系统不仅是调度运行专业的日志管理系统,而且是调度运行业务流程的技术支撑,加强对调度运行业务过程的控制,有效地提高调度管理水平和大幅度地减轻相关人员工作负担。

1 调度运行过程管理系统的设计

1.1 系统目标

调度运行过程管理系统应实现以下目标。

(1) 数据集中管理、规范、标准、开放。对内可以集中管理,对上可以汇总上报相关数据,实现生产管理信息系统的集中和统一,实现调度生产管理系统由面向功能到面向管理的转移。

(2) 系统应优化现有电网调度管理模式,强化电网调度的过程化管理,最大限度地减少在管理过程中的人为因素的随意性,为电网的安全稳定运行提供专家性意见。

(3) 为相关人员提供一个友好、实用、专业、高效的信息收集、管理、发布的工作平台,有效地提高调度管理水平和大幅度地减轻相关人员工作负担,实现电网调度运行工作的标准化、有序化和高效化。

1.2 系统结构

1.2.1 软、硬件结构

硬件系统:路由器、防火墙、服务器、用户使用客户端、打印机等;软件系统:Windows 2003 Server 操作系统、SQL 2000 数据库系统、主站 web 服务程序、客户端监控管理程序。

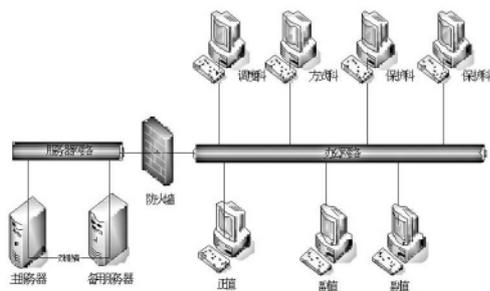


图1 网络结构

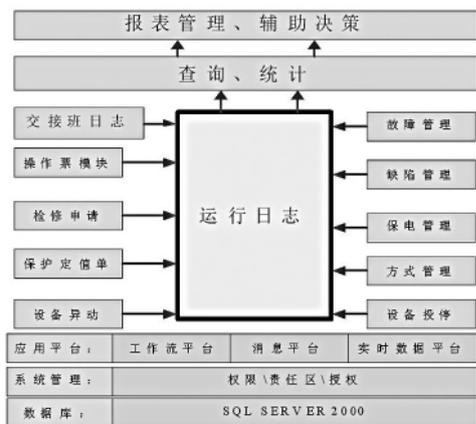


图2 软件结构

1.2.2 软件信息组织结构

调度运行过程管理系统,把各功能子系统以“模块”的方式集成到一起,直接共享系统内部所包含的数据资源,在最大程度上提高系统的性能及效能。

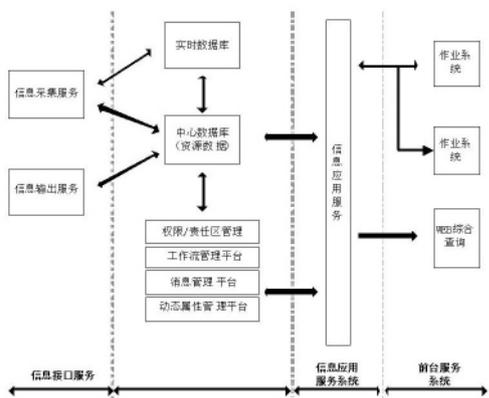


图3 系统信息组织结构图

1.3 系统功能

德阳电网调度运行管理系统采用完全的网路化结构进行设计,实现网络化的审批流程。在系统安全管理模块中,设计严密的权限管理系统,将工作中的每一个数据设置严格的权限,将运行和管理人员分开,值班运行和休息人员分开,计算机系统维护和电网工作人员分开。

该系统实现不同信息的分类记录,并按调度要求

实现关联记录的分类、汇总与统计、查询。提供方便的文字、图形录入、编辑工具,以及通用的甘特图、网络图、资源图表等管理工具,实现交接班管理、调度运行日志管理、调度运行日报管理、日调度计划书管理、继电保护管理、方式管理、检修申请管理等16项管理功能,其功能结构如图4所示。

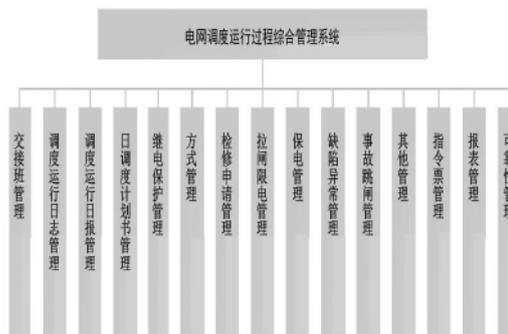


图4 系统功能结构

2 调度运行过程管理系统关键技术与创新

2.1 工作流平台

工作流平台是系统实现业务流程化的核心。工作流管理平台主要实现的就是流程控制参数化,通过对流转结点、流转条件、流转权限的控制,为实际流程的实现、流程优化和过程改进提供公共的技术支持。

根据可“配置重构”的平台设计原则及电网管理系统对工作流平台的实际需求,充分利用权限/责任区管理提供的强大功能,提出了“基于模块重构技术的工作流平台设计”的思想。通过抽象,得出流程控制元件的组合。用户可以在简单的鼠标操作中自动实现业务流程的再造,能快速响应不断变化的业务需求,无需更改代码,无需厂商支持,简单易用。

以工作流在检修申请中的应用为例,如图5所示,从创建申请票到归档,需要经过预审批、方式审批、保护审批、生成计划、现场答复、开工、完工等几个环节,在预审批节点,加入了一个判断节点,处理人可以选择该票是否为紧急申请票,如果紧急,则可以直接进行开工处理,不用再经过流程审批,提高了系统的灵活性。

工作流引擎保存流程的每一个历史环节,并用不同的颜色表示出历史痕迹,其中白色框及实线表示已经走过的环节,灰色框表示当前所在的节点,虚线框及虚线表示未流过的节点,管理人员一目了然地了解申请票的审批全过程。

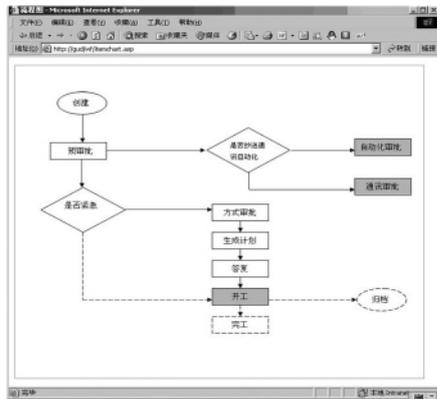


图 5 检修申请流程图

2.2 关联技术

以调度运行过程管理系统为基础平台,各个子系统(模块)既有相对的完整性,自成体系,但又与其他的系统功能(模块)保持密切关联性的设计原则,直接共享系统内部所包含的数据资源,提高系统的性能及效能。

系统中关联分为以下 4 种情况:一是检修申请之间的关联;二是调度业务流程与调度运行专业各项记录、报表之间的关联;三是检修申请、方式通知单、定值单与调度指令票间的关联;四是设备检修情况与日调度计划书关联。

2.2.1 检修申请之间的关联(即打包管理)

由于有配合检修的检修申请通常有多张申请,易造成遗漏。在检修申请的方式批复流程中,由方式专业将各生产单位上报的有配合停电关系的多张检修申请进行关联(即检修申请的打包),然后提交调度员执行。

通过将配合检修申请之间进行关联,有关联的所有检修申请被打包关联在一起,提醒调度员关注检修申请的配合情况,在停送电操作中注意相关申请的执行情况。

2.2.2 检修申请、定值单等与交接班、调度运行日志关联

根据调度运行管理工作的需要,在检修申请、定值单管理等调度业务模块的流转和执行过程中,自动生成调度运行专业各项记录、报表,比如交接班、调度运行日志,调度各专业人员也可以通过网上查询、统计分析各项记录、报表,实现信息资源共享,有效提高工作效率。比如:调度员收到方式专业提交的检修申请,进行确认后,系统自动生成相应的值班记录,“xx:xx 分,收到方式 xx 检修申请一份,编号 xx”,同时在交接班记录中更改现有的检修申请的张数。

2.2.3 检修申请、方式通知单、定值单与调度指令票间的关联

检修申请、方式通知单、定值单与调度指令票间通常存在“一对一”和“多对一”的情况。对配合停电检修申请,存在“多对一”即多张检修申请对应一张调度指令票的情况。

系统将有关联的检修申请与对应拟写的调度指令票系统自动进行电子捆绑,在执行送电操作的调度指令票时,自动检测与该调度指令票对应的所有检修申请的工作是否全部终结。若有其中任何一张检修申请尚未完工终结,则自动弹出警告信息窗口,提醒调度员核对,调度员应查看是否仍有检修单位未汇报工作完工,相当于设置了电子锁,进一步完善了防误措施,有效地防止了调度误操作事故的发生。

2.2.4 设备检修情况与日调度计划书关联

由方式专业提交的检修申请,在当值调度员签收后,系统根据检修申请的开工时间、结束时间,自动判断当前申请的执行情况,将未开工和开工后未结束工作的检修申请生成日调度计划书。

根据日调度计划书的内容,开展调度日安全分析交底,提前作好各种运行方式下电网危险点分析,制定相应的对策,保证调度运行操作的科学性和合理性,减少设备重复停电和电气设备非计划检修。

3 应用情况

调度运行过程管理系统于 2010 年 12 月在德阳电力调度中心内调度科及保护、方式各管理部室之间联网安装完成,并经过 3 个月的试运行。现将调度运行过程管理系统每日的使用情况和原来的工作方式进行比较(每日按照三次交接班计算),见附表 1。

实践表明:使用调度运行过程管理系统与原来的工作方式相比,有效地提高调度运行管理的工作效率,大幅度地减轻调度运行人员工作负担,实现电网调度运行工作的标准化、系统化、条理化、高效化,是加强电网管理强有力的手段。

4 结 语

调度运行过程管理系统采用 workflow 平台、停电检修打包管理、模块关联等创新技术,实现调度交接班管理、调度运行日志管理、调度运行日报管理、日调度

表1 调度运行过程管理系统应用对比

	日志输入次数 (方式)	记录输入操作平均 时间/min	编辑交接 班平均时 间/min	查找记录 平均时间 /min
原来的工作方式	手写 后输入 电脑,共 计2次	3 × 15	3 × 10	3
使用调度运行过程管理系统	在业务办 理中自动 生成,共 计0次	3 × 5	3 × 5	0.5

计划书管理、继电保护管理、方式管理、检修申请管理等16项调度管理功能,优化了现有电网调度的管理模式,强化了电网调度的过程化管理,最大限度地减

(上接第18页)

下,补偿度和线路损耗下降率分别为

$$K_c = \frac{Q_c}{Q_R} = \frac{2n}{2n+1} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta P\% = \left(1 - \frac{1}{(2n+1)^2}\right) \times 100\% \quad (9)$$

单点补偿和多点补偿方式下,网络中线路无功功率潮流分布与无补偿的情况如图5所示。 LQ_0 为长线路总的无功负荷。

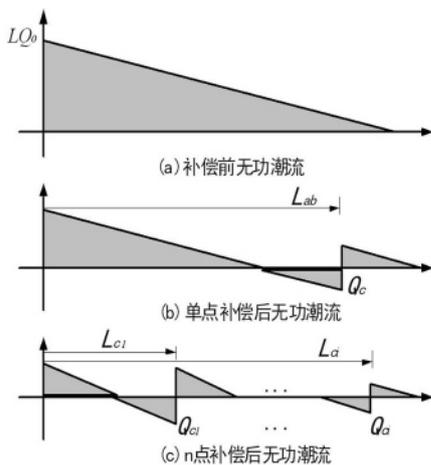


图5 补偿前后无功潮流分布图

计算了单点、两点、三点和五点补偿的补偿位置、容量、补偿度和线损下降率。单点补偿时,补偿度和线损下降率可分别达66.67%和88.89%;而两点补偿时,补偿度和线损下降率仅改变13.33%和6.11%。补偿点超过两点,补偿的经济性显著下降,详见表3。

4 结论

通过四川自贡电网运行经验和对无功补偿现状的

少了在管理过程中的人为因素的随意性,实现了调度运行专业生产管理流程的集中和统一。

但是该系统的开发和应用仍处于初级阶段,下一步打算:①实现与调度EMS系统接口,共享信息资源;②进一步完善系统术语库,提高系统的智能化水平。

参考文献

- [1] 罗宏超,赵园,任建云. 基于工作流的设备批准书与启动方案及保护定值单在OMS系统中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(18): 131-133.
- [2] 王毅. 面向事件的电网调度日志系统研究与开发[J]. 华东电力, 2009, 37(5): 783-785.

(收稿日期:2011-10-10)

表3 线路无功功率补偿方案分析

补偿点	①	②	③	④
单点补偿	0.67	0.67	66.67	88.89
两点补偿	0.40	0.40	80.00	96.00
三点补偿	0.29	0.29	85.71	97.96
五点补偿	0.18	0.18	90.91	99.17

①补偿点距离线路始端位置/线路总长(多点给出 L_{ci}/L);②各补偿点的补偿容量/总补偿容量;③无功功率补偿度(%);④线路损耗下降率(%).

简要分析,指出系统运行的薄弱环节——无功功率补偿,尤其是长线路的无功功率补偿。在分析各类无功功率补偿装置工作原理的基础上,对比其各自的优缺点,有利于无功补偿装置的合理配置。在传统电容器组补偿基础上,应合理引入各类可连续控制的静止补偿器。针对线路补偿问题,详细讨论了单点补偿和多点补偿的补偿效果,对线路无功功率补偿提供了量化参考依据,一般线路单点补偿可到线损下降80%左右,随着补偿点的增多,线损下降率降低速度显著放缓。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 刘从洪,邓晓林. 10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 40-42.
- [4] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿使用技术[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [5] 杜兵. 智能配电网无功优化应用研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 34-36.

(收稿日期:2011-11-30)

基于模糊理论的配电网电压层级优化的应用

冯景¹, 周步祥¹, 林楠²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘要:基于模糊综合评价法提出了一种配电网电压等级序列选择方法。分析合理选择城市配电网电压等级的具体评价流程。构建配电网电压层级优化的数学模型,以年综合费用 F (包括工程建设的总投资 Z_N 、运行维护费用 Y_N 、电能损耗费用 C_L) 最小为目标,并且满足网络拓扑约束、可靠性限制、电压降落限制、线路功率限制、短路电流限制等约束条件。分别构建经济评估体系和技术评估体系进行电压等级的评估和选取。以一实际的高新区 A 为例,对电压等级备选方案进行评估,得到了综合考虑技术性评价指标和经济性评价指标的模糊评价方案,验证了该方法的合理性和可行性。

关键词: 配电电压等级; 模糊理论; 评估指标体系; 方案选择; 20 kV

Abstract: Based on fuzzy comprehensive evaluation, a method to select voltage level of distribution network is proposed. The voltage level selecting method and processes are introduced. The optimal mathematical model for voltage level of distribution network is constructed. The minimum comprehensive cost F (including the total investment Z_N , the operation and maintenance costs Y_N , the costs of electric energy loss C_L) is taken as the optimum objective function, and the constraints such as the limits on network topology, the reliability, the voltage sags, the line power loss and the short-circuit current are all satisfied. The economic evaluation system and technical evaluation system for choosing voltage level are proposed respectively. Taking a high-tech zone A in a province for example, the options of voltage level are evaluated, and the fuzzy evaluation scheme is obtained which takes technical and economic evaluation index into account. Based on fuzzy comprehensive evaluation, the proposed method is proved reasonable and feasible.

Key words: distribution voltage level; fuzzy theory; evaluation index system; program choice; 20 kV

中图分类号: TM721 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)01-0043-05

0 引言

目前中国电网已基本形成了 220 kV 及以上电压等级作为输电电压和以 110 kV、35 kV、10 kV 作为配电电压的电压等级序列。少数地区已采用 20 kV 作为中压配电电压等级,例如苏州工业园区^[1]和辽宁本溪供电公司的南芬二次变电所。目前中国其他省市也纷纷进行 20 kV 的试点研究工作,并初见成效。随着中国经济的快速发展,为解决中国城市中心区及高负荷密度地区供电能力不足、农村低负荷密度地区压降过大的问题,提高配电网智能化水平,进行电压层级优化的研究是十分必要的。从而增强电网的输电能力,为配电网的智能化夯实基础。

1 配电网电压层级优化的总体目标

配电网电压层级优化是在已确定配电网变电站

布点及供电范围、负荷分布的情况下,合理确定电压等级。使配电网在保证安全可靠供电的同时,实现经济上的优化^[2]。因此,配电网电压等级优化的模型中需要考虑的因素包括工程建设的总投资、运行费用、网损费用以及其他一些技术性约束条件。

以年综合费用 F (包括工程建设的总投资 Z_N 、运行维护费用 Y_N 、电能损耗费用 C_L) 最小为目标,配电网电压层级优化的数学模型为

$$\min F = Z_N + Y_N + C_L \quad (1)$$

且满足以下约束条件。

(1) 网络拓扑结构约束

(2) 满足可靠性要求

$$R_{ASAI} \geq R_{\min} \quad (2)$$

式中 R_{\min} 为可靠性指标下限。

(3) 电压降落限制

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中 U_i 为各负荷节点电压; U_{\min} 和 U_{\max} 为节点电压

上下限; m 为负荷节点个数。

(4) 线路功率限制

$$P_k \leq P_{k,max} \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

式中 P_k 为线路 k 中流过的功率; $P_{k,max}$ 为线路 k 的最大允许传输有功功率; l 为线路的总根数。

(5) 短路电流约束

$$I_k < I_{limit} \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

式中 I_{limit} 为短路电流上限。

2 电压等级评估模型

中压配电网电压等级序列合理配置的评价指标体系非常庞大,通过分析,建立指标层次结构,确定经济性和技术性评价的核心指标和计算模型。图1即为电压等级优化的一般流程。

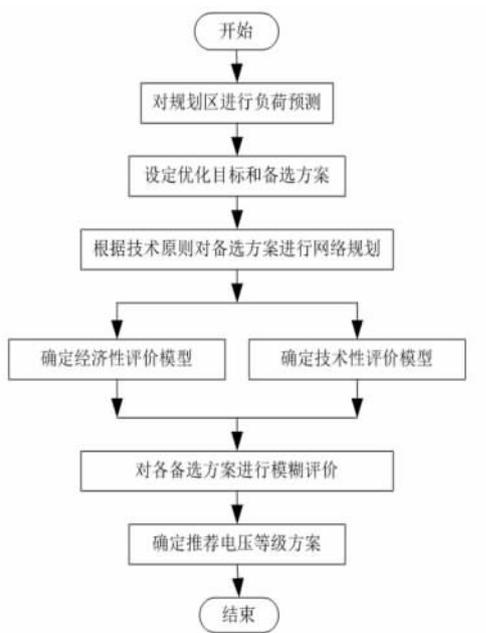


图1 电压等级优化流程图

2.1 技术性评估模型

为确保供电方案的可行性,需要对不同供电方式下配网规划方案的技术指标加以分析计算,并将技术指标分析计算的结果作为评判供电方式优劣的指标之一,主要比较的技术指标有供电可靠性、电压降落和短路电流等。

2.1.1 可靠性评估模型

供电可靠性是评价配电网电压等级优化方案的重要指标之一。一般可以从系统停电持续时间(SAIDI, system average interruption duration index)和系统平均供电可用率(ASAI, average service availability index)两个指标对不同方案进行分析比较^[3]。

(1) 系统平均停电持续时间指标 SAIDI。系统平均停电持续时间指标 SAIDI 是指每个由系统供电的用户在一年中所遭受的平均停电持续时间,可以通过一年中用户遭受的停电持续时间总和除以该年中由系统供电的用户总数来估计

$$SAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \quad (6)$$

式中 N_i 为负荷点 i 的用户数; U_i 为年停电时间。

(2) 系统平均供电可用率指标 ASAI。系统平均供电可用率指标 ASAI 是指一年中用户经受的不停电时间总数与用户要求的总供电时间之比,可按下式计算。

$$ASAI = \frac{8760 \sum_j N_j - \sum_j U_j N_j}{8760 \sum_i N_i} \quad (7)$$

显然有

$$ASAI = 1 - \frac{SAIDI}{8760} \quad (8)$$

式中 N_i 为负荷点 i 的用户数; U_i 为年停电时间。

2.1.2 电压偏差评估模型

为确保不同供电方式下对用户供电的质量,还需对电压偏差进行分析。各级线路电压降落的计算公式为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_N} = \frac{P \cdot (r + x \tan \theta)}{U_N} \cdot l \quad (9)$$

$$\Delta U\% = \frac{P \cdot (r + x \tan \theta)}{U_N^2} \cdot l \times 100\% \quad (10)$$

式中, $\Delta U\%$ 为线路电压损失百分数; θ 为线路功率因数角; r 为单位长度线路电阻; x 为单位长度线路电抗。

根据上式可知,在负荷不变的情况下: $\Delta U_{20}\% / \Delta U_{10}\% = 1/4$ 。当中压电压等级提高至 20 kV 时,电压损失是 10 kV 的 25%。由《电能质量供电电压允许偏差》(GB/T 12325),10 kV 配电线路电压降不应超过 7%; 35 kV 配电线路供电电压正负偏差之和不应超过 10%。

2.1.3 短路电流评估模型

配电网中压配电网电压的确定,受到各种条件的制约,其中要考虑到与上下级电网电压的协调发展。采用系统中通用的典型变压器容量,依据主变压器二次侧短路容量选取主变压器,变压器二次侧三相短路电

流的计算公式为

$$I_2 = \frac{100S_N U_1 I_1}{100S_N U_2 + \sqrt{3}U_k \% U_1 U_2 I_1} \quad (11)$$

式中 S_N 为变压器的额定容量; I_1 为变压器一次侧短路电流; U_1 为变压器一次侧电压; U_2 为变压器二次侧电压; U_k 为变压器阻抗百分比。

表1 不同电压等级下变压器短路电流的比较

电压等级 /kV	最大主变压器容量 /MVA	U_k /%	I_1 /kA	I_2 /kA
110/10	50	14	31.5	18.58
110/20	50	14	31.5	9.29
220/10	120	16	50	34.71
220/20	120	16	50	17.35

由表1可知,如高压配电电压为110 kV,低压侧电压由10 kV升压为20 kV,低压侧短路电流将大约减少一半,这意味着可以采用较低遮断容量的断路器,大大减少设备费用投资和占地空间。或者可以通过增加主变压器的容量以最大限度地利用低压侧开关遮断容量以提高变电站的输配电能力。

2.2 经济性评估模型

与技术性相比,经济分析要复杂的多。涉及到现有电网的升压改造时,需要考虑现存资产规模、运行年限、改造折旧费等。经济评价主要采用年费用法。年费用法是目前电力工程项目中常用的一种动态评价方法,适用于比较效益或功能基本相同的不同方案的投资费用和运行费用。进行方案比较时,年总费用的最低方案,其经济效益为最大,年费用的计算公式为

$$N_f = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + Y_N + C_L \quad (12)$$

式中 N_f 为折算到工程建设年的年费用; Z 为折算到工程建设的总投资; Y_N 为运行维护费用, Y_N 可以按照固定资产原值(近似为工程投资)乘以运行维护率 α 来实现; r_0 为电力工业基准收益率或折现率(r_0 取0.1); C_L 为电能损耗费用; n 为计算期。系统运行 n 年的电能损耗费用为

$$C_L = \sum_{i=1}^n \Delta P_i T f_i \gamma^{i-1} \quad (13)$$

式中, ΔP_i 为年度最大负荷下的功率损耗; T 为年利用小时数; f 为电价。电能损耗费用随着负荷的增长而逐年提高。

3 基于模糊理论的配电网电压层级优化模型的建立

传统对单一电网的评估主要应用解析法、模拟法

等一些经典算法^[4],这些方法侧重于分析电网的经济性或者可靠性等单一属性,没有对规划方案进行全面的综合评估。文献[5-7]采用综合评判决策理论,层次分析法可以对人为判断标量化,通过权重矩阵得出方案权重,评价供电模式的综合特性。这里应用模糊理论建立单一电网的评估体系,合理选择模糊变量,结合专家判断对指标权重进行量化和完整排序,从而建立配网电压层级优化的评价体系。

3.1 模糊评价的基本模型

模糊评价的数学模型可以表示为

$$B = f(AR) = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n] \quad (14)$$

式中 B 为模糊评价决策的一个子集; A 为模糊权重相量; $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ 为模糊评价矩阵; f 为模糊变换算子。对此运算符的不同定义,对应着不同的模糊评价模型。目前主要有4种不同的模糊评价模型^[8]:主因素决定型、主因素突出I型、主因素突出II型和加权平均型。在进行实际问题的模糊评价时,可根据实际评价目标的需要选用模糊变换算子。

3.2 建立等级论域和指标论域

确定评价基准及相应的价值量(即评价等级论域): $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, 选取 $E = \{优秀, 较好, 好, 一般, 差\}$, 对其赋值则 $E = \{0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1\}$ 。并且依据评定者给出的评定等级建立隶属度。

评价指标论域: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 。主要选取的中压配电网电压等级序列合理配置的评价指标有: U_1 系统平均停电持续时间指标 SAIDI; U_2 系统平均供电可用率指标 ASAI; U_3 电压偏差评估指标; U_4 短路电流评估指标; U_5 经济性评估指标。

3.3 建立评判隶属度矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mk} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 R_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k$) 为第 i 个评价指标对于第 j 个评价等级的隶属度,它反映了评价指标与评价等级之间用隶属度表示的模糊关系; m 表示评价指标的数目; k 表示评语集中评价等级的数目。

3.4 权重的确定

权重的确定是在专家知识和主观经验的基础上,利用具有严密逻辑性的数学方法,根据判断矩阵是否具有满意的一致性来检验权值的合理性^[9]。

3.4.1 构造模糊判断矩阵

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是全部因素的集, 对全部因素作两两之间的对比, 构造矩阵 $c = [c_{ij}]_{n \times n}$, 其中 $c_{ij} = f(x_i, x_j)$, 记 c 为判断矩阵, 即为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.4.2 计算权值

根据判断矩阵 C , 计算其最大特征根 λ_{\max} , 并且矩阵 C 关于 λ_{\max} 的特征向量 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 经过归一化处理后的 x_i 就是各评价指标的权重, 即 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ 。

至此, 上述定型的评价指标就实现了定量化, 还可根据权重的大小对各评价指标的优先级进行排序。

3.4.3 验证判断矩阵的一致性

按照下式进行一致性检验。

$$C_R = C_I / R_I \quad (17)$$

C_R 为判断矩阵的随机一致性比率; C_I 为判断矩阵的一般一致性指标, $C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$; R_I 为判断矩阵的平均随机一致性指标, 当 $C_R < 0.1$ 时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权数分配合理; 否则需要调整判断矩阵到取得满意一致性为止^[10]。

3.5 确定因素集对评价集的隶属向量 S_i

根据上述方法计算出的指标权重 A 和已经建立的评价隶属矩阵 R , 运用模糊运算法则, 进行综合运算, 并作归一化处理, 得到因素集对评价集的隶属向量 S_i 。

$$S_i = A_i \cdot R_i = [a_1, a_2, \dots, a_m] \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mk} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.6 计算各方案的可行度

$$N_i = S_i E^T \quad (19)$$

根据式(11)可依次计算出各方案的可行度 N_i , 并可按照可行度的大小排除各个备选方案的优先次序。

4 实际案例分析

4.1 规划区产业概况和电网现状

以一实际的高新区 A 为研究对象, 根据《高新区 A “十二五”电网规划》, 验证对配电电压等级的评价

方法和评估模型的合理性。高新区 A 地理位置优越, 有丰富的油气资源, 独特的政策优势和雄厚的产业基础, 具有建设大型临海资源型工业基地的诸多优势。截至 2009 年年底, 规划区内电源装机容量约为 860 MW (包括火电厂 Y 装机容量 440 MW, 企业自备电厂 J 装机容量 420 MW)。现有 220 kV 变电站 3 座, 主变压器 5 台, 总容量 620 MVA。拥有 110 kV 变电站两座, 主变压器 3 台, 总容量 120 MVA, 电源引自火电厂 Y。

该高新区 A 的规划面积为 97 km², 根据某省国民经济和高新区 A 的经济和产业发展规划, 结合经济发展和用电历史情况, 采用产值单耗法、负荷密度法和大用户法等多种负荷预测方法, 经综合比较, 得出高新区 A 远景饱和年的负荷约为 2 064.64 MW, 负荷密度约为 21.27 MW / km²。

4.2 电压等级序列备选方案

以高新区 A 目前现有的电压等级序列 220/110/10 kV 作为方案 1; 新电压等级序列 220/110/20 kV 作为方案 2; 220/20 kV 作为方案 3。对这 3 种方案进行综合比较。3 种备选方案建设规模估算见表 2。

表 2 3 种方案电网规模估算

方案名称/kV	220/110/10	220/110/20	220/20
变电规模			
220 kV 变电站 (座 × MVA × 台)	6 × 240 × 3	6 × 240 × 3	12 × 180 × 2
110 kV 变电站 (座 × MVA × 台)	17 × 80 × 3	17 × 80 × 3	0
20(10) kV 配电 变压器/台	8 224	4 134	4 134
输电规模			
220 kV 线路/km	62	62	109
110 kV 线路/km	244	210	0
20(10) kV 线路 /km	1 386	933	900

4.3 计算评价指标的权重

通过对南方电网实际运行中的数据进行分析, 同时参考专家经验, 构造判断矩阵 C , 并求出矩阵 C 关于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量, 进一步得出各评价因素的重要性权重集合为: $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\} = \{0.126, 0.126, 0.077, 0.162, 0.104\}$ 。对权重因子进行归一化, $\sum_{i=1}^5 a_i = 1$ 。各项评价指标的最终权重因子见表 3。

4.4 模糊综合评判

表3 各项评价指标的权重因子

评价指标	U_1 (SAIDI)	U_2 (ASAI)	U_3 ($\Delta U\%$)	U_4 (I_2)	U_5 (N_f)
a_i	a_1 =0.212	a_2 =0.212	a_3 =0.130	a_4 =0.272	a_5 =0.174

分别对3个方案的技术评价指标(供电可靠性、电压降落和短路电流等)和经济评价指标 N_f 进行比较,结果见表4。不同电压等级下变压器短路电流的比较见表1。

表4 各方案的评价指标

备选电压等级/kV	SAIDI/(h/a)	ASAI/%	电压降落 $\Delta U\%$	年费用 /万元
220/110/10 kV	0.999 958 5	0.363 54	1.852 7	112 356
220/110/20 kV	0.999 955 2	0.392 448	1.597 3	99 323
220/20 kV	0.999 942 8	0.501 072	1.678 2	80 059

利用对上述模糊评价指标的分析结果,计算各评价系统的模糊综合评价矩阵 R_i 。方案1的模糊评价矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.33 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对模糊评价矩阵进行加权,得出各电压等级备选方案模糊综合评价结果。由 $S_i = A_i \cdot R_i$ 得

$$S_1 = (0.212 \quad 0.212 \quad 0.130 \quad 0.272 \quad 0.174)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.33 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 \\ 0 & 1.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.195 \ 3 \quad 0.557 \ 9 \quad 0.231 \ 2 \quad 0.015 \ 6 \quad 0)$$

$$S_2 = (0.404 \ 2 \quad 0.357 \ 3 \quad 0.176 \ 6 \quad 0.062 \ 0 \quad 0)$$

$$S_3 = (0.388 \ 2 \quad 0.343 \ 6 \quad 0.214 \ 4 \quad 0.053 \ 8 \quad 0)$$

由 $N_i = S_i E^T$ 得方案1的可行度 N_1 为

$$N_1 = S_1 E^T = (0.195 \ 3 \quad 0.557 \ 9 \quad 0.231 \ 2 \quad 0.015 \ 6 \quad 0)$$

$$\begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix} = 0.686 \ 6$$

$$N_2 = S_2 E^T = 0.720 \ 7; N_3 = S_3 E^T = 0.713 \ 2$$

根据上述结论,得到3种电压等级方案可行度排序为: $N_2 > N_3 > N_1$ 。

5 结 论

提出了一种基于模糊综合评价法配电网电压等级序列选择方法。分别构建经济评估体系和技术评估体系进行电压等级的评估和选取。得到某省高新区A的合理电压等级序列。在3种建设方案中,方案220/110/20 kV的可行度最高。将中压配电电压等级提高到20 kV可以达到简化电压等级序列、节省电网投资、降低损耗、提高输送能力和输送距离的目的。由于各地的实际情况不同,在进行配电电压选取时,还需根据城市的具体情况进行深入的可行性研究,择优选取。

参考文献

- [1] 姜祥生,汪洪业,姚国平.苏州工业园区20 kV电压等级的实践[J].供用电,2002,19(6):9-11.
- [2] 陈章潮,程浩忠.城市电网规划与改造(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 王成山,王赛一,葛少云,等.中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J].电力系统自动化,2002,26(24):34-38.
- [4] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1980.
- [5] Pan J, Teklu Y, Rahman S et al. An Interval-based MADM Approach to the Identification of Candidate Alternatives in Strategic Resource Planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1441-1446.
- [6] Chen C T. A fuzzy Approach to Select the Location Of the Distribution Center [J]. Fuzzy Sets and System, 2001, 18(1): 65-73.
- [7] Noorul Faq A, Kannan G. Fuzzy Analysis Hierarchy Process for Evaluating and Selecting a Vendor in a Supply Chain Model [J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 29(7/8): 826-835.
- [8] 张焰.电网规划中的模糊可靠性评估方法[J].中国电机工程学报,2000,20(11):77-80.
- [9] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:6-39.
- [10] 宋光兴.模糊判断矩阵的一致性检验及一致性改进方法[J].系统工程,2003,21(1):110-116.
- [11] 肖峻,高海霞,葛少云,等.城市中压配电网评估方法与实例研究[J].电网技术,2005,29(20):77-81.

(收稿日期:2011-09-30)

东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源点的可行性分析

袁川¹, 刘俊勇², 张国松², 吴磊¹, 龚薇²

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要: 电网全部或部分因故障停运后, 采用黑启动方案, 通过系统中具有自启动能力的机组带动无自启动能力的机组, 可实现整个电网的恢复。分析了黑启动过程中的关键问题, 对东西关电厂作为黑启动电源的可行性进行了理论分析, 并对不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣进行了比较。最后通过 PSCAD 仿真和试验, 验证了东西关电厂作为黑启动电源的可行性。

关键词: 黑启动; 水轮机; 东西关水电厂

Abstract: Taking use of black - start program, the generators with self - starting capability are used to drive the generators without self - starting capability to enable the recovery of the entire grid after the whole or part of power outage due to the fault. The key problems in the process of black start are analyzed, and a theoretical analysis for the feasibility of Dong Xiguan power plant being a black start source is carried out. The merits and demerits of different types of water turbine as black start source are compared. Finally, PSCAD/EMTDC is used for simulation, which proves the feasibility of Dong Xiguan power plant as a black start source.

Key words: black start; water turbine; Dong Xiguan power plant

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012)01 - 0048 - 06

0 引言

东西关水电厂位于四川省武胜县境内的嘉陵江上, 是一座以发电为主, 兼顾航运、灌溉的综合性水利枢纽。电站装设 4 台 45 MW 的轴流转桨式机组, 年发电量为 9.55×10^8 kWh, 采用河床式厂房布置形式, 按无人值班设计, 设计水头 17 m, 年平均运行水头 21.6 m, 计算机监控系统、调速器电柜、励磁系统及自动化元件等自动化系统设备采用瑞典 ABB 公司设备, 水轮机及其辅助设备由施耐德公司提供。电站水库库容 21×10^7 m³, 调节库容 165×10^6 m³, 水库正常蓄水位 248.50 m, 汛期最低运行水位 241.00 m; 闸坝最大泄水流量 41 700 m³/s, 最高洪水位 259.96 m。电厂的电气主接线图如图 1 所示。

东西关电厂电动机与主变压器采用单元接线, 机组同期和换相在主变压器低压侧进行。机组励磁系统采用静止可控硅自并励系统, 其电源分别取自各机组主变压器低压侧, 经励磁变压器降压后向其励磁系统供电。厂高压直接从主变压器的低压侧取电, 在机

组停机或故障的情况下能不间断地从系统倒送电, 从而保证厂用电正常供电。同时, 还设置一台柴油发电机, 作为全厂停电时机组黑启动的电源和消防保安电源。

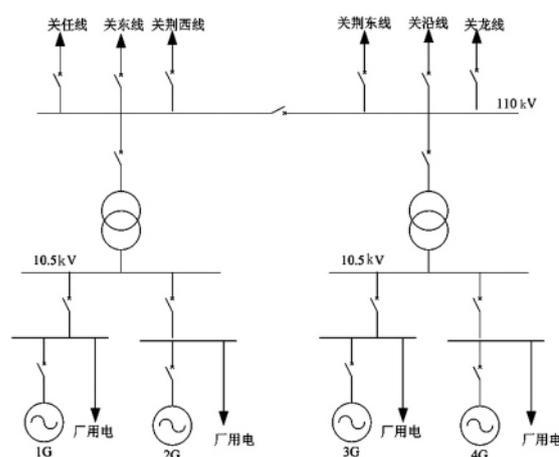


图1 东西关水电站的电气主接线图

当发生大面积停电的重大系统事故时, 若无任何黑启动措施, 则会使停电时间延长, 造成国民经济重大损失。黑启动是电力系统安全运行的重要措施之一, 黑启动是指机组在无外界帮助下, 停运后能快速

恢复发电,并通过输电线给其他机组提供厂用电,使其他机组恢复发电运行,最终恢复整个系统,其目标是在最短时间内使系统恢复带负荷能力^[1]。系统恢复的顺利与否关键在于启动电源即黑启动机组。机组黑启动时启动条件较为恶劣,因此,具有黑启动能力的机组应具备特殊的要求^[2]。下面简要介绍了东西关水电站机组作为南充遂宁电网黑启动机组的特殊要求,以及黑启动的一般过程和步骤,并且比较分析了不同类型的水轮机组自启动能力的优劣,以及它们对黑启动效果的影响,最后通过试验验证了东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源的可行性。

1 黑启动过程中的关键问题

1.1 励磁起励电源

在正常情况下,机组开机时的起励电源取自主变压器低压侧的励磁变压器,即从系统取电,系统瓦解后机组无法从电网取得励磁电源,励磁风机将不能运行,受功率柜温度限制,励磁系统可能无法长时间运行。东西关水电站黑启动时合上发电机出口开关,使励磁变压器连接到机端,此时采用220V蓄电池的直流电源起励,通过正反馈建立机端电压,解决黑启动时励磁电源问题。在机端电压建立起来后,切换到通过励磁变压器供励磁电源。

1.2 调速系统和球阀液压操作动力

机组压油系统是提供机组液压操作动力的装置^[3]。调速系统的油压装置一般能满足机组在运行中可能发生的最不利运行情况的需要,即首先甩去额定负荷,导叶接力器全关1次,然后摆动若干次(按进行1次全关闭考虑),接着机组又并入电网带上额定负荷,导叶全开1次(对转浆式水轮机其轮叶接力器也相应动作)。故在正常情况下,油压装置的油压可以保证机组进行一次正常自启动,因此在事故前压油罐的油压和油位很大程度上决定黑启动成功与否。东西关水电站压油系统油压是自动控制,每天不少于3次的巡回检查,保证压油罐的油气比例在正常值,额定工作压力为4.0MPa,事故低油压值为3.0MPa。机组调速器为交、直流220V同时供电,交、直流电源可实现自动切换,调速器调节功能齐全,调节响应迅速,大大减少了调速器在机组启动以及停机备用时的耗油量。调速系统电气装置采用微机自动调节,调节参数整定好,调节灵活,控制部分均具有频率自动跟

踪功能,可实现机组空载以及孤立运行时的频率调节,能很好适应各种运行情况。调速系统能满足机组“黑启动”的要求。

1.3 机组导轴承发热润滑与主变压器冷却

东西关水电站发电机有推力、上导、下导三大轴承,其中推力和下导共用一个油槽。上导、推力和下导均利用电机的自泵式油循环系统作用使油进行外循环,外部加装冷却器;水导采用强迫油外循环水冷。在柴油发电机不可用时,水导轴承油泵不能运行使油循环,机组各轴承没有冷却水,机组轴承运行条件变差,为确保各轴承安全,黑启动时间不宜过长^[4]。但在黑启动情况下,机组的轴承能够在没有冷却水的情况下运行15min而不发生损坏,而东西关水电站机组正常启动时间只有3min,可以在机组开启成功后带厂用电负荷。黑启动时直流注油泵投入运行,高压油通过轴瓦中心孔射出,在推力瓦与镜板间强制形成润滑油膜。主变压器冷却方式是强迫油循环水冷。在柴油发电机不可用时,则利用主变压器自身的允许温升能力,待机组开启成功带厂用电后,冷却主变压器。

1.4 监控系统

监控系统配置专用的不间断电源(UPS),由交、直流同时供电。在厂用交流中断的情况下,该UPS实现自动切换,正常承载负荷,保证监控系统在黑启动过程中正常运行。

1.5 照明和通讯、自动化系统

对于地下厂房或者在夜间操作的水电站,要保证事故照明满足条件,东西关电站正常时,厂房事故照明由交流和直流UPS供电,在厂用交流电源消失后220V直流系统通过逆变供给仍能保证可靠供电。通讯采用程控、光缆、载波、移动通讯相结合,设有专用的通讯用蓄电池组,确保通讯系统可靠,满足黑启动期间的需要。机组监控系统、机组重要装置均采用交、直流供电或直流供电,能保证装置的可靠运行。

2 不同型式水电机组自启动能力

虽然与火电、核电机组相比,水轮发电机结构简单,没有复杂的辅机系统,厂用电少,启动速度快,是安全、理想、方便的电网安全恢复工具,但是不同类型的水电机组对黑启动也会产生不同的影响,因此有必要对不同型式的水电机组自启动能力进行比较。这

里对贯流式、混流式、轴流式3种水电机组的自启动能力进行比较,以便选择出更加适合的水电机组作为黑启动电源。

2.1 水轮机的类型

水轮机是将水能转变为旋转机械能的动力设备,它可分为两类:反击式和冲击式。这里主要讨论反击式水轮机。水流以辐向从四周进入转轮,而以轴向流出转轮的水轮机称为混流式水轮机。这种水轮机的适用水头范围为30~700 m。由于其适用水头范围广,且结构简单、运行稳定、效率高,是目前应用最广泛的一种水轮机。水轮机的水流在进入转轮时,流向与主轴中心线平行,水流经过转轮后又沿轴向流出的水轮机称为轴流式水轮机。轴流式水轮机又可分为定桨式和转桨式两种,其适用水头范围分别为3~50 m和3~80 m。当水轮机的主轴成水平或倾斜布置,装置在流道中,使水流直贯转轮,这种水轮机称为贯流式水轮机,贯流式水轮机过流能力较好,适用水头范围2~30 m^[5]。

2.2 自保能力

机型的不同,自保能力也不一样^[6]。如混流式机组可以自流排水;由于轴流转桨式机组水导轴承安装高程相对较低,轴流转桨式机组顶盖积水通常采用水泵排水。一般来说,贯流式水电站的厂房为河床式,机组卧式布置。因此,尽管机组流道开挖深度较常规立式机组浅,但不能自流排除,因而采用水泵排水。所以对于轴流转桨式和贯流式机组来说,在黑启动时,当厂用电消失时间长,顶盖排水受阻,一旦水位超过水导转动油盆,则其完全失去自保能力。

2.3 适应负荷变化能力

混流式水轮机其叶片固定,转轮叶片不可调,出力依靠导水叶来调节,在偏离最优工况时效率会下降,不适合负荷变化较大的电站。轴流式水轮机以转桨式应用最多,因其叶片可随水头和导叶开度变化而协联转动的特点,其平均效率比混流式水轮机高,适合于负荷变化大、水头相对较低的电站。贯流式水轮机的转轮与轴流转桨式相同,只是流道形式有区别,因此在黑启动期间,可能出现负荷变化较大的情况下,宜采用轴流转桨式水电机组作为黑启动的电源。一般来说,水电机组相对火电机组来说,负荷调节速率快,适应范围广,抗干扰能力强,均具有较强的适应负荷变化能力(贯流式机组不具有自启动能力,不能作为黑启动电源考虑)。

2.4 工作特性曲线

一般来说,水电站水轮机通常在固定的转速下运转,水头的变化也比较缓慢,但机组负荷则是经常变化的。为表示水轮机工作在固定的转速和水头下的特性而绘制的曲线,即为水轮机工作特性曲线^[7],如图2所示为各类型水轮机工作特性曲线。

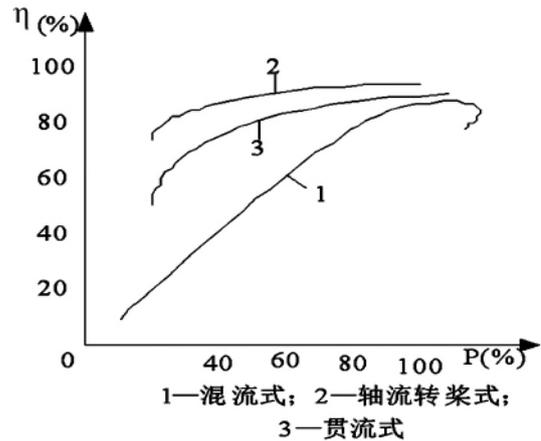


图2 各类型水轮机工作特性曲线比较

从曲线1可以看出,曲线末端呈弯钩形,当水轮机出力达到最大值后,若再加大导叶开度增加过流量,由于此时水轮机内水流条件恶化、水力损失加大、效率降低等不利影响超过了流量增加的有利影响,出力不但不增加,反而减小。在实际运行中不允许出现这种情况,因此混流式水轮机工作出力不得超过最大出力的95%。从曲线2、3可以看出轴流式、贯流式水轮机工作特性曲线的特点是高效区域比较宽,效率变化平缓,最大出力没有5%的出力限制。因此,在黑启动时,需要快速恢复负荷的情况下,高效率区间较宽、出力不受5%限制的机组更加适合作为黑启动的电源。

综上所述,不同类型的水轮机作为黑启动电源都有着各自的优缺点,同时也可以看出东西关电厂采用的轴流转桨式水电机组作为黑启动电源的可行性。

3 东西关水电站黑启动方案

3.1 黑启动原则

黑启动过程中应该遵循化整为零、分片启动,先主后次、有序供电,由下到上、按级恢复,快稳兼顾、可靠扩展的原则有序地进行电力系统的重构。确认系统故障导致大面积停电或厂用电全部消失后,应在权限范围内自行断开有关设备开关,做好黑启动准备,

取得调度同意后,选择油压装置中油压较高、顶盖漏水较小、自启动能力好、能实现自动开机的机组做“黑启动”机组,尽快开机恢复厂用电,厂用电恢复后,提起电站闸门,防止水库上水,并在调度的安排下逐步向系统恢复送电。

3.2 前期性能试验

为全面检验机组黑启动预案中各项操作的实际效果,了解机组黑启动状态下开机的可行性,进行了以下分项试验。

- 1) 模拟机组黑启动时,励磁风机停运后可控硅温度上升和报警试验。
- 2) 模拟机组黑启动时,机组事故低油压试验。
- 3) 油压装置的油压和油位特征值的确定。
- 4) 机组推力轴承及各导轴承油温和瓦温测试。
- 5) 直流系统。
- 6) 计算机监控系统。

3.3 试验一般步骤

1) 检查确认机组符合黑启动的相关条件,确认油位、油压、励磁、直流系统、UPS电源均满足黑启动试验条件。

2) 检查确认机组与系统隔离(相关的短路器和隔离开关在断开状态)。

3) 投入主变压器中性点隔离开关。

4) 投入机组冷却水系统。

5) 手动拔出机组锁锭,手动撤除机组制动闸。

6) 将调速器切手动,手动将导叶打开至空载开度,监视机组转速达到额定转速并稳定运行,再将调速器切回自动。

7) 投入机组励磁系统,手动起励,监视发电机机端电压正常。

8) 投入厂用变压器,逐步恢复厂用系统。

9) 对外恢复电网供电:可采用全电压向系统充电、零起升压这2种方式,具体方式在内部已经恢复厂用电的基础上由电网调度员调度,并按照其调令执行。

3.4 仿真黑启动机组带空载长线路过电压

黑启动过程中可能会出现空载长线过电压^[8,9],将会对设备的绝缘造成一定的危害,因此有必要在黑启动试验前,对机组带空载长线路过电压进行仿真研究。当东西关电厂机组空载情况下对110kV关任线线路充电时,仿真波形如图3、4、5所示。

由上述仿真结果可见,当东西关电厂单机带40km 110kV空线时,由于空载线路对地电容的影响,发电机相当于带了一定的容性负荷,由此致使在合闸瞬间发电机出口电压、线路末端电压都达到最大,其中机端相电压瞬时值接近15kV,最大值达13.5kV,线路终端瞬时电压接近182kV,但也迅速衰减为额定值,此过电压的过程对于设备的绝缘具有一定的危害。发电机出口电压并没有因助磁作用而相互继续增大或产生波动,因此在此情况下该机组没有发生自励磁。发电机端线电压有效值最大约10.73kV,远小于发电机过电压定值 $1.3U_N$,稳定后发电机进相无功稳定于1.51Mvar,远低于低励限制20Mvar,发电机仍然具有较大的无功调节能力^[10]。

3.5 试验结果

根据上述试验方案,对东西关电厂进行了黑启动试验,并记录下了试验过程中任隆变电站的母线线电压和线电流的波形图,如图6所示。

从试验波形图中可以看出,在黑启动过程中,母线电压、电流以及电网频率都在正常范围内波动,表明了黑启动方案的正确性。

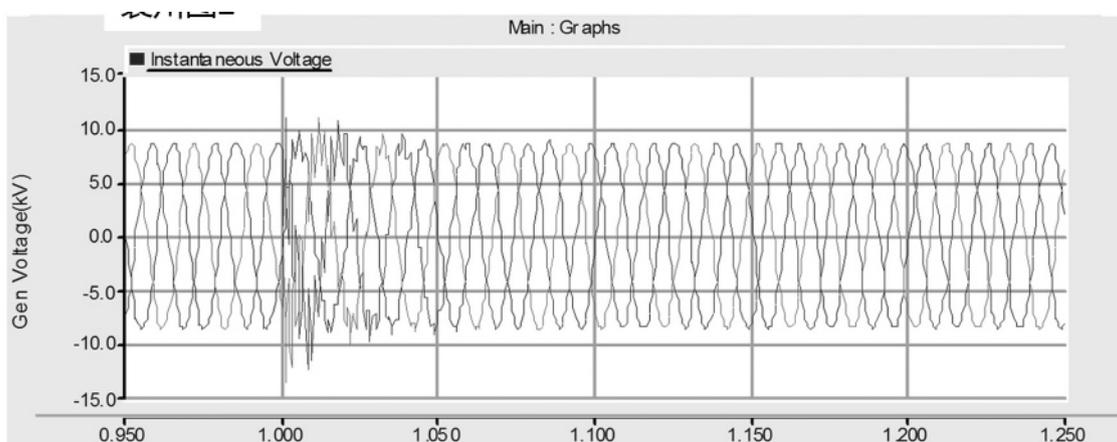


图3 机端相电压瞬时波形曲线

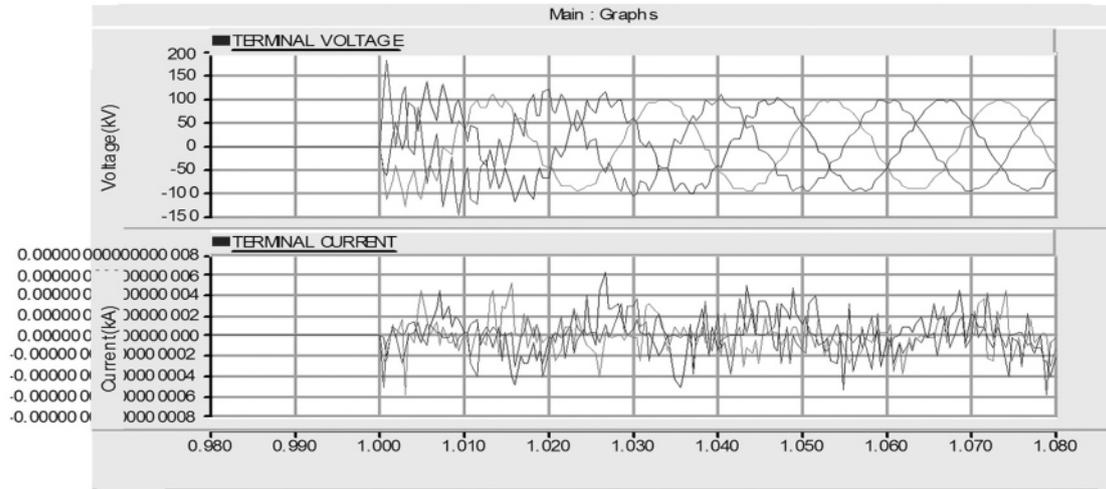


图4 线路终端相电压、电流曲线

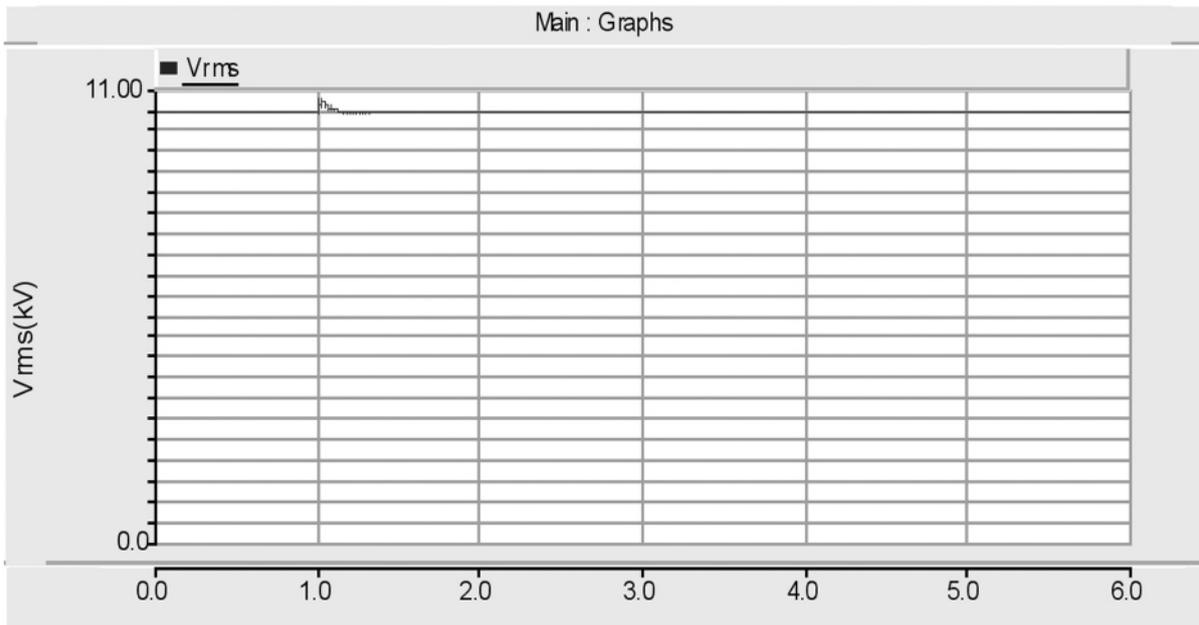


图5 机端线电压有效值变化曲线

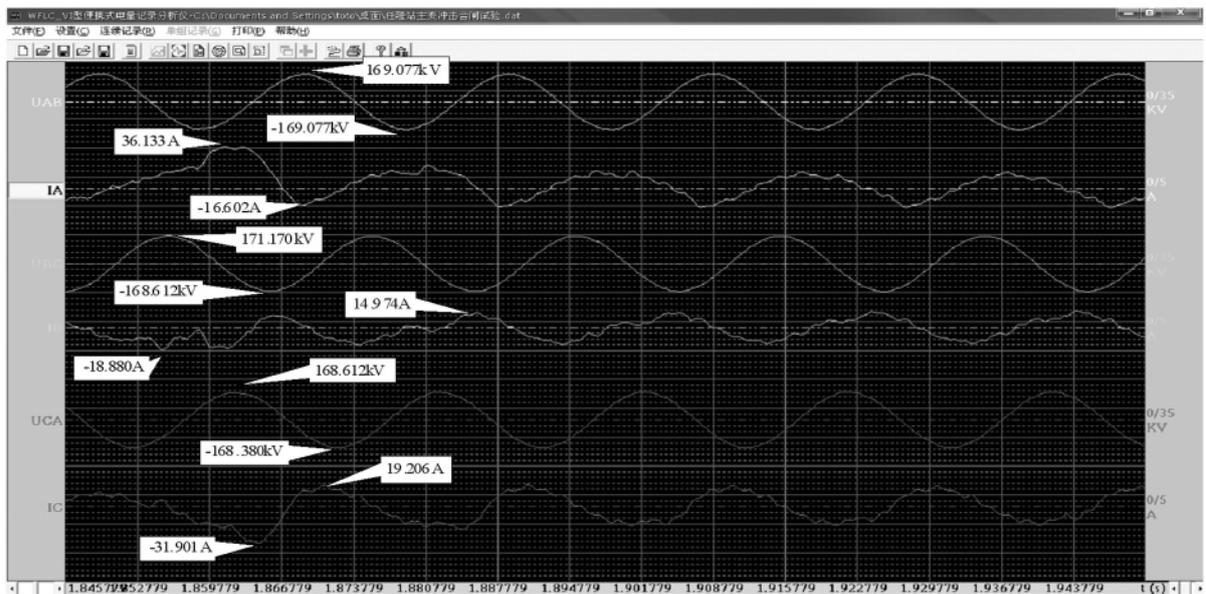


图6 东西关水电站黑启动试验 110 kV 母线电压电流波形图

4 结 论

介绍了东西关电厂黑启动方案的理论依据和实施过程,并且分析了不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣,为运行人员选择黑启动电源提供了理论依据。运用PSCAD对黑启动过程中的发电机带空载长线的过电压进行了仿真,仿真验证了黑启动方案的可行性。最后通过黑启动试验的成功,说明东西关电厂可以作为南充遂宁电网的黑启动电源点。

参考文献

[1] 熊惠敏,房鑫炎,郁惟慵,等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.

[2] 陈湘君. 广州蓄能水电厂作为广东电网黑启动电源的可行性方案[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 42-44.

[3] 鲁丽娟. 实现电力系统黑启动的基本条件[J]. 电力安

(上接第8页)

能单元调节有功功率时,各子模块超级电容电压在充放电过程中也能保持均衡。图示风电接入点电压标么值能稳定在1附近,说明储能单元也具有快速的无功补偿能力,能满足有功功率波动时对无功功率的需求。储能单元可以实现有功和无功的快速综合补偿,从而大大降低风速波动对电网稳定性的冲击,也有利于风电机组自身的平稳运行。

4 结 论

对于采用异步电机的风电系统,在风速变化时,其输出有功功率会波动,导致吸收的无功功率发生变化,连接点的电压也随之改变,故储能单元需要具有有功和无功的综合补偿能力。超级电容具有大功率密度,能够循环使用,故成为一种合适的储能载体,而MMC作为一种模块化级联拓扑,其多电平电压输出不会对电网电能质量造成影响,将两者结合作为储能单元,仿真表明,其对风电系统具有灵活快速的功率调节能力,能平滑风电机组有功输出,稳定接入点交流电压,较大幅度提高了风电场并网运行稳定性。

参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

全技术, 2009, 11(12): 54-58.

[4] 李苏宁. 黑启动试验时发电机组运行方式的配置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 104-107.

[5] 于永海,许健. 水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[6] 程刚. 葛洲坝二江电厂机组黑启动实践与分析[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 42-46.

[7] 沙锡林,陈新方,游赞培,等. 贯流式水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[8] T. Nagata, H. Sasaki. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 2(17): 457-462.

[9] C. Y. Teo, W. Shen. Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 2(15): 646-653.

[10] S. Lee, S. Lim and B. Ahn. Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-criteria[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 3(13): 1156-1163.

(收稿日期:2011-09-15)

[3] 张占奎,王德意,迟永宁,等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42, 47.

[4] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(3): 5-8.

[5] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.

[6] Laxman Maharjan, Shigenori Inoue, Hirofumi Akagi. A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter with Star Configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.

[7] 郭学英,金晓林. 基于超级电容器的风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电工电气, 2010(10): 1-5.

[8] 侯世英,房勇,曾建兴,等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.

[9] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.

[10] 刘陆洲,肖建,王嵩. 感应电机的新型神经网络广义逆系统解耦控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(z1): 72-77.

[11] 黄崇鑫,王奔,邹超,等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 52-55, 70.

[12] 屠卿瑞,徐政,姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.

(收稿日期:2011-09-30)

锦屏水电站枯期运行方式浅析

李金明 季苏蕾 龚学刚 王定立 马金奎 张 昕

(二滩水电开发有限责任公司锦屏水力发电厂(筹) 四川 西昌 615000)

摘要:通过分析锦屏1、2级电站首尾相接的特点,初步探讨了枯水期两级电站经济运行的有功优化可行方式,为电站投产后的实际安全经济运行提供了参考。

关键词:枯水期;经济运行;有功优化

Abstract: The feasible mode for active power optimization of the economic operation between the two-stage hydropower stations in low water period are discussed through the analysis on the features of Jinping Power Plant in which the first stage station and the second stage station are connected end to end. It provides a useful reference for the safe and economic operation after the hydropower stations being put into service.

Key words: low water period; economic operation; active power optimization

中图分类号:TM735 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0054-03

锦屏水电站由二滩水电开发有限责任公司(以下简称“二滩公司”)锦屏水力发电厂(目前为筹备机构,以下简称“锦屏电厂”)负责管理,它位于四川省凉山州盐源、木里、冕宁三县交界处,系雅砻江下游河段的龙头电站,是国家“西电东送”、“川电外送”能源发展战略的重要组成部分。锦屏水电站包括锦屏1级、锦屏2级水电站,总装机8400 MW。锦屏1级水电站混凝土双曲拱坝坝高305 m,为世界同类坝型中第一高坝;总库容 $7.765 \times 10^6 \text{ m}^3$,调节库容 $491 \times 10^7 \text{ m}^3$,具有年调节能力,装机6台,总装机容量3600 MW,设计多年平均发电量为16.62 TWh;锦屏2级水电站通过16.7 km的引水隧洞引水发电,最大水头达318.8 m;总库容 $1.428 \times 10^4 \text{ m}^3$,调节库容为 $496 \times 10^4 \text{ m}^3$;装机8台,总装机容量4800 MW,多年平均发电量为24.23 TWh。锦屏水电站计划首台机组于2012年年底投产发电,2014年机组全部投产发电。

锦屏水电站装机容量大,是电网中调峰调压的主力电站,其枯期运行方式是否合理,直接关系到电网安全与供电质量。下面从机组枯期运行的有功分配方面对机组枯期运行方式进行了探讨。

1 枯期有功优化

根据锦屏1、2级水电站的特点,实行两站间的梯级调度将极大程度的提高水能利用率,凸显梯级水库调度的优势。但锦屏1、2级水库水力条件复杂,枯期

运行状况多样,为实现两级电站间负荷的合理分配,有必要对负荷分配模型加以简化研究。

锦屏1级水电站最大水头240 m,最小水头153 m,调节库容 $491 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。按照图1所示机组运行特性曲线,当1级电站水头保持在200 m到240 m时,机组最大出力能达到额定出力。枯期水库低水位运行,水头小于200 m时,机组最大出力受限,将不能达到额定出力。

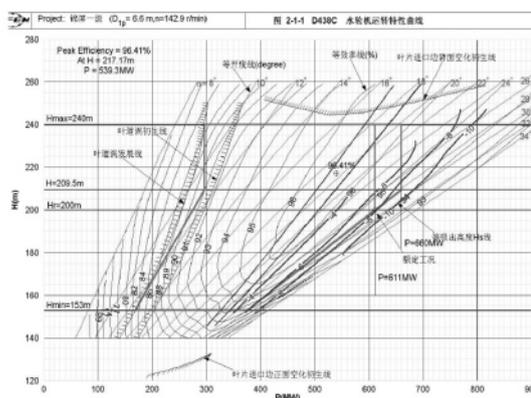


图1 锦屏1级水轮机运转特性曲线

锦屏2级水电站正常蓄水位1646 m,死水位1640 m,可调库容较小,为 $496 \times 10^3 \text{ m}^3$,为日调节库容。为满足下游生态需求,2级闸坝设有生态泄放洞,向下游泄水。

若使锦屏的总出力在1、2级电站机组内合理分配,将使水能利用得到极大的提高,对此,提出以下计算模型。

模型简化如下。

(1) 假定锦屏1级6台机组运行工况、效率分别相同,锦屏2级8台机组运行工况、效率分别相同,此时单级站内负荷分配满足理想化的分配。

(2) 由于锦屏2级水头变化范围窄(正常水位1646m,死水位1640m)根据图2所示锦屏二级机组运行特性曲线,可知在1640~1646m水位区间运行时,机组的工况变化不大,机组的效率也接近于设计值。此时,在锦屏电站总负荷可在1、2级间自由分配的情况下,可安排锦屏1级电站的发电流量等于2级电站的发电流量与生态泄放流量之和,保持2级机组在高水头下运行,同时合理安排两站内的开机台数,使机组运行在高效率区。

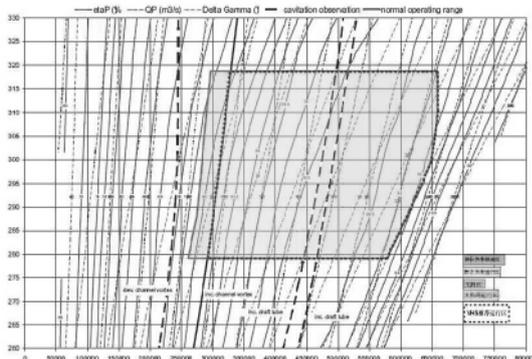


图2 锦屏2级水轮机运转特性曲线

(3) 假定锦屏1级、2级机组振动区上下限出力分别为 Z_{11} Z_{12} Z_{21} Z_{22} 。

列出目标函数如下。

$$\min Q_i = \min \sum_{j=1}^6 Q_{1j} \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^6 P_{1j} + \sum_{j=1}^8 P_{2j} = P_s \quad (2)$$

$$P_{ij} \leq P(H_i) \quad \begin{cases} i=1 & j=1, 2, \dots, 6 \\ i=2 & j=1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{ij} \leq Z_{i1} \vee P_{ij} \geq Z_{i2} \quad \begin{cases} i=1 & j=1, 2, \dots, 6 \\ i=2 & j=1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_x \quad (5)$$

$$P_{ij} = \rho g Q_{ij} H_i \eta_{iT} \eta_{iG} \quad \begin{cases} i=1 & j=1, 2, \dots, 6 \\ i=2 & j=1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (6)$$

$$153 \leq H_1 \leq 240$$

$$H_2 = 288$$

符号说明: Q_i 为 i 级发电流量; Q_{ij} 为 i 级第 j 台机组的发电流量; P_{ij} 为 i 级第 j 台机组的有功出力; P_s 为锦屏1、2级电站总有功给定值; $P(H_i)$ 为 i 级机组出力

限制曲线; Z_{i1} 为 i 级机组振动区下限出力; Z_{i2} 为 i 级机组振动区上限出力; Q_x 为2级生态泄放洞流量; η_{iT} 为 i 级水轮机效率; η_{iG} 为 i 级发电机效率; H_i 为 i 级水头值。由此约束条件,便可计算出1、2级负荷的最优分配。将之分配到1、2级电站的各机组,将使水能得到最优利用。

举例如下:枯期时锦屏1级运行在200m水头,2级运行最大水头318.8m,锦屏电站要求总负荷为3800MW时,可按上述模型计算得出两级电站的负荷分配,以达到水能利用的最大化。

表1 站间负荷分配表

1级水头 /m	2级水头 /m	总负荷 /MW	泄放洞流量 / (m ³ /s)
200	318.8	3800	80

续表1

锦1总负荷 /MW	锦1发电流量 / (m ³ /s)	锦2总负荷 /MW	锦2发电流量 / (m ³ /s)
1548	855	2252	775

此时,

$$\begin{cases} 1548 \text{ MW} + 2252 \text{ MW} = 3800 \text{ MW} \\ 775 \text{ m}^3/\text{s} + 80 \text{ m}^3/\text{s} = 855 \text{ m}^3/\text{s} \end{cases}$$

1、2级的总负荷满足电网的需求,同时,1级发电流量等于2级发电流量与生态泄放量之和,也即水能得到了充分的利用。

结合水轮机特性曲线,择优选取两站内机组高效率运行区域,同时避开机组振动区,考虑适当保留旋转备用容量和无功调节能力,可将两站内的负荷做如下分配。

表2 机组负荷分配表(单位:MW)

1级	1F	2F	3F	4F	5F	6F
	550	-	98	450	-	450

续表2

2级	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F
	600	-	450	102	500	-	600	-

如此,便将锦屏电站的总负荷按照前述模型,分配到了各台机组,最终使水能得到了较优的利用。

模型改进优化的建议如下。

(1) 保持1、2级电站总过机流量相同,只是在一定范围内的优化。如果进一步修改目标函数,追求1、2级发电的综合耗水率最小,则能使水能得到最佳的利用,篇幅限制,不再讨论。

(2) 机组有空载流量,即实际运行中流量与机组出力并不是严格正比关系,如将实际运行得出的实验

数据带回模型的约束条件中,将使计算结果更趋合理。

(3) 锦屏1、2级电站总共有14台大容量机组,调节范围大,运行方式灵活,在出力分配上应结合机组的效率区和振动区,结合水库水位控制及来水情况,科学优化分配机组负荷,降低耗水率。

(4) 实际运行中,同级电站的各机组效率不可能完全相同,若据实际情况带入各机组效率,让效率高的机组优先带负荷运行,也能使模型得到优化。

(5) 在事故情况或调度要求紧急调频情况下,可优先将负荷分配给2级机组短时运行,发挥2级的日调节库容的作用。

该部分主要提出了锦屏电站总负荷在1、2级站内机组分配的一种计算模型,使之能计算出各机组的最优负荷分配,并提出了对计算模型的改进意见,以期能在站内AGC的原理设计中起到一定的参考作用。

2 结 语

做好锦屏电站投运后枯期运行分析对保证电力系统安全和在满足系统各项指标的前提下最大程度节约水资源,从而充分发挥电站效益有着非常重要的意义。仅在一定条件下做了研究尝试。电站投产后枯期运行时锦屏1、2级电站负荷不统一安排情况下的优化调度等问题还需实际验证分析。

参考文献

- [1] 田开华,王旭东.二滩水电站枯水期经济运行及改善方法探讨[J].水电站机电技术,2005,28(5):54-55.
- [2] 孟祥萍,高嫵.电力系统分析[M].北京:高等教育出版社,2004.

(收稿日期:2011-10-17)

(上接第33页)

将式(3)代入式(12)得

$$W_{Q正} = 2W_{Q误} + \sqrt{3}W_{P正} \quad (13)$$

将式(11)和式(13)联合求解得

$$W_{P正} = W_{P误}/2 - \sqrt{3}W_{Q误}/2 \quad (14)$$

$$W_{Q正} = W_{Q误}/2 + \sqrt{3}W_{P误}/2 \quad (15)$$

由于错误接线情况下的有功电能和无功电能可以根据实际抄见电量计算,正确电量即可根据抄见有功和无功电量计算得出,消除了功率因数不恒定的影响,保证差错电量计算的准确性。

若按计量点2记录的加权平均功率因素0.92值代入更正系数计算故障期间的正确电量为

$$\begin{aligned}
 W_{P正} &= G_P \times W_{P误} \\
 &= \frac{2}{1 - \sqrt{3}\text{tg}\varphi} \times W_{P误} \\
 &= 251\,488 \text{ kWh} \\
 W_{Q正} &= G_Q \times W_{Q误} \\
 &= \frac{2}{1 - \sqrt{3}\text{ctg}\varphi} \times W_{Q误} \\
 &= 55\,162 \text{ kvar}
 \end{aligned}$$

用上述计算出的电量反推回去计算该线路的损耗为3.79%,与全年累计线损损率3.12%相差较大。

按错误计量期间的实际计量的有功电量和无功电量计算故障期间的正确电量为

$$\begin{aligned}
 W_{P正} &= W_{P误}/2 - \sqrt{3}W_{Q误}/2 \\
 &= 267\,485 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{Q正} &= W_{Q误}/2 + \sqrt{3}W_{P误}/2 \\
 &= 43\,744 \text{ kvar}
 \end{aligned}$$

用上述计算出的电量反推回去计算该线路的损耗为3.20%,与全年累计线损损率3.12%非常接近,故此方法计算值更接近实际值。

4 结 语

通过对10 kV高压三相三线计量装置现场测试电流、电压、相位的测试数据,采用相量图分析方法,可以确定计量装置接线的接入情况,并可推算出故障情况下的差错更正系数。通过更正系数的公式代换计算,采用故障期间的错误有功电量和无功电量计算出故障期间的正确有功电量和无功电量,减少了由于功率因数不恒定带来的电量计算影响,电量的计算更加准确。

参考文献

- [1] 鲍卫东.电能计量装置接线差错时电量计算方法探讨[J].电测与仪表,2007,44(6):26-30,23.
- [2] 孟凡利,祝素云,李红艳.运行中电能计量装置错误接线检测与分析[M].北京:中国电力出版社,2006.

(收稿日期:2011-11-07)

可中断负荷参与系统备用研究综述

孔祥清¹, 雷 霞¹, 刘庆伟¹, 柏小丽²

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘 要:可中断负荷参与备用能量市场的运营,在增强系统安全可靠性的同时还可以降低备用成本,提高市场的经济稳定性。在目前能源紧缺,满足节能减排和保护环境为前提的工业发展中具有一定的意义。简要介绍了市场环境下备用容量体系及可中断负荷参与备用的成本效益;详细总结了可中断负荷参与系统备用的模型研究,并比较了各种模型的优缺点。最后对可中断负荷参与系统备用的研究趋势进行了展望。

关键词:可中断负荷;备用容量;电力市场;成本效益

Abstract: Interruptible loads (ILs) participating in system reserve, not only could enhance the security of power system but also could reduce the costs of system reserve and improve the economic stability of power market. It will promote the development of industries which must meet the requirements of energy saving and emission reduction in the age of shortage of energy. Reserve capacity system in market environment and the cost-effective of interruptible loads participating in system reserve are introduced. Then, the models of ILs participating in system reserve are summarized in detail. At the same time, the advantages and disadvantages of the same type of models are compared. Finally, the development trend of interruptible loads participating in system reserve is prospected.

Key words: interruptible load; reserve capacity; electricity market; cost-effective

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0057-04

0 引 言

市场环境下,各市场参与者以收益最大化为目标,功率缺额事件具有高度的不确定性。在传统管制的电力系统中,出现系统有功不足时,系统调度员往往强制无补偿的中断某些用户的供电来保证电力系统的安全运行。但在电力市场环境中,对作为电力消费者同时也是市场参与者的用户,终止这样的服务不能再是单纯的拉闸限电,需要给予停电用户一定的补偿。可中断负荷(interruptible load, IL)即是指那些以合约等方式允许有条件停电的负荷^[1]。实施可中断负荷前需要电力公司与用户先签订可中断合同,在系统紧急情况下电力公司可以按照合同内容中断用户的电力供应,但给予这些用户一定的经济补偿^[2]。

由于市场环境下实际可用发电容量、负荷需求和容量事故不确定性的增加,备用容量的配置问题更加地突出。作为电力系统需求侧管理(DSM)的重要组

成部分,可中断负荷可以充分利用用户的用电灵活性。因此,当系统出现功率缺额时,既可以在发电侧购买机组备用容量,也可在需求侧购买IL,它们均可作为系统备用容量。并且IL响应速度快相当于发电侧的旋转备用,从IL参与系统备用的角度,可将IL视作一种需求侧紧急备用容量资源。对于小概率的严重容量事故,仅仅依靠发电侧备用不但不经济,技术上也不可行。为了防御互联系统发生灾难性大停电,紧急控制和校正控制都必须配置足够的切负荷措施,相应地,就必须建立完善的IL市场参与系统备用^[1]。可中断负荷可以看作一种虚拟的新型能量资源,只需要增加一些经济手段,改变电力系统中对用户原来固有的运营模式,就可以在不消耗任何实际能源的情况下,增加系统的发电容量和备用容量充裕性,减少备用机组的启停和运行费用;同时可以提高系统的可靠性,使用户以同样的电价享受更优质的供电服务;还可以增加用户侧的需求弹性和经济稳定性。只要IL能与其他备用形式合理协调,得到合理的补偿,那么IL不仅能提高系统的可靠性和安全性,还会促进资源的优化配置。

从IL参与系统备用的角度出发,概括了市场环

基金项目:国家自然科学基金项目(51007006);四川省科技厅科研基金(2009JY0139);四川省电力电子重点学联项目(SZD0503)

境下的备用容量体系,分析了IL参与备用的成本效益。然后详细论述比较了IL参与系统备用的建模思路,最后给出了以后的可能研究方向。

1 市场环境下备用容量体系的建立

市场环境下,电力系统不再是垄断的,各市场参与者均有权参与系统备用容量市场的竞争^[3]。电网公司作为系统备用容量的购买方,必须从可靠性与经济性协调的角度来合理选择备用容量市场的参与者,合理配置各类备用容量。为防御互联系统发生灾难性的大停电,以及避免因相继开断引起更大范围的不受控停电,系统备用容量的配置应是多方面的。一个好的系统备用容量体系需要多种备用容量及其交易市场的参与。对于频繁发生的基础备用需求,应以发电侧备用容量来应对,而对于小概率的严重容量事故,则可以采用可中断负荷容量的形式。文献[4]按发电机组响应时间及其与系统是否同步,将发电侧备用容量分为瞬时备用、快速备用、慢速备用及冷态备用。按对用户的补偿方式,IL可分为低电价可中断负荷(ILL)与高赔偿可中断负荷(ILH),其中ILL是在事故前通过电价打折来进行补偿^[5-7],ILH是在事故发生且中断实施后才对其进行事后的高额赔偿^[8]。文献[9]从风险的角度建立了发电侧备用与ILL、ILH共同参与的备用容量市场,其结构框图如图1所示。

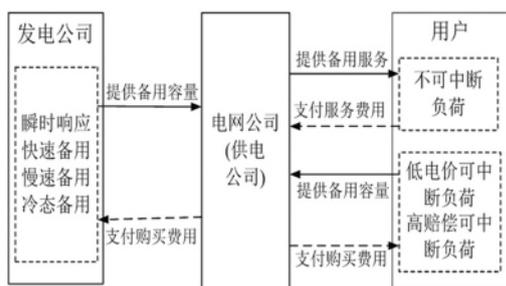


图1 电力市场下系统备用容量体系

2 可中断负荷参与系统备用的成本效益分析

2.1 IL成本估计及补偿方法

可中断负荷参与备用的成本(简称IL成本)即负荷停电损失,通常指直接损失,目前普遍以用户因停电而实际减少的利润来评估^[10]。影响IL成本的因素有:提前通知时间、停电持续时间、停电发生时

间、停电次数、停电频率、缺电比率、用电收益、缺电量等。文献[11]综合考虑了用户类型、提前通知时间、停电持续时间和缺电量等因素,建立了综合缺电成本模型,但是各因素的影响程度难以确定。文献[12-13]分别基于用户用电需求曲线为线性和指数形式建立起IL成本模型,可看出模型与用户需求价格弹性以及市场平衡点有关,即使缺电量相同,消费者剩余损失也可能不同,因而该模型能够动态评估IL成本的大小。文献[14]利用机制设计理论考虑供电公司的风险偏好,提出激励性可中断负荷合同模型,引导用户自愿参与可中断负荷管理,自愿披露真实缺电成本信息。文献[15-17]将期权的方法引入IL合同的中断价格制定中,分别以用户或电网单位电量期望收益最大为目标,推导出可中断合同的最优履约价。

2.2 IL参与系统备用的效益分析

可中断负荷参与系统备用,将供电可靠性也作为商品,不但有利于能源的合理利用和备用容量的优化配置,也增加了应对功率缺额的手段,有利于遏制发电商在备用紧张情况下滥用市场力^[18-19]。IL参与系统备用的效益主要体现在提高系统可靠性及供电充裕性,增强电力市场的经济稳定性等方面。

可靠性的提高相当于系统向用户提供了更优质的电能,使用户以不高于原来的电价享受更好的服务。文献[20]对此做了定量分析,指出可中断负荷的可靠性效益等于无中断负荷时切除的负荷容量与缺电成本的乘积,并进行了实例分析。文献[21]提出一种将直接负荷控制与可中断负荷管理相结合的自适应方案,该方案可以获取瞬时运行备用容量,同时对于电力系统动态扰动具有一定的鲁棒性。文献[22]依据微观经济学中的效用无差异理论,建立了市场环境下最优备用容量优化问题的数学模型。

从市场参与者方面考虑,可中断负荷参与系统备用可以调动需求侧参与市场的积极性,增强市场的经济稳定性,对各参与者都有益。

1) 对独立调度员ISO(independent system operator)、电能交易中心PX(power exchange):IL的参与可以削弱价格尖峰、平稳电价,还可以抑制市场中的投机行为。

2) 对电网公司:IL参与系统备用,极大地降低了系统边际电价^[19],使电网公司有可能通过降低RCGS的购买量及价格,来降低购电成本,进而提高其经济稳定性。

3) 对发电商: 与某些大用户签订可中断合同等效于新增装机容量, 增加了在市场报价中的灵活性。另外, IL 参与到备用中, 还可以延缓甚至减少新增机组的容量投资成本。

4) 对用户侧: 参与备用市场提供备用容量的 IL 用户, 不被中断时可以通过享受低电价来获得额外利润, 被中断时又可以获得中断赔偿。不参与中断的用户也可以由备用容量价格的降低, 供电可靠性的提高中受益。

3 可中断负荷参与系统备用建模

可中断负荷参与系统备用建模的最基本条件就是要满足系统备用需求平衡, 然后才是分别从不同的角度来列目标函数, 考虑不同的约束条件最后建立起 IL 参与系统备用的模型。

3.1 从电网公司的角度考虑 IL 参与备用的优化

以电网公司购买备用辅助服务的总成本最小为目标函数, 在满足系统可靠性等备用约束条件下建立数学模型, 通过各种算法(如基于蒙特卡罗随机模拟的遗传算法、非线性互补法、帕累托优化理论等等)求解得到 IL 与发电机组的最优组合情况。文献[23]以电网公司购买 IL 的总费用和由其产生的网损增加之和最小为目标函数, 考虑了不同地理位置的可中断用户对网损的影响, 采用排队法求解。文献[24]从电网公司的角度, 基于层次分析法建立 IL 参与备用的模型, 综合考虑了可中断负荷的报价、容量大小、响应时间、中断持续时间等因素。文献[25]考虑备用容量和电价波动对电力公司的影响, 以购买备用成本最小为目标函数建立了基于风险的最优事故备用容量购买模型。文献[26]考虑分布式电源(DG)和可中断负荷的基础上建立了配电公司利润最大化和总购电费用最小的双目标优化模型, 验证了 DG 和 IL 在规避风险和降低节点电价波动方面的作用。此方向研究的比较多, 数学模型的改进空间很小, 只有在算法上优化改进。

3.2 从用户的角度考虑 IL 参与备用优化

有些学者将用户侧的停电损失和获得的停电赔偿效益等因素考虑到模型中, 建立双侧开放的备用市场联合优化模型, 得到最优备用容量组合。文献[27]把用户参与系统备用也引入竞争, 以用户效益最大化为目标函数, 提出了一种基于潮流的主备用容

量市场联合优化模型。文献[28]在考虑停电持续时间等可靠性指标的基础上, 构建了新的缺电成本函数, 建立了考虑用户可靠性的可中断负荷管理模型。文献[29]提出了停电损失费用(EENS)的概念, 即由备用不足(包括发电机组和 ILs 两侧)引起用户停电造成的损失, 以系统总备用成本及 EENS 之和最小为目标函数, 求取参与备用的发电机组和 IL 的最优分配组合情况。单独以用户侧效益最大为目标函数建模的比较少, 大部分文献都是将用户侧成本效益因素作为一种约束条件加以考虑的。

3.3 考虑社会效益最大化情况下的 IL 参与备用的优化

以社会效益最大为目标函数, 引入发电侧的成本效益因素, 综合考虑 IL 参与备用后, 电网公司、发电侧和用户侧的成本效益, 应用博弈论或其他算法求得此时的备用容量配置和各参与方的成本效益。此种方法需要政府或其他独立机构(如美国电力市场中的 ISO)来组织协调各参与方的竞价和利润分配。文献[29]应用双方叫价拍卖和纳什讨价还价理论设计了可中断负荷实施的利益分享机制, 以社会效益最大为目标函数, 兼顾发电侧和电力公司的利益。以社会效益最大化为目标函数可以综合考虑资源的优化配置, 减少单位能耗和对环境的影响, 比单纯的以利润或成本等经济性指标做目标函数更有意义。

3.4 IL 的电价设计及合同管理模型的优化

电价的设计是 IL 合同管理中的一项重要内容, 因为无论对参与 IL 的用户激励还是电网公司的成本收益都要通过电价的杠杆作用来调节。研究者已经分别从激励机制^[14]、期权定价^[30]、最优潮流^[31]和直接参与报价^[32]等方面对 IL 的定价进行了研究。IL 合同内容主要包括合同有效期、中断提前通知时间、负荷中断量、中断持续时间、中断补偿费用等。文献[33]从 IL 补偿来源、用户中断成本角度应用机制设计理论思想建立了基于用户意愿的 IL 合同模型。文献[14]考虑供电公司的风险偏好, 同样利用机制设计理论建立了一种用户类型离散的激励型 IL 合同模型。文章表明对于风险进取的供电公司, IL 合同将成为其进行市场竞争和风险管理的有力工具。

3.5 其他方面的优化

还有些学者从其他角度研究 IL 参与系统备用的问题, 如用风险的观点研究系统备用容量中低电价可中断负荷(ILL)、高赔偿可中断负荷(ILH)与发电侧

备用容量(RCGS)的优化协调问题^[34]。用IL替代发电机组做系统备用对发电公司检修决策的影响^[35]。IL参与系统调频^[36]和秒级可中断负荷参与系统备用^[37]等。当然,各研究方向间难免存在一些交叉的内容。

4 结 语

在概括介绍市场环境下备用容量体系和可中断负荷参与系统备用成本效益的基础上,详细总结了IL参与系统备用的建模思路和方法。目前文献基本都只从市场的角度用经济学的方法考虑IL参与备用的优化建模问题。但是IL与系统备用都是电力系统中很重要的部分,它是实时变化的动态系统,目前的模型还不能完全反应其特点。所以可中断负荷参与系统备用优化还有以下几个方面需要进一步的研究。

1) 在满足系统安全可靠性的前提下设计更加能综合反映各参与方意愿的模型,运用更精确合适的算法寻求更加优化的IL与发电机组的组合结果,能够更加准确地量化各参与方成本效益情况。

2) 考虑可中断负荷参与备用后,系统在潮流、线损、输电阻塞、电压等方面的改变。建立考虑系统反馈的可中断负荷参与系统备用的优化模型。

3) 结合地方实际情况设计简单实用可操作性强的模型和算法,将IL参与备用应用到目前中国实际的电力系统中,逐步推进中国电力需求侧市场的开放。

参考文献

- [1] 薛禹胜,罗运虎,李碧君,等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(10): 1-6.
- [2] Huang Kun-Yuan, Chin Hong-Chan, Huang Yunn-Chang. A Model Reference Adaptive Control Strategy for Interruptible Load Management[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(1): 683-689.
- [3] MALK A S. Simulation of DSM Resources as Generating Units in Probabilistic Production Costing Framework[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(4): 460-465.
- [4] 赖业宁,薛禹胜,汪德星,等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化,2006,30(6): 1-5.
- [5] Chen C S, Lue J T. Interruptible Load Control for Taiwan Power Company[J]. IEEE Trans on Power Systems,1990,5(2): 460-465.
- [6] 任震,邝新武,黄雯莹. 电力市场中可中断电价的设计[J]. 华南理工大学学报,2006,34(4): 70-74.
- [7] Bhattacharya K, Bollen H J. Real Time Optimal Interruptible Tariff Mechanism Incorporating Utility - customer Interactions [J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(2): 700-706.
- [8] Wang Jian-xue, Wang Xi-fan, Ding Xiao-ying. The forward Contract Model of Interruptible Load in Power Market [C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference, Dalian, China, 2005: 1-5.
- [9] 罗运虎,王勤,邢丽冬,等. 系统备用容量优化问题综述[J]. 电网技术,2007,31(23): 41-46.
- [10] 曹世光,杨以涵,于尔铿. 缺电成本及其估算方法[J]. 电网技术,1996,20(11): 72-74.
- [11] 王蓓蓓,李扬,金午桥,等. 需求侧竞价对高峰电价的成本效益分析[J]. 中国电力,2006,39(1): 31-35.
- [12] 何永秀,黄文杰,谭忠富,等. 电力备用市场化运营需求研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3): 46-50.
- [13] 何永秀,王怡,黄文杰,等. 电力需求价格弹性与系统最优备用的关系[J]. 电力需求侧管理,2003,5(5): 20-23.
- [14] 方勇,李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同模型的建模与实施研究[J]. 电网技术,2004,28(17): 41-46.
- [15] GEDRA T W. Optional Forward Contracts for Electric Power Markets [J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(4): 1766-1773.
- [16] 张少华,李渝曾,王长军,等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]. 电力系统自动化,2001,25(21): 28-32.
- [17] 张少华,李渝曾,王长军. 一种双边可选择电力远期合同的定价模型[J]. 控制与决策,2002,17(6): 891-893.
- [18] 王蓓蓓,李扬,万秋兰. 需求弹性对统一出清电价下发电容量滞留的影响[J]. 电网技术,2005,29(14): 10-14.
- [19] Rajaraman R, Sarlashkar J V. The Effect of Demand Elasticity on Security Prices for the Poolco and Multi-lateral Contract Models [J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,12(3): 1177-1184.
- [20] Boisvert R N, Coppers P A, Neenan B. The Benefits of Customer Participation in Wholesale Electricity Markets [J]. The Electricity Journal,2002,15(4): 41-51.
- [21] Huang K Y, Huang Y C. Integrating Direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services [J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(3): 1626-1634.
- [22] 吴集光,刘俊勇,牛怀平,等. 电力市场环境下最优备用容量的确定[J]. 电力系统自动化,2005,29(15): 10-13.
- [23] 于娜,芙蓉薇. 电力市场高峰时段可中断负荷优化购买模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(4): 89-93.

(下转第91页)

散热能力。

2.5 安装碳粉收集系统

有实验表明碳粉在油雾的影响下,绝缘电阻可以由100 MΩ迅速降低到零。因此油性碳粉污垢是造成集电环室内各绝缘件绝缘性能下降的主要原因之一,所以有必要安装碳粉收集系统,及时带走碳粉,使之与油雾隔离,提高集电环以及碳刷之间的绝缘。

2.6 安装红外线测温系统

在集电环室内安装红外线测温系统,将信号接入监控系统,运行人员可随时监测机组集电环及每个碳刷温度的变化情况,能及时准确地找出温度异常的碳刷,消除缺陷。

3 沙湾电站集电环技改项目及结果分析

3.1 技改项目

根据沙湾水电站碳刷温度过高的原因,在年度检修过程中对集电环及碳刷进行了技改:①扩大集电环室通风窗口尺寸,通风窗口高度由原来的22 cm增加到60 cm,宽度不变;②集电环宽度由原来的4 cm增加到6 cm;③集电环返厂重新校圆打磨,表面更光滑;④使用质量更好的碳刷。

3.2 技改效果

(上接第60页)

[24] 周永灿,李扬. 基于层次分析法的可中断负荷模型参与备用市场的研究[J]. 电力需求侧管理,2010,13(1): 17-20.

[25] 常向伟,张有兵,曹一家,等. 计及风险因素的事故备用容量购买决策模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23): 82-86.

[26] 李海英,李渝曾,张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10): 88-93.

[27] 潘雄,罗春雷,徐国禹. 双侧开放市场中能量与备用容量的联合优化[J]. 电力系统自动化,2005,29(5): 10-15.

[28] 刘国春,张少华,王晔. 考虑用户可靠性的可中断负荷管理[J]. 上海大学学报:自然科学版,2009,15(1): 81-86.

[29] J. Bai, H. B. Gooi, L. M. Xia, G. Strbac. A Probabilistic Reserve Market Incorporating Interruptible Load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1079-1087.

[30] Gedra Thomas W, Varaiya Pravin P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power[J]. IEEE Trans on Power Sys-

技改后经过长期运行,集电环和碳刷的温度较技改前明显降低,见表1。

4 结 语

发电机励磁碳刷及集电环发热现象运行中时有发生,严重威胁发电机的安全运行。因此,对集电环和碳刷的监视、维护并及时处理其发生的故障和损伤,改善集电环运行环境,是保证发电机长期稳定运行的重要工作之一。所提出的改造方案中的集电环部分,在葛洲坝125 MW机组已有相似的改造应用,效果明显,具有一定的借鉴作用。

表1 技改前后温度对比 单位:℃

		1 F	2 F	3 F	4 F
技改前	集电环	98	105	110	100
	碳刷	100	108	112	105
技改后	集电环	68	72	75	70
	碳刷	70	75	78	73

参考文献

[1] 国家技术监督局. 电炭材料及产品专用名词术语[M]. 北京: 国家技术监督局出版, 1997.

[2] 张广溢, 郭前岗. 电机学[M]. 重庆: 重庆大学出版社出版, 2002. (收稿日期:2011-07-26)

[31] Majumdar S, Chattopadhyay D, Parikh Jyoti. Interruptible Load Management Using Optimal Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 715-720.

[32] Tuan Anh Le, Bhattacharya Kankar. Competitive Framework for Procurement of Interruptible Load Services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.

[33] 陈建军, 杨娜. 基于用户意愿的可中断负荷合同模型研究[J]. 现代电力, 2007, 24(6): 85-89.

[34] 罗运虎, 薛禹胜, Zhangyang DONG, 等. 发电容量充裕性的混合优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 30-35.

[35] 贾德香, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于博弈论的发电公司检修决策[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 27-32.

[36] 刘文许, 林礼清, 温步瀛. 可中断负荷参与系统频率调节的研究[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(3): 17-20, 23.

[37] 都亮, 刘俊勇, 田立峰, 等. 电力市场环境下的秒级可中断负荷研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 90-95.

(收稿日期:2011-11-30)

基于电网安全稳定运行 前提下的梯级水电站优化调度新探讨

陈策,袁明友,黄强,唐维
(南充电业局,四川南充 637000)

摘要: 优先和大力发展水电是调整能源结构和可持续性发展的重要措施之一,梯级水电站由于其经济效益显著受到极大的关注。随着水力资源的不断开发,电网结构日益复杂,水电关系必将越来越密切,就梯级水电站的优化调度问题,立足于电网稳定安全,提出了先电网优化再水库调度优化的调度方式。基于四川南充电网梯级水电站,通过PSASP系统进行了不同电网运行方式下的潮流计算,较好地验证了这一方案的提出。

关键词: 电网安全稳定; 梯级水电站; 优化调度; 多 Agent 系统

Abstract: Giving priority to the development of hydropower is one of the important measures for adjusting the energy structure and the sustainable development. Cascade hydropower station has been under the great deal of concern because of its significant economic benefits. With the continuous development of water resources and the increasing complexity of the structure of power grid, the relationship between water and electricity will become closer and closer. Aiming at the optimal dispatching of cascade hydropower station, a new dispatching method is proposed which considers power grid firstly and hydropower secondly based on the safety and stability of power grid. Through PSASP system, the calculations of power flow in different operation modes are carried out based on cascade hydropower stations in Nanchong Power Grid of Sichuan, which has verified this proposal well.

Key words: safety and stability of power grid; cascade hydropower station; optimal dispatching; multi-agent system

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0061-05

0 引言

中国江河流域的水力资源十分丰富,但由于其空间分布的不均,开发程度的不一,各地区间的利用情况存在明显差异,人均资源量仍不富裕。水力资源的合理优化利用不仅关系到水电企业自身的利益,更具有重要的社会意义。特别是在当前,在国家电力市场改革的进程中,水电作为清洁、可再生能源的开发利用已被提升到了国家能源战略的高度,具有更为重要的实际运用意义。

梯级水电站的形成就是充分利用水力资源的主要表现形式之一,它是分布在一条江河流域的上下游且有着水流联系的水电站群。如何提高水资源的利用率、协调各水电站之间的用水矛盾、最大化水电企业的经济效益等问题,已成为众多研究学者关注的重点和难点。

早在20世纪40年代国外就提出了水库优化调

度的一般方法,自此相关研究的理论、数学模型、计算算法都在不断的提出、发展和更新。到目前,学者们已将研究重点转移至水库群优化调度的模型和算法的改进上^[2]。国内对此方面的研究也有着较大进展,众多文献^[3-10]无论是从短期调度或中长期调度考虑,还是从水量可调式或径流式方面考虑,均通过经典算法或现代智能或混合算法进行了相关要点的研究和探讨,并在实际运用中起到了一定的指导作用。

然而,单从水力优化调度来看,上述文献大都从同一个角度思考问题——即是将河流的水力资源作为研究主体,考虑资源利用与机组发电的约束关系,通过不同计算方法来实现对水力资源的优化分配和利用。

水电站的优化调度实质就是水与电之间的相互协调,随着电网的不断发展升级,水电关系也会变得更加密切。因此,水电站机组发出的有功和无功多少直接影响当前上网电网的安全稳定运行。一般实际情况中,水电站会保证机组最大出力或是经济效益最

大化。然而,此时水电站机组发出的有功和无功也许对于当前当地电网安全稳定运行可能并不是最佳。因此,能够兼备电网安全稳定运行的水力优化调度,才能更好地满足社会和经济需求。这里在梯级电站优化调度的基础上,重新选择思考角度,提出全新的思考模型,引入“多 Agent 系统”概念,将各个水电站看作一个个独立且相关联的个体,在保证地区电网或更大电力系统安全稳定运行的前提下,探讨如何分配梯级电站的上网出力,合理优化利用水力资源。

1 多 Agent 系统技术简介

Agent 作为解决复杂系统的一个有效方法,能够利用并行分布式处理技术和模块化设计思想,把复杂系统划分成相对独立的 Agent 子系统,通过 Agent 之间的竞争和磋商等手段解决之间的矛盾和冲突。它具有灵活、协作、自治和易扩展等优点,在交通控制、办公信息处理、分布式传感器、软件动态配置等各项领域应用中均取得了令人满意的成就。Agent 实际系统中的多 Agent 主要研究目的是通过由多个 Agent 所组成的交互式团体来求解超出 Agent 个体能力的大规模问题。它研究的是一组自治代理之间行为的协调,通过对它们的知识、目标、规则的协同和调整,使它们能够联合起来采取行动或求解问题。

将“多 Agent 系统”技术应用在水库优化协调调度上面,在确保电网安全稳定运行的前提下,更加合理的协调梯级水电站的出力,使得经济效益或其他关注目标最大或最优化。

2 数学模型

2.1 目标函数

通常梯级电站优化调度的数学模型依据不同指标建立不同函数,常用的有如下几个。

1) 以水库发电量最大化为目标。

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \Delta \sum_{ij} (V_{ij}, Q_{ij}) \quad (1)$$

其中, $\Delta \sum_{ij}$ 为 j 水库在 t 时段的发电量; (V_{ij}, Q_{ij}) 分别表示 t 时段 j 水库的蓄水状态及水库的入库流量。

2) 以水电站经济效益最大化为目标。

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m f_{ij} \quad (2)$$

其中 f_{ij} 为 j 水库在 t 时段的发电效益。

3) 其他目标,如某一时期以防洪泄洪为主要任务,或以蓄水为主要任务等。

这里引入“多 Agent 系统”概念,将每一个水电站作为一个独立体 Agent,根据电网安全稳定运行的要求,建立如下统一目标函数。

$$\text{opt.} f(X_i, Y_j) = (f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (3)$$

其中 (X_i, Y_j) 表示所关心以及影响各个梯级水电站出力的信息元素反馈值; f_i 表示第 i 台机组优化后的出力大小。

2.2 约束条件

以电网稳定安全运行建立的目标函数,其基本约束条件与电网潮流优化计算时相同,如下。

$$\text{st.} \begin{cases} V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \\ P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} \\ Q_{i, \min} \leq Q_i \leq Q_{i, \max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, V_i 表示 i 节点的电压幅值; $V_{i, \min}$ 和 $V_{i, \max}$ 分别表示 i 节点的电压上下限值; P_i 表示 i 节点的有功; $P_{i, \min}$ 和 $P_{i, \max}$ 分别表示 i 节点的有功上下限值; Q_i 表示 i 节点的无功; $Q_{i, \min}$ 和 $Q_{i, \max}$ 分别表示 i 节点的无功上下限值。

在实际电网运行中,应根据具体情况的需求增加制定相应的其他约束条件,如各水电站的库容、水量平衡等约束。

2.3 实现方法

首先,在确定的电网结构基础上,找出所关心区域的电网枢纽点,通过优化计算得出不同时期(如丰水期、枯水期)电网安全稳定运行时各个枢纽节点的最优运行条件,即是得到一组式(3)中的 (X_i, Y_j) 。其中 (X_i, Y_j) 信息值可通过式(5)和式(6)的类似目标函数得到。例如式(5)即是将电网枢纽节点的电压幅值和无功数值作为反馈给梯级水电站多“Agent 系统”的信息元素。

1) 以电网电压质量、无功就地平衡为目标。

$$\text{opt.} f(V_i, Q_i) \rightarrow (V_i, Q_i) \quad (5)$$

2) 以电网有功功率损耗最小为目标。

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^l (\Delta p_i) \rightarrow (X_i, Y_j) \quad (6)$$

3) 其他目标,以无功功率损耗最小,或以电网传输功率最大等。

接着,梯级水电站的“多 Agent 系统”管理决策层收集 (X_i, Y_j) 信息,并通过相应的内部规则及约束条

件对各独立 Agent 进行二次统一协调、分析。

最后 梯级水电站优化调度“多 Agent 系统”管理决策层得出最终各个水电站乃至各台机组的出力方案 f_1, f_2, \dots, f_n 。

实现主要步骤如图 1 所示。

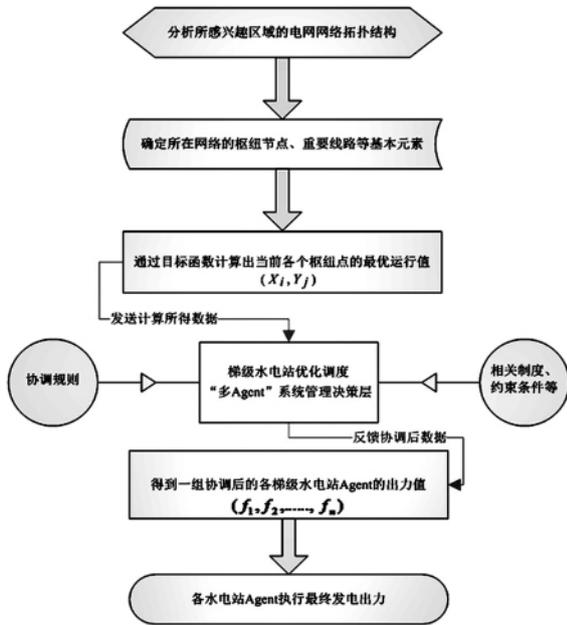


图 1 基于电网安全稳定运行前提下的水力优化调度流程图

3 实例

3.1 南充电网的运行特点^[12, 13]

南充电网位于四川电网的东北部。截至 2010 年

年底,主网共有变电站共 25 座,其中 220 kV 5 座,110 kV 16 座,35 kV 4 座,嘉陵江流域现有 8 级水电站在南充电网上网发电。随着电网的不断发展和水力的不断开发,预计 2011 年年底嘉陵江流域的梯级水电站将增至 10 级以上。

由于南充市是一个典型的农业大市,工业相对其他城市欠发达,用电负荷相对稳定的工业用电负荷在全网负荷中所占比例偏低,是一个以民用负荷为主的电网,因此受季节、温度变化及嘉陵江来水大小的影响较大。电网的负荷特性表现显著,用电负荷预测困难且不易控制,特别是在枯水期时天气气温较低——此时发电出力较少,负荷需求增大以及在丰水期时气温适宜——发电出力较多,负荷需求一般或偏少这两种情况下表现尤为明显。

南充电网作为一个有源网络,各个水电站的出力情况直接关系到电网运行的稳定和安全。因此,研究如何协调好各级水电站的发电出力,满足用电负荷需求,对保证南充电网运行的安全稳定运行,有着重要的实际意义。

3.2 南充电网的网络拓扑结构

南充电网的 110 kV 主要网络结构如图 2 所示,其中各个变电站之间的主要联络线以单线方式表示,各个水电站在对应变电站的上网情况均以实际状况标明。

3.3 示例

这里采用 PSASP(power system analysis software

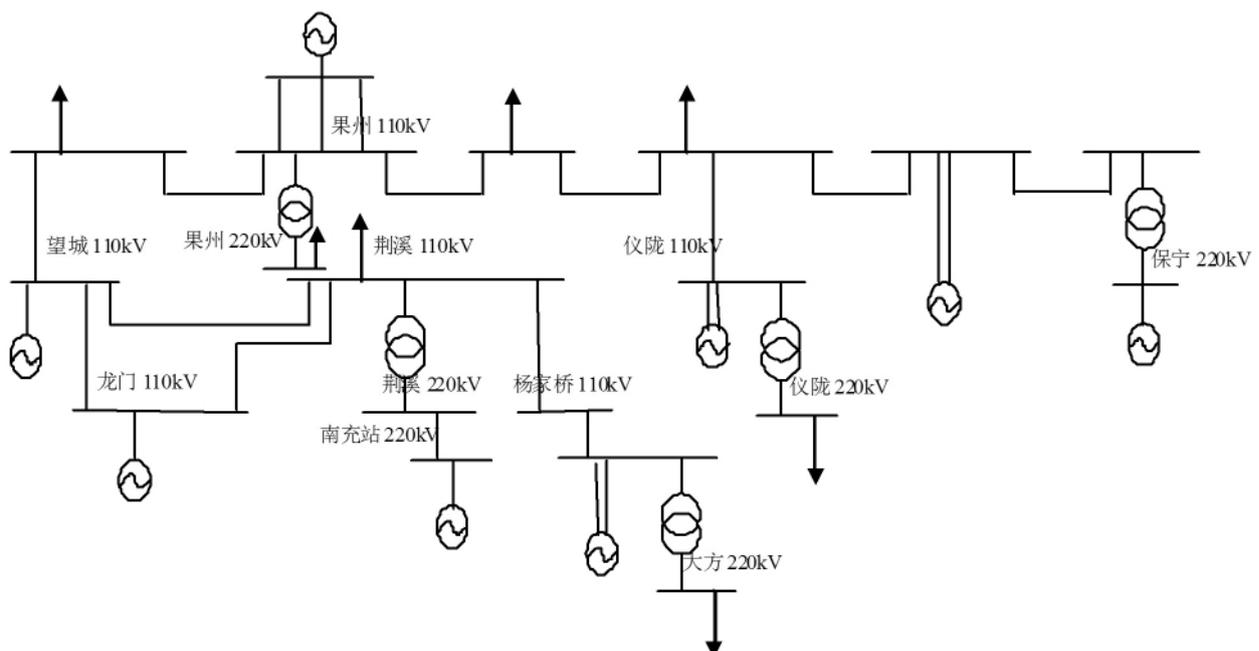


图 2 南充电网一次接线拓扑图

package) 仿真软件进行系统潮流计算,各水电站优化协调出力原则是在南充电网 2011 年最新潮流计算数据的基础上局部选择性调整。

选取了具有代表性的 5 个节点作为电压枢纽节点以及 4 条线路的潮流作为分析对象。分别为 220 kV 果州站母线节点、220 kV 荆溪站母线节点、220 kV 大方站母线节点、220 kV 保宁站母线节点、220 kV 仪陇站母线节点以及 220 kV 保荆线、110 kV 关州一线、110 kV 关州二线和 110 kV 关州三线。所选节点及输电线路在南充电网的实际地位十分关键,分别代表了南充电网各个片区的电压质量和潮流分布情况,因此上述对象的变化情况具有一定的研究价值。

3.3.1 基本潮流

2011 年南充电网基本潮流如图 3 所示,通过 PSASP 仿真系统,就丰小和枯大两种典型运行方式下的水力优化协调前后情况进行如下计算和比较分析。

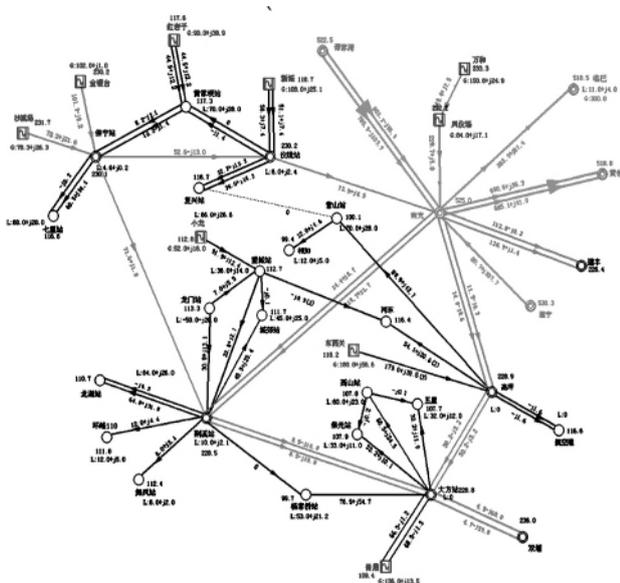


图 3 南充电网基本潮流示意图

3.3.2 运行方式 1: 丰水期且气温适宜时

该方式属于丰小运行方式,一般出现在一年中的春末夏初,气温回暖,江河水流量增大,梯级水电站通常会保持最大出力来获得客观的经济效益。但由于此时气温适宜,南充电网的负荷特性决定了用电需求不大,容易出现上网电力充足,系统电压偏上限运行,电网的主线路也容易过负荷运行。

按照所提的思考模式,先得出电网运行方式 1 下的运行最优值,再将这些最优值反馈给梯级水电站的“多 Agent 系统”管理决策层,通过内部协调规则得到新的出力方案。

图 4 及表 1、表 2 分别将该运行方式下协调前后的电压幅值及主线路潮流表示出来。

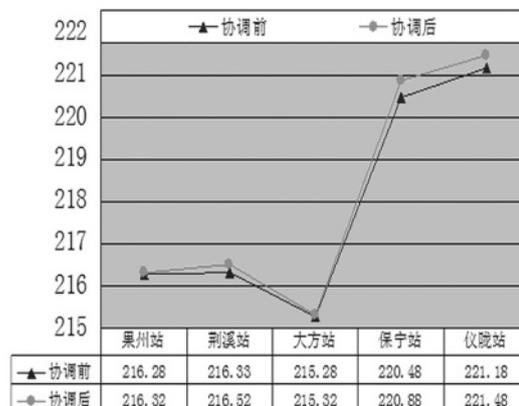


图 4 协调前后的枢纽节点电压幅值

在该运行方式下,南充电网一方面可以适当减少水电出力,另一方面也可通过将水电过剩出力通过主线路传送到相邻电网。协调后的南充电网电压质量比协调前的更加符合系统运行要求,主线路潮流过负荷的可能性也被大大地降低。

由此可见梯级水电站出力多少对整个电网的安全稳定运行有着不可忽视的影响。

表 1 运行方式 1 下的南充电网水力优化协调前后的各水电站出力情况

	协调前/MW, Mvar	协调后/MW, Mvar
金银山电厂	78.0 + j15.0	60.0 + j30.0
万和电厂	75.0 + j20	112.5 + j30.0
红岩子电厂	60.0 + j6.5	70.0 + j30.9
新城电厂	72.0 + j29.9	72.0 + j25.1
马回电厂	30.0 + j20.0	50.0 + j20.0
小龙电厂	26.0 + j10.0	40.0 + j20.0
青居电厂	68.0 + j4.0	60.0 + j12.0
东西关电厂	90.0 + j14.3	100.0 + j36.6

表 2 运行方式 1 下的南充电网水力优化协调前后的主要线路潮流负荷情况

	协调前/MW, Mvar	协调后/MW, Mvar
保荆线	32.68 - j2.10	19.80 - j2.16
关州一线		
关州二线	89.46 + j6.41	99.23 + j31.20
关州三线		

3.3.3 运行方式 2: 枯水期且气温较低时

该方式属于枯大运行方式,一般出现在一年中的冬季,河流水流量极少,梯级水电站通常停机蓄水或是少量上网发电。而此时由于气温较低,居民用电需求剧增,容易出现上网电力不足,系统电压接近下限运行,如图 5 “▲”所示。同时,主要线路为能满足负荷增长需求,潮流相对流动性较大,从主网下载负荷

的可能性比较大。未协调前的机组出力及主线路潮流分布情况分别见表3和表4。此时的南充电网运行方式极有可能影响相邻地区电网(如遂宁、达州)乃至主网(四川电网)的电压质量及安全稳定性。

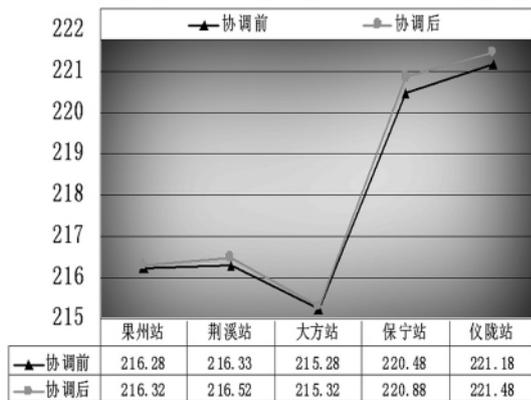


图5 协调前后的枢纽节点电压幅值

就所提方式,通过水电站“Agent 管理系统”的统一协调,得出新的出力方案,见表3协调后数据,此时南充电网的枢纽节点电压及主线路潮流分别如图5“●”及表4协调后所示。

由上可见,协调后的电网电压质量较协调前的优质,主线路的潮流负荷分配更加合理,减少了对主网系统的不利影响。

表3 运行方式2下的南充电网

水力优化协调前后的各水电站出力情况

	协调前/MW, Mvar	协调后 MW, Mvar
金银台电厂	80.0 +j3.0	90.0 +j10.0
万和电厂	75.0 +j20.0	75.0 +j16.7
红岩子电厂	60.0 +j10.0	70.0 +j20.0
新城电厂	72.0 +j21.1	72.0 +j20.0
马回电厂	30.0 +j12.0	30.0 +j12.0
小龙电厂	26.0 +j6.0	42.0 +j16.8
青居电厂	68.0 +j7.6	68.0 +j4.0
东西关电厂	90.0 +j2.3	100 +j10.0

表4 运行方式2下的南充电网

水力优化协调前后的主要线路潮流负荷情况

	协调前/MW, Mvar	协调后/MW, Mvar
保荆线	18.15 +j28.56	40.6 +j18.83
关州一线		
关州二线	89.14 +j29.66	98.99 +j27.40
关州三线		

综上所述,统一协调优化后的梯级水电站出力比没有加入电网运行条件考虑因素的水电站出力更加合理实用,对于电网的安全稳定运行具有重要的影响作用。

4 结论与展望

就梯级水电站的优化调度问题,立足于电网安全稳定,提出了先电网优化再水库调度优化的调度方式,对于实际电网的运行调度有着重要的意义。随着江河流域水能源的不断开发,电网结构变得更加复杂紧密,水电站上网发电对电网的安全影响也会越来越大,所提出的考虑方式值得借鉴和研讨。但就梯级水电站之间的协调调度规则尚不成熟,需要结合梯级水电站本身调度进一步完善和探讨才能更好的运用于实际。

参考文献

- [1] 韩冰,张粒子.梯级水电站优化调度方法综述[J].现代电力,2007,24(1):78-82.
- [2] 胡国强.梯级水电站优化调度模型与算法研究[D].华北电力大学博士学位论文,2007.
- [3] 陈毕胜.梯级水电站长期优化调度的研究与应用[D].武汉:华中科技大学硕士学位论文,2004.
- [4] 李义.梯级水电站短期优化调度的研究与应用[D].武汉:华中科技大学硕士学位论文,2004.
- [5] 张铭,丁毅,袁晓辉,等.梯级水电站水库群联合发电优化调度[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(6):90-92.
- [6] 施展武,罗云霞,邱家驹.基于Matlab遗传算法工具箱的梯级水电站优化调度[J].电力自动化设备,2005,25(11):30-33.
- [7] 赵国杰,杨敏.基于动态固化的梯级水电站长期优化调度研究[J].水力水电工程设计,2006,25(4):44-46.
- [8] 王金文,石琦,伍永刚,等.水电系统长期发电优化调度模型及其求解[J].电力系统自自动化,2002,26(24):22-25.
- [9] 邹建国,芮钧,吴正义.梯级水电站群优化调度控制研究及解决方案[J].电力自动化设备,2007,27(10):107-110.
- [10] 吴杰康,李赢.梯级水电站联合优化发电调度[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(4):11-18.
- [11] 刘伟达,孟建良,庞春江,等.多Agent在电力系统中的应用[J].电气时代,2004(8):72-74.
- [12] 南充电业局.四川南充电网2010年运行方式[R].2010.
- [13] 南充电业局.四川南充电网2011年运行方式[R].2011.

(收稿日期:2011-08-11)

母线负荷预测的实用算法

陈小平

(四川电力送变电建设公司,四川成都 610051)

摘要: 母线负荷预测是制定电网运行方式的基础,预测的精度将直接影响到后续安全校核的分析结果以及电网输电能力的计算和运行方式的安排。综合考虑母线负荷的特点,根据历史样本数据类型,考虑天气、节假日、企业生产变化、母线负荷的转供等因素,提出一种新的母线负荷预测的实用算法。所提方法基于相似日的模式匹配原则,依照与待预测日模式的相似度大小确定其间的分配系数权重,进而预测母线负荷。通过 Matlab 对一实际电网进行仿真,结果证明了所提方法的精确性和实用性。

关键词: 母线负荷预测; 相似日; 模式匹配; 分配系数

Abstract: Bus load forecasting is the basis for the development of power grid operation, and the prediction accuracy will directly affect the analysis results of follow-up safety check, the calculation of grid transmission capacity and the arrangement of operation mode. Taking the characteristics of bus load into account and considering some uncertain factors, a new practical algorithm for bus load forecasting is proposed based on the data type of historical samples. The proposed method is based on the principles of similar day and pattern matching technique to determine the weight of partition coefficient in accordance with the model to be predicted on the size of the similarity coefficient, and then to forecast the bus load. Through the Matlab simulation of a real power grid, the results prove the accuracy and the practicability of the proposed method.

Key words: bus load forecasting; similar day; pattern matching technique; partition coefficient

中图分类号: TM715 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)01-0066-03

随着调度自动化系统与母线负荷量预测装置的不完善,母线负荷预测能更好地实现分散式的负荷管理,对电网动态状态估计、安全稳定分析、无功优化、厂站局部控制等方面都有重要意义。母线负荷是电网各母线节点负荷,包括有功负荷和无功负荷。实际所指的母线负荷一般是有功负荷^[1]。母线负荷具有基数小、稳定性不强、负荷变化的趋势不明显、有坏数据、母线间的差异较大等特点,所以母线负荷的预测难点是提高精度^[2]。

目前,母线负荷预测主要有两大类方法:一类是基于母线负荷自身变化规律的预测方法^[3]。这类方法认为:与全网负荷的分析过程类似,母线负荷自身具有特定的变化规律,可以用全网预测的某些方法来进行母线负荷预测。但由于母线负荷容易发生突变,稳定性比系统负荷差,因此如果简单借鉴系统负荷预测方法可能产生较大的误差;另外一类是基于系统负荷分配的预测方法,即分布因子法^[4]。该类方法的思路是:首先由全网负荷预测取得某一时刻全网的负荷值,然后按照一定的比例因子将其分配到每一条母线上。国内外集成于能量管理系统(EMS)中的母线

负荷预测功能大多是采用这种预测方法,其特点为便捷易用,准确性较高。但缺少独立的母线负荷规律性分析和预测手段,在精细化预测及可扩展性方面还有待提高。

在传统的基于母线负荷分配系数的基础上,提出一种考虑天气、节假日、企业生产变化、母线负荷转供等因素的母线负荷预测实用算法,利用该算法对某地区进行母线负荷预测,具有很高的准确率,分析其结果完全能够满足母线负荷考核的需求。

1 母线负荷建模与指标

1.1 母线负荷模型

结合调度一体化网络,所提的母线负荷结构采用分层树状结构,如图1所示。在图1母线负荷结构中,形成的负荷对象是区域、厂站的层次关系,第一层为系统负荷,第二层为区域负荷,第三层是变电站负荷,第四层是母线负荷。在实际的电网中,母线上的各种负荷交杂,且影响母线负荷的外在因素也不同,如天气、节假日、企业生产变化、母线负荷的转供等,所以静态模型的负荷成分比重是不同的。母线负荷

预测中,要提高预测精度,需合理地确定母线的负荷成份比重。

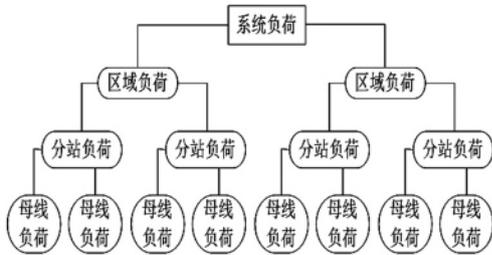


图1 母线负荷预测树型结构

1.2 母线负荷的预测指标

预测精度根据国家电网《电网母线负荷预测功能技术规范》中规定的准确率指标进行计算。采用每日96点负荷数据(每天00:15~24:00,每15min一点),其主要考核指标如下。

(1) 单母线负荷*i*每时段*j*的相对误差

$$e^{ij} = \frac{|j \text{ 时段实际值} - j \text{ 时段预测值}|}{\text{负荷基准值}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 母线负荷预测准确率(%)

$$\left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 A_i 为时段*k*的区域统计误差

$$A_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_{ij}^2} \quad (3)$$

(3) 母线负荷预测合格率

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{e_{ij}}{M_j}\right) \quad (4)$$

其中 M 为区域内考核的母线负荷总数; N 为日预报总时段数。

2 算法的主要思想

该算法的主要思路如下:确定需要使用的母线负荷模型后,通过对最近的*D*天历史样本数据进行模式匹配分析,计算所有历史日与待预测日的相似度,并对所有历史日的相似度进行排序,选择前面的*n*天作为相似日,在此基础上对预测日的母线负荷进行预测。下面以母线负荷的有功为例,其详细步骤如下。

1) 相似日的选择

选择星期类型,天气类型,日最高气温,最低气温作为影响负荷变化的主要因素,根据文献[5]提供的思想和方法将相应的影响因素映射到特征量映射表中。根据映射以后的标准特征值确定日特征量的差异度、相似度,选取相似日。设预测日的标准特征向量为 x_0 ,

历史各日的特征向量为 x_i ,其中 $i=1, 2, \dots, m$,且

$$x_0 = [x_0(1) \ x_0(2) \ \dots \ x_0(n)] \quad (5)$$

$$x_i = [x_i(1) \ x_i(2) \ \dots \ x_i(n)] \quad (6)$$

则定 x_0 和 x_i 在第*k*点的关联系数为 $\zeta_i(k)$ 。

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (7)$$

综合各点的关联系数可以得到整日的相似度 S_i 为

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (8)$$

在相似日的选择中相似度 S_i 越大,说明历史日与预测日在日类型上相似日度越大。另外,在相似日的选择中,将一年分为春夏秋冬四季,相似日只在同一个季节中选择。

2) 对选取的*D*天的样本集,有相似度 $S_i (i=1, 2, \dots, D)$,进行归一化处理,如式(9)所示。

$$S_i^* = \frac{S_i}{D} \quad (9)$$

3) 对其排序,选择其中相似度较大的*n*($n < D$)天的样本数据作为相似日样本备用数据。假设一共有母线负荷*N*个,一天有*T*(*T*一般等于96)个点,则待预测日的母线负荷数据是这*n*天样本母线负荷的加权平均值,如式(10)所示,其中 P_{0jt} 表示待预测日的第*j*($j=1, 2, \dots, N$)个母线负荷在一天的第*t*($t=1, 2, \dots, T$)个点母线有功负荷值, S_i 为归一化后的第*i*天相似度。

$$P_{0jt} = \sum_{i=1}^n S_i^* P_{jit} \quad (10)$$

4) 根据式(10)得到每点的所有的母线负荷数据,求取其母线负荷分配系数,如式(11)所示。

$$P_{0jt}^* = \frac{P_{0jt}}{\sum_{j=1}^N P_{0jt}} \quad (11)$$

5) 接入待预测日的所有*T*点的系统负荷预测值 $L_t (t=1, 2, 3, \dots, T)$,则可以得到待预测日的所有母线负荷值。如式(12)所示。

$$P_{0it}(All) = P_{0it}^* \times L_t \quad (12)$$

3 关键技术

3.1 预测样本

在实际的电网中,母线负荷时间序列比系统的总负荷更具有分散性、波动性、非线性,母线负荷预测

比系统的预测更为复杂,更具有不确定性。当前母线负荷预测的数据来源主要是15分钟的状态估计结果,在状态估计出现连续不收敛或厂站排除等情况下,母线负荷预测可能会出现某些时段样本数据缺失。可采用提高采样频率、增加SCADA数据源交叉验证等方式,来获取相对稳定可靠的样本数据。

3.2 数据预处理

母线负荷数据量大面广,属于海量数据管理的范畴。在面对海量数据的同时,母线负荷中出现不良数据的情形比较常见,对预测准确率有很大的影响。对于不良数据的处理,如完全依赖手工修正的方式几乎是不可能的,因此需要一种坏数据自动修补技术进行预处理。在该方法中,主要利用状态估计和SCADA数据双源热备机制来维护数据的完整性。一方面,利用特征分析等方法,通过符合数据的横、纵向的对比来分析、辨识和记录不良数据;另一方面,利用插值、虚拟预测和特征值提取等方法来修补坏数据。

3.3 预测结果校验

母线负荷对象都经过具体的设备进行传输,并实现等值负荷建模,如主变压器高压侧、线路等值,这些设备传输功率都可定义功率上下限,在预测结束后,对预测结果进行基本的合理性检验,可以避免预测结果中由于总负荷功率分配方式而出现越限的不合理现象。除了通过上述的静态限值方式,进行校验外,还需要根据负荷的历史变化规律,动态分析分析负荷的典型曲线和变化曲线,找出可疑的预测结果,并按照可疑程度进行分级显示,简化使用人员工作量。

4 仿真分析

为便于分析,算例以一周连续7日负荷预测的结果为例。为避免预测样本数据和待预测样本数据时间重叠,采用某省2010年9月10日至2010年10月10日期间某条220kV母线负荷的历史数据,对2010年10月20日至2010年10月26日的负荷进行预测,每日预测点数为96点。

仿真过程中,结合前述关键技术,按照“提取样本数据—数据预处理—母线负荷预测算法—预测结果校验”等步骤,用MATLAB程序实现上述算法。选取平均日母线负荷预报准确率和平均日母线负荷预测合格率作为分析和评判的依据。结果如表1。

从表1分析可知。

1) 从选取的7天的结果分析可知,所提的实用

表1 平均日母线负荷预测准确率和合格率分析表

日期	预测精度	
	平均日母线负荷预测准确率/%	平均日母线负荷预测合格率/%
2010-10-20	91.03	89.25
2010-10-21	89.72	89.61
2010-10-22	93.38	86.57
2010-10-23	92.89	90.13
2010-10-24	92.64	91.22
2010-10-25	90.71	89.93
2010-10-26	89.54	91.49
平均	91.41	89.68

算法平均预测准确率达到91.41%,平均合格率达到89.68%,完全满足母线负荷预测考核的要求;

2) 2010年10月22日的平均准确率相对较高,但其平均合格率却相对较低,10月26日则正好相反;可以说明平均合格率和平均准确率没有必然的联系;

3) 由于天气预报提供的信息不准确等原因,可能造成某天准确率较低。所以算法在对天气等因素的考虑上仍需较多改进。

5 结论

在传统的基于母线负荷分配系数的基础上,提出了一种考虑多种不确定因素的母线负荷预测实用算法,该算法借鉴短期负荷预报中的成功应用经验,从历史样本数据中依照天气、节假日、企业生产变化等不同情况的负荷特性,选择相似日匹配,最后依照与待预测日模式的距离函数值的大小确定其间的权重关系。通过对某地区母线负荷进行实例仿真,分析发现该方法具有较高的精度和较强的工程实用价值。对外部因素考虑的还不够全面,今后当进一步加强这方面的信息,更大地提高母线负荷预测精度。

参考文献

- [1] 辛丽虹. 电力系统母线负荷预测研究 [D]. 成都: 四川大学, 2000.
- [2] 康重庆, 夏清, 刘梅. 电力系统负荷预测 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] Espinoza M, Joye C, Belmans R, et al. Short-term Load Forecasting, Profile Identification and Customer Segmentation: A Methodology Based on Periodic Time Series [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1622-1630.
- [4] 鞠平, 马大强. 电力负荷系统建模 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [5] 牛东晓, 曹树华, 卢建昌, 等. 电力负荷预测技术及其应用 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

(收稿日期: 2011-09-15)

基于光传感器技术的500 kV交直流输电线路盐密在线监测研究及对比分析

范强¹, 蒋丽²

(1. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司 四川 成都 610041;

2. 武汉康普常青软件技术有限公司 湖北 武汉 430074)

摘要:为分析四川典型地理环境交、直流线路积污特性,掌握交、直流线路积污规律,应用光传感器盐密在线监测技术对途经四川地区的±500 kV 德宝直流0064号杆塔、0387号杆塔、500 kV 坡山二线交流012号杆塔、500 kV 资洪一线交流043号杆塔盐密进行在线监测,数据分析结果表明光传感器盐密在线监测装置能准确反映现场污秽变化,实现了交、直流线路盐密实时在线准确测取,为四川地区交、直流线路积污特性分析提供了数据支撑,为掌握四川地区交、直流线路积污规律提供了科学的技术手段。

关键词:光传感; 直流输电线路; 盐密; 在线监测

Abstract: In order to analyze the characteristics of pollution deposits of AC/DC transmission line in typical geographical conditions of Sichuan and master the rules of pollution deposits of AC/DC line, the online monitoring of salt density of No. 0064 and No. 0387 pole turrets in ±500 kV Deyang - Baoji 500 kV direct - current transmission project, No. 012 pole turret in 500 kV Poshan II AC line and No. 043 pole turret in 500 kV Ziyang - Honggou I AC line which are by way of Sichuan are carried out by using salt density online monitoring technology based on light sensor. The results of data analysis show that online monitoring device of salt density based on light sensor can reflect the change of pollution deposits in the field accurately, and realize the real - time and accurate online measurement of salt density in AC/DC line, which provides the data support for analyzing the characteristics of pollution deposits and the scientific technical measures for mastering the rules of pollution deposits of AC/DC transmission line in Sichuan area.

Key words: light sensor; direct current; salt density; online monitoring

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012)01 - 0069 - 04

0 引言

与交流输电工程相比,直流输电线路绝缘子的污秽度高于交流系统^[1],而且在相同污秽条件下直流线路绝缘子的污秽闪络电压要低于交流线路绝缘子^[2]。架空交、直流线路积污存在一定差别,不能完全按照架空交流上的工作经验来指导架空直流线路上的防污闪工作^[3]。由于架空直流线路占中国架空线路的比例很小,因此对于架空直流线路上的防污工作开展也较少,架空直流线路上盐密的在线测量更是少有研究。本课题就是利用光传感器盐密在线监测装置,实现直流线路盐密的在线测取,对比分析交、直流线路积污过程中盐密值的变化规律,为架空直流线路现场污秽度研究提供可靠的数据支持^[4]。

1 技术方案

1.1 技术原理

图1为光传感器测量盐密原理示意图。光传感器测量盐污的基本原理,简单来说就是基于介质光波

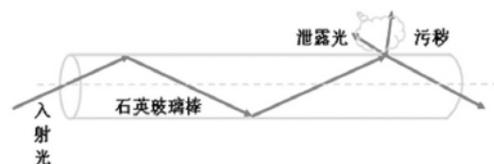


图1 盐密测量原理

导中的光场分布理论和光能损耗机理。置于大气中的低损耗石英玻璃棒就是一个以棒为芯、大气为包层的多模介质光波导^[5]。在石英棒上无污染时,由光波导中的基模和高次模共同传输光的能量,其中绝大

部分光能在光波导的芯中传输,但有小部分光能将沿芯包界面的包层传输,即有小部分光能进入大气传输,光波传输过程中光的损耗很小。当石英玻璃棒上有污染时,它将对光能产生损耗,其原因有:①是由于

污染粒子的折射率大于石英的折射率,破坏了高次模的全反射传输条件,产生光能损耗;②是由于污染粒子对光能的吸收和散射使光能产生损耗,光能损耗的程度就可以反映出污染的大小。因此,通过检测光能

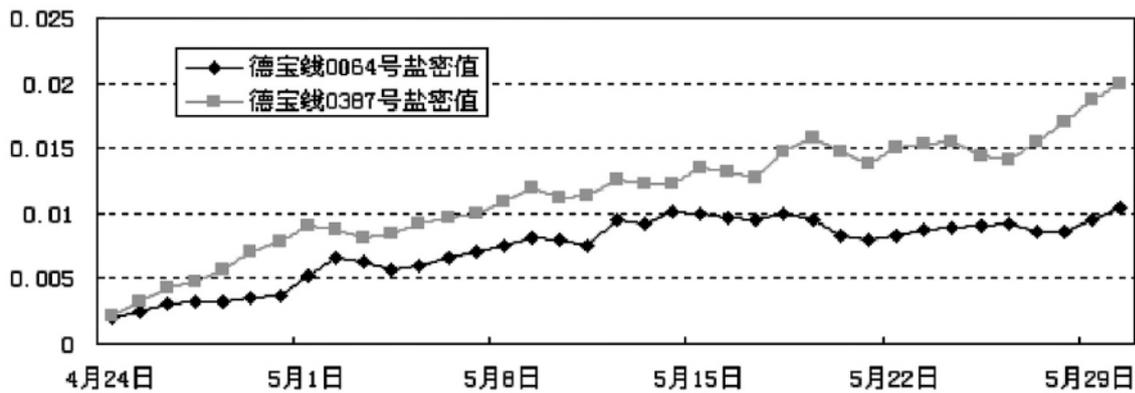


图2 德宝线0064号、0387号杆塔盐密曲线

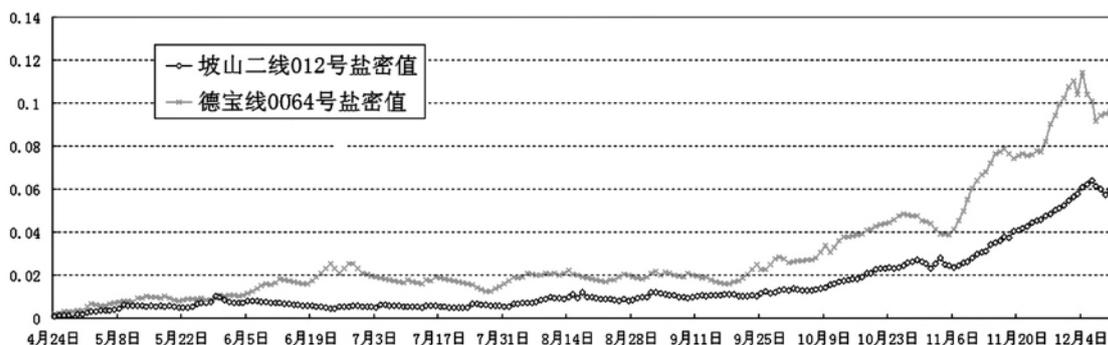


图3 农业型污秽盐密曲线

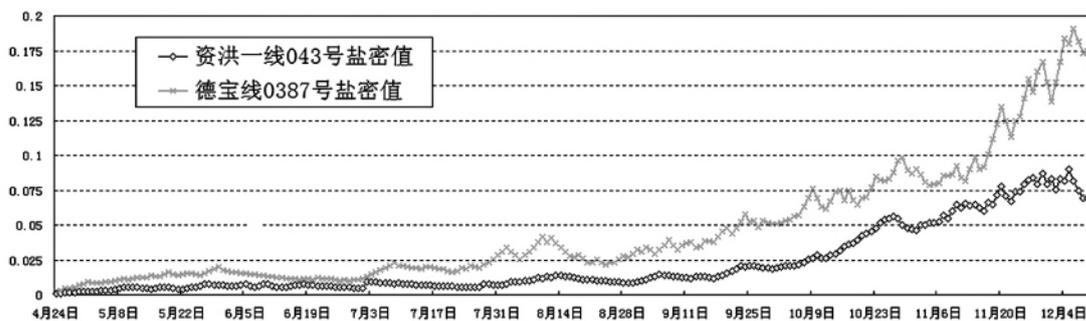


图4 工业型污秽盐密曲线

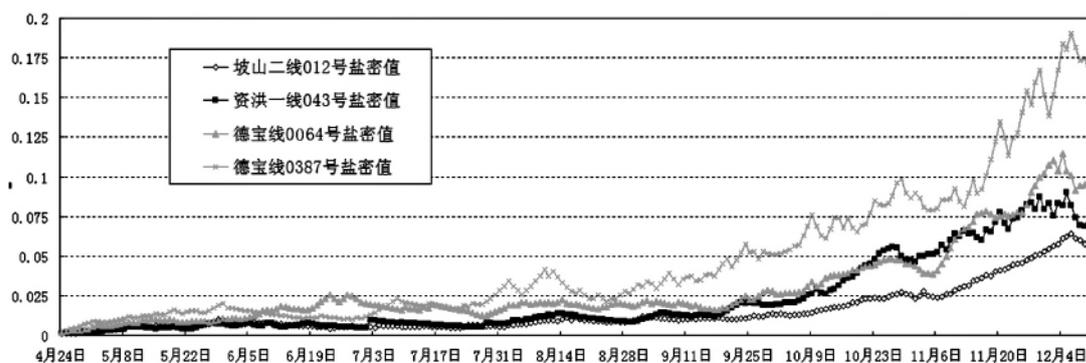


图5 4个监测点盐密对比曲线

的损耗就可以检测出污染的大小^[6]。

1.2 布点方案

2011年4月底分别在±500 kV 德宝线0064号、0387号杆塔、500 kV 坡山二线012号杆塔、500 kV 资洪一线043号杆塔安装了光传感器盐密在线监测装置。安装信息如表1所示。

为了有针对性的对交、直流线路积污特性进行分析,根据污秽环境类型进行区别性选点,分别选择处于农业污秽环境类型的德宝直流0064号杆塔与坡山二线012号杆塔为农业型对比监测点,以及处于工业污秽环境类型的德宝线0387号杆塔与资洪一线043号杆塔为工业型对比监测点。

表1 安装信息表

电压等级 /kV	输电类型	线路名称	杆塔号	污秽环境类型
500	直流	德宝线	0064号	农业型
500	直流	德宝线	0387号	工业型
500	交流	坡山二线	012号	农业型
500	交流	资洪一线	043号	工业型

2 监测数据

为了更好地分析盐密数据,收集每天当地天气预报信息作为数据分析参考。图2为±500 kV 德宝线0064号、0387号杆塔2011年4月24日至5月30日盐密曲线。气象信息见表2。

表2 绵阳气象信息记录表

地区	日期 /月.日	白天天气	夜间天气
绵阳	4-23	阴	多云
绵阳	4-24	多云	多云
绵阳	4-25	多云	晴
绵阳	4-26	晴	晴
绵阳	4-27	晴	晴
绵阳	4-28	晴	阵雨
绵阳	4-29	多云	阴
绵阳	4-30	多云	阵雨
绵阳	5-1	雷阵雨	中雨
绵阳	5-2	阵雨	阴
绵阳	5-3	多云	多云
绵阳	5-4	晴	晴
绵阳	5-5	晴	多云
绵阳	5-6	多云	多云
绵阳	5-7	多云	多云
绵阳	5-8	阴	中雨
绵阳	5-9	小雨	中雨
绵阳	5-10	阴	阵雨

续表2

地区	日期 /月.日	白天天气	夜间天气
绵阳	5-11	多云	阴
绵阳	5-12	阵雨	小到中雨
绵阳	5-13	阴	中雨
绵阳	5-14	阴	多云
绵阳	5-15	阴	晴
绵阳	5-16	多云	晴
绵阳	5-17	多云	晴
绵阳	5-18	晴	晴
绵阳	5-19	多云	多云
绵阳	5-20	阴	大到暴雨
绵阳	5-21	阵雨	小雨
绵阳	5-22	多云	多云
绵阳	5-23	多云	阵雨
绵阳	5-24	阴	多云
绵阳	5-25	多云	多云
绵阳	5-26	晴	多云
绵阳	5-27	多云	多云
绵阳	5-28	阴	中雨
绵阳	5-29	阵雨	小雨
绵阳	5-30	阵雨	阵雨

如图2所示,德宝直流0064号及0387号杆塔盐密监测点于2011年4月24日安装后开始积污,污秽值缓慢上升,5月初两个监测点盐密值均有所下降,其后3天盐密值又上升,5月10日左右盐密值又出现下降值,直到5月20日盐密有一个明显的下降,对比表1绵阳地区气象记录表可以发现盐密值的变化与降雨量保持很好的一致性,且两个监测点盐密值变化趋势也基本相同,处于工业型污秽环境的德宝线0387号监测点的盐密值也约高于处于农业型污秽环境的德宝线0064号监测点盐密值,这与运行经验一致。

图3、图4分别为交、直流线路监测点不同污染类型盐密对比曲线图,如图所示,无论是农业型盐密对比监测点还是工业型盐密对比监测点,直流线路监测点积污速度均高于交流线路监测点积污速度,这与以往研究结论一致。

图5为4个监测点盐密对比曲线,如图5所示,2011年5、6、7、8、9月降雨较多,降雨对盐密值起到很好的清洗作用,使4个监测点前期盐密值一直保持较小,9月下旬雨水慢慢减少,进入积污期,盐密值有很明显的增长过程,特别是处于工业型污秽环境的直流监测点,德宝线0387号监测点10月份一个月内盐密增长值与前面5个月增长值相当。图5中直流监

测点盐密值变化与交流监测点也有所不同,交流线路邻近几天的盐密值变化均较为平滑,直流线路却是呈波动变化。

3 结论及展望

±500 kV 德宝线 0064 号、0387 号杆塔、500 kV 坡山二线 012 号杆塔、500 kV 资洪一线 043 号杆塔 4 个监测点盐密数据与当地气象数据分析结果表明,盐密值变化与天气变化具有很好的一致性,利用光传感器盐密在线监测装置可以实现交、直流线路盐密值实时在线测取,能准确反映现场污秽环境。交、直流线路盐密分析结果表明,直流线路盐密增长速度高于交流线路,与以往研究结论一致。下一步,会每三个月对交、直流线路监测点盐密值进行对比分析,并记录分析结果,直到盐密值达到饱和。从而确定四川典型地理环境下交、直流线路积污特性,掌握四川地区交、直流线路积污规律。

参考文献

[1] 宿志一,刘燕生.我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J].电网技术 2004,28(10):13-17.

[2] 高海峰,樊灵孟,李庆峰,等.±500 kV 高肇直流线路绝缘子积污特性对比分析.高电压技术 2010,36(3):672-677.

[3] 宿志一.北方内陆地区线路悬式绝缘子串的直流自然积污特性[R].北京:中国电力科学研究院,1990.

[4] Su Z, Liang X, Yin Y, et al. Outdoor Insulation Selection Method of HVDC Lines [C]. //14th International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, China [s. n.], 2007.

[5] 吴光亚,宋伟,蔡炜,等.光谱法检测输变电设备盐密的实验室研究[J].高电压技术 2001,27(5):57-58.

[6] 谢强,朱瑞刚,熊鹏.晋中地区输电线路微气象及盐密监测系统应用[J].电网技术 2010,159(2):21-23.

(收稿日期:2011-11-21)

(上接第 21 页)

网频率的动态响应产生严重的影响,甚至会影响到新疆电网的低频减载方案。因此,要采取合适的措施来防止这种事故的发生,近一步提高新疆电网频率的安全稳定性。

参考文献

[1] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等.微电网孤网运行时的频率特性分析[J].电力系统自动化 2011,35(9):36-41.

[2] 熊小付,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J].中国电机工程学报 2005,25(19):48-51.

[3] 赵庆波,曾鸣,刘敏,等.电力市场中的负荷频率控制方案研究[J].中国电机工程学报 2002,22(11):45-50.

[4] 曾启明,陈伟乐,谢志堂,等.电力系统频率新的跟踪算法[J].中国电机工程学报 2005,25(19):48-51.

[5] 赵强,张丽,王琦,等.系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J].电网技术 2011,35(3):69-73.

[6] 王合帧,李向容,陈栋新.电网频率特性及负荷反馈 df/dt 的实测分析[J].电网技术 1995,19(12):43-47.

[7] 肖遥,孟·让·柯洛德.电力系统频率测量误差成因分析[J].电网技术 2002,26(1):29-42.

[8] 秦明亮,杨秀朝.减少低频减载方案过切的措施的研究[J].电网技术 2002,26(2):83-86.

[9] 赵强,王丽敏,刘肇旭.全国电网互联系统频率特性及低

频减载方案[J].电网技术 2009,33(8):35-40.

[10] 陈桥平,蔡泽洋,李爱民,等.互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J].中国电力,2009,42(8):1-5.

[11] 古丽扎提·海拉提,加码力汗·库马什,常喜强.新疆地区电网频率特性仿真分析[J].中国电力,2008,43(8):45-48.

[12] 周海峰,倪腊琴,徐泰山.电力系统功率频率动态特性研究[J].电网技术 2009(16):58-62.

[13] 张恒旭,庄佩沁,祝瑞金,等.大受端电网频率稳定性研究[J].华东电力 2009(10):1644-1649.

[14] 云雷,刘涤尘,张琳,等.负荷特性对跨区大电网低频振荡的影响研究[J].电力自动化设备 2009,29(8):41-45.

[15] 张忠林.关于电网频率若干问题的浅析[J].东北电力技术 1996(10):16-20,12.

[16] 赵勇,胡剑琛,顾志东,等.海南电网孤网运行时的频率特性分析[J].南方电网技术 2009,3(5):27-30.

[17] Bin Qiu, Yiyu Liu. Lan-based Control for Load Shedding [J]. IEEE Computer Applications in Power 2002,12:38-43

[18] Under-frequency Load Shedding Relay Application Guide [R]. Salt Lake City, UT, USA: Western Systems Coordinating Council, 1974.

(收稿日期:2011-10-17)

对 500 kV 断路器膜纸绝缘均压电容介质损耗试验探讨

文 剑

(四川省电力公司超(特)高压运行检修公司成都中心,四川 乐山 614000)

摘 要: 主要介绍膜纸复合绝缘电容器的特性, Garton 效应对膜纸复合绝缘电容器介质损耗试验的影响及在低电压(常规 10 kV) 和高电压下膜纸复合绝缘电容器介质损耗试验探讨。

关键词: 介质损耗; 膜纸绝缘; Garton 效应; 解决方法

Abstract: The characteristics of film and paper composite condenser are mainly introduced. The influence of Garton effect on the dielectric loss test of film and paper composite condenser is discussed. The dielectric loss tests of film and paper composite condenser under low voltage (normally 10 kV) and high voltage are also discussed.

Key words: dielectric loss; film and paper insulation; Garton effect; solution method

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)01-0073-04

对于运行中的 500 kV 及以上断路器均压介损试验, 采用常规加压 10 kV, 正接法试验。经常出现介损值超过国家《规程》规定(《规程》规定膜纸复合绝缘电容量不超过 0.2%, 现在高压断路器均压电容大都采用膜纸复合绝缘) 而电容量变化不明显的现象。而其他绝缘试验结果均都符合规程规定, 继续投入运行后仍无异常。这对试验人员对试验结果的分析判断带来很大的影响。

1 电容器介质损耗试验分析

目前, 在电气试验中主要都是通过 10 kV 下的介损试验测量($\tan\delta$) 的大小来发现设备的缺陷。可是, 10 kV 的试验电压远低于设备的运行电压, 不能真实反映设备运行时的状况。良好的绝缘在允许的电压范围内, 无论电压上升或下降, 其介损值均无明显变化。但现场试验数据显示, 不同绝缘介质设备的介质损耗($\tan\delta$) 值会随着电压的升高而变大或变小。所以在设备运行电压下做介质损耗测试才能真实反映设备的绝缘情况。

如进口 500 kV 开关均压电容, 在 10 kV 下测量的介损值通常都比额定电压下要大, 经调查研究确定介损试验受 Garton 效应影响出现超标情况。Garton 效应是 M. Garton 教授发现在含有纸的绝缘介质(或塑料以及油的混合介质) 中, 在较低电压下介质损耗正切值的变化可以比较高电压下的值高 1~10 倍。

1.1 膜纸复合绝缘介质电容器特性

聚丙烯粗化膜就是采用超高纯度电工级聚丙烯树脂为原料, 经平膜法双向拉伸而成。具有厚薄均匀性好, 耐压强度高、介质损耗小、易卷制等优异的物理及电气性能。且与多种电容器浸渍油相溶性好, 经国家电力电容器检测中心检定, 符合作为电力电容器绝缘介质的各项性能。

1) 应用范围: 主要用于以铝箔为电极, 膜纸复合为介质或全膜介质油浸式电力、电热及其他相关高压电容器。

2) 技术特性(典型值) 见表 1。

表 1 电容器技术特性

名 称	典型数值	测试条件
拉伸强度	纵向 /MPa	140
	横向 /MPa	200
断裂伸长率	纵向 /%	150
	横向 /%	50
热收缩率	纵向 /%	3.5
	横向 /%	1.5
空隙率	平均值 /%	9.0 (6 ~ 9 μm) , 10.0 (10 ~ 18 μm)
	极限值 /%	最大 Max 15
		最小 Min 6
表面粗糙度 / μm	0.25 ~ 0.65	23 $^{\circ}\text{C}$
介电强度 /V/ μm	520	23 $^{\circ}\text{C}$ 空气中
相对介电常数	2.2	50 Hz or 1 kHz 23 $^{\circ}\text{C}$
体积电阻率 / $\Omega \cdot \text{m}$	5.0×10^{15}	23 $^{\circ}\text{C}$
介质损耗因素	2×10^{-4}	50 Hz or 1 kHz @ 23 $^{\circ}\text{C}$

1.2 膜纸复合绝缘电容低电压下介质损耗情况

膜纸复合绝缘电容器用聚丙烯薄膜与电容器纸复合浸渍有机合成绝缘油介质取代电容器纸浸矿物质油介质,有功损耗较低,约为油纸绝缘电容器的1/4,介质损耗因数小于0.1%,因为其中聚丙烯粗化膜电容器的介质损耗因数只有0.01%,损耗为电容器纸的1/10,有机合成浸渍剂的介质损耗因数也只有0.03%。现场试验发现膜纸复合绝缘电容器介质损耗因数大大超过0.1%,甚至超标。有两种可能性:①是制造上的原因,如引线端子焊接不良,引线片与铝箔接触不良,有毛刺,容易引起放电,铝箔或膜不平整,浸渍不良等,均会引起介质损耗因数增大。②是

试验过程或仪器方面的,如果介质损耗因数的出厂试验值比较小而现场试验值较大,则应考虑现场试验的复杂情况。

用AI-6000F自动抗干扰电桥对断路器均压电容进行10kV正接法测量,大多数介质损耗因数为0.2%~0.1%,但也有部分为0.2%~0.3%。虽然有少部分介质损耗因数超过0.2%,但也不能认为不能运行。

以500kV蓝天变电站对500kV开关均压电容(面向主变压器左边为1)在投运时间为1年后首次检修时(全站停电检修无电场干扰)进行10kV介质损耗试验的数据,试验数据见表2。

表2 10kV介质损耗试验数据

开关 编号	相 别	编 号	前一次测量值 ($T=20$, $F=55%$, 泛华 AI-6000D 自动电桥)		本次测量值 ($T=18$, $F=75%$, 泛华 AI-6000D 自动电桥)		本次测量值($T=18$, $F=75%$, 2801电桥)	绝缘电阻
			tg δ /%	C_x /pF	tg δ /%	tg δ /%	测试单位:上海电 容器具检测所	
5021	A1	20916	0.534	1215	0.506	0.37	10 000 +	
	A2	20927	0.538	1221	0.514	0.378	10 000 +	
	B1	20948	0.653	1225	0.6	0.47	10 000 +	
	B2	20788	0.497	1222	0.485	0.345	10 000 +	
	C1	20920	0.245	1219	0.231	0.088	10 000 +	
	C2	20917	0.348	1225	0.358	0.211	10 000 +	
5022	A1	22396	0.26	1202	0.249		10 000 +	
	A2	22399	0.188	1203	0.194		10 000 +	
	B1	22429	0.352	1205	0.333		10 000 +	
	B2	22397	0.312	1202	0.299		10 000 +	
	C1	22400	0.242	1204	0.255		10 000 +	
	C2	22398	0.205	1205	0.225		10 000 +	
5023	A1	23101	0.331	1226	0.306	0.156	10 000 +	
	A2	20918	0.373	1227	0.347	0.208	10 000 +	
	B1	20950	0.635	1234	0.579	0.446	10 000 +	
	B2	20947	0.549	1221	0.498	0.362	10 000 +	
	C1	20876	0.544	1232	0.494	0.364	10 000 +	
	C2	20920	0.586	1229	0.55	0.340	10 000 +	
5063	A1	20835	0.435	1222	0.371	0.246	10 000 +	
	A2	20843	0.553	1216	0.476	0.338	10 000 +	
	B1	20842	0.497	1218	0.517	0.376	10 000 +	
	B2	20891	0.591	1230	0.43	0.292	10 000 +	
	C1	20929	0.661	1220	0.62	0.480	10 000 +	
	C2	20954	0.535	1221	0.507	0.362	10 000 +	
5062	A1	20804	0.25	1224	0.227	0.096	10 000 +	
	A2	20901	0.35	1219	0.32	0.190	10 000 +	
	B1	20892	0.479	1222	0.46	0.310	10 000 +	
	B2	20930	0.667	1231	0.667	0.556	10 000 +	
	C1	20928	0.628	1217	0.601	0.450	10 000 +	
	C2	20912	0.572	1213	0.543	0.400	10 000 +	

注:该开关为阿海珐开关,其均压电容器铭牌为:CPF 460/1050-1.2 SANS PCB 50-60HZ;280kV 460/1050kV 1200±pF;20P30 L2006 Δt 50/±70°C

从上面的数据看,在 10 kV 电压下对均压电容器进行介电损耗试验电容量及绝缘电阻测试的值与出厂值和交接数据变化不大,但介电损耗值 $\text{tg}\delta\%$ 变化明显,普遍偏大。用泛华 AI-6000D 自动抗干扰电桥的数据最大达到 0.67%,即使用测试单位:上海电容器检测所的高精度 2801 电桥试验结果也大大超过《电力设备预防性试验规程》0.2% 的要求。

所以对低电压下(10 kV)进行正接法测试介电损耗因数偏大的原因除了仪器自身精度影响外,主要有两个原因。

1) 天气潮湿,设备表面泄漏影响较大。湿度较大时介电损耗因数显著偏大,甚至严重超标。曾经有一清早即进行试验,介电损耗因数达到 0.4%,无论怎么也降不下来,中午天气晴朗后,再次试验,采用同样的仪器和方法,试验结果降到 0.2% 以下。

2) 高压引线和设备接触不良现场试验的设备刚投运时,表面有漆膜,如果不刮去,接触电阻就相当大,在设备运行一段时间后,还会产生氧化层。对 500 kV 断路器均压电容器试验时,通常采用绝缘杆挂接线,设备表面的这些电阻层不易破除,相当于试品中串接了一个接触电阻 R_j 。由串联电容试品等值电路,得试品的介电损耗因数为 $\text{tg}\delta = \omega Cx(Rx + Rj)$ 。式中 ω 为角频率; Cx 为试品等值串联电容; Rx 为试品等值串联电阻。

介电损耗因数增量 $\Delta\text{tg}\delta$ 为

$$\Delta\text{tg}\delta = \omega CxRj$$

如果高压引线接触电阻为 500 Ω ,对 0.01 μF 的试品,有 $\Delta\text{tg}\delta = 0.157\%$ 。该增量对油纸绝缘电容试品的介电损耗因数不会造成误判,因为其介电损耗因数标准较为宽松,一般要求不大于 0.5%,故 0.157%

影响不大。但对于膜纸复合绝缘的试品则很关键,因为,出厂值一般在 0.1% ~ 0.2%,交接和预防性试验规程要求小于 0.2%。在发现高压引线接触电阻影响后,一般采用高空作业车,用强力试验钳夹紧试品以消除接触电阻影响。

但仍然有部分介电损耗因数不符合规程要求(小于 0.2%)。

2 高电压下膜纸复合绝缘电容器介电损耗试验探讨

所以高电压介损试验越来越受到重视,国家电网公司在国家电网生(2009)819号(关于印发《预防油浸式电流互感器、套管设备事故补充措施》的通知)上也提出了对 110 kV 以上电流互感器、套管等开展高电压试验的要求。另外国家电网公司新颁布的企业标准 Q/GDW 168-2008《输变电设备状态检修试验规程》中也要求对主变压器套管、互感器、断路器等运行设备开展额定电压的介损试验。

以下介绍高电压下 500 kV 开关膜纸复合绝缘均压电容高电压下介电损耗试验方法。

1) 均压电容采用正接线,试验接线为一侧接地,先做一侧,另一侧接地。

2) 断路器均压电容高电压介损试验,因试品容量一般小于 2000 pF,所以用 AI-6000M 直接带试验变压器升压,组件最少,接线最简单。只需 AI-6000M 主机、试验变压器和高压标准电容器三大件即可,试验接线如图 1。

3) 500 kV 蓝天变电站对 500kV 开关其中 1 只在 10 kV 试验时介电损耗超标的均压电容进行高电压

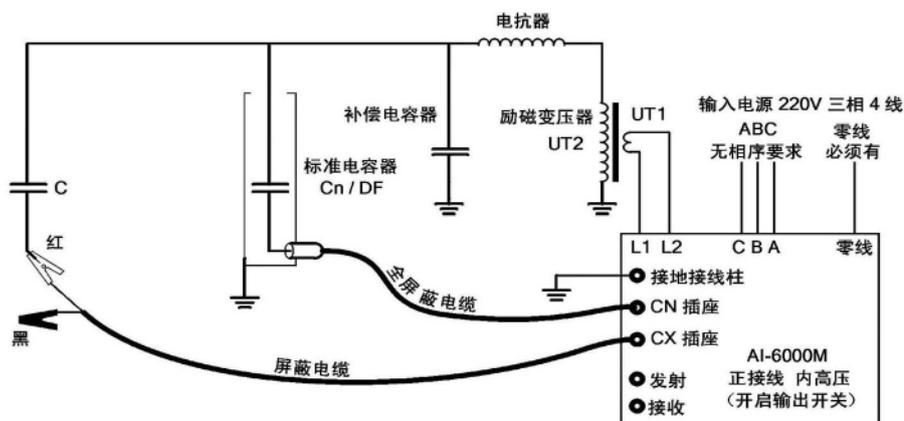


图 1 介损试验接线图

表3 介损超标高电压试验结果

NO	设置电压 /V	实测电压 /kV	电容量 /nF	tgδ /%
01	10000	9.844	1.212	0.587
02	20000	19.69	1.210	0.381
03	30000	29.51	1.209	0.255
04	40000	39.34	1.204	0.205
05	50000	49.17	1.204	0.183
06	60000	58.99	1.204	0.181
07	70000	68.80	1.204	0.186
08	80000	78.56	1.204	0.190
09	90000	88.32	1.204	0.199
10	80000	78.52	1.204	0.192
11	70000	68.74	1.204	0.186
12	60000	58.94	1.204	0.178
13	50000	49.13	1.204	0.180
14	40000	39.32	1.205	0.201
15	30000	49.13	1.204	0.253
16	20000	19.68	1.210	0.369
17	10000	9.840	1.212	0.561

注: 试品名称: AI-6000M 正接线 测量日期: 2010/10/20
10:40 频率设置: 50 ± 1 Hz

试验结果见表3。

从上面数据可以看到电容量与电压变化的关系不大,但是随着电压的升高其介质损耗呈现明显的下降趋势,原来在低电压(10 kV)试验电压下介质损耗tgδ高达0.57%,随着试验电压升高其介质损耗下降明显,当电压升高到50 kV及以上后tgδ下降到合格范围,当试验电压升高到60 kV时,介质损耗tgδ最低,但是当试验电压继续升高后其介质损耗也约有上升,但变化幅度不大,其值也在《规程》范围内。4) 试验结果图形

试验采用 AI-6000M 电质损耗测试仪:

AI-6000H 2010/10/20 10:40 50 ± 1Hz

22℃,试验结果见图2。

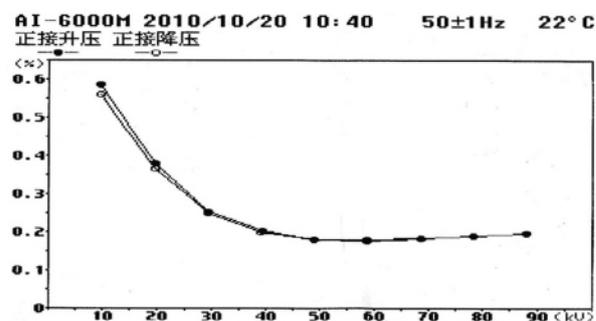


图2 试验结果图

5) 数据分析

从电压上升曲线上看,电压从10 kV到50 kV,介损从0.587%急剧下降到0.183%,这是均压电容内部绝缘材料的Garton效应引起的介损剧烈变化,当极性分子达到平衡,介质损耗趋于稳定,随着电压的继续升高,介损略有增大,这是由于表面泄漏引起的介损增大。

下降曲线是上升曲线的逆过程,但两条曲线一般不会完全重合,但试验值的变化趋势基本相同。

3 结论

对于运行中的500 kV及以上断路器均压介损试验,采用常规加压10 kV,正接法试验。由于Garton效应的影响,经常出现介损值超过国家《规程》规定(膜纸复合绝缘电容量不超过0.2%)的现象,当低电压下tgδ在除了仪器自身精度影响和试验方法的影响不符合规程要求(大于0.2%)时,此种情况下可进行额定电压下的复测,复测值如符合10 kV的要求,可继续投入运行。

(收稿日期:2011-09-16)

(上接第23页)

负荷的同步变化,因此分析机组负荷波动原因时在实际工作中往往需从以下几个方面入手:①结合机组或线路故障录波装置通过分析机组励磁控制系统的波形图,查找是否有来自电网的干扰因素;②分析调速器控制系统部分硬件存在的问题及可能造成的后果,软件是否存在逻辑控制缺陷;③分析调速器机械部分是否存在发卡或堵塞等导致负荷波动的因素;④停机后有针对性地检查控制系统或机械部分软硬件存在的问题;⑤必要时应通过相关模拟试验进行功能验证,如检查调速器电转信号动作方向、机械零位检查

与调整、并网后负荷增减试验等。

此次缺陷能及时有效地得以解决,正是基于对数据的综合仔细分析后作出了有针对性的检查处理。

参考文献

- [1] 魏守平. 水轮机控制工程[J]. 电力系统自动化, 2005(12): 82-82.
- [2] 谭中美, 刘小改. 二滩水电站调速器控制系统改造[J]. 水电站机电技术, 2005, 28(1): 64-65.
- [3] 魏守平, 王雅军, 罗萍. 数字式电液调速器的功率调节[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003(4): 20-22.

(收稿日期:2011-11-07)

电压互感器二次回路 N600 多点接地查找及处理

钟文华

(广东国华粤电台山发电有限公司, 广东 台山 529228)

摘要:电压互感器二次回路应有且仅有一个接地点,然而现实中不少厂(站)的电压互感器二次侧不止一个接地点。由于接地网存在电位差,这种相量叠加后的电压给继电保护的准确动作带来很大的压力。从理论上分析电压互感器二次回路多点接地的危害,并结合台山电厂 220 kV 变电站查找 N600 多点接地的实际例子,介绍了 N600 多点接地的判断及查找方法,并提出了防范措施。

关键词:电压互感器; N600; 接地点; 查找; 电流

Abstract: Only one grounding point should be have in the secondary circuit of voltage transformer, however there are some power plants that the secondary circuits of their voltage transformer have more than one grounding point in fact. Because of the potential difference of earthing grid, the voltage superimposed by these phasors will give more pressure to the accurate action of relay protection. The influence of multipoint earthing in secondary circuit of voltage transformer is analyzed, and the searching for N600 multipoint earthing of Taishan 220 kV substation is taken as an example. The judgment and searching methods for N600 multipoint earthing are introduced, and the precautionary measures are given.

Key words: voltage transformer; N600; grounding point; searching; current

中图分类号: TM45 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0077-03

0 引言

《电力系统继电保护反事故措施》规定:经控制室零相小母线 N600 连通的几组电压互感器二次回路,只应在控制室一点接地。若 N600 存在多个接地点,流入保护装置的二次电压幅值及相位可能发生改变,严重的情况下将会导致继电保护及安全自动装置不正确动作,应坚决杜绝。台山电厂技术人员在核查厂内 220 kV 变电站电压互感器二次侧 N600 接地情况时,运用了电阻法、电流法,最终发现多个接地点并及时处理,成功消除了安全隐患。

1 电压互感器二次回路多点接地的危害

图 1 是典型的电压互感器二次回路图。假设在电压二次回路 N600 在 TV 端子箱处存在接地点 1,在保护安装处存在另一接地点 2。当两者之间距离较远,两接地点所在接地网的电位是不同的,尤其当变电站、线路出口发生接地故障或遭受雷击,接地网将流过很大的电流,两个接地点之间将产生很高电位

差。实际流入保护装置的电压如 A 相电压变为 $\dot{U}_A = \dot{U}_{A611} + \Delta \dot{U}$,这种经过相量叠加后的电压已不能正常反映一次电压幅值和相位,必然破坏保护的正常工作状态,可能导致严重后果。

如果电压达到保护定值而又未能有效闭锁时将导致反应过电压而动作保护发生误动,如过激磁、距离保护等;由于自产 $3U_0$ 方向发生偏移致使零序功率方向误判,导致方向保护误动,如纵联零序方向保护。由此可见电压互感器二次回路若存在多点接地,对继电保护的危害最大,严重干扰保护的动作为。

以上结论同样适用于几组电压互感器二次回路经过 N600 多点接地的情形。

2 N600 多点查找方法

110 kV 及以上变电站、大型发电机组的电压互感器二次电压广泛用于保护、监控、计量、故障录波等,由于回路分布广且接线复杂,因此在设备正常运行情况下较难查找接地点,特别是接线不规范、空间狭窄以及未经过小母线而在端子排处直接接地的情况给技术人员带来一定的困难。这里介绍一种通过

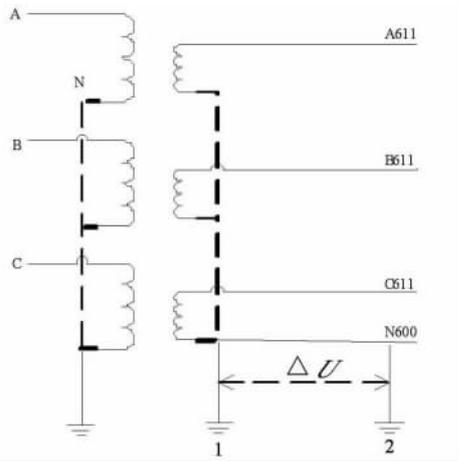


图1 典型的电压互感器二次回路图

测量 N600 接地线电流的大小作为主要判别依据的方法,该方法实际操作起来简单且又有效,值得推广。

“电阻法”和“电流法”是运用了等效电阻原理(如图2),正常情况下 TV 二次回路电缆对地分布电容 C 、TV 二次电压 U_1 以及永久一点接地形成回路,而由于分布电容很小,呈现出高阻抗,因此 N600 接地回路中的电流值 i 基本上由分布电容 C 容抗和二次电压 U_1 决定,数值较小。当 N600 只在控制室存在一个永久接地点时,增加滑线电阻 R 而拆除原永久一点接地后,调节滑线电阻 R 的阻值,测量电流 i 的大小几乎不变。而当 TV 二次回路存在两个及以上接地点时,因两接地点存在电位差 U_1 ,两接地点构成的回路中, N600 电流将因滑线电阻 R 的变化而明显变化。

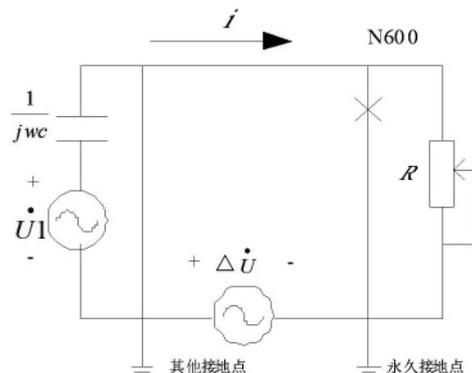


图2 电阻法和电流法运用等效电阻原理图

通常把测量电流小于 50 mA 的电压互感器二次回路 N600 认为只存在一个接地点,当测量结果大于 50 mA 时,可采用“电阻法”进一步确定是否存在多点接地,继而利用“电流法”找出 N600 接地点所在具体电压支路。

下面以台山发电厂 220 kV 变电站电压互感器多点接地的查找过程为例具体介绍。

3 N600 多点接地查找实例

3.1 测量 N600 接地电流

台山发电厂 220 kV 变电站采用双母线不带旁母的接线方式,带有两台 600 MW 燃煤机组、4 条 220 kV 输电线路以及 4 台启备变压器用于高压厂用电切换。两组母线各配置 2 台变比为 $(220/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1)$ kV 的电压互感器,两组电压互感器中性点 N600 相互连通,变电站于 2004 年正式投运。继电保护技术人员在最近一次全厂范围内的电压互感器 N600 多点接地普查活动中,在检查 220 kV 变电站时在辅助继电器屏测量 N600 小母线永久接地线电流为 240 mA,明显大于南方电网公司给出的参考值 50 mA,存在多点接地的现象,继而开展进一步的检查。

3.2 电阻法确认 N600 多点接地

电阻法主要用于确定 N600 是否存在多个接地点,其接线如图 3。操作步骤及分析如下。

第一步:合上刀闸 K,拆除在 220 kV 辅助继电器屏上的 N600 接地线。

第二步:调整滑线电阻至 0Ω ,合上刀闸 K1,断开刀闸 K,测得滑线电阻导线的电流为 235 mA。

第三步:合上刀闸 K,断开刀闸 K1,滑线电阻 R 调至一定值,合上 K1,断开刀闸 K,测量滑线电阻导线上的电流为 45 mA。

由于滑线电阻上的电流随电阻值的变化而变化,因此可以认定本变电站内的电压互感器二次回路 N600 不止一个接地点。

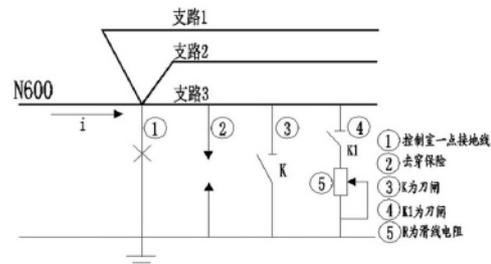


图3 电阻法和电流法试验接线图

3.3 电流法确定 N600 多点接地支路

电流法主要用于查找 N600 接地点所在支路,其接线同图 2。

该方法分别测量在刀闸 K 合上及断开情况下某一支路 N600 线的电流是否有变化,如电流出现明显变化,则可判断该支路存在接地点,再根据二次回路

图纸在该支路所涉及到的屏柜内具体查找。

事实上台山电厂 220 kV 变电站电压二次回路分布广泛,除网控室外还布置于 1、2、3 号机组电子间相关保护屏及辅助屏柜,确认支路存在接地点后找出接地线并非易事。技术人员必须充分考虑到设备正常运行期间人员误碰、接线松动等不安全因素,而采取合适的安全防范措施。通过对站内电压二次回路认真盘点及仔细检查,技术人员在 3 号高压备用变压器保护屏的保护电压回路上找到一个接地点,拆除接地线后再次测量 220 kV 辅助继电器屏顶电压二次 N600 接地电流降至 170 mA,但仍然超过合理值。继续试验查找,最终又在关口表屏发现另一接地点,拆除后再次测量 N600 接地线电流大幅下降至 10 mA,且随后连续几个月内测量值基本在 8~10 mA 左右,至此可以认为处理后的 220 kV 变电站 TV 二次回路 N600 一点接地。

台山电厂 220 kV 变电站电压互感器 N600 接地示意图如图 4。

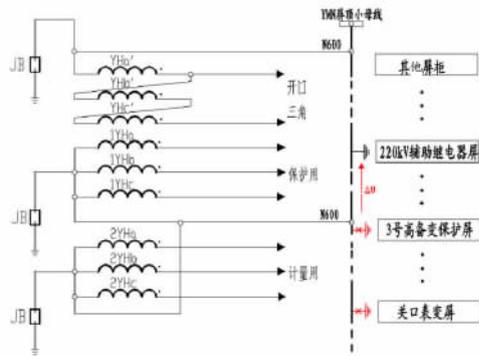


图4 台山电厂 220 kV 变电站电压互感器 N600 接地示意图

4 N600 多点接地线的处理

确定 N600 多个接地点位置后,应该尽快拆除。测量、试验及拆除工作应选择天气晴朗、保护及安全自动装置运行正常的条件下进行。通常在保护小室选定一个 N600 接地点作为永久接地点,其余接地点应就地拆除。拆除 N600 接地线的过程中,应做好必要的安全措施,密切监视 N600 永久一点接地处的测量电流变化以及 TV 三相电压是否平衡,拆除后宜及时查看相关保护及安全自动装置的电压采样情况,包括电压幅值及相位是否正常。

5 N600 多点接地的防范措施

继电保护反事故措施明确提出:电压互感器二次

回路只应有一个接地点,然而实际上由于基建安装单位对《反措》要求的了解和熟悉的程度不足、设计不合理、调试及验收人员未能及时发现等原因,N600 多点接地造成继电保护误动的事例时有发生,应当引起继电保护人员充分重视。建议从以下几点出发,在变电站设计、基建改造及日常维护中重视 TV 二次回路一点接地的重要性。

(1) 做好图纸审查工作,在设计出图纸时保证 TV 二次回路接地点满足规程及反措的要求;

(2) 新建或改扩建变电站的验收内容应包括 N600 的接地检查项目,设备投运前应测量 N600 接地电流并记录存档备查;

(3) 已投运的厂(站)开展一次电压二次回路 N600 接地情况专项核查工作,当测量 N600 接地电流不满足要求时立即检查处理;

(4) 利用机组或线路停电机会盘点全厂(站)电压二次回路,形成清晰的图纸清册;

(5) 定期测量 N600 接地电流,发现测量数据出现大幅度增加超过 20 mA 时应开展详细检查。

6 结 语

电压互感器二次回路多点接地对继电保护具有较大的潜在威胁,台山电厂在电压互感器二次回路接地专项检查中,使用了正确的试验手法,发现 220 kV 变电站存在多个接地点并成功处理,并把 N600 接地电流测量列为定期工作,定期测量记录数据,最终形成一种长期监视 N600 接地情况、确保永久一点接地的有效手段。

参考文献

- [1] 广东省电力调度中心. 广东省电力系统继电保护反事故措施及释义(2007版)[G]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 季佳彬,张桂芝. 发电厂及电力系统反事故技术措施汇编[G]. 华北电力科学研究院有限责任公司,2002.
- [3] 石文章,田俊杰,张涛. TV二次回路多点接地造成保护拒动的实例分析[J]. 电力学报,2004(2):153-154.
- [4] 张帆,李一泉,袁亮荣,等. 电压互感器二次回路接地研究[J]. 广东电力,2008(4):5-9.
- [5] 刘晓忠,叶东印. 电压互感器二次回路接地点分析[J]. 继电器,2007(18):65-67.
- [6] 西北电力设计院. 电力工程电气设计手册(电气二次部分)[S]. 北京:中国电力出版社,1996.

(收稿日期:2011-08-11)

提高变电站一次设备预防试验效率的可行方法

汪立¹, 刘代祥²

(1. 四川福溪电厂 四川 成都 644000; 2. 四川电力调整试验所 四川 成都 610016)

摘要:500 kV 变电站的预防试验工作往往是工作量大、耗时间长,容易造成工作人员精神不集中,另外站内较强的感应电会影响工作进度、试验数据,甚至损坏试验仪器或让试验人员承受电击之痛。所以在保证预防试验全面准确的前提下,通过提高工作效率来降低工作量及减少工作时间就成为急需探讨的问题。就500 kV 变电站一次设备预防试验工作中一些提高效率的可行方法作了介绍。

关键词:预防试验; 提高效率; 方法

Abstract: The preventive test of 500 kV substation is always a long time of hard work, so the working staff can hardly concentrate their attention on work, and the induced voltage will affect the working schedule and test data, even damage the instruments or let the staff get an electric shock. So, how to improve the working efficiency and reduce the work load and working time is an important and instant problem. Some useful methods that will improve the working efficiency in the preventive test of primary equipment in 500 kV substations are introduced.

Key words: preventive test; efficiency improvement; method

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0080-03

0 引言

500 kV 变电站一次设备器身高,高压引线粗,每次预防试验都需拆除一次引线,反复地拆除和恢复引线对一次设备的安全会构成一定威胁;况且,现在各厂站都配备了极少数的专业高压试验人员,长时间紧张工作、过高的试验电压以及升压站内极强的感应电,都可能造成工作人员身心疲惫甚至可能危及人身安全。结合实际工作,从试验方法、试验设备以及感应电预防等不同角度提出了一些行之有效的简易方法。

1 试验方法

1.1 不拆一次引线的方法。

1) 以山东泛华电子 AI-6000E 介损测试仪测量 TYD500/ $\sqrt{3}$ -0.005H 型电容式电压互感器介损和电容量为样本,通过在前几年常规 CVT 拆引线试验的经验基础上,在今年完成 CVT 拆引线试验后,模拟不拆引线工况进行了不拆引线 CVT 试验的尝试。常规 CVT 拆引线试验方法为:上中两节均采用正接法,下节采用 CVT 自激法。不拆引线试验方法为:上节采用反接“M”法,中节采用正接法且不需要重新接

线(上节和中节接线如图1),下节仍采用 CVT 自激法(图1)。方法及结果比较:①拆除引线加大工作人员的工作量,一个间隔(三相)可以节省1个工作日以上;②在户外运行的互感器引线端子往往存在锈蚀的情况,拆线存在一定的困难,如果恢复不到位还可能存在接头接触不良而放电或发热的情况,影响电网的安全稳定运行;③不拆引线还可以极大减少对人员的安全隐患;④上节和中节只需一次接线即可。接线方法见图1,试验数据见表1。

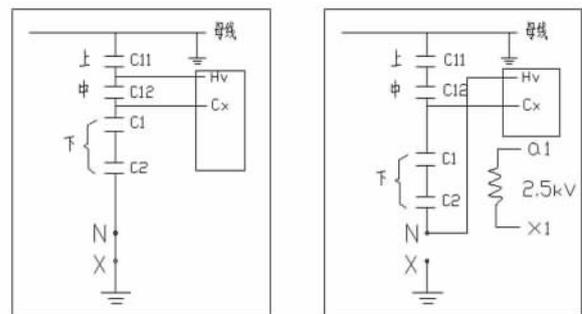


图1 接线方法

由表1的试验结果可以看出,不拆引线和拆除引线的测试数据基本一致,说明不拆引线的方法可行。

2) 变电站内避雷器预防试验工作中拆、接引线对电网运行和工作人员都存在安全隐患,也算比较繁琐的工作。将避雷器拆除引线和不拆除引线的试验

表1 试验数据

类别 项目	母线 CVT 拆引线		母线 CVT 不拆引线		线路 CVT 拆引线		线路 CVT 不拆引线	
	介损值/%	电容量/pF	介损值/%	电容量/pF	介损值/%	电容量/pF	介损值/%	电容量/pF
上节	0.071	14890	0.058	14 900	0.081	15 120	0.061	15 120
中节	0.073	15 030	0.060	15 020	0.082	15 020	0.061	15 110
下节 C1	0.051	72 140	0.064	72 160	0.046	71 160	0.069	70 610
下节 C2	0.048	18 740	0.056	18 700	0.049	18 860	0.060	18 690

表2 试验数据

类别 项目	拆引线		不拆引线	
	U_{1mA}/kV	$0.75U_{1mA}$ 下泄露/ μA	U_{1mA}/kV	$0.75U_{1mA}$ 下泄露/ μA
上节	209.2	32.3	209	28
中节	206.5	11.1	205	30
下节	201.1	10.3	202	40

方法及结果进行了对比。不拆一次引线时,需要将避雷器下节到放电计数器的引线拆除,否则在该引线上会有放电而造成试验失败,做上节试验(图2)时合上与避雷器并联的地刀,做中节(图3)、下节(图4)时断开地刀,本方法不适合做线路避雷器,因为停电后线路是接地的。试验数据见表2。

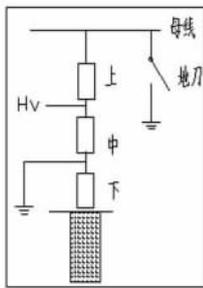


图2 上节试验接线图

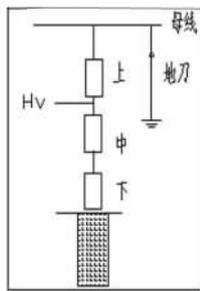


图3 中节试验接线图

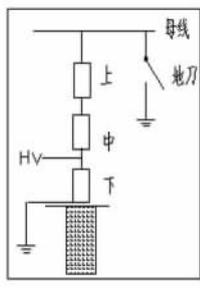


图4 下节试验接线图

1.2 部分拆除引线的方法

1) 500 kV 等级的变压器做高压侧直流电阻试验,往往都是把高压侧套管及中性点的引线都拆除再进行试验,但高压侧套管接线处离地面 10 m 左右并且是倾斜的,给拆除引线工作带来非常大的困难。通过分析变压器接地电阻与绕组直阻之间的关系来得出只拆除中性点引线做直流电阻试验的方法,因为变压器直阻为 $m\Omega$ 级,而地电阻也为 $m\Omega$ 级,两者并联后测量出来的基本上就不是变压器直阻了,所以需要至少断开一侧的一次引线,试验等效图见图5。

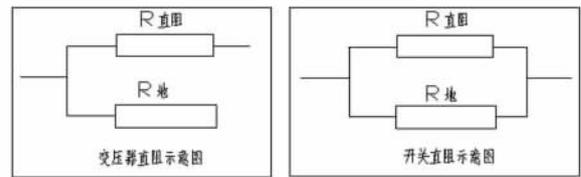


图5 试验等效图

2) 断路器回路电阻的测试也受到启发,为了防止感应电损坏试验设备,可以利用回路电阻的大小和地阻的关系得出可以不断开断路器两侧地刀进行回路电阻的测量,断路器回路电阻为 $\mu\Omega$ 级,而与其并联的接地电阻为 $m\Omega$ 级,两者并联后对回路电阻的大小是基本没有影响的,也可以采用断开断路器一侧地刀的方法测量回路电阻。这样,既不用劳师动众去拆除一次接线,又保护了试验设备免受感应电的冲击。

2 试验设备的保护

变电站的一次引线上交错,每次预防试验都不可能全站停电,所以即使停电间隔也会有非常强的感应电。曾经用北京艾斯德克交直流分压器从停电的

一次引线上测量有近900 V的感应电,如此强的感应电对试验设备也是一种考验。曾经用某型号断路器回路电阻仪测量断路器回路电阻,先接好仪器的地线,再将测试线从断路器引接至回路测试仪,立即发现测试仪内部冒烟,说明该仪器已经被感应电烧坏,并且该塑料外壳的试验设备在变电站已经烧坏两次。另外,有的设备在变电站就无法正确显示数据,比如做断路器低电压的某个仪器,合上装置电源,就有30~70 V的波动电压显示。所以,尽量选择抗感应电和抗干扰能力强的,比如铁质外壳的,其笼式的铁质外壳可以对内部的电子元件起到一定的保护作用。另外,试验人员需要对试验设备有充分的了解,学会保护试验设备,比如先将试验设备接地端子及外壳都与地线接好,把测试线一头接被试品另一端先不接入仪器,而是接到地线上,再拉开被试品两侧的地刀,等做完所有准备工作最后才将测试线接到仪器上立即开始试验,这样可以减少感应电荷在试验仪器上的积累。晴朗的天气是做试验的好时机,但让太阳暴晒试验设备可能会造成电子元件的老化。

3 感应电的预防

感应电就是导电设备外部所带的电。在变电站试验工作中,常常有人感到设备基础、构架等“有电”使人产生刺痛的电击感,有时这种电击的现象还很剧烈,工作人员在接线过程中常常被感应电电击而产生畏惧心理。虽然一般来说对人体没有危害,但会给试验人员造成心理上的创伤,如不引起足够的重视,很可能引起人身事故的发生。按照静电感应的原理,当一个导体接近一个带电体时,靠近带电体的一面,导体将感应出与带电体极性相反的电荷,而背向带电体的一面,将感应出与带电体极性相同的电荷。工作人员在接近带电导线时,相当于一个导体一样,在人体上会积累电荷,产生感应电压。这种感应电压对接地体(杆塔或构架)放电时,使人体产生刺痛感,而这种现象只有在人体与接地体(杆塔或构架)绝缘时才表现出来。因此,就需要工作人员在试验前作好有防感应电的心理准备,并作好防护措施,挂临时防护接地线;可以通过戴绝缘手套避免接线时被感应电电击,

只是戴上绝缘手套不如帆布手套灵活;另外,回到地面后可以通过把握住接地线的办法将自身积累的电荷放掉。

高压试验工作一般都选择在晴朗的天气进行,但往往越是晴朗感应电就越大,所以一般上午的感应电弱些,并且高原地区下午的风很大,对类似避雷器试验等需要升压到200 kV以上的试验项目有很大的影响。

500 kV变电站还可以采用10 m绝缘杆挂测试线的办法减少工作人员反复接线拆线的劳动强度,还避免了感应电对身体的危害。当然,这样的方法对于需要加屏蔽线的试验项目就不适合了。

4 总结

虽然不拆引线试验方法或许还存在这样或者那样的问题,数据合格还好若不合格还要解开,但是它能够起到减少劳动强度、减轻工作量、提高试验精度的作用。南方电网公司发布的Q/CSG 10007-2004《电力设备预防性试验规程》也有如下条款:如不拆引线不影响对试验结果的相对判断时,宜采用不拆引线试验的方法进行。因此就个人认为,试验数据分析上一一般需要横比和纵比,将不拆引线时的值记录下来,历年数据和三相之间如无明显变化,可视设备为正常状态。

综上所述,不拆引线的方法极大地减少了工作人员的劳动强度,感应电的预防避免了工作人员试验过程中因畏惧感应电而影响工作进度,保护好试验设备并让其能够被正常使用也是开展工作的重要保障。虽然这些都是比较简单的方法,但它们对提高变电站预防试验的工作效率是可行的。

参考文献

- [1] 许达明,何宏明,等.中国南方电网有限责任公司企业标准Q/CSG 10007-2004电力设备预防性试验规程[S].
- [2] 陈化钢.电力设备预防性试验方法及诊断技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

(收稿日期:2012-01-04)

基于两起故障实例的 500 kV CVT 故障原因对比分析

杨 洋 覃 伟 许 强 郭 锐 张智勇

(四川省电力公司超(特)高压运行检修公司 四川 成都 610041)

摘 要:介绍两起 500 kV 电容式电压互感器因电容分压器中部分电容元件被击穿导致二次电压升高的故障实例,并基于这两起实例,对密封不良导致电容芯子受潮以及电容局部绝缘缺陷这两种不同的故障原因进行了分析,并对不同故障原因下的不同试验结果进行了对比和讨论。

关键词:电容式电压互感器;故障;绝缘缺陷;介损;电容元件

Abstract: Two cases of 500 kV capacitor voltage transformers in which the breakdown of part of the capacitance elements leads to the arising of secondary voltage are introduced, the causes of faults including poor sealing and partial insulation defects are analyzed based on these two cases, and the different test results under different causes of faults are compared and discussed.

Key words: capacitor voltage transformer; fault; insulation defect; dielectric loss; capacitance element

中图分类号:TM451 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0083-02

500 kV 电容式电压互感器(CVT)主要由两部分组成,即电容分压器和电磁单元,兼顾电压互感器和电力线路载波耦合装置中的耦合电容器两种设备的功能,目前已在电力系统中得到了非常广泛的应用^[1-8]。近年来,因 CVT 电容分压器中高压电容 C_1 有部分电容元件被击穿导致 CVT 二次电压升高的故障时有发生^[1-8]。从两起电容分压器 C_1 中的部分电容元件击穿导致二次电压升高的故障实例出发,对两种不同的故障原因进行了分析,并就不同故障原因下的不同试验结果进行了对比、讨论。

1 油浸式电流互感器缺陷实例

1.1 实例 1

2011 年 5 月,四川超(特)高压运检公司所辖某 500 kV 变电站内某线路 CVT 的某相出现二次电压升高,引起保护动作的事故^[8]。对此故障相 CVT 进行停电状态诊断试验,测试结果如表 1,发现其上节的介损、绝缘电阻及电容值测得结果均严重不合格^[8]。对故障相 CVT 上节耦合电容器进行吊芯检查。通过吊芯发现^[8],装配时密封胶圈与密封面间夹有一次端子的引出线,从而导致上端密封盖的密封不良,上端密封盖上有许多水珠,在密封胶圈附近有很明显的一次端子引出线的压痕;靠近金属膨胀器的上部电容器芯子有放电痕迹,放电中产生了糊状的黑色产物。

表 1 CVT 故障相停电状态诊断高压试验结果^[8]

位 置	tgδ 测 得 值 /%	Cx 测 得 值 /nF	标准值 /nF	Cx 初 值 差 /%	绝缘电阻 /MΩ
上节	14.39	20.52 ↑	14.98	36.98	70 ↓
中节	0.051	15.12	15.15	-0.19	5 000
下节	0.049	15.02	15.13	-0.73	5 000

注:测试仪器为济南泛华 AI-6000F 自动介损测试仪,试验电压 10 kV;厂家标准为 $\text{tg}\delta(\%) \leq 0.12$, C_x 初值差介于 $\pm 5\%$ 之间。

1.2 实例 2

2009 年,在对某 500 kV CVT 进行预试前,其某相二次电压较另外两相约高出 2 V。预试中发现虽然此相 CVT 中节的绝缘电阻值合格,但是其介损和电容值测得结果不合格,介损测得值略大于 0.25%,电容的初值差为 10.70%,试验数据如表 2。

对此故障相 CVT 中节进行高压介损试验,试验装置及原理参见文献 [9-10],试验数据如表 3。从表 3 可以看出,在 80 kV 测试电压下,介损测得值远远低于 10 kV 测试电压下的测试结果,变为合格,而电容值却比 10 kV 测试电压下增加了 600 pF。

从对此故障相 CVT 进行解体的情况来看,中节密封良好,内部并没有出现任何因渗水引起的受潮情况。但电容器油已呈黑色,有部分电容元件严重烧损,铝箔间绝缘被击穿,被击穿的电容元件上有明显的击穿点。

表2 CVT故障相中节预试结果

位置	tgδ测得值 /%	Cx测得值 /nF	标准值 /nF	Cx初值差 /%	绝缘电阻 /MΩ
中节	0.315	17.27 ↑	15.60	10.70	10000

注:测试仪器为济南泛华 AI-6000F 自动介损测试仪,试验电压 10 kV;厂家标准为 tgδ(%) ≤ 0.25, Cx 初值差介于 ±5% 之间。

表3 CVT故障相中节高压介损试验结果

位置	tgδ测得值 /%	Cx测得值 /nF	标准值 /nF	Cx初值差 /%
中节	0.085	17.87 ↑	15.60	14.55

注:测试仪器为上海思创高压介损测试仪,试验电压 80 kV;厂家标准为 tgδ(%) ≤ 0.25, Cx 初值差介于 ±5% 之间。

2 故障原因分析

对于实例1的故障^[8],CVT上节装配不良,密封不严,在运行中,有雨水渗进,产生受潮,水逐渐从顶部渗透到底部,从而产生部分贯穿性放电通道^[8],导致介损测试结果高达 14.39%,绝缘电阻测试结果低至 70 MΩ,因受潮产生的放电使得部分电容元件被短接或击穿。上节部分电容元件发生了击穿或被短接,使得分压比变小,在变化后的分压比下,二次电压有所增加,当高于保护的设定值时,保护发生动作^[8]。

对于实例2的故障,元件内部在制造过程中受到杂质污染或材质的局部位置存在缺陷^[1,11],这些绝缘薄弱点使电场分布不均匀,绝缘强度下降,在长时间运行电压的作用下,薄弱点承受过高的电场强度,薄弱点进一步恶化^[1,11],最终导致部分电容元件被击穿。有部分电容元件被击穿后,其他电容元件会承受更高的电压^[1,11],从而加速绝缘缺陷的发展,使得更多的电容元件绝缘逐渐劣化、击穿^[1,11]。

3 不同故障原因试验结果对比讨论

如果故障原因是 CVT 装配不良,密封不严导致有水渗进,那么这极易发展成贯穿性受潮,并在介损和电容测试中得到反映。在 10 kV 测试电压下,不但电容测得值较出厂值会有所增加,而且介损值将远远超标,达到百分之几甚至百分之十几,绝缘电阻值会低至只有几十或几百个兆欧。

如果故障原因不是装配不良导致的受潮,而是绝缘缺陷导致部分电容元件击穿,那么这极难发展成贯穿性放电,只是局部的放电击穿,在 10 kV 测试电压

下,虽然介损值可能超标,但超标并不会太严重,只可能略有超标,绝缘电阻测试结果可能依然处于合格范围之内,因而也难以反映缺陷的真实情况,但电容初值差会明显超标。对于此类故障的 CVT,如果进行高压介损试验,在接近额定电压的测试电压下,介损值可能会远远低于 10 kV 测试电压下的介损值,甚至处于合格范围之内,而电容值会更高于 10 kV 测试电压下的电容测得值。

4 结 语

CVT 电容分压器中 C₁ 有部分电容元件被击穿会导致 CVT 二次电压升高。部分电容元件被击穿,可能有两个原因:一是因为装配不良导致的受潮,二是因为部分电容元件的绝缘缺陷导致。介绍了两个故障实例,对两种故障原因进行了分析,并对这两种不同故障原因、类型下产生的不同试验结果进行了对比和讨论。

参考文献

- [1] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 陈化钢. 电力设备异常运行及事故处理 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1999.
- [3] 国家电网人力资源部. 电气试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 杨香泽. 变电检修 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [5] 上海超高压输变电公司. 变电设备检修 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [6] 李建明, 朱康. 高压电器设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [7] 郭丽娟. 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 (1): 27-28.
- [8] 杨洋, 许强, 覃伟, 等. 对某 500 kV CVT 的故障原因诊断及分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 68-71.
- [9] 谢超. 均压电容器介损现场试验的改进措施 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5): 58-61.
- [10] 杨洋, 许强, 陈安明, 等. 对某 500 kV 开关断口间并联电容的高压介损诊断及分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(5): 64-67.
- [11] 王世阁. 国产 500 kV 输变电设备运行及事故分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2011-10-17)

成都地区输变电工程电磁环境影响分析 及其防护对策

南方¹, 姜南希²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:通过对成都地区 110 kV 和 220 kV 输变电工程周围的电磁环境进行实际测量, 分析了输变电工程产生的工频电磁场、无线电干扰对环境影响的状况。结果表明, 成都地区输变电工程的电磁环境影响均满足国家标准要求, 并就居民所关注的输变电工程环境影响问题对成都电网建设提出了建议。

关键词:电磁环境; 输变电; 影响分析

Abstract: Based on the actual monitoring of electromagnetic environment of Chengdu 110 kV and 220 kV power transmission and transformation projects, the influence of power-frequency electromagnetic field and radio interference caused by power transmission and transformation projects on the environment in Chengdu is analyzed. The results show that, the electromagnetic environment impact of power transmission and transformation projects in Chengdu are all meet the requirements of national standard. At last, the suggestions are proposed for the construction of Chengdu power grid aiming at the environment impact of power transmission and transformation project concerned by the residents.

Key words: electromagnetic environment; power transmission and transformation; impact analysis

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0085-04

0 引言

随着城市化进程的加快、经济的迅速发展以及居民生活水平的不断提高, 成都地区社会用电量需求剧增。据统计, 2009年、2010年成都主网最高负荷分别为 5 074 MW 和 5 909 MW, 截至 2011 年 10 月, 成都主网最高负荷 6 771 MW。2010 年, 成都中心城区最高负荷为 2 527 MW, 2011 年高达 3 196 MW, 突破了成都电网的最高承载能力。由于对输变电工程电磁环境影响存在误解, 担心输变电设施有“电磁辐射”, 部分居民阻挠城区输变电工程的建设, 导致成都中心城区 5 年未能新建变电站, 严重影响了成都地区的电网安全运行水平。

目前, 成都城区的输变电工程电压等级都为 110 kV 和 220 kV。为准确了解城区输变电工程电磁环境影响状况, 通过对成都地区 110 kV、220 kV 各类型变电站、多种架线形式的输电线路产生的工频电磁场、无线电干扰进行实测和分析, 研究和讨论成都地区输变电工程产生的电磁环境影响, 并对成都电网建设提出相应的建议。

1 输变电工程电磁环境监测内容及方案

1.1 变电站监测方案

变电站工频电磁场监测的布点方案是: 变电站四周围墙外 5 m 处, 以及以距围墙 5 m 为起点, 直至监测到接近环境背景值为止的监测断面。无线电干扰监测的方案是: 避开高压进出线的一侧围墙起, 以 2^n m ($n = 1, 2, 3, \dots$) 处为测量点, 同时在离围墙 20 m 处布设一个测点, 测量频率为 0.15、0.25、0.5、1.0、1.5、3.0、6.0、10、15、30 MHz。

1.2 输电线路监测方案

输电线路架空线路工频电磁场监测方案是: 在档距中央导线弛垂最大处线路中心的地面投影点为测试原点, 沿垂直于线路方向进行, 测点间距为 5 m, 直至监测到接近环境背景值。无线电干扰监测方案是在上述路径上以 2^n m ($n = 1, 2, 3, \dots$) 为测量点, 测量频率为 0.5 MHz; 同时在离边线外 20 m 处布设一个测点, 测量频率为 0.15、0.25、0.5、1.0、1.5、3.0、6.0、10、15、30 MHz。

埋地电缆监测方案是: 以电缆沟中心线为测试原点, 沿垂直于电缆线路方向进行, 测点间距为 5 m, 直

至监测到接近环境背景值。无线电干扰监测方案是在上述路径上以 2^n m ($n=1, 2, 3, \dots$) 为测量点, 测量频率为0.5 MHz; 同时在离电缆沟边线20 m处布设一个测点, 测量频率为0.15、0.25、0.5、1.0、1.5、3.0、6.0、10、15、30 MHz。

2 输变电工程电磁环境影响评价标准

输变电工程在运行期间的主要环境影响因子为工频电磁场和无线电干扰。由于种种原因, 中国高压输变电工程的相关环境标准尚未制定。依据国家环保部制定的《500 kV超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》(HJ/T 24-1998), 推荐以4 kV/m作为居民区工频电场强度评价标准; 推荐以国际辐射保护协会(IRPA)关于公众全天辐射时的工频限值100 μ T作为工频磁感应强度评价标准。

高压输电线路的无线电干扰限值执行《高压交流架空送电线无线电干扰限值》(GB 15707-1995)规定, 在距线路边导线投影20 m、测试频率为0.5 MHz、好天气条件下的无线电干扰限值如表1所示。在输变电工程环境影响评价中, 变电站的无线电干扰限值一般参照执行该标准。

表1 无线电干扰限值

电压等级 /kV	110	220~330	500
无线电干扰限值/dB(μ V \cdot m ⁻¹)	46	53	55

3 成都地区电磁环境实测与分析

3.1 不同区域电磁环境背景值实测及分析

由于地球自身会产生一定的电磁场, 再加上电磁科学技术的进步和应用, 使得人类生活在一个电磁环境之中。若避开输变电、无线电干扰等设施, 对成都地区不同区域的电磁环境背景进行了现场测量, 数据见表2。

监测数据表明, 成都地区工频电磁场、无线电干扰背景值均处于较低水平, 远远低于国家标准。中心城区的工频磁场较郊区大, 这主要是因为中心城区经济发达, 人口密集, 各种家用电器、办公设备等都可能影响工频电磁场。

3.2 变电站周围电磁环境实测结果及分析

目前成都地区变电站按照建设形式可分为户外变电站和户内变电站。本次测量分别选取成都地区

表2 不同区域电磁环境监测结果

区域	地点	工频电 磁强度 /(kV/m)	工频磁 场强度 / μ T	无线电 干扰值 /dB(μ V \cdot m ⁻¹)
城东	金堂县十里大道二段	0.002	0.017	29.28
城西	温江县文星村5组	0.002	0.018	26.48
城中	高新区天仁北2街2号	0.002	0.096	25.35
城南	双流双华路边	0.003	0.037	30.41
城北	新津县花中村6组	0.002	0.024	28.39

具有一定代表性、正常投入运行的220 kV和110 kV户外、户内变电站作为研究对象, 变电站周围的电磁环境监测数据见表3, 其中无线电干扰值为距离变电站围墙20 m处, 频率为0.5 MHz、好天气条件下的监测值。各变电站监测断面上实测的工频电场强度和工频磁感应强度分别见图1、图2。

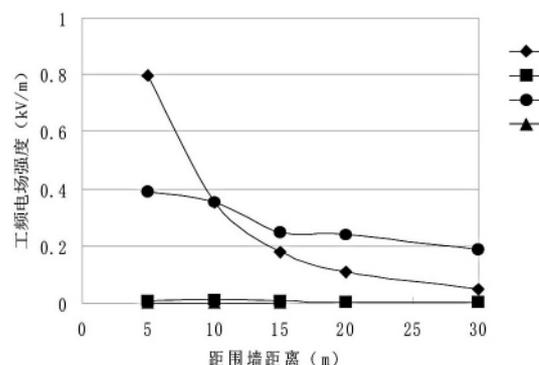


图1 变电站工频电磁监测结果

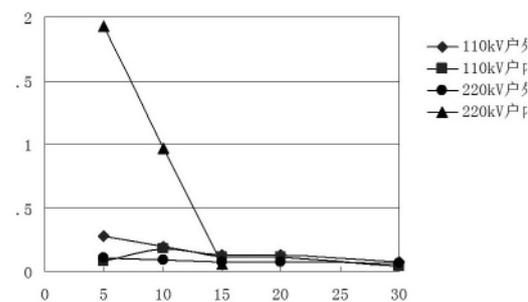


图2 变电站工频磁场监测结果

从监测结果可以看出, 变电站外工频电磁场最大值的位置一般都位于其架空出线或电缆出线侧, 这也说明了变电站周围较高的工频电磁场是由其高压出线引起的^[1]。除因220 kV塘坎街户内变电站周围建筑物较多, 监测断面无法避开电缆沟的影响外, 户内变电站产生的工频电磁场比户外变电站小, 且户内变电站外的工频电场很小, 接近环境背景值, 这主要是因为户内变电站设备都布置在室内, 建筑物的屏蔽作

用可有效降低工频电磁场,但无论是哪种变电站,其工频电场强度和工频磁感应强度都远小于国家标准限值,且随着距离的增加,工频电磁场衰减很快,在距离变电站围墙30 m外已基本相当于环境背景值。从监测数据还可看出,在距变电站围墙20 m处,频率为0.5 MHz、好天气条件下的无线电干扰值均小于相应的标准限值。

3.3 输电线路周围电磁环境实测结果及分析

目前成都地区的输电线路有架空线路和埋地电缆两种方式。架空线路有同塔双回、单回线路两种架线方式。随着城市中心城区土地资源的日益紧张,再加上架空线路难免会对城市景观产生一定的影响,成都市电力部门在中心城区逐渐采用埋地电缆方式来敷设高压线路。成都市埋地电缆目前主要埋设方式有电缆沟和电缆隧道两种。本次测量分别选取成都城区具有一定代表性、正常投入运行的220 kV和110 kV架空线路和埋地电缆作为研究对象,架空线路的电磁环境影响监测数据见表4,其中无线电干扰值为距线路边导线投影20 m、频率为0.5 MHz、好天气条件下的监测值。架空线路产生的工频电场、工频

磁场变化趋势见图3、图4、图5、图6。埋地电缆的电磁环境影响监测值见表5,其中无线电干扰值为距电缆沟边线20 m、频率为0.5 MHz、好天气条件下的监测值。

从监测数据可以看出,架空输电线路产生的工频电磁场、无线电干扰最大值均小于国家标准限值。工频电场强度最大值一般出现在距离线路边导线5 m以内,工频磁感应强度最大值一般位于边导线内。工频电磁场随着距线路中心的距离增加而迅速衰减,当距线路中心30 m时已接近环境背景值。同塔双回输电线路的工频电场强度有可能比单回输电线路的小,甚至会出现220 kV同塔双回线路的工频电磁场比110 kV单回线路的工频电磁场小,这主要是因为架空输电线路的电场强度不仅取决于线路的电压等级,在很大程度上还受到塔型结构、导线类型、弧垂高度及导线相序等设计参数的影响,同塔多回路线路采用逆相序排列时,可显著降低地面工频电磁场^[2-5]。

埋地电缆产生的工频电磁场、无线电干扰均满足国家标准要求。电缆周围的工频电场远小于架空线路,且不随距离电缆沟的距离变化,基本与环境背景

表3 城区各类变电站周围电磁环境监测结果

电压等级 /kV	变电站	类型	工频电磁强度 / (kV/m)		工频磁场强度 / μT		无线电干扰值 / dB(μV·m ⁻¹)
			最大值	最大值点位	最大值	最大值点位	
110	大弯变电站	户外	1.130	架空出线侧围墙外	0.894	架空出线侧围墙外	30.50
	吉祥街变电站	户内	0.013	电缆出线侧围墙外	0.201	电缆出线侧围墙外	33.17
220	鱼凫变电站	户外	1.212	架空出线侧围墙外	0.692	架空出线侧围墙外	30.30
	塘坎街变电站	户内	0.002	变电站四周维持在同一水平	1.923	站外电缆沟上方	38.63

表4 各类输电线路电磁环境监测结果

电压等级 /kV	架空线路类型	名称	弧垂高度 /m	工频电磁强度 / (kV/m)		工频磁场强度 / μT		无线电干扰值 / dB(μV·m ⁻¹)
				最大值	最大值点位	最大值	最大值点位	
110	单回三角排列	代岳线	10.0	1.954	距边线1 m	0.79	距边线1 m	31.53
	单回水平排列	犀太线	9.0	0.901	距边线5 m	5.84	边线内	34.50
	同塔双回	犀太犀苏线	10.0	1.370	边线内	1.44	距边线6.5 m	34.30
220	单回三角排列	龙棉西线	8.0	2.370	距边线1 m	1.22	边线内	32.60
	单回水平排列	渡石线	12.0	2.230	距边线4 m	7.60	边线内	38.20
	同塔双回	龙马一、二线	16.6	1.530	边线内	4.34	边线内	37.50

表5 埋地电缆电磁环境监测结果

电压等级 /kV	敷设方式	名称	工频电磁强度 / (kV/m)		工频磁场强度 / μT		无线电干扰值 / dB(μV·m ⁻¹)
			最大值	最大值点位	最大值	最大值点位	
110	双回电缆同沟	黄太、林黄线	0.220	电缆隧道周围维持在同一水平	0.29	电缆沟上方	41.56
220	双回电缆同沟	尖石一、二线	0.014	电缆隧道周围维持在同一水平	1.04	电缆沟上方	35.50

值在同一个水平上 这是因为电缆外层的金属屏蔽层和铠装层可以有效地屏蔽电缆带电芯线在周围所产生的电场。埋地电缆产生的工频磁感应强度随着距电缆沟距离增加而迅速衰减,当距离电缆沟中心 10 m 时已经接近环境背景值。因此,埋地电缆基本不对环境产生影响。

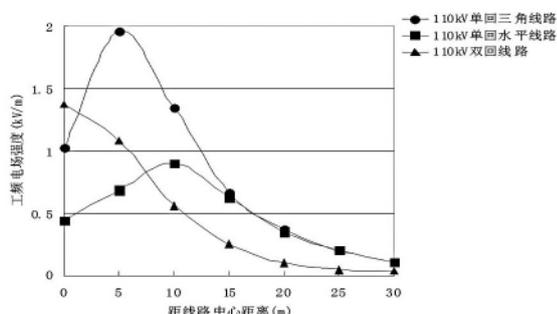


图3 110 kV 输电线路工频电场强度监测结果

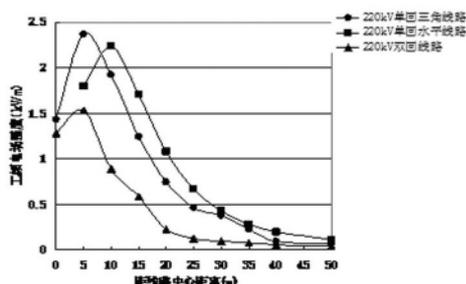


图4 220 kV 输电线路工频电场强度监测结果

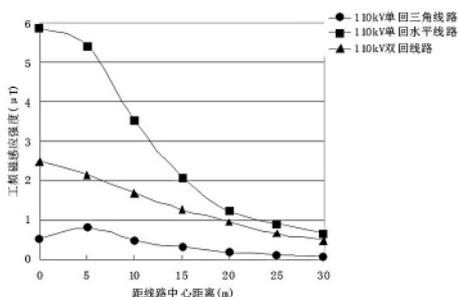


图5 110 kV 输电线路工频磁感应强度监测结果

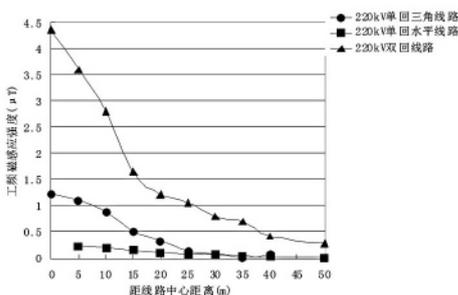


图6 220 kV 输电线路工频磁感应强度监测结果

4 结 论

(1) 通过对成都地区不同类型的输变电工程周

围电磁环境现状实测结果分析,可以得出:工频电场强度低于 4 kV/m 的居民区限值;工频磁感应强度远远低于 100 μT 的标准限值;无线电干扰也满足相应的标准要求。

(2) 户内变电站的电磁环境影响远小于户外变电站;埋地电缆的电磁环境影响远小于架空输电线路。

(3) 受变电站和进出线的双重影响,变电站周围工频电磁场最大值一般位于变电站进出线侧围墙外,但仍满足相应的标准要求。

5 建 议

(1) 中心城区新建变电站首先考虑户内变电站,建筑风格要与周围协调,降低周围居民在感官上的不适感。在进行变电站的设计时,要认真考虑进出线走向,尽量使进出线侧避开密集居民。

(2) 中心城区新建输电线路时优先采用埋地电缆,城市郊区可采用逆相序布置的同塔多回架空线路,提供架线高度,以节约土地资源,降低电磁环境影响。根据城市规划,逐步对中心城区架空线路进行下地电缆改造。

(3) 加强对社会宣传力度,广泛开展有关输变电工程电磁环境知识和有关电力法律法规的宣传,消除公众误解。

参 考 文 献

- [1] 傅正财,宋春燕. 110 kV 变电所环保化设计研究[R]. 杭州:杭州市电力局,上海交通大学电气工程系,2004.
- [2] 朱艳秋,宋晓东,赵志勇. 220 kV 高压输电线路工频电磁场影响因素研究[J]. 电力科技与环保,2011,27(1):5-8.
- [3] 王广周,张嵩阳,闫东,等. 500 kV 超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策[J]. 高压电器,2010,46(8):93-100.
- [4] 谢连科. 110 kV 同塔双回交流输电线路工频电磁场分布规律研究[J]. 山东电力技术,2009(4):3-5.
- [5] 《输变电设施的电场、磁场及其环境影响》编写组. 输变电设施的电场、磁场及其环境影响[M]. 北京:中国电力出版社,2007:99-109.

(收稿日期:2011-09-23)

水轮发电机组集电环温度过高原因分析及技改措施

向春见 顾 轩 李友安

(四川圣达水电开发有限公司 四川 乐山 614900)

摘 要:针对大渡河沙湾电站水轮发电机组集电环及碳刷温度过高的具体原因展开分析,提出技改方案,对改善集电环的运行环境、保障机组的安全运行具有重要意义。

关键词:水轮发电机;集电环;碳刷;发热;改进

Abstract: The specific reasons on overheating of collecting rings and carbon brush for water-turbine generator set of Shawan Station in Dadu River are analyzed, and the technical transformation measures are proposed, which plays an important role in improving the operating environment of collecting ring and ensuring the safe operation of water-turbine generator set.

Key words: water turbo-generator; collecting ring; carbon brush; heating; modification

中图分类号:TM307 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0089-03

0 引 言

大渡河沙湾水电站水轮发电机组是东方电机有限公司生产的立轴半伞型结构的轴流转桨式机组,混凝土蜗壳,总装机容量为 4×120 MW。机组定子额定电压为10.75 kV,定子额定电流为5 027 A,励磁额定电压为400 V,励磁额定电流为1 385 A。集电环正、负极各18个横截面尺寸为25 mm \times 32 mm的摩根NCC634碳刷。运行中经常出现集电环过热、碳刷打火等现象,1号发电机组曾出现过集电环正负极短路烧毁集电环和碳刷的事故。因此,为了保障供电的可靠性、安全性对集电环进行技改势在必行。

1 集电环碳刷过热的原因分析

1.1 碳刷的发热量计算

碳刷的发热量由4部分组成:碳刷自身电阻发热 Q_1 、碳刷接触压降发热 Q_2 、磨擦发热 Q_3 、刷辫与碳刷接触电阻和散流电阻发热 Q_4 。

碳刷自身电阻发热: $Q_1 = I_2 R$ (I 为流过碳刷的电流, R 为碳刷电阻)

碳刷接触压降发热: $Q_2 = I \Delta U$ (ΔU 为接触压降)

磨擦发热: $Q_3 = F v$ (F 为碳刷压紧力, v 为碳刷与集电环的相对运动速度)

接触电阻和散流电阻发热: $Q_4 = I_2 r$ (I 为流过碳刷的电流, r 为接触电阻和散流电阻等效值)

碳刷总体发热量为: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

1.2 集电环的发热量计算

集电环的发热由3部分组成:集电环自身电阻发热 Q_{11} 、碳刷接触压降发热 Q_{22} 、碳刷热传导热量 Q_{33} 。

集电环的总体发热量为: $Q' = Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}$

在集电环发热总量中,集电环自身电阻发热 Q_{11} 所占比例甚小,可以忽略;所以集电环的发热由碳刷的发热量决定。随着碳刷温度的整体变化,集电环温度随之将有不同程度的变化。

1.3 集电环碳刷过热的原因

1.3.1 集电环室通风不良

沙湾水电站水轮发电机组集电环室闭塞,风道不畅。集电环室在 $-X$ 方向开设了一个60 cm \times 80 cm的检修进入门,5个60 cm \times 22 cm的观察窗平均分布在四周。由于观察窗面积太小,且窗门皆在关闭状态,没有风扇等辅助散热设备,室内外空气流道狭小,空气流通不畅,集电环室内温度较高,严重影响集电环、碳刷散热。

1.3.2 接触电阻过大或分布不均产生的发热

集电环和碳刷是通过相互滑动接触导通励磁电流的,每个集电环上分布着18只碳刷,由于接触电阻的不同,电流分配的差异,会导致发热不均匀,其原因有:①碳刷与集电环表面接触电阻、碳刷与刷辫接触电阻、刷辫与刷架引线接触电阻过大,集电环与转子

引线接触电阻过大。由于机组的振动,集电环与转子的引线固定螺栓,刷握固定螺栓容易松动,接触电阻变大。②碳刷压力不均或不符合要求,弹簧由于过热变软、老化失去弹性等原因。集电环环面不同心,也会造成碳刷压力不均。③个别碳刷材质不良、导电性能差。④集电环及刷架表面附着有大量的碳粉。⑤油雾的影响。油雾对因碳刷磨损而产生的碳粉的吸附作用较大,容易产生油性碳粉污垢。有实验表明,在松散干燥的状态下,石墨碳粉的绝缘电阻可达到100 MΩ以上,但是在油雾作用下绝缘电阻迅速减小为零。

1.3.3 机械及摩擦等原因造成的过热

沙湾电站机组由于碳刷经常打火,进行了一些技改,主要是将正、负极碳刷数量增加一倍,即单极碳刷个数为36个。据东方电气集团的技术规范得知,沙湾电站选用碳刷的额定电流密度为10 A/cm²,碳刷的电流密度为

$$j = 1\ 385\text{A} / (18 \times 25 \times 32) = 0.096\ 18\ \text{A}/\text{mm}^2 = 9.618\ \text{A}/\text{cm}^2$$

如果将碳刷数量增加一倍,则碳刷的实际电流密度减小为额定电流密度的一半,这将导致氧化膜无法形成,碳刷与集电环间是机械摩擦,会表现出碳刷磨损大、温度高的现象。技改后的运行情况证明,此种技改并没有解决碳刷温度高的问题,反而增加了碳刷和集电环的摩擦。

1.3.4 氧化膜无法形成

正常情况下,碳刷在集电环上运行时,在其接触面上形成一层均匀、适度、稳定的氧化膜,因为这层氧化膜的存在,改变了碳刷与集电环的接触特性,减少了摩擦,降低磨损,延长使用寿命。影响氧化膜形成的原因:①温度过高。碳刷的氧化膜一般在70℃左右较易形成,沙湾电站个别碳刷温度高达120℃以上,氧化膜不易形成,无法起到润滑作用,碳刷磨损将加剧,导致温度继续升高,形成恶性循环。②冷却空气中有污染性杂质。由于碳刷摩擦大,碳粉多,且没有碳粉收集装置,大量的碳粉附着在集电环表面,会影响氧化膜的形成。③空气湿度太低或含氧量太低。碳刷表面氧化膜的形成需要空气中有一定的水分含量,即空气湿度不能太低,也不能太高。氧化膜的形成主要与空气中的氧气发生氧化作用而产生,当含氧量过低时也不利于氧化膜的形成。

2 改进方案

通过对沙湾电站水轮发电机组集电环、碳刷发热原因的分析,根据现有的不足,提出如下整改方案。

2.1 集电环的改造

集电环的改造包括:①加宽集电环宽度。现有集电环宽度为40 mm,将集电环宽度增加为80 mm。增大集电环的宽度可以提高集电环的散热性能,且有利于碳刷和刷握安装方式的改造。②改集电环环面为螺旋沟槽环面。现有集电环环面均为平面结构,容易导致碳刷表面形成微小的气膜,不利于碳刷和集电环环面的充分接触。集电环环面采用螺旋沟槽环面,增加了集电环环面和碳刷之间的透气性,有利于碳刷与集电环环面的充分接触。这种结构已经在三峡机组和葛洲坝增容机组上得到成功应用。③增加上下集电环的间距。现有集电环间距为55 mm,将集电环间距增加到100 mm。增加集电环间距的主要目的在于防止机组突然抬机和机组振动导致上下集电环之间短路,减小集电环环面烧蚀的概率。

2.2 合理配置碳刷数量

由于沙湾电站机组励磁电流长期运行在1 000 A左右,远小于额定励磁电流1 385 A,碳刷密度 $j = 1\ 000 / (18 \times 25 \times 32) = 6.94\ \text{A}/\text{cm}^2$,比正常值偏小,可能会影响氧化膜的形成,建议正负极各拔掉5个碳刷(由18支变为13支),此时碳刷密度 $j = 1\ 000 / (13 \times 25 \times 32) = 9.615\ \text{A}/\text{cm}^2$,接近额定电流密度10 A/cm²。

2.3 减少发热源

集电环室除了集电环、碳刷会产生大量热量外,集电环室内还布置了两台吸排油雾泵,吸排油雾泵长期运行时,泵体温度可达60~70℃,有时甚至高达80℃,提高了集电环室内的温度,增加了散热难度。可将吸排油雾泵电机布置在集电环室外,减少室内的发热量。

2.4 改善通风条件

在集电环室四周增设通风窗口。沙湾电站机组在集电环室的-X方向布置有一个宽60 cm、高80 cm的检修进入门,集电环室四周平均分布有五个宽60 cm、高22 cm的观察窗口。可将5个观察窗口的高度都扩展到60 cm,同时可考虑安装风扇辅助散热,这将很好地改善集电环室内外的通风条件,提高

散热能力。

2.5 安装碳粉收集系统

有实验表明碳粉在油雾的影响下,绝缘电阻可以由100 MΩ迅速降低到零。因此油性碳粉污垢是造成集电环室内各绝缘件绝缘性能下降的主要原因之一,所以有必要安装碳粉收集系统,及时带走碳粉,使之与油雾隔离,提高集电环以及碳刷之间的绝缘。

2.6 安装红外线测温系统

在集电环室内安装红外线测温系统,将信号接入监控系统,运行人员可随时监测机组集电环及每个碳刷温度的变化情况,能及时准确地找出温度异常的碳刷,消除缺陷。

3 沙湾电站集电环技改项目及结果分析

3.1 技改项目

根据沙湾水电站碳刷温度过高的原因,在年度检修过程中对集电环及碳刷进行了技改:①扩大集电环室通风窗口尺寸,通风窗口高度由原来的22 cm增加到60 cm,宽度不变;②集电环宽度由原来的4 cm增加到6 cm;③集电环返厂重新校圆打磨,表面更光滑;④使用质量更好的碳刷。

3.2 技改效果

(上接第60页)

[24] 周永灿,李扬. 基于层次分析法的可中断负荷模型参与备用市场的研究[J]. 电力需求侧管理,2010,13(1): 17-20.

[25] 常向伟,张有兵,曹一家,等. 计及风险因素的事故备用容量购买决策模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23): 82-86.

[26] 李海英,李渝曾,张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10): 88-93.

[27] 潘雄,罗春雷,徐国禹. 双侧开放市场中能量与备用容量的联合优化[J]. 电力系统自动化,2005,29(5): 10-15.

[28] 刘国春,张少华,王晔. 考虑用户可靠性的可中断负荷管理[J]. 上海大学学报:自然科学版,2009,15(1): 81-86.

[29] J. Bai, H. B. Gooi, L. M. Xia, G. Strbac. A Probabilistic Reserve Market Incorporating Interruptible Load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1079-1087.

[30] Gedra Thomas W, Varaiya Pravin P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power[J]. IEEE Trans on Power Sys-

技改后经过长期运行,集电环和碳刷的温度较技改前明显降低,见表1。

4 结 语

发电机励磁碳刷及集电环发热现象运行中时有发生,严重威胁发电机的安全运行。因此,对集电环和碳刷的监视、维护并及时处理其发生的故障和损伤,改善集电环运行环境,是保证发电机长期稳定运行的重要工作之一。所提出的改造方案中的集电环部分,在葛洲坝125 MW机组已有相似的改造应用,效果明显,具有一定的借鉴作用。

表1 技改前后温度对比 单位:℃

		1 F	2 F	3 F	4 F
技改前	集电环	98	105	110	100
	碳刷	100	108	112	105
技改后	集电环	68	72	75	70
	碳刷	70	75	78	73

参考文献

[1] 国家技术监督局. 电炭材料及产品专用名词术语[M]. 北京: 国家技术监督局出版, 1997.

[2] 张广溢, 郭前岗. 电机学[M]. 重庆: 重庆大学出版社出版, 2002. (收稿日期:2011-07-26)

[31] Majumdar S, Chattopadhyay D, Parikh Jyoti. Interruptible Load Management Using Optimal Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 715-720.

[32] Tuan Anh Le, Bhattacharya Kankar. Competitive Framework for Procurement of Interruptible Load Services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.

[33] 陈建军, 杨娜. 基于用户意愿的可中断负荷合同模型研究[J]. 现代电力, 2007, 24(6): 85-89.

[34] 罗运虎, 薛禹胜, Zhangyang DONG, 等. 发电容量充裕性的混合优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 30-35.

[35] 贾德香, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于博弈论的发电公司检修决策[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 27-32.

[36] 刘文许, 林礼清, 温步瀛. 可中断负荷参与系统频率调节的研究[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(3): 17-20, 23.

[37] 都亮, 刘俊勇, 田立峰, 等. 电力市场环境下的秒级可中断负荷研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 90-95.

(收稿日期:2011-11-30)

高压加热器跳闸对超临界机组的影响及处理

薛森贤

(广东珠海金湾发电有限公司, 广东 珠海 519060)

摘要:针对超临界直流炉高压跳闸的现象及对机组的影响,结合金湾电厂600 MW超临界机组高压跳闸的案例,总结处理经验。从理论上对超临界直流锅炉调节特性进行了分析;从运行角度阐述了超临界直流炉高压加热器跳闸情况,对减少大型机组非计划停运具有指导作用。

关键词:超临界直流炉;高压加热器跳闸;处理

Abstract: Aiming at the phenomenon of HV tripping in supercritical DC furnace and its influence on the unit, and combined with the case of HV tripping of 600 MW supercritical unit in Jinwan Power plant, the treatment experiences are summed up. The regulation features of supercritical DC furnace are analyzed in theory, and the situation of HV tripping in supercritical DC furnace is also described as viewed from the operation. It plays the role of guidance in reducing the unplanned outages of large-scale units.

Key words: supercritical DC furnace; HV heater tripping; treatment

中图分类号:TK267 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0092-03

0 引言

高压加热器在火电厂抽汽回热系统中占有非常重要的地位,给水通过高压加热器被加热从而提高了循环效率。高压加热器的故障停运直接导致机组的效率降低、煤耗增加,从而影响电厂的正常运行和经济性。高压加热器跳闸后,由于给水温度的剧烈变化,负荷、汽温、煤水比控制难度较大。通过机组正常运行工况下高压加热器跳闸后对超临界机组汽轮机及锅炉的影响进行分析,提出了超临界直流锅炉高压加热器跳闸后的正确操作方式。

金湾电厂的锅炉、汽轮机、回热系统的基本情况如下:锅炉型号为SG1910/25.40-M960,采用定-滑-定运行方式,单炉膛、四角切圆燃烧、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构II型超临界直流炉。燃煤设计煤种为神府东胜煤,校核煤种为晋北烟煤。汽轮机由上海汽轮机有限公司生产的引进型超临界凝汽式汽轮机(N600/24.2/566/566),旁路配置为40% BMCR高压旁路。汽轮机为中间一次再热、三缸四排汽、单轴双背压凝汽式机组。回热系统由3个高压加热器、4个低压加热器和1个除氧器构成,除氧器采用滑压运行。

1 高压加热器跳闸对超临界机组的影响

1) 高压加热器跳闸后,机组负荷快速上升的原因是由于高压加热器跳闸使进入汽轮机内的蒸汽量骤然增加。额定负荷下,高压加热器的抽汽量约为220 t/h,高压加热器跳闸后,本来应该抽到高压加热器的蒸汽量进入汽轮机,导致汽轮机增加约50~70 MW负荷。但是锅炉的产汽量并没有增加,因此机组只是短时过负荷,然后负荷会渐渐回落。

2) 高压加热器跳闸后,中间点温度会短时快速上升,是因为高压加热器跳闸后主汽门前压力瞬间升高导致给水流量的下降,如果汽泵调节特性好的话,给水流量很快就增加到设定值。另外就是高压加热器虽然跳闸,但是省煤器内的水容积约为167 m³,高压加热器水侧的水容积约为20 m³,大部分已被加热的水导致中间点温度延时下降。再加上锅炉的热惯性作用,也导致中间点温度延时下降。但中间点温度一旦开始有反应,将以6~7 °C/s的速度快速下降。

3) 以一次机组600 MW负荷高压加热器跳闸为例,再热器出口压力从3.783 MPa经78 s后上升至4.512 MPa,再经310 s后,再热器出口压力重新下降至3.832 MPa。压力上升的原因是高压加热器跳闸

后,高压缸和中压缸进汽量增加,导致再热器系统进汽压力升高从而使整个系统压力升高。

4) 高压加热器跳闸后,给水温度降低。带同样负荷,需要增加一定的燃料,增加的燃料量可以通过简单计算得出。机组600 MW时高压加热器解列前给水温度为279℃,解列后给水温度降低了179℃,给水温度每降低10℃,供电煤耗增加0.83 g/kWh(600 MW数据),通过计算可以得出带相同负荷需要增加的煤量。 T 为标准煤量, $T = [(279 - 179) / 10] \times 0.83 \times 660\ 000 = 5.47\ \text{t/h}$,然后根据实际换算成实际煤量(只是个粗略值,可作为调整参考)。

5) 高压加热器跳闸后对锅炉效率的影响:高压加热器跳闸后锅炉排烟温度降低了,这主要是因为高压加热器跳闸后省煤器入口给水温度降低了,省煤器吸热增大从而使锅炉排烟温度降低。一般对于锅炉来说,排烟温度每降低1℃,锅炉效率可以提高约0.05个百分点,所以高压加热器跳闸后对锅炉效率还是有所提高的。

6) 高压加热器跳闸后对锅炉燃烧的影响:高压加热器跳闸后,空气预热器出口一、二次风温均降低了,这会对锅炉在低负荷造成一定的影响。一次风热风温度的降低,将会影响到锅炉制粉系统的干燥出力,特别是在燃用含水量较大的煤种时,但从多次高压加热器跳闸过程来看,锅炉燃烧工况基本未发生变化,各台制粉系统出口温度基本都在可控范围之内;对锅炉燃烧影响较大的是二次风温的降低,由于金湾电厂多次高压加热器跳闸均在70%负荷以上进行的,所以对锅炉的燃烧影响还是不太明显的。

7) 高压加热器跳闸后对锅炉水动力的影响:由于高压加热器跳闸后,水冷壁入口温度降低,水冷壁入口工质欠焓增大,容易造成锅炉水循环不良,稳定性变差,导致水冷壁传热恶化,水冷壁出口温度产生偏差。尤其是在低负荷时由于汽水比容差增大,将会使锅炉水循环不稳定的概率增大。所以在高压加热器跳闸后,为了避免发生锅炉水循环不稳定,应适当提高锅炉运行压力,减少汽水比容差。若高压加热器跳闸时机组负荷较低,锅炉给水流量比正常时还少100多t/h,锅炉水冷壁出口温度偏差变大,分离器出口温度的偏差也较大,此时应特别注意锅炉螺旋管温度是否有局部超温现象^[1]。

2 超临界机组高压加热器跳闸的处理原则及方法

机组运行时高压加热器的跳闸始终是个动态过程。处理原则根据直流炉的运行特点,煤量和给水两个参数必须是稳住一个。参考值是煤水比和中间点温度的变化趋势,平衡点便是中间点温度或是分离器出口温度,根据上述处理原则对于高压加热器跳闸后的事故处理,负荷段不一样处理的方法以及存在的操作风险也不尽相同。为此将机组负荷分为高负荷(500~600 MW)、低负荷(300~500 MW)两个工况进行简要分析。

2.1 机组在高负荷(500~600 MW)情况下高压加热器跳闸

高负荷情况下解列,由于机组高压加热器抽汽轮机的汽做功,将会使机组负荷快速上升,锅炉过、再热器压力上升,进而有可能导致锅炉安全门动作,这时应该解除机组协调控制,快速降低机组负荷,防止锅炉安全门动作,此时,锅炉应该迅速将燃料量减至机组负荷的80%~90%左右,同时应该将锅炉给水量减少,降低锅炉的水煤比,根据高压加热器解列前机组负荷情况大致了解当时高压加热器的正常疏水量,将锅炉给水量降低,给水量减少的幅度取决于高压加热器的疏水量(如金湾电厂机组在600 MW负荷时高压加热器正常疏水量大约在220 t/h),即锅炉此时给水量为减去高压加热器正常的疏水量后的给水量,但要注意的是在减水时,不能一下将给水数量减少220 t/h,应该根据给水温度下降幅度,按比例减少给水量,维持中间点温度正常,与此同时,及时调整减温水,使主蒸汽温度正常^[2]。

由于锅炉本身有一定的蓄热,且温度较低的给水进入锅炉各受热面需要一定的时间,因此高压加热器解列导致给水温度突降时,锅炉各段工质温度会延迟一段时间再下降,所以,减少的水量不能与给水温度下降同步,应适当地先减一部分水量,然后根据中间点的温度变化来进行减水,防止一次减水量过大而锅炉热负荷因蓄热没有降下来造成中间点温度高保护动作。由于锅炉给水和燃料的降低,将有助于减轻锅炉超压。

2.2 机组在低负荷(300~500 MW)情况下高压加热器跳闸

在低负荷的情况下,由于不存在机组过负荷的危险,所以应以汽温控制为主。将在负荷不超过规定的情况下,为了避免处理中对锅炉燃烧工况造成不必要的扰动,燃料量可切手动保持不变。在此基础上根据给水温度下降的幅度,按比例减少给水流量,维持过热度的正常。与此同时,及时调整减温水量,保持主蒸汽温度正常,并根据过热度手动干预给水量。待稳定后负荷会下降,此时根据中调负荷重新加煤进行调整。但值得注意的是,在低负荷下高压加热器解列锅炉给水流量将较正常工况下低很多,调节给水流量时容易造成给水流量偏低,引发给水泵工作状况不稳,甚至有可能引起锅炉给水流量低保护动作。

另外高压加热器解列后由于省煤器入口给水温度降低较多,将会使空气预热器出口一、二次风温降低,在低负荷情况下,将会对锅炉燃烧造成一定程度的影响,二次风温度降低,将会削弱煤粉着火的稳定性;同时,由于磨煤机入口一次热风温度降低,也会对磨煤机的干燥出力产生影响,当燃用煤种的水分较大时,应该注意制粉系统运行工况的变化,当制粉系统干燥出力不足时,应该减少制粉系统的出力,增加磨煤机的干燥通风量。

在低负荷时高压加热器跳闸后对锅炉水动力的影响较大,锅炉水循环不良,稳定性变差,导致水冷壁传热恶化,水冷壁出口温度产生偏差,要特别注意锅炉螺旋管水冷壁超温现象,此时若有条件可适当增加

负荷或提高锅炉主蒸汽压力。

3 结 语

目前,大部分投产的超临界新机组均采用直流锅炉,由于运行操作经验不足及设备的缺陷造成高压加热器跳闸的现象经常发生。若处理不当很容易造成机组的解列,对电网造成不稳定因素。金湾发电厂自投产以来,由于设备及操作的原因多次发生高压加热器汽侧跳闸的现象,但运行操作人员成功运用了上述事故处理的原则及方法,及时消除了高压加热器跳闸对锅炉和汽轮机运行的不良影响,保证了发电机组的安全运行,避免了机组跳闸对发电厂所带来的经济损失。同时,对后续机组运行中发生该类异常后,防止异常扩大,保证机组的安全稳定运行有着借鉴和操作指导意义。

参考文献

- [1] 章德龙. 600 MW 火力发电机组培训教材(第二版)——锅炉设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 丁有宇, 丁一. 600 MW 火力发电机组培训教材(第二版)——汽轮机设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2011-10-08)

四川电科院高压所组织召开《“四图”编制研究》和 《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目评审会

2012年2月12日,四川电科院高电压技术所在成都组织召开了《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》和《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目评审会。

会上,首先由《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》项目组向参会评审专家组先后汇报了项目的评审相关材料。专家组讨论认为“四图”的绘制对于指导生产具有重要的实际意义,并对“四图”的绘制原则提出了宝贵意见。之后进行了《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目相关材料的汇报,专家组和项目组成员进行了深入的技术交流讨论,认为“高海拔、长线路”以及创新的高压局部放电试验方法等均可作为本项目的亮点。

专家组对两个项目给予了高度评价,其中《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》评审组认为,其研究成果达到了国际先进水平,同意该项目成果通过技术评审。《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》评审组认为,该项目的部分研究成果达到国内领先水平,同意该项目成果通过技术评审。

据悉,《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》和《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》已具备参与科技项目相关奖项的申报资格。



国家电网四川自贡电业局

自贡电业局属国家电网四川省电力公司大一型供电企业，拥有电力客户23.98万户；2010年售电33.356 GWh。

担负着自贡市四区两县（其中叠县1个）和内江市威远县部分区域的电能供应、电网建设和运行管理任务。局本部设14个职能部室，下辖二级单位21个（其中：供电局5个、专业化车间及管理中心11个、集体企业15个），控股荣县供电有限公司，代管富益电力公司，有31个农村供电所。

近年来，自贡电业局紧紧围绕建设“一强三优”现代企业战略目标，不断深化“两个转变”，坚持“三抓一创”工作思路和“十二字”工作方针，企业各方面工作取得了长足发展。截止2011年11月1日连续安全生产2600天。荣获国网公司抗灾救灾恢复重建“功勋集体”、省公司抗灾救灾恢复重建“杰出贡献”先进集体等称号。被评为全国精神文明建设先进单位、“全国模范职工之家”、“国家电网公司文明单位”、“四川省创建和谐劳动关系先进单位”，连续两届获得省公司十佳文明单位称号。

目前，自贡电业局已先后开通了供电营业厅、超市现金代收、政通信息港现金代收、药店现金代收、银行现金代收、委托银行代扣、网上银行、移动POS现金收费、移动缴费网点代收、电话银行缴费、手机银行、多媒体自助终端缴费、手机银行（短信）缴费、24小时自助缴费、预存电费等多种缴费方式，用电客户可根据自身实际情况灵活选择。

自贡电业局所属集体企业，具有长期从事220 kV及以下送变电工程的咨询、评估和设计、安装、调试、检修及运行的丰富经验，批量生产220 kV及以下线路铁塔、金具，10 kV及以下高低压开关柜和配电变压器。

“十二五”期间，自贡电业局发展总体思路是：以加速建成“一强三优”现代企业为目标，深入贯彻落实科学发展观，深化“两个转变”，坚持“安全发展、创新发展、和谐

发展”理念，加速推进坚强智能电网建设，巩固企业安全、稳定的局面，建立科学规范、高效有序的管理体系，推动企业实现跨越式发展。

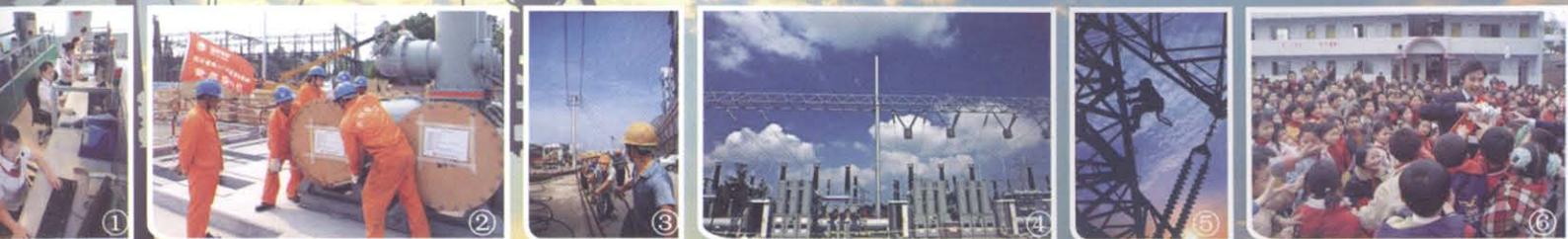
地址：自贡市檀木林大街115号
电话：0813-4602012



社区居民送锦旗感谢党员服务队

- ①95598服务热线训练有素
- ②党员突击队安装GIS设备
- ③城市电网改造

- ④老站焕新颜 设备智能化水平逐渐提升
- ⑤保障电网安全稳定运行
- ⑥开展全方位安全宣传 促进全民安全用电



奉献清洁能源 构建和谐社会

在低负荷的情况下,由于不存在机组过负荷的危险,所以应以汽温控制为主。将在负荷不超过规定的情况下,为了避免处理中对锅炉燃烧工况造成不必要的扰动,燃料量可切手动保持不变。在此基础上根据给水温度下降的幅度,按比例减少给水流量,维持过热度的正常。与此同时,及时调整减温水量,保持主蒸汽温度正常,并根据过热度手动干预给水量。待稳定后负荷会下降,此时根据中调负荷重新加煤进行调整。但值得注意的是,在低负荷下高压加热器解列锅炉给水流量将较正常工况下低很多,调节给水流量时容易造成给水流量偏低,引发给水泵工作状况不稳,甚至有可能引起锅炉给水流量低保护动作。

另外高压加热器解列后由于省煤器入口给水温度降低较多,将会使空气预热器出口一、二次风温降低,在低负荷情况下,将会对锅炉燃烧造成一定程度的影响,二次风温度降低,将会削弱煤粉着火的稳定性;同时,由于磨煤机入口一次热风温度降低,也会对磨煤机的干燥出力产生影响,当燃用煤种的水分较大时,应该注意制粉系统运行工况的变化,当制粉系统干燥出力不足时,应该减少制粉系统的出力,增加磨煤机的干燥通风量。

在低负荷时高压加热器跳闸后对锅炉水动力的影响较大,锅炉水循环不良,稳定性变差,导致水冷壁传热恶化,水冷壁出口温度产生偏差,要特别注意锅炉螺旋管水冷壁超温现象,此时若有条件可适当增加

负荷或提高锅炉主蒸汽压力。

3 结 语

目前,大部分投产的超临界新机组均采用直流锅炉,由于运行操作经验不足及设备的缺陷造成高压加热器跳闸的现象经常发生。若处理不当很容易造成机组的解列,对电网造成不稳定因素。金湾发电厂自投产以来,由于设备及操作的原因多次发生高压加热器汽侧跳闸的现象,但运行操作人员成功运用了上述事故处理的原则及方法,及时消除了高压加热器跳闸对锅炉和汽轮机运行的不良影响,保证了发电机组的安全运行,避免了机组跳闸对发电厂所带来的经济损失。同时,对后续机组运行中发生该类异常后,防止异常扩大,保证机组的安全稳定运行有着借鉴和操作指导意义。

参考文献

- [1] 章德龙. 600 MW 火力发电机组培训教材(第二版)——锅炉设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 丁有宇, 丁一. 600 MW 火力发电机组培训教材(第二版)——汽轮机设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2011-10-08)

四川电科院高压所组织召开《“四图”编制研究》和 《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目评审会

2012年2月12日,四川电科院高电压技术所在成都组织召开了《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》和《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目评审会。

会上,首先由《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》项目组向参会评审专家组先后汇报了项目的评审相关材料。专家组讨论认为“四图”的绘制对于指导生产具有重要的实际意义,并对“四图”的绘制原则提出了宝贵意见。之后进行了《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》项目相关材料的汇报,专家组和项目组成员进行了深入的技术交流讨论,认为“高海拔、长线路”以及创新的高压局部放电试验方法等均可作为本项目的亮点。

专家组对两个项目给予了高度评价,其中《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》评审组认为,其研究成果达到了国际先进水平,同意该项目成果通过技术评审。《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》评审组认为,该项目的部分研究成果达到国内领先水平,同意该项目成果通过技术评审。

据悉,《±400 kV 拉萨换流站高电压设备试验技术研究》和《四川电网雷区图、污区图等“四图”编制研究》已具备参与科技项目相关奖项的申报资格。

四川省电机工程学会第七届二次常务理事会议暨2012年迎春团拜会



2012年1月12日，四川省电机工程学会第七届二次常务理事会议暨2012年迎春团拜会在成都市名雅山庄召开。

上午9:00，召开了四川省电机工程学会

第七届二次常务理事会议，理事长王平，副理事长兼秘书长袁邦亮，副理事长刘俊勇、陈维荣、张启德、许保卫出席了会议。会议由刘俊勇副理事长主持，共46名常务理事参加了会议。

四川省电机工程学会副秘书长王卓向常务理事会议作了《四川省电机工程学会2011年度工作报告和2012年度工作计划》；会议审议通过了《四川省电机工程学会2011年度先进集体和先进个人评选情况》、《新组建“电力系统智能化专委会”及“电气制造和新能源专委会”的建议》和《四川省电机工程学会2011年经费使用情况》等事项；会议还听取了张治安副秘书长报告2011年中国电机工程学会年会情况。

王平理事长在会上指出，新的一年学会要加

强学会建设，加强学术交流，办好学术期刊，加强各专（工）委会、分会建设，不断创新，开拓和扩大会工作职能，充分发挥会员作用。要认清形势、解放思想，努力开拓学会工作的新局面，促进四川省电机工程事业的蓬勃发展。

上午10:00，召开了四川省电机工程学会2012年迎春团拜会，四川省科协、四川电监办及四川省电力公司老领导、理事等118名代表出席了会议。四川省电力公司总经理王抒祥发来了贺辞，四川省电机工程学会副理事长刘俊勇作新年致辞，四川省民政厅民间组织管理局罗伯益副局长对四川省电机工程学会2011年的工作充分认可，对学会2012年工作充满期望，四川电监办综合处卢宏亮副处长在会上做了重要讲话。

王平理事长在总结发言中指出，2012年是四川省电机工程第七届理事会成立的第一年，学会将坚持“立足学会、服务中心、发挥优势、创新发展、促进和谐”的工作方向，努力搭建好四个平台，着力提高学术交流的质量和实效，着力提高科普工作的质量和实效，增强学会工作的社会责任感，为把学会工作做得更好而不懈努力！



中国电力工程顾问集团西南电力设计院

浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程概况

中国电力工程顾问集团西南电力设计院设计的浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程，采用先进高效的大容量、高参数超超临界机组，同步实施脱硫、脱硝。通过工艺系统、设备及材料选型、总平面布置、主厂房布置、土建结构等各方面进行的多方案精心优化，工程实现了节约投资、节约能源、低碳排放、绿色环保、节约土地、节约用水、节约原材料，自动化程度高，减人增效，与国际先进电厂设计接轨的目的，技术经济成果明显。创造了多个世界和国内第一。

世界首创——在百万千瓦机组主厂房采用全混凝土结构

世界首创——在百万千瓦机组塔式锅炉上采用等离子点火技术

全国首创——海水二次循环技术实现了温排水的零排放

全国首创——采用13 000 m²超大型海水冷却塔

全国首创——在百万千瓦机组脱硫系统采用现场总线控制技术（FCS）

全国首创——在百万千瓦机组取消电动给水泵组小汽机排汽进入主凝汽器；

全国首创——在百万千瓦机组厂用电系统采用6 kV一级电压且开断电流在40 kA以下

全国首创——不新设启动/备用电源（变压器）

全国首创——在百万千瓦机组锅炉采用回字型中空桩筏基础

全国首创——圆形煤场堆煤区地基处理采用托板桩技术

全国首创——P92仪表导管在施工现场完全不与异种材料焊接

浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程可行性研究获2007年度全国优秀咨询成果一等奖；

浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程可行性研究获2007年度电力行业优秀咨询成果一等奖；

浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程获2009年度电力行业优秀工程设计一等奖；

浙江国华宁海电厂二期2×1 000 MW扩建工程获2010~2011年度中国建设工程鲁班奖（国家优质工程）；

“13 000 m²海水冷却塔技术研究与应用”获中国电力科学技术奖三等奖；

“封闭式圆形煤场优化设计研究”获2010年度中国电力工程顾问集团公司科技奖一等奖；

“海水循环冷却水处理试验研究”获2010中国电力工程顾问集团公司科技奖二等奖，正在申报中国电力科学技术奖。



实验室外景

人工智能四川省重点实验室



部分荣誉证书

人工智能四川省重点实验室是由四川理工学院、四川电力科学研究院、四川长征机床集团有限公司产、学、研共建而成，面向国内外开放。拥有智能信息处理、智能控制、智能检测技术、电力仿真、数控技术五个研究室，建筑面积2 600 m²，设备总值达2 000多万元。现有研究人员48人，其中教授15人，副教授18人，博士6人；主要从事智能计算、信息处理、智能控制、检测技术等方面的理论和应用研究。近5年来，实验室研究人员共发表论文400余篇，承担国家、省、市各级项目80余项，获得四川省科技进步一等奖1项，二等奖6项。



实验室研究人员合影



实验室主任曾黄麟教授（左）



实验室仪器