

江苏电机工程

JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 第 5 期(总第 157 期)

2014 年 9 月 28 日出版



《江苏电机工程》 编辑委员会

顾 问	张凤祥	郑健超	严陆光
	尹积军	黄其励	薛禹胜
	张 龙	陈 刚	
主 任 委 员	沈国荣		
副主任委员	鞠 平	王海林	李 群
	蒯狄正		
委 员	袁晓辉	黄学良	李晓慧
	张兴华	吴军基	张官元
	王作民	费益军	陈云仑
	莫建益	薛一如	叶 辉
主 编	薛一如		

目 次

专论与综述

500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究	刘建坤,赵静波,周 前,等(1)
基于源网协同的风电并网系统双层优化调度	丁 楠,陈 中,胡吕龙(6)
大型地区电网调度控制系统海量历史数据处理技术	彭 晖,赵家庆,王昌频,等(11)

故障诊断与检修策略

一起 35 kV 电容式电压互感器缺陷的分析及处理	季 烨(15)
10 kV 开关手车控制回路断线原因分析及处理方法	陆 琳(18)

电网技术

基于 D-S 证据理论的母线负荷预测	刘亚南,卫志农,季 聪,等(21)
小电阻接地系统零序电流 II 段保护整定策略研究	鲍有理,季东方(25)
基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划研究	周建华,孙 蓉,陈久林,等(28)
太阳能光伏电池建模与动态特性仿真	易桂平,胡仁杰(32)
新能源发电与电动汽车充换储站协调运行研究	薛钟兵,彭 程(36)
馈线自动化终端设备智能接入的研究	王川化(39)

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)

基于预制舱的配送式智能变电站设计	孙建龙,鲁东海(43)
基于 PSD-BPA 的暂态稳定控制批处理计算方法的实现	常宝立,徐光虎,易 杨,等(48)
基于突变理论的配电网规划方案综合评估	季晓明,成乐祥(51)
江苏海上风电接入系统若干问题探讨	陆 燕,谈 健(55)
一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法	薛明军,陈福锋,姚 亮(59)
多采样率转换算法对差动保护的应用研究	薛 蓉(62)

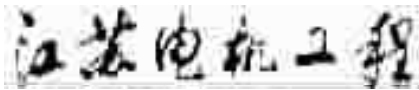
发电技术

燃煤 PM10 湍流聚并 GDE 方程算法及算例分析	周林海,骆建友,刘含笑,等(66)
高硫煤对燃煤机组的影响分析	宋金琳,张 光(70)
1000 MW 机组塔式锅炉 NO _x 排放的试验研究	卞康麟(73)
火电厂选择性催化还原法脱硝效益与安全	董志军,施 跃(76)
汽包锅炉炉内结渣的监控及优化吹灰策略	万 跃,晏海能(80)

科普园地

电力系统信息安全及博弈防御系统	王 燕(82)
-----------------	---------

下期要目	(17)
广告索引	(5)



主管单位:江苏省电力公司
主办单位:江苏省电力公司
江苏省电机工程学会
编辑出版:《江苏电机工程》编辑部
地址:南京市江宁区帕威尔路 1 号
邮政编码:211103
电话:(025)86558772(主编)
(025)86556860(编辑)
(025)86558020(编务)
(025)86558020(广告)
网 内:954296903, 954296927
传 真:(025)86558020
电子信箱:jsdj@chinajournal.net.cn(电网系统外)
jee@js.sgcc.com.cn(电网系统内)
创刊时间:1982 年
发行范围:公 开
国内发行:南京邮政局
邮发代号:28-305
国内定价:16.00 元
订 阅:全国各地邮政局(所)
印 刷:南京电力印刷厂
广告经营许可证号:3200004000534
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-0665
CN 32-1541/TM

封面简介:

淮安供电公司下辖涟水、盱眙、洪泽、金湖等 4 个县供电公司、128 个供电所。截至 2013 年底,淮安电网 35 千伏及以上变电站 142 座,主变容量 1178 万千伏安,服务全市各类用电客户 214 万户。

2013 年,全市全社会用电量 148.39 亿千瓦时,全社会用电最高负荷 286.45 万千瓦。截至 2013 年 12 月 31 日,实现连续安全生产 4686 天。

公司先后获得全国五一劳动奖状、全国精神文明建设先进单位、全国法制宣传教育先进单位、连续六年全国“安康杯”竞赛优胜单位、全国模范职工之家、全国守合同重信用单位、全国实施用户满意工程先进单位、全国厂务公开民主管理先进单位、国家电网公司文明单位、国家电网公司安全生产先进单位、江苏省文明行业、江苏省用户满意服务明星企业、淮安市软环境与效能建设十佳单位、淮安市市长质量奖等称号。

CONTENTS

Thesis and Summary

Evaluation on Open/closed Loop operation Modes of 500/220 kV Electromagnetic Loop Network	LIU Jiankun, ZHAO Jingbo, ZHOU Qian,et al.(1)
A Bi-level Optimal Dispatching Approach for Grid-connected Wind Power Based On Source-grid Collaboration	DING Nan, CHEN Zhong, HU Lyulong(6)
Massive Historical Data Management Technology for Large-scale Regional Power Grid Dispatching Supporting System	PENG Hui, ZHAO Jiaqing, WANG Changpin,et al.(11)

Faults Diagnosis and Maintenance Strategy of Power Apparatus

An Accident of Voltage-Dividing Capacitor Breakdown of 35 kV Capacitive Voltage Transformer	JI Ye(15)
An Accident Analysis of 10 kV Handcart Switch Cabinet Control Circuit Break	Lu Lin(18)

Electric Network Technology

Bus Load Forecasting Based on D-S Evidence Theory	LIU Yanan, WEI Zhinong, JI Cong,et al.(21)
Study on Definite-time of Zero Sequence Over-current Protection Settings for Low Resistance Grounding System	BAO YouLi, JI DongFang(25)
Research on Transmission Network Expansion Planning of Power System Containing Wind Power Based on Improved Particle Swarm Optimization	ZHOU Jianhua, SUN Rong, CHEN Jiulin,et al.(28)
Solar Photovoltaic Battery Modeling and Dynamic Characteristics Simulation	YI Guiping, HU Renjie(32)
Research on the Coordinated Operation of New Energy Power Generation and EV Charging Storage Station	XUE Zhongbing, PENG Cheng(36)
Research on Intelligent Access of Feeder Automation Terminal Equipment	WANG Chuanhua(39)
Distribution-mode Smart Substation Design Based on Prefabricated Cabin	SUN Jianlong, LU Donghai(43)
Realization of Batch Calculation of Transient Stability Control Based On PSD-BPA	CHANG Baoli, XU Guanghu, YI Yang, et al.(48)
Synthetical Assessment on Distribution Network Planning Scheme Based on Catastrophe Theory	JI Xiaoming, CHENG Lexiang(51)
A Discussion on the Integration of Offshore Wind Farm into Jiangsu Power Grid	Lu Yan, Tan Jian(55)
An Accurate Method for Recovery Voltage Calculation on Extra High Voltage Transmission Lines	XUE Mingjun, CHEN Fufeng, Yao Liang(59)
Research on the Impacts of Multi -Rate Conversion Algorithm on Differential Protection	Xue Rong(62)

Generation Technology

Arithmetic Research on GDE of PM10 Turbulence Coalescence and the Example Analysis	ZHOU Linhai, LUO Jianyou, LIU Hanxiao, et al.(66)
Influence of High Sulfur Coal on Coal-fired Power Units	SONG Jinlin, ZHANG Guang(70)
Testing Research on NO _x Emission Characteristics of a 1000 MW Ultra-supercritical Tower Boiler	BIAN Kanglin(73)
Safety and Economy of Selective Catalytic Reduction Denitration in Coal-fired Power Units	DONG Zhijun, SHI Yue(76)
Sootblowing Strategy Optimization and Monitoring of Slagging in Drum Boiler Furnace	WAN Yue, YAN Haineng(80)

Popular Science Field

A Design of Gaming Theory Based Defense System for Power System Cyber-Security	WANG Yan(82)
--	--------------

Jiangsu Electrical Engineering(Bimonthly)

Competent Authorities Jiangsu Electric Power Company

Sponsor Jiangsu Electric Power Company

Jiangsu Society of Electrical Engineering

Editor and Publisher Editorial Department of Jiangsu Electrical Engineering

Address No.1 Power Road, Jiangning District, Nanjing, China

E-mail jsdj@chinajournal.net.cn(网外)

jee@js.sgcc.com.cn(网内)

Tel (025)86558772, 86558020

Fax (025)86558020

Publication Number ISSN 1009-0665

Post Code 211103

500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究

刘建坤, 赵静波, 周 前, 李 群

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:提出了一种新的 500/220 kV 电磁环网运行方式评价方法,该方法从电网运行可靠性和经济性出发,确定了以母线短路电流水平、线路负载率、变压器负载率、电网静态安全性、电网暂态稳定性、网损作为评价电磁环网不同解合环方式优劣的指标,并基于电网实际运行中对各指标的期望曲线,建立了考虑阈值的运行指标评价公式,对于各运行指标的权重参数,采用了一种新的群决策理论方法进行确定。根据计算实例对比,表明了该电磁环网运行评价指标方法是实用有效的。

关键词:电磁环网;解合环;评价方法;群决策;权重

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)05-0001-05

电力系统的电磁环网是指两组不同电压等级的输电线路通过变压器或电磁耦合构成的环形电网^[1]。电磁环网的形成是电网发展过程中的产物,在电磁环网存在的早期,环网运行方式一定程度上使电网的输电能力得到加强,提高了电网的供电可靠性和系统的暂态稳定性。但随着高低电压等级电网的不断增强,电网结构日趋复杂,电磁环网运行可能会对电网的安全运行带来一定影响,如短路电流超限、高压线路故障后向低压线路潮流转移等^[2-6]。随着特高压和新能源快速发展,电网运行更趋复杂,研究合理的电磁环网解合环评价方法更加重要^[7,8]。

在电力系统实际运行中,电磁环网的解合环应根据电网运行实际具体分析,并非排斥一切电磁环网运行方式,在有些情况下,电磁环网运行在充分利用资源、提高输电可靠性、降低输电损失等方面比开环运行更利大于弊^[1]。因此,电磁环网的解合环方案,需进行详细的运行可靠性和经济性分析,进而选择最佳的解合环运行方式。目前,在电磁环网解合环评价方面,以满足约束条件为目标的电网运行方式对比研究较多,但对满足约束条件的不同运行方式优劣往往缺乏定量对比。文献[9-12]提出了电磁环网解环研究的原则和可行性等,但未给出具体的定量评价指标及方法;文献[13]等提出了电磁环网开环方案的模糊综合评价方法,但对各行为指标的计算未考虑指标在不同范围的分段特性。文中根据电网实际运行的经验,对 500/220 kV 电磁环网的解合环方式建立了指标评价体系,并且结合具体电网实例验证了该评价体系的有效性。

1 电磁环网运行指标评价公式

1.1 电磁环网运行评价指标

对电磁环网的不同解合环运行方式,可以从运行

可靠性和经济性两方面进行评价,具有可靠性和经济性综合最优的运行方式应当是最佳的运行方式。

根据电网运行经验,对于电网的不同解合环方案而言,电网运行的可靠性主要反映在短路电流水平、设备负载情况、静态安全性、系统稳定性等方面;经济性主要反映在不同方式的网损方面。对于 500/220 kV 电磁环网,文中确定了以下几个电网运行的评价指标:(1) 母线短路电流水平;(2) 线路负载率;(3) 变压器负载率;(4) 电网静态安全性;(5) 电网暂态稳定性;(6) 网损。

1.2 电磁环网运行评价指标的属性

在决策理论中,指标属性类型一般可以分为效益型、成本型、固定型、偏离型、区间型和偏离区间型等^[14]。根据电磁环网运行评价指标的特点,文中对各评价指标的属性均采用成本型,即在评价得分中,得分越少越好。此种属性选择符合一般的电网运行经验,例如网损越小则经济性越优、线路(变压器)负载率越低则供电裕度越大等。

1.3 运行指标评价公式

1.3.1 短路电流指标评价公式

对应短路电流指标的成本型属性,根据电网实际运行经验,对单条母线短路电流指标所得分值的期望值如图 1 所示。

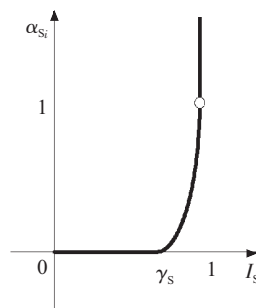


图 1 母线短路电流评分期望值曲线

图 1 中,横坐标 I_s 为单条母线短路电流同开关额定开断电流的比值,其中 γ_s 为短路电流影响度阈值。根据

以上期望值曲线,当 I_s 大于1,也即母线短路电流超过开关额定开断容量时,期望值为无穷大,当 I_s 小于某一阈值 γ_s 时,可认为对电网负面影响可忽略,即期望值为0,当 I_s 位于1和 γ_s 之间时,期望值随 I_s 的增大而增大,且 I_s 越接近于1,变化趋势越陡峭。根据以上期望值曲线,单条母线短路电流指标评分公式为:

$$\alpha_{Si} = \begin{cases} +\infty, I_s \geq 1 \\ (\frac{I_s - \gamma_s}{1 - \gamma_s})^{\beta_s}, \gamma_s < I_s < 1 \\ 0, I_s \leq \gamma_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: β_s 为大于1的正实数。对于电磁环网解合环方式中的整体短路电流指标,评分公式则如下式所示:

$$\alpha_s = \lambda_{S500} \sum_{\Phi_{S500}} \alpha_{Si} + \lambda_{S220} \sum_{\Phi_{S220}} \alpha_{Si} \quad (2)$$

式中: Φ_{S500} 为500 kV 母线集合; Φ_{S220} 为220 kV 母线集合; λ_{S500} 为500 kV 母线短路电流权重; λ_{S220} 为220 kV 母线短路电流权重。

1.3.2 线路运行状态评价公式

与短路电流指标评价公式类似,单条线路运行状态评分公式为:

$$\alpha_{Li} = \begin{cases} +\infty, I_L \geq 1 \\ (\frac{I_L - \gamma_L}{1 - \gamma_L})^{\beta_L}, \gamma_L < I_L < 1 \\ 0, I_L \leq \gamma_L \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_L 为线路负载率; γ_L 为线路负载率阈值; β_L 为大于1的正实数。电磁环网解合环方式中的线路运行状态指标评分,如下式所示:

$$\alpha_L = \lambda_{L500} \sum_{\Phi_{L500}} \alpha_{Li} + \lambda_{L220} \sum_{\Phi_{L220}} \alpha_{Li} \quad (4)$$

式中: Φ_{L500} 为500 kV 线路集合; Φ_{L220} 为220 kV 线路集合; λ_{L500} 为500 kV 线路运行状态指标权重; λ_{L220} 为220 kV 线路运行状态指标权重。

1.3.3 变电站运行状态评价公式

与线路运行状态指标评价公式类似,单座变电站运行状态评价公式为:

$$\alpha_{Ti} = \begin{cases} +\infty, I_T \geq 1 \\ (\frac{I_T - \gamma_T}{1 - \gamma_T})^{\beta_T}, \gamma_T < I_T < 1 \\ 0, I_T \leq \gamma_T \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_T 为单座变电站的越限率,即变电站输送功率同主变稳定限额的比值; γ_T 为变电站越限率阈值; β_T 为大于1的正实数。电磁环网解合环方式中的变电站运行状态指标评分,如下式所示:

$$\alpha_T = \lambda_T \sum_{\Phi_T} \alpha_{Ti} \quad (6)$$

式中: Φ_T 为500 kV 变电站集合; λ_T 为变电站运行状态指标权重。

1.3.4 静态安全分析指标评价公式

对电磁环网不同解合环方式下的静态安全性,主要是分析电网发生 $N-1$ 后的设备过载率,基于指标的成本型属性,不满足 $N-1$ 的情形越多,令得分越高。对于系统发生单个元件故障时静态安全分析指标的评分公式为:

$$\alpha_{Ni} = n_N \quad (7)$$

其中 n_N 为系统发生单个元件故障 $N-1$ 时其余设备过载的个数。则具体电磁环网解合环方式中静态安全指标得分为:

$$\alpha_N = \lambda_N \sum_{\Phi_N} \alpha_{Ni} \quad (8)$$

式中: Φ_N 为系统发生单个元件故障($N-1$)的集合; λ_N 为静态安全评价指标权重。

1.3.5 电网暂态稳定性指标评价公式

对电磁环网不同解合环方式下的暂态稳定性,文中通过比较发生相同故障时的故障极限切除时间来进行评价。对发生单个故障时电网暂态稳定性得分的期望值可如图2所示。

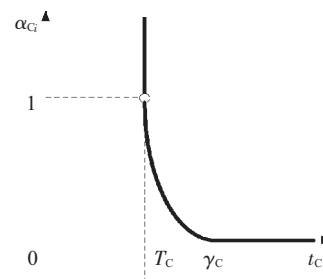


图2 电网暂态稳定性评分期望值曲线

图中:横坐标 t_c 为故障极限切除时间; T_c 为故障时保护动作时间; γ_c 为故障极限切除时间阈值。对于图2中期望值曲线有如下解释:当发生电网故障时,当故障极限切除时间 t_c 大于 γ_c 时,可认为电网具有较强的暂态稳定性,此时期望值恒定为0;如 t_c 小于 T_c ,此时系统会失稳,则电网稳定性指标期望值为无穷大;当 t_c 大于 T_c 而小于 γ_c 时,期望值随着 t_c 的增大而减小,此时 t_c 越接近 T_c ,期望值曲线越陡峭。根据以上期望值曲线,对于单个故障时电网稳定性指标评分公式为:

$$\alpha_{Ci} = \begin{cases} +\infty, t_c \geq T_c \\ (\frac{t_c - \gamma_c}{T_c - \gamma_c})^{\beta_c}, T_c < t_c < \gamma_c \\ 0, t_c \leq \gamma_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: β_c 为大于1的正实数。电磁环网解合环方式中的暂态稳定性指标评分,如下式所示:

$$\alpha_c = \lambda_c \sum_{\Phi_c} \alpha_{ci} \quad (10)$$

式中: Φ_c 为设定的故障集合; λ_c 为暂态稳定性指标权重。

1.3.6 网损指标评价公式

在网损指标评价中,以电磁环网的不同解合环方式中的最小网损为基准值,其他解合环方式以最小网损值作为参考进行评分。对于某种解合环方式,网损相对值为:

$$\Delta S_i = S_i - S_0 \quad (11)$$

式中: S_i 为某解合环方式下网损; ΔS_i 为同比最小网损 S_0 对应的网损水平增量。由于网损越小,运行方式越优,则基于指标的成本型属性,相应得分则越低。对此电网网损指标评分公式为:

$$\alpha_E = \lambda_E \Delta S_i \quad (12)$$

式中: λ_E 为电网网损评价指标权重。

1.3.7 评价指标公式中参数的确定

上文中给出了电磁环网解合环方式的指标评价公式,根据电网实际运行经验,对评分公式中包含的参数确定可参考表1。

表1 电磁环网评价指标评分公式相关参数

参数	取值	参数	取值
γ_s	0.8	γ_T	0.8
γ_L	0.75	γ_c	0.3

以 γ_L 为例对上表参数的确定进行说明, γ_L 是指线路运行状态阈值,在线路负载率分析中,往往对负载率在75%以上的线路给予较多关注,认为属于重载线路,而负载率在75%以下,可认为对电网的可靠性影响程度较低,因此在上表中,令 $\gamma_L=0.75$ 。同理, $\gamma_s, \gamma_T, \gamma_c$ 分别确定为0.8, 0.8, 0.3。

$\beta_s, \beta_l, \beta_T, \beta_c$ 均属于指数参数,在文中统一确定为2,经检验指数为2时可满足节中各评分公式期望值曲线的趋势。值得指出的是,以上评分公式中的各参数,均可根据实际需要进行另行设定。

对于各指标中的权重参数 λ ,将在下文中对确定方法进行叙述。

2 基于群组多属性决策的电磁环网指标权重确定方法

上文中提出的各个具体指标评价公式中,包括了每个指标的权重参数 λ ,这是因为不同的指标对电网

影响的重要程度是存在差异的,因此需要对各评价指标进行赋权。根据统计学理论,建立了一套基于群组多属性决策的电磁环网指标权重确定方法。

2.1 群组多属性决策权重确定方法

对于电磁环网各具体评价指标重要程度的判定,需由具有丰富电网运行经验的专家完成。而在判定过程中,由单一专家形成的确定意见往往偏于片面,应当由许多专家分别给出确定意见,从而形成集体决策,此类问题即为群组决策问题^[15]。

最终的权重向量需要综合每位专家的赋权信息,所以对群组专家赋权信息的合成,是整个权重求解的关键。针对这一问题,采用了一种群组多属性决策权重确定方法,其主要思想为:每位专家在多属性决策中的决策权力,应该体现在决策活动中,该专家与专家组的决策结果一致性程度上,当一名专家与大多数专家的决策结果一致时,该专家就应该拥有较大的决策权力;与此相反,当该专家与大多数专家的决策结果一致性较差时,其决策权力就应该较小^[16]。

假设对某个多属性决策问题,有 n 名专家对 m 种属性给出权重系数,得出的权重向量值为:

$$\begin{aligned} W_1 &= (w_{11}, w_{12}, w_{13}, \dots, w_{1m}) \\ W_2 &= (w_{21}, w_{22}, w_{23}, \dots, w_{2m}) \\ W_3 &= (w_{31}, w_{32}, w_{33}, \dots, w_{3m}) \\ &\dots\dots\dots \\ W_n &= (w_{n1}, w_{n2}, w_{n3}, \dots, w_{nm}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $w_{jk} \geq 0$, 且 $j \in \{1, 2, \dots, n\}, k \in \{1, 2, \dots, m\}$

专家决策权力赋权问题的核心在于选择反映大小的最佳统计量。这里记为:

$$\bar{w}_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} / n, 1 \leq j \leq m, \bar{W} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_m) \quad (14)$$

$$|W_i - \bar{W}| = \sqrt{(w_{i1} - \bar{w}_1)^2 + (w_{i2} - \bar{w}_2)^2 + \dots + (w_{im} - \bar{w}_m)^2} \quad (15)$$

$$|W_i - W_j| = \sqrt{(w_{i1} - w_{j1})^2 + (w_{i2} - w_{j2})^2 + \dots + (w_{im} - w_{jm})^2} \quad (16)$$

取:

$$A_i = a_i \sum_{j=1}^n |W_i - W_j| + b_i |W_i - \bar{W}| \quad (17)$$

其中 $a_i + b_i = 1, a_i \geq 0, b_i \geq 0, 0 \leq i \leq n$,这里,用 $1/A_i$ 来度量专家权重的大小,令:

$$W^* = (\frac{1}{A_1}, \frac{1}{A_2}, \dots, \frac{1}{A_n})' \quad (18)$$

把 W^* 归一化,即得到赋权专家的权重向量:

$$W' = (w'_1, w'_2, w'_3, \dots, w'_n)' \quad (19)$$

根据加权和法,该决策问题各属性的权重向量为:

$$W=W' \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & L & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & L & w_{2m} \\ M & M & O & M \\ w_{n1} & w_{n2} & L & w_{nm} \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.2 电磁环网评价各指标权重的确定

对于已确定的电磁环网解合环评价可靠性和经济性的具体指标权重向量:

$$W=(\lambda_{S220}, \lambda_{S500}, \lambda_{L220}, \lambda_{L500}, \lambda_T, \lambda_N, \lambda_C, \lambda_E) \quad (21)$$

利用层次分析法中判断矩阵的形式向若干位具有丰富电网运行经验专家发放调查问卷,获得了每位专家对各指标的重要性判断信息,并利用层次分析法(AHP)的原理获得了每位专家的赋权:

$$W_1=(0.050 \ 5 \ 0.079 \ 9 \ 0.019 \ 2 \ 0.034 \ 6 \ 0.166 \ 0$$

$$0.141 \ 7 \ 0.453 \ 3 \ 0.054 \ 8);$$

$$W_2=(0.059 \ 1 \ 0.100 \ 1 \ 0.018 \ 3 \ 0.042 \ 3 \ 0.193 \ 9$$

$$0.126 \ 6 \ 0.408 \ 0 \ 0.051 \ 7);$$

.....

$$W_n=(0.029 \ 3 \ 0.095 \ 5 \ 0.021 \ 6 \ 0.070 \ 2 \ 0.135 \ 8$$

$$0.139 \ 2 \ 0.443 \ 3 \ 0.065 \ 0)。$$

对于利用层次分析法判断矩阵的方式获取每位专家对具体指标的权重判断,具体过程可以参见相关文献^[17],文中不再赘述。

根据上节中的群组多属性决策方法,取 $a_i=b_i=0.5$,可获得最终的权重向量为:

$$W=(0.049 \ 0 \ 0.091 \ 4 \ 0.019 \ 5 \ 0.045 \ 9 \ 0.170 \ 0$$

$$0.135 \ 7 \ 0.434 \ 8 \ 0.053 \ 8)。$$

3 计算实例

以某年度南京南部电网为例,对文中所提出的电磁环网运行方式评价指标体系进行了验证。

南京南部电网结构如图3所示。廻峰山变电站2台500 kV主变建成之后,受短路电流增大等因素影响,东善桥-廻峰山之间面临电磁环网解环,根据东善桥变电站和廻峰山变电站之间的电网结构,以下述2种解环方式作为研究对象。

方案1:开断东善桥-龙山、东善桥-华科、殷巷-溧水、殷巷-苏庄线路;

方案2:开断东善桥-龙山、东善桥-华科、东善桥-殷巷线路。

对于以上2种解环方式,解环后网架结构仍然基本保持环形,不存在大范围串供情况,网架结构合理。对东善桥-廻峰山电磁环网2种解环方式进行了计算对比,结果见表2。

对2种解环方案下不同的运行指标进行了量化评分,定量对比结果见表3。

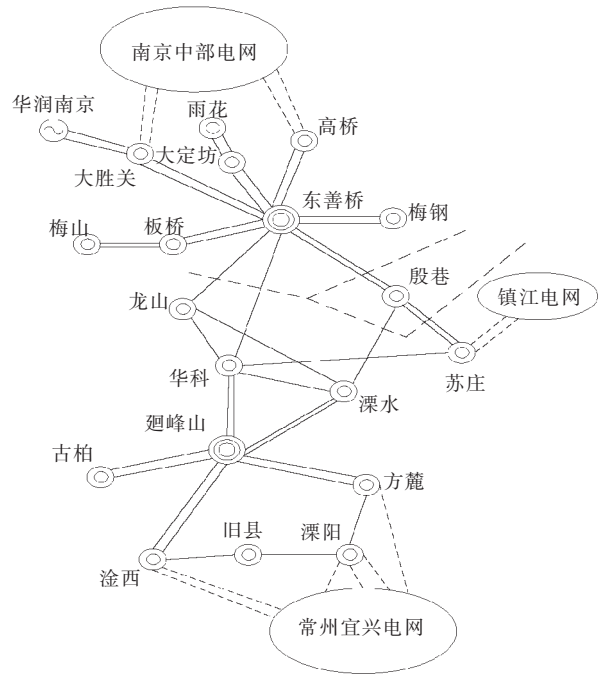


图3 南京南部电网结构

表2 东善桥-廻峰山电磁环网不同解环方式下电网运行情况定性对比

评价指标	解环方式1	解环方式2
短路电流	不超标	不超标
输送能力	线路和变压器均未超稳定限额	线路和变压器均未超稳定限额
静态安全分析	无N-1后过载	无N-1后过载
暂态稳定	无稳定问题	无稳定问题
网损	475.587 MW	475.748 MW

表3 东善桥-廻峰山电磁环网不同解环方式电网运行情况定量对比

评价指标		得分	
		解环方式1	解环方式2
短路电流	500 kV 母线	0.153 1	0.153 4
	220 kV 母线	0.083 1	0.087 9
线路运行状态	500 kV 母线	0.003 9	0.003 9
	220 kV 母线	0.005 7	0.006 2
变电站运行状态		0.069 3	0.069 7
静态安全分析		0.000 0	0.000 0
系统稳定性		0.095 7	0.095 6
网损		0.000 0	0.008 7
总评分		0.410 8	0.425 4

由表3,可以对2种解环方式下的运行指标情况进行横向对比,如:短路电流方面方式1优于方式2、系统稳定性方面方式2略优于方式1等。而从总评分中可看出,解环方式1比解环方式2总评分更少,基于评价的成本型属性,即运行方式更优,因此,通过定量分析可判断出解环方式1优于解环方式2,在运行中可采取此种解环方式,这同实际电网运行中采用的解环方式相一致。

4 结束语

提出了一种新的 500/220 kV 电磁环网运行评价方法,此方法基于电网实际运行经验,提出了考虑指标阈值的电网运行方式评价指标公式,并采用群组多属性决策理论提出了确定各评价指标权重的方法,从而可以对电磁环网的不同解合环方式的优劣进行定量的对比。此种方法具有较好的扩展性,不同电网可根据实际情况和运行经验对其中的参数进行设定,从而更适用于不同电网的需求。根据计算实例分析,对于确定的 500/220 kV 电磁环网,通过此运行评价方法,可以对不同解合环方式下的运行指标情况进行横向对比,而且通过对比不同解合环方式的总评分,可以确定最优的解合环方式,从而为电网的安全可靠运行提供参考。

参考文献:

- [1] 成涛,成连生. 电力系统的电磁环网运行[J]. 华中电力, 2001, 14(6): 17-19.
- [2] 王涛,赵良. 500 kV/220 kV 电磁环网调度运行对策和浙江电网案例分析[J]. 华东电力, 2005, 33(9): 39-41.
- [3] 侯春青,郑惠萍. 2005 年山西中南部 500 kV 及 220 kV 电网的电磁环网运行方式研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 80-84.
- [4] 颜俊,程改红,张中庆,等. 南方电网 500 kV/220 kV 电磁环网运行方式研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 76-80.
- [5] 刘楠,唐晓骏,张文朝,等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136.
- [6] 王加庆,吴迪,叶彬,等. 安徽电网 2008~2015 年电磁环网的解环方案[J]. 华东电力, 2008, 36(12): 59-60.
- [7] 崔晓丹,李威,任先成,等. 大规模风电接入的输电网规划研究述评[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 1-4.
- [8] 董宸,周霞,李威,等. 提升特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 1-4.
- [9] 南哲,侯玉琤,宁辽逸. 500/220 kV 电磁环网解环与分区运行研究[J]. 东北电力技术, 2014(3): 4-8.
- [10] 张祖平,范明天,周莉梅. 城市电网电磁环网的解环问题研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 42-44.
- [11] 刘明松,张健,张文朝. 弱电磁环网运行控制若干问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 109-114.
- [12] 程海辉. 500/220 kV 电磁环网开环运行分析[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(5): 38-40.
- [13] 叶华,刘玉田,牛新生. 500 kV~220 kV 电磁环网开环方案模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2006, 27(7): 1-5.
- [14] 张方伟,姚炳学,王志强. 一种新的区间数多属性决策权重信息集结方法[J]. 模糊系统与科学, 2007, 21(6): 135-140.
- [15] SZMIDT E, KACPRZYK J. Intuitionistic Fuzzy Sets in Group Decision Making[J]. Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets, 1996, 2(1): 15-32.
- [16] 阎瑞霞,刘金良,姚炳学. 一种群组决策中专家权重确定的方法和应用[J]. 统计与决策, 2007(23): 84-86.
- [17] 潘仁飞,邹乐乐,侯运炳. 基于专家可信度的不确定型 AHP 方法及其应用[J]. 系统工程, 2008, 26(10): 101-106.

作者简介:

刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统计算和分析工作;

赵静波(1982),男,重庆市人,高级工程师,从事电力系统计算和分析工作;

周前(1978),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事电力系统计算和分析工作;

李群(1967),男,江苏靖江人,研究员级高级工程师,从事电力系统分析、无功补偿控制、新能源研究等工作。

Evaluation on Open/closed Loop Operation Modes of 500/220 kV Electromagnetic Loop Network

LIU Jiankun, ZHAO Jingbo, ZHOU Qian, LI Qun

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: In this paper, a new method is proposed to evaluate the operation modes of 500/220 kV electromagnetic loop network. From the views of reliability and economy of power grid operation, the bus-bar short-circuit current level, the line load rate, the transformer load rate, the power grid static security, the power grid transient stability and the power grid loss are selected as evaluation indexes. Based on the anticipant curves of each index during actual operation of power grid, evaluation formula combined with threshold is established. To acquire the weight coefficient of each operation index, a new group decision-making theory is adopted. Comparisons of calculation results of an actual example shows that the proposed method is practical and effective.

Key words: electromagnetic loop network; open/closed loop; evaluation method; group decision; weight

广告索引

江苏省电力公司淮安供电公司

封一

《江苏电机工程》协办单位

前插 4

江苏省电力设计院

封二

江苏南瑞帕威尔电气有限公司

(黑白) 文前

南京南瑞继保电气有限公司

前插 1

远东电缆有限公司

封三

《江苏电机工程》协办单位

前插 2、3

南瑞科技股份有限公司

封四

基于源网协同的风电并网系统双层优化调度

丁楠, 陈中, 胡吕龙

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:在风电渗透率较高时, 多点接入的风电出力波动就会在整个电网中形成扰动, 威胁电网的安全稳定运行。针对风电的多点扰动带来的潮流全局窜动和局部涌动, 以常规机组出力、储能系统 (ESS) 充放电功率和可控串联补偿装置 (TCSC) 为调控手段, 建立了含风电场的源网协同双层调度模型。上、下层模型分别以全网潮流均衡度和关键断面潮流均衡度为优化目标, 采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解。含风电场的 IEEE39 节点系统算例验证了调度方法的可行性和有效性。

关键词:风电场; 波动; 潮流均衡度; 源网协同; 双层规划; 可控串联补偿装置

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)05-0006-05

风电存在随机性和间歇性, 随着风电渗透率的不断增加, 给电力系统的运行带来新的挑战^[1-2], 风电并网系统调度方法已经成为当前研究的热点。针对区域电网, 风电是从多个集中接入点接入电网, 在风电渗透率较高时, 多点扰动的风电或许不会对电网整体的有功平衡造成太大影响, 但它会造成电网中潮流分布的重大变化, 带来新的系统安全运行问题。

目前针对高渗透风电并网系统调度主要从全局性出发, 控制手段主要是通过电源侧的常规火电、常规水电、风电的联合控制以保证系统安全经济运行。文献[3]考虑风电出力不确定性对备用和线路潮流的影响, 建立了计及风电备用和线路安全约束的有功经济调度模型; 文献[4]建立了风—水—火电联合调度的多目标优化模型与算法, 以充分利用清洁能源、降低系统运行成本、保证火电机组运行效率; 文献[5]以电网安全条件风险价值作为电网安全指标, 取代一般调度模型中的安全约束, 来描述风电随机性给电网运行带来的风险; 文献[6]在提出采用基于随机模拟、神经网络和遗传算法的混合智能算法得到常规电厂出力数据的动态经济调度方法。文献[7]提出通过与风电机组紧密关联的 AGC 机组的实时偏差控制对功率波动进行调整的策略。

目前针对局部性调度已经开展的工作主要集中于可再生能源并网点及其衍生的较小区域, 抑制手段主要通过并网点储能的配置, 文献[8-9]利用离散傅里叶变换对可再生能源输出功率进行频谱分析, 确定不同类型的储能系统 (ESS) 所需补偿的功率变化的时间尺度, 有效地平抑了可再生能源输出功率的波动。文献[10]通过基于小波变换的算法利用储能平抑了风电的波动。文献[11]以基于标准差基础上的改进

数学熵的衡量指标对风—光—储系统进行优化, 减小了系统的峰谷差和波动性。

文中建立的双层调度模型, 上层模型以调度周期内全网潮流均衡度为优化目标, 以常规机组的出力为调控手段, 保证整个电网的潮流分布的均衡性和安全稳定; 下层模型以调度周期内关键断面潮流均衡度为优化目标, 以 ESS 充放电功率和可控串联补偿装置 (TCSC) 为调控手段, 保证这些关键断面的潮流分布的均衡性, 从而巩固了整个电网的安全稳定状态。采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解, 最终取得上、下层模型都满意的解。

1 潮流分布均衡性的描述

电力系统的运行状态在时刻变化着, 导致电网中每条线路的负载率也在不断变化。文献[12]考虑线路潮流安全限制, 以线路负载率的方差定义电网运行的均衡度并将其作为安全指标, 通过求解系统经济、安全协调的双目标问题确定优化调度。文献[13]以线路负载率为指标, 分析了在不同调度方式下, 安全经济调度、输电能力及其分布间的关系。因此, 文中将潮流均衡度引入含风电场的调度。

设线路 i 的最大有功传输容量为 $P_i^{\max}$, 系统运行时线路 i 实际潮流为 P_i , 则线路 i 的负载率 μ_i 为:

$$\mu_i = \left| \frac{P_i}{P_i^{\max}} \right| \quad i=1, 2, L, N_l \quad (1)$$

式中: N_l 为线路数。

目前, 描述潮流均衡性的模型有 2 种: 方差模型^[12]和潮流熵^[14]模型。文中选取方差来描述潮流的均衡性, 并定义 D 为潮流均衡度, 其数学表达式如式(2)所示:

$$D = \frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (\mu_i - \bar{\mu})^2 \quad (2)$$

收稿日期: 2014-04-20; 修回日期: 2014-05-30

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 自助项目 (2011AA05A105); 国家自然科学基金自助项目 (51177019)。

式中: $\bar{\mu} = \frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} \mu_i$ 为电网中所有线路的平均负载率。

电力系统运行时,当所有线路的负载率都相同时,电网潮流处于最均衡的状态,整个电网的潮流均衡度就是 0;当有的线路负载率很大,而有的线路负载率很小时,整个电网的潮流均衡度就很大,潮流窜动明显,容易发生连锁故障。整个电网的潮流均衡度反映的是整个电网潮流的综合水平,具有全局性。当系统的关键断面中的线路的负载率都相同时,断面中的潮流分布就处于最均衡的状态,关键断面的潮流均衡度就是 0;当断面中有的线路负载率很大,而有的负载率很小时,潮流涌动突出,线路的利用率就不合理,关键断面的潮流均衡度就很大。关键断面的潮流均衡度反映的是断面中潮流的分布情况,具有局部性。文中应用全网潮流均衡度表征风电并网系统的全局潮流窜动特性,应用关键断面潮流均衡度表征局部潮流涌动特性。

2 TCSC 的工作原理与数学模型

TCSC 是可控串联补偿的实现方案之一,也是最为成熟和使用最广的可控串联补偿的实现方案。TCSC 可以快速连续地改变所补偿的输电线路的等值电抗,因而在一定的运行范围内,可以将此线路的输送功率控制为期望的常数。在暂态过程中,通过快速地改变线路等值电抗,从而提高系统的稳定性。TCSC 的构造形式很多,原理结构如图 1 所示。与机械开关控制的补偿装置相比,晶闸管控制补偿装置可以实现串联补偿度的快速调节,其性能可以满足电力系统稳定控制和快速潮流控制的需要。

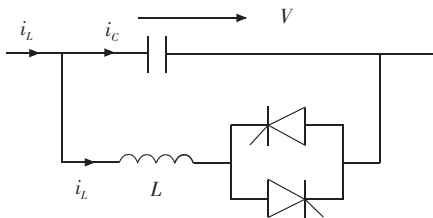


图 1 TCSC 原理结构

风电场接入系统中,可能会经过多条线路构成的断面向系统传输功率,这些线路类似于并联的关系。风电场功率的波动使这些线路上的功率也在不断波动,可能出现有些线路的负载率很高,有些线路的负载率却很低这种功率分配不合理的现象。因此,在风电场出口处这些并联的线路上装设 TCSC,通过这些 TCSC 的协调控制,将风电场出口处断面的潮流均衡性保持在理想的状态。

文中主要分析电力系统的稳态行为和潮流控制,因此采用 TCSC 的稳态模型,TCSC 在可调运行状态下可等效为串联在输电线路中的可变电抗 X_{TCSC} ,线路

电抗变为^[15]:

$$\begin{cases} X'_{ij} = X_{ij} + X_{TCSC} \\ X_{TCSC} = -\beta X_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{ij} , X'_{ij} 分别为补偿前和补偿后的支路电抗; β 为 TCSC 对支路电抗的补偿度。

3 含风电场的双层调度模型

文中所建立的双层协同调度模型,上层模型以调度周期内的全网潮流均衡度为优化目标,以常规发电机组的有功出力为决策变量;下层模型以调度周期内关键断面潮流均衡度为优化目标,以 ESS 充放电功率和 TCSC 为决策变量。上层优化后的方案成为下层规划的初始变量,下层规划在此基础上将下层优化方案传递到上层求解,由此反复,直到满足要求的最优方案出现。

3.1 双层规划理论

双层规划 (BLPP) 是一种具有二层递阶结构的系统优化问题,上层问题和下层问题都有各自的决策变量、约束条件和目标函数。双层规划的一般形式为^[16]:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } G(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \min f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(\mathbf{g})$ 为上层规划目标函数, $F: R^{n_1+n_2} \rightarrow R$; $G(\mathbf{g})$ 为上层规划约束条件集合, $G: R^{n_1} \rightarrow R^{m_1}$; $\mathbf{x} \in R^{n_1}$, $\mathbf{y} \in R^{n_2}$; $f(\mathbf{g})$ 为下层规划目标函数, $f: R^{n_1+n_2} \rightarrow R$; $g(\mathbf{g})$ 为下层规划约束条件集合, $g: R^{n_1+n_2} \rightarrow R^{m_2}$ 。双层规划模型中,上层决策问题是主问题,下层决策在上层给定决策下行动;上、下层决策通过传递最优解的方式相互影响,在满足各自约束条件时,实现上、下层的相互作用,取得上、下层都满意的解。

3.2 上层规划

上层规划的目标函数为:

$$\min F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D_t \quad (5)$$

式中: F 为一个调度周期的全网潮流均衡度的平均值; D_t 为时段 t 的全网潮流均衡度; T 为研究周期内的小时数,文中取 24,即研究日前调度计划。

上层约束集合为功率平衡约束、支路传输容量约束、常规机组有功出力约束、常规机组爬坡速率约束和系统的上、下旋转备用约束等。

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} S_{Gi,t} + \sum_{j=1}^{N_W} S_{Wj,t} + \sum_{k=1}^{N_E} P_{Ek,t} = S_{D,t} + S_{L,t} \quad (6)$$

式中: N_G 为系统中常规机组的台数; $S_{Gi,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的输出复功率; N_W 为系统中风电场总数; $S_{Wj,t}$ 为风电场 j 在时段 t 的输出复功率; N_E 为系统中 ESS 的总数; $P_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 在时段 t 的目标输出有功功率(为负表明吸收有功功率); S_{Dt} 为时段 t 的负荷值; S_{Lt} 为时段 t 的网损值。

(2) 支路传输容量约束:

$$|P_{l,t}| \leq P_l^{\max} \quad (7)$$

式中: $P_{l,t}$ 为线路 l 在时段 t 的传输功率; $P_l^{\max}$ 为线路 l 的传输功率上限。

(3) 常规机组出力约束:

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi,t} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 和 $Q_{Gi,t}$ 分别为常规机组 i 在时段 t 的有功出力 and 无功出力; $P_{Gi}^{\max}$, $P_{Gi}^{\min}$ 分别为常规机组 i 有功出力的上、下限; $Q_{Gi}^{\max}$ 和 $Q_{Gi}^{\min}$ 分别为常规机组 i 无功出力的上、下限。

(4) 常规机组爬坡速率约束:

$$R_{dt}^G \Delta t \leq P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq R_{ut}^G \Delta t \quad (9)$$

式中: R_{ut}^G , R_{dt}^G 分别为常规机组 i 有功出力的最大上升速率和下降速率; Δt 为一个时段的长度, 单位为 h。

(5) 系统的上、下旋转备用约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi,t}) \geq R_w^S \\ \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi,t} - P_{Gi}^{\min}) \geq R_{dt}^S \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_w^S 和 R_{dt}^S 分别为系统在时段 t 的上、下旋转备用要求, 一般取系统总负荷的 5%。

3.3 下层规划

下层规划, 通过上层规划传递下来的常规机组的有功出力安排 T 个时段的 ESS 的充放电功率和 TCSC 的补偿度, 使调度周期内的关键断面潮流均衡度为最小, 即:

$$\min f = \max \{ \bar{D}_1, \bar{D}_2, L, \bar{D}_{N_s} \} \quad (11)$$

式中: N_s 为电网中关键断面的数量; 目标分量 $\bar{D}_m$ 为调度周期内第 m 个关键断面的潮流均衡度的平均值, 即:

$$\bar{D}_m = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D_{m,t} \quad (12)$$

式中: $D_{m,t}$ 为电网中第 m 个关键断面在时段 t 的潮流

均衡度。

下层约束集合包括 TCSC 补偿度范围约束、ESS 充放电功率约束、ESS 充放电等式约束和 ESS 稳定运行约束。

(1) TCSC 补偿度范围约束:

$$\beta_n^{\min} \leq \beta_{n,t} \leq \beta_n^{\max} \quad (13)$$

式中: $\beta_{n,t}$ 为第 n 个 TCSC 在时段 t 的补偿度; $\beta_n^{\max}$ 和 $\beta_n^{\min}$ 分别为第 n 个 TCSC 补偿度范围的上、下限。

(2) ESS 充放电功率约束:

$$-P_{Ec,k}^{\max} \leq P_{Ek,t} \leq P_{Ed,k}^{\max} \quad (14)$$

式中: $P_{Ec,k}^{\max}$ 和 $P_{Ed,k}^{\max}$ 分别为第 k 个 ESS 充、放电的最大功率。

(3) ESS 充放电等式约束:

$$S_{Ek,t} = \begin{cases} S_{E,k,t-1} - \frac{P_{Ek,t} \Delta t}{\eta_{E,d}} & P_{Ek,t} > 0 \\ S_{E,k,t-1} & P_{Ek,t} = 0 \\ S_{E,k,t-1} - \eta_{E,c} P_{Ek,t} \Delta t & P_{Ek,t} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 在时段 t 结束时刻的容量; $\eta_{E,c}$ 和 $\eta_{E,d}$ 分别为 ESS 的充电效率和放电效率, 假定 $\eta_{E,c} = \eta_{E,d} = \sqrt{\eta_E}$, η_E 为 ESS 的综合充放电效率。考虑到充放电功率损耗, 在放电时, ESS 实际放电功率扣除损耗后需满足所需放电功率的要求, 其值为所需放电功率除以放电效率; 在充电时, ESS 实际充电功率为所需充电功率扣除充电损耗后的值, 应为所需充电功率乘以充电效率。

(4) ESS 稳定运行约束:

$$\sum_{t=1}^T \frac{P'_{Ek,t} \Delta t}{3600} = 0 \quad (16)$$

式中: $P'_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 实际充、放电的功率, 当 $P'_{Ek,t} \geq 0$ 时, $P'_{Ek,t} = P_{Ek,t} / \eta_d$, 当 $P'_{Ek,t} < 0$ 时, $P'_{Ek,t} = \eta_c P_{Ek,t}$; $\Delta t / 3600$ 的意义是将时间单位 s 折算为 h。

4 求解方法及流程

多精英保留策略的遗传算法是一种新型的多目标算法, 从出现以来因其简单有效性和比较明显的优越性以及可供下载的免费源码, 得到了大量的引用, 已经成为进化优化领域的基准算法之一。文中提出将多精英保留策略的遗传算法应用于电力系统优化, 并取多个算例进行了测试, 计算结果表明, 多精英保留策略的遗传算法收敛性和鲁棒性好。采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解^[17]。具体求解流程如图 2 所示。

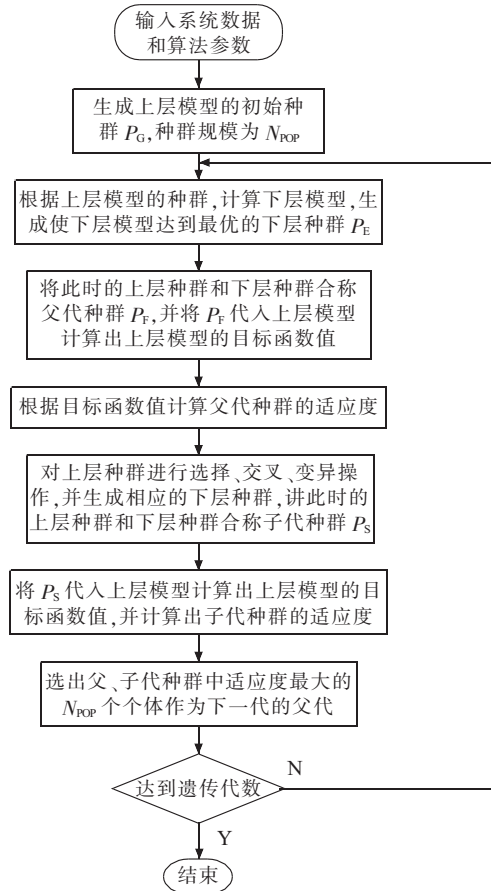


图2 含风电场的双层调度模型的求解流程

5 算例分析

文中以改进的新英格兰 10 机 39 节点测试系统^[18]为例,对文中方法进行仿真验证。节点 31 为平衡节点。分别在节点 32、33 和 35 接入风电场,装机容量都为 5.0 p.u.。10 台常规机组的参数如表 1 所示,爬坡率上限均为 0.6 p.u./h,爬坡率下限均为 -0.6 p.u./h。分别在 3 个风电场中装设相同型号的 ESS,容量为 5.0 p.u.。最大充、放电功率均为 1.5 p.u./h 和 3.0 p.u./h。ESS 的综合充放电效率为 95%。遗传算法参数如下:上、下层模型的群体规模分别为 100 和 50,遗传代数均为 500,交叉概率均为 0.9,变异概率均为 0.1。

表1 常规机组参数

机组	有功上限 /p.u.	有功下限 /p.u.
30	3	0.9
31	5	1.5
32	4	1.2
33	3	0.9
34	6	1.8
35	5	1.5
36	3	0.9
37	5	1.5
38	5	1.5
39	6	1.8

将线路 10-11 和 10-13 构成的断面、线路 19-16 和 19-20 构成的断面、线路 22-21 和 22-23 构成的断面定义为关键断面 S1、S2 和 S3。关键断面内的 TCSC 的补偿度范围均为 -0.2~0.3。

经过遗传迭代计算,上下层模型的目标函数值分别为 0.274 2 和 0.008 3。调度周期内,全网潮流均衡度曲线如图 3 所示,电网的潮流就处于最均衡的状态,处于最安全的状态。关键断面 S1、S2、S3 内线路在调度周期内的负载率分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

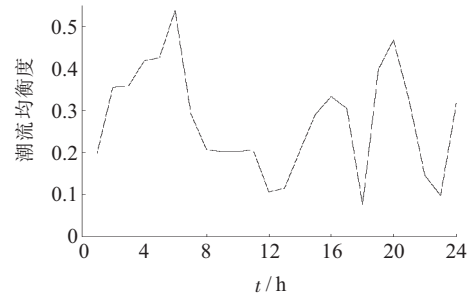


图3 调度周期内全网潮流均衡度曲线

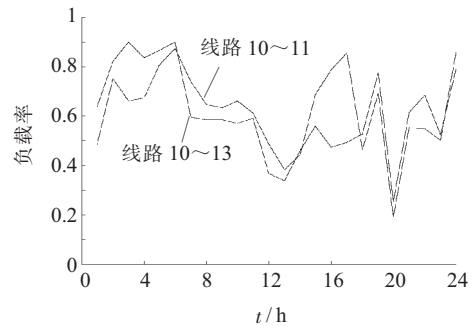


图4 关键断面 S1 内线路在调度周期内的负载率

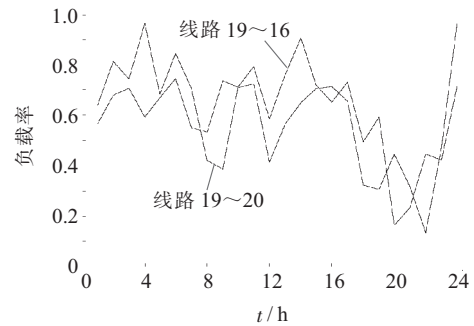


图5 关键断面 S2 内线路在调度周期内的负载率

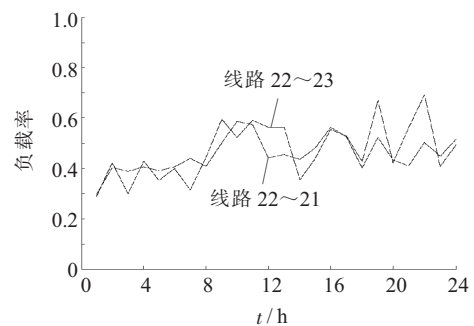


图6 关键断面 S3 内线路在调度周期内的负载率

此时关键断面中的线路在各调度时段的负载率接近,线路容量利用率接近,使关键断面尽可能地处于最安全的状态。可见,通过 TCSC 的协调控制,关键断面的潮流分布的比较均衡。

6 结束语

将 TCSC 考虑到电力系统调度中,建立了基于源网协同的风电并网系统双层优化调度模型。通过常规机组出力、ESS 充放电功率和 TCSC 的协调控制,较好地解决了风电波动带来的潮流扰动问题。并将双层规划理论引入到含风电场的电力系统调度中,从整体和局部两方面保证潮流的均衡性,并采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解。采用含风电场的源网协同双层调度方法,可以增强系统的安全性,优化系统的潮流分布,减小线路的潮流波动,满足了系统运行调度的要求。在文中所构建的模型中加入负荷侧的调控作用,是有待进一步研究的重要问题。

参考文献:

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 秦旭东. 大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 6-12.
- [3] 夏 澍, 周 明, 李庚银. 考虑线路安全校核的含风电电力系统有功和备用协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 18-26.
- [4] 王开艳, 罗先觉, 吴 玲, 等. 清洁能源优先的风—水—火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.
- [5] 周任军, 姚龙华, 童小娇, 等. 采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 56-63.
- [6] 孙元章, 吴 俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
- [7] 陈 宁, 于继来. 基于电气剖分信息的风电系统有功调度与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 51-58.
- [8] 王成山, 于 波, 肖 峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
- [9] 王成山, 于 波, 肖 峻, 等. 平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 12-17.
- [10] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing out Wind Power Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [11] 陈 中, 胡吕龙, 丁 楠. 基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 86-91.
- [12] 孙 欣, 吕跃春, 高 军, 等. 电网经济性与安全性的精益协调方法[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 12-17.
- [13] 张 强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.
- [14] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
- [15] 潘淑杰, 马 平, 蔡兴国, 等. 用于提高输电能力的 TCSC 选址和定容方案[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 65-70.
- [16] 刘宝碇, 赵瑞清, 王 纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 8-10.
- [17] 冯士刚, 艾 芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- [18] PAI M A. Energy Function Analysis for Power System Stability [M]. Kluwer Academic Publishers, 1989.

作者简介:

丁 楠(1990), 男, 江苏射阳人, 硕士研究生, 研究方向为风电并网优化运行技术;
陈 中(1975), 男, 江苏丹阳人, 博士, 研究员, 从事电力系统稳定运行与控制、新能源并网优化运行技术的研究;
胡吕龙(1988), 男, 安徽东至人, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网优化运行技术。

A Bi-level Optimal Dispatching Approach for Grid-connected Wind Power Based On Source-grid Collaboration

DING Nan, CHEN Zhong, HU Lyulong

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: When the penetration of wind power is high, the fluctuations of the output of the wind farm with multipoint accesses becomes disturbance to the power grid. It threatens the safety and stability of the power grid. Aimed at the overall volatility and local surge of power flow, a bi-level optimal dispatching approach for grid-connected wind power based on source-grid collaboration and control of conventional units, ESSs and TCSC is proposed. The objectives of the upper and the lower models are to optimize the overall power flow and the key interfaces' power flow, respectively. The methods for solving the upper and the lower models are both the genetic algorithm with multi-elitist preservation method. The simulations on the IEEE 39 test system including wind farms validate the proposed dispatching method.

Key words: wind farm; fluctuation; power flow homogeneity; source-grid collaboration; bi-level programming; thyristor controlled series compensation

大型地区电网调度控制系统海量历史数据处理技术

彭 晖¹, 赵家庆², 王昌频¹, 丁德鑫¹, 丁宏恩²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 2. 苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要:随着电网规模扩大和集约化运行管理体系的建设,地区电网调度控制系统监控范围急剧增加,传统以商用数据库为基础的历史数据管理技术和早期使用时间序列数据库的历史数据管理技术已不能满足大型地区电网调度运行和各类应用深化拓展的需要。结合商用数据库、文件系统,以时间序列数据库为重要存储手段的海量历史数据处理技术能很好地解决上述问题。文中首先介绍了以时间序列数据库为核心的历史数据管理体系架构,然后阐述了解决大容量、高效率、高可靠问题的关键技术,紧接着介绍了部分依赖历史时序数据的深化应用。该技术已成功应用于苏州电网调度控制系统,它很好地适应了“大运行”的要求,提升了地区电网调度运行水平,为地区智能电网建设提供了有力的技术支持。

关键词:时间序列数据库集群;时序库插件技术;关键字/标签映射;两级缓存;事件驱动多维历史反演;精准断面分析

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)05-0011-04

随着电网规模不断扩展,同时以资源集中管理、统一调控、优化配置、合理布局为核心的运行管理^[1,2]体系建设不断推进,省地间电网调度扁平化管理^[3-6]、地县间调控一体化^[7,8]运行的需求愈发增强,地区电网调度控制系统监控的范围急剧扩大,监控测点快速增加,传统以商用数据库为基础的历史数据管理技术因占用磁盘空间大,历史数据采样密度低(分钟级),越来越不适应大型地区智能电网调度运行、管理的需求,并成为各类应用进一步拓展的数据瓶颈。这就需要电网调度控制系统^[9,10](以下简称调度系统)采用新的历史数据处理技术^[11]。

时间序列数据库(简称时序库)拥有超大规模数据处理能力和高比例压缩能力,支持秒级、毫秒级历史数据存储,可实现海量历史数据^[11,12]高效的压缩存储、查询检索和统计分析。结合商用数据库和文件系统,将时序库应用于大型地区调度系统,既可实现海量历史采样数据细粒度(秒级)的存取管理,又可节省磁盘空间,还可有效服务于各类应用。但是时序库表达复杂关系的能力较弱,对非关键字搜索的效率不高,所以对于占用空间相对较少的告警历史信息保存于商用库中。历史图、模 CASE 这类非结构化数据,文件管理的效率较时序库和商用数据库效率更高。

国内已有中小型地区调度系统使用时序库的先例^[13],它的实现方式能较好地管理 5 万及以下测点规模地调的历史数据,但是其体系架构无法满足苏州等大型地区电网调度系统(苏州 76 万测点)各类应用的需要,不能以插件的方式灵活支持多种类型的时序库;在性能上无法满足大型地区调度以不低于百万级测点为目标的历史数据容量和性能需求;在可靠性上,未考虑冗余备份机制;在使用上,未能将应用和各

类历史数据有机关联,使用不便。国内还有学者研究了利用第三方插件在电厂监控信息系统中使用时序库的方法^[14]、时序库在广域监测系统(WAMS)中的使用^[15]、南方电网时间序列库备份方式^[16],但均未涉及到历史数据内部管理技术和适宜于地区电网调度系统的应用。

为了适应地区电网的快速发展和管理模式的转变,结合以苏州为代表的大型地区调度系统历史数据管理和应用需求,文中提出了以时序库为核心,结合商用数据库和文件的历史数据管理技术,以解决大型地区调度系统历史数据管理面临的容量、效率、可靠性方面的问题,并对依赖历史数据的各类应用提供有效的支撑。

1 以时序库为核心的历史数据管理架构

以时序库为核心的历史数据管理体系采用面向服务的体系架构(如图 1 所示),应用程序通过数据服务层的隔离和数据访问层的封装来实现各类应用对时序数据的访问。这种设计考虑了对主流时序库^[16-18]的支持,规范了应用程序访问时序库的方式,便于对时序库访问进行统一的管理和控制,易于工程安装维护并节省购买时序库客户端的费用。

最下层的数据层是各种时序库及其访问接口,不同的时序库访问方式存在明显的差异。

数据层之上为数据服务层,它首先要封装时序库统一访问接口,以屏蔽数据层各种类型时序库访问方式的差异;其次,由于调度系统和时序库表征量测的方式不同,需要实现调度系统关键字/时序库标签的转换机制来完成采样点在调度系统和时序库之间的映射。文中所述历史数据管理架构下,提供了数据冗余备份机制和为提升容量采用的集群机制,而这 2 套机制都依赖时序库监视服务。在数据服务层的上部是标签定义服务、采样定义服务、时序库提交服务和时序库查询服务。

数据访问层包括定义采样点的工具、标签定义功能

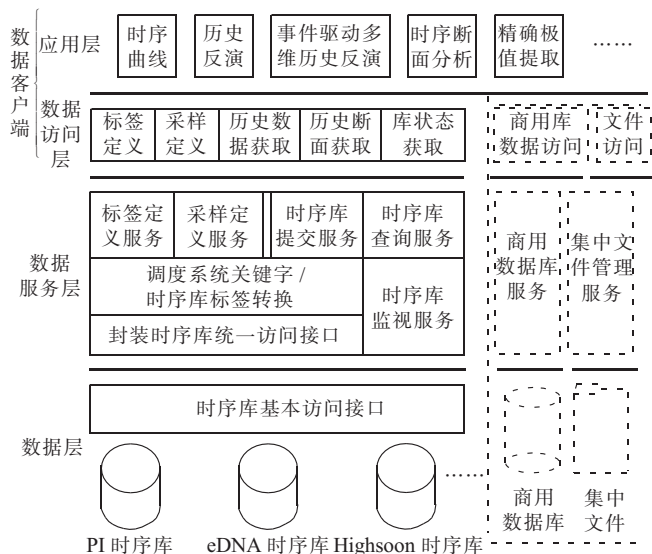


图1 以时序库为核心的历史数据管理架构

和提供给数据客户端访问数据服务端的各类接口。

最上层是应用层,通过底层封装,应用不关心时序库的类型、部署情况,通过数据访问层接口方便地存取历史序列数据和获取历史断面数据。

商用库数据和集中文件数据的访问也采用了同时序库类似的4层结构。

2 大型地调使用时序库存储关键技术

2.1 时序库访问插件技术

传统历史数据管理架构下,支持新的时序库存在复杂的设计、开发、维护工作;已投运系统更换时序库也非常困难。通过时序库访问插件技术可较好地解决上述问题。该技术包含2个关键点:

(1) 时序库统一访问接口。如图1所示,在数据服务层设计了时序库统一访问接口,该接口通过工厂模式以动态库插件方式对上层服务提供一致的访问方式,屏蔽下层时序库的差异。每个插件动态库匹配一种时序库。

(2) 统一的关键字/标签映射技术。调度系统用关键字表征数据点,时序库通过标签号来表征,针对不同时序库特点,需要一种统一的关键字/标签映射技术(如图2所示)。

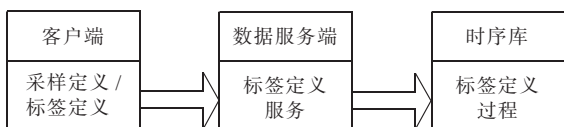


图2 标签定义过程

一些时序库的标签号是调度系统可以直接生成的(如eDNA、Highsoon),对于这种时序库,直接由调度系统按照一定的策略生成不重复的标签号,生成后直接通知时序库的标签定义过程,标签定义过程在时序

库中记录这个已定义的标签号。

而另外一些时序库的标签号是时序库内部生成的,譬如主备2个PI时序库,对应同一个采样点的标签号可能不一样。这就需要先借助数据服务端的标签定义服务产生一个唯一且主备库一致的标签名作为桥梁,实现关键字到标签名的映射,标签定义服务将标签名告诉时序库的标签定义过程,时序库根据标签名产生内部的采样定义点和标签号。

客户端可以通过数据服务端的标签定义服务向时序库的标签定义过程根据标签名取得时序库内的标签号。关键字/标签映射也在插件动态库中。

2.2 时序库集群技术

大型地区电网调度控制系统需要海量测点/计算点采样处理的能力,而单台时序库服务器的处理能力是有限的,这就需要通过时序库集群的方式解决海量数据采样的问题。

如图3所示,海量采样数据可以分为多个采样数据集,每个数据集的采样数据存入对应的时序库,多个时序库无交集地覆盖所有采样点,通过时序库集群形成一个逻辑可扩展的时序库池,满足任意数据规模调度系统的历史数据存储需要。

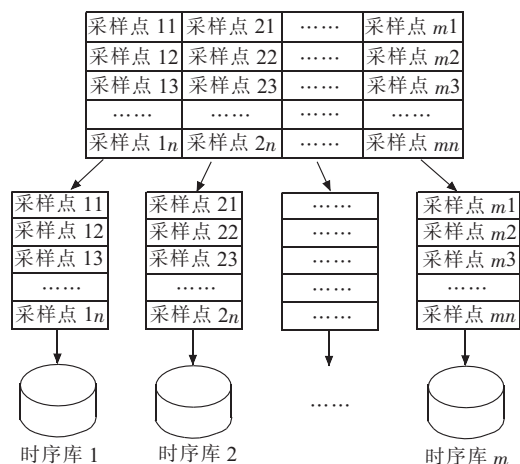


图3 时序库集群

系统可以自动也可手动定义每一个采样点关联到哪一个时序库。但是对于应用程序,完全感知不到系统使用的是一个时序库,还是多个时序库集群。

2.3 数据提交两级缓存技术

文献[10]中时序库历史数据管理采用了基于文件缓存方式,这种方式简单可靠,适合于中小型地区调度系统。但对于大型地区调度系统,这种方式带来的大文件I/O不仅会影响时序库采样的性能,还会对调度系统其他模块带来影响。文中的数据提交服务使用了共享内存队列与文件缓存相结合的两级缓存机制来解决时序库高效提交的问题,同时还可保证异常情况下历史数据保存的可靠性。

如图 4 所示,时序库提交服务包含内存队列缓存和文件缓存两种缓存,围绕这两种缓存有 3 个线程。当外部请求提交的时候,请求处理线程将请求以结构化的方式存入内存队列缓存。正常情况下,时序库提交线程会及时提交内存队列缓存中的请求,并清空内存已提交缓存队列,不会有信息写入文件缓存。但是当出现异常情况时(譬如时序库故障),已用内存队列缓存长度超过阈值后,内存转储线程将把内存队列缓存的信息写入文件缓存;当异常情况处理后,时序库提交线程将优先提交文件缓存的采样数据,然后提交内存队列缓存的数据。

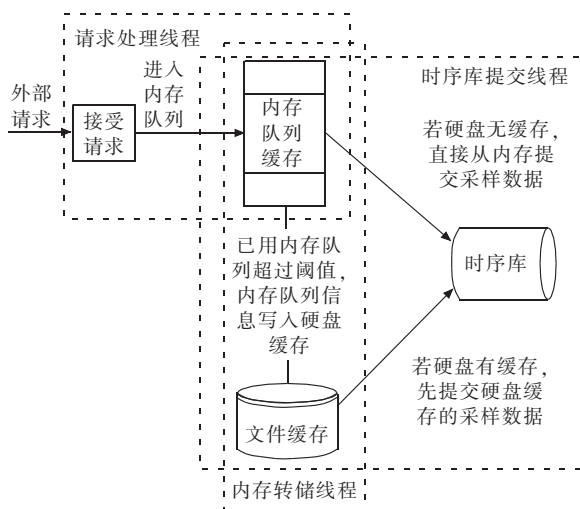


图 4 时序数据提交服务中的两级缓存

2.4 时序库集群动态冗余互备技术

如图 5 所示,在横向上,时序库以 2 个集群的形式出现;在纵向上,2 个时序库集群的对应单库存放内容完全一致,互为备用。

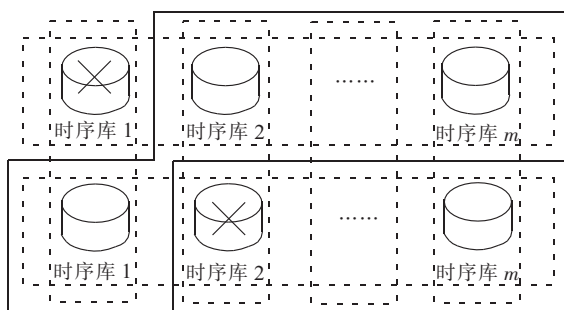


图 5 时序库集群的冗余备份

这种集群的冗余互备是动态的,譬如上面集群的时序库 1 故障,下面集群的时序库 2 故障,系统会将下面的时序库 1 和上面的时序库 2、时序库 3、……、时序库 n 组成一个新的可用时序库集群(图 5 的黑实线框),从而保证了时序库集群最大程度的可用性。

时序库提交服务同时向 2 个时序库集群提交采样数据,当集群中某个时序库节点故障时,时序库提交服务利用 3.3 节所述数据请求两级队列缓存技术缓存历

史数据,待故障时序库恢复后,再补充提交。

时序库动态形成可用时序库集群,应用感知不到时序库集群的单点故障及交叉故障。

3 基于多维历史数据的应用

3.1 事件驱动的多维历史反演

文献[10]的反演功能只能手动设定反演时间,在最近画面、最新模型基础上结合时序采样数据反演事故前后的状态,不能结合事故当时的图、模,不能联动历史告警,使用上有较多不便和诸多限制。

如图 6 所示,文中所述事件驱动历史反演功能中,反演总控制台作为核心驱动部分,它从商用数据库获取各类历史事件,用户可以选择任意一个事件(不局限于事故),反演总控制台自动根据事件所附带的时间信息,根据用户选择获取 CASE 中保存的历史模型、历史图形,并提取对应时间段时序历史数据和历史告警信息,在反演总控制台的指令下协调同步滚动显示。

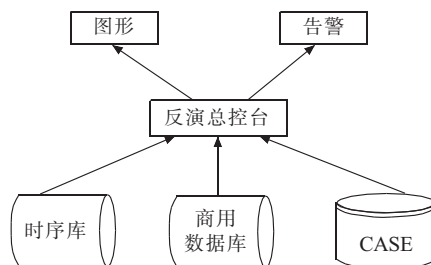


图 6 事件驱动多维历史反演原理

事件驱动的多维历史反演可以反演事件前后任意时长的整个事件经过,它优于传统基于报文回放方式的事故反演。传统事故反演事故前后的反演间隔是固定的,不能任意延长,且反演内容仅仅限于事故,而事件驱动多维历史反演不限定事件启动和终止时间,且可拓展到事故以外的其他事件。

3.2 基于精准时间断面的应用分析

依托时序库的精确历史数据保存,系统可以截取任意时刻的断面数据用于分析计算,突破原有分钟级 CASE 断面局限,并可联动 CASE 保存的历史模型、历史图形(如图 7 所示)。

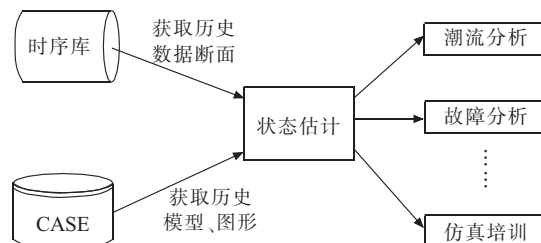


图 7 基于时序库精准断面的应用分析

文中所述系统已实现基于时序库的任意时刻数据断面提取,在提取数据断面基础上可进行状态估计及

后续的潮流分析、故障分析等应用功能。

正是因为有了这种灵活的数据断面获取能力,应用分析的数据来源真实可信。系统方便地获取关键时刻及其前后的断面数据,对各类分析及仿真应用的数据准备有很大的帮助。

3.3 基于时序数据的报表

基于时序数据库的报表相对于基于商用数据库的报表最大的好处在于统计数据的准确性,这种准确性是靠时序库的高密度历史数据采样保证的,这就克服了关系数据库中统计时间间隔过长的缺点。譬如,每年的极值潮流统计,统计所辖电网最大负荷和出现的时间,通过时序库就可以得到精确的结果,而传统的基于商用库的历史管理很难精确捕捉到这一类关键数据和关键时刻。

报表中的统计内容可以包括最大值、最小值、平均值、负荷率、最大值时间和最小值时间等。

4 现场应用

早期的历史数据处理技术无法满足苏州历史数据规模、历史数据提交效率和可靠性的要求,研发团队针对这些问题研发了时序库集群、数据提交两级缓存、时序库集群动态冗余互备技术,解决了系统投运初期的性能瓶颈和可靠性问题。

结合用户专家提出的生产实际需求,研发团队研发和部署了事件驱动多维历史反演、基于精准断面的应用分析、基于时序数据报表的功能。这些都成为日常运行、维护的有效分析工具。

时序库厂家就库在多个存储的部署、参数调优等方面工作开展了工作,并取得明显效果。

以时序库为核心,商用数据库、文件系统辅助支撑的历史数据管理技术已在全国最大地调苏州调度系统得到应用。该技术的使用很好地解决了苏州调度系统历史数据容量、效率、可靠性方面的问题,实现了历史数据采样密度从分钟级到秒级的跨越。新的历史数据管理机制还有力地促进了苏州地区电网调度各类应用的深化和拓展。

5 结束语

大型地区电网调度控制系统历史数据处理技术解决了集约化、扁平化运行管理体系下,省地协作、地县一体化运行带来的海量历史数据管理问题,为各类应用深化拓展提供精准的历史序列数据、历史断面数据,便于深入观察和分析电网细分阶段特性。该技术能有效促进地区电网调度自动化水平的提升,为地区智能电网建设提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 余立军. 从企业价值链看电网企业“三集五大”集约化管理[J]. 能源经济技术, 2011, 23(5): 57-61.
- [2] 宋晓辉, 盛万兴, 史常凯, 等. 模式化电网规划设计方法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 123-128.
- [3] 赵家庆, 季 侃, 孙大雁, 等. 电网调度省地一体化试点工程关键技术方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 120-125.
- [4] 王 彬, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 双向互动的省地协调电压控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 53-57.
- [5] 孙大雁, 丁 杰, 彭 林, 等. 面向多级调度管理的云搜索体系架构研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 5-7.
- [6] 蒋 宇, 张 勇, 胡鹤轩. 500 kV 主网电压集中控制模式下的调压方法[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 17-19.
- [7] 彭 晖, 任 远, 宋 鑫, 等. 基于双核架构的分布式地县配一体化技术支持系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 100-103.
- [8] 缪建国, 李云鹏, 徐春雷, 等. 地县一体化调度自动化系统在南通电网的应用[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(5): 57-63.
- [9] 国家电力调度通信中心. 智能电网调度技术支持系统建设框架[R]. 2009.
- [10] 刘振亚. 智能电网知识读本[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010, 128.
- [11] 姚建国, 严 胜, 杨胜春, 等. 中国特色智能调度的实践与展望[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 16-20.
- [12] 汪际峰, 沈国荣. 大电网调度智能化的若干关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 10-16.
- [13] 黄军高, 王首顶, 凌 强, 等. 时间序列数据库在地区电网调控一体化系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 107-111.
- [14] 陈 兵, 李俊娥, 聂剑平, 等. 电厂实时监控信息系统的设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 81-83.
- [15] 戴则梅, 葛云鹏, 张珂珩, 等. 电网广域监测系统的数据库集成方案[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 1-4.
- [16] 余 静, 麦绍辉, 刘立东. 电力系统 EMS 数据备份方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 101-104.
- [17] 淡海英. 关于 eDNA 实时数据库架构的一点理解[J]. 陕西国防工业职业技术学院学报, 2012, 22(4): 10-12.
- [18] 王 伟, 杨 勇, 应芳义. 基于海迅数据库的应用开发方法的研究[J]. 电力信息化, 2013, 11(2): 11-14.

作者简介:

- 彭 晖(1974), 男, 重庆人, 高级工程师, 从事智能电网调度自动化软件平台的设计与研发工作;
- 赵家庆(1963), 男, 江苏苏州人, 高级工程师, 从事电力系统自动化的系统设计、建设运行和技术管理工作;
- 王昌频(1985), 女, 安徽天长人, 工程师, 从事时间序列数据库、模型管理方面的研发工作;
- 丁德鑫(1984), 男, 江苏南通人, 工程师, 从事 SCADA 应用、告警服务方面的研发工作;
- 丁宏恩(1982), 男, 河南商丘人, 工程师, 从事电力系统调度自动化的系统设计与运行维护工作。

(下转第 17 页)

一起 35 kV 电容式电压互感器缺陷的分析及处理

季 烨

(盐城供电公司, 江苏 盐城 224002)

摘 要:介绍了一起 35 kV 电容式电压互感器(CVT)在停电例行试验中诊断出的分压电容器击穿短路的案例,根据 CVT 测量原理,作出对缺陷现象的判断以及处理情况分析,并采用其他方法加以验证,提出相关防范措施,避免此类设备缺陷引发事故。

关键词:电容式电压互感器;诊断;击穿;防范措施

中图分类号:TM451+.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0015-03

电容式电压互感器(CVT)相比传统的串级式电磁型电压互感器,具有体积小、重量轻、绝缘强度高、造价低、介损小、可以兼作载波通信或线路高频保护的耦合电容等特点^[1],目前广泛应用于电力系统中的电压、功率测量、继电保护和载波通信。文献[2-5]均是根据某一具体的 CVT 事故,通过试验或解体等方法分析故障原因,较少对试验方法本身的准确性和适用性提出质疑并加以验证。由于每次被试设备电压等级、环境条件等各异的,每个事故都有其自身的特点和差异性。针对例行试验中的一起故障,在固有的试验方法上,提出用反接法测量 CVT 的总电容量的方法,并与自激法的试验结果比较,从而验证方法的准确性,为故障的处理决策提供可靠的依据。

1 CVT 的结构原理

文中 35 kV CVT 的型号为 WVP35-10HF, 结构原理如图 1 所示。

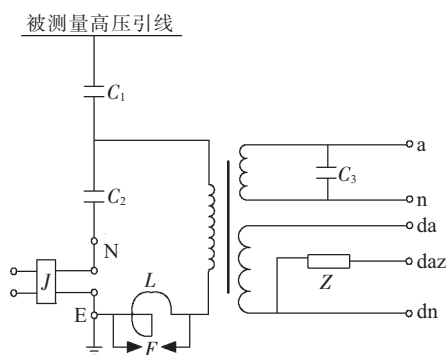


图 1 35 kV CVT 的结构原理

CVT 主要由电容分压器、电磁单元和接线端子盒组成,在结构上是电容分压器加电磁式电压互感器组合而成。电容分压器的中压端子和接地端子穿过密封的油箱盖引入到油箱中分别与电磁单元的高压端子和二次接线板的接地端子相连。载波装置、保护球极(N-E 间)置于二次接线盒内,当 CVT 作载波通信

使用时,需将 N-E 间连接片断开;否则需将 N-E 用连接片短接。电磁单元的油箱内装有中间变压器和补偿电抗器、阻尼器、保护补偿电抗器的低压避雷器,并充有变压器油。中间变压器高压绕组与补偿电抗器串联,电磁单元的二次绕组端子及接地端子均由二次接线盒引出。CVT 采用电容分压原理,由主电容 C_1 和分压电容 C_2 串联构成电容分压器,把一次侧的高电压降为中压,经分压抽头引入电磁单元。

2 故障情况

35 kV 盐东变一次主接线如图 2 所示。2013 年 10 月 16 日,对 35 kV 盐东变电站进行 35 kV 部分集中检修,35 kV 间隔及主变全部停电,10 kV 盐李 131 线路和附近的 35 kV 李灶变的 10 kV 李东 139 线路形成“手拉手”,由李东 139 线路反供盐东变的 10 kV 母线,故盐东变 10 kV 部分全部带电。盐东变 35 kV 盐东 334 线路压变例行试验为工作内容之一,该压变(2005 年生产出厂)接于盐东 334 线路 A 相上。

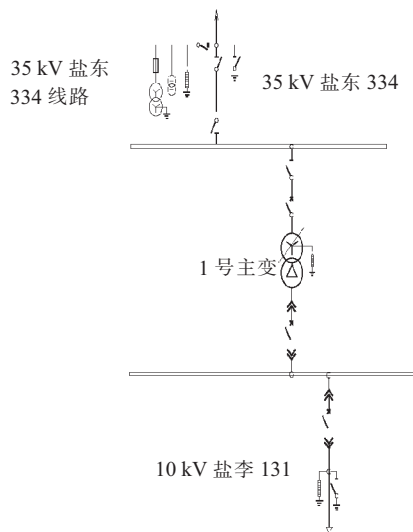


图 2 35 kV 盐东变电站一次主接线

在对其进行例行试验时,按照标准化作业指导书要求,采用 Megger 电压等级为 2500 V 的绝缘电阻测试仪

测量主电容和分压电容的极间绝缘电阻;采用济南泛华AI-6000型电桥,利用自激法测量 C_1 、 C_2 和介质损耗,试验电压设为2 kV。试验结果如表1所示。

表1 盐东334线路压变A相试验结果

项目	2007数据		本次数据	
	主电容	分压电容	主电容	分压电容
额定电容量/pF	11 080	26 185	11 080	26 185
极间绝缘/MΩ	75 000	85 000	65 000	0.0 133
实测电容量/pF	11 006	26 194	11 000	66 620
介质损耗 tgδ/%	0.017	0.031	-0.094	未测得 试验数据

从表1可以看出:(1)盐东334线路压变A相主电容 C_1 的试验数据正常,绝缘电阻和电容量较2007年试验数据无明显变化。(2)盐东334线路压变A相分压电容 C_2 的绝缘电阻仅有13.3 kΩ,远远小于江苏省电力公司《输变电设备交接和状态检修试验规程》对CVT分压电容器绝缘电阻的规定值(极间绝缘电阻 ≥ 5000 MΩ);电容量试验数据变化很大,远远超过上述规程对CVT分压电容器介质损耗试验的规定值(电容量初值差 $\leq 2\%$);主电容介质损耗为负,分压电容测不出数据,起初怀疑测量回路中存在外界干扰因素^[7],但经过多次试验并尽可能排除外界干扰后,试验结果变化不大。

测量盐东334线路压变A相主电容和分压电容的电容量和介质损耗时,试验电压只能升到0.4 kV,并未达到设定的2 kV。

分析此次例行试验中绝缘电阻试验可以正常进行,介质损耗试验未能得出有效数据,初步分析是盐东334线路压变A相测量回路中有短路现象^[3]或互感器中间变压器的励磁回路存在问题^[4]。CVT一般情况下均为叠装式结构,无中压引出端子,因此在测量过程中很难将电磁单元和电容分压器分开测量。主电容的绝缘电阻和电容量均合格,而分压电容的绝缘电阻和电容量均不合格。因测量回路中的干扰因素,试验电压无法升到设定值,因此无法得到主电容和分压电容介质损耗的有效结果。初步判断是分压电容击穿短路所致。

3 结果分析

为了验证判断,采用反接法对该压变整体电容进行测量,试验接线如图3所示,高压端加压,中间变压器末端悬空,二次绕组短路接地,将其试验结果与自激法测量的数据进行比较,从而验证上述自激法测量的 C_1 、 C_2 结果是否准确。

反接法测出主电容和分压电容串联的总电容 $C_{\text{反串}}$ 为9421 pF。自激法测量中,两者串联的总电容 $C_{\text{自串}}$ 为:

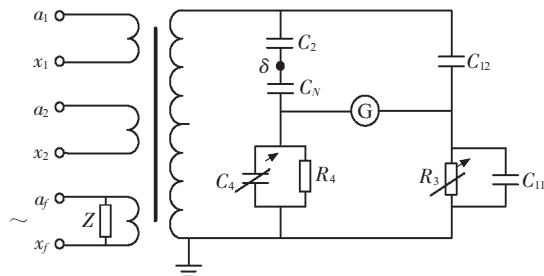


图3 反接法测量整体电容量和介质损耗的原理

$$C_{\text{自串}} = C_1 \times C_2 / (C_1 + C_2) \quad (1)$$

计算得 $C_{\text{自串}}$ 为9441 pF。反接法测出的整体电容量和自激法测出的电容量非常接近,误差仅为0.21%,由此可以确定自激法测量的 C_1 、 C_2 无误,从而验证了分压电容击穿短的推断。

随后又对该CVT二次线圈的绝缘电阻和直流电阻进行了测量,与2007年试验数据相比均无明显变化,进而确定中间变压器并无故障。

综合以上试验结果可以判断:盐东334线路压变A相的分压电容器已击穿短路,但事后与调度部门沟通,该压变在当天凌晨6点(停电前)采集信号时信号传输仍然正常。综合现场情况分析可能是由于该压变在停电过程中,盐东334线路对侧的110 kV黄尖变的盐东334出线断路器分开时,开关三相不同期引起的操作过电压或者CVT中间变压器的电感能量释放引起的内部过电压将分压电容器击穿。

对该压变进行更换处理,并进行返厂解体检查,证实了故障CVT的分压电容的确已击穿短路。

4 措施和建议

对运行设备进行停电例行试验发现设备存在如此重大缺陷的案例不多,因此对该案例应足够重视。针对CVT的运行和检修工作提出以下防范措施和建议:

(1) 应结合设备检修周期对公司管辖范围内该厂家的CVT和同型号的电压互感器进行一次专项排查,杜绝隐患,预防在先。

(2) 加强CVT的运行维护工作,重视红外测温的开展和对CVT二次输出电压参数的监测,如发现运行中的CVT发热或输出电压异常等现象,应及时汇报并采取措施。

(3) 有条件可以安装CVT在线监测装置,实时监测其运行状况,及时发现设备异常。

(4) 每次例行试验时都要认真准确得出试验数据,并与历史数据进行比对。出现异常结果应通过多种方法排除干扰,查明原因。如怀疑设备确实存在缺陷,应立即退出运行,尽快检查处理。

(5) 采购设备时建议设备厂家改进制造工艺,加

强密封性能,严格出厂试验,确保电容分压器和电磁单元的绝缘强度,杜绝此类故障的发生。

5 结束语

针对一起 35 kV CVT 在停电例行试验中诊断出的分压电容器击穿短路的案例分析,从试验数据中发现问题,提出对于故障原因的猜想,然后加以验证,最终得出结论。分压电容器中出现电容器击穿短路是导致介质损耗试验结果异常甚至得不出结果的主要原因。在今后的试验中,当发现无法得出试验数据或试验数据超标时,应在排除外界电磁场干扰、接触不良等原因后,再进一步分析判断,防止引起误判断。确定试验结果异常后,应质疑测量回路中的元件是否已经损坏,并通过相应方法加以验证。

参考文献:

- [1] 刘宝贵. 发电厂变电所电气设备第一版[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008: 59-60.
- [2] 李 辉, 姚龙泉. 电容式电压互感器负介损现象分析与解决措施[J]. 四川电力技术. 2010, 33(3): 84-86.
- [3] 张春燕. 几起电容式电压互感器故障分析[J]. 江苏电机工程. 2012, 31(3): 15-16.
- [4] 刘 滔. 电容式电压互感器分压电容介损现场测试时应注意的一个问题[J]. 电力电容器. 2002 (3): 34-35.
- [5] 陈明光, 包玉树, 张兴沛. 一起电容式电压互感器电磁单元故障分析[J]. 江苏电机工程. 2012, 31(5): 15-16.

作者简介:

季 烨(1988), 男, 江苏盐城人, 助理工程师, 从事电力设备电气试验工作。

An Accident of Voltage-Dividing Capacitor Breakdown of 35 kV Capacitive Voltage Transformer

Ji Ye

(Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224002, China)

Abstract: This paper introduces an accident of voltage-dividing capacitor breakdown in a routine test of 35 kV Capacitive Voltage Transformer (CVT). According to the principle of CVT's measurement, the causes of the fault are analyzed. Some other approaches are adopted to verify our analysis. Preventive measures for similar accidents are provided.

Key words: capacitive voltage transformer (CVT); breakdown; preventive measures

(上接第 14 页)

Massive Historical Data Management Technology for Large-scale Regional Power Grid Dispatching Supporting System

PENG Hui¹, ZHAO Jiaqing², WANG Changpin¹, DING Dexin¹, DING Hongen²

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;

2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: Along with the trends of expansion and intensiveness of operation management system of electric power grid, the monitoring scope of regional power grid dispatching supporting system expanded. The historical data management technology only based on traditional RDB or time series database (TSDB) can't meet operational demand of large-scale regional power grid. The newly developed massive historical data management technology based on TSDB combining with RDB and file system can solve these problems. The paper first introduced the architecture of the management system, then described the key technologies for high-capacity, high-efficiency and high-reliability problems, which is followed by an introduction of intensive application of the technology. The technology has been applied in Suzhou, the biggest city electric grid dispatching supporting system in China. It raised the dispatching level and provided strong technological supports to smart electric grid construction.

Key words: cluster of time series databases; TSDB plug-in technology; mapping between keywords and labels; dual cache; multi-dimensions history review driven by history events; PAS based on accurate data profile

下 期 要 目

- 江苏电网 1000 MW 超超临界机组可靠性分析
- 智能电能表小电量走字原因分析及抑制方法
- 高频电源在 1000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析
- 大数据可视化技术在电网企业的应用
- 500 kV 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析

10 kV 开关手车控制回路断线原因分析及处理方法

陆 琳

(镇江供电公司, 江苏 镇江 212000)

摘 要: 开关控制回路完好与否, 直接影响操作和保护命令能否正确执行。一旦控制回路出现断线等异常, 会造成线路故障时无法跳闸, 危及电网安全。通过对 10 kV 开关手车控制回路以及开关机构回路的分析, 总结了控制回路断线的原因, 从运行人员的层面提出了检查和判断控制回路断线的方法, 通过现场实例分析了某 110 kV 变电站 10 kV 电容器开关发生控制回路断线的原因, 并提出了处理方法, 为解决类似问题提供参考。

关键词: 开关手车; 控制回路断线; 监视回路; 接点; 行程开关

中图分类号: TM561

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0018-03

近年来, 具有弹簧储能机构的 10 kV 开关手车已越来越广泛应用于配电网中。由于 10 kV 配网线路受到自然或人为等外界因素的影响较大, 开关动作次数较为频繁。特别是无功优化 VQC 装置在系统中调节电压能力的凸显, 10 kV 电容器开关动作次数明显升高。伴随着开关频繁动作, 控制回路中器件故障的概率也有所增加。开关控制回路完好与否, 直接影响操作和保护命令能否正确执行。一旦控制回路出现断线等异常, 必须尽快进行处理, 否则轻则影响手动合闸, 重则在故障时无法跳闸, 危及电网安全^[1,2]。文中以及开关机构回路的分析, 总结了 10 kV 开关手车控制回路断线的原因, 并通过现场实例, 分析了某 110 kV 变电站 10 kV I 段电容器 150 开关发生控制回路断线的原因, 并提出了处理方法。

1 10 kV 开关手车控制回路基本原理

对于 10 kV 的线路保护, 大部分厂家都将微机保护和操作箱整合为 1 台装置。操作箱主要由分合闸回路(包括手动和遥控分合闸)、防跳回路、分合闸监视回路以及断路器操作闭锁回路构成^[3-5]。其操作回路如图 1 所示。

1.1 10 kV 开关手车分合闸回路

断路器合闸回路分为就地手动合闸和远方遥控合闸。以就地手动合闸为例, 合闸前断路器辅助接点 DL 闭合。将转换开关(XK)切至就地位置, 1KSH 的①②接通。按下开关合闸按钮, 则 1KK 的③④接通。端子 1Q2D16 与正电源联通。电路(+)-1Q2D16-HZJ-P-22-1Q2D26-(-)接通, 合闸中间继电器 HZJ 励磁, HZJ 的常开接点闭合, 合闸回路(+)-P4-1-HZJ-TBJV-HBJ-DL-HQ-(-)接通。此时 HBJ 线圈励磁, HBJ 的接点接通, HBJ 继电器自保持, 回路(+)-HBJ 常开接点-TBJV-HBJ 线圈-

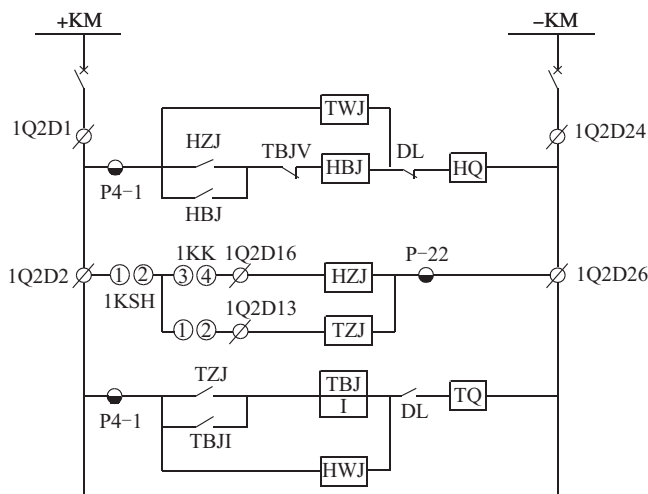


图 1 NSR610R 操作回路接线

DL-HQ-(-)接通, 该回路在断路器完成合闸前自保持。断路器合上后, 合闸回路中 DL 的辅助接点打开, 切断合闸回路, 避免合闸线圈因长时间带电而烧毁。

同样, 断路器分闸回路分为就地手动分闸和远方遥控分闸以及保护分闸。以就地手动分闸为例, 分闸前断路器辅助接点 DL 闭合。将转换开关(XK)切至就地位置, 1KSH①②接通。按下开关分闸按钮, 则 1KK 的①②接通。端子 1Q2D13 与正电源联通。电路(+)-1Q2D13-TZJ-P-22-1Q2D26-(-)接通, 跳闸中间继电器 TZJ 励磁, TZJ 的常开接点闭合, 分闸回路(+)-P4-1-TZJ-TBJ 电流线圈-DL-TQ-(-)接通。此时 TBJ 线圈励磁, TBJ 的接点接通, TBJ 继电器自保持, 回路(+)-TBJ 常开接点-TBJ 线圈-DL-TQ-(-)接通, 该回路在断路器完成分闸前自保持。当断路器分开后, 分闸回路中 DL 的辅助接点打开, 从而切断分闸回路。

1.2 10 kV 开关手车分合闸监视回路

为了保证开关手车能够正常进行分合闸, 确保操作的正常进行以及在线路发生故障时及时切除故障线路,

需要对开关分合闸回路进行监视。监视回路是通过 HWJ 和 TWJ 的常闭接点串联来实现的,如图 2 所示。

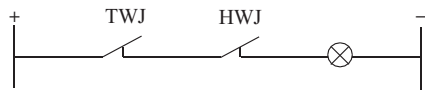


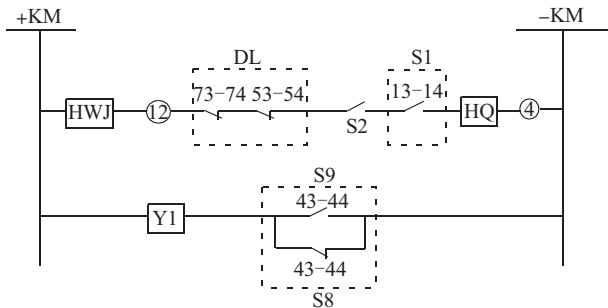
图 2 控制回路断线信号回路

HWJ 接于跳闸回路,用来监视分闸回路的完好性。当开关合闸后,分闸回路中开关的辅助接点 DL 闭合,(+)—P4-1—HWJ—DL—TQ—(-)接通,HWJ 励磁从而使 HWJ 的常闭接点打开;同样当开关跳闸后,合闸回路中开关的常闭辅助接点闭合,(+)—P4-1—TWJ—DL—HQ—(-)接通,TWJ 励磁从而使 TWJ 的常闭接点打开。HWJ 与 TWJ 的正常只有一组励磁,若两者都不励磁,则表示控制回路出现了故障^[6]。

1 个继电器提供的接点有限,而在控制回路中要使用多个 TWJ 和 HWJ 的接点,所以采用了多个 TWJ 和 HWJ。

2 10 kV 开关手车控制回路断线原因分析

控制回路断线究其根本原因是由于 TWJ 和 HWJ 同时失磁,从而接通控回断线信号回路。无论开关在合闸状态还是在分闸状态,正常情况下 TWJ 和 HWJ 必有一个励磁,断开控回断线信号回路。以帕威尔的 VEP 系列开关为例,如图 3 所示。断路器处于分闸状态,机构未储能,手车处于工作位置。此时断路器主轴的辅助开关 DL 的常闭辅助接点 53-54、73-74 均闭合,合闸监视回路为 (+)—TWJ—12—S3 (73-74, 53-54)—S2—S1 (13-14)—HQ—4—(-)。回路中的器件或者接点只要有一个发生故障,整个合闸回路就会断开并且报控制回路断线信号。



⑫、④为航空插头端子;DL 为开关辅助接点;Y1 为合闸闭锁电磁铁;S2 为合闸闭锁接点;S1 为开关储能接点;S8、S9 为手车位置辅助接点;HQ 为合闸线圈

图 3 VEP 手车式真空断路器电气接线(直流)

(1) 控制电源失去。当电源空开断开或者电源空开损坏时,整个控制回路失电,必然造成开关不能分合,报控制回路断线。

(2) 分合闸线圈烧毁。当分合闸线圈烧毁(图 3 中的合闸线圈 HQ),控制回路断开,开关不能合闸。

(3) 开关分合闸辅助接点转换不到位(图 3 中的 DL(73-74)或 DL(53-54)断开)。

(4) 行程开关不切换或切换不到位。手车开关底盘有一个行程开关,行程开关的接点串联在合闸回路中,无论手车在试验位置还是在工作位置,都对应一副接点闭合,另一副接点打开(图 3 中手车在工作位置,S9 的 43-44 接点闭合,S8 的 43-44 接点打开)。当手车在工作位置与试验位置中间时,两副接点都打开,从而断开合闸回路(图 3 中,手车在中间位置时,S8、S9 的 43-44 接点都打开,Y1 失磁,Y1 的常开接点 S2 打开,断开合闸回路)。目的是防止手车开关在摇至中间位置过程中开关被误合上,造成带负荷拉合闸。

(5) 弹簧未储能或弹簧储能接点损坏。为防止在弹簧未储能情况下合断路器,造成合闸线圈过热甚至烧毁,在二次回路中一般将弹簧储能继电器的常开接点串联在合闸控制回路中,在弹簧未储能情况下会发控制回路断线信号,同时弹簧未储能灯亮。若储能弹簧弹性下降或者弹簧储能辅助接点发生问题,则合闸回路断开,发控制回路断线信号。

(6) 控制回路中端子接线松动或者二次连线断线。其原因与设备出厂接线是否安全牢固、现场施工人员的责任心有很大的关联。因此,必须加强设备验收和员工责任心的教育。

(7) 手车航空插头松动。由于 VQC 对系统电压的实时调整,电容器等开关动作次数明显增多。开关频繁分合所产生的振动对航空插头的牢固接触造成了影响,若厂家工艺水平一般,则有可能产生因航空插头松动造成的控制回路断线。

将引起控制回路断线的问题汇总,如表 1 所示。

表 1 控制回路断线问题汇总表

序号	电源	回路部件	手车位置	回路断线或接触不良
1	控制电源空气开关跳开	分合闸线圈烧坏	行程开关不切换	控制回路端子接线松动
2	控制电源空气开关损坏	开关分合闸辅助接点转换不到位	行程开关切换不到位	控制回路二次线断线
3		开关弹簧未储能	小车本体不到位	手车航空插头未插好
4		开关弹簧储能辅助接点损坏		

3 10 kV 开关手车控制回路断线处理方法

实际运行中,手车开关由于二次线断线以及端子接线松动等情况造成控回断线的情况可能性比较低,更多时候问题出现在回路部件损坏或者小车位置不到位等情况下。而电源问题和弹簧储能问题可以通过其他信号间接判断。

根据以上对手车控制回路断线的分析,结合笔者现场工作实践,从运维人员层面列出了判断和解决 10 kV 开关手车控回断线的方法如下:

(1) 检查控制电源空开是否跳闸,若空开没有跳闸,可以用万用表测量空开下桩头是否有正常电压。如果电压正常,则判断电源没有问题;

(2) 检查航空插头是否牢固;

(3) 通过开关柜面板上的工作位置、试验位置指示灯判断手车开关是否到位,若手车确已到位,可通过万用表测量 S8、S9 接点是否导通;

(4) 通过检查分合闸线圈是否有烧焦气味,判断分合闸线圈是否烧坏;

(5) 用万用表测量 DL 常开、常闭接点两端电压,判断开关分、合闸辅助接点是否损坏,转换是否到位;

(6) 观察手车开关弹簧储能灯是否亮,判断开关是否已经储能,否则手动储能再检查,并用万用表在储能辅助接点测量判断是否接通;

(7) 通知检修班组,检查开关二次端子接线是否松动,用万用表按照图纸逐步测量开关控制回路,判断是否存在断线情况。

4 实例分析

镇江供电公司某 110 kV 变电站 10 kV I 段电容器 150 开关报控制回路断线信号,开关合不上。现场查看发现,150 开关在远方热备用,检查保护装置信息,装置显示控制回路断线,尝试手动复归信号,信号不能复归。将 150 开关由热备用转为冷备用,对开关手车进行详细检查。先检查 150 开关控制电源,发现空开未跳开,用万用表测量控制电源空开上下桩头电压均正常,排除了控制电源故障的可能。断开控制电源,将航空插头重新牢固插在卡槽里,合上空开,控制回路断线依然存在。初步判断故障可能存在于控制回路部件中。

随后检查对开关电气接线检查。测量断路器常闭辅助接点为接通状态,排除了断路器辅助接点接触不良引起的控制回路断线。测量分合闸线圈无异常,排除

了分合闸线圈烧毁引起的控制回路断线。测量弹簧储能接点导通,排除了弹簧储能接点损坏引起的控制回路断线。通过排除法判断问题可能出在手车底部的行程开关。

将手车拉至检修位置,拆开底部挡板,发现丝杠尾部档块与杠杆机构连接处由于松动,造成了传动发生变化,导致行程开关接点通断的灵敏度下降,在手车摇至工作位置或试验位置时,对应接点状态不能变化,造成合闸回路断开。经过处理,150 手车恢复运行。

5 结束语

运行人员应对控制回路断线信号进行重点关注,对于造成控回断线的原因也应深入分析,对可能发生的潜在问题加以预判。平时制定防范措施,加强事故预想,以便在问题出现时能快速查找原因并解决。通过对 10 kV 开关手车控制回路断线故障的排查,有效解决了断路器由于控制回路断线导致的操作机构不能正常分合闸的故障,从而确保了断路器运行操作的正确性和稳定性。并以 VEP 手车式真空断路器为例,结合现场实际,解决了由于手车行程开关问题导致的控制回路断线故障。

参考文献:

- [1] 崔勇,王川,杨锦红,等. 高压断路器控制回路隐性故障检修方法[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 96-99.
- [2] 丁明安,熊道兵,刘震. 一例断路器控制回路的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 151-156.
- [3] 刘利华. 国家电网公司生产技能人员职业能力培训通用教材二次回路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 60-74.
- [4] 蔡勇斌. 断路器控制回路故障分析与处理[J]. 电工技术, 2011 (9): 52-55.
- [5] 马振良,吕惠成,焦日升. 10~500 kV 变电站事故预想与事故处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 32-39.
- [6] 尹项根,等. 电力系统继电保护[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 15-25.

作者简介:

陆琳(1984),男,江苏镇江人,硕士,从事变电运行管理工作。

An Accident Analysis of 10 kV Handcart Switch Cabinet Control Circuit Break

LU Lin

(Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: The control circuit of switch in cabinet directly affects the operation and the executing of relay protection. Abnormal control circuit would lead to tripping failure, which endangers power grid's security. In this paper, the control circuit of 10 kV handcart switch cabinet and the switching mechanism circuit are analyzed. Also, the reasons of control circuit breaking are summarized, and the methods for inspecting faults in control circuit are proposed. A detailed analysis of the causes and the treatment methods of 10 kV capacitor switch control circuit break in a 110 kV substations are provided by using a practical example. This analysis provides a reference for future similar problems.

Key words: handcart switch; control circuit break; monitoring circuit; contact; overtravel-limit switch

基于D-S证据理论的母线负荷预测

刘亚南¹, 卫志农², 季聪¹, 唐一铭¹, 都晨¹

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏南京 211102;

2.河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏南京 210098)

摘要:基于D-S证据理论,提出一种母线负荷预测新方法。该方法对BP神经网络、改进的BP神经网络和支持向量机(SVM)的母线负荷预测模型分别建立权重提取和权重融合模型,并运用D-S证据理论对3种预测模型的权重进行融合。通过对预测数据进行分析,提取证据理论样本,并将可信度函数的融合结果作为母线负荷预测模型的权重,最终得到待预测日的母线负荷预测结果。仿真结果表明,与单一的母线负荷预测模型相比,经D-S证据理论融合的母线负荷预测模型更有效,也具有更高的预测精度。

关键词:BP神经网络;支持向量机网络;D-S证据理论;母线负荷预测

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)05-0021-04

随着现代计算机科学、自动化、通信技术的高速发展,变电站的调度自动化系统日趋完善。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、安全稳定分析等方面具有十分重要的理论和现实意义。

母线负荷^[1]可以定义为由变电站的主变压器供给一个相对较小的供电区域的负荷总和,通常一个地区的母线负荷类型比较单一。它包括有功和无功负荷,通常所指的母线负荷一般是有功负荷,同时具有稳定性不强、有坏数据、母线间的差异较大等特点。Kassaei^[2]等人提出一种基于模糊和神经网络的混合模型对母线进行预测,即在负荷受天气影响较大的地区,将母线负荷分解为与天气无关的基本负荷和受天气变化影响的天气敏感负荷2个负荷分量。用BP神经网络模型预测相对稳定的基本负荷分量,而用3个模糊逻辑子系统建立的模型预测天气敏感负荷分量,提高了预测精度。文献[3]先采用K均值聚类方法对电网中众多母线进行特性聚类,形成几大类聚类中心,然后采用多层神经网络方法进行母线负荷预测。文献[4]先采用最小二乘支持向量机进行短期母线负荷预测,然后由历史预测误差组成误差序列,将历史预测误差看作一个马尔可夫过程的时间序列,采用马尔可夫链方法对未来的预测误差进行估计,并采用预测误差估计结果对上一步的预测结果进行修正,预测精度得到显著提高。文献[5]将支持向量机与相关向量机在负荷预测中进行比较,仿真结果表明相关向量机不仅提高了预测精度,并且在稀疏性与计算时间等方面的表现更加优异。文献[6]提出基于粒子群算法(PSO)优化的BP神经网络母线负荷预测,通过PSO优化BP权值和阈值,提高预测精度,改善母线负荷

预测的泛化性。文献[7]采用神经网络进行短期负荷预测,同时将证据理论应用于负荷预测模型的融合,提取了多种预测模型的优点,从整体上提高了预测精度,但是它对权值的计算比较复杂,采用绝对误差也不能够充分反映预测数据的准确性。文献[8]采用3种BP网络进行负荷预测,通过Dempster合成法则进行融合得到最终结果,但是BP网络也具有一定的缺陷。

鉴于上述分析,文中将根据母线负荷数据的构成和特点,提出基于证据理论的母线负荷预测模型,分别对BP神经网络、改进的BP神经网络和支持向量机母线负荷预测模型建立权重提取和权重融合模型,并运用证据理论对3种预测模型的权重进行融合,最终对母线负荷进行预测。

1 证据理论相关概念

1.1 基本定义

定义1^[9]设 Θ 为识别框架,基本信任分配函数 m 是一个从集合 2^Θ 到 $[0,1]$ 的映射, A 表示识别框架 Θ 的任一子集,记作 $A \subseteq \Theta$,且满足 $m(\Phi)=0$, $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A)=1$ 。式中: $m(A)$ 称为事件 A 的基本信任分配函数, $\frac{1}{c}$ 表示证据对 A 的信任程度。

1.2 证据理论 Dempster 合成法则

D-S合成规则是一个反映证据联合作用的法则。给定几个同一识别框架上基于不同证据的信任函数,如果证据不是完全冲突的,那么就可以利用D-S合成规则计算出一个新的信任函数。

设 Bel_1, Bel_2 是同一个识别框架上2个信度函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本可信度分配,对应焦元分别为 A_i 和 B_j ,设 $K = \sum_{A_i \cap B_j = \Phi} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$,则D-S合成法则为:

收稿日期:2014-03-23;修回日期:2014-06-03

国家自然科学基金项目(51277052,51107032,61104045)。

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1-K} & A \neq \Phi \\ 0 & A = \Phi \end{cases} \quad (1)$$

2 证据理论融合权重的数学模型

2.1 权重提取的数学模型

运用 Dempster 合成法则进行权重融合之前,需要先提取权重。在利用训练数据对单一负荷预测模型进行训练后,每个模型都会产生训练误差。根据训练误差 e_i ,可以确定每个模型相应的权重为 w_i 。 $e_i = (\hat{y}_i - y_i)/y_i$, $i=1,2,3$, $\hat{y}_i$ 为预测值, y_i 为真实值。权重赋值与预测精度有关,预测精度高,赋予的权重就比较大;预测精度低,赋予的权重就比较小,因此权重 w_i 可以表示为 e_i 的函数^[10-12]:

$$w_i = \frac{1/(|e_i| + \varepsilon)}{\sum_{i=1}^3 1/(|e_i| + \varepsilon)} \quad (2)$$

需要特别指出的是,这里引入 ε 的目的是为了避免出现相对误差为 0 的情况。由 3 个模型的预测值和权重得到组合预测的结果为:

$$Y = \sum_{i=1}^3 w_i y_i \quad (3)$$

其中: $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

2.2 权重融合的数学模型

通过合成法则对多组权值进行融合,在母线负荷预测融合模型中,模型权重就相当于证据理论的基本信度值。对 3 种模型预测值 y_1, y_2 和 y_3 ,其对应的基本信度值为 $m(y_i) = w_i$ ($i=1,2,3$)。假设 1~3 日的负荷预测值所对应的信度值为 $m_j(P_i)$ ($i=1,2,3; j=1,2,3$)。首先将 1 日和 2 日对应的信度函数进行融合,然后将合成信度函数与 3 日信度函数进行 2 重融合,最终得到的基本信度值记为 $m_4(y_1), m_4(y_2)$ 和 $m_4(y_3)$,该基本信度值即为 4 日负荷预测型融合的权重。假设 4 日母线负荷预测结果为 y_1^4, y_2^4 和 y_3^4 ,则最终合成结果为:

$$y = m_4(y_1) * y_1^4 + m_4(y_2) * y_2^4 + m_4(y_3) * y_3^4 \quad (4)$$

3 3 种预测模型

3.1 BP 神经网络模型

BP 神经网络^[13,14]是一种多层前馈神经网络,由输入层、隐含层和输出层组成。BP 网络权值调整采用反向传播的学习算法,它利用均方误差和梯度下降法来实现对网络连接权值的修正,使得网络实际输出与目标输出之间的均方误差达到期望误差范围之内。BP 网

络的权值调整算法如下:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha D(k) \quad (5)$$

式中: $w(k)$ 为第 k 步权值; $D(k) = -\partial E / \partial w(k)$ 为第 k 步负梯度; E 为 k 时刻的输出误差; α 为学习率。

3.2 改进 BP 神经网络算法

BP 神经网络算法是一种简单的最速下降静态寻优算法,收敛缓慢。文献[8]提出多种改进的算法,取得了一定效果。文中采用动量-自适应学习率 BP 算法,从而提高学习速度并增加算法的可靠性。动量法降低了网络对于误差曲面细节的敏感性,抑制网络陷入局部极小,提高了收敛速度。动量法权值调整算法为:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha [(1-\eta)D(k) + \eta D(k-1)] \quad (6)$$

其中: η 为动量因子, $0 \leq \eta < 1$, 加入动量项相当于阻尼项,目的是为了改善收敛性。自适应调整学习率的权值调整算法为:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha(k) D(k) \quad (7)$$

其中: $\alpha(k) = 2\lambda\alpha(k-1)$, $\lambda = \text{sign}[D(k)D(k-1)]$ 。将上述 2 种方法结合起来,就得到动量-自适应学习率 BP 神经网络的权值修正算法:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha(k) [(1-\eta)D(k) + \eta D(k-1)] \quad (8)$$

3.3 支持向量机原理

支持向量机^[15,16]的基本思想是通过一个非线性映射,把输入空间的数据映射到一个高维空间,然后在此空间中作线性回归。对于回归预测问题,设训练样本 x_i 为输入向量, $x_i \in R^n$, y_i 为相应目标输出数据, $y_i \in R$, 其中 $i=1,2,\dots,n$, 采用如下的回归函数:

$$f(x) = w\Phi(x) + b \quad (9)$$

其中: w 为权值向量; b 为偏差。这是 2 个待训练的参数,而对于非线性映射函数 $\Phi(x)$ 的选取都是选择试算得到的。对 w 和 b 的训练实际是极小化下的泛函数:

$$R(c, \varepsilon) = \frac{1}{m} c \sum_{i=1}^m L_\varepsilon(y_i - f(x_i), x_i) + \frac{1}{2} w^T * w \quad (10)$$

式中第一项为经验误差项,第二项为正规化项,正规化常数 c 用来平衡 2 项误差之间的关系,其中:

$$L(y - f(x), x) = |y - f(x)|_\varepsilon = \begin{cases} 0, & |y - f(x)| \leq \varepsilon \\ |y - f(x, w)| - \varepsilon & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

即为 ε 的不敏感损失函数。

具体求解时,引入核函数 $k(x, x_i)$, 可以直接将问题转化为下面的对偶问题,并采用二次规划进行求解:

$$\max \{a_i\} \{a_i^*\} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (a_i - a_i^*)(a_j - a_j^*) k(x, x_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^m (a_i + a_i^*) + \sum_{i=1}^m (a_j + a_j^*) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m (a_i - a_i^*) = 0 \\ a_i, a_i^* \in [0, C] \end{cases} \quad (13)$$

由于成为一个二次规划问题,因此,原来待定的回归函数表达式可以写成:

$$f(x, a_i, a_i^*) = \sum_{i=1}^m (a_i - a_i^*) k(x, x_i) + b \quad (14)$$

核函数的选择决定了特征空间的结构。常用的有径向基(RBF)核函数等。由于对偶问题被描述成为一个凸规划问题,因此所求得的任意解均为全局最优解,克服了神经网络的局部极值问题。

4 基于证据理论的母线负荷预测模型

4.1 数据预处理

选择 SCADA 系统采集的量测数据作为原始数据源,由于传输通道等原因,采集的量测数据时常含有很多异常数据,这些数据的存在会影响预测精度。因此需要进行数据检测并剔除坏数据,文中使用横向纵向数据对比法进行预处理。

4.2 样本数据选择

从母线负荷曲线本身分析,短期负荷有着明显的周期性,表现在不同日之间的整体变化的相似性以及同类型日的相似性。因此选择 8 个影响因素作为学习机的输入变量,其中对于预测日日类型,将节假日取为整数 1,工作日取为整数 0。特征因素见表 1。

表 1 特征因素选择

序号	影响因素	表达式
1	预测日前 1 日同时刻负荷	$L(d-1, h)$
2	预测日前 2 日同时刻负荷	$L(d-2, h)$
3	预测日前 3 日同时刻负荷	$L(d-3, h)$
4	预测日前 1 日前 1 h 负荷	$L(d-1, h-1)$
5	预测日前 2 日前 1 h 负荷	$L(d-2, h-1)$
6	预测日前 1 周同时刻负荷	$L(d-7, h)$
7	预测日前 1 周前 1 h 负荷	$L(d-7, h-1)$
8	预测日日期类型	$D(d)$

4.3 证据理论融合样本的提取

为了确定待预测日预测模型的权重,首先对待测日前 3 日(1~3 日)的预测模型权重进行融合,然而每一天的模型权重又需要前述模型来进行权重提取。因此,为了获得融合样本,首先需要用 3 种预测模型对前 3 天的母线负荷进行预测。

5 算例分析

为了验证方法的有效性,以华东地区某 220 kV 变电站 2010 年 11 月 25 日至 12 月 4 日(00:00~23:00,每 1 h 为 1 点)母线负荷数据为例进行预测仿真测试。1~3 日母线负荷预测的结果如表 2、表 3 和表 4 所示。

通过对上述预测数据分析,利用阐述的数学模型对 4 日的母线负荷进行预测。首先,分别提取 1~3 日

表 2 1 日预测相对误差

时刻	BP	改进 BP	SVM	时刻	BP	改进 BP	SVM
1	0.028 3	0.033 3	0.182 1	13	0.089 2	0.028 8	0.015 3
2	0.027 5	0.025 5	0.138 4	14	0.087 5	0.026 2	0.014 7
3	0.033 8	0.025 2	0.117 1	15	0.092 3	0.033 1	0.004 8
4	0.037 7	0.024 0	0.108 5	16	0.088 2	0.025 0	0.020 9
5	0.057 8	0.034 6	0.084 4	17	0.075 8	0.021 6	0.046 1
6	0.062 2	0.038 0	0.072 2	18	0.075 9	0.019 5	0.008 2
7	0.059 0	0.024 8	0.028 4	19	0.073 2	0.017 7	0.051 5
8	0.054 9	0.019 2	0.062 1	20	0.052 8	0.004 4	0.086 2
9	0.053 5	0.01 68	0.079 5	21	0.036 6	0.003 8	0.152 2
10	0.071 7	0.023 6	0.058 1	22	0.008 6	0.019 8	0.182 2
11	0.085 0	0.027 6	0.064 7	23	0.038 5	0.043 4	0.282 3
12	0.090 6	0.022 8	0.002 8	24	0.071 5	0.309 5	0.309 5

表 3 2 日预测相对误差

时刻	BP	改进 BP	SVM	BP	BP	改进 BP	SVM
1	0.029 5	0.029 5	0.090 7	13	0.025 8	0.025 8	0.024 5
2	0.035 3	0.035 3	0.079 4	14	0.027 2	0.027 2	0.004 1
3	0.021 1	0.022 1	0.066 8	15	0.024 3	0.024 3	0.009 7
4	0.032 6	0.032 6	0.064 5	16	0.026 3	0.026 3	0.018 0
5	0.036 9	0.036 9	0.052 8	17	0.030 8	0.030 8	0.006 5
6	0.026 3	0.026 3	0.033 8	18	0.032 7	0.032 7	0.006 5
7	0.018 3	0.018 3	0.065 4	19	0.033 8	0.033 8	0.020 8
8	0.022 9	0.022 9	0.048 5	20	0.031 7	0.031 7	0.015 4
9	0.037 7	0.037 7	0.047 7	21	0.021 6	0.021 6	0.020 9
10	0.044 0	0.044 0	0.071 9	22	0.001 2	0.001 2	0.017 8
11	0.042 3	0.042 3	0.036 2	23	0.013 9	0.013 9	0.001 0
12	0.032 1	0.032 1	0.033 2	24	0.003 8	0.003 8	0.018 3

表 4 3 日预测相对误差

时刻	BP	改进 BP	SVM	BP	BP	改进 BP	SVM
1	0.007 1	0.052 0	0.036 9	13	0.000 8	0.003 1	0.127 2
2	0.016 5	0.037 6	0.071 9	14	0.009 8	0.010 3	0.121 3
3	0.032 8	0.025 5	0.068 8	15	0.017 6	0.009 5	0.130 5
4	0.063 5	0.006 8	0.060 6	16	0.005 0	0.004 9	0.109 4
5	0.067 0	0.009 9	0.094 6	17	0.005 7	0.000 7	0.117 8
6	0.062 3	0.013 6	0.110 0	18	0.006 1	0.001 0	0.109 9
7	0.070 5	0.020 0	0.094 0	19	0.004 3	0.007 9	0.106 1
8	0.060 7	0.016 0	0.102 9	20	0.007 0	0.010 9	0.089 9
9	0.054 3	0.017 5	0.106 8	21	0.016 9	0.014 1	0.051 0
10	0.039 1	0.019 8	0.115 8	22	0.035 2	0.016 3	0.015 8
11	0.031 9	0.024 4	0.129 7	23	0.057 6	0.013 3	0.038 8
12	0.008 8	0.009 9	0.125 5	24	0.088 0	0.035 0	0.068 8

的模型权重,然后通过 Dempster 法则进行多重融合,将融合结果作为 4 日预测模型权重,文中的 ε 选择 0.01。通过计算,可以得到 1~3 日预测模型对应的权重,如表 5 所示。

利用 D-S 证据理论和前面所述的数学模型,将表 3 中的权重当作相应的基本信度值,再通过 Dempster 合成法则进行 2 重融合,得到的融合结果为 0.159 4,

表 5 1~3 日 3 种预测模型对应的权重

日期	BP 权重	改进 BP 权重	SVM 权重
1	0.271 5	0.538 3	0.190 2
2	0.265 7	0.404 7	0.329 5
3	0.329 0	0.535 1	0.135 9

0.783 3, 0.057 2。将融合结果作为模型的权重,对 4 日的母线负荷预测,结果如表 6 所示。3 种单一预测模型与权值融合模型的预测误差对比如表 7 所示。

表 6 4 日母线负荷预测结果

时刻	真实值 /MW	预测值 /MW	相对误差 /%
1	49.5	49.3654	0.0027
2	47.775	46.0991	0.0351
3	46.35	44.2611	0.0451
4	45.075	42.9961	0.0461
5	44.1	41.7470	0.0534
6	43.075	40.6351	0.0566
7	42.525	39.9019	0.0617
8	41.8	39.2100	0.0620
9	41.175	38.6157	0.0622
10	40.425	37.9595	0.0610
11	39.8	37.3904	0.0605
12	39.25	36.9866	0.0577
13	38.85	36.6789	0.0559
14	38.675	36.6574	0.0522
15	38.25	36.4090	0.0481
16	38.3	36.2652	0.0531
17	38.45	36.2743	0.0566
18	38.425	36.3243	0.0547
19	38.75	36.5106	0.0578
20	38.125	36.8263	0.0341
21	38.675	37.3463	0.0344
22	39.325	38.3084	0.0259
23	40.6	39.7957	0.0198
24	42.62	41.9697	0.0154

表 7 4 种方法误差比较

预测方法	最大误差 /%	平均相对误差 /%
BP	7.96	5.69
改进 BP	6.56	5.11
SVM	13.4	5.62
D-S	6.22	4.63

从表 7 中可以看出,单一预测模型中,改进 BP 网络的预测精度较高,最大误差比 BP 预测模型和 SVM 预测模型低 1.4%和 6.84%。D-S 证据理论提取了各种模型的优点,结果表明,其权值融合模型预测的最大误差和平均相对误差均小于单一预测模型。

6 结束语

提出了一种基于证据理论的母线负荷预测方法。

借助证据理论,通过 Dempster 合成法则对历史预测数据进行模型权重的融合,从而对待预测日的母线负荷进行预测。首先建立了权重提取的数学模型,通过对待测日前 3 日的母线负荷进行预测,提取了融合样本,从而计算这 3 日的模型权重,并对权重进行融合,然后将融合结果作为待测日的模型权重,对待测日的母线负荷进行了预测。实例分析结果表明,基于证据理论的母线负荷预测模型比单一模型更有效、精度也更高。

参考文献:

- [1] 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,2007,3-5.
- [2] KASSAEI H R, KEYHANI A, WOUNG T, et al. A Hybrid Fuzzy Neural Network Bus Load Modeling and Predication[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 718-724.
- [3] SALGADO R M, BALLINI R, OHISHI T. An Aggregate Model Applied to the Short-term Bus Load Forecasting Problem [C]// IEEE Power Systems Conference and Exposition. Bucharest, IEEE, 2009: 1-8.
- [4] 李光珍,刘文颖. 基于 LSSVM 和马尔可夫链的母线负荷短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 55-60.
- [5] 段青,赵建国,马艳. 相关向量机与支持向量机在负荷预测中的比较[C]// 全国电气工程博士论坛. 成都:西南交通大学, 2008: 314-319.
- [6] 彭信淞,贺辉,姚建刚,等. 用 PSO 优化 BP 神经网络的母线负荷预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5): 146-151.
- [7] 吴京秋,孙奇,杨伟,等. 基于 D-S 证据理论的短期负荷预测模型融合[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 66-70.
- [8] 孙奇,杨伟. D-S 证据理论融合改进 BP 网络的短期负荷预测研究[J]. 继电器, 2007, 35(7): 61-65.
- [9] 杨风暴,王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2010, 15-20.
- [10] 刘亚南,卫志农,孙国强,等. 基于 D-S 证据理论的短期风速预测模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 1-6.
- [11] 李鹏,颜艳,郑武军,等. 证据理论融合量子神经网络的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 49-53.
- [12] 李鑫滨,张娟,张岩,等. 基于 D-S 证据理论的相似日支持向量机短期负荷预测[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 143-147.
- [13] 蔡凯,谭伦农,李春林,等. 时间序列与神经网络法相结合的短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 82-90.
- [14] 梁雪飞,陈歆技. 小波熵和 BP 神经网络在孤岛检测与扰动辨识中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 5-8.
- [15] 崔晓祥,李娟. 基于支持向量机回归的电力系统负荷建模[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 37-39.
- [16] 李云飞,黄彦全,蒋功连,等. 基于 PCA-SVM 的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 66-70.

作者简介:

刘亚南(1988),男,江苏徐州人,硕士,从事电力系统负荷预测研究工作;

(下转第 27 页)

小电阻接地系统零序电流 II 段保护整定策略研究

鲍有理¹, 季东方²

(1. 无锡供电公司, 江苏 无锡 214061; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘 要:小电阻接地系统发生接地故障时, 各级零序电流保护动作切除接地故障, 该故障电流包括短路电流和电容电流, 在整定零序电流 II 段保护定值时必须考虑电容电流对 10 kV 线路零序保护和主变低后备零序定值的影响。利用图示说明 10 kV 线路发生单相接地时电容电流和故障电流的流向, 定性计算 10 kV 线路发生单相接地时, 线路零序保护和主变低后备零序电流保护获得的故障电流的大小, 为主变低压侧零序电流 II 段保护和 10 kV 线路零序电流 II 段保护的定值配合提供参考数据。

关键词:小电阻接地系统; 电容电流; 零序电流后备保护; 整定值

中图分类号: TM772

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0025-03

江苏省电力公司于 2008 年发布的《中压系统中性点接地方式选用技术导则》中明确 10 kV、20 kV 和 35 kV 变电站每段母线单相接地故障电容电流大于 100 A (35 kV 系统为 50 A) 时, 宜采用小电阻接地方式^[1]。基于此原则, 无锡电网目前的总体原则是中心城区、新区及太湖新城区的新建变电站 10 kV 系统均选择小电阻接地方式, 其他地区选择消弧线圈接地方式^[2]。小电阻接地方式既满足了运行设备较低绝缘水平的要求, 也解决了城市电网电缆化过程中电容电流不断上升对消弧线圈容量的问题^[3]。然而, 低压电网 (如 10 kV 系统) 单相接地故障产生的故障 (零序) 电流既有短路电流, 又有影响故障电流幅值的电容电流^[4]。整定计算时必需考虑小电阻接地方式的低压系统中电容电流对故障电流的影响^[5,6], 正确给出主变低压侧 (如 10 kV 侧) 零序电流后备保护的定值和 10 kV 线路零序电流后备保护的定值, 以确保低压系统的正常稳定运行。

1 小电阻接地方式的构成

110 kV 主变压器 10 kV 侧绕组通常为三角形 (Δ) 接线^[7], 无中性点引出接地。需在 10 kV 侧接入 Z 型接线的接地变压器, 从其中性点经小电阻接地。该接地变压器与接地电阻成套装置接于主变压器 10 kV 出口侧, 典型的 110 kV 变电站一次系统图及主变和线路的零序电流保护的基本配置^[8]如图 1 所示。

2 典型实例

根据 DL/T-584-2007^[9], 接地变中性点上装设零序电流 I 段、II 段保护, 作为接地变压器单相接地故障的主保护和系统各元件的总后备保护。零序电流 I 段保护第一时间跳母联开关, 第二时间跳供电变压器

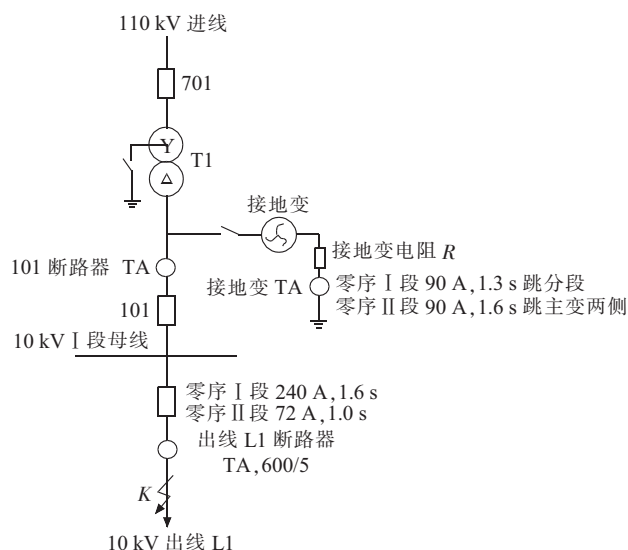


图 1 典型的 110 kV 变电站的一次系统

同侧开关; 零序电流 II 段保护动作跳供电变压器各侧开关。

图 1 中, 主变低压侧零序电流后备保护 I 段定值 90 A、1.3 s 跳分段断路器; II 段定值 90 A、1.6 s 跳主变两侧断路器。线路的零序电流保护 I 段定值 240 A、1.6 s; II 段定值 72 A、1.0 s 出口跳主变两侧断路器。观察零序电流 II 段的时间定值满足逐级配合的要求, 但电流的定值大小是否满足要求需分析后才能确定。

3 主变低后备及 10 kV 线路的零序后备保护获取故障电流的途径

主变低压侧零序电流后备保护从接地电阻 R 处的零序电流互感器 (TA) 上获得零序电流; 10 kV 线路保护的零序电流经线路微机保护的软件计算获得, 源于三相 TA 的采样电流。TA 的位置不同, 在 10 kV 线路上发生接地故障时, 2 个零序保护所获得的零序电流是不一样的。

4 故障电流的构成及分解图

在 10 kV 线路发生单相接地故障时,故障(零序)电流中既有短路电流,也有影响故障电流幅值的电容电流^[10]。下面以图示的方法解析电容电流、故障电流的流向,最后以合成的方式得到故障时的零序电流。设接地故障点在 10 kV 线路 L_1 出口处。

(1) 不接地系统中,发生单相(A相)接地故障时,电容电流的流向如图 2 所示(图 2 中接地变不作考虑)。

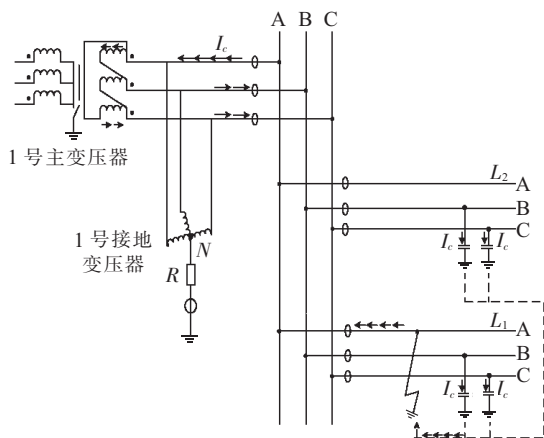


图 2 A 相接地故障时电容电流的流向

可见,A 相接地故障时,另外两相的电容电流经接地点回到故障线路的故障相上,方向指向母线。

(2) 小电阻接地系统中,不考虑电容电流的影响、电缆线和母线阻抗忽略不计,发生单相接地故障时,故障电流的流向如图 3 所示。

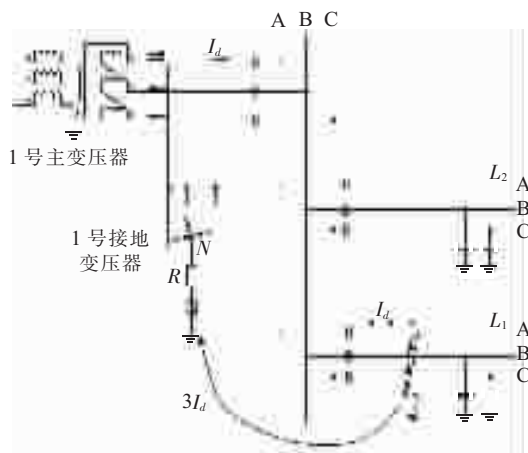


图 3 故障电流的流向

短路电流 I_d 为:

$$I_d = 3 \frac{U_k}{3R + Z_0} \quad (1)$$

如接地变零序阻抗 Z_0 为 8.6Ω , 中心点接地电阻 R 为 10Ω , 母线电压 10 kV, 计算可得短路电流为 $556 \angle -15.6^\circ$ A。

可见,A 相接地故障时,流过接地变压器接地电阻的短路电流为 556 A,该电流由母线流向故障点,经由

故障点、接地电阻、接地变回到主变。短路电流的方向和电容电流的方向不一致并存在较大的角度差。

(3) 故障点的故障电流合成如图 4 所示。故障电流 I_g 由电容电流 I_c 和短路电流 I_d 的叠加构成,图中以母线电压 U_m 为参考方向。可以清晰看到故障电流由于电容电流的影响,比短路电流要小。

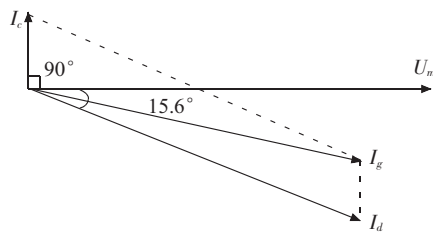


图 4 故障点的故障电流合成

按照目前 10 kV 系统电容电流的实测统计结果,分 70 A,100 A,150 A 3 个数量级分别计算电容电流对故障电流的影响。在短路电流不变(556 A)的前提下,故障电流分别为 542 A,538 A,537 A。可见,较大的电容电流对故障点的故障电流(零序电流)存在影响。即 10 kV 线路发生接地故障时,线路零序电流保护感受的零序电流(故障电流 I_g)由电容电流 I_c 和短路电流 I_d 的叠加构成;主变低压侧零序电流后备保护感受的零序电流没有电容电流,只有短路电流 I_d 。很明显,接地故障时,线路零序电流保护感受的零序电流小于主变低压侧零序电流后备保护。

5 零序电流 II 段保护定值的配合问题

文中定性地给出电容电流对故障电流的影响。从表 1 看,影响最大时有近 20 A 的幅值。这种影响对零序电流 I 段保护不存在问题,而线路零序电流 II 段保护整定值需要商榷。按照“线路零序电流 II 段保护整定值为 72 A,0.6 s,主变低压侧后备零序电流 II 段保护整定值为 90 A,1.0 s”来整定,则线路末端发生接地故障时,在故障电流偏小的情况下,流入线路零序保护和主变低后备零序保护的电流将可能出现主变低后备零序保护动作、线路零序保护不动作。结果导致 10 kV 线路末端发生接地故障时,可能出现主变低后备零序电流 II 段保护动作而线路零序保护不动作的情况。

6 结束语

上述利用图示说明 10 kV 线路发生单相接地时电容电流和故障电流的流向,定性地计算 10 kV 线路发生单相接地时,线路零序保护和主变低后备零序电流保护获得的故障电流的存在偏差,如果考虑不周全,在 10 kV 线路发生接地故障时,主变低压侧零序电流 II 段保护将动作,而 10 kV 线路零序电流 II 段保护不动作。基于以上分析,无锡地区的零序电流后备整定为:

10 kV 线路零序电流 II 段保护整定值改为 60 A, 0.6 s, 主变低压侧后备零序电流 II 段保护整定值为 90 A, 1.0 s。这样,无论在电流的防止和动作的时间上均满足运行要求。

参考文献:

- [1] 程路,陈乔夫.小电流接地系统单相接地选线技术综述[J].电网技术,2009,33(18):219-224.
- [2] 张志文,申建强,杨俊,等.配电网混合接地运行分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(2):47-52.
- [3] 刘明岩.配电网中性点接地方式的选择[J].电网技术,2004,28(16):86-89.
- [4] 江苏省电力公司.电力系统继电保护原理与实用技术[M].北京:中国电力出版社,2006:4-6.
- [5] 王英民.10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序保护误动原因分析[J].华北电力技术,2009(1):24-26,29.
- [6] 窦新宇,李春明.广州 10 kV 电网中性点经小电阻接地的研究

[J].继电器,2007,35(1):158-161.

- [7] 中国标准出版社第四编辑室.输变电技术常用标准汇编:电力变压器卷[M].北京:中国标准出版社,2010:40-42.
- [8] 陈刚,王清昊,黄玉霞,等.中性点间隙击穿引起的 220 kV 主变跳闸事故的分析[J].电瓷避雷器,2013(5):73-78.
- [9] 国家发展和改革委员会.DL/T 584—2007 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].北京:中国电力出版社,2008.
- [10] 田宝江,张太升,陈军,等.不平衡零序电流对纵联零序保护的影响分析及其对策[J].电力系统自动化,2013,37(19):132-135.

作者简介:

鲍有理(1966)男,安徽安庆人,高级工程师,从事电力系统继电保护专业技术管理工作;
季东方(1974)男,江西抚州人,工程师,从事电力系统设备维护及技术支持工作。

Study on Definite-time of Zero Sequence Over-current Protection Settings for Low Resistance Grounding System

BAO Youli¹, JI Dongfang²

(1.Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China;

2.Guodian Nanjing Automation Co.Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: The zero sequence over-current protection would clear fault in low resistance ground system. The fault current contains the short circuit and the capacitance current. Therefore, the effects of capacitance current on zero sequence protection of 10 kV line and transformer backup zero sequence protection should be considered, especially for the value setting of definite-time of zero sequence over-current protection. The direction of capacitance current and fault current of 10kV line is investigated. The quantitative effects of single-line ground fault on line zero sequence protection and transformer backup zero sequence protection are analyzed. It provides a reference for coordinating protection settings between transformer backup definite-time of zero sequence protection and 10kV line definite-time of zero sequence protection.

Key words: low resistance grounding system; capacitance current; zero sequence current backup protection; setting value

(上接第 24 页)

卫志农(1962)男,江苏江阴人,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制,输配电系统自动化等;
季聪(1988)男,江苏南通人,硕士,从事电力系统运行与控制研究工作;

唐一铭(1990)男,江苏徐州人,硕士,从事电力系统运行与控制研究工作;
都晨(1986)女,江苏南京人,硕士,从事电力系统负荷预测研究工作。

Bus Load Forecasting Based on D-S Evidence Theory

LIU Yanan¹, WEI Zhinong², JI Cong¹, TANG Yiming¹, DU Chen¹

(1.Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China; 2.Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, based on Dempster-Shafer (D-S) evidence theory, a new bus load forecasting approach is presented. The proposed method will firstly establish the weight extraction model and weight fusion model for BP neural networks, generalized BP neural networks and SVM bus load forecasting models, respectively. Then, by using D-S evidence theory, the weights of three forecasting models are fused. After the extraction of fusion samples of evidence theory by analyzing forecasting data, and multi-fusion result of belief function is taken as the weight of bus load forecasting model, by which the bus load in the future is forecasted. Finally, simulation results provided later show that the proposed method in this paper are more effective and has a higher forecasting accuracy than that by using only one model.

Key words: BP neural network; SVM; D-S evidence theory; bus load forecasting

基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划研究

周建华¹, 孙 蓉¹, 陈久林¹, 袁 越², 袁晓冬¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;

2.河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘 要:基于改进后的 PSO 算法,研究了如何利用网架扩展规划,来缓解风电并网发电后部分线路出现输电阻塞的现象。在 PSO 算法中,惯性权重和学习因子分别是控制 PSO 算法全局搜索和局部搜索的关键性可调整参数。为避免陷入局部解,同时加快收敛速度,提出了同时动态优化调整惯性权重和学习因子的改进 PSO 算法。基于 IEEE39 节点的仿真算例表明:在保证获得最优解的前提下,该算法的收敛速度显著加快。

关键词:网架扩展规划;PSO 算法;惯性权重;学习因子

中图分类号:TM715

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0028-04

风电大规模并网发电后,部分输电线路容易出现输电阻塞现象^[1,2]。为缓解可能出现的输电阻塞,网架扩展规划是一个比较好的解决办法。该办法是依据仿真计算结果,通过在可能的线路走廊上扩建或新建线路,以实现缓解输电阻塞的目的。

在仿真计算中,算法的研究是整个网架扩展规划中非常重要的一个环节。总的来说,算法大致可分为解析类算法和人工智能类算法。较为常见的解析类算法有最小生成树法^[3]、Benders 分解法^[4]、分支定界法^[5]等。由于网架扩展规划问题属于大规模数学组合问题,故该类算法存在计算时间长、对实际大规模系统求解困难等诸多缺点。此外,有些约束条件难以用数学模型表达,故由解析类算法求出的数学意义上的最优解未必是符合实际要求的最优方案^[6]。人工智能类算法,目前主要有 Tabu 搜索法^[7]、遗传算法^[8]、蚁群算法^[9]、模拟退火算法^[10]、离散猴群算法^[11]、禁忌搜索法^[12]、粒子群优化(PSO)算法^[6]等。其中,PSO 算法通过记忆与反馈机制实现了高效的寻优搜索,对于求解网架扩展规划问题中那些目标函数或约束条件不可微的非线性优化问题尤为适用。

利用 PSO 算法寻找含风电场电力系统最优的网架扩展规划方案时,有 2 个问题值得关注:一是容易陷入局部最优解;二是收敛速度缓慢。基于以上认识,文中研究了含风电场电力系统网架扩展规划问题,提出了同时动态优化调整惯性权重和学习因子的改进 PSO 算法。

1 含风电场电力系统网架扩展模型

利用网架扩展规划来缓解系统输电阻塞,其本质是通过线路的扩建或新建,将那些重负荷线路上输送的部分功率由其他轻负荷线路来输送。在假定所有线

路输送容量极限一致的前提下,也就意味着需要尽可能地使所有线路上输送的有功功率相差不大。与此同时,在衡量某系统是否发生输电阻塞时,节点电压幅值大小也是一个依据。若某节点电压幅值介于正常范围时,该节点所连接的线路发生输电阻塞的可能性就会比较低。反之,若超出正常范围时,该节点所连接的线路很可能是重负荷线路,这时系统极有可能发生阻塞。

基于上述认识,文中的目标函数定义为:

$$F = a_1 F_1 + a_2 F_2 = a_1 f_1(P_{\text{line}}) + a_2 \sum_{j=1}^n f'(V_j) \quad (1)$$

其中:

$$f(P_{\text{line}}) = \text{var}(P_{\text{line}_1}, P_{\text{line}_2}, K, P_{\text{line}_m})$$

$$f'(V_j) = \begin{cases} \exp(1 - V_{\text{down}}/V_j) & V_j < V_{\text{down}} \\ 1 & V_{\text{down}} \leq V_j \leq V_{\text{up}} \\ \exp(1 - V_j/V_{\text{up}}) & V_{\text{up}} < V_j \end{cases}$$

式中: a_1, a_2 为常数,用于调整不同指标在目标函数中所占的比例; P_{line_i} 为第 i 条线路上输送的有功功率, $i=1, 2, K, m, m$ 为线路总数; V_j 为节点 j 的电压幅值, $j=1, 2, K, n, n$ 为节点总数; $V_{\text{up}}, V_{\text{down}}$ 分别为节点电压幅值上、下限。约束条件为系统常规潮流方程,如式(2)、(3)所示:

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

$$\begin{cases} P_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + t_{ij} G_{ij} V_i^2 \\ Q_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + (B_{ij} - b_{j0}) V_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_i, Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率注入量; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 上电压角度的差值; G_{ij}, B_{ij} 分别为导纳矩阵元素的实部和虚部; t_{ij} 为变压器变比; b_{j0} 为线路导纳的一半。

2 改进的 PSO 算法

PSO 算法源自鸟群捕食行为的研究,是一种通用的启发式搜索技术。自提出以来,该算法就以概念简单、容易实现和需要调整的参数较少等优点得到了广泛应用和研究。

2.1 PSO 算法及惯性权重计算策略

PSO 算法的基本思想是^[13]:随机初始化一群没有体积和质量的粒子,将每个粒子视为优化问题的一个可行解,粒子的优劣由一个事先设定的适应度函数来辨别。每个粒子在可行解空间内运动,并由一个位移变量决定其迭代的方向。

粒子 k 在 $t+1$ 时刻的位置 z_k^{t+1} 可以通过下式更新获得:

$$z_k^{t+1} = z_k^t + \Delta z_k^{t+1} \quad (4)$$

$$\Delta z_k^{t+1} = \omega z_k^t + c_1 r_1 (p_k^t - z_k^t) + c_2 r_2 (p_g^t - z_k^t) \quad (5)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子(通常设置为常数); r_1 和 r_2 是均匀分布在 $(0,1)$ 区间的随机数; p_g^t 和 p_k^t 分别是所有粒子和粒子 k 从第一次迭代至当前迭代次数内出现的最优解。

式(5)由三部分组成:第一部分表示粒子对当前自身运动状态的延续,依据自身的位置进行惯性运动;第二部分表示粒子的思考,即综合考虑自身以往的经历从而对下一步行为进行决策,反映的是增强学习过程;第三部分表示粒子间的信息共享和相互合作。在搜索过程中,每个粒子一方面要记住自己的经验,同时还要考虑同伴的经验。当单个粒子觉察同伴经验较好的时候,它将进行适应性的调整,寻求一致认知过程。

在标准 PSO 算法中,惯性权重是重要的参数,决定了粒子先前位置对当前位置的影响程度。惯性权重值较大,有利于全局搜索,虽然搜索速度快,但不易得到精确解。反之,惯性权重值较小,有利于局部搜索和得到更为精确的解,但收敛速度慢,有时会陷入局部极值。因此,寻找合适的惯性权重值,使之在搜索精度和搜索速度方面起恰当的协调作用,成为很多学者研究的焦点。

文献[14]将惯性权重随着迭代次数而线性递减,计算公式为:

$$\omega(t) = \omega_{\text{start}} - t(\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})/t_{\text{max}} \quad (6)$$

式中: ω_{start} 为惯性权重的初始值,也是最大值; ω_{end} 为迭代结束时的惯性权重值,也是最小值; t 是当前迭代次数, t_{max} 是最大迭代次数。该方法更好地控制了全局搜索能力和局部搜索能力,加快了收敛速度,提高了算法的性能。然而,由于惯性权重采取的是线性递减策略,

一旦在迭代初期搜索不到最好点,那么随着 ω 的减小,局部搜索能力加强,就极易陷入局部最优。

为克服这种不足,文献[15]经过大量研究实验,提出了惯性权重的 2 种非线性递减策略,计算公式为:

$$\omega(t) = \omega_{\text{start}} - t^2 (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})/t_{\text{max}}^2 \quad (7)$$

$$\omega(t) = (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})(t/t_{\text{max}})^2 + (\omega_{\text{end}} - \omega_{\text{start}})(2t/t_{\text{max}}) + \omega_{\text{start}} \quad (8)$$

由式(7)、(8)可以看出,在迭代初期, ω 的减小趋势缓慢,全局搜索能力很强,有利于找到很好的优化种子。而在迭代后期, ω 的减小趋势加快。因此一旦在前期找到合适的种子,上述策略就可以使得算法收敛速度加快,在一定程度上减弱了前述线性递减策略的局限性。

2.2 改进的 PSO 算法

在 PSO 算法中,每个粒子代表问题的一个解。所有粒子迭代的目的是为了找到适应值最优的位置。为此每个粒子均通过 3 个方面进行更新:自身位置;对自己历次位置中择优选取的最佳位置;对所有粒子位置中择优选取的最佳位置。

其中,学习因子 c_2 反映了粒子间的信息交流,对 PSO 算法的性能影响较大。理想状态下,一个好的策略应使得算法在搜索初期时,粒子能够遍历整个空间;而在搜索末期,粒子能够避免陷入局部极值。为此,与以往大多数研究中将学习因子 c_2 设定为定值不同,文中将学习因子 c_2 随着迭代次数的变化而变化,并将其与惯性权重的变化相结合,提出了新的 PSO 算法策略。

其基本思想是:在搜索初期,粒子飞行主要参考粒子本身的历史信息;在搜索后期,则更加注重社会信息。学习因子 c_2 的计算公式为:

$$c_2 = c_{2_end} + t(c_{2_start} - c_{2_end})/t_{\text{max}} \quad (9)$$

式中: c_{2_start}, c_{2_end} 分别为 c_2 的迭代初值和迭代终值。

2.3 改进 PSO 算法的实现

2.3.1 初始化粒子

在网架扩展规划的初始种群设置中,倘不加选择,任意选取两节点作为新建线路端点的话,则仅扩建一条输电线路,粒子迭代过程中需遍历的总数将达 $n(n-1)/2$;若扩建 2 条输电线路,需遍历的总数将高达 $n(n-1)(n-2)(n-3)/4$ 。随着扩建输电线路数目的增加,初始种群数目将更多。从简单化角度出发,文中将风电并网点作为新建线路的一个端点,另一端点为一个非常规发电机并网端点。

网架扩展规划是通过在可能的线路走廊上扩建或新建线路来实现的,因此定义:若扩建或新建 n 条线路,则其对应的粒子为 (x_1, x_2, K, x_n) 。其中,元素 x_i 表示在风电并网点与节点 x_i 之间新建一条输电线路。

2.3.2 适应度函数

适应度函数与研究问题的目标函数具有很强的关联性。由于目标函数是关于线路输送功率和节点电压的表达式,而文中研究的是如何通过网架扩展规划来缓解含风电场电力系统的输电阻塞,因此,适应度函数即可由目标函数直接转化而来。

2.3.3 实现步骤

(1) 初始化算法。设定 PSO 算法的各类参数;搜索空间的上限 U_d ,下限 L_d ;学习因子 c_1, c_2 ;最大迭代次数 $t_{\max}$ 或收敛精度 ξ 。随机初始化种群粒子。

(2) 评价每一个粒子。依据适应度函数,计算每一个粒子的适应值,并据此选择粒子当前的最优位置 p_i^t 和全局最优位置 p_g^t 。

(3) 更新粒子位置。用式(4)和式(5)对每一个粒子的位置进行更新。

(4) 检验是否符合结束条件。如果当前的迭代次数达到了预先设定的最大次数 $t_{\max}$,或最终结果小于预定收敛精度 ξ 要求,则停止迭代,输出最优解,否则转到步骤(2)。

3 仿真算例及结果讨论

仿真算例以改进后的 IEEE 39 节点系统作为研究对象,详细参数参见文献[16]。该系统含有 39 个节点和 46 条输电线路,如图 1 所示。不计平衡节点,该系统总装机规模和负荷水平分别为 46.20 p.u. 和 46.41 p.u. (以 100 MV·A 为基准功率)。假设风电并网于节点 22,风速变量是符合威布尔分布的随机变量。风电场内安装了 100 台 Vestas V112-3.0 MW 型号的风电机组,其切入、额定和切出风速分别为 4 m/s,16 m/s 和 25 m/s^[17]。

3.1 改进前后的迭代结果比较

为描述方便,定义 3.1 节中惯性权重的改进算法依次为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 。将前述的学习因子改进与惯性权重改进进行组合,就可以得到 6 种不同的算法: $\omega_1, \omega_1 c_2, \omega_2, \omega_2 c_2, \omega_3, \omega_3 c_2$ 。算例对这 6 种不同的算法均作了仿真计算,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:(1) 不同算法下,迭代计算结果都一致,均为(8,18)。这说明在上述算法下,迭代结果未出现陷入局部最优解的问题。这是由于在初始化粒子时,选择了多达 5000 个的初始粒子。初始粒子数目越多,陷入局部最优解的可能性越小。(2) 与仅依靠惯性权重改进算法相比,同时动态优化调整惯性权重和学习因子的改进 PSO 算法,不管是在迭代次数还是在迭代时间上,均具有明显的优势。这就说明了文中所提出的改进 PSO 算法的优越性。

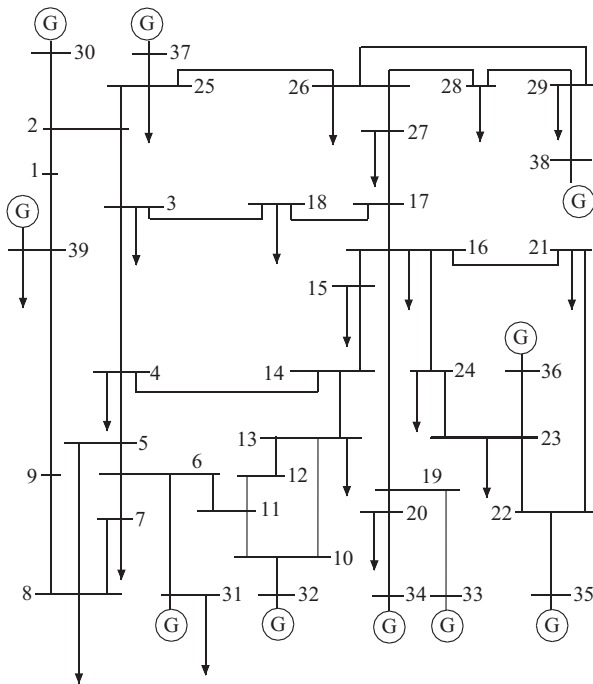


图 1 IEEE 39 节点网架结构

表 1 算法改进前后的迭代结果比较

算法	迭代次数	收敛时间 /s	迭代结果
ω_1	77	8 836.46	8,18
$\omega_1 c_2$	21	1 796.18	8,18
ω_2	97	11 356.63	8,18
$\omega_2 c_2$	19	1 674.96	8,18
ω_3	56	6 163.95	8,18
$\omega_3 c_2$	20	1 759.95	8,18

3.2 网架扩展前后的系统输电阻塞程度比较

由上节计算结果可知:当通过扩建 2 条线路来缓解含风电场电力系统的输电阻塞时,PSO 优化算法的最终结果为(8,18)。通过基于 Gram-Charlier 级数展开的概率潮流计算^[18],文中研究了原先重负荷线路在网架扩建前后输送功率期望值的变化情况,如表 2 所示。

表 2 网架扩建前后原重负荷线路输送功率期望值变化

线路	线路输送功率的期望值	
	扩建前	扩建后
21-22	-7.11	-3.32
16-19	-4.51	-4.51
16-21	-4.36	-0.58
23-24	4.13	2.04
6-7	4.09	2.83
6-11	-4.06	-2.86
10-11	4.04	2.95

由表 2 可以看出:网架扩建前,线路 21-22 的阻塞程度较为严重;网架扩建后,该线路输送的部分功率被其他轻负荷线路所承担,原先所面临的阻塞压力得到极大缓解。

4 结束语

为缓解风电大规模并网发电后部分线路可能出现的输电阻塞现象,基于改进后的 PSO 算法,采用网架扩展规划这一技术手段,对含风电场电力系统的网架规划进行了研究,实现了缓解部分线路输电阻塞的目的。在 PSO 算法中,惯性权重决定了粒子先前位置对当前位置的影响,而学习因子则决定了粒子本身经验和群体经验对粒子运动轨迹的影响,反映了粒子间的信息交流。通过合理动态调整这 2 个参数,有效避免了陷入局部最优解、加快迭代收敛速度,对提高 PSO 算法的性能具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 张乐丰,王增平. 风电并网对电力系统的影响[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):81-84.
- [2] 崔晓丹,李威,任先成,等. 风电并网对电力系统的影响[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):1-5,10.
- [3] 刘健,杨文字,余健明,等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):103-108.
- [4] BINATO S, PEREIRA M V F, GRANVILLE S. A New Benders Necomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2):235-240.
- [5] BAHENSE L, OLIVEIRA G C, PEREIRA M, et al. A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3):560-565.
- [6] 程浩忠,张焰. 电力网络规划的方法与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002:150-155.
- [7] DA SILVA E L, ORTIZ J M A, DE OLIVEIRA G C, et al. Transmission Network Expansion Planning under a Tabu Search Approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1):62-68.
- [8] MAGHOULI P, HOSSEINI S H, BUYGI M O, et al. A Multi-objective Framework for Transmission Expansion Planning in Deregulated Environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):1051-1061.
- [9] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(20):37-42.
- [10] BRAGA A S, SARAIVA J T. Transmission Expansion Planning and Long Term Marginal Prices Calculation using Simulated Annealing [C]//Power Tech Conference Proceedings, Bologna, 2003:7-9.
- [11] 王靖然,余贻鑫,曾沅. 离散猴群算法及其在输电网扩展规划中的应用[J]. 天津大学学报,2010,43(9):798-803.
- [12] 王赛一,王成山. 遗传禁忌混合算法及其在电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化,2004,28(20):43-46,62.
- [13] SHI Y, EBERHART R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]// IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, Anchorage, 1998:69-73.
- [14] SHI Y, EBERHART R C. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[C]//Proceeding of Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, New Jersey, 1999:1945-1949.
- [15] 陈贵敏,贾建援,韩琪. 粒子群优化算法的惯性权重递减策略研究[J]. 西安交通大学学报,2006,40(1):53-56,61.
- [16] PAI M A. Energy Function Analysis for Power System Stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov[M]. Boston: Kluwer Academic Pub, 1981:339-345.
- [17] Turbine overview[EB/OL]. <http://www.vestas.com/en/wind-power-plants/procurement/turbine-overview.aspx#/vestas-univers>.
- [18] ZHANG P, Lee S T. Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-charlier Expansion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1):676-682.

作者简介:

周建华(1983),男,江苏镇江人,工程师,从事新能源发电并网技术研究工作;
孙蓉(1979),女,江苏江都人,高级工程师,从事电力系统仿真分析工作;
陈久林(1970),男,江苏扬州人,高级工程师,从事电力系统继电保护研究工作;
袁越(1966),男,陕西西安人,博导,从事电力系统分析和新能源并网技术研究工作;
袁晓冬(1979),男,江苏无锡人,高级工程师,从事电能质量测试、仿真和评估工作。

Research on Transmission Network Expansion Planning of Power System Containing Wind Power Based on Improved Particle Swarm Optimization

ZHOU Jianhua¹, SUN Rong¹, CHEN Jiulin¹, YUAN Yue², YUAN Xiaodong¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, based on particle swarm optimization algorithm, the expansion planning of power network containing wind power for relieving transmission congestion is investigated. Inertia weights and acceleration coefficients are critical parameters in PSO algorithm. To avoid local optimal solution and to accelerate convergence speed, an improved PSO algorithm with self-adjusting inertia weights and acceleration coefficients is proposed. The simulations on the IEEE 39 power system show that the proposed algorithm significantly reduces computational time to obtain the global optimal solution.

Key words: transmission network expansion planning; particle swarm optimization; inertia weights; acceleration coefficients

太阳能光伏电池建模与动态特性仿真

易桂平, 胡仁杰

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 光伏电池是太阳能光伏发电系统中的核心部分, 因此成为太阳能光伏发电系统研究的主要环节。分析了光伏电池的工作特性, 应用仿真软件 PSCAD/EMTDC 工具, 建立了光伏电池及最大功率点跟踪(MPPT)仿真模型。仿真结果证明了光伏电池的输出功率在光照强度变化的条件下能够始终追踪最大功率点, 使得光伏电池在不同光照条件下均输出最大功率。

关键词: 光伏电池; PSCAD 仿真; 最大功率点

中图分类号: TM615

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0032-04

在构建光伏系统时, 由于其在不同的光照强度和温度下的输出功率有较大的变化, 如果采用真实的光伏电池的阵列, 则成本会很高。尤其是当光伏系统的功率在数百瓦甚至更大级别时, 为了降低投资, 提高系统的可行性, 建立光伏电池阵列模型就显得十分重要。光伏电池阵列模型可以模拟出在不同的光照强度、环境温度以及不同组合下的光伏电池阵列的特性、负载能力与系统的性能, 可大大缩短光伏系统的研究周期, 提高研究效率和研究结果的可信度。因此建立光伏电池阵列模型在实际工作中是非常必要的。文中介绍了一种在 PSCAD/EMTDC 环境下, 模拟一个实用的光伏电池阵列模型的方法^[1]。

1 光伏电池工作特性

1.1 光伏电池组的数学模型

光伏电池是利用某些材料组成的半导体 PN 结在受到太阳光照时产生光伏效应, 直接将太阳辐射能转换成电能的装置。图 1 为光伏电池的等效电路^[2,3]。

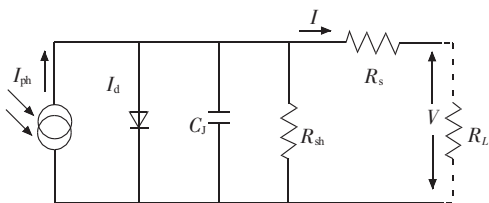


图 1 光伏电池的等效电路

在建立光伏电池的实用数学表达式时, 需要进行一些近似处理, 简化后的 $I-V$ 特性方程为:

$$I = I_{sc} \times [1 - B_1 \times (e^{V/(B_2 V_{oc})} - 1)] \quad (1)$$

式中: I 为光伏电池的输出电流; I_{sc} 为光伏电池短路电流; V 为光伏电池的输出电压; V_{oc} 为光伏电池开路电压; B_1, B_2 为待定系数。

在最大功率点处近似满足下式:

$$e^{V_m/B_2 V_{oc}} - 1 \approx e^{V_m/B_2 V_{oc}} \quad (2)$$

在最大功率点有 $I = I_m, V = V_m$, 则由式(1)和式(2)

可解得:

$$B_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \times e^{V_m/B_2 V_{oc}} \quad (3)$$

$$B_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) \times [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \quad (4)$$

式中: I_m 为光伏电池最大功率点电流; V_m 为光伏电池最大功率点电压。

由式(3)、(4)可知, 在电池参数 I_{sc}, I_m, V_{oc}, V_m 给定的条件下, B_1, B_2 为常数, 代入式(1)得到光伏电池的 $I-V$ 特性。

当光照强度、温度变化时, 电池的参数也会发生变化, 当光伏电池当前光照强度为 S , 温度为 T , 就会得到当前的电池参数 $I_{sc-new}, I_{m-new}, V_{oc-new}, V_{m-new}$, 进而得出 B_{1-new}, B_{2-new} 。则当前的电池参数可通过下列式子得到:

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (6)$$

$$I_{sc-new} = I_{sc} (\frac{S}{S_{ref}}) (1 + a \Delta T) \quad (7)$$

$$I_{m-new} = I_m (\frac{S}{S_{ref}}) (1 + a \Delta T) \quad (8)$$

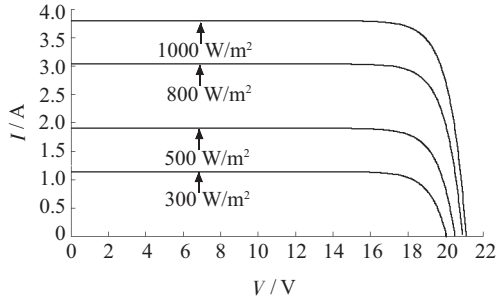
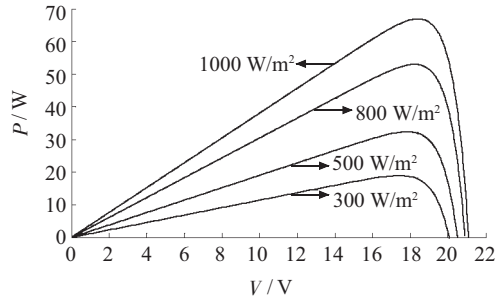
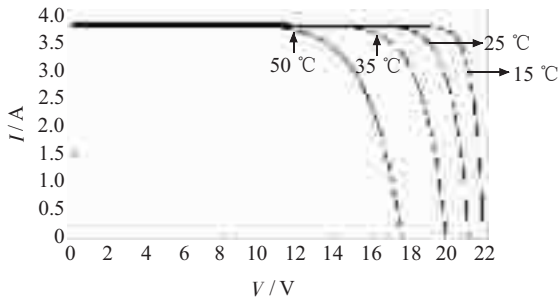
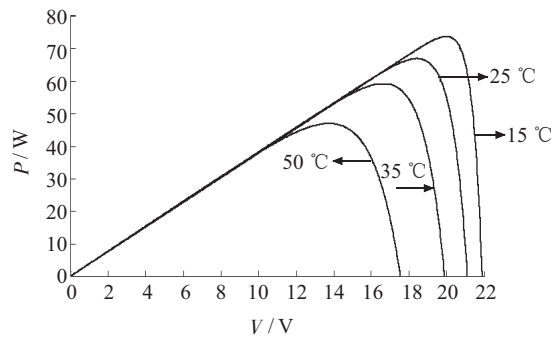
$$V_{oc-new} = V_{oc} [(1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S)] \quad (9)$$

$$V_{m-new} = V_m [(1 - c \Delta T) \ln(e + b \Delta S)] \quad (10)$$

式中: T_{ref} 为光伏电池参考温度; S_{ref} 为光伏电池参考日照强度; a, b, c 为光伏电池内部系数。

1.2 光伏电池的输出特性

太阳能光伏电池受外界很多因素(光照强度、温度等)影响, 因此其输出具有明显的非线性。仿真得到的不同光照强度下、不同温度下, 光伏组件的 $I-V, P-V$ 特性曲线如图 2 所示^[5]。

(a) 25 °C 时光伏组件的 I - V 特性(b) 25 °C 时光伏组件的 P - V 特性(c) 光照强度 1000 W/m² 时光伏组件的 I - V 特性(d) 光照强度 1000 W/m² 时光伏组件的 P - V 特性图 2 光伏组件的 I - V 和 P - V 特性曲线

2 基于阈值电压的最大功率点跟踪(MPPT)控制

光伏电池在一定的温度和光照条件下其输出特性曲线为单凸峰形曲线, 当光伏电池的端电压 V 为 V_m 时, 其输出功率 P 达到最大功率点功率 P_m , 同时电流 I 为 I_m ; 当光伏电池的端电压小于 V_m 时, 其输出功率随电池端电压上升而增加; 当光伏电池的端电压大于 V_m 时, 其输出功率随端电压上升而减小。可通过控制端电压, 使光伏电池工作在最大功率点^[6]。

文中采用改进扰动观察法实现 MPPT, 在传统的

扰动观察法的基础上加一个电压检测判断部分, 在检测到最大功率点附近时就减小扰动步长。这样可在最大功率点外取较大的扰动步长, 以提高响应速度, 又可在最大功率点附近取较小的扰动步长, 以提高跟踪精度, 减少摇摆造成的能量损失。

先让光伏电池按某一电压值输出, 计算扰动前光伏电池的输出功率, 测得输出功率; 然后在此电压基础上给一个扰动再计算输出功率, 比较前后测得的 2 个功率值。若功率值增加了, 则继续给相同方向的扰动; 若功率值减少了, 则给反方向的扰动。如图 3 所示, P_k 为当前的采样值, P_{k-1} 为上一次的采样值。在整个扰动过程中不断比较 V 与 V_m , 若 $|V - V_m| \leq th$, 即在最大功率点附近, 则减小扰动步长。th 为阈值, 要适当选取。

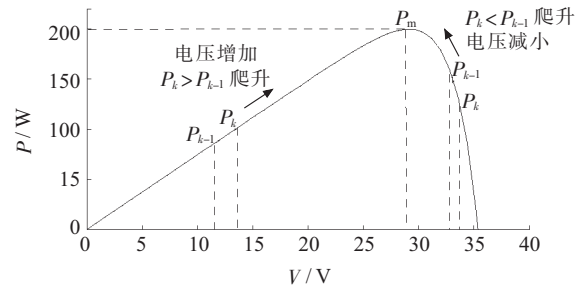


图 3 扰动观察法示意图

3 光伏电池并网的基本模型

光伏并网装置分单相和三相光伏并网装置, 单相光伏并网装置输出电压为 50 Hz 交流 220 V, 多用于小型的用户系统, 其运行功率因素和波形由控制器性能决定; 三相光伏并网装置输出电压为线电压 50/60 Hz 交流 380 V 或者更高的电压等级, 其中 60 Hz 为美国和日本标准, 50 Hz 为中国和欧洲标准。三相并网装置多用于容量较大的并网系统, 输出波形采用正弦波方式, 功率因素接近 1^[7]。

光伏电池发出的是直流电能, 需要逆变器将其变换为交流电提供给用户。此外, 逆变器还能对光伏电能进行自动稳压, 可以改善光伏发电系统的供电质量, 联网型光伏发电系统也需要通过交流逆变器来并网。

为典型的三相光伏并网发电系统(GCPS)如图 4 所示, 该系统由光伏电池、直流母线、电压源型逆变器(VSC)、滤波器及电力系统组成。

光伏并网系统采用电压型逆变器时, 其连接的电感是必不可少的。光伏逆变器本身是电压源型逆变器, 它与电网连接, 由于电网本身也是电压源, 2 个电压源不能直接相连接, 否则会造成逆变器损坏。逆变器向电网输送有功和无功功率分别为^[8]:

$$P = U_g \times U_s \times \sin \delta / X_L \quad (11)$$

$$Q = U_g \times (U_c \times \cos \delta - U_s) / X_L \quad (12)$$

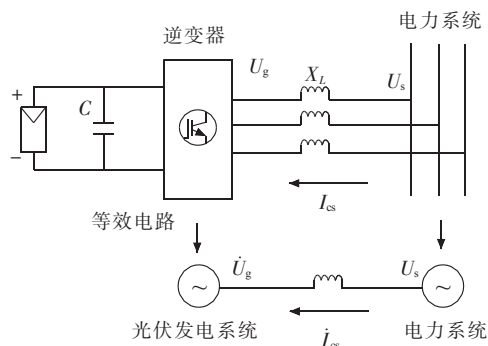


图 4 GCPS 结构

式中: δ 为逆变器输出电压超前系统电压的角度(弧度单位), 当 $\delta < 5^\circ$ 时, 上述公式可以近似为

$$P = U_g \times U_s \times \delta / X_L \quad (13)$$

$$Q = U_g \times (U_c - U_s) / X_L \quad (14)$$

在 PSCAD/EMTDC 中建立了光伏电池并网的仿真模型, 如图 5 所示。模型包括光伏电池阵列, MPPT 控制模块, 空间矢量调制(SVPWM)的 VSC, 三相 LC 滤波器, 阻性负荷, 大电网用接地电源来表示^[9]。

为了实现有功功率和无功功率的解耦控制, 引入同步旋转 dq 坐标系。光伏电池的 P/Q 控制包括外环功率控制和内环电流控制, 功率控制提供电流控制环节的参考值, 电流控制提供 SVPWM 的参考电压 dq 分量信号。逆变器控制的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = v_{sd} - v_d - \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = v_{sq} - v_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\begin{cases} v_d = v_{sd} - \omega Li_d - (k_p + \frac{k_i}{s})(i_{dref} - i_d) \\ v_q = v_{sq} - \omega Li_q - (k_p + \frac{k_i}{s})(i_{qref} - i_q) \end{cases} \quad (16)$$

4 动态特性仿真分析

在 PSCAD 中对光伏电池并网模型进行仿真分析。用 C 语言对 MPPT 算法编程, 建立 MPPT 控制模块, 用指针储存上 1 s 的 V 和 I 数值, 与下 1 s 的数值进行比较, 循环计算得到 V_{ref} 的数值。由图(6—9)可以发现, GCPS 在光照强度突然变化时的响应迅速且准确。

图 6 是光照强度变化曲线, 在 $t=4$ s 时, 光照强度从 300 W/m^2 增大到 1000 W/m^2 , 经过 3 s 后在 $t=7$ s 时刻光照强度从 1000 W/m^2 下降为 500 W/m^2 。

由于光伏阵列固有的二极管输出特性, 其输出功率能迅速跟随光照强度的变化, 而逆变器的功率控制使得逆变输出的功率与光伏阵列输出功率相比有短暂的滞后。光伏电池输出的电压能在光照变化时追踪 V_{ref} , 由于 V_{ref} 一直有小幅度波动, V_{pv} 也一直有微小波动, 但基本维持平稳。输出电流跟随电压变化。从图 9 中可以看出, 300 W/m^2 光强下的最大功率约为 170 W, 500 W/m^2 光强下的最大功率约为 260 W, 1000 W/m^2 光强下的最大功率约为 560 W。此光伏系统在光照强度突然变化时, 其输出有功功率能快速跟踪相应光照强度下的最大功率, 无功功率仅在光照变化时有小幅波动。

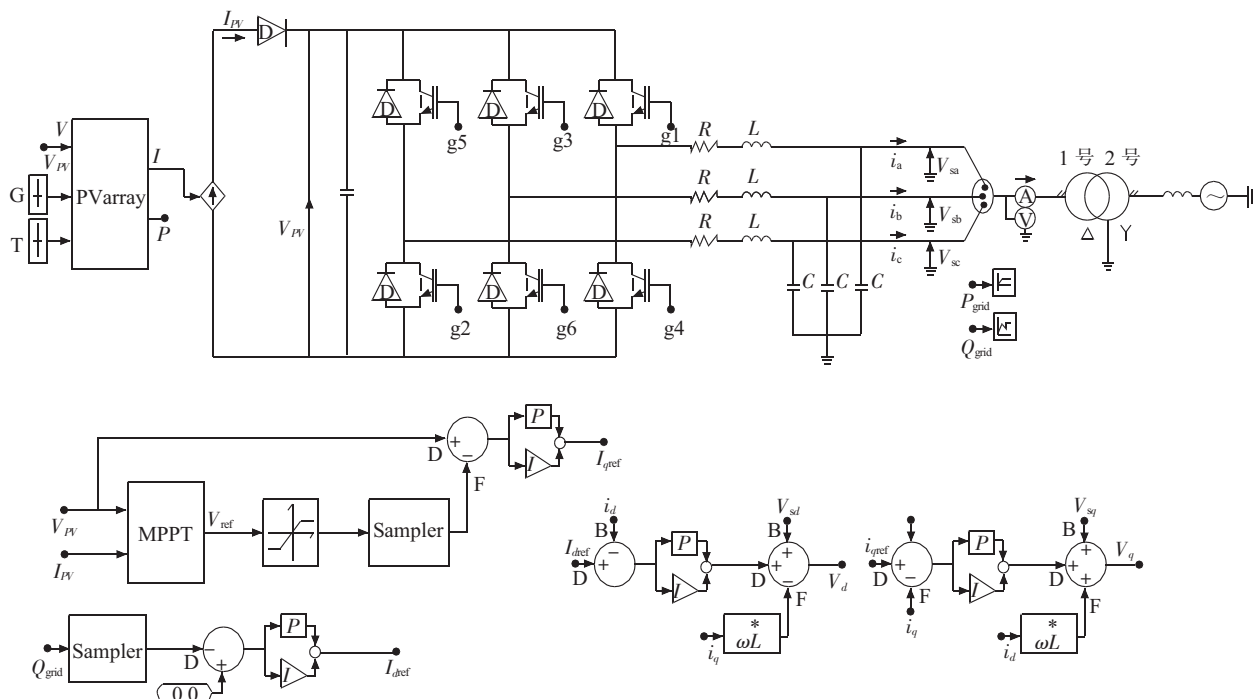


图 5 GCPS 仿真模型

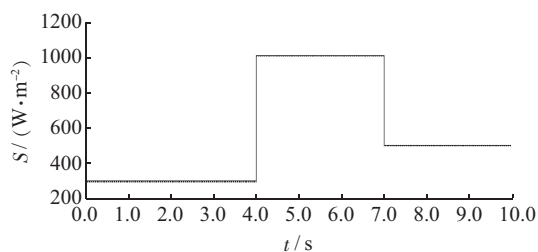


图6 光照强度

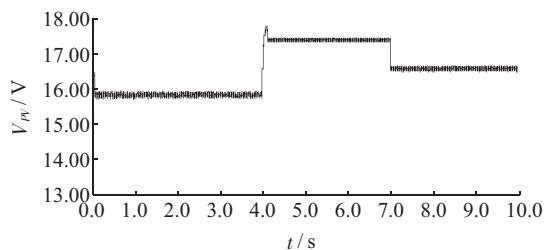


图7 电池输出电压

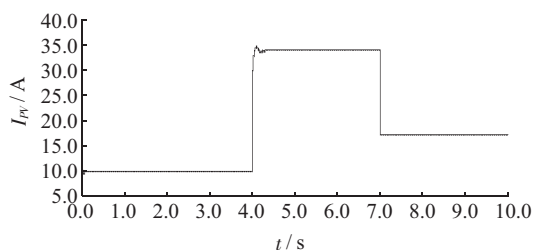


图8 电池输出电流

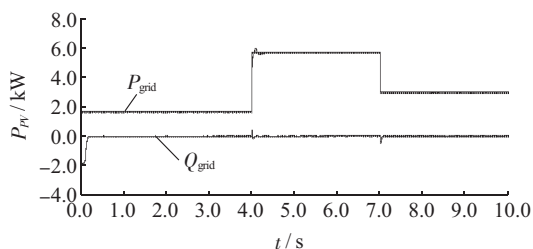


图9 电池输出功率

5 结束语

通过分析光伏电池内部原理及其等效电路, 建立其数学模型, 分析了光伏电池的输出特性, 应用 PSCAD 构建光伏电池并网的基本模型进行动态特性仿真分析。仿真结果表明: 光伏电池阵列模型输出基本与实际输出相似。输出电压及电流受光照强度和温度变化的影响, 但在任意温度和光照强度下都存在一个

最大功率输出点。应尽量使光伏电池阵列工作在该点, 这样才能提高光伏电池阵列的利用率。模型参数的设置方便快捷、仿真速度快、收敛性好。该模型的建立为光伏发电系统的仿真及各种控制方法的验证提供了较好的仿真激励源。

参考文献:

- [1] ARDESHNA NIKHIL K, CHOWDHURY BADRUL H. Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2010; 1-8.
- [2] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. The CERTS MicroGrid Concept [EB/OL]. [2009-04-10]. http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/researchdo/certsdocum0/certspubli/certsmicro_grid-whitepaper.pdf.
- [3] ZOKA Y, SASAKI H. An Interaction Problem of Distributed Generators Installed in a MicroGrid [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, China, 2004: 795-799.
- [4] HUSSEIN K H, MUTA I, HOSHINO T, et al. Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(1): 59-64.
- [5] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
- [6] XUE J H, YIN Z D, WU B B, et al. Design of PV Array Model Based On EMTDC/PSCAD [C]//Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009, 2009; 1-5.
- [7] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] 蔡先武. 光伏并网系统中的最大功率点追踪控制 [J]. 电子工业专用设备, 2008(11): 48-52.
- [9] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.

作者简介

易桂平(1981), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 从事电力电子技术应用、微网电能质量方面的研究工作;
胡仁杰(1962), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 从事光伏发电、电能质量管理及超级电容器储能方面的研究工作。

Solar Photovoltaic Battery Modeling and Dynamic Characteristics Simulation

YI Guiping, HU Renjie

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The solar energy battery is the core part of photovoltaic generating system, so the photovoltaic battery attracts lots of researchers' attention. This paper analyzed operational characteristic of solar energy battery plate. Simulation models of photovoltaic cells and MPPT are built in PSCAD/EMTDC software. Simulation results show that the output power of photovoltaic cells can track maximum power point well in the condition of light intensity changes and can produce maximum power in different light conditions

Key words: photovoltaic array; PSCAD simulation; maximum power point

新能源发电与电动汽车充换储站协调运行研究

薛钟兵, 彭 程

(扬州供电公司, 江苏 扬州 225009)

摘 要:作为智能电网建设的重要组成,一流配网其发展直接关系到新能源的接入与电动汽车的推广应用。结合当前一流配网的发展实际,分析了新能源发电和电动汽车能量补给的协调运行适应性;对比已有示范工程,提出了新能源与电动汽车充电站协调运行的模式,即新能源依靠充换储一体化站提高消纳能力,实现整体效益最大化;结合新能源、电动汽车充电站和一流配网发展现状,提出了相关建议。

关键词:新能源发电;充换储一体化站;一流配网;电动汽车

中图分类号:TM910.6

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0036-03

随着能源危机和环境污染问题的加剧,全球各国对新能源的开发推广日益重视。近年来,我国也针对新能源发电频频出台相关扶持政策,国内光伏发电、风力发电等得到积极发展。但由于光伏和风电的间歇式和随机性特点,其一直面临并网难的困扰,这在一定程度制约了新能源的发展^[1,2]。另外,同样受能源和环境问题的影响,节能减排和电能替代战略被逐渐提上议程,电动汽车因此获得极大关注,其被认为是新一轮经济增长突破口和实现交通能源转型的根本途径。然而,传统电网难以满足电动汽车快速有序的充电需求,加上续航里程有限,因此一直发展缓慢。但不容忽视的是,电动汽车动力电池储能潜力巨大,一旦规模化应用后将对电力系统产生革命性影响^[3]。而如今,电网发展正处于传统电网向智能电网的转型期,配网建设逐步展开,这为电动汽车友好接入、有序充电提供了重要的技术支撑。在配网环境下,电动汽车通过充换储一体化站集中有序充电、换电,并充分利用站内电池的储能潜力为新能源接入电网服务,以平抑新能源发电功率波动,实现新能源发电、电动汽车和电网运行效益最大化^[4]。文中分析了新能源发电和电动汽车能源补给方式的协调运行适应性,对比已有示范工程建设,提出了一流配网下新能源与电动汽车充换储一体化站协调运行的网络结构。

1 协调运行适应性分析

1.1 新能源发电特点

新能源具体包括太阳能、风能、地热能、海洋能等,其中最具规模开发前景和较大经济效益的当属太阳能和风能,而应用这 2 种能源发电最典型的形式即为光伏发电和风力发电^[5]。太阳能受光强、温度等因素影响较为明显,因而光伏发电具有很大的随机性和间歇性;同样,风能也受自然因素影响较大,风力发电

也具有很大的不稳定性^[6-8]。而这种随机波动和不稳定特点势必造成其并网运行时难以控制,针对这一问题,目前解决方案是依靠增设储能环节平抑功率波动、减少对电网冲击。但储能单元规模化应用成本高昂,因此,目前风力发电和光伏发电并网容量相对不大,储能技术成为制约当前其大规模开发利用的一大瓶颈。

1.2 电动汽车能源补给特点

电动汽车一般而言可大致分为 3 种:纯电动车、混合动力电动车和燃料电池电动车。而现阶段应用最广泛的为混合动力电动车,其特点在于采用至少包括常规能源汽油和电池 2 种动力驱动,可有效解决纯电动续航里程短的问题,虽然会产生一些污染,但相比传统内燃机汽车环保低碳很多。

除了高性能电机和电池储能技术两大历史制约因素外,电动汽车能源补给技术无疑是影响当今电动汽车发展的关键原因。一方面,能源补给设施尚不完善,通常,电动汽车的能源补给方式有以下 3 种^[9-11]:

(1) 通过分散式充电桩充电。这种即插即用类充电方式一般分散设置于小区、单位内等集中生活、办公场所。其特点为多采取慢充模式,能源补给时间较长。

(2) 通过大型充电站充电。这种方式类似于常规的加油站,一般设立于市内商业区、办公区、高速路边等,用于能源的较快速补给。

(3) 通过换电站更换电池。其直接利用站内已充满的电池更换,能源补给速度更快。另外,这种方式可采取电池租赁模式,很大程度上节约了用户电池成本支出。

另一方面,电动汽车能源补给时对电网运行也有很大影响。一旦电动汽车规模接入电网,如果能源补给随机无序,将加剧负荷侧的功率波动,影响安全性和电能质量,其高功率、低电量的特点,给电网运行的经济性带来很大影响。

1.3 协调运行适应性

电动汽车换电站由于其能源补给方式的特点决定

了站内必然储备有大量电池资源,而这些电池资源如果闲置势必造成浪费。考虑到新能源发电并网对储能介质的需求,如能将换电站闲置电池结合新能源发电加以充分利用,必会对新能源发电的发展起到很大促进作用^[11-13]。一方面,可充分利用新能源发电为电池充电;另一方面,可利用闲置电池为新能源发电储能、并网。另外,随着一流配网工程的推进,电动汽车电池集中有序充电也可以得到保证^[14],依靠配网,新能源发电的接入也更为可靠。因此,考虑电动汽车充换储一体化站结合新能源发电协调运行具有一定的适用性^[15]。

2 现有示范工程运行模式

目前,一流配网工程建设在全国范围内尚未大面积推广,只在江苏等地区示范建设,其中以扬州经济开发区智能电网综合示范工程最为典型。

该工程依靠先进的配电自动化技术实现了新能源发电的并网和电动汽车充电站的友好接入。新能源发电主要考虑接入扬州晶澳太阳能有限公司的屋顶光伏,装机容量为1 107.6 kW。考虑到平滑光伏发电出力及满足微电网孤岛运行时的负荷需求,同时配置了总容量为10 000 A·h的卷绕式铅酸蓄电池作为储能系统。光伏发电和储能系统接入低压母线,经过升压变压器后统一并入10 kV的配网。而电动汽车充电站作为江苏省首家智能站,未来考虑升级改造应用基于主动削峰填谷、用户需求侧响应的充电设施负荷自适应控制策略的综合智能运行管理系统并实现其与配电调度自动化系统、用电信息采集系统及营销系统的互联。

虽然该工程作为一种模式对于新能源发电的开发和电动汽车推广具有很强的示范引领作用,但新能源发电和电动汽车充电站独立运行,没有充分发挥它们的互补经济性。

3 协调运行模式

3.1 协调运行网络模型

基于新能源发电与电动汽车充电站独立运行的不足,并考虑配网下协调运行的适应性,文中提出了新能源发电与电动汽车充换储一体化站协调运行,其网络拓扑模型如图1所示。

图1中示出了现行调度模式下新能源发电与电动汽车充电站在配网中的协调运作架构。新能源发电依靠电动汽车充换储一体化站这一媒介实现向电网传输能量,该过程通过配网网络中央控制系统由调度部门掌握指挥。配网网络中央控制系统主要负责各站间协调控制,起桥梁纽带作用。

具体运行模式为:新能源发电通过充换储一体化站为站内电池充电,当电动汽车需要进站补给能源时,

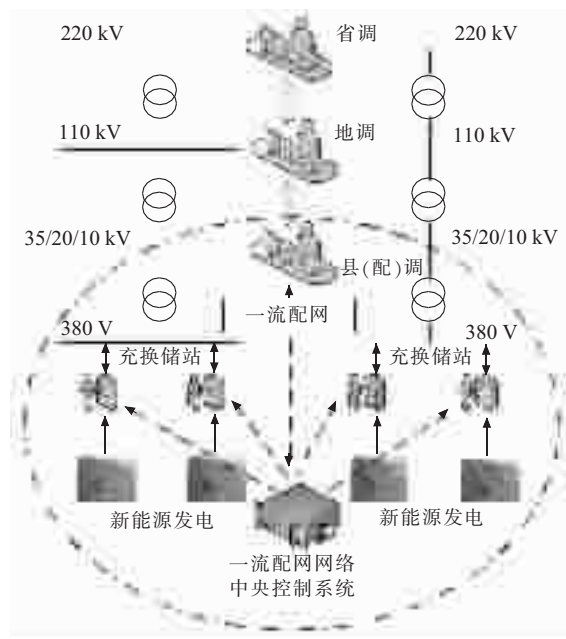


图1 新能源与充换储一体化站协调运行网络模型

可直接更换电池。至于站内闲置的电池,用作新能源发电并网的储能单元,其并网情况由配网网络中央控制系统向调度部门申请,由调度部门决策发令,中央控制系统负责协调执行。

另外,对于少数电动汽车需进站即时充电,也优先考虑使用新能源发电充电,只有当新能源发电不足时才考虑接入电网。

3.2 站内协调运行模式

为进一步说明新能源发电与电动汽车充换储一体化站协调运行工作原理,以下从站内加以阐述。图2所示即为充换储一体化站与新能源发电站内协调运行模式。

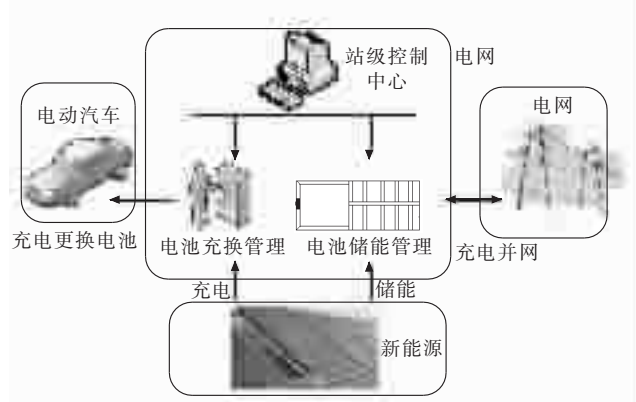


图2 充换储一体化站与新能源发电站内协调运行模式

由图2可以看出,充换储一体化站通过站级控制中心控制整个站内运行,主要包括电池充换管理和电池储能管理两方面。电池充换管理主要针对电动汽车的充电和更换电池,其中,充电包括利用新能源发电对电池的充电及利用电网对电池的充电。而电池储能管理则指利用新能源发电对闲置电池储能以及通过此类电池并网。当然,并网和充电非随机进行,而是由站级

控制中心与前述的一流配网网络中央控制系统协调沟通,从而进行有序充电、并网。通常,电池储能优先利用新能源发电的电能,需要电网对电池储能时则尽量安排在夜间用电低谷时进行,而并网则选择在白天用电高峰时,这样可以保证在不影响电动汽车能量供给的前提下,一方面充分利用新能源,另一方面对电网起到移峰填谷的作用。

4 相关发展建议

(1) 综合考虑日常电动汽车更换电池需求和新能源发电并网储能需求,合理设计充换储一体化站电池容量和数量,保证基本不发生电池过剩或电池不够用,使整体效益最大化。

(2) 进行站内电池日常利用率评估,及时做好站间电池调配协调。由于各站站内电池利用率以及新能源发电电量并不同,为了充分利用新能源发电,可及时做好站间协调以尽可能提供足够电池储能及并网。

(3) 加强电池梯次管理。电池长期使用容易老化,虽然不能作为电动汽车动力电池使用,但仍具有一定储能价值。因此,可以进行电池梯次管理,充分挖掘这部分电池潜力,用于新能源发电并网时的储能单元。

5 结束语

可再生能源发电和电能替代是当前倡导环保、实现可持续发展的两大重要举措。长期以来,新能源发电虽受国家政策大力支持,但受传统电网吸纳能力和发电成本(新能源发电建设投资成本)限制,新能源发电并未规模化应用。同样,电动汽车也因电网接入问题及电池成本过高而未市场化运行。从这一实际出发,结合当前电网发展的新阶段,在分析新能源发电与电动汽车能源补给协调运行适应性的基础上,提出并探讨了新能源发电与电动汽车充换储一体化站协调运行的模式,最后,针对该模式具体的实现细节,提出了一些建议。当然,与已有示范工程相比,该方案只能作为另一

种新能源利用模式,具体经济效益需进一步评估研究。

参考文献:

- [1] 邢运民,张文娟. 新能源与可再生能源发电技术的发展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 50-52.
- [2] 赵异波,何湘宁. 新能源发电技术的最新进展[J]. 电子技术杂志, 2002(2): 1-4.
- [3] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
- [4] 马玲玲,杨军,付聪,等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
- [5] 李碧君,方勇杰,杨卫东,等. 光伏发电并网大电网面临的问题与对策[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(4): 52-59.
- [6] 朱雪凌,刘林飞,周伦燕. 风力发电并网对电网的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(6): 94-97.
- [7] 刘伟,彭冬,卜广全,等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.
- [8] 江林. 分布式光伏发电并网的国内外政策分析与启示[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 66-68.
- [9] 高赐威,吴茜. 电动汽车换电模式研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 891-898.
- [10] 陈良亮,张浩,倪峰,等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 11-17.
- [11] 张文亮,武斌,李武峰,等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
- [12] 张学清,梁军,张利,等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
- [13] 崔美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
- [14] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
- [15] 杨敏霞,刘高维,房新雨,等. 计及电网状态的充放储一体化站运行模式探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1202-1208.

作者简介:

薛钟兵(1987),男,安徽桐城人,助理工程师,从事地区电网调度运行与控制工作;

彭程(1977),男,江苏扬州人,技师,从事地区电网调度运行与控制工作。

Research on the Coordinated Operation of New Energy Power Generation and EV Charging Storage Station

XUE Zhongbing, PENG Cheng

(Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China)

Abstract: As an important part of the smart grid, the first-class distribution network and its development are directly related to the access of new energy and the popularization of EV. Combined with the actual development of distribution network, this paper presents the study on the coordinated operation of the new energy power generation and EV charging storage station. Firstly, the coordinated operation adaptability of energy supply between new energy power generation and EV is analyzed. Based on this and compared with existing demonstration project, the coordinated operation mode which can improve the absorptive capacity and realize the overall benefit maximization is proposed. Last, some suggestions are put forward.

Key words: new energy power generation; charging storage station; first-class distribution network; EV

馈线自动化终端设备智能接入的研究

王川化

(江苏兴力工程建设监理咨询有限公司,江苏 南京 210024)

摘 要:在 IEC 61850 通信体系应用到馈线自动化的基础上,利用互换性原理实现终端设备的智能接入研究。基于资源定义机制和需求激励的资源匹配机制,利用地理信息系统(GIS)提供生产资源对象的 IP 地址实现了资源对象的自动匹配。提出通过主动获取 GIS 的实时拓扑关系,建立系统的工程实例化拓扑模型,实现了设备在系统中的对象化。将变电站配置描述语言(SCL)模型转换成公共信息模型(CIM),解决了馈线终端模型和配电主站模型不一致带来的差异性。通过对资源确定、关联、拓扑模型的更新、资源对象的连接以及模型的转换,最终实现馈线终端的智能接入。

关键词:IEC 61850;地理信息系统;拓扑模型;变电站配置描述语言;公共信息模型

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0039-04

馈线自动化系统包含大量的现场终端设备,接入主要是依靠配电主站和终端之间人工配置信息点表传送三遥信息的方式实现^[1]。传统的馈线自动化系统由于通信体系的不完善,只解决了终端与主站之间数据传输问题,没有统一的数据模型,终端之间缺乏必要的说明和关联。现场大量的馈线终端接入将导致调试时间长、出错几率大。国际电工委员会制定的 IEC 61850 规范了智能终端的信息模型和信息交换模型,为实现智能电子设备(IED)的互操作和互换性奠定了基础^[2]。以 IEC 61850 标准建立的馈线终端模型实现智能接入还存在两方面的问题^[3,4],一是馈线结构发生变化时拓扑模型的更新以及设备在系统中的对象化问题。二是在接入过程中和原配网主站的数据模型存在差异^[5,6],需要实现馈线终端模型向配电主站模型的转换和融合。

目前,关于 IEC 61850 的馈线终端接入的研究还比较少。文献[7]研究了通过配电主站读取终端配置(ICD)文件从中解析出三遥信息表,但配电馈线自动化系统的拓扑结构经常发生变化,系统集成商需要重新对系统进行集成配置,并且该方法无法实时获取数据模型。文献[8]提出了 Discover/Register 配电终端自动发现模型。文献[9,10]研究了地理信息系统(GIS)可以建立馈线设备实时的通用信息拓扑模型。文献[11]利用建立中间模型实现变电站配置描述语言(SCL)模型和公共信息模型(CIM)的转换,通过文档转换实现数据的交换。但未实现涉及终端具体功能的量测模型、保护模型等的转换。文献[12]提出了考虑变电站设备拓扑关系的 IED 智能接入机制。基于终端接入存在的问题和研究现状,文中在配电网中实现 IEC 61850 通信体系的基础上,力图研究馈线结构发生变化时,不需要人工干预的情况下终端能智能接

入的功能。

1 馈线终端智能接入的原理

1.1 资源对象的定义

为了实现终端的智能接入过程,只能采用服务器配置方式,利用 IEC 61850 特有的抽象服务接口功能,读取馈线终端的数据模型。为了清楚数据模型的供需关系,借助文献[10]中的资源定义机制和需求激励匹配机制,把所有的数据模型划分为需求资源对象和生产资源对象。生产资源对象是终端设备能向系统提供资源的对象,需求资源对象是需从终端设备获取资源的对象。

1.2 馈线拓扑模型的自动生成

目前,配电生产过程控制与调度自动化系统和 GIS 实现了一体化功能,将 GIS 的全网设备数据模型和图形转换成配电数据采集与监视控制系统(SCADA)数据模型和图形,一体化模型如图 1 所示。

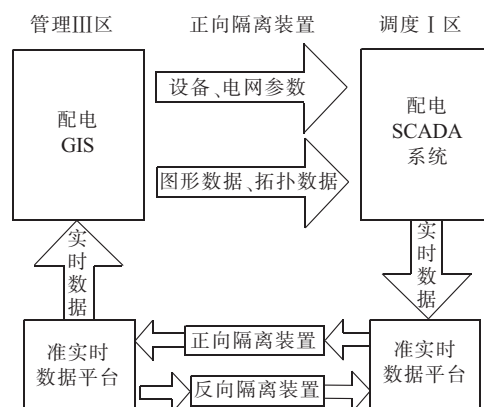


图 1 配电 SCADA 和 GIS 一体化

文中利用 GIS 系统给配电主站提供的设备属性参数中馈线终端单元(FTU)的 IP 地址,关联需求资源对象和生产资源对象。GIS 系统中设备(馈线线路中主要指开关设备)的属性定义如下:

设备属性

{ ID;
设备类
设备类别;
设备名称
FTU 的 IP 地址;
其他;}

CIM 拓扑模型主要由端点(Terminal)和连接点(CN)组成,设备通过端点和连接点的关系连接在一起,图 2 是一个简单的馈线接线和它的 CIM 拓扑模型^[13],其中 CB 为开关设备,开关设备有 2 个端点,母线设备形成 1 个端点,线路有 2 个端点。每 2 个端点之间形成 1 个 CN,通过连接点来实现设备之间的连接关系。在已经形成了拓扑图的 GIS 系统中馈线结构变化时,只需要在相应的位置画上一个点,GIS 系统就会根据拓扑图中点的属性,自动产生该点的属性字段,用户只要根据该点的属性填上相应的属性即可。若馈线拓扑结构未发生变化,但设备属性发生了变化,此时也需通知 GIS 系统更改相应设备的设备属性。

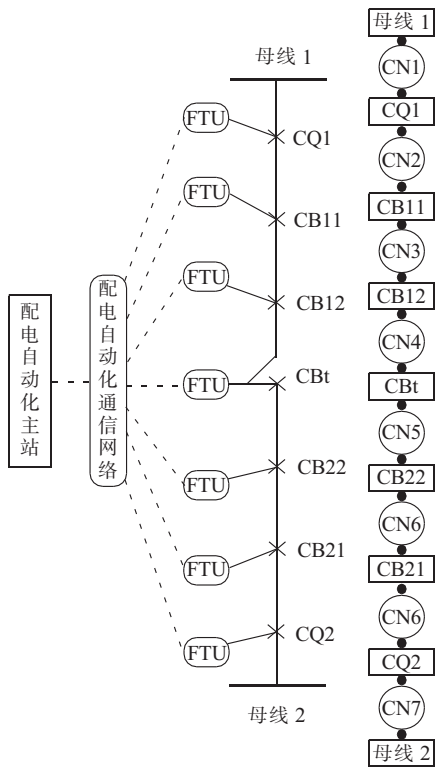


图 2 馈线接线图和 CIM 拓扑模型

假设图 2 中的 CB11 和 CB12 之间增加一条线路,线路上增加开关设备 CB31,如图 3 所示。此时, CB31 个端点 T5、T6 将通过连接点 CN9、CN10 与相邻设备 CB11、CB12 连接在一起。新设备通过拓扑模型更新使其在系统中实现对象化过程。

1.3 SCL 模型和 CIM 模型的融合

馈线终端 SCL 模型和配电主站 CIM 模型之间无论在建模方式还是模型的内容上都存在很大的不同,

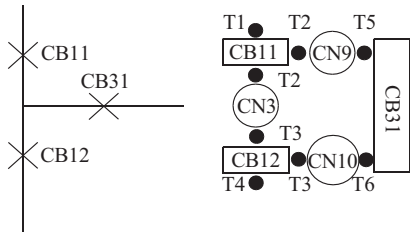


图 3 实时的拓扑模型

要想实现馈线终端的智能接入,就必须把馈线终端提供的数据模型转换到配电主站的模型中。

2 馈线终端智能接入的实现过程

2.1 资源对象的确定

馈线终端设备接入上电时,激励互换性功能组件程序运行,查询系统中的所有资源对象,确定需求资源对象和生产资源对象。

2.2 资源对象的关联

(1) 当馈线拓扑结构未发生变化时。首先配电主站需要调用 GIS 系统中新接入上电的 FTU 所对应设备的设备属性。需求资源对象通过设备属性中 FTU 的 IP 地址与生产资源对象一一关联。

(2) 当馈线拓扑结构发生变化时。馈线拓扑结构发生变化后,新接入的生产资源对象可能在配电主站中没有原数据模型,这样就导致需求资源对象数目和需要关联的生产资源对象数目不一致。因此,同样先调用 GIS 系统的新接入上电 FTU 所对应设备的设备属性,互换性组件程序激励需求资源对象通过 IP 地址与生产资源对象关联。剩余的生产资源对象则由互换性组件通过其 IP 地址关联读取数据模型,从而在主站建立的新数据模型。

2.3 馈线拓扑模型的更新

GIS 系统对馈线拓扑结构自动分析和生成,当馈线结构变化后,GIS 系统将通过发送增量模型更新主站中的拓扑关系。

2.4 资源对象的连接

通过抽象通信服务接口(ACSI)实现资源对象间数据模型的交换。

2.5 数据模型的转换

转换的方法是通过建立中间模型来实现,中间模型是以 CIM 模型为基础,把馈线终端模型的相关节点数据映射到中间模型的相应节点中。

3 数据模型的融合

3.1 量测数据

基于 IEC 61850 标准的馈线自动化终端模型,是用 SCL 来描述的 SCL 模型,利用可扩展标记语言架构(XML Schema)解析的 XML 文档。馈线终端的 SCL

模型中有 3 个主要的类:逻辑节点类(tLN)、数据(tDOI)、数据属性类(tDAI)。馈线终端模型包括电流互感器(TCTR)、电压互感器(TVTR)、合并单元(MMXU)、计量(MMTR)、开关设备(XCBR)、开关控制器(CSWI)和瞬时过电流保护(PIOC)等逻辑节点功能。配电主站中的量测数据是由量测包建模,1 个量测数据可以通过 2 种方式与相关的设备相连。一是通过与电力资源(Power System Resource)关联,包含于 1 个 Power System Resource。二是通过导电设备(Conducting Equipment)的一个端点 Terminal 关联。2 种模型的共同量测数据节点如表 1 所示。Name 是 IEC 61970 赋予的名字,aliasName 是 IEC 61850 系列中类型赋予的名字。

表 1 量测节点

属性名	单位	描述
Current	Amps	非三相电路的电流
Frequency	Hz	频率
ThreePhasePowerFactor	TotPF	三相电路的平均功率因数
ThreePhaseApparentPower	TotVA	三相电路的总视在功率
ThreePhaseReactivePower	TotVAr	三相电路的总无功功率
ThreePhaseActivePower	TotW	三相电路的总有功功率
ApparentPower	VoltAmp	非三相电路的视在功率
ActivePower	Watts	非三相电路的有功功率
ReactivePower	VoltAmpR	非三相电路的无功功率
Voltage	Volts	电压
ApparentEnergy	TotVAh	视在能量
ReactiveEnergy	TotVArh	无功能量
ActiveEnergy	TotWh	有功能量
LocalOperation	Loc	当地运行
AutomaticControl	LTCBlk	LTC 闭锁的自动控制
SwitchPosition	Pos	开关位置
Operation Count	OperCnt	运行计数

3.2 保护数据

配电主站中的保护数据是由保护包作为核心包和电线包的扩展用来建立保护设备,如继电器的信息模型。保护包中的数据模型如图 4 所示,图中展示的是 1 个电流继电器(CurrentRelay)的数据模型,模型包含 4 个数据属性:名称(Naming.name)、描述(Naming.description)、电流限制点(CurrentLimit)和动作断路器(Operates_Breakers),Operates_Breakers 包含其他的一些资源(Resource)。

3.3 数据模型的转换

通过对 2 种模型差异性的分析,用节点映射的方式实现文档的转换。由于篇幅的原因,量测数据只分析 XCBR 逻辑节点的转换,其他节点类似。需要注意的是每个量测类的属性(ConductingEquipment.Resource)需要从主站实时的馈线拓扑模型中断路器的 ID 或对

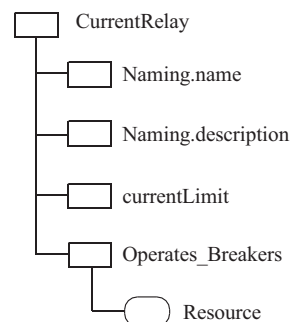


图 4 保护包数据模型

应端点名称中映射。如图 5 所示,SCL 模型中的数据 Amp 相应的值 Amp.Val 映射到 CIM 模型中的属性 normalValue 中,这样就顺利地把 TCTR 逻辑节点的电流采样值转换到了量测包中。同理 TVTR 的电压采样值也是通过同样的方式映射到量测包模型中。由于这些量测值与连接性相关,因此,把馈线拓扑模型中相应电流互感器和电压互感器的 Terminal 的属性 name 映射到 CIM 模型中每个量测的 Terminal 的属性 Terminal.Resource 中。

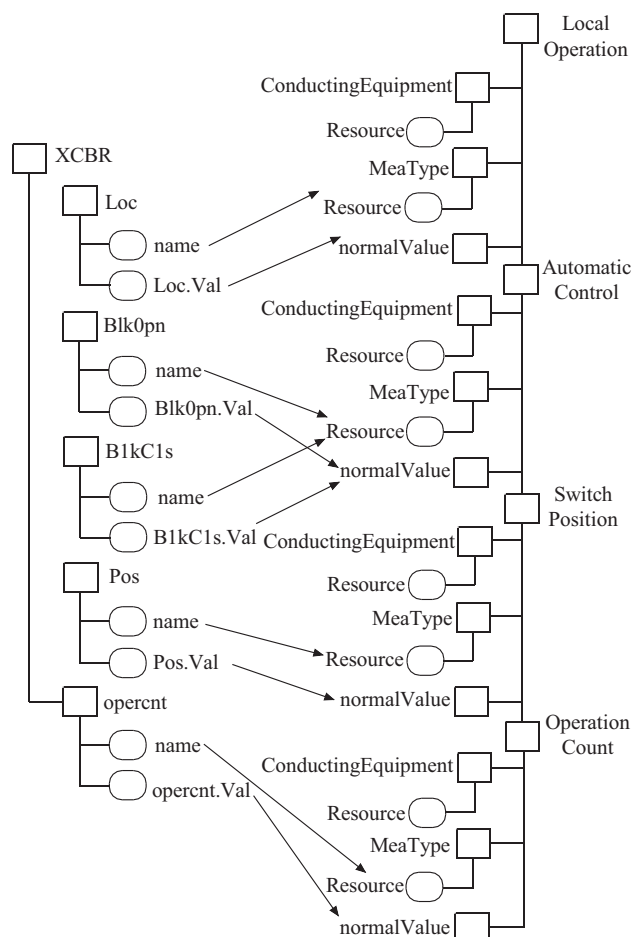


图 5 XCBR 逻辑节点数据映射关系

保护数据节点的转换如图 6 所示。保护包中的断路器属性(Operates_Breakers.Resource)是从馈线拓扑模型断路器的属性 name 中映射而来。

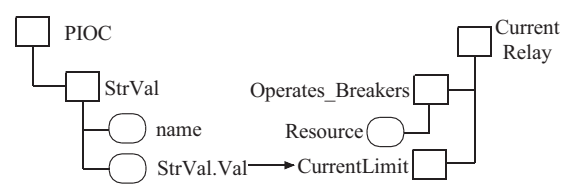


图 6 PIOC 逻辑节点数据映射关系

4 仿真与验证

在实验室搭建馈线终端智能接入的验证平台,其中设备有 5 台 PC 机分别是装置 A、B、C、D、E,1 台交换机,互换性客户端和服务端软件,报文分析软件(Wireshark)。验证平台如图 7 所示。装置 A 模拟配电主站,运行互换性客户端程序和关系数据库(SQL Server);装置 B 模拟馈线线路上的 FTU,运行服务器程序;装置 C 对资源对象交换过程的报文进行分析,运行 Wireshark;装置 D、E 分别模拟转换器和调度中心系统,运行 SQL Server 数据库。各个装置的 IP 地址如上图所示。装置 B 接入上电后,经过验证分析,读取的部分馈线终端数据如表 2 所示。

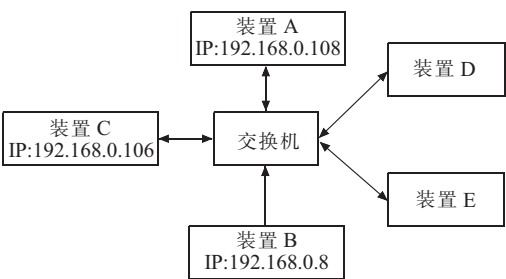


图 7 验证平台

表 2 馈线终端数据

类	属性	值
Breaker	name	Breaker_01
	MemberOf_EquipmentContainer	VL_02
	DOI	
DOI	name	Med
	Val	status-only
DOI	name	Loc
	Val	远方 / 就地
DOI	name	Pos
	Val	开 / 合
DOI	name	BlkOpn
	Val	status-only
DOI	name	BlkCls
	Val	status-only
DOI	Val	定值

表 2 所包含的数据模型是以 IEC 61850 标准,采用 SCL 语言的馈线终端数据,馈线终端数据包含若干的实例化的数据对象(DOI),每个 DOI 包含若干的属性,例如数据对象名称(name)、值(Val)。经过智能接入过程,数据模型转换后的 CIM XML 数据如表 3 所

示,该数据模型是基于 IEC 61970 建立的 CIM 数据模型,可以看出,DOI 已经转化成 IEC 61970 包含的逻辑节点类,例如动作类(Operation)、电流(Current)等。结果表明,文中提出的馈线自动化终端设备智能接入方法能够正确完成设备的配置。

表 3 CIM XML 数据

类	属性	值
Local	name	LocalOperation_01
	normalValue	远方 / 就地
	Conducting	Breaker_01
Operation	Equipment	
	name	SwitchPosition_01
	normalValue	开 / 合
Switch	Conducting	Breaker_01
	Equipment	
Position	name	AutomaticControl_01
	normalValue	status-only
	Conducting	Breaker_01
Automatic	Equipment	
	Control	
	Conducting	Breaker_01
Current	Operate_Breakers	Breaker_01
	Relay	
	CurrentLimit	定值

5 结束语

国际电工委员会制定的 IEC 61850 意在实现设备的互操作性,而互换性是它的最终目的。文中基于互换性原理,利用 GIS 系统关联资源对象、更新配电主站的拓扑模型。通过节点映射方式把馈线拓扑模型和终端模型转换生成 CIM XML 文档数据,实现数据模型的融合。以配电主站中的保护数据为例,对节点映射的方式实现文档的转换方法进行了研究,最后对论文提出的方法进行仿真,成功利用馈线终端数据生成了 CIM XML 数据,验证了馈线自动化终端设备智能接入方法的可行性。

参考文献:

[1] 陈冲,陈小伟,沈明慷,等. 含分布式电源的配电网馈线系统保护研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):6-10.

[2] 任翔,周心亮. 基于 IEC 61850 的变电站系统配置工具设计与实现[J]. 江苏电机工程,2012,31(1):21-23.

[3] 徐丙垠,李天友,薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):38-41.

[4] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):1-4.

[5] 陆岩,胡道徐,马文龙. IEC 61850 信息建模的反思与变通[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):68-70.

[6] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008:36.

[7] 石文江,冯松起,夏燕东. 新型智能配电自动化终端自描述功能的实现[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):105-109.

基于预制舱的配送式智能变电站设计

孙建龙¹, 鲁东海²

(1. 江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008; 2. 江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘要:针对目前电网建设难度加大, 变电站建设周期压缩, 生态环境对变电站建设工地的环保措施要求愈来愈严及变电站设备智能化、精细化程度不断提高导致现场施工愈加困难等一系列问题, 提出了一种基于预制舱的配送式智能变电站建设模式, 分析了该模式变电站的特点, 阐述了其设计方案。根据智能变电站的特点, 将变电站分为智能一次设备和集成二次设备的预制舱, 两者之间通过预制光缆、电缆连接, 对预制舱结构及舱内设备布置、接线、运行环境的设计方案进行了讨论, 结合工程实例给出了具体实施方案和技术经济效益分析, 为今后基于预制舱的配送式智能变电站建设提供了参考与借鉴。

关键词: 预制舱; 配送式; 智能变电站; 即插即用; 建设效率

中图分类号: TM633

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0043-05

我国变电站建设模式经过几十年的摸索已经形成较为成熟的模式, 在提高建设水平促进电网发展的同时也暴露出越来越多的问题, 如: 电网建设的投资力度和建设规模持续增加, 电网项目建设难度加大、周期加长, 作为电网最主要环节的变电站其建设周期不断压缩, 现场施工效率与建设质量的矛盾愈加突出; 电网建设要求与国民经济及社会发展相适应, 要节约用地、保护生态环境, 对变电站建设工地的环保措施要求愈来愈严格^[1]; 随着智能变电站发展, 变电站设备智能化程度不断提高, 现有建设人员不能很快适应, 无法满足建设进度要求; 变电站设备精细化程度不断提高, 接口愈加繁杂, 并伴随大量光缆使用, 而光缆较电缆更为容易受损, 对现场设备接线的要求越来越高; 现场调试工作量大, 调试环境恶劣, 且必须等到施工结束才能进行, 造成大量时间浪费, 降低建设效率等^[2,3]。为解决上述问题, 电力行业的工作者们一直在寻求一种新的变电站建设模式以替代传统变电站建设模式。随着装配式变电站的发展, 一大批基于预制建筑物^[4]、围墙、电缆沟、防火墙、构支架的全预制装配式变电站迅速崛起^[5,6], 在解决以往变电站建设模式固有缺陷, 实现“标准化设计、工厂化加工、配送式建设”的设计建设新方法方面初显成效。

目前, 装配式变电站建设模式方兴未艾, 国家电网公司又提出基于全新技术架构的配送式智能变电站概念, 预制舱的概念伴随着配送式变电站应运而生。文中提出一种基于预制舱的配送式智能变电站建设方案, 并详细阐述了其具体实施方案。

1 基于预制舱的配送式智能变电站框架

1.1 总体框架

基于预制舱的配送式智能变电站是一种全新概

念的智能变电站^[7], 它将变电站分为两部分, 智能一次设备和集成二次设备的预制舱: 智能一次设备是变电站的身体, 集成二次设备的预制舱是变电站的大脑, 其中智能一次设备由一次设备本体、传感器、智能组件和标准接口构成^[8], 集成二次设备的预制舱由各种保护、测控装置及为这些装置提供保护和标准接口的预制舱构成^[9], 智能一次设备和预制舱之间通过预制光缆^[10,11]、电缆连接。基于预制舱的配送式智能变电站框架如图 1 所示。

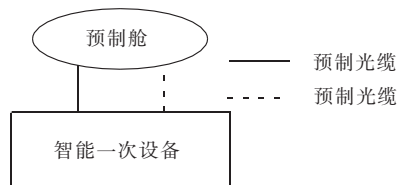


图 1 基于预制舱的配送式智能变电站框架

1.2 主要特点

基于预制舱配送式智能变电站具有如下主要特点:

(1) 大规模采用预制式二次设备。预制式二次设备即将二次设备集中布置在预制舱内, 由设备厂家统一集成安装后, 整体运输到现场, 就地布置在配电装置区, 舱内设备之间的连接与调试在集成商厂家完成, 对外配置标准的预制光缆、电缆接口。

(2) 即插即用的光缆、电缆连接方案。通过对变电站各设备之间信息交互内容与模式的充分分析与归纳, 总结出典型间隔(如出线、母联、主变、母线)的连接光缆、电缆的数量及规格, 进而将其接口标准化, 分别在智能一次设备端和预制舱端预制标准接口, 现场采用预制光缆、电缆连接, 实现即插即用。

(3) 现场施工与工厂化预制同步。变电站现场进行土建施工及电气一次设备安装调试的同时, 预制舱内二次设备在集成商厂家同步进行接线及调试, 无需等到前一步工序结束再进行, 大幅缩短建设周期。

2 预制舱结构及舱内设备布置方案

2.1 智能变电站预制舱结构

智能变电站预制舱要实现设备厂家统一集成安装,整体运输到现场,就地布置在配电装置区,需要分别对预制舱的外形尺寸、舱体材料、整体结构进行统筹考虑。

(1) 外形尺寸。目前预制舱尺寸基本参考集装箱尺寸选择^[12]。电力控制柜标高为 2260 mm,接入电 / 光缆分布在机柜顶部或底部,柜顶(底)上(下)方需要桥架及走线的空间,标准的集装箱内部净高度为 2394 mm,因此需要增加集装箱的高度,同时根据《超限运输车辆行驶公路管理规定》,预制舱横向尺寸不宜超过 2500 mm,长度不宜超过 13 000 mm,并尽量采用标准集装箱尺寸。目前主要选择的尺寸如表 1 所示 3 种。

表 1 标准预制舱规格

规格		尺寸(长×宽×高)/mm
20 尺	外	6058×2438×2896
	内	5898×2350×2646
30 尺	外	9125×2438×2896
	内	8965×2350×2646
40 尺	外	12192×2896×2438
	内	12032×2350×2646

(2) 舱体材料。舱体一般采用不锈钢材料,强度高、结构牢、焊接性和水密性好,通过采取超重防护体系喷漆处理提高抵抗腐蚀能力;封闭的金属六面体保证了舱体的电磁屏蔽性能。由于舱体置于户外,舱壁夹层应附着保温材料(如岩棉等),材料的防火性能应不低于 V2 级。舱内壁附保温材料厚度约为 45 mm,具有很好的隔热保温性能。

(3) 整体结构。考虑风荷载及抗震要求,主体结构采用 H 型钢柱和 H 型钢梁,梁柱间采用焊接或螺栓连接。舱体底部可加设水平或纵向工字钢或槽钢,加强舱体整体性。预制舱一端设标准双开门,作为设备输入通道,另一端设检修人员出入口即可。顶部增加斜顶,斜顶与箱顶保持 15° 角,预防积水,减少箱顶阳光照射。

2.2 智能变电站预制式二次设备布置方案

根据标准预制舱尺寸大小,有 2 种布置方式:

(1) 单列布置。屏柜布置于舱体中间,屏前预留 1000 mm 距离作为操作维护通道,屏后 750 mm 距离为检修更换插件的空间(如图 2 所示)。以 40 尺预制舱为例,可布置尺寸为 2260×600×600 mm 的屏柜 16~17 面。

(2) 双列布置。屏柜双列靠边布置,采用前接线结构柜体,中间预留 1150 mm 作为操作维护通道(如图 3



图 2 屏柜单列布置俯视图

所示)。以 40 尺预制舱为例,可布置尺寸为 2260×600×600 mm 的屏柜 32~34 面。

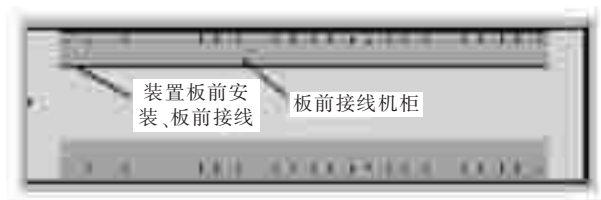


图 3 屏柜双列布置俯视图

3 预制舱内外接线设计

3.1 预制舱外部光/电缆接入

站内光 / 电缆通过电缆沟到达预制舱所在位置,进入预制舱主要有 2 种形式:

(1) 从预制舱底部接入。预制舱安装的混凝土基础与站内地面有一定高度差,电缆沟延伸到箱体下方,光 / 电缆通过箱体底板上设置的开口进入舱室内部,而后分散到各个屏柜。

(2) 从预制舱侧板接入。预制舱侧板开设光 / 电缆口,用矩形管框架形式加强,如图 4 所示。电缆进入后可通过电缆桥架在舱室内部走线。



图 4 外部线缆从预制舱侧板接入

3.2 预制舱内部光/电缆接线

(1) 舱内布线一般有上部走线、底部走线、上下组合走线 3 种方式。

上部走线方式是在舱顶设置 2 根横梁,通过横梁将电缆桥架吊装,光 / 电缆通过桥架自机柜顶部进入机柜(如图 5 所示)。

底部走线方式是在舱体底部预留屏柜底座安装槽,分两侧布置。舱体底部采用架空防静电隔板,架空层内铺设行线架(如图 6 所示)。

上下组合走线方式是将上述两种走线方式组合起

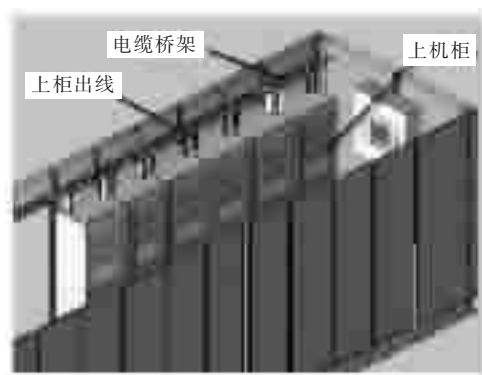


图5 舱内上部走线方式



图6 舱内底部走线方式

来的一种走线方式,一般在光/电缆较多,单纯上(底)部走线不能满足要求时采用(如图7所示)。

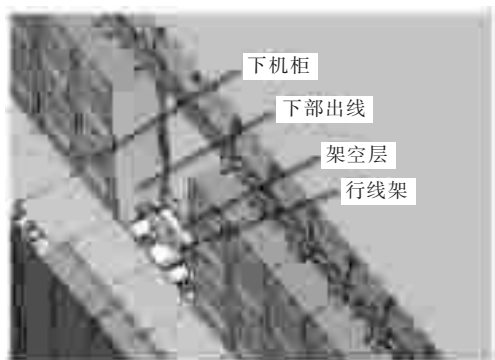


图7 上下组合走线方式

(2) 站内照明、通风、空调等电源电缆经阻燃线槽沿舱壁敷设。

(3) 屏柜内、外光/电缆的连接:对于“前开门”类型的屏柜,可在机柜底(顶)部固定多芯预制插头,并完成至屏柜内部的光/电缆连接的预制,外部预制电缆经由预制舱进入后,在屏柜底(顶)部实现与屏柜的快速对接;对于“后开门”类型的屏柜,可在机柜背部固定多芯预制插头,并完成至屏柜内部的电缆连接的预制;外部预制光/电缆经由预制舱进入后,在屏柜背部实现与屏柜的快速对接。

(4) 屏柜间光/电缆的连接:在屏柜侧门开设过线孔,实现柜间光/电缆连接,也可以考虑取消屏间的侧门。

4 预制舱内的运行环境设计

针对预制舱无人值守的运行要求,需对舱内的照明、消防、安防、逃生、通风及温湿度控制系统等辅助设施的布局、实施方案进行设计,使预制舱内部环境系统具备“自维持”能力。详细设计方案如下:

(1) 照明系统分舱外照明与舱内照明,舱外照明可采用声控方式控制开关。舱内照明光源安装在舱体顶部。所有照明均采用冷光源,节能环保。

(2) 消防系统在舱体顶部设置烟雾报警装置,自动检测舱内是否存在火灾,同时设置人工火灾报警按钮,防止自动火灾报警装置失灵或不及时动作。舱体配备预制式七氟丙烷自动灭火柜,与火灾报警设备相连,在发生火灾险情时,可实现自动灭火,且对设备及人员不造成损害。

(3) 安防系统在舱体大门相对侧的内部上方位置安装视频摄像头,保证摄像头覆盖舱内所有区域,后台监控室实时监测舱内情况,且具备视频保存功能。舱体配备门禁系统,由维护门进入舱内需经过身份确认。

(4) 舱门上设有紧急逃生锁,以防舱内人员被误锁在舱内,同时舱内有明显的逃生标识。

(5) 为舱体配备由排风扇和排气口组成的通风系统,该系统配备一键式开关,当人员进入舱体前可开启开关,对舱内空气进行更新并进行自动检测及报告,为维护人员提供适宜人类活动的操作环境。

(6) 为使舱体内部维持恒温恒湿,舱内配置冷暖空调2台,对内部温湿度进行控制。2台空调形成冗余备份,工作状态按一定的逻辑程序控制,保证舱体内始终有1台空调正常运行,当1台空调出现故障时,及时切换至另1台空调运行,同时发出故障警报,保障舱内环境的稳定。

5 基于预制舱的配送式智能变电站应用实例

江苏某110 kV智能变电站由预制舱和智能一次设备组成,全站配置了2个二次设备预制舱,并在预制舱端和智能一次设备端加装了航空插头、预制光缆组件等标准接口,实现了变电站建设的工厂化调试和配送式安装,成为先进、可靠、集成、低碳、环保的新型智能变电站建设典范。该站投运后运行情况良好,由于变电站结构清晰、接口精简,大大减少了运维工作量。该站为110 kV户外气体绝缘开关设备(GIS, Gas Insulated Switchgear)变电站,具体设计方案及实施效果如下。

5.1 二次设备预制舱

全站设置2个二次预制舱,均为40尺标准预制舱,采用单列布置方案,每个预制舱布置16面屏,全站共计32面屏,均采用尺寸2260×600×600 mm的屏

柜。站控层设备、交直流电源、蓄电池及通信设备布置于预制舱 1, 110 kV 及主变保护、测控等间隔层设备布置于预制舱 2。

5.2 预制舱内外接线

该站预制舱内外接线均采用底部走线方式, 结合舱内屏柜单列布置方案, 在屏柜底部前面设置 1 个光缆槽盒, 后面设置 1 个电缆槽盒, 槽盒规格为 500×75 mm。舱内屏柜间的光 / 电缆分别通过这 2 个槽盒走线, 由预制舱厂家在工厂内完成接线及调试; 舱内设备与舱外智能一次设备间的光 / 电缆则分成两部: 在预制舱的一端设置光 / 电缆转接屏, 同时在智能一次设备和转接屏预制标准接口, 舱内与舱外需连接的光 / 电缆先接至转接屏(第一部分, 视为舱内接线并在工厂完成), 再由转接屏通过预制光缆、电缆连至智能一次设备(第二部分, 现场插接即插即用)。预制舱与舱外电缆沟通过电缆隧道连通。

5.3 舱内环境

该站预制舱进行了必要的消防、通风、照明、防雨、防潮、防雷、防腐、防紫外线及防静电设计, 为舱内提供良好的人机环境。另外还进行了紧急逃生、视频监控及温湿度控制系统设计。

舱体内出口方向设自带蓄电池的疏散及安全通道指示标志; 在舱体长度方向两端按照消防要求设置安全门, 内部可无障碍开启, 以防舱内发生火灾等紧急事故时工作人员方便逃生。

预制舱内 2 条通道方向各设置 1 个摄像头, 达到对舱内情况的全天候监控, 并将数据传输到远方后台供调用。

预制舱内温湿度传感器采集预制舱内温度和湿度数据, 并将数据上传到后台主机进行分析处理, 当舱内温度和湿度数据超出设定的上限和下限时, 动力环境主机发出操作空调控制器开启对空调温度进行控制, 使舱内温度保持在设定范围内。

5.4 技术经济效益

(1) 二次设备预制舱提高建设效率, 改善设备建设环境。该站二次设备预制舱吊装时间为 1 d, 普通变电站控制室内设备安装受不同设备厂家供货时间限制。即使在设备齐全的情况下, 普通变电站控制室设备安装通常也需 5 d, 节约工期 4 d。二次设备预制舱通过工厂生产预制, 整体运输, 现场吊装, 避免了常规变电站电土交叉作业带来的二次污染。

(2) 即插即用技术缩短建设周期, 提升建设质量。预制式光 / 电缆工厂化加工, 在施工中直接放置, 即插即用, 免除了现场熔接、接线, 节省了施工时间, 大大缩短了配送式变电站的建设周期。普通变电站光 / 电缆敷设和接线需要 20 d, 现在缩短至 9 d, 节约工期 11 d。

由于预制光 / 电缆集成度高, 节约了光 / 电的数量, 并且预制光缆光纤平均损耗较小, 比现场制作可靠性高, 在日后的运行和检修中, 即使有损坏也可以直接更换光缆, 维护方便。

(3) 基于预制舱的配送式智能变电站建设模式综合经济效益显著。根据国家电网公司 LCC 管理要求, 结合江苏省电力公司以往工程的 LCC 统计数据和资料, 分别对常规 110 kV 变电站方案和配送式 110 kV 变电站方案在设计寿命周期内的 LCC 成本费用进行测算, 设备设计寿命周期按 25 a, 折现率按 7% 计, 残值率暂按 5% 考虑, 常规变电站方案为 258 万元 / a, 基于预制舱的配送式变电站方案为 245 万元 / a。

可见, 该站全寿命周期成本净年值(NPALCC)^[13]较常规站方案减少约 13 万元 / a。虽然就目前预制式构件尚未形成大规模工程化建设规模的前提下, 预制构件成本较高, 初期成本分析结果高于常规站方案, 但标准配送式变电站在确保建设进度、大幅减缩建设周期、节约施工成本方面的效果则非常显著, 减少建设周期幅度高达 48.79%, 将产生较可观的相对效益, 从项目综合价值效益角度分析, 采用标准配送式变电站方案占优。

5 结束语

基于预制舱的配送式智能变电站总体来讲是依托装配式变电站的物理技术构架, 融入二次设备预制舱、预制光 / 电缆及智能一次设备的综合体, 通过提高变电站设备工厂预制化程度及接口的标准化程度, 实现智能变电站从“建造”模式提升到“制造”模式的目标。该方案可实现变电站建设效率的提升和建设质量的提高, 为今后变电站的设计和建设提供了参考与借鉴。

参考文献:

- [1] NIU D X, SHI H, LI J Q. Research of Evaluation Index System of the Development and Construction of “Two-type Transformer Substation” [J]. Journal of Sustainable Development, 2010, 3(3): 115-120.
- [2] 柳国良, 张新育, 胡兆明. 变电站模块化建设研究综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(14): 36-38.
- [3] 何红艳. 变电站建设综合开发研究 [J]. 建筑电气, 2012(12): 37-43.
- [4] GIRIUNAS K, SEZEN H, UPAIX REBECCA B. Evaluation, Modeling, and Analysis of Shipping Container Building Structures [J]. Engineering Structures, 2012, (43): 48-57.
- [5] 朱文博, 张 芸. 全预制装配式变电站考察情况简述 [J]. 能源与节能, 2011(10): 20-22.
- [6] 肖向东, 司为国, 戴 阳, 等. 预制装配式变电站设计和建造技术研究 [J]. 建筑技术, 2008, 39(12): 939-942.
- [7] 彭 鹄, 田娟娟, 陈 燕, 等. 重庆大石 220 kV 新一代智能变电站优化设计 [J]. 电力建设, 2013, 34(7): 30-36.

- [8] 罗理鉴,黄少锋,江清楷. 智能变电站智能一次设备框架设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):120-124.
- [9] 刘 群. 预制式二次设备在智能变电站中的应用研究[J]. 电气开关,2012,12:37-43.
- [10] 丁腾波,李 慧. 基于预制光缆的智能变电站户外组网方案[J]. 电力建设,2013,34(2):50-54.
- [11] 李艳丽,束 娜,韩本帅. 智能变电站光缆选型及敷设研究[J]. 水电能源科学,2012,30(3):167-169.
- [12] 曹伟炜,宋漩坤,胡君慧,等. 变电站集装箱建筑设计方法研

究[J]. 电力建设,2013,34(6):22-25.

- [13] 韩 豫,胡继军,查申森,等. 变电站全寿命周期设计的理论及应用[J]. 中国电力,2011,44(3):23-26.

作者简介:

孙建龙(1963),男,江苏苏州人,高级工程师,从事电力系统输变电技术研究;

鲁东海(1981),男,湖北襄阳人,工程师,从事智能变电站设计工作。

Distribution-mode Smart Substation Design Based on Prefabricated Cabin

SUN Jianlong¹, LU Donghai²

(1.Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: Considering the difficulty in current power grid construction, the compression of construction cycle, the more restricted environmental requirement and the increasingly intelligent and fineness of substation equipment, this paper proposes a construction model of distribution-mode smart substation based on the prefabricated cabin. The characteristics of this model is analyzed, and the design scheme is introduced. The smart substation includes two parts: the intelligent primary equipment and prefabricated cabin which integrated with secondary equipment. The two parts are connected with prefabricated cables and prefabricated fiber optic cables. Besides, in this paper, the structure, the inner layout and the wiring and operation environment of prefabricated cabin are discussed. In the end, the concrete implementation of the method is provided. Also, the analysis of technical and economic significance combining with practical engineering applications is presented, which provides reference for future prefabricated cabin based smart substation construction.

Key words: prefabricated cabin; distribution-mode; smart substation; plug-and-play; construction efficiency

(上接第 42 页)

- [8] 韩国政,徐丙垠,索南加乐,等. 配电终端自动发现技术的实现[J]. 电力系统自动 2012,36(18):82-85.
- [9] 张 鹰,贺 彦. GIS 电网拓扑及其在 ORACLE 数据库中的实现[J]. 浙江电力,2012(12):48-50.
- [10] 郑 勇,周步祥,贺 琦. 基于 GIS 的配电网拓扑分析方法[J]. 继电器,2004,32(14):25-28.
- [11] 罗 建,朱伯通,蔡 明,等. 基于 CIM XML 的 CIM 和 SCL 模型互操作研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):134-138.

- [12] 罗 建,钟加勇,黄益华,等. 数字化变电站 IED 互换性研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(8):90-94.

- [13] 许凯宁,程新功,刘新峰,等. 基于 CIM 设计的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):123-128.

作者简介:

王川化(1960),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力工程建设监理工作。

Research on Intelligent Access of Feeder Automation Terminal Equipment

WANG Chuanhua

(Jiangsu Xingli Construction Supervision Consultancy Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: On the basis of the IEC61850 communication system applied to feeder automation, intelligent access of terminal equipment to the power grid is achieved by using the interchangeability principle. Based on resource definition mechanisms and incentive demand resources matching mechanism, automatic object data matching model is realized with the production resource IP address from GIS system. The established topology model of engineering system achieves object-oriented equipment in the system. The difference between feeder terminal model and distribution master model is eliminated by replacing the SCL model into the CIM model. Through resources determination, associating, topology model updating, resource object connecting and model transforming, intelligent access to the feeder terminal is achieved.

Key words: IEC 61850; GIS system; topology model; SCL model; CIM model; fuse

欢迎投稿 欢迎订阅

基于 PSD-BPA 的暂态稳定控制批处理计算方法的实现

常宝立¹, 徐光虎², 易 杨³, 李 敏¹, 夏彦辉¹, 何俊峰¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510623;

3. 广东电网公司电力调度控制中心, 广州 510600)

摘 要: 为了应对暂态稳定性分析、暂态稳定控制策略研究、稳控定值计算等工作量大、效率低的问题, 以 PSD-BPA 的暂态稳定仿真程序(SWNT)为基础, 通过自定义相关数据卡和故障文件, 采用工程-方式的数据管理模式, 结合系统稳定性的自动判别方法, 实现了多方式、多故障的暂态稳定控制批处理计算功能。该实现方法能明显提高工作效率。

关键词: PSD-BPA; 暂稳控制; 批处理计算

中图分类号: TM712

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0048-03

为保证电网安全可靠运行, 对电网稳态、暂态问题的分析越来越细致和深入^[1,2]。目前, 我国电力调度运行机构、电力系统的规划、设计、试验等相关单位和各高校在进行电网分析研究时, 广泛使用中国电力科学研究院开发的 PSD-BPA 机电暂态仿真软件包^[3,4]。在对电网进行年度方式计算、暂态稳定控制策略研究、稳控定值计算等工作时, 需要考虑多种检修方式和多种故障, 计算量很大, 为了提高工作效率, 文中研究了通过调用 PSD-BPA 的暂态稳定仿真程序(SWNT), 来实现暂态稳定控制(简称暂稳控制)批处理计算功能。

1 工程-方式的数据管理模式

对电网进行暂态稳定性分析、暂稳控制策略研究、稳控定值计算等工作时, 会涉及大量检修方式和仿真故障。为了便于实现多方式、多故障的暂稳控制批处理计算, 文中采用工程-方式的数据管理模式。

一个工程中可以包含多个方式, 每个方式包含该方式下的数据文件和结果文件, 如图 1 所示。各文件的物理存储对应于 Windows 操作系统的文件夹, 工程对应为父文件夹, 方式为父文件夹下的子文件夹。通过加载、卸载方式等操作管理工程中包含的方式, 加载、卸载文件等操作管理方式中包含的文件。

这种管理模式使得数据变得清晰明了, 且便于进行多方式、多故障的批处理计算。启动方式计算时, 只计算该方式下的多个故障; 启动工程计算时, 则计算工程中包含的多个方式, 每个方式都执行自身的多故障计算。

2 系统稳定性自动判别

为了实现暂稳控制的批处理计算, 需要明确获知故障后系统是否稳定, 才能自动执行对应的控制措



图 1 工程-方式数据管理模式

施。由于 SWNT 程序并未提供稳定性的自动判别, 所以需要手动查看计算结果曲线来进行判断, 当进行大量故障分析时, 工作量很大。对此, 文中实现了由程序读取 PSD-BPA 计算结果文件来自动进行系统稳定性判别的功能。常规的稳定性判别主要涉及以下几个方面。

(1) 功角稳定。PSD-BPA 暂稳仿真后结果文件中会输出系统内最大的功角差, 即使故障后电网分成 2 个孤立网络, PSD-BPA 程序也会自动选取 2 个孤网内部功角差最大的值。所以, 通过判断结果文件中最大功角差是否超过一定数值来判别系统是否功角失稳。

(2) 频率稳定。PSD-BPA 暂稳仿真后结果文件中会输出系统内的最高、最低频率, 可以通过读取故障切除后的频率结果, 判断最高、最低频率是否超出指定的上下限来判别系统是否频率失稳。

(3) 暂态电压低。PSD-BPA 提供了最低暂态电压输出(BV)卡来进行暂态电压低的判别, 判别结果保存在结果文件中, 可以通过设置该卡, 并读取结果文件来进行判别。

(4) 动态稳定。虽然 PSD-BPA 提供了暂稳计算时对相关曲线进行 Prony 分析的功能, 但使用起来并不方便, 且没有提供配套的程序对计算结果进行校核和后续

分析。因此文中采取将需要进行 Prony 分析的曲线在输出卡中设为 7 (依据中国电力科学研究所的《PSD-BPA 暂态稳定程序 4.15 版用户手册》), 计算完毕后, 调用专门开发的暂稳仿真结果曲线查看工具(简称曲线工具), 自动从对应的 SWX 文件中读取曲线数据进行 Prony 分析, 并根据自定义数据卡中设定的频率范围、振荡模式幅值范围、最小阻尼比, 对结果进行自动筛选, 筛选出主导振荡模式, 并判断这些模式是否为弱阻尼, 从而自动实现系统动态稳定的判别。

(5) 过载问题。BPA 提供了寻找过载线路(OLT)卡进行支路过载的判别, 其采用比较支路的实际电流与额定电流来判断支路是否过载, 并将结果输出到结果文件中。而对于变压器支路, 一般采用视在功率进行过载判断, 通过填写自定义数据片设定需要判断过载的变压器支路, 计算时程序自动生成变压器支路有功、无功的输出卡, 然后调用曲线工具从结果文件中读取功率值计算其视在功率, 进而判断其是否过载。

(6) 故障后恢复电压。在某些情况下对电网中一些关键节点电压, 需要判断故障后是否恢复到指定范围内。通过填写自定义数据片设定需要判断恢复电压的母线, 计算时程序自动生成母线电压的输出卡, 然后调用曲线工具从结果文件中读取母线电压, 进行判断。

由上所述, 为了实现系统稳定性的自动判别, 需自定义卡片设置相关参数。对此定义了 NR_SC 卡用于功角、频率、暂态电压低的判断; NR_PY 卡用于动态稳定判断; NR_OL 卡用于变压器和线路过载的判断; NR_VR 卡用于故障后母线恢复电压的判断。

暂稳仿真计算完毕后调用曲线工具进行稳定性判别, 稳定性判别的流程如图 2 所示。

3 暂稳控制批处理计算

在进行系统稳控策略研究时, 对于存在稳定问题的故障, 需根据电网的特性及分析人员的经验, 制定出对应的控制策略, 此时还需通过暂稳控制计算对策略的可行性进行验证。以常用的切机策略为例, 需选定可切的机组, 然后计算为了保证系统稳定所需的切机量, 再进一步分析切机量是否合适。计算过程中需手动多次修改切机卡, 工作较为繁琐。

对此, 通过设定每个故障对应的控制集, 在暂稳仿真计算完后, 自动判断系统是否稳定, 如不稳定, 则逐条执行控制集中的控制策略, 直至系统稳定或所有策略执行完毕。

为了实现故障与控制措施集的关联, 自定义了故障组 NR_FG 卡, 卡中定义了故障名称、所用控制措施集名称等信息; 控制措施集 NR_CS 卡, 卡中定义了控制措施集名称; 以及控制卡 NR_KZ 卡, 用于定义控制

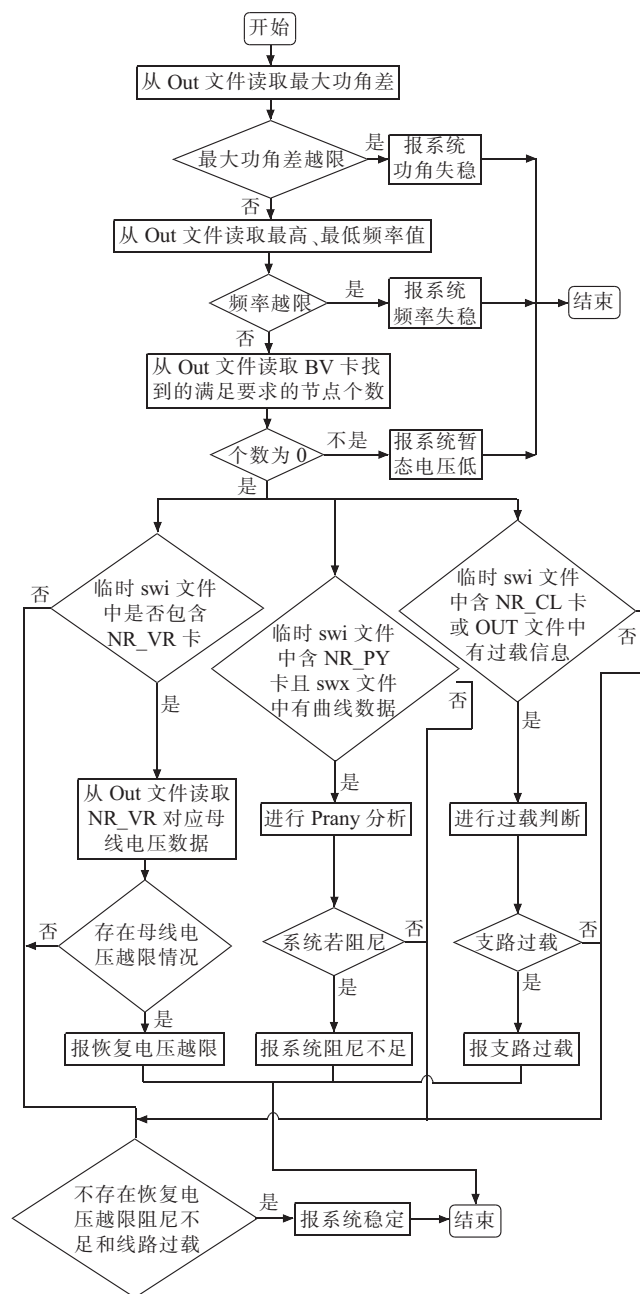


图 2 系统稳定性判别流程

集中包含的控制措施, 包含: 切机、切负荷和切线路。将所有的自定义卡片放置在自定义的故障文件中, 其文件内容如图 3 所示。

暂稳控制的批处理计算的实现过程如下:

(1) 在计算前程序自动识别自定义故障文件, 解析相关的卡片, 将控制卡转化成 BPA 格式的故障卡。

(2) 逐一进行故障计算, 计算时将故障文件中的故障卡(包含本次计算所需的控制卡)、输出卡和暂稳判别卡, 与 swi 文件中暂稳参数卡拼接成临时 swi 文件(程序自动提取 swi 文件中对应的卡片), 临时 swi 文件名设为故障名, 对该文件调用 SWNT 进行暂稳仿真计算。

(3) 调用曲线工具进行稳定性判别, 如不稳定则增

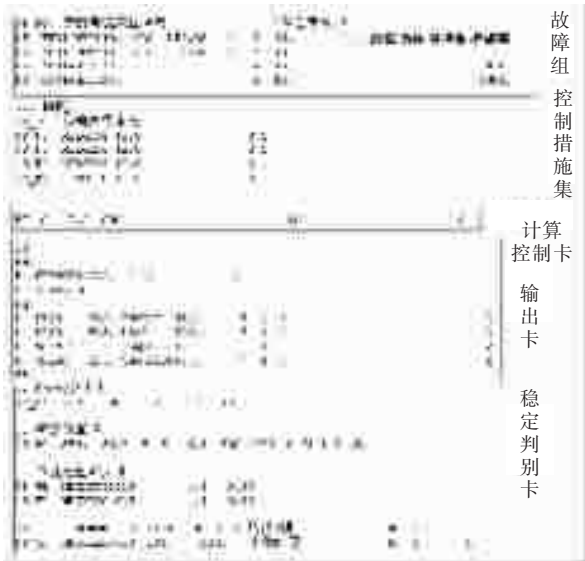


图 3 自定义故障文件

加一条控制措施,继续计算;如稳定则计算下一个故障。
单方式下多故障的暂稳控制批处理计算的执行流程如图 4 所示。如果工程包含多个方式,可从工程中启动计算,实现多方式、多故障的暂稳控制批处理计算。

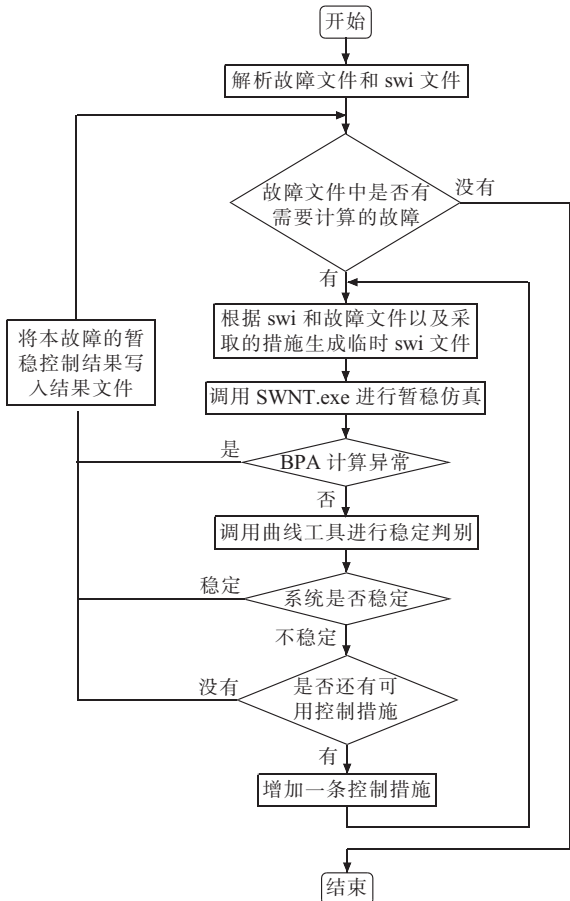


图 4 暂稳控制批处理计算流程

4 软件实现及应用

根据上述设计方案,采用 VC++ 编制了多方式、多

故障的暂稳控制批处理计算软件。
为了方便对计算结果的统一查看以及后期计算结果的研究、整理,软件对计算结果自动汇总至 Excel 表格。表格中主要包含如下信息:方式名、故障名、稳定情况、稳控措施采取的切机和切负荷量、弱阻尼情况、恢复电压越限情况、元件过载情况。软件还具备按方式和按故障显示计算结果的功能。按方式显示计算结果能了解该方式下电网存在的问题;按故障显示计算结果能了解当前故障在所有方式下产生的影响及所需的控制措施量,有利于稳控策略的制定和稳控定值的设置。计算结果能方便地拷贝至 Excel 文件中。该软件在南方电网总调、广东中调、云南中调、广东省电力设计院、广东省电科院等相关单位的日常工作中得到了广泛的应用,通过该软件的应用,能明显提高工作效率。

以 2012 年广东电网粤东及珠三角地区稳控策略研究为例,分析了夏季大负荷、夏季小负荷方式,每种方式下分别考虑 500 kV 沙角电厂开环和合环的情况,共 4 个基础极限方式。对于每个基础方式,考虑了单回 500 kV 线路、部分双回 500 kV 线路、部分 500 kV 主变检修的情况,共 50 个极限方式,在极限方式调整时,计算了 40 个 $N-1$ 故障,然后计算约 40 个 $N-2$ 故障。对应于 4 个基础方式,共计算了约 16 000 个故障,同时对于其中约 10 个 $N-2$ 故障进行了暂稳控制措施量的计算。如采取手动逐个故障进行计算并统计计算结果,工作量非常大,需花费约 1 个人 8 个月的时间。采用该软件,主要工作量为极限方式数据的调整、方式安排和控制措施优化,实际花费了 1 个人 2 个月的时间。

5 结束语

采用工程-方式的数据管理模式,通过自定义相关数据卡和故障文件,实现了系统稳定性的自动判别,暂稳控制措施与故障的关联,并设计了多方式、多故障的暂稳控制批处理计算的执行流程。根据该设计方案,开发了对应的软件,核心计算采用 PSD-BPA 的 SWNT 程序,保证仿真结果的准确性,软件在多个相关单位的实际应用中表明,其明显提高了工作效率。

参考文献:

[1] 丁留宝,王 健. 银东直流西北侧电网稳定控制系统实现[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):37-39.
[2] 向昌明,谢晓清. 基于感应电动机的暂态电压稳定判据的研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(6):38-41.
[3] 李广凯,李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报,2005,27(3):61-65.
[4] 潘 福,韩伟强,张建设. 南方电网系统仿真工具应用的分析研究[J]. 南方电网技术,2005,1(1):14-18.

基于突变理论的配电网规划方案综合评估

季晓明¹, 成乐祥²

(1.宿迁供电公司,江苏 宿迁 223800;2.南京供电公司,江苏 南京 210019)

摘 要:为了对配电网规划方案进行全面有效的评估,从技术性和经济性两方面构建了配电网规划方案三级评估指标体系。提出了基于突变理论的配电网规划方案综合评估方法,该方法利用系统状态量在临界点附近非连续变化的特征,采用突变决策归一化公式提取系统突变级数,避免了常规的评估方法对评价指标采用权重的方式,减少了决策的主观性,使决策更符合实际。以某地区配电网规划方案的实际数据为例,并且与其他常用的评估方法进行对比分析,验证了所提出方法的有效性和准确性。

关键词:配电网规划;综合评估;突变理论;方案优选;突变级数

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0051-04

目前,国内外在配电网综合评估方面已经开展了大量工作,涉及配电网的多个方面,如网络规划、供电能力、系统运行、风险评估等方面,同时也发展和应用了多种相对成熟的评估方法,如层次分析法、数据包络分析法、模糊综合评价法等。文献[1]提出了一种基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策方法。文献[2]提出了基于模糊层次分析法的综合评判决策方法,完成了基于模糊层次分析法的城市电网规划综合评判决策。文献[3]提出了均值意义下的交叉效率数据包络法(SE-DEA)评价模型并应用在电网规划方案的综合评判决策中。这些方法在模型参数的确定上需要专家进行评判,存在较大的主观性,具有较大的不确定性,并且存在没有充分利用客观数据所提供信息的不足。

突变理论是一种对待评估指标数据进行排序分类的综合方法。该方法利用系统状态量在临界点附近非连续变化的特征,采用归一化公式求取系统各层指标的突变级数,通过自下而上的综合过程最终获取系统综合评估指标的突变级数。该方法计算简易,操作性与实用性较强,并且不使用权重^[4-8]。文中从技术性和经济性两方面构建了配电网规划方案三级指标体系,提出了基于突变理论的配电网规划方案综合评估方法,建立了配电网规划方案的突变决策模型,为配电网规划方案的综合评估提供了一个新的思路。

1 突变理论评估方法

1.1 突变理论的基本原理

突变理论是由法国数学家雷内·托姆在 20 世纪 70 年代创立的^[4]。突变理论的原理是根据势函数把临界点进行分类,研究各种临界点附近非连续状态的特性,把得到的信息与对不连续现象的理论分析和观

察相结合,从而归纳出若干初等变量模型,并以此为基础探索自然和社会中的突变现象。突变决策理论的基本模型有 7 种,其中常见的 4 种模型分别为尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变和棚屋突变,如图 1 所示^[5]。

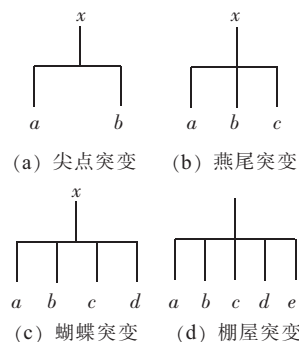


图 1 4 种典型的突变决策理论模型

上述 4 种突变的数学模型分别为:

$$f(x)=x^4+ax^2+bx \quad (1)$$

$$f(x)=x^5+ax^3+bx^2+cx \quad (2)$$

$$f(x)=x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx \quad (3)$$

$$f(x)=x^7+ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex \quad (4)$$

式中: x 为突变系统中的状态变量; $f(x)$ 为状态变量 x 的势函数; a, b, c, d, e 为突变系统中的控制变量。

利用突变理论进行综合评价时,4 种突变的归一化公式分别为:

$$x_a=\sqrt{a}, x_b=\sqrt[3]{b} \quad (5)$$

$$x_a=\sqrt{a}, x_b=\sqrt[3]{b}, x_c=\sqrt[4]{c} \quad (6)$$

$$x_a=\sqrt{a}, x_b=\sqrt[3]{b}, x_c=\sqrt[4]{c}, x_d=\sqrt[5]{d} \quad (7)$$

$$x_a=\sqrt{a}, x_b=\sqrt[3]{b}, x_c=\sqrt[4]{c}, x_d=\sqrt[5]{d}, x_e=\sqrt[6]{e} \quad (8)$$

式中: x_a, x_b, x_c, x_d 和 x_e 分别表示各式中对应 a, b, c, d 和 e 的 x 值。

1.2 突变理论的评估原则

利用归一化公式对某一评估体系的各个指标数据计算 x 值时, 要考虑下列原则: (1) 非互补决策原则。如果系统的各个指标 (如 a, b, c, d) 之间不可相互替代, 即不可相互弥补其不足, 此时系统的状态变量 x 值取各指标计算值的最小值; (2) 互补决策原则。如果系统各指标之间可相互替代, 即可相互弥补其不足, 此时系统的状态变量 x 值取各指标计算值的算术平均值。

2 配电网规划方案评估的突变理论方法

采用突变理论进行配电网规划方案评估时, 首先需建立配电网规划方案评估指标体系, 然后把各层待评估的指标数据带入其相应的突变决策模型中做归一化计算, 采用一定的指标计算原则, 得到各层次的指标数据, 最后归总得到综合评估指标结果。

2.1 规划方案评估指标体系

配电网规划涉及多方面的影响因素, 在建立配电网规划方案的评估指标体系时, 要考虑指标的科学性、完整性、相互独立、突出重点等原则^[9]。文中从技术性和经济性两方面构建了配电网规划方案三级指标体系, 所图 2 所示。其中, 技术性指标涵盖了网架结构、抗灾能力、可靠供电、持续发展 4 个方面的二级指标; 经济性指标涵盖了建设经济性、运行经济性、报废处置成本 3 个方面的二级指标。每个二级指标下面又涵盖了若干三级指标, 以从不同的角度加以量化规划方案。评估指标中的抗灾能力主要指的是电网抵御因自然灾害、事故灾害等突发事件所导致的严重事故的能力, 是确保电力安全稳定供应的重要前提。从配电网角度出发, 对配电网抗灾能力的评价主要考虑重大灾害情况下配电网减供负荷占比和重大灾害情况下配电网停电用户占比。重大灾害情况下配电网减供负荷占比为评估区域内在发生重大灾害情况下配电网所减少的网供负荷占总的网供负荷的比例; 重大灾害情况下配电网停电用户占比为评估区域内在发生重大灾害情况下配电网停电用户占总用户的比例。由于各个指标是相互

独立的, 在计算评估值时, 应采用非互补决策的原则。

2.2 决策变量的无量纲化处理

由于各指标可能具有不同的度量单位, 各指标间缺少可比性, 这就需要对原始数据进行无量纲化处理。根据评价指标的具体情况, 可将指标分为效益型指标 (指标值越大越好) 和成本型指标 (指标值越小越好)。指标无量纲化处理如下。

对于效益型指标:

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_{\min j}) / (x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (9)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个待评价样本中的第 j 个指标数据; $x_{\min j}$ 和 $x_{\max j}$ 分别为所有待评价样本中的第 j 个指标的最小值和最大值; y_{ij} 为 x_{ij} 无量纲化后的指标数据值。

对于成本型指标:

$$y_{ij} = (x_{\max j} - x_{ij}) / (x_{\max j} - x_{\min j}) \quad (10)$$

2.3 突变决策方法的主要步骤

基于突变理论的配电网规划方案综合评估的主要步骤如下:

(1) 确定待评估的配电网各个规划方案。

(2) 建立配电网规划方案评估指标体系, 其中, 网架结构、可靠供电和持续发展的 4 个子指标构成蝴蝶突变模型; 建设经济性和运行经济性的 3 个子指标构成燕尾突变模型; 抗灾能力和报废处置成本的 2 个子指标构成了尖点突变模型; 技术性指标的 4 个子指标构成了蝴蝶突变模型; 经济性指标的 3 个子指标构成了燕尾突变模型, 最后, 这 2 个二级指标又构成了尖点突变模型。

(3) 收集各规划方案中与评估指标体系中对应的数据, 依据评估指标体系, 对各个指标数据进行分类, 利用式 (9) 和式 (10) 对各个指标的原始数据进行无量纲化处理。

(4) 根据式 (5—8), 对于配电网规划方案评估体系下的二级指标以及抗灾能力和报废处置成本下的三级指标, 可采用下式计算其评估值。

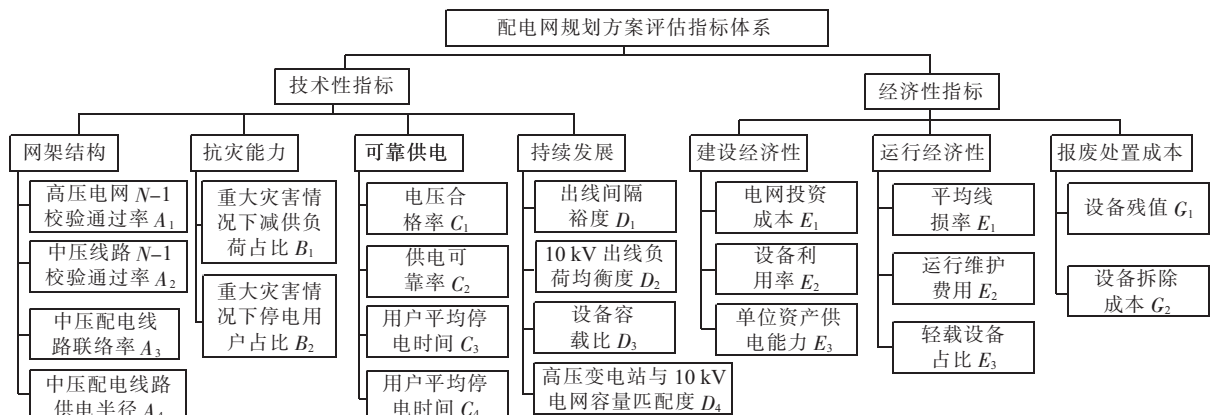


图 2 配电网规划方案评估指标体系

$$F_2 = \frac{1}{2N_1} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt[3]{x_{Ai1}} + \sqrt{x_{Ai2}}) \quad (11)$$

式中: $N_1=2!=2$, 为 x_{Ai1}, x_{Ai2} 的全排列种数, A 为其全排列集; $A_{ij} \in \{1, 2\}$ ($j=1, 2$) 为第 i 组排列的第 j 个元素。

类似的, 对于建设经济性和运行经济性下的三级指标, 可采用下式计算其评估值:

$$F_3 = \frac{1}{3N_2} \sum_{i=1}^{N_2} (\sqrt[4]{x_{Bi1}} + \sqrt[3]{x_{Bi2}} + \sqrt{x_{Bi3}}) \quad (12)$$

式中: $N_2=3!=6$, 为 $x_{Bi1}, x_{Bi2}, x_{Bi3}$ 的全排列种数, B 为其全排列集; $B_{ij} \in \{1, 2, 3\}$ ($j=1, 2, 3$) 为第 i 组排列的第 j 个元素。

对于其余指标可采用下式计算其评估值。

$$F_4 = \frac{1}{4N_3} \sum_{i=1}^{N_3} (\sqrt[5]{x_{Ci1}} + \sqrt[4]{x_{Ci2}} + \sqrt[3]{x_{Ci3}} + \sqrt{x_{Ci4}}) \quad (13)$$

式中: $N_3=4!=24$, 为 $x_{Ci1}, x_{Ci2}, x_{Ci3}, x_{Ci4}$ 的全排列种数, C 为其全排列集; $C_{ij} \in \{1, 2, 3, 4\}$ ($j=1, 2, 3, 4$) 为第 i 组排列的第 j 个元素。

对各个规划方案按照上述流程分别计算各自综合评估指标的突变级数, 选取综合评估指标突变级数值最大的方案为最优方案。具体流程如图 3 所示。

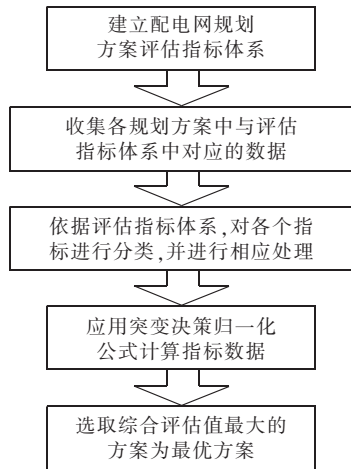


图 3 配电网规划方案评估流程

3 案例分析

以南京市某开发区(面积约 45 km²)配电网规划方案为例进行评估分析。该开发区以化工生产企业为主, 目前建有 220 kV 变电站 2 座, 110 kV 变电站 4 座, 35 kV 变电站 2 座, 中压配电网以架空线为主, 干线沿主干道采用同杆双回结构。预计未来 5 年该区新增供电负荷 300 MW, 根据负荷预测结果及该地区电网现状, 应用文中提出的评估方法对该区的 3 种未来 5 年的配电网规划方案进行评估。3 种规划方案的评估指标数据如表 1 所示。

表 1 配电网规划方案评估指标数据

一级指标	二级指标	三级指标	方案 1	方案 2	方案 3
网架结构		A_1	0	1	0
		A_2	0.763 3	1	0
		A_3	0.842 8	1	0
		A_4	0	1	0.560 1
抗灾能力		B_1	1	0.520 2	0
		B_2	0.668 5	1	0
		C_1	0.807 7	1	0
		C_2	0.548 2	1	0
可靠供电		C_3	0.699 1	1	0
		C_4	0.850 5	1	0
持续发展		D_1	0	1	0.501 7
		D_2	0	1	0.780 9
		D_3	0.230 9	1	0
		D_4	1	0	0.653 3
建设经济性		E_1	0.552 8	0	1
		E_2	0.462 4	0	1
		E_3	0.753 3	0	1
运行经济性		F_1	0	1	0.635 0
		F_2	0.349 5	1	0
		F_3	0.538 2	0	1
报废处置成本		G_1	0.779 4	1	0
		G_2	0	0.865 5	1

从表 1 中可以看出, 各单项指标间的排序存在矛盾, 无法直接从单项评估指标中得出综合评估结果。按照突变决策方法的流程, 得到方案 1, 2, 3 的综合评估指标的突变级数分别为 0.924 3, 0.930 6, 0.901 5, 由此可知, 方案 2 规划结果最优。参考文献[2], 采用模糊层次分析法对方案 1, 2, 3 进行评估的结果分别为 0.483 1, 0.524 5, 0.366 7, 方案的优劣排序与文中一致。表 2 为分别采用层次分析法、网络分析法和交叉效率数据包络法和文中方法的排序结果, 其中 3 种评估方法得出方案 2 为最优规划方案的结论, 可见文中提出的评估方法是切实可行的。

表 2 不同评估方法的评价结果

评估方法	方案 1	方案 2	方案 3
层次分析法排序	2	1	3
网络分析法排序	2	1	3
交叉效率数据包络法排序	1	2	3
文中突变决策模型排序	2	1	3

4 结束语

为了客观全面的评估配电网规划方案的优劣, 从技术性和经济性两方面构建了配电网规划方案三级评估指标体系, 并将突变理论应用于配电网规划方案评

估中,取得了良好的效果。该方法利用系统状态量在临界点附近非连续变化的特征,采用突变决策归一化公式提取系统突变级数,避免了常规的评估方法对评价指标采用权重的方式,减少了决策的主观性,使决策更符合实际。该方法具有严格的理论基础,计算简易,操作性与实用性较强,并且不使用权重,能消除评估过程中人为因素的影响,为配电网规划方案的综合评估提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 肖 峻,王成山,周 敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):50-57.
- [2] 陈天宇,肖 峻,王成山. 基于模糊层次分析法的城市电网规划综合评判[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(4):83-88.
- [3] 高庆敏,张乾业. 基于 SE-DEA 的交叉效率模型的城市电网规划综合评判决策[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(8):60-64.
- [4] AMOLD V I. Catastrophe Theory [M]. Berlin:Springer Verlag, 1986:42-45.
- [5] 申金山,吕康娟,张晓阳. 基于突变理论的城市空间拓展决策方法与应用[J]. 河南科学,2005,23(6):61-64.
- [6] DOUA W, GHOSE S. A Dynamic Nonlinear Model of Online Retail Competition Using Cusp Catastrophe Theory [J]. Journal of Business Research, 2006, 59(7):838-848.
- [7] RAFTOYIANNIS I G. Dynamic Buckling of a Simple Geometrically Imperfect Frame Using Catastrophe Theory [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(10):1021-1030.
- [8] 宫凤强,李夕兵,高 科. 地下工程围岩稳定性分类的突变级数法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2008,39(5):1081-1086.
- [9] 肖 峻,崔艳妍,王建民,等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(15):36-40.

作者简介:

季晓明(1974),男,江苏南京人,工程师,从事电网运行与管理工作;
成乐祥(1984),男,江苏南京人,工程师,从事配电网规划、智能配电网研究工作。

Synthetical Assessment on Distribution Network Planning Scheme Based on Catastrophe Theory

JI Xiaoming¹, CHENG Lexiang²

(1.Suqian Power Supply Company, Suqian 223800,China;2.Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: To evaluate distributed network planning scheme effectively, a 3-class evaluation system including technical and economic aspects is established. A catastrophe theory based synthetical assessment on distributed network planning scheme is proposed. The proposed method adopts normalized formula to extract catastrophe progression under the assumption that the state variables near the critical point do not vary continuously. Therefore, it differs from ordinary methods in terms of using indices weights, so that subjective factors are avoided and decision obtained are more objective. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method is verified by comparing with other methods on an actual distributed network.

Key words: distribution network planning; synthetical assessment; catastrophe theory; optimal selection; catastrophe progression

(上接第 50 页)

作者简介:

常宝立(1981),男,河北唐山人,工程师,从事电力系统分析与控制工作;
徐光虎(1974),男,安徽合肥人,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制工作;
易 杨(1983),女,四川成都人,硕士,工程师,从事电网分析和运

行控制工作;

李 敏(1982),女,湖南娄底人,硕士,工程师,从事电力系统分析与控制工作;
夏彦辉(1982),男,河南开封人,硕士,工程师,从事电力系统分析与控制工作;
何俊峰(1978),男,湖南郴州人,硕士,工程师,从事电力系统分析与控制工作。

Realization of Batch Calculation of Transient Stability Control Based On PSD-BPA

CHANG Baoli¹, XU Guanghu², YI Yang³, LI Min¹, XIA Yanhui¹, HE Junfeng¹

(1. Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 2. CSG Power Dispatching Control Centre, Guangzhou 510623, China; 3. Guangdong Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The calculations related to transient stability analysis and transient stability control are time-consuming and low-efficiency. To deal with these problems, in this paper, the batch calculation of transient stability control for multi-case and multi-fault is realized. This method is based on the SWNT program in PSD-BPA software, the project-case data management, the custom defined data cards and fault file and the automatic identification of system stability. The method significantly improves calculation efficiency.

Key words: PSD-BPA; Transient Stability Control; Batch Calculation

江苏海上风电接入系统若干问题探讨

陆燕¹, 谈健²

(1.南京供电公司,江苏南京 210019;2.江苏省电力公司经济技术研究院,江苏南京 210008)

摘要:结合江苏近阶段开发建设的海上风电场项目,介绍了海上风电接入系统并网的电压等级、并网回路数的选择原则,讨论了长距离海缆并网的大型海上风电场输电系统的无功平衡、内部过电压限制措施,并通过工程实例,探讨了一种解决大型海上风电场接入系统后引起电网电压波动的无功补偿配置容量计算原则及方法。

关键词:海上风电;并网电压等级;高压海缆;无功平衡;内部过电压;无功补偿容量

中图分类号:TM614

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0055-04

江苏是我国经济发达地区之一,又是一次能源匮乏的地区,全省有 954 km 的海岸线及广阔的近海海域,海上风资源丰富,电网完备,具有开发利用海上风电非常好的条件。结合近期开发建设的海上风电场项目规划及工程实例,对海上风电接入系统的电压等级、并网回路数的选择原则,以及离岸距离较远的大容量海上风电场并网输电系统的无功平衡、内部过电压的限制措施等问题进行了探讨。

1 接入系统的电压等级及并网回路数

江苏电网确定了江苏沿海地区风电将按“分层分片、近期就近分散、远期相对集中”的原则,根据电网结构、主干电网输电能力及地区电网负荷特性,因地制宜地接入系统。分散接入的风电场容量应与电网规划的分区分片格局合理匹配;远期大容量的风电通过开闭站汇流后接入 500 kV 电网,在全省范围内消纳。

按照现阶段江苏沿海地区风电场,电网电力电量平衡情况,考虑地区电网电压、潮流控制等因素,装机容量小于等于 100 MW、离岸距离较近小于 10 km 的海上(潮汐带)风电场,一般建议可采用 110 kV 电压等级直接接入地区电网;装机容量大于 100 MW、离岸距离大于 10 km 的海上(潮汐带)风电场,原则上均宜采用 220 kV 电压等级接入系统。

由于风电的随机性,系统对风电的可靠性没有很高的要求,即使是远距离的大型海上风电场均宜以一回高压交流输电并网线路接入系统^[1,2]。对规模相对较小的分散在附近不同海域的海上风电,宜按照“打包开发,规模并网”的原则,统筹考虑,分期规划开发,将附近海域的若干个风电场打包汇流后,以 220 kV 电压等级一回并网线路接入系统。

目前江苏将要开发建设的海上风电项目规划建设容量均为 200~300 MW,风电场的离岸距离大致在 20~60 km 之间,根据沿海地区电网结构、电力平

衡以及潮流分析,均宜以 220 kV 电压等级一回线接入系统。风电场在海上建设 220 kV 升压站,采用一回 220 kV 交流海底电缆接至岸边陆地滩涂的海缆登陆点,再根据周边地理位置、电网并网资源等情况,因地制宜采用 220kV 架空线接入系统。

2 无功功率平衡

海上风电的集电、输电一般均采用充电功率较大的交流海底电缆,会对并网电压带来较大影响。由于风电的随机性,为使风电运行时对电网电压影响最小,最佳的无功平衡补偿方式应为风电场并网线路与电网公共连接点不发生无功交换,即风电场送出线路注入电网公共连接点的功率因数为 1。大型海上风电的无功平衡大致可分为风电场内部 35 kV(电压)层及送出输电系统 220 kV(电压)层 2 个层面。

2.1 风电场 35 kV 层的无功平衡

35 kV 层无功平衡涉及的电气设备主要有 35 kV 集电海缆、风电机组无功调节容量(暂设定风机功率因数为 1)、风机端升压变压器。

以装设 100 台 3.0 MW 风电机组、额定容量为 300 MW 的海上风电场为例,一般需布置 12~15 回 35 kV 集电海缆线路,每回集电线路不同段长的 35 kV 海缆,根据风电机组布置的位置、汇集风电机组的多少,采用 70~300 mm² 不同截面型号的 35 kV 海底电缆,整个风电场 35 kV 集电海缆总计长度约为 140~150 km。

经初步估算,计及每台风电机组机端升压设备的感性无功损耗,风电场内部 35 kV 层的无功功率大致在风电场额定出力的 50%~60%时,35 kV 集电海缆的容性充电无功可以在 35 kV 层消纳平衡;当风电场出力小于额定出力的 50%时,35 kV 集电海缆容性充电功率将大于感性无功功率损耗,风电场需通过调节(或设置)风电机组的功率因数以及在升压站 35 kV 母线侧集中加装适当容量的动态无功补偿装置来调节控制 35 kV(电压)层的无功、电压。

2.2 220 kV 层的无功平衡

涉及 220 kV 层无功平衡的电气设备主要有海上变电站的升压主变压器和 220 kV 高压交流海缆。

由于高压海缆较大的容性充电功率,当海上风电场离岸距离超过 20 km 或更远时,即使在系统正常运行方式下,海缆送端、风电场海上升压站并网点电压可能会超过其额定电压的 10%,致使风电场无法正常并网运行;另外,长距离高压交流海缆的电容效应还会因风电场并网输电系统的断路器操作或系统故障产生内部过电压,将严重影响系统及风电场运行安全。因此,离岸距离较远的风电场 220 kV 层应在并网海缆线路侧配置足够容量的感性无功补偿装置,以满足 220 kV 层无功平衡的需要。海缆线路侧加装 220 kV 高压并联电抗器,不仅可以补偿、平衡海缆的容性充电无功,而且还是补偿海缆电容效应、限制系统内部过电压的有效措施。因此,通过较长距离高压交流海缆线路并网的海上风电场,220 kV 层无功补偿宜采用 220 kV 高压并联电抗器(以下简称高抗)。

为了避开输电线非全相运行谐振区,高抗补偿容量一般不宜大于 80% 补偿度(并联电抗器的容量与空载海缆线路电容无功功率之比)。综合平衡输电系统的无功损耗、风电机组无功调节能力以及 35 kV 母线需加装动态无功补偿容量,通常在 220 kV 海缆侧加装 60%~70% 补偿度的高抗容量,可以满足 220 kV 电压层无功平衡需求。

3 内部过电压

运行方式改变、断路器操作或系统故障,导致风电场和接入系统电气参数变化时,可能产生工频过电压、操作过电压等内部过电压情况,需采取相应措施^[3,4]。

3.1 工频过电压

工频过电压和系统运行方式有关,风电场容量愈大,工频过电压值愈小;风电场容量愈小,即内电抗 X_G 越大,末端电压升高越严重。因此,在估算最严重的工频过电压时,应以风电场可能出现的正常最小的运行方式为依据,并考虑海上升压站主变压器 $N-1$ 运行方式。根据 DL/T 620-1997^[5] 规定,对 220 kV 系统工频过电压的限值一般不应超过 1.3 p.u.。

由于海上风电场风电机组的建设过渡期间并网运行方式与常规电源不同,因此海上风电场限制系统过电压需配置的高抗容量应以风电场建设最终规模时正常并网运行方式为依据;过渡期间并网运行时可采取临时的限制措施(例如在需保护点加装金属氧化物避雷器等措施)。工频过电压的值与故障形式、发生故障的位置以及风电场运行方式、功率突变量大小等有关,在海上风电场接入系统方案估算时要充分考虑这些因

素,特别是风电场不同运行方式(风电场出力及风电机组功率因数)对工频过电压值的影响。

对于离岸距离较远的大中型海上风电场,以一回 220 kV 高压交流海缆并网接入江苏电网的并网方式,相当于单电源、单回线接入强电网的网络结构。经初步计算分析,这种接入方式下,工频过电压的最大值一般出现在海上风电场并网输电线的受端线路侧发生单相接地故障、三相断开时的健全相中。在并网线路侧配置适当容量的高抗,补偿平衡海缆充电无功的同时可有效地将工频过电压升高限制在容许的限度之内,而限制工频过电压需配置高抗容量的多少与高抗装设在并网输电线路送、受端的位置关系不大。

3.2 操作过电压

由于海缆的电容效应,当海上风电场并网输电线路的开关设备在 220 kV 长距离海缆线路发生无故障三相跳闸、单相接地故障跳闸等各种运行方式的操作过程中,特别是切空载 220 kV 长距离海缆线路时,断路器触头间电弧会重燃,重燃间系统将会产生强烈电磁振荡并进而有可能产生较高的过电压,在电缆与架空线混合线路尤其严重。根据文献^[5] 规定,对 220 kV 系统的操作过电压的限值一般不应超过 3.0 p.u.。

为防止长距离 220 kV 海缆线路产生的操作过电压超规定的限值,风电场送出线路可选用灭弧性能优的高性能断路器,在断路器断口加装并联电阻,以及在需要的保护点安装金属氧化物避雷器外,在海缆线路侧加装高抗也是限制操作过电压的有效措施。

具体的高抗装设容量应在海上风电场工程的 220 kV 海缆实际长度、型号参数、敷设方案确定后,结合限制工频过电压及 220 kV(电压)层无功平衡需要综合平衡来确定。

4 海上风电场的无功配置

大型海上风电场的无功容量包括两部分:风电场的无功电源容量以及长距离海缆并网输电系统配置的高抗容量。

风电场的无功电源容量包括风电机组及风电场升压站 35 kV 母线配置的动态无功补偿容量^[1,2]。现阶段国内海上风电场选用的主流风电机组机型大致为双馈式异步风力发电机组和永磁直驱风力发电机组 2 种类型。其额定功率因数为 1.0,在配置相应的无功电压调节控制软硬件设备后,风机具备功率因数在 +0.95~ -0.95 间动态连续调节的能力,可一定程度上实现对风电机组无功和电压的调节控制。

当海上风电场仅靠风电机组的无功容量和调节能力无法满足电网运行要求时,应考虑集中加装适当容量可动态连续调节的无功补偿装置^[1,2]。海上风电场的

无功可调容量及电压控制能力应由风电场风电机组及动态无功补偿装置共同提供。

4.1 海上风电场无功补偿装置容量的确定

以某一计划建设的海上风电场为案例,探讨一种解决大型海上风电场接入电网后引起电压波动并在电网高峰低谷时段,按电网需要送出或吸收一定容量无功,起到对电网电压调节作用的无功补偿容量的计算原则及方法。

4.1.1 计算原则

(1) 按照无功容量分(电压)层、分(供电)区基本平衡的原则,海上风电场配置的无功补偿装置包括220 kV海缆线路侧需装设的高抗容量以及海上升压站35 kV汇流母线侧动态无功补偿容量。

(2) 考虑电网规划年度负荷水平、网络结构的不确定性,为使风电场具备一定的无功电压调节能力,在确定需装设的动态无功容量时,宜以其并网输电线注入电网公共连接点潮流的功率因数在 ± 0.98 范围调节能力为标准进行估算。

(3) 配置的动态无功补偿装置容量应能满足海上风电场各种随机运行方式的电网调控要求,在容量估算时可选用海上风电场额定发电出力的100%,50%,10%几种典型运行方式。

(4) 针对风电机组不同的无功调节能力,在配置动态无功补偿容量估算时,可按以下2种方式设置:①风电场的无功功率出力根据运行初始条件设定风电机组运行的功率因数;②风电机组运行的功率因数可在一定范围内连续可调。

4.2 案例说明

某海上风电场共安装100台单机容量为3.0 MW的风电机组装机,距海岸约56 km。风电场通过220 kV电压等级接入电网,其中架空线导线型号选用LGJ-2×630、长度为6 km,陆缆截面选用1000 mm²、长度为15 km,海缆截面选用800 mm²、长度为56 km,风电场接入电网示意图如图1所示,相关数据见表1。

(1) 风电场内部35 kV层无功平衡,选择风机初始运行功率因数。在风电场满发的运行方式下,风电场35 kV集电海缆充电功率远远小于中心升压站主变、集电海缆及机端升压变的无功损耗,因此风机功率因数通常可在+0.95~1之间选择,不同的风机功率因数、风电场升压站主变高压侧功率因数计算结果见表2。

由表2计算结果可知,当风机功率因数设定为0.98时,风电场内部无功发生量与损耗基本平衡。

(2) 风电场并网输电线220 kV层无功平衡以及限制工频过电压的需要,选择高抗容量。由于该工程并网输电线电缆长约70 km,220 kV电压层无功平衡的需要,高抗补偿容量不宜小于60%。

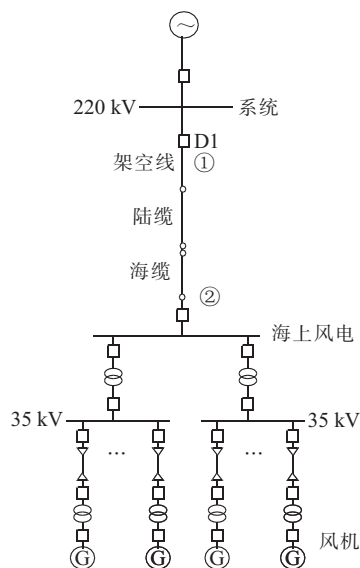


图1 风电场接入电网示意图

表1 示例计算参数

序号	名称	参数
1	风电场总容量	300 MW
2	风电场出现概率较大出力	180 MW
3	单台风机容量	3.0 MW
4	风电机组额定功率因数	1
5	风电机组功率因数调节范围	0.95~−0.95
6	220 kV 主变 2 台	2×150 MV·A
7	220 kV 主变电压等级	220/35 kV
8	220 kV 主变短路阻抗	14%
9	35 kV 机端升压变 100 台	100×3.3 MV·A
10	35 kV 机端升压变短路阻抗	7%
11	35 kV 机端变电压	35/0.69 kV
12	35 kV 集电回路数	13 回
13	每回集电回路风机台数	8~9 台
14	35 kV 海缆, 截面 70 mm ²	56.5 km
15	35 kV 海缆, 截面 120 mm ²	9.3 km
16	35 kV 海缆, 截面 150 mm ²	7.5 km
17	35 kV 海缆, 截面 185 mm ²	8.5 km
18	35 kV 海缆, 截面 240 mm ²	48.2 km
19	35 kV 海缆, 截面 300 mm ²	9.5 km

表2 风电场主变高压侧功率因数计算结果

序号	风机功率因数	主变高压侧功率因数
1	0.95	0.982
2	0.98	0.999
3	1	−0.982

在风电场满发的运行方式下,装设不同容量的高压并联电抗器、风电场送出线路电网侧功率因数计算结果见表3。由表3可知,在装设130~145 Mvar的高压并联电抗器后,风电场送出线路电网侧功率因数接近1。为避免非全相状态下的谐振区,高压并联电抗器容量可选择130 Mvar。经工频过电压计算,并网输电线

配置 130 Mvar 高抗,已能满足风电场不同运行方式下,送出输电线各种故障方式限制工频过电压的要求。

表 3 风电场送出线电网侧功率因数计算结果

序号	高压并联电抗器		风电场送出线电网侧的功率因数
	补偿度 / %	容量 / Mvar	
1	80	145	-0.998
2	70	130	0.998
3	60	110	0.987

注:风电场送出线路充电功率约为 183 Mvar。

(3) 风电场动态无功补偿容量的确定。风电场应具备的无功调节能力,按照上述(2)风电场送出线路电网侧功率因数+0.98(高峰)~-0.98(低谷)来要求。风机不具备功率因数动态连续调节能力时,功率因数设定为 0.98,相关计算结果见表 4。风机具备功率因数动态连续调节能力时,相关计算结果见表 5。

表 4 动态无功补偿容量计算

运行方式	风电场出力 / %	动态无功补偿容量 / Mvar
高峰	100	-29.4
	50	30.9
	10	54.9
低谷	100	78.6
	50	87.7
	10	69.1

表 5 功率因数可动态调节时动态无功补偿容量计算

运行方式	风电场出力 / %	风机功率因数	动态无功补偿容量 / Mvar
高峰	100	+0.971	-29.4
	50	-0.988	30.9
	10	-0.95	54.9
低谷	100	0.993	78.6
	50	-0.95	87.7
	10	-0.95	69.1

由表 4 计算结果可知,若风机不具备功率因数动态连续调节能力,风电场 35 kV 母线侧所需的动态无

功补偿装置容量为-30 Mvar(容性)~90 Mvar(感性)。由表 5 计算结果可知,若风机具备功率因数在+0.95~-0.95 范围内动态连续可调,风电场 35 kV 母线侧所需的动态无功补偿装置容量为 0~60 Mvar(感性)。

5 结束语

近阶段,江苏开发建设的海上风电场离岸距离较近容量较小,因此结构简单、技术成熟、经济性优的高压交流输电并网方式仍然是接入系统的首选。下阶段江苏将进入海上风电规模化发展阶段,风电场容量和离岸距离将进一步增加,而高压交流海缆电容效应对交流输电距离和输送容量的限制将更为明显,成为大容量、远距离海上风电并网的技术瓶颈。柔性直流输电技术可有效解决远距离、大容量海上风电并网技术要求,随着其技术的不断成熟和推广应用,工程造价也将逐步降低。未来,柔性直流输电技术凭借优异的并网性能、合理的性价比,将成为大容量、远距离海上风电并网方式的最佳选择。建议加强对柔性直流输电并网方式及其工程实践应用的研究,为今后江苏特大型海上风电基地的建设创造更有利的条件。

参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [2] 国家电网公司. Q/GDW 392—2009 风电接入电网技术规定[S].
- [3] 张纬钊,何金良,高玉明,等. 过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002:173-177.
- [4] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M].北京:中国电力出版社,2005:384-396.
- [5] 电力工业部. DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].北京:中国电力出版社,1997.

作者简介:

陆 燕(1977),女,江苏南通人,工程师,从事新能源接入系统、电网运行方式、经济调度工作;
谈 健(1974),男,江苏常州人,高级工程师,从事电力系统规划、新能源接入系统、电力市场分析预测工作。

A Discussion on the Integration of Offshore Wind Farm into Jiangsu Power Grid

LU Yan¹, TAN Jian²

(1.Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: Combining with the last constructed offshore wind power farm in Jiangsu Province, the selecting principles of integrating voltage level and number of connecting circuits are introduced. The reactive power balance and the court-measures for inner over-voltage of large-scale wind farm connected to the power grid through a long distance transmission line are discussed. Based on an engineering project, a method for reactive compensation capacity calculation for large-scale offshore wind farm is proposed.

Key words: offshore wind farm; access voltage; HV submarine cable; reactive power balance; inner-overvoltage; reactive compensation capacity

一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法

薛明军, 陈福锋, 姚 亮
(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘 要:在超高压输电线路单相重合闸的成功取决于故障处潜供电弧能否快速自熄,恢复电压和潜供电流是影响潜供电弧的决定性因素。分析了影响恢复电压的主要因素,对不带并联电抗线路提出了利用系统和线路参数以及负荷电流,精确计算恢复电压的方法,并通过 EMTP 仿真数据证明了该方法的正确性,该仿真结果可以用到高压输电线路保护装置中的自适应重合闸判据中。

关键词:超高压;输电线路;恢复电压;潜供电流;瞬时性故障

中图分类号:TM726.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0059-03

输电线路由于分布在户外,受自然条件的影响最为显著,因此发生故障的几率较高。根据运行经验,高压输电线路超过 70% 的故障为单相接地故障,而其中 80% 以上又为瞬时性故障。瞬时性故障及时重合断路器有利于连续供电和电网的稳定运行^[1]。高压输电线路发生单相接地故障时,健全相对故障相的耦合使得故障相存在较大的恢复电压和潜供电流,影响单相重合闸的成功。对于高压输电线路,存在带并联电抗器和不带并联电抗器 2 种情况。后者故障时恢复电压可能比前者高,盲目重合断路器将对系统造成更大的危害^[2,3],因此对不带并联电抗器线路恢复电压的研究尤为重要。

近年来国内外学者在恢复电压方面进行了大量的研究,提出了很多恢复电压的相关应用,如文献[4-6]利用故障后恢复电压的幅值或相位特征来判别故障是否为永久性故障,从而完成自适应重合闸判据;文献[7-9]利用恢复电压的大小来判别线路是否需要装设并联电抗器或快速接地开关来减小恢复电压。潜供电流与恢复电压幅值的大小是超高压输电线路潜供电弧能否自熄的决定因素,为保证单相自动重合闸的成功,需将恢复电压和潜供电流限制在一定数值以下,因此恢复电压计算方法的精确性显得尤为重要。文中通过对线路两侧断路器单相跳开后的非全相运行电路进行较精确求解,提出利用系统与线路参数以及运行负荷来计算线路的恢复电压的方案。

1 路恢复电压

系统发生单相接地故障后,随着故障相两端断路器的跳开,瞬时性故障电弧熄灭后,故障点消失,电路转非全相运行,故障相通过与健全相的电容耦合和电磁耦合使得断开相仍存在较高恢复电压,其端电压由电容耦合电压和电磁耦合电压叠加组成,对不带并联

电抗线路可以进行 π 型等效计算,如图 1 所示,图中 C_m 为线路互感电容, C_0 为线路对地电容, Z_s 为线路自阻抗。

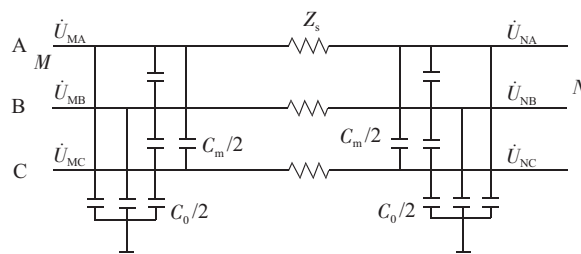


图 1 线路 π 型等值模型

以 A 相瞬时性故障为例进行分析,两端 A 相断路器跳开后,取电路进入稳定状态后的恢复阶段进行分析,当瞬时性故障电弧熄灭后,故障点消失,此时可以将图 1 的 π 型等值电路简化为图 2,其中 $\dot{U}_{xl}$ 为健全相(B 和 C)对于断开相(A 相)的电磁感应电压, $\dot{U}_{xl}$ 与健全相电流成正比, $\dot{Z}_m$ 为线路互阻抗。单位长度的电磁耦合电压可以表示为^[10-13]:

$$\dot{U}_{xl} = (\dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC}) \dot{Z}_m \quad (1)$$

其中 $\dot{Z}_m$ 为单位长度线路相间互感阻抗。

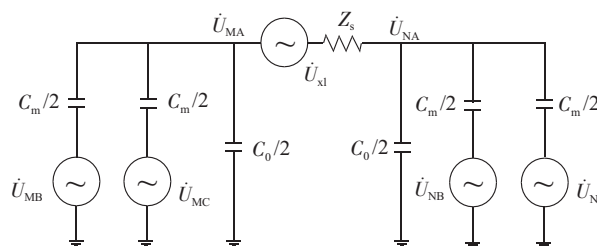


图 2 A 相断开后等值电路

1.1 瞬时性故障断开相端电压的计算

由于线路自阻抗 $\dot{Z}_s$ 相对于线路容抗值小得多,可以忽略不计,利用戴维南定理将图 2 简化为图 3 所示^[1]。

由图 3 简化等值电路可知:M 端电压 $\dot{U}_{MA}$ 可用如下

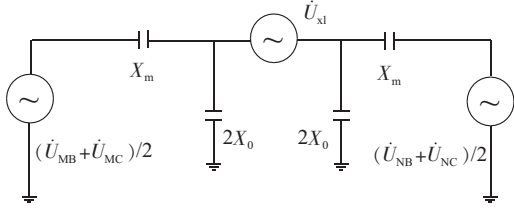


图3 A相断开后简化等值电路

公式表示:

$$\dot{U}_{MA} = k_1 (\dot{U}_{MB} + \dot{U}_{MC})/2 + k_2 (\dot{U}_{NB} + \dot{U}_{NC})/2 + k_3 \dot{U}_{xl} \quad (2)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为图中电路相应的等值阻抗比值, 其值分别为:

$$k_1 = k_2 = \frac{2X_0 // 2X_0 // X_m}{2X_0 // 2X_0 // X_m + X_m} \quad (3)$$

$$k_3 = \frac{2X_0 // X_m}{2X_0 // X_m + 2X_0 // X_m} = \frac{1}{2} \quad (4)$$

A相断开时, BC两相运行时零序电流可以用式(5)来表达^[14-17]:

$$3\dot{I}_{M0} = \dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC} = 3 - \dot{I}_{MA} / (1 + 2 \frac{\dot{Z}_{0\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma}}) \quad (5)$$

式中: $\dot{I}_{MA}$ 为系统正常运行时 M 侧 A 相负荷电流; $\dot{Z}_{0\Sigma}, \dot{Z}_{1\Sigma}$ 分别为断线端口的零序和正序综合阻抗。

$$\begin{cases} \dot{Z}_{0\Sigma} = \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{N0} \\ \dot{Z}_{1\Sigma} = \dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_{N1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{Z}_{M0}, \dot{Z}_{N0}, \dot{Z}_0$ 分别为 M 侧系统、N 侧系统和线路的零序阻抗; $\dot{Z}_{M1}, \dot{Z}_{N1}, \dot{Z}_1$ 分别为 M 侧系统、N 侧系统和线路的正序阻抗。N 侧的 B 相、C 相电压可以用 M 侧的电压来表示:

$$\begin{cases} \dot{U}_{NB} = \dot{U}_{MB} - \dot{I}_{MB} \cdot \dot{Z}_s - \dot{I}_{MC} \cdot \dot{Z}_M \\ \dot{U}_{NC} = \dot{U}_{MC} - \dot{I}_{MC} \cdot \dot{Z}_s - \dot{I}_{MB} \cdot \dot{Z}_M \end{cases} \quad (7)$$

非故障相受故障的影响不大, 其电压特征量变化很小, 一般计算中, 可认为故障前后不变。则有:

$$\dot{U}_{MB} + \dot{U}_{MC} = -\dot{U}_{MA} \quad (8)$$

将式(1)、(5)、(7)、(8)带入到式(2)中, 恢复电压的表达式可以整理为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MA} = & -k\dot{U}'_{MA} - \frac{k}{2} 3\dot{I}_{M0} (\dot{Z}_s + \dot{Z}_M) + \frac{3}{2} \dot{I}_{M0} \dot{Z}_M = \\ & -k\dot{U}'_{MA} - k_s \dot{I}'_{MA} \dot{Z} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\dot{U}'_{MA}, \dot{I}'_{MA}$ 分别为系统正常运行时的 A 相 M 端电压和电流; k, k_s 值分别为:

$$k = k_1 = \frac{X_0}{2X_0 + X_m} = \frac{\omega C_m}{2\omega C_m + \omega C_0} = \frac{C_1 - C_0}{2C_1 + C_0} \quad (10)$$

$$k_s = \frac{3}{2} (\dot{Z}_M - k\dot{Z}_M - k\dot{Z}_s) / (1 + 2 \frac{\dot{Z}_{0\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma}}) \quad (11)$$

式中: C_1, C_0 分别为线路的正序电容和零序电容。线路断开相两端恢复电压向量如图4所示。

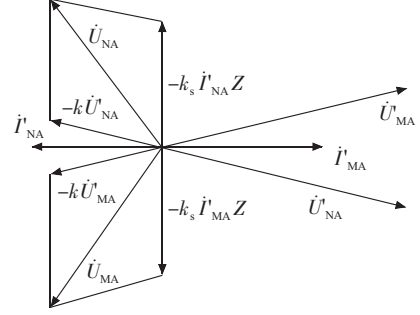


图4 恢复电压向量

1.2 永久性故障断开相端电压

永久性故障时, 故障点的电压同样可看成是电容耦合电压与电感耦合电压在该点产生的电压的叠加。但电弧熄灭后, 故障点依然存在, 电路中端电压中电容耦合电压很小, 只有电磁耦合电压。因此相对瞬时性故障时, 永久性故障端电压要小得多。

1.3 恢复电压分析

根据以上分析, k 值与线路的正序电容和零序电容有关, 即与输电线路的导线布置方式有关, k_s 则与系统和线路的阻抗参数都有关系, 同时恢复电压还与系统的电压等级和输送功率有关, 系统电压等级越高, 恢复电压越高; 系统输送功率越大, 恢复电压越高。因此, 高电压大功率输送线路需要架设并联电抗器来减小恢复电压的影响, 从而提高单相重合闸的成功率。

从上述分析知, 还可将此恢复电压计算公式应用到高压数字式线路保护装置中去, 将 k 和 k_s 值作为定值来开放, 对于一个确定的线路, 可以利用线路和系统参数来完成整定, 单相故障跳开后进入稳态阶段后, 利用保护安装处测量得到的线路电压与式(8)正常运行时估算的恢复电压进行比较, 误差在一定范围内就判别为瞬时性故障, 否则为永久性故障, 据此来构成自适应重合闸判据。但当现场无法获取精确的线路参数时, 则需要评估参数误差对该判据的影响, 是否会造成该判据误动。

2 仿真实验

2.1 仿真系统及其参数

为验证文中提出的估值计算的准确性, 采用仿真模型对所提方法进行了分析验证。模型采用简单的 500 kV 两机系统, 如图5所示, M, N 为保护安装处。

每公里线路参数为 $R_1=0.022 \Omega, R_0=0.183 \Omega, L_1=$

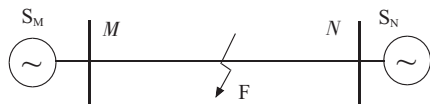


图5 仿真系统

$0.28 \Omega, L_0=0.86 \Omega, C_1=0.013 \mu\text{F}, C_0=0.0092 \mu\text{F}$ 。M 侧系统: $Z_{m1}=0.66+8.4j, Z_{m0}=1.13+14.38j$ 。N 侧系统: $Z_{n1}=1.1+14j, Z_{n0}=2.21+28.1j$ 。

2.2 仿真结果及其分析

采用 EMTP 分别针对不同线路长度和不同功角的恢复电压进行仿真, 线路长度分别为 50 km, 100 km, 150 km 和 200 km 时, 两端电源相角差分别为 $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 时, 模拟在线路中点发生 A 相瞬时性故障, 断路器在 100 ms 跳开, M 端恢复电压的计算值和实际值如表 1 所示。表中计算的恢复电压为故障跳开后 500 ms 时刻的值, 采样频率为 2000 kHz。

表1 仿真结果对比

恢复电压 /kV		线路长度 /km			
		50	100	150	200
60°	实际值	79.5	80.2	76.1	74.6
	计算值	78.9	80.0	75.7	74.1
	误差 /%	-0.75	-0.25	-0.53	-0.67
45°	实际值	77.3	77.8	71.2	69.2
	计算值	76.8	77.1	70.8	68.8
	误差 /%	-0.62	-0.90	-0.56	-0.58
30°	实际值	73.8	74.1	65.1	61.7
	计算值	73.4	73.6	64.6	61.2
	误差 /%	-0.54	-0.67	-0.77	-0.81

由表 1 可以看出, 此计算方法与实际值相对误差小于 1%, 对高压输电线路, 恢复电压的大小与线路长度, 输送负荷都存在一定的关系, 文中提出的利用系统参数和线路正常运行工况来估算恢复电压的方案具有很高的准确度, 仿真结果与理论分析一致。

图 6 是 A 相瞬时性故障时 A 相恢复电压随时间变化的曲线, 由图可见, 恢复电压进入稳态阶段需要一段时间, 而这个时间跟线路的参数有关系, 现场运行中单相重合闸的时间一般较长, 保证了有足够的稳态数据窗去执行该判据, 该判据可以在故障切除后 300 ms 之后再投入, 以躲过恢复电压的暂态过程。

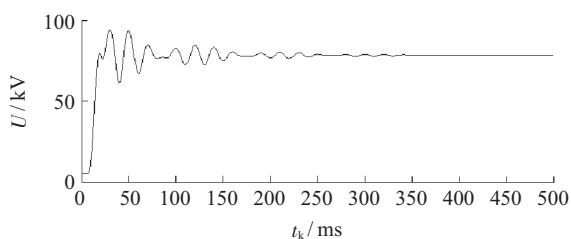


图6 A 相瞬时性故障恢复电压

3 结束语

分析了影响恢复电压的主要因素, 简化了在线路不带并联电抗器的单相接地故障下断路器跳开后非全相运行时的等效电路, 提出了利用系统参数和负荷电流来精确估算线路恢复电压的计算方法并论证之, 最后通过 EMTP 仿真结果证明了该计算方法的准确性, 此方法原理简单、计算量小, 可用于各种不带并联电抗器的超高压输电线路中。

参考文献:

- [1] 商立群, 白维祖, 程刚. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 81-84.
- [2] 商立群, 施围. 同杆双回输电线路的潜供电流与恢复电压[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 22-25.
- [3] 郭征, 贺家李, 王俊. 特高压长线路单相自适应重合闸的新原理[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1005-1008.
- [4] 林莘, 柏娜, 徐建源. 超高压线路上潜供电弧熄灭特性的分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 7-12.
- [5] 孙秋芹, 王冠, 李庆民. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- [6] 刘浩芳, 王增平, 徐岩. 带并联电抗器的超/特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.
- [7] 林军, 郑荣进. 利用中性点电抗器实现高压输电线单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 89-92.
- [8] 王增平, 刘浩芳, 徐岩. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.
- [9] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 11(26): 75-84.
- [10] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵. 带并联电抗器输电线路永久性故障识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 80-85.
- [11] 李志红. 输电线路单相瞬时性故障的判别研究[J]. 继电器, 2007, 35(26): 102-106.
- [12] 程玲, 吴剑波. 自适应单相重合闸的研究现状及展望[J]. 继电器, 2006, 35(26): 246-250.
- [13] 程玲, 徐玉琴, 宋稀霖. 基于电弧特性的特高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2007, 35(22): 18-22.
- [14] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
- [15] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.
- [16] 王海蓉, 袁兆强, 鲁明芳, 等. 电力系统自适应重合闸技术[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(3): 81-84.
- [17] 宋亮亮, 汪萍, 袁宇波, 等. 双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 18-21.

作者简介:

薛明军(1983), 男, 湖北荆州人, 工程师, 从事高压继电保护研究开发工作;

多采样率转换算法对差动保护的应用研究

薛 蓉

(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘 要:智能变电站中要求合并单元的数据采集满足“一处采集, 全站共享”, 因此合并单元数字接口必须具有采样率转换的功能, 并且满足差动保护动作的要求。文中主要研究了通过抽取和插值环节的级联实现任意分数倍采样频率归一化的方法及其对差动保护差电流的影响, 设计了一种零相位滤波算法以解决在采样频率转换过程中高阶 FIR 数字滤波器带来的群延迟较大的问题, 与抽取和插值算法配合使用, 可以将任意不同采样频率的 ECT 采样数据统一到相同的采样基准下, 实现差动保护各分支采样数据之间频率的快速统一, 提高保护动作的快速性。

关键词:采样频率转换; 差电流; 群延迟; 零相位滤波

中图分类号: TM774

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0062-04

智能变电站合并单元的数据采集需满足“一处采集, 全站共享”, 对于继电保护装置, 其采样率满足 IEC 60044-8 的要求 (额定采样频率可取 1 kHz, 2.4 kHz 和 4 kHz 中的任意一种); 对于计量设备, 其采样率在 8 kHz 以上; 对于电能质量分析装置和行波测距装置, 其采样率要求在 12.8 kHz 以上^[1,2]。DL/T 282—2012 则要求合并单元应能可配置采样率, 以满足智能变电站中各智能电子装置(IED)的不同需求。因此在智能变电站中, 合并单元的数字接口必需具有采样率转换的功能, 但是在采样率转换的同时, 需要确保差动保护装置能正确判别故障区域和发出动作跳闸信号^[3-5]。文中通过设计一种零相位滤波算法, 实现了差动保护各分支采样数据之间频率的快速统一。

1 多采样率信号处理

多采样率信号处理实际上是对采样后的离散序列进行重新采样的过程, 主要包括抽取和内插两部分内容, 通过抽取和插值的级联可以实现任意分数倍采样频率转换^[6,7]。

降低采样频率以去除多余数据的过程称为信号的抽取, 是把原采样序列 $x(n)$ 每隔 $D-1$ 个取一个数据, 以形成一个新的序列。整数 U 倍插值就是在已知的 2 个抽样点之间插入 $U-1$ 个抽样值的点。将二者级联则可以实现任意分数倍采样频率之间的转化, 采样频率变换因子为 U/D , 其实现过程如图 1 所示^[8,9]。数字滤波器的输入、输出都是离散时间信息, 且单位脉冲响应 $h(n)$ 也是离散的。对于一个线性时不变系统, 滤波器的时域输入 $x(n)$ 、输出 $y(n)$ 的关系为 $y(n) = x(n) \cdot h(n)$ 。由图 1(a)可见, 插值过程中的抗镜像滤波器 $h_U(n)$ 和抽取过程中的抗混叠滤波器 $h_D(n)$ 其输入信号频率均为 $f = Uf_s$, 故可以等效为一个组合低通

滤波器 $h_R(n)$, 其理想频率特性为:

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} U & 0 \leq |\omega| \leq \min(\frac{\pi}{U}, \frac{\pi}{D}) \\ 0 & \min(\frac{\pi}{U}, \frac{\pi}{D}) \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

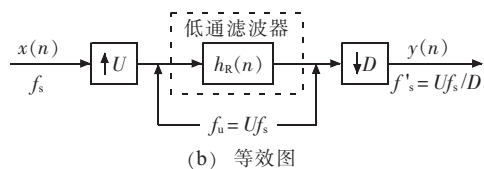
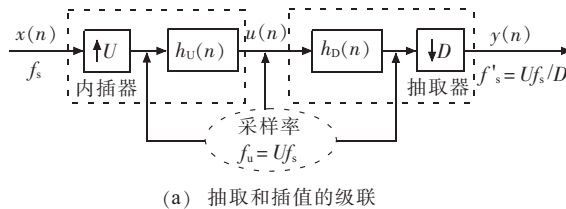


图 1 按有理因子 U/D 的采样频率转换方法

IEC 60044-8 标准规定电子式电流互感器数字化输出数据的额定采样频率可取 1 kHz, 2.4 kHz 和 4 kHz 中任意一种。通过适当设置抽取因子 D 和插值因子 U , 用抽取和级联来实现 IEC 60044-8 标准规定的 3 个采样频率之间的转换, 如图 2 所示。

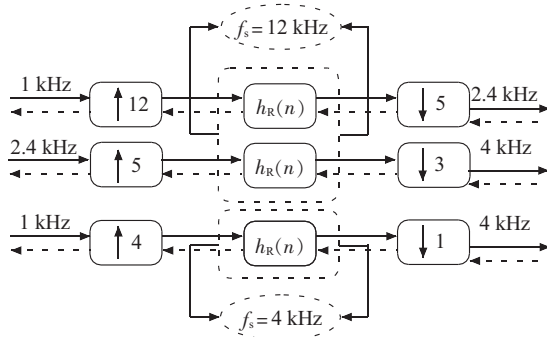


图 2 采样频率转换框图

实现任意分数倍采样频率转换可以分为以下两步：第一, 确定转换后的统一采样基准, 设置适当的抽取因

子 D 和插值因子 U ; 第二, 设计满足频率转换要求的数字低通滤波器。而对转换后差电流、保护动作时间的影响则关键取决于第二步, 即低通滤波器的设计, 其性能的优劣直接影响采样频率转换的整个效果。

数字滤波器采用有限脉冲响应滤波器(FIR), 由于 FIR 滤波器不存在系统极点, 主要采用非递归结构, 因而从理论上和从实际的有限精度的运算中, 都是绝对稳定的系统。FIR 滤波器可以采用快速傅里叶变换(FFT)来实现, 在阶数相同的条件下, 运算速度可以快很多, 同时 FIR 具有严格的线性相位的优点, 因此文中在采样频率转换过程中选择 FIR 滤波器。

3 零相位滤波算法

通过对线性相位脉冲响应系数 $h(n)$ 的循环移位实现了零相位脉冲响应, 消除了群延迟。假设线性相位 FIR 滤波器的阶数为 N , 其离散傅里叶变换(DFT)为:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi kn/U} \quad k=0, 1, 2 \dots U-1 \quad (2)$$

令:

$$e^{j2\pi/U} = W_U \quad (3)$$

将式(3)代入(2), 得到:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) W_U^{-nk} \quad k=0, 1, 2 \dots U-1 \quad (4)$$

计算一个序列的 DFT 是以该周期序列为前提的, 可以看作将脉冲响应 $h(n)$ 系数平均分布在一个圆周上, 起点则是 $h(n)$ 系数的第一个点, 因此对 $h(n)$ 作 DFT, 得到其相频响应为:

$$\Phi(\omega) = -2\pi f \left(\frac{N-1}{2} \right) \quad (5)$$

现将 $h(n)$ 循环左移 $(N-1)/2$ 个采样点, 新的脉冲响应序列 $h_1(n)$ 的 DFT 变换为:

$$H_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_1(n) W_U^{-nk} \quad (6)$$

$$H_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h\left(n + \frac{N-1}{2}\right) W_U^{-nk} \quad (7)$$

令 $n' = n + (N-1)/2$, 则:

$$H_1(k) = W_U^{k[(N-1)/2]} \sum_{n=0}^{N-1} h(n') W_U^{-n'k} = W_U^{k[(N-1)/2]} H(k) = e^{j(2\pi/U)k[(N-1)/2]} H(k) \quad (8)$$

$h_1(n)$ 的相频响应为:

$$\Phi_1 = \begin{cases} \pi \frac{k}{U} (N-1) = \pi f (N-1) & N \text{ 为奇数} \\ \pi \frac{k}{U} (N) = \pi f N & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (9)$$

通过上述分析可知, $h(n)$ 的相频响应为:

$$\Phi_1 = \begin{cases} -2\pi f \frac{N-1}{2} & N \text{ 为奇数} \\ -2\pi f \frac{N-1}{2} & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)和(10)可得, N 为奇数时, $H_1(k)$ 的相位为 $\pi f(N-1) - \pi f(N-1) = 0$; N 为偶数时, 相位为 $\pi f N - \pi f(N-1) = \pi f$ 。因此当 N 为奇数时, 利用 DFT 变换获得了零相位滤波器, 实现零群延迟的滤波算法。

但是该方法在实现时需要缓存 M 个采样周期的数据, 其缓存延时 t_d 由信号序列长度 M 与信号采样频率 f_s 决定, 序列长度 M 越小, 缓存延时越短。同时从图 3 观察到所设计数字滤波器的阶跃响应至少需要 5 个点才能稳定, 因此对于进入数字滤波器的信号序列, 其长度 M 越大, 受到滤波器边缘效应的影响越小, 滤波后输出的最终值越稳定。

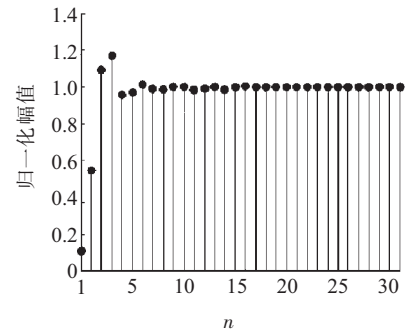


图 3 滤波器的阶跃响应

在充分考虑 M 对延时与稳定性的影响后, 选取 $M=5$, 在采样频率最低为 1 kHz 时, 缓存延时为 5 ms。

4 仿真实验

为了验证文中所提算法的可行性和有效性, 利用 Matlab/Simulink 对 500 kV 两圈变压器进行仿真分析, 系统模型如图 4 所示, 变压器采用 Yn/D-11 接线, 转角方式为减零序的相电流差动方式, 由软件算法实现。

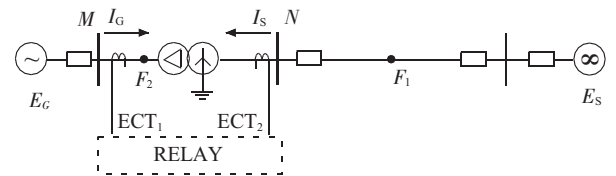


图 4 500 kV 系统仿真模型

ECT₁ 和 ECT₂ 为分别装设在变压器首端和末端的电子式电流互感器, 其分别为变压器差动保护装置提供采样数据。设 ECT₁ 输出数据采样频率为 4 kHz, ECT₂ 输出数据采样频率为 1 kHz。以高采样频率的采样数据向低采样频率转化为例进行仿真, 首先确定插值因子 $U=1$, 抽取因子 $D=4$, 关于 FIR 滤波器系数的设计, 采用基于切比雪夫逼近原理的等波纹设计方法设计低通滤波器的系数, 通过多次仿真优化取滤波器阶

数 $N=47$, 幅频响应如图 5 所示。

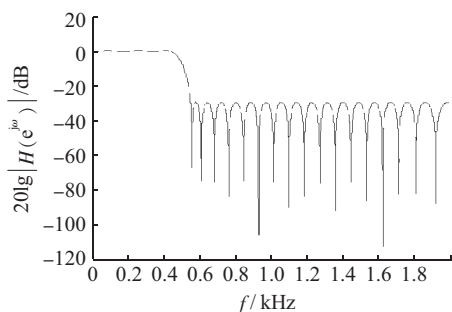


图 5 幅频特性

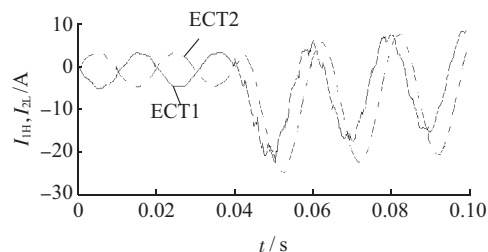
方法 1: $U=1$ 倍插值、直接线性卷积滤波和 $D=4$ 倍抽取三者级联的传统采样频率转换方法;

方法 2: $U=1$ 倍插值、零相位滤波算法和 $D=4$ 倍抽取三者级联的采样频率转换方法。

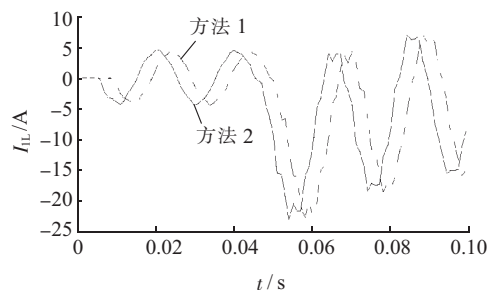
4.1 变压器内部故障

设 A 相绕组在 $t=0.04$ s 时发生区内三相短路故障, ECT1, ECT2 在采样前经低通滤波器进行抗混叠滤波, 同时将 ECT2 的采样数据向一次侧进行归算。图 6(a) 给出了 ECT1 和 ECT2 的 A 相采样电流数据 I_{1H} , I_{2L} 。图 6(b) 给出了 A 相高采样率的 ECT1 采样数据波形分别采用方法 1 和方法 2 进行采样率转换后的采样电流输出值 I_{1L} 。可见 2 种方法都会造成一定的数据响应延迟, 但方法 1 的转换方法输出滞后于方法 2 的输出, 延迟约为 4.65 ms。因此, 采用线性卷积的滤波输出滞后于零相位滤波, 制约了保护动作的快速性, 而零相位滤波算法在完成滤波时不带来附加的输出延迟。

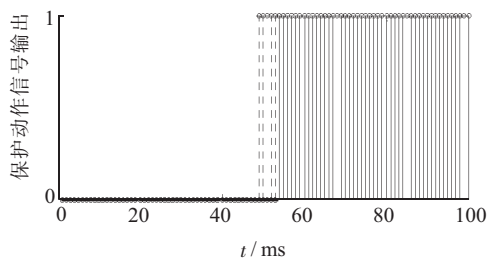
为了更加清晰地了解零相位滤波算法的优越性, 选用采样值差动保护判据的变压器保护方案^[10], 即双折线采样值差动判据, 1 为跳闸断开动作, 0 为闭合导通。由于转换后采样频率为 1 kHz, 因此选取数据窗长 $R=8$, 判别点数 $S=6$, 即连续 8 次判别中有 6 次及以上



(a) ECT 采样数据



(b) 转换后电流采样数据



(c) 动作情况

图 6 变压器内部故障时采样频率转换

输出动作信号 1, 否则输出 0, 其动作信号如图 6(c) 所示。方法 1 必须等到正确的滤波输出后方能进入差动保护算法, 其动作时间明显大于方法 2 的动作时间。滤波器阶数越高, 其动作延迟时间也越大。

4.2 高压端区外三相短路故障

在 $t=0.04$ s 时高压侧母线 N 区外 F_1 点发生三相短路故障。以 A 相为例进行分析, 图 7 为 ECT1 和 ECT2 的 A 相采样数据 I_{1H} , I_{2L} 。同样, 对采样频率为 4 kHz 的 ECT1 的采样数据转角后分别采用方法 1 和方法 2 转换后采样数据输出 I_{1L} 如图 8(a) 所示, 图 8(b) 为采样频率转换后计算的差电流 I_{dL} , $I_{dL}=I_{1L}-I_{2L}$, 其最大瞬时值为 0.65 A, 通过合理的整定, 能够保证在区外故障时差动保护的正确判别。电子式互感器很好地克服了互感器的饱和问题, 因此互感器饱和对变压器差动保护的影响不在此讨论范畴。

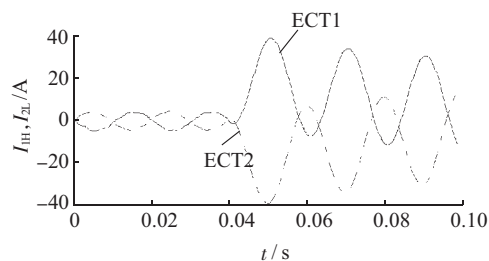
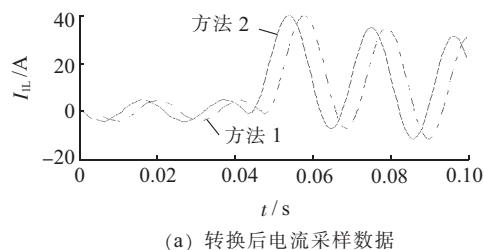
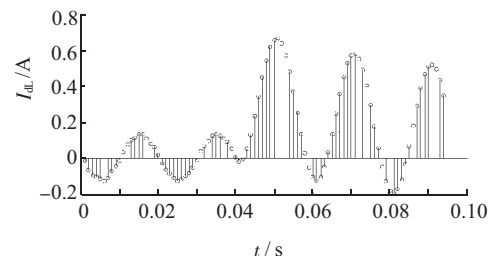


图 7 高压端区外三相故障两端电流采样数据



(a) 转换后电流采样数据



(b) 差电流

图 8 区外故障时采样频率转换及差电流

5 结束语

较传统的采样频率频率转换方法而言,零相位滤波算法有地解决了高阶 FIR 滤波器带来的群延迟较大的问题,极大地提高了保护动作的快速性,同时在区外故障时转换后的误差电流能够满足保护精度的要求,不会造成区外故障时的误动作,有效地实现了测量环节和智能保护装置之间频率的快速统一,理论分析和仿真实验证明了文中所提算法的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
- [2] 周 斌,张 何. 基于电子式互感器的变电站智能设备采样值接口技术[J]. 江苏电机工程,2007,26(2):37-39.
- [3] 刘 文,杨慧霞,祝 斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):120-126.

- [4] 陆玉军,徐 勇,薛 军,等. 智能变电站中低压母线保护设计[J]. 江苏电机工程,2014,33(3):21-25.
- [5] 杨经超,尹项根,陈德树,等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):71-77.
- [6] 刘 静,邵能灵,李 坤. T 型线路电流差动保护研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):58-63.
- [7] 宗孔德. 多采样率信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1996:105-110.
- [8] 徐光福,陆于平,吴崇昊,等. 多采样率信号处理在数字化变电站差动保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):44-48.
- [9] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003:74-82.
- [10] 丛 伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30.

作者简介:

薛 蓉(1987),女,江苏江都人,硕士,从事电力工程设计工作。

Research on the Impacts of Multi-Rate Conversion Algorithm on Differential Protection

XUE Rong

(Nanjing Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In the smart substation, data collected from any place is available for the entire substation' is required by data acquisition of merging unit. Therefore, the digital interface of merging units should possess the sampling rate conversion function and meet the demand of differential protection. This paper studies the mechanism of sampling rate conversion with cascade connection of decimation and interpolation. Also, the impacts of sampling rate conversion on differential current of differential protection is analyzed. To reduce group delay of high order Finite Impulse Response (FIR) in sampling rate conversion, a zero phase filtering algorithm is designed. Combining this algorithm with decimation and interpolation algorithm, the data from ECTs with different sampling rates can be converted to the same one. This achieves a unified sampling rate and improves the action speed of differential protection.

Key words: sampling rate conversion; differential current; group delay; zero phase filtering

(上接第 61 页)

陈福锋(1979),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作;

姚 亮(1979),男,江苏南京人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作。

An Accurate Method for Recovery Voltage Calculation on Extra High Voltage Transmission Lines

XUE Mingjun, CHEN Fufeng, Yao Liang

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: Single phase adaptive reclosing technology improves the reliability and the stability of the power system. A successful reclosing is depended on quick and automatic extinction of the secondary arc. The factors affecting the secondary arc are recovery voltage and secondary arc current. The paper proposes a method to calculate the accurate recovery voltage of transmission line without series capacitor by using system and line parameters. Then the main factors affecting recovery voltage are detailed discussed. It shows that recovery voltage is related to transmission line voltage rate, transmitted power, conductor spatial arrangement and line parameters. Simulation results from Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) validates the proposed method.

Key words: extra high voltage; transmission line; recovery voltage; secondary arc current; transient fault

燃煤 PM10 湍流聚并 GDE 方程算法及算例分析

周林海, 骆建友, 刘含笑, 郭峰, 余顺利, 吕岱岳
(浙江菲达环保科技股份有限公司, 浙江 诸暨 311800)

摘要: 颗粒群平衡方程(GDE)是模拟计算超细颗粒物的聚并情况有效方法, 针对 GDE 方程的特点分别探讨了分区法、矩方法、MC 方法等主要算法, 运用激光粒度分析仪和 ANDERSON 测量 PM10 初始尺度分布, 为超细颗粒物聚并的数值模拟计算提供了理论借鉴。利用 CFD 软件编程功能, 编写湍流聚并计算程序, 计算结果同文献、实验结果吻合较好, 有效说明了湍流聚并模型及计算方法的合理性。

关键词: 颗粒群平衡方程; 算法; 超细颗粒物

中图分类号: TM621.73

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0066-04

超细颗粒物难以被除尘设备捕捉以及更易被人体吸收, 具有很大的危害性, 所以强化对细颗粒粉尘的收集将是除尘技术发展的新方向。颗粒物聚并技术是控制超细颗粒粉尘排放的有效方法, 其中, 湍流聚并是最有应用前景的一种团聚技术^[1]。对于颗粒动力学演变过程进行定量描述有助于揭示颗粒聚并机制, 完善湍流聚并技术的理论基础。颗粒群平衡模型(PBM)仅仅抓住颗粒尺度分布这个关键参数, 采用概率方法为各种动力学实践建立定量的描述模型。对于颗粒群平衡方程(GDE)的算法也是目前研究的热点^[2], 文中将对其展开讨论, 为后续研究提供理论借鉴, 并利用 CFD 软件编程功能, 编写湍流聚并计算程序, 引入湍流计算模块和计算方法, 验证该模型和计算方法的合理性。

1 颗粒湍流聚并动力学方程

基于颗粒稀疏和分子混沌假设, 在仅考虑颗粒湍流聚并的情况下, 建立在欧拉坐标体系的颗粒尺度分布函数的零维平衡方程:

$$\frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_{v_{\min}}^v \beta(v-u, u, t) n(v-u, t) n(u, t) du - n(v, t) \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \beta(v, u, t) n(u, t) du \quad (1)$$

式中: $\partial n(v, t)$ 是体积为 v 的粒子在 t 时刻粒子数密度分布函数; $\beta(u, v-u)$ 是体积分别为 u 和 $v-u$ 的粒子间湍流聚并核; $v_{\min}, v_{\max}$ 是所研究颗粒物体中粒子体积的最小值和最大值。方程右边第一项表示体积为 u 的颗粒和体积为 $v-u$ 的颗粒聚并成体积为 v 颗粒的速率; 第二项表示体积为 v 的颗粒同其他颗粒的聚并速率。

Zaichik^[3]在各向同性的湍流中提出了惯性颗粒湍流聚并核 β 的具体表达式, 该表达式适用于全部范

围的惯性颗粒(从零惯性颗粒到大惯性颗粒), 并且考虑 2 种影响聚并效率的作用, 即湍流和聚集效应对聚并效率的增大效果。

$$\beta = 2\pi d^2 (|w_r(d)|) \Gamma(d) \quad (2)$$

式中: Γ 为径向分布函数, 表征颗粒的不均匀分布, 即颗粒的局部富集效应; $w_r(d)$ 是颗粒间相对速度, 主要由连续相引起。后来又对方程进行修正^[4], 得到适用于任意密度颗粒的聚并核:

$$\beta = 4\pi^{1/2} d^2 V_t \quad (3)$$

$$V_t = (V_{in}^2 + V_{sp}^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$V_{in} = |1 - A| \left(\frac{f_{u1} + f_{u2}}{2} - f_{u1} f_{u2} \right)^{1/2} u' \quad (5)$$

$$V_{sp} = \left\{ \frac{[(1-A)f_{u1} + A][(1-A)f_{u2} + A]S_{11}(d)}{2} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

式中: V_t 表示总的湍流聚并系数; V_{in} 为由于颗粒惯性而两颗粒速度相关量缺失引起的聚并系数; V_{sp} 为由于颗粒相对距离 d 引起两颗粒速度相关量缺失而引起的聚并系数; f_{ui} 是颗粒对流体脉动速度的响应系数。

2 聚并动力学方程解法

GDE 方程是一个典型的部分积分微分方程, 只有在某些特殊情况下才可以得到聚并动力学方程的解析解。在绝大多数情况下, 由于引起粒子变化的机制多样而复杂, 因此都不能对方程进行解析求解, 通常的数值求解或者近似求解方法有: 分区法、矩方法、Monte Carlo 方法等。

2.1 分区法

分区法是把颗粒的尺度分布曲线离散划分为 N 个区间, 每个区间内颗粒尺度满足统一的分布函数, 在各个区间建立平衡方程进行联立求解, 分区算法的计算精度取决于所采用的分区数目, 分区数目越多, 计算精度越高, 但计算代价也随之增大, 颗粒尺度范围分布要求

少于 2~3 个数量级,这样颗粒群可以被分为相对小的尺度间隔,可以得到较精确的结果。

分区法中颗粒群平衡方程是以粒径为 i 的颗粒的体积分数形式描述的:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_d \alpha_i] + \nabla \cdot [\rho_d u_i \alpha_i] = \rho_d V_i (B_i - D_i) \quad (7)$$

式中: ρ_d 为颗粒相密度; u_i 为尺寸为 i 的颗粒相密度; α_i 为尺寸为 i 的颗粒相体积分数:

$$\alpha_i = N_i V_i = V_i \int_{V_i} n(V, t) dV \quad (8)$$

定义一个关于颗粒相体积的系数 $f_i = \alpha_i / \alpha$, 其中 α 为颗粒相总体积分数, 颗粒由于聚并产生和消失的量可表示为:

$$\begin{cases} B_i = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{kj} N_k N_j x_{kj} \xi_{kj} \\ D_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} N_i N_j \end{cases} \quad (9)$$

式中: ξ 和 x 为保存当聚并后颗粒尺寸落于某区间后该区间尺寸的再赋值。

2.2 矩方法

矩方法是描述颗粒尺度分布函数的矩的演变过程。连续分布颗粒尺度函数的 m 阶矩定义为 $m_k = \int_v v^k n(v, t) dv$, m_0 为颗粒总数目浓度 $n(t)$, m_1 为颗粒总体积浓度, $V(t)$ 对于单组分颗粒而言, 颗粒体积的描述等价于颗粒质量的描述, 故文中 m_1 在某些场合也称为颗粒总质量浓度 $m(t)$, m_2 为颗粒体积平方浓度。

2.2.1 标准矩方法

标准矩方法是离散法的有效替代方法, GDE 被转化为一组颗粒分布矩的输运方程, 用来解决少量的矩方程 (3~6 个), 与离散法相比计算量减少了, 当不需要颗粒尺度的整体分布, 而只要平均和总的数量就可以代表颗粒分布的时候, 该方法是有效的。

矩方法的关键是颗粒尺度分布的重建和模型封闭问题, 标准矩方法对于颗粒初始分布要求比较苛刻^[5], 如必须满足对数分布、伽马分布等。并且矩方法不能得到颗粒演变的内部详细信息。

该方法中没有假设颗粒的粒度分布, 要求必须严格收敛, 因为聚并和破碎函数不能写成矩函数的形式。FLUENT 中颗粒群平衡方程写成矩方程形式^[6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_k) + \nabla \cdot (\rho u m_k) = \rho (\bar{B}_k - \bar{D}_k) \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{B}_k = \frac{1}{2} \int_0^\infty n(\lambda) \int_0^\infty \beta(u, \lambda) (u^3 + \lambda^3)^{k/3} n(u) du d\lambda \\ \bar{D}_k = \int_0^\infty L^k n(L) \int_0^\infty \beta(L, \lambda) n(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中: L 为颗粒的粒径尺度。

2.2.2 正交矩方法

正交矩方法引入加权函数的叠加方法近似颗粒尺度谱求解输运方程, 避免了传统矩方法对颗粒尺度分布和聚并核函数的诸多假设^[7]。如 $m_k \approx \sum_{i=1}^N \omega_i L_i^k$, 这样式(11)转化为:

$$\begin{cases} \bar{B}_k \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i \sum_{j=1}^N \omega_j (L_i^3 + L_j^3)^{k/3} \beta(L_i, L_j) \\ \bar{D}_k \approx \sum_{i=1}^N L_i^k \omega_i \sum_{j=1}^N \omega_j \beta(L_i, L_j) \end{cases} \quad (12)$$

2.3 蒙特卡洛(MC)方法

求解 GDE 的 MC 方法源于描述气体动力学的 Boltzmann 方程的 DSMC 算法, 它直接以描述对象的物理模型为基础, 能够得到颗粒轨迹和历史信息, 但是该方法计算量较大, 计算精度难于保证。赵海波^[2]研究了多维颗粒群模拟的 MC 算法, 定量地描述了颗粒的碰撞、聚并、破碎等动力学事件, 取得了很好的模拟效果。凡凤仙等^[8]应用 MC 方法研究了驻波声场中细颗粒物声凝并特性。

3 颗粒物尺度初始分布

煤灰粒度分析采用 MASTERSIZER2000 激光粒度分析仪测定, 结果如图 1 和图 2 所示。

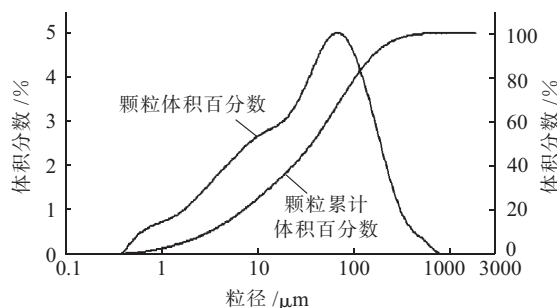


图 1 激光粒度分析结果

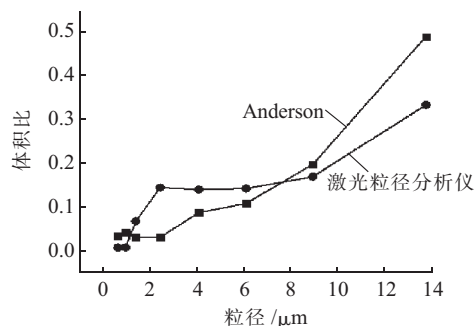


图 2 粒径分布比较

图 1 所示, 颗粒粒径大约从 0.7~800 μm (粒径太小的颗粒质量有限, 不易测得), 程单峰分布, 大约在 100 μm 达到峰值, PM10 含量较多, 为了更准确了解 PM10 的粒度分布, 采用 ANDERSON 对聚并前煤灰

进行采样称重,将称重结果同激光粒度分析结果比较。

如图 2 所示,ANDERSON 测得 PM10 中 6 μm 以下颗粒明显少于激光粒度分析仪分析结果,而大颗粒质量高于激光分析结果,这是因为煤灰本身便存在聚并现象,大颗粒上面粘附有许多小颗粒,在激光粒度分析时,由于震荡粘附较松的小颗粒便会脱落,使得小颗粒含量偏高,大颗粒含量降低。

4 算例分析

4.1 物理模型

扰流柱是凝聚器的重要部件之一,以单根扰流柱为例,模拟计算凝聚器内扰流区的流场、产涡情况及湍流凝聚效果,取空间尺寸为 2000 mm×3000 mm×5000 mm,扰流柱直径取 220 mm,单扰流柱模型网格划分如图 3 所示。



图 3 网格划分

4.2 边界条件

运用商业 CFD 软件计算,采用双流体模型计算气相和颗粒相的运动情况,湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型,采用 PBM 计算颗粒的聚并,通过用户自定义函数(UDF)将不同的聚并核函数写入到 PBM 中,将 PBM 同双流体模型耦合求解。对 GDE 采用分区算法求解。为了计算更加准确,初始颗粒尺度分布由 Andersen 测得为 0.45 μm 到 12.5 μm 之间分为 8 个区间,见表 1。入口条件为速度入口,流速为 12 m/s,空气黏度为 14.8×10^{-6} m²/s,空气密度为 1.1691 kg/m³,颗粒相密度为 2100 kg/m³,颗粒物体积分分数为 7.02×10^{-6} ,出口条件采用压力出口,时间步长取 0.001 s;压力-速度耦合方法采用 SIMPLE 算法,压力-连续方程差分方法采用 PRESTO 方法。

表 1 各尺度颗粒的体积分数

组分	平均粒径 /m	体积分数
Bin-0	$1.247\ 236\ 6 \times 10^{-5}$	0.501 24
Bin-1	$7.759\ 677\ 4 \times 10^{-6}$	0.198 04
Bin-2	$4.827\ 679\ 9 \times 10^{-6}$	0.105 13
Bin-3	$3.003\ 539 \times 10^{-6}$	0.083 13
Bin-4	$1.868\ 650\ 5 \times 10^{-6}$	0.024 45
Bin-5	$1.162\ 580\ 1 \times 10^{-6}$	0.024 45
Bin-6	$7.232\ 987\ 2 \times 10^{-7}$	0.036 67
Bin-7	$4.499\ 999\ 9 \times 10^{-7}$	0.026 89

4.3 计算结果与讨论

湍流凝聚计算公式采用公式(1)~(3),计算方法采用分区算法,运用自定义函数编程功能,编写湍流聚并模块,导入 CFD 软件中,计算结果如图 4 和图 5 所示。



图 4 速度等值面



图 5 湍流强度等值线

图 4 为各工况速度等直面三维图,图 5 为各工况湍流强度的等值线图,可以明显看出,漩涡在圆柱尾部形成,脱落,逐渐向下游扩散,形成湍流涡街,圆柱后方具有明显的涡街分布。该模拟结果,与前人文献卡门涡街模拟结果相仿^[9-10],说明了湍流计算方法和网格划分的合理性。

为验证模拟结果的准确性,研究采用与模拟体系相同的实验设备,采用电厂实际煤灰进行实验,通过 Anderson 测试扰流装置前后的煤灰颗粒粒径分布变化,并与模拟结果进行对比。

超细颗粒物聚并实验的初始分布、聚并实验后颗粒分布和数值计算结果如图 6 和图 7 所示,其中图 7 是对图 6 中 bin-0 到 bin-5 的局部放大。横坐标为颗粒的粒径尺寸,纵坐标为颗粒质量分数的粒径分布函数,定义为:

$$d_i/d_{\log(D_p)} = M_i / (\log D_{p_{upp}} - \log D_{p_{low}}) \quad (13)$$

式中: D_p 为颗粒物的空气动力学直径; f_i 为*i*级颗粒的质量分数(与体积分分数相同); upp 、 low 分别是*i*级颗粒的粒径上限和下限。聚并后颗粒粒径范围从 bin-0 到 bin-5 的颗粒质量分数都有所减少,聚并效果明显,其中,bin-0 到 bin-3 减少比例较小,而 bin-4 和 bin-5 减少比例较大。bin-6 和 bin-7 比例有所增加,表明聚并后,PM10 的粒径尺度分布发生了变化,较大尺寸颗粒占的比例增加,这与实验结果定性一致,有效说明了湍流凝聚计算模型剂分区计算方法的合理性。

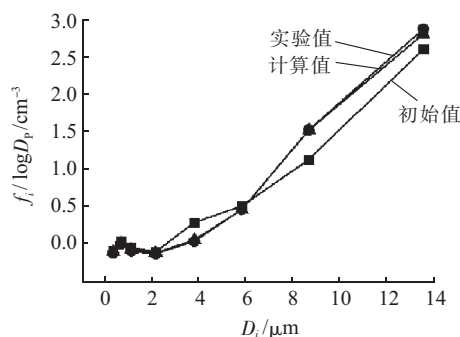


图6 颗粒体积分数粒径分布

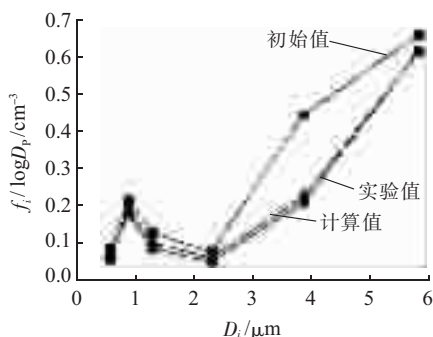


图7 粒径分布局部放大

5 结束语

对 GDE 方程不同算法进行探讨,并测得 PM10 初始尺度分布,为超细颗粒物湍流聚并提供了理论参考,并利用商业 CFD 软件,编写湍流计算模块,将计算结果同文献、实验数据比较,结果表明:分区法计算量大,精度高;矩方法计算量小,标准矩方法对颗粒初始尺度分布要求苛刻,正交矩方法可以用叠加近似法解决这个问题;MC 算法计算量较大,并且计算精度难以保证;扰流柱具有很好的产涡效果,计算结果同文献模拟结果相符,验证了湍流计算方法和网格划分的合理性;通过自定义函数功能引入湍流聚并计算程序和计算方法,计算结果同实验结果吻合较好,有效说明了模型和

算法的合理性。

参考文献:

- [1] 刘忠,刘含笑,冯新新,等. 湍流聚并器流场和颗粒运动轨迹模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 71-75.
- [2] 赵海波. 颗粒群平衡模拟的随机模型与燃煤可吸入颗粒物高效脱除的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [3] ZAICHIK L I, ALIPCHENKOV V M, AVETISSIAN A R. Modelling Turbulent Collision Rates of Inertial Particles[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2006, 27 (5): 937-944.
- [4] LEONID I Z, SIMONIN O, VLADIMIR M A. Turbulent Collision Rates of Arbitrary-density Particles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010 53 (10): 1613-1620.
- [5] LEE K W, LEE Y J, HAN D S. The Log-normal Size Distribution Theory for Brownian Coagulation in the Low Knudsen Number Regime [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 188 (2): 486-492.
- [6] 姚熊亮, 方媛媛, 戴绍仕, 等. 基于 LES 方法圆柱绕流三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 2(5): 564-572.
- [7] McGraw R. Description of Aerosol Dynamic by the Quadrature Method of Moments[J]. Aerosol Science and Technology, 1997, 27(1): 255-265.
- [8] 凡凤仙, 袁竹林, 赵兵, 等. 驻波声场中细微颗粒凝并的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14 (3): 253-258.

作者简介:

周林海(1976),男,浙江诸暨人,工程师,从事燃煤电站环保成套项目总体设计及技术研发工作;

骆建友(1972),男,浙江诸暨人,硕士,从事燃煤电站环保设备设计工作;

刘含笑(1987),男,山东潍坊人,硕士,从事燃煤电站 PM2.5 捕集增效优化技术与装备研发工作;

郭峰(1979),男,浙江诸暨人,工程师,从事燃煤电站 PM2.5 捕集增效优化技术与装备研发工作;

余顺利(1985),男,浙江淳安人,工程师,从事燃煤电站 PM2.5 捕集增效优化技术与装备研发工作;

吕岱岳(1980),男,浙江诸暨人,工程师,从事燃煤电站 PM2.5 捕集增效装备调试工作。

Arithmetic Research on GDE of PM10 Turbulence Coalescence and the Example Analysis

ZHOU Linhai, LUO Jianyou, LIU Hanxiao, GUO Feng, YU Shunli, LYU Daiyue
(Zhejiang Feida Environmental Science & Technology Co. Ltd., Zhuji 311800, China)

Abstract: GDE has been proved to be one effective method for the simulation calculation of the ultrafine particle coalescence situation. Many methods were explored, including the Partition algorithm, the Moment method, the MC method and so on. The initial size distribution of the PM10 was measured using the laser particle size analyzer and the ANDERSON, which provided a theoretical basis for the ultrafine particle coalescence numerical simulation. Using CFD software, the turbulence coalescence model was established. The results were consistent with the literature and experiments, which illustrated the rationality of the turbulence coalescence and arithmetic method effectively.

Key words: GDE; arithmetic; ultrafine particle

高硫煤对燃煤机组的影响分析

宋金琳¹, 张 光²

(1.江苏省电机工程学会,江苏 南京 210024;2.江苏南热发电有限责任公司,江苏 南京 210035)

摘 要:通过对南热 2×600 MW 机组锅炉水冷壁的高温腐蚀、空预器的低温腐蚀及积灰堵塞和脱硫系统的情况分析,对锅炉高温腐蚀和低温腐蚀机理进行了阐述,论述了燃用高硫煤对机组运行带来的危害及应对措施。

关键词:高硫煤;高温腐蚀;空预器;堵塞;脱硫

中图分类号:TK224.9

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0070-03

随着电厂煤炭市场的放开,锅炉设计煤种很难保证,大量的高硫煤进入炉内燃烧,造成炉内高温燃烧区域的水冷壁大面积腐蚀和空预器冷端的低温腐蚀、积灰、堵塞,严重影响火电机组的安全运行。文中以江苏南热发电有限责任公司(以下简称南热)2×600 MW 燃煤机组为例,分析水冷壁高温腐蚀的机理,并就燃用高硫煤带来水冷壁高温腐蚀、空预器积灰堵塞、脱硫系统的危害和采取的对策进行了介绍。

1 水冷壁高温腐蚀

南热 2×600 MW 超临界机组锅炉型号为 HG-1965/25.4-YM5,为一次中间再热、超临界压力变压运行带内置式再循环泵启动系统的直流锅炉,单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、 π 型布置。锅炉岛为露天布置。锅炉同步安装选择性催化还原法(SCR)脱硝装置。脱硫系统采用石灰石—石膏湿法脱硫工艺。锅炉设计煤种为神府煤,校核煤种为淮南煤。

南热 1 号、2 号机组分别于 2010 年 1 月和 8 月通过 168 h 试运行。由于煤炭市场变化,燃用煤种偏离设计煤种较多,尤其在 2012 年大量高硫煤的燃用导致锅炉水冷壁高温腐蚀严重。2012 年 3 月 1 号机组 102B 和 2 月 2 号机组临检期间发现 2 台锅炉水冷壁燃烧器区域及两侧墙均发生大面积高温腐蚀,面积均高达 1600 m²,腐蚀减薄严重处高达 1.2 mm。

1 号锅炉高温腐蚀主要集中在前墙 A 层(中层)燃烧器、后墙 D 层(中层)燃烧器下方及周围区域以及两侧墙区域,对上述区域分别在燃烧器喷口下方 500 mm 处和相邻燃烧器区域抽取 2 点进行测厚,结果见表 1。该处水冷壁管设计为 D38×7.3 mm,由表 1 可以看出高温腐蚀减薄量最大 1.2 mm,最小 0.5 mm,平均约 0.9 mm。

2 号锅炉高温腐蚀同样主要集中在前、后墙燃烧器区域及两侧墙热负荷较高区域,对上述区域进行了

表 1 1 号锅炉燃烧器区域水冷壁测厚 mm

序号	A 层	C 层	D 层	F 层
1	6.2,6.4	6.7,6.5	6.3,6.6	6.4,6.1
2	6.4,6.5	6.4,6.6	6.6,6.3	6.2,6.5
3	6.8,6.4	6.3,6.5	6.6,6.2	6.6,6.5
4	6.1,6.5	6.3,6.5	6.1,6.5	6.6,6.1
5	6.7,6.3	6.3,6.2	6.5,6.4	6.5,6.2
平均	6.43	6.43	6.41	6.37

抽样测厚,高温腐蚀减薄量最大 1.1 mm,最小 0.1 mm,平均约 0.6 mm。

通过上述检查、测厚发现,2 台锅炉才运行 2 年左右,水冷壁区域的高温腐蚀已经相当严重,为此在机组检修期间,对 1 号、2 号锅炉的水冷壁进行了大面积的防腐喷涂,以期适当减缓高温腐蚀的发生。2012 年 3 月 1 号机组 102B 级检修对水冷壁腐蚀严重区域进行了防腐喷涂。(1)前后墙:上自中间层燃烧器(A、D 层燃烧器)上部 1.5 m 处(标高 27.7 m),下至水冷壁拐角下 1 m 处(标高 17.2 m)以上区域,喷涂面积约为 500 m²;(2)两侧墙:上自燃烬风燃烧器喷口中心下 1.5 m 处(标高 34.7 m),下至水冷壁拐角下 1 m 处(标高 17.2 m)以上区域,喷涂面积约为 550 m²。2013 年 2 月 1 号机组 103C 级检修期间对上述喷涂区域进行了检查,总体效果较好,未发现喷涂层大面积脱落及高温腐蚀情况,局部由于喷砂除锈不彻底,小范围出现喷涂层脱落,在此次 103C 级检修中进行了二次处理。

1.1 高温腐蚀的机理

锅炉水冷壁的高温腐蚀是一个及其复杂的物理化学过程,研究表明:水冷壁的高温腐蚀大多属于硫化物型腐蚀,其腐蚀产物主要是铁的硫化物和氧化物。引起硫化物型高温腐蚀的主要原因是煤粉在缺氧条件下燃烧产生了 H₂S 以及游离态硫,其与管壁基体金属铁以及铁的氧化物发生反应生成铁的硫化物。

1.1.1 硫化氢气体腐蚀

研究表明:当炉膛内过量空气系数 $\alpha < 1.00$ 以及当水冷壁附近因煤粉浓度过高,空气量不够而出现还原性

气氛时,原煤中的硫以 H_2S 的形式释放出来的比例在 75% 以上^[1],通常当 $\text{CO}/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ 由 8% 上升到 24% 时, H_2S 则由 0.02% 上升到 0.07%, 从而引起水冷壁的强烈腐蚀。在 H_2S 浓度不变时,若管壁温度低于 300 °C,则水冷壁不腐蚀或腐蚀很慢;若壁温在 300~500 °C 范围内,则腐蚀速度与壁温呈指数关系,即壁温每升高 50 °C,腐蚀速度增加一倍^[2]。 H_2S 气体具有渗透作用,它可穿过疏松的 Fe_2O_3 层和致密的磁性氧化铁层 ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}$) 与其中复合的 FeO 以及管壁 Fe 发生反应,腐蚀速率与烟气中 H_2S 的浓度几乎成正比,其反应如下:



1.1.2 单质硫腐蚀

煤粉在燃烧过程中会产生一定量的单质硫,其在 350~400 °C 时很容易与碳钢直接反应生成硫化亚铁形成高温硫腐蚀,并且从 450 °C 开始,其对炉管的破坏作用相当严重。单质硫的生成途径主要有以下几种:

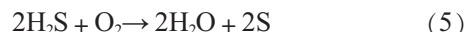
(1) 煤中的黄铁矿 FeS_2 受热分解:



(2) H_2S 和 SO_2 反应分解出单质硫:



(3) H_2S 与 O_2 反应:



(4) FeS_2 与碳的混合物在有限的空气中燃烧^[3]:

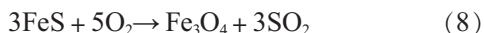


(5) 在高温下 H_2S 分解也可以产生单质硫^[4]:



生成的单质硫可以直接穿透管壁金属表面保护膜,并沿金属晶界渗透,进一步腐蚀锅炉水冷壁并同时使氧化膜疏松,剥裂甚至脱落。

金属硫化腐蚀产物层相对基体金属的体积比很大,一般在 2.5~4.0 之间,因此,层内会产生很大的应力,腐蚀层易破裂。其熔点温度较高为 1195 °C,性质非常稳定,即使在 1000 °C 高温下,其与氢气还原反应也非常低,在还原气体中能保持稳定。当温度超过其熔点温度,烟气中的氧化性气体达到一定分压时,则缓慢氧化转变成 Fe_3O_4 :



生成的 SO_2 又可以提高单质硫的活性并加速硫酸盐型腐蚀,使腐蚀不断恶化。在 2775 °C 以后其会发生分解,生成硫和自由铁。

通过上述高温腐蚀的机理分析,可以看出原煤中的含硫量越高,发生高温腐蚀的几率和速率就越快,国外的研究表明:燃用含硫量低于 0.8% 的煤种时,高温腐蚀的速率较低。

2 空预器低温腐蚀和积灰堵塞

2.1 空预器低温腐蚀

锅炉燃料中或多或少都含有硫。当燃用含硫量较高的燃料时,燃料中的硫份燃烧后除了部分硫酸盐留在灰中外,大部分变成 SO_2 , 其中约有 0.5%~5% 的 SO_2 在烟气中过剩氧量及积灰中 Fe_2O_3 的催化作用下生成 SO_3 , SO_3 与烟气中的水蒸汽形成硫酸蒸气。硫酸蒸气的含量越高,酸露点越高,可以达到 110~160 °C,甚至更高。这就导致硫酸蒸气凝结在低于烟气露点的低温受热面上,引起腐蚀,称之为低温腐蚀。锅炉低温腐蚀最严重的部位是空气预热器的冷端。

烟气的酸露点与燃料含硫量和单位时间送入炉内的总硫量有关,而后者是随燃料发热量降低而增加的。显然,燃料中的含硫量较高,发热量较低,燃烧生成的 SO_2 就越多,进而 SO_3 也将增加,致使烟气酸露点升高。酸露点越高,腐蚀范围越广,腐蚀也越严重。

对空预器冷端加装防护措施,并尽量降低燃煤硫含量,是减少低温腐蚀的有效途径,南热在机组建设期间同步安装了 SCR 脱硝装置,空预器冷端传热元件采用搪瓷钢板,有效避免了冷端低温腐蚀的发生。

2.2 空预器积灰堵塞

烟气中的 SO_3 与烟气中的水蒸汽形成硫酸蒸气;而南热 2×600 MW 机组为了满足环保要求,同步安装的 SCR 脱硝装置,有时喷氨量较大,因而造成氨逃逸率增加。这样,氨气与硫酸蒸气反应,生成硫酸氢氨,硫酸氢氨在 180~200 °C 的环境中呈鼻涕状的黏性物,因此在空预器高温段和低温段处,烟气中的灰尘容易和硫酸氢氨一块极易粘附于空预器换热面上,造成积灰、堵塞,使得空预器压差变大,排烟温度升高,锅炉效率降低,送、引风机电流增加,引风机失速,影响机组带负荷等一系列问题。

1 号锅炉 2012 年 3~5 月进行了 102B 修,期间空预器进行了冲洗,冲洗后空预器压差降低,2012 年 5 月 1 号 A 空预器烟气侧进、出口压差平均约 0.88 kPa,最高时约 1.1 kPa;1 号 B 空预器烟气侧进、出口压差平均约 0.87 kPa,最高时约 1.2 kPa。因大量高硫煤的燃用,尤其 11 月份,入厂煤平均含硫量高达 1.02%,导致空预器进出口压差急剧增加。2012 年 11 月份 1 号 A 空预器进、出口压差平均约 2.3 kPa,最高时约 3.12 kPa;1 号 B 空预器进、出口压差平均约 2.29 kPa,最高时约 3.07 kPa。和 5 月份相比,空预器进出口压差大幅增加,如图 1 所示。

目前多数燃煤电厂采用吹灰和控制喷氨解决空预器的积灰及堵塞。南热曾多次发生空预器冷端堵塞,这时,将冷端蒸汽吹灰压力提高至 2.0 MPa,连续吹灰,

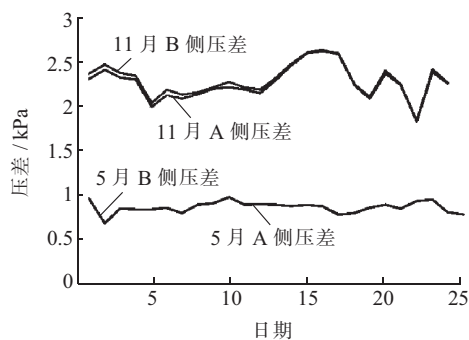


图 1 空预器进出口压差

可使空预器压差降低。SCR 脱硝机组的空预器吹灰器一般采用蒸汽和高压水双介质吹灰器,当空预器堵塞严重时,可以在线实施高压水冲洗,亦可以降低空预器压差。同时在机组检修期间,采用高压水对冷、热端传热元件进行彻底的清洗;还可通过低氮燃烧器改造和燃烧调整来降低 SCR 入口 NO_x 含量,减少喷氨量,控制氨逃逸,减少硫酸氢氨的生成,防止空预器堵塞。

3 高硫煤对脱硫系统的影响

南热脱硫设计收到基硫分为 1%,对应系统进口 SO_2 浓度 2 432.5 mg/m^3 。实际运行中,因入厂煤硫分搭配问题,例如:2012 年 11 月份入厂煤平均硫分为 1.02%,月平均硫分看似仅超设计值一点点,但是因为来煤硫分波动较大,一段时间只来高硫煤,一段时间又全是低硫煤,再加上南热单圆型煤场造成的配煤困难,脱硫系统入口 SO_2 浓度一段时间内远超设计值,入口 3800 mg/m^3 ,4000 mg/m^3 的 SO_2 浓度成为常态,这么高的 SO_2 浓度对脱硫系统运行的影响十分严重,主要有以下几方面。

3.1 排放超标

脱硫系统目前执行 200 mg/m^3 的排放标准,因高硫煤问题造成脱硫系统出口排放超标,为了避免环保处罚并获得脱硫电价,只能以降负荷应对。经统计,2012 年 11 月 2 日~12 月 10 日,为保证 SO_2 排放数据共降负荷 31 次,时间长达 16.67 h,严重影响公司月度电量计划的完成。

3.2 脱硫系统物料平衡发生问题

高硫分导致石灰石粉的用量增加,原有的有序供粉被打破,粉仓粉位最低时仅有 0.5 m,协调供粉人员频繁忙于救急,严重影响脱硫系统运行安全。

高硫分导致供浆量大增,为保证排放,供浆泵出口调门开度至最大,多次造成供浆泵超负荷跳闸。

高硫分导致石膏产量大幅增加,因供浆量增大,浆液氧化不足现象相当明显,脱水系统 24 h 运行,有时还不能满足运行要求,不得不外排部分浆液。

3.3 运行控制困难

浆液密度控制发生问题,正常情况下浆液密度 1150 kg/m^3 时开始脱水,但为了满足排放要求,加大供浆量,浆液密度边脱水边升高,1180 kg/m^3 ,1200 kg/m^3 成为常态,造成搅拌机超负荷运行,电机过热跳闸。

为应对“石膏雨”问题,治理结束后,规定了不同负荷、不同 SO_2 浓度下运行参数的控制规定,高硫分导致这些规定得不到执行,除雾器压差上升,“石膏雨”现象抬头,影响公司正常的生产秩序。

3.4 对设备的影响不断显现

高硫分造成的氧化、密度控制等问题,对脱硫设备造成的影响十分严重,供浆泵、搅拌机电机过热,除雾器压差上升,系统设备、管道、阀门磨损加剧,设备缺陷大幅度上升,急剧减少这些设备的使用寿命。

4 燃用高硫煤带来的主要经济损失

4.1 空预器压差增加造成电量损失

空预器压差增大导致送、引风机电流大幅增加,1 号机组 2012 年 5 月份送风机平均电流 66 A,11 月份送风机平均电流 75 A,空预器堵塞导致送风机平均电流增加 9 A。2012 年 5 月份引风机平均电流 227 A,11 月份引风机平均电流 285 A,空预器堵塞导致引风机平均电流增加 58 A。单台引风机增加电耗 500 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{h}$,单台送风机增加电耗 76.7 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{h}$,则 1 号机组增加电耗 1 153.4 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{h}$,按 0.456 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)计,平均每天用电增加电量费用 1.26 万元,按年利用小时 7500 h 计,每年用电增加电量费用约为 395 万元。

4.2 水冷壁高温腐蚀增加防腐喷涂费用

1 号锅炉 102B、103C 修水冷壁喷涂面积约 1600 m^2 ,2 号锅炉临检水冷壁喷涂面积 1600 m^2 ,共计喷涂费用约 200 万元。因水冷壁仍存在高温腐蚀,后续仍将进行防腐喷涂,费用还将增加。

5 结束语

燃用高硫煤(含硫量 $\geq 1\%$)时,对于燃煤锅炉,尤其是带有 SCR 脱硝装置的燃煤锅炉的影响非常大。主要体现在水冷壁的高温腐蚀、空预器堵塞以及排放超标等方面。燃煤发电企业为了满足日益严格的环保要求,不得不投用脱硝和脱硫装置。为了保证 NO_x 达标排放,要求脱硝入口的 NO_x 含量尽可能的低,这就导致在燃烧器区域要求低氧燃烧,形成还原性氛围,如燃用高硫煤将加剧该处区域水冷壁管的高温腐蚀。减缓水冷壁高温腐蚀的主要措施主要是通过低氮燃烧器改造和燃烧调整,有效降低炉膛出口 NO_x 含量,同时控制燃烧区域还原性氛围。而对于投用 SCR 脱硝装置所造成的氨气逃逸由此形成硫酸氢氨,附着在空预器传热元件上,造成空预器积灰、堵塞,导致空预器压差增

(下转第 75 页)

1000 MW 机组塔式锅炉 NO_x 排放的试验研究

卞康麟
(江苏省电力公司,江苏 南京 210008)

摘 要:以某电厂 1000 MW 超超临界机组塔式锅炉为研究对象,采用低 NO_x 燃烧优化技术,进行了变氧量、变二次风配风方式、变煤层二次风、变强耦合式燃尽风(CCOFA)风量和变分离式燃尽风(SOFA)风量对锅炉 NO_x 排放浓度影响的试验研究,分析了锅炉 NO_x 排放浓度与锅炉运行参数的关系,试验研究结论可用于指导同类型锅炉的高效低 NO_x 运行。

关键词:超超临界塔式锅炉;燃烧调整;NO_x 排放特性;锅炉效率

中图分类号:TK224.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0073-03

近年来,国内新建的大型燃煤电站锅炉均采用低 NO_x 燃烧器结合炉内空气分级技术^[1],通过对炉膛内煤粉燃烧过程合理组织实现低 NO_x 生成和排放^[2,3]。锅炉燃烧优化也是首选的锅炉低 NO_x 燃烧技术,燃烧优化是通过锅炉燃烧器运行参数的调整实现的,采取优化控制炉膛出口氧量、燃烧器一、二次风量合理配比、平衡送入每只燃烧器的风粉量等方法,从而在燃烧过程中把 NO_x 的生成量降到最低^[4]。通过采用低 NO_x 燃烧优化技术进行某厂 1000 MW 机组塔式锅炉 NO_x 排放特性试验,降低了锅炉 NO_x 的排放浓度,分析锅炉 NO_x 排放浓度与电站锅炉运行参数的关系,提出该锅炉高效低 NO_x 运行方式,可用于指导同类型锅炉的燃烧优化运行。

1 设备概况

该 1000 MW 超超临界塔式锅炉的炉膛尺寸为:21 480 mm×21 480 mm,冷灰头下沿标高为 4450 mm,炉顶管中心标高为 111 275 mm。炉膛由管子膜式壁组成,水冷壁采用下部螺旋管圈和上部垂直管圈的布置方式。锅炉采用四角切圆燃烧方式,设计和校核煤种均为烟煤,配中速磨煤机一次风正压直吹式制粉系统。燃烧器为四角布置、切向燃烧、摆动式燃烧器,共设置 12 层煤粉喷嘴。锅炉燃烧系统为典型的 LNTFS 燃烧器布置。煤粉燃烧器及 CFS 喷嘴的水平布置如图 1 所示。该 1000 MW 超超临界塔式锅炉的主要设计参数见表 1。

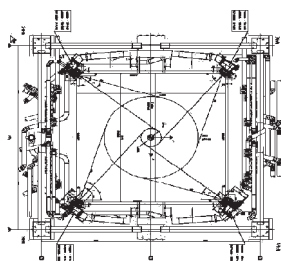


图 1 燃烧器喷口的水平面布置

表 1 锅炉额定工况主要设计参数

名称	参数	名称	参数
主汽流量/(t·h ⁻¹)	3040	再热蒸汽出口温度/℃	603
主汽温度/℃	605	给水温度/℃	295
主汽压力/MPa	27.38	排烟温度*/℃	126
再热蒸汽进口压力/MPa	5.81	锅炉效率/%	93.72

*修正后的数据

2 试验标准及方法

试验依据美国机械工程师协会性能试验法规 ASME PTC4.1 (Steam Generating Units)^[5]和 GB13223—2011^[6]进行。试验测试项目及方法见表 2。相关运行数据在试验中于 DCS 中每 15 min 记录 1 次。试验测点布置示意图见图 2。

表 2 测试项目及方法

项目名称	取样地点或测试仪器	分析内容
原煤取样	给煤机处,人工取样	工业、元素分析
炉渣取样	碎渣机处取样	可燃物含量
飞灰取样	电除尘灰斗,省煤器出口处	可燃物含量
排烟温度	在空预器烟气出口,用 K 型热电偶网格布置和 IMP 数据采集系统测试	温度
烟气取样	空预器烟气进、出口,TESTO 350 烟气分析仪, M&C 烟气分析仪	O ₂ 、NO _x 、CO 等
环境温度、空气湿度	数字干湿球温度计 TESTO 625	温度、湿度
大气压力	数字大气压计 TESTO 6111	大气压
炉膛温度测量	看火孔、高温红外辐射仪	温度

注:除排烟温度、烟气取样分析连续进行外,其他测试项目每 30 min 进行 1 次。

3 试验结果及分析

3.1 试验煤质化验分析结果

该 1000 MW 机组塔式锅炉 NO_x 排放特性试验煤质化验的工业分析和元素分析结果见表 3。

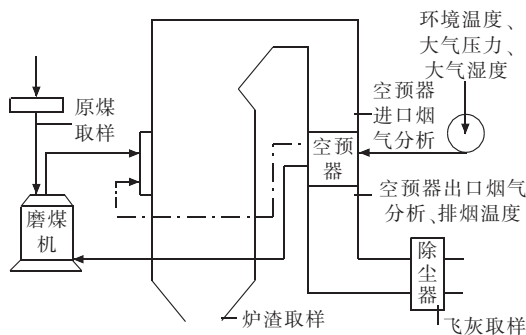


图2 试验测点布置示意图

表3 试验煤质分析结果 %

项目	数值	项目	数值
Mt	17.55	Har	3.42
Mad	7.57	Nar	0.68
Aar	14.32	Oar	10.10
Var	27.13	Sar	0.55
Car	53.36	$Q_{dw,net,ar} / (kJ \cdot kg^{-1})$	20 210

3.2 变氧量试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数、二次风配风方式及磨煤机运行工况稳定,进行了 4 个工况的变炉膛出口氧量试验。变氧量试验工况 1~工况 4 分别控制表盘氧量平均值分别为 2.62%, 2.48%, 2.77% 和 3.12%,实测氧量两侧平均值分别为 3.41%, 2.89%, 3.59% 和 3.68%。试验结果表明,锅炉 NO_x 排放浓度随氧量的上升而呈上升趋势,工况 1~工况 4 试验实测的锅炉 NO_x 排放浓度分别为 230 mg/m^3 , 213 mg/m^3 , 240 mg/m^3 和 248 mg/m^3 (NO_x 排放浓度均折算到 6% O_2 下,下同)。

3.3 变二次风配风方式试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定,进行了 4 个工况的变二次风配风试验。变二次风配风试验工况 1~工况 4 分别为正塔配风方式、均等配风方式、束腰配风方式和倒塔配风方式。试验结果表明,该 1000 MW 塔式锅炉 NO_x 排放浓度正塔配风方式时最高,倒塔配风方式时最低,其他 2 种配风方式居中,工况 1~工况 4 试验实测的锅炉 NO_x 排放浓度分别为 247 mg/m^3 , 223 mg/m^3 , 222 mg/m^3 和 214 mg/m^3 。

3.4 变煤层二次风试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定,进行了 2 个工况的变煤层二次风试验。变煤层二次风试验工况 1 和工况 2 的煤层二次风开度分别保持在 20% 和 40%,其锅炉 NO_x 排放浓度分别为 230 mg/m^3 和 213 mg/m^3 。试验结果表明:随着煤层二次风的开大,锅炉 NO_x 排放浓度略有减小。

3.5 变油层二次风试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定,进行了 2 个工况的变油层二次风试验。变油层二次风试验工况 1 和工况 2 的油层二次风风门开度分别为 20% 和 40%,其锅炉 NO_x 排放浓度分别为 229 mg/m^3 , 247 mg/m^3 。试验结果表明:通过开大油层二次风风门挡板,锅炉 NO_x 排放浓度明显增大,其主要原因是开大油层二次风正好增加了在煤质初期挥发分析出燃烧所需要的氧气,减弱了燃烧器区域的还原性氛围,故 NO_x 排放浓度上升明显。

3.6 变 CCOFA 风门试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定,进行了 2 个工况的变 CCOFA 风门开度试验。试验工况 1 和工况 2 的两层 CCOFA 风门开度分别为 100% 和 60%。试验结果表明,将 CCOFA 风门开度从 100% 关小到 60%,锅炉 NO_x 排放浓度平均值从 229 mg/m^3 上升到 243 mg/m^3 。其主要原因是由于 CCOFA 风位于主燃烧器区的上部,在主燃烧器区域附近形成了分级燃烧,因此 CCOFA 风门开大, NO_x 排放浓度下降。此外,CCOFA 风风门开大也有利于减少节流损失,降低二次风压和风机电耗。建议在机组满负荷运行时,控制 CCOFA 风风门保持全开状态。

3.7 变 SOFAF 风量试验

在机组负荷为 1000 MW 下,运行磨组为 ABCDE 组合,维持负荷、蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定,进行 3 个工况的变 SOFAF 风门开度试验。其中,工况 1 的 SOFA 风风门保持全开;工况 2 保持最上层 SOFA-VI 风门全关,其他 SOFA 风风门全开;工况 3 保持最上层 SOFA-VI 风门全关,SOFA-V 风门开 50%,其他 SOFA 风风门全开。试验工况 1~工况 3 得到的锅炉 NO_x 排放浓度分别为 229 mg/m^3 , 249 mg/m^3 和 266 mg/m^3 。试验结果表明:随着关小 SOFA 风风门开度,锅炉 NO_x 排放浓度则呈降低趋势。究其原因,主要是逐步关小上层 SOFA 风风门开度,使得送风风压提高,在其他风门开度不变的前提下,主燃烧器区域的风量份额相对提高,增加了燃烧初期以及下层燃尽风区域的氧量供应,煤粉颗粒的燃尽效果得到提升,也恰恰是由于这个原因,主燃烧区域和下层燃尽风区域氧量的增加也直接导致了燃料型 NO_x 大量生成,故 NO_x 排放浓度随 SOFA 风风门的逐步关小而大幅上升。

4 结束语

采用低 NO_x 燃烧优化技术进行该电厂 1000 MW 机组塔式锅炉 NO_x 排放特性试验研究,结果表明:(1)

锅炉 NO_x 排放浓度随氧量的上升而呈上升趋势。为保证锅炉高效低 NO_x 运行,建议该锅炉在机组负荷为 1000 MW 负荷下燃用试验煤种相近煤种时,控制 DCS 中炉膛出口氧量为 2.5% 左右。(2) 在机组负荷为 1000 MW 负荷下,为进一步降低该塔式锅炉的 NO_x 排放浓度,建议二次风方式采用均等配风方式或倒塔配风方式运行;锅炉煤层二次风开度控制为 40%;油层二次风风门开度控制为 20% 左右;CCOFA 风风门保持全开状态;并保持 6 层 SOFA 风风门全开。

参考文献:

- [1] 江哲生,董卫国,毛国光. 国产 1000 MW 超超临界机组技术综述[J]. 电力建设,2007,28(8):6-13.
- [2] 高小涛,黄磊,张恩先,等. 1000 MW 机组锅炉氮氧化物排放

影响的试验研究[J]. 热动力工程,2010,25(2):221-225.

- [3] 高小涛. 电站锅炉燃用混煤的煤质特性分析[J]. 江苏电机工程,2009,28(1):63-66.
- [4] 高小涛,章名耀. SG-1036/17.5-M871 锅炉 NO_x 排放特性的试验研究[J]. 锅炉技术,2007,38(2):77-80.
- [5] ASME PTC4.1 (Steam Generating Units) 蒸汽锅炉性能试验规程[S]. 美国机械工程师协会,1964.
- [6] 环境保护局,国家质量监督检验检疫总局. GB13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011.

作者简介:

卞康麟(1967),男,江苏扬州人,高级工程师,从事电力工程技术管理和技术培训等工作。

Testing Research on NO_x Emission Characteristics of a 1000 MW Ultra-supercritical Tower Boiler

BIAN Kanglin

(Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: In large-scale coal-fired power plants, through reasonably organizing the in-furnace combustion processes, all the boilers are designed to achieve low NO_x emission. The combustion debugging and tests on NO_x emission characteristic of one 1000 MW ultra-supercritical tower boiler were carried out by optimizing the combustion technology. Based on the test results, the effects of various boiler operating parameters on the NO_x emission were analyzed. The obtained conclusions can guide the similar boilers to achieve low NO_x emission.

Key words: ultra-supercritical tower boiler; combustion debugging; NO_x emission characteristic; boiler efficiency

(上接第 72 页)

大的危害,目前主要采用低氮燃烧器改造和燃烧调整来降低 SCR 入口 NO_x 含量,减少喷氨量,控制氨逃逸。当空预器发生冷端堵塞时,将冷端蒸汽吹灰压力提高至 2.0 MPa,连续吹灰,可使空预器压差降低。SCR 脱硝机组的空预器吹灰器一般采用蒸汽和高压水双介质吹灰器,当空预器堵塞严重时,可以在线实施高压水冲洗,亦可以降低空预器压差。

虽然通过水冷壁的防腐喷涂,可以减缓高温腐蚀的发生;加强空预器吹灰,控制氨气逃逸率,可以减缓空预器的堵塞,但都不能从根源上消除隐患。只有控制入炉煤的含硫量,方可消除高硫煤带来的不利因素,确保机组安全、经济、稳定、可靠运行。

参考文献:

- [1] 刘青,吕俊复,张建胜,等. 还原态下流化床煤热解硫的释放[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):367-370.
- [2] 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京:科学出版社,1995:25.
- [3] 赵虹,魏勇. 燃煤锅炉水冷壁烟侧高温腐蚀的机理及影响因素[J]. 动力工程,2002,22(2):1700-1704.
- [4] 杨波,田松柏. 不同形态硫化物腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2004,16(6):385-388.

作者简介:

宋金琳(1963),男,河南平顶山人,工程师,从事电厂锅炉检修管理工作;和科企合作管理工作;

张光(1980),男,江苏南京人,工程师,从事锅炉技术管理工作。

Influence of High Sulfur Coal on Coal-fired Power Units

SONG Jinlin¹, ZHANG Guang²

(1. Jiangsu Society of Electrical Engineering, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Nanre Power Generation Co. Ltd., Nanjing 210035, China)

Abstract: The high temperature corrosion of water wall, the low-temperature corrosion and the deposition of air preheater, and the operating condition of the gas desulfurization system in Nanre 2×600MW Power Units are analyzed in the paper. It also elaborates the principles of both the high-temperature and low-temperature corrosion. Besides, the harm associated with burning high sulfur coal and the solution measures are presented.

Key words: high sulfur coal; high temperature corrosion; air preheater; occlusion; desulfuration

火电厂选择性催化还原法脱硝效益与安全

董志军, 施 跃

(国电常州发电有限公司, 江苏 常州 213033)

摘 要:本文以国内火电厂采用选择性催化还原法(SCR)脱硝技术为例,分析了 SCR 脱硝装置成本,指出还原剂费用、催化剂费用和固定资产折旧费用是 SCR 脱硝装置成本中最大的 3 项费用,在此基础上估算火电厂脱硝电价,指出了如何降低火电厂脱硝成本,提高脱硝效益,并且提出脱硝设备在安全方面的注意事项。

关键词:SCR 脱硝;脱硝成本;脱硝电价;脱硝安全

中图分类号:TX701.3

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0076-03

从 2012 年 1 月 1 日起,GB13223—2011 火电厂大气污染物排放标准开始实施。新标准规定所有新建火电机组 NO_x 排放量达到 100 mg/m^3 ; 从 2014 年 1 月 1 日开始,要求重点地区所有火电投运机组 NO_x 排放量达到 100 mg/m^3 。为了提高火电企业脱硝的积极性,国家发展改革委相继出台了火电脱硝电价补贴政策,对安装并正常运行脱硝装置的燃煤电厂,每度电加价 0.008 元。江苏省于 2014 年 3 月实施电价补贴政策,省内 135 MW 及以上发电机组只要脱硝达标排放即享受 0.008 元/(kW·h)的电价补贴。选择性催化还原法(SCR)是目前应用最多、最为成熟且最有成效的烟气脱硝技术,脱硝效率一般可达 80%~90%, NO_x 排放浓度可降至 100 mg/m^3 左右,我国已建成或拟建的烟气脱硝工程中大多采用 SCR 法。但 SCR 技术投资大,运行维护成本高,采用 SCR 技术进行烟气脱硝必将增加发电企业的成本^[1]。文中从我国 SCR 脱硝成本入手,分析了影响成本的各种因数,为火电厂降低脱硝成本提供参考,并且指出了脱硝装置运行的安全考虑因数。

1 燃煤电厂 SCR 脱硝成本分析

1.1 SCR 脱硝成本的计算原则

为使 SCR 脱硝成本的计算结果具有可比性,首先需要确定计算原则。计算原则:脱硝装置的建设周期为 1 a;折算到满负荷时脱硝装置年利用小时数为 5500 h;机组厂用电率对于 600 MW 等级机组为 5%,300 MW 等级机组为 5.5%;还原剂到厂价格液氨为 3000 元/t,尿素(46%)为 2200 元/t;催化剂价格 50 000 元/ m^3 ;水价为 2.5 元/t;蒸汽价格为 60 元/t;预提修理费率为 1.0%;保险费率为 0.25%;增值税率为 17%;脱硝装置生产运营期限为 20 a;脱硝装置折旧年限为 10 a;固定资产折旧残值率为 5%;脱硝工程投资自有资金比例为 20%;建设期贷款年利率为

7.47%;贷款偿还年限为 10 a;流动资金贷款年利率为 7.83%;资本金现金流财务内部收益率为 8%。

1.2 SCR 脱硝成本的构成及分析

燃煤电厂 SCR 脱硝装置的总成本费用包括生产成本和财务费用两部分。生产成本是 SCR 脱硝装置投产后为维持系统正常运行产生的各项生产支出,它由还原剂费用、电费、水费、蒸汽费用、人工费用、催化剂费用、折旧费、大修费和保险费等组成;财务费用是为 SCR 脱硝装置建设和运行筹集资金时所发生的贷款利息,包括长期贷款利息、短期贷款利息和流动资金贷款利息等,采用液氨做还原剂的 SCR 脱硝成本构成如图 1 所示。

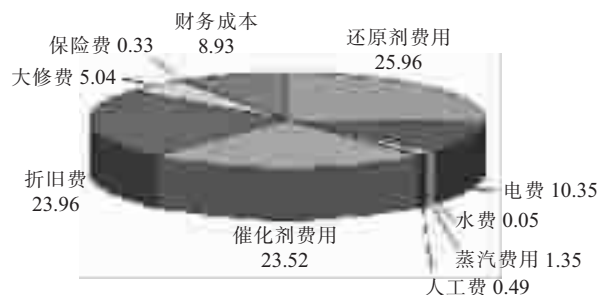


图 1 SCR 脱硝各项成本所占比例(%)

1.2.1 还原剂费用

从图 1 中可以看出,还原剂费用在所有成本中所占比例最大,为 25.96%,还原剂费用主要与 SCR 脱硝装置的液氨耗量、SCR 脱硝装置年运行小时数及还原剂的价格等有关,而液氨耗量又与 SCR 入口 NO_x 浓度、设计脱硝率有关,SCR 入口浓度高、设计脱硝率高,则液氨耗量多,还原剂费用所占比例增加。

1.2.2 催化剂费用

在 SCR 脱硝装置中,催化剂是最重要的部件,但催化剂价格昂贵,使用寿命短,一般在 24 000 h 左右。催化剂费用是指在脱硝装置运行寿命期内,更换催化剂的总费用摊销到每年的运行成本,催化剂费用占 23.52%。

目前在 SCR 中使用的催化剂,大多以 TiO_2 为载体,以 V_2O_5 或 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$ 或 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MoO}_3$ 为活性成分,组成蜂窝式、板式和波纹式 3 种类型。存在的问题主要有:

(1) 催化剂的配方和生产工艺的关键技术目前为国外企业所掌握。(2) 催化剂价格昂贵, 标价约为 50 000 元/ m^3 , 1 台 600 MW 的燃煤机组, 需要 600 m^3 左右的催化剂, 约占整个脱硝工程造价的 40% 左右。(3) 催化剂的使用寿命较短, 一般 3 a 左右就需要更换, 催化剂的再生技术尚需探索, 1 台 600 MW 机组每年更换催化剂费用高达 1000 万元。(4) 催化剂中含有大量重金属, 对废弃催化剂的处置方法有待进一步开发。否则将会造成污染转移。

近几年国内已有企业分别引进或拟引进日本、德国、美国等国催化剂生产技术, 催化剂的国产化水平已经日益成熟, 其价格已有很大降低。催化剂的国产化对降低国内火电机组脱硝造价有很大影响。

1.2.3 固定资产折旧费

固定资产折旧费是 SCR 脱硝成本中又一重要成本, 占 23.96%, 它与 SCR 脱硝装置的动态投资有关。老机组脱硝改造, 除了加装 SCR 脱硝装置, 还需要对空预器、引风机等进行改造, 投资费用比新建机组大。

1.2.4 电费

SCR 脱硝装置的电费包括两部分, 一是由于 SCR 脱硝装置本身电耗而产生的费用; 二是由于加装了 SCR 脱硝装置, 引起烟气阻力增加, 从而造成引风机电耗增加而产生的费用。对于液氨作还原剂的 SCR 脱硝装置, 其本身电耗比较小, 主要是由系统阻力增加引起的引风机电耗增加, 电费平均占总成本费用的 10.35% 左右。

1.2.5 蒸汽费用

对于采用液氨为还原剂的 SCR 脱硝装置, 其蒸汽费用也由两部分组成: 一是液氨制备区液氨蒸发所需的蒸汽耗量; 二是 SCR 反应器采用蒸汽吹灰所需的蒸汽耗量(如果采用声波吹灰, 这部分费用为空压机的电耗)。蒸汽费用在 SCR 脱硝装置中为 1.35% 左右。

1.2.6 水费

SCR 脱硝装置中水耗非常少, 有的脱硝装置水耗为零, 水费仅占 0.05%, 因此水费在 SCR 脱硝装置成本中基本可以不考虑。

1.2.7 财务费用

财务费用由长期贷款利息、短期贷款利息和流动资金贷款利息组成, 其中工程建设长期借款利息是主要的, 占财务费用的 98% 以上。财务费用主要与贷款金额、还贷年限及贷款利息有关。财务费用占脱硝成本的 8.93% 左右。

2 脱硝电价估算

2.1 投资改造费用

北京国电龙源环保工程有限公司提供的 SCR 脱

硝改造工程投资费用估算见表 1。

表 1 SCR 脱硝改造工程的投資費用 萬元

項目	2×300 MW	2×600 MW	2×1000 MW
脫硝本體	8200	12 900	16 200
鍋爐鋼架及送風機 支架和基礎加固	1400	2200	2800
引風機改造	1200	1500	1800
空預器改造(局部)	1600	2600	3900

(1) 估算基础为: 脱硝系统无旁路; 还原剂为液氨方案, 制备车间为 2 台机组公用; 每炉设 2 台脱硝反应器, 脱硝系统入口 NO_x 浓度 450 mg/m^3 (干态, 标态, 6% O_2), 脱硝效率 80%。(2) 由于各厂地质条件和上部结构形式不同, 锅炉钢架、送风机支架基础及上部结构加固也会有很大差异, 该表统一按 700 万元/炉 (300 MW)、1100 万元/炉 (600 MW)、1400 万元/炉 (1000 MW) 计。

由表 1 可知, 2 台 600 MW 火电机组的脱硝改造投资费用为 19 200 万元, 设备折旧按 10 a 计, 假设某电厂 2 台 600 MW 火电机组年利用小时数 5000 h, 则脱硝改造电价成本为 0.003 2 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。脱硝设备随机组每 6 a 大修一次, 大修费用可按图 1 所示折算。财务费用可按 SCR 脱硝成本的计算原则折算。

2.2 脱硝运行费用

北京国电龙源环保工程有限公司提供的 SCR 脱硝工程的运行费用估算见表 2。

表 2 SCR 脱硝工程的运行費用 萬元

項目	2×300 MW	2×600 MW	2×1000 MW
液氨耗量	250	500	830
SCR 本體電耗	3	5	8
蒸汽	10	12	14
脫硝阻力增加 引風機電耗	170	340	560
催化剂耗量	420	924	1260

(1) 估算基础为: 机组年利用小时数为 5000 h, 脱硝系统入口 NO_x 浓度 450 mg/m^3 (干态, 标态, 6% O_2), 脱硝效率 80%, 还原剂采用液氨, 液氨单价按 2600 元/t, 电费 0.4 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$), 蒸汽费用按 100 元/t, 催化剂单价 4.2 万元/ m^3 , 催化剂按 3 a 更换一层, 脱硝阻力 1000 Pa, 引风机效率 85%。(2) 以上费用不含折旧、维护、工资、利息等。

由表 2 可估算 2 台 600 MW 火电机组的脱硝运行电价成本是 0.002 97 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

2.3 脱硝总费用

脱硝总费用为脱硝改造投资费用和运行费用之和。即脱硝设备折旧费+大修费+财务费+运行费用。按表 1、表 2 费用估算一年总费用大约 5492 万元。按机

组年利用小时数为 5000 h 算, 脱硝电价成本约为 0.009 15 元/(kW·h)。而国家脱硝电价补贴^[2]仅 0.008 元/(kW·h)。

需要说明的是很多机组年利用小时数都超过 5000 h, 达到 6000 h 以上。所以脱硝的改造成本电价还有下降空间。按机组年利用小时数 6000 h 计算, 脱硝总成本电价约 0.008 12 元/(kW·h)。

常州发电有限公司 2 台 600 MW 机组脱硝改造总费用约 1.3 亿万元, 环保专项补贴 1 台炉 1000 万元, 改造费用由单位自留资金承担, 财政无贷款。设备折旧年限 12 a, 年发电量约 75 亿 kW·h。因此脱硝改造电价约 0.001 48 元/(kW·h), 加上脱硝运行电价, 总的脱硝电价约为 0.004 45 元/(kW·h), 故公司脱硝收益约 0.003 55 元/(kW·h)。

3 氮氧化物排污费的节约收益

2007 年 6 月 20 日, 江苏省物价局、省财政厅、省环境保护厅、省经济贸易委员会关于调整排污费征收标准的通知规定: 从 2007 年 7 月 1 日起, 提高排污费征收标准, 其中废气(包括氮氧化物)排污费征收标准, 由 2004 年的 0.6 元/污染当量提高到 1.2 元/污染当量。

火电机组一年的排污费用=煤量×燃煤 NO_x 排放系数×1.2 元/污染当量。其中燃煤 NO_x 排放系数由环保部门到各电厂实测后制定。公司今年燃煤 NO_x 排放系数是 4.3, 每月发电耗煤约 30 万 t, 2014 年总发电量约 75 亿 kW·h, 则 NO_x 年排污费用为 19 553 684 元(约 2 千万元)。现在通过改用低氮燃烧器(脱硝效率为 40%), 尾部采用 SCR 脱硝(脱硝效率为 80%), NO_x 排污费用为之前的 60%×20%, 共 2 346 442 元(约 230 万元)。节约排污费 0.0023 元/(kW·h)。

环保部 2009 年 6 月 30 日对外公布的《火电厂氮氧化物防治技术政策》征求意见稿提出要提高氮氧化物排污费的征收标准, 有条件的地区和单位可实行氮氧化物排污交易。可以肯定的是, 随着国家对氮氧化物减排力度的加强, 对氮氧化物排污费的征收标准也会相应提高。所以火电厂投用脱硝设施后氮氧化物排污费节约收益也会日益显著。

4 降低脱硝成本

4.1 国家政策扶持

由上述成本分析和估算得出实行脱硝改造后脱硝电价成本大于国家的补贴。相关部门正在加紧调研各地区电厂的脱硝成本, 尽快出台新的补贴标准。国家为鼓励火电厂脱硝, 环保部门对各电厂脱硝建设有专项资金补贴。另外建议国家对脱硝建设贷款降低利率, 进

一步降低脱硝建设成本。

4.2 降低脱硝设备市场价格

这方面主要靠国内相关生产厂家引进国外先进技术, 加大国产化率, 降低脱硝设备市场价格。如北京国电龙源环保工程有限公司从日本日挥触媒化(CCIC) 全套引进了具有国际先进水平的蜂窝式催化剂生产技术, 催化剂价格大大降低。同时催化剂失效后对催化剂进行免费回收处理。

4.3 采用低氮燃烧技术

低氮燃烧技术一般是指空气分级燃烧技术、燃料分级燃烧技术和低氮燃烧器等。采用低氮燃烧技术能显著降低炉内氮氧化物生成, 降低 SCR 反应器入口 NO_x 浓度, 减少还原剂液氨的耗用量, 减少氮氧化物排放量。

一般 600 MW 燃煤机组(设计煤种烟煤和褐煤)在改用低氮燃烧器采用低氮燃烧技术后脱硝系统入口 NO_x 浓度一般能控制在 400 mg/m³ 以内。公司采用烟台龙源电力技术股份有限公司的低 NO_x 燃烧器, 最高能减少 40% 炉内氮氧化合物生成。

但是 600 MW 墙式煤粉炉的低氮燃烧器技术起步较晚, NO_x 减排效果还有待提高。同 SCR 脱硝装置国内生产厂家一样, 燃烧器国内厂家也需要进一步提高自身技术水平, 缩小与先进国家的差距。

5 脱硝安全运行

5.1 SCR 反应器运行的安全问题

三氧化硫在 SCR 脱硝工艺和锅炉燃烧中是不可避免要产生的, 氨、三氧化硫、水在低温情况下会形成硫酸氨和硫酸氢氨, 即生成氨盐, 该物质黏性大, 且具有一定的腐蚀性, 易粘结在催化剂和锅炉尾部的受热面上, 影响锅炉运行。

所以现在 SCR 脱硝除了要满足锅炉正常负荷范围内烟气脱硝效率和脱硝装置出口 NO_x 浓度, 氨逃逸量应控制在 3×10⁻⁶ 以下, 二氧化硫转化为三氧化硫的氧化率小于 1%。

5.1.1 对空预器的影响和应对措施

要防止脱硝后铵盐所造成的空预器冷端腐蚀及堵塞^[3]。国外制造商通常对安装 SCR 的锅炉预热器低温段元件加高, 超出硫酸氢铵积灰带以上, 一般使冷段传热元件高度达到 900 mm 以上(具体根据烟气温度分布情况而定)。

低温段建议采用搪瓷换热元件, 为防止发生硫酸氢铵堵塞, 低温段采用大波纹的板型, 以增大烟气流通过截面, 防止空预器的低温腐蚀和铵盐堵塞。使用高压水对其进行清洗, 防止硫酸氢铵的粘结和堵塞, 避免低温腐蚀。在预热器上部和下部分均设置伸缩式蒸汽吹灰器,

预防堵塞及腐蚀的发生。

5.1.2 催化剂失效和中毒及堵塞

(1) 烟温影响。烟气温度低于 300℃时,催化剂活性降低,NO_x 脱除率降低,氨逃逸率增大,二氧化硫易被催化氧化成三氧化硫,与氨及烟气中的水反应生成硫酸铵和硫酸氢铵,沉积于催化剂的表面,引起微孔堵塞和腐蚀。高于 400℃时,氨会与氧发生反应,导致烟气中的 NO_x 增加,同时又容易发生催化剂的熔结,微孔消失,使催化剂失效。所以一般 SCR 反应温度控制在 300~400℃。

(2) 积灰影响。飞灰不但会对催化剂造成磨蚀,而且能沉积在催化剂上,引起催化剂小孔堵塞。所以应采取措施减少通过催化剂的飞灰含量,同时利用吹灰器进行定期吹扫。必要时应设置催化剂前置吹灰系统。在安装有选择合适的催化剂节距进行模型实验,保证反应器内部流场分布满足设计要求,防止部分位置出现逆向流动,长时间运行后,催化剂孔内挂灰得不到烟气的冲刷,造成堵灰。如果出现爆米花状灰的情况,应当装设拦截网。在 SCR 装置停炉检修之前,应当对所有催化剂层进行 1~2 次强行吹扫,清除已有积灰,并进行一次真空吸尘。在启动过程中,应当加强反应器吹灰,避免催化剂上碳粒沉积过多着火。停机后锅炉吹扫应等到催化剂温度降低到 200℃以下再进行,避免催化剂着火。

(3) 燃料影响。我国燃煤质量变化大,且经常出现混烧等情况,因此对 SCR 装置的氨逃逸和催化剂的适用性提出了很大挑战。同时也会增大砷化物和碱金属等作用使催化剂中毒失活的风险。同时要求催化剂能够适应不同的压降、燃料和烟气成分的要求。燃料特性对 SCR 的影响主要有燃料的含灰量、含硫量、碱土金属、氯离子、氟离子对催化剂的影响。

5.2 氨气稀释系统的要求

为保证氨注入烟道的绝对安全以及均匀混合,将氨浓度降低到爆炸极限^[4](其爆炸极限在空气中体积

为 15%~28%)下限以下,控制在 5%以内。要求以脱硝所需最大供氨量为基准设计氨稀释风机及氨/空气混合系统。所选择的风机该满足脱除烟气中 NO_x 最大值的要求,并留有一定的余量。稀释风机按单元 2 台 100%容量(一用一备)设置,并定期切换运行。

5.3 氨系统的相关联锁保护和报警

- (1) 氨区压力容器具有压力温度超限联锁切断供氨阀;
- (2) 氨区泄露报警和联锁切断供氨;
- (3) 稀释风机的出口风量低或全跳联锁切断供氨和 SCR 运行;
- (4) 所有供氨气动门失气关,水系统阀门失气开;
- (5) SCR 入口烟气温度超限停止 SCR 运行。

6 结束语

火电企业安装 SCR 脱硝装置,会增加火电企业的发电成本。脱硝成本电价低于国家脱硝补贴电价就会给火电厂带来收益。另外脱硝后少缴纳的排污费也是一笔收入。国家会通过各项政策降低脱硝成本,火电厂也需从各方面降低成本提高收益。火电厂上脱硝设备后除了要提高经济效益,还要重视脱硝安全运行。氨是有毒物质,对氨系统的安全管理不得有半点松懈。

参考文献:

- [1] 彭祖辉. 江苏省燃煤机组脱硝装置运行现状分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 77-80.
- [2] 郭 斌, 廖宏楷, 徐程宏, 等. 我国 SCR 脱硝成本分析及脱硝电价政策探讨[J]. 热能动力工程, 2010, 25(4): 437-438.
- [3] 国家能源局. DL/T 335—2010 火电厂烟气脱硝(SCR)系统运行技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB18218—2009 危险化学品重大危险源辨识[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

作者简介:

董志军(1976),男,辽宁阜新人,工程师,从事火力发电运行工作;
施 跃(1982),男,江苏张家港人,工程师,从事火力发电运行工作。

Safety and Economy of Selective Catalytic Reduction Denitration in Coal-fired Power Units

DONG Zhijun, SHI Yue

(Guodian Changzhou Power Generation Co. Ltd., Changzhou 213033, China)

Abstract: With the example of selective catalytic reduction (SCR) denitration technique adopted by domestic thermal power plants, the cost of denitration devices is analyzed in this paper. The top three components of the whole cost are reducing agent, catalyzer, and the depreciation of permanent assets. Based on the cost mentioned above, the denitration electrovalency of coal-fired power plants is estimated. The methods for reducing the cost and enhancing the efficiency of denitration are proposed. The safe precautions for denitration devices are also presented.

Key words: SCR denitration; cost of denitration; denitration electrovalency; safety of denitration

汽包锅炉炉内结渣的监控及优化吹灰策略

万 跃, 晏海能

(江苏淮阴发电有限责任公司, 江苏 淮安 223002)

摘 要:在介绍炉内结渣影响因素的基础上,以优化炉内吹灰为目标,比较分析了汽包锅炉炉内结渣或吹灰的多种监测方法,针对某 300 MW 汽包锅炉,提出采用低温过热器出口蒸汽温度作为监测炉内结渣的主要参数,以此确定炉内吹灰条件,并利用现场数据说明了该方法的有效性。

关键词:汽包锅炉;炉内;结渣;吹灰

中图分类号:TK227

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0080-02

目前,煤碳供应形势越来越紧张,各火力发电厂为提高经济效益,在生产运行中很难燃用设计煤种,甚至无法燃用校核煤种,掺煤混烧已成为火电厂的必然选择。很多火电厂燃用过高硫分、低灰熔点的劣质煤,这些煤种对炉膛结渣有较大的影响,甚至可能因炉内结渣严重而引起停炉的事故。因此,在燃用劣质煤时,加强对炉内结渣的监控和预防就显得尤为重要,结合实例,对燃用劣质煤时的炉内结渣情况进行分析和研究,可供同类型电厂参考。

1 炉内结渣的特性

炉内结渣指在受热面上熔化了灰沉积物的积聚,多发生在炉内辐射受热面上。大型煤粉锅炉炉内煤粉在 0.03~0.05 s 的时间内即被加热到 1600 ℃^[1]以上,因此,煤粉炉内穿过炉膛火焰的全部灰粒都是液化的,如果处于熔融或半熔融状态的灰到达受热面上,则很容易粘附在受热面上。由于扩散作用,在管子外表面形成薄的、白色的、很细的灰沉积层。该层厚度一般为 0.2~0.5 mm,具有良好的绝热性能,不仅引起炉膛温度的升高,而且还造成了受热面管子外表温度比原来高很多,使受热面管表面大量结渣成为可能。随着表面烧结层厚度的增加,积灰表面温度也升高,当积灰表面的温度升高到接近烟气温度时,大量熔融的灰粒与积灰层相碰撞,结合成坚实的积灰,灰层进一步变厚,灰温升高,导致恶性循环,使灰层表面形成熔融相,可能形成液态渣层。

炉内结渣导致炉内传热恶化,炉内辐射传热量减少,炉膛出口烟温升高,对流受热面区域热负荷增加,可能造成受热面管壁超温,同时造成过热器、再热器减温水用量大幅增加,排烟温度也随之升高,给锅炉的安全、经济运行带来较大的影响。目前,一般电厂经常使用的方法是加强炉内吹灰,但强化吹灰将带来如下问题:

(1) 炉膛水冷壁吹灰次数过多,造成汽温偏低。为了提高汽温,增加了对水平烟道末级过热器和末级再热器管屏处的吹灰次数,这样不仅浪费汽源,而且也增加了对管子的冲蚀。

(2) 由于吹灰频繁,炉膛水冷壁、过热蒸汽管、再热蒸汽管管壁过于清洁,管子表面缺乏调节换热的“灰层”,热量分配容易失衡,导致过热汽温与再热汽温调节困难,对煤种的适应性变差。

(3) 不利于调整过热蒸汽、再热蒸汽两侧汽温:出现两侧汽温偏差时,调整的手段和幅度非常有限,常用的只能是将温度较高一侧的减温水或事故喷水开大,来控制受热面的管壁不超温,将造成减温水或事故喷水量增加,特别是再热器事故喷水量的增加,使机组煤耗增加较多,机组的效率降低。

根据西安热工研究所的研究结果,在 GB7562—87 中,以煤的软化温度为基本指标,以煤的低位发热量为辅助指标。对于热值 $Q_{ar,net} > 12\,560$ kJ/kg 的煤种,软化温度 > 1350 ℃,属于不结渣煤种,如果软化温度 ≤ 1350 ℃则属于结渣煤种。哈尔滨电站设备成套设计研究院对我国 290 种动力用煤的灰渣特性进行分析,并用三段最优分割来确定,以还原性气氛下软化温度作为判别依据:软化温度 > 1390 ℃ 轻微结渣;软化温度 $= 1260 \sim 1390$ ℃ 中等结渣;软化温度 < 1260 ℃ 严重结渣。

2 炉内结渣的监控

炉内结渣的监视目前还是依靠运行人员的观察。已有部分科研单位对炉内结渣自动监督进行开发研究,吹灰器程序控制系统已得到普遍应用,主要是根据炉内结渣时运行参数的变化,作为炉内结渣的监控手段。

2.1 根据炉膛出口烟气温度进行监控

根据传热学原理,炉内辐射传热基本公式为:

$$Q_f = \alpha_1 \sigma_0 A_f (T_h^4 - T_w^4) / B_j \quad (1)$$

式中: Q_f 为相对 1 kg 燃料炉膛辐射吸热量,kJ/kg; α_1 为炉膛系统黑度; σ_0 为绝对黑体辐射常数,取 $2.04 \times$

$10^{-7} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$; T_h 为火焰平均有效温度, K; T_w 为水冷壁积灰污染层表面温度, K; A_f 为炉膛有效辐射受热面积, m^2 ; B_j 为计算燃料消耗量, kg/h 。

由分析可知,随着水冷壁表面积灰的增加,水冷壁积灰污染层表面温度必然升高,使得炉膛辐射吸热量减少。另外,根据烟气在炉膛内的放热公式^[2]为:

$$Q_f = \varphi V C_p (T_a - T_1'') \quad (2)$$

式中: φ 为考虑散热损失的保温系数; V 为 1 kg 燃料的烟气体积, m^3/kg ; C_p 为炉内烟气的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; T_a 为理论燃烧温度, K; T_1'' 为炉膛出口烟气温度, K。由此可知,当炉内结渣严重时, T_1'' 会升高。

但在实际应用中,用炉膛出口烟温作为炉内结渣的监控参数仍存在一定困难,主要原因:一是高温烟气的测量问题,采用水冷抽气热偶测量精度差,不能作为长期连续测量的手段,所以用高温过热器或高再热器后的烟气温度来替代;二是大型锅炉炉膛出口烟道截面积大,烟气温度偏差很大,难以找到具有代表性的测量点。三是炉膛出口烟温受运行工况如磨组变化及一、二次风的调整等影响较大,并不单纯反映炉内结渣情况,因此难以确定某一定值来严格界定炉膛是否结渣。

2.2 采用蒸汽侧吸热量计算炉膛出口烟气温度

华北电力大学提出,通锅炉汽水侧参数计算出炉膛出口烟温。对于汽包锅炉,当煤种变化不大时,可用省煤器出口联箱水温的测量和布置在炉膛内过热器、再热器吸热量的测量,替代炉膛出口烟温的测量^[3]。

由式(2),只要计算出炉膛放热量,即可以计算出炉膛出口烟温:

$$T_1'' = T_a - Q_f / (\varphi V C_p) - 273 \quad (3)$$

因此,问题转化为炉膛辐射传热量 Q_f 的计算:

$$Q_f = (Q_{sc} + Q_{fg} + Q_{fz} + Q_{yc} - Q_{gr} - Q_{sm}) / B_j \quad (4)$$

式中: Q_{sc} 为锅炉部分输出热量, kJ/h ; Q_{fg} 为炉内辐射式或半辐射式过热器蒸汽吸热量之和, kJ/h ; Q_{fz} 为炉内辐射式或半辐射式再热器蒸汽吸热量之和, kJ/h ; Q_{yc} 为炉膛出口烟窗投射出去的热量, kJ/h ; Q_{gr} 为工质过热过程吸收的热量, kJ/h ; Q_{sm} 为省煤器内工质吸收的热量, kJ/h 。此方法虽然看似复杂,但由于蒸汽侧温度、压力等测点较为准确,华北电力大学经过多次传热试验证实,此方法测量精度更高。

3 选用低温过热器出口蒸汽温度监控炉内结渣

从理论上讲,炉内结渣必然造成水冷壁吸热量减少,因此造成炉膛出口烟温升高,但是炉膛出口烟温受运行工况、煤种等影响较大,即炉膛出口烟温升高,不一定是炉膛结渣引起的。因此,笔者通过跟踪锅炉运行

参数变化,提出用低温过热器出口蒸汽温度的变化来表示炉膛辐射吸热量的变化,反映炉内结渣情况。不选取高温过热器或屏式过热器的原因是:炉膛结渣的结果是使炉膛蒸发量变小,且炉膛出口烟温升高,这两者都使过热汽温必然升高。但由于屏式过热器和高温过热器出口的蒸汽经过喷水减温,其温度值受喷水量的影响较大,不能作为比较依据。

运行工况稳定时,炉内结渣使炉膛蒸发量减少,流过低温过热器的蒸汽量减少,由于低温过热器的吸热主要取决于烟气侧,因此,可将低温过热器的吸热量看作不变,则低温过热器出口蒸汽温度必然升高。另一方面,炉内结渣还造成低温过热器处烟气温度升高,这也使低温过热器出口汽温上升。

在实际使用过程中,以某火电厂 HG-1036/17.5-YM36 锅炉为例,在燃用正常煤种时,低温过热器出口汽温为 $390 \sim 400^\circ\text{C}$,在燃用高硫煤时,硫份 $S_{t,ad}$ 远远超过设计煤种的 0.72% ,达到 1.49% ,造成炉膛结渣。为防止炉内结渣严重,通过炉膛吹扫可有效地减少炉膛结渣,提高炉膛运行的安全性和经济性。以该厂燃用高硫煤时的一次炉膛吹灰为例,入炉煤工业分析成分见表1,炉膛吹灰前后的参数见表2。

表1 入炉煤工业分析成分

成分	数值
全水 $M_t/\%$	16.6
内水 $M_{ad}/\%$	4.28
空干灰 $A_{ad}/\%$	16.82
挥发份 $V_{ad}/\%$	33.41
固定碳 $FC_{ad}/\%$	45.49
全硫 $S_{t,ad}/\%$	1.49
低位热值 $Q_{net,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	20.341

表2 炉膛吹灰前后的参数

参数	吹灰前	吹灰后
低过出口汽温 $/^\circ\text{C}$	414.4	403.9
过热器减温水量 $/(t \cdot h^{-1})$	40.2	10.4
再热喷水量 $/(t \cdot h^{-1})$	10.9	4.2
过汽温 $/^\circ\text{C}$	541.5	538.5

从表中可以看出,在炉膛吹灰前,1 h 内的低过出口汽温平均为 414.4°C ,吹灰后,低过出口汽温下降到 403.9°C ,同时,过热器减温水也从 40.2 t/h 下降到 10.4 t/h ,再热器喷水量从 10.9 t/h 下降到 4.2 t/h ,锅炉运行的经济性明显提高。

针对不同机组的不同的煤种,在实际运行中,可通过试验得出最佳吹灰标准,当运行工况发生变化时,只要及时考虑上述情况,合理选择蒸汽侧(低温过热器出口温度)的参数,就能达到优化吹灰的目的,提高锅炉的安全、经济运行性能。

(下转第84页)

电力系统信息安全及博弈防御系统

王 燕

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

摘 要:随着智能电网的发展,电力系统中出现了越来越多的电子设备和通信系统,因而信息安全成为国内外电力系统面临的巨大挑战。介绍了电力系统信息安全的现状,总结了各国对于信息安全的要求,对国内外在信息安全方面的研究现状进行了梳理。在此基础上,提出了电力系统主动应对信息攻击的智能决策系统的框架和实现方法。该智能决策可以帮助运行人员与黑客博弈,决定电力系统的最优应对策略。

关键词:信息安全;斯塔尔博格竞争;随机博弈

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0082-03

由于大量的电子设备和通信系统,现代电力系统存在着诸多信息安全漏洞。恶意的个人和组织、恐怖分子和敌对势力很可能利用这些安全漏洞,发动攻击,破坏电网的正常运行。各国政府对此非常重视,出台了相应的政策法规,期望提高电力系统信息安全。黑客攻击的威胁是始终存在的,因此只有开发出可以发现黑客攻击、并采取相应的防御反击措施的系统,才可以确保电网的可靠供电和经济运行。

1 电力系统信息安全现状

电力信息系统的安全现状不容乐观。电力行业大量使用现代信息技术(IT)以实现自动化。IT技术带来了许多便利,但是也带来了诸多安全隐患。数据采集与监视控制(SCADA)系统和企业管理网络的对接就是一个很好的例子。这样的对接提高了企业运行效率,也将SCADA系统暴露在黑客攻击的威胁下。

电力信息系统中常见的安全隐患有:(1)网络之间缺乏安全隔离。SCADA系统、配电管理系统(EMS)、企业管理网络等不同安全等级的网络不恰当地连接在一起,造成非授权访问、非法操作、病毒和恶意软件的传播。(2)网络内部没有完善的安全防御体系。很多网络只是购买了防病毒软件和防火墙。针对信息安全威胁的预防、监控和审计机制严重缺失。(3)远程通信渠道和通信协议缺乏安全机制。通信渠道中没有入侵检测装置;通信协议没有采用加密技术。(4)重要设备的密码认证保护不够强。很多时候,人们使用简单的密码,甚至继续使用设备的出厂密码。(5)电力行业人员的信息安全意识薄弱。很多人不会定期地给操作系统打安全补丁、点击电子邮件中的链接、使用外来的U盘。

电力系统正在成为黑客攻击的主要目标。电力系统是关系到国计民生的关键基础设施。黑客攻击电力

信息系统,会影响电力系统的安全、稳定、经济运行,危及电网的可靠供电和人民群众的日常生活,将会引发难以估量的经济损失和大规模的社会恐慌。2007年,全球最大的黑客大会“Defcon”就提出SCADA系统将成为黑客攻击的主要目标。目前已经有电力系统遭到攻击的实例。2000年10月13日,四川二滩水电厂控制系统收到异常信号停机,7s甩出力890MW,川渝电网几乎瓦解。2003年1月,Slammer蠕虫扰乱美国俄亥俄州的一家核电厂运行。2003年12月30日,龙泉、政平、鹅城换流站控制系统感染病毒^[1]。

2 安全需求

黑客对电力系统的威胁已经引起了各方的高度重视。美国能源部(DOE)在2006年公布,并于2011年更新了关于能源控制系统网络安全的路线图。DOE计划在10年内,升级所有重要的能源控制系统,使之能承受至少一次精心策划的黑客攻击。为此,DOE设立了SCADA系统安全仿真平台(NSTB),模拟针对SCADA系统的黑客攻击,研究相应的防御策略。美国计算机应急准备小组(US-CERT)致力于提高人们对网络安全的认识。北美电力可靠性委员会(NERC)颁布了关键设施保护(CIP)标准,要求各电力企业为重要的网络设施提供相应的防护措施。国际电工通信技术委员会(IEC TC 57)提出要在IEC 62351标准通信协议中采用更先进的加密和认证技术。

在我国,电力系统的信息安全被提升到国家战略安全高度。2002年5月,国家经贸委发布30号令《电网和电厂计算机监控系统及调度数据网络安全防护的规定》。2004年12月,电监会发布第5号令《电力二次系统安全防护规定》。电力行业致力于构建电力系统信息安全保障体系,全面提高防护能力,重点保障电力二次系统、重要电力网络、重要电力信息系统和重要电力生产经营管理信息系统的安全。

3 国内外研究现状

面对黑客对电力系统的威胁, 现有的研究集中于预防手段和风险评估。文献[2]针对变电站自动化系统中不同实体之间的认证进行了分析, 提出了相应的安全认证机制。文献[3]从系统整体量化分析变电站自动化系统信息安全。文献[4]分析了电力系统微机保护通信的安全需求, 提出了相应的方案来保障微机保护通信的保密性、准确性和即时性。文献[5]使用攻击树(Attack Tree)对 SCADA 系统的脆弱性定量分析。文献[6]定量评估了黑客攻击对电力系统的影响。文献[7]利用面向对象的建模技术, 提出二次系统安全体系结构化设计方法。文献[8]以某电厂实时系统为例, 提出了提高实时系统安全的方案。文献[9]使用证据理论, 结合 ISO 17799 标准, 对电能自动抄表系统进行了信息安全评估。美国施魏策尔工程实验室公司研发了用于 SCADA 系统通信的安全通信协议(SSCP), 以保障 SCADA 信息的真实度。数邦公司开发了网络安全审计和入侵检测工具包, 用于发现系统安全漏洞。

针对黑客对电力观测系统的威胁, 从 2009 年开始, 也有一些文章发表。文献[10]建立了坏数据注入对状态估计产生影响的必要条件, 并且由此建立了启发式算法来构造有效的攻击。文献[11]提出了用数理统计的方法来检测坏数据注入攻击是否存在。

4 存在问题

近年来黑客攻击表现出高度的组织化和智能化。最著名的例子当属 Stuxnet 病毒。Stuxnet 病毒是世界上首例被精心设计以攻击工业自动化控制系统的病毒。Stuxnet 病毒巧妙地避开不同网络之间的安全认证机制, 不断传播, 成功感染了核电厂控制系统。直到 2010 年 7 月, 因为一个偶然的事件, Stuxnet 病毒才被首次发现。此时, Stuxnet 病毒已经感染了超过 10 万台计算机(伊朗境内), 1000 台离心机, 大大滞后了伊朗的核进程。除此之外, 目前的预防和风险评估方法都隐含地假定了电力观测系统是可信的、准确的。然而, 电力观测系统本身也是有可能被攻击的对象, 而且难以被现有的方法检测出来。

面对黑客对电力系统的威胁, 现有的研究集中于预防手段和风险评估。但当黑客对电力系统的威胁成为现实后, 电力系统如何进行应对和防御, 鲜见报道。特别是考虑到黑客攻击的针对性、连续性和有组织性, 对其防御具有很大的难度, 值得进行深入研究。

5 信息安全智能决策系统

在攻击成为现实后, 电力系统必须具备主动应对

功能。信息安全智能决策系统可为调度人员提供主动应对的策略。智能决策系统的结构如图 1 所示。该系统使用虚拟操作人员模块模拟操作人员; 使用虚拟黑客模块模拟黑客。基于电力系统状态估计(需要新型的状态估计方法以辨识有意识注入的坏数据)的结果, 智能决策系统建立系统模型。通过虚拟操作人员、虚拟黑客、系统模型, 智能决策系统模拟操作人员和黑客的博弈过程, 并决定最优博弈策略。智能决策系统采用斯塔尔博格竞争和随机博弈相结合的方法作为核心技术。

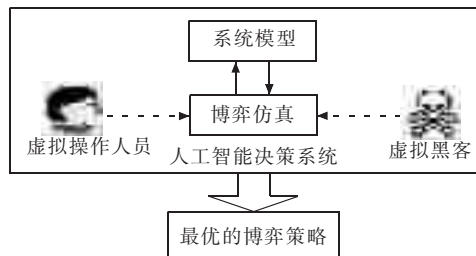


图 1 信息安全智能决策系统功能

斯塔尔博格竞争定量地分析黑客和系统操作人员之间的博弈过程。黑客是斯塔尔博格竞争中的 leader, 操作人员则是 follower。在黑客发动攻击之前, 电力系统及其信息系统处于一个初始状态。黑客拥有的资源(包括人力、物力和智力)总量为 Δ ; 操作人员拥有的资源总量为 Θ 。在斯塔尔博格竞争中, 黑客要设计博弈策略, 使得操作人员拥有的资源总量降为 0, 同时自己消耗的资源最小化; 操作人员要设计博弈策略, 使得黑客拥有的资源总量降为 0, 同时自己损失的资源最小化。设计博弈策略时, 要预判对方可能做出的应对。这是一个复杂的博弈过程。

随机博弈分析电力系统及其信息系统复杂的动态过程。大规模电力系统及其信息系统是一个极其复杂的非线性复合系统, 其动态过程具有很大的不确定性。当黑客或操作人员采取措施促使系统状态迁移时, 迁移的结果并不是确定的, 而是基于一定的概率分布。采用随机博弈可以模拟系统状态迁移的不确定性。

6 结束语

随着智能电网的发展, 信息安全成为国内外电力系统都面临的挑战。国内电力系统的信息系统由于采用了横向隔离、纵向加密的措施, 在应对黑客攻击的能力方面, 有了极大的提高, 而国外的电力系统, 面临更严峻的挑战。针对电力系统信息安全的现状做了分析, 对国内外在信息安全方面的研究进行了总结。并在此基础上, 提出了电力系统主动应对可能攻击的智能决策系统的框架和实现方法。该智能决策系统通过虚拟操作人员、虚拟黑客、系统模型, 模拟操作人员和黑客的博弈过程, 并决定电力系统的最优的博弈策略。

参考文献:

- [1] 辛耀中. 电力二次系统安全评估[C]// 信息安全风险评估研讨会, 北京, 2004: 15-21.
- [2] 段 斌, 王 健. 变电站自动化信息交换安全认证体系[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 55-59.
- [3] 刘 念, 张建华, 段 斌, 等. 网络环境下变电站自动化通信系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 28-33.
- [4] SU S, CHAN W L, LI K K, et al. Context Information-based Cyber Security Defense of Protection System[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007, 22(3): 1477-1481.
- [5] TEN C W, GOVINDARASU M, LIU C C. Cybersecurity for Critical Infrastructures: Attack and Defense Modeling [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 40(4): 853-865.
- [6] TEN C W, LIU C C, GOVINDARASU M. Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2008, 23(4): 1836-1846.
- [7] 胡 炎, 辛耀中, 韩英铎. 二次系统安全体系结构化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 27(21): 63-67.
- [8] 陈思勤. 华能上海石洞口第二电厂实时系统安全分析及防护对策[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 72-75.
- [9] NORDSTROM L. Assessment of Information Security Levels in Power Communication Systems Using Evidential Reasoning [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009, 24(3): 1384-1391.
- [10] LIU Y, NING P, REITER MICHAEL K. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids [J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2011, 14(1): 21-32.
- [11] KOSUT O, JIA L Y, THOMAS ROBERT J. Malicious Data Attacks on Smart Grid State Estimation: Attack Strategies and Countermeasures[C]// 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010: 220-225.

作者简介

王 燕(1965), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网投资管理、电网信息安全工作。

A Design of Gaming Theory Based Defense System for Power System Cyber-Security

WANG Yan

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Along with the fast development of smart grid, more and more electronic devices and communication systems have been applied in power system. Therefore, cyber security becomes a big challenge faced by all power companies. This paper first introduces the current status of cyber security in power companies. Then the cyber security requirements set by various countries are summarized. Following that, the researches on power system cyber security are reviewed. Based on that, a cyber-security intelligent defense system is proposed which provides system operator a tool to actively fight with the hackers. Finally, the framework and the implementation methodologies of this defense system are provided.

Key words: cyber-security; stackelberg competition; stochastic game

(上接第 69 页)

4 结束语

目前, 对炉膛结渣的监控还没有很好的自动监控手段, 运行人员通过运行中参数的变化, 能及时有效地判断炉膛是否结渣。对于汽包锅炉, 可以采用低温过热器出口温度作为炉膛结渣的判据, 通过对低温过热器出口温度的分析, 合理确定吹灰时机, 及时清除炉膛结渣, 提高运行的安全性和经济性。

参考文献:

- [1] 岑可法, 周 昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 38.
- [2] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1986: 52.
- [3] 姚文达, 姜 凡. 火电厂锅炉运行及事故处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 46.

作者简介:

万 跃(1958), 男, 江苏淮安人, 从事电力生产管理工作;
晏海能(1973), 男, 江苏淮安人, 高级工程师, 从事火力发电技术管理工作。

Sootblowing Strategy Optimization and Monitoring of Slagging in Drum Boiler Furnace

WAN Yue, YAN Haineng

(Jiangsu Huaiyin Power Generation Co. Ltd., Huaian 223002, China)

Abstract: In this paper, firstly, the main factors influencing the slagging issues within boiler furnace are introduced. Then, the widely adopted methods for monitoring the slagging condition and sootblowing problems are analyzed. Focusing on one 300 MW drum boiler, we proposed a method employing the outlet steam temperature of the low-temperature superheater as the main monitoring parameter for the slagging condition within the furnace. The field test results strongly supported the validity of the proposed method.

Key words: drum boiler; boiler furnace; slagging; sootblowing