

《四川电力技术》 编辑委员会

主任委员 刘 勇
副主任委员 王 平
刘俊勇
委 员(按姓氏笔画笔形为序)
丁理杰 邓亚军 甘德刚
田立峰 李镇义 朱国俊
朱 康 刘天琪 苏少春
杨子辛 肖 红 吴广宁
余 熙 邹见效 陈 缨
胡 灿 袁邦亮 徐 波
董秀成 韩晓言 曾嘉志
秘 书 李世平
程文婷

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2020 年第 43 卷第 2 期(总 266 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 缨

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得文化传播有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数]CN51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*20*

2020-4

目 次

· 新能源及综合能源技术 ·

- 计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法
..... 苗树敏,滕予非,罗 彬,陈 刚,王 亮(1)
热电联产机组的控制优化策略研究..... 叶 晨,李红军,唐志东,崔双喜,孙 凯(7)
含分布式电源的城市电网故障分析方法研究 马子钦,廖 凯,杨健维(12)
采取电采暖方式消纳清洁能源的综合效能分析
..... 姚锦松,常喜强,于 冰,郭小龙,徐吉智,刘博文(17)

· 电网技术 ·

- 一种新型的 MMC 直流故障保护三电平子模块拓扑 常 非,赵 金(21)
用户供电质量需求识别与优质供电增值服务策略
..... 马智远,莫文雄,许 中,周 凯(24)
基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法
..... 李小鹏,戴文睿,林 圣,李世龙(33)
基于告警信息的保护跳闸识别方法研究
..... 段翔兮,何 锐,李小鹏,冯世林,吴海瑕(36)

· 高电压技术 ·

- 水力发电厂 GIS 升压站雷电侵入波阻碍电抗器研究
..... 刘守豹,侯俊宏,方 圆,李 欣,杨 剑(41)
10 kV 配电变压器雷电过电压及其防治方法研究
..... 雷 潇,兰 强,刘守豹,崔 涛(48)
500 kV 交流海底电缆过电压保护与绝缘配合研究 李浩原,李 健(53)
500 kV GIL 管廊接地系统分析
..... 赵新宇,张益赓,贾振宏,张瑞永,吴述关,谭沛文(59)

· 运检技术研究 ·

- 六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究..... 罗 洋,董汉彬,王嘉易,谢 茜(63)
智能变电站二次设备缺陷试验验证方法..... 李 霞,周文越,朱 鑫,丁宣文(67)
某 500 kV 输电导线耐张线夹断裂失效分析
..... 陈家慧,赵兴虹,刘 曦,冯 杰,林德源(70)
一起防跳回路异常引起的断路器误动事件分析
..... 丁宣文,刘明忠,郑永康,王 平(74)
一起换流变压器绝缘油氢气异常分析 谭华安,刘春涛,黄学民,齐向东,罗 新(77)
一种超声波局部放电检测辅助装置的研制
..... 董小顺,刘 鹏,王 喆,宋昆峰,马海军,何海丹(80)
网络安全等级保护在大型水电站的实践..... 钟 健,倪雅琦(84)
基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估 杨慎涛,陈劲松,袁 林(91)

CONTENTS

· New Energy and Integrated Energy Technology ·

Short - term Optimal Scheduling Method for Combined Operation of Wind Power and Hydropower Considering Uncertainty of Wind Power	Miao Shumin, Teng Yufei, Luo Bin, Chen Gang, Wang Liang(1)
Research on Control Optimization Strategy for Co - generation Unit	Ye Chen, Li Hongjun, Tang Zhidong, Cui Shuangxi, Sun Kai(7)
Research on Failure Analysis Method of Urban Power Grid with Distributed Generation	Ma Ziqin, Liao Kai, Yang Jianwei(12)
Comprehensive Efficiency Analysis on Clean Energy Accommodation with Electric Heating	Yao Jinsong, Chang Xiqiang, Yu Bing, Guo Xiaolong, Xu Jizhi, Liu Bowen(17)

· Power System Technology ·

A New Three - level Sub - module Topology of MMC with DC Fault Protection Capability	Chang Fei, Zhao Jin(21)
User Power Supply Quality Demand Identification and Strategy for Value - added Service of Premium Power Supply	Ma Zhiyuan, Mo Wenxiong, Xu Zhong, Zhou Kai(24)
Single - ended Protection Method for HVDC Transmission Line Based on High Frequency Component	Li Xiaopeng, Dai Wenrui, Lin Sheng, Li Shilong(33)
Research on Protection Tripping Identification Method Based on Alarm Signal	Duan Xiangxi, He Rui, Li Xiaopeng, Feng Shilin, Wu Haixia(36)

· High Voltage Technology ·

Research on Blocking Reactor of Lightning Invasion Wave in GIS Booster Station of Hydropower Plant	Liu Shoubao, Hou Junhong, Fang Yuan, Li Xin, Yang Jian(41)
Research on Lightning Overvoltage of 10 kV Distribution Transformer and It Prevention Method	Lei Xiao, Lan Qiang, Liu Shoubao, Cui Tao(48)
Research on Overvoltage Protection and Insulation Coordination of 500 kV AC Submarine Cable System	Li Haoyuan, Li Jian(53)
Analysis of 500 kV GIL Tube Grounding System	Zhao Xinyu, Zhang Yigeng, Jia Zhenhong, Zhang Ruiyong, Wu Shuguan, Tan Peiwen(59)

· Research on Operation and Maintenance Technology ·

Research on Detection Methods of SF ₆ Gas Leakage Imager	Luo Yang, Dong Hanbin, Wang Jiayi, Xie Qian(63)
Defect Test Verification Method for Secondary Equipment of Smart Substation	Li Xia, Zhou Wenyue, Zhu Xin, Ding Xuanwen(67)
Failure Analysis on Fracture of Strain Clamp in 500 kV Transmission Line	Chen Jiahui, Zhao Xinghong, Liu Xi, Feng Jie, Lin Deyuan(70)
Analysis on A Circuit - breaker Misoperation Accident Caused by Abnormal Anti - jumping Circuit.	Ding Xuanwen, Liu Mingzhong, Zheng Yongkang, Wang Ping(74)
Analysis on Abnormal Hydrogen of Insulating Oil in A Converter Transformer	Tan Huaan, Liu Chuntao, Huang Xueming, Qi Xiangdong, Luo Xin(77)
Development of An Ultrasound Partial Discharge Detection Device	Dong Xiaoshun, Liu Peng, Wang Zhe, Song Kunfeng, Ma Haijun, He Haidan(80)
Practice of Classified Protection of Cybersecurity in Large - scale Hydropower Station	Zhong Jian, Ni Yaqi(84)
Comprehensive Evaluation for Live Working Safety in Distribution Network Based on G1 Weighting Method	Yang Shentao, Chen Jinsong, Yuan Lin(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2020 Vol. 43 No. 2

(Ser. No. 266)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan,
China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Chen Ying

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

计及风电不确定性的风－水短期联合优化调度方法

苗树敏¹,滕予非¹,罗彬²,陈刚¹,王亮¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 清华四川能源互联网研究院,四川 成都 610042)

摘要:针对风电并网带来的出力随机性和波动性问题,提出了一种计及风电不确定性的风－水短期联合优化调度方法。首先,以地区风电群为整体,考虑风电出力不确定性导致的预测值与实际值间的偏差,采用模糊聚类方法对风电预测值与实际值进行二次聚类,构建预测值与对应的实际值间的出力情景集合及条件概率分布,将风电不确定性转变为有限个确定的条件情景进行描述;继而,建立多情景风电与水电站群联合调峰调度模型,结合当前风电预测值对应的实际情景及其概率分布,采用基于逐次逼近和关联搜索的水电站群短期优化调度方法进行求解;最后,以西南某地区为例,验证所提方法应用效果。

关键词:风电;水电;不确定性分析;发电优化调度

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003－6954(2020)02－0001－06

Short – term Optimal Scheduling Method for Combined Operation of Wind Power and Hydropower Considering Uncertainty of Wind Power

Miao Shumin¹, Teng Yufei¹, Luo Bin², Chen Gang¹, Wang Liang¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Sichuan Energy Internet Research Institute under Tsinghua Univeristy, Chengdu 610042, Sichuan, China)

Abstract:Aiming at the output randomness and fluctuation brought by wind power integration, a short – term optimal scheduling method for combined operation of wind power and hydropower is proposed. The uncertainty of wind power is considered in this method. Firstly, the scenario analysis method is adopted to describe the uncertainty of wind power output, which constructs the corresponding relationship between wind power prediction scenarios and practical scenarios through a two – step fuzzy clustering method. Then, the conditional probability distribution between prediction scenarios and practical scenarios can be determined. And, the uncertainty of wind power can be described by the determined set of scenarios and its probability distribution. Finally, combined with the wind power scenarios, an optimal scheduling model with peak regulation as the optimization objective for combined operation of wind power and hydropower is established. A association search method combined with successive approximation method is used to solve the proposed model. Taking a region in Southwest China for example, the application effect of the proposed method is verified.

Key words:wind power; hydropower; uncertainty analysis; optimal generation scheduling

0 引言

大力发展清洁能源是应对全球气候变化、减少环境污染、调整能源结构、实现可持续发展的有效途径。风电作为典型的绿色、可再生清洁能源,受自身工程优越性及国家政策导向激励,发展十分迅速,截至2019年年底,全国累计并网风电装机容量为210 GW,占总发电装机容量10.5%,规模化的地区并网风电已成为中国重要的电力资源。

不同于传统水、火电并网调度,风电受资源特性和自然条件限制,出力呈明显的随机性和波动性,难以准确预测,特别是随着并网风电装机规模的不断增大,其对电力调度运行的影响也愈发显著^[1-2]。传统电力调度中,通常假设次日风电出力为确定

基金项目:国家重点研发项目(2018YFB0905200);国家自然科学基金项目(51909133);国网四川省电力公司科技项目(52199718001B)

值^[3-4],忽略了风电出力预测误差影响,导致调度结果不能很好地反映系统实际运行状态,增加了系统运行风险和弃风风险。目前,关于风电并网随机性问题研究已取得许多成果,包括风功率预测^[5-8]、随机性描述^[9-10]、风电并网策略^[11]等,但规模化风电并网、消纳问题依旧突出。风电、水电联合调度是促进风电并网消纳的一种有效途径^[12-13],其关键是利用水电良好的调节能力平抑风电出力波动性,提高系统运行安全水平。

为此,以风电、水电联合调峰最优为目标,开展计及风电不确定性的风-水联合调度方法研究,这与目前多清洁能源互补消纳的政策和实际需求相适应,旨在挖掘电网消纳能力,提高清洁能源并网质量。首先,以地区风电群为整体,考虑风电出力不确定性导致的预测值与实际值间的偏差,采用模糊聚类方法对风电预测值与实际值进行二次聚类,构建预测值与对应的实际值间的出力情景集合及条件概率分布,将风电不确定性转变为有限个确定性条件情景进行描述;其次,基于当前风电预测值对应的实际情景及其概率分布,以期望调峰最优为目标,建立多情景风电与水电站群联合调度模型;再次,在有限个确定的风电出力情景下,采用基于逐次逼近和关联搜索的水电站群短期优化调度方法进行求解;最后,以西南某地区为例进行仿真分析,通过与实际运行结果对比验证了所提方法的有益效果。

1 基于模糊聚类的风电出力情景描述

1.1 模糊聚类方法

模糊聚类方法由陈守煜提出,该方法是根据样本间的不同特征和相似度,用相对隶属度表征样本属于某一类程度的聚类方法^[14]。下面以所有情景与聚类中心距离最小为目标构建最优聚类函数,确定最优聚类中心和各样本的相对隶属度,并根据最大隶属度原则确定样本分类。具体步骤如下:

1) 假设有 n 个样本、 m 个模糊聚类指标,取 $i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, 2, 3, \dots, n$, 则样本 j 的指标向量为 $[x_{1,j}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{m,j}]^T$, 所有样本的指标向量矩阵可表示为 $\mathbf{X} = \{x_{i,j}\}_{m \times n}$, 其中 $x_{i,j}$ 为样本 j 的第 i 个指标特征值。

2) 为避免不同指标量纲和数量级差异影响聚类效果,对指标向量矩阵进行规格化,得到规格化特

征矩阵 $\mathbf{R} = \{r_{i,j}\}_{m \times n}$, 其中 $r_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min_j x_{i,j}}{\max_j x_{i,j} - \min_j x_{i,j}}$, $\max_j x_{i,j}$ 、 $\min_j x_{i,j}$ 分别为所有样本对应的指标 i 的最大值和最小值。

3) 以所有情景与聚类中心距离最小为目标构建最优聚类函数:

$$F(u, s, w) = \min \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^c u_{k,j}^2 \left[\sum_{i=1}^m (w_i |r_{i,j} - s_{i,k}|)^2 \right] \quad (1)$$

式中: c 为聚类类别数, $k = 1, 2, 3, \dots, c$; $u_{k,j}$ 为样本 j 对类别 k 的相对隶属度; w_i 为指标 i 的权重; $s_{i,k}$ 为类别 k 对应的第 i 个指标的聚类特征规格化数, $[s_{1,k}, \dots, s_{i,k}, \dots, s_{m,k}]^T$ 即为类别 k 的聚类中心。

需要满足的约束条件有:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^c u_{k,j} = 1, 0 \leq u_{k,j} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1 \\ 0 \leq s_{i,k} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

4) 将上述模型转换为无约束拉格朗日函数,可得到 $u_{k,j}$ 和 $s_{i,k}$ 的迭代模型:

$$u_{k,j} = \left\{ \sum_{h=1}^c \left[\frac{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{i,j} - s_{i,k}|)^2}{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{i,j} - s_{i,h}|)^2} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$s_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{k,j}^2 r_{i,j}}{\sum_{j=1}^n u_{k,j}^2} \quad (4)$$

按式(3)、式(4)循环迭代求得最优聚类中心和各样本对每类的相对隶属度。

5) 按最大隶属度原则确定样本所属类别,即样本 j 的所属类别满足 $u_{*j} = \max\{u_{k,j}\}, k = 1, 2, 3, \dots, c$ 。

1.2 风电出力情景构建

合理的聚类结果依赖于聚类数目的确定,下面采用聚类综合质量法^[15]判断不同聚类数目对应的聚类结果优劣,通过遍历法确定适应当前样本集的最终聚类数。分别建立风电预测出力和对应的风电实际出力的模糊聚类模型,构建风电出力情景,具体步骤如下:

1) 以历史日风电预测出力曲线为样本,日内每个时段预测出力为聚类指标,规格化后取各指标等

权重构建风电预测出力模糊聚类模型,获得历史日风电预测出力曲线聚类结果,记为 $\Omega = \{\Omega_1, \dots, \Omega_l, \dots, \Omega_L\}$, $l = 1, 2, \dots, L$, L 为总的预测情景类别数。

2) 对于类别 l , 统计 Ω_l 中对应的历史日风电实际出力曲线作为聚类样本, 日内每个时段实际出力为聚类指标, 规格化后取各指标等权重构建风电实际出力模糊聚类模型, 获得类别 l 对应的历史日风电实际出力曲线聚类结果, 记为 $\Phi_l = \{\Phi_{l,1}, \dots, \Phi_{l,g}, \dots, \Phi_{l,G_l}\}$, $g = 1, 2, \dots, G_l$, G_l 为类别 l 对应的总的实际情景聚类数。

3) 计算预测情景类别 l 对应的各类实际情景出现概率:

$$\text{Prob}(\Phi_{l,g} | \Omega_l) = \frac{\text{num}(\Phi_{l,g})}{\sum_{g=1}^{G_l} \text{num}(\Phi_{l,g})} \quad (5)$$

式中: $\text{num}()$ 为计数函数, 统计集合中样本个数; $\text{num}(\Phi_{l,g})$ 为实际情景类别 g 中包含的样本个数; $\sum_{g=1}^{G_l} \text{num}(\Phi_{l,g})$ 为预测情景类别 l 对应的所有实际情景类别包含的总样本个数。

4) 对每类实际情景集合选取典型代表情景, 代表情景的本质是反映集合期望, 由于类别内部所有日实际出力曲线的出现概率相等, 采用类别内情景向量均值作为典型代表情景。对于实际情景类别 g , 其典型代表情景为

$$\begin{cases} R^*(g) = \{r_{t,g}^*\}, t = 1, 2, \dots, T \\ r_{t,g}^* = \frac{1}{\text{num}(\Phi_{l,g})} \sum_{v=1}^{\text{num}(\Phi_{l,g})} r_{t,v} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $t = 1, 2, \dots, T$ 为时段编号, T 为总的时段数。通过反规格化获得类别 g 对应的风电实际出力过程代表情景, 记为 $\{P_{t,g}^*\}, t = 1, 2, \dots, T$ 。

2 多情景风电与水电联合调峰模型

建立多情景风电与水电联合调峰模型, 利用水电较好的调节能力平抑风电出力波动性, 且尽可能地削减负荷峰谷差, 使余留给火电等其他电源的负荷需求尽量平稳, 提高电力调度安全性和经济性。采用剩余负荷方差最小^[16]为风电和水电联合调峰目标函数。

$$F = \min \sum_{t=1}^T (C'_t - \sum_{t=1}^T C'_t / T)^2 \quad (7)$$

式中, C_t 和 C'_t 分别为 t 时段系统总负荷需求和剩余负荷需求, 满足 $C'_t = C_t - P_t^{\text{sum}}$, P_t^{sum} 为 t 时段系统中风电和水电联合调度总出力, 满足:

$$P_t^{\text{sum}} = P_t^{\text{hydro}} + E(P_t^{\text{wind}}) \quad (8)$$

式中: P_t^{hydro} 为 t 时段系统中水电站群出力; $E(P_t^{\text{wind}})$ 为 t 时段系统中风电群实际期望出力。当式(8)中 $E(P_t^{\text{wind}})$ 变为 P_t^{wind} 时, 即 t 时段系统中风电群预测出力, 上述模型转化为传统确定性联合调峰模型。

根据前述风电不确定性描述方法, $E(P_t^{\text{wind}})$ 可表示为某一固定预测情景对应的实际出力代表情景集与其出现的条件概率间的组合:

$$E(P_t^{\text{wind}}) = \sum_{g=1}^{G_l} \text{Prob}(\Phi_{l,g} | \Omega_l) \times P_{t,g}^* \quad (9)$$

确定风电期望情景后, 上述模型转化为仅含水电群出力变量的目标形式, 求解过程中还需满足水电运行约束, 式(9)一式(17)分别为水量平衡约束、末水位约束、水位上下限约束、出力上下限约束、发电流量约束、水位库容关系约束、尾水位下泄流量关系约束、水电转换关系约束和水头约束。

$$V_{m,t+1} = V_{m,t} + 3600(Q_{m,t} - q_{m,t} - d_{m,t})\Delta_t \quad (10)$$

$$Z_{m,T} = Z'_{m,T} \quad (11)$$

$$\underline{Z}_{m,t} \leq Z_{m,t} \leq \bar{Z}_{m,t} \quad (12)$$

$$\underline{P}_{m,t}^{\text{hydro}} \leq P_{m,t}^{\text{hydro}} \leq \bar{P}_{m,t}^{\text{hydro}} \quad (13)$$

$$q_{m,t} \leq \bar{q}_{m,t} \quad (14)$$

$$Z_{m,t} = f_1(V_{m,t}) \quad (15)$$

$$ZT_{m,t} = f_2(R_{m,t}) \quad (16)$$

$$P_{m,t}^{\text{hydro}} = A_m q_{m,t} H_{m,t} \quad (17)$$

$$H_{m,t} = \frac{Z_{m,t} + Z_{m,t+1}}{2} - ZT_{m,t} \quad (18)$$

式中: $V_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段的初始库容; $Q_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段的入库流量; $q_{m,t}$ 和 $d_{m,t}$ 分别为水电站 m 在 t 时段的发电流量和弃水流量; $Z_{m,T}$ 和 $Z'_{m,T}$ 分别为水电站 m 在调度期末的水位及给定的末水位控制值; $\bar{Z}_{m,T}$ 和 $\underline{Z}_{m,T}$ 分别为水电站 m 在 t 时段的水位控制上、下限; $\bar{P}_{m,t}^{\text{hydro}}$ 和 $\underline{P}_{m,t}^{\text{hydro}}$ 分别为水电站 m 在 t 时段的出力上、下限; $q_{m,t}$ 和 $\bar{q}_{m,t}$ 分别为水电站 m 在 t 时段的发电流量及其上限; $ZT_{m,t}$ 为水电站

m 在 t 时段的下游尾水位; $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 分别为水位库容曲线关系函数和尾水位下泄流量关系函数; $R_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段的下泄流量, 满足 $R_{m,t} = q_{m,t} + d_{m,t}$; A_m 为水电站 m 的发电系数; $H_{m,t}$ 为水电站 m 在 t 时段的发电水头。

3 模型求解

对于给定的风电预测出力过程, 采用相似性分析判断其与各预测情景类间的相似度, 取最大相似度对应的情景类作为给定预测出力所属类, 并构建对应的实际风电出力情景组合。基于构建的风电期望情景, 上述风电与水电联合调度问题可转化为水电站群短期调度问题, 下面采用已有水电站群短期优化调度方法进行求解^[17]。首先, 根据电站初始水位、来水及末水位控制条件估算发电用水量及发电量; 根据估算的发电量, 采用逐次切负荷方法生成各电站初始解; 其次, 对电量估算导致的末水位偏差, 局部修正初始解, 对电站各时段出力进行增减关联搜索, 以满足上下游电站间的水量平衡约束, 进一步修正初始解; 最后, 以修正后的初始解为起点, 通过初始搜索、影响范围扩张、影响范围边缘修正、出入库水量差修正 4 种基本操作实现了持续在当前解附近搜索更优解, 即将当前目标值 F^k 与前次迭代目标值 F^{k-1} 进行对比, 若 $F^k \leq F^{k-1}$, 则取当前目标值对应解为新的迭代初始解, 反之, 继续以前次迭代解为初始解进行搜索, 循环迭代直至满足计算精度要求。总体求解过程总结如下:

- 1) 采用第 1.1、1.2 节方法构建历史日风电预测出力过程和对应的实际出力过程情景组合, 并确定其条件概率分布;
- 2) 采用相似性分析方法, 按最大相似度原则判断给定的风电预测出力过程所属预测情景类别;
- 3) 获得所属预测情景类对应的可能出现的实际情景组合及各情景条件概率, 并计算可能出现的实际风电出力过程期望, 即风电期望情景;
- 4) 基于风电期望情景, 优化计算求解风电、水电联合调峰模型。

4 实例分析

以西南某地区为例, 地区风电装机 1 604.5 MW, 占比为 16%, 水电装机 4 428.0 MW, 占比为 44%,

取近两年风电日 96 点(15 min 一个时段)出力计划值和实际值数据, 剔除异常数据后作为模糊聚类模型输入。结合聚类综合质量法及遍历法确定风电预测数据的最佳聚类数为 6, 各类代表情景中风电出力均值及其概率分布列于表 1。以枯期某日为例进行仿真计算, 根据相关性分析可知, 风电预测出力过程与第 6 类预测情景相关性最高, 对应的实际情景聚类数为 4, 各类情景如图 1 所示, 各实际情景概率分布及各情景与当日实际风电过程间的相关系数列于表 2。由表 2 可知, 实际风电过程与第 4 类风电实际情景间相关性最高, 期望情景与实际情景间呈显著相关性, 明显高于预测情景与实际风电过程间的相关性(相关系数为 0.473), 说明相比于预测情景, 所提方法构建的期望情景更贴合实际风电出力过程。

表 1 风电群出力预测情景概率分布

类别	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类	第 5 类	第 6 类
日出力均值/MW	640.2	839.8	963.5	420.0	1 218.8	1 484.0
概率/%	15.3	22.1	18.5	14.4	19.8	9.9

表 2 仿真日风电群出力对应的预测情景、实际情景及概率分布

预测情景	实际情景	均值/MW	概率/%	与实际风电过程相关性
第 6 类	第 1 类	481.1	9.1	0.240
	第 2 类	964.8	18.2	0.756
	第 3 类	1 175.7	40.9	0.754
	第 4 类	1 383.4	31.8	0.907
	期望情景	1 140.3	—	0.853

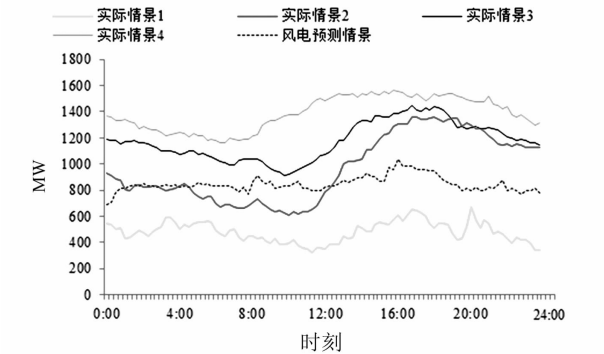


图 1 风电预测情景与 4 类实际情景

下面分析所提模型调峰效果。图 2、图 3 给出了期望情景下所建模型结果和实际运行的对比调峰效果及出力过程。采用余留负荷日占比(剩余负荷均值与剩余负荷最大値之比)、最小余留负荷占比

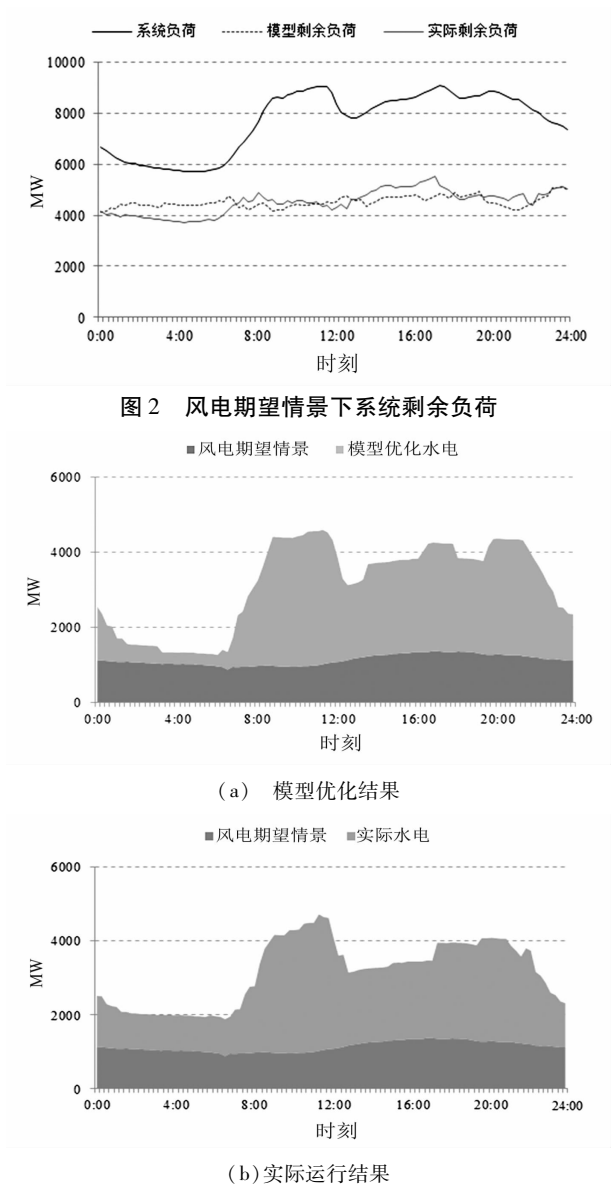


图 3 风电期望情景下水电出力过程

表 3 多情景风电与水电联合调峰结果对比

项目	风电情景	余留负荷日占比/%	最小余留负荷占比/%	余留负荷峰谷差/MW	余留负荷均方差/MW
模型优化	第 1 类	87.81	79.73	1 198.12	302.50
	第 2 类	91.91	83.41	849.71	178.92
	第 3 类	88.31	80.05	1 015.57	218.30
	第 4 类	86.51	77.39	1 120.98	250.29
	期望情景	88.36	80.38	1 006.51	216.12
	实际过程	87.42	75.38	1 303.38	252.49
实际运行	第 1 类	82.66	67.33	2 050.58	568.44
	第 2 类	84.53	70.33	1 651.30	417.04
	第 3 类	81.64	66.70	1 833.08	483.94
	第 4 类	79.62	65.72	1 845.57	486.37
	期望情景	81.65	67.22	1 818.50	474.57
	实际过程	83.92	70.72	1 614.01	385.37

(剩余负荷最小值与剩余负荷最大值之比)、余留负荷峰谷差和余留负荷均方差 4 个指标评价模型调峰效果,其中前两个指标用于衡量系统余留负荷日内的变化程度,峰谷差指标用于衡量系统剩余负荷对应的最大调峰深度,均方差指标反映了日内余留负荷过程与其均值的偏离程度,对比结果列于表 3。可以看出,在风电期望情景下,所提模型可以更好地削减系统负荷峰谷差,相比于实际运行数据,余留负荷峰谷差减少 812 MW,缩减近 45%,且余留负荷过程更加平稳,均方差减小了 258.4 MW,缩减近 55%,说明在构建的风电期望情景下,所提模型可更好地挖掘了水电站水库调节能力,提高风电、水电联合调峰效果。

进一步分析应对多种风电情景时模型结果的鲁棒性,不同情景下所提模型与实际运行对应的调峰结果见表 3。可以看出,在不同风电情景下所提模型的余留负荷日占比和最小余留负荷占比均高于实际运行,最大的余留负荷日占比和最小余留负荷占比增幅分别为 7.4% 和 13.4%,说明扣除风电和水电后系统余留负荷变化减小;不同情景下余留负荷峰谷差和余留负荷均方差与实际运行相比均有所下降,最大降幅分别为 852.5 MW 和 265.9 MW,说明调峰深度和余留负荷波动明显减小,更有利于后续其他发电机组运行安排。同时,对比了当日实际风电过程下所提模型与实际运行的调峰效果,见表 3。对比可知,相比于实际运行所提模型对应的余留负荷日占比和最小余留负荷占比均有明显增加,且余

留负荷峰谷差、余留负荷均方差明显下降,这说明应对当日实际风电过程,所提模型可以取得更好的调峰效果。因此,在预判的多种风电实际情景及当日实际风电过程下,所提模型的各项调峰指标均优于实际运行,可以更好地适应不同风电情景、有效提高风电并网质量,验证了所提模型的鲁棒性及可行性。

5 结 语

针对风电并网带来的不利影响,提出了一种计及风电不确定性的风-水联合调度方法,旨在通过利用水电良好的调节性能提高风电并网质量,促进清洁能源互补消纳。该方法可分为两部分:1)考虑风电不确定性引起的调度偏差,采用模糊聚类方法分别对历史风电预测值和实际值进行二次聚类,构建当前预测条件下可能出现的风电实际情景集合及概率分布;2)基于构建的多风电情景,以风电、水电联合调峰最优为目标,建立多情景风电与水电站群联合调度模型并优化求解。以西南某地区为例,分别对比了风电期望情景下、多情景下和实际过程下所提方法和实际运行的调峰效果,采用余留负荷日占比、最小余留负荷占比、余留负荷峰谷差和余留负荷均方差4个指标进行评价,所提方法的各项指标均优于实际运行,验证了其更好地适应性及调峰效果。所提方法为风电规模化并网、风电-水电联合调度提供了一种可行技术途径,并可为光伏等其他间歇性电源的并网调度提供借鉴。

参考文献

[1] 罗亦梅,张里,吴琛,等. 含随机风电出力及电网安全的电网调度策略研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(1): 6-11.

[2] J. C. Smith, M. R. Milligan, E. A. DeMeo, et al. Utility Wind Integration and Operating Impact State of the Art[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 900-908.

[3] 畅建霞,王义民,黄强,等. 水电与风电联合补偿调度机理研究与应用[J]. 水力发电学报,2014,33(3):68-73.

[4] 薛美娟,杨晓萍,马啸远. 基于最优潮流理论的风电、梯级水电短期联合优化调度[J]. 水利学报,2014,45

(3):368-375.

[5] 张涛,张新燕,王维庆. 基于神经网络的风功率预测问题研究[J]. 四川电力技术,2013,36(1):16-18.

[6] 孙海蓉,张鸽,王瑞珈. 基于组合优化算法的短期风电功率预测[J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(1): 33-41.

[7] 薛勇胜,郁琛,赵俊华,等. 关于短期及超短期风电功率预测的评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 141-151.

[8] 罗恩博,苏适,陆海,等. BP神经网络在风电场功率预测中的应用[J]. 云南电力技术,2018,46(4):32-34.

[9] 孙健,刘斌,刘锋,等. 计及预测误差相关性的风电出力不确定性集合建模与评估[J]. 电力系统自动化, 2014,38(18):27-32.

[10] 林卫星,文劲宇,艾小猛,等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报,2012, 32(1):38-46.

[11] 王魁,张步涵,闫大威,等. 含大规模风电的电力系统多时间尺度滚动协调调度方法研究[J]. 电网技术,2014,38(9):2434-2440.

[12] 黄春雷,丁杰,田国良,等. 大规模消纳风电的常规水电运行方式[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):37-40.

[13] 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.

[14] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2009.

[15] 吴慧军,程春田,武新宇,等. 考虑小水电出力不确定性的小水电与大中型水电站群短期联合调度方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5879-5889.

[16] C. T. Cheng, J. J. Shen, X. Y. Wu. Short-term Scheduling for Large-scale Cascaded Hydropower System with Multi-vibration Zones of High Head[J]. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 2012, 138(3): 257-267.

[17] 程春田,申建建,武新宇,等. 大规模复杂水电优化调度系统的实用化求解策略及方法[J]. 水利学报, 2012,43(7):785-795.

作者简介:

苗树敏(1992),博士研究生,研究方向为水电系统经济运行。

(收稿日期:2020-03-02)

热电联产机组的控制优化策略研究

叶 晨¹,李红军²,唐志东¹,崔双喜³,孙 凯¹

- (1. 国网江苏省电力有限公司淮安市洪泽区供电分公司,江苏 淮安 223100;
2. 国网安徽省电力有限公司检修分公司,安徽 合肥 230000;
3. 新疆大学电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要:针对风电机组的调峰能力不足导致弃风问题依然突出,分析了系统热惯性对热电联产机组控制的作用,认为热电联产机组常规控制系统的发电负荷响应的跟随性存在较大时间的延迟,不能满足快速性响应要求,无法实时参与调峰,并提出了一种改进的控制方案来解决这一问题。通过 Matlab/Stateflow 仿真软件进行验证,仿真结果表明,改进后的控制方案显著优于常规控制方案,发电负荷响应指标响应快速,跟随性能良好,为热电联产机组参与电网调峰提供了先决条件。

关键词:热惯性;负荷响应;热电联产

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0007-05

Research on Control Optimization Strategy for Co-generation Unit

Ye Chen¹, Li Hongjun², Tang Zhidong¹, Cui Shuangxi³, Sun Kai¹

- (1. Huai'an Hongze District Electric Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huai'an 223100, Jiangsu, China; 2. Maintenance Branch, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China; 3. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problem that abandoning wind is still prominent because of the insufficient peak load regulation capacity of wind turbine, the effect of thermal inertia of the system on the control of co-generation unit is analyzed. It is considered that the follow-up of generation load response of conventional control system of co-generation unit is delayed for a long time, which cannot meet the requirements of fast response and cannot participate in peak load regulation in real time, so an improved control scheme is proposed to solve this problem. Through the Matlab / Stateflow simulation software, the results show that the improved control scheme is significantly better than the conventional control scheme, the response of power load response index is fast and the follow-up performance is good, which provides the preconditions for co-generation units to participate in grid peak load regulation.

Key words: thermal inertia; load response; combined heat and power

0 引 言

中国“三北”地区冬季是风电高发季节。当前,为满足冬季供暖增长的需要,电力系统中热电联产机组的容量逐年上升,占比越来越大^[1]。为做好冬季风电消纳工作,增加电网调峰容量,热电联产机组必须在负荷允许调节范围内参与电网调峰。

基金项目:国家自然科学基金(51467020,11762021)

当前,集中供热系统热力工况控制大部分只考虑稳态情况,即由当前的户外温度及当天统计的日平均供、回水温度来调节供热系统稳定运行,以此达到供热的稳定性^[2]。但此种方法无法反映供热系统运行的动态特性。一般情况下,一天中热网负荷趋于稳定导致热电联产机组的输出功率在一天中的变化不太明显^[3]。这就是热电联产机组(承供热负荷)难以参与电网调峰的主要瓶颈。

此外,由于电力系统和热力系统的特性不同,电能的“发、输、配、用”具有瞬时性,而热力系统由于自身介质的传输特性(热量的变化具有时间效应)且管网具有一定的储热特征,所以,对于热力系统而言,其时间的相关性比较强^[4]。通过分析供热工况,可以发现:供热量(这里为供热水温差)经过突变再恢复到原有状态时对室温的影响并不明显,表明集中供热系统蓄热能力很强。正是由于供热系统这种蓄热特性(热惯性),当负荷在较短时间增加或减少,并不影响供热用户的取暖体验^[5]。这样,供热机组可以利用这部分储能应付短时间内的负荷变化,从而使热电厂参与电力调峰成为可能。

下面研究工作的核心是利用热网储能,使供热机组参与电网调峰并提高其负荷响应速度的问题。

1 常规的控制方法

热电联产机组是一个多输入、多输出的被控对象。输入有锅炉燃料量、抽汽蝶阀开度、汽轮机高调门开度;输出有汽轮机中压缸排汽压力、汽轮机机前压力、机组发电负荷。当前普遍采用的热电联产机组控制方法为锅炉燃料量控制汽轮机前压力;汽轮机高调门开度控制机组发电负荷;汽轮机中压缸压力由调节蝶阀来调整^[6]。常规控制方法的结构图如图1所示。

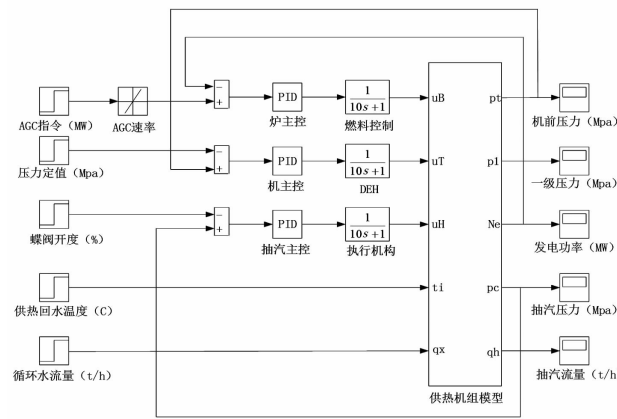


图1 常规控制方法的结构

热电联产机组额定发电负荷指令(AGC)通过速率约束后即为实际发电指令,一般发电负荷指令设定为每分钟调节1.5% P_e (P_e 为额定负荷),对于300 MW机组,通过计算可知其发电负荷速率约为4.5 MW/min。供热回路汽轮机抽汽压力经调整调节蝶阀开度来控制。锅炉主控输出到控制燃烧系统;为响应锅炉主控输出变化,相应的锅炉给煤量也要随之调整,一次风量、二次风量均需乘以一不同系数进行修正以适应锅炉主控输出变化,在此选择一

阶惯性环节 $1/(10s + 1)$ 来描述;汽轮机同样也选择一阶惯性环节 $1/(10s + 1)$;对于抽汽蝶阀开度的变化速率,控制系统一般采用惯性或者限速环节来约束,这里也用一阶惯性环节 $1/(10s + 1)$ 来描述。下面对热电联产机组在不同工况下的运行特性进行分析,首先看一下常规控制系统在额定发电负荷工况、额定供热负荷工况下的运行性能。

热电联产机组常规控制系统方案原理如图2所示。

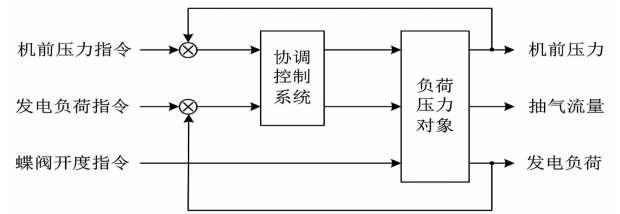


图2 常规热电联产机组控制系统原理

下面对常规控制方法分别在热电联产机组额定发电负荷、额定供热工况下对其仿真分析。

1) 额定发电负荷工况

在额定发电负荷工况下,常规控制系统的相关波形如图3至图9所示。

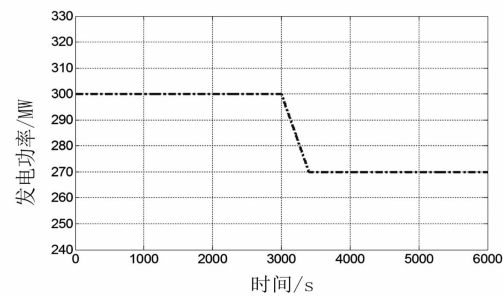


图3 额定发电负荷工况下 AGC 波形

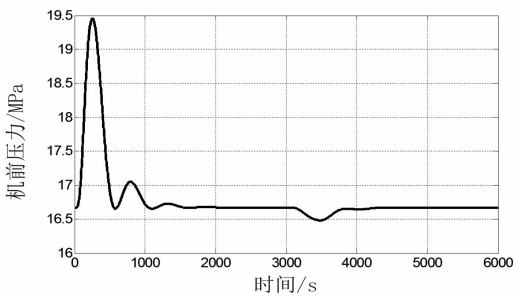


图4 额定发电负荷工况下机前压力波形

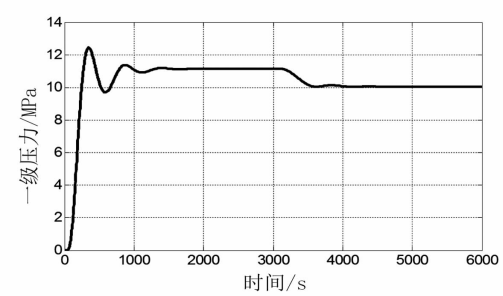


图5 额定发电负荷工况下一级压力波形

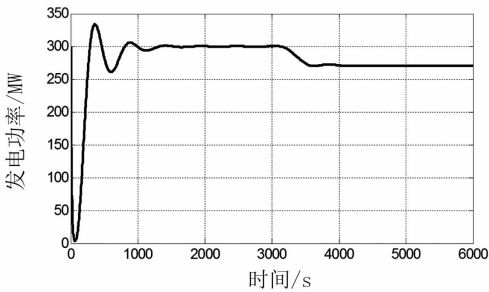


图 6 额定发电负荷工况下发电功率波形

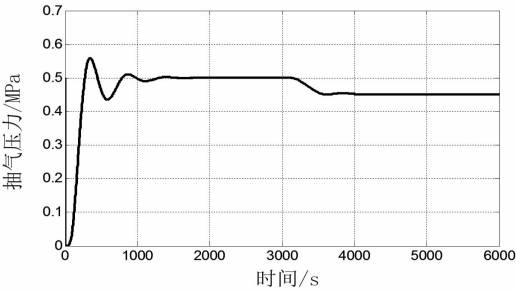


图 7 额定发电负荷工况下抽汽压力波形

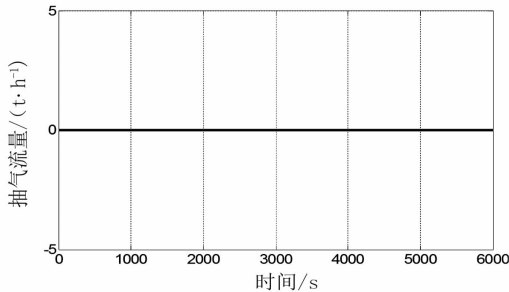


图 8 额定发电负荷工况下抽汽流量波形

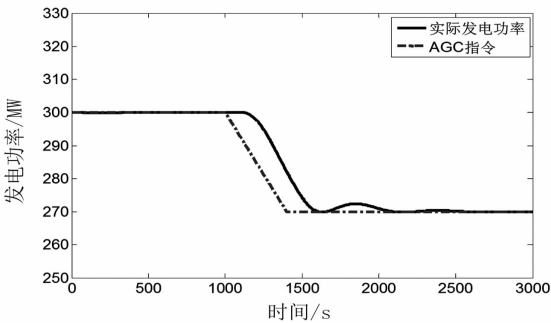


图 9 额定发电负荷工况 AGC 给定及实际发电功率波形

整个系统仿真时间设置为 6000 s, 仿真算法采用 ode45, 汽轮机前压力定值保持在 16.67 MPa, AGC 指令在 3000 s 时令以每分钟 1.5% P_e 的变化速率由 300 MW 下降到 270 MW, 整个下降时间用了 400 s。为了获得最好的控制效果, 系统的 PID 调节器的参数均采用枚举寻优法进行整定。由图 3 和图 9 可以看到, 常规控制方案中机前压力波动并不大, 在 3480 s 时, 压力偏差为 0.2 MPa, 但发电负荷在 3600 h 下降到 270 MW 给定负荷, 存在大约 200 s 的延迟, 并且随后又波动了 500 s 左右才稳定下来。

2) 额定供热负荷工况

在额定供热负荷工况下, 常规控制系统的相关波形如图 10 至图 16 所示。

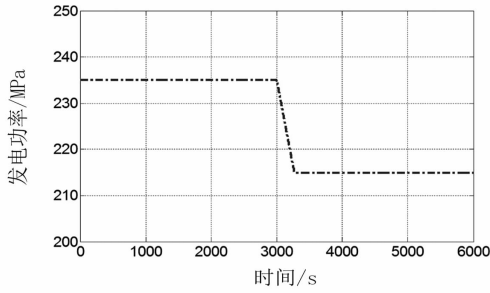


图 10 额定供热负荷工况下 AGC 波形

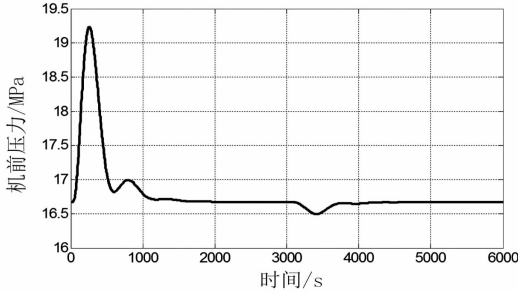


图 11 额定供热负荷工况下机前压力波形

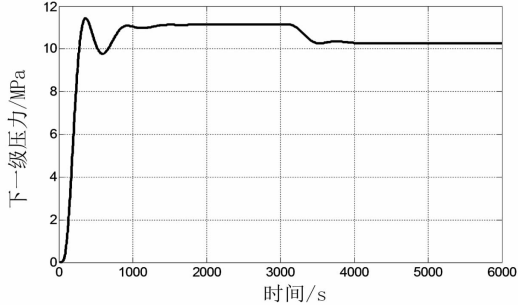


图 12 额定供热负荷工况下一级压力波形

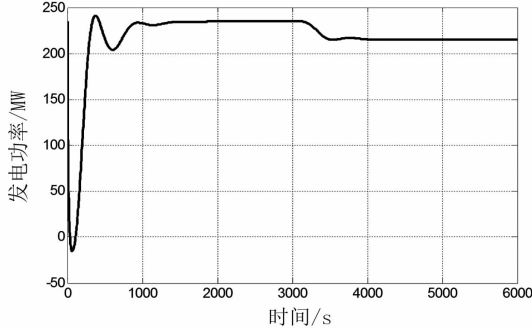


图 13 额定供热负荷工况下发电功率波形

由 10 至图 16 可以看出, 在额定供热负荷工况下, 发电负荷指令由 235 MW 下降到 215 MW (每分钟 1.5% P_e 的速率), 供热抽汽压力定值确定为 0.35 MPa, 汽轮机前压力定值一直处于 16.67 MPa。机前压力偏差最大约为 0.2 MPa, 发电负荷响应依然存在约 200 s 的延迟。

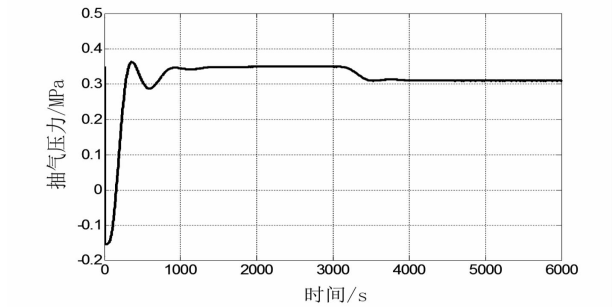


图 14 额定供热负荷工况下抽汽压力波形

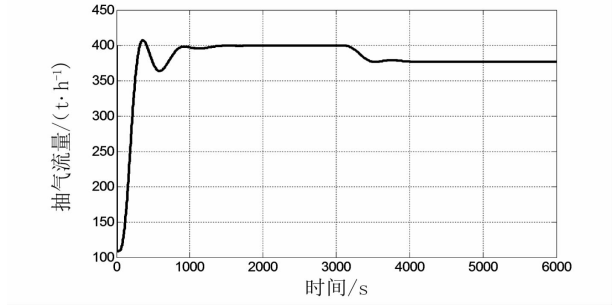


图 15 额定供热负荷工况下抽汽流量波形

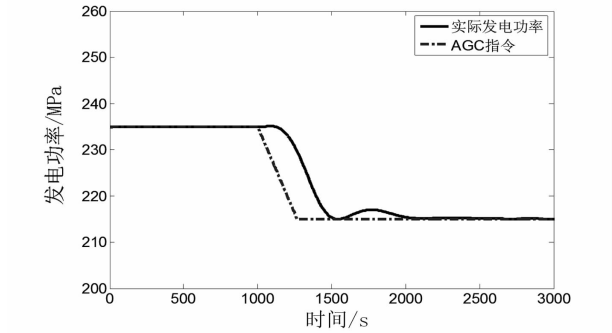


图 16 额定供热负荷工况 AGC 给定及实际发电功率波形

2 改进后的控制方法

由上述仿真结果及分析可知,常规控制方案中机前压力波动并不明显,但存在一个明显的不足,就是 AGC 的指令跟随性能差,延迟时间太长,不能满足电网快速性响应要求,无法实时参与电网调峰。要解决这一问题,需要考虑新的系统控制方案来提高系统发电负荷响应能力这一关键性能指标的快速性,这里提出一种基于热惯性的改进控制方案来解决这一关键的系统性能指标。新的方案利用锅炉燃料量控制机组发电负荷,汽轮机高调门开度控制汽轮机机前压力,通过改变供热抽汽调节蝶阀开度控制供热抽汽流量,优化后的控制系统发电功率能够快速跟踪功率指令变化。改进后的控制系统结构如图 17 所示。

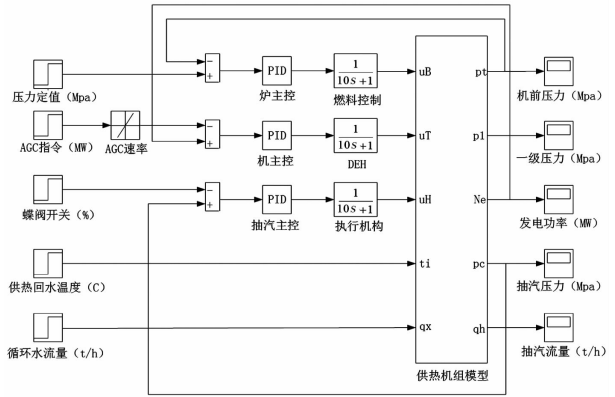


图 17 改进后的控制系统结构

改进后的热电联产机组控制原理如图 18 所示,通过引入非线性滤波器,将 AGC 指令分解成基本负荷指令和波动负荷指令两个部分。其中,基本负荷指令仍然由常规机组控制系统进行调控,而将蝶阀开度指令与惯性环节叠加之后,由波动负荷指令对蝶阀开度进行控制。

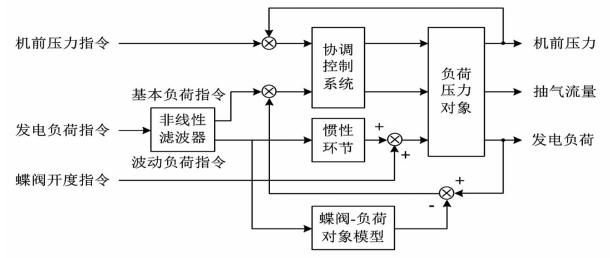


图 18 改进热电联产机组控制系统原理

对改进后的控制方案在额定发电负荷工况下和额定供热负荷工况下进行仿真分析,观察系统的相关运行情况。无论是额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,整体仿真时间都设定为 3000 s,其中在 1000 s 时,额定发电负荷工况下给定负荷由 300 MW 渐变到 270 MW;额定供热负荷工况下给定负荷由 235 MW 渐变到 215 MW。相关的波形如图 19 至图 24 所示。

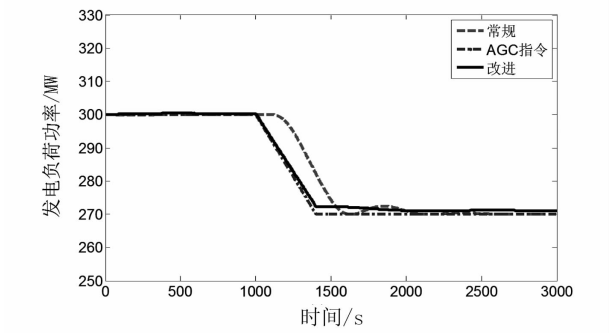


图 19 额定发电负荷工况下常规系统和改进后的系统发电负荷波形对比

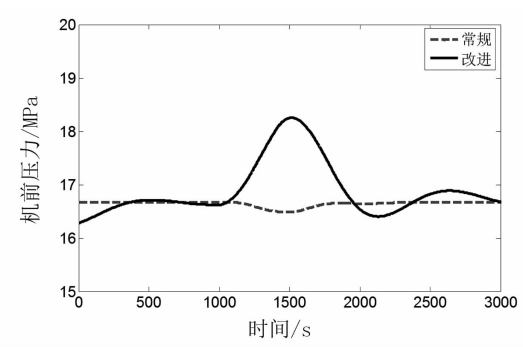


图 20 额定发电负荷工况下常规系统和改进后的系统机前压力波形对比

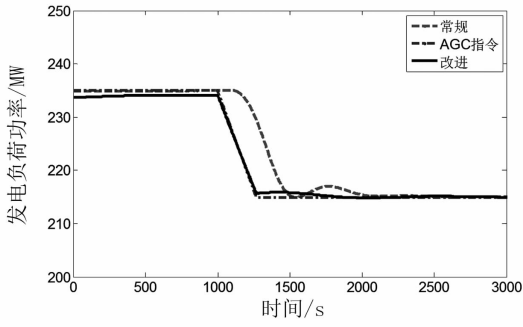


图 21 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统发电负荷波形对比

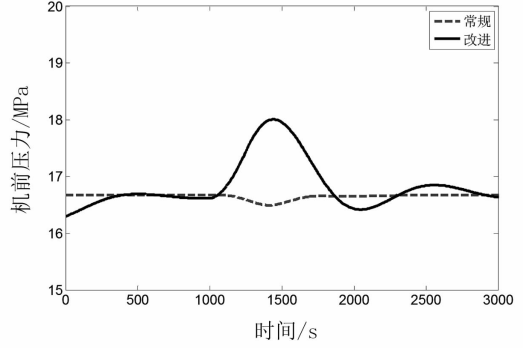


图 22 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统机前压力波形对比

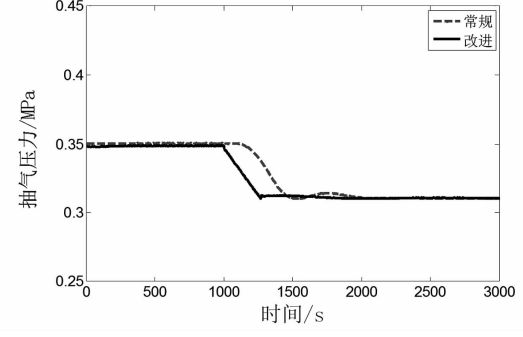


图 23 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统抽汽压力波形对比

对比常规控制方法和改进后的控制方法,可以发现:

1) 无论是额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,改进后的控制系统的机前压力波动都要大于常规控制系统,在额定发电负荷工况时,机前压力值最大达到 18.5 MPa;在额定供热负荷工况时,机前压力值最大达到 18 MPa。

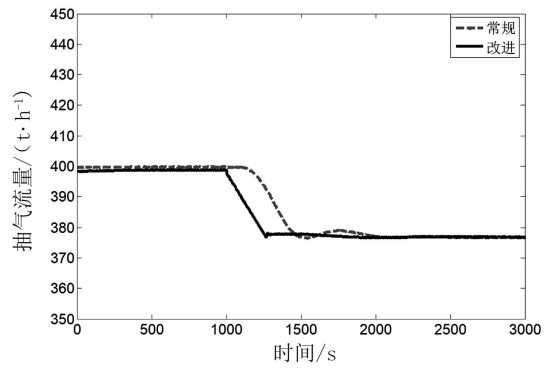


图 24 额定供热负荷工况下常规系统和改进后的系统抽汽流量波形对比

2) 从图 19 和图 21 的发电负荷波形可以看出,系统无论工作在额定发电负荷工况还是额定供热负荷工况,改进后的系统控制方案中发电负荷的控制性能不管在跟随性还是在稳定性上,都要明显优于常规控制系统。

3) 从图 22 和图 24 的相关波形可以看出,由于在发电负荷的控制性能上,改进后的控制系统优于常规控制系统,相应地,在额定供热负荷工况下,改进后的控制系统的抽汽压力波形和抽汽流量波形优于相应的常规控制系统下的波形。

综上所述,改进后的控制方案优于常规控制方案,特别是改进后的控制系统发电负荷的跟随性能优异,能满足热电联产机组发电负荷控制的快速性要求,而发电负荷控制的快速性又是热电联产机组参与电网系统调峰的先决条件。

3 结 语

前面对热电联产机组的常规控制系统进行了分析,并在额定发电工况和额定供热工况下对其进行仿真,仿真结果表明常规控制系统对发电负荷响应这一重要指标的跟随性并不理想,存在大约 200 s 的时间延迟。利用锅炉燃料量控制机组发电负荷、汽轮机高调门开度控制汽轮机机前压力对热电联产机组控制方法进行改进,并将其与常规控制方法仿真对比,结果表明,改进后的控制系统在各种工况下

(下转第 16 页)

含分布式电源的城市电网故障分析方法研究

马子钦,廖 凯,杨健维

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:分布式电源大规模接入城市电网会给城市电网的故障特征带来一定的影响,其出力的随机性会引起故障特征的不确定。针对现有故障分析方法未考虑出力随机性的影响,提出一种基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法。首先,基于分布式电源出力的概率模型,利用蒙特卡洛法进行随机抽样;然后,通过 PQ 控制和低电压穿越策略下的故障模型进行计算,形成故障电压、短路电流的概率分布;最后,通过算例进行仿真分析。结果表明,分布式电源接入城市电网后故障特征具有概率特性,该方法计及分布式电源出力随机性的影响,可得故障电压、短路电流的概率分布,可对城市电网故障特性分析以及整定值的选取提供依据。

关键词:分布式电源;PQ 控制;蒙特卡洛法;概率分布

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2020)02 - 0012 - 05

Research on Failure Analysis Method of Urban Power Grid with Distributed Generation

Ma Ziqin, Liao Kai, Yang Jianwei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract:Large - scale access of distributed generation to urban power grid will have certain impact on the fault characteristics of urban power grid, and the randomness of its output will cause uncertainty of the fault characteristics. Aiming at the fact that the existing random analysis methods do not consider the influence of output randomness, a failure analysis method for urban power grid with distributed generation based on Monte Carlo method is proposed. Based on the probabilistic model of distributed generation output, Monte Carlo method is used for random sampling, and then the fault model under PQ control and low - voltage ride - through strategy is used to calculate the probability distribution of fault voltage and short - circuit current. Finally, it is verified with a calculation example. The results show that the fault characteristics of distributed generation connected to urban power grid have probabilistic characteristics. The proposed method can obtain the probability distribution of fault voltage and short - circuit current, and can provide a basis for the analysis of fault characteristics of urban power grid and the selection of setting values.

Key words:distributed generation; PQ control; Monte Carlo method; probability distribution

0 引 言

随着全球化石能源短缺、温室效应加剧,大力发展可再生能源成为了城市电网发展的主要趋势。其中以风能、太阳能为主的分布式电源逐渐接入城市电网,而分布式电源出力具有随机性,这对电网故障

时的潮流情况带来了不确定性影响,使得传统故障分析方法难以适应^[1-2]。故障分析方法是保护配置的基础,因此分布式电源出力的随机性有必要在故障分析中深入考虑,以得到更为准确的故障分析结果,保障城市电网的可靠安全运行。

分布式电源常通过电力电子器件接入电网,即逆变型分布式电源。目前,针对含分布式电源城市电网的故障分析,许多学者做了大量研究。其中主要分为两个方面:1)考虑分布式电源的控制策略,

基金项目:国家杰出青年科学基金(51525702);国家自然科学基金项目(U1766208,51807168,61603311);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018GF04)

包括 PQ 控制、V/f 控制与下垂控制³⁻⁴,同时计及低电压穿越特性、限流环节等;2)从分布式电源的出力入手,考虑分布式电源输出的随机性,反映故障潮流的真实情况。

对于第 1 个方面,目前已有大量的研究成果。文献[5]在考虑逆变型分布式电源低电压穿越特性基础上,提出限制输出电流与功率的控制策略。文献[6]考虑逆变型分布式电源的 PQ 控制策略,将多个分布式电源进行等值,并对故障网络分区,简化了含多逆变型分布式电源复杂网络的计算。文献[7]分析 PQ 控制策略对短路电流的影响,提出适用于稳态以及次暂态的故障求解模型。文献[8-9]基于 V/f 控制策略,建立了含分布式电源网络的故障等值模型。上述文献在故障分析中考虑了逆变型分布式电源的控制策略,但其出力大小受环境因素具有随机性,使得故障时的潮流情况也是不确定的,从单一运行点计算不能确切地反应实际情况。

对于第 2 个方面,目前的研究工作较少,文献[10]利用蒙特卡洛法对分布式电源输出功率、故障点位置等进行随机抽样,利用故障模型计算短路电流的概率分布。蒙特卡洛法通过大量抽样运算具有普遍性,但该文献在计算中未考虑分布式电源的控制策略与低电压穿越特性等。

综合上述研究成果,考虑分布式电源出力的随机特性以及控制策略,提出一种基于蒙特卡洛法的故障分析方法。该方法运用蒙特卡洛法对分布式电源出力的概率模型进行随机抽样,基于 PQ 控制及低电压穿越策略的故障计算方法对故障电压与短路电流的概率分布进行求解;最后,通过算例对所提故障分析方法进行仿真验证。

1 分布式电源的概率模型

高比例分布式电源的并网改变了城市电网的基本特征。一方面,城市电网结构发生变化,由传统单电源网络发展为多电源网络,电网潮流复杂化;另一方面,分布式电源如风力发电、光伏发电受自然因素影响出力具有随机性。下面主要介绍风机、光伏出力的概率模型以反映其随机性特征。

1.1 风机出力概率模型

风力发电机组的出力大小与风速有关,通常采用双参数威布尔分布来描述风速的变化情况^[11]。

$$f(v) = \frac{a}{b} \left(\frac{v}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{b}\right)^a\right] \quad (1)$$

式中: v 为实际风速; a 和 b 分别为双参数威布尔分布的形状参数与尺度参数。

风机出力与风速的关系为

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ P_N \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_N & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电机组出力; v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别为风电机组的切入风速、额定风速、切出风速; P_N 为风电机组的额定功率。

结合式(2)可得风机出力的概率密度函数为

$$f(P_w) = \frac{a}{c_1 b} \left(\frac{P_w - c_2}{c_1 b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{P_w - c_2}{c_1 b}\right)^a\right] \quad (3)$$

式中: $c_1 = P_N / (v_r - v_{ci})$; $c_2 = -c_1 v_{ci}$ 。

1.2 光伏出力概率模型

据大量统计资料表明,一段时间内大部分地区的光照强度变化可近似看作服从 Beta 分布^[12]。

$$f\left(\frac{r}{r_{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: r 和 $r_{\max}$ 分别为这段时间内的实际光照强度与最大光照强度; Γ 为伽马函数; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数。

光伏发电机组出力与光照强度的关系可由式(5)表示,结合式(4)可得光伏出力的概率密度函数,见式(6)。

$$P_p = \gamma A \eta \quad (5)$$

$$f\left(\frac{P_p}{P_{p\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_p}{P_{p\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_p}{P_{p\max}}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

式中: P_p 和 $P_{p\max}$ 分别为光伏发电机组的实际出力 and 最大出力; A 为光伏板面积; η 为转换效率。

2 基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法

分布式电源出力的随机特性使得传统基于某一运行点的故障分析方法难以满足实际情况,同时其输出受控制策略影响也呈现不同的故障特征。这里提出基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法,利用蒙特卡洛法生成服从出力分布的数据代入考虑 PQ 控制策略的故障计算中,解决现

有方法未考虑控制策略或出力随机性等问题。

2.1 逆变型分布式电源等值模型

分布式电源种类繁多,根据并网方式可分为旋转型分布式电源和逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG)两种。其中旋转型分布式电源采用同步机并网,可直接接入电网;逆变型分布式电源则通过电力电子变流器接入电网^[13]。目前城市电网中大多数分布式电源为逆变型,这里主要研究逆变型分布式电源。

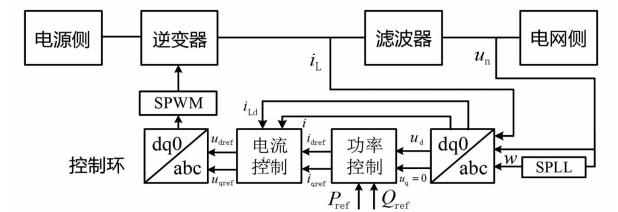


图1 基于PQ控制策略的分布式电源并网结构

逆变型分布式电源通常采用PQ控制策略进行并网,如图1所示。在此控制下,逆变器的输出电流跟随参考值发生变化,可由式(7)表示。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{ref}}{u_d} \\ i_{qref} = \frac{Q_{ref}}{u_d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率参考值和无功功率参考值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为逆变器输出的有功参考电流和无功参考电流; u_d 为电网侧电压的d轴分量。

城市电网正常运行时,在考虑可再生能源充分利用的基础上,逆变型分布式电源不输出无功功率。在电网发生故障时,逆变型分布式电源提供的故障电流与其并网点电压和有功功率参考值有关。同时逆变型分布式电源还需具有无功支撑能力的低电压穿越特性与限流环节^[14]。为满足该要求,分布式电源输出电流满足式(8)一式(10)。同时,逆变器优先输出无功电流,以保证电网的稳定性。

$$I_{q\cdot f} = \begin{cases} 0, & \frac{U_f}{U_N} > 0.9 \\ \min\left[2\left(1 - \frac{U_f}{U_N}\right)I_N, 2I_N\right], & \frac{U_f}{U_N} \leq 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{d\cdot f} = \min\left[P_{ref}/U_f, \sqrt{(2I_N)^2 - I_{q\cdot f}^2}\right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_f &= (I_{d\cdot f}\cos\theta + I_{q\cdot f}\sin\theta) + \\ &\quad j(I_{d\cdot f}\sin\theta - I_{q\cdot f}\cos\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: U_N 、 U_f 分别为节点额定电压与故障电压; I_N 为分布式电源输出的额定电流; $I_{q\cdot f}$ 、 $I_{d\cdot f}$ 分别为故

障时分布式电源输出的无功电流和有功电流; $\dot{I}_f$ 为逆变器输出的电流; θ 为并网点电压的相角。

2.2 基于蒙特卡洛法的城市电网故障分析方法

对于电网的故障计算可通过节点电压方程进行求解,而在含逆变型分布式电源的电网发生故障时,分布式电源的输出电流与并网点电压和有功参考值有关,则需对方程进行迭代求解^[15]:

$$Y\dot{U}_f^{(k)} = \dot{I}_f^{(k-1)} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I_{q\cdot f}^{(k)} = \begin{cases} 0, & \frac{U_f^{(k)}}{U_N} > 0.9 \\ \min\left[2\left(1 - \frac{U_f^{(k)}}{U_N}\right)I_N, 2I_N\right], & \frac{U_f^{(k)}}{U_N} \leq 0.9 \end{cases} \\ I_{d\cdot f}^{(k)} = \min\left[P_{ref}/U_f^{(k)}, \sqrt{(2I_N)^2 - I_{q\cdot f}^{(k)2}}\right] \\ \dot{I}_f^{(k)} = (I_{d\cdot f}^{(k)}\cos\theta^{(k)} + I_{q\cdot f}^{(k)}\sin\theta^{(k)}) + \\ \quad j(I_{d\cdot f}^{(k)}\sin\theta^{(k)} - I_{q\cdot f}^{(k)}\cos\theta^{(k)}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\max |U_f^{(k)} - U_f^{(k-1)}| < \varepsilon \quad (13)$$

式中: Y 为节点导纳矩阵; k 为迭代次数。

由上述计算模型可得网络故障电压电流值。而在计及分布式电源出力的随机性时,可将修正方程式中的有功参考值看作服从相应的概率分布,利用蒙特卡洛法进行随机抽样,将生成的样本值带入到PQ控制策略下的故障计算模型,得到一系列电压电

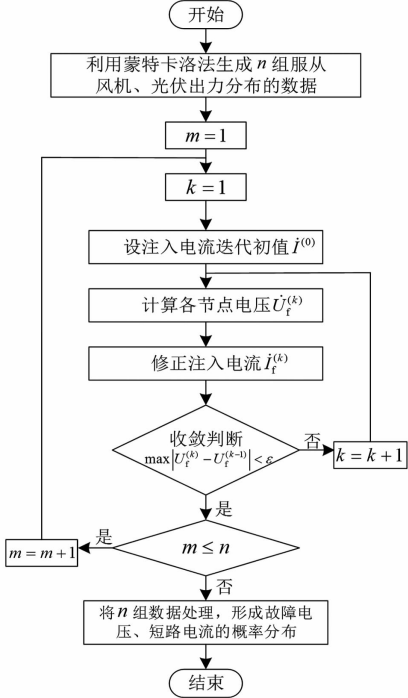


图2 算法流程

流值,通过统计分析形成故障电压、短路电流的概率分布。蒙特卡洛法通过大量抽样计算来获取系统空间的随机状态,不限制系统规模,适用于城市电网的计算分析。

综上,基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法流程图如图2所示。

3 算例分析

3.1 仿真场景设定

利用所提方法进行仿真分析。如图3所示, DG1、DG2 为风电机组, DG3、DG4 为光伏电站,具体参数设置如下。

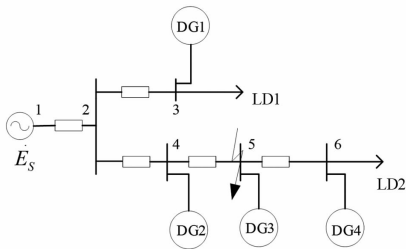


图3 算例模型

- 1) 风机出力满足威布尔分布,风电机组额定功率为1 MW,切入风速、切出风速、额定风速分别为4 m/s、25 m/s、15 m/s,实际风速表见文献[16]。
- 2) 光伏出力满足 Beta 分布,光伏电站最大光强为250 W/m²,总光伏面积为35 000 m²,转换效率为15%,参数 α 、 β 分别为0.45、9.19^[17]。

设定支路4-5末端发生三相短路,过渡电阻为1 Ω ,利用所提方法对故障网络进行分析。

3.2 基于蒙特卡洛法的故障分析方法仿真结果

通过所提方法对节点5电压幅值和支路4-5短路电流的概率密度函数与累积分布函数曲线进行计算,结果如图4、图5所示。

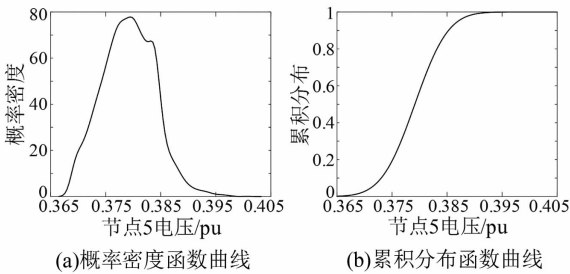


图4 节点5电压概率分布

由图4、图5可知,故障后电压、电流具有波动性,节点5电压范围为0.364~0.397 pu,支路4-5

短路电流范围为4.29~4.55 pu。此电压电流的概率分布表示在考虑风机出力呈威布尔分布、光伏出力呈 Beta 分布时,该网络发生故障后,电压电流所出现的范围区间,不同数值出现的概率不同。可见在计及风电、光伏出力随机性时,城市电网故障潮流也具有概率特性。

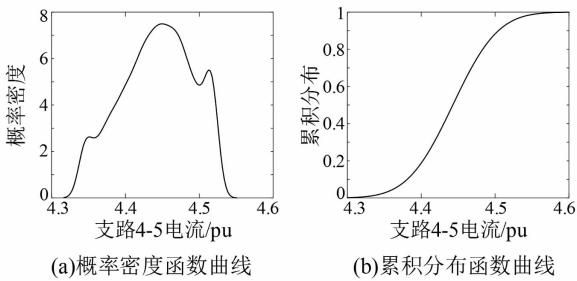


图5 支路4-5短路电流概率分布情况

同时在图3所示电网中,设风电机组和光伏机组出力分别为550 kW、65 kW,利用 Matlab/Simulink 对故障网络进行仿真分析,以一相为例得到节点5电压和支路4-5电流的有效值,如表1所示。

表1 仿真结果

参数	节点4电压/(pu)	支路4-5电流/(pu)
有效值	0.383	4.43
允许范围	0.364~0.397	4.29~4.55

节点4电压与支路4-5短路电流幅值有效值分别为0.383 pu、4.43 pu,满足在计及出力随机性后故障电压电流的范围内,证明该方法可得含分布式电源的城市电网故障后电压电流的波动区间,即该故障分析方法考虑了分布式电源出力的概率特性,而不仅以固定出力值参与计算分析,符合实际情况,可对保护整定值的设置等提供一定的参考。

4 结 语

在考虑分布式电源出力的概率特性基础上,提出了一种基于蒙特卡洛法的含分布式电源的城市电网故障分析方法。通过理论分析与仿真验证,得出如下结论:

- 1) 在含逆变型分布式电源的故障计算模型中,逆变型分布式电源提供的故障电流与其有功参考值有关,可将该有功参考值看做服从出力分布进行故障分析计算。
- 2) 所提方法考虑了分布式电源出力的随机特性在故障分析中的影响,不以单一基准点为例,可得

故障电压与短路电流的概率分布,同时该方法利用抽样计算,具有普遍性,对故障特性分析以及保护装置整定值的配置具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):184-192.

[2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.

[3] 吴争荣,王钢,李海锋,等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):92-96.

[4] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.

[5] Camacho A, Castilla M, Miret J, et al. Active and Reactive Power Strategies with Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters during Unbalanced Grid Faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1515-1525.

[6] 洪树斌,范春菊,陈实,等. PQ控制策略下多逆变型电源的故障等值方法[J]. 电网技术,2018,42(4):1101-1109.

[7] 张林利,彭克,苏建军,等. 含逆变型分布式电源的配电网故障分析通用计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(7):75-80.

[8] 郭文明,牟龙华,刘爽,等. U/f控制微电源的故障控制策略和故障模型分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1125-1136.

[9] 曾德辉,潘国清,王钢,等. 含V/f控制DG的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2604-2611.

[10] Bracale A, Caramia P, Fazio A R D, et al. Probabilistic

Short Circuit Analysis in Electric Power Distribution Systems Including Distributed Generation [C] //Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012), 8th Mediterranean Conference on. IET, 2012.

[11] Hetzer J, Yu D C. An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):603-611.

[12] Abouzahr I, Ramakumar R. An Approach to Assess the Performance of Utility - interactive Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2):145-153.

[13] 李桓,彭克,张新慧,等. 基于IIDG电流相位控制的配电网故障电流抑制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):180-186.

[14] 李文立. 含分布式电源配电网的故障特性分析与保护方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.

[15] 潘国清,曾德辉,王钢,等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):555-561.

[16] 陈光,戴攀,周浩,等. 计及入网电动汽车和分布式电源配电系统重构[J]. 电网技术,2013,37(1):82-88.

[17] 郑海峰. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[D]. 天津:天津大学,2006.

作者简介:

马子钦(1996),硕士研究生,研究方向为城市电网故障诊断;

廖凯(1989),博士,副教授,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

杨健维(1983),博士,副教授,研究方向为新能源电力系统保护与控制、城市电网安全预警、电动汽车并网。

(收稿日期:2020-02-24)

(上接第11页)

的发电负荷响应指标响应快速,跟随性良好,改进后的控制方案的综合性能优于常规控制方法。

参考文献

[1] 邱金鹏. 基于AHP-FCM的热电联产投资风险评估[J]. 四川电力技术,2019,42(2):91-94.

[2] 孙近文. 大中型风电场混合储能系统优化配置及先进控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[3] 王琪. 风电规模化并网条件下供热机组优化控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.

[4] 王岑娇. 热电联合系统统一能量管理模型研究[D]. 沈

阳:沈阳工业大学,2019.

[5] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.

[6] 荣爽. 促进供暖期风电消纳的多热源容量规划与协调调度策略[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

作者简介:

叶晨(1992),硕士研究生,主要研究领域为新能源发电与控制技术;

唐志东(1980),高级技师,主要研究领域为新能源发电与控制技术。

(收稿日期:2019-12-12)

采取电采暖方式消纳清洁能源的综合效能分析

姚锦松¹,常喜强^{1,2},于冰²,郭小龙²,徐吉智³,刘博文²
(1. 石河子大学机电学院,新疆 石河子 832003;
2. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 新疆大学电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:随着清洁能源大量广泛开发利用,受各种因素的影响,清洁能源弃电严重,特别是北方冬季采暖季节,受供热机组供热的约束,供热火电机组占用了清洁能源消纳的空间,采用电采暖方式一方面减少供热机组约束,扩大消纳清洁能源空间;另一方面也提高环境保护能力。但采用电采暖方式,属于二次能源再利用,存在多方面因素的效能评估。针对城市电网电采暖供电方式,开展了电采暖与燃煤(燃气)采暖的技术经济比较,对采用电采暖可行的几种方式也进行了分析,提出了采用电采暖方式需关注的方面,对电采暖的推广和提升城市清洁化水平提供借鉴意义。

关键词:电采暖;电能替代;清洁消纳;综合效能

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0017-04

Comprehensive Efficiency Analysis on Clean Energy Accommodation with Electric Heating

Yao Jinsong¹, Chang Xiqiang^{1,2}, Yu Bing², Guo Xiaolong², Xu Jizhi³, Liu Bowen²
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China;
3. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

Abstract:With the extensive development and utilization of clean energy and affected by various factors, clean energy has been abandoned seriously, especially in the winter heating season in the north. Restricted by the heating of co-generation units, the thermal units for heating supply occupy the space of clean energy accommodation. On the one hand, the electric heating method reduces the constraints of co-generation units and expands the space of clean energy accommodation, on the other hand, it is also environmentally friendly. However, there exists many factors of effectiveness evaluation in using electric heating which belongs to the secondary energy reuse. Aiming at the power supply mode of electric heating in urban power grid, the technical and economic comparison between electric heating and coal-fired (gas) heating is carried out, several feasible modes of electric heating are analyzed, and some aspects that need to be paid attention to in using electric heating are put forward, which can provide a reference for the promotion of electric heating and the improvement of urban cleaning level.

Key words:electric heating; electric energy replacement; clean energy accommodation; comprehensive efficiency

0 引言

北方冬季的供暖会造成环境污染和资源严重浪费,而清洁能源发电的消纳空间有限,弃电严重。特别是北方地区,如果将冬季采暖方式调整为电采暖,一方面可提高清洁能源利用,增大消纳空间,减少弃电比,保存煤炭、天然气资源;另一方面也可提高环

境保护能力,降低污染物排放,对提升空气质量起到重要作用。

针对现有的环境污染和不可再生能源枯竭以及电力资源浪费等问题,国内外研究学者开展了一系列研究。文献[1]通过建设费用和运行费用的计算,进行电采暖设备应用的经济性分析以及综合电价等经济性因素对比。文献[2-3]采用临界电价法判断高温固体蓄热电锅炉方案最佳,并利用储能

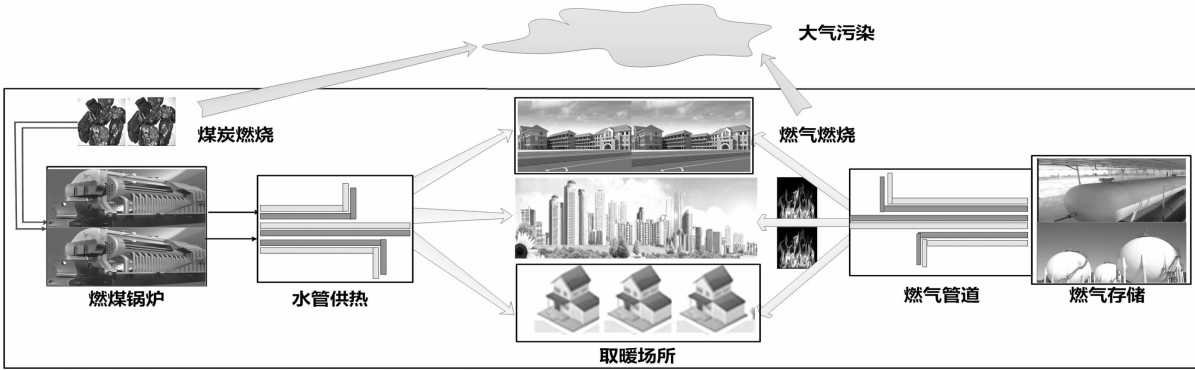


图1 燃煤、燃气供暖

技术达到“峰谷”电价杠杆降低运行成本的效果。文献[4]研究了采用蓄热式电采暖提高电网风电消纳规模的经济性评估问题。文献[5]建立分布式电采暖负荷模型并分析模型参数,从可行性与经济性两方面对该备用方式与现有备用方式进行对比。文献[6-7]研究了蓄热电锅炉使用电作为热源,尤其是在夜间利用廉价的低谷电进行加热蓄热,这种运行方式可对电网的供电起到一定的削峰填谷作用,有利于平衡用电负荷,缓解供电矛盾。对于弃风严重的“三北”地区,可以利用弃风转化为热能,充分发挥了电、热两系统互补的优势,促进了风电的消纳。文献[8]对集中采暖地区住宅建筑几种主要的采暖方式进行了经济性比较,提出了采暖方式的选择原则。

上述研究成果多侧重于单一变量研究,突出变量对电采暖方式的影响,或多变量经济性分析,缺乏“产-效-能”结合研究。同时缺乏对电采暖供电可靠性和城市附加成本的研究,下面以电采暖供电可靠性为基础,以能源二次转换、环保效益为出发点,对电采暖与燃煤、燃气采暖进行对比分析,提出了采用电采暖方式需关注的方面,对电采暖的推广和提升城市清洁化水平提供借鉴意义。

1 传统能源与清洁能源供热对比

1.1 传统能源供热

目前供暖系统主要采用的是燃煤和燃气,依靠相对完善的水暖管道和天然气管道进行供暖,普遍采用集中供暖的方式较多,集中供暖技术较为成熟,使用安全方便,可以全天候供暖,集中供暖主要是以城市热网、区域热网或较大规模的集中供暖为热源

的供暖方式,如图1所示。

传统的供暖方式为燃煤锅炉供暖,即采暖效率取决于锅炉效率,锅炉的效率是指将燃料燃烧后的热能转换给锅炉水使其加热变为蒸汽,或锅炉水吸收的热能占燃料燃烧的热能的百分比,效率公式如式(1)所示。

$$\eta_1 = \frac{c_1}{r_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中： η_1 为燃煤锅炉热效率； c_1 为燃煤锅炉输出热量； r_1 为燃煤锅炉输入热量。

能量转换形式为煤炭化石能源转换为热能,现代锅炉的热效率随着锅炉容量增大而上升,这里 η_1 取燃煤锅炉平均热效率 90%。

1.2 清洁能源供热

由于燃煤、燃气会造成环境污染和资源浪费,而电能作为二次能源,具有比煤、燃气等化石能源更方便高效、清洁安全的优势。城市电网既是电力系统的主要负荷中心,也是城市现代化建设的重要基础设施。电能生产过剩、清洁能源消纳难的问题也一直存在,所以依靠现代完备的城市电网体系,应用清洁可靠的电能,具备大规模实行电采暖方案的可行性,电采暖如图2所示。

若采用电加热锅炉,假设全部为火力发电,则先考虑将煤炭转换为电能,再将电能转换为热能,总热效率为

$$\eta_2 = \frac{c_2}{r_2 + q_2} \times 100\% \tag{2}$$

式中： η_2 为电锅炉热效率； c_2 为电锅炉输出热量； r_2 为电锅炉输入热量； q_2 为火电转换效率,一般为 40%~60%,取 50%。

对比 η_1 和 η_2 热效率,在锅炉输出热量等于输入热量时,显然 $\eta_1 > \eta_2$,即燃煤锅炉热效率大于电

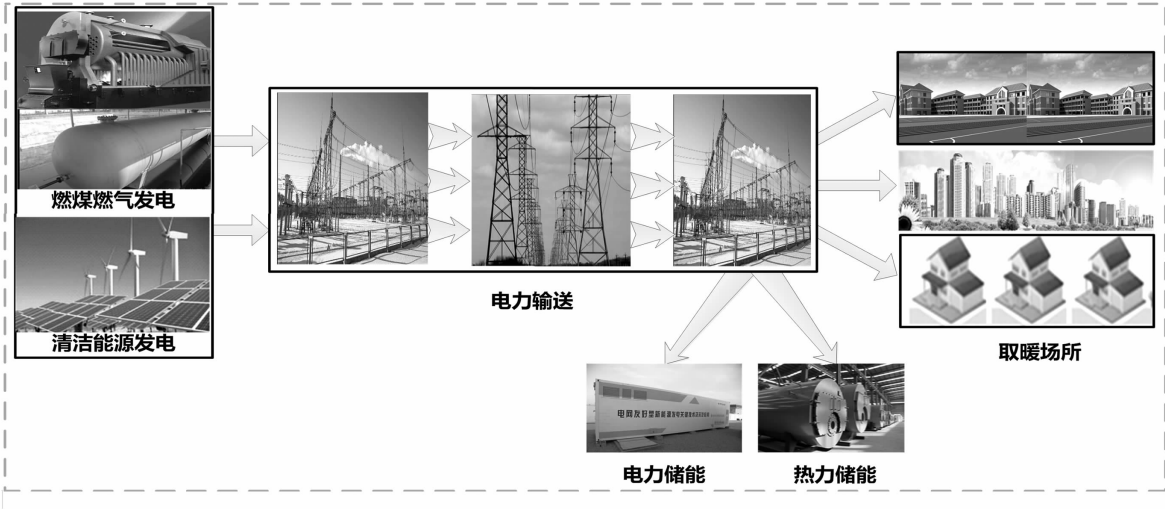


图2 清洁电能供暖

锅炉热效率。若输出热量和输入热量相等,即 $c_1 = c_2, r_1 = r_2, \eta_1$ 为90%时,将式(1)带入式(2)得 η_2 为60%,燃煤锅炉热效率远大于电锅炉热效率。综上所述,无论输入、输出热量是否相等,加上考虑能源转换损耗,即燃煤锅炉热效率总是大于电锅炉热效率。

电能替代政策的实施主要依赖于清洁能源的规模化利用,由于燃煤和燃气供暖的热效率要比转换为电能再进行供暖的效率要高一些,所以供暖成本相对较低,但是造成的环境成本却很高,资源浪费比较严重。而电能作为清洁可靠的二次能源,能够保证供暖可靠性,不会造成环境污染,提高清洁能源的消纳空间,有利于缓解能源、经济和环境间日益突出的矛盾问题。所以,适当采用电能进行供暖,提高电能取暖的比例,是未来取暖的发展趋势。

2 不同电采暖方式对比研究

2.1 电锅炉采暖

电锅炉装置按照其加热原理和使用功能分为直热式电锅炉和蓄热式电锅炉。直热式电锅炉^[9]主要由电脑控制系统、压力测试系统、电加热管、进水管和温度检测仪表等组成;蓄热式电锅炉是在电锅炉的基础上,加装蓄热装置,使其通过循环水泵、热交换系统构成蓄热式电锅炉。

蓄热式电锅炉一般在夜间低电价时运行,一方面可以帮助电网起到削峰填谷作用;另一方面有利于提高风电消纳、平衡电网负荷,缓解供电矛盾,如图3所示。

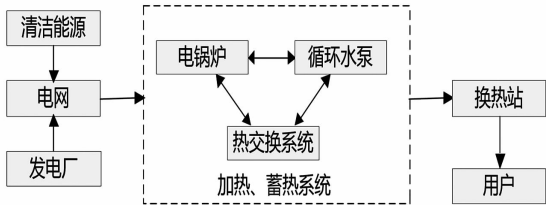


图3 蓄热式电锅炉系统

2.2 直接电采暖技术

目前较为成熟的直接电采暖技术分别为发热电缆和电热膜供暖系统。发热电缆^[10]埋设在填充层内,通电后将热能通过热传导(对流)的方式和发出8~13 μM 远红外线的辐射方式传给受热体,通过温控器根据室内温度进行自动调整;电热膜供暖系统^[11]采用一种通电后能发热的半透明聚脂薄膜,工作时以电热膜为发热体,将热量以辐射的形式送入空间,通过温控系统对温室内度进行自动调整。

2.3 电热泵

热泵是一种高效节能设备,利用压缩机做功,将低位热能转换为高位热能(吸收低温热源蕴藏的热量,并将其提升到高温热源中),1 kWh 电能产生约3倍热,即热效率为300%,它同时具备冬季采暖和夏季制冷的功能^[12-13]。

根据上述分析,可得热效率关系: $\eta_{\text{热泵}} > \eta_{\text{电缆}} = \eta_{\text{电热膜}} > \eta_{\text{蓄热}} > \eta_{\text{直热}}$ 。具体情况如表1所示。

3 综合分析

3.1 经济成本对比

传统取暖方式为燃煤、燃气直接供暖,省去燃煤

表 1 不同电采暖方式对比研究

大类	直热式电锅炉	蓄热式电锅炉	发热电缆	电热膜	电热泵
技术原理	通过电热丝加热水,起到能源转换作用	在直热式电锅炉的原理上,加装蓄热装置	由内芯、绝缘层、屏蔽层和外保护套等组成,通电加热	由可导电的石墨、金属载流条经加工、热压在绝缘聚脂薄膜间制成,通电加热	利用压缩机做功,将低位热能转换为高位热能
技术特点	加热效果明显	可用来调节电网“峰谷”电压	加热时间迅速	属于低温辐射方式采暖	冬季供热、夏季供冷,一机两用
热效率	65%	75%	99%	99%	200% ~ 300%
环境要求	较低	较低	较低	一般	较高
经济性能	经济性一般	经济性较高	经济性较高	经济性较高	经济性一般
其他缺点	从加热到输送至用户端,需要一定时间	一次投入成本较大,回报周期较长	铺设于地下,对于装修后的房子不适用	不适用于温度要求较高的建筑	低温环境下,能效下降,在寒冷地区可靠性差
应用场景	企业、机关、宾馆、学校	企业、机关、宾馆、学校	新建建筑,企业等用热需求间歇性建筑	罐体保温、管道伴热、温室大棚	管委会、工业园、大型酒店

发电的过程,减少能量损失,热效率大于电采暖方式,即 $\eta_{\text{煤}} > \eta_{\text{电}}$,且热力管网和燃气管道铺设工作已经基本覆盖城市网,与居民取暖或燃气做饭等生活息息相关。但考虑清洁能源并网采用集中蓄热电锅炉方式,直接利用现有相对完备的热力管网即可,无需新增铺设电缆、安装热泵等设备,使得电采暖成本大大降低,关系如图 4 所示。

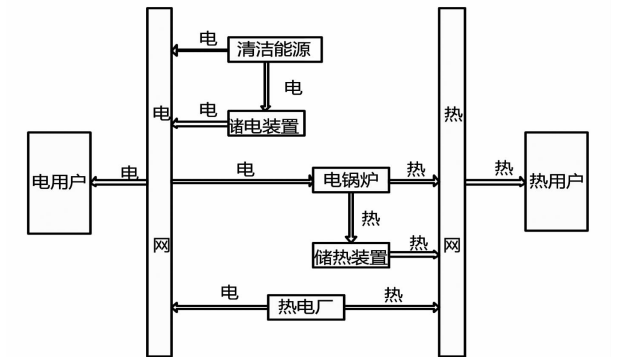


图 4 加入清洁能源时电网与热网关系

3.2 清洁能收益对比

若清洁能源作为冬季取暖主要方式,考虑减少弃光带来的经济效益,则大大填补了因热效率不足而导致取暖比例降低的缺点。在城市负荷低谷时段和弃电时段采用电采暖,有效利用新能源发电,减少弃电比,日负荷如图 5 所示。

现有数据表明,仅从能源转换角度考虑,燃煤锅炉热效率大于电锅炉热效率,但考虑加入清洁能源消纳弃风、弃光量,可以有效减少能源浪费,降低经济损失。2018 年新疆光伏发电量 11 660 GWh,风电发电量 36 026 GWh,但弃光量 1 807.3 GWh,弃风量

8 249.9 GWh,造成巨大经济损失。如若使用电采暖方式,将弃风、弃光电量合理应用到用电终端,可以有效提升清洁能源消纳空间。同时,若改造燃煤锅炉 1 204.1 t/h,预计年替代电量 6483 GWh,年节约标准煤 634.8 kt,年减排二氧化碳 1 650.4 kt,年减排二氧化硫 5.5 kt,年减排氮氧化物 4.4 kt,年减排粉尘 3.9 kt^[14]。可以看出,改造燃煤锅炉可有效降低大气污染,节约大量资源。

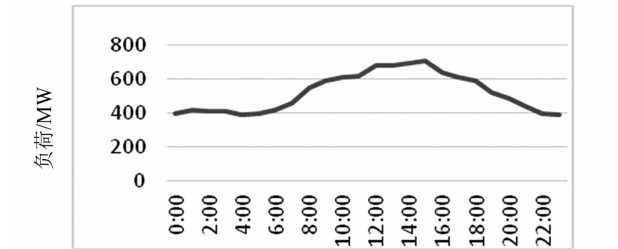


图 5 新疆某城市冬季日负荷曲线

4 结 语

通过研究得出电采暖发展可以缓解环境污染,提升新能源消纳空间,综合考虑设备投资、供热效率、供暖时间等因素,得出以下结论:1)宜煤择煤。在热力管网已经建成且改造电采暖成本较高区域,如老旧小区、城市边缘地区等继续采用清洁燃煤方式供暖,但后续应该逐步减少燃煤供热推广电采暖方式。2)宜气择气。在燃气管道铺设完善区域,考虑燃气的便捷性能、经济性以及居民取暖、做饭等生

(下转第 73 页)

一种新型的 MMC 直流故障保护三电平子模块拓扑

常 非,赵 金
(国网西安供电公司,陕西 西安 710032)

摘 要:MMC 的直流短路故障保护直接关系到其在柔性直流输电和直流电网领域的应用。提出一种无需任何附加保护功率器件的具备直流故障清除能力的三电平子模块拓扑。该拓扑利用子模块电容电压来关断续流二极管,从而快速地清除直流短路电流。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该子模块拓扑的直流故障保护能力。
关键词:模块化多电平换流器;直流故障;子模块拓扑;故障清除
中图分类号:TM77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0021-03

A New Three – level Sub – module Topology of MMC with DC Fault Protection Capability

Chang Fei, Zhao Jin
(State Grid Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, Shanxi, China)

Abstract:The DC short – circuit fault protection of modular multilevel converter(MMC)is directly related to its application to the field of flexible DC transmission and DC power grid. A three – level sub – module topology of MMC without any additional protective power devices is proposed, which uses the sub – module capacitor voltage to close the intermittent flow diode so as to quickly remove the DC short – circuit current. Finally, the DC fault protection capability of the proposed sub – module topology is verified by PSCAD/EMTDC simulation.
Key words:modular multilevel converter(MMC); DC fault; sub – module topology; fault clearance

0 引 言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)模块化程度高,无需器件直接串联;器件损耗低,其开关频率在 100 ~ 300 Hz 之间;波形接近正弦,无需滤波装置^[1]。因而 MMC 在柔性直流输电和直流电网领域得到了广泛的应用。

常规基于半桥式子模块(half bridge sub – module, HBSM)的 MMC 在直流线路发生短路故障时无法采用闭锁换流器的方式来限制短路电流,不具有直流故障保护能力。而基于全桥式子模块的 MMC 拓扑^[2-3]虽具有直流故障清除能力,但其经济性差,成本为常规 MMC 的 2 倍^[4]。文献[5-7]中提出的基于箝位双子模块的 MMC 拓扑^[5-7]降低了换流器成本,为常规 MMC 的 1.31 倍^[4],但增加了附加的

IGBT 和二极管。

下面提出一种具备直流故障清除能力的三电平子模块拓扑(enhanced NPC sub – module, E – NPC SM),其无需任何附加的保护功率器件,并且能够在 5 ms 以内实现直流短路电流的快速清除。

1 具备直流故障自清除能力的三电平子模块

1.1 三电平子模块拓扑结构

基于 HBSM 的常规 MMC 由于二极管续流效应,无法通过换流器闭锁的方式清除直流短路故障电流。为此,提出了一种具备直流故障自清除能力的三电平子模块拓扑,如图 1 所示。图中 E – NPC SM 与传统 3L – NPC 拓扑不同的是,子模块的负极直接与箝位二极管的中点相连。另外,E – NPC SM IGBT 额定电压与传统 3L – NPC 拓扑相同,均为 $u_c/2$ 。

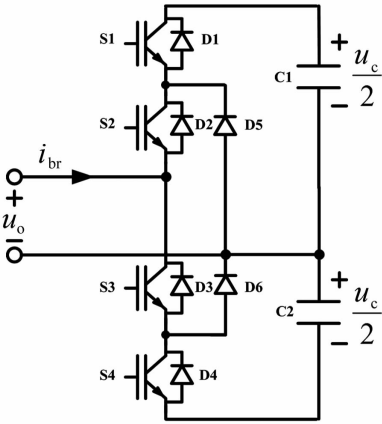


图 1 E-NPC SM 的结构

E-NPC SM 的开关状态和输出电压关系如表 1 所示。

表 1 E-NPC SM 开关状态和输出电压关系
(1: 开通, 0: 关断)

换流器的状态	S1	S2	S3	S4	u_o
投入	1	1	0	0	$\frac{u_c}{2}$
状态	0	0	1	1	$-\frac{u_c}{2}$
切除状态	0	1	1	0	0
闭锁状态	0	0	0	0	$\frac{u_c}{2}$ 或 $-\frac{u_c}{2}$

1.2 直流故障清除原理

直流短路故障时应立即闭锁换流器,此时故障电流向子模块充电,迫使二极管反向截止,从而使短路电流快速衰减到 0。故障清除过程中,基于 E-NPC SM 的 MMC 电流通路如图 2 所示。下面给出其解析分析。

当桥臂电流 $i_{br} < 0$ 时,在换流器闭锁后,如图 2(a) 所示,子模块内部的电流通路由电容 C2 和 2 只二极管 D3、D4 构成。图 2(b) 为 MMC 内部的电流通路示意图。设直流线路电压为 U_{dc} ,每个桥臂包含子模块数目为 N ,则每个电流通路中都分别含有 $2N$ 个 D3、D4 和 C2 串联在电路中。根据 KVL 定律,可以得到

$$-u_{L-L}(t) = 2N \cdot [u_{D3}(t) + u_{D4}(t) + u_{C2}(t)] \tag{1}$$

式中: $u_{L-L}(t)$ 为交流系统线电压; $u_{C2}(t) = U_{dc}/2N$ 。2 只二极管 D3、D4 的电压可以表示为

$$u_{D3}(t) + u_{D4}(t) = \frac{-u_{L-L}(t) - U_{dc}}{2N} \tag{2}$$

显然可知

$$u_{D3}(t) + u_{D4}(t) < 0 \tag{3}$$

由式(3)可知,D3 和 D4 不可能同时导通,因而

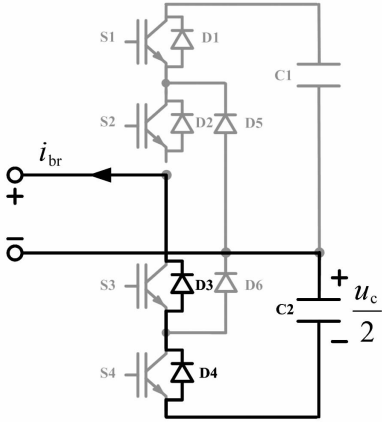
能够阻断故障电流通路,实现故障电流的自清除。

类似地,当桥臂电流 $i_{br} > 0$ 时,在换流器闭锁后,如图 2(c) 所示,子模块内部的电流通路由 2 只二极管 D1、D2 和电容 C1 构成。图 2(d) 为 MMC 内部的电流通路示意图,每个电流通路中都分别含有 $2N$ 个 D1、D2 和 C1 串联在电路中,根据 KVL 定律满足

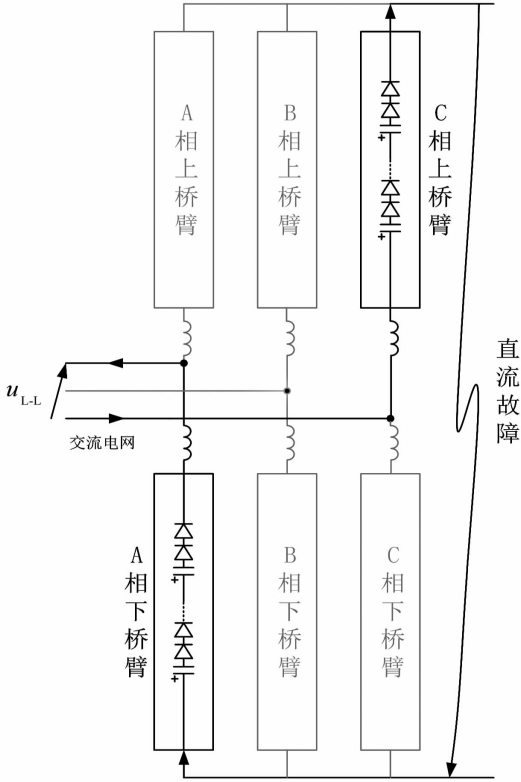
$$u_{L-L}(t) = 2N \cdot [u_{D1}(t) + u_{D2}(t) + u_{C1}(t)] \tag{4}$$

并且电容电压满足 $u_{C1}(t) = U_{dc}/2N$,则 2 只二极管 D1、D2 的电压可表示为

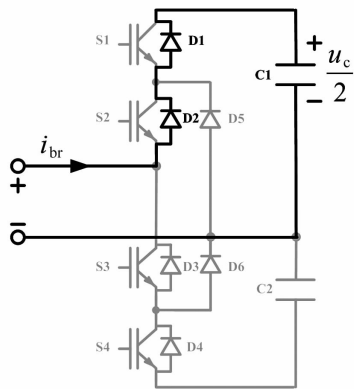
$$u_{D1}(t) + u_{D2}(t) = \frac{u_{L-L}(t) - U_{dc}}{2N} \tag{5}$$



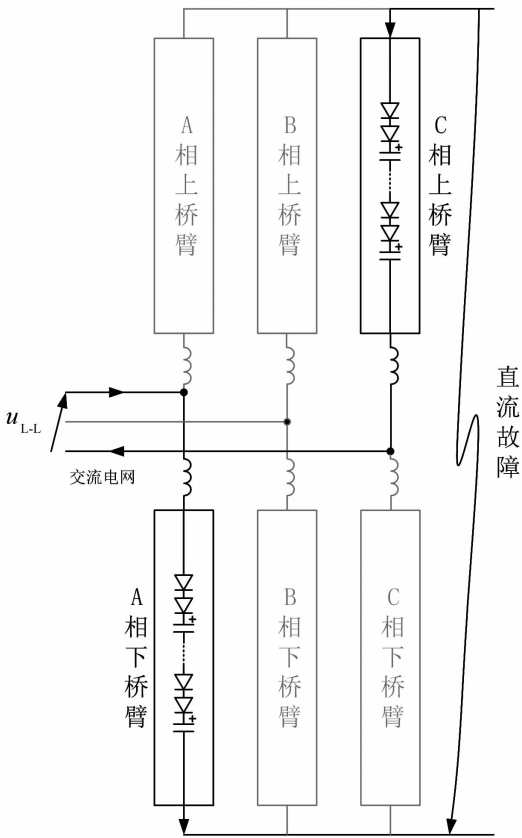
(a) $i_{br} < 0$ 时,子模块的电流通路



(b) $i_{br} < 0$ 时,MMC 的电流通路



(c) $i_{br} > 0$ 时,子模块的电流通路



(d) $i_{br} > 0$ 时,MMC 的电流通路

图 2 故障清除过程中,基于 E - NPC SM 的 MMC 的电流通路

根据调制原则,交流系统线电压的峰值 U_{L-L} 小于 $\sqrt{3}U_{dc}/2$, 因此得到

$$u_{D1}(t) + u_{D2}(t) < 0 \tag{6}$$

同理,式(6)中 D1 和 D2 也不可能同时导通,故同样能够实现故障电流的快速自清除。

综上所述,基于 E - NPC SM 的 MMC 拓扑能够在直流短路故障发生时通过换流器的闭锁来实现直流短路电流的快速清除。

2 仿真分析

为了验证所提出的 MMC 拓扑的正确性和有效性,建立了 750 MVA/ ± 160 kV 的单端 MMC 仿真系统。其中,子模块内部电压平衡通过外部电阻均压电路来解决,子模块间电压的平衡采用传统的 PI 控制。

系统在 2 s 时发生瞬时性直流双极短路故障,故障持续时间 0.01 s;设定 $t = 2.005$ s 时换流器闭锁, $t = 2.1$ s 时,换流器解锁,系统恢复。仿真波形如图 3 至图 5 所示。

如图 3 所示,直流故障的瞬间短路电流急剧增加,待换流器闭锁后直流短路故障电流能够在 5 ms 以内降为 0,完全能够满足实际工程要求。如图 4 所示,故障发生后直流电压迅速下降,待换流器闭锁后,直流电压降为 0,直流电压在换流器解锁后重新建立。图 5 为系统有功传输,故障闭锁后功率传输降为 0,正常解锁后功率传输恢复正常。

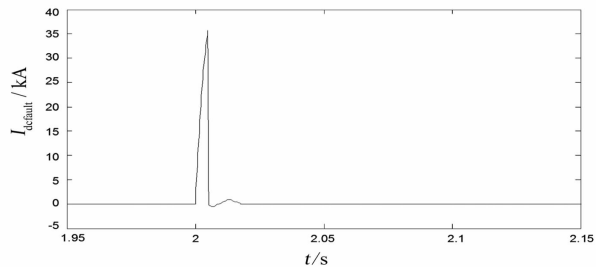


图 3 直流短路故障电流

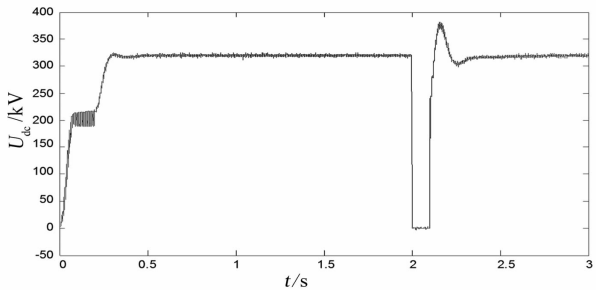


图 4 直流电压

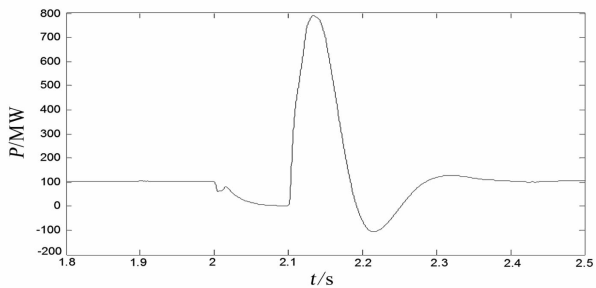


图 5 系统有功传输

(下转第 90 页)

用户供电质量需求识别与优质供电增值服务策略

马智远, 莫文雄, 许 中, 周 凯
(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420)

摘 要:优质供电的增值服务是电力公司提高售电竞争力的一项重要途径。优质供电是一个定性概念,采用供电质量指标进行定量刻画时,不同用户对优质供电的需求差异很大,供电企业不可能对每个用户提供完全不同的供电,基于对优质供电的需求类别,提供增值服务是更可行的方式。首先,研究用户对优质供电的多样性需求和供电公司的服务愿望,提出电能质量分类指标体系,包括用户价值指标和电能质量效用指标,刻画用户的电能质量需求;其次,基于所提的指标体系和各指标重要程度,建立用户供电质量需求类别识别模型,采用定性定量相结合的方式,对用户供电质量类别进行划分,并设计了优质供电差异化增值服务套餐;最后,提出增值服务套餐成本-收益模型,实现对单个用户的增值服务内容的确定和增值服务价格的计算。实例分析证明了所提方法的合理性和有效性,为售电企业吸引新用户、开展差异化增值服务提供了参考。

关键词:电能质量;优质供电;供电质量;类别识别;增值服务;套餐设计

中图分类号:TM 714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0024-09

User Power Supply Quality Demand Identification and Strategy for Value-added Service of Premium Power Supply

Ma Zhiyuan, Mo Wenxiong, Xu Zhong, Zhou Kai
(Electric Power Research Institute of Guangzhou Electric Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract:The value-added service of premium power supply is an important way for power companies to improve the competitiveness of power selling. Premium power supply is a qualitative concept. When quality index of power supply is used for quantitative description, the demand of different users for premium power supply is very different, and it is impossible for power supply enterprises to provide completely different power supply for each user. Therefore, it is a more feasible way to provide value-added services based on the demand categories of premium power supply. Firstly, the diversity demand of users for premium power supply and the service desire of power supply companies are studied, and the classification index system of power quality is put forward, including customer value index and power quality utility index, which depicts the power quality demand of customers. Secondly, based on the proposed index system and the importance of each index, a power supply quality demand category identification model for users is established with the combination of qualitative and quantitative methods to classify the user power supply quality categories, and a differentiated value-added service package for premium power supply is designed. Finally, the cost-benefit model of value-added service package is proposed to determine the value-added service content and calculate the value-added service price of a single customer. The case analysis proves the rationality and effectiveness of the proposed method, which provides a reference for power selling enterprises to attract new users and carry out differentiated value-added services.

Key words:power quality; premium power supply; quality of power supply; category identification; value-added service; service package design

0 引 言

供电质量问题已经成为用户投诉和抱怨的主要

基金项目:南方电网科技项目(基于多功能变流装置的优质供电技术研究与示范应用 080037KK52160006)

原因^[1]。以不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)、有源滤波器(active power filter, APF)、动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)等为代表的定制电力(custom power)技术已较为成熟^[2]。供电企业通过优化配置定制电力技术方案,

为用户提供差异化优质供电增值服务,并由此创造利益增长点,已成为当前售电市场的热点问题。研究供用电双方均满意的低成本优质电力增值服务策略,具有重要理论价值和现实意义。

针对优质供电增值服务,国内外已开展大量探索,但用户优质供电需求分类识别和增值服务的成本-效益问题,是当前尚未得到解决的两个关键性问题。

在用户分类识别方面,现有用户分类主要是围绕用电负荷特性、客户价值评价等开展研究,提出了模糊 k-means 聚类^[3]、模糊 c-means (FCM)^[4]、层次聚类(hierarchical clustering, HC)^[5]和自组织映射(self organizing map, SOM)^[6]等方法。针对用户供电电压等级、低谷用电率、用电负荷、功率因数、电耗占能耗比重、企业总资产、合同履约率等技术性和非技术指标已分别开展了研究^[7],并提出了当前价值、潜在价值和信用状况等电力用户分类指标。欧盟试图通过立法促使供电企业提供过去和现在的供电质量等信息,包括负荷曲线、地理位置、当前能耗、历史同期能耗、标准化平均供电水平等^[8]。利用这些信息提升用户节能和优质供电意识,激励用户采取措施^[9-10]。有学者对供电质量引起的用户用电风险开展了研究,把用电风险细分为运行风险、政策风险和管理风险等^[11]。遗憾的是,现有用户分类对用户所需优质供电需求定量刻画不足,难以解决实际问题。事实上,随着高科技产业的发展,各行业电力用户对供电质量要求越来越高且差异性越来越明显。文献[12]研究表明,供电质量已经给用户造成了严重的经济损失。文献[13]研究了谐波引起的损耗及其量化方法。可见,用户对优质供电的理解和需求差异性很大,用户优质供电需求分类和识别是解决优质供电问题的基础。

通过优质供电为用户提供增值服务,创造电力市场竞争条件下的供电企业新的效益增长点,必须解决不同增值服务策略下的优质供电成本-收益问题。针对不同优质供电需求,供电企业和用户均希望建立双方能接受的公平、公正、透明的有偿服务。供电企业不可能也不必为每个用户提供专门的供电服务。通过用户优质供电分类识别,按照不同类别用户提供增值服务套餐是降低优质供电成本,达到供用电双方均满意的有效路径。但是,采用优质供电套餐模式提供增值服务,同样存在差异性问题。以电压暂降敏感用户为例,用户设备类型、供电容

量、供电接入点等不同,均会影响所采用的 UPS、DVR 等定制电力技术方案的成本和收益。推行优质供电增值服务,急需一套同时考虑供用电双方利益的增值服务套餐设计方案和成本-收益计算方法。

下面以用户对优质供电的多样化需求为切入点,引入用户价值指标和多电能质量效用指标,提出一套用户优质供电需求分类指标体系,并基于熵权法提出一种用户优质供电需求分类方法。同时基于用户优质供电需求分类,提出用户优质供电增值服务套餐及其成本-收益量化方法,并进行实例分析证明所提方法的有效性和可行性。

1 电能质量需求分类指标体系

优质电力增值服务存在两个层面的问题,一方面是电力公司愿意售卖相关服务给用户,另一方面是用户愿意购买相应服务。电力公司为用户提供增值服务,会选择具有购买能力、信誉良好的用户,这里提出用户价值指标来刻画用户的综合素质。不同用户对不同的电能质量指标要求各异,但都可以量化为电能质量效用,以电能质量为用户带来的经济损失或收益增长来刻画用户的电能质量需求,这里提出电能质量效用指标来刻画用户电能质量需求。

基于客户价值理论^[8],将有关客户终身价值(customer lifetime value, CLV)的电力客户价值指标与有关用户优质供电需求的电能质量指标相结合,综合考虑售电公司与用户双方的不同需求,提出电力用户分类指标体系,如图 1 所示。

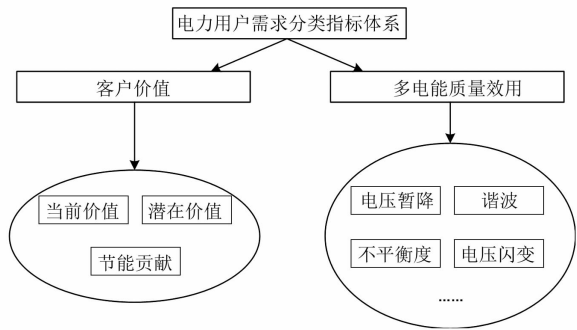


图 1 电力用户需求分类指标体系

1.1 客户价值指标

客户价值是指从企业角度看,客户能够带给企业的价值。通常使用客户为企业带来收益的货币贡献来定义客户价值,这种意义下的客户价值称为客户终身价值,即企业从客户的整个生命周期内获得

现金流的净现值^[8]。对现有客户来说,传统客户终生价值可分成 2 个部分^[14]:一是当前价值,即如果客户保持使用现在向电网公司购买的服务并持续购入,将来能够给电网公司提供的价值;二是潜在价值,即如果电网公司通过有效的交叉销售、调动客户增量购买积极性或客户向别人推荐产品和服务等,未来可能增加的客户价值。然而,随着能源可持续发展战略的提出,电网公司进行客户价值评估时不仅要考虑货币贡献,还需考虑非货币贡献,即用户的节能环保效益和持续发展潜力^[15]。

1.1.1 当前价值

用户当前价值主要体现在收入贡献、服务成本、信用等级等方面。收入贡献是度量用户当前价值的最基本标准,由用电量和平均电价共同决定。这里重新定义加权平均资本成本(weighted average cost of capital, WACC)以计算用户未来能为电网公司带来的收入贡献的期望净现值^[16]。

$$WACC = \sum_{t=1}^T \frac{(S_t - C_t)}{(1 + d)^t} \tag{1}$$

式中: S_t 为 t 时段内用户购电量与购电电价乘积,即用户向电网公司缴纳的购电费用; C_t 为电网公司买电费用; d 为折现率; t 为时间单元(如月/季度/年); T 为时间单元总数,即预期的客户生命周期。

服务成本是售电公司在不同用户服务上的不同投入,可由电压等级、用电负荷率、低谷用电率、峰谷负荷差共同表征。电压等级可以体现电力用户的用电规模,对高电压等级的用户,电网公司需提供的运营成本越低,这标志着电网公司供电变压费用的降低,从而增加了电网公司可获得的利润。用电负荷率指用户本期的平均负荷与其历史最大负荷的比值,可以反映用户用电情况和负荷分布特征。低谷用电率指客户在低谷时段的用电量占该月总用电量的比例,可以缓解高峰时段用电压力,降低电网公司运行成本。峰谷负荷差可以表征用户是否需要改变用电模式与需求响应。

$$LR = \frac{L_{\text{now-ave}}}{L_{\text{history-max}}} \tag{2}$$

$$LVECR = \frac{Q_v}{Q_{\text{total}}} \tag{3}$$

$$HL = \frac{Q_p}{Q_v} \tag{4}$$

式中: $L_{\text{now-ave}}$ 为用户本期平均负荷; $L_{\text{history-max}}$ 为用户历史最大负荷; Q_v 为用户本期低谷时段累计用电

量; Q_p 为峰时段累计用电量; Q_{total} 为用户本期总用电量。

信用等级使用拖欠率(delinquency rate, Dr)进行评估,表示拖欠和应收账款的比例^[17]。越新的拖欠率越能反映客户的可信度,Dr 越高,用户风险等级就越高,可信度就越低。在此使用最近 3 个月、半年、一年和历史同期的加权拖欠率累计,Dr 的计算如式(5)所示。

$$Dr = \frac{1}{4}(r_1 \times Dr_3 + r_2 \times Dr_6 + r_3 \times Dr_{12} + \zeta_4 \times Dr_{\text{history}}) \tag{5}$$

$$\zeta_i = \frac{2^{4-i}}{\sum_{k=0}^3 2^k}$$

式中: Dr_3 是最近 3 个月的拖欠率; Dr_6 是最近半年的拖欠率; Dr_{12} 是最近一年的拖欠率; Dr_{history} 是历史同期拖欠率。

1.1.2 潜在价值

用户潜在价值是指用户持续生产和盈利的能力。对于电力公司而言,为用户进行优质供电的服务,需要投入大量定制电力设备,如果购买优质电力服务的用户不能持续生产和盈利,就可能会出现用户拖欠优质电力服务费用的情况。电力公司不仅会损失有偿优质电力服务的服务费用,还会损失购置、运输、安装、拆卸电能质量补偿设备的大量成本。相较于普通欠缴电费的情况,电力公司可以直接选择停电的方式止损;但是,优质电力服务需要电力公司大量的前期投入,如果出现欠费或用户违背合同约定期限,要求停止服务的情况,电力公司损失巨大。所以,评价用户持续生产和盈利,选择潜在价值大的客户,是电力公司选择客户时非常重要的指标。

采用历史同期用电增长率和历史同期电费增长率刻画用户潜在价值指标,具体公式如式(6)、式(7)。

$$HGREC1 = \frac{Q_{\text{now}} - Q_{\text{before}}}{Q_{\text{before}}} \tag{6}$$

$$HGREC2 = \frac{P_{\text{now}} - P_{\text{before}}}{P_{\text{before}}} \tag{7}$$

式中: Q_{now} 为本期用电量; Q_{before} 为历史同期用电量; P_{now} 为本期产生电费; P_{before} 为历史同期产生电费。

1.1.3 节能贡献

节能贡献是指用户通过采取推行合同能源管理机制、更新设备、改进生产工艺流程、开展节能管理活动等一系列举措,从而提高电能利用效率,减少能源损耗为供电企业带来的社会收益,属于非货币贡献。具体指标可选择功率因数、电能消费强度下降

率、是否推行合同能源管理项目、是否设立节能管理部门、是否具有持续发展潜力。前两点为数值型指标,后两点为二元(布尔)型指标。

$$PCIRr = \frac{Q_n^{per} - Q_b^{per}}{Q_b^{per}} \times 100\% \tag{8}$$

式中: Q_n^{per} 表示统计期内用户单位产值的用电量; Q_b^{per} 表示上一统计期内单位产值用电量。

1.2 电能质量效用指标

效用是用户对售电公司某种商品或服务的需求偏好程度^[18],一般由用户感知获得,可作为用户价值评价、购买决策的依据。通常情况下,由于敏感用户发生电能质量扰动会产生大量损失,因此该类用户对售电公司的要求不只包括可靠供电与合理电价,对电能质量与优质供电的需求反而更强烈,因此,其对优质供电增值服务套餐是有偏好的。为了衡量用户对差异化增值服务套餐的偏好程度,可以引入多电能质量效用概念,统一刻画电力用户的多样化优质电力需求。

1.2.1 考虑多种电能质量问题的效用指标

根据效用理论(utility theory),用户的多电能质量效用可定义为:用户使用的优质供电增值服务套餐能满足其电压暂降、谐波、三相不平衡等电能质量需求的程度,是对用户电能质量需求是否得到满足以及满足度的一种心理评价。用户对多电能质量效用的实际感知会受到用户主观想法的影响^[19]。此外,多电能质量效用还会受到优质供电增值服务套餐的竞争力、市场占有率等不确定或不可测因素的影响,因此,多电能质量效用包括可量化和不可量化两部分,如式(9)所示。

$$V = U + \varepsilon \tag{9}$$

式中: V 为多电能质量效用; U 为其可量化部分; ε 为不可量化部分。

根据学者 Kahneman 和 Tversky 提出的前景理论(prospect theory)^[20]和累积前景理论(cumulative prospect theory)^[21],用户关心优质供电增值服务套餐带来的用电效用,同时,由于用户存在损失厌恶心理,其在效用方面更重视损失而不是同等的收益。因此,式(9)中的 U 可写为

$$U = v(x) = \begin{cases} x^\alpha & x > 0 \\ -\lambda (-x)^\alpha & x < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中: $v(x)$ 为优质供电增值服务套餐带来的用户感知效用; x 为电能质量经济损失指标(power quality

economic loss index, PQELI); α 为反映用户风险规避心理的系数,取值为 $0 < \alpha < 1$; λ 为反映损失厌恶的系数,取值为 $\lambda > 1$,具体取值可调查统计或专家经验确定。

式(10)中 x 以欧盟莱昂纳多电能质量工作组(LPQI)2007 年的电能质量损失调查结果为依据,以多电能质量扰动现象对用户造成的年经济损失为指标,包括电压暂降与暂升、短时中断、长时中断、谐波、三相电压不平衡、电压波动与闪变等,如图 2(a)所示, x 的取值如式(11)所示。

$$x_t = S_t + C_t \tag{11}$$

式中: x_t 为是一段时间(一年)内用户因电能质量造成的经济损失; S_t 为设备成本,即保护装置在同一段时间内的投资成本; C_t 为与该段时间 t 内相关电压事件导致的工艺过程中断相关的直接成本,可计算为

$$C_t = c \cdot n \tag{12}$$

式中: c 为单次中断的平均成本,包括人工成本、废品损失、停工损失、生产利润损失、重启动成本、其他成本、节约成本; n 为 t 时间段内的中断次数。

用户多电能质量感知效用 $v(x)$ 受风险规避心理影响,同时由于用户感知损失 x 表示为负值,可用凸函数表示^[21],如图 2(b)所示。

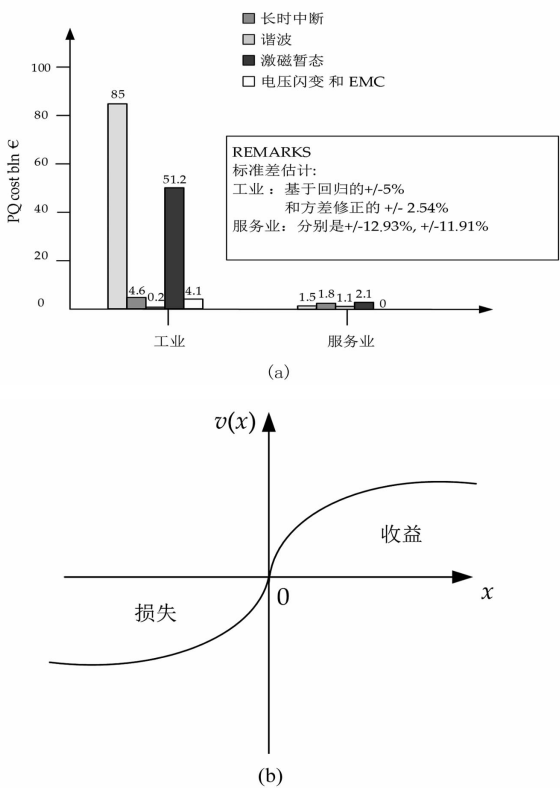


图 2 用户多电能质量效用函数

1.2.2 电能质量效用指标评估

根据式(10)至式(12),用户多电能质量效用评估方法为:

- 1)以 LPQI 电能质量损失调查方法及其得到的非居民用电电能质量损失数据为依据,统计实测电能质量事件,通常以年周期进行统计;
- 2)根据式(11)与式(12)确定用户所经受电能质量扰动事件造成的经济损失,得电能质量经济损失指标 x ;
- 3)根据式(10)确定用户多电能质量感知效用 U 。

2 用户电能质量需求分类

在建立电力用户分类指标体系后,需要对电力用户指标数据进行预处理和分类,并对不同指标的权重进行确定,从而得到用户最终分值,建立电力用户等级划分模型。

2.1 数据归一化处理

由于用户的各类指标数据具有较大的差异性,在比较不同用户的指标特征时,数值的大小会影响相似度计算。为了缩小和统一量纲,更明显地体现用户终身价值及电能质量特性差异,需要进行数据归一化处理。

评价指标通常包括效益型和成本型两种,效益型指标是指属性值越高对评价结果越好的指标,成本型指标是指属性值越低对评价结果越好的指标。可按式(13)、式(14)将属性指标转化为规范型指标。

$$g_i = \frac{g_i^o - g_{\min}^o}{g_{\max}^o - g_{\min}^o} \tag{13}$$

$$l_j = \frac{l_{\max}^o - l_j^o}{l_{\max}^o - l_{\min}^o} \tag{14}$$

式中: g_i 和 l_j 分别为归一化处理后的效益型指标和成本型指标; g_i^o 和 l_j^o 分别为归一化处理前的效益型指标和成本型指标; $g_{\max}^o$ 和 $g_{\min}^o$ 为归一化处理前效益型指标的最大值与最小值; $l_{\max}^o$ 和 $l_{\min}^o$ 为归一化处理前成本型指标的最大值与最小值。

除了节能贡献指标中的是否推行合同能源管理项目、是否设立节能管理部门与持续发展潜力指标,其余都为效益型和成本型指标。对这类非数值型指标,可以采用附加值的形式。

$$z = \pm \frac{1}{n} \tag{15}$$

式中: z 为非数值型指标可附加的值,“是”时为“+”,“否”时为“-”; n 为总指数数。

2.2 指标权重确定

指标权重计算使用熵权法,计算步骤如下^[22]:

- 1)计算特征比重;
- 2)计算熵值;
- 3)计算差异性系数;
- 4)确定权重。

2.3 用户电能质量需求分级

在确定指标权重后,根据电力用户分类指标体系和分类结果,由于综合指标分值处于[0,1]之间,因此可将电力用户划分为3个等级,分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级电力用户,建立电力用户等级划分模型,如表1所示。

表 1 用户电能质量需求等级划分

等级	综合指标分值
Ⅰ级	(0.6,1]
Ⅱ级	(0.3,0.6]
Ⅲ级	[0,0.3]

针对各级优质供电的需求,具体分析如下:

1)Ⅰ级——需求非常强烈

Ⅰ级电力用户具有极高的经济价值和社会影响力,用电量与可信度较高,具有较高的节能贡献与持续发展潜力,对电能质量极其敏感,发生轻微电能质量问题将造成重大损失,如造成重要设备损坏或大量产品报废,恢复生产需要较长时间。这种级别的用户主要包括在社会、政治、经济生活中占有重要地位,中断供电可能造成人身伤亡、重大环境巧染、重大政治影响、重大经济损失、社会公共秩序严重混乱以及对供电可靠性有特殊要求的重要用电客户与重点关注客户等,例如高端制造业、信息技术产业、政府机关、医疗中心等。

2)Ⅱ级——需求强烈

Ⅱ级电力用户具有较高的经济价值和社会影响力,用电量与可信度中等,具有一定的节能贡献与持续发展潜力,对电能质量敏感,发生电能质量问题将造成较大损失,或将影响重要用电单位的正常工作以及造成人员集中的公共场所秩序混乱。

3)Ⅲ级——无强烈需求

Ⅲ级电力用户具有较低的经济价值和社会影响力,用电量与可信度较低,节能贡献与持续发展潜力

较低,遭受电压暂降等电能质量扰动现象后造成的经济损失较低。这种级别的用户要求各种电能质量指标满足国家标准即可,只有在发生持续断电或电压波动幅度过大,持续时间较长才会受到影响。除了Ⅰ、Ⅱ级用户以外的电力用户均为Ⅲ级电力用户。

3 优质电力增值服务套餐设计

3.1 增值服务套餐内容设计

优质供电增值服务是售电侧改革下售电公司竞争的必然结果^[23]。对不同级别的电力用户,售电公司可提供的差异化增值服务套餐中应包含信息服务、网络交易服务、预测诊断服务、治理方案服务、节能服务、需求侧管理服务^[24]。其中,信息服务与网络交易服务应为用户可无偿享受的基础增值服务,具体内容如下:

1) 信息服务:为用户提供用电安全知识普及服务、行业资讯与用电信息发布服务、停电信息发布服务;及时通知停电信息,确保通知到位。

2) 网络交易服务:提供网络商店服务、网络支付服务,用户可根据自身需求直接在网上缴纳电费或购买相应优质供电差异化服务。

3.1.1 Ⅰ级电力用户增值服务套餐

1) 预测诊断服务:针对Ⅰ级用户对电能质量极其敏感的特点,提供用户所在配电网的系统元件故障与电能质量状态的监测、预测诊断等服务。

2) 治理方案服务:针对Ⅰ级用户易因电能质量问题造成重大损失的特点,采集并分析用户的设备运行参数、电能质量免疫力等信息,基于电能质量监测,对用户设备实际耐受水平与供电质量等级之间的兼容水平进行评估,为用户提供最佳用电设备咨询服务,同时为用户提供治理方案设计与定制电力设备配置服务,如在关键敏感设备侧安装 APF、DSTATCOM 和 DVR 等设备,增配备用电源与不间断电源(UPS)等储能设备,以使敏感设备免受电压暂降、短时中断、谐波等电能质量扰动的影响。另一方面,提供设备维护指导服务,为大型电力用户提供内部配电网络的更新、改造等业务。

3) 节能服务:售电公司根据业务范围,加强节能技术研发,优先提供节能改造、节能项目咨询、新技术新设备应用等服务,为用户提供合同能源管理服务。对于多能源供能的用户,售电公司还可为其

提供综合低碳能源解决方案。

4) 需求侧管理服务:为用户提供能效提升服务。例如,结合现行电价政策和节能重点,电力企业可以每年定期或不定期地进行电力需求侧技术培训,以引导用户提升能效管理水平,帮助用户实现削峰填谷并调节负荷特性,减少设备所需能耗与电费。

3.1.2 Ⅱ级电力用户增值服务套餐

1) 预测诊断服务(同 3.1.1)。

2) 治理方案服务(同 3.1.1)。

3) 节能服务(同 3.1.1)。

3.1.3 Ⅲ级电力用户增值服务套餐

1) 治理方案服务:采集并分析用户的设备运行参数、电能质量免疫力等信息,对用户设备实际耐受水平与供电质量等级之间的兼容水平进行评估,并为用户提供优质供电服务购买咨询服务、定制电力设备维护或更换服务。

2) 节能服务:为用户提供节能电器设备供应服务、分布式电源设备销售服务、使用培训及维修咨询服务,例如可以为农村及偏远山区用户销售风力照明灯、屋顶发电等分布式电源设备。

3.2 增值服务套餐成本-收益模型

3.2.1 成本模型

1) 投资建设费用

投资建设费用为套餐内各项服务的投资之和,各项服务投资费用包括设备投资、技术投资等费用。投资建设费用的模型为

$$I = \sum_{i=1}^n C_i, i = 1, 2, \cdots, n \tag{20}$$

式中: I 为优质供电差异化套餐投资费用; C_i 为套餐内第 i 项增值服务的投资费用; n 为套餐内所包含服务数目。

对Ⅰ级和Ⅱ级用户来说,投资建设费用为

$$I = \rho_{\text{mon}} S_1 + \sum_i^m \rho_i S_{2i} + F \tag{21}$$

对Ⅲ级用户来说,投资建设费用为

$$I = \sum_i^m \rho_i S_{2i} + \rho_d S_3 \tag{22}$$

式中: ρ_{mon} 为用户需安装的监测设备单价; ρ_i 为电能质量治理设备单价,元/kVA; S_1 为监测设备容量; S_{2i} 为电能质量治理设备容量; F 为节能服务合同年支付费用。

2) 运行维护费用

运行维护费用主要包括设备和线路的运行成

本、检修费用、人工维护费用等。具体模型为

$$M = IR_m \tag{23}$$

式中： M 为优质供电差异化套餐的年运行维护费用； R_m 为优质供电差异化套餐的年运行维护率。

3.2.2 收益模型

目前进行的电力体制改革中,售电公司还没有真正的建立起增值服务盈利机制,其提供的增值服务还无法与购售电合同分开,按不同比例分别收取增值税。因此增值服务套餐成本及其为售电公司带来的价值主要表现为用户购电电价的增加。无增值服务时,用户购电电价由上网电价、输配电价和售电公司利润组成;加入增值服务后,用户购电电价由上网电价、输配电价、政府性基金及电费附加、售电公司利润和增值服务费用构成。其中,输配电价和政府性基金及电费附加是“不变成本”,售电公司利润是上网电价下调从发电侧得到的利润。

无增值服务时,电力用户购电电价计算公式为

$$p_{u0} = p_g + p_l + p_v = p_g + p_l + k_l \Delta p \tag{24}$$

式中： p_g 为上网电价； p_l 为输配电价； p_v 为反映售电公司利润的电价,认为其与售电公司交易的发电侧降价 Δp 成比例, k_l 为比例系数。

有增值服务时,不同等级电力用户购电电价计算公式分别为

$$\begin{aligned} p_u^{I,II} &= p_{u0} + p_{va}^{I,II} \\ &= p_{u0} + \frac{\alpha \varphi_{mon}^{I,II} S_1 + \alpha \sum_i^m \rho_i^{I,II} S_{2i} + NF + NM^{I,II}}{NQ} \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} p_u^{III} &= p_{u0} + p_{va}^{III} \\ &= p_{u0} + \frac{\alpha \sum_i^m \rho_i^{III} S_{2i} + \alpha \varphi_{mon}^{III} S_3 + NM^{III}}{NQ} \end{aligned} \tag{26}$$

式中： $p_{va}^{I,II}$ 和 p_{va}^{III} 分别为 I、II 和 III 由于增值服务套餐而增加的用电成本； N 为所签订增值服务套餐合同的年限； Q 为用户年均交易成交电量； α 为套餐合同有效期内售电公司的设备投资成本回收率。

4 案例分析

4.1 用户数据构造及分类结果

通过走访中国南部某省的多家电力用户,其中 6 家用户能提供较详细的信息,用以验证所提方法。对 6 位用户的各项指标数据,进行归一化处理,均值如表 2 所示。

表 2 各指标分布平均值

指标	平均值
WACC/(10 ⁶ 元)	11.57
PLR	0.75
LVECR	0.25
HL	1.5
Dr	0.65
HGREC1	0
HGREC2	0
功率因数	0.9
PCIRr	0
PQELI/(10 ⁶ 元)	50

这里所用的电力用户分类指标为终身价值和电能质量效用,采用熵权法对指标权重进行两次计算,得到用户的客户价值与综合分值,如表 3 所示。 α 和 λ 分别取 0.88 和 2.25^[20-21]。

表 3 电力用户综合分值

用户	A	B	C	D	E	F
评分	0.430 9	0.179 4	0.996 8	0.021 3	0.050 7	0.100 4

因此,根据第 2 节中给出的不同类别电力用户对应分值,可以判定 C 用户属于 I 级电力用户,A 用户属于 II 级电力用户,B、D、E、F 用户属于 III 级电力用户,并可为之配备对应优质供电差异化套餐。

4.2 增值服务套餐收益分析

应用所提分类方法,对国内某晶圆制造厂^[25]进行分类,判定其为 I 类用户。根据 3.1.1 节为该用户设计增值服务套餐并进行收益分析^[26]。已知该用户有 6 台电能质量监测设备安装于高压进线,已有电能质量治理设备为 UPS,年治理成本为 478.7 万元;某年因电压暂降造成的经济损失为 2 464.3 万元,治理后经济损失减少 346.2 万元。负载容量为 40 000 kVA,年均用电量为 200 GWh。

该用户原有 UPS 治理方案无法覆盖全部用电负荷。使用所推荐的增值服务套餐后,在原有治理方案基础上加装大容量 DVR 进行集中治理。目前 DVR 单价约为 0.18 万元/kVA,加装容量为 20 000 kVA,年运维成本按设备购置成本的 5% 考虑, k_l 取 50%, α 取 70%。利用式(24)、式(25),对用户与售电公司所签订合同的用电电价与合同年限之间关系进行分析,如图 3 所示。

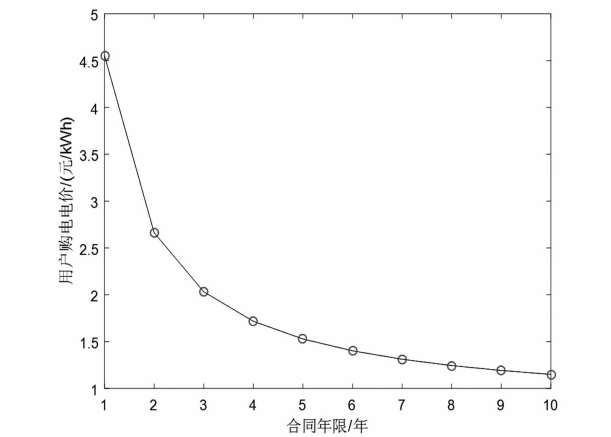


图 3 用户购电电价与合同年限关系曲线

由图 3 可以看出,随着合同年限不断增加,用户的购电电价呈现下降趋势,同时购电电价的下降速度越来越缓慢。这是因为电价公式中售电电价与合同年限成反比例关系,并且合同年限越长,DVR 治理方案的投资回收期越长,售电公司的年均投资回收金额就越低。对图 3 进一步分析可以得到,合同年限大于等于 6 年时,电价下降速度变得较为缓慢,因此综合考虑售电公司与用户的需求后,可以选择 6 年为用户所签订合同年限,如表 4 所示。

表 4 增值服务套餐设计

增值服务套餐设计	电价/(元/kWh)
无增值服务	0.682 0
有增值服务	1.402 0

假设 DVR 均能可靠动作且补偿能力为 50% 额定电压,根据某年电压暂降监测数据,有一次暂降处于 DVR 补偿范围之外,可得出用户使用套餐后年经济损失为 22.5 万元,比无增值服务套餐情况下减少了 2 441.8 万元。因此,对无增值服务套餐和有增值服务套餐情况下用户年经济支出进行分析,如表 5 所示,可以得出有增值服务套餐情况下,用户每年所支付的电费虽然增加了 1440 万元,但遭受电压暂降所造成的经济损失却大大降低,使得用户年总经济支出与无增值服务套餐情况相比降低了 26.17%。因此所设计的增值服务套餐可以给用户带来更好的经济效益,也可以明显改善其电能质量。同时,对售电公司来说,增值服务套餐可以为自身带来收益,也可以增强自身优势降低电能质量扰动对客户造成的经济损失,吸引并留住客户。

表 5 不同套餐下用户年经济支出

增值服务套餐	年支付电费 /万元	年经济损失 /万元	年经济支出 /万元
无增值服务	1364	2 464.3	3 828.3
有增值服务	2804	22.5	2 826.5

5 结 语

面向电力市场激烈竞争的现状,前面以优质供电为切入点,提出了用户供电质量需求识别及优质供电增值服务策略。并基于中国南方某省的用户数据验证所提方法,得到以下结论:

- 1)考虑客户当前价值、潜在价值和节能贡献,提出客户价值指标,为电力公司选择优质供电服务对象提出量化指标;提出电能质量效用指标来刻画因电能质量导致的经济损失,描述用户对使用优质电力的愿望。
- 2)基于熵权法,提出一种用户优质供电需求分类方法。根据所提方法,把用户需求分为 I、II、III 类,提出每类需求的主要增值服务内容。
- 3)针对用户的优质供电需求的个体差异,提出用户优质供电增值服务套餐及其成本-收益量化方法,并进行实例分析,结果证明了所提方法的有效性和可行性。
- 4)所提方法可促进电力公司优质供电的服务进程。以优质供电差异化增值服务套餐的方式推广有偿优质供电服务,可为电力公司降低差异化增值服务成本,同时对售电公司掌握竞争优势、实现稳固发展有重要意义。

参考文献

[1] 徐培栋,肖先勇,汪颖. 考虑母线电压时变区间特性的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):66-72.

[2] 宋琪,文福拴,王维洲,等. 智能电网社会效益测评的压力-状态-响应模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):23-32.

[3] Tsekouras, G. J., Hatzigiargyriou, N. D., Dialynas E. N. Two-stage Pattern Recognition of Load Curves for Classification of Electricity Customers [J]. Power System, 2007,22:11-28.

[4] Stephen, B., Mutanen, A. J., Galloway S., et al. Enhanced load Profiling For residential Network Customers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29:88-96.

- [5] Chicco G., Napoli R., Piglion F. Comparisons among Clustering Techniques for Electricity Customer Classification[J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21: 933 – 940.
- [6] Marques D. Z., de Almeida K. A., de Deus A. M., et al. A Comparative Analysis of Neural and Fuzzy Cluster Techniques Applied to the Characterization of Electric Load in Substations[C]. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956), Sao Paulo, Brazil, 2004: 908 – 913.
- [7] Wang J., Wang, C., Wang, Z. The Study of Power Customer Classification Based on Principal Component Analysis and Improved Back Propagation Neural Network[C]. IEEE. 2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Tianjin, China, 2009: 1 – 5.
- [8] Bohari, A. M., Rainis R., Marimuthu M. Customer Lifetime Value Model in Perspective of Firm and Customer: Practical Issues and Limitation on Prospecting Profitable Customers of Hypermarket Business[J]. International Journal of Business and Management, 2011, 6: 161 – 169.
- [9] Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council on Energy End – use Efficiency and Energy Services and Repealing Council Directive 93/76/EEC. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 2006.
- [10] Iyer M., Kempton W., Payne C. Comparison Groups on Bills: Automated, Personalized Energy Information[J]. Energy Build, 2006, 38: 88 – 96.
- [11] Li Z., Wang, M., Ma X., et al. High Risk Management Model for the Power Enterprise Based on Rough Set Theory[J]. Systems Engineering Procedia, 2012, 3: 63 – 68.
- [12] Targosz R., Manson J. Pan European LPQI Power Quality Survey[C]. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007: 0263.
- [13] Wang J., Yang Z., Lin F., et al. Harmonic Loss Analysis of the Traction Transformer of High – speed Trains Considering Pantograph – OCS Electrical Contact properties[J]. Energies, 2013, 6: 5826 – 5846.
- [14] Hiziroglu A., Sengul S. Investigating Two Customer Lifetime Value Models From Segmentation Perspective [J]. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2012, 62: 766 – 774.
- [15] Rasanen, T., Ruuskanen, J., Kolehmainen M. Reducing Energy Consumption by Using Self – organizing Maps to Create More Personalized Electricity Use Information [J]. Applied Energy, 2008: 85, 830 – 840.
- [16] Cermák, P. Customer Profitability Analysis and Customer Life Time Value Models: Portfolio Analysis[C]. 16th Annual Conference on Finance and Accounting, ACFA Prague, 2015.
- [17] Song L., Zhan W., Qian S., et al. Customer Segmentation for Power Enterprise Based on Enhanced – FCM Algorithm[C]. ADMA 2012: Advanced Data Mining and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2012: 127 – 137.
- [18] Haslett D. W. What is Utility[J]. Economics and Philosophy, 1990, 6: 65 – 94.
- [19] Ropo J. P., Bleichrodt, H. Does Loss Aversion Exist? Experimental Evidence From Small Stakes Decisions Under Risk and Uncertainty[D]. Netherlands Erasmus School of Economics, Erasmus Universiteit Rotterdam, 2014.
- [20] Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1979, 47: 263 – 292.
- [21] Tversky A., Kahneman, D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5: 297 – 323.
- [22] Nie H., Yu T. Comprehensive Evaluation for Transmission Network Planning Scheme Based on Entropy Weight Method and VIKOR Method [C]. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, China, 2011: 278 – 281.
- [23] 唐猛. 售电公司客户风险等级评估方法研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 73 – 78.
- [24] Wang L., Liu Z., Liu S., et al. Research on Business Model and Value – added Services of Electric Power Substitution[C]. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2017.
- [25] Mu Q., Re J., Ga Y., et al. Design of Power Supply Service Plan for Electric Company Considering Harmonic Management[C]. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, OR, USA, 2018: 1 – 7.
- [26] 电能质量经济性评估 第1部分: 电力用户的经济性评估方法: GB/Z 32880.1 – 2016 [S], 2016.

作者简介:

马智远(1987), 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量;

莫文雄(1971), 教授级高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量技术;

许 中(1986), 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

周 凯(1993), 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与用电技术监督。

(收稿日期: 2019 – 11 – 25)

基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法

李小鹏¹,戴文睿²,林 圣²,李世龙¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:输电线路是高压直流输电系统中故障率最高的元件。针对现有输电线路行波保护耐过渡电阻能力差,存在难以识别区内高阻故障和远端区外金属性故障的问题,提出了一种高压直流输电线路单端保护方法。基于高压直流输电系统拓扑,分析了高压直流输电线路区内和区外故障电流的特征,从而利用小波变换提取高频分量电流构建保护方法。仿真结果表明,该方法不受过渡电阻、故障距离影响,保护可靠性高。

关键词:高压直流;输电线路;单端保护;高频分量;小波变换

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0033-03

Single – ended Protection Method for HVDC Transmission Line Based on High Frequency Component

Li Xiaopeng¹, Dai Wenrui², Lin Sheng², Li Shilong¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Transmission line has the highest failure rate in HVDC system. In view of the poor performance to transition resistance of the existing traveling wave protection of transmission line, it is difficult to identify the high resistance internal fault and the low resistance external fault, a single – ended protection method for HVDC transmission line is proposed. Based on the topology of HVDC transmission system, the characteristics of internal and external fault current are analyzed, the high frequency component current is extracted by wavelet transform, and the protection method is constructed. The simulation results show that the proposed method has high protection reliability, and cannot be affected by the transition resistance and fault distance.

Key words: HVDC; transmission line; single – ended protection; high frequency component; wavelet transform

0 引 言

中国一次能源与电力负荷的逆向分布特性决定了高压输电将在中国电网结构中占据日益重要的地位。相比于高压交流输电,高压直流输电传输距离远、传输功率大、经济效益好,使其在远距离输电中脱颖而出^[1]。目前,中国电网共建成并投运高压直流输电工程 20 多个,形成大规模“西电东送”“北电南送”的能源配置格局。到 2020 年,跨区、跨国电网输送容量将达到 410 GW,西北地区到东部的输送距离达 2000 ~ 3000 km 以上^[2]。

由于输电距离远、输电线路长且周围环境恶劣,

容易出现区内短路等故障。根据现场运行经验,区内线路故障约占直流输电系统全部故障的 50%,而区内线路故障发生后由线路保护正确动作、断开故障线路的只有 50%。另一半的区内线路故障是由直流控制系统响应动作,但直流闭锁、关闭整个输电系统的送端,引起不必要的系统停运会造成巨大的设备损耗和经济损失^[3]。

理想的直流输电线路保护对位于线路两侧电流测点之间的线路区内故障进行动作,而对测点之外的区外故障应当不动作而由控制系统响应动作^[4]。中国高压直流输电线路配置了行波保护,行波保护以故障后线路出口侧电流中的行波波头电压、电流

变化量和变化率为判据,进行线路故障检测,当计算值超过整定值,输出保护动作信号^[3]。实际工程运行经验表明,现有行波保护方法存在一定缺陷:1)行波保护无法动作于线路远端过渡电阻大于100 Ω的区内高阻接地故障;2)行波保护会对线路远端区外非高阻接地故障尤其是金属性接地故障误动。其拒动和误动的原因如下:当发生区内远端高阻接地故障时,由于过渡电阻大且故障距离远,使行波保护计算采用的电参量(行波波头电压、电流变化量和变化率)在时域上的变化量显著减小,以致无法满足主动作判据,不能进行保护动作;而发生区外金属性接地故障时,由于过渡电阻极小,会使行波保护计算值满足保护动作判据,发生区内保护误动。因此,行波保护无法正确区分线路远端区内的高阻接地故障和远端区外的金属性接地故障,其可靠性低^[5-6]。

下面基于高压直流输电系统拓扑结构,分析了高压直流输电线路区内和区外故障电流的特征,在此基础上利用小波变换提取特定频段电流,构建保护方法。仿真结果表明,该方法不受过渡电阻、故障距离影响,保护可靠性高。

1 故障特征分析

1.1 直流输电系统结构

现有高压直流输电系统整流侧结构如图1所示。

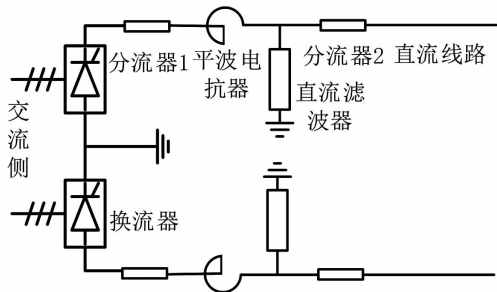


图1 直流输电系统整流侧结构

由图1可知,在平波电抗器和直流滤波器两侧分别安装有分流器1和分流器2,两分流器测得电流分别记作 i_a 、 i_b 。

1.2 线路区内外故障特征分析

输电线路故障电流蕴含着丰富的暂态信息,不

同故障位置尤其是区内、外故障受直流线路两侧电抗器和滤波器的影响,传输到测点处的暂态信息区别很大。相比于传统行波保护只利用线路故障电流的时域特征进行故障识别,所提方法采用滤波前后两个故障电流来识别区内外故障,且提取其中最能反应区内故障的暂态信息,其准确性更高。

当故障未发生时,线路处于正常运行工况下,此时,直流滤波器对其两侧的12 k 次基波电流($k=1, 2, 3\cdots$,基波频率50 Hz)有过滤作用,这几个频点仅全频段很小一部分,滤波器对其余电流分量影响很小。故线路正常工作时,电流 i_b 、 i_a 的特定频段差较小,只体现了滤波器两侧电流的自然差异。

1) 区内故障特征分析

当线路区内发生接地故障时,故障点产生的大量暂态高频信号迅速传输到分流器2,因此线路侧电流信号 i_b 所含高频分量丰富;而经过滤波器传输到整流侧后, i_a 的高频分量大大衰减,计算所得特定频段差远远大于系统正常工作及区外接地故障。因此,计算出的两电流信号在所选频段差值很大,能进行可靠的保护。

2) 区外故障特征分析

当线路末端区外发生接地故障时,故障点同样产生大量暂态信号,但由于暂态信号的传播经过逆变侧直流滤波器及整个线路,使 i_a 和 i_b 所含高频分量较之区内故障大大减少,而整流器侧电流 i_a 所含高频分量又在经过整流侧直流滤波器后衰减,故线路侧直流电流 i_b 所含高频分量仍多于整流器侧直流电流 i_a 所含高频分量,且所得特定频段差大于系统正常工作值,但又小于区内故障产生的特定频段差。因此,计算出的两电流信号在所选频段差较小,不会产生保护误动作。

根据以上特点,采取以下方法来构建高压直流线路保护方法。

2 保护方法

在1.2节中介绍了输电线路区内外故障下,分流器1和分流器2测得故障电流高频分量的含量差

异,利用小波分解提取两分流器电流的高频分量。

2.1 小波分解

设 $\varphi(t)$ 为平方可积函数,若其对应的傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足式 1),即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \tag{1}$$

则可将 $\varphi(t)$ 视为小波母函数。

将小波母函数 $\varphi(t)$ 进行如下的伸缩变换及平移变换,可得到在不同尺度下的小波基函数,即

$$\varphi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0, b \in \mathbf{R} \tag{2}$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

对于函数 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$,其连续小波变换为

$$W_f(b,a) = (f(t), \varphi_{a,b}(t))$$
$$= |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3}$$

将 $\varphi_{a,b}(t)$ 中的连续变量 a 和 b 离散化,此时 $\varphi_{a,b}(t)$ 表示为

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^j t - k) \tag{4}$$

式中, j 为小波分解的层数。

对应序列 $f(t)$ 的离散小波变换可表示为

$$W_f(j,k) = (f(t), \varphi_{j,k}(t)) \tag{5}$$

选用电力系统故障分析常用的 db4 小波作为小波母函数,设置数据窗长为 3 ms,采样频率为 100 kHz,分解层数为 5 层,分别对故障后电流 i_a 、 i_b 进行小波分解。具体分解频段如表 1 所示。

表 1 小波分解频段分布

分解层数	低频分量范围/Hz	高频分量范围/Hz
1	0 ~ 25 000	25 000 ~ 50 000
2	0 ~ 12 500	12 500 ~ 25 000
3	0 ~ 6250	6250 ~ 12 500
4	0 ~ 3125	3125 ~ 6250
5	0 ~ 1562	1562 ~ 3125

记故障后 3 ms 内电流 i_a 、 i_b 分别对应的第 3、第 4、第 5 层小波分解系数为 i_{a3} 、 i_{a4} 、 i_{a5} 及 i_{b3} 、 i_{b4} 、 i_{b5} 。

2.2 保护判据

基于上述计算后,可构造保护判据如式(6)。

$$D > D_{\text{set}}, D = B - A \tag{6}$$

式中: D 为高频分量电流信号差值; D_{set} 为保护动作值; B 为分流器 2 处的高频分量电流信号小波系数

和,其值等于对 3 个序列 i_{b3} 、 i_{b4} 和 i_{b5} 中的所有元素进行求和; A 为分流器 1 处的高频分量电流信号小波系数和,其值等于对 3 个序列 i_{a3} 、 i_{a4} 和 i_{a5} 中的所有元素进行求和。

若 D 大于保护动作值 D_{set} ,则判定线路区内存在故障,输出保护信号,线路保护动作;否则,判定线路区内不存在故障,不输出保护信号。

3 仿真分析

为验证所提方法对直流输电线路故障识别的准确性,采用 PSCAD/EMTDC 建立 ± 500 kV 高压直流输电系统仿真模型;设置不同距离、不同过渡电阻的区内故障和区外故障,来考察所提保护方法的性能。线路末端区内发生高阻接地故障时的保护动作情况如图 2 所示,线路末端区外发生金属性接地故障时的保护不动作情况如图 3 所示,更多故障情况下的保护动作情况如表 2 所示。

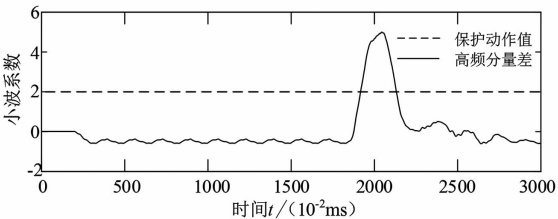


图 2 保护动作情况

由图 2 可知,区内线路远端高阻故障发生时,所提方法得到的高频分量电流信号差值 D 明显大于保护动作值,能快速识别并保护动作,表明所提方法对于区内的线路远端高阻故障识别能力强。

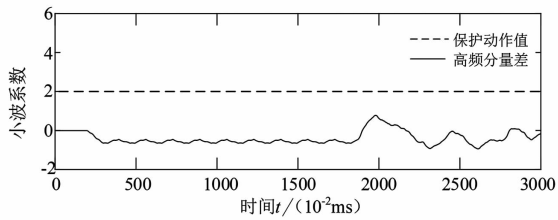


图 3 保护不动作情况

由图 3 可知,区外线路发生金属性(低阻)接地故障时,所提方法得到的高频分量电流信号差值 D 小于保护动作值,保护不会动作。

表 2 表明,对于过渡电阻为 100 Ω 、500 Ω ,故障距离在 1000 ~ 2500 km 的接地故障,行波保护无法正确动作,但所提方法保护均可准确、快速识别。同时,对区外故障,所提保护方法能够可靠不动作。

(下转第 47 页)

基于告警信息的保护跳闸识别方法研究

段翔兮¹,何锐²,李小鹏¹,冯世林¹,吴海瑕³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041;3. 西昌电力工程有限责任公司,四川 凉山 615000)

摘要:针对目前保护跳闸事件发生后主要依靠人工梳理告警信号来识别事件类型和漏发信号费时费力的问题,提出了构建保护跳闸序列比对模块。首先,构建了各类保护跳闸事件的标准序列模板;然后,设计了序列比对算法,实现了待匹配序列与标准序列模板的对比;最后,输出事件类型和漏发信号。通过算例证明了方法的有效性,同时进行了模块的设计与实现,通过实用化证明了该方法的准确性和快速性。

关键词:跳闸事件;序列比对;事件类型;漏发信号

中图分类号:TM93 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0036-05

Research on Protection Tripping Identification Method Based on Alarm Signal

Duan Xiangxi¹, He Rui², Li Xiaopeng¹, Feng Shilin¹, Wu Haixia³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Xichang Electric Power Engineering Co., Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: Nowadays, after the happening of protection tripping event, it mainly depends on the manual sorting of alarm signals to identify the event type and missed signals, which is resulting in the wasting of time and labour. In order to solve this problem, a comparison module of protection tripping sequence is proposed. First of all, the standard sequence models for various protection tripping events are constructed, and then, a sequence alignment algorithm is designed which realizes the comparison between the matching sequence and the standard sequence model. Finally, the event type and missed signals are output. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by numerical examples, meanwhile the modules are designed and implemented, and the accuracy and rapidity of the proposed method are proved by practical application.

Key words: tripping event; sequence alignment; event type; missed signal

0 引言

目前保护跳闸事件发生后,在调控主站主要依靠调控人员人工梳理告警信号来识别跳闸事件的类型和漏发信号等^[1-2]。特别是超高压输电线路送电距离长,经常跨越不同地形,易受风力、外力影响发生故障,发生故障后,依赖保护的准确快速动作来切除故障;保护能否正确动作直接影响着电网的安全可靠运行^[3-5]。在实际调控运行中,调控人员根据故障后保护跳闸序列中的保护动作信息和开关动作

信息判断故障情况和保护的動作情况。目前超高压线路普遍配置了双重化保护,在故障发生后,保护动作信息、开关动作信息和其他伴随信息将在短时间内频发至告警窗^[6-7]。面对短时间频发的诸多告警信息,调控人员单纯依靠人工识别,很难迅速识别出这些告警信息是否完全正确,也无法及时判断有无漏发信号,影响了对故障和保护动作情况的及时判断与处置^[8-10]。

目前国内外还没有基于告警信息对保护跳闸事件进行自动识别的方法。为解决调控人员人工识别保护跳闸序列中保护和开关动作信息费时费力、难

以迅速判断有无漏发信号的问题,提出对保护跳闸序列比对的方法,并对所提方法进行了模块化的设计与实现,建立了跳闸事件标准序列模板。基于序列比对算法,根据信号特征建立事件触发条件并进行序列比对,通过计算机进行了算法功能实现,经过实用化证明了所提方法的有效性和可靠性。

1 序列比对算法

序列比对算法是主要功能实现的关键,通过长期的系统运行经验和算法总结,形成了如图 1 所示的流程图。

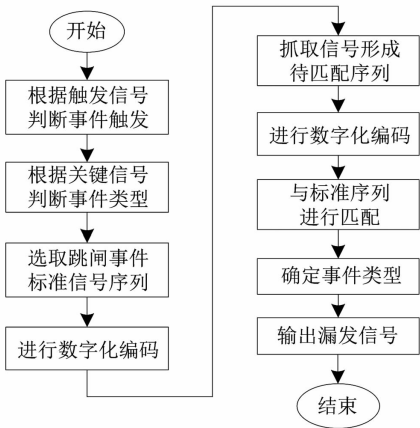


图 1 序列对比算法总体流程

首先,根据监控告警信号中的“间隔事故汇总”和“断路器事故分闸信号”作为触发条件判断跳闸事件的发生;然后,采集该信号前后各 2 min 内触发的所有告警信号,根据关键信号判断跳闸事件的类型,比如线路跳闸、主变压器跳闸、电容器跳闸等;再根据事件类型选取相应跳闸事件的标准信号序列,同时对标准信号序列和待匹配序列进行数字化编码;最后,将标准信号序列和待匹配序列进行匹配,确定事件类型,判断是否有漏发信号并输出结果。

2 保护跳闸事件

在所有跳闸事件中,发生最多的为线路保护的跳闸事件,因此,以高压交流线路保护跳闸为例,其跳闸逻辑见图 2 所示。

图 2 中,当事件触发后,根据跳闸后重合闸的动作情况,分别生成故障无重合闸、重合闸成功和重合

闸失败 3 种情况下的跳闸事件模板,并分别记为 M1、M2 和 M3;对模板 M1、M2 和 M3 中的保护和开关动作信息进行融合处理,生成总跳闸事件模板 MT,并对其中的保护和开关动作信息进行数字编码,生成数字集合 QT1、QT2、QT3 和 QT。

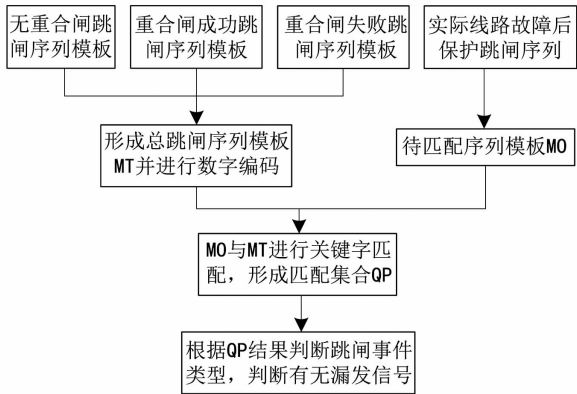


图 2 线路保护跳闸逻辑

收集实际线路保护跳闸时间前后各 2 min 内和该线路相关的保护和断路器动作信息,生成待匹配序列 MO。将待匹配序列 MO 中的信息依次与总模板 MT 中的信息进行关键字匹配,如果匹配上 MT 中的某条信息,则将该信息的数字编码记录下来,生成待匹配序列 MO 对应的匹配集合 QP。再根据匹配集合 QP 对跳闸事件类型进行识别,确定实际的跳闸事件类型。

根据实际的跳闸事件类型,将匹配集合 QP 与实际跳闸事件类型对应的数字集合进行比较,完成序列识别,判断有无漏发信号。

生成的故障无重合闸、重合闸成功和重合闸失败 3 种跳闸事件模板 M1、M2 和 M3 中,M1 包括无重合闸和断路器合闸信息,M2 包括重合闸或断路器合闸信息,M3 包括重合闸或断路器合闸信息或断路器分闸信息,且断路器分闸信息比合闸信息多 1 次。

上述步骤中,对模板 M1、M2 和 M3 中的保护和开关动作信息进行融合处理,生成总跳闸事件模板 MT,形成过程如下。

M1 中共有 a 条告警信息:

$$M1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \cdots, x_a\} \tag{1}$$

M2 中共有 b 条告警信息:

$$M2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \cdots, x_b\} \tag{2}$$

M3 中共有 c 条告警信息:

$$M3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, \cdots, x_c\}$$

(3)

则形成的总模板 MT 为

$$MT = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, \cdots, x_d\},$$

$$(d = \max\{a, b, c\})$$

(4)

对总模板 MT 中的保护和开关动作信息按照不同类型进行数字编码,编码过程如下。

M1 中共有 a 条告警信息:

$$QT1 = \{1, 2, 3, 4, 5, \cdots, a\}$$

(5)

M2 中共有 b 条告警信息:

$$QT2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, \cdots, b\}$$

(6)

M3 中共有 c 条告警信息:

$$QT3 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \cdots, c\}$$

(7)

MT 中有 d 条告警信息:

$$QT = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \cdots, d\},$$

$$(d = \max\{a, b, c\})$$

(8)

将待匹配序列 MO 中的信息依次与总模板 MT 中的信息进行关键字匹配,匹配过程如下。

MO 中包含的信息有:

$$MO = \{e, f, g, h, i\},$$

$$(0 < e < f < g < h < i < d)$$

(9)

式中, e, f, g, h, i 为匹配信息编码。

通过与 MT 匹配,形成的匹配集合:

$$QP = \{e, f, g, h, i\}$$

(10)

根据匹配集合 QP 对跳闸事件类型进行识别确认,识别过程如下:

1)QP 中没有重合闸和断路器合闸信息,判断事件类型为故障无重合闸;

2)有重合闸或有断路器合闸信息和断路器分闸信息,且断路器分闸信息比合闸信息多 1 次,判断事件类型为重合闸失败;

3)有重合闸或有断路器合闸信息和或断路器分闸信息,且断路器分闸信息的次数小于或等于合闸信息的次数,判断事件类型为重合闸成功。

3 算 例

以四川省内某条 220 kV 线路为例,该线路故障后,保护和断路器动作信息所形成的跳闸序列模板

分别如表 1 至表 3 所示,形成的模板分别为 M1、M2 和 M3。

表 1 220 kV 线路故障保护动作且无重合闸

序号	厂站	间隔	设备	主站信号	备注
1	A 站	线路	1 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}保护出口	
2	A 站	线路	1 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}A 相跳闸 {电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}B 相跳闸 {电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}C 相跳闸	故障相
3	A 站	线路	2 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}保护出口	
4	A 站	线路	2 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}A 相跳闸 {电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}B 相跳闸 {电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}C 相跳闸	故障相
5	A 站	线路	断路器	{断路器编号}A 相跳闸位置 {断路器编号}B 相跳闸位置 {断路器编号}C 相跳闸位置	

表 2 220 kV 线路故障保护动作且重合闸成功

序号	厂站	间隔	设备	主站信号	备注
1	A 站	线路	1 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}保护出口	
2	A 站	线路	2 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}保护出口	
3	A 站	线路	断路器	{断路器编号}A 相跳闸位置 {断路器编号}B 相跳闸位置 {断路器编号}C 相跳闸位置	故障相
4	A 站	线路	1 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}重合闸出口	
5	A 站	线路	2 号保护	{电压等级}{间隔编号} {设备编号}{型号}重合闸出口	
6	A 站	线路	断路器	{断路器编号}A 相合闸位置 {断路器编号}B 相合闸位置 {断路器编号}C 相合闸位置	故障相

对表 1 至表 3 中的保护和断路器动作信息进行融合处理,形成总跳闸事件模板 MT,并对每条信息进行数字编码,如表 4 所示。

表 3 220 kV 线路故障保护动作且重合闸失败序列					
序号	厂站	间隔	设备	主站信号	备注
1	A 站	线路	1 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 保护出口	
2	A 站	线路	2 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 保护出口	
3	A 站	线路	断路器	{断路器编号} A 相跳闸位置	故障相
				{断路器编号} B 相跳闸位置	
				{断路器编号} C 相跳闸位置	
4	A 站	线路	1 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 重合闸出口	
5	A 站	线路	2 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 重合闸出口	故障相
				{断路器编号} A 相合闸位置	
				{断路器编号} B 相合闸位置	
7	A 站	线路	断路器	{断路器编号} C 相合闸位置	故障相
				{断路器编号} A 相合闸位置	
				{断路器编号} B 相合闸位置	
7	A 站	线路	1 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 保护出口	后加速
8	A 站	线路	2 号保护	{电压等级} {间隔编号} {设备编号} {型号} 保护出口	后加速
				{断路器编号} A 相跳闸位置	
				{断路器编号} B 相跳闸位置	
9	A 站	线路	断路器	{断路器编号} C 相跳闸位置	三相
				{断路器编号} A 相跳闸位置	
				{断路器编号} B 相跳闸位置	

表 4 220 kV 线路保护跳闸标准序列	
总跳闸事件模板 MT 序列信息	数字编码
* 第一套. * 保护 * 出口. * 动作 *.	1
* 第二套. * 保护 * 出口. * 动作 *.	2
* 断路器. 分闸. *	3
* 第一套保护. * 重合闸. * 动作. *	4
* 第二套保护. * 重合闸. * 动作. *	5
* 断路器. 合闸. *	6

以某实际 220 kV 线路故障后的跳闸序列为例,形成待匹配序列 MO,如表 5 所示。

将待匹配序列 MO 中的信息依次与表 4 中总模板 MT 中的信息进行关键字匹配,如果匹配上 MT 中的某条信息,则将该信息的数字编码记录下来,形成待匹配序列 MO 对应的匹配集合 QP。QP 中有重合闸、断路器合闸和断路器分闸信息,且断路器分闸信息与合闸信息数量相等,判断事件类型为故障后重合闸成功。同时,跳闸事件齐全,未发现漏发信息。

表 5 某 220 kV 线路故障保护跳闸待匹配序列 MO	
1	“2017-07-08 18:39:37 220kV. * * 二线/第一套保护 WXH-803 保护出口 动作”
2	“2017-07-08 18:39:42 220 kV. * * 二线/第二套保护 RCS-902A 保护出口 动作”
3	“2017-07-08 18:39:42 220 kV. 269 断路器/间隔事故信号 复归”
4	“2017-07-08 18:39:42 269 断路器分闸”
5	“2017-07-08 18:39:42 全站事故总 复归”
6	“2017-07-08 18:39:42 269 断路器分闸”
7	“2017-07-08 18:39:42 220kV. * * 二线/第一套保护 WXH-803 重合闸出口 动作”
8	“2017-07-08 18:39:42 220 kV. * * 二线/第二套保护 RCS-902A 重合闸出口 动作”
9	“2017-07-08 18:39:42 公用信号/500 kV 2 号故障录波器录波启动 复归”
10	“2017-07-08 18:39:43 220 kV. 269 断路器关/保护三相不一致状态 复归”
11	“2017-07-08 18:39:43 220 kV. 269 断路器/保护三相不一致状态 动作”
12	“2017-07-08 18:39:43 269 断路器合闸”
13	“2017-07-08 18:39:43 220 kV. 269 断路器/储能电机运转 动作”
14	“2017-07-08 18:39:43 269 断路器合闸”
15	“2017-07-08 18:39:43 220 kV. 269 断路器/油压低合闸闭锁 告警
16	”2017-07-08 18:39:43 220 kV. 269 断路器/油压低合闸闭锁 复归”

将待匹配序列 MO 中的信息依次与表 4 中总模板 MT 中的信息进行关键字匹配,如果匹配上 MT 中的某条信息,则将该信息的数字编码记录下来,形成待匹配序列 MO 对应的匹配集合 QP。QP 中有重合闸、断路器合闸和断路器分闸信息,且断路器分闸信息与合闸信息数量相等,判断事件类型为故障后重合闸成功。同时,跳闸事件齐全,未发现漏发信息。

4 模块实现

基于国产的达梦数据库和 JAVA 编程语言进行模块的设计与实现。目前序列比对的主要逻辑部分使用变形的责任链模式实现。输入的告警数据将会在各模板类型的实例间逐个传递,直至有模板声明其能够处理此数据。在模板中,被确定为跳闸事件的信号序列会逐一通过正则表达式匹配的方式与模

板中的模板信号进行比对,得到序列比对的结果。同时,含有重合闸逻辑的模板也会通过索引数查询方式,在确定的跳闸事件信号序列集合中索引间隔 ID 相同的全部事故分闸信号与合闸信号,并作出重合闸情况判断。

在图 3、图 4 展示的序列比对结果中可以看到,序列比对结果详细地呈现出了当前跳闸事件原始信号序列与模板信号序列的比对情况。若当前跳闸事件有漏发信号,经过序列比对,可以清晰地看出漏发信号的内容以及在模板中的索引位置。并且,包含重合闸逻辑的跳闸事件(如线路跳闸事件)也会精准判断出跳闸后的重合闸情况。同时,该模块具备跳闸数据统计分析及日志导出功能,避免了调控人员人工记录的繁琐。



图 3 输出事件报告

时间	地区	变电站	线路或设备	开关	电压等级	事件类型	漏发信号
2020-01-05 06:04:31	A地	A变电站	AB线	265开关	220kV	线路跳闸-重合闸成功	第一套保护 A/B/C相跳闸, 第二套保护 A/B/C相跳闸
2020-01-05 07:08:51	B地	B变电站	BA线	265开关	220kV	线路跳闸-重合闸成功	第一套保护 A/B/C相跳闸, 第二套保护 A/B/C相跳闸

图 4 数据统计报告输出

由上述可知,该模块可以准确且快速地识别保护跳闸序列中的保护和断路器动作信息,迅速判断有无漏发信号,为及时处理故障提供支撑。

该方法及模块与现有技术相比,具有如下的优点及效益:

1)将人工识别跳闸序列转换为了自动识别,提高保护跳闸序列识别效率和准确性,及时发现有无

漏发信号,加快故障处理;

2)不需要增加新的设备,只需要增加一个跳闸序列识别模块即可,不影响调控人员监盘;

3)使调控人员识别保护跳闸序列中保护和断路器动作信息省时省力,更易迅速判断有无漏发信号的问题。

5 结 语

通过所提出的跳闸序列比对算法实现了保护跳闸自动判别,解决了目前调控人员人工识别保护跳闸事件中的保护和断路器动作信息费时费力、难以迅速判断有无漏发信号的问题,提高保护跳闸序列识别效率和准确性,加快故障处理。同时,进行了代码实现,设计并实现了跳闸序列比对模块,仅需在监控界面增加一个模块,将人工识别跳闸序列转换为自动识别,实用化效果良好。可推广至所有调控机构,潜力巨大。

参考文献

[1] 汪洋,张玉,李磊. 电网调度智能监控及防误技术研究[J]. 山东工业技术,2019(19):168.

[2] 李明翔. 电网调度智能监控与事故处理辅助决策[J]. 城市建设理论研究,2019(11):3.

[3] 林湘宁,刘畅,汪致洵,等. 基于动态权重修正 D-S 证据理论的最后断路器多判据保护跳闸策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(9):2609-2621.

[4] 蒋红亮,吕飞鹏. 基于图论的智能变电站战域后背保护跳闸策略[J]. 电气技术,2017(12):24-29.

[5] 肖燕. 新一代智能变电信息流架构设计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1245-1251.

[6] 牛晓玲. 基于大电网的智能调度控制系统的智能告警设计[J]. 微型电脑应用,2019,35(7):118-120.

[7] 肖艳炜. 基于大电网的智能调度控制系统智能告警设计研究[J]. 自动化与仪器仪表,2019(2):29-32.

[8] 林志贤. 基于调度智能指挥平台的电网信息监控方式研究[J]. 大众用电,2019(6):23-25.

[9] 于军,吴金祥,罗茂嘉,等. ABB 保护跳闸出口自保持继电器监视功能的实现[J]. 浙江电力,2012(12):24-27.

[10] 马静,裴迅,马伟,等. 基于方向权重的后域后备保护跳闸策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):107-112.

作者简介:

段翔兮(1991),博士研究生,助理工程师,主要研究领域为电力大数据和人工智能。

(收稿日期:2020-02-24)

水力发电厂 GIS 升压站雷电侵入波 阻碍电抗器研究

刘守豹¹, 侯俊宏², 方 圆¹, 李 欣¹, 杨 剑¹

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007;
2. 嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司, 四川 广元 628400)

摘 要:水力发电厂 GIS 升压站因场地限制,多采用长管道方式与户外场相连,在断路器开断时遭受雷击容易发生 GIS 内部件击穿事故。以某水力发电厂发生的雷电侵入波故障为分析对象,首先,采用电磁暂态分析软件 ATP – EMTP 建立升压站雷击分析模型,对断路器开断状态下的雷电侵入波过电压进行了量化计算,指出雷电侵入波故障原因;然后,对户外场加装避雷器和出线杆塔安装线路避雷器两种侵入波防治手段进行了有效性分析,指出常规防雷手段无法解决该水电站雷电侵入波防治问题;最后,提出了一种雷电侵入波阻碍电抗器设计思路,建立了该电抗器的分布参数模型,通过仿真计算验证了该防雷措施的有效性。所提供的防雷思路对雷电多发地区水电站 GIS 升压站防雷具有重要参考价值。

关键词:水力发电厂;升压站;雷电侵入波;电磁暂态;阻碍电抗器;避雷器

中图分类号:TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954 (2020)02 – 0041 – 07

Research on Blocking Reactor of Lightning Invasion Wave in GIS Booster Station of Hydropower Plant

Liu Shoubao¹, Hou Junhong², Fang Yuan¹, Li Xin¹, Yang Jian¹

(1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd.,
Nanning 530007, Guangxi, China; 2. Jialing River Tingzikou Water Resources and Hydropower
Development Co., Ltd., Guangyuan 628400, Sichuan, China)

Abstract:GIS booster station of power plant is usually connected with outdoor field by long pipeline due to site limitation, and breakdown accidents of GIS internal parts usually happen when the breaker is disconnected due to lightning strike. Taking the lightning surge fault in a hydropower plant as analyzing object, the lightning surge analysis model of booster station is established with the electromagnetic transient analysis software ATP – EMTP. The lightning surge overvoltage under the condition of breaker disconnection is calculated quantitatively, and the cause of lightning surge fault is pointed out. Effectiveness analysis of adding lightning arrester for the plant and installing line arrester are carried out, and it is pointed out that the conventional lightning protection methods could not solve the problem of the prevention and control of lightning invasion wave in hydropower GIS station. A design idea of blocking reactor for lightning invasion wave is presented, the distributed parameter model of the reactor is established, and the effectiveness of the proposed protection measures against lightning is verified by simulation. The proposed idea of lightning protection has an important reference value for lightning protection of GIS booster station in hydropower station in lightning prone area.

Key words:hydropower plant; booster station; lightning invasion wave; electromagnetic transient; blocking reactor; lightning arrester

0 引 言

水力发电厂多位于高山峡谷地理条件区域,由于地形地貌复杂,其送出线路雷击概率较高^[1-2]。

基金项目:中国大唐集团公司科技项目资助(基于尾端电流监测的避雷器状态评估及发电厂过电压智能识别系统研究)

同时,水力发电厂因地理位置和空间受限的原因,多采用 GIS 进行全封闭设计,在实际运行过程中,GIS 热备断路器断口或其他部件因雷击或多重雷击发生损坏的情况时有发生^[3-6]。

由于 GIS 管道的波阻抗极小(只有同电压等级架空输电线路的 1/12 ~ 1/15),侵入 GIS 内的雷电

波在管道内来回反射,会形成陡度较高的过电压^[7-9]。对于分断状态的 GIS 断路器,雷电侵入波在断路器断口处形成的过电压幅值将因为发生反射而达到侵入过电压的 2 倍,严重威胁了 GIS 的安全运行^[10]。对于 GIS 升压站的雷电侵入波防治,通常的做法是使用在户外场安装出线间隔避雷器^[11-16]。如果户外场与 GIS 断路器之间的管道过长且中间没有 GIS 罐式避雷器,将使升压站防雷问题复杂化。

下面从某水电厂发生的一起 GIS 雷电击穿故障入手,设计了一种雷电侵入波阻碍电抗器,通过与站用避雷器配合,防止雷电侵入波损坏升压站设备。为验证该思路的有效性,基于 ATP-EMTP 建立了电磁暂态仿真分析模型,对不同运行方式下雷电侵入波过电压幅值、各种防雷措施的有效性、阻断电容器电磁特性等进行仿真计算。研究成果对于雷击故障频发的发电厂 GIS 升压站的防雷工作具有重要参考价值。

1 某水力发电厂 GIS 雷击故障情况

水力发电厂总装机为容量 1100 MW (4 × 275 MW),主接线为三角形接线,单回 500 kV 出线接入电网变电站。发电厂升压站为 GIS 室内站,户外场以后均采用 GIS 管道形式布置,水力发电厂 GIS 升压站主接线见图 1。

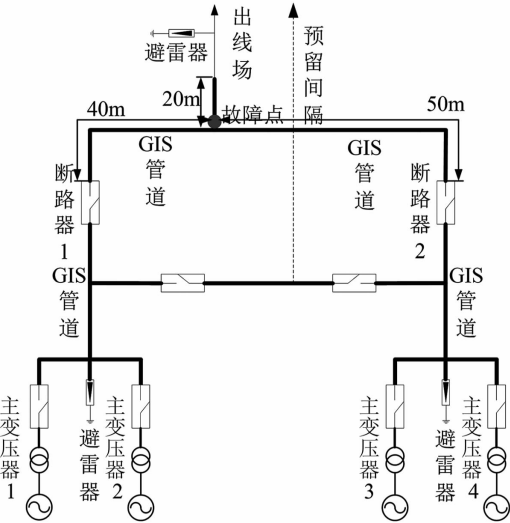


图 1 GIS 升压站接线

事故发生时,发电厂出现强雷雨天气,送出线路走廊有大量雷电活动。首先出现的是 C 相高阻接

地,接地故障触发纵联差动保护,继而 C 相断路器 1、断路器 2 同时跳闸,断路器断口开断,C 相导线处于电位悬浮状态。接着,架空线 C 相导线遭受雷击,雷电侵入波通过线路进入户外场,出线间隔避雷器动作,电压互感器记录到的过电压幅值为 1298 kV,而避雷器 20 kA 标称放电电流下冲击残压为 1065 kV,这表明雷电侵入波电流幅值超过了 20 kA,为大幅值雷电流引起的侵入波。最后,C 相断路器 1、断路器 2 三相同时跳闸,故障录波情况见图 2。经查,GIS 出线管道气室支柱绝缘子发生击穿,如图 3 所示,该绝缘子位于管道预留高抗引线位置,此处导体结构比较复杂,电场畸变,是 GIS 绝缘的薄弱点。

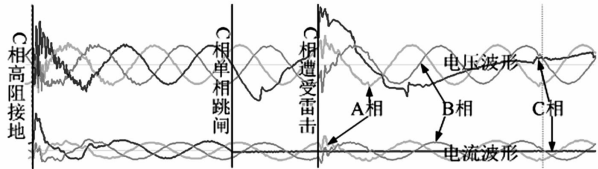


图 2 水力发电厂故障录波

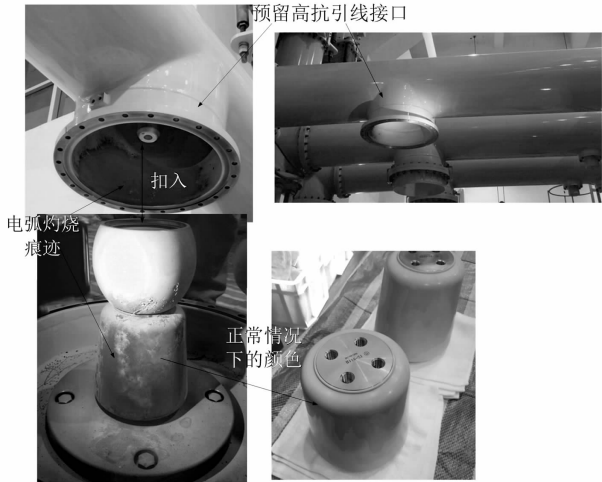


图 3 故障点放电情况

从上面的分析可知,雷电侵入波是在线路跳闸断路器断口分开的情况下侵入的,虽然在电压互感器处测得的过电压幅值为 1298 kV,但是在 GIS 管道内断路器断口处形成的入射与反射电压叠加幅值应远大于该数字。

2 GIS 升压站模型的建立

采用 ATP-EMTP 建立水力发电厂雷电侵入波分析模型,如图 4 所示,其中户外场出线间隔避雷器型号为 Y10W-444/1015,户外场一次设备二分裂连

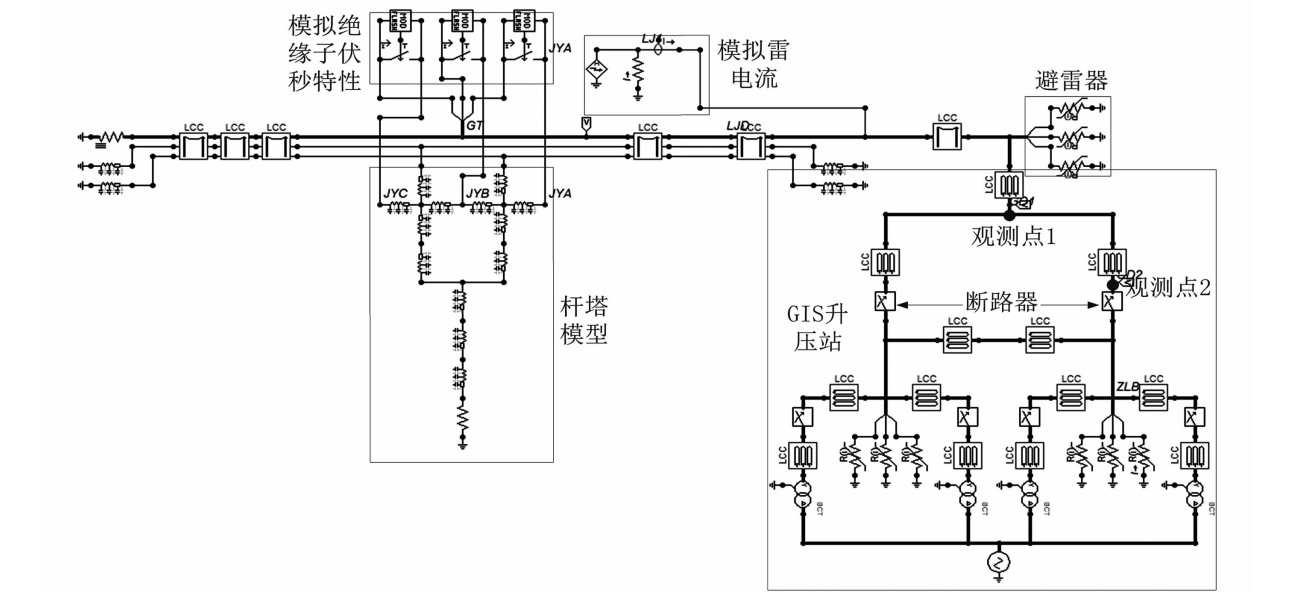


图4 GIS升压站雷电侵入波分析模型

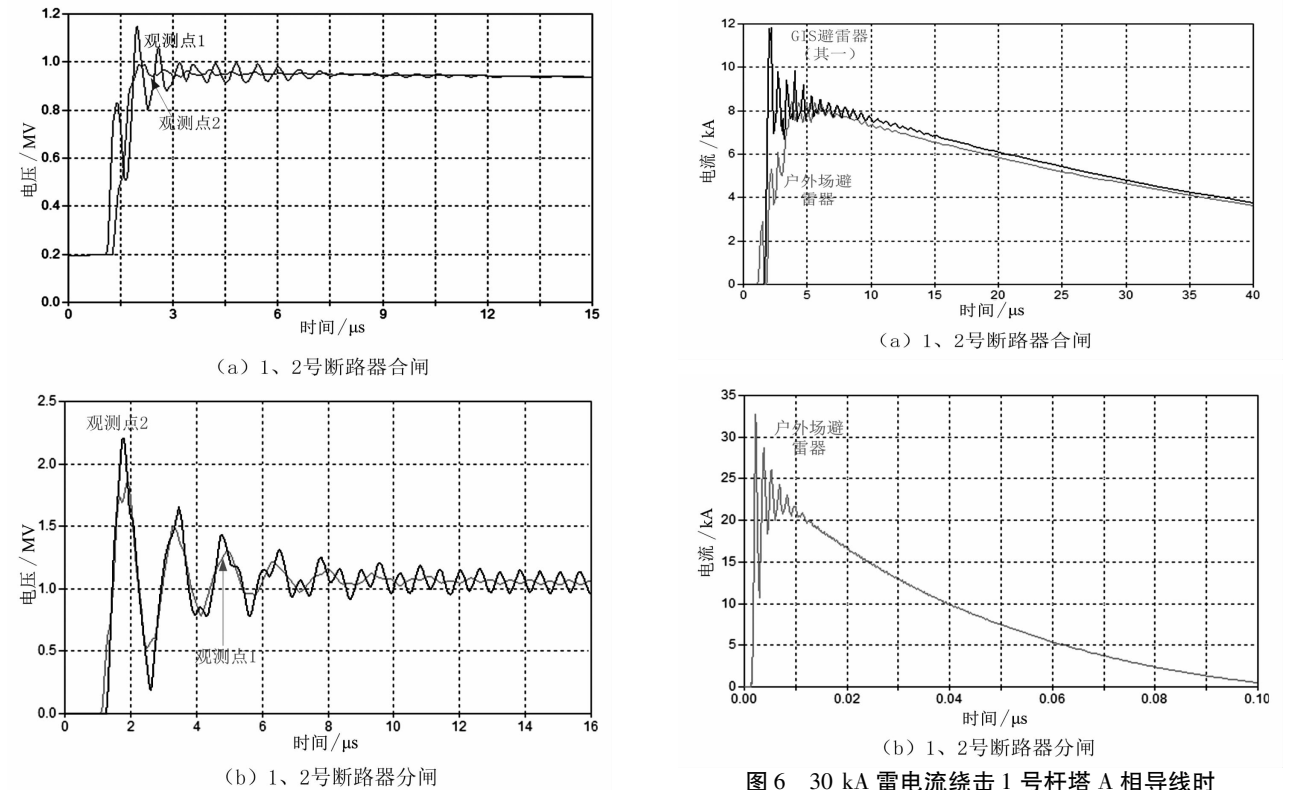


图5 30 kA 雷电流绕击1号杆塔A相导线时
观测点电压波形

接线型号为2×LGJQT-1400/35。架空线1号杆塔类型为5A-ZM1直线酒杯塔,1号杆塔距离升压站户外场300 m,500 kV导线型号为4×LGJ-400/50,地线型号为GJ-70,绝缘子串为28片XP-160型绝缘子,线路档距为500 m,杆塔接地电阻为2 Ω,雷电流波形采用1.2/50 μs单极脉冲波。500 kV GIS额定

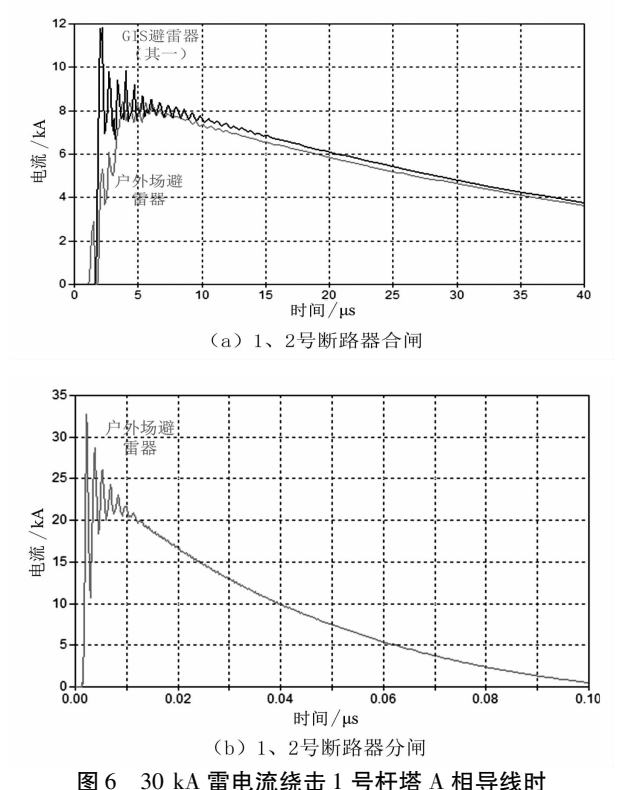


图6 30 kA 雷电流绕击1号杆塔A相导线时
避雷器电流波形

雷电冲击耐受电压(1.2/50 μs)相对地为1675 kV,断口为2125 kV,GIS管道由单芯电缆模拟。为了便于分析,在故障点和2号断路器分别设置电压观测点1和观测点2。

采用30 kA的雷电流绕击1号杆塔A相导线,此种情况下由于雷击点离升压站出线避雷器较近,不会发生线路绝缘子串击穿。分别对1、2号断路器

合闸和分闸两种情况下的过电压进行计算,得到电压波形如图5所示,避雷器电流情况如图6所示。

从图5和图6可知,1、2号断路器合闸时,在雷电侵入波传播路径上,户外场避雷器、两组GIS避雷器均动作,使得观测点电位得到有效限制,未出现超过GIS耐受电压幅值的过电压;在1、2号断路器分闸情况下,虽然户外场避雷器动作且释放的雷电流幅值较大,但是由于侵入波在短路断口的反射,观测点处仍然出现了高幅值的过电压。

3 常规治理措施有效性分析

以1、2号断路器开断情况为分析对象,用30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线,采用加装户外场避雷器和在1号杆塔加装线路避雷器两种常规治理措施,考察治理措施的有效性。

3.1 加装户外场避雷器

在原有户外场避雷器附近加装一组同型号站用避雷器,与原有避雷器一起削弱雷电侵入波能量,两组避雷器分相并联排列,忽略两组避雷器之间的电气距离。计算得到电压电流波形如图7所示。

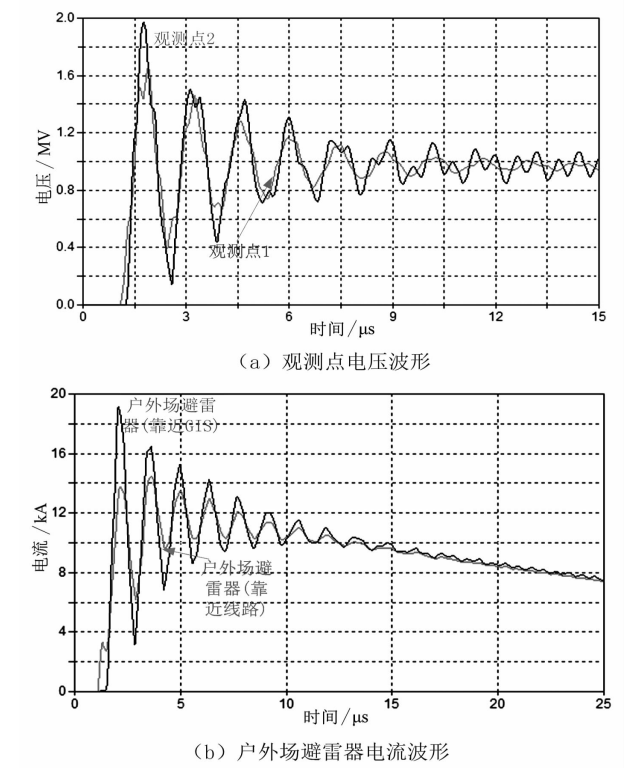


图7 加装户外场避雷器后的电压电流波形

从图7可知,采用两组户外场避雷器的方式在一定程度上能够有效削弱GIS管道内和断路器断口

的电压幅值,但是降低的效果并不明显,过电压幅值在GIS耐受电压附近。从两组避雷器A相电流波形可知,靠近GIS的避雷器吸收的能量大于靠近线路侧的避雷器吸收的能量,表明大量的雷电流能量进入GIS是管道内过电压幅值高的根本原因。

3.2 在1号杆塔加装线路避雷器

在1号杆塔A相安装型号为YH20CX1-396/1050的线路避雷器,在30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线时,观测点电压及避雷器电流情况如图8所示。

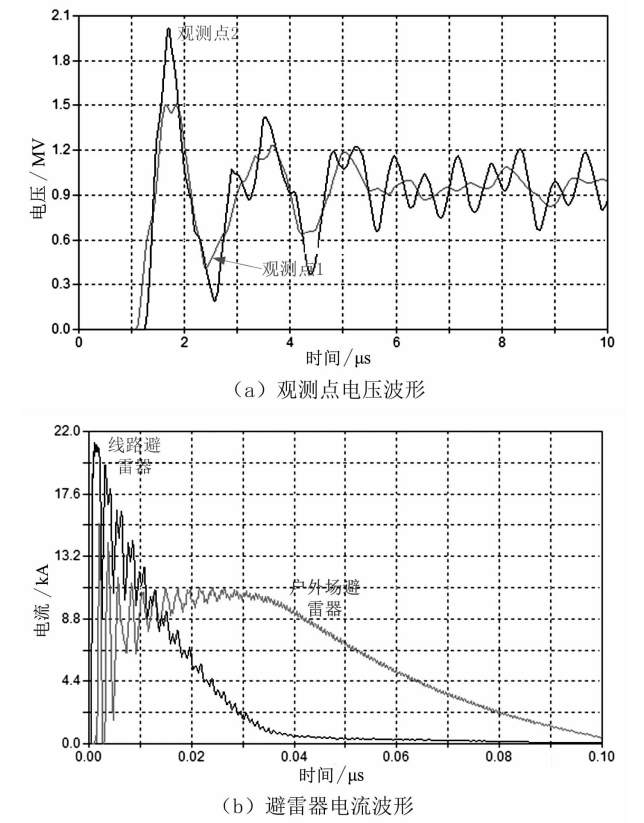


图8 加装线路避雷器后的电压电流波形

从图8可知,线路避雷器在雷击后释放了大量雷电流能量,但仍有较高幅值的雷电流侵入升压站,导致观测点电压幅值接近其额定耐受值。通过加装户外场避雷器和在1号杆塔加装线路避雷器都可以在一定程度上降低GIS管道和断路器断口的侵入波过电压幅值,但是效果并不显著。

4 雷电侵入波阻碍电抗器及其防雷效果

为了彻底解决水力发电厂GIS升压站雷电侵入波导致的设备损坏问题,需要采用更加严格的防雷措施。根据电抗对高频电流的阻碍作用,提出了一种雷电侵入波阻碍电抗器与避雷器配合使用的防雷思路。

4.1 设计思路及分布参数模型

雷电侵入波阻碍电抗器不是阻波器,阻波器是为电力载波通信提供信号通道的电抗器,其结构高度较低且首尾两端并联了保护避雷器以便在雷电冲击下及时释放雷电侵入波能量^[17]。因此,常规电力通信领域使用的阻波器不能直接用于阻碍雷电侵入波。

为了能够有效防止雷电侵入波,需要在阻波器的基础上做两点改造:一是增加电抗器的结构高度;二是减小线圈匝数以降低电抗器重量。所设计的电抗器结构图如图9所示,电抗器分内外两层,其中每匝导线由两个铜排并联,每层线圈有28匝导线。铜排尺寸为40 mm×10 mm,每匝线圈中两个铜排的间隙距离为10 mm,上下两匝线圈之间的间隙距离为40 mm,内层线圈的内径为360 mm,内外层线圈之间的间距为30 mm,电抗器结构高度为2200 mm。

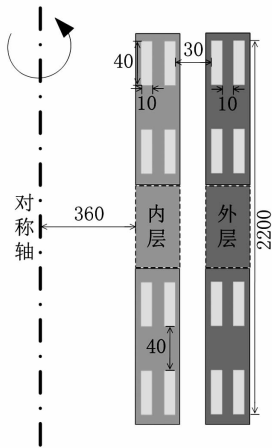


图9 电抗器尺寸参数(单位:mm)

将电抗器等分为7个单元,在ATP-EMTP中建立电抗器分布参数模型,如图10所示,其中各单元的对地电容和自感、相邻单元互容以及跨越一个单元的两单元间的互容通过有限元计算方式提取,跨越多个单元的两单元间的互容由于数量急剧下降而忽略。

在有限元软件中建立仿真模型对分布参数进行提取,如图11所示;计算得到相关参数如表1所示。

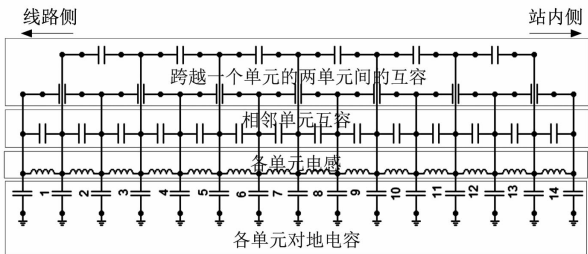
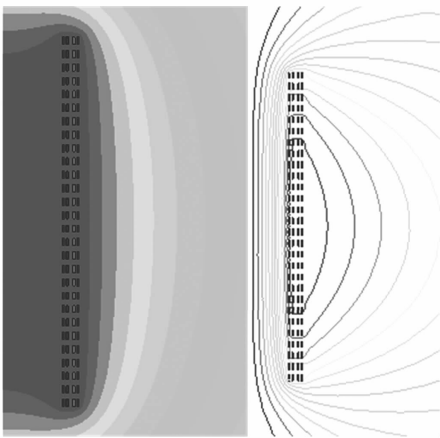


图10 电抗器的分布参数模型



(a) 电场计算结果 (b) 磁场计算结果

图11 电抗器参数提取有限元计算模型

表1 各单元的电容、电感参数(仅列出单元1-单元7)

单元序号	电感/nH	电容/ μ F	
		对地	互容
1	905	15.4	83.6
2	854	6.0	79.9
3	840	5.1	79.8
4	836	4.7	79.7
5	834	4.5	79.7
6	833	4.4	79.7
7	833	4.3	79.7

如图12所示,在实际使用过程中,电抗器安装在门型架上(与载波通信电抗器类似),在阻波器线路侧、站内侧各安装一组避雷器。

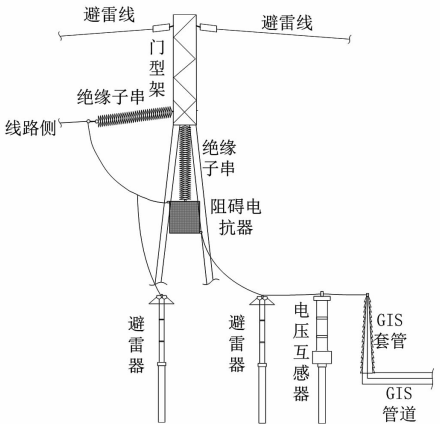


图12 雷电侵入波阻碍电抗器安装示意

4.2 雷电侵入波阻碍电抗器效果分析

采用30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线,杆塔未安装线路避雷器,此种情况下A相绝缘子串未击穿,电压电流波形如图13所示。

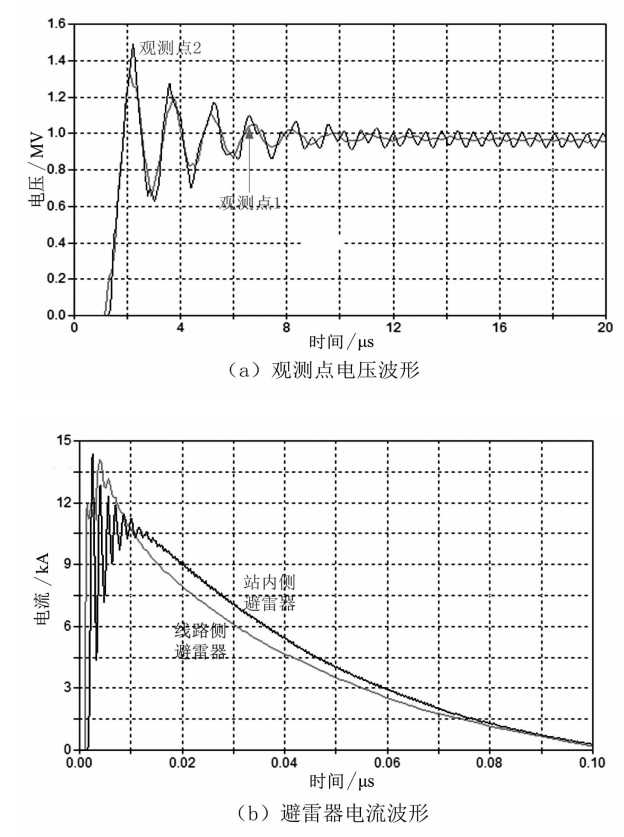


图 13 采用侵入波阻碍电抗器后的电压电流波形

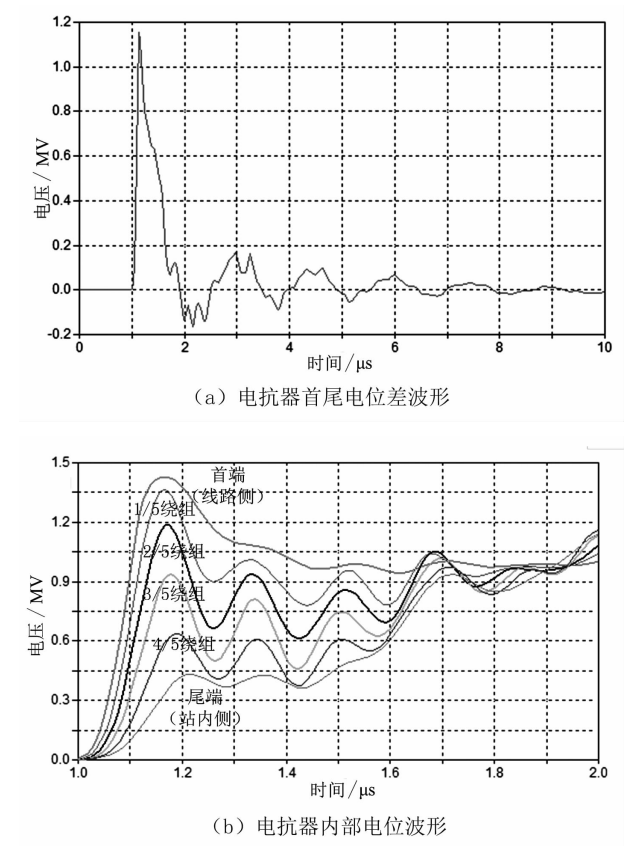


图 14 侵入波阻碍电抗器工作时电位分布

从图 13 可知,在加装阻碍电抗器后,GIS 管道内和断路器断口处的雷电侵入波过电压幅值大幅降

低,实现了过电压安全防护;从避雷器电流波形可知,阻碍电抗器的使用让靠近线路侧的避雷器能够更多地释放来自线路侧的雷电能量,使侵入升压站的能量大幅降低,减轻了靠近站内的户外场避雷器的能量释放负担。

阻碍电抗器自身的电位分布情况见图 14,在所述雷电流作用下,其两个引线端电位差最大值为 1150 kV,在雷电流冲击下不会发生电抗器首尾或内部放电的问题。

5 结 语

1)水力发电厂 GIS 升压站因户外场到开关站的管道过长,在断路器处于开断状态下遭受雷击,容易发生雷电侵入波在断路器断口处发生反射,使户外场避雷器无法及时吸收雷电能量的情况,在侵入波雷电流过大时,易发生设备击穿故障。

2)简单采用加装户外场避雷器或在 1 号杆塔安装线路避雷器的方式,难以大幅削减进入 GIS 的雷电流能量,对侵入波过电压的防治效果有限,无法满足 GIS 断路器开断情况下的防要求。

3)通过采用雷电侵入波阻碍电抗器和站用避雷器配合,利用雷电流侵入升压站时在电抗器首端形成的高电位,强制实现线路侧避雷器对雷电流能量的大量释放,使得进入升压站的雷电能量大幅减小,达到了防止 GIS 管道和断路器断口击穿的目的。

参考文献

[1] 胡苗. 含小水电的山区配电网规划和优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[2] 范威. 偏远山区风光水资源分布特性及优化配置研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.

[3] 邱慧敏. 500 kV 避雷器保护距离试验及对热备用断路器距离保护效果分析[J]. 电瓷避雷器,2015(3):57-61.

[4] 钱海,邱慧敏,别睿,等. 500 kV 断路器多重雷击事故分析[J]. 南方电网技术,2014,8(5):20-23.

[5] 荀羽,韦瑞峰,代正元,等. 母线分段带断口运行母联断路器雷击事故[J]. 云南电力技术,2016,44(S2):118-120.

[6] 王乃会,邢大鹏,汪德荣,等. 热备用状态下的断路器雷击事故分析[J]. 电工电气,2012(2):39-41.

[7] 何哲,朱斌,梁晖,等. GIS 变电站进线电缆雷电过电压影响因素分析[J]. 电瓷避雷器,2018(5):84-88.

[8] 倪秀尧,倪莉. GIS 的防雷设计原则[J]. 电工技术,2001(11):5-6.

[9] 李雍,周悦,李建明,等. 特高压 GIS 变电站雷电过电压防护研究[J]. 高压电器,2016,52(7):37-44.

[10] 李乐,潘文斌. 电厂升压站侵入波过电压抑制策略研究[J]. 电工技术,2019(23):6-8.

[11] 樊友平,陈艺,白津阳,等. 高压低通滤波器限制雷电过电压的应用方案[J]. 高电压技术,2019,45(4):1256-1265.

[12] 谢海,黄金,孙春日,等. 220 kV 输电线路终端避雷器对断路器断口保护效果的研究[J]. 南方电网技术,2017,11(12):62-67.

[13] 叶育林,刘行,刘晏平,等. 500 kV 多雷区核电厂变电站雷电过电压仿真计算分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):167-172.

[14] 谭逢焘,罗日成,李懿儒,等. 1000 kV GIS 变电站雷电

过电压影响因素分析[J]. 电力学报,2019,34(3):249-255.

[15] 孙秋芹,张永涛,汪泓,等. 江苏 500 kV 电网限流电抗器雷电侵入波过电压特性[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):87-92.

[16] 黄修乾,张文锋,赵淳,等. 500 kV 紧凑型线路雷电反击机理研究[J]. 云南电力技术,2016,44(1):110-114.

[17] 李张秀,江峰,张建波. 一起阻波器因络故障产生的原因分析及防范[J]. 四川水力发电,2017,36(1):110-112.

作者简介:

刘守豹(1983),博士,高级工程师,主要研究方向为电气系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期:2020-03-02)

(上接第 35 页)

表 2 各种故障情况下保护动作情况

故障类型	故障距离 /km	过渡电阻 /Ω	高频分量电流差值 <i>D</i>	故障位置判别	是否动作
区内故障	1000	100	22.97	区内	是
		500	8.02	区内	是
	1500	100	20.16	区内	是
		500	7.35	区内	是
	2000	100	16.69	区内	是
		500	6.13	区内	是
	2500	100	13.54	区内	是
		500	5.10	区内	是
远端区外故障		0.1	0.89	区外	否
		100	0.51	区外	否
		500	0.45	区外	否

4 结 语

基于高压直流输电系统拓扑结构,分析了输电线路区内故障时故障电流高频部分的信号特征,利用故障信号小波系数构造了保护方法,具有以下特点:

1)选取能够反应接地故障特征的高频电气量作为保护特征量,所选的频段受故障电阻和故障位置的影响小,提高了区内外故障的识别能力,能够可靠地保护线路全长。

2)使用 3 ms 的滑动数据窗进行保护判别,减少了瞬时干扰信号对保护判据的影响。同时,仅使用

线路单端电气量,无需在线路两侧进行数据交换,在故障发生后 5 ms 内即可识别区内故障,保护动作速度快。

参考文献

[1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.

[2] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

[3] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):123-129.

[4] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.

[5] 张保会,孔飞,张嵩,等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):179-185.

[6] 束洪春,刘可真,朱盛强,等. ±800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):108-117.

作者简介:

李小鹏(1987),博士,高级工程师,研究方向为高压直流输电控制与保护;

戴文睿(1996),硕士研究生,研究方向为高压直流输电线路保护;

林 圣(1983),教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与故障定位;

李世龙(1989),博士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2020-02-24)

10 kV 配电变压器雷电过电压及其防治方法研究

雷 潇¹, 兰 强², 刘守豹³, 崔 涛¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041;
3. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘 要:10 kV 台区配电变压器是配电网最重要的设备之一,但在多雷区时常发生雷击损坏故障。根据台区典型设计和现场勘查结果,建立了雷电直击导线和雷电磁感应下的电磁暂态仿真模型,分析了配电变压器高压侧绝缘的雷电过电压,结果如下:雷电直击导线后,变压器绝缘承受的电压为避雷器残压和接地引下线电压之和,过电压幅值极易超过标准雷电耐受电压 75 kV;雷电磁应的能量较小,过电压幅值超过标准雷电耐受电压的概率非常小。同时,研究了加装避雷线对雷电直击过电压的防治效果,发现避雷线可大幅降低过电压幅值,若在此基础上缩短避雷器横担至变压器支架的电气距离,可大大降低变压器损坏概率。

关键词:配电台区;避雷器;配电变压器;雷电过电压

中图分类号:TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0048-05

Research on Lightning Overvoltage of 10 kV Distribution Transformer and It Prevention Method

Lei Xiao¹, Lan Qiang², Liu Shoubao³, Cui Tao¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract:Distribution transformer in 10 kV power distribution area is one of the most important equipment in distribution network. However, it is often be damaged by lightning in the area with more lightning activities. According to the typical design and the field investigation, the electromagnetic transient simulation model for lightning direct striking and lightning induction is established, and the lightning overvoltage of high voltage side insulation on distribution transformer is analyzed. The results are as follows: After lightning directly striking conductor, the voltage suffered by transformer insulation is the sum of the residual voltage of lightning arrester and the voltage of ground lead. The amplitude of overvoltage easily exceeds the standard lightning withstand voltage, which is 75 kV. Because the energy induced by lightning is small, the probability that overvoltage amplitude exceeding the standard lightning withstand voltage is very small. The preventive effect of adding lightning arrester on lightning direct overvoltage is studied. It is found that lightning arrester can greatly reduce the amplitude of overvoltage. If the electric distance between the arrester cross-arm and the transformer support is shortened on this basis, the probability of transformer damage can be greatly reduced.

Key words:distribution transformer service area; lightning arrester; distribution transformer; lightning overvoltage

0 引 言

雷击跳闸和设备损坏是多雷区 10 kV 配电网面临的主要问题^[1-3]。在降低雷击跳闸率方面,目前

基金项目:国家电网公司科技项目资助(川藏高海拔地区电网雷电基础参数综合分析与工程化应用研究)

已有大量研究,并取得了一定效果^[4-6]。然而,配电网设备雷击损坏故障率仍然较高。台区配电变压器是配电网最重要的设备之一,其雷击损坏不仅造成经济损失,伴随而来的长时间停电还对供电可靠性有明显影响。

配电变压器雷击损坏主要原因是雷电过电压对

绝缘产生了永久性破坏。部分文献^[7-9]研究了雷电过电压在高低压绕组间的传递,分析了变压器低压侧表计损坏的机理,但未研究变压器一次绕组绝缘承受的过电压,且以感应雷为主。而在山区和丘陵地区,位于山顶、山脊等区域的台区也有较大雷电直击风险。文献[10]对配电变压器在雷电直击和雷电感应两种情况下进行了过电压仿真,但雷电直击分析中未考虑避雷器。根据配电网典型设计要求^[11],台区需三相安装避雷器。但对各地市公司的调研发现,时常发生变压器雷击损坏而避雷器完好的情况。

针对上述问题,在台区防雷措施调研的基础上,开展了电磁暂态仿真,研究了雷电直击和雷电感应下变压器绝缘承受的过电压,并提出相应防治方法。

1 台区防雷设计

根据配电网典型设计,台区配电变压器仅由三相氧化锌避雷器保护。避雷器一般布置于10 kV导线下方4~8 m,配电变压器支架高3~4 m。避雷器横担接地引下线与变压器外壳接地引下线在杆塔某处汇接后入地,设计如图1所示。而根据现场勘查,

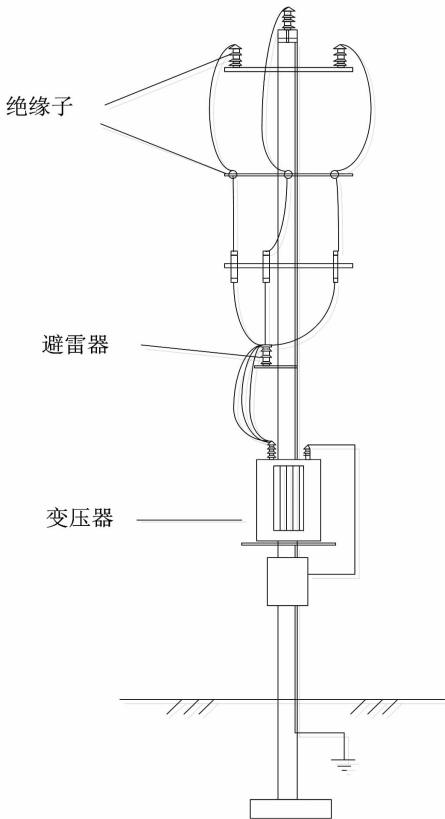


图1 避雷器与变压器相对位置

部分台区的布置受地形、施工条件及技术的影响,避雷器接地引下线至汇接点的距离具有一定分散性。一些台区的避雷器接地引下线甚至未与变压器接地引下线汇接,而是分别连接在接地装置上。避雷器在雷电过电压下动作时,接地引下线也会因流过雷电流而产生过电压,导致变压器绝缘承受的过电压大于避雷器残压。当变压器绝缘承受电压高于标准雷电耐受电压75 kV时,可能造成绝缘击穿。

2 仿真模型

为了研究台区配电变压器在雷电直击和雷电感应下的过电压,在ATP-EMTP中建立电磁暂态仿真模型。雷电流采用标准波形,即波前时间2.6 μs,半波时间50 μs。雷电直击仿真模型中的雷电流采用Heidler模型。雷电感应仿真模型中的过电压计算部分采用文献[12-13]的模块,如图2所示。

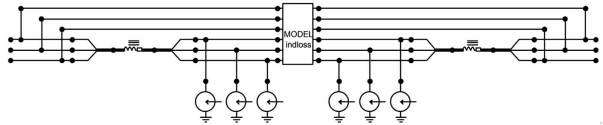


图2 感应过电压计算模块

台区杆塔设为13 m,三相导线成三角形排列。避雷器横担接地引下线与变压器支架连接后入地。变压器支架高3 m,避雷器横担距变压器支架分别设为2 m、4 m和6 m,以研究避雷器接地引下线长度对过电压的影响。接地引下线的电感设为0.8 μH/m。杆塔接地电阻为4 Ω。台区电路模型如图3所示,其中变压器绕组电路模型如图4所示^[7]。10 kV 避雷器伏安特性如表1所示^[14]。

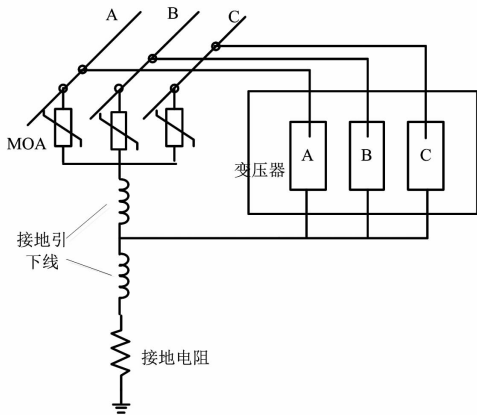


图3 台区模型

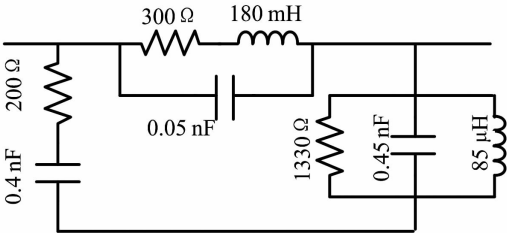


图4 变压器绕组模型

表1 10 kV 避雷器伏安特性

电压/V	电流/A
20 820	0.9×10^{-3}
25 980	1.2×10^{-3}
29 100	0.6×10^{-3}
31 140	0.06
33 300	0.6
47 460	3000
51 000	6000
56 640	12 000

3 过电压分析

3.1 雷电直击过电压

雷电直击过电压与雷电流幅值密切相关。以雷击中相导线且避雷器接地引下线至变压器支架距离 d 为 4 m 的情况为例,在雷电流幅值为 10 kA、20 kA 和 30 kA 时,变压器高压侧中相绕组对壳过电压如图 5 所示,其峰值分别为 67 kV、90 kV 和 113 kV。

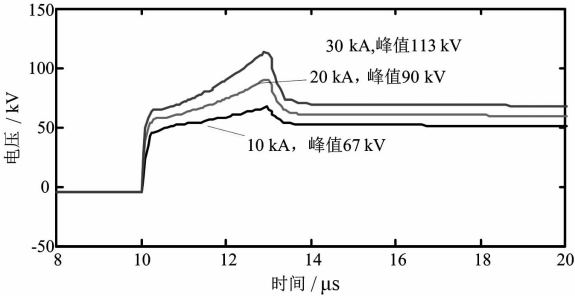


图5 变压器高压侧中相电压(d 为4 m)

雷电流幅值 20 kA 下,变压器高压侧三相绕组对壳过电压如图 6 所示。未遭受雷击的相位承受过电压的峰值仅为 30 kV,且发生在 2.6 μ s 附近。遭受雷击相位的过电压峰值也出现在 2.6 μ s 附近。这是由于雷电流经过避雷器接地引下线时,接地引下线的等效电感产生了过电压,其极性与遭受雷击相位的避雷器一致。变压器中相绕组对壳电压即为

避雷器残压与接地引下线电感电压之和,如图 7 所示。避雷器在通过 20 kA 雷电流时的残压最大值为 60 kV,而接地引下线上的电压峰值为 30 kV。对于未遭受雷击的相位,避雷器在横担电位抬升后对导线反击,变压器绕组承受的电压为避雷器残压与接地引下线电压之差。

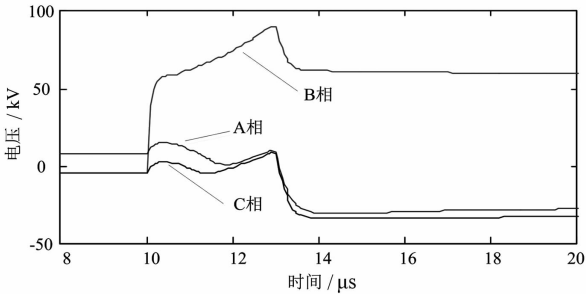


图6 变压器高压侧三相电压(d 为4 m)

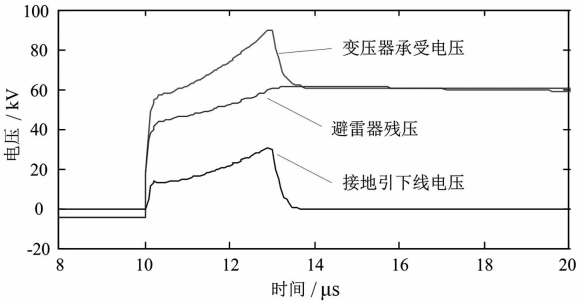


图7 变压器高压侧中相绝缘、避雷器、
接地引下线的直击雷过电压(d 为4 m)

不同接地引下线长度下,变压器绝缘承受过电压与雷电流幅值的关系如图 8 所示。雷电流幅值越高,过电压幅值越高。接地引下线越长,过电压幅值越高。当接地引下线为 6 m 时,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压 75 kV 的雷电流幅值仅为 10 kA。而即使接地引下线为 2 m,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压 75 kV 的雷电流幅值也仅为 20 kA。根据多雷区雷电流幅值概率分布,雷电流超过 20 kA 的概率达 59%。因此,10 kV 配电变压器在雷电直击台区时极易发生绝缘损坏。

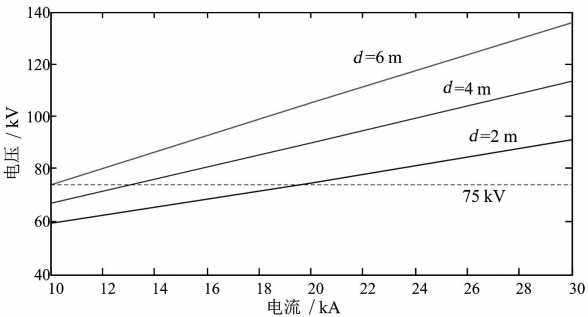


图8 变压器中相绝缘承受电压与雷电流的关系

3.2 感应雷过电压

为了防止线路末端的反射影响,将线路总长度设置为5 km,线路末端经与导线波阻抗等值的电阻接地。雷击点距离线路越近,感应雷过电压越大。一般认为线路附近65 m以内的雷击为直击雷,65 m以外为感应雷。这里将雷击点设置为台区65 m,以体现感应雷过电压最严苛的情况。

当接地引下线至变压器支架距离为4 m以及雷电流幅值分别为10 kA、60 kA 和100 kA 时,变压器绝缘承受的电压如图9所示。雷电流幅值越大,变压器绝缘承受电压越高。图10为雷电流幅值为100 kA的情况下,变压器绝缘、避雷器和接地引下线的电压。由于感应雷的能量比直击雷低,通过避雷器和接地引下线的电流较小,避雷器残压和接地引下线电感电压均较低。可见,即使雷电流幅值高达100 kA,过电压也低于标准雷电耐受电压75 kV,感应雷过电压造成变压器绝缘损坏的概率非常小。

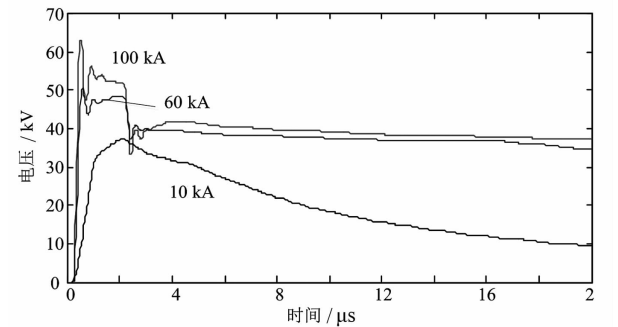


图9 感应雷下变压器高压侧中相电压(d 为4 m)

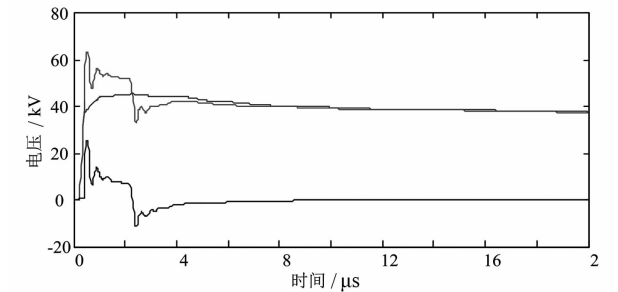


图10 变压器高压侧中相绝缘、避雷器、
接地引下线的感应雷过电压(d 为4m)

4 防治方法

由上节可知,雷电直击是导致变压器绝缘损坏的主要原因,可采用加装避雷线的方式进行防治。设避雷线在导线上方2 m 以确保30°的保护角。在接地引下线至变压器支架距离为4 m 的情况下,雷电直击避

雷线后,变压器中相绝缘承受电压波形如图11所示。雷电流较大时,过电压峰值出现在正极性,雷电流较小时则出现在负极性。这是因为避雷器残压与接地引下线电压极性不同所致。雷电流由杆塔接地引下线入地,使避雷器横担处电位抬升后导致避雷器动作,一部分雷电流由避雷器反送至10 kV 线路。

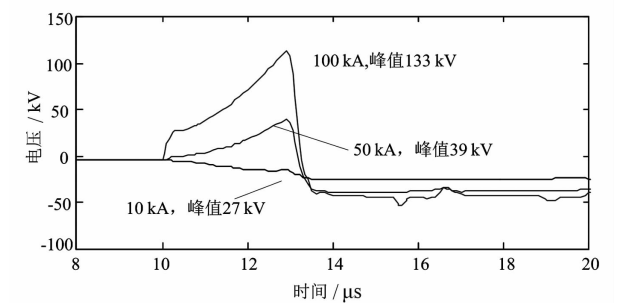


图11 有避雷线时变压器高压侧中相电压(d 为4 m)

以雷电流幅值50 kA 的情况为例,如图12所示,接地引下线上的电压峰值为78 kV,而避雷器残压为39 kV且与其极性相反,变压器绝缘承受电压则为两者之差,即39 kV。

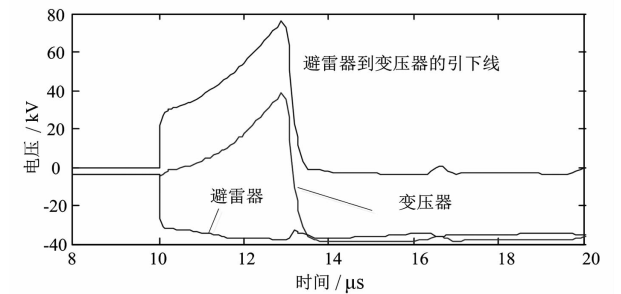


图12 有避雷线时变压器高压侧中相绝缘、避雷器、
接地引下线的直击雷过电压(d 为4m)

流过接地引下线和避雷器的雷电流与杆塔接地电阻有关。在雷电流幅值为50 kA、接地引下线为4 m 的情况下,不同接地电阻的过电压如图13所示。接地电阻越大,过电压正极性峰值越低。这是由于经接地引下线入地的雷电流随接地电阻的增大而减小,导致接地引下线的正极性电压峰值降低。台区接地电阻的标准规定值为4 Ω,若接地电阻超过该值,变压器绝缘承受的电压反而更小。但不宜刻意增大接地电阻,以免避雷器流过电流过大而损坏。

不同接地引下线长度下,变压器绝缘承受过电压与雷电流幅值的关系如图14所示。当雷电流较小或接地引下线较短时,接地引下线的正极性电压峰值低于避雷器残压,变压器绝缘承受的电压不超过避雷器残压。当雷电流较大且接地引下线较长

时,接地引下线的正极性电压峰值高于避雷器残压,变压器绝缘承受的电压随雷电流幅值线性增大。

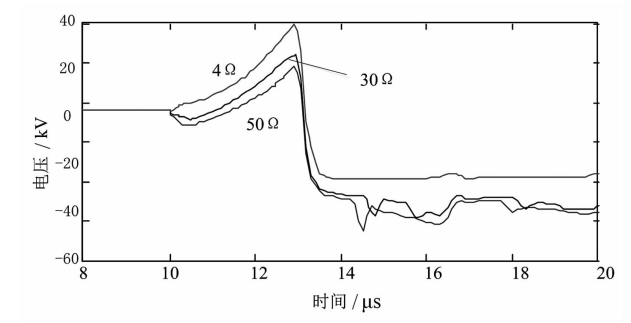


图 13 有避雷线时变压器高压侧中相绝缘在不同接地电阻下的过电压(d 为 4 m)

当接地引下线为 6 m 时,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压 75 kV 的雷电流幅值为 50 kA,雷电流超过 50 kA 的概率为 27%,而无避雷线时的概率为 77%。当接地引下线为 4 m 时,过电压超过 75 kV 的概率仅为 15%。而当接地引下线为 2 m 时,即使雷电流为 100 kA,过电压也远低于 75 kV。因此,台区加装避雷线后会大大降低变压器雷击损坏概率。

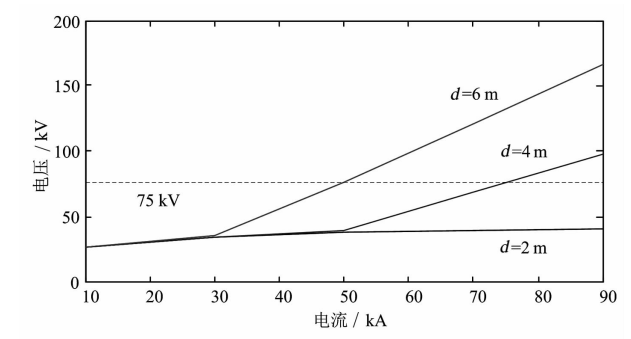


图 14 有避雷线时变压器绝缘承受电压与雷电流的关系

5 结 语

为了降低 10 kV 配电变压器雷击损坏故障率,在建立了电磁暂态仿真模型的基础上,研究了变压器绝缘在雷电直击和雷电感应的过电压及防治方法,结论如下:

- 1)台区避雷器横担至变压器支架的接地引下线在流过雷电流时会产生过电压,导致变压器绝缘承受的电压超过避雷器残压。
- 2)雷电直击台区产生的过电压极易超过变压器标准雷电耐受电压,而雷电感应的过电压超过变压器标准雷电耐受电压的概率很小。因此,变压器雷击损坏多为雷电直击造成。

3)在台区加装避雷线后,变压器承受的电压明显降低。同时,将避雷器接地引下线至变压器支架的电气距离缩短,可进一步降低雷电直击时绝缘损坏的概率。

参考文献

- [1] 李琳,齐秀君. 配电线路感应雷过电压计算[J]. 高电压技术,2011,37(5):1093-1099.
- [2] 罗大强,唐军,许志荣. 10 kV 架空配电线路防雷措施配置方案分析[J]. 电瓷避雷器,2012(5):113-118.
- [3] 张利庭. 雷电对配电安全运行的影响及防范研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [4] 王敬春,罗军. 降低配电线路雷击断线和跳闸率的防护措施[J]. 高电压技术,2009,35(12):2958-2962.
- [5] 雷潇,刘强,刘守豹. 土壤电阻率对 10 kV 架空线路雷害分析的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2016(6):116-119.
- [6] 横山茂. 配电线路雷害对策[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [7] 杨剑锋,牛育忠,吕安璞,等. 配电变压器低压侧负载雷电浪涌防护研究[J]. 电瓷避雷器,2018(2):110-114.
- [8] 郭红霞,王兆军,王者龙,等. 智能电表的雷电浪涌防护分析[J]. 电瓷避雷器,2017(8):120-124.
- [9] 王兆军,矫真,刘丽君,等. 智能电表雷电感应的过电压防护分析[J]. 电瓷避雷器,2018(5):93-97.
- [10] 王华云,安义,蔡木良,等. 10 kV 配电变压器雷击过电压仿真计算研究[J]. 电瓷避雷器,2016(5):94-97.
- [11] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计 10 kV 配电分层[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] H. K. Høidalen. Analytical Formulation of Lightning - induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines above Lossy Ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 92-100.
- [13] H. K. Høidalen. Calculation of Lightning - induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects[C]. International Conference on Power System Transients, New Orleans, 2003.
- [14] Mario Paolone. Modeling of Lightning - induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in A Transient Program[D]. Italian: University of Bologna, 2001.

作者简介:

雷 潇(1988),博士,高级工程师,从事输配电线路雷电防护技术研究。

(收稿日期:2020-01-21)

500 kV 交流海底电缆过电压保护与绝缘配合研究

李浩原, 李 健

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘 要:海底电缆造价昂贵、施工检修较为复杂,一旦出现故障,后果严重。而过电压导致的绝缘老化和绝缘击穿是造成电缆故障的重要因素,因此有必要对海底电缆的过电压进行研究。基于镇海—舟山 500 kV 交流海底电缆工程,建立海底电缆过电压 ATP 仿真计算模型,对海底电缆系统的暂时过电压、操作过电压和雷电过电压进行了分析和计算,给出了保护措施,并基于计算结果研究了海底电缆的绝缘配合。

关键词:海底电缆;过电压;绝缘配合;仿真

中图分类号:TM86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0053-06

Research on Overvoltage Protection and Insulation Coordination of 500 kV AC Submarine Cable System

Li Haoyuan, Li Jian

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.

of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract:Submarine cables is very expensive, meanwhile the construction and maintenance is complicated. Once failure occurs, the consequences are serious. The aging and breakdown of cables caused by overvoltage are the important factors leading to cable fault, so it is of great significance to study the overvoltage of submarine cable system. Based on Zhenhai - Zhoushan 500 kV AC submarine cable project, simulation models for overvoltage calculation of submarine cable is established in ATP, the transient overvoltage, switching overvoltage and lightning overvoltage are analyzed and calculated, and finally the protective measures are given. Based on the simulation results, the insulation coordination of submarine cable system is studied.

Key words:submarine cable; overvoltage; insulation coordination; simulation

0 引 言

海底电缆在工程中的应用可追溯到 20 世纪初,最初的应用场合是给海上灯塔供电。随着电缆技术的进步和社会经济的发展,目前海底电缆已广泛应用在电网互联或者孤岛供电等重要场合。海底电缆价格昂贵,高电压等级的海底电缆价格可达每公里数百万元。由于其敷设于海上,施工和抢修很复杂,若出现故障,则很可能导致电力系统解列等严重的电网事故。因此,海底电缆的运行可靠性要求很高^[1-2]。海底电缆属于非自恢复性绝缘,绝缘一旦击穿,无法自恢复^[3-4],因此海底电缆的绝缘水平需

充分考虑系统的过电压水平,以免出现绝缘击穿导致严重后果。一般来说,国外交流海底电缆工程都会进行过电压计算,而由于参考标准体系及电力系统参数等不同,绝缘的配置情况都会有所差异^[5-7],因此,对国内工程的参考价值不大。对于国内工程需针对工程具体参数进行过电压计算以满足海底电缆绝缘配合要求。

考虑海底电缆过电压水平与绝缘配合的重要性,基于镇海—舟山 500 kV 交流海底电缆输电工程,研究了交流海底电缆系统的过电压和绝缘配合。研究结果可为后续海底电缆工程提供参考,对提高中国海底电缆工程技术水平也有着积极的意义。

1 仿真模型

过电压仿真计算是基于 ATP – EMTP 成熟的模型库及仿真计算平台,进行架空线 – 电缆混合系统模型搭建和过电压仿真分析。之前,需选择合适的仿真模型搭建交流海底电缆过电压仿真系统。

1.1 架空线路仿真模型选择

采用 ATP – EMTP 中输电线路的 LCC 模型进行计算。该模型属于分布参数模型,包含导线、杆塔、接地等参数,其中频率相关子模型包含 J. Marti 模型和 Noda 模型等。

Noda 模型较为复杂,同时需要合适的参数以及较大的步长才能得到稳定的响应。而 J. Marti 模型能够很好反应雷电过电压波过程。J. Marti 充分考虑了导地线之间的耦合,计算方便、精度较高。这里的架空输电线路将采用 J. Marti 模型。

1.2 海底电缆仿真模型选择

电缆仿真模型的选取与架空线类似,考虑到雷电波过程及其频率特性,电缆采用 J. Marti 模型。

镇海 – 舟山 500 kV 海底电缆工程采用的海底电缆为交联聚乙烯电缆,典型 500 kV XLPE 交流海底电缆的结构如图 1 所示。

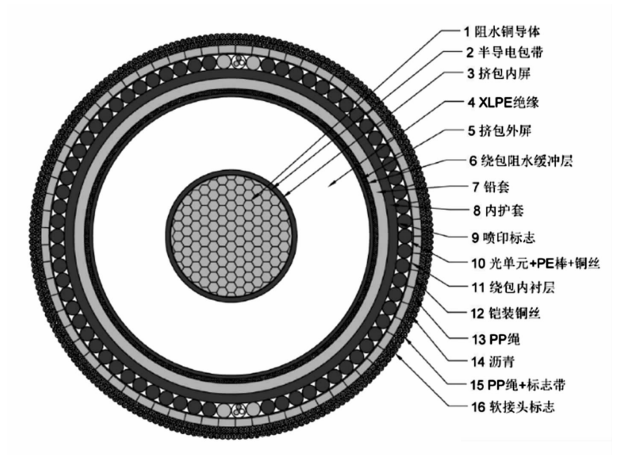


图 1 典型交联聚乙烯海底电缆结构

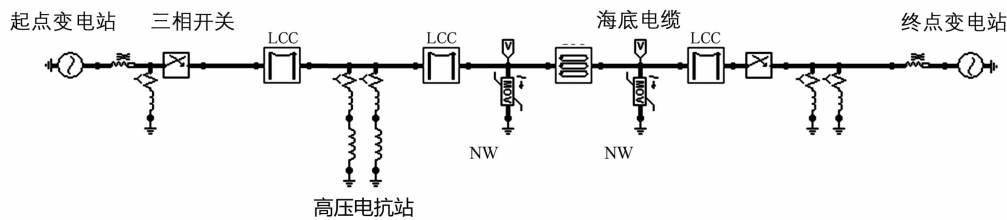


图 3 架空线 – 海底电缆混合系统仿真模型

1.3 避雷器仿真模型

避雷器特性对系统过电压水平有显著的影响,正确地建立避雷器仿真模型是架空线 – 海底电缆混合系统过电压分析与绝缘配合的前提。

ATP – EMTP 软件模型库中包含基于伏安特性的金属氧化物压敏电阻(metal oxide varistors, MOV)模型,仿真中需基于避雷器实际安装场合、应用情况对 MOV 模型进行修正完善,避雷器常用模型有 IEC 模型及 IEEE 模型。IEEE 模型考虑了陡波响应,更准确。此处仿真采用 IEEE 模型,如图 2 所示。

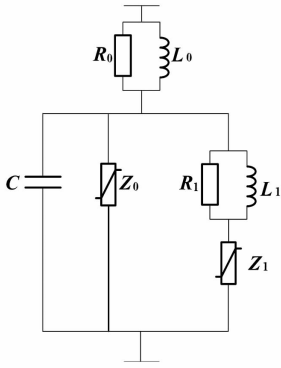


图 2 IEEE 避雷器等效电路

图 2 中: L_0 为避雷器内部电感,体现避雷器的动态特性; R_0 是为计算稳定性而设的参数; C 为杂散电容;非线性特性由 Z_0 和 Z_1 表示, Z_0 大于 Z_1 ,两部分由并联的线性 R_1 与 L_1 支路隔开。

2 暂态过电压

在电力系统中,因为断路器的操作或系统故障,系统参数会发生改变,引起内部出现暂态变化过程,在这个期间会出现系统暂时过电压。暂时过电压通常由故障、容升效应、谐振等导致。

为研究空载线路容升效应,选取配置和不配置高压电抗两种方案进行仿真,有高压电抗时镇海及舟山高压电抗容量均为 180 Mvar,仿真模型见图 3。空载长线电容效应如表 1 所示。

表 1 容升过电压计算结果

位置	有高压电抗时容升过电压/(pu)		无高压电抗时容升过电压/(pu)	
	镇海空载	舟山空载	镇海空载	舟山空载
镇海站	0.99	0.99	1.02	1.10
海底电缆首端	0.98	1.00	1.02	1.09
海底电缆末端	0.98	1.00	1.08	1.03
舟山站	0.97	1.01	1.08	1.03

表 2 不同故障类型下过电压

故障类型	断路器断开位置	过电压计算值/(pu)				系统过电压最大值 /(pu)
		镇海	海底电缆首端	海底电缆末端	舟山	
无故障甩负荷	镇海	0.99	0.98	0.98	0.97	1.01
	舟山	0.99	1.00	1.00	1.01	
单相接地故障	镇海	1.23	1.09	1.09	1.02	1.23
	舟山	1.05	1.15	1.15	1.23	
两相接地故障	镇海	1.24	1.16	1.16	1.01	1.24
	舟山	1.02	1.20	1.20	1.24	

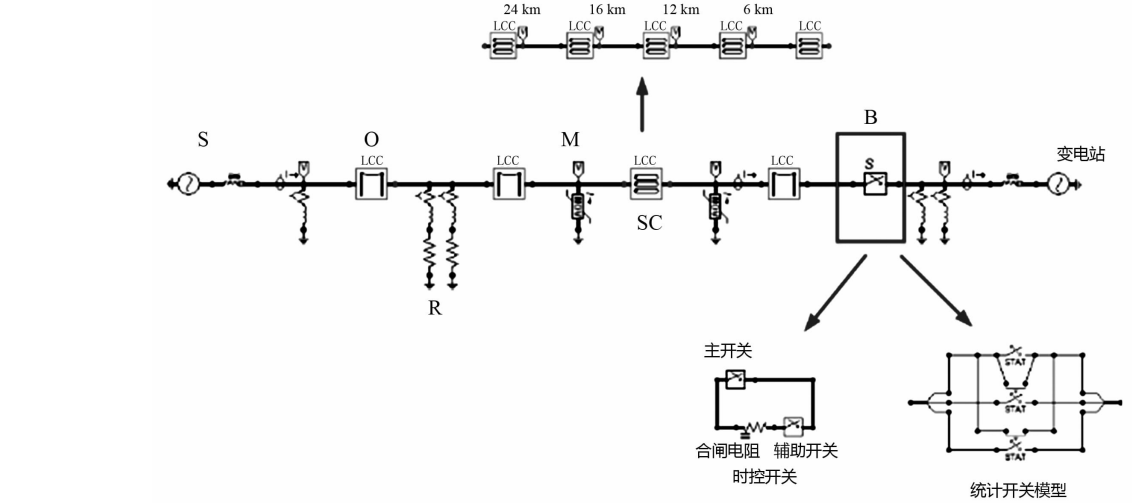


图 4 操作过电压仿真模型

由表 1 可见,有高压电抗的情况下,系统无显著的容升效应;未配置高压电抗的情况下,系统出现显著的容升效应。

不同故障类型情况下海底电缆沿线过电压如表 2 所示。可以看出,两相接地故障甩负荷时海底电缆沿线过电压值最大,为 1.24 pu。

3 操作过电压研究

操作过电压由切除空载变压器、空载线路合闸、切除空载线路等产生^[13]。仿真结果表明,空载线路合闸过电压是最严重的操作过电压类型。仿真模型见图 4 所示。

图 4 中:S 为等效电压源;R 为补偿电抗器;O 为架空线;M 为避雷器;SC 为海底交流电缆;C 为端

口电容;B 为断路器。

对于不带合闸电阻的断路器,电源峰值合闸时过电压最为严重,远离操作端的海底电缆过电压随时间变化特性如图 5 所示。

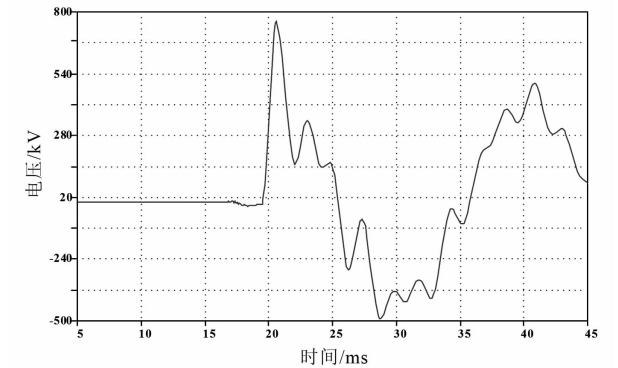


图 5 远离操作端操作过电压随时间分布

由于回路电阻较小,系统发生欠阻尼振荡。振荡的频率与线路参数有关,振荡的幅值会逐步衰减。

在末端进行操作时其过电压水平高于首端。以海底电缆末端(舟山侧)合闸为例,海底电缆沿线过电压幅值如表 3 所示。

表 3 远离操作端过电压沿线分布规律(无合闸电阻)

距海底电缆末端 距离/km	0	3	6	9	12	17
沿线过电压 幅值/kV	766.5	773.4	778.2	783.5	787.5	790.1
沿线过电压 幅值/(pu)	1.71	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76

断路器合闸电阻取 400 Ω。在电源峰值时刻主开关合闸,半周期后辅助开关合闸。海底电缆沿线过电压幅值见表 4 所示。

表 4 远离操作端过电压沿线分布规律(400 Ω 合闸电阻)

距海底电缆末端 距离/km	0	3	6	9	12	17
沿线过电压 幅值/kV	610.6	607.5	604.2	606.4	608.6	607.7
沿线过电压 幅值/(pu)	1.26	1.27	1.29	1.29	1.29	1.30

由图 6 的有无合闸电阻操作过电压的对比可见,增加合闸电阻后,系统的空载线路合闸过电压明显降低。

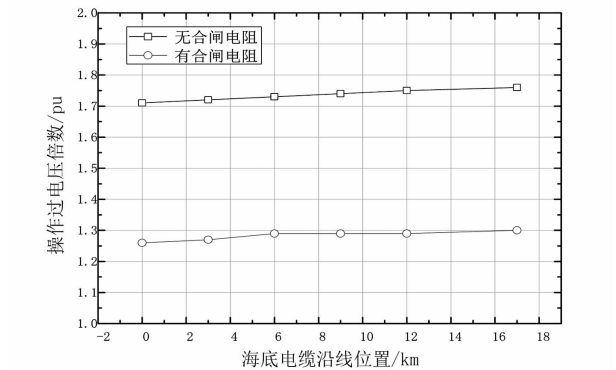


图 6 有无合闸电阻操作过电压对比

合闸时刻对系统过电压也存在较为明显的影响,当主触头在合闸电阻电压为 0 时刻合闸时,线路将直接进入稳态,而随机合闸则有可能造成震荡产生过电压,如图 7 所示。选择合适的合闸时刻对降低过电压有重要的意义。

4 雷电过电压研究

雷电过电压包括绕击和反击两种类型。下面分别对这两种情况下沿海底电缆的雷电过电压分布进

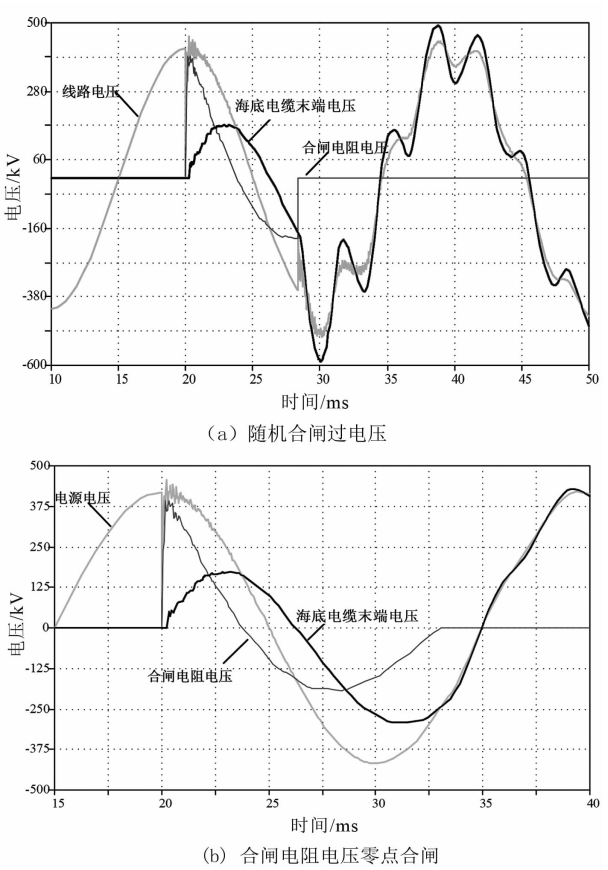


图 7 不同合闸时刻操作过电压波形

行计算。采用标准雷电流波形(2.6/50 μs 的斜角波),对进线段遭受雷电绕击及反击时海底电缆过电压进行计算。海底电缆采用 J. Marti 模型,电缆头用入口电容表示,为 1 000 pF。雷电通道波阻抗绕击时取 800 Ω,反击时取 300 Ω。绕击和反击点均取靠近终端站的架空线杆塔。仿真模型如图 8 所示,图中 S 为变电站等效电源,R 为补偿电抗器,F 为闪络判据,T 为等效杆塔模型,L 为雷电流源,O 为架空输电线路,M 为避雷器,SC 为海底电缆,C 为端口电容。

4.1 绕击过电压在海底电缆沿线分布规律

绕击计算时,采用最大绕击电流进行计算,取绕击电流峰值为 26 kA。海底电缆长度为 17 km,电源相位与雷电过电压同相位。海底电缆沿线过电压幅值分布如图 9 所示。

雷电侵入波过电压幅值表现为先减小后增大的趋势。海底电缆前面部分的过电压最大值在电缆的起点处,而电缆后面部分的过电压最大值在接近终点处,海底电缆沿线过电压最大值出现在接近终点处,为 905 kV。

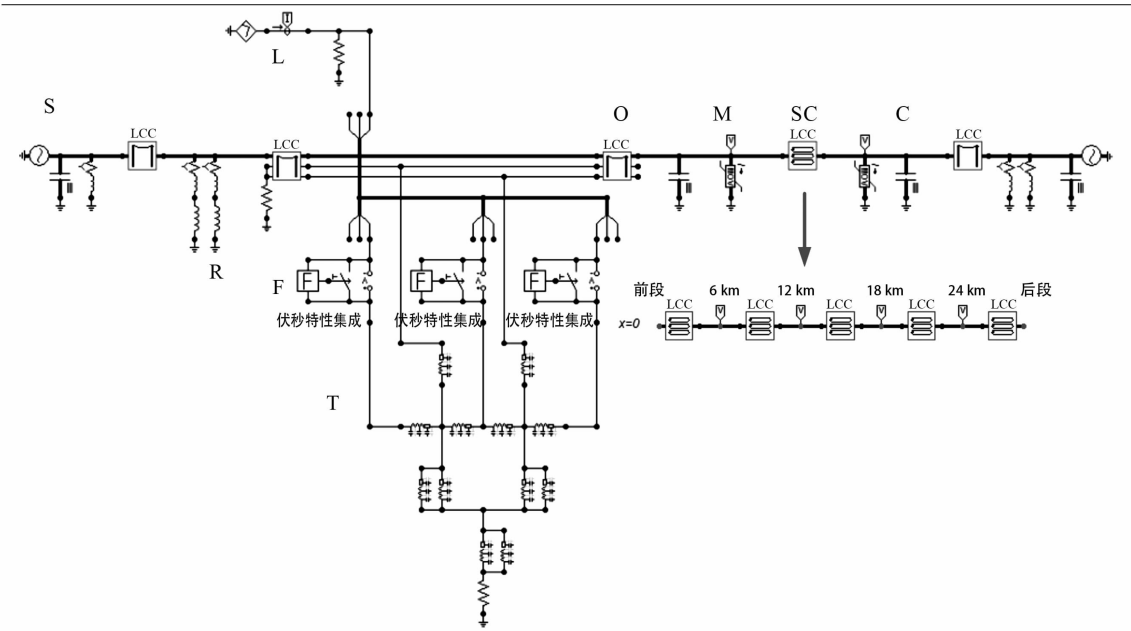


图 8 雷电工况下仿真系统

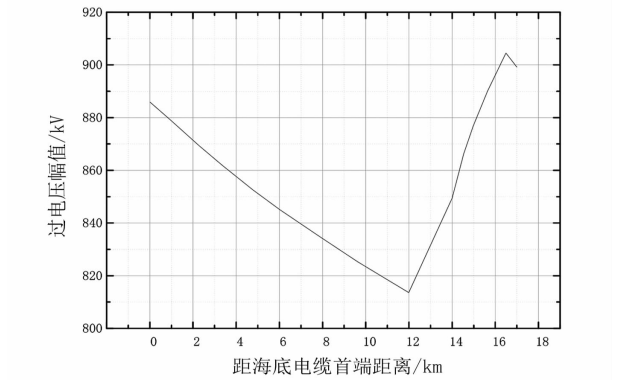


图 9 海底电缆沿线绕击过电压分布

4.2 反击过电压海底电缆沿线分布规律

参考 500 kV 变电站雷电侵入波计算中的雷电流^[12],反击雷电流取 -220 kA,考虑最严重情况即电源与雷电流反相。反击过电压沿线分布情况如图 10 所示,过电压分布规律与绕击类似,最大过电压值为 893 kV。

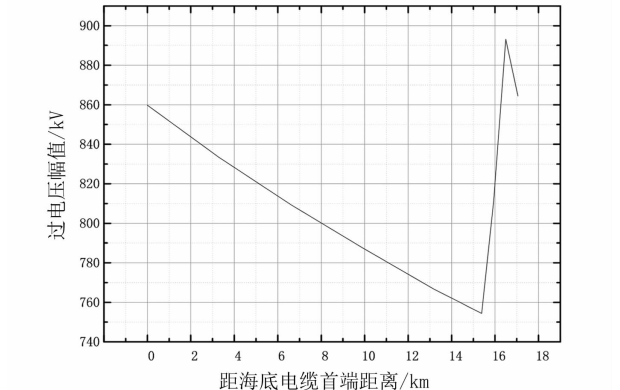


图 10 海底电缆沿线反击过电压分布

4.3 海底电缆长度对过电压幅值的影响

改变海底电缆长度,海底电缆沿线最大绕击过电压幅值随其长度变化的关系如图 11 所示。海底电缆沿线最大过电压随着海底电缆长度的增加而减小。

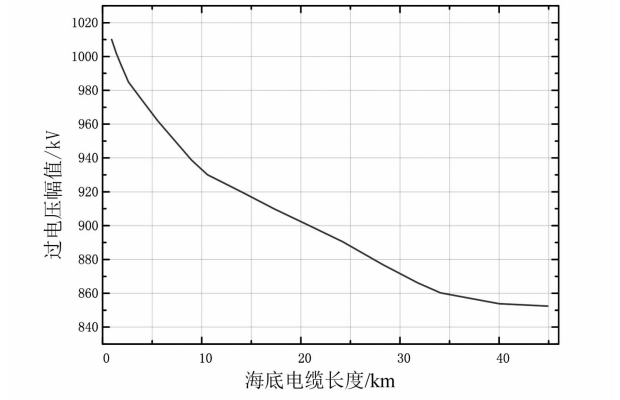


图 11 海底电缆过电压幅值与其长度关系

4.4 避雷器数量对过电压幅值的影响

避雷器为非线性电阻片,当多个避雷器并联时,并联电阻值减小,电流被多联避雷器分担,流过每支避雷器的电流减小,避雷器残压会有所降低。绕击雷电流幅值为 26 kA 时,单个避雷器和两个避雷器并联时的海底电缆末端过电压幅值对比见图 12 所示。由图 12 可见,采用避雷器并联可减小过电压幅值 4.2%。

避雷器多柱并联后海底电缆末端电压及沿线过电压最大值见图 13 所示。过电压值随避雷器并联支数的增加而减小。

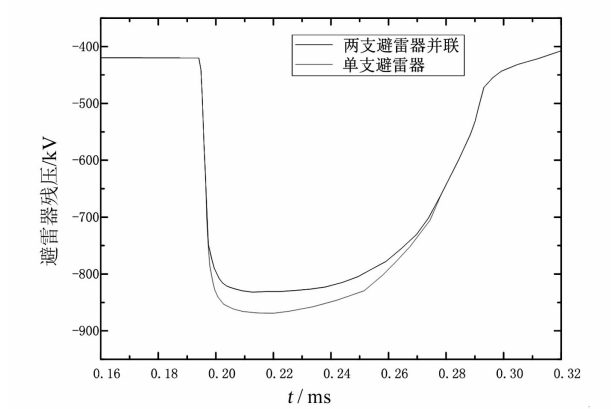


图 12 不同避雷器数量时海底电缆末端避雷器电压对比

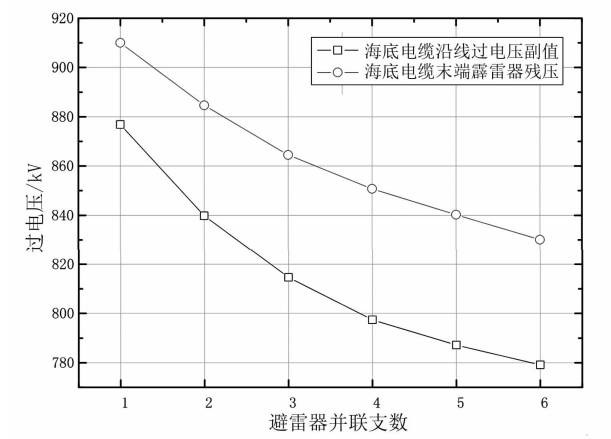


图 13 避雷器并联支数与残压关系

5 交流海底电缆系统绝缘配合

海底电缆系统的绝缘配合需根据系统中出现的各种电压和保护装置的特性来确定电缆的绝缘水平。海底电缆系统代表性过电压由系统仿真得出,根据前面仿真计算结果,镇海—舟山海底电缆系统的代表性过电压如表 5 所示。

表 5 镇海—舟山海底电缆系统代表性过电压	
过电压形式	过电压值
暂时过电压(有效值)	556 kV (1.24 pu)
操作过电压(幅值)	790 kV (1.76 pu)
雷电过电压(幅值)	905 kV (2.02 pu)

根据《绝缘配合 第 2 部分:使用导则》(GB/T 311.2 - 2013)、《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》(GB/T 50064 - 2014)和《交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则》(DL/T 804 - 2014),不同过电压类型对应的最大配合系数如表 6 所示^[8-11]。

表 6 绝缘配合系数值			
过电压类型	暂时过电压	操作过电压	雷电过电压
配合系数	1.15	1.196	1.4

综合考虑以上配合系数,海底电缆系统代表性过电压在不同绝缘配合系数下要求耐受电压如表 7 所示。

表 7 镇海—舟山海底电缆系统要求耐受电压			
过电压类型	代表性过电压 /kV	配合系数	要求耐受电压/kV
暂时过电压	556.0	1.150	639.4
操作过电压	790.1	1.196	945.0
雷电过电压	904.5	1.400	1 266.3

根据《高压电缆选用导则》(DL/T 401 - 2002), 500 kV 交流电缆操作冲击耐受电压为 1175 kV,雷电冲击耐受电压值为 1550 kV,均大于表 7 中的要求耐受电压。因此,海底电缆绝缘水平满足要求。

6 结 语

镇海—舟山 500 kV 交流海底电缆工程过电压与绝缘配合仿真计算结果表明:

- 1)暂时过电压中接地故障甩负荷时过电压水平最高,镇海—舟山海底电缆暂时过电压水平为 1.24 pu。
- 2)空载线路合闸过电压是主要的操作过电压类型,海底电缆远离操作端的过电压幅值大于靠近操作端,镇海—舟山海底电缆操作过电压水平为 1.76 pu,配置合适的合闸电阻后,操作过电压可明显降低,降为 1.30 pu。
- 3)雷电绕击侵入波过电压是主要的雷电过电压类型。由于波的折反射和避雷器的限制作用,海底电缆沿线过电压呈现先降低后升高的特点,最大过电压出现在靠近电缆末端的位置,为 2.03 pu,可采用多支避雷器并联进一步降低雷电侵入过电压水平;过电压幅值随电缆长度的增加而减小。
- 4)根据《高压电缆选用导则》(DL/T 401 - 2002)的规定,海底电缆绝缘强度满足要求,且有较大裕度。

参考文献

[1] 陈凯华. 海南联网海缆敷设施工与防护[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 25 - 26.

(下转第 66 页)

500 kV GIL 管廊接地系统分析

赵新宇¹,张益赓¹,贾振宏¹,张瑞永¹,吴述关¹,谭沛文²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102;
2. 东南大学电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘 要:气体绝缘金属封闭输电线路的接地系统对该输电方式的稳定可靠运行至关重要。基于 CDEGS 仿真软件对某实际 GIL 综合管廊工程的接地系统进行了研究,建立了 GIL 综合管廊接地系统模型,对接地系统的接地电阻、跨步电压、接触电压以及地电位升等电气特性参量进行计算分析,研究了接地网的深度、混凝土电阻率、入地点的个数、钢筋主支架等因素对 GIL 管廊电气特性的影响规律,提出了较为优化的接地系统。结果表明,混凝土结构钢筋作为自然接地体对 GIL 电气特性的影响最大,入地点个数对 GIL 电气特性的影响最小。优化的接地系统为 GIL 综合管廊的建设和运维提供了依据。

关键词:GIL 输电;接地系统;接地电阻;跨步电压;接触电压;地电位升

中图分类号:TM86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0059-04

Analysis of 500 kV GIL Tube Grounding System

Zhao Xinyu¹, Zhang Yigeng¹, Jia Zhenhong¹, Zhang Ruiyong¹, Wu Shuguan¹, Tan Peiwen²

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd.,
Nanjing 211102, Jiangsu, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University,
Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract:The grounding system of gas insulated metal enclosed transmission line (shorted for GIL) is very important for the stable and reliable operation of the transmission mode. The grounding system of an actual 500 kV GIL project is studied based on CDEGS. Its grounding system model is established, and the electrical characteristic parameters such as earth resistance, step voltage, touch voltage and earth potential rise are calculated and analyzed. The influence rules of the depth of grounding grid, the concrete resistivity, the number of earth points and the main structure steel on the electrical characteristics of GIL grounding system are studied. The results show that the reinforced concrete structure as a natural grounding body has the greatest influence on the electrical characteristics of GIL, and the number of earth points has the least impact on the electrical characteristics of GIL. The optimized grounding system of GIL provides a basis for the construction and operation of GIL utility tunnel.

Key words:GIL transmission; grounding system; earth resistance; step voltage; touch voltage; earth potential rise

0 引 言

目前,城市用电需求越来越大,而大规模发电装置通常远离负荷中心,需要长距离、高可靠和高效的特高压输电线路^[1-4]。由于采用架空线的特高压长距离输电线路的铁塔很高、导线束很大,受场地限制,不能在任何地方都实现。而气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)具有输电容量大、占地少、维护量小、环境影响小等显著优

点,逐渐成为特殊环境下替代架空线路的首选。

类似于输电线路接地系统,GIL 的接地系统对 GIL 稳定运行起着重要作用,它直接影响管廊内部工作人员的生命安全,对地面上的行人也有着影响。目前的研究主要是针对 GIL 外壳环流和外壳接地^[5-7],对于 GIL 接地系统少有涉及。

基于某实际 GIL 综合管廊工程的设计参数,采用 CDEGS 软件,建立 GIL 管廊三维仿真模型,研究分析接地网的深度、入地点的个数、混凝土电阻率、是否考虑钢筋主结构等因素对 GIL 系统接地电阻、

接触电压、跨步电压以及电位升的影响,从经济和安全
的角度提出最合适的接地结构。

1 GIL 接地模型

1.1 舱内结构及模型

GIL 管廊建于地面下 2 m 处,总长度为 330 m,混凝土墙壁厚度为 0.25 m。管廊内有 500 kV 单回路交流输电线路,布置在管廊的左侧,沿管廊每隔 20 m 设置长 0.843 m 的金属支架,GIL 本体放置在金属支架上,相间距为 0.85 m。金属支架固定于混凝土墙壁,并与接地母线相连,接地母线通过接地引线与管廊底部的接地网相连接。

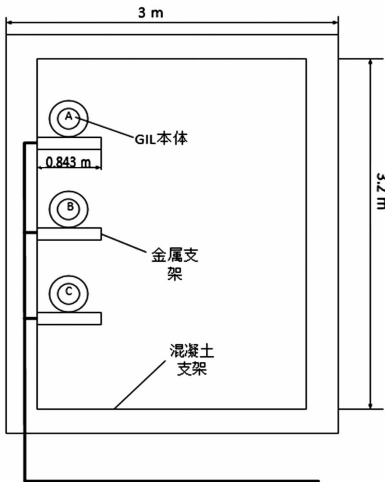


图 1 GIL 舱结构断面

接地母线和接地引线均采用截面为 50 mm × 5 mm 的铜排,接地网埋在 GIL 管廊下方,面积为 3 m × 330 m。接地网横向取 20 根导体棒,纵向取 7 根导体棒。此外铜排接地干线两端引出与接地网相连,铜排与接地网不少于 2 个连接点^[9],这里取在前端位置连接。

根据实测数据和软件仿真的结果,将土壤电阻水平分为 1 层,土壤电阻率为 28 Ω · m。

根据上述条件,基于仿真软件 CDEGS 建立 GIL 管廊接地模型,接地系统局部截面图如图 2 所示,其管廊局部截面图如图 3 所示,混凝土电阻率取值范围为 500 ~ 20 000 Ω · m^[8],接地网的深度取在 GIL 底部下侧 0.8 ~ 2 m 处,观测面设置在管廊隧道底部,距离地面深度为 5.45 m。

1.2 接地系统电气特性分析

基于上述 GIL 模型,将短路入地电流激励设在

接地网前端入地点上,设置短路入地电流激励因子为 10 kA,计算接地系统电气特性参数;设置混凝土电阻率为 3000 Ω · m,计算接地系统的接地电阻值为 0.125 1 Ω。

观测接地网电气特性参数,其跨步电压分布如图 4 所示,跨步电压最大值为 282.76 V,主要分布在管廊的末端,中间管廊处跨步电压很低,分布也比较均匀。

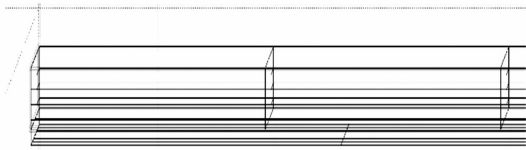


图 2 GIL 接地系统 Y - Z 平面

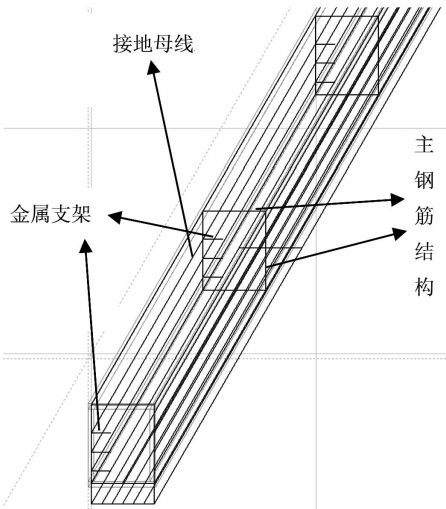


图 3 GIL 管廊三维平面

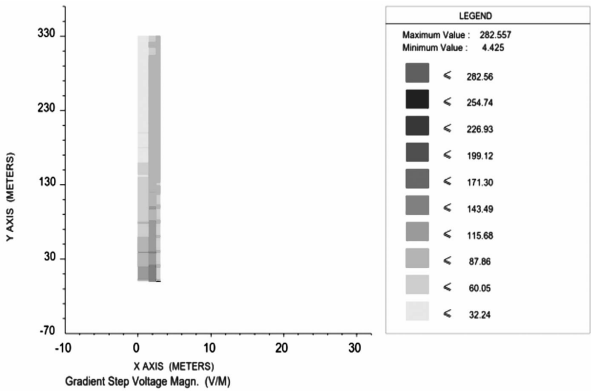


图 4 接地模型跨步电压云图

接触电压分布如图 5 所示,可以看出,接触电压的最大值为 480.668 V,位于两边的入地点附近,远离入地点的方位,接触电压逐渐减小。

地面最大电位升为 530.245 V,与接触电压相似,随着远离入地点的方向,地电位升逐渐降低,如图 6 所示。

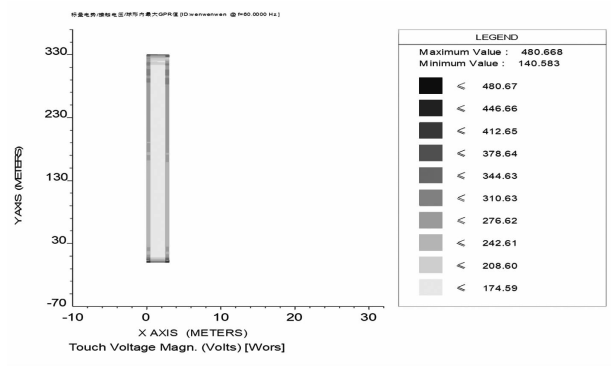


图5 接地模型接触电压云图

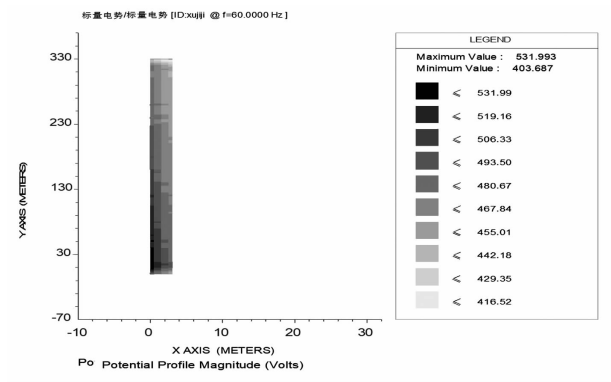


图6 接地模型地电位升云图

根据 IEEE 标准计算的接触电压和跨步电压的安全阈值如表 1 所示。根据表 1 可知,在故障切除时间为 0.250 s 和 0.500 s 时,最大跨步电压和接触电压小于允许的最大限值。所以,接地网设计总体符合计算要求,是较为接近实际的一种模型。

表 1 CDEGS 电气特性安全阈值标准

0.5 s 跨步 电压/V	0.5 s 接触 电压/V	0.25 s 跨步 电压/V	0.25 s 接触 电压/V
1 441.6	518.7	1 947.4	700.8

2 接地网的组成对接地特性参数的影响

2.1 入地点的个数对接地特性参数的影响

由于工程要求,此 GIL 接地系统的入地点不少于 2 个,将多个入地点加入系统中,为电流提供了多个路径,起到了一定的分流作用。入地点个数对接地系统电气特性的影响如表 2 所示。

随着入地点个数的增加,接地电阻、接触电压、跨步电压、地电位升会略微下降,但下降幅度很小。入地点个数对接地特性参数基本没有影响。

2.2 地网的深度对接地特性参数的影响

出于人身安全考虑,设计院一般规定的标准为接地网距离 GIL 管廊底部 0.8 m 以上^[10]。这里的 GIL 接地网沿着 GIL 管廊铺设,埋设的难度不大,所

考虑的接地网距离 GIL 底部 0.8 ~ 2 m。接地网入地深度对接地系统特性的影响如表 3 所示。可以看出,随着接地网入地深度的增加,接地电阻值分别下降了 2.7%、4.6%、8.2%、10.39%、11.83%,接触电压、跨步电压、地电位升也有明显下降。接地网入地深度对接地网特性的影响较大。

表 2 入地点个数对接地系统接地特性的影响

入地点 的个数	接地电阻值 /Ω	接触电压 /V	跨步电压 /V	地电位升 /V
1	0.125 60	481.840	283.29	531.630
2	0.125 10	480.668	282.76	530.245
3	0.125 08	478.540	281.45	529.870
5	0.125 07	476.250	280.19	528.950
9	0.125 05	475.370	278.86	526.210
13	0.125 02	472.660	277.14	524.350

表 3 接地网与 GIL 管廊距离对接地系统接地特性的影响

接地网与 GIL 的距离/m	接地电阻 /Ω	接触电压 /V	跨步电压 /V	地电位升 /V
0.8	0.125 1	480.668	282.76	530.245
1.0	0.121 7	475.930	280.15	523.610
1.3	0.119 3	470.540	278.32	518.950
1.5	0.114 8	466.380	276.62	512.340
1.8	0.112 1	462.890	274.36	506.780
2.0	0.110 3	458.640	272.95	500.230

3 混凝土结构钢筋对特性参数的影响

3.1 混凝土电阻率对接地电阻的影响

混凝土中主结构钢筋可形成 2 个竖直平面的辅助接地系统,起到了良好的分流效果。同时混凝土的电阻率与周围水分联系紧密,会在晴天与下雨天有所不同^[9]。表 4 为不同混凝土电阻率条件下接地系统的接地电阻,其接触电压、跨步电压分别如图 7、图 8 所示。

表 4 混凝土电阻率对接地系统接地电阻的影响

混凝土电阻率 /(Ω·m)	接地电阻 /Ω	接触电压 /V	跨步电压 /V	地电位升 /V
3000	0.125 10	480.67	282.76	530.24
1200	0.159 10	368.41	188.80	405.69
500	0.107 28	300.29	150.40	374.56

由计算结果可知,当混凝土电阻率由 $3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 下降为 $1200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,接地电阻下降了 7.3%;当混凝土电阻率由 $3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 下降为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,接地电阻下降了 14.2%。接触电阻下降对接触电压和跨步电压也有较大影响,当混凝土电阻率由 $3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 下降为 $1200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,接触电压最大值由 480.67 V 下降为 368.41 V,跨步电压最大值由 282.78 V 变为 188.8 V。当混凝土电阻率降低时,接地网的电阻值降低,从而导致接触电压和跨步电压减小。

3.2 不考虑混凝土主结构钢筋对接地系统的影响

断开混凝土主结构钢筋与铜排接地干线和接地网的连接,计算接地网电气特性,结果如表 5 所示。

表 5 钢筋结构对接地系统电气特性的影响

接地参数	接地电阻 / Ω	接触电压 /V	跨步电压 /V	地电位升 /V
考虑钢筋 混凝土影响	0.125 1	480.67	282.76	530.24
不考虑钢筋 混凝土影响	0.142 0	898.50	411.58	1 080.50
变化率/%	13.6	81.9	45.6	103.78

同考虑主结构钢筋作为辅助接地系统时相比,不考虑主结构钢筋时的接地电阻值升高了约 13.6%,跨步电压、接触电压、地电位升的最大值在相同条件下分别增加了 45.6%、81.9% 和 103.78%,超过所允许的最大接触电压限值。这是因为主结构钢筋镶嵌在混凝土里组成辅助接地网,辅助接地网与接地网串联形成接地系统。不考虑主结构钢筋时,入地电流的路径减少,接地系统的接地电阻值增加,导致了接触电压、跨步电压和地电位升的增加。根据上述分析可知,钢筋混凝土结构可以有效降低接触电压、跨步电压和地电位升,在实际应用中应该考虑。

4 结 语

针对某 500 kV 线路改迁工程的 GIL 管廊接地系统进行了分析研究,主要分析了 GIL 在故障情况下的接触电压、跨步电压、地电位升,研究了入地点个数、接地网的入地深度、混凝土电阻率和混凝土钢筋结构对接地网特性的影响,结果表明:

- 1)入地点个数对接地特性影响很小,一般设置 2 个比较好。
- 2)接地网的埋设深度对接地特性影响较大,接地网埋设越深,接地电阻、接触电压和跨步电压越小,但是综合成本考虑最好埋设在 GIL 管廊底部 1.2 ~ 1.5 m 处。
- 3)在考虑钢筋支撑结构的条件下,混凝土电阻率对接地特性影响很大。GIL 接地设计时不可忽略钢筋主结构对接地系统的影响。

参考文献

[1] 汤亮亮,刘刚,吴敏,等. GIL 管廊结构参数对接地系统电气特性参数的影响[J]. 电网技术,2019,43(8): 3032 – 3038.

[2] 王亚楠,丁卫东,苟杨,等. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)接地问题探讨[J]. 高压电器,2016,52(4):98 – 102.

[3] 王通德,王晓琪,万方华,等. 高压交流 GIL 的设计与应用[J]. 高压电器,2014,50(10):107 – 111.

[4] 高延庆,何金良,曾嵘,等. 非均匀土壤中变电站接地网优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(3):345 – 348.

[5] 庞亚东,倪敏. 1000 kV GIS(HGIS)接地设计方案[J]. 电力建设,2010,31(1):49 – 52.

[6] H Koch,A Schuette. Gas Insulated Transmission Lines for High Power Transmission over Long Distances[J]. Electric Power Systems Research,1998,44(1):69 – 74.

[7] 范建斌,李鹏,李金忠,等. $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(13): 1 – 7.

[8] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466 – 1473.

[9] 冶海廷,王亦平,马仲鸣. 拉西瓦水电站 800 kV GIL 结构特点及安装试验[J]. 水力发电,2009,35(11): 60 – 62.

[10] 李鹏,颜湘莲,王浩,等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J]. 电网技术,2017,41(10):3161 – 3167.

作者简介:

赵新宇(1978),硕士,高级工程师,从事输电线路设计研究。

(收稿日期:2019 – 12 – 18)

六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究

罗 洋,董汉彬,王嘉易,谢 茜

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:随着电力设备制造水平的快速提升,以六氟化硫(SF₆)气体作为绝缘介质的高压电器具有绝缘和灭弧性能强、缩减设备占地面积等优点,在变电站中大量使用。然而,由于设备制造、环境等因素造成 SF₆ 气体泄漏,将直接影响高压电器的安全运行。SF₆ 气体泄漏成像仪的检出灵敏度高且又不用直接接触高压设备,是用于现场定位泄漏点的理想仪器。在探讨了 SF₆ 气体红外成像技术的基础上,重点研究了 SF₆ 气体泄漏成像与泄漏速率、检测距离和检测背景的关系,并对运行变电站的 GIS 设备开展了 SF₆ 气体泄漏现场检测,为技术人员现场检漏工作提供参考。

关键词:六氟化硫;激光;红外辐射;背景;检漏

中图分类号:TM506 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0063-04

Research on Detection Methods of SF₆ Gas Leakage Imager

Luo Yang, Dong Hanbin, Wang Jiayi, Xie Qian

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the rapid improvement of power equipment manufacturing level, sulfur hexafluoride (SF₆) as insulating medium for high-voltage electrical appliances is widely used in substation, which has the advantages of strong insulation and arc performance, reducing the occupied area of the equipment etc. However, leakage of SF₆ gas resulting from equipment manufacturing, environment and other factors will directly affect the safe operation of high-voltage electrical appliances. SF₆ gas leakage imager has high sensitivity of detection and can be used without contacting high voltage equipment directly, it is also the ideal instrument which can be used for locating the leakage points. The SF₆ gas infrared imaging technology is discussed, which focuses on the relationship between SF₆ gas leakage imaging and leak rate, detection distance as well as the background. Meanwhile, the field detection of SF₆ gas leakage is carried out for GIS equipment in substation, which provides a reference for technical personnel.

Key words: sulfur hexafluoride (SF₆); laser light; infrared radiation; background; leakage detection

0 引 言

六氟化硫(SF₆)气体无色、无味、无毒、不燃烧,具有优良的绝缘和灭弧性能,被广泛应用于断路器、气体绝缘金属封闭式组合电器(GIS)等高压电器中^[1-2]。然而,由于设计施工不合理、制造安装不规范和自然环境恶劣等因素影响,造成高压电器出现尺寸偏移、裂纹、砂眼、受潮等缺陷而发生 SF₆ 气体泄漏。SF₆ 气体泄漏不仅会给大气环境造成严重的污染,而且当泄漏量超过一定阈值时,高压设备的内部绝缘性能会下降,极易在高压设备中出现闪络或

击穿现象。因此,在结构复杂的高压电器中,如何正确使用泄漏检测仪器并快速准确地查找这种无色、无味气体的泄漏部位显得尤为重要。

下面针对 SF₆ 气体的红外吸收特性,采用 SF₆ 气体泄漏成像技术,重点开展了 SF₆ 气体泄漏成像情况与泄漏速率、检测距离和测试背景的关系研究。同时,在此研究基础上,对运行变电站的 GIS 设备开展了 SF₆ 气体泄漏现场检测,为技术人员开展现场快速带电查找 SF₆ 气体泄漏部位提供了应用参考。

1 SF₆ 气体红外吸收理论

根据能级跃迁理论,不同的气体分子对入射光具有

不同的选择吸收性,而 SF₆ 气体对以波长为 10.55 μm 为中心的红外光谱带具有很强的吸收作用^[3]。图 1 为 SF₆ 气体红外吸收特性,明显看出 10.55 μm 波长的红外光在 SF₆ 气体中的透过率极低。因此,可以利用 SF₆ 气体对特定波长的红外光强吸收特性,在红外的光照射下区别是 SF₆ 气体还是空气,实现 SF₆ 气体的快速辨识。

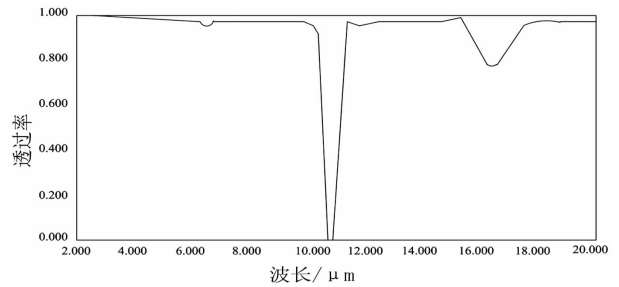


图 1 SF₆ 气体红外吸收特性

2 SF₆ 气体泄漏检测方法

2.1 SF₆ 气体泄漏激光成像技术

SF₆ 气体泄漏激光成像检测技术是利用 SF₆ 气体对特定波长的红外光吸收性能较空气强的特性^[4],通过激光发射系统发出的红外光入射到被检测区域的物体上,并在物体表面上反射,其反射光沿着原来的光路重新返回到检测设备处。一部分特定波长的入射激光遇到泄漏的 SF₆ 气体,其能量会被吸收一部分;而另外一部分入射激光遇到的是空气,其能量相对 SF₆ 气体而言吸收较少。所以穿过 SF₆ 气体和空气的红外光遇到物体表面再反向散射回探测器的红外光能量存在差异,自然各自的激光成像也不同,由此可发现 SF₆ 气体泄漏。SF₆ 气体泄漏激光成像仪可实现泄漏点的精确定位,但在使用时必须有反射背景,否则入射激光无法在物体表面反射并回到检测设备处成像。其检测原理如图 2 所示。

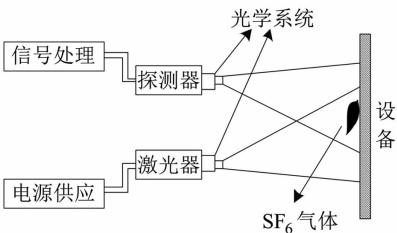


图 2 SF₆ 气体泄漏激光成像技术

2.2 SF₆ 气体泄漏红外辐射成像技术

所有温度大于绝对零度(- 273℃)的物体表面

都会发射出红外辐射,且 SF₆ 气体的红外吸收特性较空气而言极强,致使两者反应的红外影像不同^[6]。因此,利用 SF₆ 气体和空气的红外吸收特性不同,将通常可见光下看不到的 SF₆ 气体泄漏,以红外图像的形式直观地反映出来,具有无需外加激光发生源、无需检测背景、检测方便等优点。其检测原理如图 3 所示。

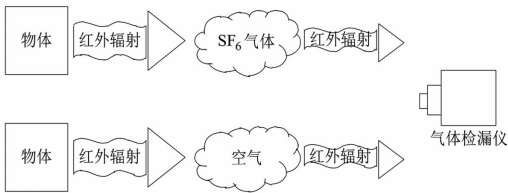


图 3 SF₆ 气体泄漏红外辐射成像技术

该项技术对 SF₆ 气体泄漏成像仪中红外焦平面探测器的性能要求十分高。根据制冷方式,红外焦平面探测器可分为制冷型和非制冷型,制冷型探测器的探测率通常能达到 10¹¹ cmHz^{1/2} W⁻¹,而非制冷型探测器为 10⁹ cmHz^{1/2} W⁻¹,相差两个数量级^[7]。因此,在快速、准确定位泄漏点中,制冷型探测器的 SF₆ 气体泄漏成像仪较非制冷型探测器的 SF₆ 气体泄漏成像仪具有明显优势,并且制冷型探测器的响应速度是微秒级,非制冷型探测器的响应速度是毫秒级。但制冷型探测器的 SF₆ 气体泄漏成像仪仍然有不足之处,就是启动时间较长,仪器需要用较长的时间进行自校正。

除此之外,无论是制冷型还是非制冷型红外焦平面探测器,其半导体材料的选取和探测元阵列数都是影响探测效果的关键因素。例如,即便同属于制冷型的量子阱红外探测器,也可分为光导型量子阱材料(GaAs/ AlGaAs)和光伏型量子阱材料(InAs/ InGaSb、InAs/ InAsSb)等类型,其探测波长范围、探测率和温度灵敏度等参数各自也会不同。

2.3 SF₆ 气体泄漏检测方法对比

传统的高压电气设备 SF₆ 气体泄漏检测方法主要有: 皂水法、包扎法及使用手持式普通检漏仪等^[8],通常需要接触设备或靠近漏点,对于敞开式断路器或 GIS 的出线套管这些部位仍需要设备停电进行,并且技术人员需要根据气室压力是否有明显下降,对泄漏点所在范围有初步的判断后才便于实施。各检测方法特性对比见表 1。

表 1 检测方法特性对比

检测方法	检测形式	检测距离	精度	是否断电	背景
皂水法	被动	近程	定性	否	无需
包扎法	被动	近程	定性	是	无需
卤化物检测	主动	近程	极低	是	无需
真空监测	被动	近程	定性	是	无需
激光成像	主动	约 100 m	定性	否	需要
红外辐射成像	被动	约 50 m	定性	否	无需

SF₆气体泄漏激光、红外辐射成像仪相比传统方法虽有较为突出的优点,但在全站普测应用中,其工作量仍然较大。因此,仍然建议首先观察气室压力,且发现压力有明显下降后,在该气室范围内开展 SF₆气体泄漏激光或红外辐射成像检测。

3 SF₆气体泄漏成像检测分析

3.1 实验室检测分析

目前,SF₆气体泄漏成像仪已在高压电器泄漏点的查找工作中逐步应用,但 SF₆气体泄漏速率、检测距离和检测背景对泄漏成像效果的影响情况并不是十分清楚。为此,在实验室模拟出不同泄漏速率的 SF₆气体泄漏,使用 SF₆气体泄漏激光成像仪和 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(选用制冷型探测器),开展检测距离分别为 1 m 和 5 m、检测背景分别为白色墙体和金属面板的泄漏检测试验。

1) 白色墙体为检测背景

以白色墙体为检测背景,分别在检测距离为 1 m 和 5 m 的情况下,调节模拟泄漏源的泄漏速率,其成像效果见表 2。

表 2 白色墙体为检测背景下的成像效果

泄漏速率 /($\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	红外辐射成像效果		红外激光成像效果	
	1 m	5 m	1 m	5 m
4.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
3.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
2.0	清晰	较清晰	清晰	不可见
1.5	清晰	不可见	清晰	不可见
1.0	清晰	不可见	较清晰	不可见

由表 2 可知,以白色墙体为背景,在检测距离 1 m 的检出情况优于 5 m,并且气体泄漏速率越大越易

检出。无论 1 m 还是 5 m 距离,当泄漏速率较小,低于 2 $\mu\text{L}/\text{s}$ 时,SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出效果比 SF₆气体泄漏激光成像仪好。

2) 金属面板为检测背景

以金属面板为检测背景,分别在检测距离为 1 m 和 5 m 的情况下,调节模拟泄漏源的泄漏速率,其成像效果见表 3。

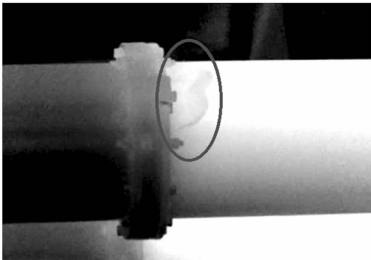
表 3 金属面板为检测背景下的成像效果

泄漏速率 /($\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	红外辐射成像效果		红外激光成像效果	
	1 m	5 m	1 m	5 m
4.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
3.0	清晰	较清晰	清晰	不可见
2.0	清晰	不可见	清晰	不可见
1.5	清晰	不可见	清晰	不可见
1.0	清晰	不可见	清晰	不可见

由表 3 可知,以金属面板为背景,在检测距离 1 m 的检出情况优于 5 m,并且气体泄漏速率越大越易检出。在 5 m 距离情况下,当泄漏速率较小,低于 3 $\mu\text{L}/\text{s}$ 时,SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出效果比 SF₆气体泄漏激光成像仪好。

3.2 变电站检测应用情况

某 220 kV 变电站 220 kV GIS 设备 A 相穿墙气室,补气周期为半年一次,分别使用 SF₆气体泄漏激光成像仪和 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)在距离泄漏点 2 m 处检测,其成像效果如图 4 所示。



(a) SF₆气体泄漏红外辐射成像仪检测



(b) SF₆气体泄漏激光成像仪检测

图 4 变电站 SF₆气体泄漏检测情况

由图4可知,在距离泄漏点2 m处检测,SF₆气体泄漏激光成像仪和SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出清晰度差异不大,但呈现效果仍然是SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)较优。

4 结 语

前面利用激光成像仪和红外辐射成像仪开展了SF₆气体泄漏速率、检测距离和检测背景对泄漏成像效果的影响分析,发现检测仪器距离泄漏源的距离越近越容易检出泄漏;在相同距离、相同背景的情况下,泄漏速率越大越容易检出泄漏;白色墙体为背景的检出效果好于金属面板。

对于变电站GIS母线、开关等靠近地面安装的气室,较容易找到GIS壳体为背景的检测角度且可实现1 m左右的近距离检测,则SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)与SF₆气体泄漏激光成像仪均可较好使用;对于变电站GIS出线套管、换流站GIL及其他远离地面安装的气室,较难通过调整检测角度找到反射物体且需要远距离(一般大于2 m)检测,则SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)成像效果比SF₆气体泄漏激光成像仪好。

(上接第58页)

[2] 张勇,陈建斌,余畅,等. 联网后海南电网与主网严重故障下的相互影响及解列措施研究[J]. 南方电网技术,2009,3(5):50-53.

[3] 应启良,徐晓峰,孙建生. 海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[4] 张张国. 电缆故障分析与测试[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[5] Zubiaga M, Abad G, Barrena J A, et al. Spectral Analysis of A Transmission System Based on AC Submarine Cables for an Offshore Wind Farm[C]//Conference of IEEE Endustrial Electronics, IEEE, 2010.

[6] Bui - Van Q, Beaulieu G, Huynh H, et al. Overvoltage Studies for the St. Lawrence Rriver 500 - kV DC Cable Crossing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(3):1205-1215.

[7] Henriksen T, Gustavsen B, Balog G, et al. Maximum

参考文献

[1] 李玉海,路自强,李后顺,等. 红外成像检漏技术在青海电网SF₆电气设备泄漏检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(12):130-134.

[2] 林敏,杨景刚,贾勇勇,等. 电气设备SF₆气体检漏技术研究与应用[J]. 江苏电机工程,2014,33(4):27-29.

[3] 叶涛,尹建波,王瑞军. 红外成像技术在SF₆断路器气体检漏中应用[J]. 内蒙古电力技术,2010,28(4):31-33.

[4] 弓艳朋,毕建刚,杨圆,等. SF₆气体泄漏成像仪校验技术研究[J]. 电测与仪表,2014,51(14):92-95.

[5] 郭利民. 基于红外吸收原理SF₆气体在线检漏仪的设计[D]. 郑州:郑州大学,2011.

[6] 高树国,郑爱全,耿江海,等. 应用激光成像技术检测SF₆气体泄漏[J]. 高压电器,2010,46(3):103-105.

[7] 喻新发,闫荣鑫,钟亮,等. 航天器红外成像检漏方法研究[J]. 航天器环境工程,2012,29(2):220-225.

[8] 胡伟涛,隋少臣,韩建波. 红外检漏成像仪在SF₆电气设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2010,46(10):90-93.

作者简介:

罗 洋(1986),硕士,高级工程师,从事高电压技术研究。
(收稿日期:2019-12-11)

Lightning Overvoltage along A Cable Protected by Surge Arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):859-866.

[8] 绝缘配合 第2部分:使用导则:GB/T 311.2-2013[S],2013.

[9] Insulation co-ordination - Part 2: Application guide:IEC 60071-2-1996[S],1996.

[10] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064-2014[S],2014.

[11] 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则:DL/T 804-2014[S],2014.

[12] 李炬添. 海上风电场海底高压电缆雷电过电压研究[J]. 电工技术,2012(12):45-46.

[13] 王梅义,吴竞昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

作者简介:

李浩原(1987),博士,工程师,从事输变电工程设计。
(收稿日期:2019-12-05)

智能变电站二次设备缺陷试验验证方法

李霞¹,周文越²,朱鑫²,丁宣文²

(1. 国网成都供电公司,四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:为缩短消缺时间、提高消缺效率,智能变电站二次设备的消缺工作通常未深究缺陷产生的根本原因,缺陷处理过程简单、表面,导致缺陷无法彻底消除,使得相同缺陷可能再次发生。因此,为查明缺陷产生的根本原因,将缺陷产生的原因定位到芯片级、原理级,通常需要对缺陷设备开展深层次缺陷查找、分析工作。基于上述原因,对智能变电站二次设备缺陷的验证和试验方法进行了研究,提出了一种缺陷验证和试验技术。

关键词:智能变电站;二次设备;缺陷处理;试验验证

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0067-03

Defect Test Verification Method for Secondary Equipment of Smart Substation

Li Xia¹, Zhou Wenyue², Zhu Xin², Ding Xuanwen²

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to shorten the time of defect elimination and improve the efficiency of defect elimination, the defect elimination of secondary equipment in smart substation usually does not go into seriously the root cause of defects. The defect treatment process is simple and superficial, so that the defects cannot be completely eliminated. Therefore, in order to find out the root cause of defects, the cause of defects is located at the chip level and the principle level, and usually a deep defect detection and analysis for defective equipment is needed. Based on the above reasons, the verification and test methods of defects of secondary equipment in smart substation are studied. A defect verification and testing technique is proposed.

Key words:smart substation; secondary equipment; defect treatment; test verification

0 引言

随着国家电网公司对二次设备运行管理要求的提高,二次设备的缺陷管理也越来越规范和严格。二次设备的缺陷处理从现场消缺到事后整改,需形成闭环^[1-3]。然而智能变电站的现场消缺工作通常仅对缺陷设备进行简单的处理,使其能满足变电站的运行需求即可。在大多数情况下,二次设备发生缺陷的具体原因并未完全查清,导致消缺后的二次设备可能会再次发生相同的缺陷。因此,为进一步分析智能变电站二次设备缺陷产生的原因,防止类似缺陷再次发生,使整个缺陷处理过程形成闭环,对

智能变电站二次设备缺陷试验验证技术开展研究,建立了二次设备缺陷试验验证体系,提出智能变电站二次设备缺陷试验验证的通用方法。

1 二次设备缺陷试验验证体系

目前,智能变电站二次设备缺陷处理存在以下3个问题:

1)缺陷定位不准确。随着大量电子器件以及光纤的使用,传统的二次回路^[4-5]大量简化,大量元件集成于二次设备的内部插件中。这减少了变电站二次回路数量,简化了变电站二次设备外部接线,对缩短变电站的建设周期、缩小变电站占地面积等都

起到了积极的作用。但是,集成化的元器件、光纤化的二次回路往往导致二次设备在发生缺陷时,仅能定位至装置级、插件级,很难定位到芯片级、原理级,导致缺陷准确定位困难。

2) 缺陷分析不透彻。高集成化的二次设备使得部分回路、元器件变得不可见,同时复杂的运行环境、有限的辅助手段导致设备缺陷原因分析不透彻。因此,二次设备缺陷的分析不仅需要通过现场的理论和经验分析,更需要在实验室对缺陷的原因及整改措施进行分析论证。

3) 缺陷整改不彻底。二次设备缺陷定位模糊、分析不透彻,增大了缺陷整改的难度,导致缺陷的整改往往仅能更换插件或装置。这无形中扩大了缺陷整改的范围。整机或插件的更换不仅增加了运维成本,也使得各器件未得到充分的利用,造成资源的浪费;另一方面,由于缺陷的原因并未完全查清,缺陷整改后,相同的缺陷可能再次发生,进一步增加了工作量和运维成本。

由于以上的这些问题,需对二次设备缺陷开展高效、全面的再分析工作^[6]。建立二次设备缺陷试验验证体系,如图 1 所示。各部分别如下:

- 1) 基本理论
- 仿真技术、保护原理、标准化设计规范等基本理论、规范构成了试验验证技术的理论基础。对于仿真技术而言,在电力系统事故或装置缺陷事后分析中往往需要在一定的环境中对预判进行辨别验证,而电力系统的特殊性决定了系统在发生故障时的不可复制性。因此,为进行多装置、多类型二次设备的协同整体分析,通常需要一些涉及系统级的缺陷分析如定值配合问题、缺陷定位排查等采用在一些专

用软件中建模仿真,以对推测结果进行测试验证。保护原理描述了二次设备应具备的具体功能,在二次设备发生缺陷时,其外在表现可能与保护原理的要求不一致,以此来进行缺陷原因的分析。IEC 61850、标准化设计规范则明确了二次设备信息传递的要求和需具备的功能。

2) 试验验证技术

二次设备缺陷试验验证主要包括两个阶段:缺陷原因分析阶段和整改措施验证阶段。

在缺陷原因分析阶段,主要依靠继电保护相关知识、专业经验或仿真分析,依据 SOE 记录或故障录波记录对二次设备的缺陷原因进行推断,得到设备缺陷的可能原因,并对推测的原因进行试验验证。分析二次设备缺陷的推理方法主要包括顺序推理法、逆序推理法以及整组试验^[7]法。顺序推理法是从缺陷设备的外在反映出发,按正向的逻辑寻找缺陷根源;逆序推理法是当缺陷设备所反映出来的外在表象难以找到缺陷根源时,从缺陷造成的事故结果出发,逐级向上进行缺陷原因的查找。对推测出来的缺陷原因需进行试验验证,其中:专项试验是根据缺陷原因,针对具体的某一功能进行试验,比如对不满足电磁兼容要求的需开展电磁兼容试验、对保护动作时间过长的需开展保护动作时间测量试验;整组试验和波形回放试验是通过模拟二次设备在现场运行状态的真实工况对保护装置进行动作时间、动作逻辑的检查,可用于还原缺陷设备在现场表征出来的缺陷现象,辅助进行缺陷分析。

在整改措施验证阶段,针对已经验证通过的设备缺陷原因,提出相应的整改措施,并对整改后的缺陷设备制定相应的试验方案。在该阶段主要是对试验方案中的整改措施进行试验验证,验证该措施是否可根除该装置缺陷、装置功能能否满足相关标准或设计要求,并满足安全稳定运行的要求。这一阶段,通常需针对缺陷原因再次开展专项试验,以验证整改后的装置是否还存在相同的缺陷;另一方面,为验证缺陷的整改措施是否会影响装置的既有功能,需对装置的常规功能开展试验。

3) 试验验证环境

推测出缺陷原因、提出整改措施后,需在一定的试验环境中对缺陷原因和整改措施进行试验验证,

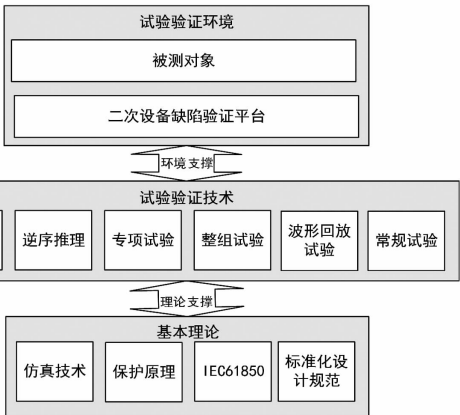


图 1 二次设备缺陷试验验证体系

构建试验验证环境如图 2 所示。

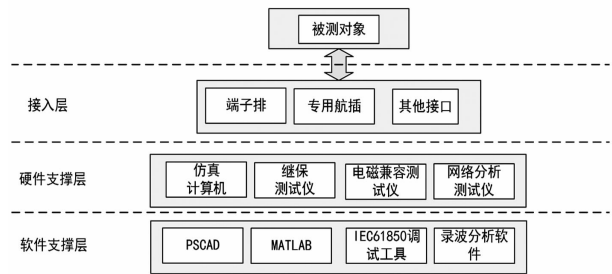


图 2 二次设备缺陷试验验证环境

试验验证环境由接入层、硬件支撑层、软件支撑层 3 个层级组成。软件支撑层由 PSCAD、MATLAB、IEC 61850 调试工具等仿真分析或辅助调试软件组成,主要用作试验验证过程中的理论分析和辅助测试。硬件支撑层由仿真计算、继保测试仪、电磁兼容测试仪等测试设备组成,主要为下层的软件支撑层提供硬件平台,并根据自身的功能给缺陷设备提供测试平台。接入层由端子排、专用航插等一些接口设备组成,主要作为被测对象与硬件支撑层之间的连接。在某些情况下,可不需要搭建接入层,被测对象直接通过电缆、光纤等连接线与硬件支撑层的设备相连。

接入层、硬件支撑层、软件支撑层构成了二次设备缺陷验证环境,试验验证环境可有效整合各种试验验证资源,实现对被测对象的标准化、自动化测试。将以原运行状态一致的被测对象搭建试验验证平台,利用理论知识和测试环境,利用试验验证技术,从装置功能、装置性能等方面实现了对二次设备缺陷进行全方位的试验验证。

2 二次设备缺陷试验验证流程

根据二次设备缺陷验证体系,并综合多起二次设备缺陷试验验证案例,建立二次设备缺陷试验验证流程如图 3 所示。将二次设备缺陷试验验证分为两个阶段,即缺陷原因分析验证阶段和整改措施验证阶段。整个缺陷试验验证流程使二次设备缺陷的处理形成闭环。

1) 缺陷原因分析验证阶段

此阶段主要对缺陷原因开展深入的分析,首先通过相关设备运行情况的分析、报文和故障录波的分析,推测出缺陷产生的具体原因,在此基础上针对推测出来的缺陷原因,开展专项试验,以验证推测的缺陷原因是否正确。若验证通过,则缺陷原因分析

结束;若验证未通过,则需再次进行缺陷原因推测,并进行试验验证直至验证通过。

2) 整改措施验证阶段

此阶段主要对缺陷二次设备的整改措施开展验证。首先,针对上一阶段分析出来的缺陷原因提出整改措施。其次,为验证缺陷的整改是否影响到设备的正常功能,需对整改后的设备开展常规试验,若设备未通过常规试验则需重新提出整改措施。最后,若设备通过常规试验,则进行针对缺陷原因的专项试验,以验证相同缺陷是否会再次发生。若专项试验未通过,则需返回到提出整改措施这一步;若专项试验通过,则整个缺陷试验验证流程结束。

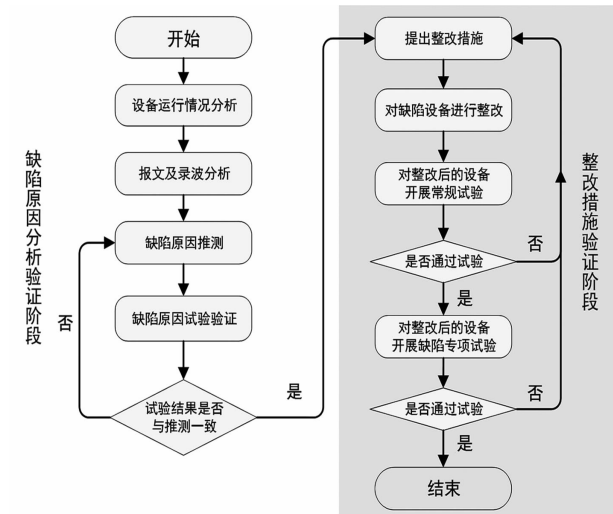


图 3 二次设备缺陷试验验证流程

3 结 语

对智能变电站二次设备缺陷试验验证技术开展了研究,建立了二次设备缺陷试验验证体系,从中梳理出智能变电站二次设备缺陷试验验证的通用流程。所提出的方法弥补了现有二次设备缺陷处理流程的不足,将缺陷定位至芯片级、原理级,可彻底防止类似缺陷再次发生,使二次设备缺陷处理形成了闭环。

参考文献

[1] 卞玉涛,李志华. 基于专家系统的故障诊断方法的研究与改进[J]. 电子设计工程,2013,21(16): 83-86.
[2] 孙莉君,董科研,许晓峰,等. 智能变电站二次设备故障诊断系统的研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2016,12(1): 55-60.

(下转第 94 页)

500 kV 输电导线耐张线夹断裂失效分析

陈家慧¹,赵兴虹²,刘 曦¹,冯 杰¹,林德源³

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
- 2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司,四川 成都 610041;
- 3. 国网福建省电力公司电力科学研究院,福建 福州 350007)

摘要:采用宏观检查、拉伸试验、金相组织检测、扫描电镜及能谱分析等方法,对输电导线耐张线夹断裂的原因进行了分析。结果表明,耐张线夹内钢芯和铝管的力学性能、显微组织及化学材质均正常,耐张线夹断裂失效的主要原因为钢锚表面存在较深压痕及明显弯曲变形,会使钢芯在变形点产生较大的应力集中和挤压摩擦损伤。长时间运行后钢芯受损程度加重,钢芯在变形处相继断裂,从而导致外部铝管断裂事故发生。

关键词:耐张线夹;钢芯;断裂;变形

中图分类号:TM755 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)02-0070-04

Failure Analysis on Fracture of Strain Clamp in 500 kV Transmission Line

Chen Jiahui¹, Zhao Xinghong², Liu Xi¹, Feng Jie¹, Lin Deyuan³

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 2. Gaoxin District Branch, Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 3. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: The fracture reason of a strain clamp in 500 kV transmission line is investigated by macroscopic examination, tensile testing, metallographic examination, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. Results show that mechanical properties, microstructure and chemical composition of the steel core and aluminum tube are qualified and can satisfy the requirements of relevant standards. Repeated crimping trace and obvious bending deformation can be clearly observed on the surface of steel anchor, resulting in larger stress concentration and the extrusion friction damage of steel core. After long time running, the damage of steel core is aggravating and steel cores suffer the fracture successively, which leads to the fracture of external aluminum tube. Thus, the accident happens.

Key words: strain clamp; steel core; fracture; deformation

0 引言

耐张线夹是用于在耐张、转角、终端杆塔的绝缘子串上固定导线或避雷线,并承受导线张力的金具。压缩型耐张线夹作为机械和电气负荷的传递者,是输电线路最常见的工具之一^[1-6]。本体由钢锚和铝管组成,钢锚用来接续和锚固钢芯铝绞线的钢芯,通过压力使铝管产生塑性变形,从而使线夹与导线结合在一起。线夹的装配、设计和压接缺陷以及恶劣运行环境均有可能造成线夹断裂^[7-11],直接威胁高

压输电线路的安全运行。

下面以一起 500 kV 输电导线耐张线夹内钢芯断裂事故为研究对象,对失效线夹进行解剖,借助材料表征手段综合分析线夹断裂原因,并提出科学、可行的防护措施,对防止类似事故发生、提高耐张线夹可靠性有一定的警示、借鉴意义。

1 事故概况

2018 年 6 月,500 kV 某输电线路发生非计划停运跳闸,选相为 AC 相(无负荷损失),故障巡视发

现 140 号塔小号侧四分裂导线 C 相(中相)的左下导线耐张线夹断裂,导致子导线掉落,与 A 相(下相)距离不足,如图 1 所示。140 号塔型为 SJ 453,同塔双回路架设,小号侧档距为 148 m,挂线点高差为 48.5 m,气象区为 10 mm 轻冰,27 m/s 风速。导线型号为 JL/GIA-500/45-48/7 钢芯铝绞线,耐张线夹型号为 NY-500/45,铝管材质为 1050A。

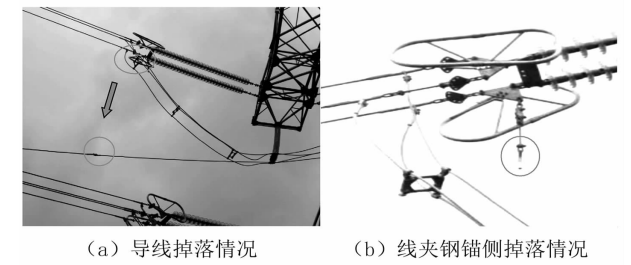


图 1 导线耐张线夹失效现场形貌

2 理化检验

2.1 宏观分析

结合失效耐张线夹外部(见图 2)和内部情况(见图 3),线夹存在两处断口。铝管断裂位置为接续板附近的未压接区(近钢锚侧),断口具有明显拉伸颈缩特征,属于韧性断裂。导线钢芯断裂在距端口 34 mm 的钢锚内部,整体看 7 根钢芯断口高低不平,拉边与轴线几乎成 45°,断口处均存在明显的颈缩现象,宏观上显示一定的塑性变形特征,如图 4 所示。钢芯的表面和断面均覆盖有大量的黑色产物,局部位置有明显的挤压和磨损痕迹,表明钢芯在运行时承受拉伸、挤压和摩擦多种应力。



图 2 耐张线夹铝管断裂位置

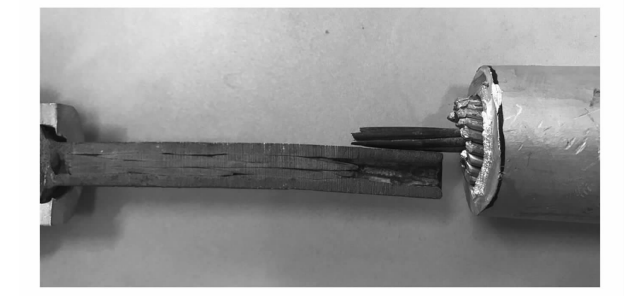


图 3 钢锚内钢芯断裂位置

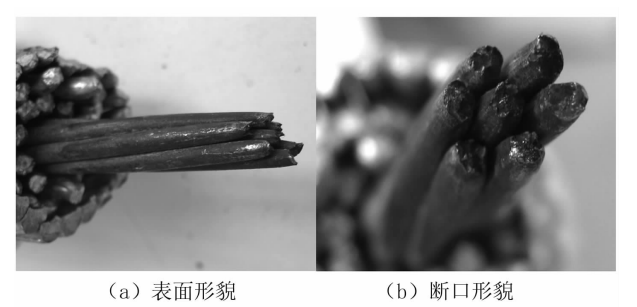


图 4 钢芯断裂的宏观形貌

2.2 压接质量检测

对失效耐张线夹的压接质量进行测量,发现铝管和钢管的压后最大对边距均符合《输变电工程架空导线(800 mm² 以下)及地线液压压接工艺规程》(DL/T 5285-2018)的相关要求。但钢锚的外观形貌显示,钢锚存在明显的弯曲变形,且表面有较深的压接痕迹(见图 5)。经测量,钢锚弯曲点与钢芯断裂位置一致,可知钢锚压接工艺不合格导致内部钢芯在变形处产生较大的应力集中。



图 5 钢锚外观形貌

2.3 扫描电镜及能谱分析

将 7 根钢芯线中的 2 根钢芯线断口置于扫描电子显微镜下观察,结果见图 6。由图 6(a)和 6(c)可知,钢芯断口凹凸不平,C 区存在剪切唇特征,断口有明显的径缩现象,符合韧性断裂特征。进一步观察发现,断口 A 区域附近的表面磨损处存在很多互相平行且垂直于钢芯径向的裂纹,最大裂纹宽度达 100 μm,如图 6(c)和 6(d)所示。由此可知,裂纹在 A 区域萌生,B 区域快速扩展,C 区域瞬时断裂。由图 6(b)可知,2 号样断口覆盖有大量的堆积物,经能谱仪分析为氧化腐蚀产物,占据约 1/3 断面,表明其断裂时间早于 1 号样。对图 6(d)中钢芯表面进行能谱分析,结果以 Zn、Fe、O 三种元素为主,可推断钢芯表面的黑色物质为镀锌层氧化后产物。观察断口外缘形貌,发现原圆弧形外表面局部已变形成为边角状,即本应为圆周形状的钢芯线外周表面变

为多边形及圆弧形的混合形状,且挤压变形区域与裂纹源位置一致。

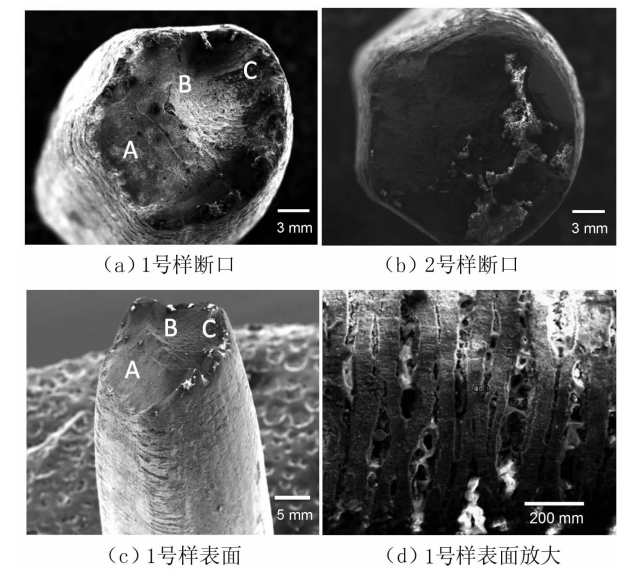


图6 钢芯微观形貌

由此推断,原钢芯线断口位置曾经受外力挤压后变形,变形部位机械强度较低,可成为裂纹萌生点。

2.4 显微组织分析

选取1根钢芯进行切割、镶嵌、抛磨,在金相显微镜下观察其径向截面,钢芯内部无异常的金属夹杂物,如7(a)所示。经硝酸酒精浸蚀后,基体组织显示为铁素体+索氏体,表明显微组织正常,如7(b)所示。

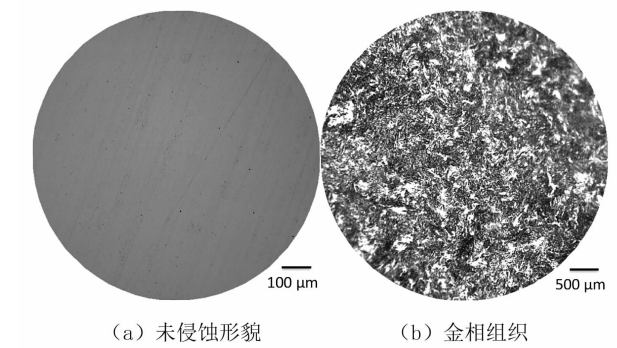


图7 钢芯横向显微形貌

2.5 力学性能试验

从远离断口的失效钢芯和铝管上分别选取3段试样进行室温拉伸试验,钢芯和铝管的最小抗拉强度分别为1580 MPa和87 MPa,铝管断后平均伸长率为46%,分别满足《导地线采购标准第2部分:钢芯铝绞线专用技术规范》(Q/GDW 13236.2-2014)和《铝及铝合金热挤压管第1部分:无缝圆管》(GB/T 4437.1-2015)标准要求。

2.6 材质分析

对耐张线夹铝管进行化学成分分析,结果符合标准《变形铝及铝合金化学成分》(GB/T 3190-2008)中对牌号1015A的要求。钢芯线的化学成分检测结果显示,钢材中有害元素P和S的含量分别为0.015%和0.008%,均满足相关要求。

3 综合分析

通过上述分析可知,耐张线夹中钢芯和铝管的显微组织、力学性能及材质均满足相关要求。钢锚上有较深压接痕迹且存在明显弯曲现象,内部钢芯在变形处产生应力集中。这极有可能是压接过程中出现钢锚弯曲,然后试图通过反复压接将钢管弯曲部位复原所致。多次压接过程导致钢芯产生挤压变形,机械强度降低。运行时,钢芯和钢锚在变形处产生较大的接触摩擦使钢芯表面被磨损,其力学性能进一步降低。钢芯在表面受损处产生裂纹源,使耐张线夹承受载荷的有效面积减小。在导线张力作用下,受损较严重的钢芯在应力集中处首先发生断裂,剩余钢芯和铝管承受的载荷急剧增大,且钢芯断口较为锋利,会对周边的钢芯造成持续的摩擦损伤,形成恶性循环,最终导致剩余钢芯和铝管断裂。

4 结 语

该导线耐张线夹断裂属于韧性断裂事故,主要是由线夹压接质量不佳引起的。钢锚弯曲变形导致钢芯在变形处产生应力集中,压接过程中的挤压变形和运行过程中的摩擦损伤使钢芯力学性能显著降低,在导线张力作用下钢芯相继被拉断,从而使铝管拉伸断裂,最终导致耐张线夹失效。

为提高耐张线夹的运行可靠性,建议对同批次压接耐张线夹进行X射线探伤检测,排查压接时存在的安全隐患,防止类似事故再次发生。在新建、改造及扩建的线路工程中,应提升耐张线夹压接工艺,加强对线夹压接质量的抽检,以确保线路安全。

参考文献

[1] 王伟,朱成丽,吴洪亮,等.耐张线夹内钢芯铝绞线断裂原因及断口特征[J].腐蚀与防护,2014,35(3):297-301.
[2] 王若民,吴刚,严波,等.高压输电用耐张线夹的失效

分析[J]. 热处理,2018,33(4):41-47.

[3] 何喜梅,王志惠,云峰,等. 750 kV 导线断裂原因分析及预防措施[J]. 热加工工艺,2018,47(4):257-259.

[4] 王坤,郑准备,杨占君,等. 某 220 kV 输电导线断线原因分析[J]. 理化检验(物理分册),2018,54(9):692-697.

[5] 胡加瑞,刘纯,欧阳克俭,等. 500 kV 直流输电线路耐张线夹断裂的原因分析[J]. 电力建设,2012,33(7):82-85.

[6] 利佳,李志翔. 500 kV 线路压缩型耐张线夹断裂原因分析[J]. 云南电力技术,2015,43(S1):27-28.

[7] 唐凌毅. 一起子导线耐张线夹断裂故障的启示[J]. 现代工业经济和信化,2019,9(10):138-139.

[8] 胡加瑞,谢亿,刘纯,等. 输电线路耐张线夹典型缺陷

(上接第 20 页)

活方式,可以继续保持燃气供暖方式。3) 宜电择电。在大型商场、学校、公共设施应逐步推广电采暖方式,加热效果好、速度快,且清洁环保,在新建小区可以铺设电缆等电力取暖设备。

未来应进一步提高电采暖的应用面积与比重,合理推广电采暖方式。一是大力推广经济性相对较好的供暖方式,在非连续性取暖的学校、政府机关等场所优先推广;二是推广电锅炉与热电联产机组相结合的灵活性改造模式,增加热电联产机组的供暖能力和电力系统的调峰能力;三是创新开展新能源发电供暖新交易模式,加强新能源发电供暖的机制研究和推广,探索直接交易的市场化模式,合理降低取暖输配电价,鼓励清洁取暖用电量与电力市场直接交易。

参考文献

[1] 袁泽,于雪皎,郑小宇,等. “煤改电”项目综合效益的模糊评判方法[J]. 农村电气化,2018(2):18-22.

[2] 苗常海,白中华,王雯,等. 典型蓄热式电采暖项目经济性对比分析[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):36-39.

[3] 曾智勇,董华佳,周厚国. 储能在“煤改电”中的应用[J]. 绿色科技,2019(8):154-158.

[4] 孙勇,严干贵,郑太一,等. 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J]. 储能科学与技术,2016,5(4):532-538.

[5] 杨玉龙,王彤,赵磊洋,等. 分布式电采暖负荷群建模及备用优化[J/OL]. 电测与仪表:1-8[2019-12-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20181227.1657.005.html>.

[6] 王锋,李大勇,方劲宇,等. 基于储能协调蓄热式电锅炉消纳风电供暖系统的经济性评估[J]. 电工电能新

探析[J]. 华北电力技术,2013(4):34-37.

[9] 邵明星,武臻,杨东旭. 220 kV 线路耐张线夹断裂原因分析[J]. 山东电力技术,2017,44(6):77-80.

[10] 陈云翔,林德源,洪毅成,等. 35 kV 架空输电线路钢芯铝绞线内层铝股线的腐蚀失效分析[J]. 腐蚀与防护,2015,36(6):594-598.

[11] 赵测峰,王若民,陈国宏,等. 基于数字射线的耐张线夹压接质量评价试验[J]. 浙江电力,2018,37(11):41-45.

作者简介:

陈家慧(1991),博士,工程师,从事电网设备金属失效分析及新材料研究。

(收稿日期:2020-02-24)

技术,2019(6):50-56.

[7] 吕泉,刘永成,刘乐,等. 两种风电供热模式的节煤效果比较[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):49-59.

[8] 贺孟春,刘东,李斯玮. 集中采暖地区住宅建筑不同采暖方式的经济性比较[J]. 节能技术,2008,26(4):340-346.

[9] 林军. 国家首批火电灵活性改造试点项目吉电股份白城热电机组直热式电锅炉经验介绍——热电解耦,可再生能源消纳,清洁供暖一体化灵活性改造[C]. 北京能源与环境学会,2018 火电灵活性改造及深度调峰技术交流研讨会论文集,北京能源与环境学会:北京中能联创信息咨询有限公司,2018.

[10] 李炎锋,武海琴,王贯明,等. 发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究[J]. 北京工业大学学报,2006,31(3):217-222.

[11] 冉东生,田开明,王月敏. 低温电热膜的产业化现状[J]. 科技与金融,2019(9):94-97.

[12] 范孟华,王丹,张家安,等. 电热泵负荷等值热力学建模及控制策略评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(4):31-37.

[13] 张志英,吴贤哲,赵军. 地源热泵及其系统的相关标准与规范的综述与建议[J]. 太阳能,2015(3):8-11.

[14] 张增强,王祺,许叶林,等. “煤改电”工程节能减排潜力分析方法研究[J/OL]. 电测与仪表:1-4[2019-12-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20191104.1509.014.html>.

作者简介:

姚锦松(1994),硕士研究生,主要研究方向为泛在电力物联网及清洁能源替代;

常喜强(1976),教授级高工,主要从事电网运行管理工作;
于冰(1976),高级工程师,主要从事电网运行管理工作;
郭小龙(1983),高级工程师,主要从事电网运行管理工作;
徐吉智(1991),硕士研究生,主要研究方向为新能源储能;
刘博文(1990),助理工程师,主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期:2019-12-04)

一起防跳回路异常引起的断路器误动事件分析

丁宣文,刘明忠,郑永康,王 平
(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:结合一起取消操作板防跳措施不当引起的断路器跳闸后立即合闸的“跳跃”事故展开分析,通过对取消防跳功能的操作板进行反复的测试、试验,对操作回路的动作逻辑进行反复推演分析,找到了事故根源,并提出合理的整改建议。

关键词:操作板;防跳功能;动作时序

中图分类号:TM561 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)02-0074-03

Analysis on A Circuit – breaker Misoperation Accident Caused by Abnormal Anti – jumping Circuit

Ding Xuanwen, Liu Mingzhong, Zheng Yongkang, Wang Ping
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:A "jumping" accident of circuit – breaker is analyzed, that is, the circuit – breaker is closed immediately after tripping caused by the incorrect measures of cancelling the anti – jumping function of operation panel. After repeated tests and experiments on the operation panel whose anti – jumping function is cancelled, the repeated deduction and analysis are carried out for the action logic of operating circuit, the root cause of the accident is found out, and the reasonable improvement suggestions are proposed.

Key words:operation panel; tripping – proof function; action time – sequence

0 引言

在电力系统中,断路器的防跳回路是二次回路中最重要的回路之一,用以防止断路器出现“跳跃”现象。当合闸回路出现如触电粘连、机构卡死等情况时,合闸脉冲会一直存在,此时若线路发生永久性故障,保护装置会发出跳闸脉冲,同时存在的合闸脉冲和跳闸脉冲在没有防跳回路的作用时会使得断路器出现反复分合的“跳跃”现象^[1]。断路器多次分合于故障电流,将造成断路器损坏甚至爆炸,同时也可能扩大事故范围而影响电网稳定运行^[2-4]。而防跳回路的目的是要解决断路器的“跳跃”问题,起到保护断路器的作用。一般来说,操作箱及断路器本体均具有防跳功能,而《线路保护及辅助装置标准化设计规范》(Q/GDW 1161-2014)规定了断路器防跳功能应由断路器本体机构实现^[5]。这是因为采用断路器本

体防跳,可以保证断路器在远方操作和就地操作时均具备防跳功能,能更好地保护断路器,所以标准化设计规范推荐优先采用断路器本体防跳。考虑到原有部分断路器不满足本体防跳的要求,因此操作箱内也统一设有防跳功能,但应满足使用本体防跳时能够方便地取消操作箱防跳的要求。下面结合一起取消操作箱防跳措施不当造成断路器在线路间隔接地故障跳闸后立即合闸的事故展开分析,并针对“取消操作箱防跳措施不当”提出整改建议。

1 事故概述

某供电公司 220 kV 变电站 110 kV 线路采用的线路保护装置配套操作箱采用 TRIP. C – A 型操作板。工程投运前,调试单位参考装置说明书并按照厂家设计图纸要求,通过短接操作板的 1n12X7、1n12X8,即短接防跳保持继电器常闭接点,实现取

消装置防跳功能的目的(如图 1 所示),但装置在运行过程中,出现过两起 110 kV 断路器跳闸后立即合闸的事故。

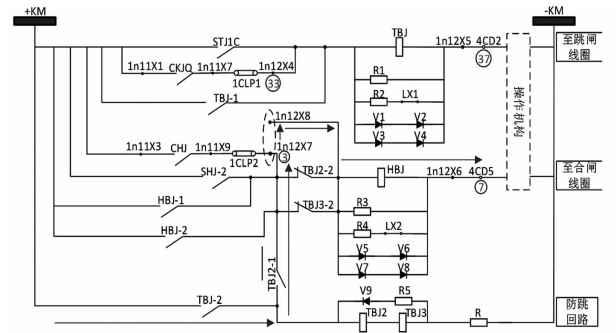


图 1 TRIP. C - A 型操作板跳、合闸及防跳回路

2 事故后测试、分析

事故发生后,技术人员对 TRIP. C - A 型操作板进行了多次分合闸测试试验,并对操作板的合闸、跳闸回路的入口(如图 1 中标注的③、③及出口(如图 1 中标注的⑦、⑦)进行了监视。通过如图 2 所示故障录波发现,在通过操作板分开 110 kV 断路器时,断路器辅助接点已翻转到位,操作板的跳位监视继电器已启动,但是跳闸回路⑦的正电仍未消失,操作板的跳闸回路跳闸保持继电器仍处于励磁状态。

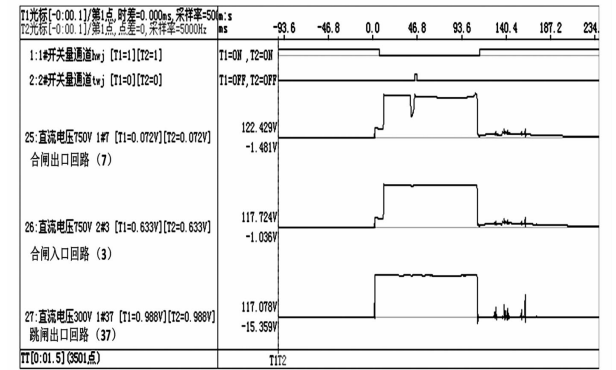


图 2 断路器分闸过程操作板分合闸回路电位变化

由于该操作板的跳闸保持继电器会开放合闸回路的正电,因此在断路器分开后,合闸回路③、⑦的正电会使得断路器合闸回路立即导通,导致断路器立即合闸。断路器跳闸过程中合闸回路导通示意图 1 箭头所示。

因此,按照厂家设计图纸的说明,在取消操作板防跳时,仅短接跳闸保持继电器常闭接点的做法是存在安全隐患的,合闸正电仍能通过图 1 箭头所指示的回路启动合闸保持继电器,也就是说按设计图纸所述方法取消操作板防跳回路后,在该操作板至

合闸线圈的路径上形成了一条寄生回路。

目前,国内主流保护厂家取消操作板防跳功能的方法主要有两种:一是利用跳线短接电压自保持防跳继电器常闭接点;二是断开电压自保持防跳继电器启动回路(例如剪断如图 1 中电压自保持防跳继电器 TBJ2、TBJ3 的串联电阻 R)。通过上述分析显而易见,短接 TRIP. C - A 型操作板的 1n12X7、1n12X8,即短接防跳保持继电器常闭接点实现取消装置防跳功能的措施并不可取。

3 取消操作板防跳功能后动作逻辑分析

前面已经分析了操作板合闸寄生回路产生原因,如果该寄生回路在某种特定条件下能够获得正电,那么断路器就有可能被误合上。下面对寄生回路是否有可能带正电展开分析。

3.1 操作板防跳回路继电器参数

TRIP. C - A 操作板上的电流启动类 TBJ、HBJ 继电器,选用松下公司生产的某型号小型继电器,动作时间约 10 ms(最大不超过 15 ms),返回时间约 8 ms(最大不超过 10 ms);电压自保持 TBJV 继电器(图 1 中 TBJ2 + TBJ3)选用欧姆龙公司生产的某型号单稳型继电器,动作时间约 5 ms(最大不超过 10 ms),返回时间约 2 ms(最大不超过 10 ms)。

3.2 操作板取消防跳功能后的动作时序分析

根据装置说明书并按照厂家设计图纸要求,通过短接操作板的 1n12X7、1n12X8 取消操作板防跳功能后,操作回路在断路器常开、常闭辅助接点切换时间以及防跳继电器动作和返回时间不同时,造成合闸保持继电器励磁的情况是不一样的。

根据操作板防跳回路继电器参数,设定以下几种情况分别分析:

1) 设定 TBJ 继电器的动作时间、返回时间为典型值,即动作时间 T_{dz} 为 10 ms,返回时间 T_{fh} 为 8 ms; TBJV 继电器的动作时间、返回时间为典型值,即动作时间 T_{dz} 为 5 ms,返回时间 T_{fh} 为 2 ms;常开、常闭辅助接点切换时间 T_{qh} 为 8 ms。此时操作回路各元器件的动作时序如图 3 所示。

此种时间关系下合闸线圈未带电,合闸保持继电器 HBJ 也未动作。

2) 设定 TBJ 继电器的动作时间、返回时间为典型值,即动作时间 T_{dz} 为 10 ms,返回时间 T_{fh} 为 8 ms; TBJV 继电器的动作时间、返回时间为典型值,即动

作时间 T_{dz} 为 5 ms, 返回时间 T_{fh} 为 2 ms; 常开、常闭辅助接点切换时间 T_{qh} 为 2 ms。此时操作回路各元器件的动作时序如图 4 所示。

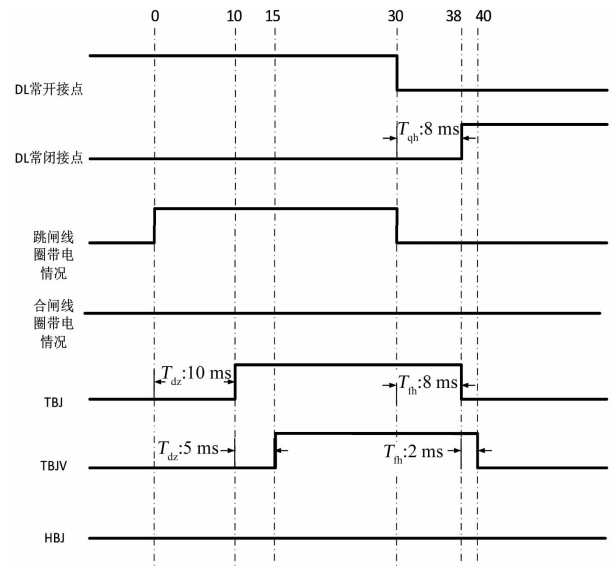


图 3 操作回路各元器件动作时序 1

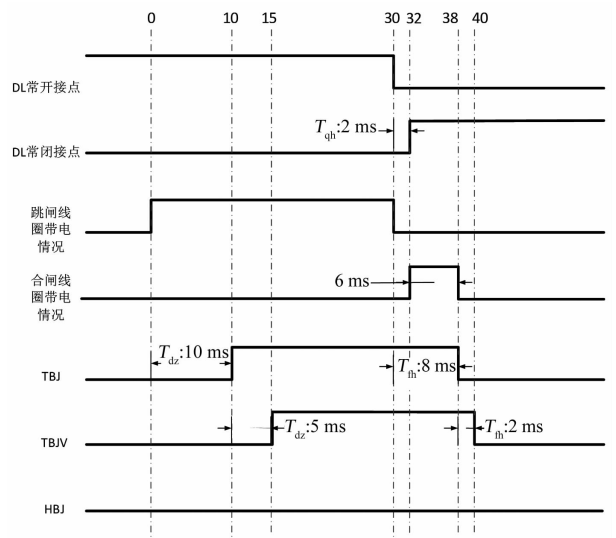


图 4 操作回路各元器件动作时序 2

此种时间关系下合闸线圈带电 6 ms, 由于 HBJ 合闸保持继电器的动作时间 T_{dz} 为 10 ms, 因此 HBJ 未动作, 但存在断路器误合上的可能性。

3) 设定 TBJ 继电器的动作时间、返回时间为最大值, 即动作时间 T_{dz} 为 15 ms, 返回时间 T_{fh} 为 10 ms; TBJV 继电器的动作时间、返回时间为典型值, 即动作时间 T_{dz} 为 5 ms, 返回时间 T_{fh} 为 2 ms; 常开、常闭辅助接点切换时间 T_{qh} 为 0 ms。此时操作回路各元器件的动作时序如图 5 所示。

此种时间关系下, 合闸线圈带电 10 ms 后合闸保持继电器动作自保持, 断路器将被误合上。

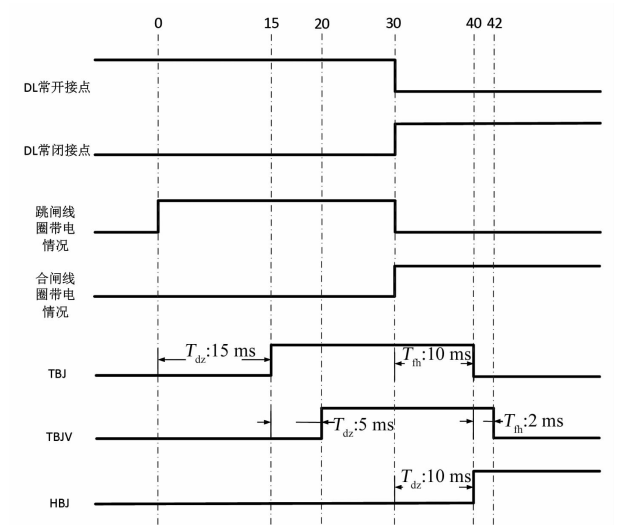


图 5 操作回路各元器件动作时序 3

4 结 语

按照厂家设计图纸要求短接 ln12X7、ln12X8 后, 该断路器操作回路形成了一条合闸寄生回路, 通过对断路器辅助接点不同切换时间、TBJ 继电器不同动作和返回时间的操作回路动作时序分析, 可以看出: 断路器辅助接点切换时间、TBJ 继电器返回时间是影响断路器合闸线圈是否带电以及带电时间长短的主要因素; 断路器辅助接点切换时间越短、TBJ 继电器返回时间越长, 断路器被误合上的概率就越高。

因此, 建议剪断 TBJV (图 1 中 TBJ2 + TBJ3) 电压自保持防跳继电器回路中串联电阻, 防止合闸寄生回路形成合闸通路。

参考文献

[1] 熊为群, 陶然. 继电保护、自动装置及二次回路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[2] 张凯, 杨佩佩, 杨军亭, 等. 一起断路器机构故障引起的事故分析[J]. 电气技术, 2016, 17(10): 142 - 145.

[3] 张茜, 张磊, 刘希嘉, 等. 一起 220 kV 线路间隔断路器防跳回路异常的故障分析[J]. 电工技术, 2019(20): 26 - 28.

[4] 邱生敏, 黄兆琴, 程哲. 断路器和隔离开关异常引发调度风险分析[J]. 云南电力技术, 2018, 46(5): 39 - 42.

[5] 国家电网公司. 线路保护及辅助装置标准化设计规范: Q/GDW 1161 - 2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

作者简介:

丁宣文(1985), 硕士, 工程师, 主要从事智能变电站继电保护调试及故障分析等研究。

(收稿日期: 2020 - 01 - 15)

一起换流变压器绝缘油氢气异常分析

谭华安,刘春涛,黄学民,齐向东,罗 新
(中国南方电网超高压输电公司广州局,广东 广州 510663)

摘 要:通过对一台换流变压器“氢气异常”的原因进行查找分析,发现是由于在线油色谱监测装置的载气进入变压器内部所致,针对这一问题提出了在线油色谱监测装置的工艺改进建议。
关键词:换流变压器;氢气异常;在线油色谱检测装置;氦气
中图分类号:TM75 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)02-0077-03

Analysis on Abnormal Hydrogen of Insulating Oil in A Converter Transformer

Tan Huaan, Liu Chuntao, Huang Xueming, Qi Xiangdong, Luo Xin
(Guangzhou Bureau of CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510063, Guangdong, China)

Abstract:Based on the analysis on the causes of "hydrogen abnormality" in a converter transformer, it results from the carrier gas of the on-line monitoring device of oil chromatography entering into the transformer. In order to solve this problem, the process improvement suggestions for the on-line monitoring device of oil chromatography are put forward.
Key words:converter transformer; abnormal hydrogen; on-line monitoring device of oil chromatography; helium

0 引 言

油浸式变压器内部绝缘通常采用油和纸作为绝缘材料,这些材料无论是热故障还是电故障的情况下,最终都将导致绝缘介质发生氧化、裂解与碳化等反应,产生氢气、甲烷、乙烯、乙炔、乙烷等各种特征气体,溶解在绝缘油中。由于碳氢键之间的极性比碳碳键强,更容易断裂,在绝缘油的裂解过程中一般总是先生成氢气,因此氢气是各种故障特征气体的主要成分之一^[1]。油中溶解气体分析(dissolved gas analysis,DGA)技术可在设备不停电的情况下开展分析判断油浸式电气设备内部是否有隐患以及故障类别、变化趋势、故障点定位、严重程度等,能早期和实时地诊断识别设备内部潜伏性故障,已经成为最有效、应用最为广泛的油浸式电器设备状态诊断与评价的方法之一^[2]。

1 主要缺陷情况

某换流站一台 500 kV Y/Y A 相换流变压器,型

号为西门子公司 EFPH8557,额定容量 282 MVA,冷却方式 ODAF,绝缘油油重 92 t。在一次年度检修期间更换了油枕胶囊和补充了约 900 kg 处理后的新油,没有对换流变压器本体进行任何检修。投运后油色谱跟踪分析结果表明氢气组分增长较快,而油中溶解气体中总烃值很小(具体数值见表 1)。色谱特征气体单组分增长基本上可以排除变压器内部的缺陷,初步怀疑与更换胶囊有关。咨询厂家,厂家认为不排除胶囊安装时带有水分,在运行过程中受电场和热的作用分解产生氢气。对该台换流变压器进行了微水、含气量跟踪分析,含气量在 3.0%、微水在 8.0 mg/L 附近波动,无异常。

通过查阅该台设备的绝缘油色谱分析谱图,发现该设备绝缘油分析谱图的氢气的保留时间与标准气体分析中氢气的保留时间存在不是很明显的差异。怀疑是其他保留时间与氢气比较接近且浓度比氢气大很多的气体,导致色谱仪工作站误将该峰识别为氢气峰。通过综合分析,怀疑是 S 公司在线油色谱装置的载气氦气进入了变压器本体绝缘油中。

表 1 换流站极 2 Y/YA 相油色谱分析结果									单位: $\mu\text{L/L}$
时间	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO	CO_2	总烃	备注
11-05	13.32	4.58	2.82	1.78	0.45	388.82	1479.15	9.63	滤油后
12-18	1.32	0.57	0.46	0.37	0.17	53.38	405.50	1.57	
01-17	41.85	2.09	0.68	0.87	0.27	81.74	569.77	3.91	
01-29	83.35	0.84	1.54	0.49	0.20	83.67	582.91	3.07	
03-12	152.71	1.20	0.62	0.43	0.24	82.79	642.19	2.49	
04-01	185.86	1.16	0.86	0.87	0.39	101.97	797.77	3.29	
04-09	178.59	1.91	0.74	0.46	0.27	96.07	889.53	3.37	
04-23	207.85	1.92	0.77	0.56	0.29	100.77	894.95	3.55	
05-16	231.98	2.67	0.81	0.46	0.45	121.97	1 066.17	4.38	
05-28	221.99	2.16	0.91	0.84	0.43	137.93	1 209.12	4.33	

2 气体分析确认

为确定该气体是否是氦气,在气相色谱仪同一工作工况下,进行了以下试验工作:

1) 标准气体试验

用标准气体进行试验,得到的谱图如图 1 所示。正常情况下,氦气只有一个波峰,且从图中可以看出氦气的保留时间为 0.29 min 左右。

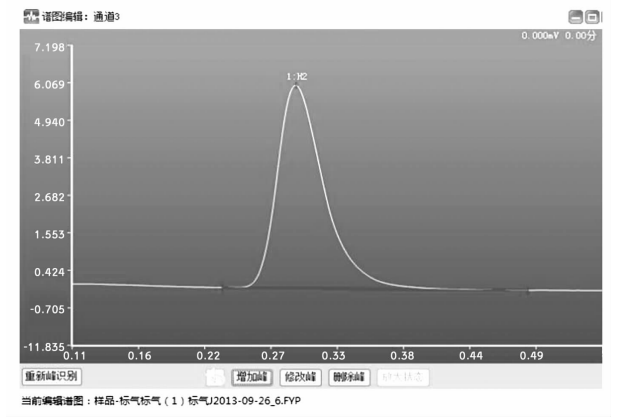


图 1 标准气体中氦气出峰谱图

2) 纯氦气试验

用纯氦气作为样品气体进行了色谱试验,得到的分析谱图如图 2 所示。可以看出流出的基线从 0.16 min 开始出峰,到 0.44 min 出峰结束,纯氦气的保留时间为 0.23 min 左右。

3) 氦气与氢气 1:1 混合气体试验

对氦气与氢气按体积比 1:1 混合的气体作为样品气体进行色谱试验分析,得到的分析谱图如图 3 所示。流出的基线从 0.16 min 开始出峰,到 0.44 min 出峰结束,混合气体的保留时间为 0.23 min 左右,出峰情况与单一纯氦气基本无差异。

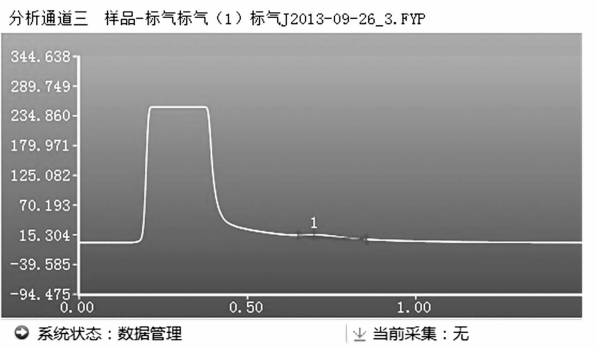


图 2 纯氦气的谱图

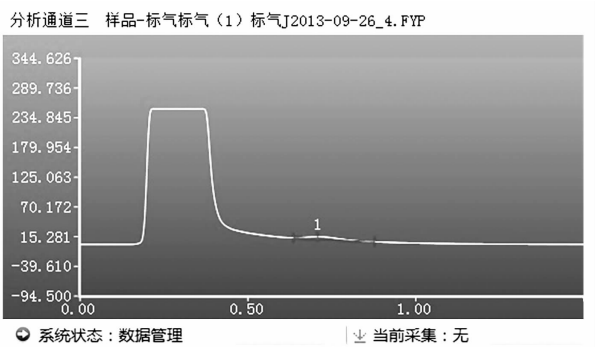


图 3 实验室氦气和氢气混合后的谱图

4) 氦气稀释氮氢混合气体试验

用气相色谱仪所用载气氦气稀释氮氢混合气体约 10 倍后进行试验,得到的分析谱图如图 4 所示,氢气和氦气出峰可分离,两峰分离时间大约在 0.26 min。

从前面 4 组对照试验可以得出:在浓度高的情况下,氢气和氦气的色谱峰无法有效分离,应该与两种气体的热导率有关。从表 2 中可以看出氦气和氢气的热导率相差不大,同属于常用气体里面热导率极高的气体。在低浓度的情况下,氢气和氦气可以分离,氢气和氦气的浓度比影响两者分离效果,氢气的保留时间为 0.29 min 左右,氦气的保留时间为 0.23 min 左右。

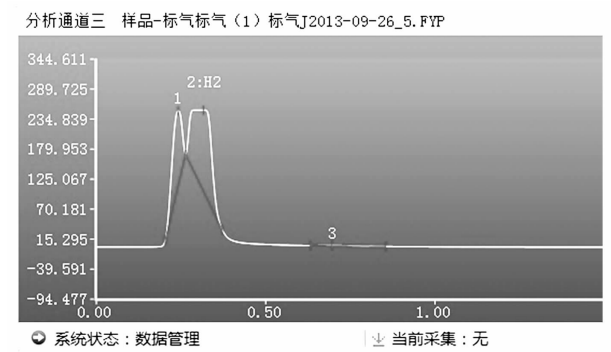


图4 氢气和氢气混合气体氦气稀释后的谱图

表2 常用气体的热导率^[3] (48.9℃)

气体	热导率 $\lambda / (10^{-2} \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1})$
H ₂	19.71
He	15.74
Ar	1.90
N ₂	2.75
空气	2.80
CO ₂	1.83

3 气体来源分析

如在线油色谱油路(图5)和在线油色谱装置工作原理(图6)所示,S公司的在线油色谱装置通过供油口A和回油B与变压器油箱相连,变压器油在进入在线油色谱装置前经过油过滤器过滤,泵入脱气装置进行油中溶解气体分离提取,脱气装置采用半透膜脱气的方法。该半透膜是外包多层特氟纶材料、中空的结构,利用其透气选择性,即半透膜只允许油中溶解的某些特征气体渗透到集气室而阻止其他物质透过^[5]。集气室中的气体通过控制旋转阀,利用载气吹扫定量的样品气体到色谱柱进行分离后再进入热导检测器检测浓度。脱气室的变压器油则未经处理经过回油口B再回流到变压器本体内部。

分析在线色谱装置的整个油路工作流程,变压器油与载气氦气有接触可能性的地方只有脱气装置。理论上半透分离膜应具备良好的单向透气性,脱气时使用的载气不应透过半透分离膜进入到变压器油中。但实际在设备运行过程中,由于膜老化、皱裂或维护不当等原因,载气通过半透膜溶入到脱气室的绝缘油中^[4],而这部分绝缘油并没有经过脱气处理直接回流到本体,造成氦气在设备内逐渐累积。

S公司生产的油色谱在线监测装置用氦气作为载气,采用半透膜的脱气方式,但在设计上没有考虑防止载气进入一次设备本体的措施。而安装在换流变压器附近的在线油色谱装置由于运行环境较为恶

劣,半透膜更容易老化和损坏。S公司的油色谱在线监测装置允许少量氦气进入约5 μL/(L·年)。目前,已分析了37台安装有该公司在线监测装置的变压器的离线油色谱图谱,发现其中12台变压器油中存在氦气,氦气含量均超过20 μL/L,其中氦气含量最高值达到300 μL/L,远高于厂家允许值。

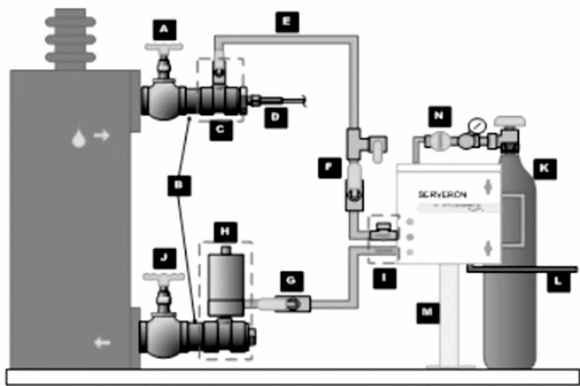


图5 在线油色谱油路

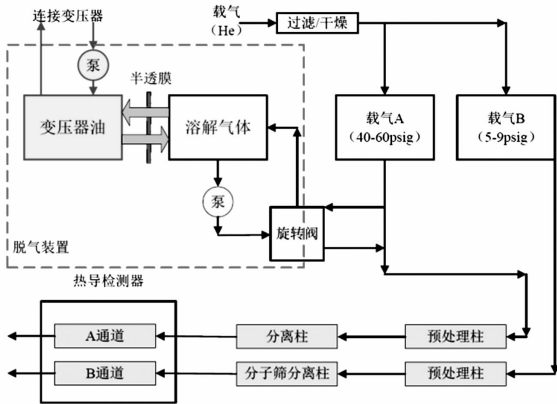


图6 在线油色谱装置工作原理

4 结 语

1) 装有S公司在线油色谱装置的换流变压器氢气较高,现场通过对谱图出峰的时间分析,其原因是在线油色谱装置所用载气氦气引起的。在离线色谱仪的同一工况下,氢气的保留时间为0.29 min左右,氦气的保留时间为0.23 min左右。

2) 当油中氦气浓度远大于氢气浓度时,色谱装置会把氦气的色谱峰误认为氢气的色谱峰,从而造成误判氢气浓度较高现象。

3) 建议在线油色谱监测装置加装绝缘油脱气后回流变压器本体前的脱气模块,防止载气等气体带入换流变压器本体内,影响设备状态评价。

4) 氦气进入换流变压器本体绝缘油中,对换流
(下转第83页)

一种超声波局部放电检测辅助装置的研制

董小顺,刘 鹏,王 喆,宋昆峰,马海军,何海丹

(国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司,新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要:为了克服现有 GIS 设备局部放电测试仪的不足,提出在不改变原有超声波测试仪结构的基础上,增加可拆卸的伸缩绝缘杆、超声波传感器固定组件、传感器与绝缘杆连接部分组件、无线传输信号组件以及伸缩绝缘杆固定底座的设计理念。经过组装之后应用到某变电站,现场检测数据表明,该装置与传统装置比较,现场测试数据偏差不大,同时节省了时间,提高了工作效率,避免了人员登高作业风险。

关键词:GIS 设备;局部放电;超声波;伸缩绝缘杆;固定组件;无线传输信号

中图分类号:TM855 **文献标志码:**B **文章编号:**1003 - 6954(2020)02 - 0080 - 04

Development of An Ultrasound Partial Discharge Detection Device

Dong Xiaoshun, Liu Peng, Wang Zhe, Song Kunfeng, Ma Haijun, He Haidan

(Urumqi Electric Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power

Co. ,Ltd. ,Urumqi 830001, Xinjiang, China)

Abstract:In order to overcome the shortcomings of the existing partial discharge tester for GIS equipment, the design concept of adding detachable extendible insulating pole, fixed component of ultrasonic sensor, connecting component of sensor and insulating pole, wireless transmission signal component and fixed base of extendible insulating pole is presented without changing the structure of the original ultrasonic tester. After assembly, the device is applied to a substation. The field test data show that compared with the traditional device, the deviation of field test data is small, which saves the time, improves the work efficiency and avoids the climbing operation for the staff.

Key words:GIS equipment; partial discharge; AE; extendible insulating pole; fixed component; wireless transmission signal

0 引 言

近年来, GIS 设备因其结构紧凑、绝缘性能好、可靠高、安全性强、环境适应能力强、占地面积小及安装便捷等特点在电力系统中被广泛使用^[1-2]。GIS 设备中的电气元件都封闭在金属外壳中,结构密闭、内部电场比较集中。当存在电晕、自由金属颗粒、导体或接触电极的突起或毛刺、悬浮电位等缺陷时引发设备局部放电,如果不能及时检测并进行处理,绝缘性能将遭到严重的破坏,最终导致设备故障,造成重大的停电事故,极大地降低设备可靠性^[3]。由于 GIS 设备结构密封性,当其发生故障时,故障定位难,故障处理时间长,维修困难,耗时耗力,而且还需要进行大面积的停电^[4],因此, GIS 设备的安全稳定运行对于电网安全的重要性日益凸显。

目前, GIS 设备局部放电故障检测主要利用超声检测技术或者超高频检测技术^[5-10]。超声波检测技术具有抗电磁干扰能力强、便于实现放电定位等优势,是目前除了特高频检测方法外最为成熟的局部放电检测方法之一。目前超声波局部放电测试仪主要设备有主机、超声波传感器及信号传输,超声波传感器通过信号传输线与主机相连。各个地区 GIS 布置各不相同,在检测过程中需要根据检测位置登高或将传感器伸向远处等各种操作^[11-12]。在登高作业过程中,检测人员要将探头牢固地贴在 GIS 的外壳表面等指定位置,劳动强度大、耗时耗力且危险性高:在安装和拆除探头时无法完全避免探头与设备外壳的碰撞,易造成探头的损坏,严重影响局部放电检测工作的开展;对母线或套管出线部位进行检测时,工作人员与裸露带电部分距离很近,易发生感应电伤人事故,需专人监护以确保足够的安全距

离;有些测试点所在位置狭小,检测人员无法靠近。

鉴于上述问题,提出了在不改变原有超声波测试仪结构的基础上,增加可拆卸的伸缩绝缘杆、超声波传感器固定组件、传感器与绝缘杆连接部分组件、无线传输信号组件以及伸缩绝缘杆固定底座的设想。根据设计思路,将各个部件组装并应用于现场,现场检测结果表明,该装置提高了工作效率,降低了劳动强度,保证了人身安全。

1 超声波局部放电检测辅助装置设计

传统超声波检测装置是大都由设备主机、超声波传感器以及信号传输线组成,现有的设备已无法满足现代电网带电检测的需求。针对这一问题,在传统超声波局放检测装置的基础上,增加了伸缩绝缘杆、超声波传感器固定组件、无线传输模块以及固定底座,如图1所示。

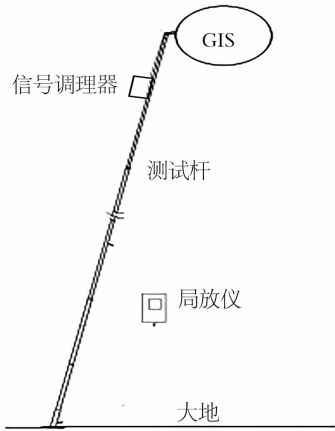


图1 便携式超声波检测装置

1.1 伸缩绝缘杆设计

伸缩式绝缘杆主要采用优质玻璃纤维布、环氧树脂、306树脂苯酐、玻璃钢纤维布以及固化剂等绝缘材料制成。可以根据现场需求,设计不同长度、不同电压等级的绝缘杆,并且该技术较为成熟。伸缩绝缘杆的应用可以避免人员登高作业,降低工作效率。

1.2 传感器固定结构设计

要满足远程测试过程中传感器与GIS壳体紧密接触避免测试时信号衰减,就必须对原有的传感器外壳进行重新设计并加装防护,来提高传感器的机械强度。因此根据超声波传感器的外形以及现场操作实际情况,设计了传感器固定结构,主要由弹簧底

座、外壳及传感器金属卡环组成,简易设计图如图2所示。

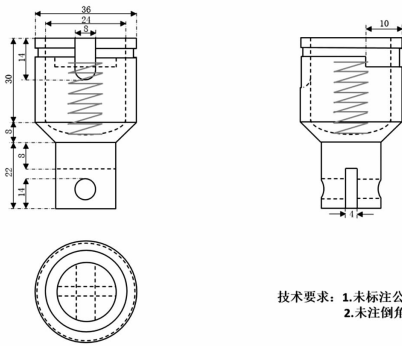


图2 传感器固定方式设计

主要设计思路:将传感器嵌入到外壳内,配置专用金属固定卡环;在外壳内底部设置弹簧底座,将传感器内嵌于卡槽中且依托于弹簧之上。传感器通过伸缩绝缘杆上举进行测试时,金属卡环可将传感器可靠固定于外壳内,弹簧将在传感器与壳体接触时进行缓冲并达到防止抖动的效果。

1.3 传感器与绝缘杆连接部分设计

测试过程中常常需要根据测试部位实时调整探头方向,现场作业时具有一定的不便。考虑这一因素,借鉴相机云台(见图3)可以万向转动的设计理念,设计了连接部分,如图4、图5所示。



图3 相机云台转动装置

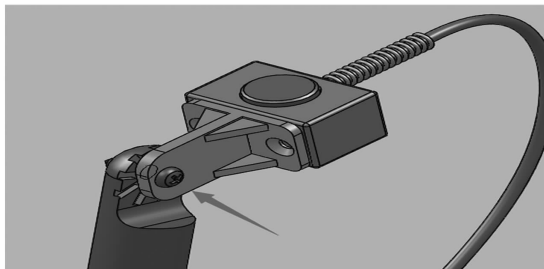


图4 模型

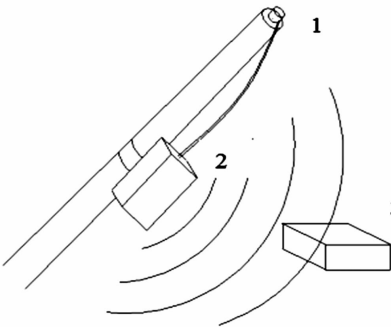
所设计的万能转向连接部分能够实现传感器的水平0°至360°、垂直0°至90°范围内任意角度固定。通过该设计理念可以高效地将传感器对准被测物外壳,实现有效贴合,更方便现场测量。



图 5 实物

1.4 无线传输信号模块设计

Zigbee 技术是目前比较流行的有较大优势和较高关注度的无线传输技术,具有能量损耗较小、传输速率高的优点,且适合传输电气设备之间距离近的数据。这里通过无线传输技术,将传感器采集到的信号传输到主机,但这涉及信号衰减和延迟的问题。因此,在超声波传感器后方加装了一个信号调理器,并利用前置放大电路放大信号,再将接收到的信号汇集后用 ZigBee 技术传输回主机的方式,可以解决信号衰减和延迟问题,实现了信号无线传输。其设计简易图如图 6 所示。



1. 超声波传感器 2. 信号调理器 3. 信号处理及显示器

图 6 简易设计示意

1.5 伸缩绝缘杆固定底盘设计

现场实际检测时需要对绝缘杆进行扶举,而

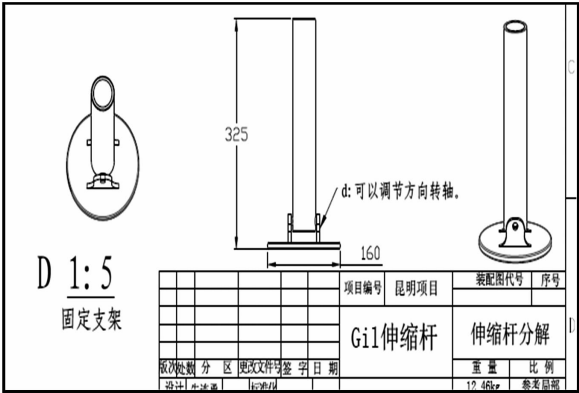


图 7 伸缩绝缘杆固定底盘设计

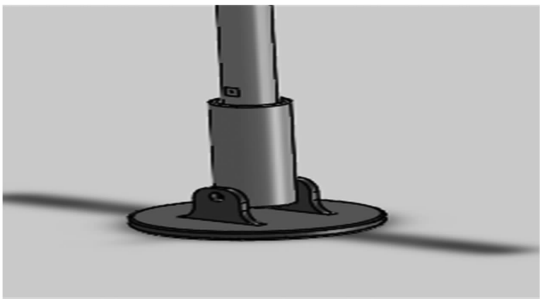


图 8 伸缩绝缘杆固定底盘模型

人为施力容易造成绝缘杆移动,导致测试不准确。因此考虑在伸缩绝缘杆底部加装固定底盘,将绝缘杆部分放置固定在地面,使得测试过程中杆体稳定。固定底盘设计如图 7 所示,模型如图 8 所示。

所设计的固定底盘可自由调节绝缘杆角度($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$),当测试杆长度大于 GIS 离地高度时,可调节绝缘杆角度,使其倾斜依靠 GIS 外壳以便测试。

2 现场检测

根据设计思路将各个部分组装后,在 220 kV 某变电站与传统的手持传感器测试方式取得的数据进行了对比,如图 9 所示,测试数据比对如表 1 所示。表 2 为测试时间对比。



(a) 传统测试方法 (b) 本装置测试方法

图 9 带电局部放电测试仪超声无线测量装置应用前后对比

表 1 GIS 设备局部放电测试数据比对

气室名称	测试值/ $(\text{dB} \cdot \text{mV}^{-1})$		误差率 /%
	传统方式	所设计装置	
2275 某二线断路器气室	0.81	0.80	-1.23
2275 某二线 电流互感器气室	0.92	0.95	+3.26
22757 某二线 隔离开关气室	0.84	0.84	0
2250 母联断路器气室	0.90	0.89	-1.11
22501 母联隔离开关气室	0.88	0.88	0
22502 母联隔离开关气室	0.92	0.89	-3.26
110 kV 母线筒	0.75	0.74	-1.33
1101 避雷器气室	0.83	0.80	-3.61
1101 断路器气室	0.98	1.00	+2.04
221Y 电压互感器气室	0.97	0.96	-1.03

表 2 GIS 设备局部放电测试时间对比

气室名称	测试时间/min		时差 /min
	传统方式	所设计装置	
2275 某二线断路器气室	28	8	20
2275 某二线 电流互感器气室	27	8	21
22757 某二线 隔离开关气室	31	11	20
2250 母联断路器气室	29	8	21
22501 母联隔离开关气室	28	9	19
22502 母联隔离开关气室	27	9	18
110 kV 母线筒	26	8	18
1101 避雷器气室	28	9	19
1101 断路器气室	27	7	20
221Y 电压互感器气室	28	7	21

由表 1、表 2 可知,检测的数据误差率均在 ±5% 以内,但大大缩减了检测时间,既省时省力,又避免了人员登高作业的危险。

3 结 语

1)提出了一种新型超声波局部放电检测辅助装置的设计思路,在不改变原有测试仪结构的基础上,增加可拆卸的伸缩绝缘杆、超声波传感器固定组件、传感器与绝缘杆连接部分组件、无线传输信号组件以及伸缩绝缘杆固定底座。

2)现场测试数据表明,所设计装置不仅实现了原有测试仪的功能,而且避免了人员登高风险以及防止传感器表面与 GIS 外壳发生碰撞和摩擦,提高了工作效率,降低了劳动强度。

参考文献

[1] 王迪. GIS 局部放电检测技术研究及应用[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.

[2] 张洋. GIS 局部放电带电检测技术研究与应

(上接第 79 页)
变压器的安全运行是否存在危害,需要进一步研究。

参考文献

[1] 王建中. 变压器油中氢气含量异常的分析与处理[J]. 农村电气化,2006(6):26-27.

[2] 朱文兵,陈玉峰. 电力变压器状态监测参量及监测方法综述[J]. 山东电力高等专科学校学报,2011,14(6):8-12.

[3] 李浩纯. 分析化学手册 第五分册:气相色谱分析[D]. 北京:化学工业出版社,1999.

京:华北电力大学,2018.

[3] 王峥,袁乐童,智李. 超声波检测技术在 GIS 中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2018,40(4):64-67.

[4] 王志强. GIS 局部放电检测方法探讨[J]. 自动化应用,2018(11):51-52.

[5] 国家电网公司运维检修部. 电网设备带电检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[6] 王磊. GIS 设备超声波局部放电带电测试方法及故障研究[J]. 电声技术,2018,42(9):35-37.

[7] 郭路遥. GIS 设备局部放电带电检测技术有效性研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.

[8] 董化新,孙大为. GIS 设备局部放电检测装置的研制[J]. 黑龙江电力,2008,30(6):433-435.

[9] 杨坤. 变电设备局部放电带电检测技术研究[D]. 济南:山东大学,2014.

[10] 戴武昌,赵永财. 一种新型的 GIS 局部放电检测便携装置[J]. 东北电力学院学报,2004(6):88-91.

[11] 高超,刘航,舒鸿科,等. GIS 设备超声波局部放电带电检测操作杆总成[P]. 北京:CN204731376U,2015-10-28.

[12] 王斌,李杰,郑建,等. 一种便携式多功能局部放电检测用探测杆[P]. 山东:CN205786694U,2016-12-07.

[13] 王伟,张弛,李松原,等. 用于 GIS 超声波巡检的传感器固定装置[P]. 天津:CN204613250U,2015-09-02.

作者简介:

董小顺(1989),硕士,助理工程师,主要研究方向为高电压与绝缘技术;

刘 鹏(1987),硕士,工程师,主要研究方向为高电压绝缘技术;

王 喆(1990),工程师,主要研究方向为带电检测技术。

(收稿日期:2019-12-04)

[4] 谢超,郑望其,谭华安,等. 油色谱在线监测装置载气进入变压器本体情况分析[J]. 仪表技术,2014(8):35-37.

[5] 刘栋梁,王新彦. 浅谈变压器油中溶解气体在线监测系统的脱气技术[J]. 江苏电机工程,2009,28(3):72-73.

作者简介:

谭华安(1980),高级工程师,主要从事高压直流输电系统运维技术研究工作;

刘春涛(1981),高级工程师,主要从事高压直流输电系统运维工作。

(收稿日期:2019-12-04)

网络安全等级保护在大型水电站的实践

钟 健¹,倪雅琦²

(1. 中国电力工程顾问集团公司西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021;
2. 国网四川省电力公司信息通信公司,四川 成都 610041)

摘 要:按照《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》要求,对某大型水电站电力监控系统安全防护现状做出详细分析后,提出电力监控系统安全防护整改方案。整改方案严格遵守《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》《电力监控系统安全防护规定》等重要文件要求,涵盖了水电站主要的电力监控系统。在采取了有针对性的技术措施加强安全防护的同时,完善了水电站电力监控系统安全防护管理的建设。最后,对部分遗留问题进行了初步探讨,以便今后进一步完善电力监控系统安全防护体系建设。

关键词:电力监控系统;安全防护;网络安全等级保护;安全管理;水电站

中图分类号:TP309 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)02-0084-07

Practice of Classified Protection of Cybersecurity in Large – scale Hydropower Station

Zhong Jian¹, Ni Yaqi²

(1. CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Information and Telecommunication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:After a detailed analysis for the current situation of security protection in a hydropower station, the security architecture of power monitoring system in hydropower station is designed and proposed, which is strictly based on the "Information security technology – Baseline for classified protection of cybersecurity" and "Regulations on security protection of power monitoring system" and covers the technology and management together. The design also involves most subsystems of the station, and is feasible to be put into practice. Finally, several remaining issues which need to be improved are discussed in order to enhance the security architecture.

Key words:power monitoring system; security protection; classified protection of cybersecurity; security management; hydropower station

0 引 言

随着计算机技术和通信技术在电力行业中的广泛应用,电力监控系统逐渐由传统生产控制设备范畴扩大到整个信息系统和通信网络,各系统之间的边界随着信息化逐渐模糊和融合,同时信息安全问题也从管理信息系统延伸到了生产控制系统的各个环节。因此,需要理清在《中华人民共和国网络安全法》、《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019)(以下简称等保 2.0)和国家发展和改革委员会颁布的《电力监控系统安全防

护规定》等法律、标准要求下,如何组织实施电力行业网络安全防护,为发电企业等提供一个具备动态响应、持续进化的符合《中华人民共和国网络安全法》和等保 2.0 标准的整网安全保障体系。

1 电力监控系统安全防护与等保 2.0 的关系

《中华人民共和国网络安全法》自 2017 年 6 月 1 日开始施行。《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》自 2019 年 12 月 1 日开始施行,它是依据《中华人民共和国网络安全法》建立的国家层面的

网络安全标准体系,针对通用计算机信息系统,提出了安全技术应用、安全管理体系建设等方面普遍适用的规范要求^[1]。

《电力监控系统安全防护规定》是国家能源局制定的网络安全行业标准,电力监控系统安全防护关注的重点是与电力安全生产中用于监视、测量、控制和调度电力生产及传输的业务系统和通信网络,并根据其对安全生产的重要性的业务特点,提出相关的安全防护措施和安全管理规范要求^[2]。

电力监控系统安全防护的防护强度应满足或超过等级信息系统安全等级保护的要求。由于电力监控系统内部随着生产业务系统的升级也在不断更新、扩充、结合,安全要求也相应产生改变,《电力监控系统安全防护规定》其相关安全防护措施更加具有系统性、动态性和可持续性。因此,《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》是一个对信息网络系统安全防护体系建设通用的规范要求,也是对信息网络系统安全防护强度最基本的要求^[3];《电力监控系统安全防护规定》则是根据电力行业信息网络系统的特点,进行了有针对性的细化和加强,网络安全层级和界面清晰,操作性更强。

2 电力监控系统安全防护总体要求

电力监控系统安全防护的目的是防止电力监控系统的崩溃、误动和数据被非法访问,并造成电力设备故障或电力安全事故。电力监控系统安全防护的重点:一是防止来自系统外部非法访问获取信息和恶意攻击,特别是集团式攻击;二是防止内部非法访问和违规操作^[4-6]。

纳入整改方案的电力监控系统安全防护分析的水电站核心电力监控系统包括:水电站计算机监控系统;相量测量装置(PMU);安全自动装置系统;泄洪闸控制系统;船闸控制系统;消防火灾报警系统;110 kV 变电站监控系统;调功终端系统;电能量计量系统;故障信息处理系统;机组状态监测系统;水调自动化系统(水情自动测报系统)市场报价终端;大坝安全监测系统;工业电视系统;生产管理信息系统;临时接地线管理系统;办公 OA 系统;MIS 网。

整改思路主要为:

1)调度数据网作为生产控制大区业务系统与调度端实时信息的专用通信通道,是电力监控系统安全

防护纵向边界安全防护的一个着重点;电力监控系统与上级单位之间的纵向数据通信应作为纵向边界安全防护的一个重点;各电力监控系统之间的横向通信作为安全防护的另一个重点。

2)水电厂各系统之间通过硬接线传输信号因不存在网络通信,应确认其为安全;而水电厂各系统之间的串行通信方式视其为安全。

3)闸门控制系统实际包括泄洪闸控制系统、船闸控制系统以及进水口快速门。由于进水口快速门通过 I/O 口与计算机监控系统 LCU 相连实现远程控制,因此归入计算机监控系统。闸门控制系统在所提方案中由泄洪闸控制系统和船闸控制系统替代。

4)严格禁止生产控制系统/装置的远程拨号维护接口。

5)各业务系统内部的通信安全性应由生产厂家按照国家相关标准实施,在这里不再考虑。

根据上述思路,水电站电力监控系统安全防护边界防护和系统内部防护要求如下:

1)通信安全需求

生产业务系统之间采用点对点串口通信应视为安全;生产业务系统设备之间网络通信需根据各业务系统安全分区的不同情况采取相应的横向隔离措施;生产业务系统/设备与调度端经调度数据网通信须采取纵向加密认证装置进行隔离;MIS 网与上级单位、调度端 DMIS 系统的网络通信应采取相应的隔离措施;出差人员与 MIS 远程拨号访问须采取 VPN 等技术和管理手段防止重要数据被窃取,防止该通道成为病毒传播和恶意攻击跨越防火墙的途径。通信网络连接图如图 1 所示。

2)各电力监控系统安全需求

计算机监控系统内部应部署防病毒软件,防止病毒传播。系统主机和工作站的操作系统漏洞和应用系统漏洞存在被利用的风险,应及时封堵或升级,重要服务器和通信网关应进行主机加固。

水调自动化系统应具有病毒防护能力。

机组状态监测系统应部署防病毒软件,防止病毒传播。系统 Web 服务器与本系统的通信应进行物理隔离,实现数据单向传输,同时应保证 Web 数据与机组状态监测系统同步。

安全自动装置远方修改定值和控制的功能应屏蔽。故障信息处理系统 Web 服务应增加加密认证功能实现安全 Web,否则应关闭。

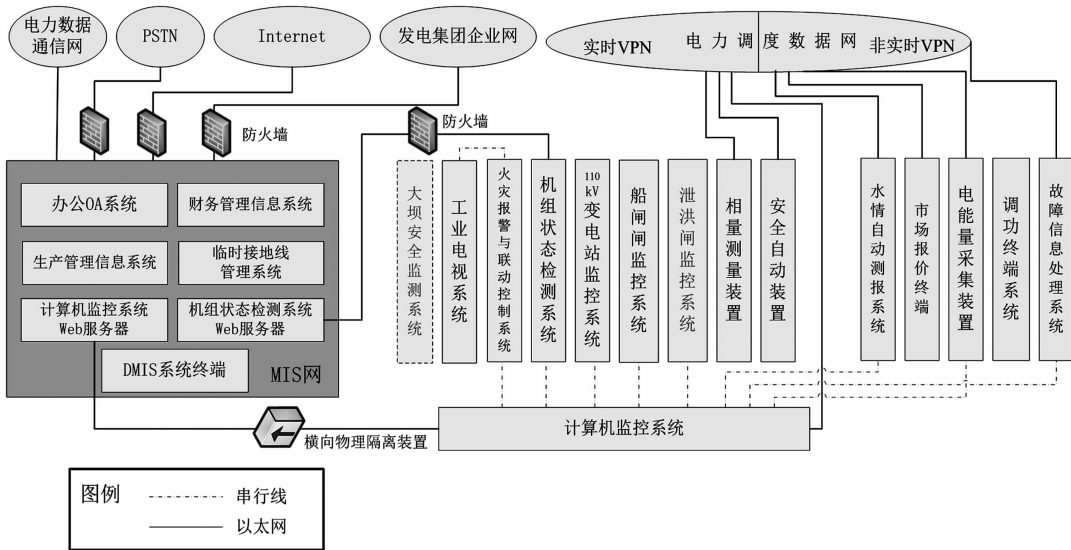


图 1 通信网络连接

市场报价系统作为电力市场运营系统的厂站侧组件,必须专机专用,与办公网络进行物理隔离;并配置防病毒系统。

MIS 网内重要服务器应采取有效的访问控制和隔离手段,封堵系统漏洞,过滤恶意代码病毒,阻挡网络攻击。各应用服务器应具有病毒防护能力。

移动设备是网络内部病毒传播的主要介质,应进行严格管理控制,采用比如安全 U 盘等措施。

各业务系统管理与操作人员、各终端使用人员的操作行为应得到有效监控,防护措施应能在一定程度上防止并可靠记录操作行为和恶意违规操作。

3) 全局安全需求

生产控制业务系统网络应能实时、可靠地响应安全事故,进行事故追忆,并具有学习功能。

水电站应定期对电力监控系统进行安全性评价,具有全面合理的电力监控系统安全防护管理体系。

3 业务系统保护等级测评

按照《信息安全技术 信息系统安全等级保护实施指南》(GB/T 25058 – 2010)和《电力行业信息系统安全等级保护定级指导意见》确定水电站电力监控系统的安全保护等级。

电力监控系统的安全保护等级确定后,根据测评结果出具的信息安全等级保护测评报告,按照《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》管理规范和技术标准,开展电力监控系统安全建设工作,达到电站安全防护体系合规合法的总体目标。

4 电力监控系统安全防护措施

电力监控系统安全防护的总体策略是:安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证^[2]。

针对水电站电力监控系统安全防护总体需求,同时遵循系统性、实用与先进结合、风险代价相平衡等原则,提出建立实时、主动、动态、由边界到核心的安全防护体系方案。

4.1 安全分区

防护方案所涵盖的电力监控系统依据《信息安全技术 信息系统安全等级保护实施指南》(GB/T 25058 – 2010)和《电力行业信息系统安全等级保护定级指导意见》所确定的保护等级纳入相应的安全分区中。本期水电站业务系统划分为生产控制大区和管理信息大区两个大区。生产控制大区由具有实时控制功能的安全区 I 和具有非实时控制功能的安全区 II 组成,业务系统安全分区见图 2 所示。管理信息大区按照水电站业务管理需求划分为安全区 III、安全区 IV^[7]。业务系统安全分区如图 3 所示。

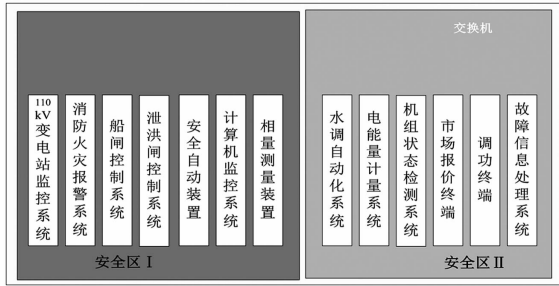


图 2 安全分区 I / II

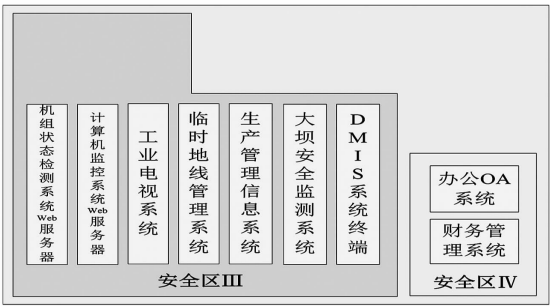


图 3 安全分区Ⅲ/Ⅳ

水电站计算机监控系统和机组状态监测系统向 MIS 网提供的 Web 服务调整为独立的系统,迁移至安全区Ⅲ运行。

根据水电站的各业务网络连接情况,防护方案采用如图 4 所示链式拓扑结构实现安全区互连。

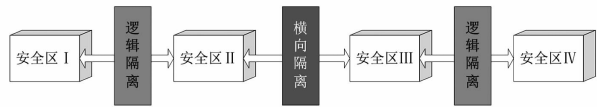


图 4 链式结构

4.2 纵向通信防护

水电站纵向网络通信包括:1) 生产控制系统经调度数据网与调度端的通信;2) DIMS 客户端经电力数据通信网与调度端通信;3) MIS 网络经同集团公司通信。

第 1 项通信属于生产控制业务,远程通信采用纵向加密认证装置进行隔离;通过加密隧道、加载在加密隧道上的访问控制策略以及系统通信主机 IP 地址和端口的对应关系保证其传输数据的机密性、完整性。纵向加密认证装置可配置双机热备,确保设备高可靠性。

第 2、第 3 项通信属于管理信息业务,采用国产硬件防火墙完成数据过滤和访问控制。防火墙应基于网络地址、通讯协议、通讯端口、用户、信息传输方向、操作方式、通讯时间、服务类型等因素配置控制策略,并能快速重组分片报文抵御分片攻击。

4.3 横向隔离

安全区Ⅱ和安全区Ⅲ区内交换机之间采用正向物理隔离装置实现数据以非网络方式从安全区Ⅱ发送到安全区Ⅲ,保证传输层以上数据完全单向传输,且最多返回 1 个字节的 TCP 应答数据。为确保设备高可用性,要求隔离装置采用双机网络热备份连接方式。同时,为提供安全区Ⅱ中水调自动化等系统从安全区Ⅲ获取数据的通道,须在安全区Ⅱ、Ⅲ区

内交换机之间部署反向物理隔离装置,使用数字认证、病毒查杀和有效性检查等手段对纯文本数据进行过滤后将其从安全区Ⅲ摆渡到安全区Ⅱ。物理隔离装置的使用可极大提高生产控制大区的安全性,但同时也会造成 FTP、SQL 等应用层通信无法跨越隔离装置。因此必须对计算机监控系统和机组状态监测系统软件进行调整,以确保其 Web 功能的正常运行。

安全区Ⅰ、Ⅱ之间和安全区Ⅲ、Ⅳ之间采用国产防火墙逻辑隔离,对跨区的访问进行严格控制。

安全区Ⅳ采用国产防火墙与 Internet 隔离,配置完整的路由策略,对开放的协议、服务、端口、时段、用户、数据流向、连接数等进行严格控制。

4.4 入侵检测

生产控制大区统一部署一套分布式 IDS,分别在安全区Ⅰ和安全区Ⅱ的区内交换机和调度数据网接入交换机镜像端口配置探测引擎,实时主动侦测攻击和非法操作。控制中心软件安装在安全区Ⅱ综合管理服务器上,接收扫描引擎事件上报并向扫描引擎下发安全策略。特征库的升级要求定期采用离线方式。

需要注意的是,目前商业化的入侵检测系统多数采用基于异常的检测方法,该检测方法误报率高,故不宜配置 IDS 与防火墙的联动策略。

4.5 病毒防护

由于安全区Ⅰ、安全区Ⅱ内的业务系统网络相对独立,不便于统一防病毒系统的形式,根据系统规模采用单机或网络方式的防病毒系统。

管理信息大区的应用基本上都建立在 MIS 网上,采用网络方式的防病毒系统。

病毒库由负责人定期采用离线方式升级。对 UNIX 或 LINUX 服务器和工作站以及嵌入式系统暂不考虑病毒防护。

4.6 漏洞扫描

漏洞扫描是一种主动的防范措施。漏洞扫描与防火墙、入侵检测系统互相配合,能够有效提高网络的安全性。通过对网络、主机和数据库的扫描,及时发现安全漏洞,评估网络风险;并根据扫描结果采取安装升级包、补丁包,修改各种网络隔离设备和数据库的访问控制策略等手段,避免非授权个人利用系统安全漏洞进行攻击或者非法访问。

4.7 安全审计

纵向加密认证装置、横向物理隔离装置、防火

墙、入侵检测、防病毒系统、主机、工作站等电力监控系统安全防护设备以及调度数据网接入设备本身都会产生自身运行状况和系统安全的日志。生产控制大区应建立安全审计管理平台,方便运行维护人员集中管理日志信息,借助相应工具分析、判断、预防和及时响应处理系统的安全事件,完成全面的日志分析、告警和综合安全管理^[2]。

安全审计管理平台部署在安全区Ⅱ和管理信息大区的 MIS 网内,通过 SNMP 协议或 SYSLOG 等方式获取安全设备(如纵向加密认证装置、横向物理隔离装置、防火墙、IDS、防病毒系统等)、调度数据网接入设备的安全事件信息,对网络安全事件信息进行集中分析过滤、处理、保存。通过合理的事件配置为管理人员提供及时、可靠的告警,实现全网的实时安全检测,清晰的记录可为安全审计提供有力的支持,统一标准化管理功能可有效的整合生产控制大区的安全防护体系,衔接安全技术和安全管理,从全局高度维护网络的安全性。

4.8 主机加固

防火墙、IDS 等网络安全产品解决了当前网络系统的一些问题,但由于这些安全产品大多独立于应用系统之外,并不能完全防护外部的入侵行为,也不能防止内部用户的破坏行为。而且通过渗透攻击,黑客最终将获得服务器系统管理员的权限,基于网络的安全产品将不再起作用。

水电站重要的主机(如:监控主服务器、重要的工作站/操作员站、通信服务器)运行的是实时系统的重要数据和业务进程,对可靠性要求更高。一旦出现了事故,事后无法追查、判断责任,无法迅速找到解决方案。因此主机加固做为核心防护是一项必须的措施,要保证重要的业务不停顿,重要的数据不被更改、删除、非法拷贝。除加强操作系统补丁管理、安全配置外,在核心系统上部署主机加固防护产品,对计算机监控系统、110 kV 变电站监控系统、船闸控制系统、泄洪闸控制系统、水调自动化、生产管理信息系统的服务器、操作员站和通信服务器等进行安全配置和主机加固。

4.9 MIS 网安全监控

水电站 MIS 网与 Internet 连接,且涉及的业务量大,终端多,用户类型相对复杂。虽然 MIS 网重要性不及生产控制系统,但由于内部存在相当数量

的企业级保密数据且网络化的管理和办公方式日益深入,维护其安全将是电厂生产管理工作正常运行的重要保障。

管理信息大区应配置一套内网安全管理系统,实现严格可靠的网络管理,形成健康有序的网络环境,避免内部安全隐患造成边界防护的失效。

内网安全管理系统不间断监测服务器和网络设备的运行状况,采集相关运行日志,实现网络资源状态的集中监管;对重点业务系统进行精细化的监管;将网络设备、关键服务器及业务整合,发生故障时,及时告知故障点及故障可能波及的范围,尽可能减少故障修复时间和关键数据的损失;能够对内部网络操作进行监控和管理;具备远程监测和报警功能;并提供详细的网络性能和网络行为报告。

4.10 网络安全设置

在维护网络安全的同时,安全设备以及组网设备自身应由专人执行严格的安全设置,采取建立强健的身份认证、合理分配管理权限、限制不安全应用协议、关闭默认设置、信息加密等措施确保网络及安全设备的安全可靠。

5 建立安全管理机制

“技术是基础,日常管理是根本”,健全的管理是人与技术设备协调统一的保证。所提方案对水电站电力监控系统安全管理提出了以下几个方面的建议:1)建立完善的安全管理组织机构和责任制度;2)设备、应用及服务的接入管理;3)建立日常运行的安全管理制度;4)工程实施过程中的安全管理;5)建立快速的安全事件响应机制;6)建立分级的安全评估制度。

前 3 个方面对安全管理组织安排、安全职责划分、系统接入管理、人员管理、资源管理、保密工作、访问控制、系统维护、安全审计、应急备份、安全培训等提出了全面的建议,是安全管理工作的基础,更详细的内容可参考《信息安全管理体系要求》(GB/T 20269-2006)、《信息安全实用管理规则》(GB/T 19716-2005)等标准,作为安全管理机制基本思路和建设框架的参考,通过实际的执行、调整应尽早形成初步可行的电力监控系统安全防护管理规范。

6 安全评估

电力监控系统安全防护是一个长期动态的过程,方案设计仅是处在安全防护的初级阶段,在安全防护的基础框架上,定期的安全评估可促使新问题的发现和及时修正,在不断的循环中完善防护体系。

提出建立分级的安全评估制度,水电站作为基层单位首先必须配合上级的安全工作,定期进行全面安全评估,同时需建立可行的自评估办法,利用自评估逐步规范和加强安全管理,促进安全意识、机制的建立。同时自评估项目和标准也应不断完善和提高。

7 待进一步探讨的问题

所提水电站电力监控系统安全防护方案仅处于安全防护体系生命周期的初步建设阶段。从效率、安全等角度看,该方案尚存在以下需进一步研究和解决的问题:

1)所提方案关注的主要是边界防护和核心防护两方面的安全需求。《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》已经将信息网络扩展到工业控制网络,其中安全计算环境关系到工控系统的主机应用安全、数据存储保护,是网络安全等级保护中三重防护重要组成部分。这将是下一步水电站电力监控

系统安全防护的重点内容^[4]。

2)漏洞扫描、安全审计、入侵检测系统等安全防护设备提供了详细的资料辅助安全策略制定。但由于电厂安全防护负责人员大多只是电力专业背景,在缺乏专门训练的情况下,面对庞大的分析数据要坚持长期跟踪变化并实时做出应急反有一定的困难。可以考虑建设网络安全态势感知体系,实现对主机设备、网络设备、安防设备等的实时告警与运行状态在线监测,从静态布防到实时管控转变^[5],达到以下目标:①外部侵入有效阻断。对外部侵入行为能够实时监视,及时阻断危害链路,保证电力监控系统不受入侵事件影响。②外力干扰有效隔离。对于外部产生紧急威胁事件,能够通过有效手段对涉及主机或设备进行有效隔离,保证威胁事件不会扩散传播。③内部违规及时发现。对于内部的越权访问和恶意操作,可及时发现并预警。

3)区域电力数字证书系统的缺乏使得要在电厂等基层单位实现统一的身份认证机制和普及加密通信还需时日。

8 结 语

水电站电力监控系统安全防护实施方案如图5所示。方案严格地执行了相关文件的规定,符合电力监控系统安全防护和信息安全的原则性要求。尽管如此,上述问题仍应该在今后的生产管理中继续

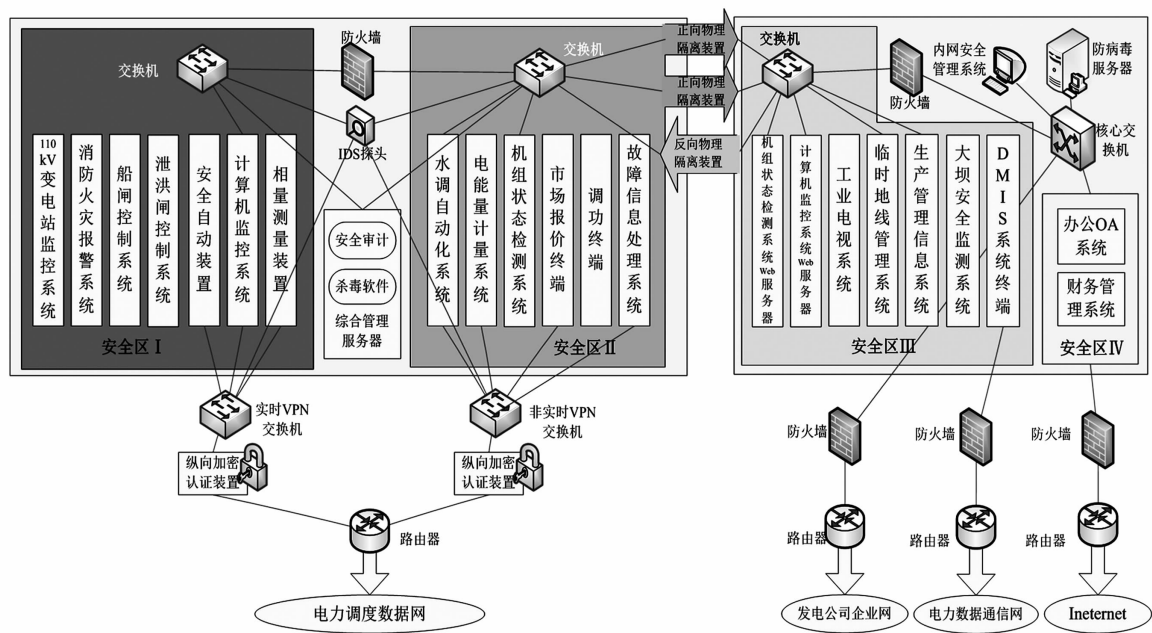


图5 电力监控系统安全防护实施方案

得到高度关注和进一步研究,根据技术的发展、环境因素的改变对方案做出合理的调整,以保证跟上安全形势的变化;为水电站提供一个具备动态响应、持续进化的符合《中华人民共和国网络安全法》和《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》的整网安全保障体系。

满足文件要求不是最终目的,安全工作要努力实现的是人员安全意识的提高、安全机制的建立和事故保障体系的完善,最终形成渗入生产管理各个细节的安全体系,而不仅仅是浮于文字的规定。

参考文献

[1] 中华人民共和国网络安全法[Z]. 2016.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力监控系统安全防护规定[Z]. 2014.

[3] 国家市场监督管理总局中国国家标准化管理委员会. 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求;GB/T 22239 -

(上接第 23 页)

3 结 语

瞬时性故障的保护是 MMC 在柔性直流输电和直流电网领域应用必须解决的关键问题。前面提出了一种具备直流故障清除能力的三电平子模块拓扑,该拓扑无需任何附加的保护功率器件。经仿真验证了所提 MMC 拓扑在直流短路故障发生时能够在 5 ms 以内实现短路故障电流的自清除。

参考文献

[1] 徐政. 柔性直流输电系统(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.

[2] International Electrotechnical Commission. High - voltage Direct Current (HVDC) Transmission Using Voltage Sourced Converters (VSC) [C]. IEC Tech. Rep. TR - 62543, 2011.

[3] Soto - Sanchez D, Green T. Control of A Modular Multilevel Converter - based HVDC Transmission System[J]. IEEE, 2011: 1 - 10.

[4] Norrga S, Xiaoqian L, Angquist L. Converter Topologies for HVDC Grids; Energy Conference(ENERGYCON) [C].

2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.

[4] 电力监控系统安全防护总体方案[S], 2015.

[5] 何占博,王颖,刘军. 我国网络安全等级保护现状与 2.0 标准体系研究[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38 (3): 9 - 14.

[6] 赵志远. 等保 2.0 安全扩展要求讲了些什么[J]. 网络安全和信息化, 2019(6): 42 - 43.

[7] 周双进. 亭子口水电站二次系统安全防护方案[J]. 四川水利, 2018(5): 32 - 36.

[8] 国家能源局. 电力信息系统安全等级保护实施指南: GB/T 37138 - 2018[Z]. 2019.

作者简介:

钟 健(1972), 高级工程师,从事电力调度自动化、电力监控系统安全防护、网络通信等工作;

倪雅琦(1976), 高级工程师,从事电力调度自动化、电力信息系统建设、信息化产品研发等工作。

(收稿日期:2019 - 12 - 26)

IEEE International, Cavtat, 2014.

[5] Marquardt R. Modular Multilevel Converter Topologies with DC - Short Circuit Current Limitation; Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE) [C]. 2011 IEEE 8th International Conference on, Jeju, 2011.

[6] 薛英林,徐政. C - MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63 - 70.

[7] 薛英林,徐政. 适用于架空线路输电的新型双极 MMC - HVDC 拓扑[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 481 - 487.

[8] Solas E, Abad G, Barrena J A. Modular Multilevel Converter with Different Submodule Concepts - Part I: Capacitor Voltage Balancing Method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4525 - 4535.

[9] Solas E, Abad G, Barrena J A. Modular Multilevel Converter with Different Submodule Concepts - Part II: Experimental Validation and Comparison for HVDC Application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (10): 4536 - 4545.

作者简介:

常 非(1986), 博士, 工程师, 研究方向为电力电子技术

在电力系统中的应用与继电保护。

(收稿日期:2020 - 01 - 16)

基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估

杨慎涛, 陈劲松, 袁 林

(国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着城市配电网可靠性要求越来越高,全国各大城市配电网带电作业急速扩张,其作业的安全综合评估显得十分重要。配电网带电作业的安全受到城市电配电网实际运行环境、安全生产制度以及作业人员综合素质等多方面因素的影响,使其呈现出分层分级的非线性综合评价的特征。为此,提出采用一种无需进行一致性检验的 G1 赋权法进行综合评估的思路。首先,通过深入分析带电作业特点,建立起配电网带电作业安全综合评价指标体系;然后,利用 G1 赋权法确定各指标因素的各自权重,计算得到综合评价结果;最后,通过对某实际带电作业现场的安全性进行评估验证,说明所提方法的合理性与有效性,可为带电作业现场安全管理提供参考。

关键词:G1 赋权法;带电作业;安全综合评估

中图分类号:TM755 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)02-0091-04

Comprehensive Evaluation for Live Working Safety in Distribution Network Based on G1 Weighting Method

Yang Shentao, Chen Jinsong, Yuan Lin

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:As the reliability requirements of urban distribution network are getting higher and higher, the live working of distribution network in major cities across the country is rapidly expanding, and comprehensive evaluation for the safety of live working is very important. The safety of live working in distribution network is affected by many factors, such as the actual operating environment of urban distribution network, the safety production system and the comprehensive quality of the operators, which makes it appear as a hierarchical and non-linear comprehensive evaluation. To this end, a comprehensive evaluation method using G1 weighting method that does not require consistency check is proposed. Through in-depth analysis of the characteristics of live working, a comprehensive evaluation index system for the safety of live working in distribution network is established, and then G1 weighting method is used to determine the respective weights of each index factor, and at last the comprehensive evaluation results are obtained by calculation. Finally, the evaluation and verification for the safety of an actual live working site demonstrates the rationality and effectiveness of the proposed method, which can provide a reference for the safety management of live working sites.

Key words:G1 weighting method; live working of distribution network; comprehensive safety evaluation

0 引言

近年来,随着国民经济的快速增长,作为城市经济一项最基本保障的电力供应,对可靠性的要求越来越高,这也使得供电企业内部对于城市配电网的可靠性越来越重视,对停电越来越难以容忍。因此,具备不停电检修性质的配电网带电作业发展十分迅猛。中国东部发达地区的配电网带电作业每年已经

达到了近万次,产生了极高的社会价值和经济价值。带电作业作为城市配电网未来检修的主要方式,全国其他各地也积极布局,使得近年的带电作业迅猛发展,作业次数急速增长^[1-3]。

虽然,配电网带电作业目前均采用全绝缘化的方式,相比于多年以前采用等电位的作业方式,在基本安全性方面有了较大的进步与保证^[4-6]。但是,带电作业作为一项本身就具备高危险性的工作,其整体安全性还受到安全生产综合管理、工器具及防

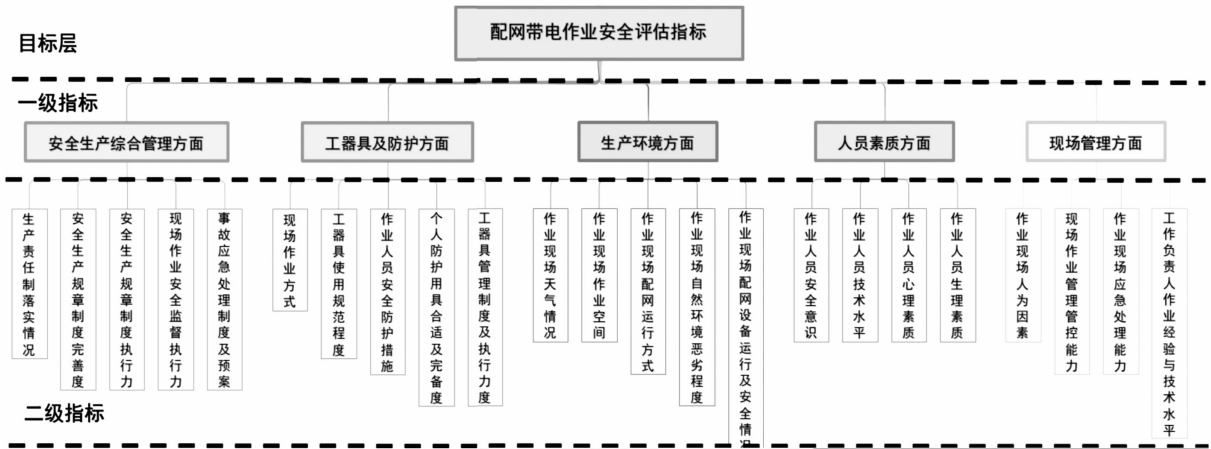


图1 配电网带电作业安全综合评价指标体系

护、生产环境、人员素质和现场管理等多方面因素的影响,呈现出分层分级的多因素非线性特征,不能仅从单方面进行评价^[7],相关文献研究探讨了输电线路带电作业安全评估的方法^[5,8],但是少有涉及到城市配电网。

基于此,下面提出了一种无需进行一致性检验的改进层次分析法的 G1 赋权法,进行配网带电作业安全综合评估。

1 配电网带电作业安全综合评价指标体系

配电网带电作业安全性评价是综合多方面因素的评价,在文献[1,4,8]的基础上,深入结合了带电作业的生产制度和现场作业管理。从安全生产综合管理、工器具及防护、生产环境、人员素质和现场管理等多个方面进行了细致的指标梳理,建立了涵盖目标层、一级指标、二级指标的递阶层次结构的配网带电作业安全综合评价指标体系,如图1所示。

安全生产综合管理方面:主要是从供电企业的安全生产制度方面进行分析,提取出了生产责任制度落实情况、安全生产规章制度完善度、安全生产规章制度执行力、现场作业安全监督执行力和事故应急处理制度及预案等几个二级指标。

工器具及防护方面:主要考虑到带电作业的安全防护和工器具是人员安全的“魂”,其重要性不言而喻。为此,提取出了现场作业方式、工器具(包含带电作业绝缘斗臂车)使用规范程度、作业人员安全防护措施、个人防护用具合适程度和完备程度(如应该穿绝缘服的情况而仅穿了绝缘披肩)以及

工器具管理制度及执行力度等多个二级指标。

生产环境方面:主要通过对作业现场天气情况(风力和湿度等方面)、作业现场作业点的作业空间情况、作业现场配电网运行方式、作业现场自然环境恶劣程度以及作业现场配电网设备运行及安全情况等多个因素进行了深入分析与提取。

人员素质方面:主要通过作业人员的安全意识、技术水平(面对突发情况的技术应急处置能力)、心理素质和生理素质等多个方面进行了分析。

现场管理方面:通过深入分析带电作业现场的管理方式,主要提取了作业现场人为因素、现场管理管控能力、应急处理能力和工作负责人作业经验和技术水平等几个方面的指标。

2 基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估

配电网带电作业安全综合评价主要是确定各指标的权重信息,这里采用 G1 赋权法来确定各指标的权重 w_j 。

2.1 利用 G1 赋权法的指标权重计算

G1 赋权法是层次分析法 (analysis of hierarchy process, AHP) 的一种改进方法,其主要优势在于^[9]:1) 计算量小,计算速度快;2) 无需构造判断矩阵,更无需一致性检验;3) 具备保序性的特点,方法使用简便。

G1 赋权法对于待评价的指标集 $\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 确定其序关系的主要步骤为^[9]:1) 从待评价的指标集中挑选出最不重要或者最重要的那个指标,标记为 X_i ;2) 对余下的待评价指标集的元素中再选

出最不重要或者最重要的那个,标记为 X_j ;3)按以上步骤,以此类推,就可以得到待评价指标集各元素的唯一序关系 $X_i > X_j > \cdots > X_k (i, j, k \in \{1, 2, \cdots, m\})$ 。最后,再确定各相邻指标之间的相对重要程度。

G1 赋权法作为主观赋权法,需要专家人为地选择相邻指标 X_{k-1} 和 X_k 之间地重要程度,其用数学关系表示为 $r_k = w_{k-1} / w_k$,式中 w_k 为第 k 个指标的权重系数,且 $k = 2, 3, \cdots, m$ 。这样就可以根据之前确定的序关系计算出各指标的重要程度。为了尽可能减少人为因素的偏差, r_k 可以通过多位专家评判再取平均的方式进行计算。通常,可以取最次要指标相对重要程度 $r_m = 1$,且可参考表 1。

$$r_{k-1} \geq r_k$$

(1)

$$w_m = \left[1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right]^{-1}$$

(2)

$$w_{k-1} = r_k w_k$$

(3)

式中, $k = m, m - 1, \cdots, 2$ 。那么,各指标的权重系数向量可表示为 $W = [w_1, w_2, \cdots, w_m]$ 。

表 1 指标权重比较规则

重要程度 r_k	规则
1.0	指标 X_{k-1} 与 X_k 同样重要
1.2	指标 X_{k-1} 与 X_k 稍微重要
1.4	指标 X_{k-1} 与 X_k 明显重要
1.6	指标 X_{k-1} 与 X_k 强烈重要
1.8	指标 X_{k-1} 与 X_k 极端重要
1.1、1.3、1.5、1.7	介于两者之间

2.2 配电网带电作业安全综合评估

在确定了各指标综合权重的基础上,采用模糊综合评价的方法,来确定配电网带电作业安全综合评价结果。主要步骤如下^[8-10]:

1) 划定 5 个评价等级集,即从好到差依次为{A 级;B 级;C 级;D 级;E 级}。

2) 通过确定各子集模糊综合判断矩阵 R_i 。由于有两级评价指标,需要先对二级指标进行综合评判,然后计算得到一级指标的模糊评判结果。

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1c} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2c} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \cdots & r_{inc} \end{bmatrix}$$

(4)

3) 进行模糊综合评价。为简便易用,采用最大隶属度原则,通过隶属度 $N = W_i \cdot B_i$ 得到评价结

果。例如,通过计算得到对应{A 级;B 级;C 级;D 级;E 级}的各自隶属度为 $N = [N_A \ N_B \ N_C \ N_D \ N_E]$,若 N_D 最大,按照最大隶属度原则,那么最大的隶属度 N_D 对应的等级 D 就是该评价的最终等级。

3 实例验证

以成都市区某次带负荷更换跌落式熔断器的配电网带电作业为例,其整体为两层指标体系。首先,通过 G1 赋权法计算得到一级指标和二级指标的格子权重,一级指标权重 $W^{(1)} = (0.154, 0.234, 0.207, 0.184, 0.221)$,二级指标权重 $W_1^{(2)} = (0.184, 0.203, 0.227, 0.205, 0.181)$, $W_2^{(2)} = (0.162, 0.226, 0.249, 0.216, 0.147)$, $W_3^{(2)} = (0.215, 0.224, 0.181, 0.202, 0.178)$, $W_4^{(2)} = (0.284, 0.251, 0.247, 0.218)$, $W_5^{(2)} = (0.268, 0.239, 0.252, 0.241)$,其中 $W_j^{(i)}$ 表示第 i 级指标下的第 j 个指标的权重向量。

按照模糊综合评价的方法,由各带电作业专家对各级指标进行单独的模糊评判,得到各指标集合的隶属度矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.25 & 0.15 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.15 & 0.15 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.55 & 0.15 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.65 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.45 & 0.3 & 0.15 & 0 \\ 0.1 & 0.55 & 0.35 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.35 & 0.15 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.35 & 0.2 & 0.15 & 0.1 \\ 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

然后再结合各指标的权重系数,计算得到一级指标各自隶属度向量为

$$\begin{aligned} B_1 &= W_1^{(2)} \cdot R_1 = [0.20, 0.50, 0.16, 0.12, 0] \\ B_2 &= W_2^{(2)} \cdot R_2 = [0.12, 0.51, 0.24, 0.11, 0.01] \\ B_3 &= W_3^{(2)} \cdot R_3 = [0.16, 0.57, 0.11, 0.18, 0.02] \\ B_4 &= W_4^{(2)} \cdot R_4 = [0.17, 0.43, 0.18, 0.17, 0.24] \\ B_5 &= W_5^{(2)} \cdot R_5 = [0.20, 0.55, 0.12, 0.13, 0] \end{aligned}$$

那么,目标层的隶属度为

$$W^{(1)} \cdot (B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5)^T$$

$$= [0.167 \ 9, 0.518 \ 4, 0.163 \ 9, \ 0.139 \ 2, \ 0.051 \ 3]$$

按照最大隶属度原则,第 2 个隶属度 N_B 数值最大为 0.518 4,故该次作业对应的安全综合评价等级应为 B 级,处于较好的安全水平,但也需要注意到其他因素的潜在安全风险,需要持续改善整个作业过程。

4 结 语

在用户和供电企业对可靠性要求越来越高的当下,配电网检修方式必然大规模向带电作业方式转变,而急速的扩张使得带电作业的安全风险问题必须得到足够的重视,为此提出了一种配电网带电作业安全综合评估方法,可为相关企业的管理者提供相应的决策支撑手段,并得到以下结论:

1)配电网带电作业的安全多方面的影响,同时由于不同管理人员认知的不同,对安全的把控方面侧重不同,为此,以相关文献资料为基础,结合实际带电作业现场,建立了细化完善的安全综合评估指标。

2)利用 G1 赋权法确定了各评估指标各自权重

(上接第 69 页)

[3] 丁宣文,王平. 500 kV 智能变电站二次设备改造方案研究[J]. 四川电力技术,2016,39(6): 59-64.

[4] 叶远波,孙月琴,黄太贵,等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(20): 148-153.

[5] 高翔,杨漪俊,姜健宁,等. 基于 SCD 的二次回路监测主要技术方案介绍与分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15): 149-154.

信息,然后建立了以模糊综合评价为基础的配电网带电作业安全综合评估模型,以最大隶属度原则的方式得到最终评价结果。

3)最后,以某实际带电作业工作的安全综合评估为例,详细计算了整个综合评估过程,验证所提方法的可行性。

参考文献

[1] 国家电网公司. 供电企业安全风险评估规范[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[2] 成亮. 浅谈 10 kV 配网带电作业[J]. 图书情报导刊,2006,16(14): 288-289.

[3] 应鸿,景伟强. 杭州电网的主要带电作业方法[J]. 浙江电力,2004,23(6): 72-74.

[4] 罗云,樊运晓,马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[5] 彭勇,雷兴列,方玉群,等. 特高压直流输电线路不停用再启动功能情况下的带电作业安全性分析[J]. 四川电力技术,2019,42(4): 85-89.

[6] 张昊. 电网运行安全风险量化评估软件实现[J]. 云南电力技术,2017,45(3): 43-45.

[7] 胡毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 高电压技术,2006,32(11): 1-10.

[8] 彭熠,戴刚. 基于层次分析法的输电线路带电作业安全综合评估模型[J]. 电工技术,2018,11(21): 44-46.

[9] 李军,李继光,姚建刚,等. 属性识别和 G1-熵权法在电能质量评价中的应用[J]. 电网技术,2009,33(14): 56-61.

[10] 张富超,芮建勋,邢楚铭,等. 采用模糊综合评判方法的供电企业安全评估[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(1): 11-16.

作者简介:

杨慎涛(1979),高级工程师,研究方向为城市配电网管理与新技术应用。

(收稿日期:2020-03-02)

[6] 王彪,甄威,张华,等. 智能变电站二次系统试验方法综述[J]. 四川电力技术,2012,35(2): 4-5.

[7] 赵永生,刘海峰,梁文武,等. 智能变电站同步整组试验方法[J]. 中国电力,2015,48(5): 156-160.

作者简介:

李 霞(1988),硕士,工程师,主要从事电力系统调度控制工作;

周文越(1989),硕士,工程师,主要从事电力系统继电保护运行、检修、研发相关工作。(收稿日期:2020-01-15)