

《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 纓
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

2019年第42卷第4期(总262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 纓

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*18*

2019-8

目 次

· 国网四川省电力公司研究生工作站专栏 ·

融合智能代理模型和改进微分进化算法的电力系统暂态稳定预防控制	陈 振,韩晓言,范成围,张 华,刘 畅(1)
高压直流接地极线路阻抗监视系统断线故障时动作性能评估	李小鹏,滕予非,宋新尧,李世龙,罗荣森(7)
直流接地极线路招弧角间电弧的运动模型	王 涛,郑连清,范松海,官瑞杨,孙鹏宇(11)
地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估研究	郝文斌,张亚刚,牟 森(17)
不同负载条件下 CVT 过电压监测装置频率响应特性分析	张 榆,谢 敏,谢施君,张晨萌,穆 舟,朱 军(21)
非标准雷电冲击电压模拟技术研究	孙鹏宇,江 渝,张晨萌,谢施君,王 鑫,王 涛(24)
220 kV 限流式统一潮流控制器设计	杜莹莹,郝文斌(28)
冲击电容器直流叠加操作冲击回路仿真分析	张晨萌,陈芒芒,王鑫,孙鹏宇(33)
极化去极化电流法极化参量对电力电容器绝缘状态的影响	王 鑫,张晨萌,刘渝根,谭思文,孙鹏宇(38)

· 电力大数据与人工智能 ·

基于大数据的智能变电站二次状态监测系统研究	张 艺,李大中,郑永康(43)
基于卷积神经网络的视频大数据智能预警分析	邓 平,郑 鸿,罗冰峰,李 明(49)
基于大数据与计量回归分析的四川终端能源竞争态势研究	沈 军,严 磊,魏 阳(54)
基于电力数据与机器学习的家庭收入估计方法	张玉蕾,王谷城,关键雄(60)
地理数据可用性评估指标算法及模型构建探究	叶水勇(65)

· 学术交流 ·

基于行波特征量与堆叠自动编码器的电缆早期故障定位方法	李成升,于 洋(72)
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	彭 勇,雷兴列,方玉群,苏梓铭,肖 宾,刘 凯(85)
基于通信协议多元接入的计量自动化远程控制研究	梁 捷,梁广明(90)

CONTENTS

• Thesis by Postgraduate Workstation of State Grid SEPC •

Transient Stability Preventive Control of Power System Based on Intelligent Surrogate Model and Improved Differential Evolution Algorithm	Chen Zhen, Han Xiaoyan, Fan Chengwei, Zhang Hua, Liu Chang(1)
Performance Evaluation of HVDC Electrode Line Impedance Supervision System under Line Break Fault	Li Xiaopeng, Teng Yufei, Song Xinyao, Li Shilong, Luo Rongsen(7)
Motion Model of Arc between Arcing Horns in DC Grounding Electrode Line	Wang Tao, Zheng Lianqing, Fan Songhai, Guan Ruiyang, Sun Pengyu(11)
Research on Reliability Evaluation of Power Grid Considering Structural Reliability of Tower under Seismic Conditions	Hao Wenbin, Zhang Yagang, Mou Miao(17)
Analysis on Frequency Response Characteristics for CVT Over – voltage Monitoring Device under Different Load Conditions	Zhang Yu, Xie Min, Xie Shijun, Zhang Chenmeng, Mu Zhou, Zhu Jun(21)
Research on Simulation Technology for Non – standard Lightning Impulse Voltage	Sun Pengyu, Jiang Yu, Zhang Chenmeng, Xie Shijun, Wang Xin, Wang Tao(24)
Design of 220 kV Unified Power Flow Controller with Fault Current Limiting	Du Yingying, Hao Wenbin(28)
Analysis on Loop Simulation of DC Voltage Superimposed with Switching Impulse Voltage for Surge Capacitors	Zhang Chenmeng, Chen Mangmang, Wang Xin, Sun Pengyu(33)
Effect of Polarization Parameters of Polarization – Depolarization Current Method on Insulation State of Power Capacitors	Wang Xin, Zhang Chenmeng, Liu Yugen, Tan Siwen, Sun Pengyu(38)

• Power Big Data and Artificial Intelligence •

Research on Secondary State Monitoring System in Smart Substation Based on Big Data	Zhang Yi, Li Dazhong, Zheng Yongkang(43)
Intelligent Early Warning Analysis of Video Dig Data Based on Convolutional Neural Network	Deng Ping, Zheng Hong, Luo Bingfeng, Li Ming(49)
Research on Competitive Situation of Terminal Energy in Sichuan Province Based on Big Data Analysis and Regression Analysis.	Shen Jun, Yan Lei, Wei Yang(54)
Household Income Estimation Method Based on Power Data and Machine Learning	Zhang Yulei, Wang Gucheng, Kwan Kian Hoong(60)
Research on Geographic Data Availability Evaluation Index Algorithm and Model Construction	Ye Shuyong(65)

• Academic Exchange Section •

Detection and Location of Incipient Cable Fault Section Based on Traveling Wave Feature and Stacked Automatic Encoder	Li Chengsheng, Yu Yang(72)
Safety Analysis of Live Working on UHVDC Transmission Lines with Restart Function	Peng Yong, Lei Xinglie, Fang Yuqun, Su Zhiming, Xiao Bin, Liu Kai(85)
Research on Remote Control of Metrology Automation Based on Multi – source Access of Communication Protocol	Liang Jie, Liang Guangming(90)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2019 Vol. 42 No. 4

(Ser. No. 262)

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

融合智能代理模型和改进微分进化算法的电力系统暂态稳定预防控制

陈 振¹, 韩晓言², 范成围¹, 张 华¹, 刘 畅¹
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:电力系统暂态稳定预防控制可看作含微分方程的非线性规划优化模型,开发一种寻优能力强、计算速度快的优化求解方法非常关键。考虑暂态稳定预防控制问题的特点,提出一种融合智能代理模型和改进微分进化算法优化求解算法。在微分进化算法的基础上,引入扩展变异操作及参数自适应调整策略,提高微分进化算法的寻优能力,并利用改进微分进化算法求解预防控制优化模型。同时,为提高求解速度,利用潮流特征和集成极限学习机建立暂态稳定裕度预测的智能代理模型,在迭代优化过程中快速估计稳定裕度水平,避免反复进行时域仿真计算。仿真结果表明,所提方法不仅增强了传统智能优化算法的寻优能力,并能大幅度减少预防控制策略的求解时间。

关键词:暂态稳定;预防控制;智能优化;智能代理模型

中图分类号:TM44 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0001-06

Transient Stability Preventive Control of Power System Based on Intelligent Surrogate Model and Improved Differential Evolution Algorithm

Chen Zhen¹, Han Xiaoyan², Fan Chengwei¹, Zhang Hua¹, Liu Chang¹
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Transient stability preventive control of power system can be expressed mathematically as a nonlinear dynamic programming problem with differential equation, and it is very important to develop an optimization algorithm with strong optimization ability and small computational cost. An optimization algorithm mixed with intelligent surrogate model and improved differential evolution algorithm is proposed to solve transient stability preventive control problem. Based on differential evolution algorithm, the extended mutation operation and the parameter adaptive adjustment strategy are introduced to improve the optimization ability of differential evolution algorithm. Meanwhile, in order to improve the speed of solving the optimal power flow, the power flow characteristic and ensemble extreme learning machine regression model are employed to predict the transient stability boundary in the iterative process. The simulation results show that the proposed method not only improves the optimization ability of the traditional intelligent optimization algorithm, but also greatly reduces the solving time complexity.

Key words: transient stability; preventive control; intelligent optimization; intelligent surrogate model

0 引 言

随着电力市场改革不断深入以及电网互联规模增大,系统的运行方式越来越趋于稳定极限,暂态稳定问题愈发突出^[1-2]。暂态稳定预防控制(transient stability preventive control, TSPC)是指在预想故障状态下,通过调整系统稳态运行点提高安全稳定

裕度,保证系统暂态稳定的同时确保系统某一经济性指标最优。从数学的角度看,可表示为考虑暂态稳定约束的最优潮流模型^[3]。TSPC模型属于动态优化范畴,即包含微分方程的非线性规划问题,求解困难。因此,开发一种寻优能力强且计算代价小的TSPC模型求解算法十分重要。

传统的TSPC求解方法,如数值差分方法和交互迭代方法,均采用动态规划或者内点法求解优化

问题,这类方法在寻优时依赖于优化问题的凸特性^[4-8]。随着系统复杂程度的增加和优化模型中考虑因素的增多,TSPC问题逐渐呈现出非凸性和不连续性的特点,传统方法在求解时面临较大困难^[9]。智能优化算法又具有全局寻优性能强以及通用性强等特点,能有效弥补传统方法的不足,适用于有效求解大规模、复杂的优化问题。

微分进化(differential evolution, DE)算法属于众多智能优化中的一种,具有寻优能力强和运行速度快的特点。文献[10]将DE算法应用于TSPC的求解中,取得不错的效果。然而,基于标准DE算法的TSPC求解仍然面临以下2个问题:1)标准DE算法的变异操作和参数在寻优过程中保持不变,缺乏对优化算法全局搜索和局部搜索的平衡;2)由于在每次优化迭代过程中,需要对系统的暂态稳定状态进行判定,传统方法通常采用时域仿真方法进行稳定分析,时间开销巨大。

针对上述问题,提出融合代理模型和改进微分进化算法的预防控制优化模型求解方法。在标准DE的基础上,引入扩展变异操作及参数自适应调整策略,提高微分进化算法的寻优能力,并利用改进微分进化算法(improved differential evolution, IDE)求解预防控制优化模型。同时,为提高TSPC的求解速度,在离线阶段,利用潮流特征和集成极限学习机(ensemble extreme learning machine, EELM)建立暂态稳定裕度预测的智能代理模型^[11],快速判定给定运行方式下系统的暂态稳定裕度,避免迭代过程中需要反复进行时域仿真的缺点,大大降低了寻优过程的计算代价。仿真结果证明了所提方法的有效性和快速性。

1 暂态稳定预防控制的数学模型

1.1 目标函数

TSPC目标函数的形式很多,以考虑阀点效应的发电机运行成本为目标函数^[12],可表示为

$$F_C = \sum_{i=1}^{N_G} \{a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 + |e_i \sin(w_i (P_{gi}^{\min} - P_{gi}))|\} \quad (1)$$

式中: P_{gi} 为发电机*i*的有功出力; N_G 为可调发电机集合; a_i 、 b_i 、 c_i 、 e_i 和 w_i 分别为考虑阀点效应后发电机*i*的发电成本系数。

由式(1)可见,考虑阀点效应后,发电机的运行成本在原来二次函数的基础上加上了类正弦项。由于此目标函数存在三角函数和绝对值运算,因而优化模型呈非凸特性。

1.2 等式约束

TSPC模型的等式约束为系统的潮流方程,以极坐标的方式表示系统的潮流方程。

$$P_{gi} - P_{di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中: N 为总节点数; P_{gi} 和 Q_{gi} 分别为节点*i*的有功、无功注入功率; P_{di} 和 Q_{di} 分别为节点*i*的有功负荷与无功负荷; θ_{ij} 为节点*i*和节点*j*的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点*i*和节点*j*之间的电导和电纳。

1.3 不等式约束

1)有功出力约束

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (4)$$

2)无功出力约束

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (5)$$

3)节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

4)支路功率约束

$$|S_i| \leq S_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_l \quad (7)$$

式中: S_i 为线路*i*的视在功率; N_l 和 N_g 分别为支路总数和发电机总数。

5)暂态稳定约束

暂态稳定约束具有多种表达形式,这里采用基于临界切除时间(critical clearing time, CCT)的表示方法。若系统在给定故障状态下失稳,通过改变系统的运行状态提高此故障的CCT大小,使CCT大于故障持续时间,从而保证系统的暂态稳定。为使系统具有一定的稳定裕度,常使CCT稍大于故障持续时间。

在利用智能优化算法求解TSPC问题时,需要反复计算CCT的大小,若采用时域仿真的方法,时间开销巨大。因此,在离线阶段,利用系统的潮流特征和EELM建立暂态稳定裕度预测的智能代理模型,从而在优化求解过程中大幅度减小时间开销。智能代理模型的构建过程详见文献[11]。

暂态稳定约束可表示为

$$t_{pc} - t_d \geq t_m \quad (8)$$

式中: t_{pc} 为预测的CCT值; t_d 为故障持续时间; t_m 为

给定的时间裕度,取大于 0 的常数。考虑到 EELM 代理模型存在预测误差,可适当增大时间裕度值,确保优化结果的可靠性,这里中 t_m 取为 0.01 s。

2 改进微分进化算法

良好的搜索策略应该是在搜索的初始阶段保持种群的多样性,进行全局搜索,而在搜索后期加强局部搜索能力,以提高算法的精度和收敛速度^[13]。

根据此原则,从扩展变异操作与参数自适应调整两方面对标准 DE 算法进行改进,形成改进微分进化算法,平衡寻优过程中的全局搜索和局部搜索能力。

2.1 微分进化算法基本原理

DE 算法利用随机选取的矢量参数的差向量作为新矢量参数的随机变化源,通过对当前种群进行交叉、变异和选择等操作产生新一代种群,并逐步使种群进化到最优解^[14]。主要包含以下几个步骤:

1) 变异。对于第 k 代的第 i 个目标向量 X_i^k ,变异向量 $V_i^{k+1} = (v_{i1}^{k+1}, v_{i2}^{k+1}, \dots, v_{in}^{k+1})$ 的产生方式为

$$V_i^{k+1} = X_{r3}^k + F(X_{r2}^k - X_{r1}^k), \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \quad (9)$$

式中: r_1, r_2, r_3 属于 $[1, N_p]$ 之间随机产生的整数,且与目标向量的索引号 i 不同;系数 F 为缩放因子。

2) 交叉。为增加参数向量的多样性,引入交叉操作,试验向量 $U_i^{k+1} = (u_{i1}^{k+1}, u_{i2}^{k+1}, \dots, u_{in}^{k+1})$ 由变异向量和目标向量经过选择产生,其各个分量的计算方法为

$$u_{ij}^{k+1} = \begin{cases} v_{ij}^{k+1} & \text{rand} \leq \text{CR 或 } j = q_j \\ x_{ij}^k & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: q_j 为 $[1, n]$ 中随机选取的一个整数,用以保证每轮试验向量至少有一维变量由变异向量提供;交叉因子 CR 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

3) 选择。采用一种贪婪的选择模式,以最小化问题为例,可表示为

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} U_i^{k+1}, & f(U_i^{k+1}) \leq f(X_i^k) \\ X_i^k, & f(U_i^{k+1}) > f(X_i^k) \end{cases} \quad (11)$$

2.2 改进微分进化算法

1) 扩展变异操作。标准 DE 算法的变异操作采用 3 个完全随机的个体组成,可增加种群的多样性,具有较强的全局搜索能力,但收敛速度慢。可对标准 DE 算法的变异操作进行自适应扩展,形成新的

变异操作方程为

$$V_i^{k+1} = (1 - \alpha)X_{r3}^k + \alpha X_{\text{best}}^k + F(X_{r2}^k - X_{r1}^k), \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i \quad (12)$$

式中, $\alpha = k/N_l$, k 为当前迭代数, N_l 为最大迭代次数。

从新的变异操作方程可知,在搜索初期,变异操作主要由随机个体引导,因此具有较强的全局搜索能力,随机进化代数的不断增大,逐渐过渡为由最优个体进行引导,算法的局部搜索能力增强,从而增加收敛精度,加快收敛速度。

2) 参数自适应调整。缩放因子 F 和交叉因子 CR 是 DE 算法的主要参数,其值大小对于 DE 的寻优性能具有重要影响。在标准的 DE 算法中,整个搜索群体共享一个 F 和 CR 的值,且在进化过程中, F 和 CR 均保持不变,影响 DE 的搜索性能。因此,对参数 F 和 CR 分别提出自适应调整策略,可有效提高算法的寻优能力。

$$F^k = F_{\max} - (F_{\max} - F_{\min}) \exp(-\varphi_1 \times \frac{N_l - k}{N_l}) \quad (13)$$

$$\text{CR}^k = \text{CR}_{\max} - (\text{CR}_{\max} - \text{CR}_{\min}) \exp(-\varphi_2 \times \frac{N_l - k}{N_l}) \quad (14)$$

式中: $\text{CR}_{\max}$ 和 $\text{CR}_{\min}$ 分别为 CR 的最大值和最小值; φ_2 为给定系数,这里取为 3。

3 TSPC 优化模型求解流程

3.1 种群初始化与约束条件处理

1) 种群初始化。求解 TSPC 问题首先需要对种群进行初始化,需要进行初始化的变量包括除去平衡节点发电机有功功率和所有发电机的电压幅值。初始化的个体 i 可表示为

$$X_i = [P_{i,g1}, \dots, P_{i,gNg-1}, V_{i,g1}, \dots, V_{i,gNg}] \quad (15)$$

在随机初始化后,需要对种群中的个体进行潮流计算,考虑到平衡机有功出力的上下限,为避免生成潮流不收敛的个体,需要对初始化后的种群进行筛选,剔除不满足有功平衡的个体,并重新初始化,提高迭代过程的搜索效率。满足以下两个公式中任意一个的个体将会被剔除:

$$P_{\text{sumP}} + P_{\text{slack}}^{\max} < P_L \quad (16)$$

$$P_L + P_{\text{Loss}} < P_{\text{slack}}^{\min} + P_{\text{sumP}} \quad (17)$$

式中: P_{sumP} 为除去平衡节点的所有发电机的有功功率之和; P_L 为系统的有功负荷大小; P_{Loss} 为系统的有

功损耗,这里取为负荷的 10%; P_{slack}^{max} 和 P_{slack}^{min} 分别为平衡机节点有功功率的最大值和最小值。

2)约束条件处理。种群初始化后,对其中的每个个体进行潮流计算,为了使潮流结果的值满足不等式约束和暂态稳定约束,可采用罚函数法处理不等式约束,其基本思想是将约束条件引入目标函数中作为一个新的函数,将有约束的优化问题转化为无约束优化问题。

3.2 TSPC 求解流程

所提 IDE - EELM 方法综合利用智能优化和智能预测算法的特点,利用 IDE 算法寻优能力强的特点在解空间进行搜索,并利用 EELM 智能代理模型的快速性和准确性对 IDE 算法搜索的解进行暂态稳定判定,并将判定结果以惩罚值的形式反馈给 IDE 算法,引导其进一步搜索。

基于 IDE - EELM 的 TSPC 优化流程如下:

1)参数设置。输入系统数据、变量上下限及故障信息。设置 IDE 算法初始参数,包括种群规模 N_p 、最大迭代次数 N_I 及控制参数 F 和 CR 的上下限等。

2)初始化种群。随机生成初始种群,对每个初始种群进行有功平衡校验,若不满足校验则重新生成,直到生成 N_p 个解。

3)计算每个个体的潮流,将潮流结果作为输入特征,应用 EELM 代理模型预测当前运行状态下的 CCT,并判定系统暂态稳定性。根据潮流信息和暂态稳定信息计算个体的适应度函数值;记录群体中的最优解。

4)令迭代次数 k 为 1。

5)判断当前迭代次数 k 是否达到最大迭代次数 N_I ,若未达到最大迭代次数,则转至步骤 6);否则结束迭代,转为步骤 9)。

6)根据目前的迭代次数确定缩放因子 F 和交叉因子 CR 的大小并进行扩展变异操作,经过变异后,需要对控制变量进行校验,避免控制变量越限;根据交叉因子大小进行交叉操作。

7)调整罚函数系数,计算新生成个体的适应度函数值;记录群体最优解。

8)利用贪婪策略对个体进行选择,迭代次数 $k+1$;转至步骤 5)。

9)输出最优解对应结果。

计算流程如图 1 所示。

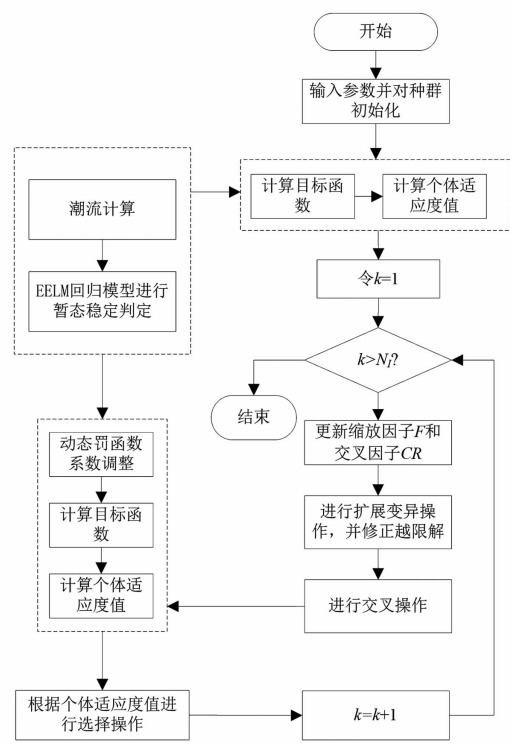


图 1 TSPC 优化模型求解流程

4 算例分析

以新英格兰 39 节点系统为例对所提方法进行仿真验证,发电机的成本系数来自文献[15],不等式约束中各变量的限值来自文献[16]。系统单线图如图 2 所示。

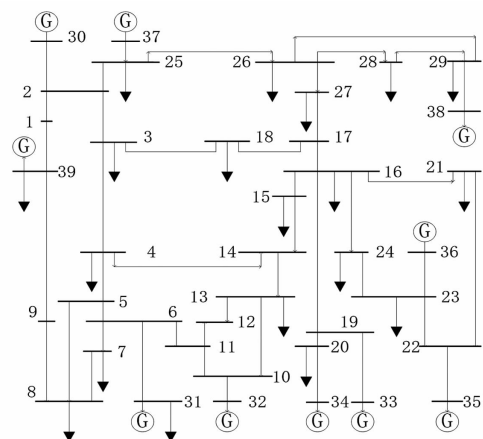


图 2 新英格兰 39 节点系统单线

预想故障集包含以下 2 种故障。

预想故障 1:故障节点为 2 号母线,切除线路 2-3,故障发生时间为 0.1 s,故障切除时间为 0.28 s。

预想故障 2:故障节点为 15 号母线,切除线路

15-16,故障发生时间0.1 s,故障切除时间为0.25 s。

根据上述预想故障,考虑以下3种TSPC模型:
模型1:仅考虑故障1的TSPC模型。
模型2:仅考虑故障2的TSPC模型。
模型3:同时考虑故障1和故障2的TSPC模型。
前两种模型称为考虑单重预想故障的TSPC模型,第3种模型为考虑多重预想故障的TSPC模型。
首先对IDE-EELM算法的有效性进行仿真分析。将所提方法应用于求解上述3种TSPC模型,并将结果与PSO-EELM算法和DE-EELM算法的计算结果进行对比。

3种优化算法的参数分别为:IDE算法中,缩放因子取值的最大值和最小值分别为0.9和0.4,交叉因子取值的最大值和最小值分别为0.8和0.3;DE算法中,缩放因子和交叉因子分别固定为0.6和0.5;PSO算法中,采用线性递减的惯性权重,惯性权重的最大值和最小值分别为1.2和0.4,加速因子均取为2。3种方法的种群个数均为30,最大迭代次数均为50次^[9]。EELM智能代理模型的参数见文献[11]。为考虑算法的随机性,同一模型均进行10次重复试验。

4.1 预防控制策略有效性分析

根据所提算法的优化结果,验证预防控制策略的有效性,如图3所示。

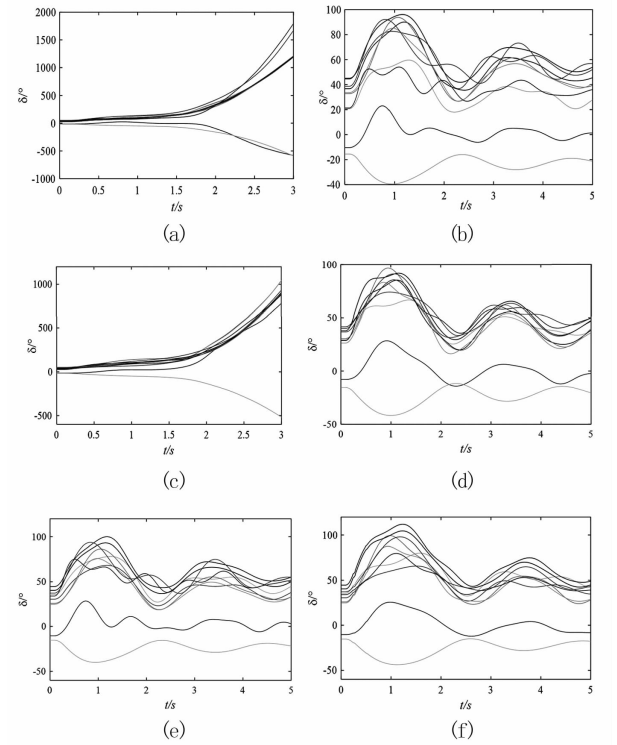


图3 3种模型下的预防前后控制对比

图3(a)和图3(b)为传统最优潮流下和暂态稳定约束最优潮流下故障1分别发生时的功角曲线,图3(c)和图3(d)为传统最优潮流下和暂态稳定约束最优潮流下故障2分别发生时的功角曲线,图3(e)和图3(f)为暂态稳定约束最优潮流下同时考虑故障1和故障2的功角曲线。

由图3可见,不论是单重故障还是多重故障,所提方法均能有效抑制电网在预想故障下的暂态失稳现象。

4.2 算法性能对比

对比3种优化算法(IDE-EELM、PSO-EELM、和DE-EELM)的结果见表1,主要对比了3种算法的平均费用。

表1 3种算法的平均费用 单位:\$/h

算法	模型1	模型2	模型3
PSO-EELM	62 322	62 629	62 741
DE-EELM	62 279	62 327	62 609
IDE-EELM	62 176	62 216	62 406

由表1可知,3种模型下,IDE-EELM算法求解得到的平均费用均优于PSO-EELM算法和DE-EELM算法。

4.3 时间开销分析

传统基于智能优化算法求解TSPC模型时采用时域仿真法(time domain simulation,TDS)对暂态稳定性进行判定,为降低时域仿真的计算开销,往往需要设置一个较短的仿真时长和较小的功角阈值。

表2给出了3种模型下,IDE-EELM算法的求解时间 t_{AE} 与IDE-TDS算法求解时间 t_{AT} 的对比情况,IDE优化算法的参数如前所述,TDS的参数来自文献[16],仿真分析的计算机配置参数为:Inter core i7 CPU @2.5 GHz,8 G内存,暂态稳定时域仿真软件为PST 3.0。

表2 计算时间对比

模型	t_{AE}/s	t_{AT}/s
模型1	29.86	1980.38
模型2	29.12	2057.56
模型3	33.45	3774.87

由表2可知:1)在求解单重预想故障和多重预想故障时,IDE-EELM算法的计算时间增长不明显,而IDE-TDS算法的计算时间几乎是成倍增长;2)在3

种模型下, IDE – EELM 算法的计算时间相对于 IDE – TDS 算法的计算时间分别减少了 98. 49%、98. 58% 和 99. 11%, 说明 IDE – EELM 算法可大幅度降低 TSPC 模型求解的计算时间。

5 结 语

提出一种融合智能代理模型和改进微分进化算法的 TSPC 求解方法, 综合利用 IDE 算法优良的寻优能力和 EELM 智能代理模型快速的暂态稳定能力进行优化模型的求解, 通过在新英格兰 39 节点系统的仿真分析, 可得结论如下:

1) 相比于传统的两种智能优化算法, 无论在单重预想故障还是多重预想故障下, IDE – EELM 算法均能在保证系统暂态稳定的前提下, 求解得到经济性更好的预防控制策略, 证明了 IDE – EELM 算法优越的寻优能力和求解结果的有效性;

2) 通过对 IDE – EELM 算法计算性能的分析, 表明利用 IDE – EELM 算法求解 TSPC 模型可大幅度减少优化求解的计算时间。

参考文献

[1] Kundur P, Balu N J, Lauby M G. Power System Stability and control [M]. New York: McGraw – hill New York, 1994.

[2] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 杨健, 韦化, 覃秀君. 基于二阶正交配置法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 64 – 72.

[4] 方勇杰, 鲍颜红, 徐伟, 等. 电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 199 – 207.

[5] 吕晓祥, 王建全. 电力系统暂态稳定预防控制算法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 144 – 153.

[6] 孙景强, 房大中, 周保荣. 基于轨迹灵敏度的电力系统动态安全预防控制算法研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 26 – 30.

[7] 甘德强, 辛焕海, 王建全, 等. 暂态稳定预防控制和优

化新进展[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 1 – 7.

[8] Mo N, Zou Z Y, Chan K W, et al. Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(3): 476 – 483.

[9] Xia S W, Chan K W, Bai X F, et al. Enhanced Particle Swarm Optimization Applied for Transient Angle and Voltage Constrained Discrete Optimal Power Flow with Flexible AC Transmission System[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(1): 61 – 74.

[10] Cai H R, Chung C Y, Wong K P. Application of Differential Evolution Algorithm for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 719 – 728.

[11] Chen Z, Han X Y, Fan C W, et al. Prediction of Critical Clearing Time for Transient Stability Based on Ensemble Extreme Learning Machine Regression Model [C]. IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, 2019.

[12] Wu D, Gan D Q, Jiang J N. An Improved Micro – particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application in Transient Stability Constrained Optimal Power Flow[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(3): 395 – 411.

[13] 吴亮红. 差分进化算法及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

[14] Price K V. Differential Evolution: A Fast and Simple Numerical Optimizer[C]. Fuzzy Information Processing Society, Berkeley, CA, USA, 1996: 524 – 527.

[15] Xia S W, Zhou B, Chan K W, et al. An Improved GSO Method for Discontinuous Non – convex Transient Stability Constrained Optimal Power Flow with Complex System model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 483 – 492.

[16] Xu Y, Dong Z Y, Meng K, et al. A Hybrid Method for Transient Stability – constrained Optimal Power Flow Computation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1769 – 1777.

作者简介:

陈 振(1991), 博士, 主要从事电力系统数据科学研究。
(收稿日期: 2019 – 06 – 04)

高压直流接地极线路阻抗监视系统 断线故障时动作性能评估

李小鹏¹, 滕予非¹, 宋新尧², 李世龙¹, 罗荣森¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西, 西安 710049)

摘要: 高压直流接地极线路阻抗监视系统用于监测接地极线路运行状态。阻抗监视系统的动作性能直接影响着对接地极线路运行状态的实时感知。通过理论分析, 推导了接地极线路在双回线断线和单回线断线故障情况下, 阻抗监视系统测得的阻抗结果。通过不同故障位置的阻抗结果遍历, 分析了不同断线故障情况下阻抗监视系统的动作性能。分析结果显示, 在单回线断线故障时, 在特定的接地极线路长度下, 阻抗监视系统容易发生拒动。

关键词: 接地极线路; 阻抗监视系统; 评估性能

中图分类号: TM934 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)04-0007-04

Performance Evaluation of HVDC Electrode Line Impedance Supervision System under Line Break Fault

Li Xiaopeng¹, Teng Yufei¹, Song Xinyao², Li Shilong¹, Luo Rongsen¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: The operation state of HVDC electrode line is monitored by electrode line impedance supervision (ELIS). The performance of ELIS will affect the operation state identification of electrode line. With theoretical analysis, the measured impedance by ELIS is obtained under double-line break faults and single-line break faults. The performance of ELIS is analyzed based on the impedance measured with different break faults. The results show that for single-line break faults under some specific electrode line lengths, the ELIS will be unable to monitor the fault reliably.

Key words: grounding electrode line; impedance supervision system; performance evaluation

0 引言

目前, 特高压直流输电作为远距离大容量电能输送的重要通道已在国内广泛应用, 目前在运和在建的特高压直流超过了 10 条^[1]。直流接地极和接地极线路是特高压直流输电系统的重要组成部分, 其为换流阀提供参考地电位, 同时作为入地电流的通道。在实际工程运行中, 因雷击或过电压闪络引起的接地极线路短路、断线故障已严重威胁到直流系统的安全运行。为可靠迅速地检测和处理接地极线路故障, 实际工程中为接地极线路配备了过流保护、电流不平衡保护和接地极线路阻抗监视系统。

过流保护和电流不平衡保护受保护原理限制存在保护死区, 难以保护线路全长, 且在直流输电系统双极平衡运行或金属回线运行时无法发挥作用。差动保护可以保护接地极线路全长, 但依然不适用于双极平衡运行或金属回线运行方式, 且需要双端通信, 在通信失效时无法发挥作用。为了解决接地极线路保护的可靠性问题, ABB 公司提出为直流输电系统配置基于高频信号注入的接地极线路阻抗监测系统。

阻抗监视系统通过向接地极线路注入高频正弦电流信号, 同时在注入点测量同频电压信号, 间接计算出接地极线路的阻抗变化。如果阻抗监视装置检测到阻抗进入动作区并持续一定时延, 判断接地极线路发生了故障。阻抗监视系统可以适应双极平衡

运行方式,但在实际运行过程中,阻抗监视系统曾在短路故障时发生过拒动,需要进一步分析接地极线路的故障特性以及阻抗监视系统在不同故障情况下的动作性能^[2]。

在接地极线路故障特征分析方面,文献[3]针对不同短路故障下接地极线路的暂态行波的特征进行了仿真分析。文献[4]提出了一种接地极线路短路故障快速识别方法。文献[5]分析了接地极线路阻抗监视系统在短路故障情况下的动作情况,并提出了相应的改进措施。

然而,上述研究大多是针对短路故障情况开展的研究,较少涉及断线故障,且缺乏断线故障后 阻抗监视系统的动作性能分析。下面着重对接地极线路断线故障开展理论研究,推导了断线故障情况下接地极线路阻抗监视系统的测量阻抗变化情况,并进一步分析了不同故障位置下阻抗监视系统的动作性能,为下一步改进提供了基础。

1 接地极线路阻抗监视系统

1.1 接地极线路阻抗监视系统原理

高压直流输电工程接地极线路的阻抗监视系统 (electrode line impedance supervision, ELIS) 如图 1 所示。

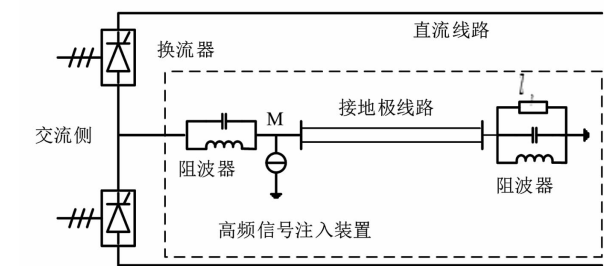


图1 ELIS 系统

向接地极线路注入高频电流信号后可以在注入点测得对应频率的电压值。目前国家电网有限公司已经投运的高压直流输电工程中,注入信号频率均为 13.95 kHz^[5]。通过测量对应频率的电压电流值即可计算出接地极线路的等效阻抗,进而判断线路上是否发生故障。为了防止高频电流进入直流系统,在接地极线路两端还分别装设有阻波器。其中接地极侧的阻波器还并联有匹配电阻,其阻值与接地极线路等效波阻抗相当。

ELIS 系统在换流站内向接地极线路注入 13.95 kHz

的高频电流,同时对注入点的同频电压进行检测,并计算出接地极线路的阻抗。ELIS 系统的动作条件为

$$\Delta Z = |Z_{eq} - Z_{normal}| \geq Z_{set} \quad (1)$$

式中: Z_{eq} 为测量阻抗; Z_{normal} 为正常运行时接地极线路等效阻抗; ΔZ 为测量阻抗与正常运行时阻抗差值; Z_{set} 为整定阻抗,工程中一般取 30 Ω 。

1.2 正常运行时接地极线路阻抗

接地极线路正常运行时,接地极引线的等效电路如图 2 所示。

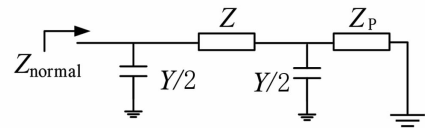


图2 正常运行时接地极线路等效电路

由图 2 可得,此时

$$Z_{normal} = Z_{eq} = \frac{2}{Y} // (Z + \frac{2}{Y} // Z_P) \quad (2)$$

式中: Z_{eq} 为接地极线等效阻抗; Z_P 为接地极线路末端并联的匹配电阻,其值等于线路的波阻抗 Z_c ; Z 和 Y 分别为输电线路 PI 型等效电路中的等效阻抗和等效导纳,其计算公式为

$$\begin{cases} Z = Z_c \sin \gamma l \\ Y = \frac{1}{Z_c} \frac{2(\cos \gamma l - 1)}{\sin \gamma l} \end{cases} \quad (3)$$

式中: l 为接地极线长度; γ 为线路传播系数; Z_c 为线路波阻抗, $Z_c = \sqrt{Z_1/Y_1}$; z_1 、 y_1 分别为线路单位长度的阻抗和导纳。

将式(3)代入式(2)可得

$$Z_{normal} = Z_c \quad (4)$$

由此可知,正常运行时,接地极线路等效阻抗为线路的波阻抗。

2 接地极线路在断线时的等效阻抗

2.1 双回线断线故障

当距离接地极引线首端 x 处发生双回线断线故障时,接地极线等效电路图如图 3 所示。

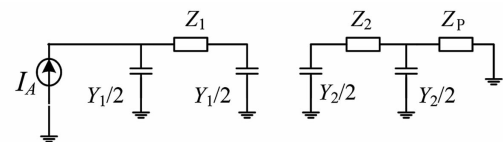


图3 双回线断线故障时接地极等效电路

图中, Z_1 、 Y_1 和 Z_2 、 Y_2 分别是两段线路的等效阻抗和

等效导纳,其计算公式为

$$\begin{cases} Z_1 = Z_C \sin \gamma x \\ Y_1 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cos \gamma x - 1)}{\sin \gamma x} \\ Z_2 = Z_C \sin \gamma (l - x) \\ Y_2 = \frac{1}{Z_C} \frac{2(\cos \gamma (l - x) - 1)}{\sin \gamma (l - x)} \end{cases} \quad (5)$$

则接地极引线的等效阻抗 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \frac{2}{Y_1} // (Z_1 + \frac{2}{Y_1}) \quad (6)$$

2.2 单回线断线故障

当特高压直流接地极线路出现单回断线故障时,其等效网络如图 4 所示。

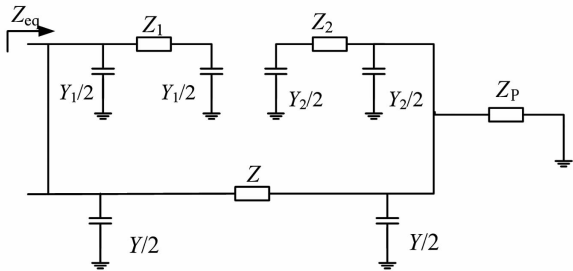


图 4 单回线路断线故障时接地极线等效电路

将图 4 进一步简化为图 5。

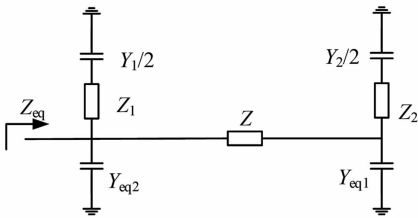


图 5 单回线断线故障时接地极线简化电路

图 5 中各变量的表达式为

$$\begin{cases} Y_{eq1} = \frac{Y_2}{2} + \frac{Y}{2} + \frac{1}{Z} \\ Y_{eq2} = \frac{Y_1}{2} + \frac{Y}{2} \end{cases} \quad (7)$$

将图 5 进一步经电路等效变换简化为图 6。

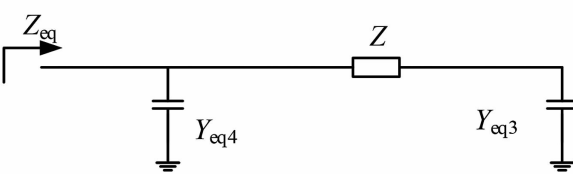


图 6 单回线路故障时接地极线简化电路

图 6 可表达为

$$\begin{cases} Y_{eq3} = 1/(2/Y_2 + Z_2) + Y_{eq1} \\ Y_{eq4} = 1/(2/Y_1 + Z_1) + Y_{eq2} \end{cases} \quad (8)$$

由图 6 可得等效阻抗 Z_{eq} 为

$$Z_{eq} = \frac{Z \times Y_{eq3} + 1}{Z \times Y_{eq3} \times Y_{eq4} + Y_{eq3} + Y_{eq4}} \quad (9)$$

3 接地极线路阻抗监视系统动作性能分析

3.1 双回线断线时 ELIS 动作性能分析

采用某 ±800 kV 特高压直流工程的接地极线路参数来分析 ELIS 系统的性能。在该特高压直流输电工程中,接地极线路采用同杆双回架设,线长 100 km,具体参数如表 2 所示。注入信号源位于接地极线路换流站端,注入频率为 13.95 kHz。为了减少线路上高频驻波的影响,在接地极线路两端还分别装设有阻波器。

表 2 单回接地极线路参数		
$L/(mH \cdot km^{-1})$	$R/(\Omega \cdot km^{-1})$	$C/(\mu F \cdot km^{-1})$
2.370 9	0.262 6	0.007 7

利用表 2 参数,首先仿真接地极线路长度变化时,不同故障点双回线断线故障时的故障阻抗,得到故障阻抗与正常运行时的最小阻抗差值随线路长度的变化情况,如图 7 所示。

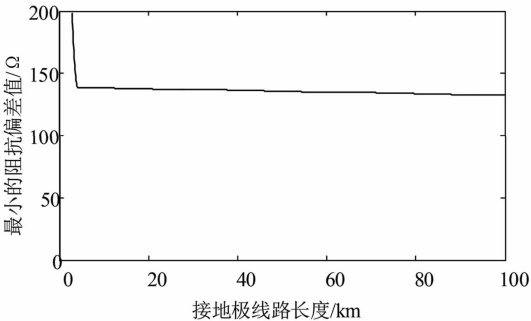


图 7 不同接地极线路长度下最小的阻抗偏差值

由图 7 可知,在线路长度在 100 km 以内时,任意地点发生双回线断线故障时,阻抗差值最小值也在 130 Ω 以上,远远大于整定值 30 Ω,ELIS 系统不会拒动。

3.2 单回线断线时 ELIS 系统动作性能分析

首先考察在线路长度为 100 km 时,发生单回线断线故障,不同故障距离下的阻抗差值,如图 8 所示。

由图 8 可知,在接地极线路长度为 100 km 时,接地极线路单回线故障后阻抗变化量均大于门槛

值,ELIS 系统不会拒动。

在以上仿真中接地极线路长度均为 100 km。为了研究接地极线路长度对故障后阻抗变化量的影响,设置接地极线路长度从 5 km 一直增加到 100 km。同时在接地极线路上每隔 0.1 km 设置一个单回线断线故障点,在不同的线路长度下故障后阻抗变化量最小值如图 9 所示。

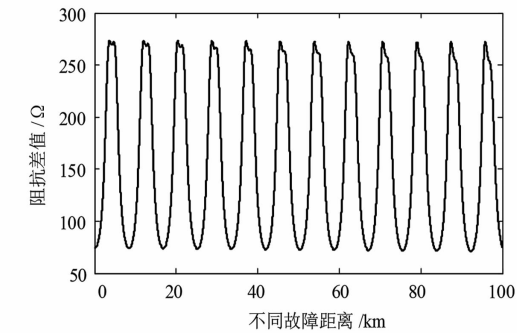


图 8 不同故障距离下阻抗偏差值

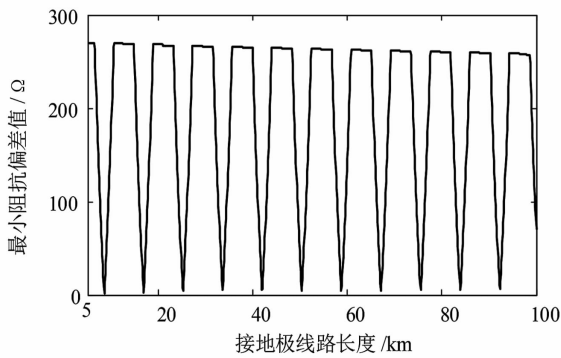


图 9 不同接地极线路长度下最小阻抗偏差值

由图 9 可以看出,在某些线路长度下单回线断线故障后的最小阻抗变化量将远小于门槛值,这就意味着在这些故障情况下 ELIS 系统将会拒动。

由图 9 可知这些特殊情况的线路长度接近于注入信号半波长的整数倍。

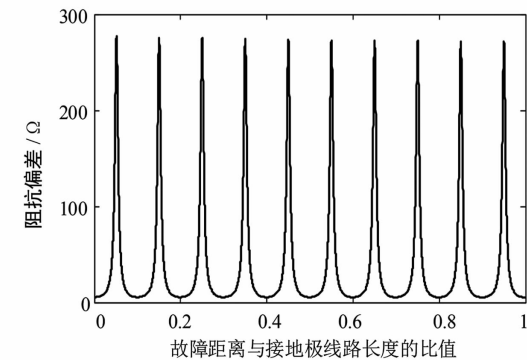


图 10 接地极线路长度为 10 倍注入信号半波长时阻抗偏差

为了验证上述结论,将线路长度设置为注入信号半波长的 10 倍,接地极线路单回断线故障后的阻抗变化量如图 10 所示。

由图 10 可以看出,当故障距离为注入信号半波长的整数倍时,线路单回断线故障后测量阻抗与正常运行时的测量阻抗相当,这就意味着在这种情况下 ELIS 系统将会拒动。

4 结 语

前面首先分析了接地极线路在双回断线和单回断线故障后的等效阻抗,然后利用接地极线路参数研究了不同故障下 ELIS 的动作性能。研究表明:ELIS 系统在接地极线路双回断线时能可靠发现故障,但在接地极线路长度为注入信号半波长的整数倍时,在某些故障距离下 ELIS 系统将无法发现线路上的单回线断线故障。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 滕予非,汤涌,周波,等. 基于高频电压突变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术,2016,42(1):72-78.
- [3] 张怿宁,王彩芝,陈平,等. 直流接地极线路故障暂态行波传播特效分析[J]. 中国电力,2015,48(3):88-93.
- [4] 束洪春,田鑫翠,张怿宁. 接地极线路短路故障快速识别及故障测距研究[J]. 电网技术,2015,39(12):3584-3591.
- [5] Y. F. Teng, X. P. Li, Q. Huang, et al. A Novel High-frequency Voltage Standing-wave Ratio-based Grounding Electrode Line Fault Supervision in Ultra-high Voltage DC Transmission Systems[J]. Energies, 2017, 10(3):309.

作者简介:

李小鹏(1987),博士,高级工程师,研究方向为特高压直流控制保护技术;

滕予非(1984),博士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定、高压直流输电。

(收稿日期:2019-06-04)

直流接地极线路招弧角间电弧的运动模型

王 涛¹, 郑连清¹, 范松海², 官瑞杨³, 孙鹏宇¹

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
- 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
- 3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘 要:针对直流接地极线路在遭受雷击和操作过电压时容易在绝缘子串间建立起电弧的问题,采用链式电弧模型,考虑电流元受磁场力、热浮力和空气阻力的作用以及电流元在不同运动速度下空气阻力系数与雷诺数之间的关系,分析电流元的受力,得出电弧的运动模型。通过仿真分析直流电弧在羊角型电极间的运动过程,发现直流电弧的熄弧时间与电流大小、电极张角之间存在相关关系,电弧电流和电极张角越大,直流电弧的熄弧时间越短。仿真研究结果为后续进行直流电弧试验提供理论依据。

关键词:直流电弧;招弧角;电弧电流;电极张角;运动模型

中图分类号:TM86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0011-06

Motion Model of Arc between Arcing Horns in DC Grounding Electrode Line

Wang Tao¹, Zheng Lianqing¹, Fan Songhai², Guan Ruiyang³, Sun Pengyu¹

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
- 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problem that DC grounding electrode line is easy to build arc between insulator strings when subjected to lightning stroke and operating overvoltage, the chain arc model is adopted to consider the effect of magnetic field force, thermal buoyancy and air resistance on current element, and the relationship between air resistance coefficient and Reynolds number under different moving speeds of current element. The force of current element is analyzed and the motion model of arc is obtained. Through simulation and analysis of the movement of DC arc between sheep-horn electrodes, it is found that there is a correlation between the extinguishing time of DC arc and the magnitude of current and electrode opening angles. The bigger the arc current and the electrode opening angle, the shorter the extinguishing time of DC arc. The simulation research provides a theoretical basis for the subsequent DC arc test.

Key words: DC arc; arcing horn; arc current; electrode opening angle; motion model

0 引 言

在直流输电工程中,当接地极线路处于满负荷运行状态,遭受雷击或操作过电压时,高电压可能会击穿绝缘子周围的空气间隙,引起直流电弧的持续燃烧,使绝缘子受到高温灼烧。目前采用在绝缘子

两端并联招弧角的方法来避免直流电弧的灼烧。

国内对招弧角熄弧特性的试验研究起步较晚,且主要集中在对交流电弧的研究。文献[1]对接地极线路招弧角熄弧能力展开研究,通过燃弧试验获取电弧伏安特性曲线,但是该实验仅能输出毫秒级的高压脉冲,无法维持长时间的燃弧。文献[2]对直流小电流下不同气体电弧的图像特性进行了分

析,发现随着电弧电流的减小,电弧半径减小,电弧亮度降低,电弧变得不稳定,同时随着气体压强的增大电弧中心的亮度升高。文献[3]对短间隙模型的直流输电线路极间短路电弧的运动进行仿真研究,采用链式电弧模型,建立了电弧的速度控制方程,并构建了小尺度试验研究平台对仿真进行了验证。目前对直接地极线路招弧角间电弧的运动研究较少,没有建立起电弧在招弧角间的运动模型,对于不同电弧电流和电极张角的情况下,电弧的爬升距离与速度之间没有确定的关系。

国外较早就进行了直流电弧的研究,文献[4]通过试验拟合出了电流和电弧长度的关系式。早期的直流电弧研究主要是通过试验观测其伏安特性,并拟合成公式^[5-12]。由于早期试验条件的限制,拟合公式都是基于有限的试验次数,没有建立标准的试验步骤和一致的测量方法。

基于上述研究现状,下面充分考虑空气流动的影响,基于电磁学、热力学和流体力学,采用链式电弧模型,推导出直流电弧的运动特性方程,在 Matlab 中编程对直流电弧的运动过程进行仿真分析,为在实验室进行直流电弧试验提供理论参考。

1 羊角型招弧角间直流电弧运动模型

1.1 招弧角间直流电弧受力分析

基于羊角型招弧角研究直流电弧运动模型。由于电弧燃烧时的运动比较复杂,电弧的运动实际为高温气体在多种受力下的流动,电弧形状会发生无规律的变化,并不能简单地将电弧等效为圆柱形刚体。因此,采用链式电弧模型,将弧柱离散为一系列电流元,如图1所示。当电流元数目足够多时,可将电流元看作刚体,分析每一段电流元的受力及运动过程,最后得出整个电弧的运动过程。

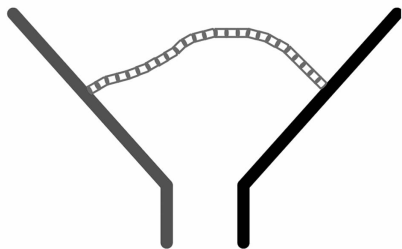


图1 羊角型招弧角间链式直流电弧模型

首先当电弧燃烧时,弧柱区温度高达4000~50 000 K,因此电流元会受到热浮力的作用;其次,当电弧维持燃烧时,电弧电流可达数百至数千安培,还需考虑电流元所受磁场力影响;再次,由于电弧运动时速度较快,需考虑空气阻力的影响^[3];最后,为建立更加贴近实际的电弧运动模型,需要考虑电流元质量。

电流元所受热浮力 F_{bi} 大小由式(1)决定,方向竖直向上,如图2所示。

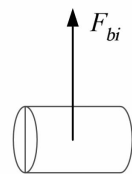


图2 电流元所受热浮力

$$F_{bi} = (\rho_0 - \rho) g \pi R_i^2 L_i \quad (1)$$

式中: ρ_0 为标准大气压中空气密度,值为 1.29 kg/m^3 ; ρ 为弧柱区空气密度,根据文献[13]可将电弧看作高温气体,其密度与温度有关; g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s^2 ; L_i 为电流元长度; R_i 为当前时刻电弧电流元的半径,cm。 R_i 与电流大小有关,当电弧静止时, $R_i = 0.27 \sqrt{I}$;当电弧运动时, $R_i = 0.08 \sqrt{I/v_i}$, v_i 为电流元运动速度大小。

每一个电流元所处位置的磁感应强度为其他各电流元在该处所产生磁感应强度矢量和,可根据毕奥-萨伐尔定律求得第*i*个电流元处的磁感应强度为

$$B_i = \sum_{j=1}^m B_j \quad (2)$$

式中, m 为离散电流元数目, $i \neq j$ 。

第*i*个电流元所受的磁场力为

$$F_{mi} = L_i I \times B_i \quad (3)$$

式中, I 为电弧电流矢量。电流元所受磁场力方向如图3所示。

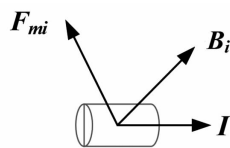


图3 电流元所受磁场力

在实际输电线路,电流元区域的磁场由传输线和电弧电流共同决定,但是对电弧运动影响最大的是电弧本身电流^[14]。由于在实验室条件下无法模拟实际输电线路,所以仅考虑电弧电流本身所产

生的磁场。

根据空气动力学理论,电流元在空气中运动时受到的阻力与电流元运动速度有关,关系如式(4)所示,阻力方向与速度相反。图 4 为空气阻力示意图。

$$F_{ii}=C_D(2R_iL_i)\left(\rho\frac{v_i^2}{2}\right)=C_DR_iL_i\rho v_i^2\tag{4}$$

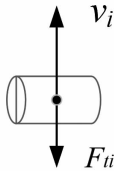


图 4 电流元所受空气阻力

式中: v_i 为第 i 个电流元速度; C_D 为空气阻力系数,由雷诺数 Re 决定。雷诺数 Re 又与电流元速度有关,对应关系为。

$$Re=\frac{\rho}{\mu}v_i\lambda\tag{5}$$

式中: ρ 为空气密度; μ 为空气粘性系数; v_i 为电流元速度; λ 为特征长度。

根据尼古拉兹实验曲线,在 $Re < 2000$ 时为层流运动,此时空气阻力系数与雷诺数关系为^[15]

$$C_D=\frac{64}{Re}\tag{6}$$

当 $2000 < Re < 4000$ 时,为层流向紊流的过渡区,此时空气阻力系数与雷诺数关系为

$$C_D=\frac{0.3164}{\sqrt{Re}}\tag{7}$$

当 $Re > 4000$ 时,为紊流区,此时空气阻力系数与雷诺数关系为

$$C_D=\frac{1}{4\left(\lg\frac{Re}{4.5223\ln Re-3.8215}\right)^2}\tag{8}$$

根据牛顿第二定律,

$$\boldsymbol{F}_{bi}+\boldsymbol{F}_{mi}+\boldsymbol{F}_{ii}=m_i\boldsymbol{a}_i\tag{9}$$

$$\boldsymbol{v}_i=\boldsymbol{v}+\boldsymbol{a}_i dt\tag{10}$$

$$\boldsymbol{x}_i=\boldsymbol{x}+\boldsymbol{v}_i dt\tag{11}$$

式中, $\boldsymbol{v}_i$ 、 $\boldsymbol{x}_i$ 为电流元的速度和位置矢量。当程序运行的步长较小时,可以认为在这一时间段内电流元做匀速运动。

1.2 直流电弧运动仿真流程

直流电弧在羊角型招弧角间燃烧时,会出现向上爬升的现象,导致电弧被拉长,当达到一定长度

时,电弧被拉断熄灭,电弧熄灭长度可由式(12)得到^[16]。

$$L_{\max}=0.71I_a^{0.25}U_a\times10^{-4}\tag{12}$$

式中, U_a 、 I_a 分别为电弧电压和电弧电流。

根据上述分析,仿真流程如图 5 所示。

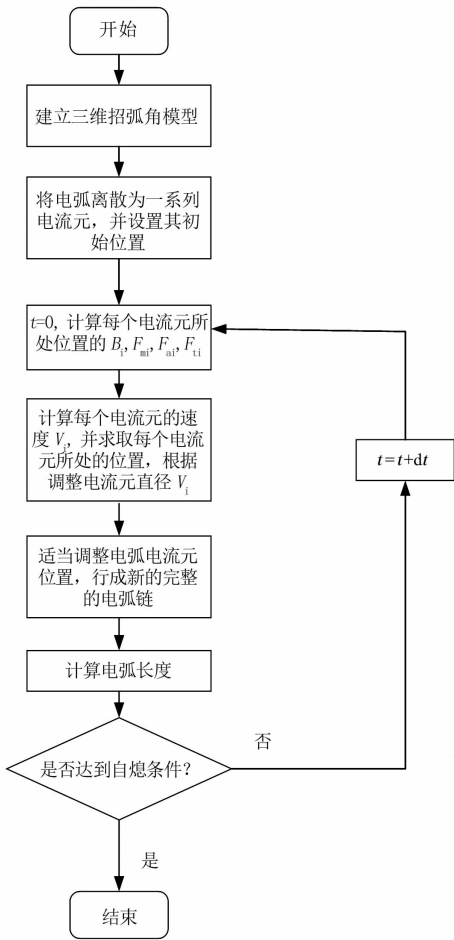


图 5 仿真流程

2 羊角型招弧角间直流电弧运动仿真分析

所采用的仿真模型参数为:电极长度为 0.5 m;羊角型招弧角电极张角分别为 17°、34°、60°;电极根部间距为 0.01 m;电弧电流为 150~600 A。分别对相同电流、不同电极张角的直流电弧运动以及对不同电流、同一电极张角的直流电弧运动进行仿真。图 6 所示为仿真模型结构图。

2.1 电流大小对电弧运动的影响

由于在发生雷击时,电弧总是在最短间隙处建立,所以仿真中将电弧初始位置设置在电极最下端,

仿真步长为 1 μs 。图 7 所示为 600 A 电弧在 17°张角电极间的运动过程。

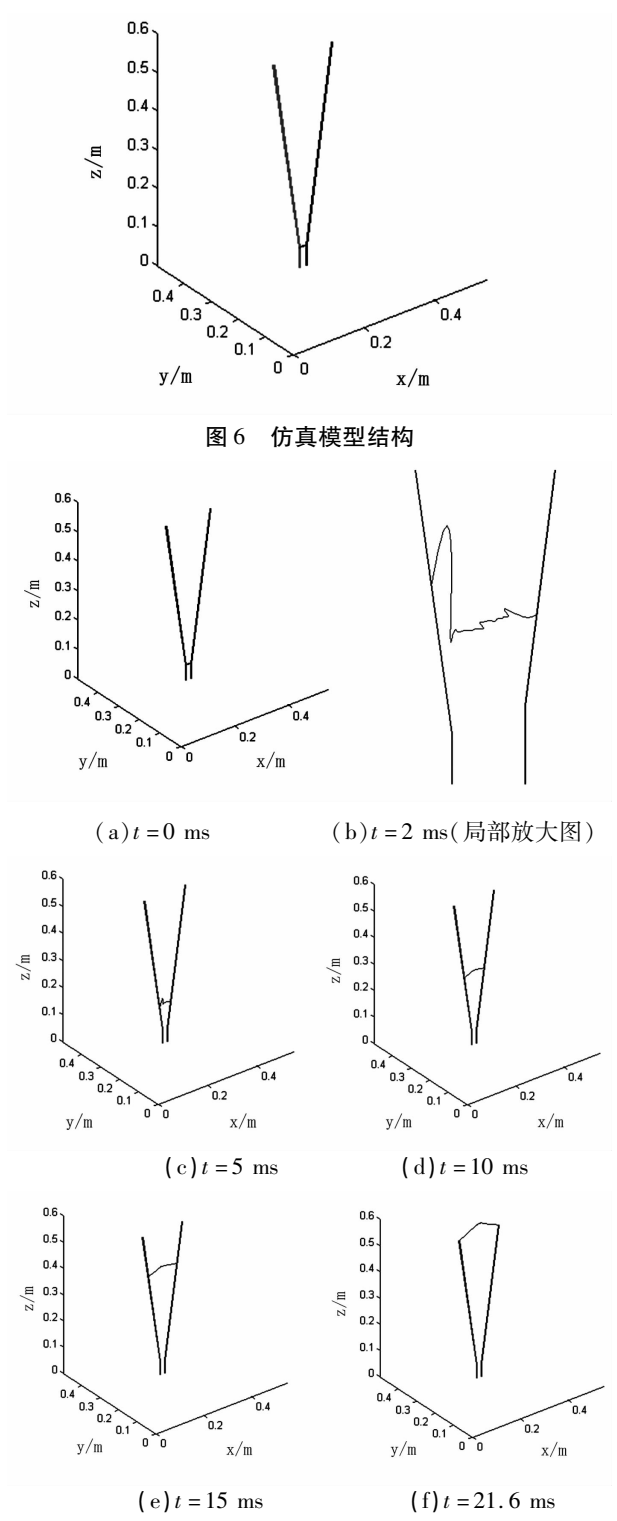


图 7 电极张角 17°, 600 A 电流电弧运动过程

通过仿真分析:电弧在燃烧时,由于弧柱区温度较高,电弧受热浮力的作用,并在电磁力和空气阻力的共同作用下沿电极向上爬升,电弧被拉长;最后当电弧运动到电极根部时,电弧还未达到熄弧的长度时,电弧被继续拉长,弧长达熄弧长度时电弧熄灭。

通过对 17°电极张角、150 ~ 600 A 电流电弧的仿真分析,得到电流与熄弧时间的对应关系如表 1 所示。

图 8 所示为熄弧时间 - 电弧电流折线图。

当电弧电流增大时,电弧熄灭所需达到的弧长也增加,但是电弧所受磁场力增大,电弧半径也增大,从而热浮力也增加,电弧在竖直方向的受力也增加,电弧可以更快地被拉长使熄弧时间变短。

表 1 不同电流电弧的熄弧时间

电弧电流 I/A	熄弧时间 t/ms	电弧电流 I/A	熄弧时间 t/ms
150	45.3	390	39.8
170	44.6	400	25.3
190	44.2	420	24.5
200	44.1	450	24.7
220	44.2	470	22.9
250	43.9	490	23.1
270	43.6	500	22.2
290	42.5	520	22.0
300	42.1	540	21.9
320	42.4	560	21.8
340	41.3	580	21.7
350	41.1	600	21.6
370	41.1		

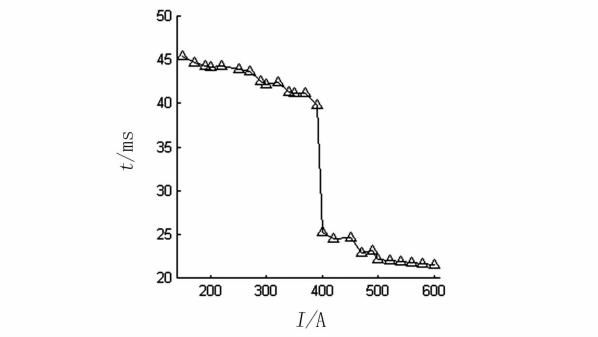
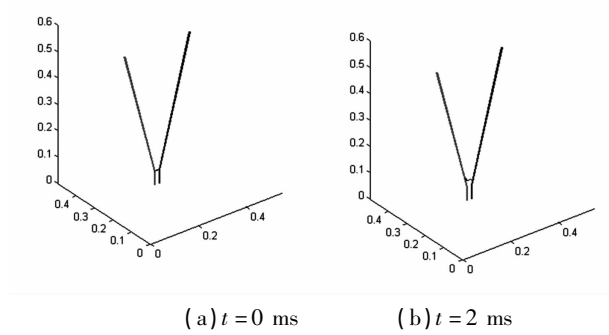


图 8 电弧电流与熄弧时间对应关系

2.2 电极张角对电弧运动的影响

分别对 600 A 电弧在不同张角电极下的运动过



(a) $t = 0\text{ ms}$ (b) $t = 2\text{ ms}$

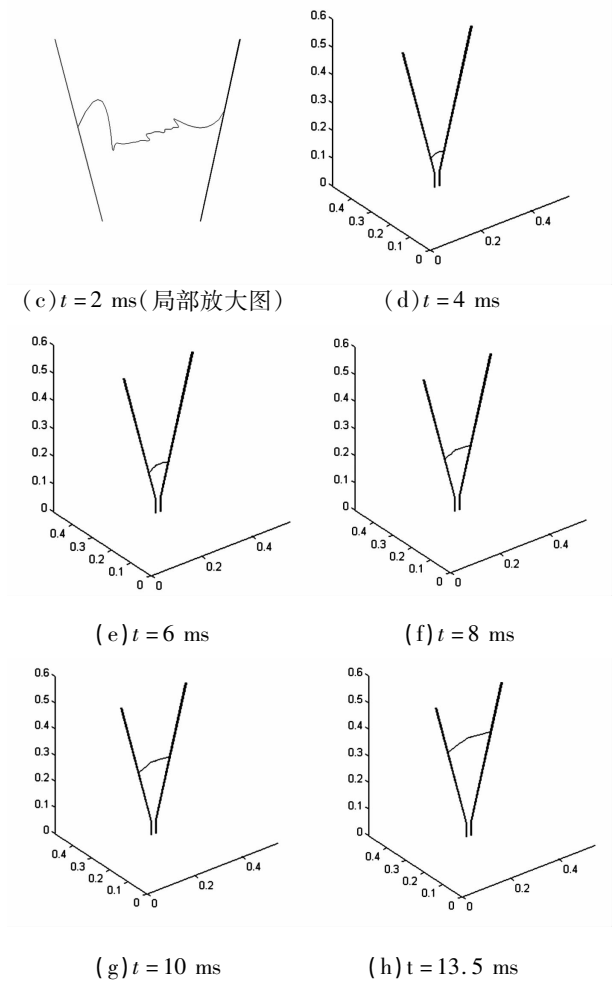


图9 电极张角 34°, 电流 600 A 电弧运动过程

程进行仿真分析,在电极张角 34°时的熄弧时间为 13.5 ms,在电极张角 60°的熄弧时间为 7.9 ms。图9、图 10 分别为电弧在 34°及 60°电极张角下的运动过程。

通过仿真分析,电极张角越大,电弧熄弧时所处的竖直高度越低,电弧更容易被拉长至熄弧长度,熄弧时间会越短。17°张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.587 8 m,34°张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.370 2 m,60°张角的电极中电弧电流元爬升的最高位置是 0.220 1 m。对 300 A、400 A、500 A、600 A 电弧在不同张角电极的运动过程分析,得出仿真时间与电极张角的对应关

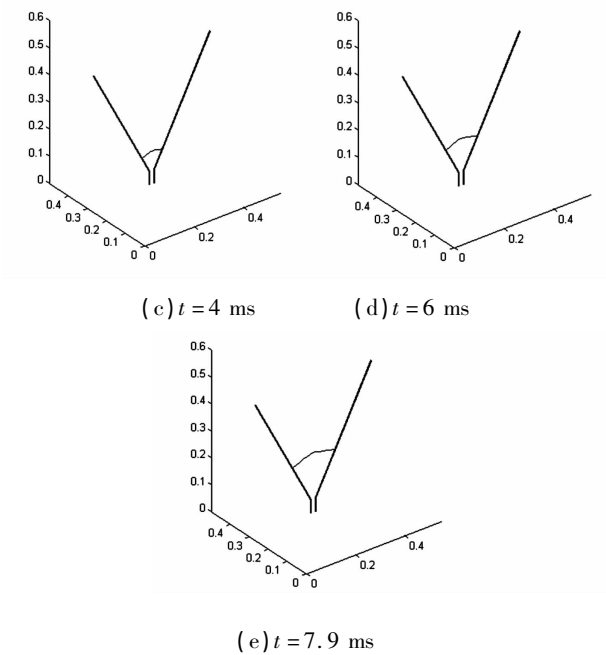
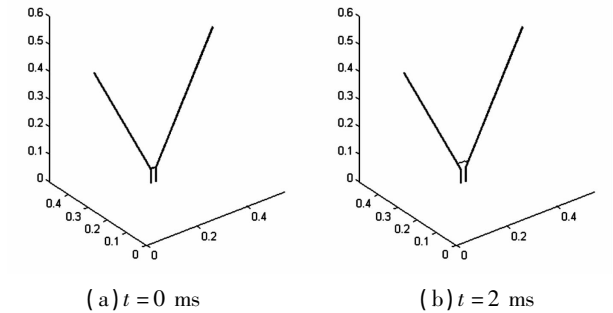


图 10 电极张角 60°, 电流 600 A 电弧运动过程

系如表 2 所示。

表 2 熄弧时间与电极张角的对应关系		
电弧电流/A	电极张角/(°)	熄弧时间/ms
300	17	42.1
	34	35.4
	60	26.5
400	17	25.3
	34	19.9
	60	14.4
500	17	22.2
	34	13.4
	60	7.8
600	17	21.6
	34	13.5
	60	7.9

图 11 为熄弧时间与电极张角对应的折线图。

直流电弧在电极根部起弧运动时,弧柱的形状较复杂,但是在电磁力、热浮力作用下,电弧向上运动过程中被拉长,呈圆拱形向上运动。

通过仿真发现电弧电流和电极张角是影响电弧运动的关键因素。电流越大,电弧向上爬升速度越快,熄弧时间越短。电极张角越大,电弧更容易被拉长至熄弧长度而更容易熄弧;但是电弧向上爬升的距离也变短,在实际中就是电弧在整个燃烧过程中

距电极根部绝缘子的距离短,绝缘子容易受到高温灼烧。因此在设计招弧角张角时需要综合考虑电弧电流大小和电极张角,既要使熄弧时间短,又要使电弧燃烧时不能距离绝缘子太短。

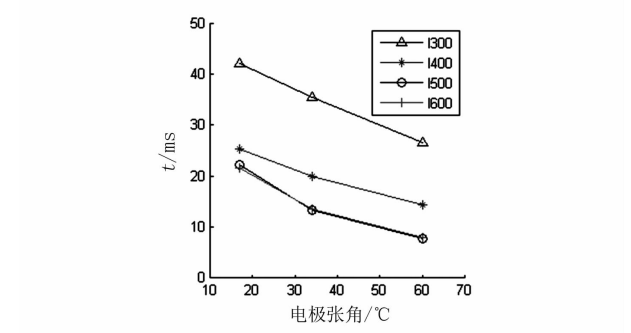


图 11 电极张角与熄弧时间对应关系

3 结 语

1)建立了直流电弧在羊角型电极间运动的数学模型,其间考虑了在磁场力、热浮力和空气阻力作用下电弧的运动;并且考虑了不同电弧运动速度情况下电弧半径的不同导致热浮力的变化;同时考虑了不同电弧运动速度下的雷诺数与空气阻力系数的计算关系。

2)通过仿真不同电流电弧运动过程,发现电流越大,电弧所受磁场力及热浮力越大,电弧更容易向上爬升拉长,电弧可以更快地发展到熄弧弧长,熄弧时间越短。

3)同时仿真发现,当电极张角越大时,电弧被拉长的速度越快,熄弧时间越短。但是电极张角越大,电弧向上爬升的竖直距离越短,电弧距电极根部的距离短,在实际中就是电弧在燃烧时距绝缘子的距离较短,容易使绝缘子受到高温灼烧,所以在设计招弧角张角时需要综合考虑熄弧时间与电弧燃烧时距绝缘子的距离。

参考文献

[1] 徐志坚. 直流通地极招弧角熄弧能力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[2] 陈志彬,姜旭,史宗谦,等. 直流小电流下不同气体电弧的图像特性分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 199 – 203.

[3] 王胜辉,詹振宇,陈维江,等. 基于短间隙模型的直流输电线路极间短路电弧运动仿真研究[J]. 电网技术,

2018, 42(7): 2353 – 2359.

[4] Hertha Marks Ayrton. The Electric Arc[M]. Hardpress Publishing, 2012.

[5] A. R. Van, C. Warrington. Reactance Relays Negligibly Affected by Arc Impedance[J]. ElectWorld, 1931, 98(12): 502 – 505.

[6] D. B. Millter, J. L. Hildenbrand. DC Arc Model Including Circuit Constraints[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1973, 92(6): 1926 – 1934.

[7] J. D. Cobins. Gaseous Conductors[M]. New York: McGraw – Hill, 1941: 371 – 378.

[8] V. P. Ignatko. Electric Characteristics of Open Heavy – current Arcs [C]. in Proc. 3rd Int. Symp. Switching Arc Phenom, 1977: 98 – 102.

[9] Shangqiang Gu, Jinliang He, Bo Zhang, et al. Movement Simulation of Long Electric Arc Along the Surface of Insulator String in Free Air[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1359 – 1362.

[10] Stokes A D, Oppenlander W T. Electric Arcs in Open Air [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24(1): 26.

[11] 吴盛麟. 对我国输电线路工作的几点建议[J]. 电网技术, 1994, 18(2): 49 – 52.

[12] A. M. Cassie. Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory[R]. Paris, France, CIGRE Report, 1939.

[13] 王其平. 电器电弧理论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.

[14] 司马文霞, 谭威, 杨庆, 等. 基于热浮力 – 磁场力结合的并联间隙电弧运动模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 138 – 145.

[15] 伍欣, 张卓, 杨诗怡. 输气管道摩阻系数计算方法[J]. 计量技术, 2017(6): 10 – 15.

[16] 行晋源, 李庆民, 丛浩熹, 等. 半波长输电线路潜供电弧多场耦合的动力学建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2351 – 2359.

作者简介:

王 涛(1996), 硕士研究生, 研究方向为直流电弧运动模型与直流电弧试验;

郑连清(1964), 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子技术 在电力系统中的应用等。

(收稿日期: 2019 – 04 – 24)

地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估研究

郝文斌¹, 张亚刚², 牟 森¹

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘 要:地震会对电网造成破坏性影响, 目前对于地震条件下电网可靠性评估主要进行抗震性能的分析, 所得近似分析结果满足不了实际需要。在对地震条件下电网可靠性评估中考虑了输电杆塔结构可靠度与地震的传播性, 采用有限元仿真手段直接分析了输电杆塔的结构问题; 利用杆塔结构可靠度来计算输电线路故障率, 在得到输电线路可靠性数据后评估了各个地震烈度下电力系统的可靠性; 最后计及地震的传播性评估了电网的综合可靠性。地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型可用于地震条件下电网薄弱环节的预警, 为改善电力系统抗震性能提供参考。

关键词:地震; 有限元分析; 杆塔结构可靠度; 蒙特卡洛; 电力系统可靠性

中图分类号: TM507 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)04-0017-04

Research on Reliability Evaluation of Power Grid Considering Structural Reliability of Tower under Seismic Conditions

Hao Wenbin¹, Zhang Yagang², Mou Miao¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: Earthquakes can have devastating effects on power grid. At present, the approximate analysis of seismic performance is the main method to evaluate the reliability of power grid under seismic condition, but the approximate analysis results can not meet the actual needs. So, the reliability of transmission towers and the propagation of earthquakes are considered in the reliability evaluation of power grids under seismic condition. The finite element simulation method is used to directly analyze the structural problems of the tower. The reliability of transmission line is calculated by using the tower reliability. After obtaining the reliability data, the reliability of power system under each seismic strength is evaluated. Finally, the propagation of earthquake is considered. The overall reliability of power system is evaluated. The reliability evaluation results of grid reliability under seismic condition can be used to identify the vulnerable links of power system and provide a reference for improving the seismic performance of power system.

Key words: earthquake; finite element analysis; structural reliability of tower; Monte Carlo; power system reliability

0 引 言

地震灾害会对电力系统造成破坏性影响, 严重时会造成输电杆塔倒塌、输电线路断线、输电网络解列等严重后果, 会使得电网大面积瘫痪, 严重影响到国家经济与人民的正常生活。在近代的多次地震灾害中, 如 1976 年中国唐山大地震、1989 年美国 Loma Prieta 地震、1995 年日本阪神地震、1999 年中国台湾

大地震和 2008 年中国汶川大地震等都使得电力系统遭到严重破坏。2008 年 5 月 12 日中国汶川 8.0 级大地震, 造成直接经济损失超过 106 亿元, 由于地震造成 246 万用户停电^[1], 因此对地震条件下电网可靠性评估进行研究成为一个至关重要的问题。

国外关于电力系统抗震可靠性研究主要从电气设备层次、变电站层次和电力网络层次进行抗震可靠性研究。其中电气设备层次及变电站层次的抗震可靠性研究相对成熟, 电力网络层次的抗震可靠性

研究处于初步阶段,还未达到工程应用^[2-4]。国内对于这方面研究起步较晚,其研究工作主要是进行电力网络抗震性能的近似分析。

目前地震条件下输电线路故障率的求取主要有3种常见思路:1)根据历史统计数据来模糊估计各个地震烈度下输电线路的停运率^[5];2)直接通过输电线路与地震荷载的数学模型来计算输电线路的停运率^[6];3)通过有限元仿真等手段直接分析各个地震烈度下输电杆塔和输电线路的结构问题^[7-9]。首先各个地区地理环境差异较大,地震烈度分布不同,因此收集不到足够的历史数据来反应地震烈度与线路停运率的关系;其次利用数学模型进行近似分析得到的线路停运率不是十分精确。为此,下面基于有限元法利用 ANSYS 软件来计算各个地震烈度下杆塔构件与电缆的地震荷载,使用 JC 法与窄界限法构建的模型来求杆塔构件与电缆的可靠度;利用所得到的结构可靠度数据来求取输电线路的故障率;最后利用得到的输电线路可靠性数据进行电力系统可靠性评估。评估结果可以用于对地震条件下电网薄弱环节的预警,为改善电力网络抗震性能提供参考。

1 输电杆塔与电缆的地震荷载

1.1 荷载效应

荷载效应^[10]包括恒载效应 S_G 和活载效应 S_Q 。就输电杆塔而言,其承受的恒载效应 S_G 主要包括输电导线、接地线、绝缘子、各种固定设备、杆塔本体结构以及土石方等的重力荷载。活载效应 S_Q 包括风、冰雪、地震烈度、元件张力等。

1.2 地震荷载

基于有限元法利用 ANSYS 软件来计算各个地震烈度下杆塔构件与电缆的地震荷载 S_Q (单位:N,下同)。ANSYS 建模的杆塔模型选用《国家电网公司输变电工程通用设计 220 kV 输电线路分册》中 2C3-J2-1 塔型。选用 beam 188 和 link 180 作为基本单元,弹性模量取 2.06×10^{11} , P_a 泊松比取 0.3,密度取 $7.85 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$, g 取 $9.806 65 \text{ m/s}^2$,4 个塔腿与地面接触点约束类型为全约束,经过 ANSYS 模态分析和谱分析可得到各个地震烈度下杆塔构件的地震荷载 S_Q 。高压输电电缆主要敷设在电力隧道中。由于电缆隧道为地下结构,且电缆固定接于支架上,由此可以取一段两个接头之间的电缆作为研究对象。选用 YJLW02 64/110 1×630 电缆,最大侧

压力为 5000 N/m。由 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》,取设计基本地震加速度如表 1 所示^[11]。

表 1 设计基本地震加速度

抗震设防烈度	设计基本地震加速度值
6	0.05 <i>g</i>
7	0.15 <i>g</i>
8	0.20 <i>g</i>

根据电缆自重以及支架夹具作用面积,可求得不同地震烈度下电缆段的等效地震荷载 S_Q 。

2 杆塔与电缆的结构可靠度

2.1 构件功能函数

为保证输电杆塔及输电线路在使用过程中的可靠性和安全性,采用基于概率理论的极限状态法来设计输电杆塔结构^[12],输电杆塔结构构件用可靠度指标来进行评价和设计。输电杆塔构件的极限状态^[13]是指杆塔构件在规定的各种载荷作用下,可以保持输电线路安全可靠运行的临界状态。可得到输电杆塔构件的功能函数为

$$Z = G(R, S_G, S_Q) = R - S_G - S_Q \tag{1}$$

式中: $Z=0$ 表示杆塔结构为极限状态, $Z>0$ 表示杆塔结构为可靠状态, $Z<0$ 表示杆塔结构为失效状态; R 为结构抗力,服从对数正态分布; S_G 为恒载效应,服从正态分布; S_Q 为活载效应,服从极值 I 型分布。

2.2 杆塔构件与电缆段的结构可靠度

结构的可靠度^[14],是指结构在给定的时间内和给定的条件下,完成预定功能的能力。结构可靠度是将可靠性量化后得到的概念,也即结构在给定的时间内和给定的条件下,完成预定功能的概率。杆塔构件的结构可靠度为

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_{S_G} - \mu_{S_Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_G}^2 + \sigma_{S_Q}^2}} \tag{2}$$

式中: β 为杆塔构件的结构可靠度; μ_Z 、 μ_R 、 μ_{S_G} 、 μ_{S_Q} 分别为 Z 、 R 、 S_G 、 S_Q 的期望值; σ_Z 、 σ_R 、 σ_{S_G} 、 σ_{S_Q} 分别为 Z 、 R 、 S_G 、 S_Q 的标准差。

杆塔构件的失效概率为

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{3}$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; p_f 为杆塔构件的失效概率; β 为杆塔构件的可靠度。

由上述可以求得杆塔构件与电缆段的故障率如表 2、表 3 所示。

表 2 各个地震烈度下杆塔构件的故障率

杆塔构件	$p_f(6)$	$p_f(7)$	$p_f(8)$
3916	2.38×10^{-10}	4.54×10^{-10}	1.21×10^{-9}
3895	2.17×10^{-5}	3.34×10^{-5}	6.41×10^{-5}
3413	8.47×10^{-11}	1.27×10^{-10}	2.34×10^{-10}
3958	1.02×10^{-7}	1.79×10^{-7}	4.20×10^{-7}
3850	1.75×10^{-8}	3.21×10^{-8}	8.07×10^{-8}
3826	5.73×10^{-5}	8.65×10^{-5}	1.61×10^{-4}

表 3 各个地震烈度下电缆段的故障率 p_f

$p_f(6)$	$p_f(7)$	$p_f(8)$
5.93×10^{-5}	1.86×10^{-4}	1.50×10^{-3}

2.3 杆塔体系的可靠度

输电杆塔体系是由大量的构件组成,当某一个杆塔构件失效时,杆塔整体不一定会失效。因此利用“窄界限法”来计算输电杆塔整体可靠度^[15-16],可以得到杆塔整体失效概率 p_{fs} 取值的上下限。根据窄界限法的原理,杆塔整体失效概率的范围为

$$\begin{cases} \max(p_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} p_{fij}, 0) \leq p_{fs} \\ p_{fs} \leq \sum_{i=1}^m p_{fi} - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} p_{fij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_{fs} 为结构体系整体失效概率; i, j 为失效模式; m 为失效模式数量; p_{fij} 为 i, j 两个失效模式同时失效的概率。

由此可以得到杆塔体系在各个地震烈度下的失效概率 P_s 为如表 4 所示。

表 4 各个地震烈度下杆塔体系的失效概率

$P_s(6)$	$P_s(7)$	$P_s(8)$
7.90×10^{-5}	1.20×10^{-4}	2.25×10^{-4}

3 地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型

所建立的地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型,主要关注地震对输电杆塔体系结构可靠度和电缆结构可靠度的影响,计算杆塔体系与电缆失效的条件下输电线路故障的概率,然后分析各个地震烈度下输电杆塔体系与电缆结构可靠度变化对电网可靠性的影响。模型的基本步骤如下。

步骤 1:确定待评估电力系统所在区域的地震烈度分布。

步骤 2:基于有限元法利用 ANSYS 软件对输电杆塔与电缆进行建模,建模完成之后对输电杆塔与电缆进行模态分析与谱分析,计算求得各个地震烈度下输电杆塔构件与电缆的地震荷载 S_Q 。

步骤 3:在得到地震荷载 S_Q 之后,利用杆塔构件的功能函数里各个影响因素的统计参数得到输电杆塔构件与电缆的可靠度 β 与失效概率 p_f 。

步骤 4:这里主要关注杆塔与电缆的结构可靠度,因此做了简化处理,假设输电线路是由若干输电杆塔或电缆段组成的串联系统,即可得到输电线路故障率为 $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \bar{p}_{fi})$ 。式中: $\bar{p}_{fi}$ 为第 i 个杆塔或者电缆段的失效概率; n 为该输电线路杆塔或者电缆段的数量。

步骤 5:根据得到的系统可靠性数据,利用蒙特卡洛抽样法对系统进行可靠性评估,计算各个地震烈度下的可靠性指标,可靠性指标采用电量不足期望 EENS(expected energy not supplied)与电力不足概率 LOLP(loss of load probaility)。分析地震条件下系统的薄弱环节。

步骤 6:考虑系统所在区域的地震烈度不是均匀分布的,对系统所在区域的地震烈度分布进行划分,重新计算不同震源位置时输电线路的故障率,分析震源位置对系统可靠性的影响。

4 算例分析

采用 IEEE-RTS79 系统作为可靠性评估的测试系统,IEEE-RTS79 系统包含 33 条线路(31 条架空线路、2 条电缆)、5 台变压器、1 台电抗器、32 台发电机和 24 条母线。

4.1 各个地震烈度下电网的可靠性评估

根据上述模型,可以得到地震条件下电网的可靠性评估结果,表 5 给出了各个地震烈度下的电力系统可靠性指标。

表 5 给出了正常、六级地震烈度、七级地震烈度与八级地震烈度下电力系统的可靠性指标,可以发现随着地震烈度的增大,系统的可靠性指标 LOLP 与 EENS 在增大,这表明地震烈度越大对于电力系统的危害越大,说明所提出的评估模型可以用于评估各个地震烈度下电力系统的可靠性。

表 5 各个地震烈度下电力系统可靠性指标

地震烈度	LOLP	EENS/(MWh·a ⁻¹)
正常	0.007 6	582.173 7
六级	0.067 5	7 737.497 1
七级	0.151 3	16 847.061 0
八级	0.318 4	36 222.612 5

4.2 计及地震传播性的电网综合可靠性评估

前面假设系统区域的地震烈度是均匀分布的,统一为一个等级,而在实际情况中却不是这样的,基于这些考虑,利用汶川地震的烈度分布对 IEEE – RTS79 系统进行了划分,假设震源分别在系统区域的中心、西北方向、东北方向、西南方向、东南方向,将系统区域分别划分为 6、7、8 三个震烈强度区域。重新计算了不同震源位置时系统输电线路的故障率,随后对系统的可靠性进行了综合评估,见表 6。相比于表 5 中不考虑地震传播性的电力系统可靠性评估结果,表 6 中的可靠性评估结果可以更综合地反映地震对于电力系统可靠性的影响。

表 6 不同震源位置时电力系统的可靠性指标

震源位置	LOLP	EENS/(MWh·a ⁻¹)
中心	0.079 4	7 719.032
西北	0.086 8	8 123.037
东北	0.067 1	7 218.386
西南	0.188 1	17 324.421
东南	0.295 9	35 413.312

5 结 语

提出了一种地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型,并在 IEEE – RTS79 系统上进行了验证,所取得的研究成果如下:

- 1)利用 ANSYS 对于杆塔和电缆进行有限元分析,分析得到杆塔构件和电缆在各个震烈强度下的地震荷载;根据所得到的荷载数据,利用 JC 法与窄界限法求得了杆塔体系与电缆的故障率;随后将输电线路简化为由架空线杆塔与电缆组成的串联系统,计算得到了各条输电线路的故障率。
- 2)根据得到的可靠性数据利用蒙特卡洛抽样模拟法对系统进行可靠性评估,得到各个震烈强度(6、7、8)下系统的可靠性指标,同时考虑地震从震源中心的传播性,计算了计及地震传播性的电网可靠性综合评估指标。

3)算例分析结果表明所提出的模型能够对地震条件下电网薄弱环节进行预警,为改善电力网络抗震性能提供参考。

参考文献

[1] 王茜. 供电系统抗震可靠性分析及脆弱性评估[D]. 大连:大连理工大学,2012.

[2] 贺海磊,郭剑波,谢强. 电气设备的地震灾害易损性分析[J]. 电网技术,2011,35(4):25 – 28.

[3] Vanzi I. Seismic Reliability of Electric Power Networks: Methodology and Application[J]. Structural Safety,1996,18(4): 311 – 327.

[4] Liu G Y, Liu C W, Wang Y J. A Study on Seismic Response and Vulnerability of Electric Power System[C]// Second Proceeding of Japan – Taiwan Workshop on Life-line Performance and Disaster Mitigation, Kobe, Japan; Japan – Taiwan Workshop,2002;176 – 183.

[5] 韩卫恒,刘俊勇,张建明,等. 冰冻灾害下计入地形及冰厚影响的分时段电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):81 – 86.

[6] 孙荣富,程林,孙元章. 基于恶劣气候条件的停运率建模及电网充裕度评估[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):7 – 12.

[7] John B Bowles. Commentary – Caution:Constant Failure – rate Models May Be Hazardous to Yours Design [J]. IEEETransactions on Reliability,2002,51(3):375 – 377.

[8] 陈蓉. 输电线路的整体可靠度研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[9] 姚陈果,李宇,周泽宏,等. 基于极限承载力分析的覆冰输电塔可靠性评估[J]. 高电压技术,2013,39(11):2609 – 2614.

[10] 白海峰. 输电塔线体系环境荷载致振响应研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.

[11] 建筑抗震设计规范:GB 50011 – 2010[S],2016.

[12] Robert E. Melchers. Structural Reliability Analysis and Prediction[M]. John Wiley & Son Ltd,1999.

[13] 冯云芬. 可靠度理论在结构设计中的若干应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.

[14] 瞿文举. 基于承载能力极限状态的混凝土结构耐久性概率设计[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.

[15] 郑道钦. 极值 I 型 – 正态模式结构可靠性当量正态设计法[J]. 福建:福建师范大学学报(自然科学版),1987,3(2):1 – 9.

[16] 余鹏. 计及不同灾害条件下杆塔可靠度的电网可靠性评估研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

作者简介:

郝文斌(1976),博士,教授级高级工程师,从事电力系统规划及调度运行研究;
张亚刚(1995),硕士,研究方向为重大灾害下电网可靠性评估。

(收稿日期:2019 – 05 – 21)

不同负载条件下 CVT 过电压监测装置频率响应特性分析

张 榆¹, 谢 敏², 谢施君¹, 张晨萌¹, 穆 舟¹, 朱 军¹
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:过电压的准确测量对保证电网的安全稳定运行具有重要意义。为此,对不同负载条件下基于电容式电压互感器(CVT)的过电压监测装置的频率响应特性进行了实际测试分析,研究了不含内置低压电容和含有内置低压电容情况下负载变化对频率响应特性的影响。研究表明:对于不含内置低压电容的情况,当 CVT 二次侧空载或额定负载时,得到的频率特性大致相同,但当负载较重时,频率特性与额定负载情况下差异较大;当含有内置低压电容时,内置低压电容的存在几乎不对 CVT 不同负载情况下的频率特性产生影响,且额定负载和空载情况也对内置低压电容高压侧频率特性影响较小。

关键词:过电压;电容式电压互感器;负载;频率响应特性

中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0021-03

Analysis on Frequency Response Characteristics for CVT Over – voltage Monitoring Device under Different Load Conditions

Zhang Yu¹, Xie Min², Xie Shijun¹, Zhang Chenmeng¹, Mu Zhou¹, Zhu Jun¹
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The accurate measurement of over – voltage is very important to ensure the safety and stability of power grid. Therefore, the frequency response characteristics of over – voltage monitoring device employing capacitor voltage transformer (CVT) under different load conditions are tested and analyzed, and the effect of load change on frequency response characteristics without and with interior low – voltage capacitor is studied. The results show that: for the case without interior low – voltage capacitor, when the secondary side of CVT at no – load or rated load, the frequency characteristics are roughly the same, but when the load is heavy, the frequency characteristics are greatly different from the situation under rated load. When there is an interior low – voltage capacitor, the presence of interior low – voltage capacitor has almost no effect on the frequency characteristics of CVT under different load conditions, and there is also little effect on the frequency characteristics in high – voltage side of interior low – voltage capacitor under rated load and no – load conditions.

Key words: over – voltage; capacitor voltage transformer; load; frequency response characteristic

0 引 言

暂态过电压是引发设备事故的重要原因之一,同时也是评估电网运行状态的有效手段之一。虽然电网中投入了大量的过电压防护装置,但由于实际中各种过电压相对较复杂,因此过电压现象仍时有发生。为了减小过电压对电网的影响,需要对过电压进行实时监测分析^[1-2]。

目前主流的过电压监测方式主要有 3 种:1) 基于分压器的过电压监测,如电容、阻容分压器等^[3-4];2) 基于运行中容性设备的过电压监测,如电流互感器(current transformer, CT)、套管等^[5-6];3) 基于电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)的过电压监测^[7-8]。其中,分压器属于离线设备,因此无法在运行中使用。而基于容性设备的过电压监测装置操作复杂,且存在一定的安全隐患,因此这种测量方式目前仍处于调试阶段;相

比而言,CVT 属于在线设备,且进行过电压监测时具有较好的测试结果,因此开始在实际的过电压在线监测系统中得到应用。

为了实现基于 CVT 的过电压监测,文献[9]在实验室成功搭建了基于 CVT、二次电缆和分压器的过电压在线监测系统,并对该系统的频率响应进行了实测和理论分析;文献[7]结合 500 kV CVT 实际结构,提出利用内置低压电容实现了过电压的在线监测。然而,以上监测系统均未考虑实际运行中的 CVT 在不同负载情况下的频率特性,从而影响后续的过电压波形分析。因此,下面对基于 CVT 的过电压在线监测装置在不同负载情况下的频率特性进行研究,这将对后期过电压的监测分析具有实际指导意义。

1 CVT 过电压监测装置

图 1 为常规 500 kV CVT 的典型电气结构图。由图 1 可知,常规 500 kV CVT 由电容分压器(高压电容 C_1 和中压电容 C_2)、电磁单元和二次端子 3 部分组成。图中:T 为中间变压器;K 为中压接地开关;L 为补偿电抗器; Z_d 为阻尼器;BL 为 ZnO 避雷器;a - n 为主二次绕组端子;da - dn 为剩余电压绕组端子; $3a_z - 3n$ 为阻尼器端子。

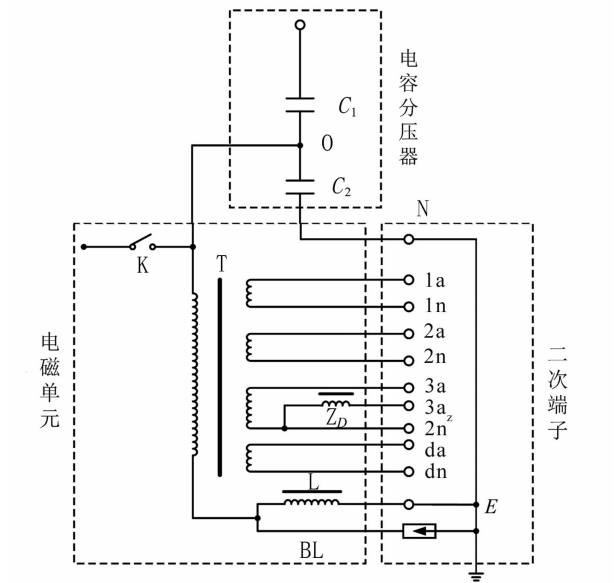


图 1 CVT 电气结构

通常采用两种方式利用 CVT 对过电压进行测试,测试原理分别如图 2(a)、图 2(b)所示。第 1 种测量方式为直接在 CVT 分压器信号输出端(图 1 中 O 点)外接二级分压装置,并利用二次电缆进行连接。第 2 种测量方式是在电容分压器低压端 N 接入低压电容 C_5 ,从 C_5 高压端进行过电压测量。

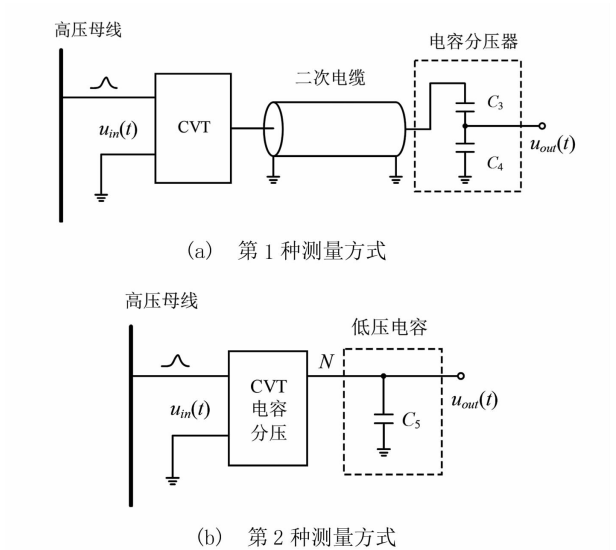


图 2 典型 CVT 过电压测量方式

除了以上两种测试方式外,亦可在二次端子侧进行过电压测试,通过测量端得到的输出电压 $u_{out}(t)$ 结合测量系统的传递函数,利用反演计算即可实现过电压波形的恢复。需要说明的是,当信号电缆长度较长时,为减小过电压经过长电缆后存在的振荡现象,需要在电缆末端加匹配阻抗抑制振荡。

2 不同负载条件下 CVT 频率特性

为了研究基于 CVT 的过电压在线监测系统在不同负载情况下的传递特性,对 WVL₂ 110 - 10H 型的 CVT 进行不同负载条件下的频率特性研究。该 CVT 最高运行电压为 126 kV,额定高压电容为 11 207 pF,额定电压电容为 92 857 pF,二次绕组参数如表 1 所示。

表 1 WVL ₂ 110 - 10H 型 CVT 二次绕组参数			
二次绕组	额定电压/V	额定输出/VA	准确级
1a - 1n	$100/\sqrt{3}$	10	0.2
2a - 2n	$100/\sqrt{3}$	10	0.5
3a - 3n	$100/\sqrt{3}$	10	3p
da - dn	100	10	5p

2.1 无低压电容时负载对 CVT 频率特性的影响

为了研究无低压电容(图 2(b)中 C_5)在不同负载情况下 CVT 的频率特性(测量端为 1a - 1n),利用图 3 所示测量系统进行测量。其中,高压放大器最大输出电压为 500 V, - 3 dB 带宽为 75 kHz;数据采集部分最大采样率 2.5 GSa/s,垂直分辨率 12 bit;R//C 为示波器的输入阻抗,设置为 1 MΩ//15 pF。需要说明的是,进行频率特性测量时同时利用 10:1 探头对高压侧电压进行了测量。

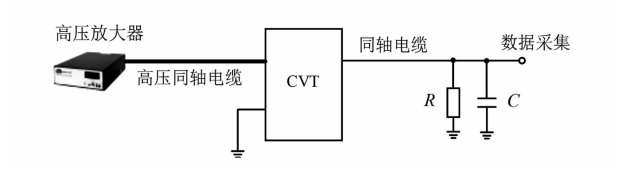


图 3 CVT 频率特性测试原理

由表 1 参数可知,当二次绕组外加 $1000/3\ \Omega$ 电阻、剩余绕组外加 $1000\ \Omega$ 电阻时,二次绕组负载处于额定状态。利用图 3 所示测试电路进行测试,保持负载处于额定和空载状态,得到二次侧空载、二次侧额定负载、仅测量端空载(1a-1n 空载,其他端子额定负载)及仅测量端额定负载(其他端子空载)4 种情况下的频率响应曲线,如图 4 所示。

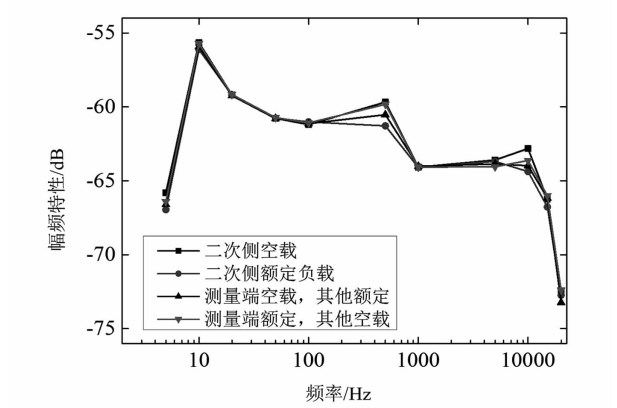


图 4 不同负载情况下 CVT 幅频特性

由图 4 可知,当二次侧额定负载或空载时,4 种情况测试得到的结果整体呈相似状态,但也存在着一定的不同:当测试频率为 $500\ \text{Hz}$ 时,二次侧均空载与仅测量端接额定负载情况下的频率特性大致相同,但与另外两种情况存在一定差异;当测试频率为 $10\ \text{kHz}$ 时,4 种情况下的测试结果均存在一定的差异。

进一步地,图 5 给出了负载较重情况下($10\ \Omega$) CVT 频率响应测试结果。由测试结果可知,由于补偿电抗器(图 1 中 L)和电磁单元励磁支路的电抗值与电容分压器的等值电容在额定频率附近下的容抗相等,因此当测试频率为额定频率时,负载较大与额定负载情况下的频率特性相似;相比而言,除了额定频率点外,其他频率点的特性曲线均与二次侧额定负载情况下的测试结果存在着较大的差异。因此在实际中利用 CVT 进行过电压监测时,当二次侧负载较重时,若直接利用空载或额定负载条件下的频率特性对真实过电压波形进行反演计算时(过电压波形恢复),计算结果将与真实结果存在着较大的差异;与此同时,当二次侧负载较重时,测量得到的信

号也会存在较大的衰减,不利于过电压的检测。

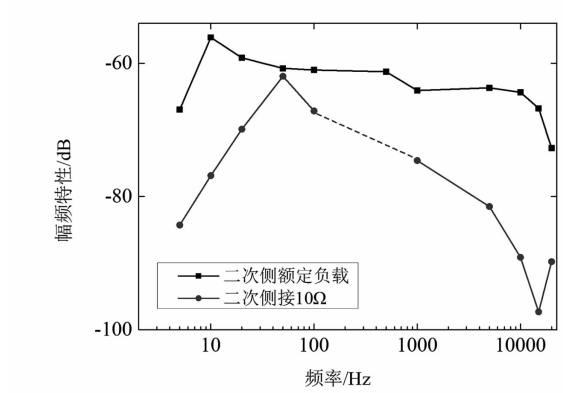


图 5 $10\ \Omega$ 负载情况下 CVT 幅频特性

2.2 负载对内置低压电容出口处频率特性的影响

文献[7]给出了一种基于 $500\ \text{kV}$ CVT 内置低压电容(图 2(b))的过电压监测系统,然而该文献也未给出不同负载情况下的频率特性。为此,接下来主要对存在低压电容情况下二次侧接不同负载时的频率特性进行研究。

图 6 为二次侧空载和二次侧接额定负载情况下内置低压电容($C_5 = 1100\ \text{nF}$)高压侧的频率响应曲线。由图 6 测试结果可知,二次侧空载和额定负载情况下得到的频率特性呈高度相似状态,即当二次侧接额定负载时,其对内置低压电容出口处的频率特性影响较小。

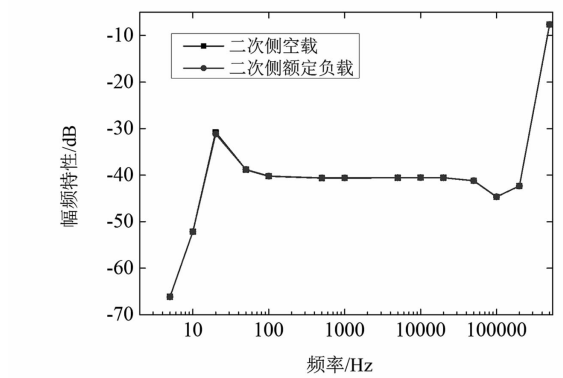


图 6 内置低压电容高压侧幅频特性

2.3 存在低压电容时负载对 CVT 频率特性的影响

进一步地,图 7 给出了存在内置低压电容情况下的 CVT 频率特性曲线。由图 7 结果可知,当接入内置低压电容时,不同负载情况下 CVT 频率特性与未接内置低压电容时不同负载情况下(见图 4)的频率特性存在着较高的相似度,即内置低压电容对 CVT 不同负载情况的下的频率特性影响较小。

(下转第 37 页)

非标准雷电冲击电压模拟技术研究

孙鹏宇¹, 江 渝¹, 张晨萌², 谢施君², 王 鑫¹, 王 涛¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:变电站内实际遭受的雷电冲击电压与在高压设备试验中所用的标准雷电冲击电压存在很大差异。为探讨变电站内设备实际可以承受的非标准雷电冲击电压与标准雷电冲击电压(1.2/50 μs)的差异,设计了一种可以产生模拟非标准雷电暂态电压波形的电路,可对电路元件参数进行调节,研究电路中不同的元件参数对产生的非标准雷电冲击电压波形的影响。非标准雷电冲击电压波形大多是振荡型冲击电压波形,通过 Matlab Simulink 进行电路仿真,依据仿真设计出能够产生非标准振荡型冲击电压波形的电路。研究结果表明,仿真电路产生的电压波形与实际电路测量得到的冲击电压波形相比较基本一致。该研究为进一步探讨非标准雷电振荡型冲击电压对电介质击穿特性的试验奠定了基础。

关键词:雷电侵入波;非标准雷电电压;Simulink;振荡型冲击电压;电路设计

中图分类号:TM935 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0024-04

Research on Simulation Technology for Non – standard Lightning Impulse Voltage

Sun Pengyu¹, Jiang Yu¹, Zhang Chenmeng², Xie Shijun², Wang Xin¹, Wang Tao¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The actual lightning impulse voltage suffered in substations is far from the standard lightning impulse voltage used in high – voltage equipment test. In order to discuss the difference between non – standard lightning impulse voltage and standard lightning impulse voltage (1.2/50 μs) actually tolerated by substation equipment, a circuit which can generate non – standard lightning voltage waveform is designed, the circuit component parameters are adjusted, and the influence of different component parameters on non – standard lightning impulse voltage waveform is studied. Most of non – standard lightning impulse voltage waveform are oscillating impulse voltage waveform, the circuit simulation is carried out with Matlab Simulink, and the circuit which can generate non – standard oscillating impulse voltage waveform is designed according to the simulation. The results show that the voltage waveform generated by the simulation circuit is basically consistent with the impulse voltage waveform measured by the actual circuit. This research lays a foundation for further exploring the dielectric breakdown characteristics of non – standard lightning impulse voltage.

Key words: lightning intruding surge; non – standard lightning voltage; Simulink; oscillating impulse voltage; circuit design

0 引 言

电力设备,特别是电压等级比较高的电力设备绝缘设计主要依据 1.2/50 μs 的标准雷电冲击(standard lighting impulse waveform, SLIW)耐受电压^[1-4]。

然而,由于变电站内进线段衰减、折反射及绕组谐振等因素,变电站现场遭受的大多为非标准雷电冲击电压(non – standard lightning impulse waveform, NSLIW),其波前时间可能在百纳秒到数十微秒范围内变动,还会叠加频率为几百到几兆赫兹较高幅值的振荡^[5-9]。这与现行标准规定的 1.2/50 μs 标准

雷电冲击电压波形存在较大差异^[10-15],不利于高压电气设备的合理绝缘设计和绝缘考核^[16-20]。

多年来,重庆大学、华北电力大学等高校进行了大量的站内侵入冲击电压波形的在线监测研究,并得到了大量的雷电侵入冲击电压波形数据,取得显著进展。研究学者对多年的雷电侵入冲击电压波形数据进行了统计分析,进一步得到了变电站内雷电侵入冲击电压波形的典型特征,分析显示采集所得的雷电波形均呈现为振荡的衰减或上升的冲击电压波形^[21]。因此有必要设计出一种可以产生非标准雷电冲击电压的发生装置,对高压电气设备进行绝缘测试。

针对上述问题和需求,首先通过 Matlab Simulink 搭建电路仿真模型,通过运用电路理论等相关知识对仿真电路进行逻辑推导,进一步得出所设计电路产生的非标准雷电冲击电压的近似解析表达式,并在试验室条件下设计出能够产生非标准雷电冲击电压波形的装置。

1 非标准雷电冲击电压发生回路

所设计的非标准雷电冲击电压发生器的原理如图 1 所示。图 1 中: C 为冲击电压发生器等值电容; g_1 为冲击电压发生器等值放电球隙; R_1 、 R_2 分别为标准冲击电压发生器的波尾、波前电阻; L 为电路中线路及电阻电感(外接电感或线路杂散电感); R_3 、 R_4 为电路中线路的阻尼电阻; R_d 为波尾调节电阻,用于调节非标准冲击电压发生器的波尾时间 T_1 。当球隙 g_1 击穿时,发生器将标准的冲击电压施加到 C_s 上给予充电,当 C_s 上的电压达到一定值时,击穿球隙 g_2 ,这时发生器将产生非标准雷电冲击电压并施加到测量试品两端。

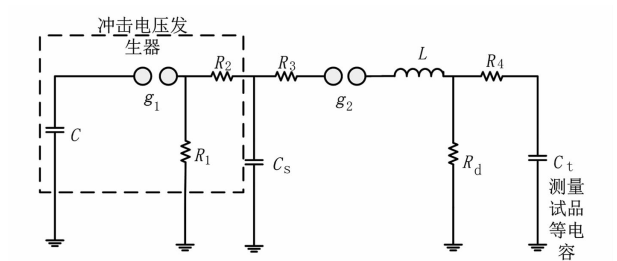


图 1 非标准雷电冲击电压发生器原理图

由于非标准雷电冲击电压发生器电路中,阻尼电阻 R_3 、 R_4 相对于电路中其他电阻来说相对较小,这里为了方便计算忽略不计,当 g_1 、 g_2 球隙闭合时简化

的等效电路如图 2 所示。

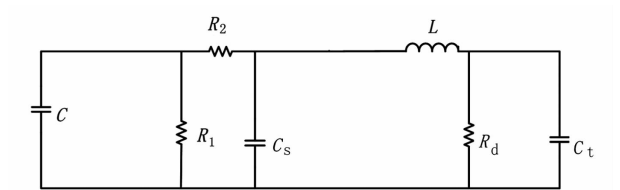


图 2 非标准雷电冲击电压发生器等效回路

由图 2 可知非标准雷电冲击电压发生器等效回路是带有电感、电容、电阻的多阶回路,且电容 C 带有一定的初始电压值 $U_c(0_-)$,所以在这里用拉普拉斯变换来求解试品电容两端的电压 U 。非标准雷电冲击电压发生器等效回路的拉普拉斯运算电路如图 3 所示。

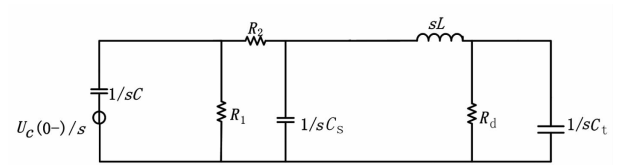


图 3 发生器拉普拉斯运算电路

通过电路运算可求出：

$$U(s) = \frac{U_c(0_-)R_1R_dCC_s}{[sCR_1 + sC_s(R_1 + R_2) + 1][(s^2L C_s + 1)(sC_tR_d + 1) + sC_sR_d]} \quad (1)$$

展开得：

$$U(s) = \frac{U_c(0_-)R_1R_dCC_s}{\{ [CR_1 + C_s(R_1 + R_2)]s + 1 \} [C_tR_dL C_s^3 + L C_s s^2 + (C_tR_d + C_sR_d)s + 1]} \quad (2)$$

为方便计算,令 $a = U_c(0_-)R_1R_dCC_s$, $b = CR_1 + C_s(R_1 + R_2)$, $d = C_tR_dL C_s$, $e = L C_s$, $f = C_tR_d + C_sR_d$, 近似可得：

$$U(s) = \frac{a}{(bs + 1)(ds^2 + es + f)} \quad (3)$$

对式(3)进行分式拆分化简,得到有利于拉普拉斯反变换的式子为

$$U(s) = \frac{A}{s + \frac{1}{b}} + \frac{B \sqrt{\frac{4df - e^2}{4d^2}}}{(s + \frac{e}{2d})^2 + \frac{4df - e^2}{4d^2}} \quad (4)$$

式中, A 、 B 为由 a 、 b 、 d 、 e 、 f 构成的量。式(4)经拉普拉斯反变换后得：

$$U(t) = Ae^{\frac{-t}{b}}\varepsilon(t) + Be^{-\frac{e}{2d}t}\sin(\sqrt{\frac{4df - e^2}{4d^2}}t)\varepsilon(t) \quad (5)$$

由式(5)可知,所设计的非标准雷电冲击电压发生器产生的电压波形由一个负指数波形加一个振荡的正弦波形组成,波形满足非标准雷电冲击波的要求。

2 Matlab Simulink 仿真

根据非标准雷电冲击电压发生器等效回路构建发生器仿真模型,如图 4 所示。

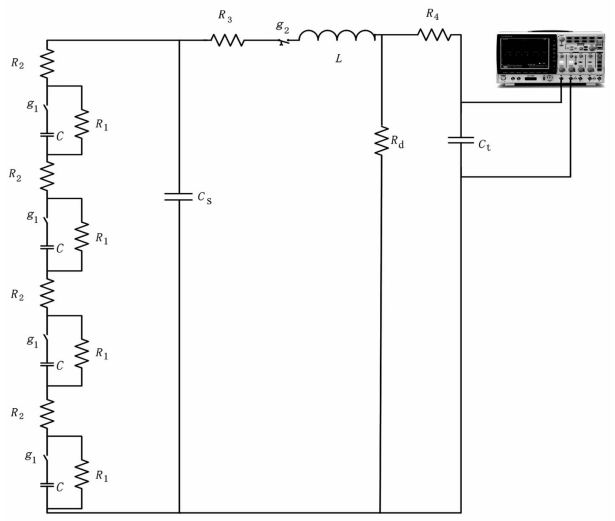


图 4 发生器仿真模型

图 4 中,由 4 组电容 C 串联构成了四级标准的冲击电压发生器。假设电容 C 带有一定的初始电压 $U_c(0_-)$,开关 g_1 在 0.01 s 时闭合,根据电路的有关计算设计出各元件参数,仿真出 a、b 两种波形。在 a 波形中设置 g_2 在 $0.010\ 05\text{ s}$ 时闭合,a 波形元件具体参数如表 1 所示。

在表 1 中,设置充电电容 C 的初始电压为 40 kV ,四级串联的总充电电压为 160 kV ,由于实际电路中电感与导线中存在电阻,这里设置电路中的阻尼电阻 R_3 、 R_4 分别为 $20\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 。利用 Matlab Simulink 进行

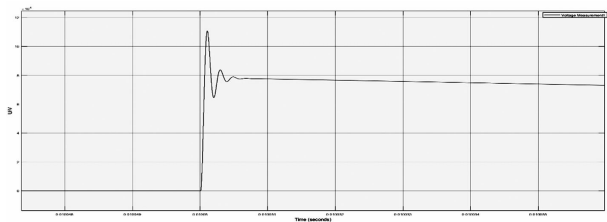


图 5 冲击电压发生器振荡波形 a

仿真,在试验电容 C_t 两端得到的 a 波形如图 5 所示。

由图 5 可知:冲击电压发生器产生的波形在波峰处产生了下降的高频振荡,尽管由于电感电阻与线路中阻尼电阻的影响,振荡持续 5 个周期,但仍然符合非标准雷电冲击波的范围。

接下来改变电容 C_s 的值,其他元件参数保持不变,仿真出 b 波形,并在 b 波形中设置 g_2 在 $0.010\ 01\text{ s}$ 时闭合。b 波形元件的具体参数如表 2 所示,在试验电容 C_t 两端得到的波形如图 6 所示。

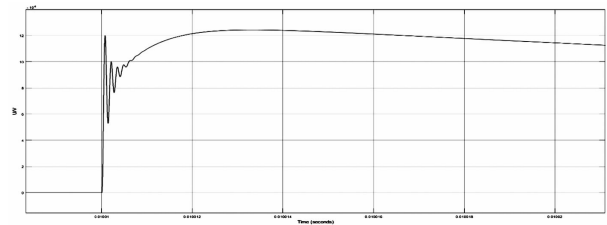


图 6 冲击电压发生器振荡波形 b

由图 6 可知:所设计的非标准雷电冲击电压发生器产生了在波峰附近出现高频振荡的波形,满足非标准雷电冲击波的要求,达到了预期的结果。



图 7 非标准冲击电压发生器

3 实际设计电路运行结果

根据 Matlab Simulink 仿真电路设计出实际的非标准雷电冲击电压发生器,如图 7 所示。实际非标准雷电冲击电压发生器装置由四级标准冲击电压发生装置、外接设计电路、分压器测试装置构成。由于自然界中侵入变电站的雷电波多数呈负极性,这里设计发生器产生的电压也为负极性,其中主电容 C

表 1 a 波形参数取值

元件	$C_1/\mu\text{F}$	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	R_4/Ω	R_d/Ω	C_s/pF	C_t/pF	$L/\mu\text{H}$
参数	1	70	300	20	10	20	5070	390	2.2

表 2 b 波形参数取值

元件	$C_1/\mu\text{F}$	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	R_4/Ω	$R_d/\text{k}\Omega$	C_s/pF	C_t/pF	$L/\mu\text{H}$
参数	1	70	300	20	10	20	425	390	2.2

为 $1\text{ }\mu\text{s}$, 每级电容充电 40 kV 。

参照仿真电路 a 模型设计发生器其他元件参数, 调波电感 $L = 2.2\text{ }\mu\text{s}$, 波尾电阻 $R_d = 20\text{ k}\Omega$, 测量实际发生器产生的非标准雷电冲击电压波形如图 8 所示。实测波前时间 T_1 为 $0.21\text{ }\mu\text{s}$, 波尾时间为 $55.1\text{ }\mu\text{s}$, 波峰值为 118.8 kV , 误差为 19.32% , 与仿真 a 波形结果相似, 符合非标准雷电冲击波的定义。

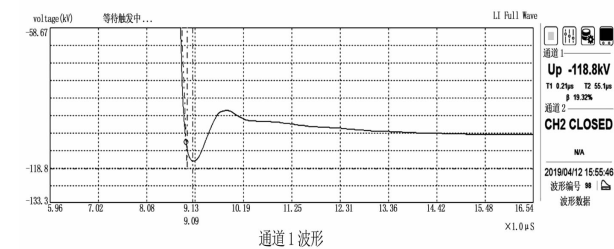


图 8 实际发生器产生的 a 波形

同样参照仿真电路 b 模型设计发生器其他元件参数, 设置电容 $C_s = 425\text{ pF}$, 波尾电阻 $R_d = 20\text{ k}\Omega$, 实际发生器产生的非标准雷电冲击电压波形如图 9 所示。实测波前时间 T_1 为 $12.50\text{ }\mu\text{s}$, 波尾时间为 $74.2\text{ }\mu\text{s}$, 波峰值为 107.0 kV , 误差为 12.64% , 与仿真 b 波形结果也相似, 符合非标准雷电冲击波的定义。

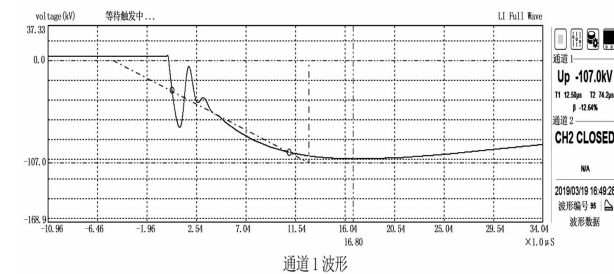


图 9 实际发生器产生的 b 波形

4 结 语

前面通过计算非标准雷电冲击电压回路的简化运算, 得到了试品电容两端电压与电路中元件的关系, 并据此构建了冲击电压发生装置。

通过对比仿真模型与实际电路的波形, 验证了实际得到的波形与仿真所得到的波形相似, 且与统计得到的非标准雷电波形一致, 进一步证实了设计的实际电路可以模拟产生变电站内侵入的非标准雷电波, 为接下来测量非标准雷电冲击电压对电介质击穿特性打下了基础。

参考文献

[1] K. Nakanishi, S. Fujita, H. Kurita, et al. High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings and Electrical Breakdowns Properties of Interturn Insulation Immersed in oil at VFT Voltage [C]// IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, MN, USA, 1997: 490 – 493.

[2] 张璐, 张乔根, 刘石, 等. 特快速瞬态过电压和雷电冲击作用下特高压 GIS 绝缘特性 [J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 335 – 341.

[3] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[4] 谢施君, 曾嵘, 李建明, 等. 变电站雷电侵入过电压波形特征及其影响因素的仿真 [J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1556 – 1564.

[5] 王喆, 张乔根, 王同磊, 等. 非标准雷电冲击电压下油纸绝缘击穿特性 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2931 – 2937.

[6] Cox J H, Beck E. Lightning on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930, 49(3): 857 – 865.

[7] Norinder H. The Cathode Oscillograph as Used in the Study of Lightning and Other Surges on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928, 47(2): 446 – 455.

[8] Lewis W W, Foust C M. Lightning Investigation on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930, 49(3): 917 – 928.

[9] Lewis W W, Foust C M. Lightning Investigation on Transmission Lines – IV [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1934, 53(8): 1180 – 1186.

[10] Gallet G, Leroy G, Lacey R, et al. General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(6): 1989 – 1993.

[11] Pignini A, Rizzi G, Carbagnati E, et al. Performance of Large Air Gaps under Lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy Predetermination Methods [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1379 – 1392.

[12] Aleksandrov G N, Podporkyn G V. Analysis of Experimental Data on the Electric Strength of Long Air Gaps [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 597 – 605.

[13] Paris L, Cortina R. Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(4): 947 – 957.

(下转第 53 页)

220 kV 限流式统一潮流控制器设计

杜莹莹¹, 郝文斌²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:限流式统一潮流控制器 (UPFC-FLC) 通过故障限流器与统一潮流控制器的结合, 组成了能有效控制系统短路电流的新型 FACTS 装置。针对 220 kV 线路, 为缩短限流时间, 减小装置体积和成本, 实现更高效的短路故障切除, 提出了一种采用饱和型自耦变压器作为串联变压器, 二次侧限流支路采用 RLC 串联谐振电路的新型限流式 UPFC。对其拓扑结构、限流过程进行了分析, 设计了装置的主要参数, 仿真结果表明新型限流式 UPFC 相较于常规型在体积成本更小的基础上具有更佳的限流效果。

关键词:限流式 UPFC; 饱和型自耦变压器; RLC 串联谐振; 短路电流

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0028-05

Design of 220 kV Unified Power Flow Controller with Fault Current Limiting

Du Yingying¹, Hao Wenbin²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;
2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The unified power flow controller with fault current limiting (UPFC-FLC) combines a fault current limiter with a unified power flow controller to form a new FACTS device that can effectively control short-circuit current of the system. For 220 kV voltage class, in order to shorten the current-limiting time, reduce the device volume and cost and achieve more efficient short-circuit fault removal, a new UPFC-FLC is proposed, that is, taking saturated autotransformer as series transformer and adopting RLC series resonant circuit for the secondary side current limiting branch. Its topological structure and current limiting process are analyzed, and the main parameters of the device are designed. The simulation results show that the new UPFC-FLC has a better current limiting effect than the conventional one in terms of smaller volume cost.

Key words:unified power flow controller with fault current limiting; saturated autotransformer; RLC series resonance; short-circuit current

0 引言

近年来,中国各省市电网的短路电流超标问题日益突出,而现有的限流措施仍以运行方式调整、网架结构改变和加装电抗器等传统方式为主,对电网运行灵活性、可靠性、安全性造成影响^[1-4]。限流式统一潮流控制器作为一种新型 FACTS 装置,在灵活控制线路电压、相角、阻抗实现系统潮流优化,增加输电容量的同时,可以对系统短路电流进行有效控制^[5]。在电力系统短路容量不断增大的趋势下,限流式 UPFC 的优异性能可以提高电网和装置的安全

性,为此受到电力界广泛关注。

江苏省 UPFC 的投运处于全国领先水平,南京西环网 UPFC 示范工程和苏州南部电网 UPFC 示范工程分别在 2015 年年底和 2017 年年底投运^[6-7]。针对实际已投运的江苏省含 UPFC 电网,文献[8]提出了模块化多电平 UPFC (MMC-UPFC) 单相接地故障后的保护策略,在 220 kV 南京西环网项目中进行了验证,但 MMC-UPFC 会影响距离保护性能。文献[9]针对苏州南部电网项目,将 UPFC 与串联电抗器相结合,设计了既能控制短路电流又能调节线路潮流的电抗器阻值,但当短路电流超标节点较多时,电抗器的优化布点难度大。在学术性研究方面,

文献[10-13]对10 kV电压等级下的限流式UPFC进行了研究,采用桥式限流器与UPFC协调配合的方法,基于常规限流式UPFC构建新型拓扑结构,取得了较好的效果,但是不适用于220 kV线路。

下面针对220 kV线路,提出了一种饱和型自耦串联变压器与RLC串联谐振支路相耦合的桥式限流UPFC。对其拓扑结构和限流过程进行详细分析说明,建立故障阶段数学模型,给出主要元件参数的设计方法。通过仿真验证所提方案的有效性和可行性。

1 限流式UPFC的电路拓扑

1.1 常规限流式UPFC拓扑结构

常规的限流式UPFC电路拓扑结构如图1所示,其中: u_s 、 u_r 为系统电源; L 为线路阻抗; i_d 、 i_L 分别为短路电流和稳态电流;并联变压器 T_{sh} 及串联变压器 T_{se} 分别将UPFC并联侧和串联侧与电网、限流器相连。串并联变换器经直流电容 C 背靠背连接,其交流侧滤波电感分别为 L_{sh} 和 L_{se} 。限流器模块中, T_1-T_6 组成晶闸管三相桥式整流电路, T_7-T_8 为续流晶闸管, L_d 、 R_d 为限流电感和电阻。

1.2 新型限流式UPFC拓扑结构

适用于高压大容量电力系统的新型限流器一般

串联在系统线路中,所提出的用于220 kV线路的限流式UPFC电路拓扑结构如图2所示。图2在图1的基础上进行了如下改进:用饱和型自耦变压器AT替代了常规串联变压器 T_{se} ,使得整个限流器设备的体积与成本减小,变压器容量被充分利用;在限流器模块中,将由反向二极管、限流电容 C_d 、电力电子开关 S 组成的RLC串联谐振电路作为新的限流电抗支路。

2 新型限流式UPFC的工作过程

限流器的基本原理是通过控制串联在线路中的等效阻抗实现正常低阻与故障高阻的功能^[14]。对新型限流式UPFC应提出更高的要求,需要实现故障时限流器灵敏可靠地限制短路电流,正常运行时仅作为常规UPFC,减小限流器对线路造成的影响。同时,在等效阻抗变化过程中对自身元器件和系统均不产生较大的负面影响。因此,要求新型限流式UPFC的限流器模块凭借自身工作原理快速检测故障电流、迅速切换等效阻抗,不借助因判断与出口动作具有延时而导致限流器难以应对短路电流第一周波峰值的继电保护装置或其他装置。

假设系统故障发生在 t_1 时刻,对限流式UPFC的工作过程分3个阶段进行分析,限流过程示意图见图3。

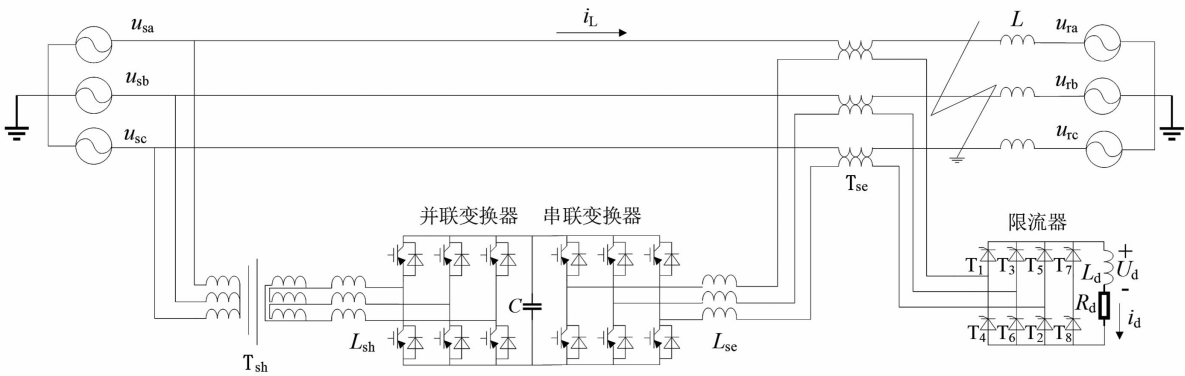


图1 常规限流式UPFC电路拓扑

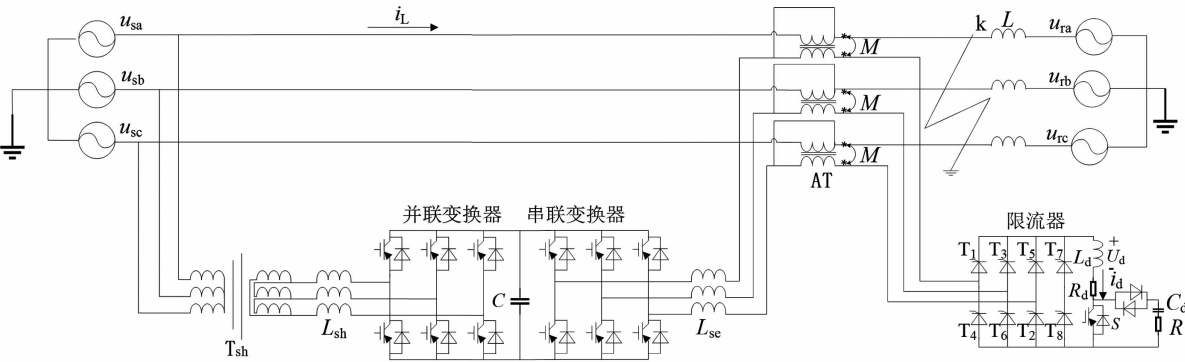


图2 新型限流式UPFC电路拓扑

2.1 正常运行工作阶段

系统在 t_1 之前正常运行。正常运行时图2中的饱和型自耦变压器 AT 等同于常规变压器,其公共绕组两端短接。限流器模块中, $T_1 - T_6$ 工作在 180° 模式, $T_7 - T_8$ 续流,开关 S 关断, RC 支路接入,形成 RLC 串联谐振电路,呈现零阻抗状态。短路电流 i_d 图3所示,保持不变。此时限流器模块整体体现零阻抗,等效为常规 UPFC,系统运行损耗较小,满足新型限流式 UPFC 的要求。

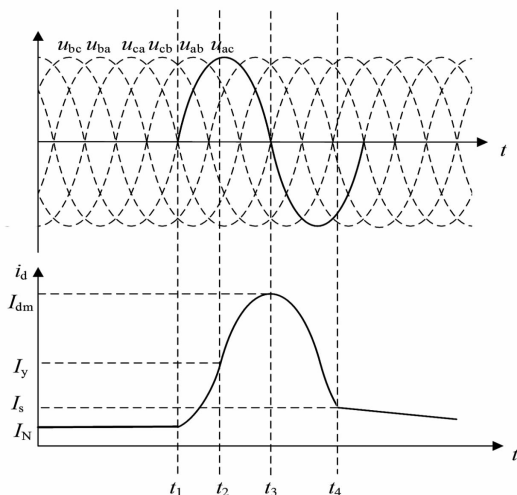


图3 限流过程

2.2 过渡限流阶段

$t = t_1$ (系统电压正过零点) 发生短路故障,如图3所示。 T_5 被迫关断, T_1 、 T_6 继续导通, T_7 、 T_8 承受反向电压关断,开关 S 导通, RC 支路短接。此时线路绝大部分电压经 AT 加于限流电抗 L_d ,即 L_d 自动串入回路,限制短路电流 i_d 的上升,有效抑制 i_d 第一周期峰值。过渡限流阶段的等效电路如图4所示。图中, L_1 、 L_2 分别为自耦变压器 AT 的一、二次绕组自感; M 为互感; u_{ac} 为 AT 副边的三相六脉电压; r 为系统内电阻和限流电阻等效值的和。

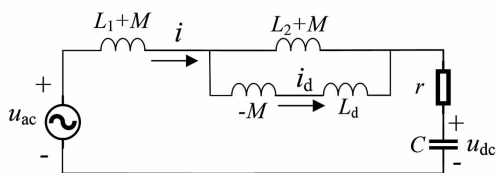


图4 过渡限流阶段等效电路

在过渡限流阶段,限流器的等效限流电感为

$$L_{q2} = L_1 + L_2 + L_d + 2M - \frac{(L_2 + M)^2}{L_2 + L_d} \quad (1)$$

根据式(1)可知,限流器的等效限流电感很大,可以实现对第一周期电流峰值的有效抑制。

直流侧电容 C 两端电压 u_{dc} 为

$$u_{dc} = \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_d dt \quad (2)$$

由式(2)可知,短路电流经串联自耦变压器 AT 向 C 充电,导致其两端电压迅速上升,易造成电容及换流器等设备的损坏。为此,检测到短路故障时,需对并联侧立即采取定电压控制,使功率倒送回系统,将电容电压稳定于 U_{dc} 。

i 和 i_d 满足式(3):

$$\begin{cases} u_{ac} - U_{dc} = ri + (L_1 + M) \cdot \frac{di}{dt} + (L_d - M) \cdot \frac{di_d}{dt} \\ (L_d - M) \cdot \frac{di_d}{dt} = (L_2 + M) \cdot \frac{d(i - i_d)}{dt} \\ i_d(t_1) = I_N \\ u_{ac} = \sqrt{2}U_{ac} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_N 为正常运行时线路电流幅值; U_{ac} 为 u_{ac} 的有效值。由于电压几乎全部通过 AT 加在 L_d 两端, U_{dc} 可忽略以简化计算,解得线路电流和短路电流分别为

$$i(t) = e^{-\frac{r(t-t_1)}{L_{q2}}} \left(i(t_1) + \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{z} \cos(\omega t_1) \right) - \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{z} \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$i_d(t) = \frac{(L_2 + M)(i - i(t_1))}{L_2 + L_d} + I_N \quad (5)$$

式中: L_{q2} 表达式为式(1); $z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ 。

由于故障时间极短,为简化公式,可将式(4)指数项视为1,同时忽略 r ,式(4)、式(5)可化简为

$$i(t) = i(t_1) + \frac{\sqrt{2}U_{ac}}{\omega L_{q2}} (1 - \cos \omega t) \quad (6)$$

$$i_d(t) = I_N + \frac{\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)\omega L_{q2}} (1 - \cos \omega t) \quad (7)$$

根据式(6)、式(7),在过渡限流阶段, i_d 迅速上升, $t = t_2$ 时, i_d 达到阈值 I_y ,控制系统判定电路发生短路故障,封锁 $T_1 - T_8$ 的触发脉冲,此时仅 T_1 、 T_6 仍处于封锁前的导通状态(晶闸管半控特性)。 i 和 i_d 一直增大到 t_3 时刻达到峰值 I_m 、 I_{dm} 。

$$I_m = i(t_1) + \frac{2\sqrt{2}U_{ac}}{\omega L_{q2}} \quad (8)$$

$$I_{dm} = I_N + \frac{2\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)\omega L_{q2}} \quad (9)$$

对式(7)进行求导,得到

$$\frac{di_d(t)}{dt} = \frac{\sqrt{2}U_{ac}(L_2 + M)}{(L_2 + L_d)L_{q2}} \sin \omega t \quad (10)$$

由式(10)可得,在 $t > t_1$ (系统电压正过零点),

即故障发生后的一段时间内,式(10)大于 0。说明限流电抗在故障发生后无需故障判断延时,立即串入电路对短路电流第一周波上升率进行限制,等效限流电感值 L_{q2} 越大,短路电流上升速度越慢。

2.3 完全限流阶段

控制系统检测到 i_d 到达峰值后,延迟 $120 \sim 150^\circ$,即在 $t = t_4$ 时刻,开始进入完全限流阶段,再次触发导通续流管 $T_7 - T_8$,整流桥退出运行。 i_d 通过 $T_7 - T_8$ 续流,此时 AT 公共绕组两端开路,AT 相当于“带铁心的电抗器”,其公共绕组和串联绕组串联接入电路。由 AT 的等效电抗实现稳态限流, i_d 逐渐衰减到 0。等效电路如图 5 所示(忽略系统内电阻和内电感)。

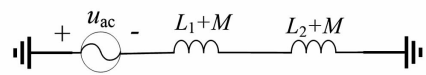


图 5 完全限流阶段等效电路

此时的串联等效电感为

$$L_{q3} = L_1 + L_2 + 2M \tag{11}$$

由式(11)可知,完全限流阶段,AT 的一、二次绕组串联限流,而常规的非自耦串联变压器结构的限流电路只有变压器一次绕组参与限流,其等效电感约为 L_1 。将常规串联变压器用饱和型自耦变压器替代后增强了其限流能力,使 L_1 、 L_2 及 M 的设计参数值显著减小,节省了绕组导体和铁心材料。

3 新型限流式 UPFC 的关键参数设计

3.1 限流电感参数设计

为了使限流电感体积尽量减小,以满足限流电感能量最优为目的来进行限流电感参数的设计。短路故障发生后,限流电感 L_d 储能为

$$E = \frac{1}{2} L_d i_d^2 \tag{12}$$

将式(9)中最大短路电流代入式(12):

$$E = \frac{1}{2} L_d \left(I_N + \frac{2 \sqrt{2} U_{ac} (L_2 + M)}{(L_2 + L_d) \omega L_{q2}} \right)^2 \tag{13}$$

要使能量最优,求 E 的极值点,得到此时 L_d 满足的方程:

$$\frac{(L_2 + L_d) L_{q2}}{L_2 + M} = \frac{2 \sqrt{2} U_{ac}}{\omega I_N} \tag{14}$$

式中:饱和型自耦变压器 AT 的参数为 L_1 、 L_2 ; M 短路故障后的值可由有限元分析得到^[15]; L_{q2} 的值可由式(1)得到。

3.2 限流电容参数设计

系统正常运行时,限流器部分组成 RLC 串联谐振电路, L_d 和 C_d 的串联等效电阻为 0,则有

$$C_d = \frac{1}{\omega^2 L_d} \tag{15}$$

L_d 对限流器限流水平起重要作用,一定的稳态短路电流幅值要求下,更高的电压等级需要越大的 L_d ,从式(15)可以看出 L_d 和 C_d 成反比,则需要的电容 C_d 就相应越小,在实际高电压等级系统中更易于配置。说明 RLC 串联谐振电路作为限流电抗支路较适合所提的 220 kV 高压系统。

3.3 直流电容参数设计

直流电容参与限流过程,因此设计的电容值不仅需要达到维持 UPFC 两侧功率平衡和电容电压稳定的目标,还要确保装置安全性及限流效果。

短路故障的发生使得短路电流快速为直流电容充电,导致直流电容电压急剧上升。在检测到短路故障后对并联侧立即采取了定电压控制,电容电压被稳定于 U_{dc} 。为此,需要将直流电容稳定前的最大充电电压值 U_{dcm} 限制在 IGBT 耐压值以下,保证 UPFC 串并联换流器的安全。设在 t_m 时刻直流电容电压达到 U_{dcm} ,则

$$U_{dcm} = U_{dc0} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_m} i dt \tag{16}$$

i 的表达式为式(6),由式(16)可以计算出直流电容的合理取值 C 。

4 算例分析

在 Matlab/Simulink 中对 220 kV/1.5 kA (额定电压 220 kV,额定电流 1.5 kA) 系统进行限流式 UPFC 在正常运行和短路限流情况下的仿真分析。主要仿真参数如表 1 所示。

4.1 正常运行

正常运行时,限流式 UPFC 等效为常规 UPFC,对线路的潮流分布进行控制。在某节点处当线路的有功和无功指令分别发生阶跃变化时,仿真结果如图 6 所示。

表 1 主要仿真参数	
主要仿真参数	数值
系统线电压/kV	220
线路额定电流 I_N /kA	1.5
限流电容 C_d /mF	1.6
限流电感 L_d /mH	10
直流电容 C_d /mF	3.6
AT 变比	3:1
AT 一次侧电感 L_1 /mH	17.3
AT 二次侧电感 L_2 /mH	3.6
AT 一二次侧互感 M /mH	7.22

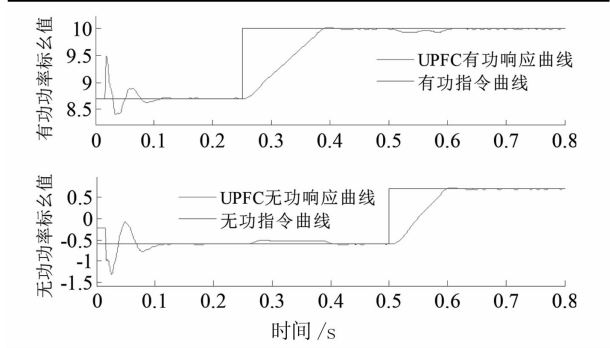


图 6 线路潮流调节曲线

从图 6 可以看出,初始时刻有功、无功标么值分别为 8.7 和 -0.6,系统在启动后的 0.1 s 内有功功率和无功功率存在轻微振荡,之后保持稳定,对系统影响很小。在 0.25 s 时有功控制指令阶跃到 10,UPFC 可以使有功功率快速准确跟踪指令变化,且无功功率基本没有波动。在 0.5 s 时无功控制指令阶跃到 0.7,UPFC 可以使无功功率快速准确跟踪指令变化,且有功功率基本没有波动。说明正常运行时,限流式 UPFC 可以实现等效为常规 UPFC,控制线路的潮流分布。

4.2 短路限流仿真

在 0.2 s 时系统发生三相短路,安装常规 UPFC、安装限流式 UPFC、安装所提的新型限流式 UPFC 的系统短路波形分别如图 7 至图 9 所示。

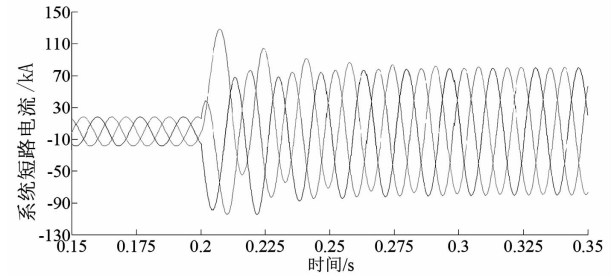


图 7 常规 UPFC 三相短路电流

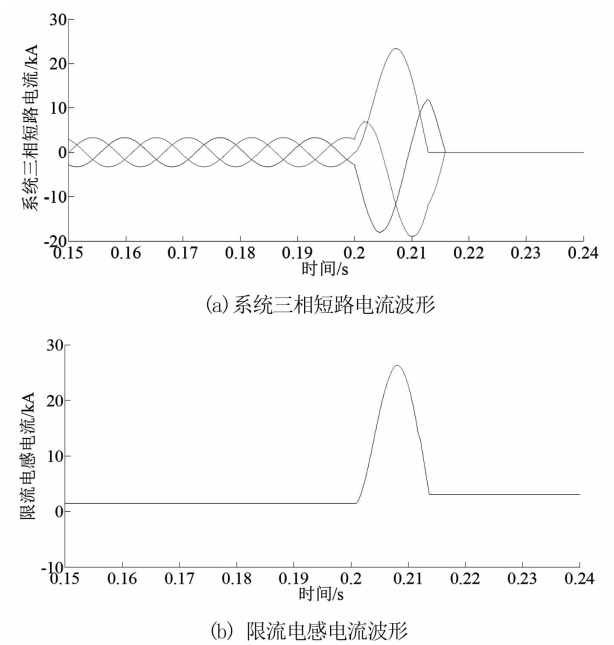


图 8 常规限流式 UPFC 短路波形

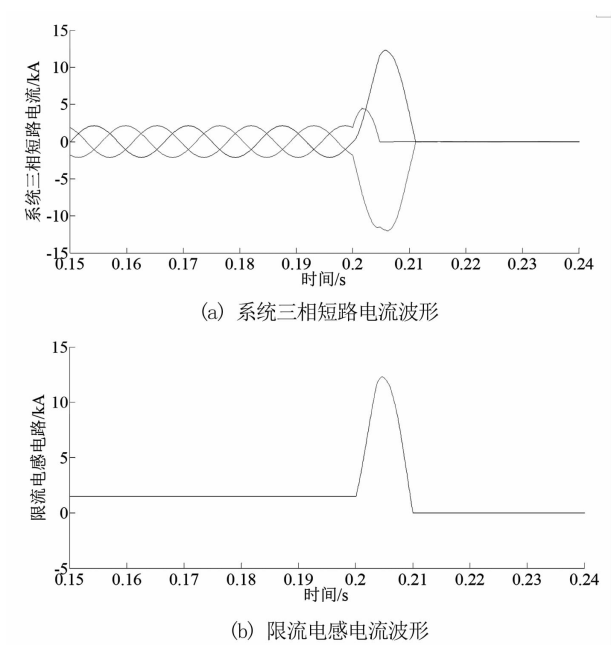


图 9 新型限流式 UPFC 短路波形

从图 7 可知,常规 UPFC 在短路故障中三相短路电流最大峰值超过了 110 kA,将对系统稳定运行和 UPFC 装置的正常工作造成严重影响。从图 8 可以看出,采用限流式 UPFC 后,短路故障时的电流峰值降低到了 30 kA 以下,故障后约 14 ms 整流桥退出运行,相比于常规 UPFC 性能得到了很大提升,但是短路电流衰减速度较慢,衰减为 0 耗时长。从图 9 可以看出,采用所提出的限流式 UPFC 后,短路故障时的电流峰值被限制到 15 kA 以下,从短路故障发生到短路电流衰减为 0 用时 10 ms 左右。表 2 为 3

(下转第 84 页)

冲击电容器直流叠加操作冲击回路仿真分析

张晨萌¹, 陈芒芒², 王鑫³, 孙鹏宇²

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
- 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
- 3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:直流输电线路中性线上运行的冲击电容器,同时承受直流电压及站内外故障操作冲击电压的影响。基于pscad电磁暂态仿真软件对冲击电容器直流叠加操作冲击电压老化试验回路进行了仿真,分析了该试验回路中直流电压对冲击电压发生器输出波形的影响,以及连接操作冲击电压侧与直流电压侧的耦合电容对试品电压波形的影响。分析认为,直流电压对冲击电压发生器输出波形影响极小,耦合电容取值对试品电压波形影响也极小。仿真结果表明,冲击电容器直流与冲击叠加老化试验具有可行性。

关键词:冲击电容器;直流电压;操作冲击电压;耦合电容

中图分类号:TM89 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0033-05

Analysis on Loop Simulation of DC Voltage Superimposed with Switching Impulse Voltage for Surge Capacitors

Zhang Chenmeng¹, Chen Mangmang², Wang Xin³, Sun Pengyu³

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
- 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:The surge capacitor running on the neutral line of DC transmission line is affected by DC voltage and switching impulse voltage of the faults inside and outside the station. Based on pscad electromagnetic transient simulation software, the aging test loop of DC voltage superimposed with switching impulse voltage in surge capacitor is simulated. The influence of DC voltage on the output voltage waveform of impulse voltage generator is analyzed as well as the influence of coupling capacitor connected switching impulse voltage side with DC voltage side on the sample voltage waveform. According to the analysis, DC voltage has little influence on the output voltage waveform of impulse voltage generator, and the value of coupling capacitor also has little influence on the sample voltage waveform. The simulation results show that the aging test of DC voltage superimposed with switching impulse voltage is feasible.

Key words:surge capacitor; DC voltage; switching impulse voltage; coupling capacitor

0 引言

由于中国一次能源中心与负荷中心在地域上跨度很大,为合理优化国家能源配置,充分发挥西南地区水力资源的作用,国家电网公司近年加快了特高压直流输电工程的建设^[1-3]。中性母线冲击电容器作为直流回路和滤波回路发生故障时的电流通回路,

是换流站中性母线保护的重要组成部分。近年来,由冲击电容器故障引发的换流站事故时有发生:2011年7月30日龙政直流中性母线曾发生极中性母线电容器击穿事件^[4],宜都站、政平站已经进行了中性线电容更换;2014年5月25日,三广直流工程鹅城站极线故障,极I中性线电容器破裂损毁。冲击电容器运行条件特殊,目前对冲击电容器的绝缘老化机理、绝缘状态评估方法等在国内外尚

缺乏深入研究。为研究换流站中性母线侧运行的冲击电容器在实际环境中的绝缘老化情况,需要同时考虑正常运行状态下电容器承受的直流电压和故障时侵入电容器的冲击过电压。考虑与电容器并联的避雷器对雷击过电压的限制作用,下面仅模拟对电容器同时施加直流电压和操作冲击电压的情况。

1 试验回路

试验电路如图 1 所示,包含:冲击电压发生器,400 kV/40 kJ,共 8 级,单极额定电压 50 kV,单极电容 3.99 μF ,保护电阻 48 k Ω ,波前电阻及放电电阻阻值见 3.2 节;冲击电压发生器的对地杂散电容和高压引线及球隙等的电容, C_{g1} 、 C_{g2} ,取 500 pF; C_{m1} 、 C_{m2} 组成电容分压器,采用 MWF400 – 1200 型脉冲电容器,额定冲击电压 400 kV,电容值 1188 pF;耦合电容 C_c ,50 μF ;冲击电容器试品 C_s ,额定电压 12 kV,电容值 0.6 μF ;保护电阻 R_0 ,3 k Ω ,整流硅堆 STACK;交流 220 V 电压源;隔离变压器 T_1 ;调压变压器 T_2 ;升压变压器 T_3 。

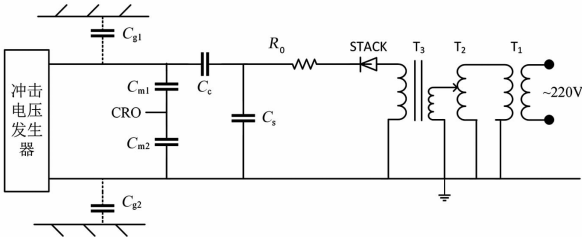


图 1 电容器叠加电压老化试验回路

- 试验回路工作原理如下:
- 1) 交流电源由图 1 中右侧输入电压,通过整流硅堆使冲击电容器试品 C_s 两端加直流电压。
 - 2) 操作冲击电压由图 1 中左侧冲击电压发生器产生,通过耦合电容 C_c 输出至电容器试品 C_s 两端。 C_{m1} 、 C_{m2} 组成电容分压器用于测量冲击电压发生器输出端电压。
 - 3) 直流电压产生部分与操作冲击电压产生部分由耦合电容 C_c 进行连接。耦合电容既可以避免直流电压侵入冲击电压发生器,同时能够保证操作冲击电压无畸变地通过耦合电容加到冲击电容器试品两端。

2 试验电压

2.1 操作冲击电压

以某 ± 500 kV 直流输电工程首端换流站中性母线

冲击电容器组为对象,电容器组型式及参数见表 1。
 ± 500 kV 换流站中性线电容器故障电压最大波峰值、波谷值见表 2,将明显幅值偏大的数据置于前端。从表 2 可见仅约 15% 的故障电压的最大波峰值及最大波谷值远超过平均值。排除 15% 故障电压偏大值,中性母线故障电压最大波峰平均值为 1.333 kV,中性母线故障电压最大波谷平均值为 -2.269 kV,均远小于电容器单元的额定电压 13.5 kV,经过换算,分别约占电容器单元额定电压的 0.985% 和 1.68%。

表 1 ± 500 kV 换流站中性线电容器

型式及参数	参数值
电容器组型式	2 并 10 串再 2 并
电容器单元额定电压/kV	13.5
电容器单元电容/ μF	40
电容器单元电容额定电流/A	63
操作冲击耐受能力/kV	351
操作冲击下避雷器最大残压 /(kV/kA)	322/1

表 2 ± 500 kV 换流站中性线电容器故障电压

最大波峰/kV	最大波谷/kV
15.172	-15.767
49.731	-63.807
19.541	-22.893
1.653	-4.033
2.807	-4.084
1.455	-3.143
0.946	-1.719
1.129	-1.796
0.977	-1.643
1.638	-2.019
1.75	-2.289
1.343	-2.472
1.139	-1.958
1.17	-1.821
1.038	-1.846
1.129	-1.984
1.149	-2.014
1.144	-2.004
1.165	-1.907
1.038	-1.841

对于研究对象 12 kV、0.6 μF 电容器,取保守偏大值 2% U_n 时,则冲击电压峰值仅为 0.24 kV。GB/T 20993-2012《高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器》中定义了中性母线冲击电容器组额定电压与电容器组的操作冲击耐受水平(峰值)的关系为^[5]。

$$U_n = \frac{U_{SWL}}{2.6} \tag{1}$$

但该标准中仅对端子与外壳间雷电冲击电压试验(型式试验)进行了说明,并未对操作冲击电压试验提供指导意见。

在约占 15% 比例的中性母线故障电压偏大值中,最严重时中性母线故障电压最大波峰值为 49.731 kV,最大波谷值为 -63.807 kV,分别约为电容器单元额定电压的 36.84% 和 47.26%,并且最大波谷值比最大波峰值更大。JB/T 8168-1999《脉冲电容器及直流电容器》中对用于冲击电压的直流电容器的耐久性能的定义为,在额定电压下,按规定的波形或电路参数充放电次数达到 10 000 次^[6]。

综合考虑试验的时间成本及实际故障电压峰值、极性影响,冲击电容器直流电压叠加操作冲击电压老化试验的冲击电压峰值定为 -1.2 U_n 、-1.5 U_n 、-1.8 U_n 、-2.2 U_n 、-2.6 U_n ,即 -14.4 kV、-18 kV、-21.6 kV、-26.4 kV、-31.2 kV。

2.2 直流电压

同样以 2.1 节中的 ±500 kV 直流输电工程首端换流站中性母线冲击电容器组为对象,中性母线直流电压 $U_0 = I_0 R_0$,其中: I_0 为单极大地回线运行时接地极注入电流; R_0 为直流接地极线路电阻与接地极接地电阻之和。该站接地极线路参数如表 3,±500 kV 换流站接地极接地电阻一般小于 0.1 Ω,此处计算取 0.08 Ω,其误差相对于接地极线路电阻值很小。

表 3 ±500 kV 首端换流站接地极线路参数

名称	参数
线路长度/km	25.3
导线型号	4×LGJ-630/55
额定电流/A	3000
最大过负荷电流/A	3300(持续 2 h)

所以 R_0 为 0.162 225 Ω, I_0 取 3 kA^[7]时,得中性母线直流电压为 0.486 675 kV,考虑一定的裕度取 1 kV。

3 试验回路仿真

3.1 电容器叠加电压老化电路

冲击电容器直流电压叠加冲击电压老化试验回路经过简化,得到电路原理图如图 2 所示。

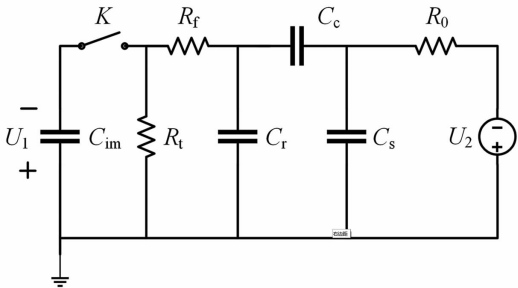


图 2 电容器叠加电压老化电路

图中: C_{im} 为充电电容,取冲击电压发生器 1 级电容,电容值为 3.99 μF; R_f 为波前电阻,Ω; R_t 为放电电阻,Ω; C_r 为不计入试品电容的负荷电容,1688 pF; C_c 为耦合电容,50 μF; C_s 为电容器试品,0.6 μF; R_0 为保护电阻,3 kΩ。

3.2 波前电阻及放电电阻

先不考虑直流电压侧影响,假定冲击发生器简化回路为高效率回路(忽略内部阻尼电阻),不考虑回路电感影响,采用简化回路的非近似计算方法,如式(2)。

$$\begin{cases} T_0 = -\left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right) \\ R_f = \frac{1}{2C_{r1}}\left(T_0 - \sqrt{T_0^2 - \frac{4(C_{im} + C_{r1})}{(s_1 s_2 C_{im})}}\right) \\ R_t = \frac{1}{2(C_{im} + C_{r1})}\left(T_0 + \sqrt{T_0^2 - \frac{4(C_{im} + C_{r1})}{(s_1 s_2 C_{im})}}\right) \end{cases} \tag{2}$$

而总负荷电容 C_{r1} 由式(3)得到。

$$C_{r1} = C_r + C_c C_s / (C_c + C_s) \tag{3}$$

对 0.6 μF 的冲击电容器试品 C_s 而言,串联一个电容值约为其 10 倍的耦合电容 C_c ,其电容值由 0.6 μF 变为 0.593 μF,变化率仅约 1%,对总负荷电容大小的影响很小。而不计入试品电容的负荷电容 C_r 为 1688 pF,仅为冲击电容器试品 C_s 的 0.28%。综合以上分析,忽略不计入试品电容的负荷电容和耦合电容,得到 $T_0 = 3\,217.472$ s,波前电阻 $R_f = 120.157\,1$ Ω,放电电阻 $R_t = 683.777\,8$ Ω。

为研究直流电压对冲击电压发生器输出波形的影响以及连接操作冲击电压侧与直流电压侧的耦合电容对试品电压波形的影响,基于电磁暂态仿真软件 pscad,使用常用器件搭建了使用时控开关控制的电容器直流叠加操作冲击电压的仿真模型,如图3所示。时控开关 BRK 和 BRK1 的断开电阻为 $1\text{ G}\Omega$,闭合电阻为 $0\text{ }\Omega$ 。仿真时长为 1.6 s ,仿真步长 $1\text{ }\mu\text{s}$,以 $U_1 = -2.6U_n = -31.2\text{ kV}$ 交流电源降低至波谷的时刻 1.425 s 为动作时刻,在 1.425 s 前开关 BRK1 闭合,开关 BRK 打开,在 1.425 s 时刻打开开关 BRK1,闭合开关 BRK,得到冲击电压发生器输出端电压波形,这同时也是电容器试品承受的电压波形(见图4)。为便于观察,冲击电压发生器输出波形及试品两端电压波形均为反极性波形。

图4的无耦合电容冲击电压发生器输出电压波形为 $419\text{ }\mu\text{s}/3909\text{ }\mu\text{s}$,峰值为 30.925 kV 。IEC 60060-1:1989 及国家标准 GB/T 16927.1-2011 规定的标准操作冲击电压的波前时间 T_f 为 $250\pm 20\%\text{ }\mu\text{s}$,即 $200\sim 300\text{ }\mu\text{s}$,半峰值时间 T_1 为 $2500\pm 60\%\text{ }\mu\text{s}$,即 $1000\sim 4000\text{ }\mu\text{s}$ 。此时操作冲击电压波头时间超过了规定范围。

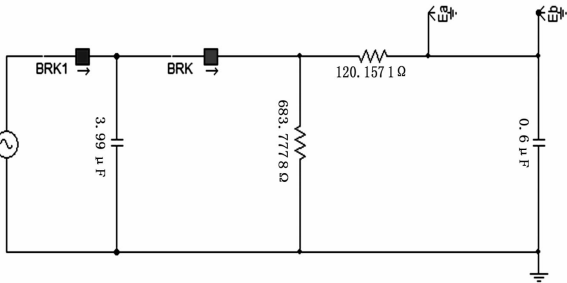


图3 无耦合电容叠加电压老化电路

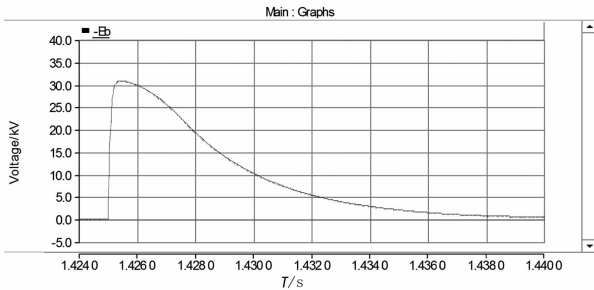


图4 无耦合电容冲击电压发生器输出电压波形

修正电路将波前电阻 R_f 降低至 $70\text{ }\Omega$ 后,得到操作冲击电压波形为 $280\text{ }\mu\text{s}/3645\text{ }\mu\text{s}$,峰值为 31.08 kV 。

3.3 直流电源

在老化试验电路中考考虑直流电源及保护电阻 $3\text{ k}\Omega$ 后,调整直流电源电压至 5 kV ,冲击前电容器试品两端直流电压约 1 kV 。操作冲击电压波形 $276\text{ }\mu\text{s}/3542\text{ }\mu\text{s}$,

幅值 30.49 kV ,如图5所示。可见,直流电源对混合冲击电压波形影响极小,但在无耦合电容连接冲击电压发生侧和直流电压侧时,需要大幅提高直流侧电压至 5 kV 来使电容器试品两端直流电压达到试验要求。

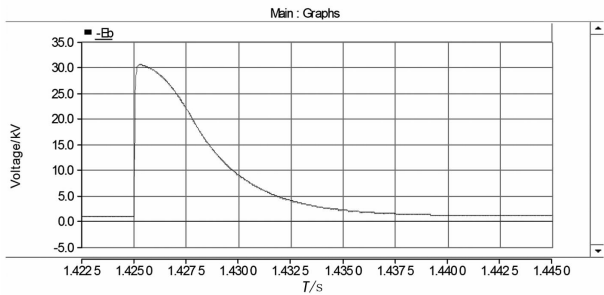


图5 无耦合电容修正电路电容器试品叠加冲击电压波形

3.4 耦合电容

耦合电容 C_c 电容值为 $50\text{ }\mu\text{F}$ 。仿真时长调整为 2.6 s ,时控开关动作时间调整为 2.425 s ,直流电源电压调整为 1 kV ,此时冲击电压发生器输出端电压波形如图6,冲击波形为 $274\text{ }\mu\text{s}/3477\text{ }\mu\text{s}$,峰值 30.4 kV ,而冲击发生前电压基本为0,与无耦合电容下冲击电压波形及幅值基本一致。因此,可以认为直流电源对冲击电压发生器的冲击电压并无影响。电容器试品上的叠加冲击波形为 $263\text{ }\mu\text{s}/3467\text{ }\mu\text{s}$,峰值 31 kV ,如图7所示。可见带耦合电容后,电容器试品端电压峰值由 30.49 kV 增大至 31 kV ,变化幅度约 1.67% 。

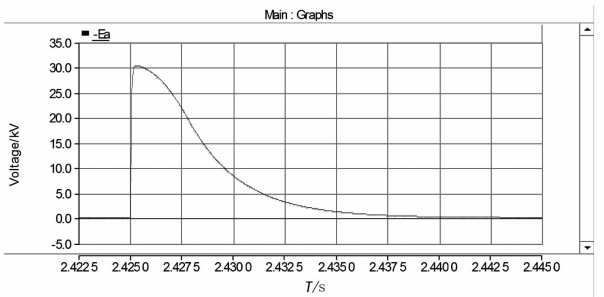


图6 有耦合电容修正电路冲击电压发生器输出电压波形

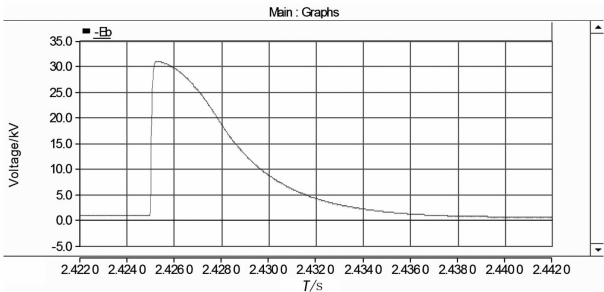


图7 有耦合电容修正电路电容器试品电压波形

4 结 论

- 1)在无耦合电容的条件下,直流电源电压需大幅提高才能达到电容器试品未冲击前直流电压的试验要求。
- 2)在有耦合电容的条件下,耦合电容能有效限制直流侧电压对冲击电压发生器未动作时的影响。
- 3)本试验条件下,有、无耦合电容对试品叠加电压波形的影响很小,耦合电容对冲击电压发生器效率的影响可以忽略。

参考文献

[1] 孙昕,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报,2009, 29(22):35-45.

[2] 舒印彪, 刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 6400 MW 特高压

直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006,30(1):1-8.

[3] 舒印彪,刘泽洪,袁骏,等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术,2006,30(5):1-12.

[4] 雷霄,王明新,王华伟,等. 龙政直流闭锁事件分析及降压再启动直流电压偏高抑制[J]. 电力系统自动化, 2013,37(8):129-133.

[5] 高压直流输电系统用直流滤波器电容器及中性母线冲击电容器:GB/T 20993-2012[S],2012.

[6] 脉冲电容器及直流电容器:JB/T 8618-1995[S], 1995.

[7] 叶杰宏. 直流单极运行对 500 kV 交流变压器的影响[J]. 电气时代, 2011, 47(3):84-86.

[8] 高电压试验技术第 1 部分:一般定义及试验要求:GB/T 16927.1-2011[S],2011.

作者简介:

张晨萌(1988),博士,主要从事电力系统过电压、电容器绝缘介质方面研究。(收稿日期:2019-06-04)

(上接第 23 页)

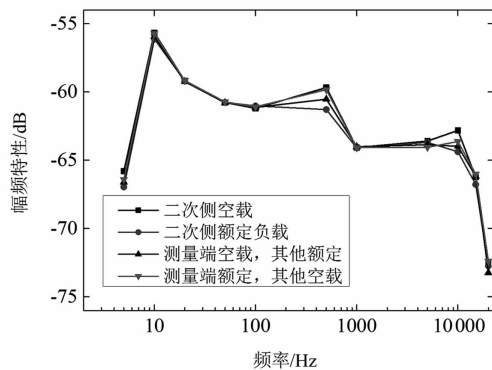


图7 存在内置低压电容时 CVT 幅频特性

3 结 语

对基于 CVT 的过电压在线监测装置在不同负载情况下的频率特性进行了研究,所得结论如下:

- 1)当 CVT 二次侧接额定负载或空载状态时,测量得到的频率特性整体呈相似状态,仅在部分频率处存在较小的差别;
- 2)当 CVT 二次侧负载较重时,测量得到的频率特性与额定负载情况下具有较明显的差别,且高频下衰减更为严重;
- 3)额定负载和空载情况对内置低压电容高压侧频率特性影响较小,且内置低压电容的存在也几乎不对 CVT 不同负载情况下的频率特性产生影响。

参考文献

[1] 张重远,李文博,陈涛. 基于 TV 宽频特性的过电压在线监测算法[J]. 高电压技术,2014,40(3):801-807.

[2] 郑必成,傅煜. 500 kV GIS 开关站快速暂态过电压计算及对主变的影响[J]. 高压电器,2012,48(12):135-138.

[3] Jayaram S, Xu X Y, Cross J D. High Divider Ratio Fast Response Capacitive Dividers for High-voltage Pulse Measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,36(3):920-922.

[4] 周凯,何珉,熊庆,等. 基于两级分压器的 6~35 kV 系统过电压在线监测装置[J]. 高电压技术,2015,41(11):3583-3589.

[5] 兰海涛,司马文霞,姚陈果,等. 高压电网过电压在线监测数据采集方法研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):79-82.

[6] 罗易桥,毛宇翔,甘黎. 变电站雷电侵入波过电压测量技术综述[J]. 电工文摘,2017(6):11-14.

[7] 傅晨钊,刘兆林,杨凌辉,等. 基于 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 的暂态过电压在线监测[J]. 高压电器, 2015,51(9):77-84.

[8] 司文荣,贺林,金珩,等. 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 测量过电压波形的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2013,32(2):81-86.

[9] 李文博. 基于 CVT 宽频线性模型的过电压在线监测方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.

作者简介:

张 榆(1986),硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电网电磁暂态过程监测、分析及仿真。(收稿日期:2019-06-04)

极化去极化电流法极化参量 对电力电容器绝缘状态的影响

王鑫¹, 张晨萌², 刘渝根¹, 谭思文³, 孙鹏宇¹
(1. 输配电装备系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;
3. 国网德阳供电公司 四川 德阳 618000)

摘要:电力电容器用途广泛,是电力系统中重要的一次设备。针对目前电力电容器绝缘状态检测欠缺成熟高效的手段,提出一种基于极化去极化电流法来检测电力电容器的绝缘状态,并分析极化去极化电流法中极化电压和极化时间对绝缘状态判断的影响。首先阐述了极化去极化电流法的基本原理,其次利用测试的极化去极化电流推导出决定电容器绝缘状态的两个特征参量,即直流电导率和0.1 Hz介损;再基于该方法理论,研究出在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器极化、去极化电流都有不同程度的差异,但其绝缘状态参量直流电导率和0.1 Hz介损却没有发生显著的变化。通过研究说明利用极化去极化电流法能够无损检测电力电容器的绝缘状态。

关键词:电力电容器;极化去极化电流;直流电导率;0.1 Hz介损

中图分类号:TM854 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0038-05

Effect of Polarization Parameters of Polarization – Depolarization Current Method on Insulation State of Power Capacitors

Wang Xin¹, Zhang Chenmeng², Liu Yugen¹, Tan Siwen³, Sun Pengyu¹
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:Power capacitors are widely used in power system and are the important primary equipment in power system. At present, there is a lack of mature and efficient means to detect the insulation state of power capacitors. So a method based on polarization – depolarization current is proposed to detect the insulation state of power capacitors. The influence of polarization voltage and polarization time in polarization – depolarization current method on the judgment of insulation state is analyzed. The basic principle of polarization – depolarization current method is described, and then two characteristic parameters are deduced, namely DC conductivity and dielectric loss at 0.1 Hz, which determine the insulation state of capacitors by using the measured polarization – depolarization current. Based on the theory of this method, the polarization and depolarization current curves of power capacitors under different polarization voltage and different depolarization time are studied. The test results show that the polarization and depolarization currents of power capacitors vary under different polarization voltage and time, but DC conductivity and dielectric loss at 0.1 Hz do not change significantly. It shows that the polarization – depolarization current method can detect the insulation state of power capacitors nondestructively.

Key words:power capacitor; polarization – depolarization current; DC conductivity; dielectric loss at 0.1 Hz

0 引言

电力电容器在电力系统中用途广泛等,扮演着滤波、载波和高频保护等多种角色^[1-4]电力电容器长期

处于温度高、场强高的状态,受到谐波电流、过电压、过负载等因素影响,内部绝缘状态会出现一定程度的劣化,使电网正常运行受到威胁^[5-8]。所以,找到成熟高效的电力电容器绝缘检测手段显得十分必要。

电容值作为电力电容器主要的电气参数,在一定程度上可以反映电力电容器的绝缘状态。电容值的减小,可判断是内部元件有断虚焊、松脱造成;电容值的增大,可判断是由于电力电容器内部某些串、并联单元被击穿所引起的。国家标准规定,电力电容器实测电容与其额定电容相差应保持在一定范围内(一般为 $-5\% \sim +5\%$, 不同类型电容器偏差范围要求不同)^[9]。如今,主要通过化学方法^[10]、电方法^[11]对其进行绝缘判断,其中包含电容器极间绝缘检测、油中气体组分分析、微水浓度分析、局部放电参量检测等一系列手段。就化学方法而言,油中溶解气体分析法已广泛使用,但由于实验材料取样困难,不易现场检测。局部放电检测法能够实现电容器内部集中性缺陷的定量检测,但由于电容器电容值较大,限制了局部放电检测的灵敏度,且现场测试存在干扰,限制了电容器局部放电检测技术的广泛应用。

近些年来,基于时域介电响应的极化去极化电流法(polarization – depolarization current, PDC)作为一种新型的电力设备绝缘状态评估方法开始受到各国学者的重视^[12-13]。该方法利用测试所得的极化去极化电流推导出决定电气设备绝缘状态的参量,可以有效对其老化程度进行判断。同时极化去极化电流法是一种快速、高效、不具有破坏性的电气测量方法。文献[14]利用 PDC 法对交联聚乙烯电缆进行了没有损耗的检测,研究结果证实了极化去极化电流检测方法能够有效反映 XLPE 电缆的绝缘特性。文献[15]利用极化去极化电流法提出了用极化电导率来衡量油纸绝缘的老化情况,在不同温度下,其利用 PDC 法测试所得的极化去极化电流,推导出了油纸绝缘的极化电导率。文献[16]通过 PDC 法分析了油纸绝缘中水分含量与其 PDC 中的参数联系。上述研究表明,利用极化去极化电流法可以有效反映试品的绝缘状态。但目前极化去极化电流测试法多在实验室针对绝缘介质进行测试,利用该方法对现场电气设备的测试,特别是对电力电容器的测试尚缺乏研究。

下面,首先分析了极化去极化电流法的测试原理,其次利用测试的极化去极化电流推导出决定电容器绝缘状态的两个特征参量,即直流电导率和 0.1 Hz 介损;再基于该方法理论,研究了在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器的绝缘状态两个

特征参量的差异;提出了利用极化去极化电流来检测电力电容器绝缘状态,并分析极化参量对检测结果的影响。

1 极化去极化电流法原理和测试方法

1.1 极化去极化电流法原理

外加电场 $E(t)$ 作用在电力电容器上,则此时电力电容器介质材料内部的全电流为

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} U(t) + \varepsilon_\infty \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) U(\tau) d\tau \right] \tag{1}$$

式中: $i(t)$ 为极化全电流; C_0 为电介质试验样品的几何电容; σ_0 为电介质的直流电导率; ε_0 为真空介电常数; ε_∞ 为光频介电常数; $f(t)$ 为电介质极化响应函数,其随着时间连续衰减,衰减的速度和电介质的组成、构成以及外界因素有关。

通过式(1)可知,当电力电容器两端通电,其电介质进入极化过程,此时极化电流为

$$i_p(t) = C_0 U(t) \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \tag{2}$$

当进入去极化过程,即电力电容器两端短接,此时回路电流是去极化电流。

$$i_d(t) = -C_0 U[f(t + t_d) - f(t)] \tag{3}$$

式中, t_d 表示极化时间。

利用设备测试所得 PDC 电流推导出表征电力电容器绝缘参量之一的直流电导率。

$$\sigma_0 = \frac{\varepsilon_0}{C_0 U(t)} (i_p(t) - i_d(t)) \tag{4}$$

式中, σ_0 即为电力电容器绝缘状态评估的其中一个特征参量。

其次,通过傅立叶变换得到频域中的全电流表达式,为

$$I(\omega) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} U(\omega) + j\omega \varepsilon_\infty U(\omega) + j\omega F(\omega) U(\omega) \right] \tag{5}$$

式中, $F(\omega)$ 是将电力电容器内部电介质响应函数 $f(t)$ 利用傅立叶变换表示的复数形式。

$$F(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \tag{6}$$

将式(6)代入式(5),全电流的频域表达式可改写为

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left[\varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right) \right] U(\omega) \tag{7}$$

则可以得到介质损耗角正切值为

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{\sigma_0/\varepsilon_0\omega + \chi''(\omega)}{1 + \chi'(\omega)} \quad (8)$$

式中: t 为极化时间; ε''_r 相对介电常数虚部; ε'_r 为相对介电常数实部; $\chi''(\omega)$ 为去极化电流傅立叶变换的虚部,表示极化过程中的损耗; $\chi'(\omega)$ 为去极化电流傅立叶变换的实部,表示极化强度。因此,如果能够测得电力电容器的极化去极化电流,即可根据式(4)、式(8)计算出电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 低频介损。

1.2 极化去极化电流测试方法

图 1 为电力电容器极化去极化电流波形。

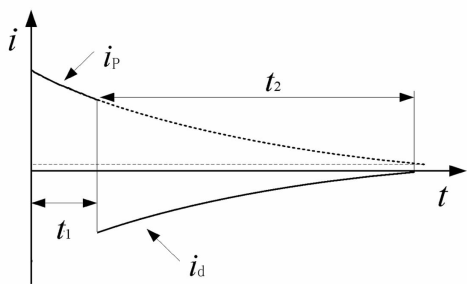


图 1 极化去极化电流曲线

实验基于极化去极化电流法测试平台,该测试平台的原理如图 2 所示。

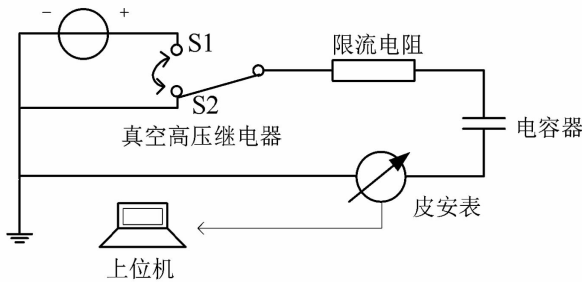


图 2 测试平台

试验中将开关打向 S1,此时整个回路进入极化阶段,利用直流电源为电力电容器提供极化电压,其内部电介质开始极化,并通过回路中的皮安表记录极化电流值。极化时间人为设定,极化阶段结束后,开关自动从 S1 打向 S2,此时回路中无直流电源,充电完成的电力电容器会对回路进行放电,进入去极化阶段,同样采用皮安表记录此时的去极化电流。

2 基于极化去极化电流法的电容器绝缘状态测试

2.1 试验试品

测试电容器为全膜型电力电容器,内部采用 3 个芯子并联后两组串联形式。双面粗化聚丙烯薄膜厚度为 12 μm ,绝缘油为苪基甲苯油。样品额定电压为 12 kV,电容量为 0.6 μF 。图 3 为测试电容器的外形及内部结构。

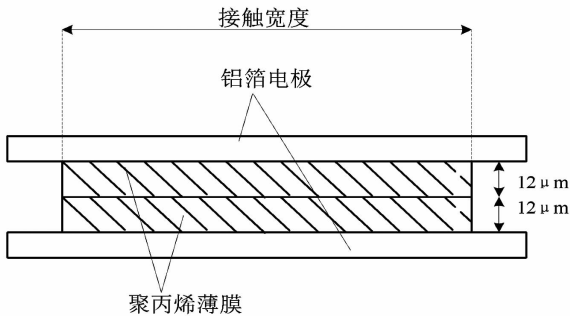
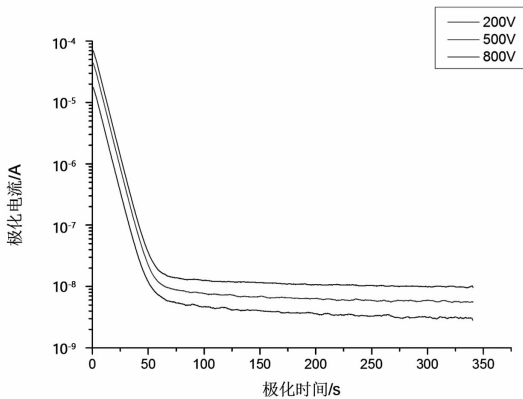


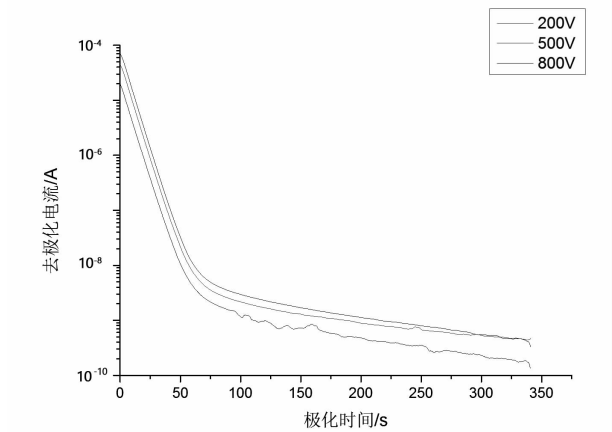
图 3 试验电容器

2.2 不同极化电压下 PDC 曲线

为了对电力电容器绝缘状态参量进行计算,需要把时域 PDC 数据利用傅立叶变换到频率,故利用不同极化电压来检测其油膜绝缘结构的线性特性。试验分别选取 200 V、500 V、800 V 三种极化电压值,进行电力电容器极化去极化电流曲线测试,极化去极化时间均选为 360 s。每一种电压等级下,重复测量 PDC 电流曲线 10 次并取其平均值。每两次试验间隔时间为 5 min,每次试验结束后对样品进行放电。各个电压等级下的测试结果如图 4 所示。



(a) 不同电压下的极化电流曲线



(b) 不同电压下去极化电流曲线

图 4 不同电压下极化去极化电流曲线

从图 4 所示的测试结果分析,在不同极化电压等级下,极化和去极化电流曲线都受到了一定的影响。从 PDC 电流幅值角度出发,可以看出随着极化电压的不断攀升,PDC 电流幅值也不断越大,而对极化去极化电流衰减趋势没有影响,体现了电力电容器油膜绝缘结构具有良好的线性特性。

根据测试所得的极化去极化电流曲线,推导出了被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介损损耗,并取其平均值,如表 1 所示。

表 1 不同极化电压下电力电容器
直流电导率和 0.1 Hz 介损损耗

极化电压/V	0.1 Hz 介质损耗	直流电导率 $\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
200	0.002 122 69	1.88×10^{-16}
500	0.002 068 12	1.69×10^{-16}
800	0.001 998 28	1.70×10^{-16}

图 5、图 6 可以更加直观地表现不同电压等级下,电力电容器直流电导率的变化。

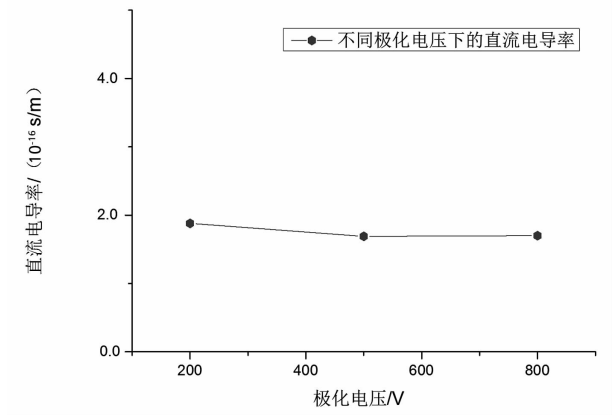


图 5 不同极化电压下的电力电容器直流电导率

从图 5、图 6 中可知,在不同极化电压等级下,被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介损损耗没有明显变化,相邻电压等级下变化不超过 5%,趋近

于一条直线。表明了极化电压的变化对于极化去极化电流法检测电力电容器绝缘状态没有显著影响。

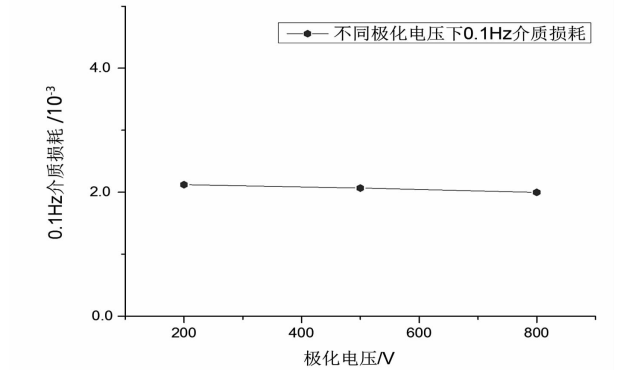
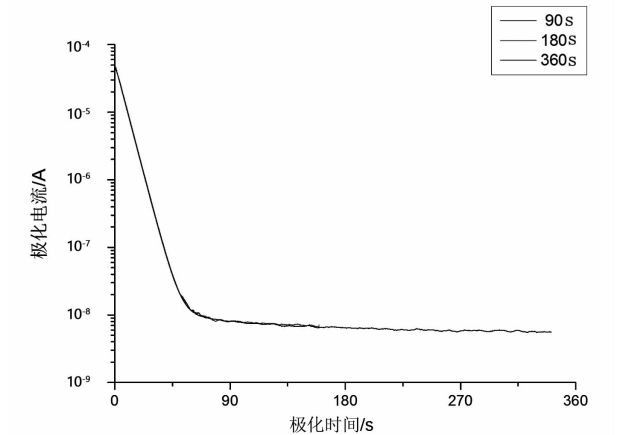


图 6 不同极化电压下电力电容器 0.1 Hz 介质损耗

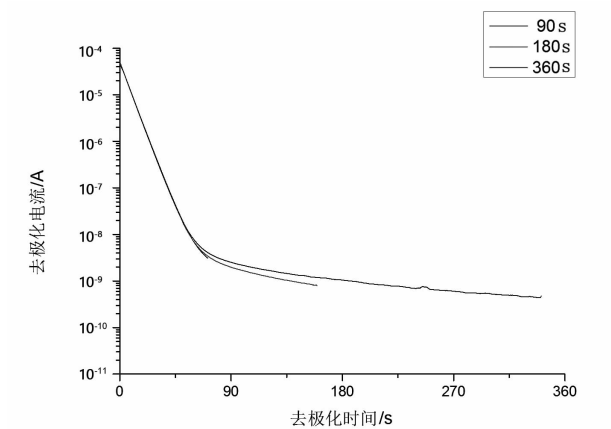
2.3 不同极化去极化时间下 PDC 曲线

由介电响应理论可知,电介质绝缘材料极化过程充分与否取决于极化时间,极化过程越充分,对于极化过程中的信息记忆更为清楚,此现象为“记忆效应”,其有利于基于 PDC 对电力电容器绝缘状态进行准确检测。分别设置 90 s、180 s、360 s 不同极化去极化时间,进行电力电容器极化去极化电流曲线测试,极化电压均选为 500 V。在任一极化去极化时间下,重复进行极化去极化电流曲线测试 10 次,并取极化去极化电流平均值作为测试结果,如图 7 所示。同样,每两次试验间隔时间为 5 min,每次试验结束后对样品进行放电。

从如图 7 所示测试结果分析可得,在不同极化去极化时间下,极化电流曲线随着时间的增长趋近于一个稳定的值,不同极化时间下极化电流曲线在同一时间段内几乎重合;而去极化电流曲线在前 60 s 内几乎重合,随着去极化时间的增加,去极化电流时间长的曲线有上移趋势,说明去极化过程更为充分时可以使得电介质产生更多的束缚电荷来降低去极化电流的衰减程度。



(a) 不同极化时间下极化电流曲线



(b) 不同去极化时间下去极化电流曲线

图 7 不同极化去极化时间下 PDC 电流曲线

同理由测试所得的极化去极化电流曲线,可推导出此时被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗,其平均值如表 2 所示。

表 2 不同极化去极化时间下电力电容器
直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗

极化去极化时间 /s	0.1 Hz 介质损耗	直流电导率 $\sigma/(S \cdot m^{-1})$
90	0.002 122 84	1.72×10^{-16}
180	0.002 087 82	1.75×10^{-16}
360	0.002 068 12	1.69×10^{-16}

更加直观体现不同极化去极化时间下电力电容器直流电导率的变化,如图 8、图 9 所示。

同样,从图 8、图 9 可得:在不同极化去极化时间下,被测电力电容器直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗并未发生明显变化,相邻不同极化去极化时间下,其两个绝缘参量变化不超过 5%,趋近于一条直线。这表明了 PDC 法中极化去极化时间不同(极化时间大于等于 90 s)对于其检测电力电容器绝缘状态没有显著影响。

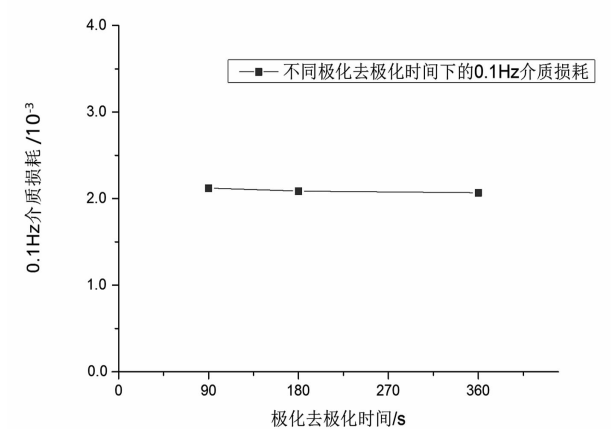


图 8 不同极化去极化时间下的电力电容器直流电导率

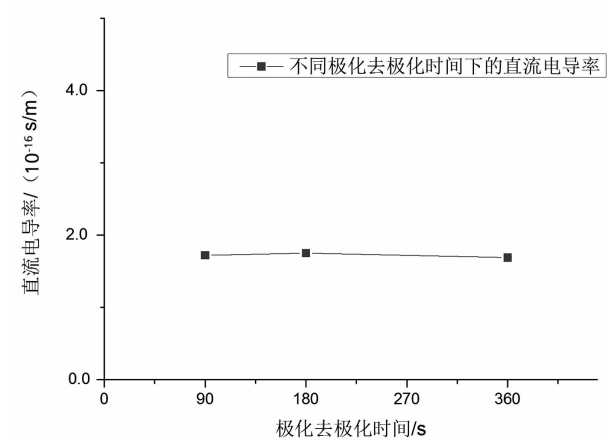


图 9 不同极化去极化时间下电力电容器 0.1 Hz 介质损耗

3 结 论

通过理论分析及试验验证,得出以下结论:

1)利用极化去极化电流法来检测电力电容器的绝缘状态,其决定性的两个特征参量为直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗。

2)测试表明在不同极化电压下,随着极化电压的提升,极化去极化电流幅值越大,但对极化去极化电流衰减趋势没有影响,直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗没有发生显著的变化。

3)测试表明在不同极化去极化时间下:极化电流曲线趋近于一个稳定的值,不同极化时间下极化电流曲线在同一时间段内几乎重合;而去极化电流曲线在前 60 s 内几乎重合,随着去极化时间的增加,去极化电流时间长的曲线有上移趋势。由此可得在不同极化去极化时间下,直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗也没有发生显著变化。

综上所述,在不同极化电压和不同极化去极化时间下,电力电容器的极化、去极化电流都有不同程度的差异,绝缘状态参量直流电导率和 0.1 Hz 介质损耗却没有发生显著的变化。所以利用极化去极化电流法能够无损检测电力电容器的绝缘状态。

参考文献

[1] 彭倩,吴广宁,周力任,等. 电容器绝缘检测技术的现状与发展[J]. 绝缘材料, 2008, 41(1):67-70.

[2] 王鹏,吴广宁,罗杨,等. 脉冲电容器绝缘老化和直流局部放电测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1268-1274.

[3] 党晓强,刘念. 电力电容器在线监测技术研究[J]. 四川电力技术, 2003, 26(6):6-7.

(下转第 79 页)

基于大数据的智能变电站二次状态监测系统研究

张 艺¹ 李大中¹, 郑永康²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071000; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:在传统变电站往智能变电站这一过渡过程中,随着变电站网络结构改变所带来的监测难点体现在难以在智能变电站二次系统状态监测的庞大数据库中,进行有效信息的高效提取以及对应故障定位与溯源。在此背景下,首先探讨学习变电站网络架构的改变;其次在智能变电站二次状态监测系统的基础上分析了其监测概念以及监测信号;最后为了解决当前智能变电站海量数据的处理问题,分析总结基于 Hadoop 数据处理平台的优势以及大数据在智能变电站中的应用发展。

关键词:智能变电站;大数据;二次状态

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)04 - 0043 - 06

Research on Secondary State Monitoring System in Smart Substation Based on Big Data

Zhang Yi¹, Li Dazhong¹, Zheng Yongkang²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei, China;

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

Abstract:In the process of transition from traditional substation to smart substation, the monitoring difficulties brought by the change of substation network structure are reflected in the difficulty of efficient extraction of effective information and corresponding fault location and traceability in the huge database of secondary system condition monitoring in smart substation. Under this background, firstly, the change of substation network structure is discussed as well as the intelligence. Secondly, based on substation secondary condition monitoring system, the concept of monitoring and monitoring signals are analyzed. Finally, in order to solve the problem of processing massive data in smart substation, the advantages of Hadoop data processing platform, and the application and development of big data in smart substation are analyzed and summarized.

Key words: smart substation; big data; secondary state

0 引 言

中国变电站自动化系统(substation automation system)从 20 世纪 90 年代开始至今已经到了全面推广的阶段^[1]。传统智能变电站中各保护装置之间存在较多硬开入连线,导致二次回路接线比较复杂,可靠性不高。相比之下,传统依靠电缆传输的二次回路被智能变电站的网络通信取代,物理信号被数字信号所取代,实现了二次设备的网络化^[2-5]。

目前国内外市场上对于智能变电站二次回路的研究,主要还是根据网络分析仪的报文进行异常原因分析,缺乏直观有效的手段对网络信息中的故障

特征进行定性分析,无法形成完整的二次回路预警和分析策略^[4]。智能变电站电力状态监测数据呈现以下特点:数据量爆炸性增长,规模急速扩大;复杂的数据结构;多样化的历史与实时监测信息(设备信息、试验数据、噪声数据等)^[5];数据种类分布跨度大,不仅仅包含结构化与非结构化数据,而且各型数据在平台的查询与处理方式及要求也不大一致;各平台的交互通信也存在较大的难度^[5-6]。

下面对智能变电站的网络架构与二次状态监测的概念、Hadoop 大数据处理技术的优势进行了总结;分析验证了大数据技术在智能变电站海量状态监测数据下,基于 Hadoop 平台的储存与读写优势。

1 智能变电站网络结构

早期的智能化变电站利用 IEC 61850 协议将变电站设备模型化。这个时期的智能变电站的网络化实现仅仅存在于间隔层与站控层,过程层设备的信息交互仍然依靠传统的模拟信号^[7]。网络结构如图 1。

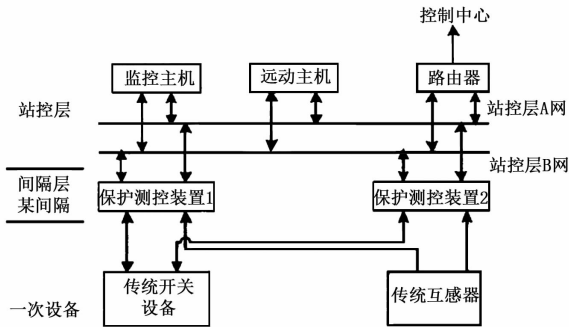


图 1 早期智能变电站网络结构

基于早期的智能变电站的不足,理想的智能变电站为了将信息采集到输出的整个过程全部数字化,采用智能开关、EVCT 等智能设备来满足设备智能化、网络通信协议一体化、运维管理全程自动化等基本性能需求^[7]。但是考虑在实际应用中的设备条件,目前只能通过智能终端与传统的二次开关进行结合链接,来填补实际的技术缺陷以达到较高的网络数字化程度。工程实践中,采用“直跳直采”方案来实现过程层信息共享并加强了测控保护装置的可靠性。具体网络结构如图 2 所示。

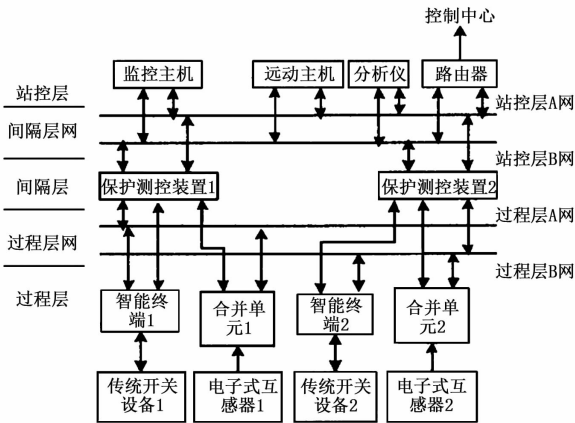


图 2 智能变电站实用网络结构

2 智能变电站二次系统的在线监测

智能变电站中,信息采集输入时需要光纤以太网传输的采样值报文,保护动作出口信息由光纤以

太网传输的 GOOSE 开关量取代了跳闸、重合闸接点动作;二次设备一般都具有在线自检功能及通讯功能,在线监测的实现就是利用装置本身自检及装置之间的互相监测^[8-11]。

文献[12]认为继电保护装置的电流、电压、光纤链路状态,装置的遥信遥控等 GOOSE 状态,直流逆变电源状态等都应该纳入装置的主要监测对象,甚至本身自检的 FLASH 擦写次数、RAM 是否出错等信息也纳入监控范围。文献[13]在考虑将含有端口连接状态、端口双工模式、速率和吞吐量等表征通信网络运行状态参数的网络设备(交换机等)也纳入监控范围,以更好地完成状态监测、故障诊断及故障定位等工作。总而言之,智能变电站二次设备状态监测系统正在往全面智能化方向发展^[14]。智能变电站的二次监测涵盖内容十分广泛,不仅仅局限于某些具体的信号丢失或者设备故障,具体的监测信息概念如图 3 所示。

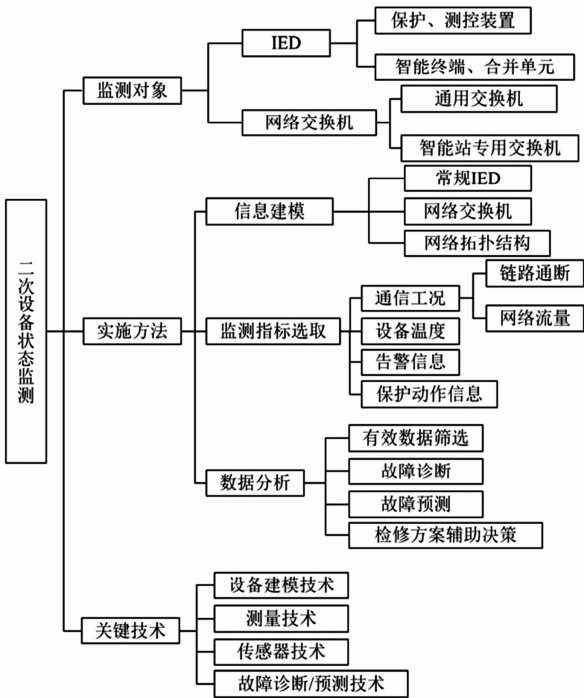


图 3 二次设备状态监测概念

3 大数据技术在智能变电站海量信息中的应用

智能变电站二次系统监测包含海量监测数据信息。其中,单个变电站公用信号分类图中包含 PMU (制造主柜相量测量单元)、TMU (时钟检测单元) 装置电源失电、PDM (局部放电在线监测) 等 60 多种

告警信号,该告警信息具体可分为 14 类,遥信、遥控、SOE(时间顺序记录)、开关刀闸动作等^[15-16]。因此,将大数据技术应用于变电设备状态监测数据的存储与管理,以此来适应电网安全经济的运行和用户对供电可靠性的要求。

3.1 Hadoop 的提出

大数据云计算原理简单,操作性强,可靠性高。文献[15]提出一种基于大数据平台的智能变电站二次装置故障追踪方法,将故障诊断数据源延展至变电层,利用 Spark 作为大数据处理工具对各类故障信息进行处理,实现故障源的准确定位。文献[16]提出一种基于 Hadoop 框架的智能变电站数据管理系统。为了对数据更好地进行分布式管理,HDFS 和 HBase 数据库发挥着至关重要的作用,采用并行计算框架 Map Reduce 作为数据查询分析的计算模式,还致力于将真实运维数据进行系统测试,在线对比该数据管理系统的存储、查询、读写延迟对比、分布式索引对比等性能参数。

3.2 Hadoop 处理技术

Hadoop 是一种开源分布式的计算框架,其扩展性、利用率、可靠性等优点使其在数据处理领域广泛应用。Hadoop 分为分布式文件系统 HDFS(Hadoop Distributed File System)和 MapReduce,其中:HDFS 是其独有的分布式文件系统,容错性与可靠性较高,在文件存储及校验中有一定的优势;MapReduce 作为 Hadoop 的并行计算框架,对于 1TB 以上的数据集有着不容忽视的并行计算优势。基于变电站大数据背景下,Hadoop 技术带来了新的解决思路,可提供高性能的计算环境。

3.3 基于 Hadoop 的智能变电站监测数据处理平台

目前大多设备状态监测系统主要分为数据获取层、数据存储与管理层、数据访问层^[16]。其系统结构如图 4 所示。

原始数据信息经过第一功能层获取,进行 ETL(抽取、转化、清洗、装载)至数据库加载。图 5 展示了大数据技术下变电设备状态监测平台架构。

1)数据采集层中状态接入网关机(CAG)接收来自获取数据的传感器和状态接入控制器(CAC)以 Web 服务方式传送的信号。所采集的信息需要 Sqoop 这一开源工具来对电力设备信息、异常告警数据等结构数据以及图像、视频等非结构数据进行

ETL,进而进行存储。

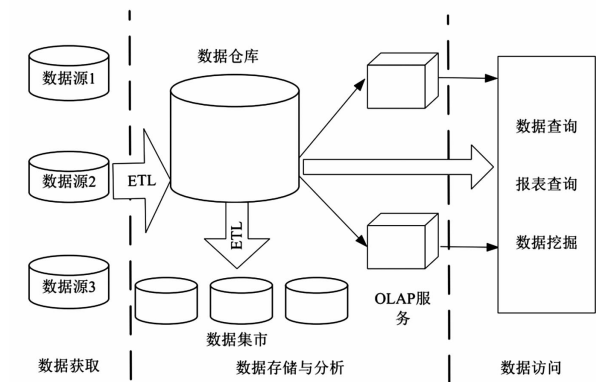


图 4 传统变电设备状态监测平台架构

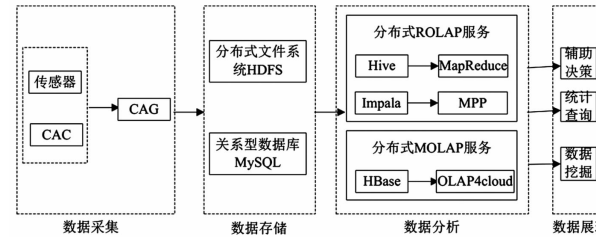


图 5 大数据技术下变电设备状态监测平台架构

2)数据存储层根据文件系统(HDFS)和数据库(MySQL)的优势进行整合。

3)数据分析层可根据具体的方案需求进行不同的分布式 ROLAP 服务和分布式 MOLAP 服务设计。Hive 和 Impala 都是 ROLAP 下的分布式服务,可共用数据库和存储资源池等。Hive 适用于长时间的批处理数据分析,但是需要通过 MapReduce 分解任务才能完成操作。Impala 适合于实时数据分析,通过使用 Select 和统计函数直接从 HDFS 抽取数据进行分析处理^[17]。不同于前者,HBase OLAP 隶属于分布式 MOLAP 服务,引擎为 OLAP4cloud。它将维信息完全压缩至事实表中,使用计算数据立方的方法同时加快寻址的速度。

4)数据展现层经过数据的统计查询,加以运维经验的辅助决策以及最后的数据挖掘等功能模块,为实现智能变电站二次状态监测的全面管理提供了有效保障。

4 智能变电站云实验平台及性能测试

实验平台由 10 台 PC 机(INTEL core i5 3.5GHz CPU,4GB 内存,500G 硬盘)搭建 Hadoop 分布式集群,分别安装 Centos 虚拟机、Apache Hadoop 云平

台。Datanode 各个节点的空间、大小、使用率等将会在 HDFS 管理界面中显示。利用 TearSort、Sort、TestDFSIO、YCSB 等辅助工具对智能变电站二次状态监测数据性能进行测试。

4.1 监测数据分类排序能力测试

Sort 是 Hadoop MapReduce 中一种衡量分布式数据处理框架数据处理能力的工具。将所有需要处理的数据划分成 N 个数据模块 (Hash 处理),接着每个 Map task 对单独的数据模块进行局部排序之后,Reduce task 将对所有数据进行全部排序处理。为了改善 sort 分类在 Reduce 阶段无法并行的弊端,TearSort 在 Map 这一阶段经过 Map task 划分需处理数据的 M (reduce task 数量为 M)个模块,设定第 i ($i > 0$)个模块中的所有数据要均要大于第 $i + 1$ 个;而 Reduce 处理阶段中,第 i 个经过 Reduce task 进行排序处理后的所有 Map task 的第 i 个模块所产生的结果均会大于 $i + 1$ 个,最后将 $1 \sim M$ 个 Reduce task 所有排序结果按照顺序输出,得到最终的数据结果,完成排序操作。图 6 为 tearsort 算法结构图。

为了验证该实验平台数据处理的优越性,首先利用 Random Writer 自动生成随机数据,将 Map 方式与 MapReduce 进行 10:1 的运行作业,每一个 Map 会生成大概 10 GB(二进制)的不同幅值和键长的数据。在此 Hadoop 软件平台上进行 tearsort 排序,取 10 次实验结果数据,如表 1 所示。

表 1 tearsort 排序测试

实验次数	时间/s
1	324. 12
2	341. 25
3	299. 88
4	387. 18
5	352. 56
6	302. 25
7	282. 14
8	345. 29
平均值	329. 33

上述结果表明,此在线监测平台在数据处理上具有明显优势,拥有良好的数据计算能力。

4.2 读写能力测试

智能变电站二次设备监测系统中信息量庞大,海量的告警信息以及各节点的采样值在日常监测系统中给监测计算机载体造成了严重的负担。仅告警信息的统计就分为事故级、一般级、预告级三大等级,如表 2 所示。

表 2 告警信息分类表

告警等级	告警信息
预告级	U/I 采样异常、无效; 局部在线监测、复归等信息
一般级	馈线两端重合闸误动; 智能终端通信链路断链; 合并单元网络通信链路出错等;
事故级	保护动作/启动,主变压器低智能终端启动

智能变电站二次状态监测系统的监测难点在于监测设备数量多,信息数据结构复杂。为了保证智

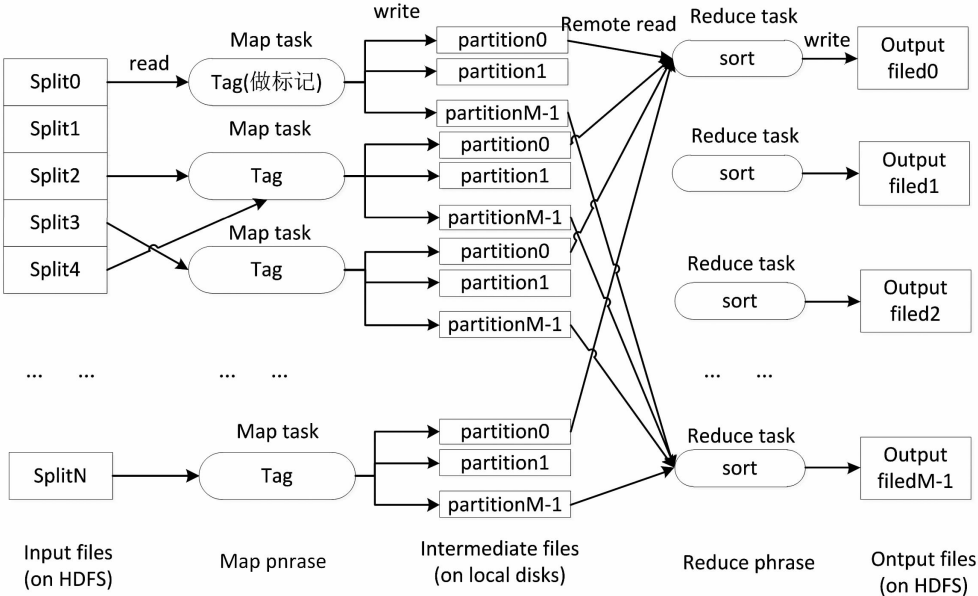


图 6 tearsort 算法结构

能电网的稳定运行,所以对试验软件平台的基准性能测试非常必要的。一般常用的测试工具是 TestDFSIO,通过生成数据提交、统计整个平台运作时间进而完成对整个 I/O 性能测试。基于控制变量法原则,分别选取文件数量与文件大小这两个变量进行试验,具体仿真结果见表 3。

表 3 I/O 性能测试

性能测试	文件数量/个	文件大小/MB	运行时间/s
write	10	1500	351.45
write	10	3000	546.28
write	10	4500	685.25
write	30	1500	396.85
write	30	3000	438.36
write	30	4500	620.69
read	10	1500	205.35
read	10	3000	241.67
read	10	4500	283.35
read	30	1500	224.15
read	30	3000	276.22
read	30	4500	343.69

根据试验结果可以得到以下信息：

相比于传统数据管理平台(人工长期的运维经验),基于 Hadoop 的在线监测数据处理系统在读写吞吐量测试上具有了明显的优势。

当数据大规模地增加时,实验平台读写测试所需要的时间增加,访问效率变低。

传统数据平台由于测试信息的大规模增加、负荷急剧增大导致平台系统性能降低,无法满足目前智能变电站的监测需求。总的来说,基于 Hadoop 数据处理软件平台中集群,在大数据驱动下展现了强大的处理能力。

4.3 在线监测数据查询测试

经过 Hadoop 平台的吞吐读写测试,在线监测的数据信息存储于 HDFS 中,为了提高该试验平台的处理效率,满足目前智能变电站信息的查询需求,需要在存储平台上建立对应的搜索引擎,并且设置相

应的关键性索引。查询过程的结构如图 7 所示,可以在存储文件更新状态下进行监测,有效缓解负载平台的运作压力。

基于 HBase 变电站设备在线监测数据概念,索引主要是由行健、时间戳和列族组成的^[18]。表 4 是以二次设备中合并单元上传到站控层的 SV 通信状态中文处理结果的监测举例:行健设置为可监测类型的编码,例如 021001 代表 SV 通信链路状态,021002 代表是其根据 SV 报文计算出来的电流有效值;被监测设备码根据国家统一规定,由 3 段共 17 位字符组成,其中前两位为省公司标识,M 表示固定字符,后 14 位表示具体流水号。基于 HBase 低冗余性与一致性不能满足目前智能变电站二次状态监测的需求,当数据规模超过一定数量级时,这种一对一的查询方式给大数据平台的数据处理上带来了不便。为了提高数据信息的查询效率,将以组合索引的方式进行拼接,如表 5 所示。

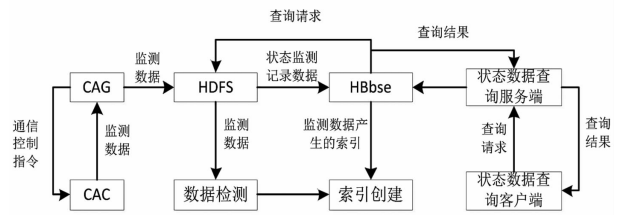


图 7 查询过程结构

将监测时间 aaaa - MM - dd 与具体的监测量组合在一起,如表 5 中 021002_aaaa - MM - dd 就表示检测时间与采样节点的电流有效值结合,这种组合方式最大的便利在于可以根据具体需求进行改变,减少索引时间提高了查询效率,用户也能根据自身查询条件建立组合索引,最终获得数据结果集。基于智能变电站二次状态监测背景,在 Hadoop 实验平台上建立索引并进行测试,对通信链路中采样节点的电流有效值查询进行性能测试对比,如图 8 所示。

表 4 基于 HBase 变电站设备在线监测数据概念

行健	时间戳	列族		
		被监测设备码	日期	I(有效值)/A
021001	T1	23M00000005482672	2016 - 02 - 18 09:30:00	
021002	T2		2016 - 02 - 18 09:30:00	95
021002	T3	23M00000005482672	2016 - 02 - 18 09:30:00	99

表 5 组合索引优化

行健	列族		
	被监测设备码	检测装置标识	相别
021002_aaaa - MM - dd	17 位字符	17 位字符	XX

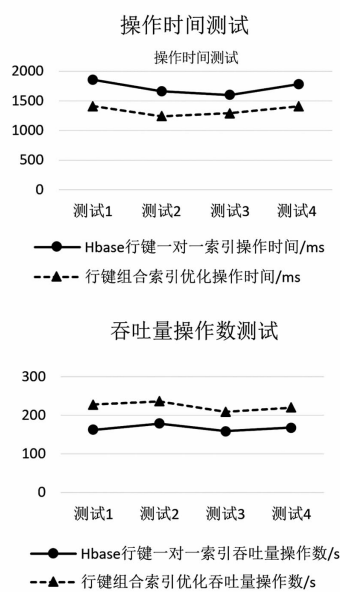


图 8 索引优化性能测试对比

根据表 5 中改进的行键组合优化后,不仅在吞吐量每秒操作数上有了大幅度的提高,而且平台的操作时间降低了不少,提高了工作效率,为智能变电站二次状态监测中的海量数据处理提供了新的思路。

5 结 语

在智能变电站监测数据的大背景下,基于 Hadoop 大数据处理平台对信息的预处理、数据的存储吞吐、查询延迟的测试以及数据可靠性与延展性的保证都进行了优化,这为后续智能变电站二次系统的状态监测和故障定位研究工作提供了有力的数据支持,提高了智能变电站二次监测系统的稳定性。

参考文献

[1] 徐长宝,庄晨,蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):127-131.

[2] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术,2006,30(23):67-71.

[3] 王治民,陈炯聪,任雁铭,等. 网络通信记录分析系统在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):92-95.

[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] 王德文,肖磊,肖凯. 智能变电站海量在线监测数据处理方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):142-146.

[6] 张怀宇,朱松林,张扬,楼其民,张亮. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术,2009,33(13):70-73.

[7] 阴玉婷,杨明玉,郑永康. 智能变电站网络化二次系统及其在线监测研究综述[J]. 电气自动化,2014,36(1):1-4.

[8] 王红星,黄曙,马凯,等. 智能变电站间隔层设备在线式自我状态监测系统设计[J]. 广东电力,2013,26(10):69-74.

[9] Yanh, Gao G, Huang, et al. Study on the Condition Monitoring of Equipment Power System Based on Improved Control Chart [C] //Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2012 International Conference on, IEEE, 2012:24-27.

[10] 蔡骥然,郑永康,周振宇,等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):148-154.

[11] 彭立波. 集中式保护装置在智能变电站中的应用[J]. 科技与企业,2012(16):120-121.

[12] 张晓华,刘跃新,刘永欣,等. 智能变电站二次设备的状态监测技术研究[J]. 电工文摘,2011(4):68-72.

[13] 朱林,王鹏远,石东源. 智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]. 电力系统自动化,2013,37(11):87-92.

[14] 张巧霞,贾华伟,叶海明,等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):123-128.

[15] 王磊,陈青,高洪雨,等. 基于大数据挖掘技术的智能变电站故障追踪架构[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):84-9.

[16] 李永恒. 基于 Hadoop 的智能变电站数据管理系统设计[J]. 长春:吉林大学,2017.

[17] 李岩,阎惊奇. 基于 Hadoop 智能变电站在线监测数据平台及性能测试[J]. 现代工业经济和信息化,2017,7(16):54-55.

作者简介:

张 艺(1994),硕士,研究方向为大数据驱动下智能变电站的二次状态监测系统研究;

李大中(1961),教授,主要从事新能源发电研究工作;

郑永康(1977),博士,专责,高级工程师,主要从事智能变电站状态监测与故障定位研究工作。

(收稿日期:2019-05-24)

基于卷积神经网络的视频大数据智能预警分析

邓 平,郑 鸿,罗冰峰,李 明
(国网自贡供电公司,四川 自贡 646100)

摘 要:大数据时代的到来对电力视频监控应用提出了新的要求,现有的电力视频监控系统基本只承担了远程录像机的作用,视频监控系统在主动预警方面的能力仍然没有体现,变电站仍然不够“智能”。基于卷积神经网络技术,先从现有的视频监控平台中提取出原始视频素材,利用视频云存储平台进行存储和 video2pic 工具进行数据清洗;然后将现场隐患行为进行分类分析并标记;最后通过特征提取、分类器模型训练和验证,实现对现有视频监控智能化升级。通过对视频大数据的挖掘实现对现场情况的实时智能预警分析,实现对变电站违章作业和营业厅不规范服务行为的自动挖掘、实时预警以及智能推送,摆脱对人工值守的依赖,在降低人力投入的同时提升电力生产安全管控能力和优质服务水平,使电力视频监控系统能充分发挥其“监”与“控”的作用。

关键词:视频大数据;卷积神经网络;智能预警

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)04 - 0049 - 05

Intelligent Early Warning Analysis of Video Dig Data Based on Convolutional Neural Network

Deng Ping, Zheng Hong, Luo Bingfeng, Li Ming
(State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 646100, Sichuan, China)

Abstract:The arrival of big data era puts forward new requirements for the application of power video surveillance. The power video monitoring system nowadays only plays the role of remote video recorder basically. The capability of video monitoring system in active early warning is still not used, and the substation is still not "intelligent enough". Based on the convolutional neural network technology, the original video material is extracted from the existing video monitoring platform. The video cloud storage platform is used for storage and video2pic is used for data cleaning. Then people's unsafe behavior of the scene is classified, analyzed and marked. Finally, the intelligent upgrade of the existing video monitoring is realized through feature extraction, classifier model training and verification. Through the mining of large video data, real-time intelligent early warning analysis of the situation on the spot is realized, and automatic mining, real-time early warning and intelligent push of irregular operation and business hall service behavior of substation are realized. By getting rid of the dependence on manual duty, saving labor investment and improving power production safety control capacity and quality service level, the power video monitoring system can give full play to its "supervision" and "control" role.

Key words:video big data; convolutional neural network; intelligent early warning

0 引 言

电力视频监控是坚强智能电网的重要基础和支撑,广泛应用于变电站、营业厅、供电所等电力生产经营场所,是国家电网公司坚强智能电网的重要组成部分^[1]。现国网四川省电力公司电力视频监控系统涵盖站点 2245 个,每天产生 PB 级的视频监控

数据量,形成丰富的视频大数据资源。

目前,视频记录的使用主要用在事故或违章发生后,人工查找存储的视频记录。这样不但花费人力,查找结果往往也不准确。所以,投入大量资金建设的视频监控系统目前仅起到视频记录的作用,并没有真正实现“实时监控”(即实时理解视频中的行为)。视频监控系统在主动预警方面的能力仍然没有体现,对电网的安全生产仍然没起到促进作用,变

电站仍然不够“智能”。

结合监控视频缺乏智能分析、实时管控的现状,利用卷积神经网络技术提取出目标特征,并通过输入大量的训练数据进行自主学习,最终实现对变电站违章作业和营业厅不规范服务行为的视频大数据自动挖掘、实时预警以及智能推送。

1 数据来源及存储

1.1 数据来源

自贡供电公司的视频监控系统主要由营业厅视频监控系统和变电站视频监控系统组成,其中:营业厅视频监控系统由自井营业厅(沙湾)、贡井局营业厅等 35 个供电所视频监控系统组成;变电站视频监控系统由圆湾变电站、舒平变电站等 43 个变电站视频监控系统组成。截止到目前,自贡供电公司已经累积历史视频数据超过 100 TB,并且每天有 4 TB 左右的新数据产生,形成丰富的视频大数据资源。

1.2 数据存储

在视频监控系统中,需要保持海量的视频图像记录,现有的视频存储模式分为如下 3 种^[2]:

1) DVR/NVR 前端本地存储:此种模式由于 DVR/NVR 存储容量相对较小,且 DVR/NVR 性能较低,信息孤岛现象严重,无法满足大数据需求。

2)集中存储模式:相对于 DVR/NVR 模式,容量大大提升,并实现了数据的集中存储;但随着大数据的来临,后续项目扩容时,需要人为配置设备的负载均衡。

3)通用云存储:为了设备的负载均衡以及空间的虚拟化设备易维护,云存储技术应运而生。通过软件运用集群技术、虚拟化技术、分布式存储技术,将网络中大量各种不同类型的存储设备集合起来协同工作,共同对外提供数据存储和业务访问功能。因其内部数据处理以结构化数据为主,云存储方式具有面向应用的特点,利于数据的分析和利用。

考虑运行实况和未来需求,充分利用视频分布式存储系统灵活性、扩展性、经济性、可靠性等优势,简化数据共享流程和降低数据统一分析的门槛,采用了针对监控行业应用推出的专业级云存储系统,其物理拓扑如图 1 所示。

根据视频监控系统监控记录,按照智能推送规则筛选出有效的视频记录,形成索引,写入至 MySQL 数

据库中备用^[3]。利用数据库可以从视频云存储平台获取特定时间的视频段。视频云存储平台提供专门数据接口以供数据的查询、回放和下载,如图 2 所示。至此,所需的原始数据文件已经就位(云存储+索引数据库)以备后续数据清洗过程使用。

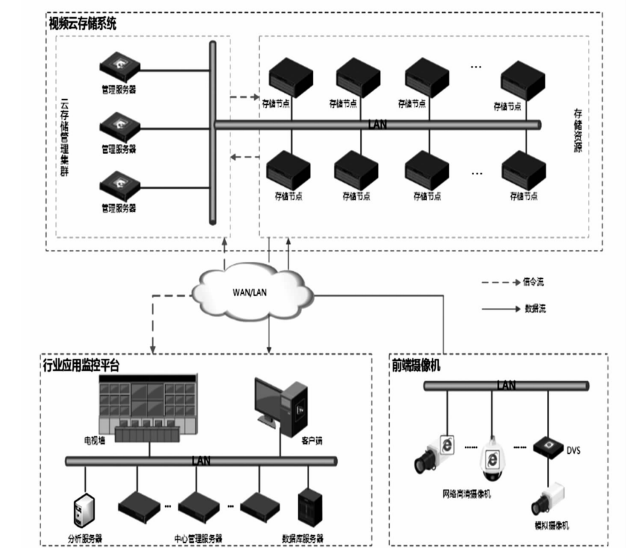


图 1 视频专用云存储物理拓扑

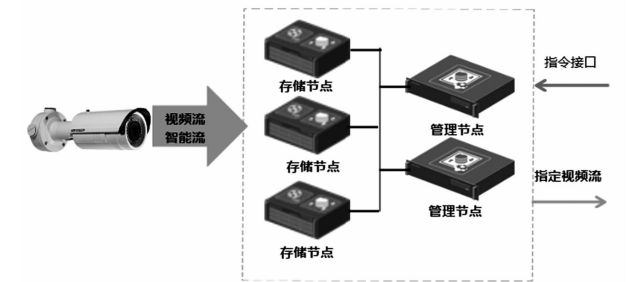


图 2 视频数据接口

2 数据清洗

数据清洗一是为了解决数据质量问题,二是让数据更适合挖掘。

2.1 视频筛选

监控场所内热点的监控素材才是有价值的素材,因此首先要筛选出有效的视频段。视频筛选使用 Python 程序语言开发的脚本工具 Detect. py,该工具基于 opencv2.3 开源代码库。

以变电站作业人员违章智能预警为例,可用 getDefaultPeopleDetector 函数实现人员行为抓取。从视频云存储系统抓取有人工作的视频片段,结合数据存储阶段整理的有人工作记录索引数据,便可

直接从视频云存储系统获取有人工作视频段,流程如图 3 所示。

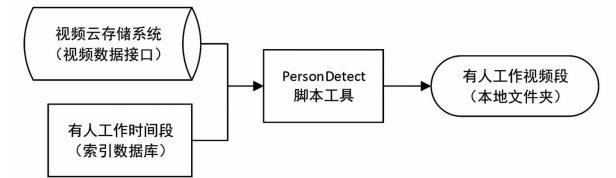


图 3 获取有人工作视频段

2.2 视频转图片

视频转换成图片的目的是为了进行机器学习。机器学习过程中,人员行为判断分类器的模型训练需要输入图片素材^[4]。

使用自行开发的轻量级工具 video2pic (Python 语言脚本),以流转换模式从有人工作视频段文件路径读取视频数据,获得等间隔时间采样的图片(帧),然后根据检测周期对图片进行间隔性的抽取(每秒从视频帧序列中抽取 2 张图片),获得图片数据集,如图 4、图 5 所示。

```
root@imagegroup:~/data/powerstation# ls power_room/
110kV 主变室2 设备 SEQNBR962_171113-11-17-15_171113-11-45-59_0.mp4
root@imagegroup:~/data/powerstation# python video2pic.py
root@imagegroup:~/data/powerstation#
```

图 4 video2pic 工具将视频转为图片



图 5 转换后的图片信息

2.3 图片标记

首先,定义项目系统将要识别的行为。这里分别以未佩戴安全帽人员头部和佩戴安全帽人员头部为例定义了两类标记。

其次,使用可视化工具 setTagUI(如图 6 所示)对图片进行筛选,与识别内容相关的图片则进行区域圈选和行为标签标记,无关的图片则舍弃,最终得到标记好类别标签的图片数据集。筛选和标记流程如图 7 所示。



图 6 setTagUI

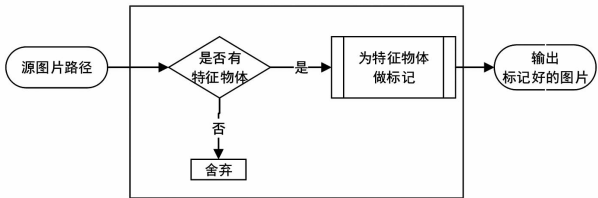


图 7 筛选和标记流程

3 分析过程

3.1 卷积神经网络算法选择

机器学习是人工智能的核心,是使计算机具有智能的根本途径,其应用遍及人工智能的各个领域,它主要使用归纳、综合而不是演绎^[5]。根据机器学习的学习形式可分为监督学习和非监督学习。以变电站人员行为违章为例,从变电站监控系统识别已知的某种违章行为,实质上是一种分类任务,即输入未知数据输出分类结果。分类任务要求系统依据已知的分类知识对输入的未知模式(该模式的描述)作分析,以确定输入模式的类属是否违章或者是哪类违章。相应的学习目标就是学习用于分类的准则(如分类规则)。

3.2 卷积神经网络模型实现

卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是一种多层的神经网络,主要由卷积层、池化层和全连接层等组成,其中每层又是由很多神经元组成^[6]。卷积神经网络中层次之间的紧密联系和空间信息使得其特别适用于图像的处理和理解,并且能够自动地从图像中抽取出丰富的相关特性^[7]。所采用的卷积神经网络算法是深度学习算法在图像处理领域的一个应用。

3.2.1 卷积神经网络模型结构

根据检测对象,可以设计出各种 CNN 架构。参

照目前主流的 CNN 网络模型,搭建的网络模型如图 8 所示。

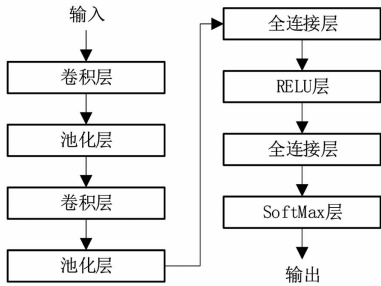


图 8 CNN 网络模型

该模型由 2 个卷积层、2 个池化层、2 个全连接层、1 个 RELU 层(激励层)及 1 个 Softmax 层(网络层)组成。根据检测对象识别效果和算法效率确定 2 个卷积层中的卷积核数是 20 和 50,卷积的步数是 1,卷积核大小为 24×24 和 8×8 ;池化层使用 12×12 最大池,步幅为 2;全连接层使用 500 个神经元。

3.2.2 模型训练

卷积神经网络的训练是先搭建整个网络架构,之后从初始化的网络参数开始通过迭代的循环交替运算,逐步调整整个网络的参数,使得最后整个网络结果误差小于阈值。

训练采用的系统环境为:Ubuntu 操作系统、python 语言(anaconda)和 Tensorflow 深度学习框架。训练过程为:把定义并搭建好的 CNN 网络视为“黑盒子”,图像的特征由 CNN 网络自动提取并训练权重,将定义好类别的图像数据集(即佩戴安全帽的头像、未佩戴安全帽的头像)输入到“黑盒子”进行迭代循环训练,最终得到案例所需要的网络模型文件和权重文件,保存在 checkpoint 文件中(“`. ckpt`”)。模型训练过程如图 9 所示。

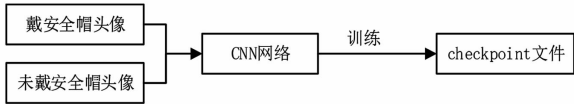


图 9 模型训练过程

3.2.3 模型固化

为了使训练好的网络模型能在具体的工程应用环境中使用,需要保证整个模型是可移植的,需要把训练好的目标模型(“`. ckpt`”文件)转换为固化模型(“`. pb`”文件)。固化模型不关心训练过程中的 CNN 网络模型的具体结构。

本次 CNN 网络模型固化使用 `freeze_graph.py`

工具。它首先加载模型文件,然后从 checkpoint 文件读取权重数据并初始化到模型里的权重变量,再将权重变量转换成权重常量,最后输出固化模型文件。

4 现场应用及结果分析

4.1 现场应用

以变电站作业人员“是否佩戴安全帽”智能预警分析为例,在视频监控平台部署训练好的分类器模型,可以实时识别监控画面是否存在特定不安全行为,与分类器训练和测试过程相似,把文件处理流程整合到视频平台便可实现实时判断。现场应用流程如图 10 所示。硬件环境如表 1 所示。

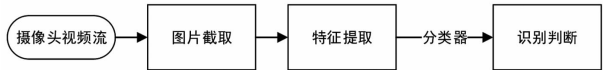


图 10 现场应用流程

表 1 现场检测环境

地点	摄像头信息	安装信息
主控室	海康威视枪机 1080P	高度 3 m、角度水平向下 30°、焦距 6 m

软件环境为 Ubuntu 操作系统、python 语言(anaconda)、tensorflow 深度学习框架、opencv - python 视觉库(用于获取摄像头实时影像)等。

测试方式为模拟测试和现场测试,如图 11 所示。

4.2 结果分析

在室内、作业现场等不同现场测试环境中,违章识别分类器实现了对测试人员安全帽佩戴情况的实时识别和标识,达到了预期的违章预警效果。但受限于训练数据集规模较小(约 1 k 数量级的图片张数),在背景复杂、光线较暗等非理想条件下的识别准确性还有待提升。从案例“是否佩戴安全帽”这一种违章场景的验证情况看,识别准确率超过 90%,但随着现场违章类别需求的细化,训练样本的种类和数据集规模将陡然增加,加之对图像进行训练时,卷积神经网络初始状态的参数选择以及寻优算法的选取均会对网络训练造成很大影响,选择不好可能会导致网络陷入局部极小、欠拟合、过拟合等问题,甚至导致训练失败。随着该领域理论方法的不断改进和开放,以及计算平台成本的不断降低,基于卷积神经网络的视频大数据智能预警分析将会有广阔的应用前景,并在预防违章领域得到广泛应用。

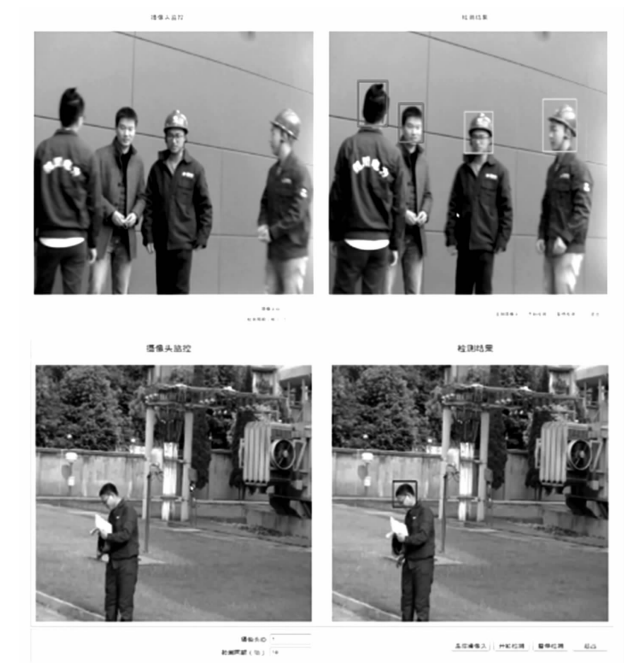


图 11 模拟测试和现场测试

5 结 语

从成功的场景应用示例,证明通过对视频监控数据的清洗、分析和基于卷积神经网络的特征提取、模型训练、检测等,实现视频监控系统的预警功能是技术可行、效果显著、前景广阔的。安全是企业发展的根本,对于电网而言,严控各类违章行为,杜绝事故发生是各级工作人员的首要职责。利用计算机技术保障人身、电网、设备的安全,提升优质服务水平是未来的发展方向,也是智能电网建设的重要组成部分。上述场景应用大数据对安全帽进行了成功检测,建议从技术和应用两方面进行更深入的研究:

- 1)通过增加训练样本、优化训练模型,提升违章预警的准确度;
- 2)通过扩展卷积神经网络学习规则,以实现智能预警功能场景扩充;
- 3)研究成果可应用到更丰富的电力安全生产、经营服务等场景,有效提升电力生产安全管控能力和优质服务水平。

参考文献

[1] 肖东晖,林立. 电力系统统一视频监控平台解决方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):74-79.

[2] 叶雄杰. 基于云存储的移动视频监控系统研究[D]. 广州:广东工业大学,2011.

[3] 许可. 卷积神经网络在图像识别上的应用的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[4] 吕敬钦. 视频行人检测及跟踪的关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.

[5] 宫世杰,王薇,郭乔进. 视频监控系统发展现状与趋势[J]. 科技技术创新,2018(29):81-82.

[6] 叶芳芳. 监控视频中异常行为检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[7] 李瑞峰,王亮亮,王珂. 人体动作行为识别研究综述[J]. 模式识别与人工智能,2014,27(1):35-48.

作者简介:

邓 平(1973),工程硕士,高级工程师,主要研究方向为电力信息化、电力通信网运维技术与管理;

郑 鸿(1987),硕士,工程师,主要研究方向为网络运行与信息安全技术;

罗冰峰(1988),硕士,工程师,主要研究方向为通信电路、HDL、图像识别;

李 明(1990),硕士,助理工程师,主要研究方向为通信设备技术、物联网技术。(收稿日期:2019-05-29)

(上接第 27 页)

[14] Udo T. Switching Surge and Impulse Sparkover Characteristics of Large Gap Spacings and Long Insulator Strings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1965,84(4):304-309.

[15] Watanabe Y. Switching Surge Flashover Characteristics of Extremely Long Air Gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1967,86(8):933-936.

[16] 杜林,刘伟明,王有元,等. 基于 CPLD 的电网过电压变频数据采集卡设计[J]. 高电压技术,2008,34(8):1589-1593.

[17] 兰海涛. 高压电网过电压在线监测系统设计与实现研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.

[18] 兰海涛,司马文霞,姚陈果,等. 高压电网过电压在线

监测数据采集方法研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):79-82.

[19] 姚陈果,孙才新,米彦,等. 配电网过电压在线监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化,2004,28(9):74-76.

[20] 平丽英. 变电站瞬时过电压在线监测系统的研制[D]. 北京:华北电力大学,2001.

[21] 吴婧瑜. 不同冲击电压波形作用下油纸绝缘的累积效应特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.

作者简介:

孙鹏宇(1994),硕士,研究方向为非标准雷电冲击电压的模拟技术;

江 渝(1964),教授,工学博士,主要研究方向为电力电子在系统中的应用。(收稿日期:2019-05-08)

基于大数据与计量回归分析的四川终端能源竞争态势研究

沈 军¹, 严 磊², 魏 阳²

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

摘 要:比较研究了电力与石油(汽柴油)、天然气在新能源汽车、分布式能源系统等终端能源之间的竞争态势,并基于大数据关联分析及计量模型回归分析等方法,对竞争关系进行了实证,得出如下结论:天然气基础设施相对薄弱,短期难以对电力能源构成明显威胁,随着政策利好以及技术突破,长期将在冷热电分布式能源、城市燃气和压缩天然气车等终端消费市场上成为电力公司的一个有力竞争对手;短期内石油终端消费表现出下行的态势,但传统油企积极向综合能源公司转型,给电力企业带来新的竞争压力;新能源汽车产业发展短期受制约,长期市场前景较好,有利于推进“以电代油”进程;分布式风光发电项目对公司短期影响有限。对电力公司而言,可以通过抢占增量市场、转型综合能源服务等方面进行应对。

关键词:终端能源;竞争态势;电力

中图分类号:F416.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0054-06

Research on Competitive Situation of Terminal Energy in Sichuan Province Based on Big Data Analysis and Regression Analysis

Shen Jun¹, Yan Lei², Wei Yang²

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

Abstract:The competition situation between electric power, petroleum and natural gas in new energy vehicle and distributed energy system is compared. And empirically studies are carried out based on big data analysis and regression analysis. The obtained conclusions are as follows:Due to the relatively weak infrastructure, it is difficult for natural gas to pose a significant threat to power energy in the short term, but in the long run, natural gas would become a powerful competitor. Oil companies are actively transforming into integrated energy companies, they would bring new competitive pressures to power enterprises. The new energy vehicle industry is constrained in the short term, but it had a good long-term market prospect, which is conducive to promoting the process of replacing oil with electricity. The distributed energy has a limited impact on electric power. For power companies, the following strategies are available: developing the incremental market and turning to integrated energy services.

Key words: terminal energy; competition situation; electric power

0 引 言

从全球能源发展进程看,不同能源的竞争和替代效应导致此消彼长,给整个行业带来冲击。如美国的页岩气革命,其成功开发及利用使得美国能源产业出现革命性变化,2017年美国天然气在能源消耗中的占比已超过31.7%,随着天然气产量的迅速增长、价格

持续下降,煤炭行业普遍亏损,石油的对外依存度大幅下降,有效抑制了电价的上涨。随着经济发展逐步进入新常态,新技术、能源生产消费革命、电力体制改革等催生了新的能源消费形态及其关联产业,原有垂直一体化能源行业之间出现相互渗透,终端能源的竞争日趋激烈,迫切需要对新形势下公司面临的能源竞争态势进行综合评估,积极应对。

下面运用计量分析方法,深入解析四川终端能源

供需现状,洞察电力行业态势,聚焦终端能源竞争格局,提出针对性的政策建议。研究成果有助于公司厘清竞争现状,调整战略布局,推动四川“再电气化”能源转型进程。

1 四川终端能源概况

1.1 能源消费趋势

从2000年开始,四川能源消费呈现出从高增长到负增长再回到中低速增长态势。2010年和2011年四川能源消费年增速都在9.5%以上高增长状态,2013年增速降到-6.62%的负增长,2014年开始回升,至2016年和2017年四川能源消费年增速分别为2.40%、2.52%。根据《四川省“十三五”能源发展规划》《四川省节能减排综合工作方案(2017—2020年)》等能源工作的部署规划^[1],预计未来四川省能源消费总量将继续维持中低速发展的态势。

1.2 供端能源特征

近年来,四川原煤、原油产量降幅显著,2017年分别下降24.4%、19.3%;而水电发电量、天然气产量则分别增长5.9%、18.7%,呈现“缺煤少油气丰、水电丰富”的资源特征,见图1所示。

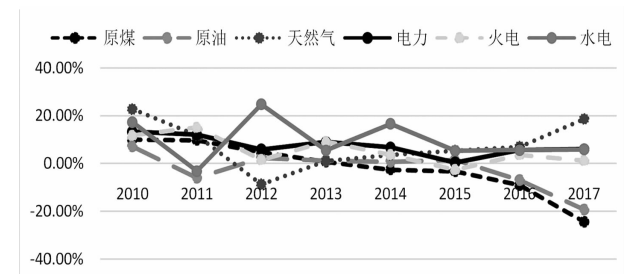


图1 2010—2017年四川省各类能源产量增速

1.3 能源消费结构

四川能源消费结构不断向清洁化调整,在消费端,按照标准煤当量计算,煤品燃料消费比例降幅明显,油品燃料消费比例低速增长,水电、天然气消费总体呈稳步上升态势,见图2所示。

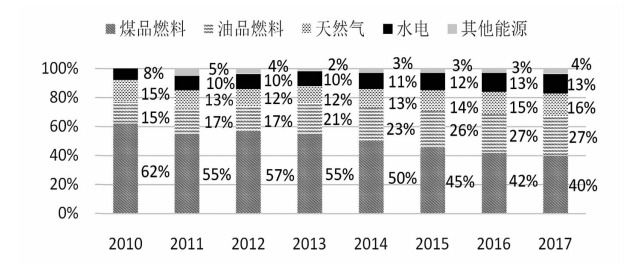


图2 2010—2017年四川省各类能源消费量占比情况

2 天然气与电力的竞争分析

2.1 天然气消费近年来加速增长

四川常规天然气探明储量占全国的21.2%，页岩气资源量和可开采量分别占全国的20.5%和17.7%，均居全国首位。天然气产量、页岩气产量居全国第一和第二位。2017年天然气产量 $339.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，同比增长18.7%，占全国比例高达22.9%；终端消费量为 $183.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增长10.7%，有加速增长苗头。作为净输出省，产量、消费增长速度的差值逐年增大，且省内存在错峰、轮供、限供等用气紧张的现象。

2.2 竞争态势分析

1)天然气消费增长短期受制于管网和省内供给。《四川省“十三五”能源发展规划》提出2020年天然气消费占一次能源总量的16.2%的目标,其中天然气发电装机将达到2110 MW(分布式发电1410 MW),约相当于统调装机的5%。目前天然气管网建设仍滞后于需求,大规模外送制约了省内供给量。当前天然气企业的主要经营策略以加大天然气勘测力度、提高天然气利用效率以及完善天然气储运输送系统为主。

2)天然气具有明显的成本优势。按1 kg标准煤测算,电力的成本约4.82元,天然气成本在1.55~2.33元之间。天然气成本比电力成本低51%~68%。

2.3 竞争领域分析

1)冷热电三联供

冷热电分布式能源具有成本和减排优势。目前,冷热电联产设备主要为燃气轮机和内燃机。从写字楼、商场、医院、体育馆、酒店类建筑等电能使用情况比较来看,采用冷热电三联供系统相比未采用的传统电能系统,在运营成本上可分别降低12%、11%、21%、32%、23%;在温室气体排放上可分别减少22.7%、34.4%、61.4%、22.7%、34.3%,综合能效高^[2]。此外,以天然气为燃料的冷热电分布式能源发电项目可以减少对集中供能的依赖,同时可缓解夏季电力高峰,调节天然气系统全年用气均衡总量,具有双重意义的调峰功能^[3]。随着售电侧放开和综合能源服务公司的兴起,分布式三联供或将成为售电主体的新赢利点。

2)民用天然气

在居民炊用、采暖方面,天然气具有明显成本优势和便利性,且定价机制灵活。按平均价格 1.89 元/m³ 测算,要产生与 1 kg 标准煤相等的能量,居民使用电能的成本约为 4.82 元,而使用天然气的成本约为 1.55 元。随着阶梯气价的实施,民用天然气采暖的成本进一步降低。

天然气汽车长期使用成本更低。传统燃油汽车改用天然气技术成熟、成本低,2017 年 9 月四川省车用压缩天然气终端销售价格统一由 3.00 元/m³ 降低为 2.90 元/m³,按百公里能耗测算天然气使用成本是电动汽车的 1.72 倍,若考虑电池寿命及更换成本,年综合使用成本则为后者的 38%,见表 1 所示。

表 1 天然气汽车与电动汽车的使用成本比较^①

成本类型	单位:元	
	电动汽车	天然气汽车
标准煤当量耗能成本	4.82	2.38
百公里能耗成本	8.87 ~ 16.45 ^②	20.3 ~ 23.2 ^③
改装成本/更换电池	50 000 ~ 60 000	3000 ~ 8000
年综合使用成本 ^④	9664 ~ 12 468	3546 ~ 4813

注:①测算数据仅针对家用轿车,不针对重型卡车等其他非家用车型;②按百公里能耗 15 ~ 20 kWh,单价 0.591 7 ~ 0.822 4 元/kWh 计算;③按百公里能耗 7 ~ 8 m³,单价 2.90 元/m³ 计算;④每年行驶里程数按 15 000 km 进行测算。

四川的天然气汽车发展有鲜明的地域特征,其局限性也很明显。相比电动汽车,存在动力性较低、前期供气体系建设投入高、储气瓶占用空间大、携带不方便等缺点,发展空间受到抑制。四川的天然气汽车、电动汽车均作为清洁能源车,与传统汽车形成了更复杂的替代和竞争格局。

3 石油与电力的竞争分析

3.1 四川油品消费增速呈下降趋势

汽柴油终端消费量增速呈现波动下降的趋势,如图 3 所示,2013 年增速为 23.5%,2015 年为 11.3%,2017 年降为 2.5%。根据四川省近年来的能源规划,石油消费将继续保持逐步放缓的发展趋势。

3.2 竞争态势分析

1)传统油企积极向综合能源公司转型,进军电力市场。近年来,中国能源结构不断向绿色低碳的

方向发展,汽车逐渐步入电气化和氢能时代,传统油企均开始积极筹划转型之路。如中石油提出“到 2030 年,建成世界一流综合性国际能源公司”,并于 2017 年 10 月由广西中油电能有限公司与广西石化签订《购电合作意向书》,完成第一笔售电业务;四川中油电能售电有限公司成为 2018 年 1—9 月四川直接交易电量前十家售电公司之一。

2)石油产品使用成本高于电力,且价格波动明显。根据测算,产生 1 kg 标准煤等量的能量,使用汽油能源的成本在 5.48 ~ 7.52 元区间,使用电力的成本约为 4.82 元,比前者要低 12% ~ 36%。2018 年随着国际原油市场价格动态调整,汽柴油价格波动达到 30%。

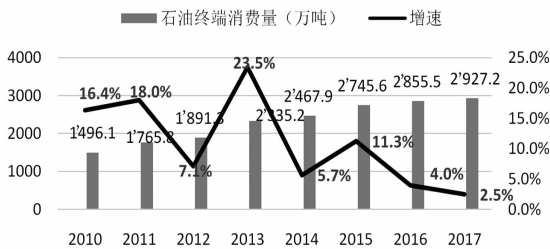


图 3 2010—2017 年四川省石油终端消费及增速

3.3 在新能源汽车领域竞争分析

1)充电桩数量较少、利用率低。截至 2018 年 7 月底,中国公共类充电桩达 27.48 万个,四川仅 6838 个。在充电电量方面,2018 年 7 月,中国充电桩过电量达 217 GWh,四川省充电桩过电量为 10.423 GWh。目前,充电桩行业存在重建设、轻运营、利用率低等问题,国网、特来电、星星充电、普天新能源等各运营商的充电设施利用率普遍低于 15%,产业仍处于培育期。

2)短期内动力电池成本高、寿命短。由于动力电池技术瓶颈暂未突破,成本下降幅度较小。2018 年电池成本为 950.6 元/kWh,比 2015 年降低 165.65 元/kWh,随着动力电池能量密度攻关持续推进,预计仍有可观的降价空间。新能源汽车电池衰减快、寿命短,目前使用寿命为 6 年左右。

3)新能源汽车的使用成本优势不明显。目前,新能源汽车用车成本与传统新能源汽车相比,综合使用成本差异不大,见表 2 所示。由于面临补贴滑坡的趋势,新能源汽车购置成本相应会提高。

4)汽车充电服务费机制尚不成熟。目前,国家

允许收取充电服务费,但具体到各地,因市场成熟度的不同、物业等第三方收费机制不明确,各地的费用标准也参差不齐,如成都上限为 0.6 元/kWh,泸州则对巴士、出租、其他车辆分别执行 0.34、0.60、0.70 元/kWh 的差异价格。随着市场逐步成熟,充电服务费放开是必然趋势,运营商需靠服务质量和充电便利性争取更多市场份额。

4 风光等分布式能源与传统电力竞争分析

风光等分布式能源具有靠近用户、运行灵活,建设技术简单等优点,如果其能源就地消纳的话,对传统电力公司将会形成正面替代性的长期影响。但当前分布式风光发电项目存在价格劣势以及发展规模受限等不利因素,对电力公司的影响较为有限。

1) 风光发电面临平价上网的政策压力。全国风电平均成本约为 0.5 元/kWh,光伏发电成本波动范围较大,在 0.55 ~ 1.02 元/kWh 之间,平均为 0.68 元/kWh,均高于燃煤标杆电价(0.25 ~ 0.45 元/kWh)。2018 年以来,国家推动平价上网,逐步减少了对风电、光伏的补贴力度。

2) 四川的资源禀赋并不能支撑其大规模发展。根据《四川省“十三五”能源发展规划》《能源发展“十三五”规划》等测算,到 2020 年年底,四川省风电建成并网规模达 6000 MW,光伏装机量达 2500 MW,仅占全国 2.5%。此外,与其他分布式光伏发展较好的省份相比,四川省 2016 年分布式光伏累计装机容量为 236.8 MW,低于江苏、安徽、浙江等省份。

4 其他终端能源对电力影响的相关分析与计量模型

4.1 基于大数据方法的相关分析

1) 分析方法

使用灰色关联度分析法探究四川省电力的竞争性能源如天然气、原油、煤炭以及水风发电方式与用电总量及用电结构之间的关联程度,并使用 Python 进行关联分析。选取四川省用电总量、衡量用电结构的三大产业及生活用电总量共 5 个变量分别作为参考变量,选择四川省天然气产量与用量,原油产量与消耗量、石油终端消费量与出厂价格指数、焦炭生产量与消耗量、煤炭消耗量以及水电、火电发电量等共计 11 个预计影响用电总量及结构变化的因素组成的数据序列作为比较变量。选取分辨系数 ξ 为 0.5,用 Python 编译程序,求得比较数列与参考数列在 2000—2017 年各个年份的关联程度值,并取平均值作为总体关联度。

2) 结果分析

对 5 个参考变量数列分别进行灰色关联度分析,根据 Python 的输出情况,得到表 3 的关联度结果。

一是天然气产量对用电总量、第二产业及居民生活用电总量的影响程度都非常大(r 高于 0.9)。随着四川省经济发展对清洁能源的需求增加,天然气产量与用电总量、工业生活用电的关联性极强。二是石油出厂价格指数与第一、第三产业用电总量变化的态势高度一致。石油价格波动明显,使用成

表 2 新能源汽车与传统燃油车的成本比较 单位:元

成本比较	纯电动车 vs 传统燃油车		油电混合电动汽车 vs 传统燃油车	
	腾势汽车	奔驰 B 级	一汽丰田卡罗拉双擎	一汽丰田卡罗拉
购车成本	289 500	280 050	176 310	165 499
行驶成本(耗电或耗油)	17 640	87 750	34 720	50 420
保养成本	8000	35 000	7000	7000
维修成本	14 000	36 500	16 250	14 750
保险费用	60 000	65 000	24 800	24 800
充电设备成本	15 000			
合计	404 140	504 300	259 080	262 469

注:选取的新能源车型参考长沙地区补贴政策;其中购车成本为补贴后的成本;保养成本、维修成本、保险费用均是预估 10 年内的情况。

表 3 基于大数据方法的灰色关联度分析结果

比较变量	参考变量 ^①	关联系数	比较变量	参考变量	关联系数
天然气产量	(0)	0.917 352	焦炭生产量	(0)	0.875 437
	(1)	0.747 597		(1)	0.778 050
	(2)	0.912 075		(2)	0.897 151
	(3)	0.822 930		(3)	0.777 332
	(4)	0.906 248		(4)	0.836 045
天然气用量	(0)	0.911 339	焦炭消耗量	(0)	0.943 263
	(1)	0.751 872		(1)	0.735 431
	(2)	0.929 933		(2)	0.941 740
	(3)	0.805 576		(3)	0.853 144
	(4)	0.882 552		(4)	0.900 572
原油产量	(0)	0.688 840	煤炭消耗量	(0)	0.775 485
	(1)	0.824 700		(1)	0.814 751
	(2)	0.701 187		(2)	0.799 121
	(3)	0.670 590		(3)	0.709 976
	(4)	0.692 863		(4)	0.759 554
原油消耗量	(0)	0.701 261	水电发电量	(0)	0.781 084
	(1)	0.659 682		(1)	0.666 327
	(2)	0.686 250		(2)	0.765 556
	(3)	0.812 840		(3)	0.895 707
	(4)	0.744 541		(4)	0.820 840
石油终端消费量	(0)	0.826 797	火电发电量	(0)	0.779 652
	(1)	0.669 763		(1)	0.795 756
	(2)	0.804 980		(2)	0.806 302
	(3)	0.669 331		(3)	0.711 468
	(4)	0.858 879		(4)	0.759 491
石油出厂价格指数 (上年 = 100)	(0)	0.826 797	注:①参考变量(0)~(4)分别代表四川省社会用电总量以及第一产业、第二产业、第三产业、生活用电总量; ②黑体表明该参考电量与比较变量的关联度最大。		
	(1)	0.669 763			
	(2)	0.804 980			
	(3)	0.669 331			
	(4)	0.858 879			

本高于电力 13% 以上,电力具有显著成本优势。三是焦炭消耗量与社会用电总量、第二产业用电量关联程度显著,都达到 0.94 之上。四是从关联度可以看出,水电发电量侧重影响第三产业和生活用电,火电发电量则与第一、第二产用电关联更强。

4.2 计量模型设计与回归分析

4.2.1 变量选择及描述性统计

在四川省用电量影响因素的实证分析中,令被解释变量为四川省用电量增速,用 elezu 表示。解释变量分别为:四川天然气消耗量增速,用 gasconzu 表示;四川省石油终端消耗量,用 oilcon 表示;四川省煤炭消耗量,用 coalcon 表示;控制变量为四川省 GDP 增长速度,用 gdpzu 表示。

分析主要采用四川省 2000—2017 年的时间序

列数据。此外,为降低数据的波动性,对石油终端消耗量、煤炭消耗量这两个变量取对数处理,表 4 为各变量的描述性统计。

由表 4 可知,各个变量之间的最大值和最小值都有一定的差距,说明 2000—2017 年这 17 年间四川省的用电量、天然气消耗量、石油终端消耗量、煤炭消耗量、GDP 都发生了较大的变化。从标准差来看,用电量增速(elezu)的离散程度最小,石油终端消耗量(oilcon)离散程度最大,这反映出四川省用电量增速波动性相对较小,而石油终端消耗量则呈现出较大的变化。

4.2.2 模型设定及回归分析

1) 变量检验

在模型选择上,采用线性回归模型进行分析。

表 4 各变量的描述性统计

变量	样本量	平均数	标准差	最小值	最大值
用电量增速 (elezu)	17	0.090 8	0.047 1	-0.011 1	0.169 0
天然气消耗量增速 (gasconzu)	17	0.094 9	0.102 4	-0.109 4	0.380 1
石油终端消耗量 lg (oilcon)	17	7.037 0	0.701 1	5.899 0	7.981 0
煤炭消耗量 lg (coalcon)	17	9.069 0	0.295 0	8.444 0	9.404 0
GDP 增速 (gdpzu)	17	0.135 4	0.050 6	0.053 1	0.223 5

由于实证数据为时间序列数据,为避免出现伪回归,首先对各序列进行单位根检验,判断其是否平稳,检验结果如表 5 所示。

表 5 ADF 单位根检验

序列	t 统计量	P 值	检验结果
elezu	-3.815 509	0.043 5 ^①	平稳
gasconzu	-3.064 848	0.004 4 ^②	平稳
lg (oilcon)	-3.673 480	0.018 1 ^①	平稳
lg (coalcon)	-3.124 122	0.044 9 ^②	平稳
gdpzu	-2.374 283	0.162 7	非平稳
d (gdpzu) ^③	-5.508 727	0.000 0 ^②	平稳

注:①、②分别为 5%、1% 显著性水平下拒绝原假设;③d 代表一阶差分。

在 5% 的显著性水平下,elezu、gasconzu、lg (oilcon)、lg (coalcon) 各个变量序列均为平稳时间序列,gdpzu 为非平稳,对其进行一阶差分后 gdpzu 平稳,故为一阶单整序列。

2) 模型设定及回归分析

由于被解释变量与解释变量均为平稳序列,因此可以进行后续的线性回归模型分析。对四川省电量消耗影响因素进行分析:首先,Model 1 是没有加控制变量的模型,在 Model 1 基础上,加入 dg (dpzu) 控制变量,得到 Model 2,表示在加入 GDP 变化这个控制变量的情况下上面 3 个因素对用电量的影响程度。两个模型的形式具体为

Model 1 :elezu = c +β₁gasconzu +β₂lg (oilcon) +β₃lg (coalcon) +μ_{*t*} (1)

Model 2 :elezu = c +β₁gasconzu +β₂lg (oilcon) +β₃lg (coalcon) +β₄d (gdpzu) +μ_{*t*} (2)

式中:c 为常数项;μ₁ 为随机扰动项。

借助 Eviews 10.0 软件代入数据得到四川省天然气用量、石油终端消耗量、煤炭消耗量对四川省用电量影响的回归结果,如表 6 所示。

表 6 其他能源消耗对用电量影响的回归结果

变量\模型	elezu	
	Model 1	Model 2
<i>c</i>	0.126 842 (0.658 8) ^①	0.081 624 (0.732 8)
	-0.174 014 (0.044 4) ^③	-0.267 849 (0.001 3) ^④
gasconzu	-0.064 882 (0.001 6) ^④	-0.068 213 (0.000 1) ^④
	0.047 669 (0.241 9)	0.055 945 (0.096 4) ^②
lg (oilcon)		0.462 165 (0.004 9) ^③
lg (coalcon)		
d (gdpzu)		
<i>R</i> ²	0.532 291	0.751 703
F 检验 ^⑤	7.449 132 (0.003 216) ^④	13.109 77 (0.000 245) ^④

注:①括号外为回归系数的统计量,括号内为 P 值;②、③、④分别为 10%、5%、1% 显著性水平下拒绝原假设;⑤F 检验用来判断回归结果的整体系数是否显著。

通过对两个模型对比来看,添加控制变量模型比没添加模型时变量更加显著,拟合程度更好,因此选择 Model 2 进行后续分析。

从 Model 2 回归结果来看,可进一步得出如下结论:四川省天然气消耗量增速对用电量每增速在 1% 的显著性水平下存在负向影响,即在其他变量不变的情况下,四川省天然气消耗量增速增加 1%,平均来说用电量增速则下降 0.27%;四川省石油终端消耗量对用电量增速在 1% 显著性水平下也存在负向影响,即石油终端消耗量每增加 1%,用电量增速会下降 0.068%;四川省煤炭的消耗量对用电量增速在 10% 显著水平下存在正向影响,由于四川水电占比较大,煤炭消耗虽然对四川用电量有正向影响,但是并不是非常的显著。

(下转第 71 页)

基于电力数据与机器学习的家庭收入估计方法

张玉蕾¹, 王谷城^{2,3}, 关键雄²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;
2. 新加坡淡马锡理工学院清洁能源中心, 新加坡 529757;
3. 新加坡国立大学计算机学院, 新加坡 117417)

摘要:合理利用从智能电表获取的家庭用电量数据,就可以推断出一个家庭的收入情况,从而有利于商家对消费群体的把控,使商家更有针对性地为用户提供需要的服务和产品。为了提高推断的准确率,提出了一种利用家庭总用电量和房屋面积信息的数据融合方法来估计家庭收入情况。研究运用几种不同的机器学习分类算法对数据进行训练和分析,最终使得对家庭年收入的分类准确率可以达到81%,相比于只利用家庭总用电量的信息,分类准确率提高了15%。可见,增加房屋面积信息的方法能够达到一定的评估目的,为商家和用户提供帮助,使人们享受更加智能和优质的生活。

关键词:智能电表;电力数据;分类算法;家庭收入;特征选择

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0060-05

Household Income Estimation Method Based on Power Data and Machine Learning

Zhang Yulei¹, Wang Gucheng^{2,3}, Kwan Kian Hoong²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;
2. Clean Energy Research Center, Temasek Polytechnic, Singapore 529757;
3. School of Computer Science, National University of Singapore, Singapore 117417)

Abstract: Reasonable use of household electricity consumption data obtained from smart meter can infer household income, which is conducive to the control of consumer groups, so that businesses can provide more targeted services and products for users. In order to improve the accuracy of inference, a data fusion method is proposed to estimate household income based on the information of total household electricity consumption and housing area. Several different machine learning classification algorithms are used to train and analyze the data. Finally, the classification accuracy of annual household income can reach 81%. Compared to using the information of total household electricity consumption only, the classification accuracy is improved by 15%. It can be seen that the method of increasing housing area information can achieve certain evaluation purposes, provide help for businesses and users, and enable people to enjoy a more intelligent and quality life.

Key words: smart meter; power data; classification algorithm; household income; feature selection

0 引言

在整个电网体系当中,用户群体是关键一环。智能电表的普及能够越来越容易地获得每个家庭的用电量数据。通过对电表数据的监测,有关部门可以实现对用电高峰的调度,还可以进行对用电器的故障检测^[1]。在大数据的时代背景下,监测家庭用

户的电力负荷,并将电力数据与生活中一些看似不相关的信息综合起来,便能得到很多意想不到却又很具有价值的信息^[2]。这些信息将会带给诸如电力公司、经销商等多个行业人群有利的信息,从而帮助人们的生活变得更加便捷。

当前的研究工作已经提出总的家庭用电量数据能够被用来评估一些家庭的静态特性,比如房屋面积、居住人口等^[3]。这些特性信息不仅能够用于目

标能源反馈,而且可以帮助调整家庭中恒温器的温度设置,从而提高能源效率和用户的舒适度,另外还能用于目标能源查询^[4]。Nipun Batra 等人^[4]使用无监督的能量分解方法预测 6 个静态房屋属性,分别为房屋的年龄、房屋面积、家庭收入、楼层数、房间数、居住人口。从总的用电量数据中分解出暖通空调的功率信号,比起简单地使用总的用电量数据,能够使评估房屋静态特性的准确率提高 10%。

为了提高非侵入式负荷监测的准确率,还可以通过数据融合的方法来进行,即除了电力数据之外,添加一些情境性信息,例如家庭中用电器的物理位置等。Akshay 等人^[5]利用通过无线位置传感器获得的用户实时位置信息和用电器的用电量数据,来提高现有的非侵入式负荷监测方法的准确率。

下面提出将总的用电量信息和静态的房屋面积信息综合起来,用来推断一个家庭的收入情况,帮助相关企业部门和经销商对消费群体进行准确的定位和把控,使商家更有针对性地为用户提供需要的服务和产品,实现对于商业发展的促进,让人们能够享受大数据时代带给生活的便利。此外,国家和政府可以通过这个技术,对一个小区甚至一个地区进行粗略但成本很低的统计,从而帮助政府更好地了解居民的收入,进而采取一系列管理和政策上的调整。

由于简单地使用从智能电表读取的用电量信息对家庭收入进行估计的准确率不高,除了对总的用电量进行能量分解来提高准确率,也可以采用增加附加信息的数据融合方法,下面采用的便是后者的研究思路。由于房屋面积信息作为房屋的一个最为明显的静态特性是很容易获得的,因此将总的用电量信息和静态的房屋面积信息综合起来推断家庭收入情况。经过研究发现,增加了房屋面积这一信息之后,对家庭收入情况估计的准确率有了很大的提高。

1 数据准备与特征提取

1.1 数据准备

主要使用公开可用的数据集 Dataport 中的数据进行对家庭收入的估计。Dataport 数据集是由 Pecan Street 公司创建的,包含从 2012—2014 年 700 多个家庭每秒钟的总用电量数据,同时也包含了一部分家庭的基本信息调查数据^[6]。从 Dataport 数据

集中提取出元数据表、3 年的家庭用电量数据表 and 对应 3 年的家庭情况调查表,然后从这 3 组数据表中提取整合出对应样本家庭该年的总用电量情况、房屋面积以及收入情况 3 部分信息,最终得到可用的样本家庭数据 371 个。为了方便评估每个家庭收入,将家庭收入情况划分为两个类别,分别为年收入低于 10 万美元和年收入等于或者高于 10 万美元^[7]。

1.2 特征提取

从收集到的家庭总用电量信息中,提取出该年中家庭总用电量的平均值(mean use)、中位数(median use)、最大值(max use)、极差(range use)、标准差(std use)以及该年中每小时的家庭总用电量超过 2 kW 的时数(count more 2)、超过 4 kW 的时数(count more 4)、超过 6 kW 的时数(count more 6)、超过 8 kW 的时数(count more 8)、超过 10 kW 的时数(count more 10)、超过 12 kW 的时数(count more 12)、超过 16 kW 的时数(count more 16)、超过 18 kW 的时数(count more 18),总共 13 个电力特征^[8-9]。另外,将房屋面积(total square footage)作为新增加的特征,和这些电力特征一起构成 14 维的特征数据集。

图 1 和图 2 分别随机选取了两组不同的二维特征,通过散点图的形式展示了数据集中各个样本家庭的部分特征分布情况以及这些样本家庭的年收入所属类别。在图 1 中,横、纵坐标分别选取的特征是房屋面积和该年中家庭总用电量的平均值,圆圈代表该样本家庭的年收入低于 10 万美元,五角星代表该样本家庭的年收入等于或者高于 10 万美元。在图 2 中,横、纵坐标分别选取的特征是该年中家庭总用电量的标准差和最大值,三角形代表该样本家

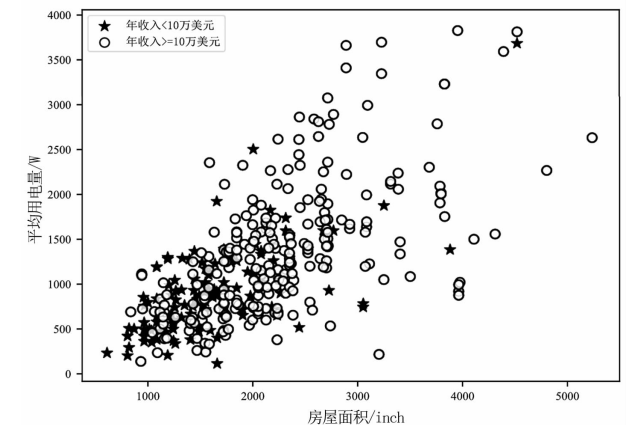


图 1 房屋面积与平均用电量二维特征数据分布散点

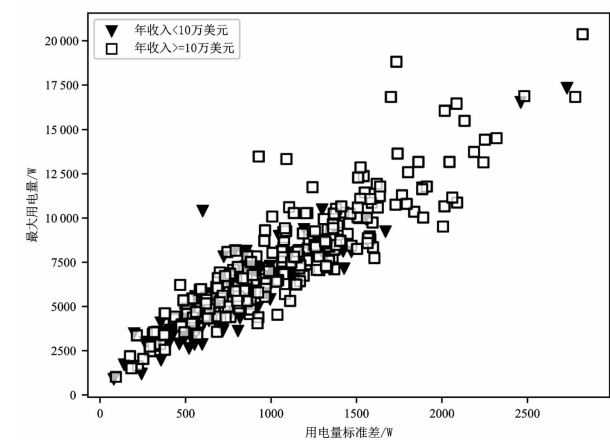


图2 用电量标准差与最大用电量二维特征数据分布散点

家庭的年收入低于 10 万美元,正方形代表该样本家庭的年收入等于或者高于 10 万美元。从两图中的数据点分布来看,数据并非线性可分的,因此无法简单地利用线性超平面将两个类别区分开。

2 实验设计与步骤

2.1 分类算法的选择

对家庭收入的估计属于机器学习的分类问题。最常见的几种机器学习分类算法有逻辑斯蒂回归(logistic regression)、支持向量机(support vector machine, SVM)、决策树(decision tree)、随机森林(random forests)、K-近邻(K-nearest neighbor classifier, KNN)等^[10]。

其中,K-近邻算法又称为一种懒惰学习算法,它通过测量不同特征值之间的距离来对目标对象进行分类^[11]。KNN 算法步骤如下:

- 1) 确定 k 的大小和距离度量;
- 2) 对于测试集中的一个样本,找到训练集中和它最近的 k 个样本。

KNN 是基于内存的方法,其优点是一旦训练集增加了新数据,模型能立刻改变。但是分类时的最坏计算复杂度随着训练集增大而增加,除非特征维度非常低。此外,需要一直保存着训练集,不像参数模型训练好模型后,可以丢弃训练集。

SVM 的主要思想就是找到空间中存在的一个能够将所有数据样本区分开的超平面,并且使得得到的样本数据到这个超平面的距离最短。SVM 能解决线性和非线性问题,因此可以分为线性和非线性两大类^[12]。

线性 SVM(linear SVM)在解决现实的分类问题时,通常与线性逻辑回归的效果近似,对于线性可分

的类别数据性能良好。

核 SVM(kernel SVM)是指在 SVM 中引入核方法,使 SVM 变为非线性分类器,从而解决线性不可分数据。常用的核函数一般称为高斯核,通常简称为

$$k(x^{(i)}, x^{(j)}) = e^{(-\gamma \|x^{(i)} - x^{(j)}\|^2)}$$

式中: γ 为一个要优化的自由参数,可以被理解为高斯球面的阶段参数,若增大 γ 的值,会产生更加柔软的决策界; k 为两个样本间的相似形函数; $x^{(i)}$ 、 $x^{(j)}$ 为两个样本。高斯核中 e 的指数范围小于等于 0,因此高斯核值域范围为 $(0, 1]$,特别地,当两个样本完全一样时,值为 1;两个样本完全不同时,值为 0^[10]。

决策树的生成是一个递归过程,训练决策树模型时,从根节点出发,使用信息增益最大的特征对数据进行分割,然后迭代此过程^[13]。决策树会将特征空间分割为矩形,因此其决策界很复杂。熵和基尼系数是决策树常用的两个度量,而且两者的结果相似,选择任何一个都是可以的。决策树直观,便于理解,具有很好的模型可解释性,对于小规模数据集很有效;但类别较多时,错误增加较快,可规模性不强。很多棵决策树集成,就叫做随机森林。

从前面可以得知,用于所研究的特征数据集并非简单的线性可分数据,因此线性逻辑回归和线性 SVM 两种算法适用性不强。而这里的数据特征维度并不低,运用 KNN 算法分类时的最坏计算复杂度和预测时的计算成本相对较高。相对来说,从各种分类算法本身的优缺点出发,拟采用决策树和核 SVM 两种算法来对样本家庭的年收入情况进行分类估计。同时,将线性 SVM 和 KNN 作为基准算法,与决策树和核 SVM 的分类效果进行对比,从而验证算法选择的合理性。

Python 的 scikit-learn 是一个专门的机器学习算法库,它提供了执行机器学习算法的模块化方案。以上这几种分类算法的模型都可以从 scikit-learn 中直接调用,简洁和高效。

2.2 估计家庭收入的步骤

2.2.1 仅通过家庭总用电量数据估计家庭年收入

步骤 1:只选取 13 个维度的电力特征组成数据样本 X ,将样本家庭的年收入类别作为要预测的目标 y 。

步骤 2:为了评估训练好的模型对新数据的预测能力,先将数据集 (X, y) 随机分为两部分:训练集占 80%,测试集占 20%。

步骤 3:对训练集中每一维度的特征计算出样本平均值和标准差,进而对数据集进行标准化,使每

一维度特征的重要性等同。

步骤 4: 调用 KNN、线性 SVM、决策树以及核 SVM 4 种不同的分类器训练模型。针对每一种分类器, 分别设置合适的模型参数和随机参数。

步骤 5: 分别计算每个模型在测试集上的分类准确率, 以此来对比和评价以上 4 种模型的性能。

步骤 6: 通过对模型进行多次的参数调整, 得到最佳的模型状态, 提高模型预测新数据的准确率。

2.2.2 增加房屋面积特征来估计家庭年收入

步骤 1: 选取电力特征和房屋面积特征共 14 个维度的特征, 组成数据样本 X , 将样本家庭的年收入类别作为要预测的目标 y 。

步骤 2: 采用同样的方法对测试集的样本家庭年收入进行预测。

步骤 3: 与 2.2.1 节对比 4 种算法模型得到的分类准确率。

2.2.3 获取最优特征估计家庭年收入

考虑到 2.2.2 节中 14 个维度的特征可能由于维度过大而出现维度诅咒的问题, 于是通过随机森林对特征重要性进行了评估, 如图 3 所示。横坐标表示 14 个特征, 纵坐标对应每个特征的重要性。从图 3 中可以看出, total square footage 是最能区分类别的特征, std use 和 mean use 次之。即重要性排名前三的特征是房屋面积、用电量标准差和用电量平均值。房屋面积和用电量往往正向相关, 面积越大, 用的电可能越多, 这也从另一个角度说明了算法的有效性和合理性。

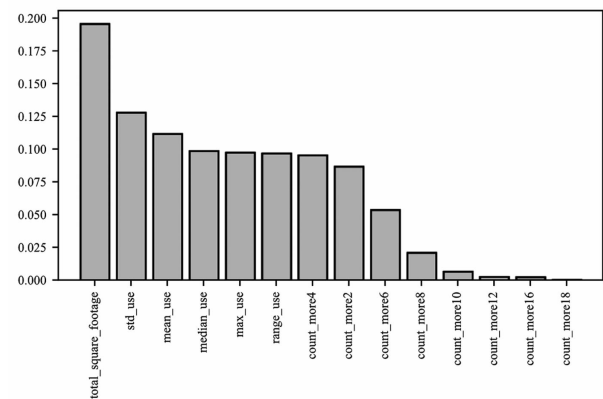


图 3 特征重要性排序

此外, scikit - learn 中的随机森林实现, 还可以基于用户给定的阈值进行特征选择。设置阈值为 0.09, 最终便选择出 7 个维度的特征作为最优特征, 即房屋面积、该年中家庭总用电量的标准差、平均值、中位数、最大值、极差和该年中每小时的家庭总

用电量超过 4 kW 的时数。

得到最优特征之后, 采用同样的方法对测试集的样本家庭年收入进行预测, 与 2.2.2 节中不进行特征选择得到的分类准确率进行对比, 验证维度诅咒的问题是否存在。

3 实验结果与分析

在图 4 中, 黑色代表只使用家庭总用电量数据来估计家庭年收入的分类准确率, 白色代表增加房屋面积特征后的分类准确率。从图 4 中可以看出, 只使用总用电量数据, 4 种算法的分类准确率都很低, 其中 KNN 的准确率相对来说是最高的, 核 SVM 次之。在增加了房屋面积特征后, 4 种算法的分类准确率普遍有了很大幅度的提高。其中, 使用核 SVM 对家庭年收入的分类准确率提高了 15%, 分类效果明显。其次是决策树算法, 使分类准确率提高了 13%。而线性 SVM 的分类准确率虽然也提高了, 却始终是 4 种分类算法中准确率最低的。可见, 增加房屋面积的信息, 确实能够提高对家庭收入估计的准确率。此外, 图 4 也验证了 2.1 节中所述的从分类算法本身的优缺点出发来选择算法的合理性, 即线性 SVM 的确不适用于所提出的数据分析。

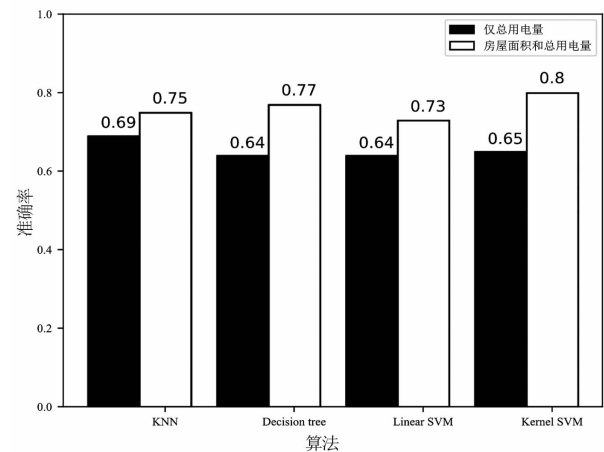


图 4 增加房屋面积特征前后的分类准确率对比

在图 5 中, 白色代表特征选择之前使用 14 个维度的特征估计家庭年收入的分类准确率, 灰色代表特征选择之后使用 7 个最优特征估计家庭年收入的分类准确率。从图 5 中可以看出, 经过特征选择, 4 种分类算法的准确率都有所提高, 但是提高的幅度并不大, 只有 1% ~ 2%。此外, 核 SVM 依然是 4 种分类算法中估计家庭年收入准确率最高的, 可以达到 0.81, 决策树算法次之, 线性 SVM 的准确率最低。而 KNN 算法的准确率时高时低, 可能与所采用的数据

样本容量较小以及样本类别不平衡等因素有关。

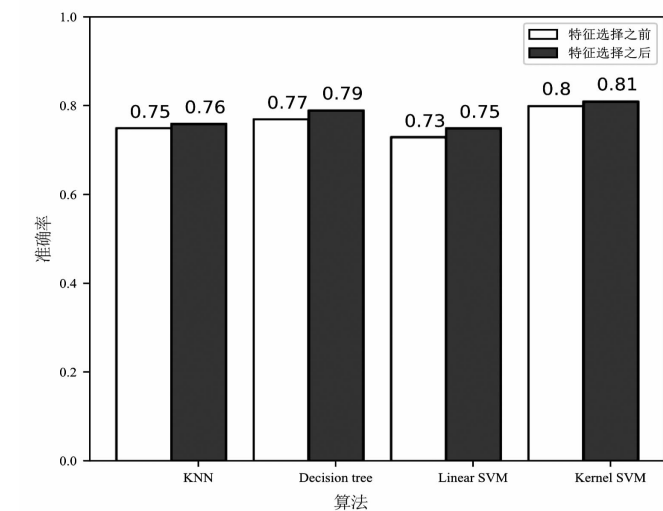


图5 最优特征选择前后的分类准确率对比

4 结 语

经过前面的研究得出以下结论:只使用总用电量信息对家庭收入估计的准确率相对较低;加入房屋面积信息之后,即使使用最基本的分类算法,也能大幅度提高对家庭收入估计的准确率。另外,在提出的4种基本的机器学习分类算法中,核SVM对于非线性可分数据的分类效果最好,决策树次之。

房屋面积信息作为房屋的一个最为明显的静态特性,不会因为受到外界影响而发生改变,具有稳定性和易捕获性的优点。用电量信息作为当今家庭中非常重要的信息之一,具有实时性的特点。综合这两种信息来推断家庭收入,无疑为今后的研究工作开拓了思路。所选用的是总用电量的信息,今后还可以尝试使用分解后各个用电器的用电量信息进行数据融合。将家庭收入划分为两个类别,今后可以尝试对家庭收入的类别作更精细的划分。同时,选用的算法仍需要不断的优化和完善。另外,所选用的数据样本规模偏小,普适意义还有待进一步提升样本规模,也是一个日后有待解决的问题^[14]。

致谢

西南交通大学电气工程学院的郑璐老师和张雪霞老师在论文的结构、撰写和算法应用方面提出了指导性建议,谨此深表感谢。

参考文献

[1] Hart G W. Nonintrusive Appliance Load Monitoring[C]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
[2] Brown R, Ghavami N, Adjrad M, et al. Occupancy Based

Household Energy Disaggregation Using Ultra Wideband Radar and Electrical Signature Profiles[J]. Energy and Buildings, 2017, 141: 134-141.
[3] C. beckel, L. Sadamori, S. Santini. Towards Automatic Classification of Private Households Using Electricity Consumption Data[C]. In Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy - Efficiency in Buildings, 2012: 169-176.
[4] Batra N, Baijal R, Singh A, et al. How Good is Good Enough? Re-evaluating the Bar for Energy Disaggregation[J]. arXiv preprint arXiv:1510.08713, 2015.
[5] Uttama Nambi, Akshay S. N., Reyes Lua, et al. LocED: Location-aware Energy Disaggregation Framework[C]. Acm International Conference on Embedded Systems, 2015.
[6] Parson O, Fishfr G, Hersey A, et al. Dataport and NILMTK: A Building Data Set Designed for Non-intrusive Load Monitoring[C]//Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2015 IEEE Global Conference on. IEEE, 2015: 210-214.
[7] 赵硕. 云计算和机器学习算法在电力负荷预测中的研究与应用[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
[8] Zeifman, Roth K. Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(1): 76-84.
[9] Chen D, Barker S, Subbaswamy A, et al. Non-intrusive Occupancy Monitoring Using Smart Meters[C]//Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems for Energy - Efficient Buildings, ACM, 2013: 1-8.
[10] Raschka S. Python Machine Learning[M]. Packt Publishing, 2014.
[11] Scott J, Bernheim Brush A J, Krumm J, et al. Preheat: Controlling Home Heating Using Occupancy Prediction[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing, ACM, 2011: 281-290.
[12] 虞尚智. 机器学习算法在短期电力负荷预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2231-2234.
[13] 王志超. 住宅用电负荷的非侵入式监测方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
[14] Humala B. Semi-supervised Energy Disaggregation Framework Using General Appliance Models[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2018.

作者简介:

张玉蕾(1994),在读硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术;

王谷城(1983),硕士研究生,研究员,研究方向为智能传感器、物联网、机器学习等。

(收稿日期:2019-04-04)

地理数据可用性评估指标算法及模型构建探究

叶水勇

(国网黄山供电公司, 安徽 黄山 245000)

摘要:由于共享性和安全性,要对地理数据进行处理,其中数据脱密是主要手段。以处理后的地理数据的可用性为研究目的,分析了脱密处理对数据的影响,在此基础上构建了地理数据可用性评估模型。该模型从可视化效果、可靠性、有效性3个方面对处理后的地理数据进行综合评估,得到地理数据可用性综合评估模型及评分等级,可以综合评估处理后的地理数据是否可用、数据处理方法(脱密算法)是否可靠。

关键词:地理数据;脱密算法;地理数据可用性;可视化效果;可靠性

中图分类号:P413 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0065-07

Research on Geographic Data Availability Evaluation Index Algorithm and Model Construction

Ye Shuyong

(State Grid Huangshan Electric Power Supply Company, Huangshan 245000, Anhui, China)

Abstract: Because of sharing and security, geographic data need to be processed, and data decryption is the primary means. Based on the availability of the processed geographic data, the impact of decryption on the data is analyzed, and a geographic data availability evaluation model is constructed. The model comprehensively evaluates the processed geographic data from three aspects of visualization effect, reliability and effectiveness to obtain an evaluation model and rating scale. Through the proposed model, it is possible to comprehensively evaluate whether the processed geographic data is available and whether the data processing method (decryption algorithm) is reliable.

Key words: geographic data; decryption algorithm; availability of geographic data; visual effect; reliability

0 引言

地理数据广泛应用于电力行业各类业务,包括导航地图、遥感影像、电网设备、传感器、用户等的位置信息。地理数据隐含高精度空间信息,因此地理数据在共享过程中存在着较大的安全隐患^[1-2],应进行脱密等处理。对涉密地理数据进行脱密处理包括数据抽取、几何精度降低、属性和高程处理等。其中,几何精度脱密是指使用专业脱密技术进行位移和空间位置精度随机干扰,使得脱密后的数据不易纠正恢复,避免要素泄密。

完成几何精度脱密的地理数据,是否仍然能够满足业务应用,需建立地理数据可用性评估模型^[3]。通过分析地理信息数据及电网数据的使用和展示特点,构建一个综合评估模型,包括可用性评估内容分

析、确定可用性评估量化因子、确定可用性评估等级等。模型用于评估脱密后数据或者通过其他变形手段变化的地理数据,是否满足应用场景需求。

1 地理数据可用性理论基础

1.1 脱密地理数据可用性问题的来源

地理数据的可用性是指地理数据被使用时,所表现出的有效性、效率和满意度^[4-5]。脱密地理数据可用性问题的来源分为两部分:空间数据质量问题和脱密过程引入的可用性问题。

1.2 脱密对地理数据的影响

地理数据几何精度脱密是对地理数据的离散点坐标进行变换,其实质是建立原始地理坐标到目标地理坐标的函数映射。

几何精度脱密模型主要包括线性模型、非线性

模型、混合模型、神经网络^[6]。无论是采用哪种脱密模型,都能对地理数据加以不均匀的扰动,产生一定程度的影响,达到保密效果。脱密技术对地理数据的影响包括对精度的影响、对空间关系的影响以及对数据可视化效果的影响。

脱密技术对精度的影响体现在位置精度和图形精度两方面。位置精度是指空间数据表示的对象位置与现实世界中对应实体位置之间的准确度。图形精度是指空间数据中表示的对象形状与现实世界中对应实体形状之间的差异程度。

脱密技术对空间关系的影响主要体现在对空间现象的几何特性引起的空间关系,如距离、方位、连通性、相似性等。

脱密技术对地理数据可视化效果的影响,主要体现在用户对地图上以符号形式表达的地理环境信息的认识和解译的过程。由于脱密处理通常采用的是非线性方式,其对地理数据可视化产生相对较大的影响。

1.3 地理数据可用性评估内容

地理数据可用性的评估内容主要包括数据可视化效果、数据在使用时的可靠性和有效性3个方面,如图1所示。

可视化效果是指地理数据经过变化处理后所体现出来的整体相似程度^[7-8]。较低的相似度使得用户在认知信息的过程中产生错误的理解,对用户所处位置与环境产生错误的认知,从而使得地理数据的可用性降低。

使用变化处理后的地理数据时,可靠性是指要素之间的相对位置准确度。可靠性理论是建立在经典概率论基础上的,主要考虑的是随机不确定性,认为变化前后保持要素之间的相对位置是一个随机事件。

有效性则是指变化后地理数据所能提供服务正确生效的程度。对变化处理后地理数据的有效性评估主要指地理数据变化前后空间相关关系一致性。

1.4 地理数据可用性评估步骤

地理数据可用性评估分为3个步骤:1)对变化前后地理数据中要素的各个特征进行描述;2)比较变化前后要素的各特征,根据提出的评估指标依次对其进行计算,可得各指标的评估结果;3)根据特定应用特征分别赋予各指标相应的权重,在此基础上整合各指标的评估结果得到最终的评估结果。如

图2所示。

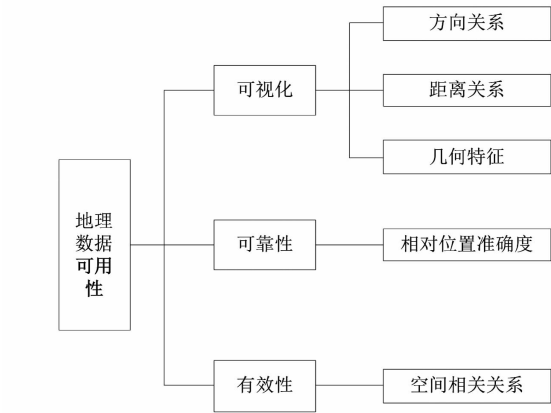


图1 地理数据可用性评估内容

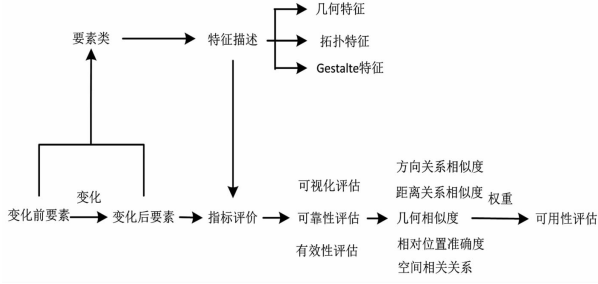


图2 地理数据可用性评估概念框架

2 地理数据可用性评估指标的度量方法

2.1 地理数据可视化度量

在地理数据中,通常用点、线、面3类数据表示各类地理实体,从而可以将地理数据划分为点群、线群和面群3类空间群组目标^[9]。对于不同的空间群对象,结合变化处理对数据的影响,分别采用不同的度量方法。

2.1.1 点群目标的相似性度量

1)点群目标方向关系相似性度量

现实空间的点群分布,通常是描述带有一定的方向偏离的地理现象^[10-11]。度量方法为:对目标点群生成标准差椭圆,计算其方向偏离程度来度量点群目标方向相似度,并在此基础上,根据目标点群的标准差椭圆的长、短轴之间的关系来进行点群目标距离相似度的度量。

标准差椭圆的圆心利用算术平均中心计算得到,公式为

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \tag{2}$$

式中： (x_i, y_i) 为每个要素的坐标； $(\bar{X}, \bar{Y})$ 为算术平均中心； (SDE_x, SDE_y) 为标准差椭圆的圆心。

标准差椭圆的方向以 x 轴为准，正北方向为 0° ，顺时针旋转 θ ，计算公式为

$$\theta = \arctan \frac{A+B}{c'} \tag{3}$$

$$A = (\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \tilde{y}_i^2) \tag{4}$$

$$B = \sqrt{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i - \tilde{y}_i)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \cdot \tilde{y}_i)^2} \tag{5}$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \cdot \tilde{y}_i \tag{6}$$

标准差椭圆的长、短轴的长度计算公式为

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n-2}} \tag{7}$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta + \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n-2}} \tag{8}$$

对空间点群目标生成标准差椭圆，点群目标的主要分布方向可用椭圆的长轴方向进行表示。那么该方向与 x 轴的夹角 θ 的取值范围为 $[0, \pi]$ ，则对标准差椭圆夹角分别为 θ_1 和 θ_2 的两个点群来说，其方向相似度为

$$SIM_{dire} = |\cos(\theta_1 - \theta_2)| \tag{9}$$

当两点群的标准差椭圆方向相互垂直时，点群之间的空间方向相似度为 0；当两点群的标准差椭圆在同一方向时，其之间的空间方向相似度为 1。

2) 点群要素距离关系相似性度量

点群的距离关系可用点群中要素的集中程度来表示，采用标准差的长、短轴的距离之比来描述^[12]。对标准差椭圆长、短轴分别为 a_1 、 b_1 和 a_2 、 b_2 的两个点群来说，定义其距离相似度为

$$SIM_{dist} = 1 - \left[\frac{\left| \frac{b_1}{a_1} - \frac{b_2}{a_2} \right|}{\max(\frac{b_1}{a_1}, \frac{b_2}{a_2})} \right] \tag{10}$$

3) 点群要素几何特征相似性度量

对于空间点群要素的几何特征描述，主要是通过点群分布范围来对空间点群目标的几何相似性进行度量^[13]。考虑到分布范围相似度的度量需要具

有旋转、平移和缩放不变性，提出了一种形状描述函数来计算面要素之间的形状相似度。

$$SIM_{scope} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^n (f_1(l_i) - f_2(l_i))^2}}{\max(f_1(l_i), f_2(l_i))} \tag{11}$$

式中， $f(l_i)$ 为点群最小外包多边形的描述参数，即点群外包多边形各点到形心点的距离。

4) 点群要素综合相似性度量

考虑到空间要素间的空间关系和几何特征分布，通过其对空间点群要素相似度的影响进行分析，因此对前述 3 个相似度度量指标分别赋以 0.4、0.3、0.3 的权值，得到点要素的综合相似度计算公式为

$$S_{poi} = 0.4SIM_{dire} + 0.3SIM_{dist} + 0.3SIM_{scope} \tag{12}$$

2.1.2 线群要素的相似性度量

1) 线群要素方向关系相似性度量

利用解析几何的方法，采用独立于空间线状要素之外的直接坐标系对线状要素整体进行统计，计算整个线群要素的方向均值，利用方向均值的象限角度对线群要素的空间方向关系进行定量描述^[14]。方向均值的计算公式为

$$\tan \theta_R = \frac{\sum \sin \theta_v}{\sum \cos \theta_v} \tag{13}$$

式中： θ_v 为各个线要素的方向； θ_R 为线群要素的方向均值。

若变化前后线群要素的方向均值分别为 θ_1 与 θ_2 ，那么两组线群要素的空间方向关系相似度的计算方法为

$$Sim_{dir} = \cos |\theta_1 - \theta_2| \tag{14}$$

2) 线群要素距离关系相似性度量

用空间线群要素的空间距离关系相似度来描述各个要素之间方向关系的不一致性程度^[15]。用环形方差来对方向距离关系进行度量。计算公式为

$$S_v = 1 - \frac{OR}{n} \tag{15}$$

式中： n 为组成线群矢量集 v 的矢量个数； OR 为线群距离关系值， $OR = \sqrt{(\sum \sin \theta_v)^2 + (\sum \cos \theta_v)^2}$ 。

环形方差即线群距离关系的值域在 0 和 1 之间。当 $OR = 0$ 时，表明线群的集中方向之间的距离为 0；当 $OR = 1$ 时，认为各要素与线群的整体方向的距离最远。那么距离相似度计算方法为

$$Sim_{dist} = 1 - \frac{|S_{v1} - S_{v2}|}{\max(S_{v1}, S_{v2})} \tag{16}$$

3) 线群要素几何特征相似性度量

线群要素几何特征可用曲折度描述。线的曲折度可简单定义为线的实际长度和其直线长度的比值^[16]。实际长度用坐标串中点与点之间的直线距离累加来近似计算。其计算公式为

$$N = \frac{\sum L}{\sum S} \quad (17)$$

式中: L 为线要素的长度; S 为线要素首尾端点的直线距离。那么可以计算线群要素 1 和要素 2 的几何相似度, 计算方法为

$$\text{Sim}_{\text{geo}} = 1 - \frac{|N_1 - N_2|}{\max(N_1, N_2)} \quad (18)$$

4) 线群要素综合相似性度量

考虑到空间要素间的空间关系和几何特征分布, 通过其对空间线群要素相似度的影响分析, 分别对前述计算出的 3 个相似度分别赋 0.4、0.2、0.4 的权值。那么线要素的综合相似度计算公式为

$$S_{\text{pline}} = 0.4\text{Sim}_{\text{dire}} + 0.2\text{Sim}_{\text{dist}} + 0.4\text{Sim}_{\text{geo}} \quad (19)$$

2.1.3 面群要素的相似性度量

1) 面群要素方向关系、距离关系相似性度量

空间面群要素多为比较规则的面状要素, 因此可生成其最小面积外接矩形, 如图 3 所示。该面状要素的方向就是其最小外接矩形的最长边的方向, 则可将二维的面状要素降维至一维的线状要素^[17]。

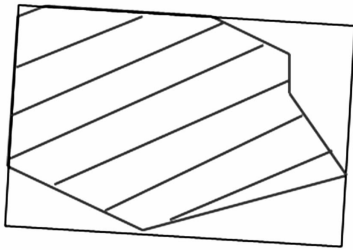


图3 多边形最小面积外接矩形

2) 面群要素几何特征相似性度量

面状要素的几何特征值采用紧致度来描述^[18]。紧致度用来描述一个给定的多边形区域离某一特定形状的面的偏离程度。面的紧致度采用其面积与周长之间的比率描述。对于多边形 X , 其紧致度 $C(X)$ 为

$$C(X) = \frac{14 \sum_{i=1}^n \text{Are}(X_i)}{n(\sum_{i=1}^n P(X_i))} \quad (20)$$

式中: $P(X_i)$ 为多边形 X_i 的周长; $\text{Are}(X_i)$ 为多边形的面积。那么, 空间面群要素的几何相似度为

$$\text{Sim}_{\text{geo}} = 1 - \frac{|C_2 - C_1|}{\max(C_2, C_1)} \quad (21)$$

3) 面群要素综合相似性度量

考虑到空间要素间的空间关系和几何特征分布, 通过其对空间线群要素相似度的影响分析, 对前述计算出的 3 个相似度分别赋 0.3、0.3、0.4 的权值。面要素的综合相似度计算公式为

$$S_{\text{pgone}} = 0.3\text{Sim}_{\text{dire}} + 0.3\text{Sim}_{\text{dist}} + 0.4\text{Sim}_{\text{geo}} \quad (22)$$

2.1.4 地理数据的综合相似性度量

人们是基于背景要素来获取其所处的空间位置, 因此在对地理数据变化前后整体相似性度量时, 应分别对点、线、面要素赋予不同的权值, 即 0.2、0.3、0.5。那么, 变化前后地理数据的可视化度量模型为

$$\text{Sim} = (0.2S_{\text{poi}} + 0.3S_{\text{pline}} + 0.5S_{\text{pgone}}) \times 100 \quad (23)$$

2.2 地理数据可靠性度量

相对位置准确度就是各地理要素在变化前后, 其相对位置变化程度^[19]。变化前随机选取多边形区域 S_i , 在此区域中随机选取 m_i 个点, 经过处理后, 得到对应的 S'_i, m'_i , 其中处理后仍在 S'_i 区域中的点数为 m''_i 。相对位置准确度计算公式为

$$A_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m''_i}{m'_i} \quad (24)$$

式中, n 表示随机选取的区域个数。

那么, 变化前后地理数据可靠性度量模型为

$$W = 100 \times A_c \quad (25)$$

式中, W 表示地理数据可靠性综合评分。

2.3 地理数据有效性度量

变化前后空间相关关系一致性是指要素间的空间相关关系在处理后得到的保持和延续。因为组成线、面的点空间相关关系不变, 则线、面的空间相关关系也保持不变。因此, 在采样点的规模足够大的情况下, 空间相关关系一致性只考虑点要素的空间相关关系。

设抽象前的地理空间场景为 DB , 其中的空间要素集合为 $OB_1, OB_2, \dots, OB_n$, 各个空间要素之间的拓扑关系分别为 $r(OB_i, OB_j) (1 \leq i < j \leq n)$; 变化后的地理空间场景为 DA , 其中的空间要素集合为 $OA_1, OA_2, \dots, OA_n$, 各个空间要素的拓扑关系 $r(OA_i, OA_j) (1 \leq i < j \leq n)$, 不妨设变化过程中, 两个空间场景中的要素之间是一一对应关系。

在对变化前后地理数据进行空间相关关系评估时, 首先确定评估目标, 并确定对应的空间要素。对

于确定的空间场景 DB 和 DA,其中任意两个要素之间的关系 $r(OB_i, OB_j)$ 和 $r(OA_i, OA_j)$ 都是已知的,那么就可以将它们的关系进行比较,判断它们之间的空间相关关系是否得到保持。若关系等价的,则认为空间相关关系一致,此时空间相关关系一致性为 1。若关系不等价,则认为空间相关关系不一致,此时一致性为 0,即有:

$$\begin{aligned} EQU(r(OA_i, OA_j), r(OB_i, OB_j)) \\ = \begin{cases} 0, & \text{当} r(OA_i, OA_j) \text{不等价于} r(OB_i, OB_j) \\ 1, & \text{当} r(OA_i, OA_j) \text{等价于} r(OB_i, OB_j) \end{cases} \end{aligned}$$

(26)

这样通过计算变化前后地理数据要素之间的空间相关关系一致性程度,可以确定变化前后场景 DB 和 DA 之间的空间相关关系一致性大小。计算公式为

$$E = EQU(DB, DA)$$
$$= \frac{\sum_{j=i+1}^n \sum_{i=1}^{n-1} EQU(r(OA_i, OA_j), r(OB_i, OB_j))}{\sum_{j=i+1}^n \sum_{i=1}^{n-1} 1}$$

(27)

那么地理数据的有效性度量计算公式为

$$Eff = E \times 100$$

(28)

3 地理数据可用性评估模型

地理数据可用性评估的目的是对地理数据的处理(脱密等)结果进行分析与评估,其评估结果可表明处理后的地理数据的可用性,可用性评估越高说明其处理技术越优,处理结果越准确^[20]。可将其反馈给处理(脱密等)过程中的各个环节,对处理技术进行调控和整改,从而得到高可用性的处理成果。

根据地理数据的可用性评估内容,可用性评估涉及到可视化效果、可靠性及有效性三方面,因此地理数据可用性评估应综合考虑这三方面的影响。由于各个指标在评估中的重要性并不完全相同,可赋予一定的权重对地理数据可用性进行综合评估。

在对地理数据进行可用性综合评估前,要对其进行可用性检测,规则如下:

1)地理数据可视化效果评价指标,在评估过程中,综合相似度计算结果低于 85 时,认定数据视觉效果严重失真,评定该地理数据可用性为不合格。

2)地理数据可靠性评价指标,采样规模庞大时,结果低于 95,则会出现变化前后地理数据中大

量点、面相对位置关系不一致的情况,不能满足电力行业的应用需求,认定为不合格。

3)地理数据有效性评价指标,在采样规模庞大时,结果低于 95,则会出现变化前后地理数据中大量点、点空间相关关系不一致的情况,导致线、面的空间相关关系也出现不一致的情况,对地理数据的使用产生误导,认定为不合格。

除了上述指标评价之外,对地理数据进行敏感性检查,若存在不符合国家相关规定的要素,则评定该地理数据可用性为不合格。

当对地理数据的可用性评估通过以上检测时,可对地理数据进行综合评估,基于业务需求与相关标准以及处理技术特点,分析可视化效果、可靠性、有效性对地理数据可用性的影响,分别对其赋予权重并进行计算,其计算方式为

$$Q = Sim \times 0.2 + W \times 0.4 + Eff \times 0.4$$

(29)

式中:Sim 表示可视化效果度量结果;W 表示可靠性度量结果;Eff 表示有效性度量结果。

根据相关要求与规定及用户需求,将地理数据可用性分为 4 个等级,分别是优秀、良好、合格和不合格。各可用性等级对应的评分值见表 1。

表 1 地理数据可用性的平直区间表

分值区间	优秀	良好	合格	不合格
评分值/%	[90,100]	[75,90)	[60,75)	[0,60)

4 地理数据可用性评估实验

4.1 概述

实验所采用的数据为某公园附近 1:10 000 地图地理数据,实验数据所涉及的区域约 1.93 km²,采用相对独立坐标系,按要素类型可分为点要素、线要素、面要素,如图 4 所示。

4.2 实验与分析

首先对脱密地理数据进行检查,检查的内容包括数据敏感要素、数据格式、数据组织、完整性、逻辑一致性、位置准确度、专题准确度、时间准确度等等。然后依据可用性度量模型将检测结果转化为对地理数据可用性元素的度量,最后计算出地理数据可用性综合评估结果。下面以模型 A(自主研发地理数据脱密算法)为例进行计算说明。

息公共服务平台数据脱密方法[J]. 现代测绘, 2012, 35(6): 42-44.

[14] 黄嵩. 拖库撞库对数据安全的威胁及应对[J]. 信息与电脑, 2015, 12(22): 131-132.

[15] 朱克, 彭昌余. 电力用户信息脱敏研究[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(26): 10-12.

[16] 陈俊文. 基于 X3D 的三维地理数据模型设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[17] 刘行, 杨维永. 能源互联网背景下的企业运维内控审计技术探索与实现[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(5): 22-27.

[18] 杨帆, 李显忠, 潘可佳, 等. 基于大数据分析的供电营业厅运营效率评估[J]. 电力信息与通信技术, 2017,

15(2): 8-13.

[19] 邢宇恒, 张冰, 毛一凡. 数据脱敏在海量数据系统中的应用[J]. 电信科学, 2017, 33(Z1): 8-14.

[20] 陈毅波, 陈乾. 基于大数据技术的电网运营分析决策系统研究[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(8): 128-131.

[21] 徐建忠, 张亮, 李娇娇. 数据智能分类技术在数据治理中的应用研究[J]. 信息安全与通信保密, 2016, 23(6): 88-90.

作者简介:
叶水勇(1964), 高级工程师, 从事电力行业信息化研究、开发和应用工作。

(收稿日期: 2019-05-28)

(上接第 59 页)

5 结论与建议

5.1 结论

1) 四川天然气产量高, 且在冷热电分布式能源、城市燃气和压缩天然气车等终端消费市场上应用广, 其将成为电力公司的一个有力竞争对手。长期趋势来看, 四川天然气消耗量增速每提高 1 百分点, 将对用电量带来 0.27 百分点下降的影响。但由于天然气应用的基础配套设施相对薄弱, 短期对电力能源的威胁还不明显。

2) 从趋势回归分析结果看, 石油终端消耗量每提高 1 百分点, 对用电量将带来 0.068 百分点下降的影响。但由于短期内石油终端消费表现出下行的态势, 对电力能源的影响不明显。此外, 需要关注传统油企业向综合能源公司转型的动向和进展, 如果油企业转型成功, 则电力能源的竞争压力急剧增加。

3) 新能源汽车产业发展短期受制约, 长期市场前景较好, 有利于推进“以电代油”进程。

4) 分布式风光发电项目由于规模小、建设成本高、价格劣势等原因, 短期内对电力公司影响非常有限。但如果分布式能源技术进步、成本下降、就地消纳成效突出的话, 则对电力公司产生区域性的替代压力。

5.2 建议

电力公司需基于自身现状, 充分发挥优势, 积极谋求转型, 实施发展突破型战略。一是落实“宜电则电”原则, 多领域推广电能替代。短期, 针对天然气发展瓶颈, 利用网络、价格手段, 大力推进与天然气的替代竞争; 中长期, 落实“宜电则电”原则, 布局

多领域电能替代, 特别是针对冷热电三联供等新型生产经营模式, 尝试积极介入。二是开拓新能源汽车增量市场, 探索增量配电园区“风光发电 + 充电桩 + 储能”一体化建设模式^[5], 打造新的增长点。合理布局充电桩、充电站, 鼓励社会多方投资进入充电桩建设运营领域、加强充电桩联网监测与维修, 为打造智慧车联网生态圈奠定基础。三是推动智能电网建设, 布局多能互补综合能源供应系统^[6]。按“互联网 + 能源”的思路, 构建能源大数据管理运营主体, 培育增值服务新型业务。以智能电网为基础, 布局多能互补综合能源供应系统, 增强综合能源服务功能。

参考文献

[1] 四川省人民政府. 四川省“十三五”能源发展规划[EB/OL]. <http://www.sc.gov.cn/zcwj/xxgk/Articles/10000000/2017/03/01/20170301144602-892297.pdf>.

[2] 赵奎. 天然气分布式能源系统及其应用探讨[J]. 应用能源技术, 2012(9): 11-14.

[3] 唐士芳, 张志鹏, 马宏权, 等. 冷热电三联供系统移峰填谷作用分析: 以上海世博后续开发 A 片区为例[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(1): 40-43.

[4] 胡芳. 大型地面光伏电站发电成本分析[J]. 能源与节能, 2013(10): 46-47.

[5] 曹凌捷. 光储充一体化电站建设关键技术研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(6): 746-749.

[6] 董振斌, 蒯狄正. 多能互补集成优化能源系统的研究与实践[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 46-49.

作者简介:
沈军(1968), 高级经济师, 研究方向为企业运营管理。
(收稿日期: 2019-07-04)

基于行波特征量与堆叠自动编码器的 电缆早期故障定位方法

李成升, 于 洋

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518052)

摘 要: 电缆由于不易受天气影响及可靠性高等优点, 在配电网中的使用越加广泛。但是, 随着电缆运行年限的增加, 电缆会因局部放电等影响而发生故障。电缆早期故障作为永久性故障的前兆, 对其进行识别和定位是提高电网安全性的重要方法。由于过电流扰动信号在时频域下包含丰富的暂态信息, 提出了行波特征量与堆叠自动编码器相结合的电缆早期故障定位方法。首先利用 S 变换对电流信号进行处理, 提取行波等特征量, 并将其作为输入数据对堆叠自动编码器进行训练, 利用训练好的网络, 正确定位早期故障发生的区段。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型获得仿真数据, 结果表明, 所提的方法具有较高的准确率和较好的泛化性能。

关键词: 电缆早期故障; 行波; S 变换; 堆叠自动编码器; 特征提取

中图分类号: TM755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954 (2019) 04 - 0072 - 08

Detection and Location of Incipient Cable Fault Section Based on Traveling Wave Feature and Stacked Automatic Encoder

Li Chengsheng, Yu Yang

(Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518052, Guangdong, China)

Abstract: Cables are more and more widely used in distribution networks due to their high reliability and not easily affected by weather. However, with the increase of service life of the cable, the cable will fail due to partial discharge and other effects. Incipient cable fault is a precursor to permanent faults. It is an important way to improve grid security for identifying and locating incipient cable fault. Because the overcurrent disturbance signal contains rich transient information in the time - frequency domain, a method of locating incipient cable fault section is proposed using traveling wave feature and stacked automatic encoder (SAE) together. Firstly, the current signal is processed by S - transform, and the features are extracted, which are used as the input of stack automatic encoder. The well - trained network can correctly locate the incipient cable fault section. The simulation data is obtained by constructing the simulation model in PSCAD/EMTDC. The results show that the proposed method has higher accuracy and better generalization performance.

Key words: incipient cable fault; traveling wave; S - transform; stacked automatic encoder; feature extraction

0 引 言

随着城市面积的不断扩张, 电缆在高中压配电网所占的比重越来越高。随着电缆运行年限的增加, 电缆的绝缘电阻逐渐减小, 局部放电逐渐演变成电缆早期故障; 早期故障随绝缘电阻的下降会更加频繁地发生, 直到绝缘失效, 电缆发生永久性故障, 引起意外停电事故^[1-2]。在发生永久性故障之前, 即电缆处于早期故障易发期时, 判断电缆的健康状况并进行故障区段定位, 将电缆存在隐患的区段进行更换, 以防发生

意外停电和不必要的经济损失, 对电网安全稳定的运行以及电缆寿命的延长有重要意义。

目前国内外对电缆早期故障的检测和定位进行了相关的研究。文献[2]基于小波变换, 将电流信号经小波分解后分成不同频段, 利用高频信息和低频信息识别和检测早期故障; 文献[3]将电流数据进行小波包分解, 把结果作为自组织映射神经网络 (self organizing map, SOM) 的输入向量, 对数据进行学习聚类, 实现对电缆早期故障严重程度的评估, 取得比较好的效果; 文献[4]对地下配电线路的现场数据进行时频域分析以确定故障参数, 并描述了电

缆早期故障的特点,揭示了这种自清除故障逐渐发展过程中的特征;文献[5]利用小波奇异性检测和贝叶斯变点分析来检测早期故障,通过谐波分析和分类器将早期故障区别于电容器投切扰动;文献[6]采用多尺度小波变换提取早期故障电流特征量组成复合判据,再根据参考样本与待测样本之间的灰色关联度识别电缆早期故障;文献[7]提出通过检查故障发生前后负载的一致性,叠加故障分量与接地电流之间持续时间的一致性,来判断早期故障的发生相位和持续时间,为早期故障检测模块的跳闸和报警功能提供设置依据;文献[8]指出应将故障处的电弧电压考虑在内,搭建半周波早期故障单相等值电路,建立算法计算测量端到故障点处的电感,实现故障定位;文献[9]考虑了变电站侧的电感,在瞬时故障发生期间从故障电压和故障电流中分离出净故障电压和电流,通过在故障点注入负电压来表示早期故障的自清除状态,并对线路进行简化,计算线路自感值,以此确定早期故障位置;文献[10]利用单端测量的电压和电流,提出一种考虑电缆电容和负载对距离估计影响的最小二乘拟合方法的改进;文献[11]则将电缆早期故障假设为电弧故障,计算故障电压总畸变率并与参考值比较,判断是否为早期故障,再计算电弧电导判断故障距离。这些基于时域分析的方法,大多对线路都进行一些简化的假设,在使用上有一定局限性。文献[12]给出区分了低压网络电缆不同故障的方法,并结合时域反射法和暂态记录系统对电缆早期故障或者间歇性故障进行定位。

下面提出了基于行波特征量与堆叠自动编码器的电缆早期故障定位方法。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建电缆早期故障模型,对获得的线路首端电流仿真数据进行处理,引入相模转换得到电流信号的模分量,从中提取行波信息,并且对信号进行 S 变换获取信号的模时频矩阵,进行早期故障检测;分析获得早期故障位置信息;最后利用提取的特征对堆叠自动编码器进行训练,使其能对早期故障进行准确地识别和区段定位。

1 电缆绝缘老化原因与早期故障的特征分析

1.1 电缆绝缘老化原因和形态

当电缆制造质量好、运行工况良好且不受外力

破坏时,电缆的使用寿命很长。但实际运行中,由于电缆本身在材料、制造和敷设过程中难免存在缺陷,加上可能受到的外力挤压或者破坏,受环境中电、热、化学等因素影响,电缆会发生不同程度的绝缘老化。表 1 给出 XLPE 电缆绝缘老化原因和形态。

表 1 交联聚乙烯电缆绝缘老化原因和老化形态

老化原因	老化形态
电效应(运行电压、过电压、过负荷、直流分量)	局部放电老化、电树枝老化、水树枝老化
热效应(温度异常、冷热循环)	热老化、热机械老化
化学效应(化学腐蚀、油浸泡)	化学腐蚀、化学树枝
机械效应(机械冲击、挤压外伤)	机械损伤、电-机械复合老化

在局部高电场强度作用下,杂质、水分和气隙等缺陷的存在会在绝缘层中形成树枝状损伤,即为电树枝和水树枝的形成;绝缘中的硫化物和铜导体反应生成硫化铜和氧化铜等,并在绝缘层中呈树枝化生长,即为化学树枝。树枝状的局部损伤会进一步加强局部放电,进而发展成为电缆早期故障,最终绝缘失效演变成为永久性故障。图 1 给出了老化原因和老化形态间的关系。

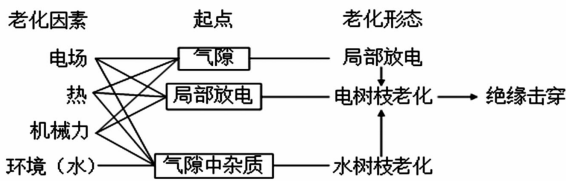


图 1 XLPE 电缆绝缘老化原因和老化形态之间的关系

1.2 电缆早期故障机理与特征

电缆故障是一个逐步发展的过程,以自清除故障为先兆,并最终演变成永久性故障。这种现象在电缆接头中非常常见,水分渗入后会导致绝缘损坏。电弧产生会蒸发水分,产生的高压蒸汽会熄灭电弧,使故障自清除。而电缆早期故障持续时间小于继电保护装置检测和动作时间,所以过电流保护装置不会动作。即使设置较低的整定值,保护装置也会受其他扰动影响。这种情况可能持续几个小时、几天、几个月甚至更久,发生的频率随时间的推移而增加。早期故障最初可能只发生一两次,但在其发展成为永久性故障之前,故障频率会迅速增加^[1-3]。

电缆早期故障通常为单相接地故障,是同一相永久故障的前兆。典型的早期故障主要分成两类:半周波故障和多周波故障。半周波早期故障发生在

电压峰值附近,持续大约四分之一周波,电弧在电流过零点熄灭,故障自动清除。多周波早期故障也发生在电压峰值附近,持续1~3个周波,故障同样在电弧消失时自清除。图2给出了电缆两种早期故障发生时由线路首端测量得到的相电压、电流波形。从图中可以看出,早期故障发生时,故障相线路首端电压突然下降,而故障相线路首端电流突然瞬时增大。在故障清除后,电压、电流均恢复正常水平。

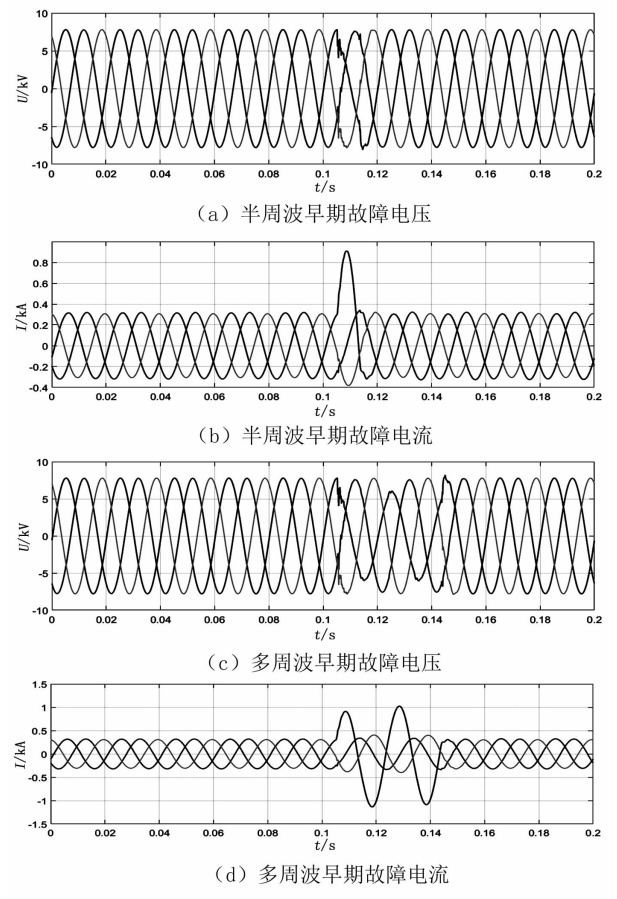


图2 电缆早期故障波形

2 基于电缆早期故障定位的行波特征量提取

2.1 多相导线波过程及解耦相模转换

在实际系统中,三相线路间存在电磁耦合,如图3所示,各相的波动方程并不相互独立,不能仅仅利用单导线等值电路进行求解。

均匀传输线方程为

$$-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}}{\mathrm{d}x}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}\tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{U}=[U_a\ U_b\ U_c]$ 为三相电压相量; $\boldsymbol{I}=[I_a\ I_b\ I_c]$ 为三相电流相量; $\boldsymbol{Z}$ 为线路阻抗矩阵。

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}\tag{2}$$

式中,对角线元素为单位长度线路自阻抗,非对角线元素为单位长度线路互阻抗。

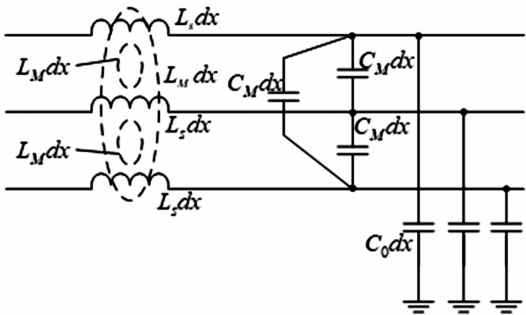


图3 三相线路耦合

为消除线路电磁耦合的影响,通过相模转换将具有耦合关系的相分量转换成不具耦合关系的模分量。相模转换关系为 $\boldsymbol{U}_s=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{U}$, $\boldsymbol{I}_s=\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{I}$,代入公式(2)得到

$$-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{S}\boldsymbol{U}_s}{\mathrm{d}x}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{I}_s\tag{3}$$

$$-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{U}_s}{\mathrm{d}x}=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{I}_s=\boldsymbol{Z}_s\boldsymbol{I}_s\tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{U}_s=[U_\alpha\ U_\beta\ U_0]$ 为电压模分量; $\boldsymbol{I}_s=[I_\alpha\ I_\beta\ I_0]$ 为电流模分量。

α 和 β 为线模分量; U_0 和 I_0 为零模分量;当选择凯伦布尔变换时,变换矩阵 $\boldsymbol{S}^{-1}$ 和 $\boldsymbol{Q}^{-1}$ 为

$$\boldsymbol{S}^{-1}=\boldsymbol{Q}^{-1}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\tag{5}$$

电压模分量和电流模分量为

$$\boldsymbol{U}_s=\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1/3(U_a-U_b) \\ 1/3(U_a-U_c) \\ 1/3(U_a+U_b+U_c) \end{bmatrix}\tag{6}$$

$$\boldsymbol{I}_s=\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1/3(I_a-I_b) \\ 1/3(I_a-I_c) \\ 1/3(I_a+I_b+I_c) \end{bmatrix}\tag{7}$$

2.2 特征量提取

由于电缆发生早期故障时,故障点产生行波向母线传播,到达母线时会引起电压或电流的突变^[13]。利用S变换,可以对信号各个频率分量进

行分析,得到对应的幅值变化信息。首先对线路首端检测到的电流信号进行相模转换(凯伦贝尔变换),得到线模分量和零模分量。由于电流突变时刻包含丰富高频分量,集中体现在复时频矩阵的频率较高的行中,选取线模分量和零模分量的电流突变时刻前后一段时间进行 S 变换。

2.2.1 行波特征量的提取

S 变换是由地球学家 R. G. Stockwell 在 1996 年提出的一种加窗傅里叶变换分析方法^[14]。S 变换最早是用于地震信号的分析,它提供了一种频率相关的时频分解方法,同时能保持和傅里叶频谱的直接关系。S 变换广泛运用于电力系统中各种信号的处理,可用于对电缆早期故障的特征提取。

先定义连续小波变换:

$$W(\tau,d)=\int_{-\infty}^{\infty}h(t)w(t-\tau,d)dt \tag{8}$$

式中: $W(\tau,d)$ 为一个小波或小波母函数;伸缩系数 d 决定小波的宽度,从而控制分辨率。

S 变换可以视为连续小波变换乘上一个相位项,即对连续小波变换进行相位修正。

$$S(\tau,f)=e^{i2\pi f\tau}W(\tau,d) \tag{9}$$

而其用的母小波为

$$w(\tau-t,f)=\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\zeta\tau-t}{2}\frac{\delta^2}{2}}e^{-i2\pi ft} \tag{10}$$

于是 S 变换可以写成:

$$S(\tau,f)=\int_{-\infty}^{\infty}h(t)\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\zeta\tau-t}{2}\frac{\delta^2}{2}}e^{-i2\pi ft}dt \tag{11}$$

式中: $w(\tau-t,f)$ 为高斯窗函数; f 为频率; τ 为时移因子,用于控制高斯窗在时间轴 t 上的位置。

信号经过 S 变换后可以获得复时频矩阵,但矩阵中仍然含有大量的信息,直接将矩阵中的元素输入自动编码器可能造成训练时间过长、拟合效果不佳等情况。因此需要对数据进行预处理,从中提取出用于训练的初始特征,以达到更快的训练速度和更佳的拟合效果。

经过分析可以得出:在不同位置发生早期故障时,检测到的线模分量两次行波的时间差不同,且不受故障点电弧电阻阻值和早期故障初始相角的影响,故可以使用该时间差 Δt_u 作为包含早期故障位置信息的特征量。零模分量同样可以进行相同的处

理,同样可以得到一组特征量 Δt_0 。由于零模分量的传播路径为线路和大地,波速可能不是一个确定值,导致距离和时间差并不完全对应,故加入线模分量和零模分量第一次到达检测处的时间差 $\Delta t_{\alpha-0}$ 。另外,S 变换后的模时频矩阵的基频幅值曲线的最大值 $\max_{j_0}$ 同样可以反映电缆早期故障距离,将此作为另一特征量。

2.2.2 S 变换能量熵特征量的提取

除了提取行波特征量,还将信号经过 S 变换后得到的复时频矩阵取模,并计对应的模时频矩阵为 G 。定义信号能谱 $E_{ij}=|G_{ij}|^2$,其中 G_{ij} 为模时频矩阵 G 中频率为 i 、时间为 j 的元素,选取对数的底为 e ,则 S 变换能量熵可以定义为

$$S_{EE}=-\sum_i\frac{E_i}{E}\ln\frac{E_i}{E} \tag{12}$$

式中: $E_i=\sum_{j=1}^N E_{ij}$,表示在频率 i 上所有时间点能量的和; $E=\sum_i E_i$ 为信号总能量。

S 变换能量熵反映了能量在时域和频域上的分布情况,对模时频矩阵不同频段进行划分,划分得越细则分解尺度越大,在一定范围内分解尺度越大,能量熵检测暂态突变的能力越强。将模时频矩阵分解成 5 个尺度,分别为低频段 3 个、中频段 1 个、高频段 1 个,计算相应的能量熵 S_{EE1} 、 S_{EE2} 、 S_{EE3} 、 S_{EEm} 、 S_{EEh} 。

最后可以得到包含 S 变换能量熵和行波特征量的电缆早期故障区段识别与定位的初始特征量 F 。

$$F=[S_{EE1},S_{EE2},S_{EE3},S_{EEm},S_{EEh},\Delta t_{\alpha},\Delta t_0,\Delta t_{\alpha-0},\max_{j_0}] \tag{13}$$

3 基于行波特征量与堆叠自动编码器的电缆早期故障定位

堆叠自动编码器包含编码和解码部分,编码部分将输入数据通过线性组合和非线性映射得到隐含层数据^[15]。如果隐含层数据通过解码能还原输入数据,可认为隐含层的数据能表征输入数据,也就是说隐含层的数据是输入层数据的抽象表达。此时,输出层已经没有太大意义,只取编码部分,即输入层和隐含层。若将这一级编码器的输出作为新的输入数据,继续训练下一级自动编码器,这样就构成堆叠

自动编码器,如图 4 所示。

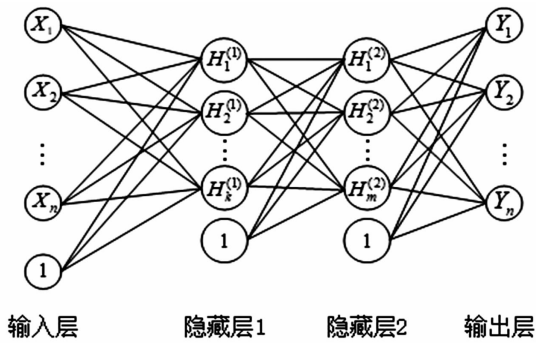


图 4 堆叠自动编码器

由于堆叠自动编码器能够对输入的数据进行深入地挖掘,因此将提取出的初始特征输入到堆叠自动编码器网络中,最后从不同的电流扰动中识别电缆早期故障,并能正确找出电缆早期故障所在区段。算法流程如图 5 所示。

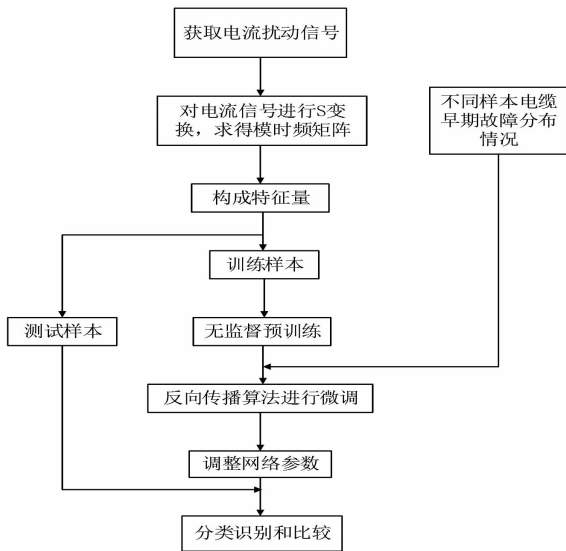


图 5 堆叠自动编码器算法流程

具体步骤如下:

1) 在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真电路,除了电缆早期故障,还考虑其他过电流扰动,如恒定阻抗故障和电容器投切扰动。实际情况中,通常选取变电站电缆馈线测量电流作为分析的原始数据。通过仿真可以获得一系列样本数据。

2) 对获得的样本电流数据和电流突变时间段内的电流信号进行 S 变换,提取用于区段定位的 9 个特征量,最后组成特征向量 F 。由于这些特征量来源不同,为了良好的训练效果,将这些数据进行极差归一化处理。

3) 对于电缆早期故障,根据其位置可以生成电缆早期故障区段序列,即将早期故障发生区段标记为 1,非早期故障区段标记为 0;而对于非早期故障,所有区段标记为 0。这样,各个样本就有对应的序列作为标签。

4) 将整合后的数据输入到堆叠自动编码器中,对堆叠自动编码器的训练分为无监督预训练和有监督微调。对网络进行无监督训练,逐步训练每一层自动编码器的参数,提升网络的性能;然后对网络进行微调,通过反向传播算法调整网络参数,提高识别精度。

5) 在分类识别中,由于每个区段均为一个二值分类,选择 Sigmoid 函数进行分类,令输出层的节点数与分区段数相同,这样,网络的输出层结果就作为区段定位的结果。

4 算例分析

4.1 数据来源与模型介绍

用于验证的仿真数据在 PSCAD/EMTDC 所搭建的系统中获得,搭建 10 kV 无支路电缆线路模型,如图 6 所示。采样频率为 1 MHz。

电缆模型采用 PSCAD/EMTDC 依频特性(相位)模型中(frequency dependent (phase) model)。改变两段电缆的长度即是改变早期故障接入的距离,由断路器 BRK 控制故障电阻是否接入。其中电缆早期故障用电弧模型来模拟,电缆线路至电源之间的元件用等效阻抗表示,线路末端有一组电容器,改变电容器投切的大小并由 BRC 控制电容器的投切。系统和电缆早期故障的参数分别由表 2 和表 3 给出。

表 2 电路仿真模型的系统参数

参数	有名值
系统基准功率 $S_{\text{base}}/\text{MVA}$	100
系统侧阻抗 $R + \text{j}X/\Omega$	$0.512 + \text{j}2.327$
负荷侧功率 $S_{\text{Load}}/\text{MVA}$	$4.2 + \text{j}1.3$

表 3 电路仿真模型的电缆参数

参数	取值范围
电弧初始长度 l_0/m	$0.01 \sim 1$
初始时间常数 τ_0/ms	$0.2 \sim 0.4$
固定电阻阻值 R/Ω	$0 \sim 40$

由于早期故障大多发生在电压峰值附近,故设置

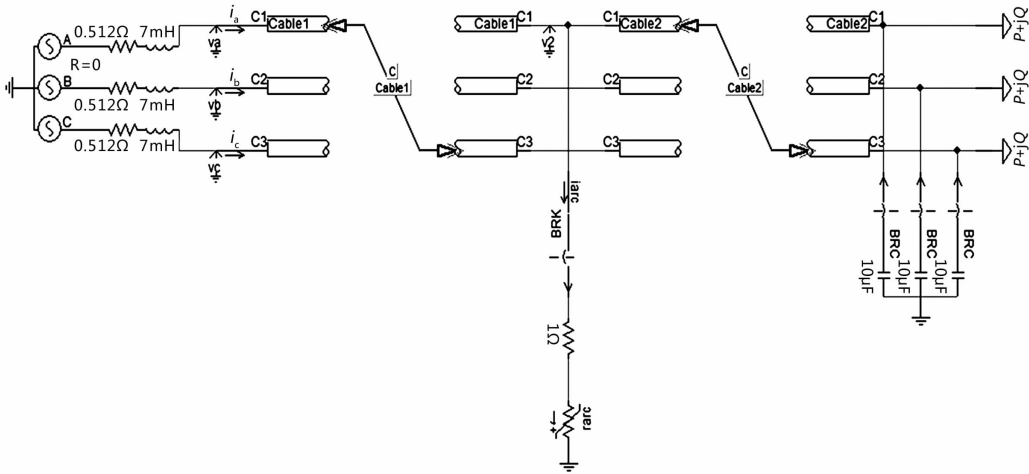


图 6 电路仿真模型

早期故障发生的初始相角在峰值相角的 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 之间,而且早期故障类型分为半周波和多周波故障。对于其他过电流扰动,考虑恒定阻抗故障和电容器投切发生的初始相角为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$;同时改变恒定阻抗值和投切电容器值,恒定阻抗故障的取值范围为 $0.1 \sim 40 \Omega$,电容器投切值在 $10 \sim 100 \mu\text{F}$ 之间变化。最后得到的仿真样本分布情况如表 4 所示。

表 4 仿真样本分布情况

类别	样本数量	训练集数量	测试集数量
半周波早期故障	400	300	100
1 周波早期故障	400	300	100
2 周波早期故障	400	300	100
3 周波早期故障	400	300	100
恒定阻抗故障	400	300	100
电容器投切	400	300	100

4.2 评价指标

堆叠自动编码器采用隐藏层 200×200 的结构,按照前面提到的特征提取方法,根据线路首端检测到的电流信号,结合 S 变换对信号进行处理,提取用于区段定位的特征量 F 作为网络的输入;另外令故障分区段数和网络的输出层节点数相等,最终堆叠自动编码器的输出即为区段故障信息。这样,区段定位问题就变成多分类问题。

为了评估模型的分类性能,以早期故障发生在区段 1 为例,表 5 给出了对应的二分类混淆矩阵。其中 TP 和 TN 分别为真正例和真负例,是预测正确的样本数;FN 和 FP 分别为假负例和假正例,是预测错误的样本数。

表 5 混淆矩阵

实际值	预测值	
	发生在区段 1	不发生在区段 1 或非早期故障
发生在区段 1	TP	FN
不发生在区段 1 或非早期故障	FP	TN

对于电缆早期故障区段选择,属于多分类问题,引入总体准确率 ACC、宏平均 Macro_F 和微平均 Micro_F 来对结果进行评价。

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN} \tag{14}$$

$$Macro_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \tag{15}$$

$$Micro_F = \frac{2 \times Micro_P \times Micro_R}{Micro_P + Micro_R} \tag{16}$$

式中: $F_i = \frac{2P_iR_i}{P_i + R_i}$, P_i 和 R_i 分别表示识别对应区段的精确率和召回率。

4.3 与其他方法的比较

传统分类器有 K 近邻 (K - nearest neighbors, KNN) 算法,随机森林 (random forest, RF) 算法,集成学习 (ensemble learning, EL) 算法等等,选择相同的训练集和测试集,用所提的方法与这几种算法对上述指标进行比较,结果如表 6 所示。

表 6 所提出的方法与其它方法的比较结果

方法	ACC/%	Macro_F/%	Micro_F/%
所提方法	95.50	92.95	95.50
KNN	84.33	78.48	84.33
RF	89.32	84.80	89.32
EL	87.83	82.86	87.83

从表 6 中数据可以看出,所提出的方法分类的

准确率最高,达到 95. 50%, 分别比 KNN 算法、RF 算法和 EL 算法高出 11. 17%、6. 18% 和 7. 67%。另外,从 Macro_F 和 Micro_F 可以看出,所提的方法比其他分类算法的值更高,说明具有更加优越的分类性能。

4.4 训练集和分区段数对结果的影响

4.4.1 训练集对结果的影响

采用交叉验证法对训练集的影响进行评估,通过仿真可以获得一系列数据,将这些数据进行分层随机抽样,得到 6 个互斥子集;选择其中的 5 个作为训练集,剩余 1 个作为测试集,得到 6 组训练/测试集。在不改变网络结构和参数的情况下,计算每一组测试集的准确率。图 7 给出了当分区段数为 10 时,每一组训练/测试集分类的准确率。从图中可以看出,不同分组下模型分类都能保持较高的准确率,平均准确率达 94. 80%,说明模型具有良好的泛化性能,即模型在新数据上仍然有良好的分类能力。

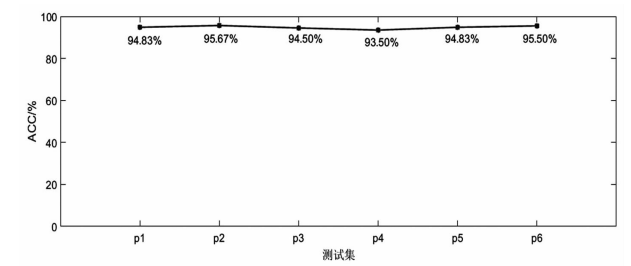


图 7 不同训练/测试集的准确率

4.4.2 分区段数对结果的影响

在不改变样本分布的情况下改变电缆分区段数以及堆叠自动编码器的输出层节点数,分别训练网络。图 8 给出了当堆叠自动编码器以电缆不同区段数进行训练时,迭代次数与测试集准确率的关系。其中,分区段数为 5、10 和 15 时,最终的准确率分别为 96. 33%、95. 50% 以及 94. 83%;对于准确率稳定所需的迭代次数,区段数为 5 时,约在 26 000 次时稳定,区段数为 10 时,约在 28 000 次稳定,而区段数为 15 则也在 28 000 次左右稳定。说明对于不同分区段数,同样的网络结构和参数设定效果不同,实际使用中应该考虑这些因素的影响。

另外,由于区段的分割是按照固定距离进行的,当故障发生在两个区段中非常接近的位置时,可能会造成误判,即深度学习网络会将故障区段判断为该故障的相邻区段。考虑到这点,重新对区段数为 5、10 和 15 的测试集计算准确率,结果分别为 99. 50%, 99. 17% 和 98. 17%。在实际检测早期故障位置时,

可以检查相邻区段,就能以较高的准确率排查故障。

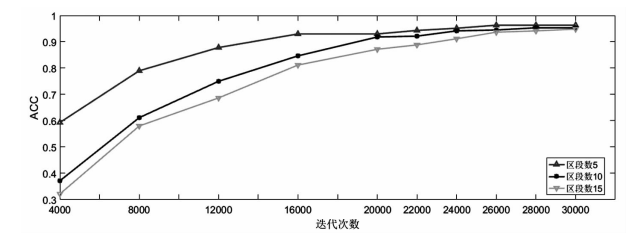


图 8 不同分区段数的准确率

5 结 论

针对电缆早期故障的区段定位进行研究,通过仿真实验得到以下结论:

1) 由于过电流是电缆早期故障的主要特征,故在线路首端设置电流采集模块,利用模变换对相电流分量进行解耦,提取线模电流和零模电流的行波在故障点折反射的时间差等特征量,可以有效反映电缆早期故障发生的距离,并且不受早期故障固定电阻大小和其他参数的影响。

2) 将电缆早期故障位置分区段,提取对应的行波等特征量,然后将这些特征量作为堆叠自动编码器的输入,通过堆叠自动编码器自动学习定位早期故障区段的特征。结果表明,与其他传统分类器相比,所提出的方法有更高的准确率,能够准确对早期故障进行区段定位。采用交叉验证法,评估训练集对分类结果的影响,平均准确率达到 94. 80%,说明所提方法对测试集有较好的泛化性能。

参考文献

- [1] Miri S. M. , Privette A. A Survey of Incipient Fault Detection and Location Techniques for Extruded Shielded Power Cables [P]. System Theory, Proceedings of the 26th Southeastern Symposium on, 1994.
- [2] Sidhu T S, XU Zhihan. Detection of Incipient Faults in Distribution Underground Cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3) : 1363 – 1371.
- [3] K. L. Butler – Purry , J. Cardoso. Characterization of Underground Cable Incipient Behavior Using Time – frequency Multi – resolution Analysis and Artificial Neural Networks [P]. Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008.
- [4] Moghe R, Mousavi M J, Stoupis J, et al. Field investiga-

tion and analysis of incipient faults leading to a catastrophic failure in an underground distribution feeder [C] //IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA, USA, 2009: 1 – 6.

[5] 戴铭. 10 kV 地下电缆早期故障检测与识别方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学.

[6] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115 – 123.

[7] Kasztenny B. , Voloh I. , Jones C. G. , et al. Detection of Incipient Faults in Underground Medium Voltage Cables [C]. Protective Relay Engineers, 61st Annual Conference for, 2008.

[8] Kulkarni S, Santoso S, Shortta. Incipient Fault Location Algorithm for Underground Cables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1165 – 1174.

[9] Herrera – Orozco AR, Bretas AS, Orozco – Henao C, et al. Incipient Fault Location Formulation: A Time – domain System Model and Parameter Estimation Approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 112 – 123.

[10] Kim C, Bialek T, Awiylika J. An Initial Investigation for Locating Self – clearing Faults in Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1105 – 1112.

[11] Zhang Wenhai, Xiao Xianrong, Zhou Kai, et al. Multi – cycle Incipient Fault Detection and Location for Medium Voltage Underground Cable [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1450 – 1459.

[12] Livie J, Gale P, Anding Wang. The Application of On – line Travelling Wave Techniques in the Location of Intermittent Faults on Low Voltage Underground Cables [P]. Developments in Power System Protection (DPSP), IET 9th International Conference on, 2008.

[13] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 9(8): 41 – 47.

[14] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum: the S Transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998 – 1001.

[15] Yann LeCun, Yo shua Bengio, Geoffrey Hinton. Deep Learning [J]. Nature, 2015, 521: 436 – 444.

作者简介:
李成升(1988), 工程师, 主要从事电能质量管理、谐波测量及电力系统滤波方面工作;
于 洋(1983), 工程师, 从事电能质量、无功电压方面技术工作。

(收稿日期: 2019 – 07 – 11)

(上接第 42 页)

[4] 曲衍宁, 吴广宁, 张血琴, 等. 储能电容器直流局部放电检测装置[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 131 – 134.

[5] 宁武, 孟丽函, 王宇, 等. 电解电容器的应用条件与寿命的关系[J]. 电源世界, 2004(3): 17 – 18.

[6] 王振河, 咸日常, 李其伟, 等. 基于模糊理论算法的电力电容器绝缘故障诊断技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(23): 31 – 36.

[7] 刘念. 电气设备状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[8] 朱德恒, 严璋, 谈克雄, 等. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[9] 标称电压 1000 V 以上交流电力系统用并联电容器第 1 部分: 总则: GB/T 11024.1 – 2010 [S], 2010.

[10] 谢超, 叶建铸, 石延辉, 等. 直流滤波电容器剩余预期寿命的试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(2): 87 – 93.

[11] 王鹏, 吴广宁, 张血琴, 等. 高压储能电容器直流局部放电测试分析系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 38 – 42.

[12] 唐盼. 基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

[13] 杨帆, 沈煜, 王彦博, 等. 基于极化/去极化电流法的交联聚乙烯电缆热老化程度判定[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 496 – 503.

[14] 雷勇, 蒋世超, 周凯, 等. 基于极化 – 去极化电流方法的交联聚乙烯电缆绝缘无损检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2643 – 2649.

[15] 周利军, 王林, 李先浪, 等. 基于极化/去极化电流法的油纸绝缘时域电导模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1433 – 1438.

[16] Leibfried T, Kachler A J. Insulation Diagnostics on Power Transformers Using the Polarization and Depolarization Current (PDC) Analysis [C] // Conferenc Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA: IEEE, 2002: 170 – 173.

作者简介:
王 鑫(1993), 硕士研究生, 研究方向为电力电容器绝缘状态检测技术研究。

(收稿日期: 2019 – 05 – 08)

(上接第 32 页)

种类型 UPFC 的限流情况对比表。综上,新型限流式 UPFC 相较于常规限流式 UPFC 限流效果更佳。

表 2 限流情况对比

UPFC 类型	短路电流峰值/kA	限流时间/ms
常规 UPFC	148	
常规限流式 UPFC	27	14
新型限流式 UPFC	12	10

5 结 语

针对 220 kV 线路的潮流调节和短路电流超标问题,提出了改进后的新型限流式 UPFC,采用饱和型自耦变压器作为串联变压器,RLC 串联谐振电路作为限流电抗支路,减少了装置体积和成本。通过对正常运行、过渡限流、完全限流 3 个阶段的电路分析以及主要元件参数的设计,证明了其理论上的可靠性。最后,仿真结果表明新型限流式 UPFC 能缩短限流时间,大大减小短路电流峰值且短路电流很快衰减为 0,可以作为 220 kV 线路的限流式 UPFC 装置。

参考文献

[1] 刘民伟,郭洪芹,胡凯. 云南电网短路电流超标原因及限制措施研究[J]. 云南电力技术,2018,46(5):35-38.

[2] 关文婷,陈成. 新疆准东电网短路电流综合限制措施[J]. 云南电力技术,2018,46(3):23-24.

[3] 张汉花,田蓓,顾雨嘉,等. 宁夏电网短路电流超标原因及限制措施研究[J]. 宁夏电力,2018(1):7-12.

[4] 徐杰,李燕. 特高压换流站单相短路电流抑制措施及对电网可靠性的影响分析[J]. 四川电力技术,2018,41(4):69-72.

[5] 吴鸣鸣,吕文韬,陈峰,等. 限流式 UPFC 特性研究综述[J]. 机电工程,2015,32(5):660-665.

[6] 蔡晖,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设,2015,36(8):73-78.

[7] 杨林,蔡晖,汪惟源,等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力,2018,51(2):47-53.

[8] 陈勇,曹伟伟,柏彬,等. MMC-UPFC 单相接地故障下运行特性分析及整体保护策略设计[J]. 电工技术学报,2019,34(3):599-610.

[9] 蔡晖,张文嘉,吕翔,等. 苏州南部电网串联电抗器与统一潮流控制器协调优化研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(6):119-123.

[10] 徐帅,杜钦君,张晓飞,马浩,王延博. 新型限流式统一潮流控制器限流分析与参数设计[J]. 电网技术,2017,41(2):558-565.

[11] 郭易木,江道灼,陈峰,等. 限流式 UPFC 对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电网技术,2016,40(7):2087-2093.

[12] 吕文韬,沈忱,江道灼,等. 具有电容限压功能的限流式统一潮流控制器[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(5):877-881.

[13] 陈峰,陈晓宇,蔡重凯,等. 限流式 UPFC 样机设计与实验研究[J]. 机电工程,2015,32(9):1238-1241.

[14] 陈峰. 限流式统一潮流控制器样机设计与实验[D]. 杭州:浙江大学,2016.

[15] 郭易木. 220 kV 新型固态限流器实用化样机优化设计[D]. 杭州:浙江大学,2017.

作者简介:

杜莹莹(1994),硕士,研究方向为线路短路电流柔性控制;

郝文斌(1976),博士,教授级高级工程师,从事电力系统规划及调度运行研究。

(收稿日期:2019-05-08)

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

彭 勇¹,雷兴列¹,方玉群²,苏梓铭¹,肖 宾¹,刘 凯¹
(1. 中国电力科学研究院有限公司,湖北 武汉 430074;
2. 国网浙江省电力有限公司,浙江 杭州 310007)

摘 要:在开展特高压直流线路带电作业时,一般要求停用直流线路再启动功能,然而过多的停用该功能会降低系统安全运行水平,因此有必要分析在不停用直流线路再启动功能情况下开展特高压带电作业的安全性。首先分析了停用直流线路再启动功能的作用;然后考虑在不停用该功能的情况下,结合特高压直流输电线路最大操作过电压水平,校核分析了带电作业安全距离;最后结合典型直流线路带电作业项目,分析了不停用直流线路再启动功能时进行带电作业的可行性。分析结果表明,特高压直流线路塔头空气间隙尺寸一般均满足带电作业最小安全距离的要求。在各类带电作业操作项目中,若极地或极间采用绝缘承力工具,应停用直流线路再启动保护功能,其他情况可不停用。
关键词:特高压直流线路;带电作业;再启动功能;安全性分析
中图分类号:TM755 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)04-0085-5

Safety Analysis of Live Working on UHVDC Transmission Lines with Restart Function

Peng Yong¹, Lei Xinglie¹, Fang Yuqun², Su Zhiming¹, Xiao Bin¹, Liu Kai¹
(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

Abstract: Restart function is generally required to be withdrawn during live working on UHVDC transmission lines, but extra withdrawal may reduce the safety operation level of power system. Thus, safety analysis about live working on UHVDC transmission lines with restart function is necessary. Firstly, the effects of withdrawing restart function is analyzed. And then, in consideration of using restart function and according to the maximum switching overvoltage level of UHVDC transmission lines, the safety distance for live working is calculated. Finally, combined with the typical live working projects on DC transmission lines, the feasibility of live working with restart function is analyzed. The results show that tower head air gaps of UHVDC transmission lines can meet the requirement of minimum safety distance for live working. In all kinds of live working projects, restart function should be withdrawn once phase-ground or phase-phase insulated bearing tools are used, and otherwise it can be used.
Key words: UHVDC transmission line; live working; restart function; safety analysis

0 引 言

根据国家电网公司电力安全工作规程(线路部分)(以下简称“安规”)及相关带电作业技术标准的要求,为确保线路带电作业工作的安全,一般要求“停用重合闸或直流线路再启动功能”^[1],其作为保
科技项目:国家电网公司科技项目(SGZJ0000KXJS1700312)

障带电作业安全的一项重要措施,已广泛应用到实际工作中。随着中国特高压输电工程广泛投运,鉴于其重要性,带电作业作为保障线路安全可靠运行重要技术手段的地位显得更为突出^[2-3],同时更高电压等级的带电检修工作给作业人员带来新的挑战 and 更大的心理压力。开展带电作业时“停用重合闸或直流线路再启动功能”这一保障措施成为很多线路运检单位开展特高压线路带电作业的必选项。然

而,由于特高压输电线路较高压及超高压线路更长,且是重要的跨区输电通道,在带电作业工作中,若经常要求停用线路重合闸或直流线路再启动功能,则很难被电力调度部门许可。因为从输电系统安全运行的角度考虑,过多的停用重合闸或直流线路再启动功能将可能提高线路瞬时故障的跳闸率,降低输电系统的安全运行水平^[4],尤其是特高压直流输电工程还经常存在因直流控制系统原因而无法操作停用线路再启动功能的情况。因此,很多线路运检单位经常面临着由于直流线路再启动功能不能停用导致带电作业无法顺利开展的难题。

下面针对不停用直流线路再启动功能的情况,开展了特高压带电作业安全性技术分析,解读分析了开展带电作业时停用直流线路再启动功能的作用,结合特高压直流输电线路最大操作过电压水平,对带电作业安全距离进行了校核分析;并结合典型带电作业项目,从带电作业方式和使用工器具的角度具体分析了带电作业的安全性,明确了在不停用直流线路再启动功能情况下能否安全开展带电作业的具体作业项目,为特高压直流线路带电作业的安全开展提供了参考。

1 相关条款说明及解读

安规中带电作业部分相应条款说明如下^[1]:“带电作业有下列情况之一者,应停用重合闸或直流线路再启动功能,并不准强送电,禁止约时停用或恢复重合闸及直流线路再启动功能。1)中性点有效接地的系统中有可能引起单相接地的作业;2)中性点非有效接地的系统中有可能引起相间短路的作业;3)直流线路中有可能引起单极接地或极间短路的作业;4)工作票签发人或工作负责人认为需要停用重合闸或直流线路再启动功能的作业。”许多带电作业技术标准如 DL/T 966《送电线路带电作业技术导则》、DL/T 1242《±800 kV 直流输电线路带电作业技术规范》、DL/T 881《±500 kV 直流输电线路带电作业技术导则》、DL/T 392《1000 kV 交流输电线路带电作业技术导则》中均有相关要求。

1.1 条文解读

带电作业时停用重合闸或直流线路再启动功能一是可减少系统产生过电压的概率,从而减小了带电作业的危险性;二是若在带电作业过程中,作业人

员发生了意外事故,该措施可防止其遭受二次伤害,以避免万一发生事故时不致扩大。实际上,该措施仅起到保障带电作业工作安全的后备作用,其起到的关键作用主要体现在当带电作业工作点发生安全事故的时候,例如作业过程中因最小安全距离不足而造成了相地之间发生放电,此时若不停用重合闸或直流线路再启动功能,则线路再次复电后,将加剧对作业人员的伤害或者造成其他后果^[4]。

大量实践工作证明,该措施并不是防止带电作业事故扩大的万全措施,且过多地停用重合闸或直流线路再启动功能会降低安全运行水平,对系统安全运行不利,特别是对输送容量大、供电范围广的超特高压电力系统。因此,对待这一措施必须谨慎,应具体问题具体分析^[5]。

1.2 停用直流线路再启动功能的作用分析

开展特高压直流输电线路带电作业时,在遇到“直流线路中可能引起单极接地或极间短路的作业”项目时,停用直流线路再启动功能主要是避免若出现带电作业事故而引起扩大性后果。下面从发生带电作业事故的角度深入分析该措施的作用。

由于带电作业过程中极地或极间起到绝缘作用的介质为空气间隙和绝缘工器具,因此有两种原因会造成带电作业事故,一是带电作业空气间隙被击穿,二是带电作业绝缘工器具发生闪络。

1) 带电作业空气间隙被击穿

带电作业空气间隙被击穿通常在是在线路产生操作过电压的情况下发生的,有两种原因:带电作业安全距离不足和小概率事件(即遇到了比带电作业危险率 10^{-5} 还小的事件)。特高压直流线路的外绝缘水平受污秽控制,杆塔塔头间隙较大,带电作业安全距离不足的情况一般不会发生。但由于前期研究获取的带电作业最小安全距离等关键技术参数是依托特高压直流示范工程开展的,其与线路操作过电压水平直接相关。因此有必要结合不同线路的过电压水平(包括考虑不停用直流线路再启动功能时产生的操作过电压)进行校核分析^[7],进一步明确带电作业安全距离参数。而对于小概率事件,应不予考虑,因为带电作业允许小概率事件发生。

此种情况下,停用直流线路再启动功能的主要作用是避免再启动时产生的操作过电压对作业位置处带电作业空气间隙绝缘的影响,若其产生的操作过电压比引起事故的间隙击穿电压低或空气绝缘能

够耐受,则没有必要停用直流线路再启动功能。

2)带电作业绝缘工具发生闪络

若带电作业绝缘工具在极地或极间作为主绝缘介质时发生了闪络,有两种原因:工具的有效绝缘长度不足和工具本身的绝缘性能不足。特高压带电作业绝缘工具有效绝缘长度不足的情况一般不会发生,而绝缘工具本身的绝缘性能不足又有两种情况,即工器具本身质量问题和作业过程中气象条件变化引起的绝缘性能降低。工器具本身的质量问题可通过预防性试验予以保障,而作业过程中气象条件等变化引起的绝缘性能下降则难以规避。

此种情况下,若直流线路再启动功能未停用,由于绝缘工器具不能及时安全退出且其绝缘性能降低不可能短时恢复,甚至会进一步下降,再启动后产生的过电压乃至正常运行电压都极有可能再次造成工器具闪络,反复闪络将大大降低工器具的机械性能,进而造成事故扩大,则该情况下应停用直流线路再启动功能。

综上分析,若要进一步明确不停用直流线路再启动功能情况下开展带电作业的安全性:一是需要根据不同线路的过电压水平进一步校核带电作业安全距离,评估最小安全距离是否满足要求;二是从带电作业工器具使用的角度,需要结合具体的作业项目、工艺和使用工具的种类来分析带电作业的安全性。

2 不停用直流线路再启动功能下带电作业安全距离校核

2.1 校核依据

研究确定超/特高压输电线路带电作业安全距离的方法是:首先分析确定线路带电作业过电压水平;然后进行真型塔典型作业工况带电作业间隙放电试验,得出放电特性曲线;最后根据带电作业绝缘配合方法,结合试验结果和线路过电压水平,计算确定带电作业最小安全距离值。

1)带电作业间隙操作冲击放电特性

IEC 60071-2《Insulation Coordination Part 2 Application Guide》推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性经验式为

$$U_{50}=KU_{50RP} \tag{1}$$

$$U_{50RP}=500d^{0.6} \tag{2}$$

式中: U_{50} 为间隙的操作冲击 50% 放电电压; d 为空气间隙距离; K 为间隙系数; U_{50RP} 为相应电压波形及

间隙距离下棒-板间隙操作冲击 50% 放电电压。研究中,可根据各带电作业间隙结构的操作冲击放电试验数据,计算求取其间隙系数 K ,得出该带电作业间隙结构的操作冲击放电电压计算式及拟合曲线^[8]。

2)直流线路带电作业绝缘配合

在中国现在普遍采用比试验得到的 U_{50} 低 3σ 的电压值作为带电作业间隙的耐受电压,以 U_w 表示。

$$U_w=U_{50}(1-3\sigma) \tag{3}$$

式中: σ 为带电作业间隙 50% 放电电压的标准偏差,一般偏严考虑取 6%^[9]。

因此,当作业间隙的耐受电压不小于直流线路的最大操作过电压,即可保证带电作业间隙不会发生击穿,保证作业人员的安全。即:

$$U_w\geq AU_{max} \tag{4}$$

式中: U_w 为带电作业间隙的耐受电压; A 为安全系数,不小于 1; U_{max} 为直流线路最大操作过电压。

实际上,当线路输送容量、线路长度和设备参数不同时,线路的操作过电压水平会有较大差别^[10],因此在试验获取典型工况下带电作业间隙的放电特性的前提下,在最终确定带电作业最小安全距离时,应根据该线路的实际过电压倍数或幅值来计算分析。

2.2 校核分析

带电作业过程中若不停用直流线路再启动功能,则在评估带电作业安全性时,需考虑由直流输电保护系统在故障或操作发生后动作所产生的操作过电压,由于其产生的操作过电压低于单极接地故障在健全极线路上产生的操作过电压水平。因此,从严考虑,校核计算带电作业安全距离应考虑单极接地故障产生的最大操作过电压。

研究表明,当直流线路最大过电压为一极线路中点发生接地故障时,最大过电压水平出现在健全极线路中点附近^[8-9],而特高压直流线路最大操作过电压水平一般在 1.75 p. u. (1 p. u. = 816 kV) 以下,安全系数 A 按照 1.05 考虑,校核计算 ± 800 kV 特高压直流输电线路操作过电压倍数在 1.60 ~ 1.75 p. u. 之间时,带电作业最小安全距离值的范围为 5.9 ~ 6.8 m。可见,带电作业最小安全距离等关键技术参数值与线路操作过电压倍数成正比。

安规中明确在海拔高度为 1000 m 及以下地区, ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业时人身与带电体的安全距离为 6.8 m,绝缘承力工具、绝缘绳

索最小有效绝缘长度为 6.6 m。上述带电作业安全距离等技术参数是依托向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流输电示范工程研究提出的,带电作业最大操作过电压水平取 1.75 p. u.,均大于后来投运的 ± 800 kV 特高压直流输电线路的操作过电压水平^[11-15]。因此,安规中的 ± 800 kV 电压等级带电作业安全距离等关键技术参数是能够满足其他 ± 800 kV 特高压直流输电线路的带电作业安全要求的,而且还留有一定的裕度。

以 ± 800 kV 特高压直流输电线路典型的“羊角型”、“L 型串直线塔”杆塔为例(如图 1 所示),对塔头尺寸进行校核,典型塔头空气间隙距离一般在 10 m 以上,比带电作业最小安全距离的数值大。所以,即使带电作业时不停用直流线路再启动功能,一般典型杆塔结构塔头间隙大小也能满足带电作业安全距离的要求。

3 具体带电作业项目的安全性分析

3.1 安全评估原则

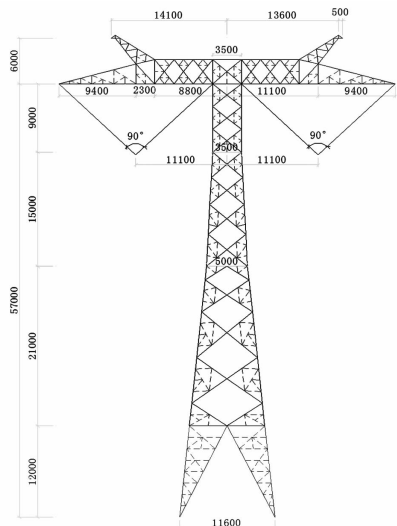
按照检修对象进行分类,输电线路带电作业典型项目包括有绝缘子类、导地线类、金具类和附属设施类。结合特高压直流线路带电作业典型项目,从带电作业工器具使用、作业方式的角度评估不停用直流线路再启动功能时开展带电作业的安全性,由 1.2 节分析可知,评估的主要原则是判断在作业过程中,是否采用绝缘工器具作为极地或极间主绝缘介质进行使用,即各典型项目作业过程中的关键工具,有无使用在极地或极间的绝缘承力工具。

3.2 带电作业典型项目分析

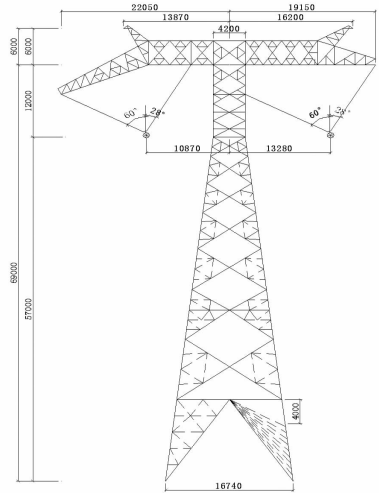
对于绝缘子类典型作业项目,若不停用直流线路再启动功能,在开展带电更换直线串复合绝缘子和耐张整串绝缘子项目时又必须使用绝缘承力工具用于转移导线机械荷载,存在工器具绝缘失效造成极地短路触发再启动功能的风险。而在开展带电更换耐张串横担(导线)侧 1~3 片绝缘子及耐张串任意单片绝缘子项目时,在保证良好绝缘子片数的情况,使用的金属承力工具无引起极地短路的风险,不会对原有的绝缘造成影响。

对于导地线类、金具类和附属设施类典型作业项目,若不停用直流线路再启动功能,由于作业过程中未在极地或极间使用绝缘承力工具,故这几类带电作业项目均可以安全开展。但需要注意的是,作业人员采用吊篮法进入等电位后,宜与塔上电工配

合将吊篮收回,以避免吊篮及其配套绝缘绳长时间位于地电位杆塔构架和高电位线路之间,避免因天气突变使得绝缘绳索性能急剧下降而造成短路触发再启动功能的风险。



(a) 羊角型塔结构



(b) “L”型绝缘子串的直线塔结构

图 1 ± 800 kV 特高压输电线路典型杆塔结构尺寸
分析特高压直流带电作业典型项目可否不停用直流线路再启动功能,如表 1 所示。

4 结 论

1)在不停用直流线路再启动功能的情况下,考虑特高压直流输电线路的最大操作过电压水平,对带电作业安全距离进行校核计算分析,结果表明:特高压直流线路塔头空气间隙尺寸一般均满足带电作业最小安全距离的要求。

2)在不停用直流线路再启动功能的情况下,对输电线路 4 类典型作业项目进行安全性分析,结果

表 1 带电作业典型项目分析

项目类型	作业项目	作业方式	关键作业工具	是否使用绝缘承力工具	可否不停用直流线路再启动功能
绝缘子类	更换直线塔 I 型、双 I 型复合绝缘子	等电位	吊篮、绝缘吊杆、导线提线器、紧线器	是	否
	更换直线杆塔单 V 型、双 V 型复合绝缘	等电位	吊篮、绝缘吊杆、导线提线器、紧线器	是	否
	更换直线杆塔双 V 型、双 L 型复合绝缘子	等电位	吊篮、横担卡、绝缘吊杆、大刀卡、紧线器	是	否
	更换耐张横担侧第 1－3 片盘形绝缘子	地电位	耐张端部卡、紧线器、闭式卡	否	可
	更换耐张导线侧第 1－3 片盘形绝缘子	等电位	导线端部卡、紧线器、闭式卡	否	可
	更换耐张绝缘子串任意单片盘形绝缘子	等电位	闭式卡、紧线器	否	可
导、地线类	修补导线	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	处理导线异物	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	修补地线	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
	处理地线异物	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
金具类	检修导线间隔棒	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	检修地线防振锤	地电位	地线接地线、地线飞车	否	可
	消除金具缺陷	等电位/地电位	吊篮、绝缘绳索/绝缘工具	否	可
附属设施类	安装或检修在线监测装置	等电位	吊篮、绝缘绳索	否	可
	安装或检修防鸟装置	地电位	静电防护服	否	可

表明:在各类典型项目中,若极地之间使用有绝缘承力工具,如带电更换整串绝缘子项目,因存在绝缘性能失效的可能性,从而可能导致极地之间反复击穿闪络,以至事故扩大。因此开展该类带电作业项目应停用直流线路再启动保护功能,

3)其他未在极地之间使用有绝缘承力工具的作业项目,如导地线类、金具类和附属设施类典型作业项目,可以不停用直流线路再启动保护功能。

参考文献

[1] 电力安全工作规程(线路部分):Q/GDW 1799.2－2013[S],2013.

[2] 胡毅,刘凯,刘庭,等.超/特高压交直流输电线路带电作业[J].高电压技术,2012,38(8):1809－1820.

[3] 胡毅,刘凯,刘庭,等.带电作业技术研究与标准制定[J].高电压技术,2012,38(11):3015－3024.

[4] 带电作业基本概念[EB/OL].<http://wenku.baidu.com>.

[5] 李如虎.对新《安规》关于停用重合闸条款的学习与探讨[J].广西电力,2014,37(2):56－61.

[6] 高压带电作业基本知识[EB/OL].<http://wenku.baidu.com>.

[7] 刘洪正,刘凯,孟海磊,等.±660 kV 直流输电带电作业安全距离的试验研究[J].电网技术,2011,35(11):

183－189.

[8] 王力农,胡毅,邵瑰玮,等.1000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J].高电压技术,2006,32(12):78－84.

[9] 刘洪正.±660 kV 直流输电线路带电作业方法的研究[D].济南:山东大学,2010.

[10] 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.

[11] 肖勇,樊灵孟.云广±800 kV 特高压直流线路带电作业分析[J].高电压技术,2010,36(9):2206－2211.

[12] 周沛洪,吕金壮,戴敏,等.±800 kV 特高压直流线路缓波前过电压和绝缘配合[J].高电压技术,2009,35(7):1509－1517.

[13] 周沛洪,修木洪,谷定燮,等.±800 kV 直流系统过电压保护和绝缘配合[J].高电压技术,2006,32(12):125－132.

[14] 朱艺颖,蒋卫平,吴雅妮.特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响[J].电网技术,2008,32(8):6－9.

[15] 吴雅妮,蒋卫平,朱艺颖,等.特高压直流输电线路故障过电压的研究[J].电网技术,2009,33(4):6－10.

作者简介:

彭 勇(1984),硕士,高级工程师,主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。

(收稿日期:2019-05-06)

基于通信协议多元接入的计量自动化远程控制研究

梁 捷¹, 梁广明²

- (1. 广西电网有限责任公司计量中心, 广西 南宁 530023;
2. 南宁百会药业集团有限公司, 广西 南宁 530003)

摘 要:广西电网计量自动化“两覆盖”工作中需对多种通信协议设备并存的复合网络进行远程控制,应用时常出现电能表拉合闸失败的问题。首先分析了广西电网常见的电表和计量终端通信协议的特点,然后从广西 97 规约电能表“先告警后控制”控制机制与南方电网公司规约电能表的差异性,以及费控体系安全防护要求等方面分析了多元接入条件下计量终端对电能表远程控制方案的可行性,并据此给出了推荐控制方案和流程。接着通过实例分析了不同集中器和载波通信模块厂家拉闸平均响应时间的特点和差异,最后对计量主站远程控制功能调试时发现的安全认证失败等常见异常问题进行了上下行通讯报文的实例分析,为计量自动化系统远程费控功能开发提供经验。

关键词:通讯协议多元接入;安全防护;远程控制;拉闸响应时间

中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)04 - 0090 - 05

Research on Remote Control of Metrology Automation Based on Multi - source Access of Communication Protocol

Liang Jie¹, Liang Guangming²

- (1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, Guangxi, China;
2. Nanning Baihui Pharmaceutical Group Co. , Ltd. , Nanning 530003, Guangxi, China)

Abstract:Aiming at the problems existing in the application of remote control function in the "two coverage" work of metering automation in Guangxi power grid, three kinds of electric energy meters and two types of communication protocols for metering terminals commonly used in the field application of Guangxi power grid are firstly introduced. And then, from the aspects pf the compatibility of equipment communication protocols, the difference of "alarm before pull" control mechanism of Guangxi 97 protocol electric energy meter, and the security protection requirements of fee control system, the feasibility of remote control scheme for watt - hour meter by metering terminal is analyzed, and the recommended scheme and the switching - on process are given accordingly. The characteristics and difference of average response time between different communication modules and concentrator manufacturers are analyzed by testing. In addition, when commissioning the communication protocol of remote control function of the metering master station, the common abnormal problems found are analyzed with examples of upstream and downstream. It can provide experiences for the development of remote cost control function of metering automa-tion system.

Key words:multi - source access of communication protocol; security protection; remote control; switching response time

0 引 言

为响应南方电网公司“十三五”科技发展规划对计量信息安全防护体系的建设要求^[1],广西电网正大力推进费控电能表和低压集抄终端 100% 覆盖的“两覆盖”工作。随着广西省集中计量主站建设和费控电能表的推广使用,广西电网存在现场安

装的计量设备的通讯协议和技术要求不统一,现行的电能表和低压集抄系列技术规范通信协议费控控制功能定义不明确的问题^[2]。为保障广西电网公司计量自动化系统远程费控功能模块的正常应用,针对不同类型的电能表和计量终端模拟现场条件组织开展了远程拉合闸功能测试试验,针对不同仪表设备组合给出可行的远程控制方案,并结合通讯报文分析了试验中拉合闸失败案例的原因,为各地计

量自动化系统远程费控功能开发提供经验。

1 广西电能表远程控制现状

目前广西电网在用的支持远程拉合闸的电能表通讯规约类型包括:1)符合南方电网技术规范的费控电能表(简称南网费控表),采用 07 规约带南网规范 ESAM 安全模块,其大多数的参数修改和远程控制过程需通过密文 + MAC 的方式进行数据的传输和验证,需经过密码机进行拉合闸^[3]。2)符合南方电网规范的 DL/T 645-2007 规约普通电子式电能表(简称南网 07 表)^[4],不带安全模。广西电网在南网规范的基础上结合大用户“先购电再用电”的需求制定了预付费电能表的技术规范,其远程拉合闸的机制与南网 07 表一致^[5]。3)符合广西电网公司电子式电能表通信规约的电能表(简称广西 97 表),该规约是在 DL/T 645-1997 规约基础上扩展而来,为广西特有,不带安全模块。

广西常见终端规约类型包括:1)符合南网规范的计量终端(简称南网终端),采用南网 2013 版上行通信规约,支持写控制参数和中继转发的方式对电表进行远程控制^[6]。2)符合广西电网技术规范的计量终端(简称广西终端),采用 2008 年广西地方自行发布施行的计量终端上行数据传输规约,大部分可通过远程通断电控制命令和数据转发的方式对电表进行拉合闸;但由于广西 2017 年省集中计量主站建设之前,旧主站一直采用控制命令方式,因此部分终端在验收时未对数据转发功能做强制要求。

由于上述多种上行通讯协议的计量终端和下行协议的电能表同时接入计量系统使用,不同设备不同协议的配合在通讯应用时缺乏完整有效的组合控制方案,无法保证拉合闸功能的实现,给新计量主站的远程费控功能开发带来困难。

2 计量终端与电表的控制方案

广西常见计量终端与电能表的 6 种控制组合见表 1。控制方案的选择需考虑电能表和计量终端通讯协议的兼容性、升级改造的成本和对费控安全防护体系的硬件需求等方面。

如表 1 所示,对于南网费控表,由于目前计量终端缺少安全模块的型式定义,故无法安装安全模块与费控密码机交互实现传输数据的加密和解密,故

只能通过计量主站连接加密机,以中继转发的方式进行远程控制。广西上行通信规约的数据转发与南网规约对中继转发命令的功能定义大体相同,区别仅在于广西规约未对中继类型进行区分。但由于第 1 节所述的历史管理问题,部分广西终端不支持数据转发功能,由于这部分终端在现场广泛使用,现场升级人力成本高,故广西终端常采用远程升级方式,常见方式有两种:方案 A 为搭建升级专用临时服务器,修改终端 IP 地址,连接该服务器,服务器升级程序远程发送升级包进行升级;方案 B 为计量主站新建一个专用升级 TCP 端口并在原应用服务器上部署升级程序,利用原来的上行链路进行升级。由于方案 B 对主站服务器存在信息安全风险,需经电网公司严格审核,故常选择方案 A。

表 1 计量终端与电表的控制方案

设备类型	南网费控表	南网 07 表	广西 97 表
南网终端	中继转发	中继转发、写控制参数	中继转发
广西终端	数据转发	通断电控制命令(推荐)、数据转发	通断电控制命令(推荐)、数据转发

对南网 07 表,根据技术规范要求,理论上南网终端和广西终端均支持通过数据转发/中继转发和控制命令方式进行远程控制。广西上行通信规约的数据转发功能与南网规约的中继转发的定义大体相同,区别仅在于广西规约未对中继类型进行区分。与广西规约的通断电控制命令不同,南网规约的控制命令是以写测量点控制参数的方式实现的,且补充了测量点和测量点地址匹配验证的功能和控制有效时间的定义。但通过方案 A 升级终端需到现场修改终端 IP,广西部分终端安装在偏远山区,给升级带来困难,目前部分终端存在未及时升级的情况,故广西终端控制南网 07 表以及广西 97 表,推荐优先采用通断电控制命令方式。

广西 97 表主要应用于国家发改委 2008 年 DL/T 645-2007 电能表通信规约实施之前,广西电网根据应用需求对 DL/T 645-1997 规约进行增补,自行定义了通断电控制机制,且对密码权限等级没有明确定义,需向电表资产管理方确认控制权限密码等级和密码。且其拉合闸机制与其他电能表不同(见图 1),拉合闸时遵循“先告警后控制”机制^[7],即需先对电表下发产生/解除断电控制告警命令,然后电能表才能响应拉合闸命令。如表 1,由于南网终端规范主要针对南网通用表型制定,未考虑对广西 97 表规约控制机制的兼容性,故南网终端目前不

支持对广西 97 表的写参数控制方式,只能通过中继转发方式实现拉合闸。此外,与南网规范的电能表相比,广西终端上行规约的通断电命令方式有延时控制参数定义,故广西终端对广西 97 表可实现延时拉闸;但广西 97 表的技术规范中无拉闸延时参数定义,南网终端上行规约的写控制参数方式无延时控制参数定义,故南网终端对广西 97 表目前无法实现延时拉闸。

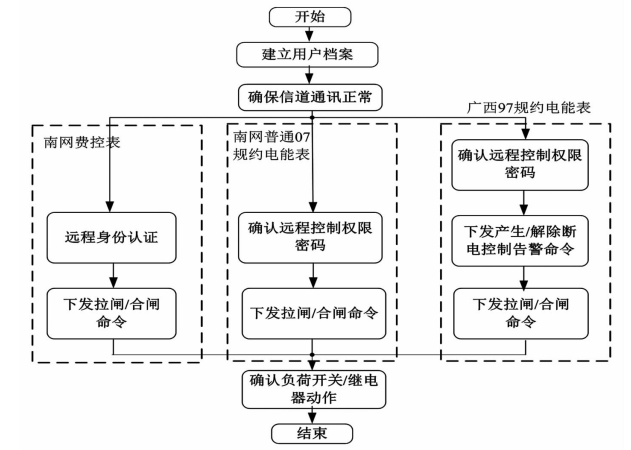


图 1 3 种类型电表的拉合闸流程

如图 1,上述 3 种类型电能表的远程拉合闸流程为:首先由计量自动化系统主站核对用户档案无误且电能表的用电信息数据能正常采集,然后对不同类型的电表采取不同的拉合闸控制方式。

1)南网费控表:拉闸时首先经计量主站连接密码机获取密钥更新数据和随机数,然后以中继命令的方式对电能表下发远程身份认证指令;电能表内的安全模块对该随机数进行加密,并与主站的加密结果进行密文匹配认证,若身份认证通过,则更新密钥并返回认证信息;接着由主站下发控制命令,电表执行相应动作。此外,当终端收到主站的远程控制命令后,若目标电表具备拉合闸功能,集中器将立即向主站正常应答,而不必考虑受控电能表是否已经真正动作。若目标电能表不具备拉合闸功能,集中器应向主站返回异常应答。接着,在控制生效时间内,终端将下发相应的下行控制命令给目标电表,并持续检测目标电能表的控制状态,若控制执行成功,电能表将更改电能表状态字 3 的继电器状态位;若控制失败,电能表将形成“开关误动作”事件,终端产生“电能表拉合闸失败”告警。可见,主站下发控制命令后,终端回复确认应答,并不一定说明电能表已经成功拉合闸,可参考电能表状态字和终端告警数据确定该状态,最稳妥的做法是去现场确认电能表外置负荷开关或内置继电器的状态。

2)南网 07 表:在南方电网 2016 年费控表正式推广前应用较广,它支持 6 位密码口令防护,密码分二级管理,出厂默认密码统一为 000000,但各地根据管理需求可能会更改密码,拉合闸前需向资产管理方确认 03 级控制权限密码,它支持主站的写控制参数命令和中继转发下行控制命令两种远程控制方式。

3)广西 97 表:它对密码权限等级没有明确定义,需向资产管理方确认控制权限密码等级和密码。控制机制为“先告警后控制”机制。

3 案例分析

3.1 拉合闸设备配合情况测试

为研究不同厂家设备通信的兼容性,对 3 个不同电能表通信模块和集中器厂家组合的拉合闸配合情况进行测试,测试地点为某城市居民试点小区,集中器上行通过移动 4G 信号与主站通信,下行通过载波方式与电能表通信。将 3 个厂家的集中器分别与 3 个厂家的载波通讯模块两两组合进行拉合闸测试,反复操作 100 次,记录从命令下发到电能表拉/合闸动作的时间,计算每种组合的平均拉闸时间如图 2 所示,同时可见:1)集中器并不能支持所有类型的载波模块,即不能实现所有厂家的互联互通,如组合 3,即威胜电气南网规约集中器不识别深圳阳光智慧 SG3000 型载波模块,原因是集中器不兼容国网 1376.2 载波协议的通信模块,从而无法通信。2)大部分集中器的拉闸平均时间集中在 8~16 s 范围内,可见该拉闸时间范围可代表该条件下的正常控制响应时间。从整体上看,南网规约集中器拉闸响应速度比广西规约集中器快,但差别不大。3)组合 2(中电华瑞集中器+阳光智慧载波通讯模块)的平均拉闸时间超过 16 s,原因是这两个厂家的设备载波网络参数匹配性较差^[8],通讯延时较长,建议通过磨合优化组网交互流程。

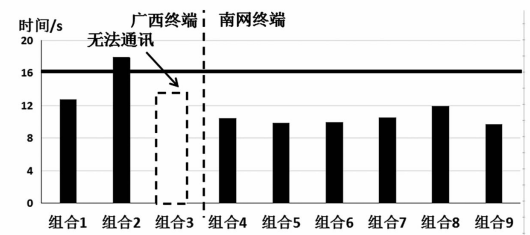


图 2 集中器拉闸响应时间比较

3.2 远程控制异常问题分析

在对计量主站远程控制功能的通讯规约进行调

试时,发现的常见异常问题如下:

1)主站下发抄读电能表运行状态字 3 后,发现终端返回的数值为 FFFF,即不支持该数据项,报文如图 3 所示。根据南网 2013 上行规约,应用层功能码 AFN 分类定义了 16 种类型的数据采集应用功能,AFN=0AH 表示读参数(H 表示 0A 为 16 进制数据),AFN=0CH 表示读当前数据。电能表运行状态字应属于测量点当前数据,AFN 应为 0CH,图中错误的报文是主站通讯规约研发人员对规范理解有误,认为电能表状态字 3 属于测量点参数造成的。

异常报文:

主站发送:68 10 00 10 00 68 7B 00 01 45 02 00 00 01 0A 64 04 01 03
05 00 04 43 16 //主站发送抄读运行电能表运行状态字 3 命令
终端回复:68 12 00 12 00 68 98 00 01 45 02 00 00 01 0A 64 04 01 03
05 00 04 FF FF 5E 16

正确报文:

主站发送:68 10 00 10 00 68 7B 00 01 45 02 00 00 01 0C 64 04 01 03
05 00 04 45 16
终端回复:68 12 00 12 00 68 98 00 01 45 02 00 00 01 0C 64 04 01 03
05 00 04 50 C0 72 16

图 3 主站抄读电能表运行状态字报文

2)对某批南网费控表(单相表,内置负荷开关)进行拉合闸测试时发现存在负荷开关误动作事件记录异常的问题。根据南网 2017 年 8 月对费控电能表拉合闸控制的要求“电能表拉闸动作时,若第一次检测结果为断路器成功拉闸,电能表持续检测,如检测到断路器误动或拒动,上报并做负荷开关误动作事件记录”。由于电能表只能存储最近 10 次事件,为避免事件重复生成挤占电能表存储空间^[9],要求电能表“在合闸动作前只记录 1 次”。

为测试电能表能否满足上述要求,测试方法如表 2,电能表在合闸后首先第 1 次下发拉闸命令,成功收到命令后电能表运行状态字 3 中的继电器命令状态位 b_{RC} 变为 1,然后短接电能表的强电 1 和 2 端子(电流 L 和 N 端子),由于此时内置开关的费控电能表继电器状态检测回路检测到费控表的电流回路状态为通,从而误认为没有拉闸成功,将继电器状态位 b_R 置 0,当 $b_{RC} \neq b_R$ 时产生负荷开关误动作事件,事件中记录了负荷开关误动作总次数、发生时刻、结束时刻等。通过这种方式模拟电能表拉闸失败,此时生成 1 次负荷开关误动作事件,然后再重复模拟电能表拉闸失败 2 次,检查电能表记录情况。测试发现该功能异常的厂家随着模拟操作次数的增加不

断形成开关误动作事件,负荷开关误动作总次数不断增加,从 1 次增加到 3 次。而正常厂家的误动作总次数在第 1 次事件后记录 1 次,然后在下一次合闸前保持不变。合闸后再进行第 2 次拉闸,重复上述事件模拟,情况依旧。异常厂家与正常厂家的电能表运行状态字 3 变化测试情况见表 2。

表 2 负荷开关误动作事件测试结果

模拟操作		电能表运行 状态字 3		负荷开关误 动作总次数	
		b_R	b_{RC}	厂家 1 (正常)	厂家 2 (异常)
合闸		0	0	0	0
第 1 次拉闸 命令下发后	次数 1	0	1	1	1
	次数 2	0	1	1	2
	次数 3	0	1	1	3
合闸		0	0	1	3
第 2 次拉闸 命令下发后	次数 1	0	1	2	4
	次数 2	0	1	2	5
	次数 3	0	1	2	6

3)南网规约的集中器对广西 97 表拉合闸失败的问题。如图 4,根据广西电能表规约要求,电能表进行拉闸,即断电控制时应先产生断电控制报警(数据区控制参数为 6D F3),再进行拉闸操作(数据区控制参数为 6F F3),此时电能表返回正常应答帧(控制码 C=84H)。合闸时应先清除断电控制报警(数据区控制参数为 6E F3),再进行通电控制,即合闸操作(数据区控制参数为 70 F3)。图 4 的异常报文未产生断电控制报警就直接进行拉闸操作,故电能表回复异常应答帧(控制码 C=C4H),故拉闸失败。

异常报文:

终端发送:68 16 46 70 00 00 00 68 04 06 6F F3 33 33 33 33 D4 16 //
断电控制命令

电表回复:68 16 46 70 00 00 00 68 C4 01 37 98 16 //电表回复异常应答
正确报文:

终端发送:68 16 46 70 00 00 00 68 04 6D F3 33 33 33 33 CC 16 //
产生断电控制告警命令

电表回复:68 16 46 70 00 00 00 68 84 00 20 16

终端发送:68 16 46 70 00 00 00 68 04 06 6F F3 33 33 33 33 D4 16 //
断电控制命令

电表回复:68 16 46 70 00 00 00 68 84 00 20 16 //电表回复正常应答

图 4 广西 97 规约电能表拉闸报文

4)南网上行规约集中器对南网费控表拉合闸失败的问题。根据南网技术要求,南网费控表拉合闸采用密文方式,但由于南网计量终端目前未有配

置安全模块的技术要求,故计量终端目前无法进行密钥更新,从而无法通过身份认证和生成密文,故无法实现通过写控制参数的方式拉合闸。图5中案例的异常报文以明文组成写拉闸控制参数的方式对电表进行远程拉闸控制(信息体数据标识编码 FN = E0001100),终端此时虽然回复确认帧(错误码 = 00),这里仅表示终端收到了正确格式的报文,但电能表实际没有拉闸成功,因为此时终端下发给电表的是明文方式的拉闸命令,此时返回异常应答帧(错误码 ERR = 37H),对应的错误原因是未授权操作。根据表1,正确的方式应为中继转发方式且需先进行身份认证。此外,根据南网发布的费控电能表系列技术标准答疑,费控表可通过明文合闸,此时应对应采用03级控制密码。

异常报文:

主站发送:68 34 00 34 00 68 4A 00 01 45 F2 61 1E 0A 04 F0 01 17 00 11 00 E0 83 93 77 00 00 00 03 00 00 00 00 00 00 05 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 01 00 08 30 08 19 00 F7 16 // 写控制参数方式发送拉闸命令,明文方式,密级为03。

终端回复: 68 16 00 16 00 68 88 00 01 45 F2 61 1E 0A 04 E0 01 17 00 11 00 E0 00 08 30 08 19 00 8F 16 // 终端回复确认帧。

终端下发给电表:68 03 10 00 16 27 12 68 1C 10 36 33 33 33 AB 89 67 45 4D 33 43 64 4A 3A 3B 48 3B 16 // 明文方式的拉闸命令(控制码 C = 1C)。

电表回复:68 03 10 00 16 27 12 68 DC 01 37 46 16 //异常应答帧。

正确报文:

主站发送:68 59 00 59 00 68 4A 00 01 45 F2 61 1E 0A 10 F0 00 00 01 00 02 E3 00 1F 08 01 08 00 64 2C 68 37 49 78 02 17 00 68 03 20 32 33 33 3A 33 33 33 33 7E 58 BD 1A 3E 7C 5C C1 24 A7 7D FF 6A AF 85 5B 6A 7C AB 35 4A 33 33 33 0F 16 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 53 09 17 00 58 16 //。中继转发方式发送:身份认证。

终端回复:68 3D 00 3D 00 68 88 00 01 45 F2 61 1E 0A 10 E0 00 00 01 00 02 E3 00 1C 68 37 49 78 02 17 00 68 83 10 32 33 33 3A 91 00 C2 6F 41 99 84 33 43 64 35 33 A8 16 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 53 09 17 00 14 16 // 中继回复,认证成功(控制码:C = 83H)

主站发送:68 55 00 55 00 68 4A 00 01 45 F2 61 1E 0A 10 F0 00 00 01 00 02 E3 01 1F 08 01 08 00 64 28 68 37 49 78 02 17 00 68 1C 1C C9 33 33 33 33 33 33 33 AB 15 C5 2B 22 22 10 17 7F A9 56 68 87 84 4F 45 3A D7 DA B7 89 16 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 03 53 09 17 00 4C 16 // 中继转发方式发送:拉闸命令。

终端回复:68 2D 00 2D 00 68 88 00 01 45 F2 61 1E 0A 10 E0 00 00 01 00 02 E3 01 0C 68 37 49 78 02 17 00 68 9C 00 7D 16 00 00 00 00 00 00 D6 56 83 33 03 53 09 17 00 94 16// 终端回复电表的中继报文,报文中电表做正常应答

图5 南网费控表拉闸报文

4 结 语

随着广西电网计量自动化“两覆盖”和计量信息安全防护体系建设的深入,通讯协议多元化计量设备的接入将对计量系统功能的正常发挥带来新的问题。前面分析了广西电网常见的电能表和计量终端远程控制通信协议的特点,并给出了推荐控制方案和流程。接着通过实例分析了不同通信模块和集中器厂家组合的拉闸平均响应时间的差异特点,最后对开关误动作事件异常、拉合闸机制不匹配、安全认证失败等异常问题进行了通讯报文的实例分析。可见,只有提高运维人员的规约解析能力和故障分析水平,准确识别和处理故障,才能确保用户的正常用电。

参考文献

[1] 胡飞雄,周保荣,卢斯煜. 南方电网促进可再生能源消纳的实践及发展展望[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 22-28.

[2] 梁捷,李刚,黄柯颖. 费控电能表费控功能检测中的若干问题分析[J]. 广西电力, 2017, 40(6):44-48.

[3] 梁捷. 基于椭圆曲线加密的电能表数据传输系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2018(5):112-114.

[4] 中国南方电网有限责任公司市场营销部. 中国南方电网有限责任公司多功能电能表通信协议扩展协议:Q/CSG 1130-2011[S],2015.

[5] 梁捷. 基于 ZigBee 的电子式电能表能耗研究[J]. 青海电力, 2018, 37(2):41-44.

[6] 梁捷,李刚. 计量终端自动化功能测试系统的功能测试研究[J]. 电气应用, 2017, 36(3):83-87.

[7] 白俊然. 智能预付费电能表的应用及修校技术探究[J]. 通讯世界, 2017(17):232-233.

[8] 张皓岚,贺慧英,陈涛,等. 舰船电力载波通信的阻抗匹配设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42(2): 104-110.

[9] 张一利. 基于智能电表的电力机车能耗管理优化系统[J]. 山东工业技术, 2015(24):114-114.

作者简介:

梁捷(1987),工学硕士,工程师,主要从事电能计量管理方面的工作。

(收稿日期:2019-04-28)