

《四川电力技术》
编辑委员会

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

目 次

· 国网四川省电力公司研究生工作站专栏 ·	
基于阻抗模型的集中式光伏电站谐波放大机理研究	王若瀚,徐琳,郑连清,董乘甫(1)
基于局部放电与 PDC 法的油膜介质老化程度研究	赵凯林,张晨萌,侯世英,高晨璐,程 铭(8)
宽频暂态电场测量装置的研究	董乘甫,熊振中,谢施君,郑连清,王若瀚,向 军(12)
罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性研究	邢昊中,吴 杰,贺子润(17)
电网超低频振荡影响因素综合分析与抑制措施研究	贺子润,陈 振,邢昊中(24)
· 电力大数据 ·	
基于组合支持向量回归的排污企业生产识别	靳 旦,唐 伟(29)
基于电力数据的居民人口流动情况评估	刘 畅,滕予非,唐 伟,靳 旦,李赋欣(33)
春节期间主要行业用电波动特性研究	戴松灵,唐 权,任志超(38)
· 电力智能装备 ·	
电力作业现场可穿戴安全保障系统设计与实现	常政威,彭 倩,张 泰,谢晓娜(43)
电力机器人的自主导航与视觉辅助定位融合方法	谢晓娜,刘 曦,常政威,彭 倩,许 硕(48)
无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究	李倩竹,杜永永,杨 阳(53)
· 电力系统 ·	
主动式配电网铁磁谐振消谐方法研究	朱子民,秦艳辉,朱咏明,段青熙,亢朋朋,刘 勇,董雪涛,樊国旗(57)
10 kV 线路调压器在低电压治理中的应用	罗 洋,蒋 伟,张星海,魏书超(64)
LCL 滤波器无源阻尼和有源阻尼对多逆变器并网谐振影响对比分析	郑嘉龙,杨 鸽,刘一均,刘 蓓(68)
基于频响法的电力变压器剩磁检测技术研究	谭志红,张 榆,单 飞,穆 舟,程 铭(73)
基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统的设计与实现	段翔兮,邹 琬,高 剑,李 熠,杨紫苓,宋永娟(78)
一种改进前推回代法的配电网潮流计算	张 捷,徐 焰,张学飞(85)
接线错误对抽头式电流互感器变比影响分析	刘 刚,覃 剑,胡 娟,艾 兵,何 娜,刘 鹏,张福州(91)
封面图片由廖望提供	

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2020 年第 43 卷第 3 期(总 267 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 缨

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得文化传播有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数]CN51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*18*

2020-6

CONTENTS

· Thesis by Postgraduate Workstation of State Grid SEPC ·

Research on Harmonic Amplification Mechanism of Centralized Photovoltaic Power Plant Based on Impedance Model	Wang Ruohan, Xu Lin, Zheng Lianqing, Dong Chengfu(1)
Research on Aging Degree of Oil – film Dielectric Based on Partial Discharge and PDC Method	Zhao Kailin, Zhang Chenmeng, Hou Shiyong, Gao Chenlu, Cheng Ming(8)
Research on Measuring Device for Wideband Transient Electric Field	Dong Chengfu, Xiong Zhenzhong, Xie Shijun, Zheng Lianqing, Wang Ruohan, Xiang Jun(12)
Research on the Wide – frequency – domain Transfer Characteristics of Electronic Current Transformer with Rogowski Coil	Xing Haozhong, Wu jie, He Zirun(17)
Comprehensive Analysis of Factors Affecting Ultra – low Frequency Oscillations in Power Grid and Research on Control Measures	He Zirun, Chen Zhen, Xing Haozhong(24)

· Power Big Data ·

Identification of Production for Pollution Emission Enterprises Based on Ensemble Support Vector Regression	Jin Dan, Tang Wei(29)
Population Mobility Evaluation of Residents Based on Electric Power Data	Liu Chang, Teng Yufei, Tang Wei, Jin Dan, Li Fuxin(33)
Research on Power Consumption Fluctuation Characteristics of Main Industries during the Spring Festival	Dai Songling, Tang Quan, Ren Zhichao(38)

· Electrical Intelligent Equipment ·

Design and Implementation of Wearable Safety Guarantee System for Electric Power Operation Site	Chang Zhengwei, Peng Qian, Zhang Tai, Xie Xiaona(43)
A Vision Assisted Positioning Method with Autonomous Navigation of Electric Robot	Xie Xiaona, Liu Xi, Chang Zhengwei, Peng Qian, Xu Shuo(48)
Application and Research on Intelligent Inspection of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Transmission Lines	Li Qianzhu, Du Yongyong, Yang Yang(53)

· Power System ·

Research on Ferro – resonance Harmonic Elimination Method for Active Distribution Network	Zhu Zimin, Qin Yanhui, Zhu Yongming, Duan Qingxi, Kang Pengpeng, Liu Yong, Dong Xuetao, Fan Guoqi(57)
Application of Voltage Regulator in Low Voltage Control for 10 kV Line	Luo Yang, Jiang Wei, Zhang Xinghai, Wei Shuchao(64)
Comparative Analysis on Influence of Passive Damping and Active Damping of LCL Filter on Multi – inverter Grid – connected Resonance	Zheng Jialong, Yang Ge, Liu Yijun, Liu Bei(68)
Research on Residual Magnetism Detection Technology of Power Transformer Based on Frequency Response Method	Tan Zhihong, Zhang Yu, Shan Fei, Mu Zhou, Cheng Ming(73)
Design and Implementation of Monitoring Alarm Information Display System Based on Unity3d	Duan Xiangxi, Zou Wan, Gao Jian, Li Yi, Yang Ziling, Song Yongjuan(85)
Power Flow Calculation of Distribution Network Based on An Improved Forward/Backward Substitution Method	Zhang Jie, Xu Yan, Zhang Xuefei(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2020 Vol. 43 No. 3

(Ser. No. 267)

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

基于阻抗模型的集中式光伏电站谐波放大机理研究

王若瀚¹, 徐琳², 郑连清¹, 董乘甫^{1,2}

(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:针对现有多逆变器并网系统研究缺乏对集中式大型光伏发电系统建模的问题,利用诺顿、戴维南等效定理对集中式光伏并网系统的发电单元、各级升压变压器、输电线路以及电网进行等值建模,建立并网发电系统的阻抗模型,并在此基础上推导谐波与系统各阻抗间的关系。利用频域分析研究谐波在传输过程中的放大机理,仿真结果给出了谐波电流放大倍数受阻抗模型的等效电源系数与等效耦合导纳的影响关系,为后续研究谐波抑制策略提供理论基础。

关键词:集中式光伏电站;阻抗模型;频域分析

中图分类号:TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0001-07

Research on Harmonic Amplification Mechanism of Centralized Photovoltaic Power Plant Based on Impedance Model

Wang Ruohan¹, Xu Lin², Zheng Lianqing¹, Dong Chengfu¹

(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: Aiming at the lack of modeling of large-scale centralized photovoltaic power generation systems in the study of the existing multi-inverter grid-connected systems, the Norton and Thevenin equivalent methods are used for equivalent modeling of power generation units, boost transformers, transmission lines and power grid for centralized photovoltaic grid-connected systems, and the impedance model of grid-connected power system is established. On this basis, the relationship between harmonics and system impedances is derived, and the frequency domain analysis is used to study the amplification mechanism of harmonics in the transmission process. The influence of equivalent power coefficient and equivalent coupling admittance of the impedance model on harmonic current amplification factor is given by the simulation results, which provides a theoretical basis for the subsequent research on harmonic suppression strategies.

Key words: centralized photovoltaic power plant; impedance model; frequency domain analysis

0 引言

受中国能源分布的影响,集中式光伏电站主要分布在西北偏远地区^[1],这使得光伏电站往往需要通过较长距离的输电线路才能上网。线路阻抗以及各级变压器会使电网与电站间产生负面交互作用,导致系统稳定性降低,电站输出谐波问题严重。因此,提高光伏电站输出电能质量、降低输出谐波电流含量,对于并网系统的安全稳定运行具有重要意义。

这就需要对集中式光伏发电系统输出谐波的放大机理进行研究。

研究集中式光伏并网系统的谐波问题首先应对系统进行建模,然后再在模型基础上分析谐波放大的机理。国外较早就进行了针对交流系统的建模研究,文献[2]将直流系统中的阻抗建模引入到交流系统,将逆变系统、网侧系统分别进行诺顿电路、戴维南电路等效,然后就可以利用频域分析工具对系统进行研究。该方法提供了交流并网系统的建模工具,但是只建立了单机理想并网模型。

在国内,文献[3-5]将光伏电站各电气结构进行了等值建模,建立了输配电系统的等值电路,但是仅将逆变系统考虑为谐波电流源,忽视其内部控制环节。文献[6]提出诺顿等效电源系数表示逆变系统的内部控制环节,但是建模未考虑传输线路与升压变压器等结构。目前来看,针对光伏并网系统建模问题,研究主要集中在多逆变器并网结构或者分布式电站,鲜有对集中式光伏系统进行各结构充分建模^[7-11]。

对于谐波放大的机理研究,文献[6,8]采用节点电压法求解了等值电路,得到谐波电流的数学模型。文献[3]则是认为系统的串并联谐振导致了谐波放大。文献[12-13]认为传输线路的分布电容效应会使并网系统出现宽频域谐振带。也有学者通过根轨迹与稳定裕度的分析,认为谐波放大受电网阻抗与光伏电站容量的影响^[11,14-15]。

根据上述研究现状,充分考虑集中式光伏系统的各环节等效建模问题,建立并网系统的等值电路,在 Matlab 中绘制谐波电流的频域响应,并在 Simulink 中搭建光伏发电模型进行对比验证,进而揭示谐波放大的机理,为后续谐波抑制策略的研究提供理论基础。

1 并网系统的等值建模

目前集中式的光伏电站采用发电单元并联结构,通过站内母线汇集,然后经站内升压变压器及并网点主变压器升压,通过长高压输电线路上网。图 1 为电站电气结构,研究对象为 50 MVA 的集中式电站,发电单元由输出 270 V 直流的光伏电池阵列与 LCL 型的 500 kW 光伏逆变器和逆变器出口 0.27/35 kV 升压变压器构成, n 个发电单元经 35 kV 母线汇流后通过 35/110 kV 主升压变压器接入高压输电线路上网。

构建集中式光伏发电系统的等值电路,需要对并网发电系统中的发电单元、各级变压器、传输线路、电网侧进行等值简化。采用电流控制的并网型逆变系统在具体阻抗模型中可以进行诺顿等效,电网侧可进行戴维南等效。图 2 为经过等值后从实际电气结构中提取的具体阻抗模型,其中变压器进行 τ 型等值,输电线路进行 π 型等值。

图 2 可经过电路变换进行简化,得到如图 3 所

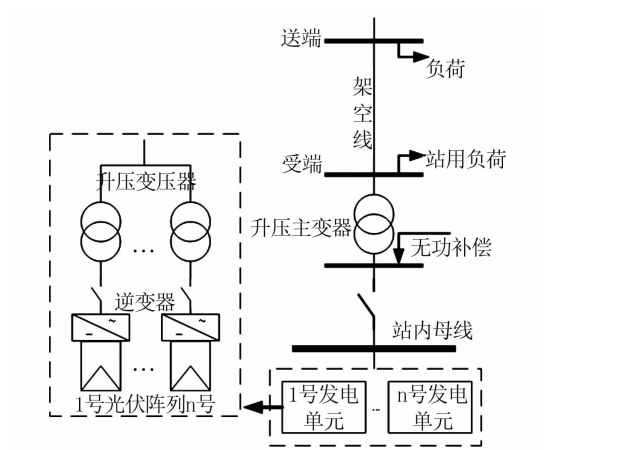


图 1 集中式光伏电站电气结构

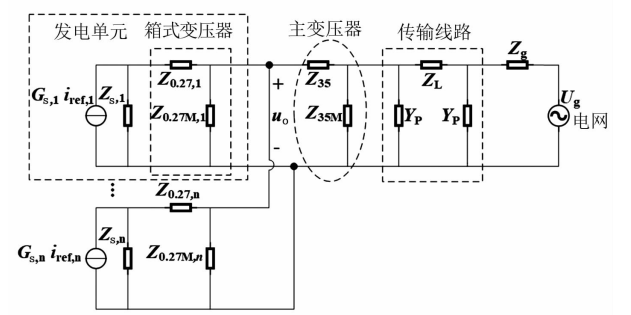


图 2 光伏发电系统具体阻抗模型

示的典型的诺顿等效电源与戴维南等效电源的互联阻抗模型。图 2 与图 3 中各符号及含义由表 1 给出。

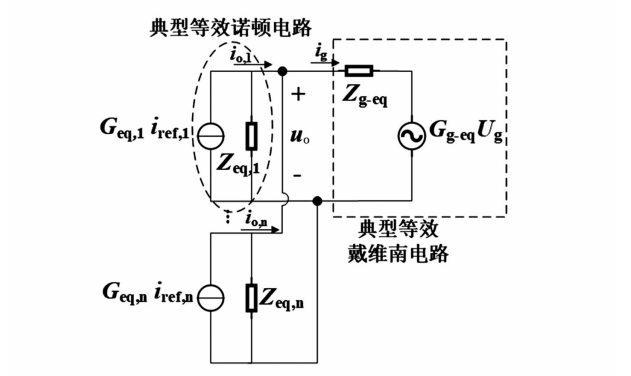


图 3 光伏发电系统简化阻抗模型

下面进行等效诺顿、戴维南系数的整定计算。
诺顿等效电流源系数 G_s 反映了逆变系统的控制策略,其值等于逆变器出口电流 i_2 与参考电流 i_{ref} 的比值,即为电流环的闭环传递函数。图 4 为发电单元中逆变器的电流环框图。由图 4 可得到带有源阻尼的闭环传递函数 $G_s(s)$,如式(1)所示。

$$G_s = \frac{I_2}{I_{ref}} = \frac{G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} k_{pwm} k_c G_c} \quad (1)$$

式中： $G_1 = \frac{1}{sL_1}$, $G_2 = \frac{1}{sL_2}$, $G_{Cf} = \frac{1}{sC_f}$, L_1 、 L_2 、 C_f 分别为LCL滤波器的逆变侧电感、网侧电感以及滤波电容； k_{pwm} 为将逆变器调制环节等效出来的比例环节，等于直流母线电压 U_{dc} 与调制载波 U_{tri} 之比。

表 1 电路各参数含义

参数	含 义
Z_s	逆变器等效输出阻抗
G_s	诺顿等效电流源系数
$Z_{0.27}$	箱式变压器短路阻抗
$Z_{0.27M}$	箱式变压器励磁阻抗
Z_{35}	主变压器短路阻抗
Z_{35M}	主变压器励磁阻抗
Z_L	输电线路等效阻抗
Y_p	输电线路等效导纳
Z_g	电网阻抗
U_g	电网电压
G_{eq}	变换简化后的诺顿等效电流源系数
Z_{eq}	变换简化后的逆变器等效输出阻抗
Z_{g-eq}	变换简化后的戴维南等效阻抗
G_{g-eq}	变换简化后的戴维南等效电压源系数

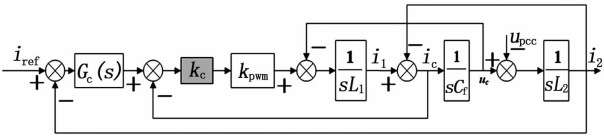


图 4 光伏逆变器电流环框图

各逆变器等效输出阻抗 Z_s 等于输出电流 i_2 与输出电压 u_{pcc} 的比值。图 5 为图 4 经变换后可反映 u_{pcc} 与 i_2 的传递函数关系的框图。根据图 5 可计算逆变器的等效输出阻抗 Z_s ，如式(2)所示。

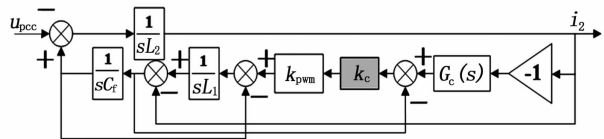


图 5 输出电压与输出电流的传递函数关系

$$Z_s = \frac{1}{Y_s}$$

$$Y_s = \frac{I_2}{u_{pcc}} = - \frac{G_2 + G_1 G_2 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf}}{1 + G_1 G_{Cf} + G_2 G_{Cf} + G_1 k_{pwm} k_c + G_1 G_2 G_{Cf} G_c k_{pwm} k_c} \quad (2)$$

G_{eq} 代表着简化后等效诺顿电源系数，如式(3)所示。

$$G_{eq} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_{0.27}} \cdot G_s \quad (3)$$

Z_{eq} 代表着简化后诺顿电源并联等效阻抗，如式(4)所示。

$$Z_{eq} = \frac{(Z_s + Z_{0.27}) \cdot Z_{0.27M}}{Z_s + Z_{0.27} + Z_{0.27M}} \quad (4)$$

Z_{g-eq} 代表着简化后网侧戴维南电路的等效串联阻抗，如式(5)所示。

$$Z_{g-eq} = (Z_g \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p \parallel Z_{35M} + Z_{35} \quad (5)$$

G_{g-eq} 代表着戴维南等效后的网侧等效电源系数，如式(6)所示。

$$G_{g-eq} = \frac{Z_{35M} \parallel Z_p}{Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L} \cdot \frac{(Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p}{(Z_{35M} \parallel Z_p + Z_L) \parallel Z_p + Z_g} \quad (6)$$

考虑 n 台发电单元并网运行的情况，利用节点电压法可对图 3 中的节点电压 U_o 进行求解。节点电压方程如式(7)所示。

$$\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} U_o + Y_{g-eq} U_o = \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i} + Y_{g-eq} G_{g-eq} U_g \quad (7)$$

又因为并联系统中任一发电单元(以第 j 台表示)诺顿等效电源满足式(8)：

$$I_{o,j} = G_{eq,j} I_{ref,j} - Y_{eq,j} U_o \quad (8)$$

通过消去节点电压 U_o ，可以得到单个发电单元输出电流 $I_{o,j}$ 的表达式为

$$I_{o,j} = \left(G_{eq,j} - \frac{Y_{eq,j} G_{eq,j}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,j} - \left(\frac{Y_{eq,j} \sum_{i=1}^n G_{eq,i}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) I_{ref,i} - \left(\frac{G_{g-eq} Y_{eq,j} Y_{g-eq}}{\sum_{i=1}^n Y_{eq,i} + Y_{g-eq}} \right) U_g \quad (9)$$

式(9)分为 3 个部分，可以看出发电单元输电电流受自身参考电流、其他并联发电单元参考电流以及电网电压 3 个因素影响。

对于集中式光伏电站,更关注其入网电流 I_g 的情况,因此对式(9)的 $I_{o,j}$ 进行求和得

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n G_{eq,i} I_{ref,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} - \left(\frac{G_{g-eq} Y_{g-eq} \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} \right) U_g$$

(10)

假设各发电单元完全一致,则式(10)可简化为式(11):

$$I_g = \frac{Y_{g-eq} n G_{eq,i} I_{ref}}{Y_{g-eq} + n Y_{eq}} - \frac{G_{g-eq} n Y_{eq} Y_{g-eq}}{Y_{g-eq} + \sum_{i=1}^n Y_{eq,i}} U_g$$

(11)

式(11)与式(8)类似,均为 $I_g = GI_{ref} - YU_g$ 形式,说明入网电流 I_g 受集中式电站等效系数 G 和电站与电网等效耦合导纳 Y 的影响,在系统阻抗模型中,考虑 50 MVA 集中式光伏电站的情况,即台数 n 将固定,那么 G 和 Y 与传输线路阻抗有关,即受传输线路长度的影响。

2 谐波放大机理分析

利用 Matlab 对前面已建立的集中式等效电源系数 G 和电站与电网等效耦合导纳 Y 进行频域分析,思路是不断改变输电线路长度,可以得到一系列系数 G 和 Y 的幅频响应曲线,然后利用绘图工具将曲线簇放在同一坐标轴系内,绘制出等效电源系数 G 和电站与电网等效耦合导纳 Y 随输电线路长度变化的幅频响应特性图。仿真算法流程图如图 6 所示。

图 7 为系数 G 和 Y 随输电线路长度变化的幅频响应图。

图 7 说明了 3 点:1)谐振尖峰频率点会随着线路长度增加而向低频段移动;2)输电线路的分布电容效应会使得同一线路长度下系统产生多个谐振点,体现为图 7 中的环形带;3)等效电源系数 G 对入网电流的影响远高于等效耦合导纳 Y 的影响,电网电压通过等效耦合导纳 Y 对入网电流施加的影响较小。根据幅频响应图,可以大致得到响应幅值与频率和长度的对应关系,比如在 60 km 馈线长度与 19 次谐波处存在一个谐振尖峰,说明该电站模型网侧的 19 次左右的谐波电流含量将受到较大程度的增加。

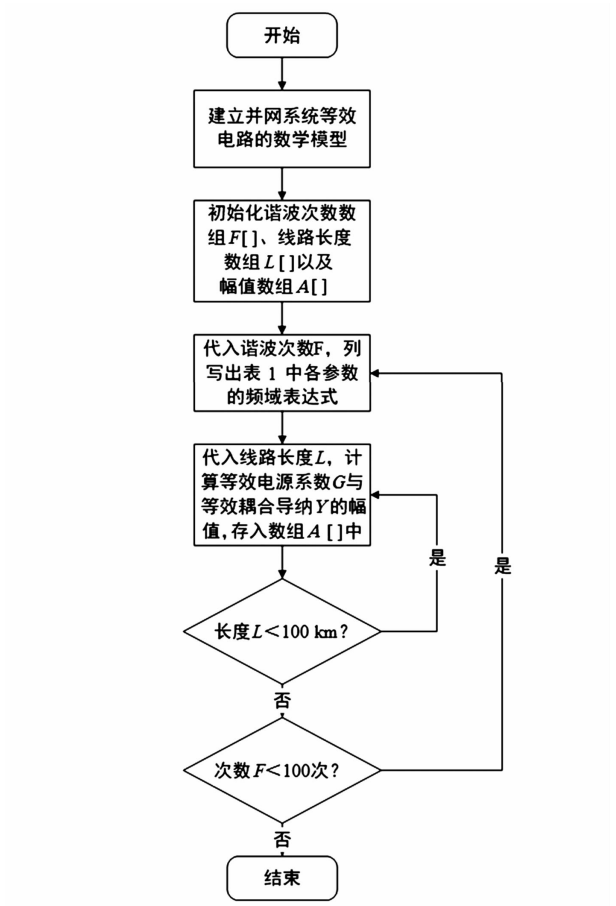


图 6 仿真计算流程

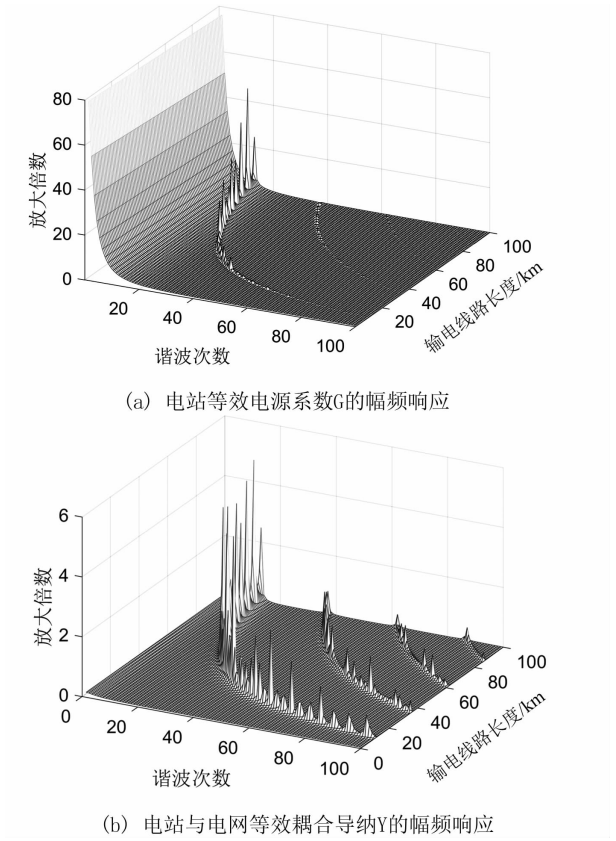


图 7 系数 G 和 Y 随输电线路长度变化的幅频响应

3 仿真对照分析

为了更好说明集中式光伏电站输出谐波放大的问题,按照图 8 的结构在 Simulink 中搭建容量为 50 MVA 的电站仿真模型。

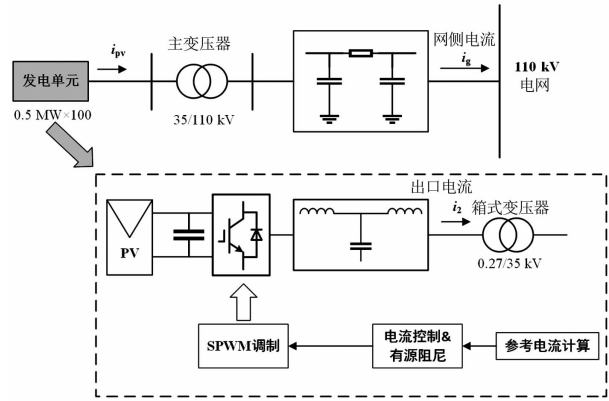


图 8 光伏电站仿真模型结构

图 9 为单个发电单元仿真模型的控制结构。该模型的发电单元为单级式三相 LCL 逆变器,采用电容电流反馈阻尼以及网侧电流闭环控制,由电压外环提供电流环给定值。

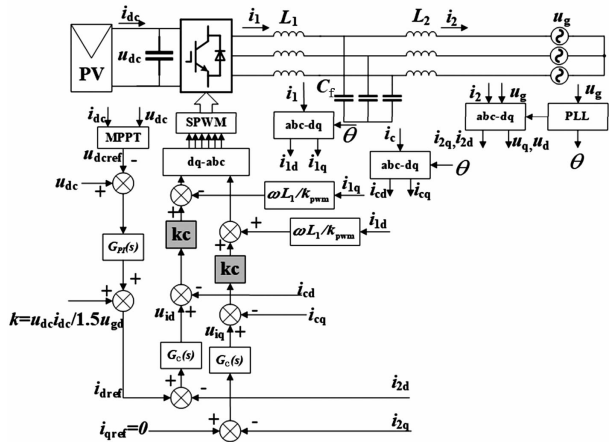


图 9 光伏逆变器的控制策略

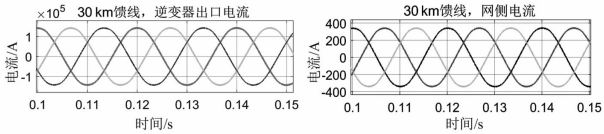
光伏电池组采用 Simulink 中由 ISoltech 厂商提供的模型,型号为 ISTH-220-P,单块额定功率 219 W,最大功率点电压 29.3 V,最大功率点电流 7.47 A,开路电压 36.6 V,短路电流 7.97 A,串联单元 19 个,并联单元 120 个。MPPT 采用定电压跟踪策略,使直流母线电压 U_{dc} 维持在最大功率点 557 V 左右。发电单元相关参数如表 2 所示。

假设各发电单元完全一致,那么可以将 50 MVA 的电站模型进行单机等值,以便在 Simulink 中运行。通过仿真,可以得到不同线路长度下,逆变器出

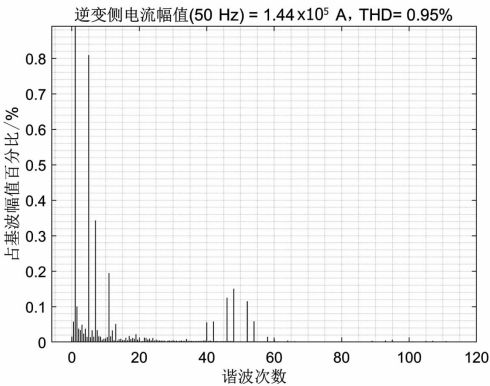
表 2 仿真参数设置

参 数	值
开关频率	$f_s = 2.5 \text{ kHz}$
直流母线电压 U_{dc}	557 V
单台逆变器功率 P	500 kW
发电单元箱式变压器	0.27/35 kV, yn - D11
主变压器	35/110 kV, Yn - d11 $L_o = 1.2 \text{ mH}$
输电线路 (1 km)	$r_o = 0.053 \text{ } \Omega$ $c_o = 12.9 \text{ nF}$ $L_1 = 0.24 \text{ mH}$ $L_2 = 0.08 \text{ mH}$ $C_f = 220 \text{ } \mu\text{F}$
LCL 滤波器	
直流稳压电容	5100 μF
电流环 PI 控制器	$k_p = 0.2, k_i = 50$
电压环 PI 控制器	$k_p = 2, k_i = 10$

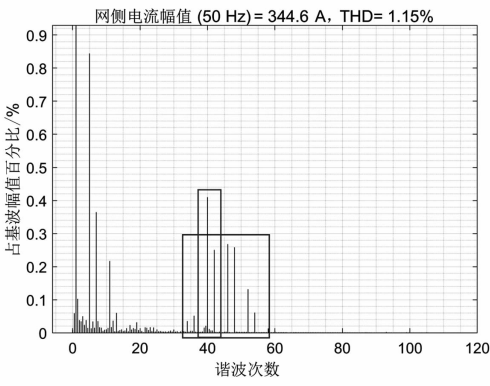
口电流与网侧电流的波形与频谱分析。图 10 至图 12 分别为 30 km、60 km、80 km 时的仿真结果。



(a) 线路长度 30 km 时逆变器出口电流 (b) 线路长度 30 km 时网侧电流



(c) 线路长度 30 km 时逆变器出口电流频谱



(d) 线路长度 30 km 时网侧电流频谱

图 10 线路长 30 km 时仿真结果

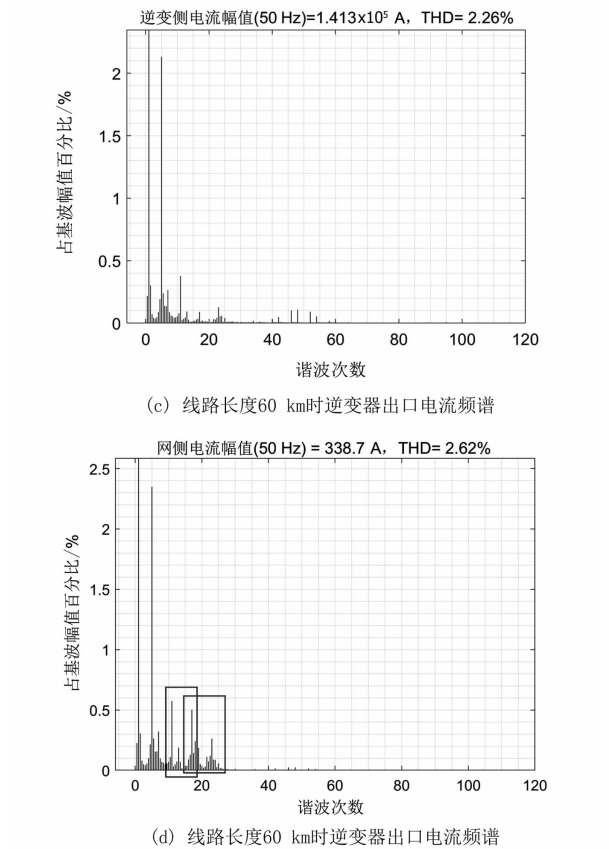
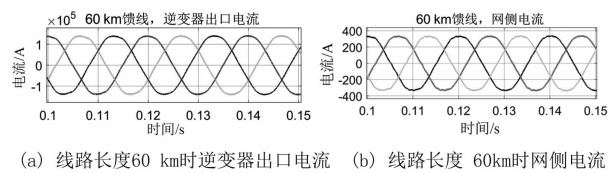


图 11 线路长度 60 km 时仿真结果

从图 10 至图 12 可以看出,谐波电流在传输过程中普遍存在放大现象,不同长度的线路影响着不同频率的谐波,且影响程度也不同。在网侧电流频谱中标注出了被明显放大的谐波,其频率位置与图 7 幅频响应图大致对应。

以图 11 线路长度为 60 km 时的仿真结果为例进行分析,从图 11(d)可以看出,受到较明显放大的网侧谐波电流频率主要在 11 ~ 23 次谐波。下面将仿真波形与第 2 节幅频响应曲线图进行对照。

表 3 给出了图 7 中线路长度为 60 km 时等效电源系数 G 和等效耦合导纳 Y 的响应幅值。

表 3 说明了当输电线路为 60 km 长度时,系统的谐振尖峰处在 11、13、17、19、21、23 次,其中最高谐振尖峰处在 19 次。

表 4 给出了在线路长度为 60 km 的情况下,逆变器出口电流与网侧电流中处在该频次范围的谐波电流含量。

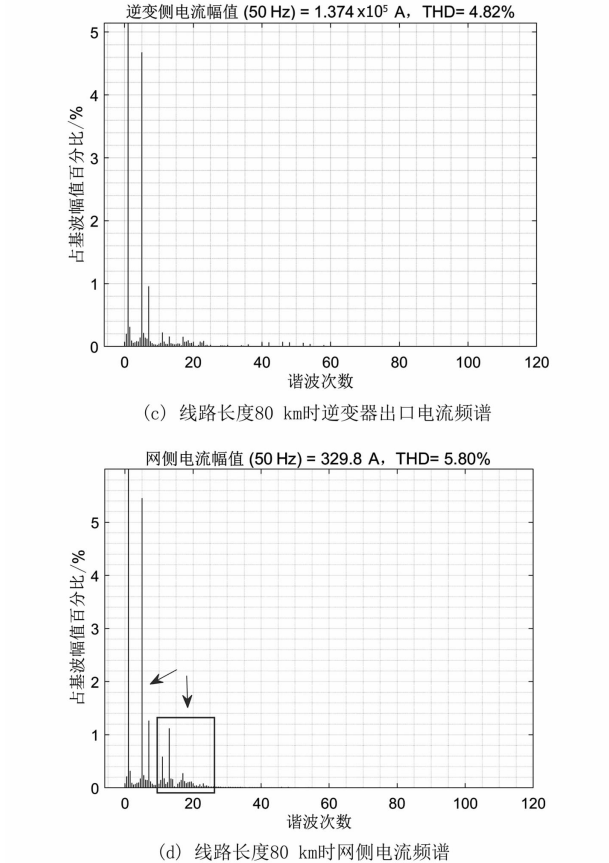
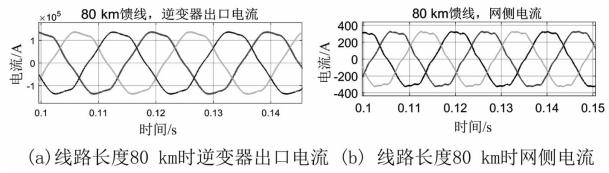


图 12 线路长 80 km 时仿真结果

表 3 等效电源系数 G 和等效耦合导纳 Y 幅频响应幅值

谐波次数	系数 G	系数 Y
11	4.318 8	0.056 3
13	3.020 1	0.062 6
17	1.193 4	0.146 6
19	12.002 1	1.982 2
21	1.848 4	0.107 4
23	1.328 6	0.051 5

表 4 逆变器出口电流与网侧电流中各次谐波的含量

谐波次数	逆变侧谐波含量/%	网侧谐波含量/%	放大倍数
11	0.38	0.57	1.50
13	0.09	0.19	2.11
17	0.09	0.50	5.56
19	0.02	0.18	9.00
21	0.01	0.03	3.00
23	0.13	0.26	2.00

从表4可以看出,线路长60 km时,17、19、21次谐波的放大倍数较为突出,其中19次谐波放大程度最严重,这与表3的结果相符,但是11、17次谐波的放大倍数与表3结果相比偏大,可能是由于在建立Simulink光伏电站开关仿真模型时,控制器效果不够理想导致的谐波含量数值上的偏差。

4 结 语

以50 MVA的集中式光伏电站为研究对象,建立了集中式光伏电站的等效阻抗模型,并在阻抗模型基础上研究谐波电流放大的机理。得出以下结论:

- 1)集中式光伏发电系统的谐振频率会随着传输线路长度的增加而逐渐向低频偏移,输电线路的分布式电容会使得系统幅频响应出现环形谐振尖峰带。
- 2)系统阻抗模型可以简化为 $I_g = GI_{ref} - YU_g$ 形式,仿真分析表明谐波电流受等效电源系数 G 和等效耦合导纳 Y 的影响,幅频响应图中的尖峰频率对应着受到严重放大的谐波电流频率。
- 3)在后续研究抑制策略时,可通过改变系统阻抗模型中的等效电源系数 G 和等效耦合导纳 Y ,抑制幅频响应图中的尖峰,就能使系统谐波电流含量降低。可从外接滤波装置以达到系统阻抗重塑,亦或直接改变逆变器控制策略从而修改等效电源系数 G 两个方向进行研究。

参考文献

[1] 国家能源局. 国家能源局关于2019 风电、光伏发电项目建设有关事项的通知[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2019-05/30/c_138102795.htm.

[2] Sun Jian. Impedance - based Stability Criterion for Grid - connected Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(11):3075 - 3078.

[3] 谢宁,罗安,陈燕东,等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):10 - 17.

[4] 谢宁,罗安,马伏军,等. 大型光伏电站与电网谐波交

互影响[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):9 - 16.

[5] 陈祥,潘基书. 光伏电站组件串联数的优化设计[J]. 云南电力技术,2018,46(5):1 - 2.

[6] 匡慧敏,罗安,陈智勇,等. 多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J]. 电网技术,2016,40(4):1180 - 1189.

[7] 陈智勇,黄旭程,杨芩,等. 分布式电站宽频域谐振机理分析及阻抗协调构造方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):141 - 154.

[8] Zhiyong Chen, Yangdong Chen, Josep M., et al. Generalized Coupling Resonance Modeling, Analysis, and Active Damping of Multi - parallel Inverters in Microgrid Operating in Grid - connected Mode[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2016,4:63 - 75.

[9] 许德志,汪飞,阮毅,等. 多逆变器并网系统阻抗建模与谐波交互[J]. 电机与控制学报,2014,18(2):1 - 7.

[10] 许德志,汪飞,毛华龙,等. 多并网逆变器与电网谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):64 - 71.

[11] 杨明. 大型光伏电站逆变器并网控制策略及稳定性分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[12] 帅智康,肖凡,涂春鸣,等. 宽频域谐波谐振劣化机理及其抑制措施[J]. 电工技术学报,2013,28(12):16 - 23.

[13] Zhang Shao, Jiang Shuai, Lu Xi, et al. Resonance Issues and Damping Techniques for Grid - connected Inverters with Long Transmission Cable[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(1):110 - 120.

[14] 郑晨. 集中式大型光伏并网系统谐振机理及谐振抑制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[15] 周林,张密. 大型光伏电站谐振现象分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):8 - 14.

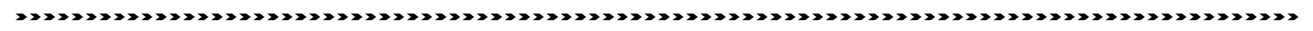
作者简介:

王若瀚(1997),硕士研究生,研究方向为光伏发电系统稳定性;

郑连清(1964),博士,教授,主要研究方向为电力电子技术

技术在电力系统中的应用等。

(收稿日期:2020-03-25)



欢迎投稿

欢迎订阅

投稿邮箱:cdscdljs@163.com

基于局部放电与 PDC 法的油膜介质老化程度研究

赵凯林¹,张晨萌²,侯世英¹,高晨璐¹,程 铭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)

摘 要:电力电容器在其长达数十年的运行周期中会随时间不断老化,且以操作过电压造成的电老化为主。电容器的内绝缘——油膜介质在承受多次冲击电压后会发生绝缘性能下降,甚至出现绝缘早期失效的现象。为了对不同老化程度的油膜型介质有一个初步的判断,搭建了油膜介质老化与测试平台来对其施加不同次数的冲击电压,并分别采用交流下的局部放电法与极化去极化电流法进行实验研究。结果表明,随着油膜介质老化程度的加深,其交流下局部放电的起始放电电压是下降的,并且油膜介质 PDC 曲线去极化电流最大值呈上升的趋势。最后,结合油膜介质在冲击电压作用下内部分子结构的变化进行了相应的解释。

关键词:油膜介质;冲击电压;局部放电;PDC 法

中图分类号:TM21 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0008-04

Research on Aging Degree of Oil – film Dielectric Based on Partial Discharge and PDC Method

Zhao Kailin¹, Zhang Chenmeng², Hou Shiying¹, Gao Chenlu¹, Cheng Ming¹

(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 power capacitor will age continuously with time in its long operation cycle of several decades, mainly caused by operating overvoltage. Internal insulation of capacitor — the oil – film dielectric will suffer from the decline of insulation state and even the early failure of insulation after it has been subjected to multiple impulse voltages. In order to have a preliminary judgment of oil – film dielectric with different aging degree, an oil – film dielectric aging and testing platform is established to apply multiple impulse voltage, and the partial discharge (PD) under AC and polarization and depolarization current (PDC) method are used respectively. The results show that the initial discharge voltage of PD decreases with the aging degree of oil film dielectric, and the maximum depolarization current of PDC curve increases. Finally, the above changes are explained by the changes of the internal molecular structure of oil – film dielectric under the impulse voltage.

Key words:oil – film dielectric; impulse voltage; partial discharge; PDC method

0 引 言

电容器作为电力系统中关键的无功补偿和滤波设备,其良好的运行状态对于保证电网的稳定性具有重要意义^[1-3]。然而近几年,输电系统中发生的故障事故大多数都来源于电容器的绝缘劣化^[4],而电容器绝缘性能下降的主要原因是由于频繁的投切使其承受多次的操作过电压。电力电容器内的绝缘

材料为苤基甲苯和聚丙烯构成的复合介质(其中苤基甲苯作为绝缘油,聚丙烯作为有机膜),电力电容器在承受多次操作过电压下的失效过程也与这两种材料密切相关。因此,通过对电容器施加多次的冲击电压来模拟其老化过程,从中找到判断电容器老化程度的检测方法与相关特征量显得十分必要。

传统的电力电容器老化状态检测方法主要包括油中溶解气体、糠醛、平均聚合度、局部放电法等^[5-6],但前3种方法或多或少都存在取样困难、不

易检测等问题,而局部放电法作为一种无损的绝缘检测技术,不仅可通过放电量、放电次数等参数来反映介质的绝缘状态,而且测试的灵敏度较高,在电力行业的应用十分广泛。文献[7]中研究了油膜介质中聚丙烯薄膜的绝缘状态对局部放电情况的影响,随着聚丙烯老化程度的加深,局部放电的严重程度明显增加,且放电部位周围介质的电导率也会发生变化。文献[8]通过直流局部放电信号研究了脉冲电容器的老化规律,并设计了一套直流局部放电测试系统;该系统能够滤除干扰脉冲从而提取出局部放电脉冲数,得到了不同老化阶段的局部放电统计特性,解决了现场局部放电测试中的低灵敏度和干扰大的问题。

近年来,作为一种新兴的老化程度检测手段,极化去极化电流法(polarization - depolarization current, PDC)受到广大学者的重视^[9-11]。该方法基于介电响应理论,在外加电场的作用下,电介质中的偶极子受到力的作用发生转向,该过程称为极化现象,主要包括偶极子转向极化、位移极化、分子界面极化等,产生一个极化电流;当撤去外电场时,偶极子不再受到力的作用,分子由于自身的弛豫性质会逐渐恢复到离散的状态^[12],称为去极化过程,产生一个去极化电流。PDC法具有非破坏性、测试速度快等优点,且当电介质材料出现老化后,其极化和去极化电流中包含了介质的绝缘状态信息,利用测试得到的PDC曲线提取相应的指标从而可以有效地对油膜介质的老化程度进行判断。文献[13]研究了变压器油纸绝缘极化/去极化电流法特征量,分别对油老化和纸老化提出了不同的特征量,并验证了其可行性。文献[14]采用极化去极化电流法来评估配电网中运行的交联聚乙烯(XLPE)电缆的绝缘状态,通过对比不同电缆的去极化电流曲线从而判断其绝缘性能,实验数据的拟合也达到了理想的效果。

因此,基于上述两种方法,分别对不同次数冲击电压下的油膜介质进行实验,以油膜介质交流局部放电下的起始放电电压与PDC曲线去极化电流最大值作为老化程度的判断依据,并结合电介质在冲击电压下其内部微观变化对实验现象进行了合理的解释。

1 实验基本原理

1.1 极化去极化电流法

当对待测的电介质施加一个电压时,由于复合

电介质可等效为电容,即可理解为外加电场 $E(t)$ 作用在试品电容上,根据全电流公式,电介质材料内部的电流可表示为

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

把外加电压替换成直流电压,此时电介质处于极化状态,即利用一恒定的直流源 $U(t)$ 为试品电容充电。由于是直流电压,式(1)中便不存在微分项,极化电流 i_p 可表示为

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

式中: C_0 为试品电介质的等效电容; σ_0 、 ε_0 分别为电介质的直流电导率与真空介电常数; $f(t)$ 为一衰减函数,用来表示电介质极化过程的响应能力,且衰减情况取决于电介质的材料以及外界因素。

当撤去该直流电源,即外电场的作用也相应地消失,进入去极化过程。电介质中的带电粒子由于自身弛豫性质产生与极化电流相反的去极化电流 i_d ,则 i_d 可表示为

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

式中, t_d 为极化时间。

采用极化-去极化电流法所得出的曲线如图1所示。

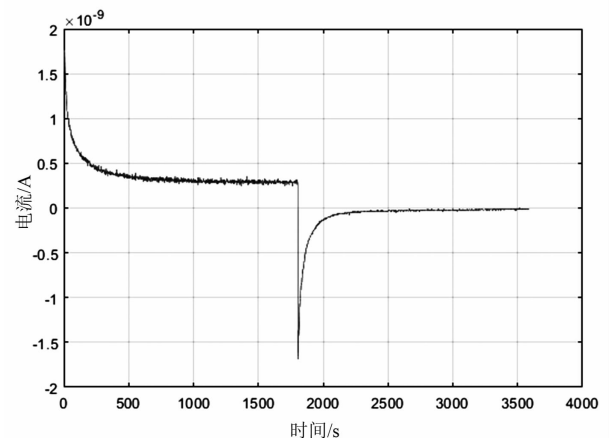


图1 极化去极化电流曲线

从图1曲线可以看出:不论电介质处于极化还是去极化状态,电流总是呈现出衰减的趋势,这种趋势由电介质中分子的极化程度是否充分决定;并且当极化时间足够长时,极化电流与去极化电流均会

趋于一个稳态值,去极化电流会逐渐衰减到0而极化电流的稳态值并不为0。这是因为油和膜组成的复合电介质存在一定的电阻,当外加电场作用于该介质时,极化电流的来源不仅是电介质中偶极子的定向移动,还有外加电压在等效电阻上产生的电导电流,所以其稳态值就是电导电流的大小;当移除了直流电压源,偶极子不再受到力的作用而恢复到起始的无序状态,这时没有电导电流的影响,故其稳态值会衰减到0。

综上所述,为了能够得到复合介质更精确的绝缘状态信息,完全反映电介质的绝缘情况,并排除电导电流的干扰,故将去极化电流作为对象来研究其与电介质老化程度的关系。

1.2 交流下局部放电试验

高压电力设备绝缘内部由于各种原因存在气泡、杂质等,而这些正是发生局部放电的根本原因。对于油膜绝缘这样的复合电介质,其内部存在的气泡可以等效为一个平行板电容器中含有气泡,相应的等值电路如图2所示。

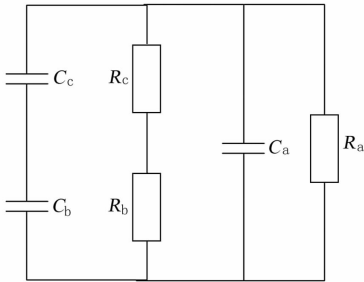


图2 等值电路

由于每次发生局部放电的时间极短,且是高频的脉冲信号,所以等值电路中不用考虑 R_a 、 R_b 、 R_c 这3个电阻的作用,即等值电路由其他介质的电容 C_a 、与气

泡串联介质的电容 C_b 和气泡的电容 C_c 三者组成^[15]。

随着交流电压的增加,气泡上的电压随着外加电压的变化而变化。当气泡两端的电压增加到其击穿值时,气泡发生放电并电离出正负离子,这些离子在外电场作用下移动形成反向电场使气泡两端的电压降低,气泡即停止放电。局部放电就是上述过程的重复。根据局部放电的特点,找到电介质中气泡第一次被击穿的电压,即起始放电电压,是关键的一步。在起始放电电压下不仅能够观察到局部放电的特征信号,而且也不会对电介质造成很大的损伤,故可将其作为判断电介质老化程度的一个判据。

2 实验研究方案

2.1 老化平台

采用如图3所示的连续冲击电压发生器来对油膜介质施加不同次数的冲击电压,通过改变球隙之间的距离来确保冲击电压发生器能够完全触发。为了使冲击电压能够连续施加,并且防止油膜介质在实验过程中不慎被击穿,该实验将冲击电压的幅值设置为17 kV,且每60 s施加一次冲击。

2.2 PDC 测试平台

根据如图4所示的实验原理图对样品及测量装置进行接线。其中,真空高压继电器、限流电阻、皮安表都内置于PDC测量仪器中。被试样品采用四层12 μm 的聚丙烯薄膜,并将其完全浸没于苜蓿基甲苯的绝缘油中。测量时,为保证油膜介质的充分极化以及足够的采样点数从而计算出更为精确的数据,因此将极化电压设置为1500 V,极化时间设为1800 s,采样点数设为1200个。

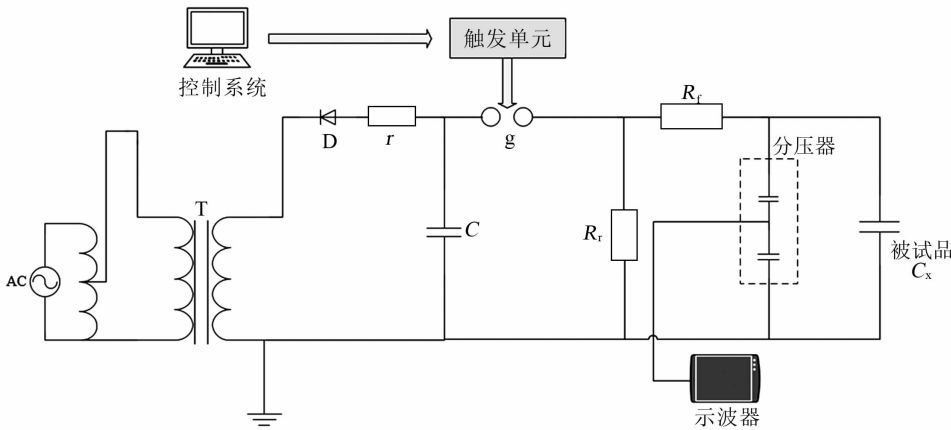


图3 冲击电压发生器实验原理

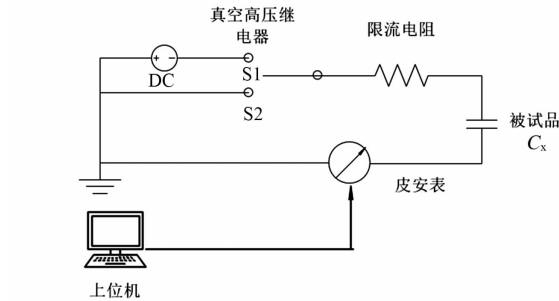


图 4 PDC 测试原理

2.3 交流局部放电测试平台

利用如图 5 所示的试验平台对不同老化程度的油膜样品进行交流下的局部放电试验。本实验采用高频电流传感器 (high frequency current transformer, HFCT) 作为局部放电信号的检测仪器。HFCT 的优势在于能对较宽频带的电流信号进行检测,且检测的稳定性好、精度较高。通过将 HFCT 安装在试品电容一端与接地线之间的导线上,不仅保证了局部放电信号的完整采集,同时实验的安全性也得到了保障。

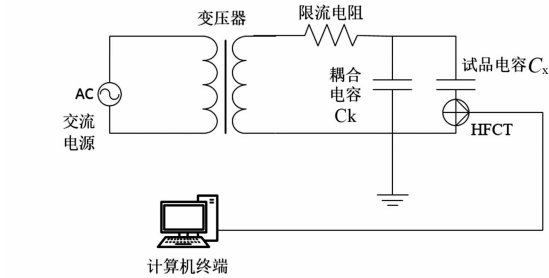


图 5 局部放电测试原理

3 实验结果分析

3.1 PDC 结果分析

实验过程中分别对样品施加 100、200、300、400 次冲击,通过对比不同老化程度下油膜介质 PDC 曲线,并对采样结果进行分析,发现油膜介质的去极化电流最大值呈现出如图 6 所示的变化规律。

当样品无损时,其去极化电流最大值仅为 1.69 nA。当对样品施加 100 次冲击后,其去极化电流最大值几乎增加了 1 倍,变为 3.30 nA。随着冲击电压次数的增加,样品的去极化电流最大值也是呈现出增加的趋势,最终当对样品施加 400 次冲击时,去极化电流最大值达到了 5.62 nA。结合油膜介质在多次冲击电压下的微观变化,图6中的递增规律可以概括为:随着样品老化程度的加深,复合介质中的油和膜均发生了不同程度的损伤,聚丙烯

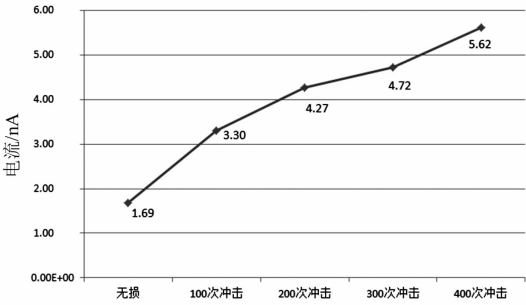


图 6 不同老化程度下去极化电流最大值变化情况

薄膜内部的部分分子链发生断裂生成新物质,部分绝缘油分子也会分解生成新的物质^[16],如带电粒子等;带电粒子数量的增加会使得在外电场作用下定向移动的粒子数量增加,当电场撤去的一瞬间,去极化电流的最大值也会增加,故去极化电流的最大值会随着老化程度的增加而上升。

3.2 交流局部放电实验结果分析

对不同冲击次数下的油膜介质进行交流局部放电实验来测量其起始放电电压,结果如表 1 所示。

表 1 不同冲击次数下的油膜介质起始放电电压

冲击次数/次	起始放电电压/kV
0 (无损)	8.4
100	8.0
200	7.5
300	6.9
400	6.3

由表 1 可以看出,样品无损时的起始放电电压为 8.4 kV,随着冲击电压次数的增加,油膜介质交流局部放电下的起始放电电压在逐渐下降。当施加 400 次冲击时,油膜介质在 6.3 kV 的交流电压下就会出现局部放电信号。这是因为冲击电压的反复施加使油膜介质的损伤加大,油和膜的分子结构都会发生变化,复合介质内部的气泡和新生成的杂质物质都会增加;这将会使油膜介质在更低的电压下出现放电现象,因此其起始放电电压也会随之降低。

4 结 语

为了模拟电容器在运行过程中承受的多次操作过电压,对油膜介质样品施加不同次数的冲击电压,并分别利用极化去极化电流 (PDC) 法与交流下的局部放电法对不同老化程度样品进行实验,进而分析其去极化电流最大值与起始放电电压的变化趋势,从而得出以下结论:

(下转第 52 页)

宽频暂态电场测量装置的研究

董乘甫^{1,2},熊振中^{2,3},谢施君²,郑连清¹,王若瀚¹,向 军⁴

(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. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;4. 国网攀枝花供电公司,四川 攀枝花 617000)

摘要:暂态过电压是影响电网安稳运行的重要因素之一,对暂态过电压的准确测量具有十分重要意义。为此,基于空间电场效应的测量方式设计了一种宽频暂态电场测量装置。首先,介绍了基于非接触式电容互感器测量电场的原理;其次,完成了外部传感器结构及内部电路设计;最后,在实验室条件下对研制的测量装置进行了工频和冲击电压试验。结果显示,该测量装置的测量误差在5%以内,同时测量装置频率响应在5 Hz~5 MHz间较为平坦,对于工频电压及1.2 μs/50 μs的标准雷电全波可有效捕捉。

关键词:过电压测量;电场测量;空间电场效应;耦合电容;频率响应

中图分类号:TM727.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0012-05

Research on Measuring Device for Wideband Transient Electric Field

Dong Chengfu^{1,2}, Xiong Zhenzhong^{2,3}, Xie Shijun², Zheng Lianqing¹, Wang Ruohan¹, Xiang Jun⁴

(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. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Transient overvoltage is one of the important factors affecting the stable operation of power grid, and the accurate measurement of transient overvoltage is of great significance. For this reason, a measuring device for wideband transient electric field is designed based on the measurement method of space electric field effect. Firstly, the principle of measuring the electric field based on non-contact capacitive transformer is introduced. Secondly, the design of its external structure and internal circuit is completed. Finally, under laboratory conditions, power frequency and impulse voltage tests are performed on the developed measuring device. The results show that the measurement error of the proposed measuring device is within 5%, and its frequency response covers 5 Hz and 5 MHz. It can effectively capture the power frequency voltage and the standard lightning full wave of 1.2 μs/50 μs.

Key words: overvoltage measurement; electric field measurement; space electric field effect; coupling capacitance; frequency response

0 引言

电力系统故障统计表明,电网过电压是引发设备事故的重要原因之一,而已知的过电压种类多样,有波前时间为纳秒级的快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)、纳秒级的雷电过电压、

数百纳秒级的操作过电压和毫秒级的工频过电压^[1-2]。随着电网的迅速建设和发展,虽然已经有大量的设备用于过电压的监测与防护,但过电压现象依然时常发生。为了电网的安稳运行,对过电压的监测和分析具有十分重要的意义。

近年来,国内外学者对过电压的监测展开了许多研究工作,其中最传统的测量方法是基于分压器

的过电压监测。该方法按照分压器类型分为电阻式、电容式、阻容式等^[3-5],然而分压器属于离线设备,往往难以在运行中应用。文献[6]中又提出基于套管末屏的过电压测量方法,但不接地的测量方式又会带来许多安全隐患。部分学者提出了基于新型传感器的过电压监测方案,如利用光纤电压传感器^[7-12]。但这种测量方式因为其测量的特殊性,极易受到外界环境和机械条件的影响,多数仍处于调试阶段。除此之外,还有应用非接触式电容电压互感器的过电压测量方法,相比而言,该方法能够实现在线监测,同时便于应用,因此在实际的过电压检测中逐步得到应用。文献[13]中提出一种非接触式传感器用以测量高压架空输电线路的过电压。该方法主要利用传感器与输电线路之间存在的杂散电容与传感器分压电容构成电容分压器,替代传统方式获取架空输电线路的电压波形。但此方法中的杂散电容易受环境影响而变化,因此测量精度一般。

基于上述研究现状和应用需求,下面从基于空间耦合电容分压的过电压测量方法出发,运用电路设计及传感器结构优化拓宽其测量频带,并在实验室条件下对其雷电冲击特性进行了试验,最终设计一种新型的测量装置。

1 电场测量方法

1.1 基本原理

所研究的暂态电场测量装置实际是通过一平行电极板放置在空间电场中获得感应电压信号,从而精确测量电场,进行电压的监测。其测量原理如下。

如图1电场测量示意图所示,将一平行板电容器放置在电场强度 $e(t) = E_m \sin \omega t$ 的正弦电场中,其两板之间的感应电流 i_c 为

$$i_c(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot A \cdot E_m \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

式中: ε_0 为真空介电常数,F/m; A 为极板表面积, m^2 ; E_m 为电场强度幅值,V/m。

取平行板之间放置的外部测量电容器的电容值为 C_B ,则该电容器在电场 E 的影响下,其电势的大小为

$$u_c(t) = \frac{1}{C_B} \int i_c(t) dt \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)则有

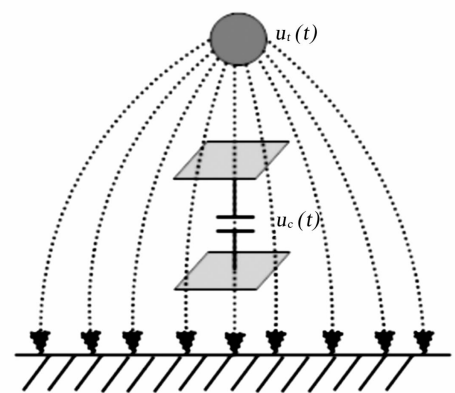


图1 电场测量

$$u_c(t) = \frac{\varepsilon_0 A}{C_B} E_m \sin \omega t \quad (3)$$

根据式(3)设转换系数 k_E ,令

$$k_E = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{C_B} \quad (4)$$

代入式(3)可得

$$u_c(t) = k_E \cdot e(t) \quad (5)$$

已知在2个导体之间产生的电场 $e(t)$ 取决于电势差 $u(t)$ 的大小。在2个电极是平行板且间隔距离 d 的特定情况下,令几何常数 k_G 为 $1/d$ 。它们之间的关系可表示为

$$E(t) = k_G \cdot u(t) \quad (6)$$

结合式(5)和式(6),可得到

$$u_c(t) = k_E \cdot k_G \cdot u(t) \quad (7)$$

考虑到电场传感器与测量设备之间会存在一定的电压增益 G_V 以适应采集的要求,测量设备最终获取的电压 $u_{c0}(t) = G_V \cdot u_c(t)$ 。最终计算得到平行板两端施加的电压 $u(t)$ 为

$$u(t) = \frac{u_{c0}(t)}{G_V \cdot k_E \cdot k_G} \quad (8)$$

因此即可通过测量电容感应得到的电压准确反映出电场变化情况,从而实现对过电压的在线监测。同时,因为电场变化是基于工频电压的基础上,所以无需得知常数 G_V 、 k_E 、 k_G 就足以验证电压波形变化的情况。但若得到准确的测量数值,考虑到现场复杂电场情况,必须首先进行工频电压试验进行校准以确定变比常数。

1.2 电路设计

测量示意图如图2所示, B_1 、 B_2 为金属极板,将电压加在两金属极板上后可产生如图1所示的电场; C_2 为测量设备电容; R_2 为测量设备输入电阻;

C_1 、 R_1 和 C_3 、 R_3 分别为测量装置上下两端和 B_1 、 B_2 之间空气间隙形成的电容和电阻。如果直接使用示波器测量 C_2 端电压,此时 R_2 的阻值为兆欧级,而空气间隙形成的 R_1 、 R_3 可达吉欧级甚至更大,为了做到阻抗匹配,不得不增大设备的输入电阻 R_2 以匹配 R_1 、 R_3 。

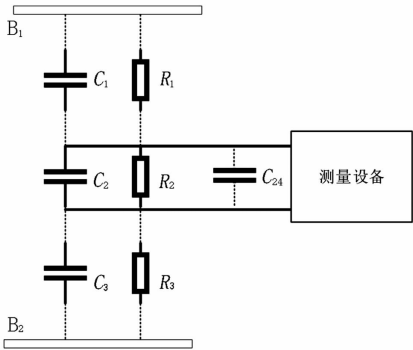


图 2 直接测量

在采集设备输入端并联电容 C_{24} ,可有效改善跟随器在 50 Hz ~ 5 MHz 范围变化时的输出响应特性。如图 3 所示,在输入幅值为 8.2 V 的正弦波电压时,随着频率的升高,跟随器输出电压在 C_{24} 取不同的电容值时有所不同。在选择适当的电容值时,跟随器输出的幅频特性会得到改善,减小信号失真,保持一致的输入输出比。

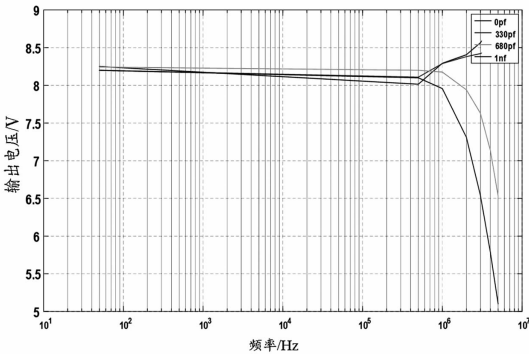


图 3 C_{24} 取不同电容值时的频率响应

1.3 结构设计

根据前述理论,测量装置的传感器部分设计为两块平行金属板所构成的电容。考虑到测量时外界电磁干扰问题以及使用的便利性,因此将该测量装置的结构设计成圆筒形结构,如图 4 所示,其中顶盖(不锈钢材质)作为平行金属板电容的上级,圆筒(不锈钢材质)和底座(不锈钢材质)的组合作为平行金属板电容的下级,在顶盖和圆筒之间添加环氧树脂材质的绝缘介质。另外,测量电路板固定在筒

中连接柱处,以达到屏蔽外部电磁干扰的作用。



图 4 装置成品

2 测量装置试验结果分析

2.1 工频电压试验

首先,对测量装置进行工频高压试验,以检验测量装置在工频条件下的运行情况,同时考虑现场电场分布的复杂情况,工频试验可以更好地获取装置的测量变比。

工频电压测量原理图如图 5 所示。图中左侧框中所示为工频高压发生器,试验变压器可输出工频高压 u_1 。随即在施加电压 u_1 的两金属极板 B_1 、 B_2 间就会产生稳定的工频电场。测试装置 C_2 同样置于 B_1 、 B_2 之间,会在电场中感应出电压 u_2 。通过测量 u_2 的大小,即可以反推出 u_1 的大小。

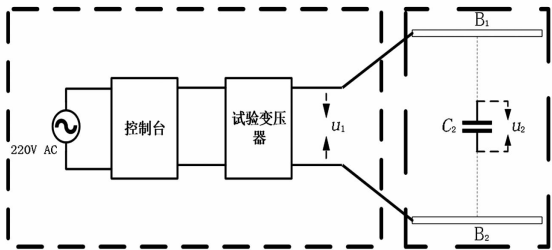


图 5 工频电压试验电路

工频试验的其中一组测量结果如图 6 所示。从图中可以看出,工频试验结果较为理想,可准确反映跟随电压变化情况。对图 6 数据进一步做归一化处理,得到的结果如图 7 所示。试验结果显示,两波形归一化结果十分吻合,测量装置的工频跟随特性良好。

随后进行了多组试验,计算其变比结果,其变化趋势如图 8 所示,变比基本维持在 5500 左右。

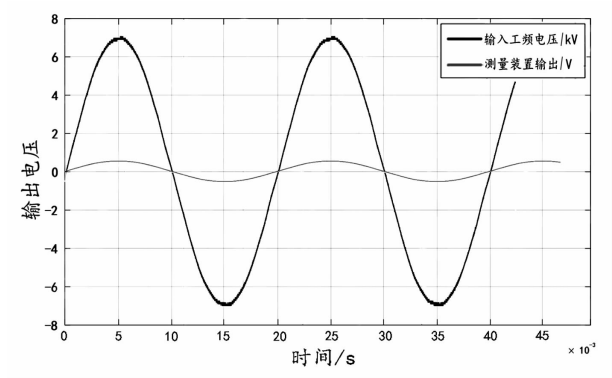


图6 工频试验结果

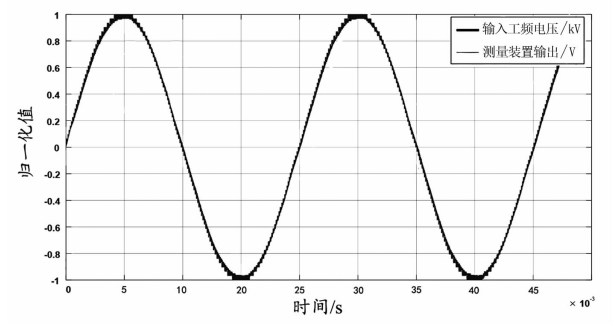


图7 归一化处理结果

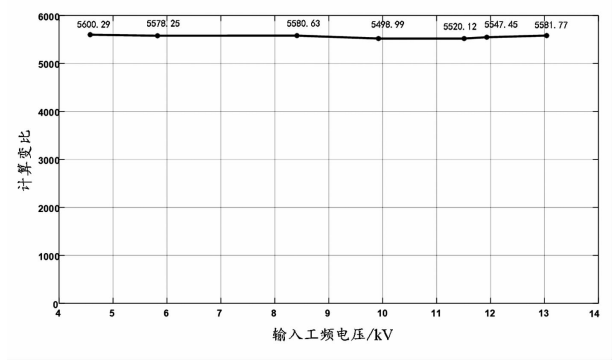


图8 工频试验变比变化情况

2.2 冲击电压实验

在实验室条件下对测量装置进行了冲击电压试验。

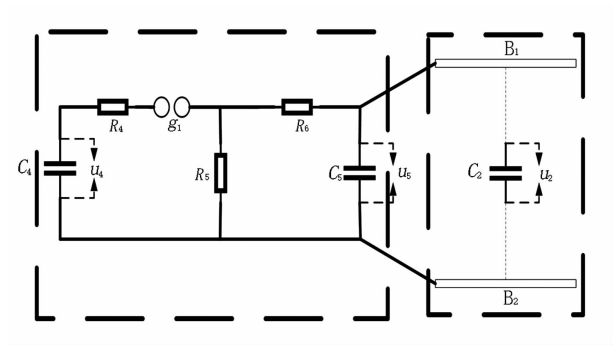


图9 冲击电压测量原理

整体测量系统如图9所示,左侧虚线框中为冲击电压发生器等效电路图,电容 C_4 在初始时刻即存

在电压 u_4 ,发生器工作时, C_4 上的电荷通过球隙 g_1 放电,在电容 C_2 上产生标准雷电冲击电压 u_5 ,然后将该电压通过导线引到右侧虚线框所示的 B_1 、 B_2 所构成的金属极板上。此时,即在 B_1 、 B_2 之间产生跟随 C_2 电压变化的电场。与工频试验同理,在获得该设备的测量变比之后,即可通过测量 u_2 的电压,计算出 u_5 的电压,达到测量的目的。

由此可见,在过电压的测量中,该方法可以无需与高压侧有任何电气接触而获得被测端的电压,具有安全可靠的性能。

2.3 实验结果及分析

选取一组冲击电压下的测量结果如图10所示,图中较深部分为高压探头输出原始电压波形(单位为kV),较浅部分为测量装置输出的感应电压波形(单位为V)。原冲击电压发生器输出的电压波形波前时间为 $1.2\mu s$,半峰值时间等于 $50\mu s$ 的标准雷电冲击全波。归一化后的结果如图11所示,从图中可看出两组电压波形变化趋势基本一致,可见测量结果理想,感应电压的输出能够跟随冲击电压的波形。

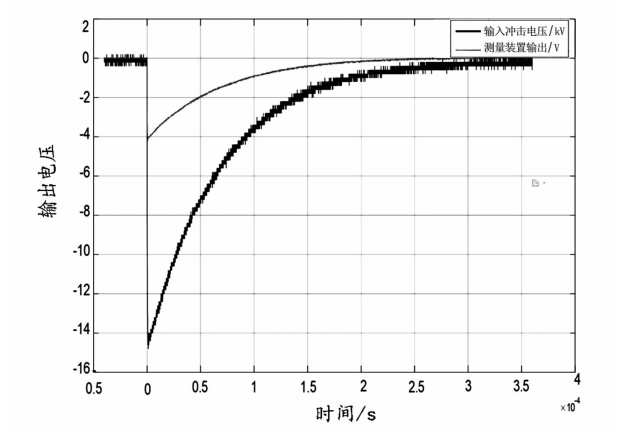


图10 冲击电压测量结果

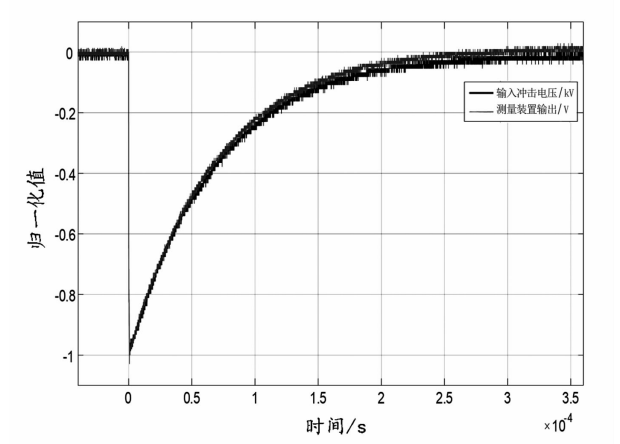


图11 归一化结果

在相同条件下进行了多组冲击电压试验,最终从各组试验数据计算出的变比值情况可以看出,随冲击电压的提升,计算变比略有变化,但基本维持在5500左右,整体误差不超过5%,同时与工频试验结果相同。结合上述分析可知,在冲击电压试验中,所设计的测量装置能够满足很好的测量精度,且灵敏度也非常理想。

3 结 语

根据空间耦合电容分压的过电压测量方法,设计了一种新的测量装置,并对电场测量原理、信号获取电路和外部结构等进行了论述,结合试验分析,得到了以下基本结论:

- 1)该测量装置与传统过电压测量设备相比,其与高压侧不含任何电气接触,且结构简单,具有较强的安全性。
- 2)装置测量精度较高,应用在工频电压获取的测量变比,整体测量误差不超过5%,能够有效地反映监测电压变化情况,且跟随性良好。
- 3)频率响应在5 Hz~5 MHz 较为平坦,测量频带较宽,可以满足工频电压到高频率的雷电冲击电压的测量。理论上可适用于电力系统各电压等级的过电压测量。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压和绝缘配合[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[2] 曾嵘,周旋,王泽众,等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高电压技术,2015,41(1):1-13.

[3] 马连英,曾正中,安小霞,等. 一种用于测量快前沿高压脉冲的电阻分压器[J]. 电工电能新技术,2010,29

(1):58-61.

[4] 高景明,刘永贵,杨建华. 一种电容补偿型高压电容分压器的设计[J]. 高电压技术. 2007,33(6):76-79.

[5] 周凯,张涛,董秀成,等. 基于电容分压的配电网过电压在线监测[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):86-89.

[6] 司马文霞,兰海涛,杜林,等. 套管末屏电压传感器响应特性研究[J]. 中国电机工程学报,2006(21):172-176.

[7] Kumada A., Hidaka K. Directly High-voltage Measuring System Based on Pockels Effect[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013,28(3):1306-1313.

[8] 李开成,胡为兵,刘建锋. 基于光电电压互感器的电压实时相位测量方案的研究[J]. 高压电器,2008,44(1):34-36.

[9] 曾嵘,陈未远,何金良,等. 光电集成强电场测量系统及其应用研究[J]. 高电压技术,2006,32(7):1-5.

[10] 谢施君,汪海,曾嵘,等. 基于集成光学电场传感器的过电压测量技术[J]. 高电压技术,2016,42(9):2929-2936.

[11] Shijun Xie, Yu Zhang, Huaiyuan Yang. Application of Integrated Optical Electric-field Sensor on the Measurement of Transient Voltages in AC High-voltage Power Grids[J]. Applied Sciences,2019,9(9):1951.

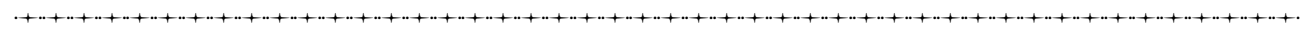
[12] S. Xie, S. Su, Y. Zhang. Field Measurement of Lightning Transient Voltage in Substations Using Optical Electric Sensors[J]. CIGRE,2018,PS2,C4-208.

[13] 杜林,常阿飞,司马文霞,等. 一种非接触式架空输电线路过电压传感器[J]. 电力系统自动化,2010,34(11):93-97.

作者简介:

董乘甫(1996),硕士研究生,研究方向为基于变压器套管过电压监测技术。

(收稿日期:2020-03-30)



绿色低碳是
能源转型发展的根本理念

罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性研究

邢昊中¹, 吴 杰², 贺子润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:智能变电站的大量投运,使得罗氏线圈电子式电流互感器的运用也愈发广泛。在阐述罗氏线圈传感单元原理基础上分析其传变特性影响因素,计算了传感单元以及外积分环节的传递函数,得到了其频率响应特性。在 Matlab 和 PSCAD 仿真平台上分别搭建了理想实验模型和实际电网模型,验证了理论推导正确性,为改进罗氏线圈电子式电流互感器传变性能提供了理论指导。

关键词:罗氏线圈;电流互感器;传变特性;频率响应特性;空载合闸

中图分类号:TM451 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0017-07

Research on Wide – frequency – domain Transfer Characteristics of Electronic Current Transformer with Rogowski Coil

Xing Haozhong¹, Wu jie², He Zirun¹

(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 large – scale commissioning of intelligent substations has made electronic current transformer with Rogowski coil more widely used. Based on the principle of sensing unit of Rogowski coil , the influencing factors of its transfer characteristics are analyzed, the transfer function of sensing unit and external integration link is calculated, and its frequency response characteristics are obtained. The ideal experimental model and the actual power grid model are established respectively with Matlab and PSCAD simulation platform. The correctness of the theoretical derivation provides a theoretical guidance for improving the transfer characteristics of electronic current transformer with Rogowski coil.

Key words:Rogowski coil; current transformer; transfer characteristics; frequency response characteristics; unloaded switching

0 引 言

随着电力技术的不断发展和进步,智能变电站的投运数目也越来越多^[1-2]。罗氏线圈电子式电流互感器有着测量线性度好、频率响应宽、绝缘性能佳、无磁饱和等一系列优点,在智能变电站的测量和保护方面有着广泛的应用^[3-5]。但是在实际运用中,罗氏线圈电流互感器依旧存在一些缺陷^[6-7]。近几年已发生多起由罗氏线圈电流互感器引起的电网事故。通过故障录波分析,发现部分罗氏线圈电流互感器存在动态响应的问题,即会产生动态附加

分量导致保护的误动作,而且这种情况在一次侧含有大量高次谐波时尤为明显。考虑到智能变电站的发展需求、电子式互感器在智能变电站的重要作用以及继电保护装置误动作带来的严重后果,研究罗氏线圈电流互感器的传变特性有着重要意义。

目前,国内外针对罗氏线圈电子式电流互感器在各方面都展开了较为深入的研究。文献[8-9]以罗氏线圈各种应用为主线展开了罗氏线圈传感原理和特性的研究。文献[10-13]对不同工作环境下的罗氏线圈电子式电流互感器进行了建模并分析了相对应的理论计算方法。文献[14-15]研究了积分环节对罗氏线圈电子式电流互感器的影响及改

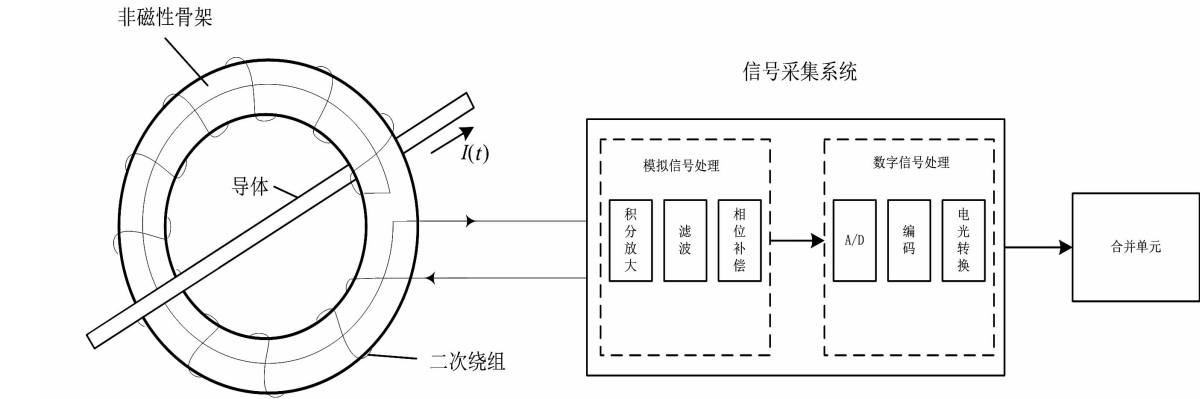


图1 罗氏线圈电流互感器结构

进方法。文献[16-17]研究了罗氏线圈电子式电流互感器的动态响应测试方法。在此基础上,下面将全面阐述罗氏线圈的传感原理和传变特性以及采用模拟积分器的罗氏线圈电子式电流互感器的结构及其频率响应特性;并仿真出了不同参数结构、不同输入信号的罗氏线圈电子式电流互感器宽频传变结果,进一步验证通过改变参数来提升电子式电流互感器宽频域传变特性的有效性。

1 罗氏线圈电子式电流互感器结构

典型的罗氏线圈电子式电流互感器结构可大致分为传感单元(罗氏线圈)、信号采集系统、合并单元三大部分,如图1所示。一次侧电流经过传感单元转变为模拟电压信号,经过积分放大、滤波和移相还原成电流信号,再依次进行A/D转换和光电转换后变为光信号,通过光纤传输到合并单元,最后经过协议转换后传输给保护、测控装置等。

罗氏线圈的积分环节对互感器的传变特性影响重大。目前,积分方式一般分为两种:模拟积分和数字积分。二者最大的区别在于前者是采样前积分,后者是采样后积分。而由于高频信号会在采样环节发生频率混叠,使采样后的积分异常,导致传变异常。因此,所研究的罗氏线圈电流互感器传变特性是基于模拟积分的方式。

2 传变特性影响因素

2.1 罗氏线圈传感原理

罗氏线圈是一种特殊结构的空心线圈电流检测工具。它将导线均匀地绕在非铁磁性环形骨架上,

一次侧导线置于线圈中央,结构如图2所示。

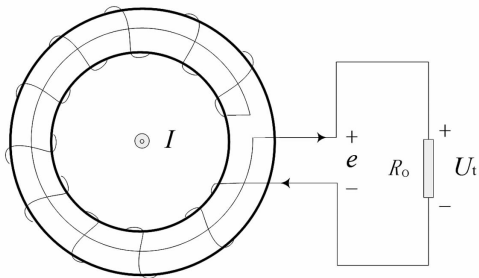


图2 罗氏线圈传感原理

根据图2所示的罗氏线圈传感原理,可以得到相应的等效电路如图3所示,其中: $i(t)$ 为被测电流; M 为罗氏线圈互感; r_T 、 L_T 和 C_T 分别是线圈内阻、自感和分布电容; R_0 为负载电阻。

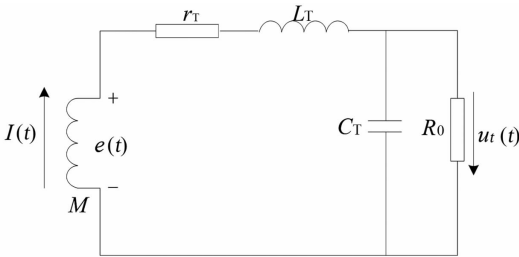


图3 罗氏线圈传感原理等效电路

当一次侧导线有电流流过时,由电磁感应定律可得感应电动势:

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = - M \frac{di}{dt} \tag{1}$$

式中: i 为一次侧流过的电流; M 为互感系数。

当罗氏线圈匝数、材料、尺寸等参数都确定时,可以计算出互感系数 M 。

一般可以通过测量负载电阻两端的电压值,并如式(2)所示进行积分还原,得到与被测电流成线性关系的信号,再通过数字化处理便可以计算出被测电流值。

$$i(t) = -\frac{1}{M}\int e(t)dt$$

(2)

2.2 线圈的传变特性影响因素

由图 3 所示的等效电路可知,罗氏线圈传感头的传递函数为

$$H_1(s) = \frac{U_i(s)}{I(s)}$$

$$= \frac{M \cdot s}{L_T C_T s^2 + (\frac{L_T}{R_0} + r_T C_T) s + (\frac{r_T}{R_0} + 1)}$$

(3)

由于感应电动势 $E = \omega M I_N$,即罗氏线圈互感 M 的大小是根据电路所需而设计的,所以匝数 N 是确定的。根据式(4)、式(5)可以知道,罗氏线圈互感 M 与自感 L_T 是同时被确定的,所以影响罗氏线圈传变特性的因素主要是线圈内阻 r_T 、分布电容 C_T 和负载电阻 R_0 。

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

(4)

$$L_T = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

(5)

式中: μ_0 为真空磁导率; a 为线圈横截面的内径; b 为线圈横截面的外径; h 为线圈截面高度。

某罗氏线圈的等值集中参数如表 1 所示,当只改变线圈的负载电阻 R_0 时,罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图 4 所示。

表 1 罗氏线圈集中参数

元件	r_T/Ω	$M/\mu\text{H}$	$L_T/\mu\text{H}$	C_T/pF	R_0/Ω
参数	2.31	0.264 5	165.3	896	500

由图 4 曲线可以看出,负载电阻越小,在特定频率点的上翘现象越明显,会对输出的幅值产生较大影响,且会产生很大的角位移,降低截止频率。因此,为了提高截止频率,在罗氏线圈互感器的设计中应考虑使用较大的负载电阻。

当只有内阻变化时,罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图 5 所示。由图 5 可知,随着罗氏线圈的内阻增加,角位移也随之增加,且在高频时这种现象愈发明显。总而言之,罗氏线圈的内阻越大,其频率响应特性越差。

当只有分布电容变化时,罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图 6 所示。

由图 6 可知,与内阻增加的情况类似,即罗氏线圈的分布电容越大,在相同的频率下传变的角偏移

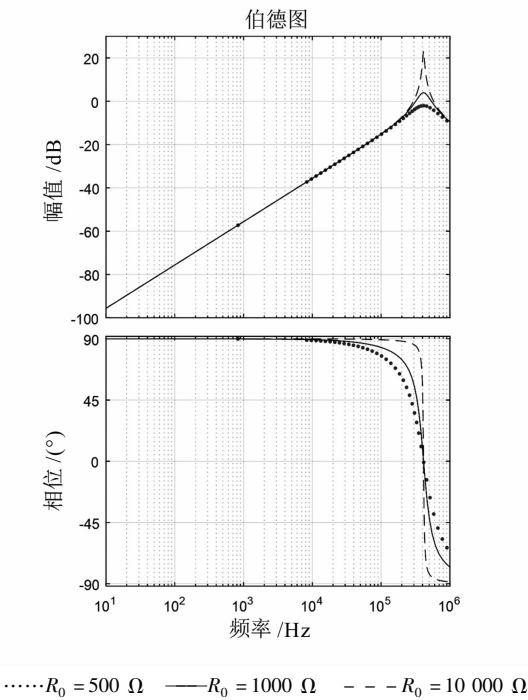


图 4 负载电阻变化时幅频、相频特性

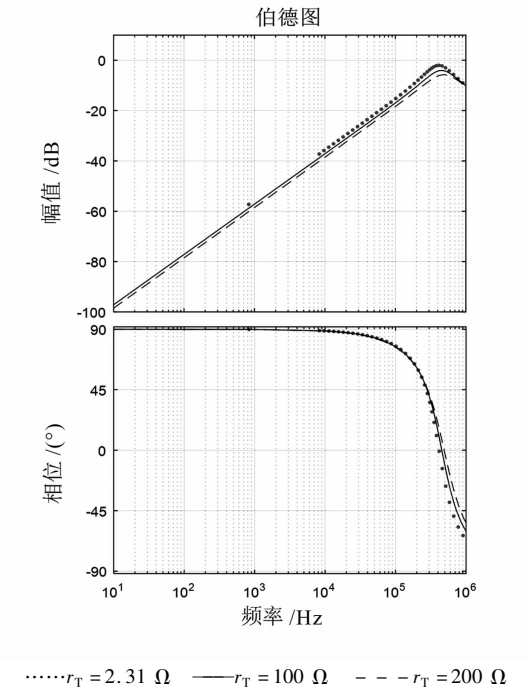


图 5 内阻变化时幅频、相频特性

越大,且在高频时影响更加严重。

综上所述,为了提高罗氏线圈传感单元的上限截止频率获得更宽的频域特性,可以通过设计负载、内阻、分布电容 3 个参数来实现,即适当增加负载阻抗、选取合适的线圈线径使罗氏线圈内阻更小、尽量减小线圈的分布电容,从而改善罗氏线圈传感单元的高频特性。

2.3 外加积分电路后的传变特性影响因素

罗氏线圈对信号进行了微分, 所以为了还原信号, 必须外加积分电路。理想积分电路结构简单, 搭配罗氏线圈基本可以不产生畸变, 可以很好地传变一次电流。但在实际运用中, 理想积分电路会产生零漂、电压失调等问题, 所以常常在积分器的反馈电容上并联一个电阻来解决这些问题, 实际积分器如图7所示。

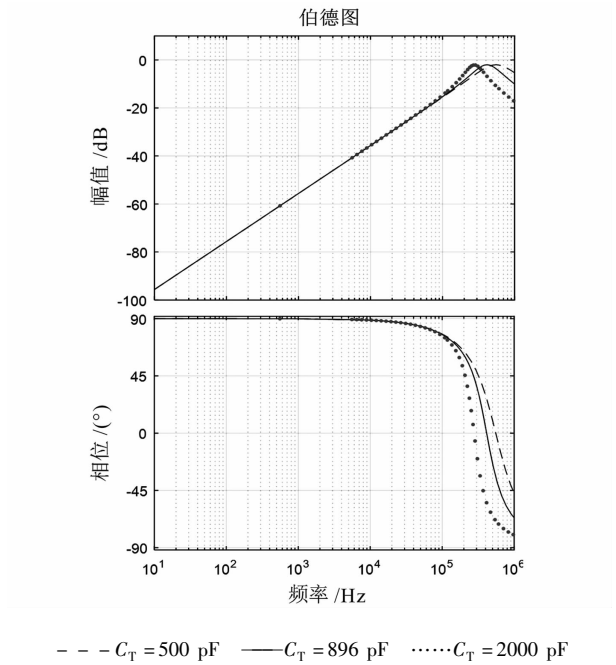


图6 分布电容变化时幅频、相频特性

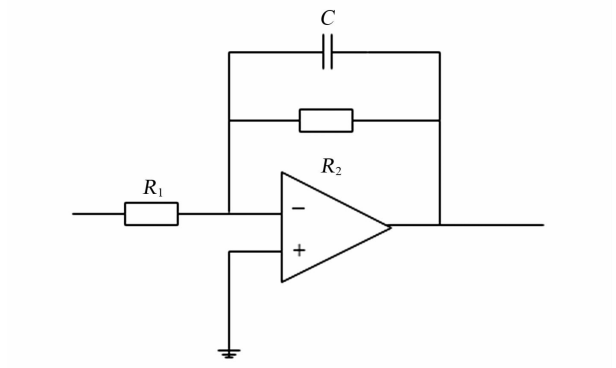


图7 实际积分器

由图7电路, 不难得出积分电路的传递函数为

$$H_2(s) = \frac{R_2}{R_1(1 + R_2Cs)} \tag{6}$$

结合式(3), 可以得出罗氏线圈加积分电路整体的传递函数为

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s)$$
$$= \frac{M \cdot s}{L_T C_T s^2 + \left(\frac{L_T}{R_0} + r_T C_T\right)s + \left(\frac{r_T}{R_0} + 1\right)}$$

$$\frac{R_2}{R_1(1 + R_2Cs)} \tag{7}$$

取 $R_1 = 10^4 \Omega$ 、 $R_2 = 10^6 \Omega$ 、 $C = 0.1 \mu\text{F}$, 罗氏线圈参数继续采用表1数据, 从而得到加了模拟积分器前后的幅频、相频特性对比, 见图8所示。由图可知, 经过积分之后, 对于在 $10 \text{ Hz} \sim 40 \text{ kHz}$ 范围内的信号, 幅值增益大约稳定在 -71.7 dB 。在 $50 \text{ Hz} \sim 8.47 \text{ kHz}$ 频率范围内的信号, 相位偏移都小于 1° , 总体与积分前的相位相差约 90° 。这说明该罗氏线圈电流互感器在 $50 \text{ Hz} \sim 8.47 \text{ kHz}$ 范围内信号传变特性良好。

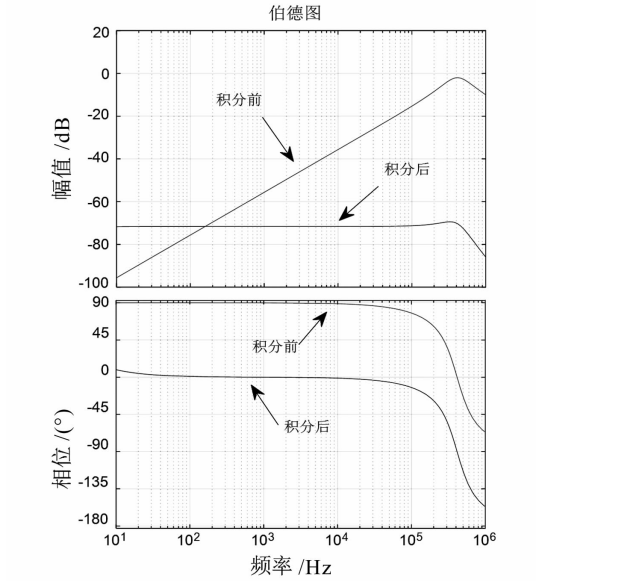


图8 积分前后幅频、相频特性对比

若分别改变积分器的 R_1 、 R_2 、 C 的大小, 可以得到3个幅频、相频特性对比图, 见图9—图11。

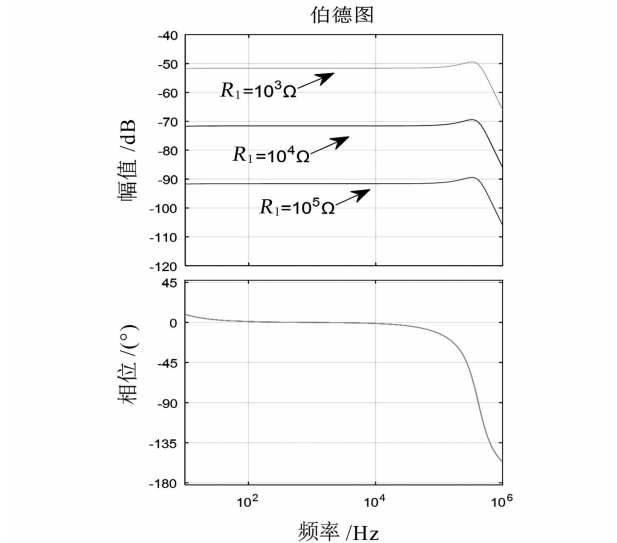


图9 不同 R_1 的幅频、相频特性

由积分电路的传递函数式(6)可以看出, R_1 的

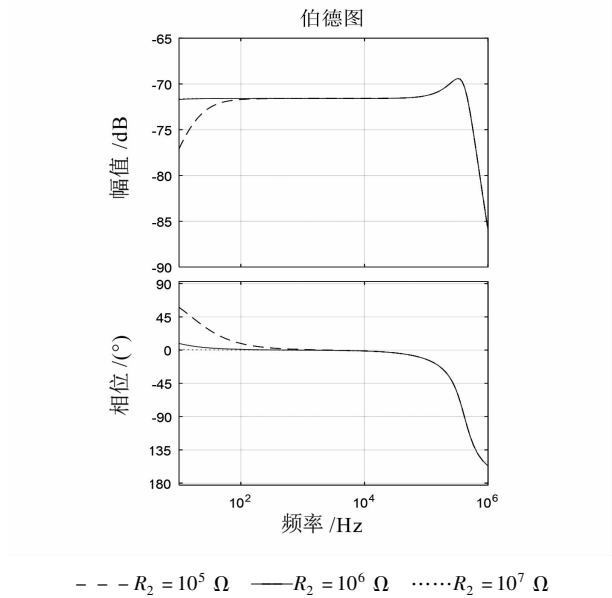


图 10 不同 R_2 的幅频、相频特性

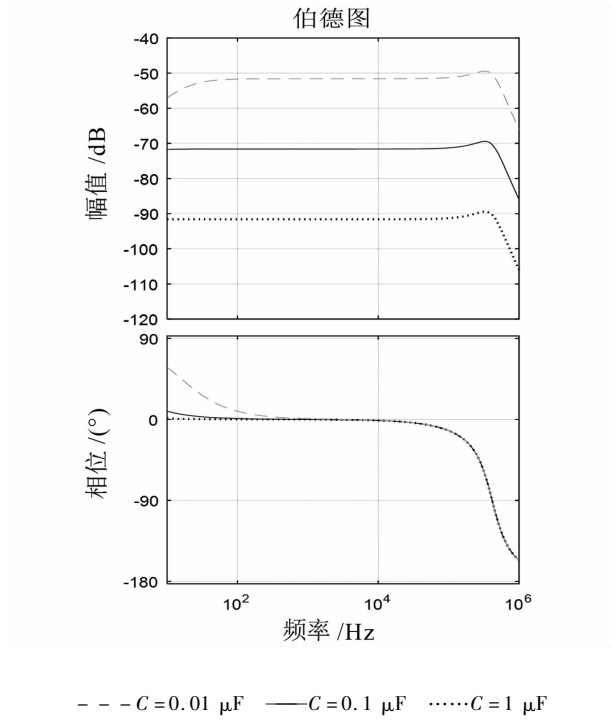


图 11 不同 C 的幅频、相频特性

大小只会影响幅值的大小,而不会改变整体的相频特性,这与图 9 所显示的结果相吻合。由图 10、图 11 可以看出,增加 R_2 的值,可以改善互感器在低频段的幅频特性,但对高频段影响不大。 C 的值越大,全频段的幅频特性都会更好。同时, R_2 与 C 对高频段的相频特性影响不大,但在低频段, R_2 或 C 的值越大,角位移越小,即整体的相频特性越好。虽然 R_2 和 C 的值越大,互感器的传变特性越好;但 R_2 的值越大,直流增益越大,从而导致元件温漂被放大,而且过大的电容会带来成本问题,也影响互感器的散

热。所以,在改善罗氏线圈电流互感器的传变特性时,要综合考虑多方面因素。

3 仿真实验验证

3.1 理想信号源仿真验证

在 Matlab 中建立一个如图 12 所示结构的实验电路。

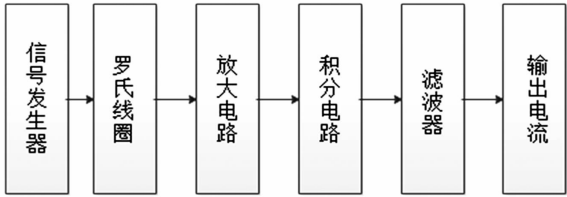


图 12 实验电路结构

当输入一个幅值为 1 A 的斜坡信号,经过不同反馈电容的罗氏线圈电子式电流互感器传变后,得

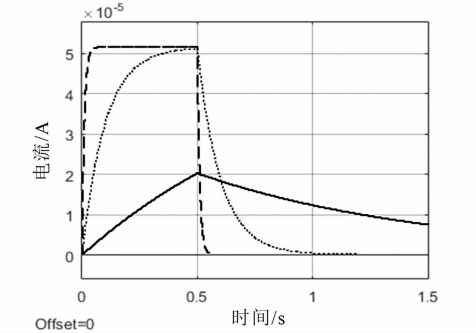


图 13 不同反馈电容下的输出电流

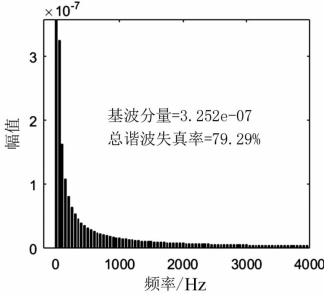


图 14 $C = 1 \mu\text{F}$ 时 FFT 分析

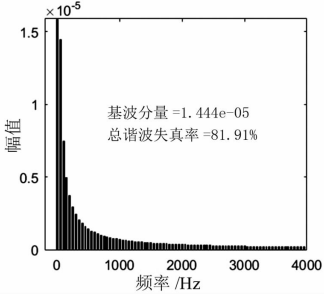


图 15 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 时 FFT 分析

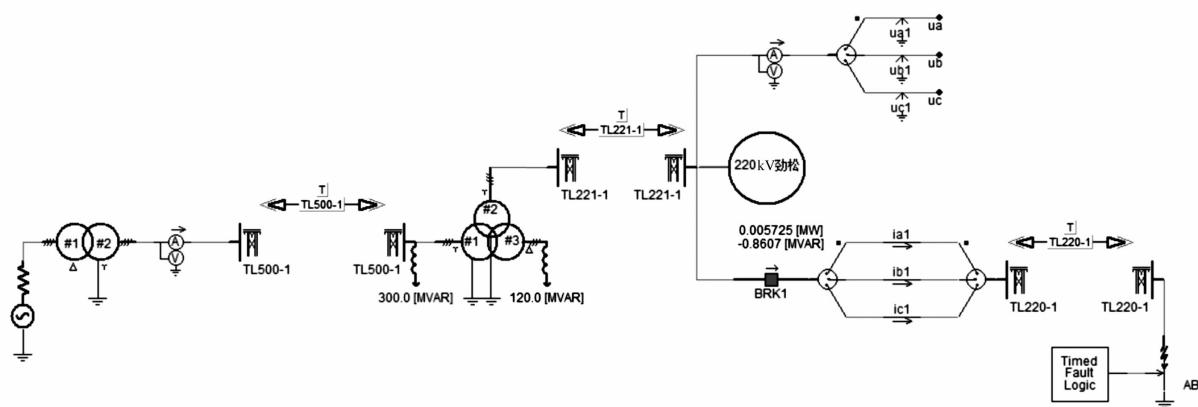


图 16 PSCAD 仿真模型

到的输出电流如图 13 所示, 反馈电容 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 和 $C = 1 \mu\text{F}$ 时相对应的 FFT 分析图如图 14、图 15 所示。由图可知, 反馈电容越小, 基波分量越大, 总谐波失真率 THD 也略微增加即高次谐波含量变多。这与图 11 所显示的传变特性相符合, 即反馈电容 C 越大, 互感器的传变特性越好。同样, 改变罗氏线圈内阻 r_T 、分布电容 R_1 、积分回路 R_2 和 R_1 的仿真结果都与前述结论相符合, 在此不一一赘述。

3.2 实际电网信号源仿真验证

某智能变电站断路器合 220 kV 空载线路时,由于罗氏线圈电子式电流互感器自身的传变问题,导致了保护的误动作。基于此次事件,在 PSCAD 平台搭建了一个实际电网,如图 16 所示,来模拟线路空载合闸过程,并将合闸线路的电流信号作为罗氏线圈的输入信号,来分析其传变性能。

在 0.5 s 空载合闸时,合闸线路所产生的电流原波形 I_{a1} 和合并单元输出电流 I_{as} 如图 17 所示。可以看出,空载合闸在线路中产生了行波,且在初始阶段行波波前很陡,但是 I_{as} 的波前没有 I_{a1} 那么陡峭,且每一个波谷到波峰之间有一段平坦的曲线也没有反映出来。即总体看来,该罗氏线圈互感器的传变特性良好,但依旧有改良的空间。

因此,根据前面所得出的罗氏线圈互感器传变特性结论,将该罗氏线圈模型中的内阻和分布电容降低 30% 得到图 18。可以看出,输出波形更加接近原波形,传变特性得到了改善。

同样,根据前面所得出的结论,在改进罗氏线圈参数后继续改进积分电路的参数,得到仿真结果波形与图 18 基本一致,没有太大的变化,这说明该积分回路对高频段的波形影响甚小。但是,对于低频段的影响结果,显而易见,改进后的波形还原度更

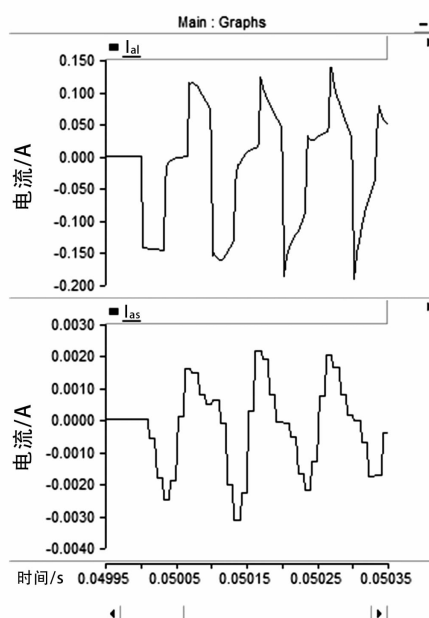


图 17 空载合闸线路的电流信号

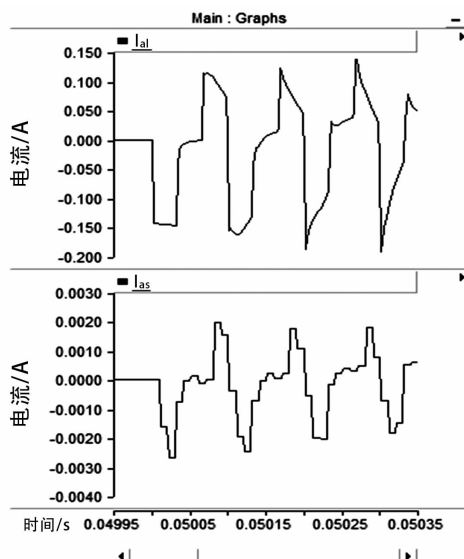


图 18 内阻和电容降低 30% 后电流序号

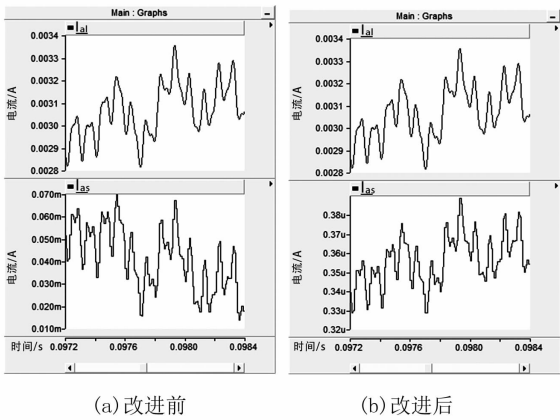


图 19 低频段电流信号

4 结 语

前面利用罗氏线圈互感器的等效电路以及积分回路,计算出了互感器的传递函数,并以此得到了罗氏线圈互感器的传变特性。通过改变仿真模型中的参数,对比输入和输出电流波形,进一步验证了前面所得出的结论:罗氏线圈内阻和分布电容越小,传变特性越好;外积分电路反馈电容和并联电阻越大,传变特性越好,且相比高频段,其对低频段影响较为明显。这为提升罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性提供了理论参考。

参考文献

[1] 张东霞,姚良忠,马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):1-15.

[2] 王勇. 电力工程技术在智能电网建设中的应用[J]. 通信电源技术,2019,36(10):164-165.

[3] 谢秋明. 电子式互感器在数字化变电站中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.

[4] 邸志刚,孙腾飞. 电子式电流互感器发展现状与应用前景[J]. 仪表技术,2019(5):37-40.

[5] 聂德宇,李晓敏,王卓远,等. 基于罗氏线圈的电子式互感器研究[J]. 通信电源技术,2017,34(3):73-74.

[6] 克帕依吐·吐尔逊. 罗氏线圈电流互感器传递特性及对保护继电器的影响[J]. 电工电气,2019(11):21-24.

[7] 徐子立,胡浩亮,刘琦,等. 罗氏线圈电流互感器电屏蔽结构缺陷误差机理研究[J]. 高压电器,2019,55(2):176-182.

[8] 马坦. 罗氏线圈传感器及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

[9] 李维波. 基于 Rogowski 线圈的大电流测量传感理论研究与实践[D]. 武汉:华中科技大学,2005.

[10] T. Orosz, Z. Á. Tamus, I. Vajda. Modeling the High Frequency Behavior of the Rogowski – coil Passive L/r Integrator Current Transducer with Analytical and Finite Element Method[C]. 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj – Napoca, 2014:1-4.

[11] 刘莉红. 电子式电流互感器建模及暂态特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2014.

[12] B. Hai, X. Weihua, Y. Yihan. A Research about A New Rogowski Coil Model Based on the Control Principle[C]. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009:1-6.

[13] 张弛,康小宁,郑永康,等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特性[J]. 高电压技术,2018,44(12):4105-4112.

[14] F. Pang, Y. Liu, J. Ji, et al. Transforming Characteristics of the Rogowski Coil Current Transformer with A Digital Integrator for High – frequency Signals[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16:3337-3340.

[15] Zhenhua Li, Xin Xiang, Tinghe Hu, et al. An Improved Digital Integral Algorithm to Enhance the Measurement Accuracy of Rogowski Coil – based Electronic Transformers[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2020:118.

[16] S. Jing, Q. Huang, F. Tang, et al. Study on Additional Dynamic Component of Electronic Current Transducer Based on Rogowski Coil and Its Test Approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2):1258-1265.

[17] 汤凡,甄威,梁晓斌,等. 罗氏线圈电子式电流互感器动态响应特性测试方法研究[J]. 电气应用,2014,33(19):76-80.

作者简介:

邢昊中(1995),硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方向研究工作;

吴 杰(1986),高级工程师,主要从事变电站智能化研究工作;

贺子润(1995),硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方向研究工作。

(收稿日期:2020-03-30)

电网超低频振荡影响因素综合分析 与抑制措施研究

贺子润¹, 陈 振², 邢昊中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:近年来,国内电网发生了多起超低频振荡事件,严重影响电网的安全稳定运行。相关研究表明,水轮机调速系统在超低频段呈现明显的负阻尼是导致超低频振荡的主要原因。为进一步分析超低频振荡的影响因素,在建立单机带负荷系统模型的基础上,基于稳定域思想的综合分析表明水锤时间常数、水轮机调速器比例参数和积分参数会显著影响系统稳定性,进而引发超低频振荡。在此基础上,针对单机带负荷系统,提出了一种考虑水锤效应不确定性的调速器参数优化模型,并利用粒子群优化算法进行求解。最后,在单机带负荷系统中仿真验证了该调速器参数优化模型的有效性和鲁棒性。

关键词:超低频振荡;复阻尼转矩;特征根;稳定域;调速器参数优化模型;鲁棒性

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0024-05

Comprehensive Analysis of Factors Affecting Ultra-low Frequency Oscillations in Power Grid and Research on Control Measures

He Zirun¹, Chen Zhen², Xing Haozhong¹

- (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: In recent years, there have been many ultra-low frequency oscillations in the domestic power grid, which seriously affect the safe and stable operation of power grid. Relevant research shows that the main reason for the occurrence of ultra-low frequency oscillations is that the turbine governing system exhibits significant negative damping in the ultra-low frequency range. In order to further analyze the factors affecting ultra-low frequency oscillation, based on the establishment of a single-machine system with load, a comprehensive analysis based on the idea of the stable region shows that the water hammer time constant, the proportional and integral parameters of turbine governor will significantly affect the system stability, then cause the ultra-low frequency oscillation. On this basis, a governor parameter optimization model considering the uncertainty of water hammer effect is proposed for a single-machine system with load, and is solved by particle swarm optimization (PSO) algorithm. Finally, the simulation results in a single-machine system with load verify the effectiveness and robustness of the proposed governor parameter optimization model.

Key words: ultra-low frequency oscillations; complex damping torque; characteristic root; stability region; governor parameter optimization model; robustness

0 引 言

2019年6月,西南电网与华中电网正式异步联网运行,西南电网的水电占比高达70%以上,超低

频振荡风险十分显著。当发生超低频振荡时,系统内所有机组共同振荡,频率和功率也发生持续振荡,突出特点是振荡频率低、振型特殊,所有机组转速同调变化,无明显的机间振荡,是一种与传统低频振荡机理完全不同的振荡。

目前对于超低频振荡的研究主要从机理分析和控制措施方面开展研究。

1)在机理分析方面:文献[1]在孤岛系统中分析了水轮机调速器等参数对振荡的影响。文献[2]通过对大量试验数据及水轮机调速器模型分析得出水电机组一次调频是产生超低频振荡的直接原因。文献[3]通过建立典型孤岛送出系统,利用特征根分析和时域仿真方法对超低频振荡模式进行排查和分析;并通过灵敏度分析,研究了水轮机引水系统水锤效应时间常数、调速器参数对超低频振荡的影响。文献[4]分别在单机系统研究了一次调频过程不稳定导致的超低频振荡事件,研究超低频振荡的振荡频率、阻尼、振荡表现等特征,并引入伯德图方法分析详细模型下的振荡频率和阻尼。文献[5]进一步研究多机系统的超低频振荡的分析,并提出相应的等值方法。文献[6]利用值集法提出了一套用于超低频振荡稳定分析的多参数图形分析工具,并研究水轮机特性系数对稳定性的影响。文献[7]利用复转矩系数法研究了超低频振荡产生的机理以及水轮机调速器、汽轮机调速器、负荷模型和系统惯量对超低频振荡的影响,并将超低频振荡归类为小干扰频率稳定范畴。文献[8]分析了水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性问题。

2)在控制措施方面目前主要采用以下两种措施:一是调整水电机组调速器参数,其优点是从源头治理超低频振荡,并不影响水电消纳。文献[9-10]通过调整调速器PID参数大小实现超低频振荡的有效抑制,然而该方法的缺点是降低了水电调节速度,影响调频能力。为解决此问题,文献[11-12]同时考虑超低频振荡抑制和一次调频性能的影响,建立调速器PID参数的优化模型,在抑制超低频振荡和维持调频能力间取得平衡。二是直流附加控制措施。文献[13]通过时域仿真,提出了直流附加频率控制的参数设计原则。文献[14]提出超低频振荡的多直流协调控制策略。利用直流进行控制的缺点是会将送端的扰动传递给受端,造成受端的功率波动,影响受端电网的安全稳定运行。

为综合分析超低频振荡的影响因素并提出相应的控制措施,首先建立超低频振荡分析的单机带负荷模型,并基于稳定域的思想综合分析了电网超低频振荡的影响因素。在此基础上,考虑水锤效应的不确定性,建立了调速器参数的优化模型,并提出优化模型的智能求解方法。

1 超低频振荡影响因素综合分析

1.1 超低频振荡分析模型与方法

单机带负荷系统是分析频率稳定的最简单系统,反映了系统发电和负荷之间的平衡及有功频率控制的动态过程。基于单机带负荷系统,分析系统发生超低频振荡的产生机理,其方框图如图1所示。

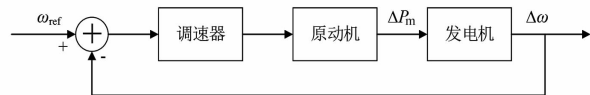


图1 单机带负荷系统

发电机的转子运动方程:

$$T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega \quad (1)$$

式中: T_J 为发电机惯性时间常数; $\Delta\omega$ 为发电机的转速偏差; ΔP_m 为原动机的机械功率输出偏差; ΔP_e 为发电机的电磁功率偏差; D 为发电机的阻尼系数。

若忽略系统网损,仅考虑负荷的频率变化,则有

$$\Delta P_L = \Delta P_e = K_L \Delta\omega \quad (2)$$

式中: ΔP_L 为负荷的有功变化量; K_L 为负荷频率调节效应系数。

由式(1)、式(2)可得发电机和负载的传递函数为

$$G_a(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta P_m} = \frac{1}{T_J s + D + K_L} \quad (3)$$

因 D 和 K_L 的作用相同,可令 $D_s = D + K_L$ 。

水轮机的传递函数为

$$G_{ht}(s) = \frac{\Delta P_m}{\Delta \mu} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (4)$$

式中: $\Delta \mu$ 为水轮机的导叶开度偏差; T_w 为水锤效应时间常数,其值随负荷变化,满载时 T_w 取值为0.5~4.0 s。

目前,水轮机广泛使用并联型比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)调速器进行调速,通过比例环节、积分环节、微分环节并联共同控制水轮机的导叶开度,这里采用的并联型PID调速器其传递函数为

$$G_r(s) = \frac{\Delta \mu(s)}{-\Delta\omega(s)} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{b_p K_I + s} \frac{1}{1 + T_y s} \quad (5)$$

式中: K_P 为调速器的比例系数; K_I 为调速器的积分系数; K_D 为调速器的微分系数; b_p 为调差系数; T_y

为伺服系统时间常数。

通过上述传递函数,可以构造一个含水轮机调速器系统的单机带负荷系统模型,用于分析超低频振荡的形成机理,其系统结构如图2所示。

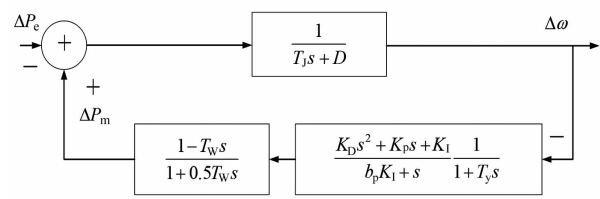


图2 水轮机组成的单机带负荷系统结构

超低频振荡分析方法主要包括复阻尼转矩方法与特征根分析方法。前者利用复阻尼转矩理论,将调速通道的阻尼转矩分解为同步转矩 K_{ms} 和阻尼转矩 K_{md} 。阻尼转矩大于0,则表示调速通道提供正阻尼,否则提供负阻尼。阻尼转矩绝对值的大小,表明调速通道提供正/负阻尼的大小。后者建立系统的传递函数,通过求解特征多项式的解判断系统的稳定性,特征值实部大于0,表明系统失稳,否则表明系统稳定。

1.2 超低频振荡影响因素综合分析

利用稳定域的思想,对影响超低频振荡的因素进行综合分析。将各基本参数设置为: $T_J = 10\text{ s}$, $D_s = 0.689$, $K_P = 0.5$, $K_I = 1.0$, $b_p = 0.04$, $T_y = 0.2\text{ s}$ 。分别设 T_w 为0.5 s、0.7 s、0.9 s、1.1 s,在0~20范围内改变 K_P 、 K_I ,对每一组参数,若求得的特征根实部为负数,即系统稳定时,在 (K_P, K_I) 平面上画圈;若求得的特征根实部为正数,即系统不稳定时,在 (K_P, K_I) 平面上画叉,由此得到不同 T_w 下 K_P 、 K_I 对系统稳定性的影响分布图,如图3所示。

由图3可知,当 K_P 、 K_I 一定时,增大 T_w ,系统的稳定性显著变差;当 T_w 、 K_I 一定时,增大 K_P ,系统的稳定性先变好,再变差;当 T_w 、 K_P 一定时,增大 K_I ,系统的稳定性变差。

2 考虑水锤效应不确定性的调速器参数优化模型与求解

2.1 考虑水锤效应不确定性的调速器参数优化模型

由前述分析可知,引起电网超低频振荡的一个重要原因是调速器参数设置不合理从而导致调速器产生负阻尼转矩,通过优化调速器参数是抑制超低频振荡的一个有效手段。然而,现有致力于解决超

低频振荡问题的水轮机调速器控制设计方法,更多地考虑了系统的稳定性,忽略了调速器需要承担跟踪负荷波动的任务,且调速器的稳定性与跟踪性能直接存在矛盾。因此需要在优化调速器阻尼性能的同时,考虑到调速器的跟踪性能。

另外,水锤效应时间常数 T_w 也是影响水电为主电网超低频振荡的关键因素,其值的大小会随着发电机出力的改变而改变。然而,现有的调速器优化模型中,往往忽略了 T_w 的变化,认为其值为定值,导致参数优化结果难以适应运行状态的改变。

为解决上述问题,根据历史数据的统计结果,对 T_w 在取值范围内离散化处理,并得到确定各离散值对应概率的大小。这里假定 T_w 离散概率分布如表1所示。

表1 T_w 的离散概率分布

T_w	概率 p
0.5	0.3
1.0	0.3
1.5	0.2
2.0	0.2

另外,提出以误差平方和时间乘积积分(integral time square error, ITSE) 准则刻画调速器的跟踪性能,其表达式为

$$F_{ITSE,i} = \int_0^{t_{\text{end}}} t \Delta P_{m,i}^2(t) dt \tag{6}$$

式中, $\Delta P_{m,i}(t)$ 为第 i 种工况下,水轮机输入阶跃响应后,输入的时间响应与其稳态值之差。

在上述基础上,建立调速器参数优化模型:

$$\begin{aligned} \min F_{ISTAE} &= \sum_i \left(p_i \int_0^{t_{\text{end}}} t \Delta P_{m,i}^2(t) dt \right) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} T_w \in T_{WA} & f \in f_{UL} \\ \min(\min K_{md}) > 0 \\ K_P^l \leq K_P \leq K_P^u \\ K_I^l \leq K_I \leq K_I^u \\ K_D^l \leq K_D \leq K_D^u \end{cases} \end{aligned} \tag{7}$$
$$\begin{cases} f_{UL} = [0.01, 0.1], \\ T_{WA} = [0.5, 1, 1.5, 2] \end{cases}$$

2.2 调速器优化模型求解

利用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 方法对上述参数优化模型求解,基于 PSO 的调速器参数优化模型的求解流程如图4所示。

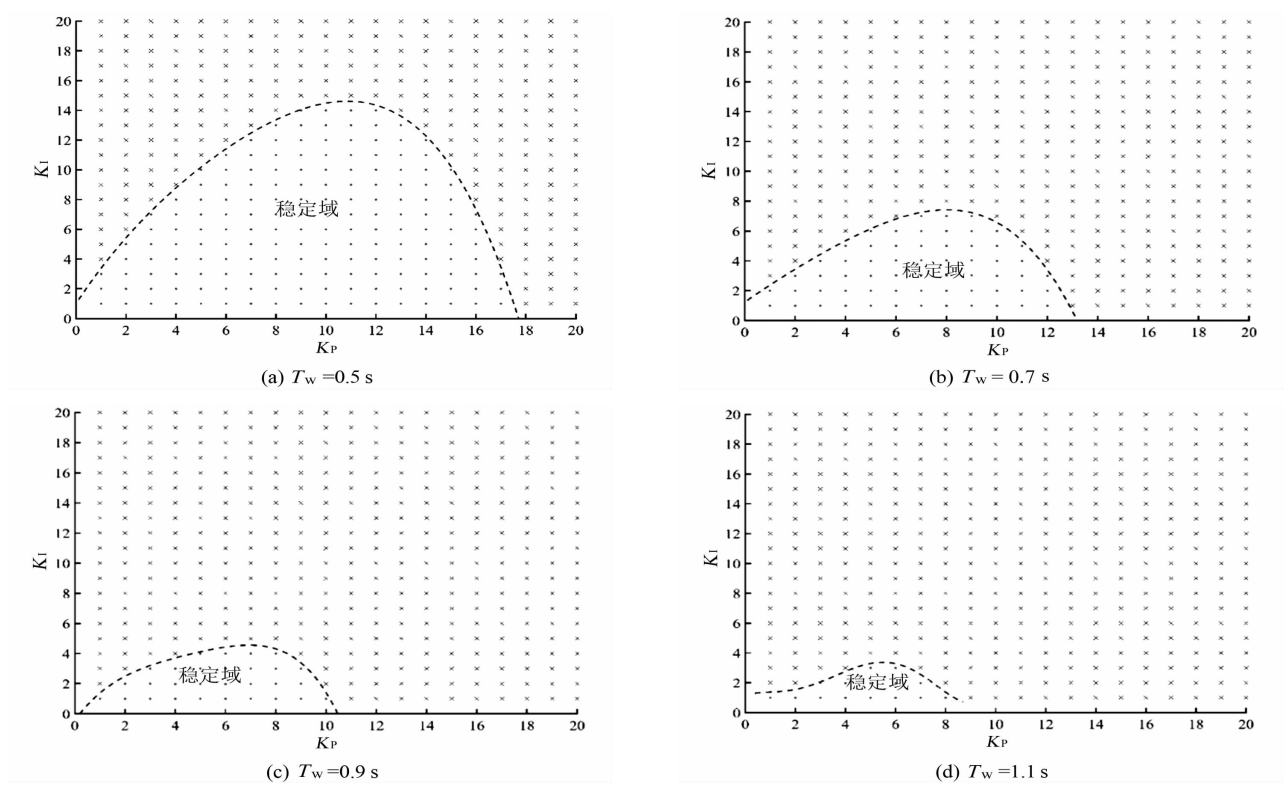


图3 各参数对超低频振荡稳定域的影响

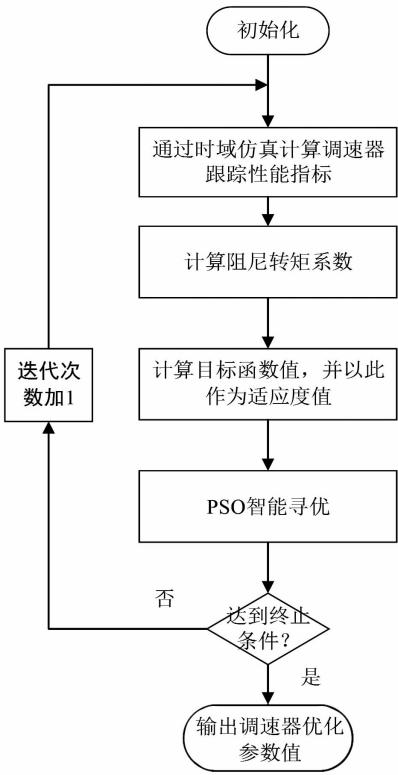


图4 调速器参数优化模型求解流程

3 算例验证

对于超低频振荡问题,由于多机系统可以解耦

成单机系统进行分析,因此以图 1 所示的水轮机组单机带负荷为例来验证所提调速器参数优化算法的有效性。设定调速器的原始参数分别为 $K_p = 0.8$ 、 $K_i = 1.2$ 、 $K_D = 1.0$ 。调速器参数的取值范围均取为 $[0,5]$,利用所提模型进行调速器参数优化,调速器参数分别为 $K_p = 5$ 、 $K_i = 2.32$ 、 $K_D = 5$ 。

在 4 种不同 T_w 取值下,参数优化前后水轮机 - 调速器通道在超低频段的阻尼转矩系数对比和参数优化前后的系统阶跃响应曲线对比,分别如图 5、图 6 所示。

由上述对比可知,所提方法能有效提升水轮机的阻尼系数,防止出现负阻尼的现象,从而避免系统发生超低频失稳。另外,由于在优化模型中考虑了多种运行工况下的 T_w 值,因此参数优化结果具有一定的鲁棒性。

4 结 语

1)由超低频振荡影响因素综合分析可知,当 K_p 、 K_i 一定时,增大 T_w ,系统的稳定性显著变差;当 T_w 、 K_i 一定时,增大 K_p ,系统的稳定性先变好,再变差;当 T_w 、 K_p 一定时,增大 K_i ,系统的稳定性变差。

2)考虑水锤效应不确定性的参数优化模型能

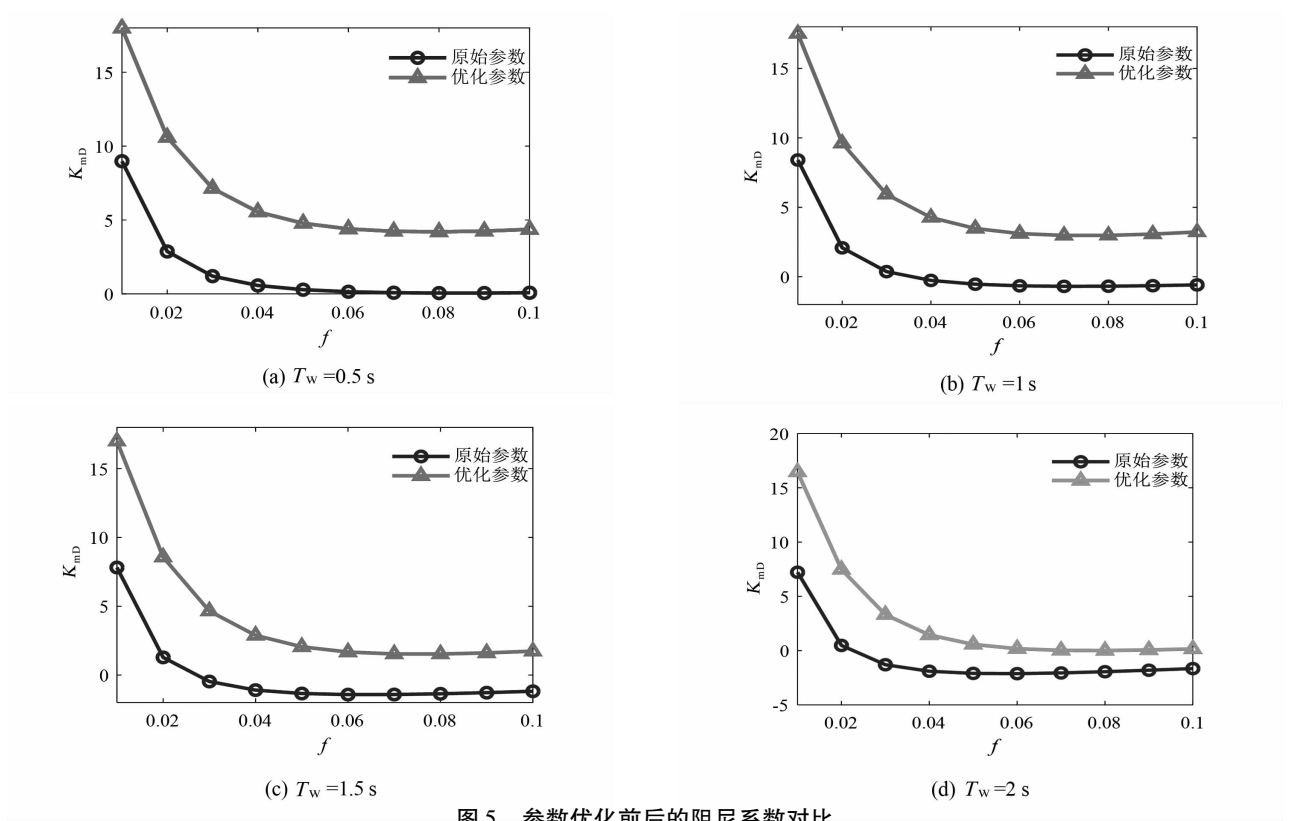


图5 参数优化前后的阻尼系数对比

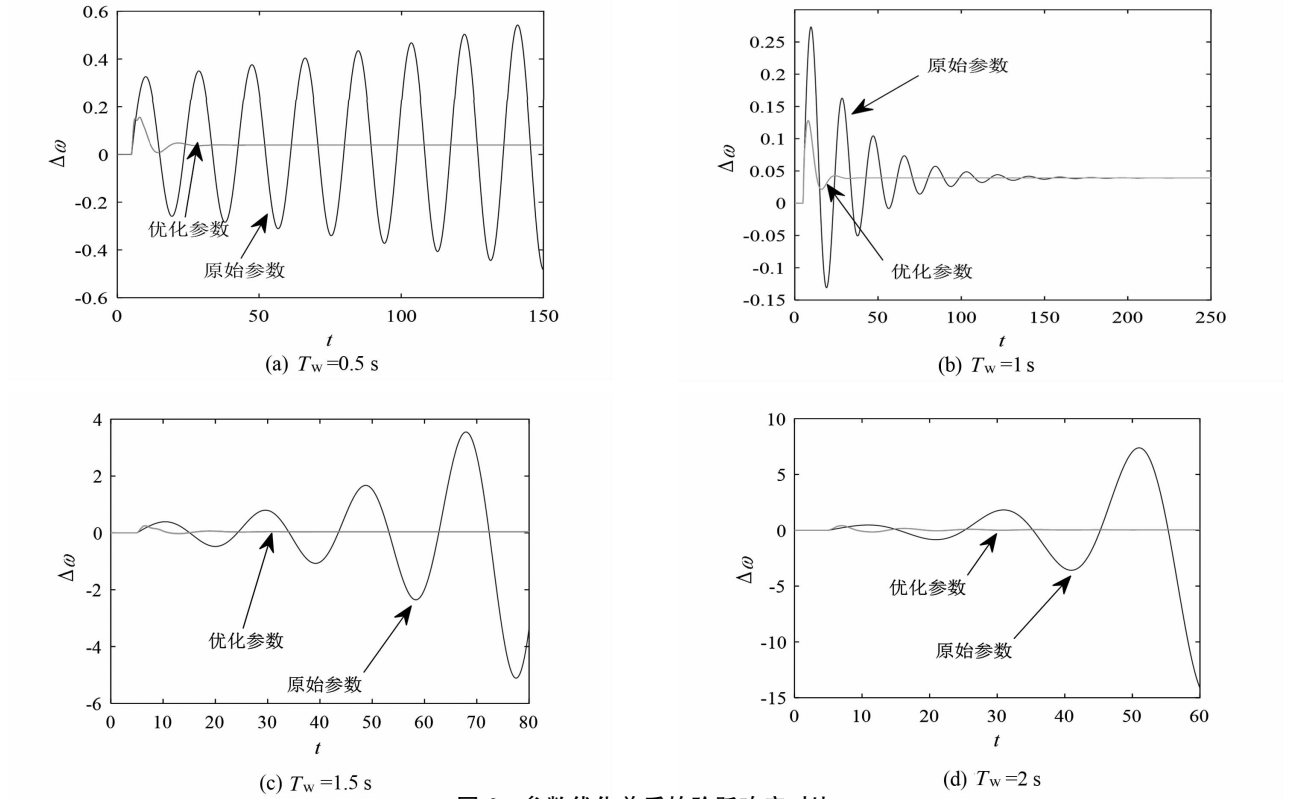


图6 参数优化前后的阶跃响应对比

有效抑制超低频振荡现象,并且具有一定的鲁棒性。

参考文献

[1] Dandeno P L, Kundur P, Bayne J P. Hydraulic Unit Dy-

namc Performance under Normal and Islanding Conditions Analysis and Validation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97 (6) : 2134 - 2143.

(下转第 42 页)

基于组合支持向量回归的排污企业生产识别

靳 旦,唐 伟

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:在电网大数据结合环保监管的背景下,研究了以企业用电和纳税数据为特征的企业生产状态识别方法。实际输入特征通常存在异常和部分缺失的情况,采用回归分析解决数据异常和部分缺失的问题,提高了分析结果的鲁棒性。建立支持向量回归模型来识别污染企业生产状况,通过网格搜索选择多个支持向量回归组合模型来识别污染企业生产状况,增加了模型的泛化能力,提高了分类精度。最后,实际测试结果验证了所提出的基于组合支持向量回归的排污企业生产识别方法的精确性和适用性。

关键词:组合支持向量回归;网格搜索;生产识别

中图分类号:TP701 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0029-04

Identification of Production for Pollution Emission Enterprises Based on Ensemble Support Vector Regression

Jin Dan, Tang Wei

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

Abstract:Under the background of big power data and environmental supervision, the identification of enterprise production status is studied, which is characterized by enterprise electricity consumption and tax payment. Regression analysis is adopted to solve the problem of data anomaly and partial missing, which improves the robustness of analysis results. Support vector regression model is established to identify the production status of pollution emission enterprises, and multiple support vector regression models are selected through grid search to identify the production status of pollution emission enterprises, which increases the generalization ability of the model and improved the classification accuracy. Finally, the simulations confirm the accuracy and applicability of the proposed method based on ensemble support vector regression (e-SVR).

Key words:ensemble support vector regression, grid search, identification of production

0 引 言

信息技术和互联网技术的快速发展使得大数据分析和人工智能等新技术应用应运而生,在建设电力物联网的背景下,大数据和人工智能新技术与能源行业相结合引发了越来越多研究人员的关注^[1]。电力大数据平台在全面管控电网营销服务和企业安全生产等方面获得显著成效^[2-3]。一种应用电网用电信息采集系统数据以实现城市大气污染排放在线管控的方法被提出。该方法基于大数据手段,将电网企业用电信息采集系统电量与环保管控数据进行批量化关联分析,无需新增硬件设备,实现了城市企业大范围在线监管,其中,排污企业对于环保措施的

响应程度评判是电力数据在环保应用的一个重要功能。

支持向量机(support vector machine,SVM)是在分类、回归和其他学习任务方面广受欢迎的一种机器学习方法,在计算机视觉、自然语言处理、神经成像、生物信息学等领域已有成功的应用^[4]。支持向量机一般分为 3 类:支持向量分类(support vector classification,SVC)、支持向量回归(support vector regression,SVR)和一类支持向量机(one-class support vector machine,1-SVM)^[5]。其中:根据分类特征,支持向量分类可分为两值分类和多值分类;支持向量回归用于处理数据回归问题;支持向量机还可实现一种特殊的一类分类问题,有学者将其称为一类支持向量机(one-class support vector machine,

1-SVM),在实际中通常应用于异常值检测^[6]。

下面研究以企业用电和纳税信息为特征的排污企业生产状态识别方法,考虑到实际输入特征异常和部分缺失的情况,采用回归分析解决数据异常和部分缺失的问题,提高了分析结果的鲁棒性;通过网格搜索选择多个支持向量回归组合模型来识别污染企业生产状况,增加了模型的泛化能力,提高了分类精度。

1 支持向量机数学模型

从模式分类中可分离模式的情况下了解支持向量机是如何工作的可能是最容易的。给定可线性或非线性分离的训练样本,支持向量机通过非线性核函数映射,生成一个超平面作为决策曲面,使得正例和反例之间的隔离边缘被最大化。

考虑训练样本 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, N\}$, x_i 为输入模式的第 i 个样例, y_i 为对应的期望响应,用于分离的超平面形式的决策曲面方程为

$$\mathbf{w}^T \mathbf{x} + \mathbf{b} = 0 \tag{1}$$

式中: $\mathbf{x}$ 为输入向量; $\mathbf{w}$ 为权值向量; $\mathbf{b}$ 为偏置。对于一个给定的权值向量 $\mathbf{w}$ 和偏置 $\mathbf{b}$, 支持向量机的目标就是找到一个特殊的超平面, 这个超平面的分离边缘最大。支持向量机是一个二次规划问题, 数学推导如下。

当样本中 $y_i = +1$ 和 $y_i = -1$ 代表的两类模式是线性可分时, 式(1)可以为

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + \mathbf{b} &\geq 0 && \text{当 } y_i = +1 \\ \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + \mathbf{b} &\leq 0 && \text{当 } y_i = -1 \end{aligned} \tag{2}$$

考虑使式(2)等号成立的那些点, 也就是距离超平面最近的两类点, 只要成比例地调整 $\mathbf{w}$ 和 $\mathbf{b}$ 的值就能保证这两类点的存在, 且对分类结果没有任何影响。设 2 个超曲面为 H_1, H_2 。

$$\begin{aligned} H_1: \mathbf{w}^T \mathbf{x} + \mathbf{b} &= 1 \\ H_2: \mathbf{w}^T \mathbf{x} + \mathbf{b} &= -1 \end{aligned} \tag{3}$$

超曲面 H_1 到原点的距离为 $|1 - \mathbf{b}| / \|\mathbf{w}\|$, 超平面 H_2 到原点的距离为 $|-1 - \mathbf{b}| / \|\mathbf{w}\|$ 。所以, H_1 和 H_2 之间的距离为 $2 / \|\mathbf{w}\|$ 。因此, 要使分离间隔最大就是使 $\|\mathbf{w}\|$ 最小, 为一个二次规划问题。

对于非线性问题, 可以通过非线性变换转化为高维空间的线性问题。因此, 对于非线性分类, 首

先, 采用一个映射 φ 将数据映射到一个高维空间。此时, 在高维特征空间中就可对输入数据进行线性分类, 映射回原空间后就成了输入数据的非线性分类。支持向量机采用了一个核函数 $K(x, y)$ 代替高维空间的内积运算, 避免高维空间的复杂运算。为使得所有样本都能被分离超平面正确分类, 增加模型的鲁棒性, 可采用松弛变量解决这个问题, 因此优化问题为

$$\min \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i \right) \tag{4}$$

式中: $\mathbf{w}$ 是权值向量; C 为惩罚因子; ξ_i 为松弛变量。约束为

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^T \Phi(x_i) + \mathbf{b} &\geq 1 - \xi_i && i = 1, \dots, l \\ \xi_i &\geq 0 && i = 1, \dots, l \end{aligned} \tag{5}$$

式中: $\Phi(x_i)$ 为核函数。

2 排污企业生产识别

2.1 排污企业生产识别整体流程

基于组合支持向量回归的排污企业生产识别的输入数据为企业的用电量和税收值, 与企业生产状态有强相关性。对输入数据进行归一化处理可直观迅速判断企业的基本运行情况, 同时大量简化了计算。规则化后的输入数据存在负值或缺失的情况, 这是异常的输入数据。通过对企业用电量和税收值的历史回归分析, 可校正负值的输入数据, 预测缺失的输入数据, 提高了分析结果的鲁棒性。

将输入数据分为 3 部分: 训练数据、验证数据和测试数据。输入数据用来训练支持向量回归的超参数, 不同的超参数对应一个支持向量回归模型。通过网格搜索可以确定多个支持向量回归模型, 验证数据用来筛选已确定的支持向量回归模型, 得到最优的支持向量回归模型集用于组合回归判断, 可提高单一模型的精度。最后, 将最优的支持向量回归模型集来测试历史数据。排污企业生产识别整体流程如图 1 所示。

2.2 排污企业数据来源

排污企业的主要数据有企业类型、企业注册地、企业纳税、企业用电等, 取自于不同的机构。其中, 企业类型和企业注册地来自四川省工商局, 企业纳税历史数据来自于四川省税务局, 企业用电历史数据来自国网四川省电力公司用电信息采集系统和营

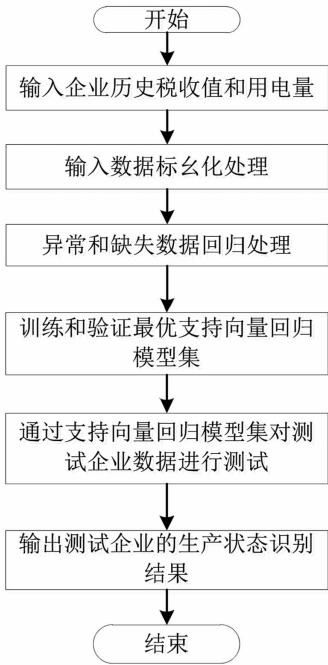


图 1 排污企业生产识别总体流程

销系统。将历史数据分为 3 部分：训练数集、验证数集和测试数集。其中，训练数据用来确定模型的参数；验证数据用来做模型验证，选定预测误差小的超参数组合，提高总模型的精度；最后，测试数据用来做模型测试及分析结果。

2.3 输入特征选择与正则化

支持向量机的输入特征选择为企业用电量和纳税值。这两个特征与企业生产密切相关，输出数据为企业开工判据。

输入数据为企业用电量和纳税值，输出数据为企业开工判据，其中，输入数据的幅值远远大于输出数据的幅值。为了降低运算难度，输入数据的大小被规则化，企业用电量被企业配电变压器容量整除，纳税值被最大纳税值整除，则企业用电量和纳税值规则化后的范围均为[0,1]。

$$\begin{aligned} \text{企业用电量}^* &= \frac{\text{企业用电量}}{\text{企业配电变压器容量}} \\ \text{税收值}^* &= \frac{\text{税收实际值}}{\text{最大税收值}} \end{aligned} \tag{6}$$

实际情况中存在输入特征值为负或者缺失的异常情况，为处理这种异常值情况，通过历史数据回归建立起企业用电量和纳税值的关系，如图 2 所示。

图 2 给出了企业历史的税收值和用电量，存在异常与缺失，图 3 对缺失与异常做了标记，通过回归分析，可对异常输入特征进行修正，并填补缺失的特征，如图 4 所示。

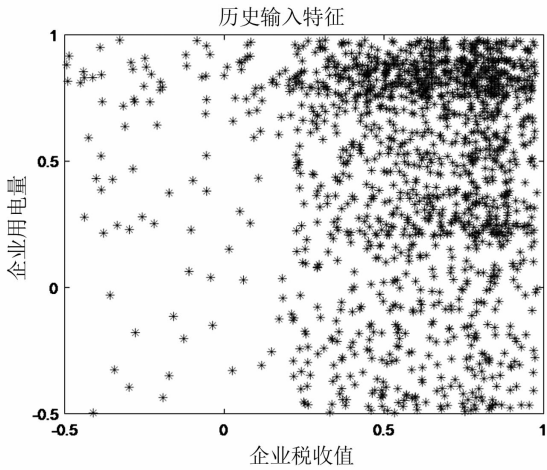


图 2 企业历史输入特征(存在特征异常与缺失)

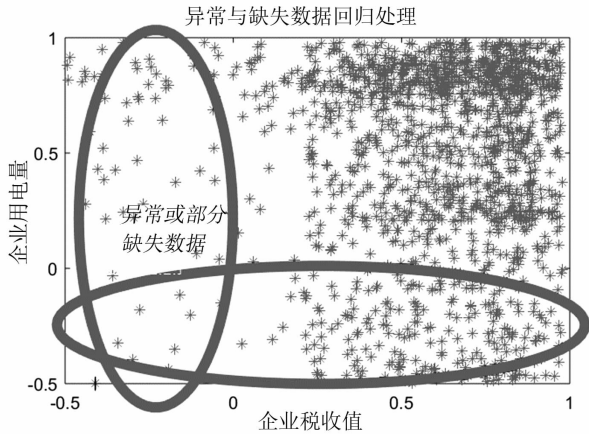


图 3 异常与缺失特征辨识

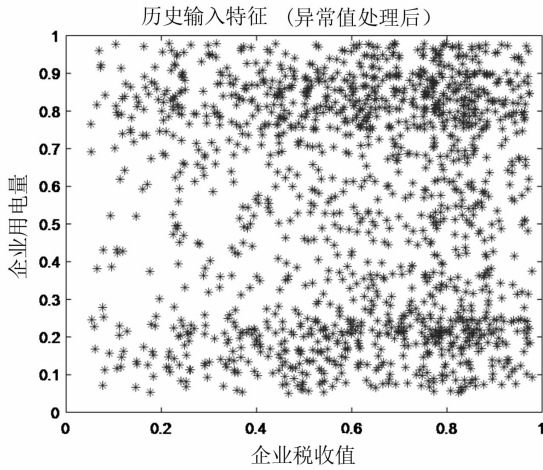


图 4 异常与缺失特征回归处理

2.4 核函数非线性映射

使用非线性映射 φ 把训练数据映射到一个高维特征空间，然后在高维特征空间里进行线性回归，映射回原空间后就成了输入空间的非线性分类。用核函数 $K(x,y)$ 就可以实现非线性回归，如图 5 所示。

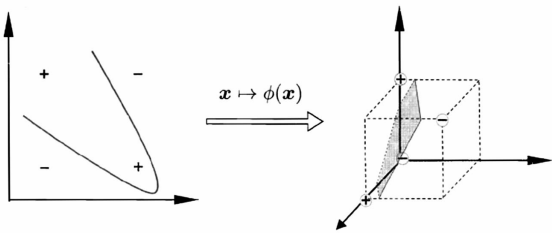


图5 核函数的非线性映射

2.5 网格搜索与验证

采用网格搜索法来选择了441组超参数(即不同的 C, γ, ε 组合),一组超参数可以确定一个SVM模型,选择网格搜索多个超参数以提高模型的边化能力, C 为惩罚因子, γ 为核函数的参数, ε 为一个大于0的常数。在使用相同数据集的情况下,训练了441个不同的SVM模型。用一部分数据来做验证,避免过拟合。通过网格搜索得到的441个模型,在验证集上取误差最小的前25个模型,测试数据的最后结果取25个回归模型的平均值。

网格搜索法是一种直接的方法,它将不同组合的 γ, C 和 ε 值逐个进行测试,查看情况,网格搜索中,令:

$$C = (2^{(-5)}, 2^{(-3)}, 2^{(-1)}, 2^{(1)}, 2^{(3)}, 2^{(5)}, 2^{(7)}, 2^{(9)}, 2^{(11)})$$
$$\gamma = (2^{(-15)}, 2^{(-13)}, 2^{(-11)}, 2^{(-9)}, 2^{(-7)}, 2^{(-5)}, 2^{(-3)})$$
$$\varepsilon = (2^{(-15)}, 2^{(-13)}, 2^{(-11)}, 2^{(-9)}, 2^{(-7)}, 2^{(-5)}, 2^{(-3)})$$

(7)

不同的参数组合依次求解,得到最优的超参数。基于组合支持向量回归的排污企业生产识别流程如图6所示。

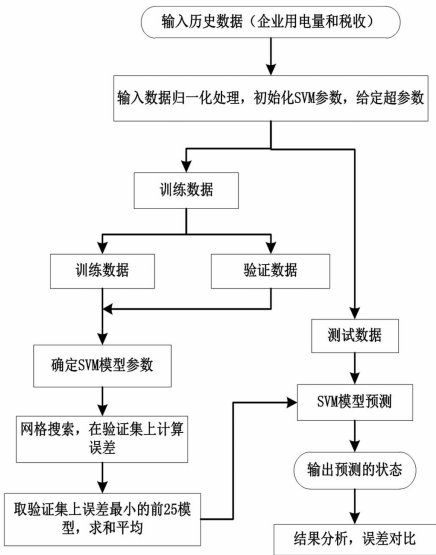


图6 基于组合支持向量回归的排污企业生产识别流程

3 测试结果分析

对企业1500个实际生产数据进行测试识别。输入数据为这1500个实际生产下的纳税值和用电量,其中,输入数据存在部分缺失和异常。组合支持向量机模型给出对于1500个输入特征下对应的生产判断。

输入的数据中,纳税数据小于0时为异常值,纳税数据为0时为缺失值。异常值和缺失值都是因为实际管理等原因造成的真实数据不能查询。

输入数据的总数为1500个,异常即小于0的数据为313个,占总输入数据的20.87%;部分缺失数据数量为29个,占总输入数据的1.93%,如表1所示。

表1 输入数据分析

数据类型	数量/个	比例/%
总输入数据	1500	100.00
异常数据	313	20.87
部分缺失数据	29	1.93

通过回归模型对异常数据进行处理,如图7所示,异常和部分缺失输入数据进行回归处理后,其规则化后的范围为(0,1)。

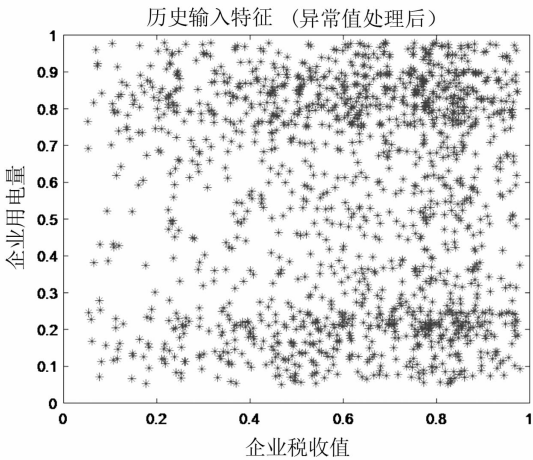


图7 异常和部分缺失数据处理后的输入特征数据

通过组合支持向量回归模型对异常和部分缺失值处理后的数据进行生产状态识别,结果如图8所示。

组合支持向量回归模型识别企业生产状态结果如表2所示。其中,正确识别的生产状态1484个,识别正确率为98.93%,多个支持向量机组合模型具有分类精度高的特点。由于异常和部分缺失数据

(下转第77页)

基于电力数据的居民人口流动情况评估

刘 畅¹,滕予非¹,唐 伟¹,靳 旦¹,李赋欣²

(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:为克服社区人口人工摸排周期长且准确性不高的问题,提出一种基于电力数据的居民人口流动情况评估方法。首先,通过用户档案信息读取用户历史用电量数据,完成缺失数据补齐和异常数据处理等工作实现数据清洗。然后,基于聚类方法挖掘用户不同场景下的稳定用电量。在此基础上,定义了用能突变判据和人口流动判据,实现人口流动状况的评估,并利用统计方法实现小区/社区的人口流动情况分析。最后,以成都市某小区实际数据为例,验证了算法的有效性。

关键词:电力大数据;用能特征;人口流动评估;用能突变判据

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0033-05

Population Mobility Evaluation of Residents Based on Electric Power Data

Liu Chang¹, Teng Yufei¹, Tang Wei¹, Jin Dan¹, Li Fuxin²

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

Abstract:In view of the long period and low accuracy of manual survey of community population, an evaluation method of population mobility based on electric power data is proposed. Firstly, the user's historical load consumption data are obtained based on user profile, and the missing data completing and abnormal data processing are used to ensure the validity of load data. Then, the clustering method is used to mine the stable power consumption of residents in different scenarios. On this basis, load mutation criterion and population mobility criterion are defined to evaluate population mobility of residents. Finally, statistical method is employed to analyze the population mobility of the community. Taking the actual data of a residential area in Chengdu for example, the effectiveness of the proposed algorithm is verified.

Key words:power big data; electricity consumption feature; population mobility evaluation; load mutation criterion

0 引 言

随着互联网技术和大数据技术的不断推广和应用,发展智能经济、数字经济已成为大势所趋。在电力物联网建设进程不断深入过程中,数字化转型已经上升为电网企业的重要战略,激活数据价值、挖掘数据应用场景、开发数据产品、服务社会发展成为热点^[1-2]。

人员流动情况摸查是电力数据应用于提质增效的重要场景。尤其是自新冠肺炎疫情发生以来,由于疫情时值春节,走亲访友的情况较多,加之城市社

区人口密集,给工作人员本来就有限的社区排查、管控工作带来极大的困难,导致人员摸排周期长、摸排不准确。基于海量用电数据把握用户的用电规律和用电特性从而辨别居民人口流动情况,可以及时有效地解决上述问题。

然而,在用户行为分析方面,当前研究主要集中在基于电力数据的用户用电行为解析^[3-5],基于用电信息的人员流动情况评估方法较少。文献[6]提出了一种基于细粒度用能数据的居民家庭活动人口评估方法,评估结果具有较高的可行度。但上述方法数据要求较高,需要获取采样间隔为15 min的居民分项电器用电数据、空调和电热负荷详细数据。

对于大部分小区尤其是老旧小区而言,分时、分项数据获取基本无法实现,严重限制了方法的应用场景,也难以满足实际需求。

鉴于此,提出了一种基于居民日电量数据的人口流动情况评估方法。首先,通过历史用电数据聚类挖掘居民的稳定用电水平;然后,基于日电量变化情况和稳定用电水平提出了人口流动判据;最后,基于上述判据对小区居民流动情况进行分析和研判,为社区疫情排查工作提供依据,并以成都市某小区居民实际数据为例验证了所提方法的有效性。

1 居民历史用电特征挖掘

1.1 数据清洗

在线采集上传的日电量,真实反映客户当日生产生活用电情况,具有实时性强的特点;但受到信号干扰、软硬件故障、通信异常等情况的影响,数据可能会出现缺失、异常等情况。数据质量直接关系到分析的结果,因此,需要对采集的数据进行校核和清洗等预处理。

日电量是一个累积值,因此,对于缺失数据的处理有两种方法。

1)用缺失日后1日的日电量作为平均值。计算方法为:

$$\begin{aligned} W_{\text{new}}(N) &= \frac{W(N+1)}{2} + \varepsilon \\ W_{\text{new}}(N+1) &= \frac{W(N+1)}{2} - \varepsilon \end{aligned} \tag{1}$$

式中: N 为数据缺失日期; $W_{\text{new}}(N)$ 为更新数值; $W(N+1)$ 为数据缺失日的后一日的日电量采集数值; ε 为随机噪声信号。该方法适用于对历史数据的处理。

2)用前一段时间日电量均值代替。计算方法为

$$W_{\text{new}}(N) = \frac{\sum_{i=1}^7 W(N-i)}{7} \tag{2}$$

该方法适用于最新日电量的处理。

对于异常数据的校正,主要用于超出合理范围的数据。一般而言,居民日用电量在0至允许容量之间,若日电量小于0,则用0替代;若日电量大于允许容量,则该日电量用最大容量或历史均值替代,计算方法与式(2)相同。

1.2 居民稳定用电量挖掘模型

聚类是样本分类的常用算法^[7],聚类分析的主要目的是通过分析数据的分布特征实现将数据对象划分为若干数据子集,保证每个子集中数据的相似性。其中, k -means 聚类方法因其简单高效而广泛应用于电力系统负荷分类中^[8-9]。

考虑到居民用电情况可分为当日不在家、当日部分时间在家和当日全天在家3种场景,可以通过聚类算法将居民历史日电量分为3类,分别代表3种场景的用电量样本。这里主要采用 k -means 算法对不同居民用电场景的电量进行聚类。

假设在同一季节,居民的用电量与在家时长呈现正相关,求取各类数据均值,均值数据由大到小分别对应全天在家 W_{part} 、部分时间在家 W_{full} 和不在家 W_{no} 3类情况的稳定用电量值。分别统计各类中的样本数量,获取各类场景的出现概率,从而了解居民的生活习惯。

1.3 模型校正

由于历史数据不足,部分用户用电场景不一定齐全,因此,需要对模型进行校正。校正判据为

$$\frac{d_{\min}}{W_{\max}} < 0.1 \tag{3}$$

式中: $d_{\min}$ 为类间距离,是3类样本均值之间的距离; $W_{\max}$ 为历史日电量最大值,表示所选样本中最大值,样本一般为同一季节的日电量数据集。

若上述判据满足,则将距离最近的两类合为一类。

2 单户居民人口流动判据

由于日电量信息颗粒度较大,无法反映实时人口活动情况,因此,日电量信息难以反应具体的人数信息。对于居民流动情况,这里重点关注人口流出后住房空置、由空置到入住的人口流入两种情况。

2.1 居民用电量变化量判据

考虑到居民离开家当天用电量可能介于全天在家场景和全天不在家场景,因此,居民用电变化量考虑次日电量变化和隔日电量变化两个层次进行指标设计,其计算方法为:

$$\text{次日突变率} = \frac{W(t) - W(t-1)}{W_{\max}} \tag{4}$$

$$\text{隔日突变率} = \frac{W(t) - W(t-2)}{W_{\max}} \tag{5}$$

式中： $W(t)$ 为当日日电量； $W(t-1)$ 为前一日日电量； $W(t-2)$ 为隔日日电量； $W_{\max}$ 为历史日电量最大值。

若某居民用户的日电量突变率满足式(6)中的两个判据之一,则该户居民为用能突变用户。

$$\begin{cases} |\text{次日突变率}| > 0.3 \\ |\text{隔日突变率}| > 0.3 \end{cases} \quad (6)$$

对于用能突变用户而言,若突变率大于 0,则居民为用能激增用户;若突变率小于 0,则该居民为用能骤减用户。

2.2 居民流入流出判据

考虑到居民流入、流出前后用电状态的变化,对于用电量可划分为 3 类的情况,定义底值系数为

$$K_{\text{cut}} = \frac{k_1 W_{\text{no}} + k_2 W_{\text{part}}}{W_{\max}} \quad (7)$$

式中, k_2 和 k_1 分别为两个系数,其关系满足 $k_2 + k_1 = 1$,且 $k_1 > 2k_2$,这里取 $k_1 = 5/6$, $k_2 = 1/6$ 。

对于模型校正后只有两类的样本,底值系数为

$$K_{\text{cut}} = \frac{0.5 W_{\text{no}}}{W_{\max}} \quad (8)$$

底值系数主要用于区分用户的居家状态,若该日日电量与历史日电量最大值的比值小于或等于底值系数,则判定用户不在家的概率较大。

2.3 居民流入流出判据

1)疑似人口流入的判据

判据 1:该用户为用能骤增用户。
判据 2:电量激增前的日电量小于 $W_{\max} K_{\text{cut}}$ 。
同时满足判据 1 和判据 2,则认为该户为人口流入客户,标志位记为 1。

2)人口流出的判定判据

判据 3:该用户为用能骤减用户。
判据 4:电量骤减后的日电量小于 $W_{\max} K_{\text{cut}}$ 。
同时满足判据 3 和判据 4,则认为该户为人口流出客户,标志位记为 -1。

值得注意的是,若隔日突变率和次日突变率均大于 1/3 时,可能存在连续两天判定外出的情况。因此,需要对上述情况进行校核,选取中间一天作为流入或流出的时间,保证流入和流出的准确性。

由于在流出到流入之间的时段,房间处于空置状态,用电量变化一般很小,利用该特征可以进一步校核判定结果的有效性。即:人口流出后到下一次

人口流入前,(日电量变化量/历史日电量最大值)小于 0.01,则认为该户短时空置,人流测算有效。

根据流入流出判据标记位按日累加,可以获得该户居民居家状况曲线。若居民居家状况的最小值为 -1,则该曲线整体加 1。居家状况为 1,代表该户当日非空置,否则代表该户当日空置。

3 小区总体居民人口流动状况统计

小区总体居民人口流动状况可以反映总体的人口流动状态,为社区防疫工作提供参考信息。具体包括:

- 1)小区持续空置户数
- 持续空置客户包含两类:1)电表表底数据持续为空的未开户用户;2)表计已开户但变化量持续为零的空置住房用户。定义两类用户户数的总和为持续空置户数。
- 2)居民用电量突变户数
- 定义除持续空置用户外的居民中,居民次日电量突变率或隔日电量突变率绝对值大于 1/3 的居民户数,为当日居民用能突变户数。其中,次日突变率数值为正的居民户数为用户用电骤增户数,突变率数值为负的居民户数为用户用电骤减户数。

- 3)稳定用能户数
- 当日稳定用能户数定义为除持续空置用户外的居民中,居民次日电量突变率或隔日电量突变率绝对值小于 1/3 的居民户数。
- 4)短期空置户数
- 小区内短时空置的用户数目。
- 5)非空置住宅数目
- 小区内当日有人居住的住宅数目。

4 算例分析

以成都市某小区 2020 年 1 月 14 日至 2 月 13 日一个月的电量数据为例进行分析。该小区总电表户数为 180 户,其中,表计未计数用户数为 48 户,统计期间未入住空置住宅户数为 36 户,空置率为 46.67%。由于该小区为成都市内的新小区,入住率不高。

剩余96户的用能曲线如图1所示。由于该小区为别墅区,部分负荷较高。从负荷曲线可以看出,当人员离开时负荷特征明显。

居民的典型判定曲线如图2所示。其中,居家情况为0表示该户不在家,为1表示该户在家。如图2(a)所示,该居民2020年2月3日返回家中,居民电量在当日出现上升,但次日上升电量较小,不足用能突变判据,但隔日用能突变率满足要求,可判定该户用能突变。可见,仅利用次日突变率判据可能出

现漏判。根据居家情况判定结果可知,该算法能准确反映人口流动情况。图2(b)所示为居民1月24日离开,1月28日返回;图2(c)所示为居民1月23日返回,2月1日离开,居家判定结果准确。

从小区整体来看,用能骤增和用能骤减的居民户数随时间的变化曲线如图3所示,其中图3(a)为次日用能骤变居民户数,图3(b)为隔日用能骤变居民户数。

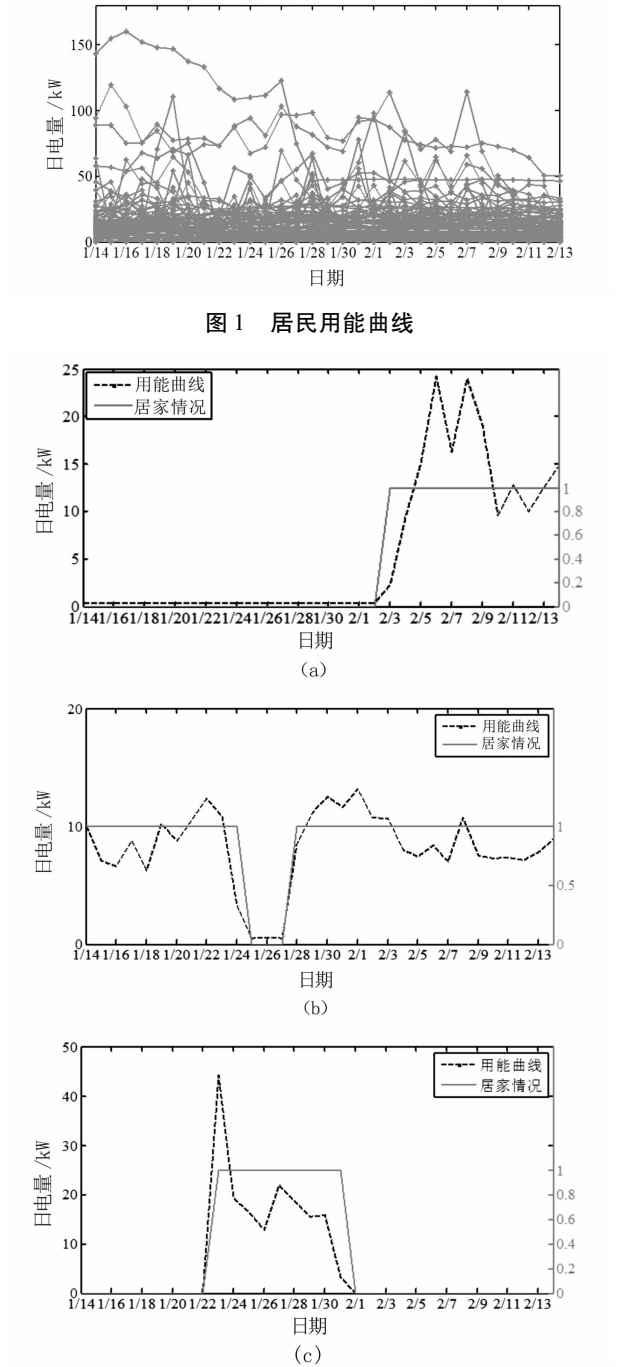


图1 居民用能曲线

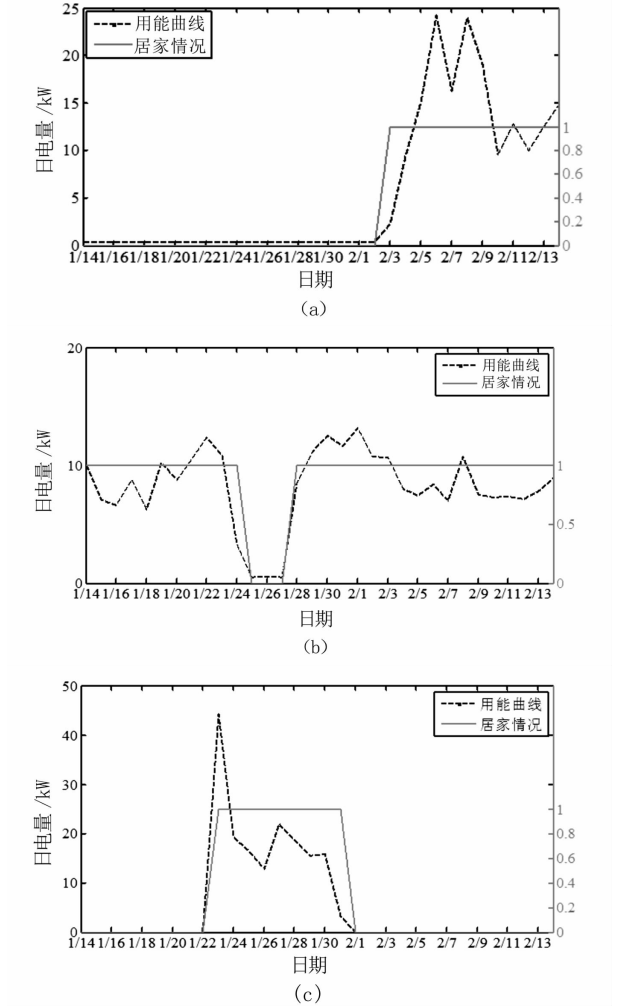


图2 居民居家情况典型判定

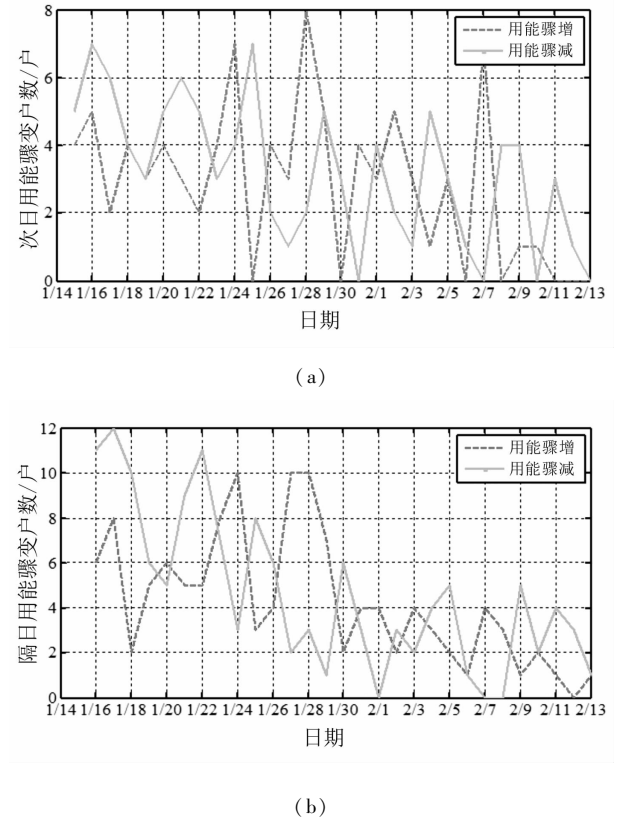


图3 小区用能骤变户数

小区疑似人口流动的户数如图4所示。由图可见,1月22日(春节前)疑似流出人口居民户数大于当日用能骤变数目或隔日用能骤变数目,说明所采用的两个指标结合的方法性能更好。

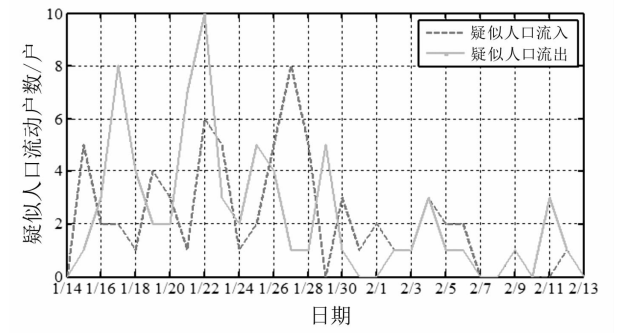


图4 小区疑似人口流动户数

该小区非空置住宅户数如图5所示。由图可见,1月15日至1月22日(春节前)流户数略大于流入户数,非空置住房数持续下降,整个小区人口流出明显。1月23日(除夕)有所回升,但随后继续下降,至1月25日达到最低点。随后,非空置住房数持续上升,到2月1日后基本保持稳定。分析结果与实际情况基本相符。1月28日后非空置住房数回落疑似与国家将复工时间由1月30日调整至2月3日有关。

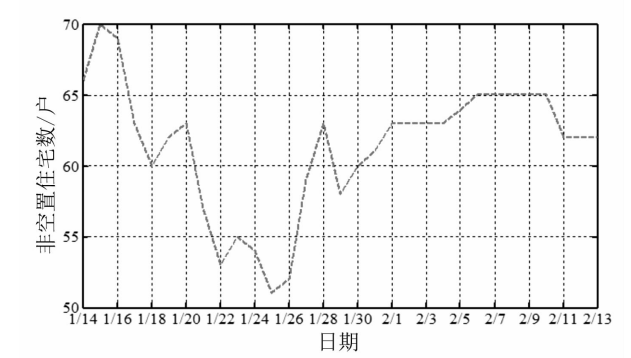


图5 小区非空住宅数

由上述分析可知,虽然日电量数据颗粒度不高,但采用所提出的算法后仍能较好地监测人口流动情况。

5 结 语

鉴于城市社区人口密集,采用人工排查人口情况的方式工作量大、工作周期长,且受节假日等因素的影响其数据准确性不高等问题,提出了一种基于电力大数据的居民人口流动情况评估方法,通过构建用能突变判据和人口流动判据实现了居民人口流入、流出情况的动态监测。利用所提方法应用于某小区的人口流动分析,得到结论如下:

- 1)根据居民数据分析结果与实际流入流出情况的对比可知,采用居民日电量数据可以较好地反映居民人口流动情况。
- 2)采用隔日突变率和次日突变率相结合的方法,可以更好地反映用户的实际用能变化情况,有效提高算法的准确性。
- 3)由算例分析结果可知,小区居民流动情况和非空置户数情况受节假日(春节)影响很大,假期前

半段流出数量较多,后半段流入较多。分析结果与实际相符。

由于日电量维度较低,载有的信息量较少,因此,在用户用能习惯变化极大的情况下,所提方法可能出现误判或漏判。因此,未来将进一步研究在有限信息下精确挖掘用户习惯、提高算法准确性的方法。

参考文献

[1] 王继业,季知祥,史梦洁,等. 智能配用电大数据需求分析与应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8):1829-1836.

[2] 刘科研,盛万兴,张东霞,等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(2):287-293.

[3] 罗滇生,杜乾,别少勇,等. 基于负荷分解的居民差异化用电行为特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21):29-33.

[4] 孙毅,崔灿,陆俊,等. 基于遗传优化的非侵入式家居负荷分解方法[J]. 电网技术,2016,40(12):3912-3917.

[5] 周明,宋旭帆,涂京,等. 基于非侵入式负荷监测的居民用电行为分析[J]. 电网技术, 2018,42(10):3268-3274.

[6] 张祥瑞,陶鹏,李翀,等. 基于细粒度用能数据的居民家庭活动人口评估方法研究[J]. 河北电力技术, 2019, 38(6):48-51.

[7] 蔡秋娜,刘思捷,陆秋瑜. 基于GMM聚类和SVM的用户负荷行业分类辨识方法[J]. 广东电力, 2017,30(12):91-96.

[8] Al - Wakeel A, Wu J, Jenkins N. K - means Based Load Estimation of Domestic Smart Meter Measurements [J]. Applied Energy, 2017,194:333-342.

[9] 程明畅,刘友波,张程嘉,等. 基于分位数半径动态K - means 的分布式负荷聚类算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 47(24):15-21.

作者简介:

刘畅(1991),硕士,工程师,研究方向为电力系统分析与大数据应用。

(收稿日期:2020-03-09)

春节期间主要行业用电波动特性研究

戴松灵,唐 权,任志超

(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘要:针对中国节假日尤其是长假对用电曲线的显著影响,提出了春节期间行业用电波动特性的表征参数,开展了基于K-means算法的曲线聚类分析,揭示了主要工业行业和服务行业逐日用电与春节长假的内在联系。结果表明,主要工业行业可聚为4类,主要服务行业可聚为3类。部分行业用电基本不受春节因素影响;在受影响明显的行业中,有U型曲线,也有V型曲线,有些降幅大但恢复快,有些降幅小但恢复慢,还有一些与春节假期高度重合。

关键词:春节期间;K-means;聚类分析;工业行业;服务行业;逐日用电

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0038-05

Research on Power Consumption Fluctuation Characteristics of Main Industries during the Spring Festival

Dai Songling, Tang Quan, Ren Zhichao

(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Holidays, especially long holidays, have a significant impact on the curve of power consumption. The characteristic parameters of industry power consumption fluctuation during the Spring Festival are put forward, and the curve clustering analysis based on K-means algorithm is carried out, which reveals the internal relationship between the daily power consumption of main industries and service industry and the long Spring Festival holiday. The results show that the main industries can be divided into four categories, and the main service industry can be divided into three categories. The power consumption of some industries is basically not affected by the Spring Festival, and among the industries that are obviously affected, there are U-shaped curves and V-shaped curves, some of which have a large decline but rapid recovery, some of which have a small decline but slow recovery, and some of which are highly overlapped with the Spring Festival holiday.

Key words: during the Spring Festival; K-means; clustering analysis; industrial industry; service industry; daily electricity load

0 引言

中国节假日包含周末、小长假和长假。小长假时间较短且与周末的时长差距不大,对行业用电的影响较小。与之相比,长假的影响更为显著,但国庆期间尚有许多企业依旧在正常生产,而春节作为中国最重要的传统节日其影响更甚,日用电量曲线往往会出现较大波动,且呈现出一定的规律,下面重点分析春节期间及前后行业用电波动的情况。

目前关于节假日对电力消费的影响,大多数研究主要针对电网整体负荷开展分析且主要是趋势预测^[1-5],鲜有针对细分行业的假日用电特征研究。

下面构建了表征春节期间行业用电波动特性的量化指标,开展了基于K-means算法的曲线聚类分析,揭示了主要工业行业和服务行业在春节及其前后期间的波动特征,相关成果可以为电网的规划计划、生产运行提供决策参考。

1 行业用电聚类分析的基本思路

1.1 K-means 聚类方法

K-means 算法是一种广泛使用的聚类方法,该方法的主要步骤如下:

- 1) 假定输入样本 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 。
- 2) 观察不同曲线特征,指定要形成的聚类个

数,选择初始的 k 个类别中心为 $\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_k$ 。

3) 计算每个样本点到各类中心的距离,将每个样本点归到距离中心最近的那个类,形成初始分类结果。

$$\text{label}_i = \arg(\min_{1 \leq j \leq k} \|x_i - \mu_j\|)$$

式中: label_i 为样本 x_i 的分类结果,其输出为 I, II, III, IV, ……; $\arg$ 为分类函数。

4) 分别计算每个类别所有样本到该类别中心的几何距离均值,并据此更新每个类别中心的位置。

$$\mu_{j(t)} = \frac{1}{\text{count}(c_j)} \sum_{i \in c_j} x_i$$

式中: $\mu_{j(t)}$ 为第 t 次更新后的类别中心; c_j 为依据步骤 3) 确定的属于第 j 类群体的样本下标编号集合; count 表示个数。

5) 重复第 3) 和第 4) 步,不断迭代,直到类别中心变化小于某阈值,不再调整为止。

6) 分析聚类结果的科学性,若结果不理想,则调增或调减聚类个数,回到步骤 2),直至结果合理。如图 1 所示。

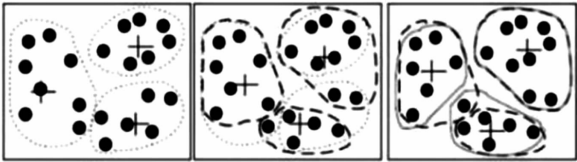


图 1 K-means 聚类中心迭代

1.2 变量选取思路

考虑到各行各业的用电量差距较大,且受春节影响差异较大,拟采取如下做法:1) 归一化处理:选取各行业在所研究时间段内的最大值作为基准,形成无量纲归一化曲线,使得不同行业不同年份可以在同一尺度类比。2) 双维度分类指标:一是深度即降幅,各行业选取研究时间段内的日电量平均值为基准,将最低点与之比对,据此衡量电量波动下降的程度;二是宽度即时长,各行业日电量低于平均值的天数,据此衡量行业用电恢复的速度。

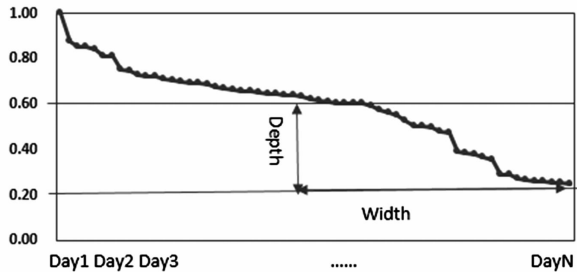


图 2 归一化处理及衡量指标

2 主要工业行业用电波动特征分析

2.1 聚类结果及最终聚类中心

2019 年春节及前后主要工业行业逐日电量曲线聚类结果如表 1 和表 2 所示,分为 4 类。其中第 1 类和第 3 类分别都只有 1 个行业,第 2 类和第 4 类各有 2 个行业纳入。从最终的聚类中心看,4 个类别的主要特点分别是降幅不明显但持续时间长、降幅明显但持续时间短、降幅处于中等水平且持续时间很短、降幅较小且持续时间处于中等水平。

表 1 2019 年春节及前后主要工业行业用电波动特征聚类

行业名称	深度	宽度	聚类	距离
化学原料和化学制品制造业	0.12	34	I	0.000
非金属矿物制品业	0.64	26	II	1.500
黑色金属冶炼和压延加工业	0.28	29	IV	0.095
有色金属冶炼和压延加工业	0.09	29	IV	0.095
金属制品业	0.57	23	II	1.500
计算机、通信和其他电子设备制造业	0.43	20	III	0.000

表 2 2019 年春节及前后主要工业行业用电最终聚类中心

聚类	I	II	III	IV
深度	0.12	0.61	0.43	0.19
宽度	34.00	24.50	20.00	29.00

2.2 工业行业用电波动特征聚类分析

1) 工业 I 类聚类曲线

化学原料和化学制品制造业:2019 年,春节放假并未对行业日电量产生明显影响,这应当与化学原料和化学制品制造业自动化程度相对较高有关。总体上,化学原料和化学制品制造业呈现出稳定小幅增长的趋势,如图 3 所示。

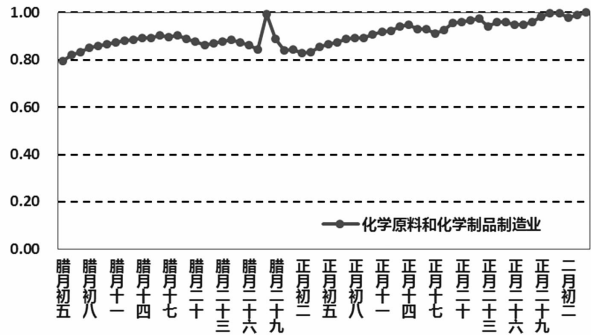


图 3 2019 年工业第 I 类特性曲线

2)工业Ⅱ类聚类曲线

非金属矿物制品业:2019年,非金属矿物制品业日用电量从除夕前12天(腊月十八)开始下降,在农历新年初三达到最低值。整个春节假期期间,非金属矿物制品业的日用电量一直处于较低水平。同时在除夕之前,日用电量呈现快速下降趋势,而在春节假期结束之后,日用电量稳步回升。非金属矿物制品业用电量具有典型的U型特征,受春节假期的影响十分明显。

金属制品业:2019年,金属制品业日用电量从除夕前12天(腊月十八)开始呈下降趋势,在农历新年正月初一达到最低值。春节假期过后,从正月初七开始出现快速回升,到除夕后16天(正月十六)恢复到一个相对稳定的水平。金属制品业用电量也具有典型的U型特征,与非金属矿物制品业的用电波动曲线特征相似度极高。

工业Ⅱ类聚类曲线如图4所示。

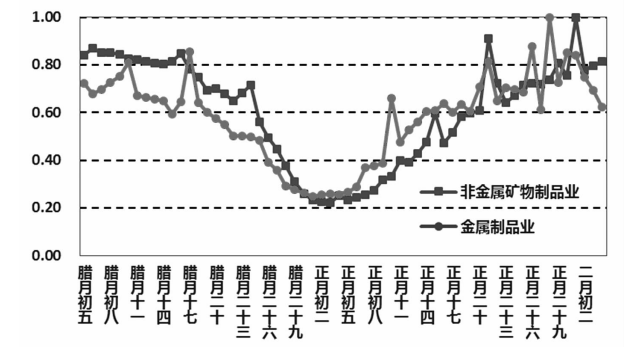


图4 2019年工业Ⅱ类特性曲线

3)工业Ⅲ类聚类曲线

计算机、通信和其他电子设备制造业:2019年,计算机、通信和其他电子设备制造业日用电量从除夕前9天(腊月二十一)开始呈下降趋势,在农历新年正月初一达到最低值。春节假期过后,从正月初七开始出现快速回升,到除夕后10天(正月初十)恢复到一个相对稳定的水平。与其他行业相比影响时长明显较短。如图5所示。

4)工业Ⅳ类聚类曲线

黑色金属冶炼和压延加工业:2019年,黑色金属冶炼和压延加工业日用电量从腊月初五开始一直呈下降趋势,在农历新年正月初二达到最低值20.0608GWh。春节假期过后,从正月初八开始出现缓慢回升,一直到除夕后26天(正月二十六)恢复到一个相对稳定的水平。可以看到,黑色金属冶炼和压延加工业用电量也具有典型的U型特征,但

与第二类曲线相比,电量下降的时间较早,同时节后电量恢复的速度较快。

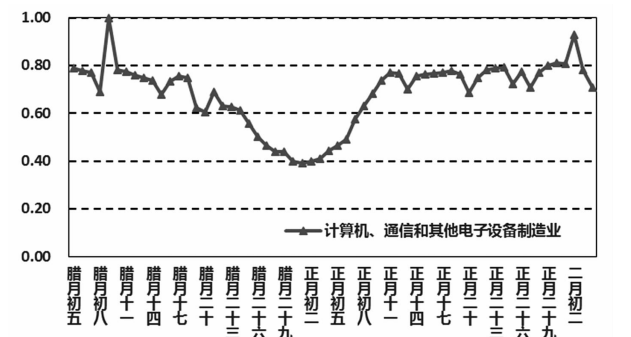


图5 2019年工业Ⅲ类特性曲线

有色金属冶炼和压延加工业:2019年,有色金属冶炼和压延加工业日用电量变化趋势较为平稳,春节放假对该行业用电量的影响类似于黑色金属冶炼和压延加工业且程度更小。

工业Ⅳ类聚类曲线如图6所示。

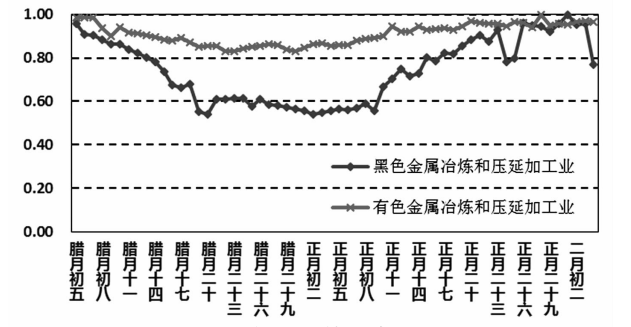


图6 2019年工业Ⅳ类特性曲线

3 主要服务行业用电波动特征分析

3.1 聚类结果及最终聚类中心

2019年春节及前后主要服务行业逐日用电量曲线聚类结果如表3和表4所示,分为3类。其中第1类包括4个行业,第2类和第3类各有两个行业纳入。从最终的聚类中心看,3个类别的主要特点分别是降幅较小且持续时间处于中等水平、降幅虽大但持续时间短、降幅大且持续时间长。

3.2 服务行业用电波动特征聚类分析

1)服务业Ⅰ类聚类曲线

交通运输、仓储和邮政业:2019年,交通运输、仓储和邮政业日用电量从除夕前4天(腊月二十六)开始呈下降趋势,在农历新年正月初一达到最低值。随后,该行业日用电量出现快速回升,到除夕后9天(正月初九)恢复到一个相对稳定的水平。交通运输、仓储和邮政业用电量具有典型的V型特

征,春节放假因素导致的该行业用电量下降幅度相对有限、波动时间不长。

表 3 2019 年主要服务行业用电波动特征聚类

行业名称	深度	宽度	聚类	距离
交通运输、仓储和邮政业	0.25	31	I	0.501
信息传输、软件和信息 技术服务业	0.11	30	I	0.527
批发和零售业	0.46	35	Ⅲ	1.000
住宿和餐饮业	0.34	31	I	0.504
金融业	0.41	25	Ⅱ	0.015
房地产业	0.46	37	Ⅲ	1.000
租赁和商务服务业	0.44	25	Ⅱ	0.015
公共服务及管理组织	0.40	30	I	0.515

表 4 2019 主要服务行业用电最终聚类中心

聚类	I	Ⅱ	Ⅲ
深度	0.28	0.43	0.46
宽度	30.50	25.00	36.00

信息传输、软件和信息技术服务业:2019 年,信息传输、软件和信息信息技术服务业日用电量在春节假期前后出现了短暂降低,但降幅很小。春节因素对该行业用电特征的影响十分微小。

住宿和餐饮业:2019 年,住宿和餐饮业日用电量从除夕前 2 天(腊月二十八)开始呈下降趋势,在农历新年正月初一达到最低值。随后,该行业日用电量出现快速回升,到除夕后 7 天(正月初七)恢复到一个相对稳定的水平。与前两个行业类似,春节放假因素导致的用电量波动时间不长。

公共服务及管理组织:2019 年,公共服务及管理组织日用电量受假日影响降幅不算太大,且持续时间不算太长,与住宿和餐饮业具有一定相似度。

服务业第 I 类特性曲线如图 7 所示。

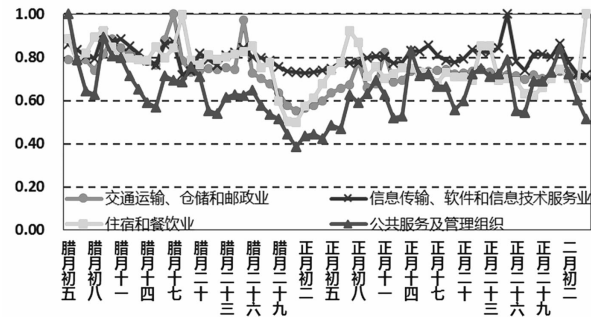


图 7 2019 年服务业第 I 类特性曲线

2) 服务业Ⅱ类聚类曲线

金融业:2019 年,金融业日用电量曲线具有明显的以周为周期的用电波动特征,即工作日用电量,周末用电量会出现短暂降低,这与该行业的基本特点相符。考虑该行业日用电量的周期波动后,可

以判断该行业在除夕前 2 天(腊月二十八)开始呈下降趋势,到除夕后 7 天(正月初七)恢复到节前相对稳定的水平。该行业日用电量的波动特征与春节假期高度重合。

租赁和商务服务业:2019 年,租赁和商务服务业日用电量的变化趋势与金融业十分相似,正常生产状态下具有典型的周期性波动特征,春节假期的影响起始于除夕前 2~3 天,结束于春节假期后 1~2 天,与春假放假时间高度重合。

服务业Ⅱ类特性曲线如图 8 所示。

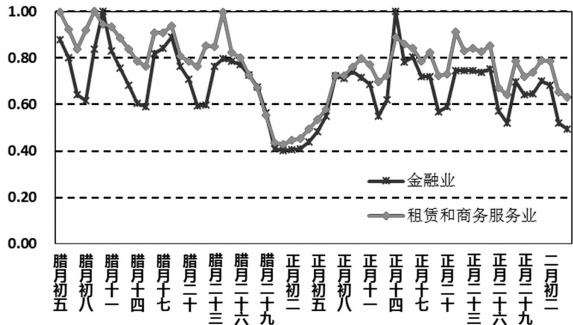


图 8 2019 年服务业第Ⅱ类特性曲线

3) 服务业Ⅲ类聚类曲线

批发和零售业:2019 年,批发和零售业日用电量数据质量较低,数据波动十分剧烈,数据清洗比较困难,因而无法准确分析出春节因素对该行业用电量的具体影响。但根据曲线整体变化趋势,低位运行时间较长,与房地产行业有一定相似度。

房地产业:2019 年,房地产业日用电量从除夕前 4 天(腊月二十六)开始呈下降趋势,在农历新年初一(2 月 5 日)达到最低值。随后,该行业日用电量出现稳步回升,到除夕后 10 天(正月初十)恢复到一个相对稳定的水平。房地产业用电量具有典型的 V 型特征,受春节假期的影响较为明显。

服务业Ⅲ类特性曲线如图 9 所示。

4 结 语

1) 春节假期及其前后对主要工业行业逐日用电的影响:化学原料和化学制品制造业用电量基本不受春节因素的影响。非金属矿物制品业、金属制品业用电量具有典型的 U 型特征,受春节假期的影响十分明显。计算机、通信和其他电子设备制造业受春节影响的时长明显较短。金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业用电量也具有典型的 U 型特征,但电量下降的幅度较小、时间较早且恢复速度较快。

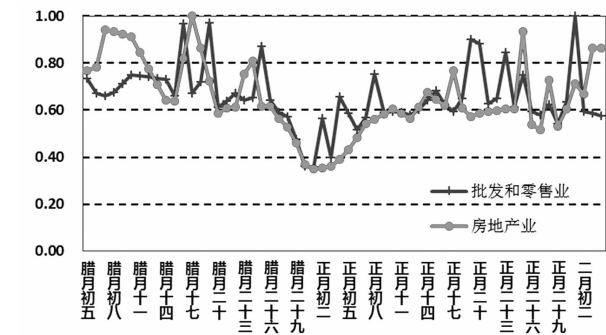


图9 2019年服务业Ⅲ类特性曲线

2) 春节假期及其前后对主要服务行业逐日用电的影响:交通运输、仓储和邮政业,信息传输、软件和信息技术服务业,住宿和餐饮业,公共服务及管理组织日用电量受假日影响降幅不算太大,且持续时间不算太长。金融业、租赁和商务服务业等行业日用电量曲线具有周期性波动特征,工作日用电量高,周末用电量小,同时春节因素的影响持续时间与春节假期高度重合。批发和零售业、房地产业低位运

行时间较长,受春节假期的影响较为明显。

参考文献

[1] 冯丽,邱家驹. 基于模糊多目标遗传优化算法的节假日电力负荷预测[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):29-34.

[2] 苗键强,童星,康重庆. 考虑相关因素统一修正的节假日负荷预测模型[J]. 电力建设,2015,36(10):99-104.

[3] 桑福敏,胡润滋. 国家法定节假日重庆地区电网日负荷预测分析与研究[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2015,20(6):42-45.

[4] 杨俊义,周琪,赵宏大,等. 春节假期对江苏电网负荷及电量影响研究[J]. 电力需求侧管理,2015,17(6):19-22.

[5] 王宁,陈亮,李嘉龙. 电力系统节假日负荷预测实例分析[J]. 广东电力,2010,23(11):47-49.

作者简介:

戴松灵(1963),工学学士,研究方向为电力市场、电网规划等。

(收稿日期:2020-03-31)

(上接第28页)

[2] 刘春晓,张俊峰,陈亦平,等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术,2016,10(7):29-34.

[3] 王官宏,于钊,张怡,等. 电力系统超低频率振荡模式排查及分析[J]. 电网技术,2016,40(8):2324-2329.

[4] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):62-68.

[5] 陈磊,路晓敏,陈亦平,等. 多机系统超低频振荡分析与等值方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):10-15.

[6] 周靖皓,江崇熙,甘德强,等. 基于值集法对云南电网超低频振荡的稳定分析[J]. 电网技术,2017,41(10):3147-3152.

[7] Xie R C, Kamwa I, Rimorov D, et al. Fundamental Study of Common Mode Small-signal Frequency Oscillations in Power Systems[J]. Electrical Power and Energy Systems,2019,106:201-209.

[8] 岳雷,薛安成,李志强,等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):227-235.

[9] Mo W K, Chen Y P, Chen H Y, et al. Analysis and Measures of Ultra-low-frequency Oscillations in A Large-scale Hydropower Transmission System[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Elec-

tronics,2018,6(3):1077-1085.

[10] Wang G T, Xu Z, Guo X Y, et al. Mechanism Analysis and Suppression Method of Ultra-low-frequency Oscillations Caused by Hydropower Units[J]. Electrical Power and Energy Systems,2018,103:102-114.

[11] Chen L, Lu X M, Min Y, et al. Optimization of Governor Parameters to Prevent Frequency Oscillations in Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(4):4466-4474.

[12] Chen G, Tang F, Shi H B, et al. Optimization Strategy of Hydro-governors for Eliminating Ultralow-frequency Oscillations in Hydro-dominant Power Systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2018,6(3):1086-1094.

[13] 王菲,刘建琴,韩丰,等. 应用直流调制改善水电能源基地交流电网运行特性[J]. 电网技术,2017,41(12):3911-3916.

[14] 刘程卓,王渝红,王彪,等. 基于系统暂态能量函数及直流灵敏度排序的多直流调制协调策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(21):6295-6304.

作者简介:

贺子润(1995),硕士研究生,主要研究方向为主电网频率振荡分析与控制;

陈振(1991),博士,主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用及水电为主电网频率振荡分析与控制。

(收稿日期:2020-04-01)

电力作业现场可穿戴安全保障系统设计与实现

常政威¹, 彭倩¹, 张泰¹, 谢晓娜²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610025)

摘要:高海拔、高寒地区紫外线强烈、缺氧、温差大,电力现场作业人员在此类恶劣环境下的人身安全难以保障,甚至存在生命危险。设计和实现了一种可穿戴安全保障系统,采用智能手表实现人体生理体征检测,以无线可穿戴式网关为环境监测和数据通信中心,集中管理可穿戴设备信息,并与后台服务器进行远程数据交换,实现对作业人员周围环境及自身体征状况的实时监测、健康预警和安全管理等功能。

关键词:可穿戴系统;安全保障;信息处理网关;安全管理软件

中图分类号:TP319 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)03-0043-05

Design and Implementation of Wearable Safety Guarantee System for Electric Power Operation Site

Chang Zhengwei¹, Peng Qian¹, Zhang Tai¹, Xie Xiaona²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025, Sichuan, China)

Abstract:There are strong ultraviolet rays, lack of oxygen and large temperature difference in the areas with high altitude and extremely cold climate. The safety of electric power operators is difficult to be guaranteed and even life-threatening in such a harsh environment. A wearable safety guarantee system is designed and implemented, which uses smart watch to detect the physiological characteristics of human body. The wireless wearable gateway is used as the environment monitoring and data communication center to centrally manage the wearable device information and exchange the remote data with the background server. The system can perform real-time monitoring, health warning and safety management of the working environment and physical signs of operators.

Key words:wearable system; safety guarantee; information processing gateway; safety management software

0 引言

在高海拔、高寒等电力作业现场,由于高度缺氧、紫外线照射和温差变化大等影响,对工作人员安全评价和管理难度加大,迫切需要一种能够在恶劣环境下保障电力作业人员安全的装置,辅助现场人员对复杂环境和自身体征状况及时感知,进行团队沟通和安全管理。

南京邮电大学开展了一种可穿戴式消防交互设备系统设计研究^[1],对消防员灾害状态下的身体机

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(恶劣电力作业环境的可穿戴安全保障技术 2019YFG0131)

能、活动轻度、体温和呼吸率等进行监测。电子科技大学开展了可穿戴技术在企业现场设备维护作业及在心血管远程监护中的应用研究^[2-3]。中国电力科学研究院将可穿戴技术运用到安全帽和电子手表上,结合后台监护系统实现对电力作业人员的安全监护,对人员的不安全行为及时进行警告,发生安全事故时及时开展应急救援^[4]。电网企业现有的电力作业现场通信终端具备音视频录制、4G通信功能,已内置重力传感器、震动模块、GPS定位,但不具备环境数据采集功能;此外,近场通信对讲机和应急单兵终端不可穿戴,功能单一且使用方式落后,难以保障恶劣环境下作业人员的安全。

下面设计和实现了一种基于可穿戴设备和物联

网技术的恶劣电力作业环境安全保障系统,采用能够监测心电的智能手表和监测大气环境的可穿戴通信网关,实现电力现场作业人员健康和环境状况的监测预警、可穿戴设备/可视终端及后台的安全高效通信等功能,以保障工作人员的职业健康安全和安全生产。

1 系统架构设计

考虑到高原等恶劣环境工作现场的情况复杂,现场安全保障需要的功能点众多,设计了一种可扩展的可穿戴安全保障架构,使用无线可穿戴式网关,集中管理个体所有的可穿戴设备信息,并与后台服务器进行数据交换,如图 1 所示。

该系统由可穿戴信息采集设备、信息处理网关、应用系统 3 部分组成。可穿戴信息采集设备采集工作人员心电、脉搏、体温、血氧、血压等生命体征信息,通过 ZIGBEE、蓝牙、WiFi 无线网络传输等方式与信息网关进行信息传输。信息处理网关主要由网络通信、数据处理与集中管理模块构成。数据处理是整个系统架构的核心模块,主要承担数据接入、显示、转换、存储等任务以及内置语音对讲、GPS 定位、环境信息(紫外线强度、气压、温度等)采集和 4G 通信等功能。应用系统提供健康管理、信息援助与协同决策功能。

1.1 信息采集装置

智能手机实施方案如图 2 所示,采用业务分离及模块化的设计思路,将可穿戴智能手表分为手表模组与生理信号采集两部分。在智能手表模组部分,完成智能手表的常用功能,如操作系统、蓝牙传

输、屏驱动、存储等;在生理信号采集部分,完成心电、心率、血氧、体温的采集和数据预处理。两者通过并口进行通信,生理信号采集部分将生理信号采集和预处理完毕后传输给智能手表,在智能手表上通过专业的健康分析算法进行显示。健康信息可通过蓝牙同步至手机和可穿戴网关,用户通过手机或后台进行日常健康管理。

1.2 信息处理网关

信息处理网关是数据汇聚、处理和输出的关键设备。监测信息包括生命体征信息、位置信息与环境信息,它们包含不同具体指标,来源于不同的可穿戴设备。以生命体征信息为例,包含心电、脉搏、体温、血氧、血压等指标。信息处理网关接收处理数据信息后,将结果通过 4G 网络上传至后端服务器,系统将数据可视化后在 Web 端显示其结果。后台管理系统主要负责对现场作业人员设备信息的汇总、分析、管理、存储及反馈,可进行环境监测、健康分析与异常报警。

网关系统硬件结构如图 3 所示,可穿戴安全保障网关主要分为电源、语音对讲及信息处理模块 3 部分。电源模块采用 12 V 锂电池供电,并具有系统供电稳压及充放电管理,它直接供给语音对讲和信息处理模块。语音对讲模块主要完成团队作业时的近场沟通;信息处理模块可分为传感器、网络传输、近场网关与基本信息 4 部分。传感器集成了环境感知模块和 GPS,可定位作业人员地理信息位置,并采集当地的环境情况(温湿度、大气气压、紫外线等);网络传输主要采用 4G 模组,用于本地信息与后台的交互;近场网关采用蓝牙和 WiFi 模组,主要用于集成和扩展可穿戴设备;NFC 作为个体标识,用手

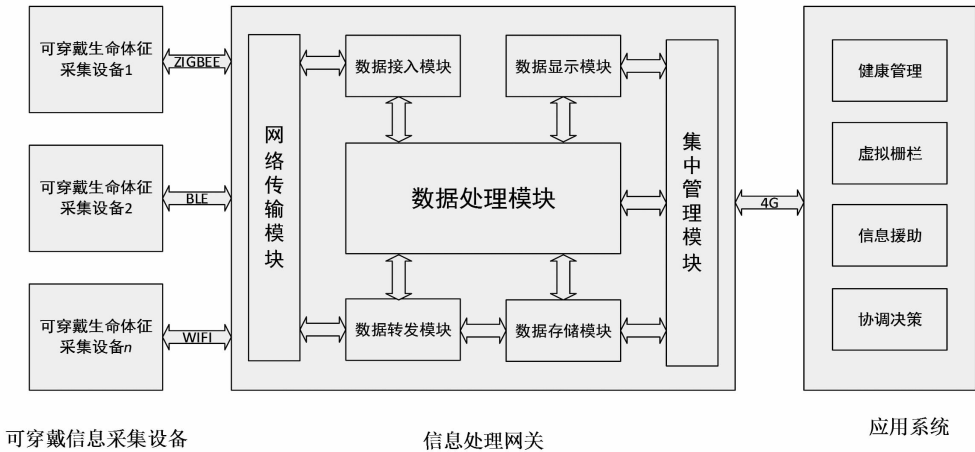


图 1 可穿戴电力作业安全保障系统架构

表扫描后可读取其人员基本信息,存储模组将完成本地的一些历史数据存档。

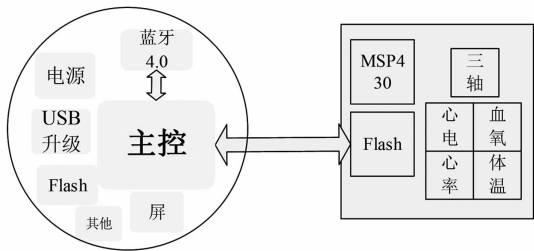


图 2 智能手表实施方案

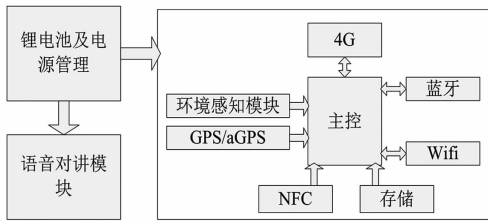


图 3 网关系统硬件结构

2 人员健康状态评价

基于采集的气象环境和人体生理体征信息,如何进行人员健康状态评价是本系统的关键。下面先介绍特征因子提取,然后通过机器学习的方法进行生命状态评价分类,并以疲劳度为例进行人体安全度判别。

2.1 生理体征衡量指标

人体生理信号分为周期性生理信号和非周期性生理信号两类^[5]。人体周期性生理信号有 PPG(脉搏波)、ECG(心电信号)等,可以反映人体疲劳和压力情况;非周期性信号如体温、血压可直接反映人体生命体征状态^[6]。非周期性信号是能够表征生命状态的特征因子,但由于其往往数据量大,需要进行时频分析,预处理得出特征因子。

例如心电数据^[7],时域特征因子选用 HR(心电 R 波数)和 SD(R 波间隔标准差);频域特征因子选用 HF(高频段功率值)、LF(低频段功率值)及 VLF(极低频段功率值)为特征因子。

2.2 生命状态评价分类

系统传感器采集人体的心电、心率、血压等特征参数,通过时频分析、多尺度熵分析等方式预处理提取出特征因子向量,并将其划分为训练样本集和测试样本集,利用机器学习中的多分类支持向量机

(DAG-SVMS)根据训练样本集来确定最优多分类超平面算法。标定模块利用得到的多分类器模型对测试样本集进行处理,完成样本数据的特征分类,其具体步骤如图 4 所示。其中,算法标定模块流程如图 5 所示。

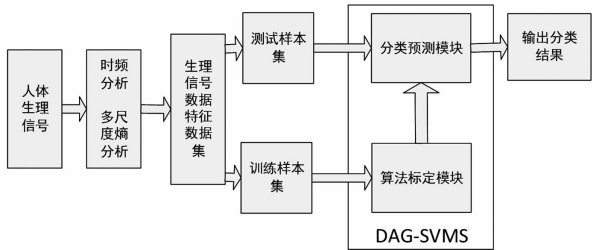


图 4 DAG-SVM 实施思路

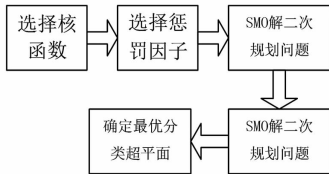


图 5 算法标定模块流程

2.3 人员安全度判别

作业人员安全度判别方法流程如图 6 所示^[7],将人员的疲劳度等级 G_n 分为 5 级,即状态良好、轻度疲劳、疲劳、比较疲劳及非常疲劳,分别对应 G_1 至 G_5 ,取值为 1~5。根据 X 对作业人员疲劳程度进行判别, X 越小,安全度越高,其中 f 的取值在 0 和 1 之间。

如前所述,作业人员心电数据指标包括时域指标和频域指标。基于心电的差异性原理,通过心率变异性等指标进行人员的疲劳度判别。将支持向量机 SVM 与心电数据相结合,其中,SVM 的训练过程为:采集电力工作场景下已作业疲劳和未作业疲劳人员的心电数据,得到数据集;对数据集提取心电数据指标,包括时域指标和频域指标;将提取心电数据指标的输入 SVM 完成训练和标定。

基于智能手表的惯性传感数据采集^[7],运动数据指标包括作业时间 WT、作业程度 WD、状态系数 K、跌倒姿态 P1、坠落姿态 P2。其中,作业时间 WT 为记录的累计持续振动时间,WD 为运动数据的均方差,K 为抬手状态时间的归一化系数。

生理信号很大程度上是精神疲劳,作业姿态统计和应急识别的结果很大可能是体力疲劳,本方法基于自身生理信号与作业姿态融合的方式对作业人员疲劳程度进行判别,对疲劳程度识别更准确。

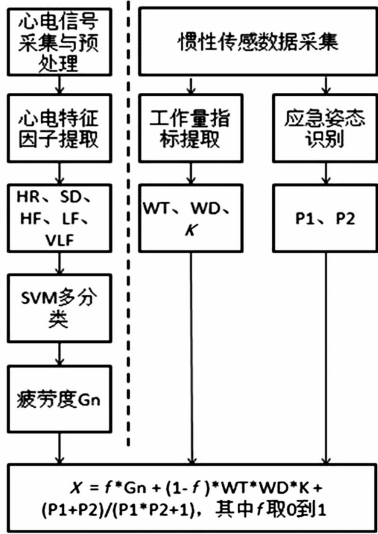


图 6 作业人员安全度判别方法流程

3 安全管理软件系统

采用大数据分析,基于工作人员健康采集数据,结合历史数据和环境参数,实时监测和预测作业人员的健康状态、疲劳度分析及预警,防范人身意外,为人员分工、作业计划时间安排及劳动防护提供辅助决策。基于地理信息和人员定位,可视化显示人员作业点位置、任务协作和人员健康实时状态。将数据存储和处理均放在服务器端,可穿戴手表与网关之间通过蓝牙通信,网关通过 4G 网络及虚拟专用网,接入服务器。

作业人员通过手机终端与个体可穿戴网关相连,可获取环境信息、定位信息、健康信息,同时可连接后台服务器以推送综合信息。普通用户的健康数据信息通过 APP 收集后以加密接口方式与平台进行通信,平台管理员通过管理后台对平台数据进行管理。手机 APP 与可穿戴网关、后台服务器的网络通信架构如图 7 所示。

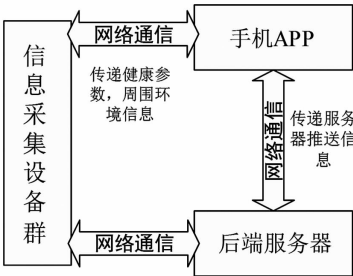


图 7 系统网络通信架构

4 系统实现及应用

可穿戴系统指标参数如表 1 所示。可穿戴智能手表可以实时监测作业人员心电、脉搏、呼吸、心率、体温,并通过无线通讯的方式向可穿戴网关传送信息。可穿戴网关具有语音对讲功能,保障团队协作过程中的通信正常。另外,可穿戴网关内置环境监测系统,能够测量高原温湿度、紫外线、大气气压。后台安全管理软件系统可进行日常人员健康状况的管理,防止恶劣天气出勤、晒伤、高原反应等。

表 1 可穿戴系统实现指标

模块名称	功能/性能指标	技术参数
体温检测	体温精度	≤ ±0.2 ℃
心率检测模块	心电/心率采集 最大振幅误差	≤ ±10%
PPG 模块	PPG peak 捕捉率	99.6%
环境监测	气压采集精度	≤ ±0.25%
环境监测	紫外线指数误差 (量程:0~15)	≤ ±2
安全管理软件	计划管理、健康预警、 统计分析、辅助决策	人员健康度分析、 疲劳预警等

可穿戴设备的使用效果如图 8 所示,网关与可视化终端集成在臂章上,与智能手表无线通信。

使用该系统后,人员生命体征、环境信息、人员历史状况等进行了信息化展现,作业场景安全防护水平大大提高。



图 8 可穿戴设备使用效果

图9 为疲劳度的分析应用界面。

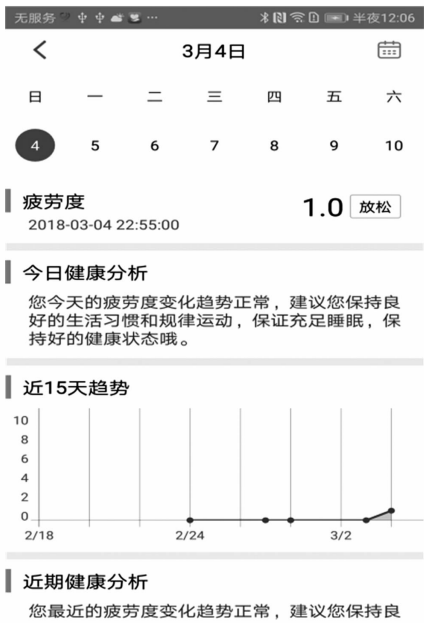


图9 疲劳度分析

5 结 语

研制了恶劣电力作业环境的可穿戴安全保障系统,包括心电健康智能手表和具备近场通信、远程通信和环境监测的可穿戴网关。提出和实现了基于生理特征信号的复杂环境人体健康管理算法,实现健康状态的实时评价和智能预警。

所研制的网关以臂章形式穿戴或手持系统与智能手表结合,可实现环境、生命体征、位置数据、运动数据等信息的实时采集,具有良好的适用性和扩展性,形成一套基于物联网、可穿戴技术的人

身安全和企业安全生产保障软硬件架构。该项目完成后进行产品试制,可应用于藏区电网调试、高海拔地区检修试验、智能变电站等作业现场,替代现场原有的对讲机等单一设备,提高现场安全管控的智能化和有效性。

参考文献

[1] 吴学政. 消防员灾害现场可穿戴式交互设备系统设计研究[J]. 科技通报, 2018, 9(9): 234 - 237.

[2] 侯丽君. 可穿戴远程健康监控系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[3] 相建南, 卢松柏. 移动与可穿戴技术在心血管远程监护的应用[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(增刊1): 1 - 5.

[4] 郭雨松, 于振, 赵炜妹. 基于可穿戴技术的电力作业安全监护平台研究[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(1): 72 - 77.

[5] Liang Qiancheng, Xu Lisheng, Bao Nan, et al. Research on Non - Contact Monitoring System for Human Physiological Signal and Body Movement[J]. Biosensors, 2019, 9(2): 58.

[6] 李天博, 于梦浩, 吕毅, 等. 基于动态多生理参数的人体疲劳检测研究[J]. 信息技术, 2017(11): 121 - 124.

[7] 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都信息工程大学. 一种作业人员安全度判别方法及设备: 中国, 201810128076.0 [P]. 2018 - 02 - 08.

作者简介:

常政威(1981), 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为人工智能;

彭 倩(1983), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力安全管控。

(收稿日期: 2020 - 03 - 17)

为美好生活充电

为美丽中国赋能

电力机器人的自主导航与视觉辅助定位融合方法

谢晓娜¹, 刘 曦², 常政威², 彭 倩², 许 硕¹

(1. 成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610025;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:为了改进电力作业现场复杂环境下机器人定位精度,提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法。在激光传感器即时定位与地图构建的基础上,基于视觉图像处理,对机器人位置进行校准,使其能够准确停靠在任务位置。应用结果表明,所提方法能够有效提高机器人定位精度,定位误差小于1 cm。
关键词:电力机器人;自主导航;视觉定位;校准
中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0048-05

A Vision Assisted Positioning Method with Autonomous Navigation of Electric Robot

Xie Xiaona¹, Liu Xi², Chang Zhengwei², Peng Qian², Xu Shuo¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to improve the localization accuracy of the robot in the complex environment of electric power operation site, a vision assisted positioning method with autonomous navigation is proposed. Based on laser simultaneous localization and mapping, the robot position is calibrated using the robot vision information and image processing algorithm, so that it can accurately stop at the task position. The application results show that the proposed method can effectively improve the positioning accuracy of the robot and the localization error is less than 1 cm.
Key words:electric robot; autonomous navigation; vision location; calibration

0 引 言

中国大力推进“科技兴安”战略,在重点行业领域开展“机械化换人、自动化减人”,大力提高企业安全生产科技保障能力。在电力行业,变电站巡检机器人^[1-2]、地下电缆巡检机器人等移动机器人覆盖了发电、输电、变电、配电、用电等各环节,代替人工巡视、操作,发挥日益重要的安全保障作用。

导航是机器人在工作过程中要解决的最重要问题之一,也是实现机器人智能化和完全自主移动的关键技术^[3]。变电站等场所的电力机器人导航方式,经历了巡线、轨道和全场定位等^[4]。此外,基于视觉的导航方式^[5],是通过摄像机实时采集图像进

行目标点的监控与识别,指导机器人进行移动定位和导航。但仅依靠视觉定位导航是无法满足电力作业现场等复杂环境下的要求,与其他导航方式相融合是一个新的研究方向^[6]。

目前,基于激光传感器即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)的定位和导航方式^[7]是变电站巡检机器人主要采用的技术。SLAM不需要依靠应用场所的辅助物,机器人前进、后退、转弯、掉头环节稳定可靠。但对于电力作业现场复杂环境下,机器人需要准确到达任务位置,并准确巡视预置位图像以识别故障或安全隐患时,仅靠激光 SLAM 全场定位方式,可能导致定位不满足要求,迫切需要研究新的多数据融合机器人导航方式。

基金项目:四川省科技计划应用基础研究项目(基于多数据融合的复杂电力作业环境机器人导航技术研究 2018JY0386)

为了改进变电站、高电压实验室等电力作业现

场的机器人定位精度,提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法,在基于激光 SLAM 的自主导航基础上,对机器人位置和视觉角度进行再次校准,使其能够准确获得预置位图像。在实验室的应用结果表明,所提方法定位精度可达到 1 cm。

1 问题简介

以实验室内配电变压器试验过程中的安全巡检为例,电力机器人可在试验作业过程中,自主导航到达不同的预设位置,实时对典型安全风险、不安全行为进行实时识别和预警提醒,如表 1 所示。

表 1 机器人巡检要点

序号	实验流程	巡检要点
1	设备叉装	须有人员在设备叉装过程中进行监护
2	温升试验阶段	试验设备状态环境监控、禁区入侵检测
3	试验接线拆除	须进行设备放电接地操作
4	设备叉装	须有人员在设备叉装过程中进行监护

在每个巡检步骤中,机器人必须准确导航到已设定的最优位置,才能保证准确拍摄和识别图像。以温升试验阶段巡检为例,如图 1 所示,只有准确定位后并完整拍摄围栏内区域,才能有效开展巡检图像分析,对人员误闯入、设备接线空间位置变化、冒烟等异常及时警示和报告。如果定位不准确,则可能拍摄的视频图像不完整、存在较大偏差,无法正确执行巡检任务。

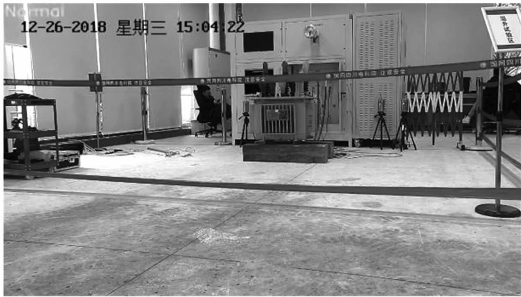


图 1 温升试验阶段巡检监视图像

2 视觉辅助定位方法

2.1 激光 SLAM 导航与视觉辅助定位融合

结合现有的机器人架构,提出一种基于激光

SLAM 导航与视觉辅助定位相结合的方法,整个流程如图 2 所示。

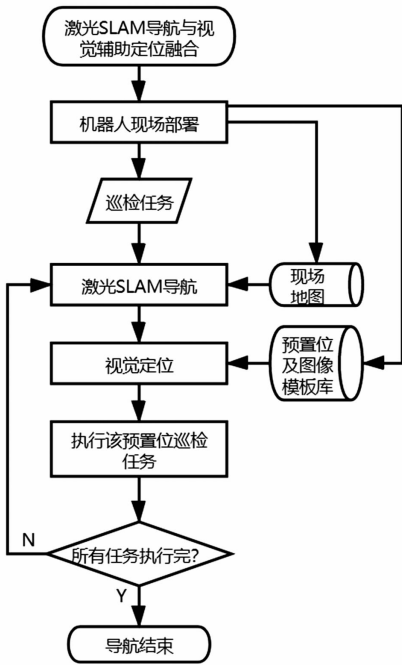


图 2 激光 SLAM 导航与视觉辅助定位

在部署环节,机器人通过激光传感器扫描,采用预建地图的方式,将地图存放于机器人数据库。同时,结合具体巡视任务,将机器人对应的停靠定位、拍摄的标准预置位图像模板保存在数据库中。

在根据接收到的巡检任务自主导航时,机器人根据所采样的信息,通过概率统计方式匹配地图中的位置,计算导航路径。同时,采用电子陀螺仪等辅助传感系统来定位和辅助机器人调控运动姿态,从而达到激光 SLAM 导航的目的。

机器人到达指定位置后,精度可能不满足特定巡视任务的要求,此时视觉定位模块通过对摄像头图像以及查询数据库得到的预置位图像模板进行分析处理,并对应调整机器人位置等,直到精度满足要求为止。

机器人准确定位后,利用可见光摄像机和红外摄像机执行在该预置位的巡检任务。然后,依次导航到其他位置并再次校准,执行每个预置位的巡检任务,直到完成所有的任务才回到充电位置,导航结束。

由此可知,与单一的激光导航方式不同,所提方法在部署环节即建立了预置位对应的图像模板库,作为视觉定位环节的校准图像依据。在巡检过程中,实现激光 SLAM 导航与视觉辅助定位的实时融合。

2.2 基于视觉图像的定位校准

机器人能够准确执行任务的前提是它可以精确导航并停靠在定位处,然而当由于环境的特殊性、机器人的误差等原因而导致无法满足定位要求时,提出采用一种基于视觉图像的定位校准算法,以减少定位误差和改进精度,其主要步骤如图 3 所示。

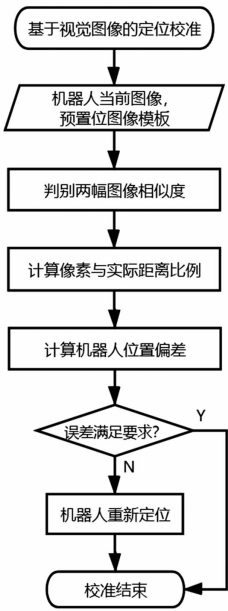


图 3 基于视觉图像的定位校准流程

首先,机器人读取在当前位置采集到的视频图像,提取图像的轮廓定位,并和已保存的该预置位图像模板比对,使用基于哈希 (Hash) 的图像匹配算法^[8]判别两幅图像的相似度。

计算机器人位置偏差的前提,是计算像素与实际距离比例。图 4^[9-10]为摄像机成像模型: (x_c, O_c, y_c) 表示摄像机坐标系;原点 O_c 为摄像机中心的位置;平面 π 为成像平面; m 为摄像目标物体,其映射在 π 上得到点 m' 。显然,可知:

$$p = \frac{x_r}{x} = \frac{y_r}{y} \tag{1}$$

式中, p 为实际坐标与像素坐标的比例关系。

考虑机器人摄像机当前图像和预置位图像模板中,机器人与目标物体的垂直距离基本相同。根据前面计算得到的图像轮廓,计算当前图像中窗体中心的坐标值 (x', y') ,而图像模板窗体中心在其坐标系下的坐标值记为 (x, y) ,计算得到机器人的位置偏差:

$$\Delta d \approx p \cdot (x' - x) \tag{2}$$

根据 Δd 与机器人允许的最大误差值相比,如不满足要求,则机器人据此重新定位。

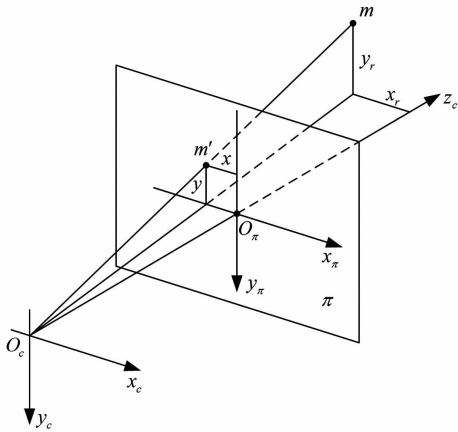


图 4 摄像机成像模型

3 视觉辅助定位方法的应用

3.1 应用环境及测试方法

如图 5 所示,为了验证所提视觉定位方法的精度,在某配电变压器实验室现场进行导航和定位性能测试,图中左下角为工作中的机器人。由于在试验准备及进行过程中,存在叉车搬运、人员进入围栏区域等行为步骤,如机器人的定位和导航精度不高,可能会导致误碰撞或巡视结果不准确等后果。



图 5 实验室应用

机器人基于激光 SLAM 构建的实验室地图如图 6 所示。

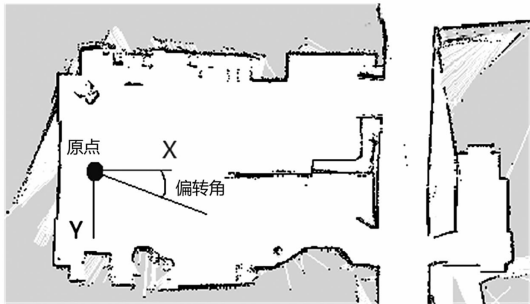


图 6 机器人构建的实验室地图

测试方法为:配置机器人预置点位,通过自主导

航的方式让机器人前往不同的预置点,同时测量机器人定位误差和角度误差。首先在实验室配置了11个点位,如表2所示。然后,基于激光SLAM定位方法对11个点位分别执行5次定位。经测量,最大定位误差在5 cm范围内。

表2 实验室现场配置点位

设定点位	X/m	Y/m	设定点角度/(°)
1	7.073 3	-1.076 0	0.538 582 310
2	11.011 9	-8.041 1	-89.497 624 170
3	19.014 1	-7.048 2	1.635 277 050
4	23.026 2	-16.031 5	-91.878 028 970
5	24.034 1	2.002 9	88.150 097 510
6	16.058 9	12.000 0	-1.406 073 712
7	14.012 5	7.030 5	177.193 021 300
8	7.008 8	15.082 9	178.379 417 100
9	0.078 7	16.011 7	-0.656 613 226
10	6.075 7	1.061 8	3.250 252 404
11	0.001 7	0.005 5	0.757 455 721

3.2 视觉辅助定位精度试验

基于激光SLAM与视觉融合定位,进行第1组定位试验,分别记录定位误差,如表3所示。

表3 第1组定位误差

点位	X 偏差/cm	Y 偏差/cm	角度偏差/(°)
1	-0.31	-0.23	-0.919 795 697
2	-0.06	-0.22	0.203 233 480
3	-0.24	-0.15	-0.078 461 069
4	-0.04	0.32	0
5	-0.19	0.05	-0.080 214 098
6	0.49	0.16	0.249 576 794
7	0.29	-0.04	-0.057 295 782
8	0.12	0.09	0
9	0.01	0.02	0
10	0.15	0.08	0.703 596 593
11	0.38	-0.02	-0.426 701 769

可以看出,最大的X偏差、Y偏差分别约为0.49 cm、0.16 cm,即最大定位误差为0.49 cm;最大角度偏差约为0.92°。

按照该方式进行多组定位测量,第2至第5组结果如表4所示。

表4 第2至第5组定位误差

定位试验	最大定位误差/cm	最大角度偏差/(°)
第2组	0.72	0.93
第3组	0.70	0.88
第4组	0.99	0.93
第5组	0.98	0.72

然后,选定一点进行连续20次定位测量,计算

定位误差和角度误差,如表5所示。可以看出,最大定位误差为第11次的Y偏差0.75 cm。

表5 同一定位点测量

序号	X 偏差/cm	Y 偏差/cm	角度偏差/(°)
1	0.659 367	0.566 3	-0.654 321 358
2	0.457 767	0.515 11	-0.826 212 299
3	0.453 805	0.228 998	-0.562 646 816
4	0.241 489	0.145 343	-0.482 431 889
5	0.238 652	0.201 593	-0.516 809 683
6	0.149 434	0.110 883	-0.849 131 223
7	0.421 691	0.466 65	-0.883 509 673
8	0.418 258	0.512 47	-0.929 347 731
9	0.304 707	0.204 752	-0.631 402 685
10	0.131 552	0.604 71	-0.459 513 383
11	0.132 133	0.752 07	-0.952 266 816
12	0.711 437	-0.120 604	-0.402 217 198
13	0.430 161	0.404 236	-0.654 321 358
14	0.423 72	0.375 249	-0.826 212 299
15	0.258 284	0.617 88	-0.562 646 816
16	0.598 191	0.429 893	-0.482 431 889
17	0.156 899	0.431 813	-0.516 809 683
18	0.172 195	-0.031 797	-0.849 131 223
19	0.431 705	0.202 103	-0.768 915 131
20	-0.085 118	-0.229 06	-0.803 293 408

综上,所提视觉辅助定位方法的定位精度小于±1 cm、角度精度小于±1°。与激光SLAM定位方法相比,定位精度提高了80%。经现场应用,满足了配电变压器检测试验的机器人巡视要求。

4 结 语

针对定位精度要求高的电力作业环境,提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法。在激光SLAM导航基础上,通过机器人实时采集图像与预置位图像模板的比对分析,得到机器人定位误差,从而完成机器人定位校准。实验室应用结果表明,通过SLAM算法与视觉定位方法的融合,能够有效提高机器人定位精度。

下一步的工作,是进一步研究如何结合视觉图像的识别结果,提升电力机器人对动态环境下障碍物的判别能力和导航有效性。

参考文献

[1] 杨旭东,黄玉柱,李继刚,等. 变电站巡检机器人研究

现状综述[J]. 山东电力技术, 2015, 42(1): 30-34.

[2] 唐法庆,刘荣海,耿磊昭,等. 机器人路径规划及目标识别算法在变电站检测机器人中的应用[J]. 云南电力技术,2017,45(5):78-81.

[3] 江渊,刘珍,张慕婕,等. 机器人智能导航技术在变电站的研究与应用[J]. 电工技术, 2019(22): 126-127.

[4] 廖佳威. 变电站巡检机器人定位导航技术研究[D]. 成都:成都理工大学, 2019.

[5] 郑争光,任小洪,程亚军,等. 未知环境下单目视觉移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2018(3): 255-258.

[6] 张书玮. 基于机器视觉和雷达数据融合的变电站巡检机器人自主导航方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.

[7] 薛永胜. 变电站巡检机器人 SLAM 算法及其应用研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2015.

(上接第 11 页)

- 1)随着油膜介质老化程度的加深,油膜介质在冲击电压的反复作用下生成了新的带电粒子,去极化电流的最大值呈现出上升的趋势;
- 2)冲击电压次数的增加导致油膜介质的绝缘状态不断下降,新增的气泡与杂质使得油膜介质的在交流下的起始放电电压降低。

参考文献

[1] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4): 1-9.

[2] 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.

[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.

[4] 叶建铸,管春伟,谢超,等. 高压直流输电工程用电力电容器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 71-75.

[5] 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.

[6] 彭倩,吴广宁,张星海,等. 局部放电对脉冲电容器的绝缘老化及其失效的影响分析[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 489-492.

[7] Krishnan V, Nema R S. A Study on Partial Discharge Degradation of Polypropylene Films[C]. Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1987, IEEE, 2016: 120-125.

[8] 王鹏,吴广宁,罗杨,等. 脉冲电容器绝缘老化和直流

[8] He Z, Wang Q. A Fast and Effective Dichotomy Based Hash Algorithm for Image Matching[C]. Advances in Visual Computing, International Symposium, Isvc, Las Vegas, Nv, Usa, December, Part I, 2008.

[9] 王博达. 基于激光雷达与视觉的监所机器人建图定位算法研发[D]. 成都:电子科技大学, 2019.

[10] 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川阿泰因机器人智能装备有限公司. 一种复杂环境下的视觉定位方法:中国,201910620329.0 [P]. 2019-07-10.

作者简介:

谢晓娜(1978),博士,副教授,主要研究方向为物联网与智能电网;

刘 曦(1982),硕士,高级工程师,主要研究方向为电网设备材料抽检。

(收稿日期:2020-04-09)

局部放电测试系统[J]. 仪器仪表学报,2012,33(6): 1268-1274.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 赵荣普,陈井锐,赵威,等. 基于极化-去极化电流法变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 绝缘材料,2017, 50(12): 78-82.

[12] 田杰,段绍辉,许昊,等. 温度及老化状态对油纸绝缘时域介电响应特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(S1): 69-75.

[13] 吴广宁,宋臻杰,杨飞豹,等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术,2017,43(1):195-202.

[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] 于成龙,叶海福. 高压脉冲电容器的直流局部放电绝缘检测[J]. 高电压技术,2006(6):5-8.

[16] 司马文霞,华杰方,孙魄韬,等. 冲击电压作用下冲击电容器用聚丙烯薄膜累积失效特性[J]. 高电压技术,2018,44(2):358-365.

作者简介:

赵凯林(1996),硕士研究生,研究方向为电力电容器内绝缘与老化。

(收稿日期:2020-03-20)

无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究

李倩竹, 杜永永, 杨 阳
(国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:传统单一人工线路巡视存在劳动强度大、安全风险高、作业效率低等诸多不足,严重制约了输电线路运行维护的智能化转变。无人机智能巡检因其作业高效、缺陷发现率高等优点,不断被应用于输电线路的运行维护。通过研究无人机在输电线路巡检中的应用成果,分析了无人机巡检发展中的各种制约因素,探讨了实现无人机巡检智能化的关键技术,为无人机智能巡检在线路运行维护中的推广与发展提供了研究方向。

关键词:输电线路;无人机智能巡检;制约因素;关键技术

中图分类号:TM726.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)03-0053-04

Application and Research on Intelligent Inspection of Unmanned Aerial Vehicle in Transmission Lines

Li Qianzhu, Du Yongyong, Yang Yang
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The traditional manual inspection of transmission lines has many deficiencies such as high labor intensity, high safety risks and low operating efficiency, which seriously restrict the intelligent transformation of the operation and maintenance for transmission lines. Unmanned aerial vehicle (UAV) inspection has been continuously applied to the operation and maintenance of transmission lines for its high efficiency and high defect discovery rate. The application results of UAV in the transmission line inspection are studied, various constraints in the development of UAV inspection are analyzed, and the key technology to realize the intelligence of UAV inspection is discussed, which provides the research direction of promotion and development in UAV intelligent inspection.

Key words: transmission lines; UAV intelligent inspection; constraints; key technology

0 引言

随着成都电网规模的不断扩大,对线路的运行维护效率和安全水平提出了更高的要求。成都电网所辖约30%的输电线路分布于丘陵、山区地带,巡视环境较为恶劣,给线路的运行维护带来了较大的困难。同时,输电线路的运行维护人员日趋老龄化,难以适应输电线路运行维护日益增长的安全需求,因此寻求新的线路运行维护模式并实现线路运行维护的智能化具有十分重要的意义^[1-8]。

传统人工巡视劳动强度高、作业安全风险大、缺陷识别率和精确率低下且易受天气和地形等的影响,远远不能适应当今泛在电力物联网建设的需求。

无人机智能巡检通过搭载物联网装置(包括激光雷达、摄像机、红外测温仪等)实现了对输电线路运行状态数据的高效收集,对缺陷的精准识别,有效地提高了线路的安全运行水平。相比传统人工巡视,无人机智能巡检效率提高了2.5倍,一定程度上缓解了线路运行维护人员不足的困境。随着无人机新技术的不断发展,无人机智能巡检将逐步替代人工巡视成为线路运行维护的主要手段。

下面首先简述了无人机在输电运行检修中的应用成果,然后分析了无人机智能巡检发展中的各种制约因素,探讨了实现无人机巡检智能化的关键技术,为无人机巡检在线路运行维护中的深化使用提供参考。

1 无人机在输电线路巡检中的应用

1.1 杆塔本体的精细化巡检

通过无人机搭载高清摄像头,对杆塔绝缘子串、连接金具、保护金具等重要部件进行拍照,以第一视角完成对杆塔本体的精细化巡检。杆塔精细化巡检主要包括人工纯手动飞巡和无人机自主巡检两种方式。人工纯手动飞巡效率比较低,具有一定安全风险,且对无人机巡检作业人员(以下简称飞手)的飞行技能要求比较高,很难做到图像拍摄的标准化、统一化。因此,纯手动飞巡目前正逐渐被自主巡检所替代^[9]。



图1 无人机自主精细化巡检

无人机自主巡检按照不同的技术路线分为人工示教航线规划和激光三维建模航线规划两种。人工示教为通过手动飞行记录航拍点,再通过深度学习算法优化拍照位置,形成平滑连接的飞行航线。激光三维建模航线规划通过对输电线路进行激光点云三维建模,规划最精准、高效的巡检路径,自主完成杆塔巡检。

在输电线路的航迹规划中,人工示教对飞手的技能要求更高,而激光三维建模的数据处理较为复杂。但是采用激光三维建模的方法,得到的线路信息更全面,且可进行不同拍照点和拍摄角度的调整以及航点的优化重组。两种方法的优劣对比如表1所示。

表1 人工示教与激光三维建模航线规划的对比

航迹规划手段	飞手水平	数据处理	设备成本	航线编辑
人工示教	高	简单	较低	否
激光三维建模	低	复杂	较高	是

目前,人工示教和激光三维建模航线规划得到的应用都比较多,总体经济成本也相差不大,可以根据自身具备的条件及实际需求来选择合适的航迹规划方案。但从长远看来,激光三维建模航线规划的数据优势会越来越突出。

1.2 通道树障测距

目前,输电线路通道树障测距可采用激光扫描和可见光两种方法。

激光扫描树障测距是通过无人机搭载激光雷达对线路通道进行三维建模,并对电力导线和植被进行不同颜色的渲染,明确导线和线下树木的绝对坐标,从而获取线路和树木之间的精确距离。

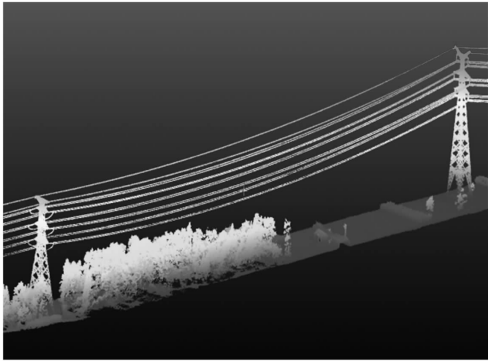


图2 输电线路通道激光三维建模

可见光树障测距是采用RTK技术采集杆塔坐标,在保证地面分辨率和飞行安全的情况下,自主规划巡检航线对线路通道进行正射拍摄,通过空三加密解算等实现导线和地面植被相对位置的计算。

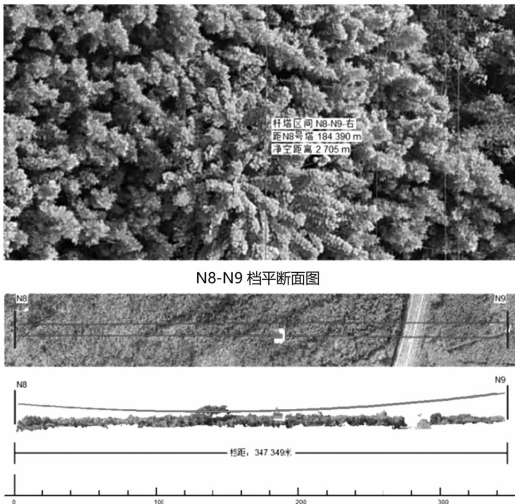


图3 输电线路可见光树障测距

目前,激光树障测距测量精度高,高程误差仅为±10 cm,且后续数据处理速度快,但经济成本较高,在经济欠发达的地区推广较难。可见光树障测距成本低廉,但数据处理耗时多,且测量精度较低,不利

于树障隐患的及时发现和管控。两种方法的对比情况如表 2 所示。

表 2 激光与可见光树障测距的对比

测距方法	设备成本	测试精度	人工操作	数据处理
激光	高	高	复杂	耗时短
可见光	低	低	简单	耗时长

随着无人机技术的不断发展和市场的推广,激光树障测距的优势会越来越突出,将得到电力公司等越来越多的青睐。

1.3 输电线路应急抢险

采用无人机新技术,能够及时深入一线灾害现场,为快速抢险提供第一手资料,提高线路应急抢险的效率。如某供电公司 110 kV 线路杆塔所在区域发生山体滑坡,人员无法到达现场,使用无人机现场飞巡及时发现了杆塔基础边缘 5 m 处,有一条长几十米、深 6 ~ 7 m 左右的壕沟,如图 4 所示。这为抢险方案的制定提供了有力的数据支撑。



图 4 110 kV 某线路区域发生山体滑坡

此外,采用无人机搭载照明等装置可为线路抢修提供应急照明。如无人机对 220 kV 某线夜间更换架空地线进行持续 3 h 的抢修照明,如图 5 所示,有效地保证了施工的安全进行。



图 5 220 kV 某线路夜间更换架空地线

随着无人机技术的不断发展与日趋成熟,其应用将越来越广泛,无人机智能巡检模式将逐步取代传统的人工运检模式。

2 无人机巡检发展中的制约因素

1) 飞巡空域限制条件多

一是空域管制严格,申请流程复杂且周期长;二是空域管制机构多且多重管制区域划分不明确;三是部分适航区军事活动频繁;四是空域管制机构人员少且通讯占线率高。应优化空域申请的管理流程,提高飞巡空域的申请效率。

2) 无人机续航能力低

目前,纯电动无人机续航时间一般在 30 min 左右,不能满足连续大档距的输电线路巡检作业要求。对于油电混合的无人机,续航能力可达到 2 h 左右,但由于油电混合无人机体积较大,不方便单人作业且有发生爆炸的危险,故目前的推广使用受到较大的约束。

3) 无人机图传距离短

现市场上比较成熟的大疆系列无人机图像传输距离理想状态下一一般在 3 ~ 7 km,但在城区及近郊等地方,由于受到信号干扰以及建筑物的影响,只能保持 2 km 左右的图像传输。对于无人机杆塔巡检,当线下树木植被较高时,将进一步影响图像传输效果,导致图像传输距离不到 1 km,严重制约了无人机巡检的质量。

4) 自主巡检 RTK 通讯链路信号差

无人机杆塔精细化自主巡检需要较强的 RTK 网络信号,但由于输电线路所处地区比较偏远,网络信号一般比较弱,很难满足自主巡检的要求,严重阻碍了无人机自主巡检的进程。

5) 手动无人机电力巡检效果欠佳

电力巡检因其具有高电压的风险,需要专业的电力培训和无人机飞巡实践才可实现输电线路通道和杆塔本体的精准飞巡,采集到满足生产需求的图像数据。但由于受到输电线路运维人员年龄结构偏大、学习新技术能力较差等的制约,目前输电线路的人工飞巡技能一直处于较低的行业水平。

6) 数据存储容量严重不足

通过统计某电力公司一运维班组 3 个小组 6 名运维人员年度杆塔精细化巡检和通道巡视的影像数据量大小发现,每个班组需要存储的数据达到 84 TB(其中通道巡视视频所需容量为 2 GB/档 × 40 档/(组 × 天) × 3 组 × 20 天/月 × 12 月 ≈ 60 TB,杆

塔精细化巡检照片大小为 0.2 GB/基 × 1100 基 ≈ 0.2 TB, 年度 A、B 类树竹隐患通道扫描数据量为 180 档 × 5 GB/(次 × 档) × 2 次/月 × 12 月 ≈ 24 TB)。同时,为了保证数据的安全可靠以及后续的数据挖掘,对部分数据需要备份操作,故目前数据的存储容量基本不能支撑无人机巡检大规模的发展。可考虑配置大容量分布式阵列存储器解决以上问题。

7) 人工缺陷隐患判别工作量大

按照国网运行维护管理规定,对上述班组采集的图片数量估计,年度精细化巡检图片数据量为 1100 基 × 30 张/基 ≈ 3.3 万张,通道巡视视频为 60 TB。同时,通道 A、B 类树障测距数据处理时间需约 360 h (180 档 × 1 h/档 × 12 = 2160 h),给人工缺陷隐患的判别带来巨大的工作量。

3 无人机智能巡检的未来发展关键技术

随着泛在物联网建设的不断推进,无人机在输电线路巡检中的应用将得到越来越多的重视。无人机巡检将逐渐替代单一传统人工巡视,解放人员劳动力,降低线路运行维护成本,实现线路本体运行状态的精准把控,提高线路抗风险水平^[10-12]。

无人机巡检提高了线路运行维护的效率,但仍存在续航能力不足、图像缺陷识别差异性大等明显不足,未来将主要从以下几方面实现输电线路运行维护的自主化、智能化。

3.1 “巢-巢”巡检新模式

对于线路距离较短、供电密度较大的区域,选择有条件的变电站部署无人机机巢(如图 6 所示)。结合激光导航、视觉识别、RTK 精确定位等技术,实现无人机巡检过程中的精准降落、自主更换电池、快速充放电等操作。通过远程指令实现“巢-巢”之间的接力续航和无人机的自主巡检,从而解决了无人机续航能力低的问题,并保证了重要负荷地区输电线路的高可靠性运行维护。

对于分布比较偏远、距离较长的线路,部署无人机机巢将需要巨大的经济成本和维护费用,故主要采用人工操控无人机配置移动充电车辆(如图 7 所示)进行杆塔本体精细化巡检,并结合固定翼无人机进行远距离通道巡视。

3.2 “5G+”通信实现低延迟自主巡检

目前,无人机自主巡检主要依赖于 4G 网络信



图 6 无人机机巢

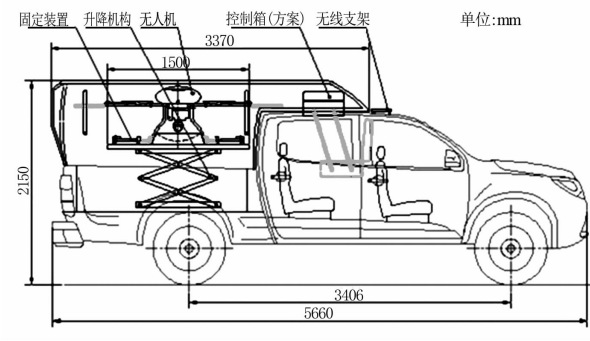


图 7 移动充电车辆

号,控制信号存在 200 ms 左右的延迟,不利于无人机的精准悬停和对杆塔本体部件位置的精准拍摄,同时易造成无人机在飞行中出现碰撞等事故。因此利用 5G 通信技术低延迟、高效的优势,将更加有利于无人机自主巡检影像数据的精准采集以及巡检过程的安全可靠,解决了自主巡检中 RTK 通讯链路信号差的问题。

3.3 超短波远程高清图传技术

为了保证无人机巡检图像传输的效率,无人机通常采用压缩算法对图像进行压缩,因此无法保证图像的清晰度。同时,目前无人机的图传距离尚不能满足远距离自主巡检的需求,且容易受到周围无线电信号的干扰,故选择合适的图像传输技术对于缺陷的及时发现具有十分重要的意义。超短波通信因其传输性能好、频带较宽等优点,目前正逐渐应用于无人机的远距离高清图传。

3.4 图像缺陷的全过程实时智能识别

大量的机巡作业使得采集到的线路影像数据呈几何级增长,给人眼对图像缺陷的识别带来巨大的工作量,很难保证缺陷的精准识别和缺陷识别的实时性。在条件合适的变电站、供电所、机巢等部署边缘计算处理器,将传输至此的机巡作业

(下转第 63 页)

主动式配电网铁磁谐振消谐方法研究

朱子民¹, 秦艳辉^{1,2}, 朱咏明³, 段青熙¹, 亢朋朋⁴, 刘 勇⁵, 董雪涛¹, 樊国旗⁶
(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;
4. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
5. 安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥 230000;
6. 国网浙江省电力公司金华供电公司, 浙江 金华 321001)

摘 要:针对当前中性点不接地中低压配电网中频发的铁磁谐振这一典型故障,首先,研究分析了其谐振现象的产生机理与抑制方法,并在此基础上提出了一种基于非故障相电压幅值实时跟踪、调节 PT 开口三角形阻尼电阻的主动式谐振消弭方法;进而,基于电力系统全数字实时仿真平台 ADPSS/ETSDAC,结合某 35 kV 变电站实际参数,搭建了铁磁谐振故障的仿真模型进行分析;最后,仿真验证了所提出的谐振消弭方法的可行性与正确性。
关键词:中性点不接地配网;铁磁谐振;主动式消谐措施;ADPSS
中图分类号:TM864 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0057-07

Research on Ferro – resonance Harmonic Elimination Method for Active Distribution Network

Zhu Zimin¹, Qin Yanhui^{1,2}, Zhu Yongming³, Duan Qingxi¹,
Kang Pengpeng⁴, Liu Yong⁵, Dong Xuetao¹, Fan Guoqi⁶
(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
3. State Grid Xinjiang Changji Electric Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China;
4. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China;
5. Anhui Zhengguang Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China;
6. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China)

Abstract: The ferro – resonance is a typical fault occurring frequently in the medium and low voltage neutral ungrounded distribution network, its triggering mechanism and inhibition method are analyzed, and a novel active resonance inhibition method based on real – time sound phase voltage magnitude tracking and open – delta resistance regulation is proposed. Furthermore, based on a full digital real – time simulation platform of power system called ADPSS/ETSDAC, according to actual parameters of a 35 kV substation, a simulation model of ferro – resonance in a distribution network is established. Feasibility and validity of the proposed resonance inhibition method are verified by the simulation results.
Key words: neutral ungrounded distribution network; ferro – resonance; active resonance inhibition method; ADPSS

0 引 言

作为系统保护与测量的关键设备,中性点非直
基金项目:国家电网公司科技项目(NY7-17-008)

接接地配电网中电磁式电压互感器(potential transform, PT)设备的非线性励磁电感在某些切换操作或接地故障消失后,可能与线路对地电容形成谐振回路,频繁地在系统中激发起可自维持的铁磁谐振过电压现象,造成 PT 高压绕组过电流,严重威胁电

网设备绝缘乃至系统的安全稳定运行。

针对该问题,国内外专家学者从不同角度展开探讨,并据此制定了多种消谐措施^[1-5]。文献[6]用谐波平衡法和描述函数法进行单相铁磁电路1/3次分频谐振计算和分析,讨论了存在1/3次分频谐振的条件及平衡状态的稳定性问题。文献[7]通过周期、准周期和混沌分析方法,给出了电力系统典型铁磁谐振电路非线性方程的解。文献[8]将铁磁谐振电路视为非线性动力学系统,提出一种分类分析方案,为铁磁谐振故障的辨识和治理提供了新的思路。消谐措施方面,主要可分为两类^[9-11]:1)藉由改变系统阻抗频率特性,以期达到远离铁磁谐振激发条件之目的,从而限制谐振发生的可能性^[12];2)消耗谐振的能量,通过阻尼抑制或消除谐振的发生^[13],较之改变系统参数配置,此类措施更便于工程实践应用。然而,以PT开口三角形处串接阻尼电阻为代表的常见消谐措施仍存在故障辨识困难、投入阻尼电阻阻值不当可能引发设备过载风险等诸多问题^[14],亟需一种能够可靠消弭铁磁谐振故障的新方法。

在针对铁磁谐振故障机理深入剖析的基础上,提出一种基于实时跟踪调节开口三角形处消谐电阻阻值的主动式谐振消弭方法,通过不同故障条件下消谐电阻的跟踪调节,以达到主动消弭铁磁谐振、避免PT过载之功效;进而,基于ADPSS/ETSDAC软件平台,搭建某35 kV变电站铁磁谐振仿真模型,就铁磁谐振故障机理分析和主动式谐振消弭方法的正确性进行分析验证。

1 铁磁谐振故障机理

受PT铁芯磁滞特性影响,铁磁谐振故障具有显著的非线性特征。以单相接地故障下的基波铁磁谐振情况为例进行分析,以有效值形式绘制出了故障条件下PT与系统对地电容串联谐振电路中 L_m 和 C_0 的伏-安曲线 U_L 、 U_C ,如图1所示。

铁芯饱和前, U_L 与 i 呈现近乎线性关系;铁芯受外部因素影响进入饱和后,在 L_m 值快速下降的过程中,两条伏安特性曲线发生相交,并在交点 i_n (即谐振工作点)后交换上下位置;交点 i_n 以前回路电流呈感性,此时 $U_L = E + U_C$,与 E 同相;交点 i_n 后回路电流呈容性, $U_L = U_C - E$,且与 E 反相,呈“反倾”状态。

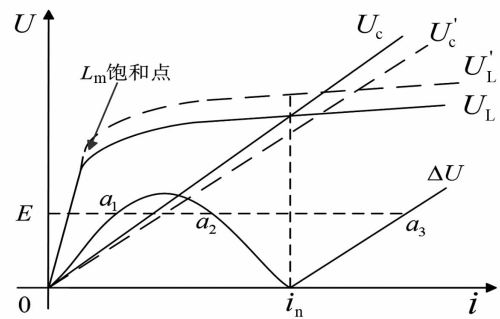


图1 单相接地故障下的基波铁磁谐振分析

令:

$$\Delta U = |U_L - U_C| \tag{1}$$

则图1中满足 $E = \Delta U$ 的3个交点 a_1 、 a_2 、 a_3 中仅 a_1 和 a_3 是稳定的。 a_1 为非谐振工作点;位于工作点 a_3 时,铁芯严重饱和。此时PT绕组电流、压降幅值骤升,产生谐振过电压现象,且有:

$$\omega L_m > 1/\omega C_0 \tag{2}$$

满足上述条件时, U_L 和 U_C 可能在外部多种诱因激励下相交并产生谐振现象。谐振产生后,回路中 L_m 因非线性特性存在,可等效成为“谐波电源”,在与 C_0 间反复的交换能量过程中使得谐振过电压现象呈现自维持性;由于回路没有固定的自振频率,因而除基频谐振外,也可能产生3次、5次等高次谐波或1/2次、1/3次等分次谐波的铁磁谐振现象。

2 主动式铁磁谐振抑制方法

针对当前铁磁谐振“被动式保护”存在的问题,提出一种基于调节开口三角形处阻尼电阻的“主动式”铁磁谐振抑制方法,流程如图2所示。

1)无故障条件下,于PT开口三角形处投入一小电阻,改变 X_{C_0}/X_{L_m} 比值,消弭单相对地短路故障等因素诱发PT铁磁谐振现象的可能性。

2)单相对地短路等相间电压不平衡故障条件下,通过实时监测PT一次侧三相母线电压,跟踪调节投入的电阻大小,避免可能发生的PT绕组过载问题。

PT开口三角形处将随故障条件下系统三相电压的不平衡度加剧而感应出较高幅值的工频电压 U_Δ ,依据实际运行经验,中性点漂移电压值通常不超过15 V^[15]。故此,以 $U_\Delta = 15$ V作为消谐电阻 R_Δ 调节的动作判据,当 $U_\Delta \leq 15$ V时,对应最大相的相电压为

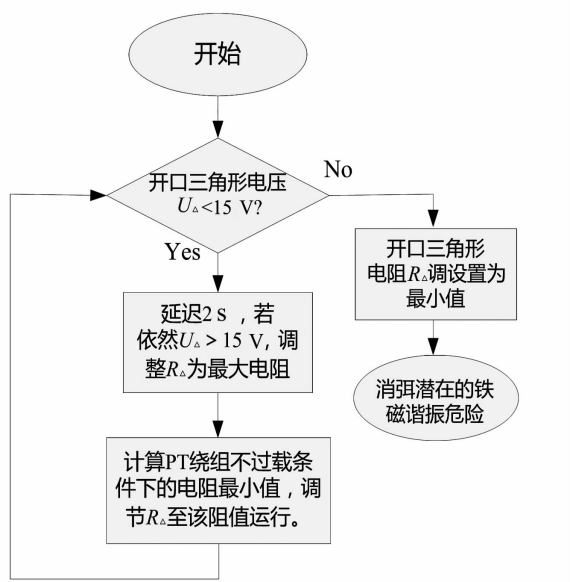


图 2 主动式铁磁谐振抑制方法流程

$$U_{\max} = \frac{1}{3}(U_{\Delta} + 100) \tag{3}$$

则正常运行时投入的 R_{Δ} 最小值为

$$R_{\Delta} = \frac{(U_{\Delta} + 100)U_{\Delta}}{3KS_{\Delta}} \tag{4}$$

式中: K 为 PT 设计制造时的额定过电压倍数; S_{Δ} 为 PT 开口三角形单相绕组的额定功率。

针对不同故障条件影响,则以故障时正常相电压幅值作为考量标准进行分析,对应 R_{Δ} 阻值计算方法如下:

1) 单相接地条件下阻值调整

以 A 相发生瞬时性接地故障为例,当电压相角 $\theta \neq 60^{\circ}$ 时,系统电压相位如图 3 所示。 U_{am} 、 U_{bm} 、 U_{cm} 为开口三角三相的相电压; U_a 、 U_b 、 U_c 为故障发生时开口三角形处对地相电压;此时中性点对地电压 $U_0 = U_{\Delta}/3$; U_0 为零序电压。故障发生后,B 相的对地电压 U_b 最大,相应视在功率最大;若能保

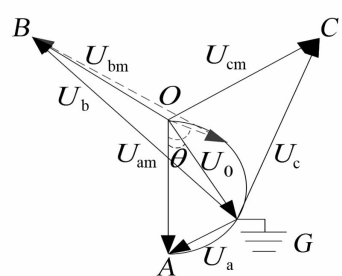


图 3 线路 A 相瞬时性接地, $\theta \neq 60^{\circ}$

证此时 B 相绕组不过载,则 PT 不会发生过载问题。在 $\triangle OAG$ 中:

$$\theta = \arccos\left(\frac{U_{\Delta}}{100}\right) \tag{5}$$

OB 和 OG 为已知,若 $\theta > 60^{\circ}$,则 OB 与 OG 的夹角为 $120^{\circ} + \theta$;若 $\theta < 60^{\circ}$,则 B 与 OG 的夹角为 $240^{\circ} - \theta$ 。BG 的长度 U_b 均可通过式(6)计算得到。

$$U_b = \frac{1}{3} \sqrt{U_{\Delta}^2 + 10000 - 200U_{\Delta}\cos(\theta + 120^{\circ})} \tag{6}$$

当 $\theta = 60^{\circ}$ 时,则电压相位如图 4 所示。由式(3)可得此时 $U_b = 50\text{ V}$,开口三角处电流为

$$i_{\Delta} = U_{\Delta}/R_{\Delta} \tag{7}$$

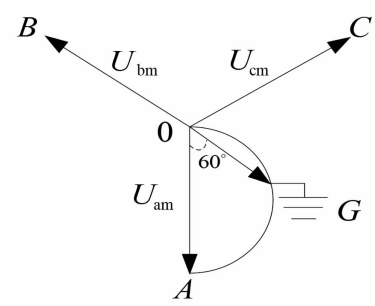


图 4 线路 A 相瞬时性接地, $\theta = 60^{\circ}$

U_m 为三相 U_{Δ} 中最大相电压,则 A 相单相接地时,正常相 B 相电压最大值 $U_m = U_b$,并有:

$$U_m \cdot I_{\Delta} = K \cdot S_{\Delta} \tag{8}$$

$$R_{\Delta} = \frac{U_m \cdot U_{\Delta}}{K \cdot S_{\Delta}} \tag{9}$$

设 $U_{\max}$ 为 PT 二次电压最大相的相电压,则有

$$U_{\max} = \sqrt{3}U_m \tag{10}$$

将其带入式(9),可得:

$$R_{\Delta} = \frac{U_{\max}U_{\Delta}}{\sqrt{3}KS_{\Delta}} \tag{11}$$

进一步,有

$$R_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{3KS_{\Delta}} \sqrt{U_{\Delta}^2 + 10000 - 200U_{\Delta}\cos(\theta + 120^{\circ})} \tag{12}$$

可计算得到 $U_{\Delta} = 100\text{ V}$ 时的电阻 R_{100} 为

$$R_{100} = \frac{10000}{\sqrt{3}KS_{\Delta}} \tag{13}$$

对于 B、C 相单相接地可以类推。

2) 相间短路情况下 R_{Δ} 的跟踪调整

考虑常见的相间短路均能够被继保装置于 700 ms 内快速切除,故此时投入任意阻值的 R_{Δ} 均不会引发 PT 过载问题。而考虑系统中可能发生的最为恶劣的故障,即两相异地且经由大电阻接地故障时,此类故障因短路电流较小、继保装置无法快速切除,将在

产生后持续很长一段时间,且其特点为两相电压降低、一相电压不变,此时则令 R_{Δ} 按照最大相电压幅值进行调节。

3 铁磁谐振仿真建模

3.1 仿真模型

为进一步验证所提主动式谐振抑制方法的正确性,采用某 35 kV 变电站的实际参数,基于 ADPSS/ETSDAC 软件平台搭建了含电磁式电压互感器的中性点不接地配电网铁磁谐振仿真模型,如图 5 所示。仿真模型中包含两段母线 I、II, PT 接入点位于 I 母处;变压器均采用 Y/ Δ 连接方式,二者铭牌参数相同;母线、变压器及负荷间采用三相 π 型集中参数线路连接。变压器与线路具体参数如表 1、表 2 所示。

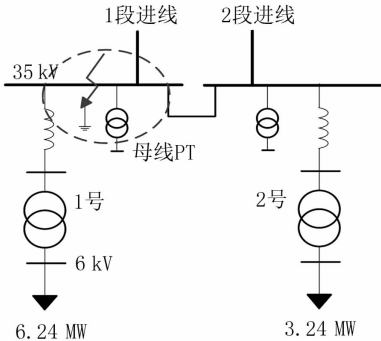


图 5 35 kV 配电网系统铁磁谐振仿真模型接线

模型中采用 JDZX2 - 35CQ 型电磁式电压互感器,由 3 台理想单相双绕组变压器连接而成,如图 6

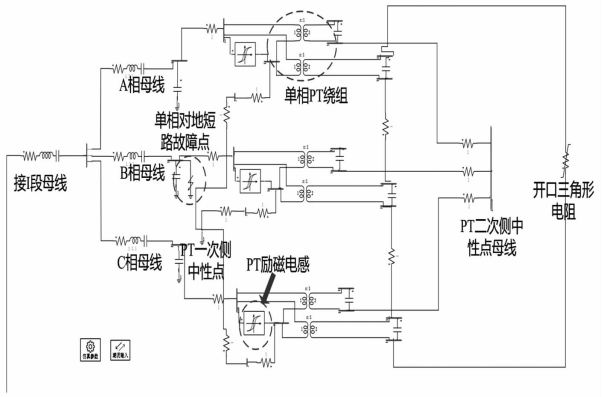


图 6 PT 绕组接线方式

所示。PT 各绕组非线性励磁电感由具有磁滞特性的变压器 L - 96 型励磁支路模块模拟,绕组励磁电流 - 磁链特性如表 3 所示。

3.2 铁磁谐振故障的产生与抑制

针对系统中较为常见、危害严重的分频谐振和基频谐振现象进行仿真分析,在搭建的仿真模型基

表 1 仿真模型线路参数

正序电阻 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	正序电感 $/\text{m}(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1/2 正序电容 $/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
0.27	0.933 7	12.74×10^{-9}
零序电阻 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	零序电感 $/\text{m}(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1/2 零序电容 $/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
0.81	4.126 4	7.751×10^{-9}

表 2 仿真模型变压器参数

额定容量/MW	短路损耗/kW	空载损耗/kW
20	392.775	89.165
短路电压百分比/%		空载电流百分比/%
8		0.11

表 2 PT 绕组励磁电流 - 磁链特性

编号	励磁电流/mA	磁链/Wb
1	0.283	18.34
2	0.655	36.50
3	0.977	55.90
4	1.337	74.85
5	1.650	92.04
6	1.998	115.46
7	3.899	139.62
8	8.445	169.43
9	14.020	173.45

础上,设 PT 母线 B 相发生单相金属性接地故障,故障起始时间为 0.065 s,持续 0.263 s 后故障切除。通过调整线路参数,可获得相应谐振故障条件下母线电压、PT 绕组电流仿真波形如图 7 所示。

分析可知:1)单相接地故障发生前,系统三相电压及 PT 绕组流过的励磁电流均呈现三相对称状态,母线线电压经折算后为 0.985 9 pu 左右,励磁电流为 1.2×10^{-5} pu;2)故障发生与持续过程中,B 相电压、对应 PT 绕组励磁电流均降至 0 左右,正常相电压、对应 PT 绕组励磁电流升高 $\sqrt{3}$ 倍;3)故障成功切除后,线路与 PT 励磁电感间发生可自维持的铁磁谐振现象,分频谐振与基频谐振条件下三相母线电压均升高至 1.910 6 pu 左右,过电压倍数为 1.937 9。

此时流过 PT 绕组的电流大幅增加,且分频谐振过电流现象更为显著,可达额定值的 12.58 倍,危害远大于基频谐振的 3.3 倍过电流。高幅值的持续过电流易烧断 PT 的高压熔丝,或将使得 PT 绕组严重过载乃至发生爆炸,因此分频谐振危害性远大于

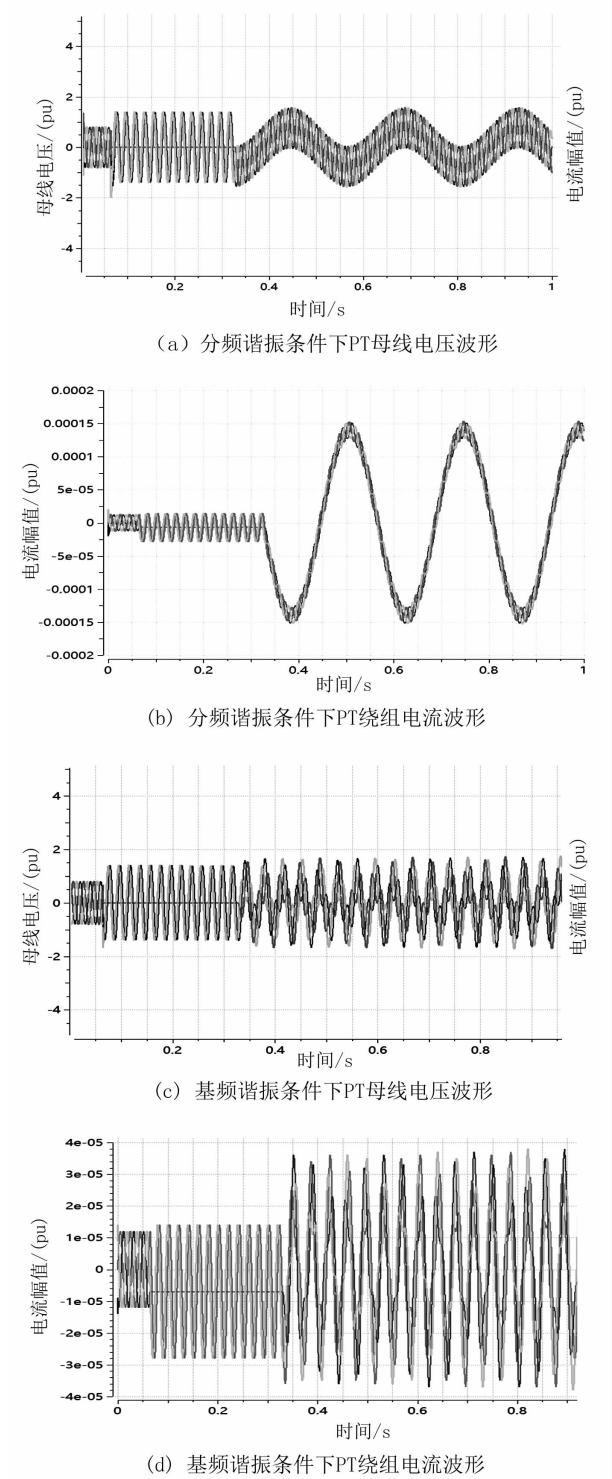


图7 35 kV 系统铁磁谐振仿真波形

其他类型的铁磁谐振故障。

基于以上分析结果,结合前述 PT 开口三角形串接小电阻的消谐方式,针对分频谐振条件下的故障抑制措施展开进一步的仿真分析,可获得谐振故障发生后 1.5 s 投入 3 Ω 固定阻值的消谐电阻时仿真波形,如图 8 所示。

可见,通过故障发生后开口三角形串接小电阻

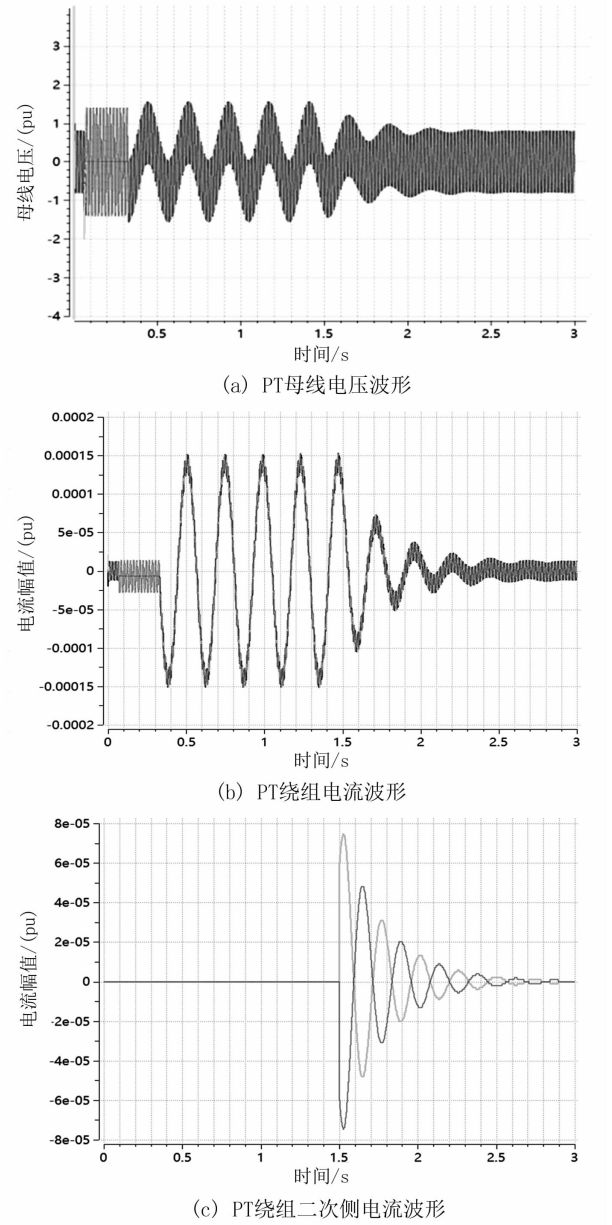


图8 分频谐振条件下的故障抑制仿真波形

的方式,能够在 1.0 s 内快速释放谐振能量,对铁磁谐振过电压、过电流现象起到有效抑制作用;但与此同时,消谐电阻的投入将使得 PT 绕组二次侧电流骤升,若单相接地故障不能及时切除,投入的消谐电阻仍将引起 PT 设备的过载,且接地故障持续期间消谐电阻的反复投切可能引发新的谐振现象。

3.3 基于主动式消谐方法的谐振抑制

进而,采用所提主动式消谐方法,以单相可控电阻元件代替开口三角形处固定阻值的电阻元件,阻值依据式(13)进行调整,可仿真得到单相接地故障及时切除与单相金属性永久接地故障期间的系统仿真波形,分别如图 9、图 10 所示。

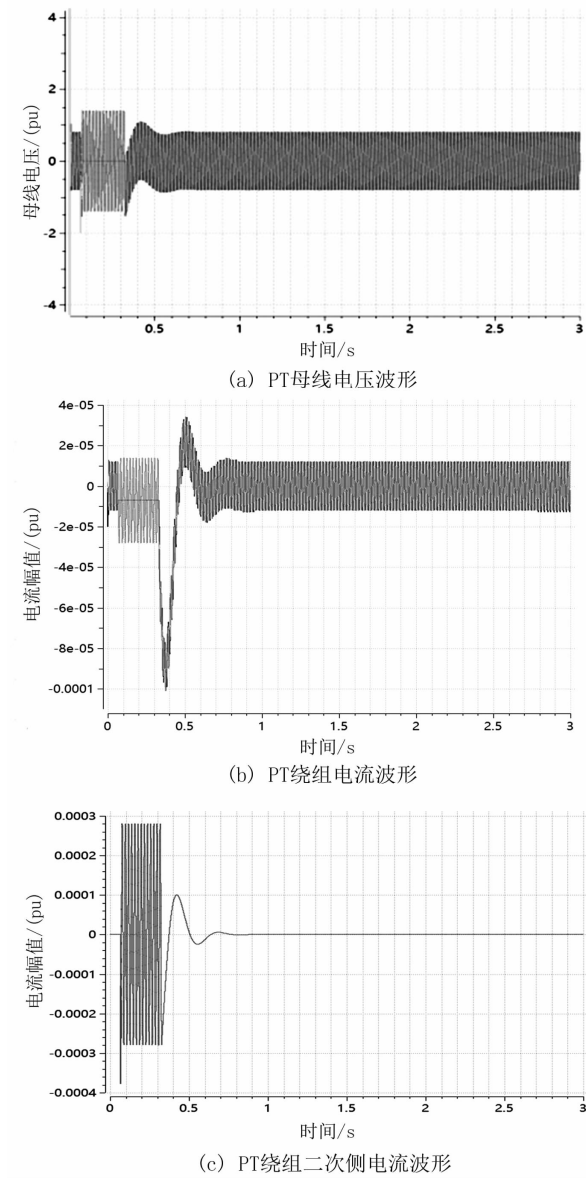


图9 单相瞬时性故障条件下的仿真波形

分析可知:1)单相故障能够及时切除时,通过开口三角形处串接的小电阻快速泄放线路与PT绕组间的能量,能够使得系统三相电压、PT绕组电流于0.5个周波内均恢复至正常状态,消弭了系统可能产生的铁磁谐振现象;2)中性点不接地系统要求单相金属性接地故障持续期间仍可在2 h内正常供电,故障发生2 s内开口三角形电阻尚未调整,PT二次侧电流增大至 9.3×10^{-5} pu;此后随着阻尼电阻的跟踪调整,PT二次侧电流快速下降至 1.0×10^{-6} pu。

进一步,对比图7、图8可知,通过对PT开口三角形处阻尼电阻的跟踪调节,有效避免了单相永久性金属接地故障持续期间PT绕组的过载现象,同时确保了系统中铁磁谐振故障、谐振过电压现象不会发生,消弭了铁磁谐振问题发生的风险。

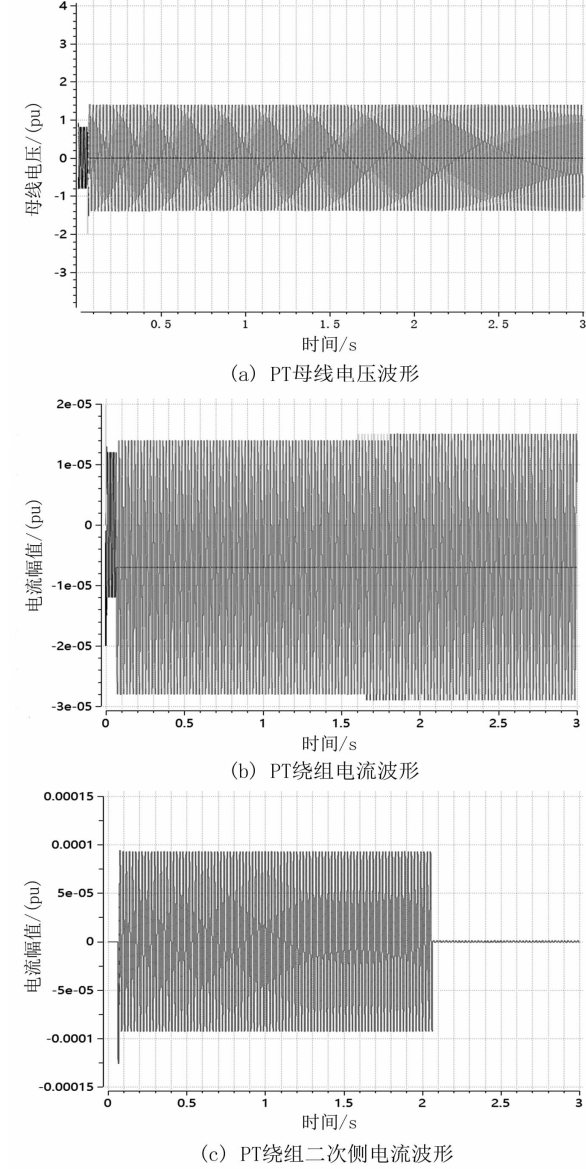


图10 单相永久性接地故障条件下的仿真波形

4 结 语

针对铁磁谐振这一配电网典型故障,提出了一种基于实时跟踪调节开口三角形阻尼电阻的主动式谐振抑制方法,并结合仿真分析、验证,得到的主要结论如下:

1)所提出的主动式消谐方法,能够有效消弭因单相金属性接地故障引发的铁磁谐振现象,且不存在因故障辨识困难等因素引起的消谐死区问题。

2)单相永久性金属接地故障持续期间,通过调节开口三角形阻尼电阻的阻值,能够在确保不发生谐振的前提下将二次侧绕组流过的电流幅值限制在 1.0×10^{-6} pu左右,确保了单相接地故障期间系统的安全稳定运行,表明所提主动消谐方法是可行、可靠的。

参考文献

[1] 张志磊,郭涛,田石金,等. 配电线路电容与 PT 电感阻抗比对铁磁谐振电压电流特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2019, 287(1):77 – 81.

[2] 曾祥君,杨先贵,王文,等. 基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1666 – 1673.

[3] 杨鸣,司马文霞,段盼,等. 铁磁谐振过电压柔性控制的试验研究[J]. 高电压技术,2015,41(2):647 – 653.

[4] 雷娟,郭洁,高媛,等. 铁磁谐振仿真模型的探讨[J]. 电瓷避雷器,2007(4): 33 – 37.

[5] 余宇红. 铁磁谐振过电压的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[6] 朱岸明,王倩. 配网铁磁谐振过电压的非线性动力学分析及制措施的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3):28 – 34.

[7] 由志勋,刘楠. 水电站内部铁磁谐振及抑制措施仿真研究[J]. 高压电器,2019(1):128 – 134.

[8] 王鹏,郭洁,齐兴顺,等. 35 kV 中性点经消弧线圈接地系统几种铁磁谐振消谐措施有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(6):34 – 37.

[9] 石文江,李春平,王睿,等. 铁磁谐振在调度端的典型特征[J]. 电力系统自动化, 2015(7):194 – 197.

[10] Abbasi H R, Heydari H, Afsari S A. Elimination of Chaotic Ferroresonance in Power Transformer by ISFC [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 68(12):132 – 141.

[11] 黄艳玲,司马文霞,杨鸣,等. 实测铁磁谐振时间序列的非线性动力学分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5):126 – 134.

[12] 龚庆武,张静,雷加智,等. 基于原子分解法的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5):1114 – 1124.

[13] 何智强,李欣,范敏,等. 基于消谐器抑制铁磁谐振过电压研究分析[J]. 电瓷避雷器,2017(5): 77 – 84.

[14] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.

[15] Yue Sh, Li P, Guo Jd, et al. A Statistical Information – based Clustering Approach in Distance Space[J]. Journal of Zhejiang University, Science, 2005, 6(1): 71 – 78.

作者简介:

朱子氏(1991),工程师,主要从事电力系统运行与控制研究。
(收稿日期:2020 – 03 – 09)

(上接第 56 页)

图像数据进行 AI 识别预处理,筛选大类明显缺陷并将统计信息发送至后台数据处理中心,同时将其他图像数据进行流式计算,采用更精确的人工智能算法实现对细小缺陷的精准识别,保证缺陷识别的实时性和可靠性。

4 结 语

现阶段无人机巡检仍然主要依赖于搭载摄像机、红外测温挂件等对线路进行状态监测,虽然智能化水平不足,但仍然具有广阔的应用前景。随着无人机机巢技术、图像智能识别技术、超短波通信技术、边缘计算等的快速发展,将逐步实现输电线路的无人机全线自主巡检、图像的实时传输、缺陷的智能识别、缺陷的实时上报等全天候、全天时、全自动的线路运行维护,进一步提高线路运维效率和质量,增强线路智能化运行维护水平。

参考文献

[1] 万康. 无人机在山区高压输电线路隐患巡检中的应用[J]. 南方农机,2019,50(23):269 – 270.

[2] 陈剑刚,姚璞,杨俊武,等. 无人机在架空输电线路巡检中的应用研究[J]. 湖南电力,2019,39(5):74 – 77.

[3] 罗星宇. 无人机在输电线路中的应用[J]. 低碳世界, 2019,9(9):115 – 116.

[4] 刘军,刘健辉. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 中国新通信,2019,21(17):109.

[5] 陈泌丞,范菁. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 电工技术,2019(3):80 – 81.

[6] 黄谨益. 电力输电线路巡检中无人机的应用[J]. 电子技术与软件工程,2019(1):233.

[7] 罗映昀,米立,王原. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 通信电源技术,2018,35(12):98 – 99.

[8] 王刚,孟莹梅. 多旋翼无人机在输电线路巡线中的应用[J]. 山东工业技术,2019(9):179 – 180.

[9] 彭福先,张玮,祝晓军,等. 基于激光点云精确定位的输电线路无人机自主巡检系统研究[J]. 智慧电力, 2019,47(7):117 – 122.

[10] 胡智敏,李凯,汤国锋,等. 一种输电线路无人机“巢 – 巢”巡检新模式[J]. 江西电力,2018,42(12):13 – 15.

[11] 韦舒天,李龙,岳灵平,等. 输电通道人机协同巡检方式的探索[J]. 浙江电力,2016,35(3):10 – 13.

[12] 李建峰,段宇涵,王仓继,等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源,2017,33(8):62 – 65.

作者简介:

李倩竹(1989),硕士研究生,工程师,现从事输电线路运检技术管理工作,主要研究方向为线路智能运检工作。

(收稿日期:2020 – 02 – 18)

10 kV 线路调压器在低电压治理中的应用

罗 洋¹, 蒋 伟¹, 张星海¹, 魏书超²

(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凉山供电公司, 四川 凉山 615050)

摘 要:随着人民生活水平的不断提高,家用电器和农用机具已成为农村家庭的标准配置,使得农村用电负荷大幅增加。然而,与用电负荷快速增长不相匹配的是农村电网的发展仍相对滞后,农村电网的低电压问题十分突出,严重影响了人民的正常生活和工作。10 kV 线路调压器在农村电网低电压治理中应用效果较好、成本较低。通过分析调压器工作原理,建立带 10 kV 调压器的配电线路等值电路,开展了调压器在 10 kV 线路中的理论计算,并结合农村线路实际情况进行了调压器的安装效果验证,为农村电网低电压治理工作提供参考。

关键词:线路调压器;低电压;恒功率;恒阻抗

中图分类号:TM714 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)03-0064-04

Application of Voltage Regulator in Low Voltage Control for 10 kV Line

Luo Yang¹, Jiang Wei¹, Zhang Xinghai¹, Wei Shuchao²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Liangshan 615050, Sichuan, China)

Abstract: With the continuous improvement of people's living standard, household appliances and farm machines and tools have become the standard configuration of rural households, which causes a huge increase in rural power load. However, the development of rural power grid is still relatively lags behind, which does not match with the rapid growth of electricity load, and low voltage problem of rural power grids is very outstanding, which seriously affects the normal life and work of people. Applying voltage regulator to 10 kV line of rural power grid is an effective method for low voltage control with good effect and lower cost. The working principle of voltage regulator is analyzed, and through establishing the equivalent circuit of distribution line with 10 kV voltage regulator, the theoretical calculation of voltage regulator in 10 kV line is carried out. Combining with the practical situation of rural line, the installation effect of voltage regulator is verified, which provides a reference for low voltage control in rural power grid.

Key words: line voltage regulator; low voltage; constant power; constant impedance

0 引 言

随着国民经济的发展以及全面建成小康社会目标的推进,家用及农用电器在农村越来越普及,农村用电负荷显著增长。然而农村电网基础薄,电网投资建设区域不平衡现象严重,供电半径长、导线截面小、线路末端负荷重等问题仍十分突出^[1-2],部分村

科技项目: 国网四川省电力公司科技项目(配电网低电压差异化治理及优化布点研究 52199718001U)

社长期受“低电压”影响,造成家用及农用电器无法正常工作。

针对农村电网“低电压”问题,目前的解决措施大致分为 3 类:优化网架结构、调整变压器档位、补偿措施。其中,优化网架结构主要是从增加电源布点、改接负荷、增加导线截面等方面解决“低电压”问题,也是从根本上解决“低电压”问题最有效的措施;但投资巨大、周期长、成效慢。调整变压器档位,目的是调整 10 kV 母线电压;但 10 kV 电压可调整范围有限,对于供电半径过长引起的“低电压”问题

成效甚微。补偿措施又分为无功补偿和电压补偿,无功补偿针对无功负荷过大的线路有一定的效果,电压补偿是通过加装调压器将电压抬升到设定值^[3-6],对于解决农村电网“低电压”问题成效显著且工程造价较低,近年来在农村电网中大量应用。

然而,电压补偿中的调压器在应用中仍然存在以下问题:1) 未经安装位置选点计算,造成调压器未能发挥最大效益^[8-9];2) 部分人员不掌握调压器适用范围而盲目安装,造成线路频繁跳闸。因此,研究和解决调压器在现场中应用难题,摸清安装调压器前后电压和电流变化规律显得尤为必要。

下面针对 10 kV 调压器在现场中的应用问题,通过分析调压器工作原理,建立带 10 kV 调压器的配电路等值电路,开展了调压器在 10 kV 线路中的理论计算,并结合农村线路实际情况进行了调压器的安装效果验证。

1 10 kV 调压器的工作原理

10 kV 调压器属于三相自耦式变压器的一种,主要由并励线圈、串励线圈和控制线圈组成,如图 1 所示。并励线圈为自耦变压器的公共绕组,主要作用是形成传递能量的磁场;串励线圈有多个抽头,通过有载分接开关调节所需连接的抽头,改变自耦变压器的变比,以实现改变输出电压的目的。控制线圈绕制于并励线圈上,主要作用是调压器控制电路提供工作电源和采样信号。

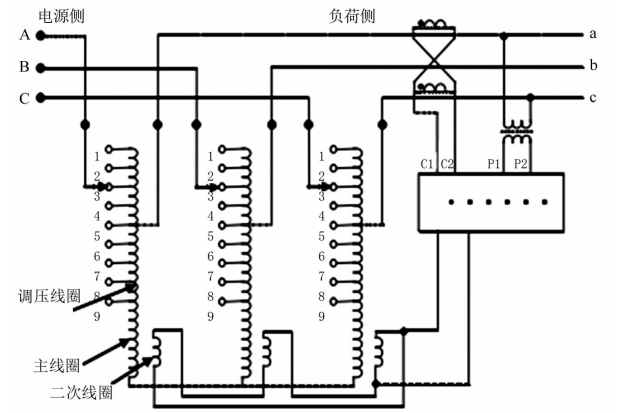


图 1 10 kV 调压器工作原理

10 kV 调压器具备自动调压功能,该功能是自动控制电路实现的。它主要是把采集的输出电压与设定值进行比较,并且达到一定动作时间后,再发出对有载分接开关的挡位调节指令。有载分接开关一般常用的有 7 挡位和 9 挡位。自动控制电路发出升

挡或降挡的指令后,有载分接开关切换连接在串励线圈上的抽头位置,改变自耦变压器的变比实现自动调压。

2 带 10 kV 调压器的配电路等值电路

为了简化分析,假设 10 kV 调压器为理想的自耦变压器,线路负荷集中在 10 kV 调压器后,则带 10 kV 调压器的配电路等值电路如图 2 所示。图中线路母线电压为 U_0 ,线路的等值阻抗为 Z_L ,T 为调压器(变比为 $k:1$),负荷 Z_{load} 的视在功率为 $P+jQ$ 。未安装调压器时,节点 1 和节点 2 的电压相等、电流相等。

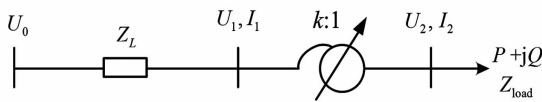


图 2 带 10 kV 调压器的配电路等值电路

1) 安装调压器后节点 1、节点 2 的电压、电流关系

节点 1 的电压、电流为:

$$U_1 = k \cdot U_2 \tag{1}$$

$$I_1 = \frac{1}{k} \cdot I_2 \tag{2}$$

$$U_1 = U_0 - I_1 \cdot Z_L \tag{3}$$

式中: U_1 、 I_1 分别为安装调压器后节点 1 处的电压、电流; U_2 、 I_2 分别为安装调压器后节点 2 处的电压、电流。

节点 2 的电压、电流为:

$$U_2 = I_2 \cdot Z_{load} \tag{4}$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_2} \tag{5}$$

2) 安装调压器后节点 1、节点 2 的电压、电流的变化量

节点 1 的电压、电流变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= U_1 - U'_1 \\ &= (U_0 - I_1 \cdot Z_L) - (U_0 - I'_1 \cdot Z_L) \\ &= Z_L \cdot (I'_1 - I_1) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\Delta I_1 = I_1 - I'_1 \tag{7}$$

式中: U'_1 、 I'_1 分别为安装调压器前节点 1 处的电压、电流; U'_2 、 I'_2 分别为安装调压器前节点 2 处的电压、电流。

由式(6)、式(7)可得

$$\Delta U_1 = -Z_L \cdot \Delta I_1 \tag{8}$$

节点 2 与原节点电压、电流的变化量为：

$$\begin{aligned}\Delta U_2 &= U_2 - U'_2 \\ &= \frac{1}{k} \cdot (U_0 - I_1 \cdot Z_L) - (U_0 - I'_1 \cdot Z_L) \\ &= \frac{k-1}{k} \cdot U_0 + Z_L \cdot (I'_1 - \frac{I_1}{k})\end{aligned}\tag{9}$$

$$\Delta I_2 = I_2 - I'_2 = k \cdot I_1 - I'_1\tag{10}$$

3 不同负荷模型下调压器的调压特性

1) 负荷为恒功率模型

负荷为恒功率模型时,则调压器安装前后,负荷的视在功率 $P + jQ$ 恒定不变。那么,安装调压器后,节点 2 的调压器出口电压调整为目标电压值 U_N ,则节点 1 和节点 2 的电压、电流变化情况如下。

节点 1 的电压、电流变化量为：

$$\Delta U_1 = -Z_L \cdot \Delta I_1\tag{11}$$

$$\begin{aligned}\Delta I_1 &= I_1 - I'_1 \\ &= \frac{1}{k} \cdot I_2 - I'_2 \\ &= \sqrt{P^2 + Q^2} \cdot (\frac{1}{k \cdot U_N} - \frac{1}{U'_2})\end{aligned}\tag{12}$$

节点 2 的电压、电流变化量为：

$$\Delta U_2 = U_2 - U'_2 = U_N - U'_2\tag{13}$$

$$\Delta I_2 = I_2 - I'_2 = \sqrt{P^2 + Q^2} \cdot (\frac{1}{U_N} - \frac{1}{U'_2})\tag{14}$$

若为升压调压器 ($0 < k < 1$) ,则调压器出口电压值 $U_N > U'_2$,即 $U_N - U'_2 > 0$ 。又由式(11)一式(14)可知,节点 1 和节点 2 的电压、电流变化量分别为 $\Delta U_1 > 0$ 、 $\Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_1 < 0$ 、 $\Delta I_2 < 0$,即安装调压器后节点 1、节点 2 的电压均较未安装调压器前有提升,而电流较未安装调压器前有降低。

2) 负荷为恒阻抗模型

负荷为恒阻抗模型时,则调压器安装前后,负荷的视在功率 $P + jQ$ 会随调压器出口电压的变化而变化,而负载阻抗 Z_{load} 保持不变。那么,安装调压器后,节点 2 的调压器出口电压调整为目标电压值 U_N ,则节点 1 和节点 2 的电压、电流变化情况如下。

节点 1 的电压、电流变化量为：

$$\Delta U_1 = -Z_L \cdot \Delta I_1\tag{15}$$

$$\Delta I_1 = I_1 - I'_1 = \frac{1}{k} \cdot I_2 - I'_2 = \frac{1}{Z_{load}} \cdot (\frac{U_N}{k} - U'_2)\tag{16}$$

节点 2 的电压、电流变化量为：

$$\Delta U_2 = U_2 - U'_2 = U_N - U'_2\tag{17}$$

$$\Delta I_2 = I_2 - I'_2 = \frac{1}{Z_{load}} \cdot (U_N - U'_2)\tag{18}$$

若为升压调压器 ($0 < k < 1$) ,则调压器出口电压值 $U_N > U'_2$,即 $U_N - U'_2 > 0$ 。又由式(15)一式(18)可知,节点 1 和节点 2 的电压、电流变化量分别为 $\Delta U_1 < 0$ 、 $\Delta U_2 > 0$ 、 $\Delta I_1 > 0$ 、 $\Delta I_2 > 0$,即安装调压器后节点 1 的电压较未安装调压器前有降低,而电流较未安装调压器前有升高,节点 2 的电压、电流均较未安装调压器前有提升。

4 10 kV 调压器的容量选择

现有的调压器标准容量主要有 500 kVA、1000 kVA、2000 kVA、3000 kVA、4000 kVA、5000 kVA。调压器的容量选择应根据流过调压器可能出现的最大负荷进行选取。通常流过调压器可能出现的最大负荷是根据调压器后端所接的所有配电变压器容量的总和,再乘以最大负荷下的同时率计算出来的。最大负荷同时率往往需要根据历史同期负荷运行情况进行确定,是一个经验性较强的数据。同时,调压器的容量还应留出一定裕度,以保证近 3 ~ 5 年负荷的自然增长需求。特别情况下,也可取导线的最大载流量作为调压器的容量计算依据。

5 10 kV 调压器在低电压治理中的应用

以 10 kV 走永线线路为例。10 kV 走永线主线全长 25.8 km,分支线长度为 33.1 km,线路总长度为 58.9 km,主线型号主要为 LGJ - 120,线路末端和支线型号主要为 LGJ - 70 和 LGJ - 50 导线,公用变压器有 161 台,专用变压器数量为 66 台,总容量约 24 000 kVA,线路配电变压器平均负载率为 23%。

治理前,10 kV 走永线 161 台公用变压器中,配电变压器出口低电压共 107 台,占配电变压器总数的 66.5%,低电压配电变压器总容量为 11 775 kVA,占配电变压器总容量的 49%。走永线主线杆塔配电变压器及低电压配电变压器分布见图 3。由图可见,64 号杆塔后集中出现大量低电压配电变压器,数量为 85 台,占低电压配电变压器总数的 79%。其中 64 号塔 T 接了多条支线,挂接在这些支线的配电变压器中有 25 台出现低电压。

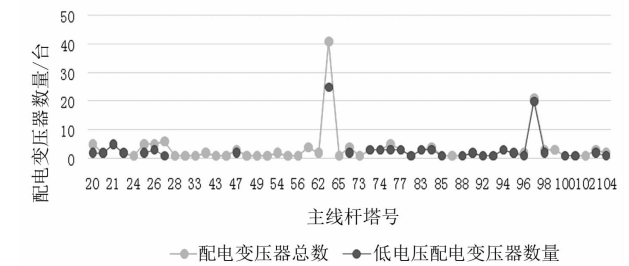


图3 低电压配电变压器分布

由配电网运维管控模块的数据可知,10 kV 走永线大部分低电压配电变压器位于主线 76 号杆之后,同时依据绝大多数低电压配电变压器的治理原则,因此可在 76 号杆前安装 10 kV 调压器。

5.1 调压器容量选择

76 号杆后端配电变压器容量为 6130 kVA,位于 76 号杆的永乐 3 台区的最低电压值为 196.6 V。根据调压器的 +7% 挡位参数,安装调压器后,其永乐 3 台区的电压最高可提升至 235.4 V,电压提升了 38.8 V,提升了 19.7%,折算至高压侧即将 10 kV 电压从 8.9 kV 提升至 10.7 kV,提升了 1.8 kV。

按配电变压器平均负载率 23% 计算,76 号杆后端平均负荷为 1 409.9 kVA。安装线路调压器后,76 号杆后端配电变压器平均负载率将增加 43%,又考虑安装调压器后负荷会增加及未来 3~5 年负荷的增长总体估算为 30%,则 76 号杆后端的配电变压器平均负载率将增加 73%,即平均总负荷为 2439 kVA。因此,调压器容量选择以 3000 kVA 为宜。

5.2 调压器的安装

经现场查勘,结合实际情况,由于线路尾端存在大面积低电压,结合调压器调压能力和现在运输吊装情况,选择在 75 号与 76 号杆之间安装 1 台容量为 3000 kVA 的 10 kV 三相调压器,对末端线路进行升压。

5.3 治理效果评估

1)在 76 号杆处安装线路调压器后,因电压提升导致的线路电流增量为 40.1 A,即 10 kV 线路最大电流将达 350.1 A,夏季最大负载率为 116.7%,冬季最大负载率为 86.4%。

2)安装线路调压器后,由于主线电流增大,76 号杆前端电压将出现明显降低。以最大负荷情况为例,调压器输入侧电压将由 8.9 kV 降低 0.19 kV,折算至配电变压器低压侧则降低 4.2 V。因此,部分原出口电压在 198~202 V 间的配电变压器,在安装调压器后其出口电压低于 198 V,形成新增低电压

配电变压器。

3)安装好后调压器运行正常,调压器自动升压功能运行正常。通过查看调压器后端台区 1 月出现低电压台区的用户表计发现,电压值恢复正常,稳定在 220 V 左右。持续运行一个月后,由配电网运维管控模块调出数据发现,安装调压器后端出现低电压的台区降低为 2 个,调压器升压能力显著。

6 结 语

上面研究了 10 kV 线路调压器的工作原理,建立了带调压器的线路等值电路模型,分析了不带调压器和带调压器两种情况下的电压和电流变化情况。同时,研究了不同负荷模型下调压器的调压特性,结果显示恒功率负荷下安装调压器后的电压均较未安装调压器前有所提升,而电流较未安装调压器前有所降低;恒阻抗负荷下安装调压器后调压器一次侧的电压均较未安装调压器前有所降低,而电流较未安装调压器前有所升高,二次侧的电压、电流均较未安装调压器前有所提升。最后,以 10 kV 走永线为例,验证了安装 10 kV 调压器后对线路电压具有抬升作用。

参考文献

[1] 王金丽,段祥骏,李云江,等. 配电网低电压产生原因与综合治理措施[J]. 供用电,2016(7): 8-12.

[2] 黄桂兰,林韩,蔡金锭. 农村配电网低电压治理措施研究[J]. 电气技术,2015,16(11): 64-67.

[3] 潘晓杰,刘涤尘,任冲,等. 一种研究电压稳定的有载调压变压器模型[J]. 高电压技术,2006,32(2):21-23.

[4] 于晓牧,王继峰,翟晓凡,等. 中压线路调压器的应用[J]. 农村电气化,2011(1):11-12.

[5] 罗书克,张元敏. 低压配用电系统两级无功补偿控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2014(16):103-107.

[6] 汪波,魏则运,兰静波,等. 有载调容调压变压器在供电线路上的应用[J]. 电子技术与软件工程,2016(12):132-133.

[7] 电能质量 供电电压偏差:GB/T 12325-2008[S], 2008.

[8] 吴克胜,周瑜,盖大忠,等. 青海配电网“低电压”治理探讨[J]. 青海电力,2015,34(4): 4-7.

作者简介:

罗 洋(1986),硕士,高级工程师,从事高电压技术研究。

(收稿日期:2020-01-26)

LCL 滤波器无源阻尼和有源阻尼对多逆变器 并网谐振影响对比分析

郑嘉龙¹,杨 鸽¹,刘一均¹,刘 蓓²

(1. 四川水利职业技术学院,四川 成都 611231;2. 国网巴塘县供电公司,四川 巴塘 627650)

摘 要:多并网逆变器系统谐振是由滤波器输出谐波与电网谐波共同作用的结果。LCL 滤波器谐振是滤波器输出谐波的主要因素之一,因此提出 LCL 滤波器谐振阻尼方法对多并网逆变器系统谐振的影响进行分析。首先,分析多并网逆变器系统谐波交互的机理;其次,建立无源阻尼和有源阻尼的多并网逆变器系统阻抗模型,对比分析 2 种阻尼方法对低频谐振和超高次谐振的影响;最后,采用 3 台并网逆变器进行仿真实验验证所提理论的有效性。

关键词:多并网逆变器;谐振;LCL 滤波器;无源阻尼;有源阻尼

中图分类号:TM761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2020)03 - 0068 - 05

Comparative Analysis on Influence of Passive Damping and Active Damping of LCL Filter on Multi - inverter Grid - connected Resonance

Zheng Jialong¹, Yang Ge¹, Liu Yijun¹, Liu Bei²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, Sichuan, China; 2. State Grid Batang Country Electric Power Supply Company, Batang 627650, Sichuan, China)

Abstract:The resonance of grid - connected multi - inverter system is the result of the joint action of filter output harmonic and grid harmonic. The resonance of LCL filter is one of the main factors of harmonic output of filter. Therefore, the influence of the resonance damping method of LCL filter on the resonance of grid - connected multi - inverter system is analyzed. Firstly, the mechanism of harmonic interaction in grid - connected multi - inverter system is analyzed. Secondly, the impedance model of grid - connected multi - inverter system with passive damping and active damping is established. Then, the influence of two damping methods on low frequency resonance and supraharmonic resonance is compared and analyzed. Finally, 3 grid - connected inverters are used for simulation experiment to verify the effectiveness of the above - mentioned theory.

Key words:grid - connected multi - inverter; resonance; LCL filter; passive damping; active damping

0 引 言

由于需要长距离传输线,使得太阳能、风能等可再生能源分布式发电(distributed generation, DG)系统以及大型新能源电站的电网阻抗不可忽略^[1]。同时,不同数量逆变器连接到同一个电网公共连接点(point of common coupling, PCC)促使任意单个逆变器在 PCC 对应的电网等效阻抗值发生变化^[2]。再由于逆变器侧和网侧谐波的存在,导致多逆变器系统与电网在PCC处发生谐波交互威胁系统的稳

定运行^[3]。以电力电子技术为基础的交流电源与电网的谐波交互已经引起广泛关注^[4],谐波交互导致的系统谐振更是其中的研究热点^[5-6]。研究人员对多并网逆变器系统谐振出现的低频谐振^[7]和超高次谐振^[8]给出了一些分析模型开展研究。文献[7]提出了一种谐振分析方法用于多并网逆变器系统低频谐振与相关因素(并网逆变器数量、LCL 滤波器参数和电网阻抗)之间的关系分析以及在 PCC 点和各母线比例含有各频率谐振的比例计算。文献[8]分析了多并网逆变器系统超高频谐振的特性。但是,上述研究中均未提及 LCL 滤波器谐振阻尼策略与多并网逆变器系统谐振之间的关系。

基金项目:四川省水利厅科研项目(SL2017-06)

虚拟阻抗控制是多并网逆变器谐振抑制的主要方法^[9-10]。文献[9]指出高电网阻抗是引起逆变器集群谐振的主要原因,并提出一种基于虚拟阻抗技术的有源谐波电导法。文献[10]提出一种基于虚拟导纳的全局谐振抑制策略,动态调整网络阻抗,抑制系统的谐波。但是有研究认为控制延时将导致虚拟阻抗控制策略失效,并提出了虚拟阻抗相角补偿法^[11]和自适应滤波算法^[12]抑制系统谐振。LCL滤波器谐振抑制策略与多并网逆变器系统谐振关系的研究主要集中在有源阻尼方法^[13-14]和低频谐振分析方面。文献[13]结合图示法寻求有源阻尼参数对耦合谐振衰减的最优取值范围。文献[14]通过仿真实验结果对比发现有源阻尼可以抑制多并网逆变器系统谐振,并给出了虚拟阻尼电阻与系统谐振频率的关系。但是,没有说明虚拟阻尼电阻大小与系统谐振幅值的关系,即虚拟阻尼电阻与系统谐振抑制能力的关系。

文献[3]指出从阻抗角度对并网逆变器建模,是从源头分析谐波交互问题的最有效方法。下面建立LCL滤波无源阻尼和有源阻尼的并网逆变器阻抗模型,对比分析2种阻尼策略对多并网逆变器低频谐振和超高频谐振的影响,为多并网逆变器系统阻尼策略的设计提供参考。

1 多逆变器并网谐波交互

1.1 多逆变器并网模型

多逆变器并网诺顿模型如图1所示,其中 L_1 、 L_2 和 C 组成单逆变器的LCL滤波器; L_g 为电网侧等效电感; U_{inv} 为逆变器输出电压; $Z_{o,n}$ ($n=1,2,\dots,n$)为单台并网逆变器等效阻抗; Z_g 为电网等效阻抗; $i_{s,n}$ ($n=1,2,\dots,n$)为并网电流的指令值跟踪分量; U_g 为电网电压。

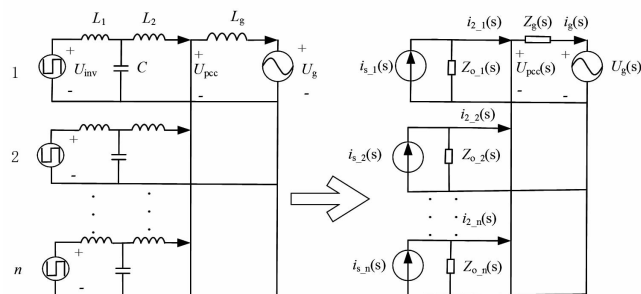


图1 多逆变器并网诺顿模型

公共连接点处的阻抗 Z_{PCC} 可以认为是多并网逆

变器与电网等效阻抗并联,其表达式为

$$Z_{PCC} = \frac{nZ_g(s)Z_o(s)}{nZ_g(s) + Z_o(s)} \quad (1)$$

1.2 谐波交互

单个逆变器并网时,其输出阻抗 $|Z_o(s)|$ 与电网等效阻抗 $|Z_g(s)|$ 差不多大且两个阻抗的相位角之差等于 180° 左右时,系统进入准谐振状态^[15]。对于多逆变器并网系统可将多逆变器输出阻抗并联等效为单个逆变器输出阻抗,与电网等效阻抗组成的多并网逆变器系统也同样存在上述系统准谐振状态。多并网逆变器系统中谐波成分的频率正好与系统阻抗网络发生准谐振频率相等时,将非常可能发生系统谐振导致系统阻抗值到达最小值。当此谐波成分频率低于2 kHz时称为低频谐振,频率范围在2~15 kHz为超高频谐振^[16]。同时为了降低问题分析的难度,采用完全相同的单相逆变器并网。

滤波电感和阻尼电感的值都很小,因而对系统谐振频率的影响也非常小。图1所示的多并网逆变器并联的系统谐振频率 f_{res} 的近似表达式为^[8]

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + nL_g}{L_1 L_2 C + nL_1 L_g C}} \quad (2)$$

定义多并网逆变器公共连接点等效阻抗与电网阻抗之比为 K ,该值越大说明系统通过调节逆变器参数从而抑制谐波干扰能力越强,也说明阻尼策略对系统谐振抑制的适应能力越强。

$$K = \left| \frac{Z_{PCC}(s)}{Z_g(s)} \right| \quad (3)$$

2 阻尼策略阻抗模型分析

2.1 无源阻尼下多逆变器并网阻抗模型

为了简化计算,未考虑延时环节,也未考虑滤波器电感的等效电阻。单台无源阻尼并网逆变器及其控制框图如图2所示。其中 L_1 、 L_2 和 C 构成LCL滤波器; L_g 为电网的等效电感; U_{inv} 为逆变器侧输出电压; U_g 为电网电压; R_d 为无源阻尼电阻; $K_{PWM} = U_{inv}/U_{tri}$, U_{tri} 为三角载波幅值; $G_i(s)$ 为PI调节器,传递函数为 $G_i(s) = K_p + K_i/s$ 。

从公共连接点观察单台无源阻尼并网逆变器等效阻抗 Z_{o1} 的表达式如式(4)所示。

$$Z_{o1}(s) = \frac{A_{11}s^3 + A_{12}s^2 + A_{13}s + A_{14}}{s^2 L_1 C + s C R_d + 1} \quad (4)$$

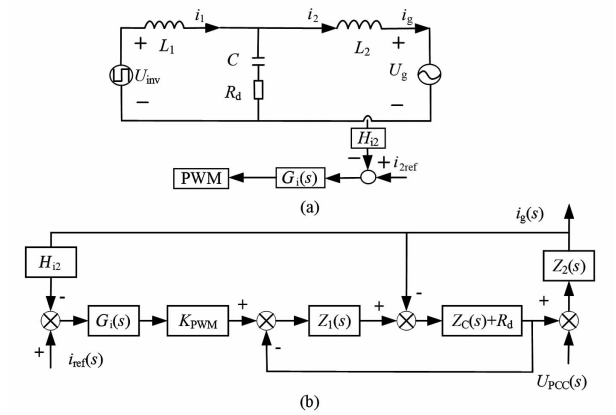


图 2 单台无源阻尼并网逆变器及其控制框图

式中: $A_{11}=L_1L_2C$; $A_{12}=(L_1+L_2)CR_d$; $A_{13}=L_1+L_2+G_i(s)K_{\text{PWM}}CR_d$; $A_{14}=G_i(s)K_{\text{PWM}}$ 。

将式(4)代入式(1)得无源阻尼多逆变器并网公共连接处等效阻抗 Z_{PCC1} 的表达式如式(5)所示。

$$Z_{\text{PCC1}} = \frac{nsL_g(A_{11}s^3 + A_{12}s^2 + A_{13}s + A_{14})}{B_{11}s^3 + B_{12}s^2 + B_{13}s + B_{14}} \quad (5)$$

式中: $B_{11}=L_1L_2C + nL_gL_1C$; $B_{12}=(L_1+L_2+nL_g)CR_d$; $B_{13}=L_1+L_2+G_i(s)K_{\text{PWM}}CR_d$; $B_{14}=G_i(s)K_{\text{PWM}}$ 。

2.2 有源阻尼下多逆变器并网阻抗模型

相较于无源阻尼,有源阻尼去除了 LCL 滤波器滤波电容支路上的无源阻尼电容,增加了滤波电容支路电流的反馈系数 H_{i1} 。单台有源阻尼并网逆变器及其控制框图如图 3 所示。

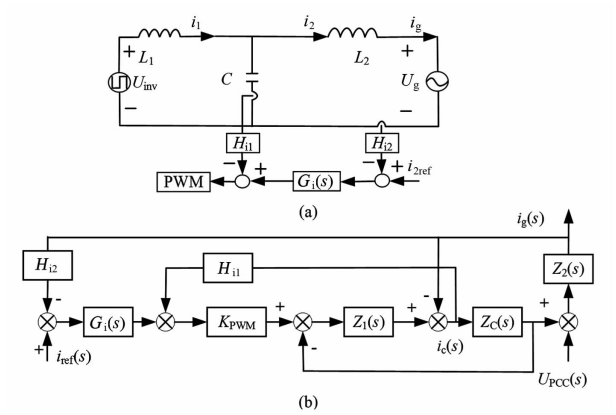


图 3 单台有源阻尼并网逆变器及其控制框图

从公共连接点观察单台有源阻尼并网逆变器的等效阻抗 Z_{o2} 的表达式如式(6)所示。

$$Z_{o2}(s) = \frac{A_{21}s^3 + A_{22}s^2 + A_{23}s + A_{24}}{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{\text{PWM}} + 1} \quad (6)$$

式中: $A_{21}=L_1L_2C$; $A_{22}=L_2CH_{i1}K_{\text{PWM}}$; $A_{23}=L_1+L_2$;

$A_{24}=K_{\text{PWM}}G_i(s)H_{i2}$ 。将式(6)代入式(1)得有源阻尼多逆变器并网公共连接处等效阻抗 Z_{PCC2} 的表达式如式(7)所示。

$$Z_{\text{PCC2}}(s) = \frac{nsL_g(A_{21}s^3 + A_{22}s^2 + A_{23}s + A_{24})}{B_{21}s^3 + B_{22}s^2 + B_{23}s + B_{24}} \quad (7)$$

式中: $B_{21}=L_1C(L_2+nL_g)$; $B_{22}=CH_{i1}K_{\text{PWM}}(L_1+L_2)$; $B_{23}=L_1+L_2+L_g$; $B_{24}=K_{\text{PWM}}G_i(s)H_{i2}$ 。

3 参数设计和敏感性分析

3.1 设计实例

采用 3 台($n=3$)单相 LCL 型逆变器并网进行仿真实验。设计实例用单相 LCL 型逆变器相关参数直接采用文献[17]所述数据,如表 1 所示。

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	360	L_1/mH	0.6
U_g/V	220	L_2/mH	0.15
P_o/kW	6	$C/\mu\text{F}$	10
f_o/Hz	50	K_p	0.45
f_{sw}/kHz	10	K_i	2200
H_{i2}	0.15	U_{tri}/V	3.052
n	3		

3.2 参数设计和敏感性分析

根据并网逆变器系统的相位裕度、幅值裕度和基波频率处幅值增益等条件的约束,可得有源阻尼反馈系数 H_{i1} 的取值范围为 $0.1^{[17]}$ 。

文献[18]给出了结合电网等效电抗的 LCL 滤波器无源阻尼阻尼系数 ζ_{PD} 和有源阻尼阻尼系数 ζ_{PA} 的表达式如式(8)一式(9)所示。

$$\zeta_{\text{PD}} = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{(L_1+L_2+L_g)C}{L_1(L_2+L_g)}} \quad (8)$$

$$\zeta_{\text{PA}} = \frac{H_{i1}}{2L_1} \sqrt{\frac{L_1(L_2+L_g)C}{L_1+L_2+L_g}} \quad (9)$$

设计无源阻尼参数时还需要考虑损耗优化问题,但这里主要讨论阻尼策略对多逆变器并网谐振的影响问题而不再涉及该问题。电网等效电感在 $0 \sim 2 \text{ mH}$ 之间变化时,谐振频率可能降低多达 $30\%^{[19]}$,当 $L_g=0.2 \text{ mH}$ 时,系统谐振出现最大值^[8]。分别取 L_g 的值为 0 mH 、 0.2 mH 和 2 mH ,在

$\zeta_{PD} = \zeta_{PA}$ 的条件下,计算每组参数对应的谐振频率,相关参数如表2所示。并网逆变器集群设计时应该避免系统谐振频率进入逆变器LCL滤波器谐振频率的约束区间,防止更多不稳定因素的出现。 K 在0~10 kHz范围的幅频特性曲线如图4所示。图4中的K1和K4为理想电网的情况,这里不作深入探讨。作为系统谐振频率发生在超高次频率的K2和K5,很明显有源阻尼的适应能力比无源阻尼的强。作为系统谐振频率发生在低频频率的K3和K6,有源阻尼的适应能力总体也比无源阻尼要强一些。

表2 K 在0~10 kHz的相关参数

曲线组别	阻尼系数 ζ	L_g /mH	R_d / Ω	H_{il}	f_{res} /kHz
K1	0.002 9	0.0	0.02		1.454
K2	0.003 9	0.2	0.04		2.758
K3	0.005 7	2.0	0.08		1.950
K4	0.002 9	0.0		0.1	1.454
K5	0.003 9	0.2		0.1	2.758
K6	0.005 7	2.0		0.1	1.950

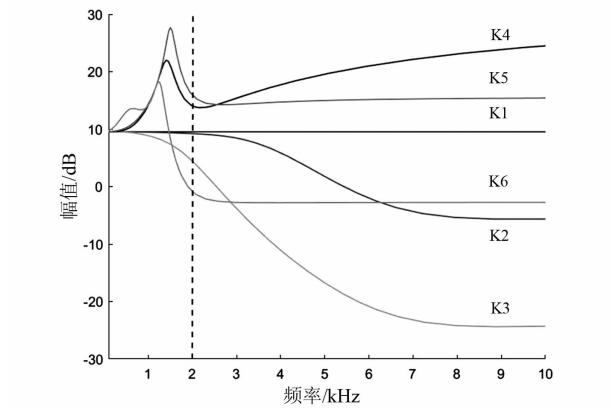


图4 K 的幅频特性曲线

4 仿真分析

采用3台同样参数的单相逆变器并网开展仿真实验。分别引入电网背景谐波含有率为0.3%的1.950 kHz和2.758 kHz考察无源阻尼策略和有源阻尼策略对多逆变器并网的低频谐振和超高次频率谐振的影响。得到并网电流 i_g 谐波频谱如图5和图6所示。从图5和图6可以看出无源阻尼策略对多逆变器并网低频谐振和超高次谐振几乎没有抑制作用,有源阻尼对低频谐振的抑制效果比对超高次频率谐振的抑制效果要好一些。

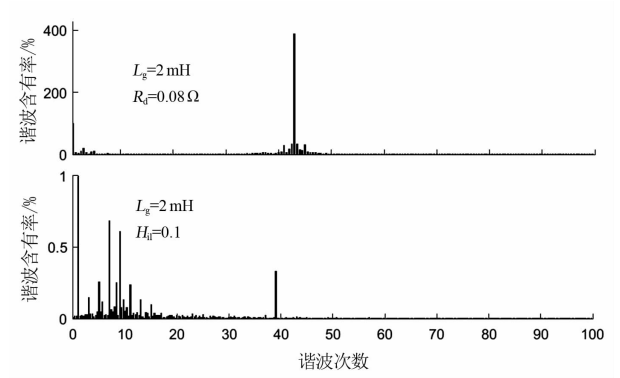


图5 低频谐振下 i_g 频谱

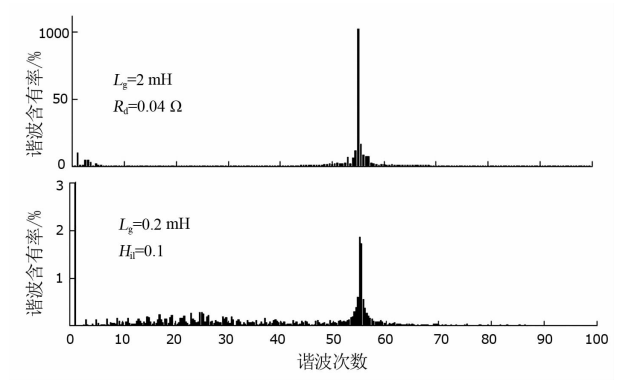


图6 超高次频率谐振下 i_g 频谱

有源阻尼策略是在电容支路上虚拟并联电阻 R_C ,然后通过控制框图的变形得到有源阻尼的反馈系数 H_{il} 。因此,可以通过 H_{il} 的表达式得出其等效的无源阻尼情况。 H_{il} 的表达式为

$$H_{il} = \frac{L_1}{K_{PWM}CR_C}$$

(10)

结合上述参数可知 $H_{il} = 0.1$ 可以等效为 $R_C = 5 \Omega$,该电阻的阻值远远大于通过 $\zeta_{PD} = \zeta_{PA}$ 条件计算出的电阻 R_d 值。提高 R_d 的数值为 2Ω 时,无源阻尼策略对低频谐振的抑制能力明显提升,对超高次频率谐振抑制能力也有所改善。 R_d 的数值为 2Ω 时,3台逆变器并网仿真实验结果如图7所示。

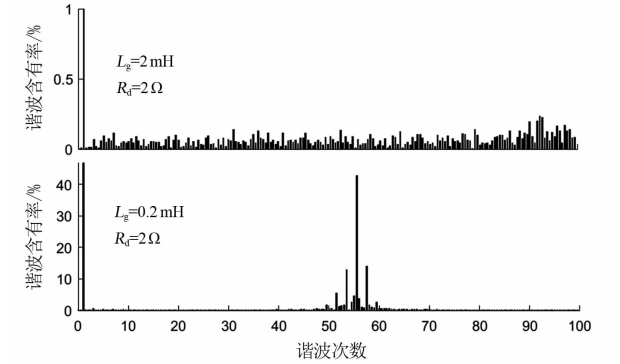


图7 $R_d = 2 \Omega$ 时仿真实验结果

5 结 语

前面首先分析了单相逆变器并网系统阻抗的数学模型,定义了并网逆变器阻尼策略对多逆变器并网谐振的适应力系数;然后提出了无源阻尼策略下的多逆变器并网阻抗模型和有源阻尼策略下的多逆变器并网阻抗模型;最后,在 Matlab/Simulink 平台上,搭建3台逆变器并网仿真模型,验证所提理论的正确性,并对无源阻尼策略和有源阻尼策略的不同表现展开分析,主要得到以下结论:

1)在相同阻尼系数和其他相关参数条件下,有源阻尼策略对多逆变器并网谐振的适应性要好于无源阻尼策略。

2)无源阻尼策略通过提高阻尼电阻的数值,可以提高对多逆变器并网谐振的抑制能力。该过程对于低频谐振的抑制效果要好于超高次频率谐振。

所提方法主要分析了无源阻尼和有源阻尼策略对低频谐振和超高次频率谐振的影响,没有开展混合阻尼策略对多逆变器并网谐振的影响,这项工作将在下一步的研究中展开。

参考文献

[1] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-connected Inverters for A Large Set of Grid Impedance Values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1):263-272.

[2] Agorreta J L, Borrega M, Lopez J, et al. Modeling and Control of N-paralleled Grid-connected Inverters with LCL Filter Coupled due to Grid Impedance in PV Plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):770-785.

[3] 许德志,汪飞,毛华龙,等.多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J].中国电机工程学报,2013,33(12):64-71.

[4] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Wu Weiwei. Modeling and Analysis of Harmonic Stability in An AC Power-Electronics-Based Power System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12):6421-6432.

[5] 刘洋,帅智康,李杨,等.多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4156-4164.

[6] Lu Minghui, Yang Yongheng, Johnson B, et al. An

Interaction-Admittance Model for Multi-Inverter Grid-Connected Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8):7542-7557.

[7] Hong Lucheng, Shu Wantao, Wang Jianhua, et al. Harmonic Resonance Investigation of A Multi-inverter Grid-connected System Using Resonance Modal Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):63-72.

[8] 汪颖,罗代军,肖先勇,等.多逆变器并网下的超高次谐振特性分析[J].电力系统自动化,2020,44(1):192-199.

[9] 孙振奥,杨子龙,王一波,等.光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J].中国电机工程学报, 2015, 35(2):418-425.

[10] 胡伟,周友斌,杜镇安,等.多并网逆变器系统谐振抑制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):45-50.

[11] 黎立丰,郑天文,郭岩,等.基于虚拟阻抗相角补偿的并联逆变器谐振抑制方法[J].电网技术,2018,42(12):4069-4075.

[12] 陈来军,黎立丰,郑天文,等.基于自适应滤波的并联逆变器谐振抑制策略[J].电网技术,2020(1):212-219.

[13] 匡慧敏,罗安,陈智勇,等.多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J].电网技术,2016,40(4):1180-1189.

[14] 武健,赵家琦,王超,等.多逆变器并网系统谐振特性模态分析与有源阻尼稳定域计算[J].电机与控制学报,2018,22(2):98-107.

[15] 杨东升,阮新波,吴恒.提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J].中国电机工程学报,2014,34(15):2327-2335.

[16] Bollen M, Olofsson M, Larsson A, et al. Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz) [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(1):114-119.

[17] 鲍陈磊,阮新波,王学华,等.基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25):133-142.

[18] 雷一,赵争鸣,袁立强,等.LCL滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J].电力系统自动化,2012,36(21):36-40.

[19] 雷一,赵争鸣,鲁思兆.LCL滤波的光伏并网逆变器有源阻尼与无源阻尼混合控制[J].电力自动化设备, 2012, 32(11):23-27.

作者简介:

郑嘉龙(1987),硕士,实验师,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、实验技术。

(收稿日期:2020-01-21)

基于频响法的电力变压器剩磁检测技术研究

谭志红¹,张 榆²,单 飞³,穆 舟²,程 铭⁴
(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;

3. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072; 4. 重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

摘 要:特高压交直流互联大电网是未来电网的发展方向,当换流站附近的大容量变压器带剩磁投入时,会出现较大励磁涌流,可能造成交直流电网故障。在长线路弱联系电网中,投带剩磁变压器产生的励磁涌流及和应涌流,会导致变压器差动保护误动和长时间的谐波电压,是电网安全稳定性的重要隐患。因此有必要对电力变压器剩磁的产生机理进行分析,探索剩磁检测方法,消除剩磁对电网的影响。对变压器进行去磁后,基于绕组的频率响应开展剩磁检测方法研究。研究表明,通过对一定扫频范围的频率响应进行对比,能准确地判断出变压器是否含有剩磁及剩磁含量的大小。

关键词:频响法;剩磁检测;扫频;频率响应特性

中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0073-05

Research on Residual Magnetism Detection Technology of Power Transformer Based on Frequency Response Method

Tan Zhihong¹, Zhang Yu², Shan Fei³, Mu Zhou², Cheng Ming⁴

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

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

3. Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 4. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: UHV AC/DC interconnected power grid is the main form of power grid in the future, and large capacity transformers are widely used. When the main transformer of a new substation is put into operation or put into operation after maintenance, large inrush current will appear in the transformer with residual magnetism, which has an important impact on AC and DC power grid. In the long-line weak-link power grid, the inrush current and sympathetic inrush current generated by the transformer with residual magnetism will lead to the disoperation of the transformer differential protection and the harmonic voltage for a long time, which is an important hidden danger of the security and stability for power grid. Therefore, it is necessary to analyze the generating mechanism of residual magnetism in power transformer, explore the detection method of residual magnetism, and eliminate the influence of residual magnetism on power grid. The demagnetization test is carried out for the transformer, and based on the frequency response of winding, the residual magnetism detection method has been studied. The research results show that: by comparing the frequency response in a certain sweep frequency range, it can accurately determine whether the transformer contains residual magnetism, and can determine the magnitude of the residual magnetism content of the transformer.

Key words: frequency response method; residual magnetism detection; sweep frequency; frequency response characteristics

0 引 言

随着中国电力系统特高压交直流互联大电网的

迅速发展,大容量励磁电力设备的应用日益增多,高幅值的励磁涌流对电气设备保护运行的可靠性和快速性提出了较高的要求^[1-2]。在电力变压器进行电压比、直流电阻测量及空载试验等操作后,由于变压

器铁芯磁畴磁滞特性,使铁芯上存在大量的剩磁。当合闸变压器充电时,铁芯中的剩磁与合闸初始磁通叠加使电力变压器铁芯迅速饱和,导致电力变压器励磁电流产生大量的谐波,造成波形畸变严重^[3]。变压器铁芯剩磁极有可能造成变压器励磁涌流,励磁涌流的幅值可达变压器额定运行电流的几倍甚至几十倍,导致变压器差动保护误动作和长时间的谐波电压,使变电站设备的稳定运行面临严峻的考验^[4]。

幅值较高的励磁涌流,在铁芯、绕组和金属结构件中增加有功损耗,使铁芯、绕组和金属结构件温度升高,同时铁芯的高度饱和使漏磁增加,引起变压器局部过热,造成绝缘纸老化,从而降低绝缘纸的绝缘性能,给变压器带来潜在性缺陷,数次积累可造成变压器的永久性损害。励磁涌流中的谐波会导致电力变压器内的杂散损耗增加,引起发电机和电容滤波器组中继电器不正确跳闸。此外,大量谐波对电网电能质量造成严重的污染。剩磁会诱发低电压和过电压,在长距离弱联系电网中,剩磁会造成局部电压过低,还可能使系统谐波震荡,在系统远端造成电压过高,严重威胁电网设备的安全稳定运行。剩磁还会诱发变压器的差动保护、轻重瓦斯保护等误动作,造成变压器的投运失败^[5-6]。

综上所述,电力变压器剩磁在一定条件下严重影响电网安全稳定运行,为解决电力变压器剩磁的影响,需要掌握电力变压器剩磁的产生机理,研究剩磁检测方法,掌握电力变压器剩磁的实时状态,从而制定消除剩磁对电网影响相关措施。

1 变压器剩磁的检测方法

国内外学者针对铁磁原件的剩磁检测、剩磁测量及去磁方法开展了相应的研究。武汉大学陈文臣^[7]等利用励磁涌流含有很大的非周期分量、含有大量的偶次谐波且以二次谐波为主这一特点,对励磁电流进行 FFT 分解,得到其各次谐波含量的分布图,通过二次谐波的含量来判断是否含有剩磁。刘勇等^[8]在变压器的中性点及高压侧施加正负极性的直流电压,通过对加压时间及电流波形的比较,来判断变压器是否含有剩磁。河北电科院张建军等^[9]通过施加电压,获得变压器的上升及下降电流曲线,基于最小二乘法判断是否含有剩磁。

关于铁芯剩磁的测量,实际工程中,铁芯剩磁的测量技术在国内外目前还没有较为明确且成熟的方法,铁芯剩磁的测量方法主要有^[10-14]:

1) 经验估磁法:一般认为变压器在实验或运行结束后铁芯中剩磁范围为 20% ~ 80% 饱和磁通值。在 1984 年国际大电网会议(international council on large electric systems)的调查中,500 台电力变压器中仅一台变压器的最大剩磁值超过这一范围。

2) 基于铁芯磁化模型的剩磁计算方法:结合变压器铁芯磁滞回线数学模型,考虑磁化过程中的磁滞效应,推导了铁芯剩磁的计算公式。

3) 电压积分法:基于电磁感应定律,通过记录变压器分闸时线圈中电压波形,对电压积分求取铁芯磁通。

4) 基于励磁涌流的剩磁测量方法:通过测量变压器铁芯中剩磁存在时励磁电流瞬时的变化(即励磁涌流),对比不同剩磁值时励磁涌流的差异,从而来判断剩磁的方向和大小。

5) 基于变压器漏磁的剩磁测量方法:利用磁通门传感器测量变压器漏磁,通过建立变压器漏磁和铁芯剩磁的传递函数,测量变压器铁芯剩磁。

变压器产生剩磁时,需采用一定的方法消除剩磁,以避免剩磁对设备带来不利影响。关于变压器铁芯的去磁方法,目前主要有交流去磁法和直流去磁法。

1) 交流去磁法:通常在变压器低压侧加压,高压侧空载,高低压中性点均接地,轮流在低压侧三相加压,低压侧的非加压相空载,电压升高至额定电压的 1.1 倍,按每 10 s 0.1 倍额定电压的速度逐渐将电压降低为 0。

2) 直流去磁法:对变压器绕组施加直流电流并不断变换极性。直流消磁法分为等幅变频法、等频降幅法两种。等幅变频法是指采用恒定幅值电压的恒压源,逐渐提高正负交替频率来实现变压器剩磁的消除;等频降幅法是指采用同一个正负电压交替频率,逐渐将电压幅值降低来实现变压器剩磁的消除。针对变压器三相剩磁的消除,直流消磁法因为可以把初始磁通调整到三相都达到较高的饱和点,三相剩磁的消磁只需要在变压器中间相施加直流交替电压,就可以完成变压器三相剩磁的同时消除^[15]。

下面对变压器开展去磁试验,基于绕组的频率响应研究其剩磁检测方法。

2 试验变压器去磁试验

利用直流去磁法,在变压器断口施加直流电流,对110 kV试验变压器进行去磁试验。

试验对象为110 kV油浸式试验变压器,原边额定电压为200 V,副边额定电压为110 kV。去磁试验前,对变压器施加工频电压,以此来产生剩磁,确保变压器含有剩磁。

去磁设备为TD-6910变压器消磁及验证装置,可采用手动去磁及自动去磁两种模式,消磁电流可设置为1 A、5 A、10 A的直流电流。去磁装置可接在变压器高压侧或低压侧,在消磁过程中,直流电流正负极性交替变化,电流幅值等时间间隔衰减直至电流为0,消磁完成。在消磁前后,可对变压器施加220 V工频电压,利用罗氏线圈测得其在消磁前后的空载电流,通过比较空载电流的大小,即可判断变压器是否完成消磁。

试验对象的高压绕组经测试电阻达250 kΩ,若将测试电流施加在其高压端,由于其阻抗过大使测试电流不能正常施加而无法完成去磁试验。低压绕组电阻测试值为0.1 Ω。因此,将去磁电流从低压端输入,选取电流为10 A,试验布置见图1。

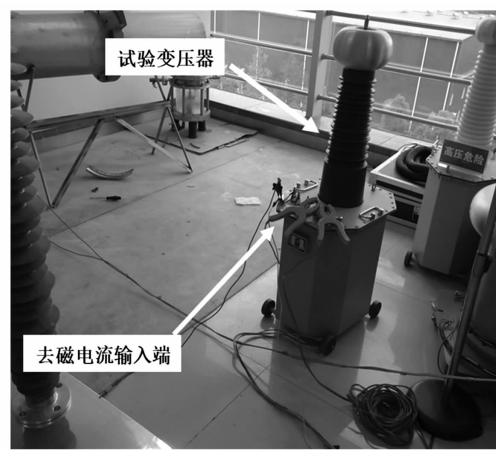


图1 试验布置

去磁试验后,从试验结果报表可以发现在去磁过程中,去磁电流从10 A开始逐渐减小,直至减小至0完成去磁,在去磁前后,空载电流明显减小。

3 剩磁对变压器频率响应特性的影响分析

首先利用直流发生器对5 kV双绕组干式变压器进行充磁,然后对充磁变压器进行扫频试验,并对

有剩磁及没有剩磁状态下的幅频特性进行比较。

3.1 试验方法

试验对象为DG-10双绕组干式变压器,原边额定电压为220 V,副边额定电压为5 kV,额定容量为10 kVA。

直流发生器为MS-115D,最大输出电压为30 V,最大输出电流为5 A。利用直流发生器输出不同幅值的直流电流至变压器,直流电流的幅值逐渐增加使变压器产生不同的剩磁量,每个幅值的电流施加时间为30 s。直流发生器的最大输出电流为5 A。为了在电流逐渐增大的过程中,使变压器产生足够的剩磁并达到饱和,考虑变压器原边及副边的变比,将直流电流从变压器的副边输入,当副边电流较小时,也能在原边产生一个很大的励磁电流。

在变压器无剩磁状态及不同幅值的直流电流输入后,均对变压器进行扫频试验。扫频设备为HR-2000数字频响分析仪。该设备产生一个幅值为3.5 V的扫频信号从变压器的高压侧输入,在变压器的低压侧对输出信号进行采集。输入及输出信号通过采集设备由数字频响仪利用数据传输线传至电脑端,即可得到变压器的幅频响应特性曲线,试验的扫频范围为10 Hz~10 MHz。扫频试验接线示意图见图2。

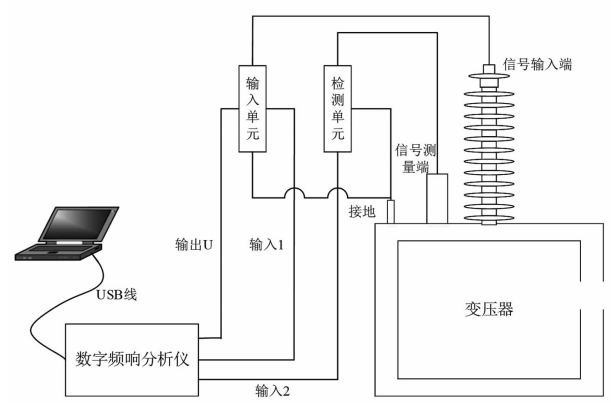


图2 扫频试验接线

3.2 试验结果分析

扫频试验结果见图3,图中除明确指出“无剩磁”的曲线为不含剩磁状态下变压器的幅频响应特性曲线外,其他均为变压器含有剩磁的曲线。利用直流发生器产生剩磁时,助磁电流不同,则在变压器上产生的剩磁含量不同,相应的扫频曲线也会存在一定的差异。通过对图3观察可知,随着扫频频率变化,变压的输出幅值发生了变化,在扫频范围内上下波动,最大幅值的绝对值约为52 dB,最小幅值的绝对值约为2 dB。进一步可以发现,当扫频频率为

10 Hz ~ 1000 kHz 时,变压器是否含有剩磁以及剩磁含量是否不同,均未对幅频响应特性产生影响,几种工况下在这一频率范围内的幅频响应曲线重合。

而当频率大于 1000 kHz 时,可以发现,各工况下的幅频响应曲线开始出现了偏移,并在一定的频率范围内呈现出一定的规律性。图 4 为 1000 ~ 2000 kHz 各工况下的幅频响应曲线。曲线 1 为变压器不含剩磁的幅频响应特性曲线,曲线 2—曲线 5 为变压器不同剩磁含量的幅频响应特性。观察可知,在这一频率范围内,若变压器存在剩磁,则输出的幅值会发生变化,且随着剩磁含量的增加,输出幅值的绝对值逐渐减小。当扫频范围为 4000 ~ 4200 kHz 时,在这一频率范围内,随着剩磁含量的增加,输出幅值的极值逐渐增大,见图 5。

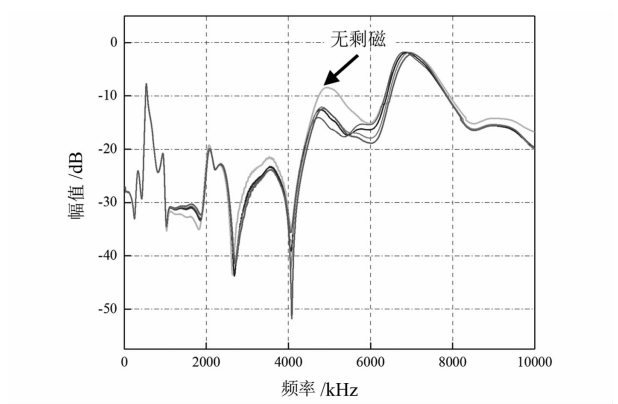


图 3 扫频试验结果

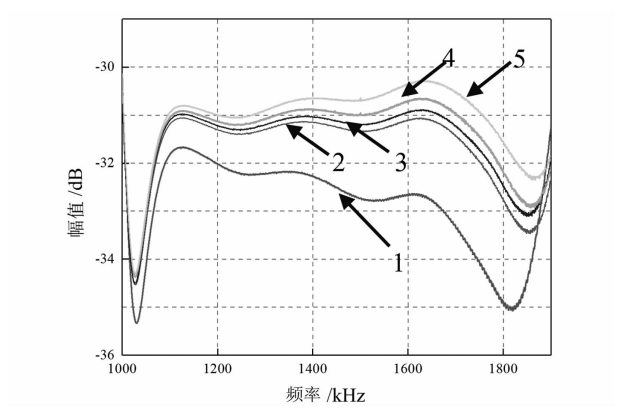


图 4 1000 ~ 2000 kHz 实验结果

当频率较高时,变压器绕组的高低电压端可视为分布电容、电感、电阻构成的线性无源双端口网络,这个双端口网络的传递函数与网络内部状态密切相关。当剩磁存在于变压器铁芯时,高频电压在变压器分布电感参数上积分磁通起点不一样,所以剩磁会影响变压器励磁电感的测量值。当变压器不含剩磁时,回路电压方程为

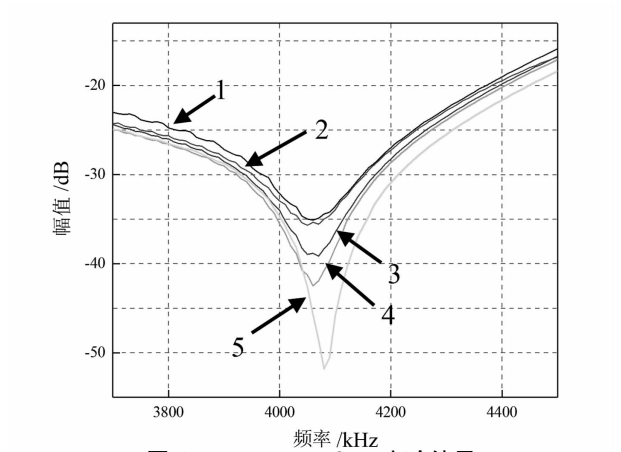


图 5 3700 ~ 4500 kHz 实验结果

$$\frac{d\varphi}{dt} + R_m \frac{\varphi}{L_{mc}} = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \alpha) \tag{1}$$

式中, $\sqrt{2}U\sin(\omega t + \alpha)$ 为作用在励磁阻抗上的电压,解得:

$$\varphi = -\sqrt{2} \frac{U}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) \tag{2}$$

$$i_0 = -\sqrt{2} \frac{U}{\omega L_{mc}} \cos(\omega t + \alpha) \tag{3}$$

$$I_0 = \frac{U}{\omega L_{mc}} \tag{4}$$

$$I_m = \frac{U}{\omega L_0} \tag{5}$$

当变压器含剩磁时:

$$\varphi = \Phi_{RES} - \sqrt{2} \frac{U}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) \tag{6}$$

$$i_0 = \frac{\Phi_{RES}}{L_{mc}} - \sqrt{2} \frac{U}{\omega L_{mc}} \cos(\omega t + \alpha) \tag{7}$$

$$I_0 = \frac{U}{\omega L_{mc}} \sqrt{1 + (\omega \Phi_{RES}/U)^2} \tag{8}$$

$$L_m = \frac{U}{\omega I_0} = \frac{L_{mc}}{\sqrt{1 + (\omega \Phi_{RES}/U)^2}} \tag{9}$$

综上所述,由于剩磁的存在,测量到的励磁电流有效值发生变化,进而导致励磁电感测量值变化;剩磁越大,测量值的误差越大。

4 结 语

通过试验发现,由于剩磁影响了变压器的电感分布而改变了其传递函数,因此基于变压绕组的频率响应,通过对一定扫频范围的频率响应进行对比,能准确地判断出变压器是否含有剩磁及剩磁含量的大小。进一步的研究可以通过大量试验,建立变压器剩磁含量与一定频率范围内幅频响应的准确关系。

参考文献

[1] 杜至刚. 中国特高压电网发展战略规划研究[D]. 济南:山东大学, 2008.

[2] 李光范, 王晓宁, 李鹏, 等. 1000 kV 特高压电力变压器绝缘水平及试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(3):1-6.

[3] 邢运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁心剩磁估量[J]. 电网技术, 2011, 35(2):169-172.

[4] 仇明. 大型变压器铁心剩磁的危害及消除方法[J]. 变压器, 2018(2):74-75.

[5] 余克光. 电力变压器铁心剩磁检测及消除[J]. 自动化应用, 2012(3):73-74.

[6] 胡海将. 变压器剩磁对启机的影响[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会年会论文集, 2013.

[7] 陈文臣, 雷晓燕, 王磊. 电力变压器铁心剩磁检测方法研究[J]. 陕西电力, 2009, 37(10):45-48.

[8] 刘勇, 陈凌, 李英锋, 等. 一种大型电力变压器剩磁检测方法:CN201510213548.9[D]. 2015-08-12.

[9] 张建军, 刘宏亮, 陈志勇, 等. 一种基于最小二乘法的

变压器铁心剩磁检测方法:CN201610382451.5[P]. 2016-11-09.

[10] 戈文祺. 电力变压器铁芯剩磁的仿真、测量与削弱[D]. 天津:河北工业大学, 2014.

[11] 周建平, 罗建, ZHOUIjian-ping, 等. 变压器铁心剩磁的一种估算方法[J]. 热力发电, 2010, 39(3):61-64.

[12] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16):10-16.

[13] 李钜, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19):37-41.

[14] 李景丽, 贺鹏威, 邱再森. 电力变压器铁心剩磁测量方法研究综述[J]. 高压电器, 2018(7):98-105.

[15] 梁汉城, 陈向胜, 苏全. 降低大型变压器铁心剩磁的方法和测试[J]. 电世界, 2013, 54(6):38-39.

作者简介:
谭志红(1966),工学博士,主要从事输变电设备运检管理、SF₆ 气体局部放电下分解组分研究等工作。
(收稿日期:2020-03-04)

(上接第 32 页)

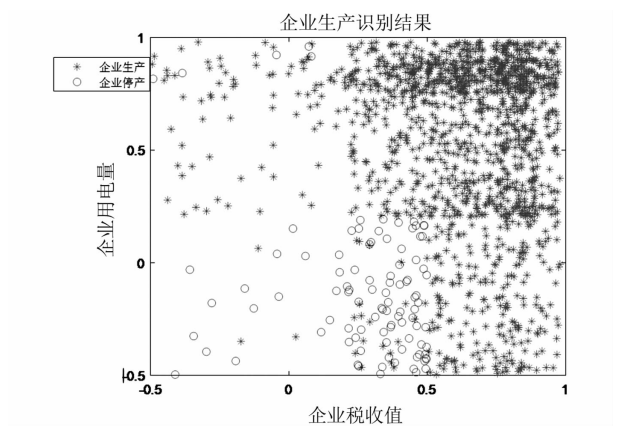


图8 企业生产状态识别结果

有 342 个,未进行异常和缺失值处理时,正确识别 1142 个,识别正确率为 76.13%,异常和缺失值回归处理提高企业生产状态识别率 22.8%。

表2 组合支持向量回归模型识别企业生产状态结果

输入数据	正确识别个数	正确识别率/%
回归处理后	1484	98.83
未回归处理	1142	76.13

4 结 语

提出了一种综合考虑企业用电和纳税信息的污

染企业生产状况识别方法。该识别方法考虑了实际应用过程中的数据部分病态的问题,采用回归分析,解决输入特征异常和部分缺失的问题,提高了分析结果鲁棒性;同时,通过网格搜索选择多个支持向量机组合模型识别污染企业生产状况,增加了模型的泛化能力,提高了分类精度。

参考文献

[1] 牛哲文,郭采珊,唐文虎,等. “互联网+智慧能源”的技术特征与发展路径[J]. 电力大数据, 2019, 22(5), 6-10.

[2] 杜若, 谢川, 吴群艳. 电力环保大数据平台开发及智能运用[J]. 电力大数据, 2017, 20(8):64-67.

[3] 罗勇智. “电力大数据+环保监管”助力蓝天保卫战[J]. 大众用电, 2019, 34(3):15-16.

[4] Nekkaa M, Boughaci D. A Memetic Algorithm with Support Vector Machine for Feature Selection and Classification[J]. Memetic Computing, 2015, 7(1):59-73.

[5] 周志华. 机器学习[J]. 航空港, 2018(2):94-94.

[6] Sebastian Raschka. Python Machine Learning[M]. Packt Publishing, 2014.

作者简介:
靳 旦(1995),助理工程师,主要从事大数据开发,数据分析与挖掘工作;
唐 伟(1990),工程师,主要从事大数据计算模式,存储和管理工作。

(收稿日期:2020-03-25)

基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统的设计与实现

段翔兮¹, 邹 琬², 高 剑², 李 熠², 杨紫苓³, 宋永娟³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网南充供电公司, 四川 南充 637000)

摘 要:在信息化、数字化、智能化的管理趋势下, 现有的监控仅仅通过文字告警信息进行判断处置的模式越来越不适应新的发展需要, 呈现管理效率低、智能化低等弊端。为推动变电站监控业务的改革发展, 设计了基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统。该系统基于 3D 模式通过 Unity3d 平台将变电站设备的位置与告警信号的关联关系及数据流向进行可视化展示, 不仅有助于监控人员掌握现场实际情况, 也有利于指导运维检修, 同时将为专业发展产生深远影响。

关键词:监控; 变电站; 信号; 3D 模型; 虚拟; Unity3d

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954 (2020) 03 - 0078 - 07

Design and Implementation of Monitoring Alarm Information Display System Based on Unity3d

Duan Xiangxi¹, Zou Wan², Gao Jian², Li Yi², Yang Ziling³, Song Yongjuan³

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

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: Under the current situation of information, data and intelligent management, the existing monitoring mode which only judges and disposes through the text alarm information is not suitable for the new development needs, which shows the disadvantages of low management efficiency and low intelligence. In order to promote the reform and development of substation monitoring business, a monitoring alarm information display system based on Unity3d is designed. The system visualizes the relationship between substation equipment posture, equipment and alarm signal and the data flow through Unity3d platform based on 3D mode, which is not only helpful for the monitor to master the actual situation on site, but also to guide the operation and maintenance, and will has a profound impact on industry development.

Key words: monitoring; substation; signal; 3D model; virtual; Unity3d

0 引 言

近年来,随着变电站设备数量和种类的增加以及变电站智能化和无人值守的发展趋势,传统的变电站也将逐步更新为新一代智能变电站^[1]。设备的信息共享、信息一体化、智能化管理变得越来越重要,而当前变电站的设备监控主要采用数据汇报的形式进行,存在告警展示方式不够形象、告警信号和设备分离等问题。当站端设备出现了问题,因缺乏设备具体 3D 位置^[2]、缺乏对告警信息流的了解,一般监控人员只能提供该设备的类型,对设备的故障

原因及数据流向不清楚,且存在基础数据收集过程复杂、信号点表版本众多等因人的主观性造成的编制误差、审查信息表耗时长等问题^[3]。以四川省某地区为例,该地区下辖 49 个变电站,仅一座 110 kV 变电站,就有近 1000 条信息,若按照传统监控方式,运行维护人员通过查询设备间隔内的所有光字牌获取设备状态,这样效率非常低^[4]。另外,较强的专业性和实践性也迫使监控人员需要在工作实践中积累丰富的经验^[5-6]。

针对传统告警展示方式不够形象、告警信号和设备分离、数据流向不明确的问题,提出了基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统。该系统将从监控系

统获取的数据植入,结合 3D 模型进行展示^[2];可以帮助监控人员了解告警信号触发的完整链路^[7];可以对设备的状态有直观了解,避免繁杂的数据分析和理解^[8];实现数据动态化管理,所有的变电站设备按照不同的电压等级进行模块化处理,不同电压等级的变电站只需要通过后台更新配置数据,即可达到系统更新的结果。

1 原理与系统架构

1.1 游戏引擎 Unity3d 作为核心平台

Unity3d 作为游戏开发平台,对图形图像、3D 模型、人机互动、跨平台运行都非常友好。Unity3d 作为前端系统,采用 WebGL 技术让系统在网页端在线运行系统,而无需进行安装配置环境。后端采用 Linux 作为服务平台,结合国产达梦数据库和 Java 作为逻辑平台,整体架构如图 1 所示。



图 1 项目架构设计

1.2 3D 可视化动态展示告警信号

用立体动画的方式全面展现变电站告警信号及其数据流。首先根据变电站的不同设备将信号分为 3 个层级,包括变电站总体信号、变电站间隔、设备组件等层级。当进入系统后,系统会提示收到的实时告警信号,告警信号附加在可视化设备上,且可以查看该层级的设备信号,并用不同色差突出显示不同的告警信息。同时系统可以切换实体和线框模

式,方便查看真实效果和透视结构,进一步了解设备结构。设备信号按照具体接点的电路结构和一、二次设备、控制设备形成的信号回路进行传播,如图 2 所示,并利用此原理将其进行 3D 模型和特效方式的展示。

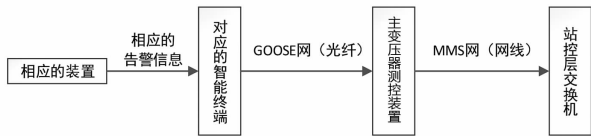


图 2 设备信号结构

最后将该信号产生的原因进行汇总,将产生的后果进行提示,并用动画形象展示。

1.3 GIS 地理位置信息全面展现地区内所有变电站信息

系统平台引入 Google 数据,在系统内进行整合,形成独立的地理系统^[9],即改造成适合于 Unity3d 的 OnLine Map 地图系统。系统生成每个变电站的具体经纬度,将经纬度通过 Google 远端 SDK 接口获取数据,并将根据经纬度给下载的贴图进行编号,Online Map 地图系统将从 Google 下载的地图转化成 png 贴图^[10],并按照横向和纵向即 X 、 Y 轴在 Unity3d 中的面片上贴图, $X = [X_1, X_2 \cdots X_n]$, $Y = [Y_1, Y_2 \cdots Y_n]$,贴图方式如图 3 所示^[11]。

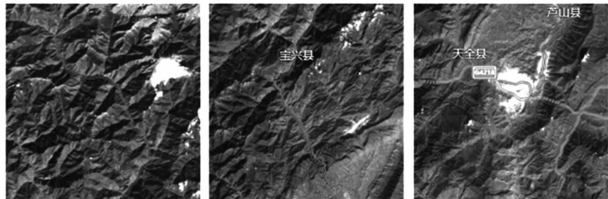


图 3 地图坐标

设 C 为最终得到的图, M 为每一块贴图,其贴图方式可以表达为

$$C = \begin{bmatrix} M_{0,0} & M_{1,0} \cdots & M_{x,0} \\ M_{0,1} & M_{1,1} \cdots & M_{x,1} \\ M_{0,y} & M_{1,y} \cdots & M_{x,y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当用户刷新切换坐标时, M 代表每一块贴图位置,如果向右下移,其地图进行相应位移,计算方式为

$$M = M_{x+1,y+1} \quad (2)$$

如果向左上移,其地图进行相应位移,计算方式为

$$M = M_{x-1,y-1} \quad (3)$$

图片按照二维数组方式排列,一个格子代表一张贴图位置,每张贴图就是一个面片,面片是一个 3D 模型,在上面具备材质贴图等属性,当动态检查

到下载的贴图时,从缓存中加载图片贴到相应的坐标位置。当鼠标移动到其他位置时,将重新计算地图经纬度,并下载更新的图片,然后重新进行贴图操作。变电站图标的方式是将设计好的变电站图标同变电站的经纬度匹配,并同目前界面上地图范围的区域具体位置匹配,然后将变电站图标放到相应位置。变电站图标集成改变电站的信息,并将图标添加 Collider 碰撞,当点击该图标时,就可以实现变电站主界面的跳转^[12]。

1.4 无缝对接传统平台和系统

数据信息的安全对于电网的安全稳定运行至关重要,所以该系统必须与传统系统紧密融合保证其在内部系统运行,并且将传统平台的数据引入系统。传统平台作为运行几十年的大数据库,已经包含每个变电站的设备点表以及管理团队配置等信息。目前电力系统均采用 Linux 系统作为服务器平台,数据库采用国产达梦数据库。所建系统通过数据库分析,将后台数据整合成设备表 EquipData、信号表 AlarmData、维护表 MainMatinData、模型表 ModelData、用户表 UserData、变电站表 SubstaionData 的数据,然后整合到原有服务;前端平台通过接口获取数据,并将数据对象化,根据数据的 ID 选择需要的数据。

1.5 设备模块化自由组合

变电站设备一般根据不同类型的和具体线路有特定编号,特别是二次设备,一般都是根据具体变电站而有不同的配置。配置的方式采用事先开发一个配置客户端,配置客户端对设备的组合进行编辑,系统首先对设备的组件模块进行定义,同时对设备的组合规律进行定义,设备的定义方法如图 4 所示。

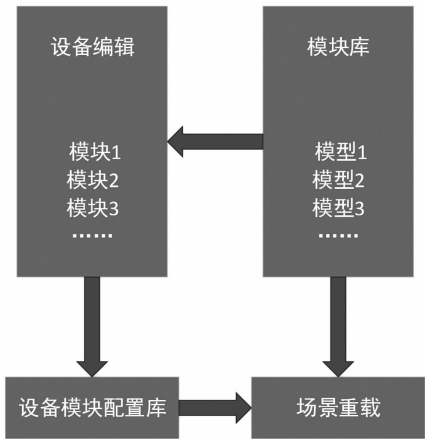


图4 设备模块的设计流程

用户从前端选择不同的模块,插入到设备的相应部位,然后将设备组合信息进行记录,并在数据库保存。使用时首先从数据库载入当前设备的组合数据,然后在场景中进行重现。

设物体空间用 T 表示, P 为设备位置点, R 为设备方向,在位置信息中 $x、y、z$ 分别表示横向、纵向、前后参数值;在方向信息中 $x、y、z$ 分别表示横向、纵向、前后方向的旋转值,它们之间关系为

$$T = \begin{cases} P(x,y,z) \\ R(x,y,z) \end{cases} \tag{4}$$

当设备进行组合时,物体组件 A 和物体 B 之间的位置关系为

$$f(P) = \frac{A_{\min} - B_{\max}}{2} \tag{5}$$

物体的角度采用欧拉角计算。欧拉角是用来唯一地确定定点转动刚体位置的 3 个一组独立角参量^[13],由章动角 θ 、进动角 ψ 和自转角 φ 组成。若令 $O_{x'y'z'}$ 的原始位置重合于 O_{xyz} ,经过相继绕 $O_z、ON$ 和 O_z 的 3 次转动 $Z(\psi)、N(\theta)、Z'(\varphi)$ 后,刚体将转到如图 5 所示的任意位置(见刚体定点转动)。

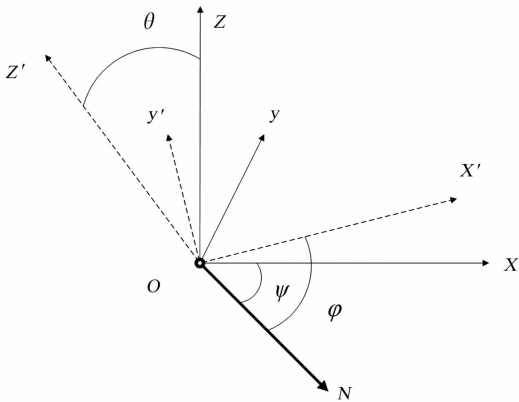


图5 模型中旋转示意

变换关系可写为

$$R(\psi,\theta,\varphi) = Z'(\varphi)N(\theta)Z(\varphi) \tag{6}$$

设定 xyz - 轴为参考系的参考轴。称 xy - 平面与 XY - 平面的相交为交点线,用英文字母 N 代表。如图 6 所示。

2 具体实施方案步骤

2.1 系统分析

设计目标是在国家电网大数据中心的基础上,充分利用Unity3d技术的直观性,构建新型配电管

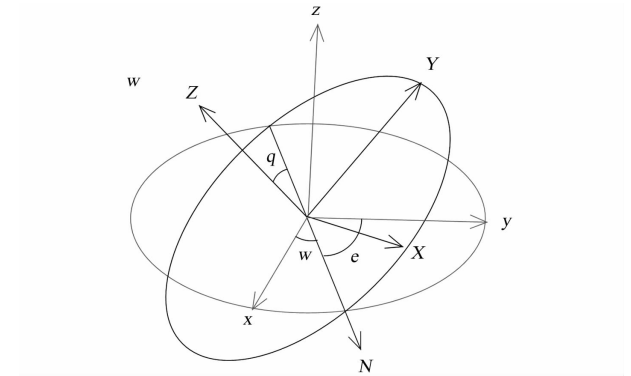


图 6 模型定位中使用的欧拉角度示意

理系统。设计时要求充分考虑实用性与行业管理特点,以达到功能需求目的,主要应遵循以下设计原则:

- 1) 标准化
本系统设计及其实施将严格按照国家和地方有关标准的规定进行。选用设备、产品和软件将完全符合行业标准与主流模式。系统采用的术语、分类、编码等的设置将完全符合或采用国家或行业标准。
- 2) 合理性
充分考虑系统的实用性,以提高工作效率、节省人力和各种资源为目标进行设计,避免过于冗杂的设计导致性能与经济性的负面效应。
功能设计充分考虑行业特点,使设计成果符合最终用户的操作习惯与行业标准,从而使系统结构、系统功能都具有良好的合理性。
- 3) 兼容性
系统结构遵循结构化、模块化的设计目标,具有良好的兼容性。既可使用不同主流厂商的设备产品,又可便捷地扩充使其能在其他系统厂商的设备产品上运行。

2.2 系统设计

- 系统功能整体规划如下:
- 1) 3D 展示系统:提供驱动图形显示的核心 3D 组件,提供将其他 3D 工具创建的模具进行整理导入接口。
变电站 GIS 展示:将用户权限范围内的变电站显示在地图上。变电站展示:提供变电站外观与内部结构的 3D 展示功能。设备展示:提供变电站设备的 3D 展示功能。告警展示:将所有设备异动情况,第三方平台告警信息集中展示,提供统一预警机制。
 - 2) 数据管理系统:提供用户、角色与权限管理

的功能。采用 netty 中间件技术,实时向前端系统发送消息。消息可以是报警信息,也可以是一个通知。接口服务中心采用 RESTful 风格的接口,以供足够权限的前端系统调用。

- 3) 美术资源加工:将从现场提取的设备资料进行加工,制作成 3D 模型并保存在数据库。
- 4) 数据库:包括基本数据、实时数据和美术资源数据,都是经过二次加工处理后的资源。
- 5) 数据处理系统:将变电站地理数据、设备美术资源、告警信息等进行数据分析加工,并存于数据库。系统的交互流程图如图 7 所示。

2.3 编码

- 1) MVC 编码模式
编码阶段采用 MVC 模式,将整个系统分为数据模型层、视图层、逻辑控制层。数据模型层将系统数据整理成 Ececl 文件,并分设为管理员类、角色类、GIS 信息类、设备基础类、设备模型类、信号基础类、实时信号类,使用管理类对数据进行统一管理。
- 2) 单例和多例结合
在界面的编写中,模块的功能也独立成不同的类。界面的通信采用单例模式让界面的互动在单独的类进行。控制类按照功能分成 3 级,分别是全站级、间隔级、设备级,分别设计 3 个不同的类。
- 3) Web 视频加载技术

动画功能采用 WebGLMovieTexture 视频纹理播放技术,具体方法是使用 Movie 类加载视频到内存,然后将内存数据图像化,最后将图形化的数据作为材质贴图附加在一个 Plane 对象上,这样 Plane 对象上就可以实时呈现动画图像。

2.4 模型和动画资源

独立的资源系统,将前端、逻辑、数据和资源单独管理。变电站设备图形资源包括模型、贴图、材质等,通过引擎自身的算法压缩成 AssetBundle 二进制数据包,然后放入数据资源库保存,并在运行过程中动态下载和解压加载到场景,同时将解压并加载到场景的资源附加互动代码,实现互动。AssetBundle 包分 PC 端和 Web 端两个平台,PC 平台用来开发过程的测试,Web 则是运行平台。AssetBundle 的使用原理是首先将各种设备模型资源在 Unity3d 中进行预处理,经材质和贴图以及模型的优化处理完毕,将模型放入一个空物体。空物体按照规范命名,如电压等级 + 间隔名称 + 设备名称规则^[14]。在空物

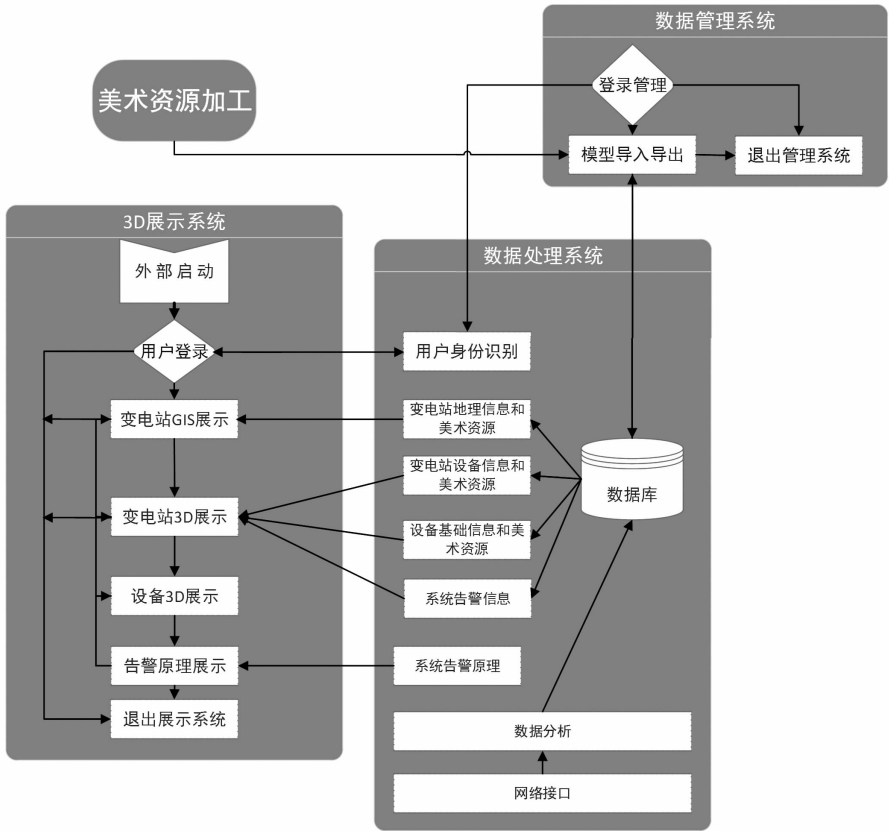


图 7 流程

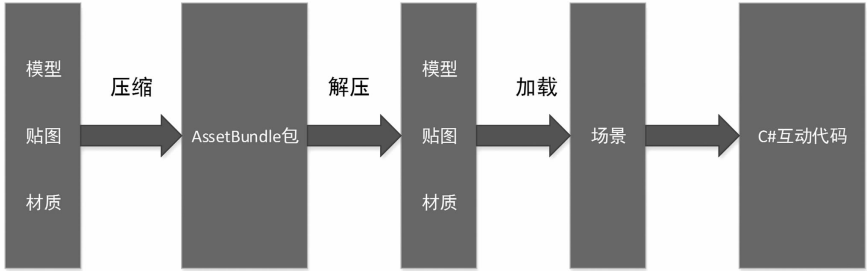


图 8 AsseBundle 压缩包的使用原理

体下建立一个目录,存放该设备同其他设备的连接信息,方便重新加载后动态将这些设备用线缆连接起来。在模型上添加 Collider,方便重新加载后处理。处理结束后使用打包程序将模型压缩成 Asset-Bundle 包,并存放在服务器指定目录。系统运行时根据服务端数据库设备信息,加载该模型,并解压然后实例化到场景中。最后,在该设备模型上添加用于控制的脚本,这样就完成了一个完整的资源处理流程,如图 8 所示。

通过资源包 ID 的办法,每一种设备对应一种资源包,每个资源包对应数据库模型数据,同一种设备可以反复使用同一个资源包,这样所有设备都具有通用性,整个系统资源库最后覆盖所有的变电站类

型,使该系统能推广到所有的行业进行使用^[14]。

2.5 测试

测试项目的时候为了方便,做了多平台的开发,包括编辑器端、PC 端、Web 端。3 个端使用不同的资源路径和资源格式,根据 Unity3d 的平台检测方法,选择不同的平台。

3 实施效果

经过前期一系列的测试,系统完成了预定目标,实现了如下功能。

3.1 用户后台管理

通过管理端,可以实现不同等级的权限,包括管

国网四川省电力公司 设备告警三维展示系统后台管理模块									
系统管理	变电站列表								
基础数据管理	新增	编辑	删除	刷新	导出				
变电站管理	变电站名称	变电站名称	坐标	电压等级	变电站类型	建设单位	代码	排序号	操作
间隔单元	338	变电站	220kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
设备	356	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
设备模型管理	357	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	358	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	359	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	360	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	361	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	362	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	363	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	364	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	365	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	366	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看
	367	变电站	35kV		国网四川省电力公司		10		修改 删除 查看

图 9 资源管理界面

理员、一级用户、二级用户、三级用户。不同用户权限查看不同等级的变电站范围。变电站资源实现后台管理,添加和删除都实现自动更新,如图 9 所示。

3.2 区域选择和变电站选择

根据用户权限的不同,加载的地图范围不同,并能随时切换不同的区域范围,然后进入相应的变电站进行查看,如图 10 所示。



图 10 GIS 变电站信息

3.3 实现全站模型的查看

进入变电站层级,系统开始初始化加载变电站模型数据,完成全站加载时间约 10 ~ 20 s。如图 11 所示。

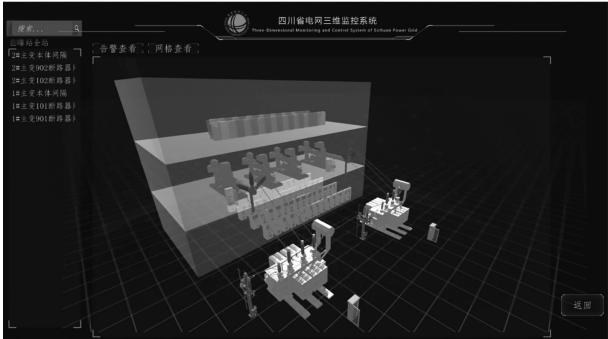


图 11 全站设备展示

3.4 模型显示模式

根据不同的需求,模型显示方式可以切换成线框或者实体模式,线框模式支持 PC 和 Web 平台,如

图 12 所示。

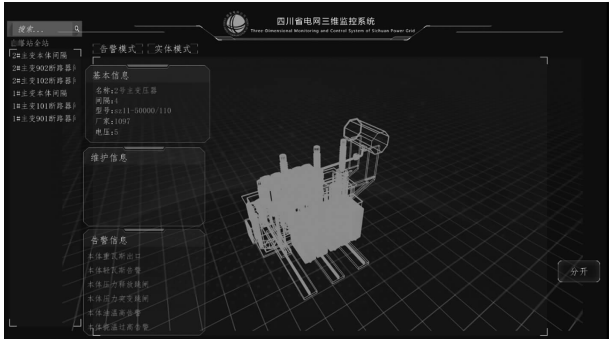


图 12 设备线框模式

3.5 模型的组合

完成了系统设备的动态组合,根据后台管理端的配置,加载不同的设备模型。

3.6 设备的预警

当有设备出现故障,设备会显示高亮提示,用户可以选择其中一个设备切换到设备级查看故障,如图 13 所示。

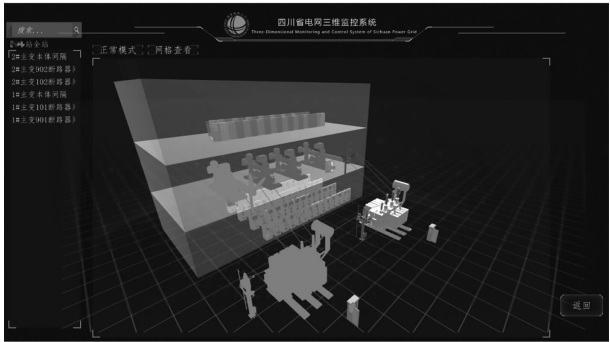


图 13 设备告警模式

3.7 设备的关联

实现设备组件和原理原因的关联,当选择故障设备时,用户可以看到其出现的故障,选择故障可以弹出其故障的原理和原因动画,并随时进行切换。

3.8 设备拆分查看

实现设备的拆分展示,在设备层用户可以使

用爆炸图的方式查看设备的主要组件结构,如图 14 所示。

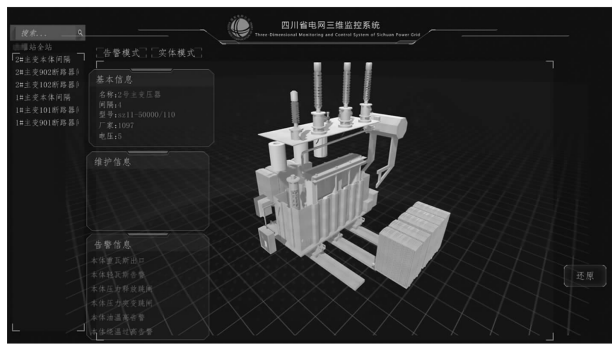


图 14 设备展开模式

3.9 实施效果分析

通过本项目实施,以主变压器的告警为例,从员工培训需要的周期、交流学习所需的时间、常规检查检修所花的时间(用小时计算)的效率进行分析,不难看出,本系统在常规管理和智能化管理基础上有了长足的提高。实施效果数据如表 1 所示,在使用常规管理方式进行培训、会议、检修分别花去 120 h、72 h、20 h,是非常消耗时间的。目前新建电站几乎抛弃这种方式,而采用智能方式进行管理,进行培训、会议和检修时分别花去 50 h、8 h 和 2 h,效率提高几倍,在这个基础上,使用本系统,进行这 3 项测试,效率又有 30% 以上的提高,项目实施效果明显。

表 1 实施效果数据 单位:h

管理方式	培训时间	会议时间	检修时间
常规管理	120	72	20
智能化	50	8	2
本系统	30	3	1.5

从上面分析可以看出,使用传统的常规管理是效率最低的方式,这种变电站逐步被智能变电站代替。智能电站虽然数据收集控制都比较方便,但由于信息量过大,也存在不直观、效率不高等问题。采用了 3D 模式的监控系统,整个系统的设备和信号完整链接在一起,在电力监控领域的使用也非常广泛,为监控领域的工作做出了明显的改进。

4 结 语

综上所述,所建系统解决了长期困扰整个行业的难题,其将生产、监控、培训的几个过程集为一体,同时也方便变电站系统内部进行汇报活动,达到了项目设计的初衷,将设备同故障信号关联提高了对变电站的管理效率。

参考文献

[1] 淡文国. 变电站自动化现状与改进[J]. 城市建设理论研究(电子版),2017(8):98.

[2] 梁雅莉,赵喜兰,马青,等. 电网调控一体化全维度培训仿真系统研究[J]. 机电信息,2018(3):120-121.

[3] 张伟渊,曹德发,陈诚伟. 浅谈调度监控信号的规范化设置[J]. 通讯世界,2019,26(10):223-224.

[4] 刘超,张旗,王家同,等. 变电站监控系统告警方式存在的问题及其对策[J]. 通信电源技术,2019,36(10):204-206.

[5] 李洪兵. 变电站监控系统在电力调度的应用探讨[J]. 科技创新与应用,2016(6):160.

[6] 李英,钱建国,方响,等. 基于大数据背景的集中监控辅助决策系统研究[J]. 浙江电力,2019,38(10):34-39.

[7] 郑晓丹,罗云霞,彭学虎,等. 虚实结合的仿真变电站实训平台建设[J]. 实验技术与管理,2019,36(12):201-205.

[8] 王晓卉,王慧楠. 智能变电站监控信息管理模式改进的探究[J]. 数字通信世界,2019(11):260-261.

[9] 王星捷,卫守林. 基于 WebGL 的三维 GIS 空间算法的研究与实现[J]. 计算机应用与软件,2019,36(4):63-68.

[10] 李卫东,刘银. 基于 Google Maps 的模拟飞行轨迹显示系统的设计与实现[J]. 中国民航飞行学院学报,2011,22(2):5-7.

[11] 张绍泽,任磊. Google Maps 在 Unity 中的可视化及交互方法[J]. 现代导航,2019,10(1):34-38.

[12] 杨静,周洁. 基于 Unity 3D 的微机组装实训平台的设计与实现[J]. 自动化技术与应用,2019,38(6):176-179.

[13] 戈洪瑶,郭仁春. 基于 Unity3D 的欧拉角实现对物体旋转的应用[J]. 湖北农机化,2019(13):119-121.

[14] 雷鸣,刘军,王国平,等. 沉浸式变电站设备监控培训仿真系统关键技术研究[J]. 电工技术,2019(15):63-65.

作者简介:

段翔兮(1991),博士研究生,主要研究方向为电力系统自动化、电力大数据;

邹 琬(1976),硕士,主要研究方向为电力系统电网设备运行分析、电力数据分析;

高 剑(1975),硕士,主要研究方向为电网运行技术研究;

李 熠(1981),硕士,主要研究方向为电力系统电网设备运行分析、电力大数据分析;

杨紫苓(1988),硕士,主要研究方向为电网监控运行技术研究;

宋永娟(1974),本科,主要从事电网调控运行技术研究。

(收稿日期:2020-01-15)

一种改进前推回代法的配电网潮流计算

张捷,徐焰,张学飞

(国网上海市电力公司市北供电公司,上海 200072)

摘要:随着电网规模日益扩大,对配电网的要求不断提高,配电网潮流计算成为当前研究热点之一。针对传统前推回代法的局限性进行了一些改进。首先,普通算法在进行迭代计算前必须按一定要求对节点进行编号,而改进算法通过形成3个矩阵能够省略该步骤;其次,将变压器负荷换算到高压侧可以使配电网变为简单的单线图,从而缩小系统规模;此外,用节点注入电流替代回代过程中的节点注入功率能省去支路损耗计算的时间;最后,通过PV节点的无功功率修正方程可以有效地处理含有PV节点的配电网,解决了原方法无法处理配电网系统中PV节点的问题。基于IEEE 33节点配电网系统和某含有PV节点的10 kV系统的对比算例表明所提方法的有效性和可行性。

关键词:配电系统;潮流计算;改进前推回代法;PV节点

中图分类号:TM744 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)03-0085-06

Power Flow Calculation of Distribution Network Based on An Improved Forward/Backward Substitution Method

Zhang Jie, Xu Yan, Zhang Xuefei

(State Grid Shanghai Shibei Electric Power Supply Company, Shanghai 200072, China)

Abstract: With the increasing scale of power system, the requirements for the distribution network are constantly increasing, and the power flow calculation of distribution network has become a hot research topic. Aiming at the limitations of the traditional forward/backward substitution method, some improvements are proposed. Firstly, the ordinary method must number the nodes according to the certain requirements before performing the iterative calculation, but the improved one can omit this step by forming three matrices. Secondly, converting the transformer load to the high voltage side can make the distribution network a simple one-line diagram, thereby reducing the system scale. In addition, replacing the node injection power with the node injection current can save the branch loss calculation time. Finally, the reactive power correction equation of PV node can effectively process the distribution network with PV nodes, which solves the problem that the original method can not handle the PV nodes in distribution network system. The validity and feasibility of the proposed method are verified by the comparative simulations on IEEE 33 bus distribution network system and a 10 kV system with PV nodes.

Key words: distribution system; power flow calculation; pre-back/forward method; PV node

0 引言

目前的配电网潮流计算方法主要有改进的牛顿-拉夫逊法^[1]、改进PQ解耦法^[2]、回路阻抗法^[3-4]、前推回代法^[5-7]等。牛顿-拉夫逊法及改进PQ解耦法由于其自身原理的缺点,直接应用于配电网潮流计算时,收敛性较差且计算误差大。回路阻抗法主要应用于处理环网结构,收敛性较好,但其节点和支路编号处理复杂且计算量大。针对配电网辐射状结构的特点,前推回代法是配电网潮流计

算最优算法之一,收敛性好且计算速度快。传统的前推回代法在计算前需要对网络的节点、支路进行预编号,可能导致计算错误,因此文献[5-6]提出了一种自动编号法,但该方法未考虑日益增加的分布式电源对配电网的影响。文献[7]指出传统前推回代法的无功功率取值可能与实际值出入较大,将导致计算误差增大影响迭代结果,因此需要将PV节点转化为PQ节点,然后对无功和电压方程进行处理;然而,将所有PV节点转化为PQ节点又会导致潮流计算收敛性变差。

因此,针对已有配电网潮流计算前推回代法的

不足,提出一种改进前推回代配电网潮流计算方法。该方法的贡献在于:提出节点自动编号方法,实现节点的正向遍历和反向遍历,提高计算速度;针对配电网的特殊结构,通过预处理消除近一半节点和支路,提升了算法计算效率;在前述节点自动编号法能区分出 PQ 节点、PV 节点和平衡节点的基础上,判断 PV 节点是否能转换为 PQ 节点,并进行相应的特殊处理。

1 配电网前推回代法潮流计算原理

各类配电网潮流算法性能通常从以下几个方面进行分析:

1)算法的收敛速度。改进的牛顿-拉夫逊法将非线性的方程通过一定变换转化为对相应线性方程的反复求解,且是二阶算法,具有平方收敛的特点,能在个位次数的迭代中迅速求解。

2)稳定性。在配电网中,电力系统网络结构、线路参数及各种扰动因素对计算结果影响的程度即为稳定性。由于牛顿拉夫逊算法是二阶算法,且受到配电网 R/X 比值较高的影响而无法输出准确的计算结果。而前推回代法受到的影响则很小。

3)算法的复杂程度。用简单原理的算法通常更可靠,由于前推回代法不需要计算节点导纳矩阵,其计算效率高。

综上所述,前推回代法的原理更符合实际配电网结构的要求,其处理环网结构方面的能力较弱;但配电网的主要特点就是运行时呈辐射状,因此并不会受到太大的影响。此外,该方法计算误差小、计算时间少,在系统异常时仍能保证输入有效结果,且收敛性能不会被配电网高 R/X 数值影响,目前已经广泛被用作计算配电网潮流的主要算法。针对已有方法的不足,下面做出了实用化的改进。

2 改进方法

以图 1 所示 10 kV 配电网系统为例介绍所提改进前推回代法的原理。图中,节点 7 为 PV 节点,各支路阻抗、节点负荷见表 1。针对普通前推回代法的不足进行的改进主要包括节点编号处理、迭代节点规模简化处理、PV 节点特殊处理 3 个部分。

2.1 节点编号的处理

首先,对节点进行分类,包括根节点、与根节点

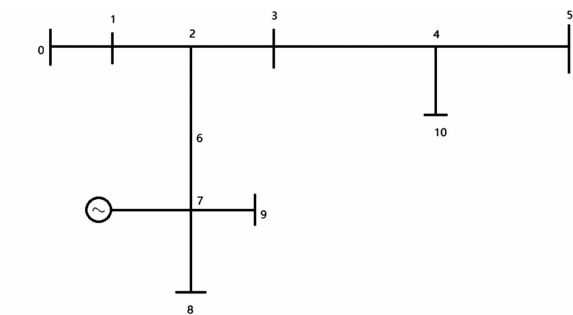


图 1 10 kV 配电网简化图

表 1 10 kV 配电网相关参数

父节点	子节点	支路阻抗		节点 j 负荷	
		R	X	P	Q
0	1	3.367	3.685	34.20	30.1
1	2	2.356	2.541	69.30	64.2
2	3	1.328	1.763	69.60	64.3
2	6	1.145	1.280	84.50	76.3
3	4	2.436	2.866	67.60	57.9
4	5	2.237	2.756	91.60	85.9
4	10	2.745	2.965	117.60	95.7
6	7(PV)	3.743	4.251	126.25	0.0
7(PV)	8	3.521	3.966	29.80	24.2
7(PV)	9	4.524	5.040	29.50	26.1

通过支路相连的子节点(根节点为该节点的父节点)、通过不同支路与不同的节点相连的兄弟节点。对节点遍历可形成一个数据表,该表记录了父节点的负荷、节点电压和节点类型(如 PQ 节点、PV 节点)以及其子节点(集)的负荷、节点电压、节点类型等信息和两点之间支路的相关参数(支路阻抗、支路电流或功率),如表 1 所示。由于前推回代法需要首先对节点进行编号才能开始运算,所改进方法能够实现配电网节点的自动编号。当处理节点较多的配电网时,能提高计算速度;当遇到复杂配电网时不必进行额外运算,能自动识别 PV 节点。

下面以图 1 所示系统进行说明。

首先根据表 1 生成 A 矩阵和 B 矩阵。其中, A 矩阵为 $a \times b$ 维矩阵, a 为网络最末端子节点(叶节点)数目,在该系统中为节点 5、8、9、10 四个节点,即 $a=4$;矩阵行表示从叶节点经过最短路径到达根节点所经过的节点号序列,形成的矩阵如表 2 所示。

B 矩阵为 $c \times d$ 维矩阵, c 为网络中节点数目, d 为网络中父节点拥有最多子节点的节点数,其中 d 为 2,形成的 B 矩阵如表 3 所示。

表 2 A 矩阵					
叶节点		经过节点			
5	4	3	2	1	0
8	7	6	2	1	0
9	7	6	2	1	0
10	4	3	2	1	0

表 3 B 矩阵		
节点	子节点	
0	1	-
1	2	-
2	3	6
3	4	-
4	5	10
5	-	-
6	7	-
7	8	9
8	-	-
9	-	-
10	-	-

其具体过程为:1) 根据表 1 的网络参数图依次生成 **A** 矩阵和 **B** 矩阵;2) 利用上述各矩阵配合传统前推回代法进行潮流计算,在计算过程中生成一个 $c \times 2$ 的矩阵,在运算完某一节点后自动将矩阵中对应的第 2 列标为 1,标 1 的节点将跳过计算,以避免同一个节点重复计算。

综上所述,通过节点自动编号提升了计算速度。

2.2 简化迭代节点的规模

针对配电网通常使用两绕组变压器,其拓扑结构可等效为一条支路。此外,为了配合目前已投入运行的线损计算程序,在实用化处理中,考虑参与迭代的节点只包含变压器支路的所有高压侧节点,而不包含低压侧节点。因此,相较于原方法,可减少近一半计算节点和计算支路,能提升计算效率。计算之前将变压器低压侧负荷换算成高压侧负荷,其换算公式为:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_0 \left(\frac{U_1}{U_N}\right)^2 + \Delta P_k \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{S_N^2}\right) \left(\frac{U_N}{U_1}\right)^2 \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_2 + \frac{I_0\%}{100} S_N \left(\frac{U_1}{U_N}\right)^2 + \frac{U_s\%}{100} S_N \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{S_N^2}\right) \left(\frac{U_N}{U_1}\right)^2 \quad (2)$$

$$U_x\% = \sqrt{(U_s\%)^2 - (U_t\%)^2} = \sqrt{(U_s\%)^2 - \left(\frac{\Delta P_k \times 100}{S_N}\right)^2} \quad (3)$$

式中: P_1 、 Q_1 分别为变压器高压侧的有功功率和无

功功率; P_2 、 Q_2 分别为变压器低压侧的有功功率和无功功率; ΔP_0 、 ΔP_k 分别为变压器铭牌参数表中的额定空载损耗和额定短路损耗; $I_0\%$ 、 $U_s\%$ 分别为空载电流百分比和短路电压百分比; U_1 、 U_N 和 S_N 分别为变压器高压侧的电压、额定电压和额定容量; $U_s\%$ 、 $U_t\%$ 分别为当变压器中的电流值正好等于额定电流值时,在电阻和电抗上的电压降百分比。

该实用化处理通过简单等效运算,将低压侧负荷换算到高压侧,大大减少了参与计算的节点数,加快了计算速度。此外,在算法回代过程中,将节点注入功率替换为节点注入电流,避免了在每次迭代时计算支路功率损耗,提升了计算速度。

2.3 PV 节点的特殊处理方法

由于传统的配电系统都是只有一个电源,呈辐射状分布,随着分布式电源 (distributed generation, DG) 技术飞速发展,分布式电源的接入会对传统的配电系统造成了一定的影响。针对此问题,目前主要的处理方法是将分布式电源视作 PV 节点,再将其与并联电容器简化等效为 PQ 节点,达到快速计算潮流的目的。

针对前述节点自动编号法能区分出 PQ 节点、PV 节点和平衡节点,提出采用一种特殊的处理 PV 节点的方法。该方法简洁且计算速度快,具有一定的工程意义。其特点是:当配电系统中出现多个电源共同供电时,先判断该 PV 节点是否能被视为 PQ 节点参与计算,或当其被视作 PQ 节点进行计算且误差在两个百分点内时,则无需用到 PV 节点特殊处理法;若不能视作 PQ 节点来进行计算,则进行 PV 节点的特殊处理。其具体步骤如下:

1) 设定 PV 节点电源的无功出力初始值为 0,使其转换为 PQ 节点。

2) 通过潮流计算求得 PV 节点所连上层双亲节点 (除平衡节点及根节点外,其他任一节点都可以找到其父节点) 的计算电压。

3) 根据图 2,由 PV 节点的双亲节点的计算电压、PV 节点与其父节点连接支路的阻抗、PV 节点的恒定电压及有功功率求得 PV 节点接入电源的无功出力的修正量为

$$Q_{PV} = \lambda (Q_2 - Q_d) = -\lambda \left(\frac{(U_{r1} - U_{r2}) U_2 + P_2 R}{x} + Q_d \right) \quad (4)$$

式中: λ 为计算步长, $-1 < \lambda < 1$,一般取值为 0.1;

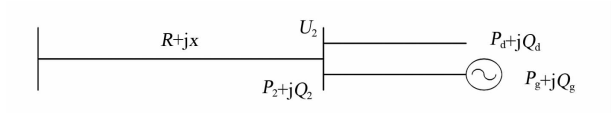


图2 PV节点无功功率迭代计算

Q_2 、 P_2 分别为PV节点的计算无功功率和有功功率； Q_d 为所有与PV节点连接的支路和节点的无功功率； U_{r1} 、 U_{r2} 分别为PV节点及其父节点的节点电压总分量； U_2 为PV节点的输入电压； R 、 x 分别为PV节点与其父节点之间支路上的阻抗。

4)若前推回代潮流计算收敛,则可得到PV节点的收敛无功;否则根据式(4)修正PV节点接入电源的无功出力,转步骤2)继续下次迭代计算。

3 仿真算例

将以10 kV系统和经典IEEE 33节点系统为例,分别计算前推回代算法和改进算法的潮流,通过对比两者的计算结果以验证改进算法的有效性和可行性。

3.1 IEEE 33节点系统仿真

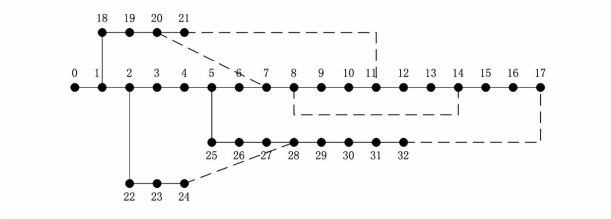


图3 IEEE 33节点系统

IEEE 33节点标准系统拓扑结构如图3所示,用Matlab仿真软件编程并进行潮流计算。分别以原方法与所提改进方法进行潮流计算,并给出网络电压分布与功率分布,其与实际结果的对比误差最大的前十和平均绝对误差值分别如表4—表9所示。

表4 IEEE 33电压误差(原方法)

节点 <i>i</i>	误差/%
16	2.01
17	2.01
15	1.91
14	1.87
13	1.78
32	1.76
12	1.73
24	1.70
31	1.67
11	1.61
平均绝对误差	1.17

表5 IEEE 33有功功率误差(原方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
3	4	-5.46
5	6	-2.98
4	5	-2.86
2	3	-2.78
1	2	-2.67
27	28	1.34
28	29	1.02
29	30	0.61
23	24	0.60
12	13	0.58
3	4	-5.46
平均绝对误差		0.8

表6 IEEE 33无功功率误差(原方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
3	4	-3.53
0	1	2.27
8	9	1.96
7	8	1.89
9	10	1.59
6	7	1.58
27	28	1.52
23	24	1.33
22	23	-1.25
12	13	1.15
3	4	-3.53
平均绝对误差		1.77

表7 IEEE 33电压误差(改进算法)

节点 <i>i</i>	误差/%
30	-0.06
31	-0.06
32	-0.06
28	-0.05
29	-0.05
9	-0.04
10	-0.04
11	-0.04
12	-0.04
13	-0.04
30	-0.06
平均绝对误差	0.02

表 8 IEEE 33 有功功率误差(改进算法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
1	2	2.67
2	3	-2.33
28	29	0.85
29	30	0.78
27	28	0.72
26	27	0.68
25	26	0.64
5	25	0.60
31	32	0.39
3	4	0.29
平均绝对误差		0.33

表 9 IEEE 33 无功功率误差(改进算法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
4	5	-1.70
2	22	-1.70
1	2	-1.66
6	7	1.60
31	32	-1.51
29	30	1.41
30	31	1.38
2	3	-1.34
3	4	-1.33
7	8	1.11
平均绝对误差		0.69

由表4—表6可知,用普通前推回代算法计算IEEE 33 节点系统潮流时,节点电压幅值的误差大部分在1%~3%之间,误差较大的位置集中在节点6到节点17之间的线路上;而功率的误差大部分发生在如节点1、节点2这类有2个以上的子节点的节点上。由表7—表9可知,用所提改进算法计算IEEE 33 节点系统潮流时,节点电压幅值的绝对平均误差为0.02%,远小于原方法的1.17%;有功功率分布的绝对平均误差为0.33%,略小于原方法的0.8%;节点电压幅值的绝对平均误差为0.69%,小于原方法的1.77%。因此,在计算相同配置网络下,所提方法具有更小的误差和更好的准确性。

3.2 10 kV 系统仿真

10 kV 系统以前述配置分别以原方法与所提改进方法进行潮流计算,并给出网络电压分布与功率分布,其与实际结果的对比误差最大的前十和平均

绝对误差值分别如表10—表16所示。

表 10 10 kV 系统电压误差(原方法)

节点 i	误差/%
0	0.00
1	0.94
2	3.13
3	4.08
4	2.09
5	3.48
6	5.39
7	4.62
8	2.79
9	5.61
10	3.62
平均绝对误差	3.25

表 11 10 kV 系统有功功率误差(原方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
0	1	34.44
1	2	27.29
2	3	40.66
2	6	-36.05
3	4	12.42
4	5	-39.78
4	10	1.27
6	7	-17.33
7	8	21.97
7	9	28.28
平均绝对误差		25.95

表 12 10 kV 系统无功功率误差(原方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
0	1	34.21
1	2	2.97
2	3	4.90
2	6	26.82
3	4	-97.38
4	5	-94.76
4	10	-194.08
6	7	100.00
7	8	24.73
7	9	31.26
平均绝对误差		61.11

表 13 10 kV 系统电压误差(改进方法)

节点 <i>i</i>	误差/%
0	0.00
1	1.05
2	1.45
3	1.11
4	-0.35
5	-0.28
6	2.13
7	1.63
8	-1.29
9	-0.47
10	-1.95
平均绝对误差	1.06

表 14 10 kV 系统有功功率误差(改进方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
0	1	3.57
1	2	2.34
2	3	5.28
2	6	-3.35
3	4	3.70
4	5	1.50
4	10	-3.75
6	7	2.51
7	8	-3.16
7	9	3.73
平均绝对误差		3.29

表 15 10 kV 系统无功功率误差(改进方法)

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	误差/%
0	1	2.45
1	2	-3.78
2	3	4.28
2	6	3.13
3	4	-1.40
4	5	2.51
4	10	3.50
6	7	-1.95
7	8	3.58
7	9	-2.72
平均绝对误差		2.93

由表 10—表 12 可知,对于用普通前推回代算法计算 10 kV 系统潮流时,由于系统中有 PV 节点的存在,有功功率的平均绝对误差达到了 25.95%,无功功率绝对误差达到了 61.11%。因此,原算法已失去计算的有效性和可行性,需要对 PV 进行相应的特殊处理。由表 13—表 15 可知,用所提方法计算 10 kV 系统潮流时,电压幅值、有功功率分布、无

功率分布的绝对平均误差分别为 1.06%、3.29%、2.93%,均在可接受范围内。综上所述,相较于原方法,所提方法不仅具有更好的准确性,特别地,对于存在 PV 节点的系统,所提方法具有较好的应用。

4 结 语

对已有配电网潮流算法从几个方面进行对比,从而得出前推回代法符合配电网要求、计算结果精确的结论。然后,针对传统前推回代算法仍存在的局限性进行分析,从 3 个方面进行实用化处理:通过生成 3 个特殊矩阵减少编号时间;简化参与计算节点的数量;对 PV 节点采用无功修正计算并将其转化为 PQ 节点来计算。最后,在 Matlab 下用两个算例进行对比,可知:在 IEEE 33 节点系统中,改进方法的误差明显减小;在 10 kV 系统中,PV 节点的处理能将误差控制在 ±3% 左右,比传统前推回代法的误差要小得多。因此,所提改进方法具有一定有效性和可行性。

参考文献

[1] 李伟,刘友仁,陈恳,等. 配电网潮流计算的实用算法[J]. 南昌大学学报(工科版),2011,33(3):303-306.

[2] 柳永妍,乐健,高鹏,等. 基于两点估计法的有源配电网概率潮流计算方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(5):1-8.

[3] 刘耀年,岂小梅,李国鹏,等. 基于回路阻抗法的配电网潮流计算[J]. 继电器,2004(8):8-10

[4] 艾鹏,张雪霞,王晓茹. 基于补偿算法改进的隐式 Z_{bus}(bus)高斯潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(21):67-72.

[5] 李欣然,李龙桂,童莹,等. 适用于多电源配电网潮流计算的前推回代方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(12):121-125.

[6] 张小敏,林群,吴旭光,等. 适用于低压配电网潮流计算的前推回代法[J]. 水电能源科学,2016,34(9):183-186.

[7] 闫丽梅,谢一冰,徐建军,等. 改进的前推回代法在含分布式电源配电网计算中的应用[J]. 西安交通大学学报,2013,47(6):117-123.

作者简介:

张 捷(1974),工程师,从事电网调控运行工作。

(收稿日期:2020-01-01)

接线错误对抽头式电流互感器变比影响分析

刘 刚¹,覃 剑¹,胡 娟²,艾 兵¹,何 娜¹,刘 鹄¹,张福州¹
(1. 国网四川省电力公司计量中心,四川 成都 610045;
2. 国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041)

摘 要:抽头式电流互感器二次绕组接线错误时有发生,其非工作抽头接入不同的负荷对工作绕组变比特性的影响规律尚未深入分析。采用理论分析和试验相结合的方式深入分析非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器变比特性的影响规律。结果表明,一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷呈正向线性关系,一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷呈反比关系。该结果可为非工作抽头接入下电流互感器的防窃电分析等提供技术参考。
关键词:抽头式;电流互感器;变比;负荷
中图分类号:TM452 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2020)03-0091-04

Analysis of Influence of Connection Error on Transformation Ratio of Tap Type Current Transformer

Liu Gang¹, Qin Jian¹, Hu Juan², Ai Bing¹, He Na¹, Liu Kun¹, Zhang Fuzhou¹
(1. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The connection error of secondary winding will seriously affect the transformation ratio characteristics of tap type current transformer. The influence regulation of different loads connected to the non-working connection on the transformation ratio of tap type current transformer has not been studied in depth, which leads to the inaccurate analysis on the changes of transformation ratio of tap type current transformer when the non-working connection is connected. Theoretical analysis and test are used to analyze the influence of different loads connected to non-working connections on the transformation ratio characteristics of tap type current transformer. The results show that the ratio of primary current to working winding current has a positive linear relationship with the load connected to the non-working connection, and the ratio of primary current to non-working winding current has an inverse relationship with the load connected to the non-working connection. The results can provide a technical reference for power stealing analysis of current transformer when the non-working connection is connected.
Key words: tap type; current transformer; transformation ratio; load

0 引 言

某专用变压器用户采用三相四线计量方式,运行中当一次负载功率达到200 kW时,A相二次电流和C相二次电流均约为2.4 A,而B相二次电流约为4 A。通过电能计量装置检测到的一次负载功率远小于实际一次负载功率,因此怀疑存在电能计量异常。经检查发现,该用户采用三相三元件组合互感器加三相四线电能表的计量方式,其中电流互感

器二次绕组采用抽头形式,电流变比有3个(二次绕组有 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 4个端子,其中 S_1 、 S_2 为工作绕组端子, S_3 、 S_4 为非工作绕组端子;电流变比分别为 $P_1P_2/S_1S_2=15:5$, $P_1P_2/S_1S_3=30:5$, $P_1P_2/S_1S_4=40:5$)。实际接线时将A相电流互感器二次绕组的 S_1S_2 接入电能表的A相电流,A相电流互感器二次绕组的 S_3S_4 接入电能表的C相电流,可见这是出现了将非工作绕组接入导致的接线错误,这种情况下如何进行变比分析及电量追补等经常困扰着现场技术人员。
目前,一些研究人员对抽头式电流互感器错误

接线导致变比错误进行了初步分析。文献[1]对抽头式电流互感器各抽头接入时的误差准确性进行了分析。文献[2]通过对多抽头电流互感器错误接线的分析,总结了防范多抽头电流互感器错误接线的方法。文献[3-4]分析了几种抽头式电流互感器二次错误接线对电能计量的影响。文献[5]分析了抽头式电流互感器其余绕组短接对继电保护的影响,并指出短接其余绕组将使保护装置不能正确动作。文献[6]讨论了多变比的电流互感器二次绕组非工作抽头误接线时对电能计量的影响。以上研究表明,非工作抽头接入将导致抽头式电流互感器的变比错误,影响其传变信号的准确性。由于现场实际情况复杂,非工作抽头接入时可能接入不同的二次负荷(以下简称负荷),非工作抽头接入对变比的具体影响规律如何以及非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响尚未进行深入分析。

采用理论分析和试验相结合的方式,从更普遍的角度即工作绕组和非工作绕组接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响进行分析,可为抽头式电流互感器的使用和电能计量异常分析等提供技术支撑。

1 接入负荷对变比影响的理论分析

以有3个电流变比(二次绕组有4个端子)的电流互感器为例进行分析,非工作绕组接头接入后的接线如图1所示,接入后将形成2个回路(分别流过电流 I_2 和 I_3)。

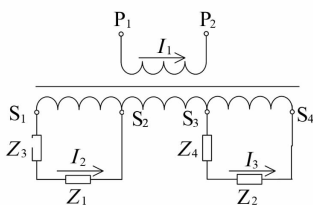


图1 无公共绕组接线

图1中: P_1 、 P_2 为电流互感器一次绕组端子; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为电流互感器二次绕组端子; Z_1 、 Z_2 为电流互感器二次绕组端子间的负荷; Z_3 、 Z_4 为电流互感器 I_2 和 I_3 支路的内阻抗。

根据电磁感应相关理论^[7],通过回路所包围面积的磁通量发生变化时,回路中产生的感生电动势

与磁通量对时间的变化率成正比,即有

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -N \frac{d(B_m \cos \omega t \cdot S)}{dt} \\ &= 2\pi f N S B_m \sin \omega t\end{aligned}\tag{1}$$

式中: f 为电流频率; N 为绕组匝数; B_m 为最大磁感应强度; S 为铁芯截面积。

感生电动势有效值可表示为

$$E = \frac{2\pi f N B_m S}{\sqrt{2}} = 4.44 f N B_m S\tag{2}$$

对于电流互感器各部分绕组的 f 、 B_m 和 S 均相同,可得各部分绕组感生电动势与绕组匝数 N 成正比,即有

$$\frac{E_2}{E_3} = \frac{N_2}{N_3}\tag{3}$$

式中: E_2 、 E_3 分别为 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 间的绕组感生电动势; N_2 、 N_3 分别为 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 间的绕组匝数。

根据电网络理论^[8],有:

$$E_2 = I_2 \cdot (Z_1 + Z_3)\tag{4}$$

$$E_3 = I_3 \cdot (Z_2 + Z_4)\tag{5}$$

由式(3)—式(5)可得

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{E_2 \cdot (Z_2 + Z_4)}{E_3 \cdot (Z_1 + Z_3)} = \frac{N_2}{N_3} \cdot \frac{Z_2 + Z_4}{Z_1 + Z_3}\tag{6}$$

由式(6)可知,二次回路各支路的电流与绕组匝数成正比,与回路的电阻成反比。当外接阻抗 Z_1 、 Z_2 等于0即抽头端子直接短接时,有

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{N_2}{N_3} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}\tag{7}$$

对于电流互感器,由于电磁感应,当一次绕组流过电流 I_1 时,在二次绕组中感应出电动势。在二次绕组外部回路接通的情况下,就有二次电流 I_2 、 I_3 流通。此时的一次磁动势为一次电流与一次绕组匝数 N_1 的乘积,二次电动势为各回路的二次电流与二次绕组匝数的乘积之代数和。根据磁动势平衡原则,一次磁动势除平衡二次磁动势外,还有极小的一部分用于铁芯励磁,产生励磁磁动势 $I_0 N_1$,来激发铁芯中的主磁通和补偿铁芯磁滞涡流损耗,因此可得此时的磁动势平衡方程式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 = I_0 N_1\tag{8}$$

由于 $I_0 \ll I_2$, $I_0 \ll I_3$,故式(8)可写为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 \approx 0\tag{9}$$

因此,若 S_1 — S_2 为工作绕组, S_3 、 S_4 为非工作绕

组抽头,则对于 S_1-S_2 ,此时电流互感器工作绕组的变比为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2 + \frac{N_3^2}{N_2} \cdot \frac{Z_1 + Z_3}{Z_2 + Z_4}}{N_1} \tag{10}$$

该值大于工作绕组的铭牌变比 N_2/N_1 ,仅当 N_3 为 0 即非工作绕组接头不接入时等于工作绕组的铭牌变比。

若 S_3-S_4 为工作绕组, S_1 、 S_2 为非工作绕组抽头,则对于 S_3-S_4 ,此时电流互感器的变比为

$$\frac{I_1}{I_3} = \frac{N_3 + \frac{N_2^2}{N_3} \cdot \frac{Z_2 + Z_4}{Z_1 + Z_3}}{N_1} \tag{11}$$

同样可得,该值大于工作绕组的铭牌变比 N_3/N_1 ,仅当 N_2 为 0 即非工作绕组接头不接入时等于工作绕组的铭牌变比。由式(10)和式(11)可知,一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成正向线性关系,一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成反比关系。

2 接入负荷对变比影响的试验分析

以多电流变比(具有多个抽头)的标准电流互感器为试验对象,开展非工作抽头接入不同负荷情况下电流互感器一次电流及工作绕组和非工作绕组二次电流测试。测试分成两种情况,即工作绕组和非工作绕组有公共绕组和无公共绕组。首先依据《测量用电流互感器检定规程》(JJG 313 - 2010)^[9],对标准电流互感器的电流变比进行测试,电流变比分别为: $P_1P_2/S_1S_2 = 15:5$, $P_1P_2/S_3S_4 = 10:5$, $P_1P_2/S_1S_3 = 30:5$, $P_1P_2/S_2S_4 = 25:5$ 。

1) 无公共绕组

工作绕组和非工作绕组无公共绕组时的试验接线如图 1 所示,负荷 Z_1 和 Z_2 分别接在电流互感器二次绕组端子 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 间。分别以 S_1 、 S_2 为工作绕组的两个端子, S_3 、 S_4 为非工作绕组的两个端子和 S_3 、 S_4 为工作绕组的两个端子, S_1 、 S_2 为非工作绕组的两个端子进行试验分析。负荷变化分为两种情况,如表 1 所示,分别保持 Z_1 或 Z_2 不变,改变 Z_2 或 Z_1 。一次电流分别与工作绕组电流和非工作绕组电流的比值如图 2 所示。

从图 2 可以看出,当 S_1-S_2 为工作绕组时,保

表 1 负荷改变情况

Z ₂ 改变		Z ₁ 改变	
Z ₁ /Ω	Z ₂ /Ω	Z ₁ /Ω	Z ₂ /Ω
0	0	0	0
0	0.5	0.5	0
0	1.0	1.0	0
0	2.0	2.0	0

注:负荷的功率因数为 0.8。

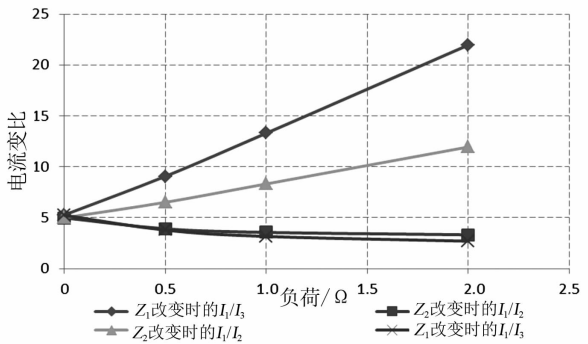


图 2 无公共绕组下电流变比与负荷关系

持 Z_1 不变,随着负荷 Z_2 增加,工作绕组 S_1-S_2 支路电流 I_2 增大,非工作绕组 S_3-S_4 支路电流 I_3 减小。其原因是各支路的感生电动势不变,负荷 Z_2 增加,则 I_3 将减小,根据式(9)及 I_1 不变可知, I_2 将增加。同理可知,当 S_3-S_4 为工作绕组时, Z_2 不变,随着负荷 Z_1 增加, S_1-S_2 支路电流 I_2 减小, S_3-S_4 支路电流 I_3 增大。 Z_1 和 Z_2 均为 0 时,电流变比均为 5 左右,大于各自作为工作绕组时的铭牌变比 3 和 2。

将一次电流与工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = ax + b$ 进行拟合,一次电流与非工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = a/(x + b) + c$ 进行拟合,拟合参数如表 2 所示,可见,具有较好的拟合优度,与理论分析吻合。

表 2 无公共绕组拟合参数

曲线	a	b	c	R ²
Z ₂ 改变时的 I ₁ /I ₃	8.383 5	5.064 9		0.999
Z ₂ 改变时的 I ₁ /I ₂	3.502 8	4.881 3		0.999
Z ₁ 改变时的 I ₁ /I ₂	1.536 6	0.387 1	2.050 7	0.949
Z ₁ 改变时的 I ₁ /I ₃	0.669 3	0.253 0	3.023 9	0.917

2) 有公共绕组

工作绕组和非工作绕组有公共绕组时的试验接线如图 3 所示,图中: P_1 、 P_2 为电流互感器一次绕组端子; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为电流互感器二次绕组端子; Z_1 、 Z_2 为电流互感器二次绕组端子间的负荷。负荷 Z_1

和 Z_2 分别接在电流互感器二次绕组端子 S_1 、 S_3 和 S_2 、 S_4 间,分别以 S_1 、 S_3 为工作绕组的两个端子, S_2 、 S_4 为非工作绕组的两个端子和 S_2 、 S_4 为工作绕组的两个端子, S_1 、 S_3 为非工作绕组的两个端子进行试验分析。负荷变化情况如表 1 所示。一次电流分别与工作绕组电流和非工作绕组电流的比值如图 4 所示。

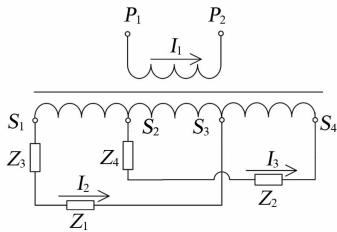


图 3 有公共绕组接线

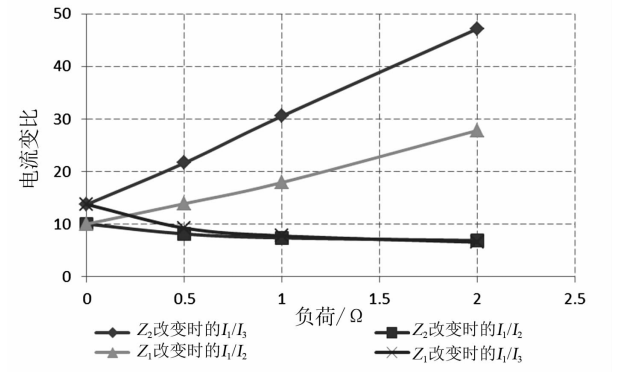


图 4 有公共绕组下电流变比与负荷关系

对比图 2 和图 4 可以看出,工作绕组和非工作绕组在无公共绕组和有公共绕组情况下,电流变比随负荷变化具有相似的变化规律,即工作绕组支路电流随非工作绕组接入负荷的增加而增大,而非工作绕组支路电流随非工作绕组接入负荷的增加而减小。从图 2 可知, Z_1 和 Z_2 均为 0 时,各绕组的电流变比已超过 10,均大于各自作为工作绕组时的铭牌变比 6 和 5。

同样将一次电流与工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = ax + b$ 进行拟合,一次电流与非工作绕组电流的比值与变化负荷值的关系用 $y = a/(x + b) + c$ 进行拟合,如表 3 所示,可见,具有较好的拟合优度,与理论分析吻合。

表 3 有公共绕组拟合参数

曲线	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
<i>Z</i> ₂ 改变时的 <i>I</i> ₁ / <i>I</i> ₃	16.782 0	13.589 0		0.999
<i>Z</i> ₂ 改变时的 <i>I</i> ₁ / <i>I</i> ₂	8.935 8	9.598 6		0.996
<i>Z</i> ₁ 改变时的 <i>I</i> ₁ / <i>I</i> ₂	4.611 1	0.515 5	4.724 1	0.999
<i>Z</i> ₁ 改变时的 <i>I</i> ₁ / <i>I</i> ₃	1.547 7	0.303 9	6.211 4	0.914

对于该三相组合互感器,当一次负载功率达到 200 kW 时,可根据计算得到各相的一次电流约为 12 A,由于此时工作绕组和非工作绕组所接外加阻抗接近于 0,根据理论和试验分析可知,此时 A 相电流互感器 S_1 — S_2 和 S_3 — S_4 的对应变比均约为 5,可得到二次电流约为 2.4 A,与错误接线方式下测量的二次电流值吻合。

3 结 语

对非工作抽头接入不同的负荷对抽头式电流互感器工作绕组变比的影响进行了理论和试验分析,得到结论为:抽头式电流互感器一次电流与工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成正向线性关系;一次电流与非工作绕组电流的比值同非工作抽头接入的负荷成反比关系。对非工作抽头接入导致的变比错误进行了有效解释,可为窃电分析等提供参考。

参考文献

[1] 李丽娟,邵强. 电流互感器二次绕组多个抽头技术性能分析[J]. 大连民族学院学报,2003,5(3): 26-28.

[2] 周海涛. 一起多抽头电流互感器错误接线故障引发的思考[J]. 宁夏电力,2010,40(增刊): 126-128.

[3] 杜卫华,周虹,陈海宾,等. 抽头式电流互感器二次错接线对电能计量的影响[J]. 华东电力,2008,36(12): 145-147.

[4] 周仲祁,许兴祥. 多抽头式电流互感器二次错误接线引起的计量差错分析[J]. 青海电力,2011,30(4): 40-42.

[5] 唐海平. 多抽头电流互感器的使用[J]. 继电器,2004,32(3): 69-70.

[6] 李宇牧,祝小红. 多抽头式电流互感器二次误接线对计量的影响[J]. 湖北电力,2008,32(增刊): 41-43.

[7] 冯慈璋. 电磁场(电工原理 II)[M]. 北京:人民教育出版社,1979.

[8] 周庭阳,张红岩. 电网络理论[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[9] 国家质量监督检验检疫总局. 测量用电流互感器检定规程:JJG 313-2010[S]. 北京:中国计量出版社,2010.

作者简介:

刘 刚(1983),博士,高级工程师,研究方向为电气设备计量及高电压测试技术。(收稿日期:2020-03-02)