

《四川电力技术》
编辑委员会

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

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2019年第42卷第2期(总260期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 纓

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街16号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得文化传播有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数]CN51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*3000*18*

2019-4

目 次

· 新能源技术 ·

基于图像识别的叶片结冰检测方法研究

..... 孙 凯,张新燕,常喜强,周登钰,李振恩,罗嘉良(1)

基于弃风-热的采暖负荷的联合调度补偿方法研究

..... 樊国伟,樊国旗,蔺 红,张 锋,刘德福,宋朋飞,亢朋朋,王 飞(6)

· 电网技术 ·

一种抑制超低频振荡的水电机组调速器参数协调优化方法研究

..... 王渝红,陈 阳,曾 琦,王 媛,李 建,王 彪,韩连山(10)

基于PSASP的UPFC自定义模型在西南电网的应用仿真

..... 韩连山,王新宝,李 建,王 彪(15)

基于无功电流的中性点不接地系统小电流接地选线方案

..... 李世龙,滕予非,李小鹏,张华杰,张星海,姜振超(20)

基于B样条二进小波变换的故障选相研究

..... 李 晨,张 阔(24)

基于系统可靠性的主动配电网置信容量评估

..... 陈 谦,张文涛,王思露,张景瑞,张 伟(30)

· 高电压技术 ·

基于极化去极化电流法的冲击电容器油膜绝缘老化检测..... 谭思文,张晨萌(36)

基于有限元法的IGBT模块复合材料等效导热率计算研究

..... 张嵩方,罗 锦,陈映秀,吴建雪,李 月,江 浩(41)

某110kV变电站35kV侧相间故障分析及治理措施研究

..... 方 欣,李晓东,罗维斯,崔 涛(47)

基于变电站汽吊作业安全距离告警系统研发..... 赵文君,施 逸,梁植淇,王宇翔(52)

· 设计与优化 ·

小水电站流域径流量的评估方法

..... 曾思明,吴杰康,陈永进,赵俊浩,翁兴航(56)

工业园区混合能源优化配置方法应用与实践..... 马 超,夏 雪,谯 宗,李嘉逸(62)

站用变压器用电流互感器变比选择研究..... 高 松,何立新,胡德峰,王亚莉(68)

现代飞机发电系统及差动保护误动的机理分析与优化策略

..... 李 红,邓乐武,吕 素,罗 强(73)

· 电力经济分析 ·

电网直购电极限规模及评估指标体系研究

..... 王正风,吴 旭,陈 实,宋云亭,陈得治,张 晨(80)

印尼电力能源建设投资环境PEST分析..... 李 洁(86)

基于AHP-FCM的热电联产投资风险评估..... 邱金鹏(91)

CONTENTS

• New Energy Technology •

Research on Blade Icing Detection Method Based on Image Recognition

..... Sun Kai, Zhang Xinyan, Chang Xiqiang, Zhou Dengyu, Li Zhenen, Luo Jialiang (1)

Research on Joint Dispatching Compensation Method Based on Heating Load of Wind Power Curtailment

..... Fan Guowei, Fan Guoqi, Lin Hong, Zhang Feng, Liu Defu, Song Pengfei, Kang Pengpeng, Wang Fei (6)

• Power System Technology •

Research on Governor Parameter Coordinated Optimization to Suppress ULFO for Hydraulic Turbine

..... Wang Yuhong, Chen Yang, Zeng Qi, Wang Yuan, Li Jian, Wang Biao, Han Lianshan (10)

Application Simulation of Unified Power Flow Controller Model in Transmission Lines between Sichuan – Chongqing Province Based on PSASP

..... Han Lianshan, Wang Xinbao, Li Jian, Wang Biao (15)

A Novel Fault Line Selection Scheme for Isolated Neutral System When Single – phase Short Circuit faults Occur Based on Reactive Current

..... Li Shilong, Teng Yufe, Li Xiaopeng, Zhang Huajie, Zhang Xinghai, Jiang Zhenchao (20)

Research of Fault Phase Selection with Dyadic B – spline Wavelet Transform Li Chen, Zhang Kuo (24)

Credible Capacity Evaluation of Active Distribution Network Based on System Reliability

..... Chen Qian, Zhang Wentao, Wang Silu, Zhang Jingrui, Zhang Wei (30)

• High Voltage Technology •

Aging Detection of Oil Film Insulation for Surge Capacitor Based on Polarization – depolarization Current Method Tan Siwen, Zhang Chenmeng (36)

Research on Calculation Method for Equivalent Thermal Conductivity of Polymeric Composites of IGBT Modules Based on Finite Element Method

..... Zhang Rufang, Luo Jin, Chen Yingxiu, Wu Jianxue, Li Yue, Jiang Hao (41)

Analysis of Phase – to – phase Fault in 35 kV Side of a 110 kV Substation and Its Treatment Measures

..... Fang Xin, Li Xiaodong, Luo Weisi, Cui Tao (47)

Research and Development of Safety Distance Warning System Based on Substation Steam Crane Operation

..... Zhao Wenjun, Shi Yi, Liang Zhiqi, Wang Yuxiang (52)

• Design and Optimization •

Evaluation Method for Watershed Runoff of Small Hydropower Stations Zeng Siming, Wu Jiekang, Chen Yongjin, Zhao Junhao, Weng Xinghang (56)

Application and Practice of Optimal Configuration Method of Hybrid Energy in Industrial Park Ma Chao, Xia Xue, Qiao Zong, Li Jiayi (62)

Research on Transformation Ratio Selection of Current Transfer for Auxiliary Transformer Gao Song, He Lixin, Hu Defeng, Wang Yali (68)

Analysis and Optimization Strategy of Power Generation System and Differential Protection in Modern Aircraft

..... Li Hong, Deng Lewu, Lv Su, Luo Qiang (73)

• Electricity Economics Analysis •

Research on Upper Limit and Evaluation Indices of Direct Power Purchase

..... Wang Zhengfeng, Wu Xu, Chen Shi, Song Yunting, Chen Dezhi, Zhang Chen (80)

PEST Analysis on Investment Environment of Indonesia Power Energy Construction Li Jie (86)

Investment Risk Assessment of Co – generation Based on AHP – FCM Qiu Jinpeng (91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2019 Vol. 42 No. 2

(Ser. No. 260)

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

基于图像识别的叶片结冰检测方法研究

孙 凯¹,张新燕¹,常喜强²,周登钰¹,李振恩¹,罗嘉良¹

(1. 新疆大学电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047;2. 国网乌鲁木齐供电公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:随着化石燃料的大量消耗,环境污染严重,清洁、环保的可再生能源发电渗透率持续提升,寒冷地区风电场建设规模不断扩大,将导致叶片结冰,严重会导致叶片断裂,因此有必要对叶片结冰识别进行深入研究。通过分析现有的叶片结冰检测方法,基于图像识别,通过改进 Canny 算法与显著物识别算法结合,将图像的边缘像素识别出来,然后计算每一个点的像素梯度,利用灰度值分割法确定最优阈值,再进行显著物的识别,对叶片结冰图像识别进行研究。研究表明叶片结冰图像识别高效可靠,可以有助于对叶片进行除冰,确保风电机组安全可靠的运行。

关键词:风电机组;叶片结冰;图像识别;边缘检测

中图分类号:TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0001-05

Research on Blade Icing Detection Method Based on Image Recognition

Sun Kai¹, Zhang Xinyan¹, Chang Xiqiang², Zhou Dengyu¹, Li Zhenen¹, Luo Jialiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xijiang, China;
2. State Grid Urumqi Electric Power Supply Company, Urumqi 830011, Xijiang, China)

Abstract: With the consumption of fossil fuels, environmental pollution is serious, the permeability of clean and environmental protection renewable energy power generation continues to increase. And with the expansion of wind farm construction in cold areas, it will lead to blade icing, which will seriously lead to blade breakage. Therefore, it is necessary to study the blade icing recognition. Based on the analysis of the existing blade icing detection methods, the edge pixels of the image are recognized by combining the improved Canny algorithm with the salient recognition algorithm, and the pixel gradient of each point is calculated. The optimal threshold is determined by using gray value segmentation method, and after the significant recognition is carried out, the recognition of icing image of the blade is studied. The research shows that the image recognition of blade icing has a high efficiency and reliability, which can help the blade deicing and ensure the safe and reliable operation of wind turbines.

Key words: wind turbines ;blade icing; image recognition; edge detection

0 引 言

近几年风力发电发展迅速,大多都建在高原寒冷的山区和潮湿的地区,因此风力发电机组面临着叶片覆冰的考验。结冰是水蒸汽凝结在叶片表面形成的水滴,由于温度低于冰点而在叶片上凝结成冰晶的过程。叶片结冰后对机组主要会造成如下影响^[1-4]:升力系数下降,导致风能利用率 C_p 降低,造成发电量的损失;阻力系数增加,导致传动链轴向载

基金项目:国家自然科学基金项目(51667018)

荷过大,可能造成机舱加速度超限;叶片质量增加,轮毂转矩增大,影响叶根处疲劳寿命;叶轮气动、质量不平衡。

目前风电机组叶片结冰成了阻碍风能发展的重要因素,大大降低了机组的利用率,严重威胁风电机组的安全运行。如何准确识别风电机组叶片结冰问题也就具有重大的现实意义。文献[5]监测叶片的振动模态信号,并提取叶片状态信息分析结冰状况,但无线信号在强电磁干扰中不稳定性极高。文献[6]通过叶片的曲率模态,提取并判断风机叶片覆冰参数特征值。文献[7-9]都是设计结冰传感器并进

行应用,但存在传感器与叶片结冰不同步现象。

提出一种采用边缘检测算法和显著物识别算法构建视频的叶片结冰检测系统的方法。基于机器视觉技术,通过摄像头对于风机叶片进行实时检测,一旦发现叶片出现结冰则可以启动相应的除冰设备或向中央控制系统发出警告,当系统检测到叶片结冰现象消失后则可以重新启动风机,在确保风机安全运行的情况下减少因为叶片结冰停机而导致的经济损失。

基于机器视觉的叶片结冰图像识别是一种直接测量叶片结冰的模式。并且由于摄像头的技术发展,在夜间通过红外补光灯也可以获取相对准确的图像资料。一般的结冰传感器,只能判断是否结冰。基于视频的叶片结冰监测系统,不仅能够判断是否结冰,而且能估算出结冰的具体区域。同时,在冰融化后该系统会自动重启风机,减少了不必要的停机时间,有效增加了风机的发电量。

1 风机叶片结冰和检测方法分析

1.1 叶片结冰背景分析

在冬季调查的 600 个风场样本中,出现叶片结冰的风场样本总数为 268 个,无一解决结冰监测和除冰问题。各机型具体分布见表 1。从发电量损失维度来说,在调查样本中,因叶片结冰故障导致的发电量损失约 75 648 621. 93 kWh (此数字为接入 SCADA 数据计算所得),主要集中在新疆、华北片区 1.5 MW、2.0 MW 机组。

从单次结冰故障平均时长维度统计,其结果见图 1 所示。

1.2 现有叶片结冰检测方法分析

现有的叶片覆冰检测方法主要有:

1) 风功率不匹配算法,是通过对预测功率与实际功率进行对比。由于其他原因出现风功率不匹配

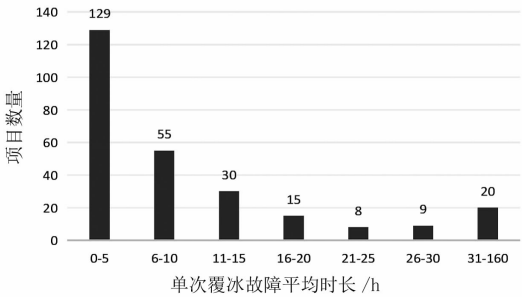


图 1 单次结冰时长对应样本数

而误启动叶片除冰程序则会对叶片产生一定损伤,并且无法及时监测除冰情况。

2) 机舱式结冰传感器监测,属于相对监测,结冰传感器结冰即认为叶片就结冰,这就造成了叶片和结冰传感器结冰状态可能不同,影响叶片结冰判断。

3) 叶片式结冰传感器一般安装在叶片上,结冰感应区域就是叶片结冰区域。叶片式结冰传感器如果需要监测大片区域则需要被大量部署,意味着成本急剧提升,并且由于叶片式结冰传感器通常贴在叶片上,能否长期稳定运行也存在一定问题。

基于现实情况及其他除冰方式的缺陷,提出一种直接观测式的叶片结冰监测,系统通过使用摄像机在短间隔下不断拍摄一定时长的视频采集叶片图像信息;利用图像识别技术监测叶片情况,如果发现叶片出现结冰则启动除冰系统,根据相应的叶片除冰系统算法不断触发除冰过程并不断监测。

2 基于图像识别的结冰算法

2.1 算法设计建模与流程图

所提算法主要是改进了识别流程图判断部分,通过改进 Canny 算法和 HED (holistically – nested edge detection) 显著物检测算法相结合,使得检测更加准确。算法设计流程见图 2。

2.1.1 改进 Canny 算法边缘检测

首先采用高斯函数构成滤波器,对采集图像进行

表 1 各机型结冰分布

机型	涉及项目数量	涉及机组台数	各片区数量						
			西北	华中	华南	宁夏	东北	华北	新疆
1.5 MW	246	9037	7	15	22	30	38	45	89
2.0 MW	18	555	0	6	3	5	1	2	1
2.5 MW	4	35	1	0	1	0	0	2	0
汇总	268	9627	8	21	26	35	39	49	90

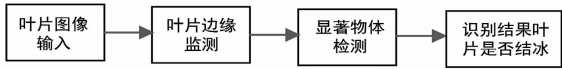


图 2 算法设计流程

平滑滤波,其中 σ 为标准差。Canny 算子检测边缘的实质是求信号函数的极大值来判定图像边缘像素点。为了实现边缘像素提取,首先通过 Canny 算子计算统计平均值,使图像像素的高斯分布趋于平衡。对图像滤波窗口采样 5×5 区域,计算此区域的均值,并与所有像素点进行比较。采用定义域 $G(x,y)$ 对图像进行平滑滤波,函数公式如式(1)。

$$G(x,y)=\sum_{x-m}^{x+m}\sum_{y-m}^{y+m}\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right]\quad (1)$$

式中, $m=(n-1)/2,n$ 表示高斯滤波窗口大小。

边缘检测算法主要是利用图像强度的一阶和二阶导数。导数通常对噪声很敏感,因此必须要采用滤波来改善与噪声有关的边缘检测性能^[10-12]。经过增强的图像,往往区域中有许多点的梯度值比较大,而在特定的应用中,这些点并不是要找的边缘点,所以应对这些点进行取舍,常通过阈值化方法来检测。计算梯度幅值 ∇G 和方向 θ 为

$$\nabla G=\sqrt{G_x^2+G_y^2}\quad (2)$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)\quad (3)$$

梯度方向近似到可能角度(一般为 0° 、 45° 、 90° 、 135°)之后进行非极大值抑制。这样能够排除非边缘像素,只保留了一些细线条(待选边缘)。其次,Canny 使用了滞后阈值,滞后阈值需要高阈值和低阈值:如果某一位置像素点的幅值超过高阈值,则该像素被保留为边缘像素;如果某一位置像素点的幅值小于低阈值,则该像素被排除;如果某一位置像素点的幅值在高低阈值之间,则该像素只会在连接到一个高于高阈值的像素时被保留。

如图 3 所示,根据当前点 (x,y) 的梯度值,与每个方向上的梯度值比较,判断出该点是否已经具备最大梯度值。

左上位置点 (x-1, y+1)	上位置点 (x, y+1)	右上位置点 (x+1, y+1)
左位置点 (x-1, y)	中心位置点 (x, y)	右位置点 (x+1, y)
左下位置点 (x-1, y-1)	下位置点 (x, y-1)	右下位置点 (x+1, y-1)

图 3 梯度求取点分布

利用最优阈值灰度分割确定高阈值 T_H 。基本

思想是:对于非极大值抑制图像 $g(i,j)$,设初阈值 T_0 ,将图像灰度级别分为背景灰度和目标灰度两类,分别确定背景平均弧度阈值 T_1 和目标平均弧度阈值 T_2 ,将 T_1 和 T_2 的平均值作为新的阈值 T ,利用迭代法得到最优阈值。

对极大值抑制图像 $g(i,j)$ 进行扫描,得到最大灰度值 $Z_{\max}$ 和最小灰度值 $Z_{\min}$,令初阈值为

$$T_0=\frac{Z_{\max}+Z_{\min}}{2}\quad (4)$$

根据设定阈值 T_k 求背景和目标的平均阈值 T_1 、 T_2 :

$$T_1=\frac{\sum_{z(x,y)<T_k}Z(x,y)\times N(x,y)}{\sum_{z(x,y)<T_k}N(x,y)}\quad (5)$$

$$T_2=\frac{\sum_{z(x,y)>T_k}Z(x,y)\times N(x,y)}{\sum_{z(x,y)>T_k}N(x,y)}\quad (6)$$

式中: $Z(x,y)$ 是图像上 (x,y) 点的灰度值; $N(x,y)$ 是 (x,y) 点的权重系数,一般设 $N(x,y)$ 为 1。

求出新的阈值 T_{k+1} 为

$$T_{k+1}=\frac{T_1+T_2}{2}\quad (7)$$

如果 $T_{k+1}=T_k$,则所求阈值 T_k 即为最优阈值。最优阈值即所求的高阈值 T_H 。

一般情况下,高阈值和低阈值之间的关系为

$$T_L=0.5T_H\quad (8)$$

2.1.2 显著物体识别

显著物检测的目标是识别一张图片上最具有视觉特征的区域,通过一系列的短连接,从深层输出结果到浅层输出结果。所提结构优点明显:高层次特征可以转换到浅输出层,而且可以更好地定位显著物区域;浅输出层可以学习丰富的低层特征,从而定义稀疏和不规则的预测区域。这个结果提供了一种在每个层次中进行分段检测的边界特征图。主要的显著物体检测方法基于局部特征和全局特征。

基于 HED 的显著物检测,将从标准 HED 架构及其扩展版本开始,用于显著对象检测,并逐步移至所提出的架构。HED 结构,使 $T=f(X_n,Z_n)$, $n=\{1,\cdots,N\}$ 表示训练集; $X_n=\{x_j\}$, $j=1,\cdots,N$,表示输入图像; $Z_n=\{z_j\}$, $j=1,\cdots,N$, $z_j\in[0,1]$,表示关于 X_n 对应连续真实显著区域。下面描述中省略下标 n ,是因为假设输入都是彼此独立的。表示所有标准网络的集合层参数 w ,假设有 M 侧输出,每个输出与分类器相关联,其中相应的权重可以表示为

$$w=(w^{(1)},w^2,\cdots,w^{(M)})\quad (9)$$

因此,HED 的侧目标函数可以表示为

$$L_{\text{side}}(W,w)=\sum_{m=1}^M\alpha_m l_{\text{side}}^{(m)}(W,w^{(m)})\quad (10)$$

式中： α_m 是第 m 侧损失的权重； L_{side} 为第 m 个边输出的图像级别平衡交叉熵损失函数。此外，添加加权融合层以更好地捕获每个侧输出的优势。熔融层的熔融损失 L_{fuse} 可以表示为

$$L_{\text{fuse}}(W, w, f) = \sigma(Z, h(\sum_{m=1}^M f_m A_{\text{side}}^{(m)})) \quad (11)$$

式中： f_m 是熔权重； A_{side} 是激活第 m 层的输出； $h()$ 为一个 sigmoid 公式，表示地面真实图和融合预测之间的距离，其被设置为图像水平的类平衡交叉熵损失。

通过显著物体监测，可以将风机叶片单独识别出来，将其他的噪声信息删去从而使整个神经网络不会受到噪声信息的干扰。而且风机叶片上的结冰情况也可以作为显著物体被识别出来。

风机所处环境多变，背景噪声如云、太阳、光线所造成的光斑均属于噪声信号，这些信号又与叶片结冰的特征存在一定的相似性。故需要将叶片从整体背景中提取出来，在删去噪声信号的同时又不损失叶片图像的信息量。

2.2 图像处理流程图

通过分析叶片结冰对机组的影响，提出一种基于图像识别结冰的方法，分析非最大抑制的梯度复制图和阈值方法，加入均值法进行自适应阈值，再把改进 Canny 算法与 HED 显著物识别算法相结合，从而使得算法更加准确高效便捷。叶片结冰图像处理逻辑流程见图 4。

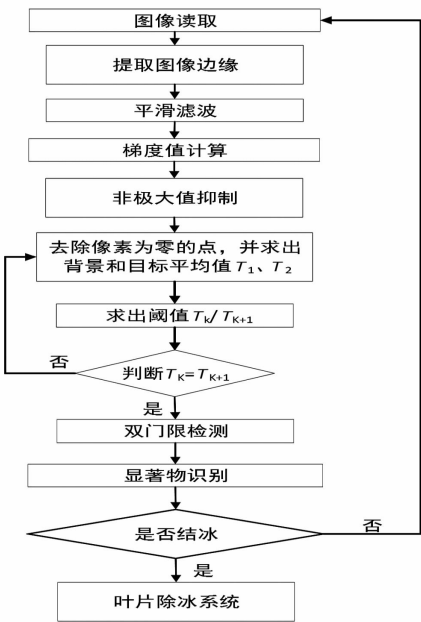


图 4 叶片结冰图像处理流程

基于视觉的叶片结冰图像检测是一种直接测量叶片结冰的模式。由于摄像头的技术发展，在夜间

通过红外补光灯可以使该系统在夜间也有较高的识别率。由于该系统可以做到实时监控，一旦发现叶片结冰就可以触发相应的报警或者除冰模块，一旦结冰情况消失则可以迅速反馈到中控室，既可以防范叶片结冰造成的危害，也可以作为相关故障解决系统的触发信号，还可以在故障解决之后的第一时间重启风机，降低由于叶片结冰导致停机所造成的经济损失。

3 结果分析与实验验证

3.1 与传统方法的比较

所提供的方法具有实时监测、高效除冰和减少停机时间等优点。传统结冰传感器在监测结冰与除冰时间上具有间隔性，与叶片结冰并非同步，易造成假结冰现象，使其机组自耗电增加；其次，在监测到结冰后需要进行停机再除冰，增加了风电机组非故障停机时间，减少发电量。

通过视频结冰监测，监测的目标对象直接是叶片，得到的结冰信号都是真信号。只要结冰量低于预设值，机组不需要停机随时进行除冰，可以更好地提高发电量。图像监测叶片结冰方法与传统方法对比见图 5。

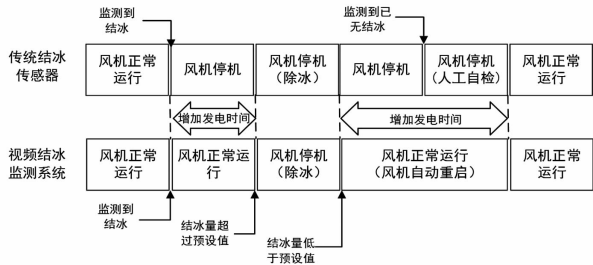


图 5 与传统除冰方式对比

3.2 实验验证

根据上述模型和算法，以某风场机组采集图像为例进行对比验证。在图像采集和传输过程中有许多干扰和噪声影响边界轮廓的提取，但滤波过程不能影响图片边界轮廓。通过实验验证，所提方法不但能够检测到图像局部特征，同时还可以保证边缘连续性。将所提的算法与常用传统算法 Canny 进行对比，图 6 为无结冰状态下图片检测结果对比。

从图 6 分析可以看出，在无结冰状态下，传统的 Canny 算法对噪声较为敏感，把蓝天白云视作噪声，使得边缘效果模糊不清。而所提改进后的算法能够保证在噪声消除后，边缘细节更加清晰。

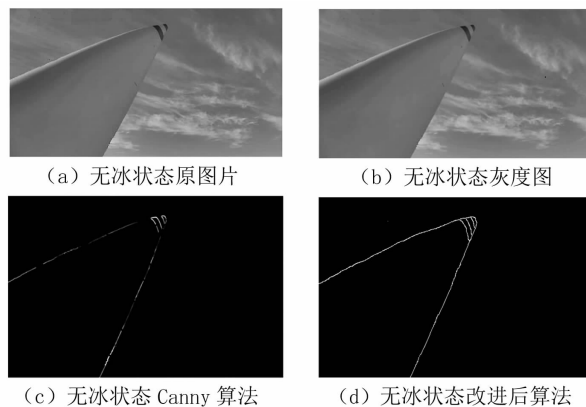


图6 无结冰状态下检测结果对比

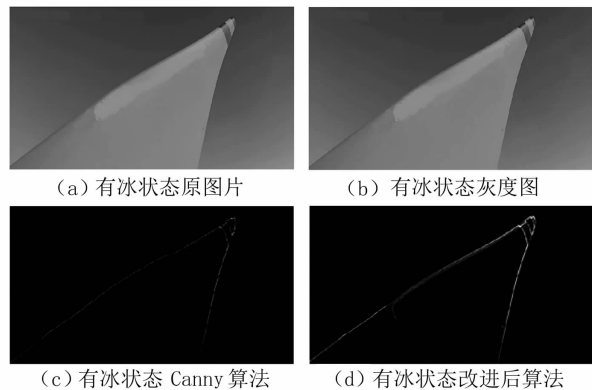


图7 有结冰状态下图片检测结果对比

图7为有结冰状态下图片检测结果对比。从图中分析可以看出,图片上明显有区域结冰,在传统的Canny算法进行边缘检测时,把结冰区域视为噪声进行消除,偏离了识别结冰的目的。从图7可以清楚地看出所提算法监测的结果明显可以判断出叶片结冰区域,并准确判断是否结冰。

从结冰与无冰图像对比,两种算法具有明显区别:传统算法对噪声比较敏感,控制噪声会以损失边缘细节为代价,同时此类算法最优阈值设置困难;所提方法自适应能力强,不需要人工设置阈值参数,可自动寻优,监测结果表明,不但能够监测到图像局部细节,同时能保证图像边缘连续性。

4 结 语

通过改进的Canny算法和HED显著物识别算法相结合,针对叶片结冰除冰进行研究。首先,图像提取后进行平滑滤波,求取均值并自适应设置高低阈值;滤波后的图片再进行HED显著物检测,判断叶片是否有结冰状况,这样可避免误判断使得信号更加可靠。该系统解决了传统依靠传感器间接检测

结冰存在的非同步性和因除冰需要停机影响发电量的问题。经过试验表明,利用所开发的叶片结冰检测除冰系统,检验结果与实际情况基本相符,系统稳定性和可靠性能满足工程实际需求。

参考文献

- [1] 雷利斌,李录平,刘胜先,等. 基于振型曲率的风力机叶片覆冰检测技术[J]. 太阳能学报,2014,35(5):841-847.
- [2] 颜健,李录平,雷利斌,等. 风力机桨叶超声波除冰实验技术研究及其应用[J]. 可再生能源,2015,33(1):68-74.
- [3] 谭海辉,李录平,靳攀科,等. 风力机叶片超声波除冰理论与方法[J]. 中国电机工程学报,2010(35):112-117.
- [4] Olivier Parent, Adrian Ilinca. Anti-icing and De-icing Techniques for Wind Turbines: Critical Review [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 88-96.
- [5] 李录平, 颜健, 封江, 等. 基于WiFi技术的风力机叶片覆冰监测系统研究[J]. 可再生能源, 2016(4): 543-549.
- [6] 刘胜先,李录平,余涛,等. 基于振动检测的风力机叶片覆冰状态诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(32): 88-95.
- [7] 卢方. 风机叶片覆冰监测与防冰除冰试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [8] 尹胜生,叶林,陈斌,等. 可识别冰型的光纤结冰传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2012(5): 9-11.
- [9] 禹迅. 风力发电机叶片结冰检测系统研究开发[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [10] Gonzalez C Rafael, Woods E Richard. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [11] 罗桓,田翔. 基于改进Canny算子的电力设备图像检测研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 77-81.
- [12] 孙智鹏,邵仙鹤,王翥,等. 改进的自适应Canny边缘检测算法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 17-21.

作者简介:

孙凯(1992),硕士研究生,研究方向为风电机组控制技术;

张新燕(1964),教授,博士生导师,主要研究方向为新能源发电控制与并网技术;

常喜强(1982),高级工程师,研究方向为电力系统运行与仿真;

周登钰(1994),硕士研究生,研究方向为新能源并网技术;

李振恩(1986),博士研究生,研究方向为风电机组故障诊断及健康评估;

罗嘉良(1994),硕士研究生,研究方向为新能源并网技术。

(收稿日期:2018-12-03)

基于弃风－热的采暖负荷的联合调度补偿方法研究

樊国伟¹,樊国旗²,蔺红²,张锋¹,刘德福¹,宋朋飞¹,亢朋朋¹,王飞³

(1. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011;2. 新疆大学,新疆 乌鲁木齐 834200;
3. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211100)

摘要:“三北”地区是中国“弃风”较多的地方,“以热定电”原则下的电网调度方法是导致80%“弃风”发生在冬季供暖时期的重要原因。利用电采暖负荷潜在的调节能力,从而完成降低供热机组出力和提高风电消纳的目标,进而实现双向提升风电的消纳目的,提出了一种电采暖追踪弃风的联合调度方法。首先根据温度计算出该地区供热所需量;然后根据弃风量,采用电采暖负荷追踪弃风量的联合调度方法并通过新的补偿方法,提高参与联合调度的积极性,促进风电的消纳。通过新疆某地区实际算例,验证了其可行性和经济性,对电采暖推广具有指导价值。

关键词:电采暖;联合调度;补偿方法

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0006-04

Research on Joint Dispatching Compensation Method
Based on Heating Load of Wind Power Curtailment

Fan Guowei¹,Fan Guoqi²,Lin Hong²,Zhang Feng¹,Liu Defu¹,Song Pengfei¹,Kang Pengpeng¹,Wang Fei³

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Company,Urumqi 830011,Xinjiang,China;
2. Xinjiang University,Urumqi 834200,Xinjiang,China;
3. Nanjing Nari-relays Engineering Technique Co.,Ltd.,Nanjing 211100,Jiangsu,China)

Abstract:"Wind power curtailment" in "Three-North" area of China is normal. In winter heating period, 80% "wind power curtailment" is caused by the power grid dispatching method under the principle of "heat-fixing electricity". Using the potential regulation ability of electric heating load, the goal of reducing the output and increasing the consumption of new energy will be accomplished, and then the binary purpose of wind power consumption is achieved. A joint dispatching method for electric heating and tracking wind is proposed. Firstly, the heating load according to the temperature of heating area is calculated, and then the electric heating load is used to track the curtailed wind power according to the amount of curtailed wind power, therefore the wind power accommodation is promoted and the enthusiasm of participation in joint dispatching is improved by the new compensation method. The feasibility and economics of the proposed method are verified by practical examples in a certain area of Xinjiang, which has guiding value for electric heating promotion.

Key words:electric heating; joint dispatching; compensation method

0 引言

风电由于其可再生和无污染的特点,在减少大气污染和可持续发展战略中起着重要的作用^[1]。但是由于近几年新能源机组和负荷严重的不匹配增长^[2],是导致新疆地区“弃风”的主要原因。目前提高新能源消纳的方法有柔性负荷主动参与调峰^[3-4]、
基金项目:国家自然科学基金项目(51667019)

火电机组改造^[5]、抽水蓄能电站建设^[6]、特高压外送通道建设^[7]以及电能替代^[8]等措施。

负荷主动参与到电力系统的调度中,可以减少电网或者电源的建设费用。文献[9]提出了基于等舒适度损失原则的空调调温策略。文献[10]根据人体舒适度,建立不同的空调负荷控制模式。文献[11]通过单条馈线上风速和电采暖负荷的分布,计算电采暖和风速分布的相关性。文献[12]根据温度预报的电采暖控制,挖掘了电采暖在电力系统的

巨大潜力。文献[13]通过对比不同供热方式,验证了新能源电采暖方式的环境和价格优势。文献[14]提出了间歇供暖的方式,但是在严寒地区可能造成壁面结露,在新疆地区并不适应。文献[15]分析了新疆某地区不同电采暖负荷的优缺点。

但是上述文献均是某条线路上电源与负荷或者局部电源与负荷结合分析,没有专门针对弃风或者弃光进行分析;而在电力市场研究中,采用构造极端数据而没有具体结合到实际算例^[16]进行研究。

下面将“弃风”电量和采暖负荷相结合,进行联合调度,通过补偿平衡各方利益,促进新能源的消纳;提出了一种基于采暖负荷跟随风电出力变化从而实现系统成本最低的调度方法。通过新疆某地区的实际算例,验证了所提联合调度方法在技术上的有效性,并在实际的补偿方法中具有较高的效率指数,对实际电采暖负荷的推广有指导意义。

采暖负荷模型、联合调度方法及补偿方法

1.1 采暖负荷建模

采暖负荷的建模仅考虑了热的暂态过程实现热的暂态平衡,没有考虑热的动态过程。首先根据等效房间计算出不同内、外温条件下所需的单位面积供热功率,然后计算出当地集中供热总面积下的供热功率。

在构建等效的房间内热力学模型时,考虑了每天的散热指标以及房间内空气参数、不同墙体之间导热的差异性,构建了房间内温度和其他相关参数的状态方程^[16]。等效单位房间面积上单位时间内等效用户的采暖计算公式为

$$Q = \frac{\sum Qi}{A} = \frac{\sum \xi \cdot K \cdot S (T_{out}(t) - T_{in}(t))}{A} \quad (1)$$

式中: Q 为单位房间内单位时间的传输热量; A 、 S 分别为用户房间的总面积、外表面积; ξ 为房间散热指标; $T_{in}(t)$ 为室内温度; $T_{out}(t)$ 为室外温度。

推导出简化的热力学参数方程^[12],描述电采暖的动态过程为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{heat}(t) - (T_{in}(t) - T_{out}(t)) \cdot K \cdot S}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V} \quad (2)$$

1.2 联合调度方法

首先计算出该地区房间内恒温度所需的采暖负

荷量;然后根据弃风量,在约束条件下采用不同的温度调度方法;最后根据各方的电量信息,平衡各方收益来确定补偿方法。联合调度模型如图 1 所示。

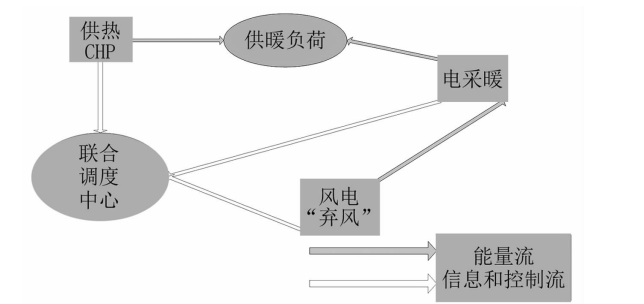


图 1 联合调度模型

1.3 补偿方法效率评价指标

风电企业将采暖用户多付出的电费用补偿后,在剩余的利润中,通过不同的方案补偿燃气供热机组并计算出其效率化指标。

当供热全部由风力发电提供的情况下,效率是最高的,将其效益指标均一化为 1,然后计算出其他模式下的效率化指数。

第 1 种方法是风电企业完全补偿燃气供热机组的利润;第 2 种方法是对燃气供热机组售价进行补偿;第 3 种方法是燃气供热机组供热按照电费售价进行补偿。3 种补偿方式分别由 S1、S2、S3 表示。

1) 计算出双方不同温度控制目标下不同补偿模式收益的平均值

$$\bar{R}_w = \sum_{i=1}^N R_{wi} / N \quad (3)$$

式中: $\bar{R}_w$ 为平均收益; R_{wi} 为补偿方法 i 收益。

2) 计算出不同温度控制目标下不同补偿模式的标准差 δ_i 。

$$\delta_i = \sqrt{[\sum_{i=1}^N (R_{wi} - \bar{R}_w)^2] / N} \quad (4)$$

3) 计算出公平性指标 f

$$f = \delta_i / \delta_e \quad (5)$$

式中: δ_e 是风电完全供热的收益; δ_i 为 3 种补偿模式下的标准差。

电采暖负荷跟随风电出力的调度方法

2.1 目标函数

联合调度目标是在不增加采暖用户费用的基础上,减少更多的弃风,同时平衡供热机组与风电企业的利润。

系统成本最小的调度目标函数为

$$\max(\sum_{i=1}^T P_i^w) \tag{6}$$

供热机组的供热成本为

$$C_H = \sum_{i=1}^T (d \cdot P_i^{h2} + e \cdot P_i^h + f) \tag{7}$$

式中: C_H 为供热负荷的成本; d 、 e 、 f 为供热机组的运行参数。

原调度方法的供热机组的收益 R_{w1} 为

$$R_{w1} = \sum_{i=1}^T P_{1i}^h r_h - C_H \tag{8}$$

式中: P_{1i}^h 为原调度方法某时刻供热机组的功率; r_h 为供热价格。第 1 种补偿方法中供热机组获得的补偿和原调度方法供热机组收益相同。

第 2 种补偿方法中供热机组参与联合调度的收益 R_{w2} 为

$$R_{w2} = (\sum_{i=1}^T P_{2i}^e) r_h - C_H \tag{9}$$

式中, P_{2i}^e 为新的调度模式中供热机组某时刻功率。

第 3 种补偿方法中供热机组的收益 R_{w3} 为

$$R_{w3} = (\sum_{i=1}^T P_{3i}^e) r_e - C_H \tag{10}$$

式中, r_e 为电采暖价格。

由于是弃风电量参与联合调度,因此可以认为风电企业该部分的成本为 0。

风电企业的收益为

$$R_w = (r_d + r_t) \sum_{i=1}^T P_{pv} \tag{11}$$

式中: R_w 为风电企业收益; r_d 为电网企业支付给风电企业的费用; r_t 为国家对风电企业的补贴费用。

电采暖负荷实施需求响应的补贴成本为

$$C_{ehr} = \sum_{i=1}^T P_i^h (r_e - r_h) \tag{12}$$

2.2 约束条件

1) 热功率平衡约束

$$\sum h_i^e + h_{ehr} = L_{h,t} \tag{13}$$

2) 供热机组约束

出力约束:

$$h_i^{e,min} \leq h_i^e \leq h_i^{e,max} \tag{14}$$

式中, $h_i^{e,min}$ 、 $h_i^{e,max}$ 分别为供热机组供热功率上、下限。

爬坡约束:

$$h_i/h_{i-1} \leq RAMP_{up} \tag{15}$$

$$h_i/h_{i-1} \leq RAMP_{down} \tag{16}$$

式中, $RAMP_{up}$ 、 $RAMP_{down}$ 分别为供热机组功率最大上行和下行爬坡速率。

电采暖的响应时间非常短,没有爬坡约束条件;电采暖的功率约束条件为

$$P_{min}^e \leq P^e \leq P_{max}^e \tag{17}$$

人体对温度舒适度的约束如图 2 所示。

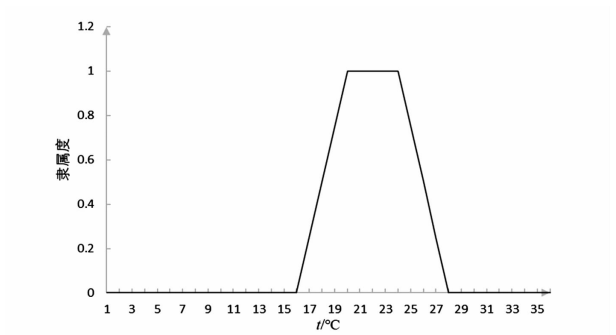


图2 人体温度与舒适度隶属度关系

3 算例仿真

3.1 地区情况分析

新疆某地区风电装机容量 1791 MW,由于其常规负荷较小,弃风率可达 20%。其中算例当天风力实际发电为 16 537.5 MWh,理论风力发电量为 19 849.7 MWh,弃风电量为 3 312.2 MWh;该地区集中供暖面积为 $6.65 \times 10^6 \text{ m}^2$,其中供热机组 1 台,技术参数如表 1 所示^[3]。供热的价格为 350 元/MWh,供电的价格为 400 元/MWh。

表 1 供热机组参数				
$h_i^{e,min}$	$h_i^{e,max}$	$RAMP_{up}$	$RAMP_{down}$	$d、e、f$
10	450	100	90	0.05、35、1055

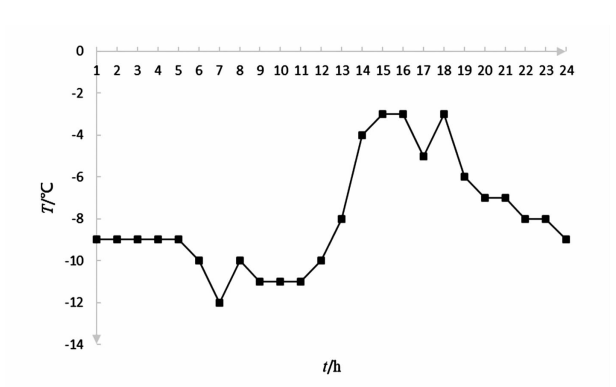


图3 温度曲线

该地区 2017—2018 年采暖季节的最低温度为

13℃,选取该地区1月29日作为算例研究,该日的温度变化曲线如图3所示。该地区风力的实际发电量、理论发电量和弃风电量如图4所示。

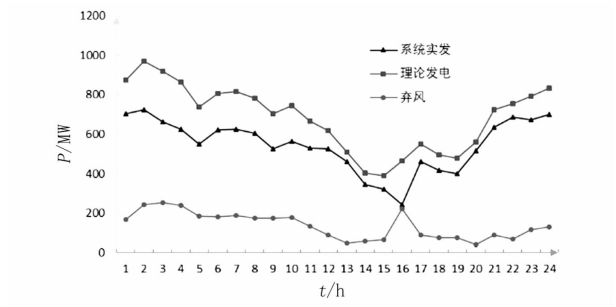


图4 风力发电曲线
等效建筑物的建筑面积为120 m²,参数如表2所示。

表2 等效房间参数	
参数名称	取值
外表面积 S/m^2	234.4
体积 V/m^3	312
导热系数 $K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.5
空气比热容 $C_{\text{air}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1.007
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.2

按照式(2)计算出该地区随气温变化下室内温度分别为20~24℃所需要的采暖负荷的功率如图5所示。

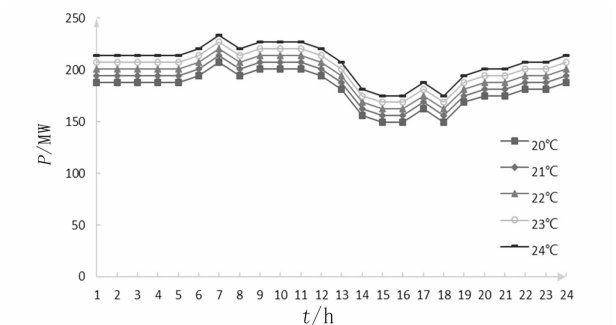


图5 采暖负荷的功率

3.2 调度与补偿方法研究

采用系统成本最小的调度方法,弃风没有任何价值,如果将弃风转化为电采暖,系统的成本则会最小。联合调度是线性混合规划问题,采用lingo12进行计算,供热机组功率如图6所示。

电采暖负荷和弃风情况分别如图7和图8所示;不同温度控制目标下的各补偿情况如表3所示。

因为风电产生的效益更高,此时取风电全供暖情况,然后计算出3种补偿方法的公平系数,不同补

偿方法的对比结果如表4所示。

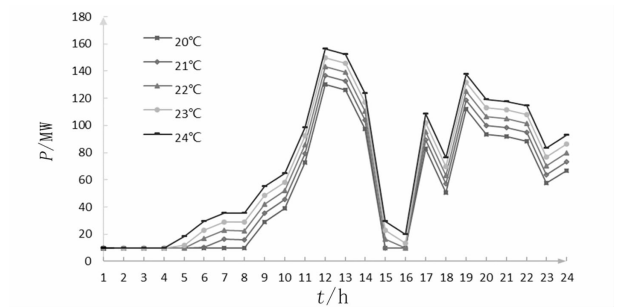


图6 供热机组功率

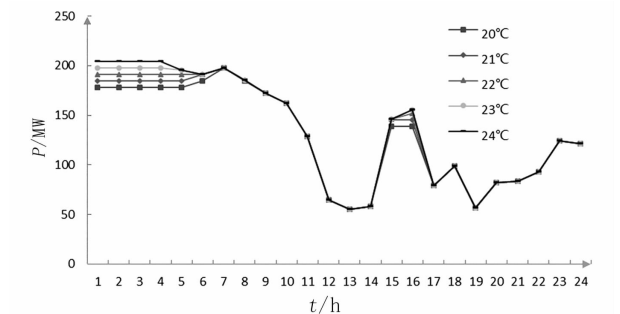


图7 电采暖负荷功率

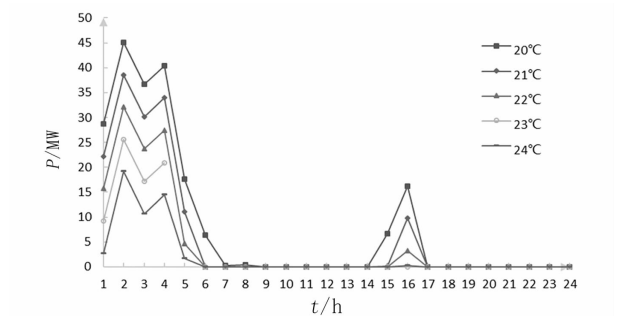


图8 弃风情况

由表4可知,第3种补偿方法的公平性指标较其他补偿模式均有较大的提高,在减少弃风的联合计划中,对减少弃风有较大的帮助。

4 结 语

采用弃风-热采暖负荷联合调度的方式可以大幅提高风电的消纳率,减少弃风;同时可以减少环境污染,节约能源,促进可持续发展。

在新的联合调度补偿方法中,将供热机组供热按照全电量补偿方法,可以较大地提高交易中的效率指标,平衡各方利润,促进弃风电量的消纳。

在所提的联合调度模型中,仍然有弃风的现象,需要配置储能或储热装置,或者增加其他的负荷参与调度,进而实现风电的零弃风。

(下转第51页)

一种抑制超低频振荡的水电机组 调速器参数协调优化方法研究

王渝红¹, 陈阳¹, 曾琦¹, 王媛¹, 李建², 王彪², 韩连山³

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:基于最小二乘法实现了在线拟合发电机机械转矩阻尼系数,可准确评估机组对超低频振荡的贡献度。同时提出一种抑制超低频振荡方法,该方法首先对系统状态子空间进行辨识,并结合改进粒子群算法协调优化机组调速器PI参数,实现了对超低频振荡的抑制。最后,利用PSASP软件在改进的EPRI 36节点模型进行了仿真验证,结果表明所提方法能有效抑制超低频振荡。

关键词:超低频振荡; 阻尼转矩系数; 子空间模型辨识; 调速器参数协调优化

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0010-05

Research on Governor Parameter Coordinated Optimization to Suppress ULFO for Hydraulic Turbine

Wang Yuhong¹, Chen Yang¹, Zeng Qi¹, Wang Yuan¹, Li Jian², Wang Biao², Han Lianshan³

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

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

3. Nari-relays Engineering Technique Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: An effective method to evaluate contribution degree of ultra-low-frequency oscillation (ULFO) for hydraulic turbine based on the least square fitting method is realized. And a suppression scheme for ULFO is presented. The state subspace representation is identified and governor parameters of hydraulic turbine are optimized by an improved particle swarm optimization. Finally, the effectiveness of the proposed suppression scheme for ULFO are verified with an improved EPRI 36-nodes system.

Key words: ultra-low-frequency oscillation; damping torque coefficient; subspace model identification; governor parameter coordinated optimization

0 引言

近年来在水电机组占比较高的直流送出系统中出现了振荡频率低于0.1 Hz的超低频率振荡现象,其振荡频率显著低于低频振荡范围^[1-2]。2016年3月,南方电网在进行云南异步联网试验时,出现持续时间25 min,周期为20 s的超低频率振荡^[3-6]。同时研究发现当渝鄂背靠背柔性直流工程投入运行后,川渝电网也与主网实现异步联网,与云南电网情

基金项目:国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)

况类似,川渝电网也存在发生超低频振荡的风险。

文献[7]指出超低频振荡发生后,系统中所有发电机转速同调变化,系统频率整体振荡,可将多机系统等值为单机带负荷系统进行分析。文献[8-10]针对水电外送孤岛系统进行小干扰分析,指出水轮机调速器PI控制器的积分系数KP、比例系数KI、水锤效应时间常数 T_w 是影响超低频振荡的关键因素。文献[11-12]针对云南异步联网验证性试验过程中出现的超低频振荡现象,重新整定了云南水电机组的调速器参数,即将所有水电机组调速器KP减小为原来的二分之一, KI减小为原来的十分之一;

但该方法没有对引发超低频振荡的振荡源进行定位,需要重新整定参数的水电机组范围过大,同时整定后调速器采用较小的PI参数将使得机组响应速度变慢,调节性能变差。文献[13-16]分析了传统直流附加频率控制器,通过其快速调节直流输送功率增强送端系统抑制频率振荡的能力;但增设直流附加频率控制器后,将导致直流输送功率随系统频率变化频繁变化,对直流系统的运行及直流受端交流系统稳定性均会造成影响。文献[17-19]采用PSS作用于发电机励磁系统,利用相位补偿原理产生纯阻尼力矩,起到抑制频率振荡的作用;但PSS主要用来抑制低频振荡,对超低频振荡没有抑制效果。文献[20]提出一种基于能量流在线评估发电机阻尼特性的方法,但能量流法没有考虑发电机电能和势能的变化,对发电机阻尼特性的评估不够准确。文献[21]为定位低频振荡源研究了发电机电磁转矩阻尼系数的辨识方法,但该方法对超低频振荡源机组的定位不够准确。

在出现超低频振荡的电网中,存在水电机组多、机组容量分散的特点。采用逐一调整水电机组调速器PI参数抑制超低频振荡的方法工作量大,并将影响电网的调频性能。因此有必要将水电机组对超低频振荡的贡献度进行评估,通过对贡献度大的水电机组调速器PI参数优化,抑制超低频振荡。

下面提出一种超低频振荡抑制方法。该方法基于子空间辨识算法和改进粒子群算法实现了对超低频振荡贡献度大的机组调速器PI参数的协调优化,相较于文献[11-12]缩小了待整定调速器PI参数的机组范围,减小了对机组调节性能的影响。仿真结果表明采用所提方法可有效抑制超低频振荡。

1 四川电网超低频振荡机理分析

渝鄂背靠背柔性直流工程投运后,西南电网与西北、华中、华东3个区域电网异步互联,四川电网稳定特性由多机系统下的暂态功角稳定问题转化为单机带负荷下的频率稳定问题。同时由于四川电网内水电机组装机容量高,水锤效应明显,使得四川电网存在发生超低频振荡的风险。

仿真结果表明,当超低频振荡发生时,四川电网内所有发电机组发生同步振荡,可将网内机组等值为单机系统。建立异步联网后的四川电网超低频振

荡简化分析模型如图1所示。

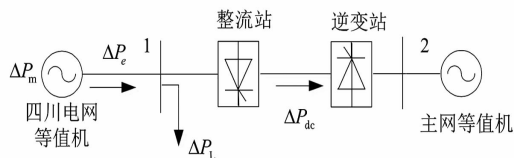


图1 单机系统模型

图1中:左侧机组为超低频振荡下四川电网发电机等值模型,经直流输电系统与主网异步互联; ΔP_m 为发电机机械功率变化量; ΔP_e 为发电机电磁功率变化量; ΔP_L 为本地负荷功率变化量; ΔP_{dc} 为直流输送功率变化量。列写图1中四川电网等值机转子运动方程为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_J 为惯性时间常数; ΔT_m 表示发电机机械转矩; ΔT_e 为发电机电磁转矩。电磁转矩和机械转矩均可以写成阻尼转矩分量和同步转矩分量矢量和的形式。

$$\begin{cases} \Delta T_m = \Delta T_{Dm} + \Delta T_{Sm} \\ \Delta T_e = \Delta T_{De} + \Delta T_{Se} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ΔT_{Dm} 为机械转矩阻尼分量; ΔT_{Sm} 为机械转矩同步分量; ΔT_{De} 为电磁转矩阻尼分量; ΔT_{Se} 为电磁转矩同步分量。将式(2)代入式(1)可得

$$T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta T_{Sm} - \Delta T_{Se} - (-\Delta T_{Dm} + \Delta T_{De} + D\Delta\omega) \quad (3)$$

由式(3)可得发电机阻尼转矩 ΔT_D 为

$$\Delta T_D = (-\Delta T_{Dm} + \Delta T_{De} + D\Delta\omega) \quad (4)$$

当 ΔT_D 为负时,将导致超低频振荡发生。发电机阻尼系数 $D > 0$,始终提供正阻尼。当忽略网损时,电磁转矩可认为由本地负荷和直流共同提供,始终为系统提供正阻尼转矩。发电机机械转矩由调速器提供,当机械转矩阻尼分量为负时,将导致发电机阻尼转矩 ΔT_D 为负,引发超低频振荡。

2 机组超低频振荡贡献度评估

当发生超低频振荡时,四川电网第*i*台发电机的机械转矩为

$$\Delta T_{mi} = K_{Di}(-\Delta\omega) + K_{Si}\Delta\delta \quad (5)$$

当 $K_{Di} > 0$ 时,发电机机械转矩为系统提供正阻

尼,机组对超低频振荡的贡献度小;当 $K_{Di} < 0$ 时,发电机械转矩为系统提供负阻尼,机组对超低频振荡的贡献度大。

考虑多机系统下,对第 i 台发电机机械转矩阻尼系数在线拟合,首选对式(5)进行离散化处理得到

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{mi}(T) \\ \Delta T_{mi}(2T) \\ \dots \\ \Delta T_{mi}(NT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega(T) & \Delta\delta(T) \\ \Delta\omega(2T) & \Delta\delta(2T) \\ & \dots \\ \Delta\omega(NT) & \Delta\delta(NT) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Di} \\ K_{Si} \end{bmatrix} + \varepsilon \quad (6)$$

式中: N 为采样点个数; T 为采样周期; ε 为线性估值的误差。发电机调速器机械转矩阻尼系数的在线辨识可以转化为线性估值问题。

$$\begin{aligned} \Delta T_{mi} &= [\Delta\omega \ \Delta\delta] \mathbf{K}_i + \varepsilon \\ &= \mathbf{A} \mathbf{K}_i + \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

定义代价函数 $\mathbf{H}(x)$:

$$\mathbf{H}(x) = [\Delta T_{mi} - \mathbf{A} \mathbf{K}_i]^T \cdot [\Delta T_{mi} - \mathbf{A} \mathbf{K}_i] \quad (8)$$

当 $\mathbf{H}(x)$ 达到最小值时, $\mathbf{K}_i$ 的估计值为

$$\mathbf{K}_i = [\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}]^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \Delta T_{mi} \quad (9)$$

当 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 可逆存在时,由式(9)即可求得发电机机械转矩阻尼系数 $\mathbf{K}_{Di}$ 。对四川电网机组超低频振荡贡献度评估的具体步骤如下:

- 1) 获取扰动后时段 t 内各机组机械功率、角速度、功角的离散时序数据;
- 2) 计算各机组时段 t 每个周期 T 内的机械功率、角速度、功角的变化量;
- 3) 将各机组的机械功率、角速度、功角的变化量数据带入式(9),得到各台发电机机械转矩阻尼系数 K_{Di} ;
- 4) 根据第 i 台发电机机械转矩阻尼系数 K_{Di} 的拟合值,评估该机组对超低频振荡的贡献度。

3 系统状态子空间辨识

考虑多输入多输出的高阶电力系统,其状态空间模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{u}(t)$ 、 $\mathbf{y}(t)$ 、 $\mathbf{x}(t)$ 分别为系统的输入、输出、可观测状态量; $\mathbf{A}$ 是系统矩阵; $\mathbf{B}$ 是输入矩阵; $\mathbf{C}$ 是输出矩阵; $\mathbf{D}$ 是输入直接作用于输出的矩阵。假定输

入输出数据分别为 u_k 、 y_k ($k = 1, 2, 3, \dots, N$), 引入分块 Hankel 矩阵:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & \dots & u_{n-\alpha+1} \\ u_2 & u_3 & u_4 & \dots & u_{n-\alpha+2} \\ u_3 & u_4 & u_5 & \dots & u_{n-\alpha+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_\alpha & u_{\alpha+1} & u_{\alpha+2} & \dots & u_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_{n-\alpha+1} \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{n-\alpha+2} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \dots & y_{n-\alpha+3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_\alpha & y_{\alpha+1} & y_{\alpha+2} & \dots & y_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, α 为自定分块行数,为保证低秩性, α 必须大于系统的阶次 n 。从状态方程可推导出如下矩阵方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{\Gamma}_\alpha \mathbf{X} + \mathbf{H}_\alpha \mathbf{U} + \mathbf{N} \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{D} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{CA}^{\alpha-2} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{\alpha-3} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{\alpha-4} \mathbf{B} & \dots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{\Gamma}_\alpha = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{\alpha-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{\Gamma}_\alpha$ 分别表示广义可观测矩阵和下三角 Toeplitz 矩阵。当已知 $\mathbf{\Gamma}_\alpha$ 和 $\mathbf{X}$ 时可得到系统状态空间矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 。因此在已知系统输入 u_k 和输出 y_k 时,辨识系统状态空间模型的方法如下:1) 根据输入输出建立 Hankel 矩阵,并进行 QR 分解得到 Hankel 矩阵的行空间投影;2) 对该投影进行奇异值分解,得到可观测矩阵 $\mathbf{\Gamma}_\alpha$ 和状态矩阵 $\mathbf{X}$;3) 由可观测矩阵 $\mathbf{\Gamma}_\alpha$ 和状态矩阵 $\mathbf{X}$ 确定系统状态空间矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 。

4 超低频振荡水电机组调速器参数整定方法

超低频振荡水电机组调速器参数协调优化方法如图 2 所示,具体步骤如下:

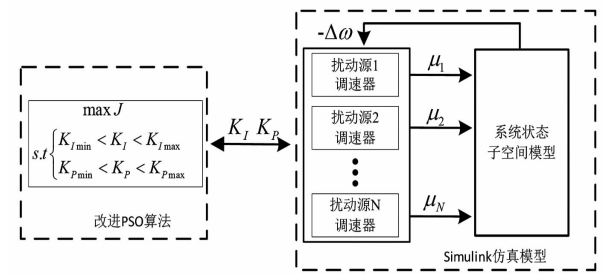


图 2 水电机组调速器参数协调优化

- 1) 在线拟合发电机机械转矩阻尼系数,筛选出阻尼系数为负,即对超低频振荡贡献度大的机组,得到待优化机组群;
- 2) 利用状态子空间辨识算法,辨识待优化机组群的机组开 $\Delta\mu$ 到频率 $-\Delta w$ 的系统状态子空间模型;
- 3) 在 Simulink 中建立含待优化机组群调速器和系统状态子空间模型的仿真模型,结合改进粒子群算法优化机组群调速器 PI 参数。

5 仿真分析

针对 PSASP 软件 EPRI 36 节点标准仿真模型进行改进,删除 BUS30 – BUS31 交流线,将 BUS34 – BUS33 交流线替换为直流输电系统。改进后的模型含 AREA1、AREA2 两区域,分别代表渝鄂柔性直流投运后的四川电网和主网。

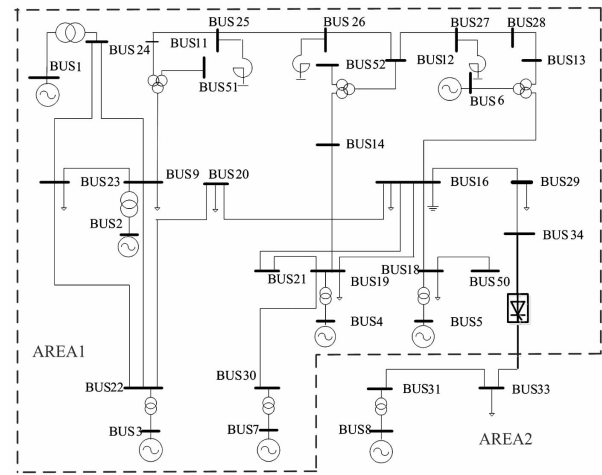


图 3 EPRI 36 节点系统

基于改进的 EPRI 36 节点仿真模型,验证所提水电机组调速器 PI 参数优化方法的有效性。其中 AREA1 含 7 台发电机(G1 至 G7),采用 PSASP 软件中 8 型调速器模型,参数套用四川电网典型水电机组调速器参数。

5.1 负荷扰动

模拟负荷扰动,在 1 s 时刻,损失 100 MW 负荷,系统频率曲线如图 4 所示。

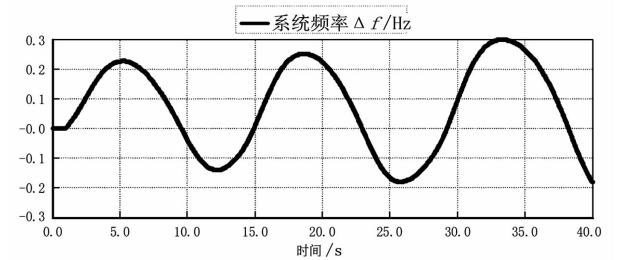


图 4 负荷扰动频率曲线

负荷扰动后,频率出现超低频振荡现象,振荡频率为 0.056 Hz,阻尼比为 -0.12 ,频率振荡逐渐发散。为抑制振荡,需先对超低频振荡贡献度较大的机组进行筛选,得到待优化机组群;并以待优化机组群开度作为输入、系统频率作为输出辨识系统状态子空间模型,利用改进粒子群算法协调优化超低频振荡贡献度较大的机组调速器 PI 参数。

1) 机组超低频振荡贡献度评估

超低频振荡发生后,拟合 G1 至 G7 发电机机械转矩阻尼系数,如表 1 所示。

表 1 G1 – G7 阻尼系数

发电机	阻尼系数	发电机	阻尼系数
G1	0.140 9	G5	0.059 2
G2	0.070 1	G6	0.005 0
G3	-0.419 5	G7	0.029 1
G4	-0.111 9		

由表 1 可知:G3、G4 发电机机械转矩阻尼系数小于 0,向系统提供负阻尼转矩,对超低频振荡的贡献度大;其余发电机机械转矩阻尼系数均大于 0,向系统提供正阻尼转矩,对超低频振荡的贡献度小。为抑制超低频振荡,需协调优化 G3、G4 发电机调速器 PI 参数。

2) 机组调速器 PI 参数协调优化

模拟 G3、G4 发电机开度阶跃扰动,辨识系统状态子空间模型。在 1 s 时刻,在 G3、G4 发电机调速器出口处施加 5% 阶跃扰动作为输入信号,选取系统频率变化量作为输出信号。辨识得到系统状态子空间模型矩阵 A 、 B 、 C 、 D 如下:

$$A = \begin{bmatrix} -0.034\ 2 & 0.316\ 5 \\ -0.316\ 5 & 0.034\ 2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.214\ 5 \\ 25.684\ 5 \end{bmatrix}$$
$$C = [-0.577\ 5 \quad 0.001\ 8] \quad D = [0]$$

其中, A 矩阵特征向量为 $-0.034\ 2 \pm 0.316\ 5i$,辨识得到的系统模型自然振荡频率为 0.05 Hz,与超低

频振荡频率近似相同,验证了系统状态子空间模型的准确性。

结合 G3、G4 发电机调速器模型和系统状态子空间模型在 Simulink 中搭建闭环仿真系统,并利用改进粒子群算法协调优化调速器 PI 参数。设置惯性权重 $w_{\min}$ 、 $w_{\max}$ 、 γ ,粒子群规模取 50,迭代次数为 30 次。优化前后 G3、G4 发电机调速器 PI 参数见表 2。

表 2 机组调速器参数

	发电机	KP	KI
原参数	G3	14	9
	G4	14	9
优化后参数	G3	5.8	1.1
	G4	6.2	0.9

G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数,其他条件不变,模拟相同负荷阶跃扰动,系统频率曲线如图 5 所示。

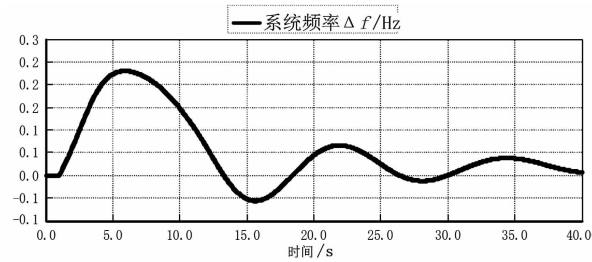


图 5 参数优化后负荷扰动频率曲线

当 G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数,相同负荷扰动下系统频率振荡模态几乎不变,阻尼比从 -0.12 提高到 0.13,超低频振荡得到了有效抑制,系统小干扰稳定性提升。

5.2 接地短路故障

仿真 EPRI 36 节点系统 BUS20 至 BUS22 交流线 1 s 时刻发生三相接地短路故障,1.1 s 时刻切除故障线路。

G3、G4 发电机调速器分别采用原 PI 参数和优化后 PI 参数的系统频率曲线如图 6 所示。从中可以看出,三相接地短路故障时,G3、G4 发电机调速器采用原 PI 参数时,发生超低频振荡;采用优化后 PI 参数,超低频振荡得到有效抑制。

由表 3 可知,G3、G4 发电机调速器采用优化后的 PI 参数可有效提升系统阻尼比,同时说明所提出的水电机组调速器 PI 参数协调优化方法针对不同扰动类型引发的超低频振荡均能够抑制,具有较强的鲁棒性。

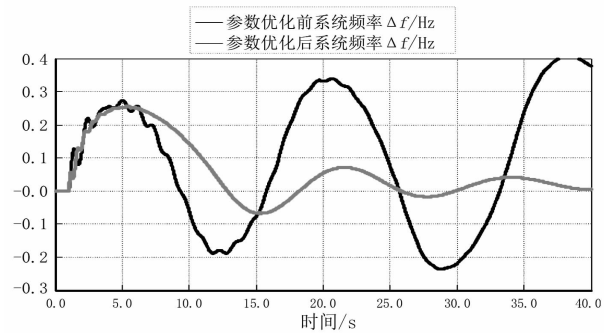


图 6 三相接地短路故障时系统频率曲线

表 3 主振模态

	振荡频率/Hz	阻尼比
原 PI 参数	0.052	-0.10
优化后 PI 参数	0.080	0.14

6 结 语

前面分析了四川电网超低频振荡产生机理,并基于最小二乘法实现了在线拟合发电机机械转矩阻尼系数。当拟合得到的发电机机械转矩阻尼系数为负时,该机组对超低频振荡的贡献度大,可认为是引发超低频振荡的振荡源。为抑制超低频振荡,提出一种水电机组调速 PI 参数协调优化方法,并将状态子空间辨识算法和改进粒子群算法用于参数优化设计。采用所提方法可准确评估机组对超低频振荡的贡献度,有效抑制超低频振荡。

参考文献

[1] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York, USA: McGraw - Hill Professional, 2005: 130.

[2] 邓集祥,贺建明,姚天亮,等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78 - 83.

[3] 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算法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 29 - 34.

[4] 杜斌,张丹,张军民,等. 异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 13 - 16.

[5] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1 - 7.

[6] 付超,柳勇军,涂亮,等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统试验分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 1 - 5.

(下转第 29 页)

基于 PSASP 的 UPFC 自定义模型 在西南电网的应用仿真

韩连山¹, 王新宝¹, 李 建², 王 彪²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;
2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:采用功率注入法和电流注入法,在 PSASP 下实现 UPFC 自定义潮流模型与暂稳模型搭建。给出了川渝断面 UPFC 安装容量与改变潮流分布的关系,计算了川渝断面动态特性。计算结果表明,UPFC 对于改善川渝断面潮流分布有一定作用,但是安装在功率输送通道上的 UPFC,单位容量改变所安装通道的潮流不到 0.5 单位,杠杆作用小。通过串并联侧控制,UPFC 对改善功率、电压振荡效果较明显。

关键词:统一潮流控制器;川渝断面;PSASP

中图分类号:TM74 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0015-05

Application Simulation of Unified Power Flow Controller Model in Transmission Lines between Sichuan – Chongqing Province Based on PSASP

Han Lianshan¹, Wang Xinbao¹, Li Jian², Wang Biao²

(1. Nanjing Nari – relays Engineering Technique Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Combined with UPFC equivalent model and power injection method or current injection method, the UPFC power flow model and the transient stability model are introduced by using PSASP custom function. The relationship between UPFC installation capacity and the change of tidal power in lines between Sichuan – Chongqing province is given. The dynamic characteristics of the lines between Sichuan and Chongqing, and the oscillation characteristics of transient energy are calculated. The results show that UPFC has a certain effect on improving the power distribution and suppressing the energy oscillation, but one unit capacity of UPFC can only change less than 0.5 units power of the lines with UPFC, the leverage effect is pool, so the required UPFC capacity is larger.

Key words: unified power flow controller (UPFC); lines between Sichuan – Chongqing; PSASP

0 引 言

川渝第三通道投运后,西南电网将建成投运藏中联网工程、渝鄂背靠背工程,使西南电网与外部电网异步联网运行,电网结构发生较大变化。西南电网异步联网运行后,川渝断面潮流分布不均现象仍然存在:北通道潮流轻而南通道潮流重,在个别方式下,北通道甚至出现潮流反送。川渝断面潮流分布不均所带来问

基金项目:国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)

题,是当前影响川电外送能力的主要因素。

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为一种典型的 FACTS 装置,可以有效改善潮流分布,所提研究即应用 UPFC 改变川渝断面潮流分布。文献[1]详细说明利用电力系统分析综合程序(PSASP)自定义程序进行 UPFC 建模的原理,并利用节点电流注入法建立了 UPFC 的动态模型。文献[2]提出了一种基于节点电流注入法的改进 UPFC 潮流控制的新方法:串联侧基于电流预测法实现对线路有功、无功功率的控制,并联侧用注入无

功电流控制母线电压,最后建立 PSASP 仿真模型。

在注入功率、注入电流原理的基础上,利用 PSASP 用户自定义程序分别搭建了 UPFC 用于潮流与暂稳计算的潮流模型和暂稳模型。为了使用方便,利用 UPFC 动态切入方法改进了暂稳计算模型。以渝鄂背靠背、川渝三通道、川藏联网三项重点工程投产后的电网为研究对象,在典型控制方式下,研究 UPFC 不同安装容量、不同安装地点对改善断面潮流分布的效果;仿真计算 UPFC 在四川电网故障后的动态特性并对比分析 UPFC 抑制暂态扰动的效果。

1 UPFC 原理

UPFC 的主要工作原理是通过电力电子设备(换流器)及控制系统来改变串联变压器的输出电压相角及幅值,从而达到优化控制线路潮流及系统电压的目的。

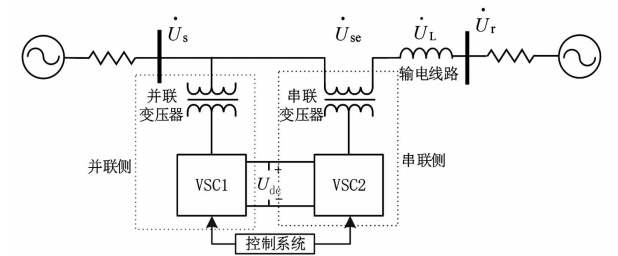


图 1 UPFC 系统

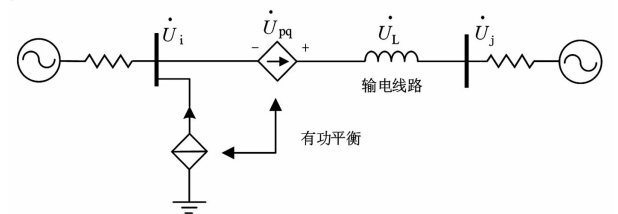


图 2 UPFC 等值

UPFC 原理如图 1、图 2 所示。串联换流器向交流线路注入幅值和相位角均可控的电压矢量 $\dot{U}_{se}$,实现潮流控制。并联侧类似于静止无功补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),下面主要介绍串联侧工作原理。

以两端无穷大系统为例分析 UPFC 串联部分的工作原理,其拓扑结构以及矢量如图 3 所示: $U_i \angle \delta$ 为线路首端电压; $U_j \angle 0$ 为线路末端电压; $U_{pq} \angle \theta$ 为 UPFC 注入的同步电压,其角度可以为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。线路等效电抗为 X_L (忽略线路电阻)。

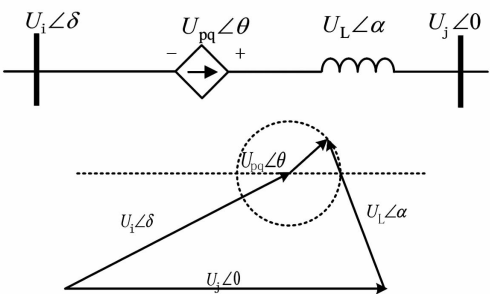


图 3 UPFC 控制原理矢量

为简化分析模型,不考虑 UPFC 串并联部分的损耗。

2 UPFC 潮流模型及 PSASP 自定义实现

PSASP 潮流程序基于功率注入方法实现,含有线路模型的 UPFC 等效模型^[3-4]如图 4 所示。为便于调度控制,采用线路功率控制(组合调节)。

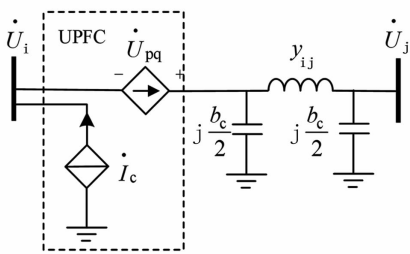


图 4 含有线路的 UPFC 等效模型

根据功率注入法将图 4 模型改写为功率注入模型,如图 5 所示。

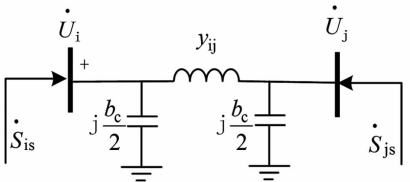


图 5 含有线路的 UPFC 功率注入模型

根据功率注入法,含有 UPFC 潮流模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{S}_{is} = \dot{U}_i [\dot{I}_c - \dot{U}_{pq} (y_{ij} + j b_c / 2)]^* \\ \dot{S}_{js} = \dot{U}_j (\dot{U}_{pq} y_{ij})^* \\ \dot{S}_{ji} = \dot{U}_j [(\dot{U}_j - \dot{U}_i) y_{ij} + j \dot{U}_j b_c / 2]^* \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{S}_{is}$ 表示 UPFC 对 i 节点的注入功率; $\dot{S}_{js}$ 表示对 j 节点的注入功率; $\dot{S}_{ji}$ 表示所在线路无 UPFC 影响时 j 侧的传输功率(由 j 流向 i)。

同时,在线路中 UPFC 所在支路还必须满足平衡条件:

$$\begin{cases} P_c + P_{pq} = 0 \\ \sum Q_{il} + Q_i + Q_{is} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据上述公式和平衡方程,可以得到 UPFC 功率控制潮流模型,输入参数为线路参数和线路期望控制功率。

3 UPFC 暂稳模型及 PSASP 自定义实现

UPFC 动态等值模型如图 6 所示。

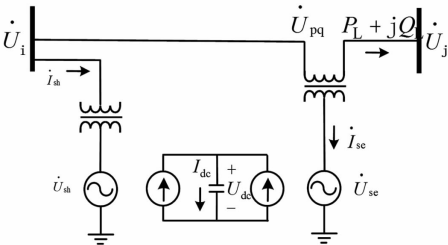


图 6 UPFC 动态等值电路模型

由于 UD 稳定模型与 PSASP 软件的接口为注入电流,这点与潮流模型有所不同,所以使用 UPFC 的注入电流模型,电流注入模型^[5]见图 7。

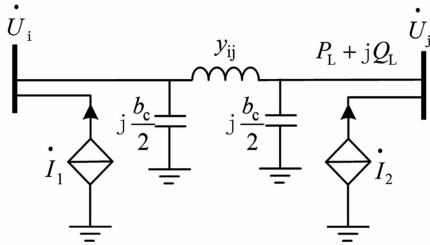


图 7 UPFC 注入电流模型

根据注入电流法, i, j 两节点的 UPFC 注入电流可分别用式(3)、式(4)表示:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_c - \dot{I}_{pq} \\ &= [I_x - U_{pqx}g_{ij} + U_{pqy}b_{ij} + U_{pqy}b_c/2] + \\ &\quad j[I_y - U_{pqy}g_{ij} - U_{pqx}b_{ij} - U_{pqx}b_c/2] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{U}_{pq}y_{ij} \\ &= [U_{pqx}g_{ij} - U_{pqy}b_{ij}] + j[U_{pqy}g_{ij} + U_{pqx}b_{ij}] \end{aligned} \quad (4)$$

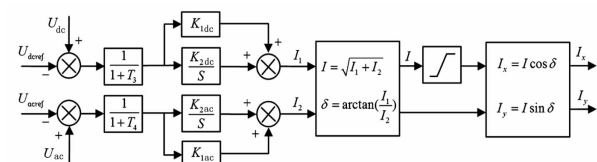
考虑直流侧电容器的充放电过程,还应满足以下关系:

$$\text{Re}[-\dot{U}_i^* \dot{I}_c] - \text{Re}[\dot{U}_{pq}^* \dot{I}_{pq}] = CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (5)$$

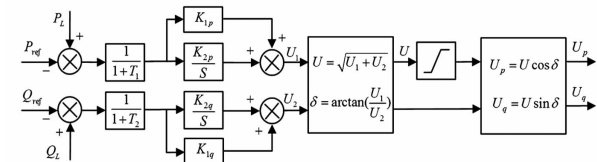
其中, $\dot{I}_c = I_x + jI_y$, $\dot{U}_{pq} = U_{pqx} + jU_{pqy}$ 。

串、并联侧控制采用 PI 控制进行解耦控制,其控制框图如图 8 所示。

通过图 8 中的控制后最终转换为式(3)、式(4)中的注入电流,实现 UPFC 暂态稳定控制。



(a) 并联侧控制



(b) 串联侧控制

图 8 UPFC 暂态串、并联侧控制

由于暂稳计算需要读取潮流计算结果,因存在小数截取误差以及初始化精度要求高,可能会导致初始化失败而无法进行暂稳仿真。因此在计算 UPFC 暂稳仿真时不采用暂稳初值计算方法。

为了避免暂态仿真失败,或者在进行暂态仿真时不搭建潮流模型,在式(3)、式(4)所述注入电流的基础上,乘上斜坡函数,斜坡函数初值为 0,终值为 1,其示意图如图 9 所示。

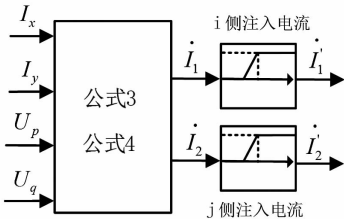


图 9 UPFC 暂态注入电流控制

这样 PSASP 软件在进行暂态仿真时,初始注入电流为 0,不影响暂态稳定计算初始化;在暂态计算开始后的,通过斜坡函数将 UPFC 注入电流注入系统即可。

4 UPFC 在西南电网的应用

西南电网四川侧将省内大量清洁能源通过川渝通道送到重庆或者经重庆送入华中电网。

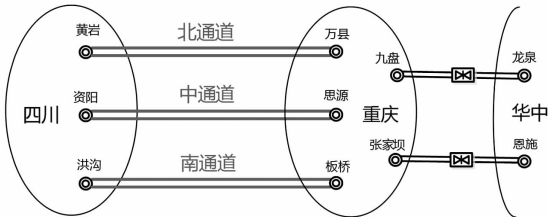


图 10 西南电网 2018 年年底川渝通道电网结构

然而,中通道投运后,南北通道潮流分布不均的

问题仍然存在,极端方式下北通道甚至倒送功率。典型丰大方式下,川电外送 6500 MW,川渝断面潮流分布如表 1 所示。

表 1 丰大方式下川渝断面功率分布

通道名称	有功功率(渝侧)/MW
黄万双线	446.402
资铜双线	2 478.158
洪板双线	3 465.342

4.1 UPFC 容量及杠杆效应计算

基于 PSASP 软件自定义潮流模型,对渝鄂背靠背投运后川渝断面四川侧安装 UPFC 的容量及杠杆效应进行计算,计算数据采用 2018 年丰大规划数据。功率基准值采用 100 MVA,基准电压采用 525 kV。

考虑增加 UPFC 后潮流转移导致三通道无功变化,模型中并联无功功率不设上限(或者通过人工投退电容器实现)。串联变压器的容量是限制 UPFC 容量的首要制约因素,模型中设置串联变压器电压限幅 0.2 p. u. 。

1) 黄万双线安装 UPFC

黄万双线初始潮流为 446.4 MW,UPFC 额定电流按照 2 kA 选取,在不同的控制功率(通道末端功率)下,在四川侧安装 UPFC 基础上,对北通道(黄万双线)UPFC 串联变压器电压幅值、相角以及容量进行计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 黄万 UPFC 不同线路控制功率下串联电压、功率

目标功率	相角 /rad	V_{pq} /(p. u.)	单串变功率 /(p. u.)
1.00	4.480 1	0.135 9	2.471 6
2.00	4.369 6	0.101 0	1.837 0
3.00	4.159 4	0.068 2	1.240 0
4.00	3.656 6	0.042 3	0.769 6
5.00	2.727 8	0.040 5	0.735 8
6.00	2.171 5	0.064 5	1.172 4
7.00	1.943 0	0.096 4	1.753 0
8.00	1.824 7	0.130 8	2.379 6
9.00	1.751 3	0.166 4	3.025 6
10.00	1.701 4	0.200 0	3.637 2

从图 11、图 12 可以看出,在增加或者减少线路潮流时,UPFC 功率近似与控制功率呈现线性关系。

黄万线 UPFC 的布置按照两串一并的配置原

则,并联侧容量按照串联侧容量计算,则 UPFC 改变黄万双线功率与 UPFC 容量比例关系(杠杆比)如表 3 所示。

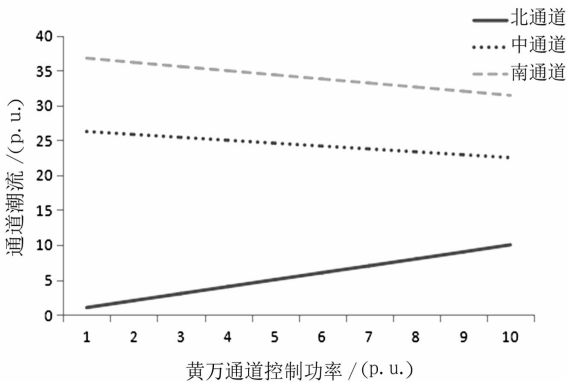


图 11 黄万 UPFC 不同控制功率对川渝断面潮流改善情况

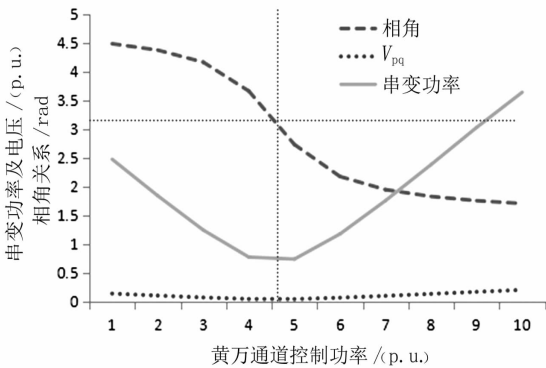


图 12 黄万不同线路控制功率下串联电压、功率关系

表 3 黄万双线 UPFC 杠杆比

黄万双线改变功率 /(p. u.)	UPFC 装置功率 /(p. u.)	杠杆比 K
0.551	2.207 3	0.249 6
1.544	3.517 2	0.439 0
2.527	5.259 0	0.480 5
3.519	7.138 7	0.492 9
4.518	9.076 9	0.497 7
5.535	10.911 6	0.507 2

从计算结果可以看出,单位容量 UPFC 仅可改变黄万双线潮流不到 0.5 单位功率。

2) 洪板双线安装 UPFC

典型方式下,洪板双线潮流较重,其双线初始有功功率为 3 465.3 MW,黄万双线初始有功功率为 446.4 MW。UPFC 额定电流按照 3.5 kA 选取,在不同的控制功率(通道末端功率)下,对南通道(洪板双线)UPFC 串联变压器电压幅值、相角以及容量进行计算,计算结果如表 4 所示。

表 4 洪板 UPFC 不同线路控制功率下
串联电压、功率计算结果

目标功率 /(p. u.)	相角 /rad	V_{pq} /(p. u.)	单串变功率 /(p. u.)
37	0.714 8	0.058 2	1.853 6
36	0.379 9	0.048 8	1.552 7
35	-0.043 5	0.046 9	1.491 7
34	-0.429 4	0.053 4	1.699 1
33	-0.700 0	0.066 0	2.099 7
32	-0.873 8	0.081 9	2.607 2
31	-0.987 2	0.099 7	3.173 0
30	-1.064 2	0.118 5	3.772 4
29	-1.118 7	0.138 0	4.393 0
28	-1.157 9	0.158 0	5.029 2
27	-1.187 2	0.178 4	5.676 4
26	-1.209 4	0.199 0	6.332 3

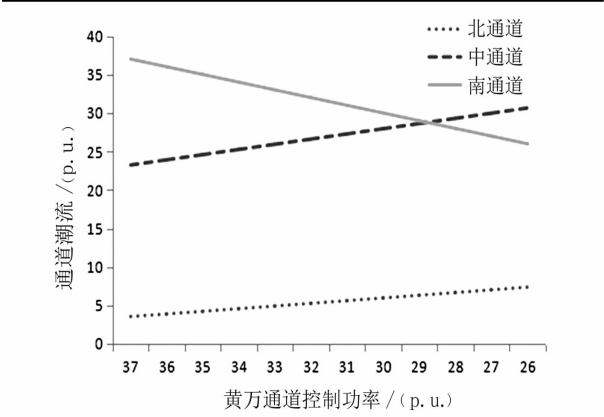


图 13 洪板 UPFC 不同控制功率对川渝断面潮流改善情况

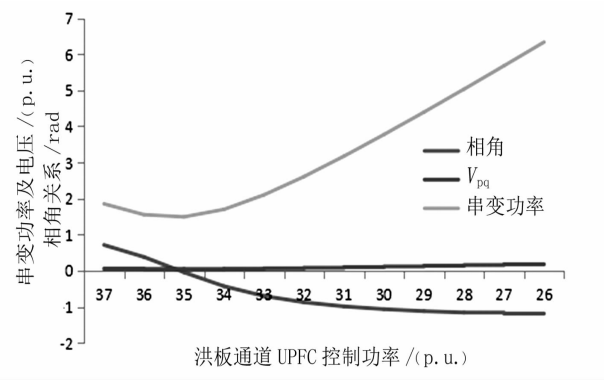


图 14 洪板 UPFC 不同线路控制功率下串联电压、功率关系

同样按照两串一并的原则在洪板双线安装 UPFC,其效果如图 13、图 14 所示,洪板双线功率改变量与 UPFC 容量计算如表 5 所示。

从计算结果可以看出,单位容量 UPFC 仅可改变黄万双线潮流不到 0.4 单位功率,效果较差。

表 5 洪板双线 UPFC 杠杆比

洪板双线功率改变 /(p. u.)	UPFC 装置功率 /(p. u.)	杠杆比 K
1.668	6.299 2	0.264 9
2.669	7.821 5	0.341 3
3.670	9.518 9	0.385 6
4.670	11.317 1	0.412 7
5.671	13.179 0	0.430 3
6.672	15.087 5	0.442 2
7.672	17.029 1	0.450 5
8.673	18.996 8	0.456 6

4.2 UPFC 动态特性仿真

以洪板双线洪沟侧安装 UPFC 为例,仿真动态模型采用动态切入式模型,暂稳仿真前川渝断面功率见表 1。仿真在 1 s 时投入 UPFC 模型并将洪板双线控制功率设置为 3000 MW。动态模型控制参数设置如下: $T_1=0.01, T_2=0.01, T_3=0.01, T_4=0.01, K_{1p}=0.06, K_{2p}=6, K_{1q}=0.06, K_{2q}=6, K_{1dc}=3, K_{2dc}=5, K_{1ac}=50, K_{2ac}=5$ 。

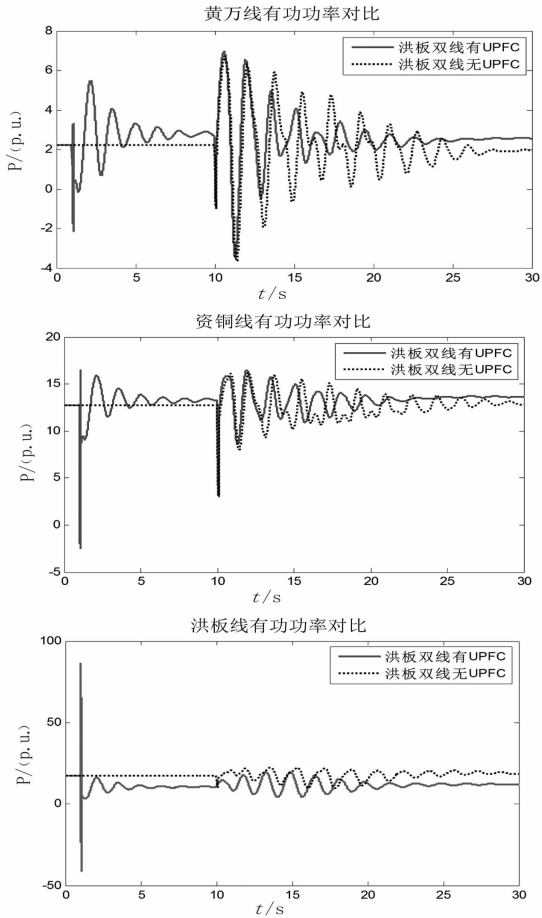


图 15 洪板 UPFC 安装前后川渝断面功率变化对比

(下转第 94 页)

基于无功电流的中性点 不接地系统小电流接地选线方案

李世龙,滕予非,李小鹏,张华杰,张星海,姜振超
(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:针对中性点不接地系统发生单相故障后难以准确选取故障回线的问题,提出一种基于无功电流的选线方案。单相短路故障发生后的,故障相各回馈线的电流变化主要来自线路分布电容电流变化,此电流为无功电流。其中故障回线无功电流为非故障回线与故障回线无功电流变化量之和,非故障回线无功电流变化量为该回线无功电流变化量。在此基础上提出基于无功电流变化量的中性点不接地系统小电流接地选线方案。单相短路故障发生后,比较故障相各回馈线无功电流变化量,变化量最大的馈线为故障馈线。利用 PSCAD 电磁暂态仿真软件搭建中性点不接地系统,对配电网中的架空线路和电缆线路单相短路故障进行了仿真研究,结果表明所提方法可靠性高,有较强带过渡电阻能力,且不受线路架设方式影响。

关键词:中性点不接地系统;无功电流;单相短路;故障选线

中图分类号:TM713 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)02 - 0020 - 04

A Novel Fault Line Selection Scheme for Isolated Neutral System When Single - phase Short Circuit Faults Occur Based on Reactive Current

Li Shilong, Teng Yufe, Li Xiaopeng, Zhang Huajie, Zhang Xinghai, Jiang Zhenchao
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Fault line selection is difficult in isolated neutral system. A novel fault line selection scheme based on reactive current is proposed. After single - phase short circuit faults occur, the current change of fault phase in each line is mainly composed of capacitive current, and the current is reactive current. For fault phase, the reactive current change of fault line is larger than that of normal line. On this basis, the novel fault line selection scheme is proposed. A isolated neutral system model is built in PSCAD to research the reliability of the proposed scheme. The type of transmission line and grounding resistance are considered in simulation. Simulation results show that the proposed scheme can select the fault line with a high reliability.

Key words: isolated neutral system; reactive current; single - phase short circuit; fault line selection

0 引 言

目前对于中性点不接地系统中单相短路故障的保护方法主要利用稳态量和暂态量。基于稳态量的保护方法主要包括:零序电流幅值法、零序电流比相法、零序电流群体比幅比相法、零序功率方向法、负序电流法和谐波法等。零序电流幅值法比较故障后各回馈线的零序电流幅值,幅值最大的馈线为故障线路^[1];然而此种检测方法灵敏度低,选线结果的可靠性受系统运行方式、线路长度和过渡电阻等影响。零序电流比相法比较故障后各回馈线零序电流方向,若某回馈线电流方向与其他馈线方向相反,则

此馈线为故障线路^[2];然而此方法同样受过渡电阻影响,当过渡电阻阻值较大时,零序电流方向难以准确比较。零序电流群体比幅比相法首先选出故障后零序电流幅值较大的三回馈线,在这三回馈线中比较零序电流方向,方向与另外两相反的为故障线路^[3];此方法综合了零序电流比幅和零序电流比相法,选线精度有一定程度提高,但仍无法消除过渡电阻对选线可靠性的影响。零序功率方向法的原理是故障馈线零序电流方向滞后于零序电压 90°,而非故障馈线零序电流方向超前零序电压 90°,因此零序功率小于 0 的馈线为故障线路^[1];此方法在本质上仍为零序电流比幅比相法的推广,因此其可靠性仍受过渡电阻影响。负序电流法的原理是故障后选

择负序电流最大的馈线为故障线^[4],但此方法的可靠性受系统对称性和负荷影响。谐波法主要针对中性点经消弧线圈接地的系统。基于暂态量的故障选线方法包括首半波法和小波变换法等。首半波法的前提是故障发生在相电压接近最大值的瞬间,故障线路暂态零序电流和电压在故障初始阶段极性相反而非故障线路二者极性相同的^[5],但此极性关系成立时间极短,且受故障初相角和过渡电阻影响。小波变换法对故障后的零序暂态电流进行小波变换,通过选取合适的小波基可实现对故障馈线和非故障馈线的区分^[6];但由于零序暂态电流受过渡电阻的影响,因此基于小波变换法的故障选线方法同样存在一定程度局限性。还有一些基于神经网络等智能算法的选线方法^[7-9],需要大量的故障后电气量进行训练,实际中难以实现。

根据前面的分析,现有中性点不接地系统小电流接地选线方法可靠性仍受过渡电阻和运行方式等多种因素的影响,存在一定局限性。仍有必要对小电流接地选线方法进行进一步研究。针对中性点不接地系统,下面提出一种基于故障相无功电流变化的新型小电流接地系统故障选线方案。通过比较故障前后的相电流无功分量变化大小选择故障馈线,提高了选线方案的耐受过渡电阻能力。

1 基于无功电流的小电流接地选线原理

典型中性点不接地系统结构如图 1 所示。

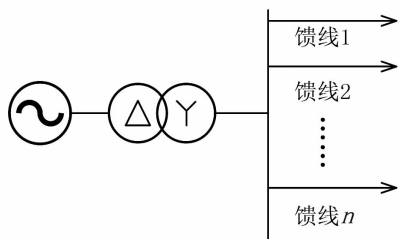


图 1 中性点不接地系统结构

中性点不接地的配电网系统中变压器多采用三角形/星型的接线方式,其中高压侧绕组为三角形接线,低压侧绕组为星型接线,发生单相接地故障后,由于中性点不接地系统无法形成故障电流通路,系统可在此状态下持续运行数小时。但出于系统安全角度考虑,仍需对故障馈线进行判断并清除故障。

以包含两回馈线的中性点不接地系统为例,正常运行与发生单相接地故障后的中性点不接地系统

无功电流分布情况如图 2 所示。

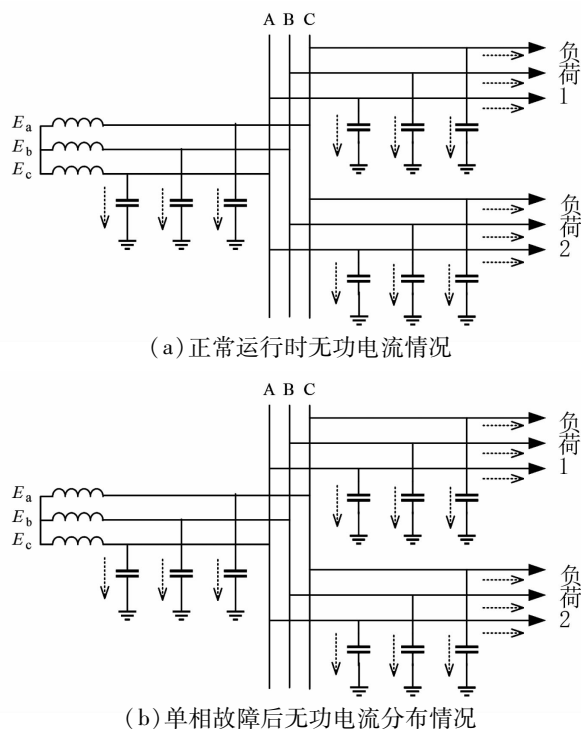


图 2 中性点不接地系统单相接地故障后无功电流分布

图 2(a)和图 2(b)分别为正常运行时和馈线 2 的 A 相短路故障后的无功电流分布情况,系统中的无功电流主要由负荷电流无功分量和线路对地电容电流组成。以 A 相为例,设馈线 1 和馈线 2 的 A 相负荷无功电流分别为 I_{qa1L} 和 I_{qa2L} ,三相母线电压为 U_a 、 U_b 和 U_c 。馈线 1、馈线 2 和母线对地等效分布电容分别为 C_1 、 C_2 和 C_b 。如图 2(a)所示的正常运行情况,馈线 1 和馈线 2 各相无功电流 I_{qa1} 和 I_{qa2} 可表示为

$$I_{qa1} = I_{qa1L} + j\omega C_1 U_a \quad (1)$$

$$I_{qa2} = I_{qa2L} + j\omega C_2 U_a \quad (2)$$

如图 2(b)所示的第 2 回馈线 A 相金属短路后,由于系统中性点不接地,A 相电压降为 0,B 相和 C 相电压上升为线电压。各相之间的线电压不变,两回馈线所带负荷可正常运行,负荷电流不变。此时馈线 1 和母线的 A 相对地电容电流为 0,非故障相对地电容电流增加。馈线 2 的 A 相由于接地,其所流过的电容电流为各回馈线及母线的非故障相电容电流之和。此时馈线 1 和馈线 2 的 A 相无功电流 I_{qa1f} 和 I_{qa2f} 可表示为

$$I_{qa1f} = I_{qa1L} \quad (3)$$

$$I_{qa2f} = I_{qa2L} - [j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_b + j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_c] \quad (4)$$

故障相各回馈线的无功电流变化量 ΔI_{qa1} 和 ΔI_{qa2} 分别为

$$\Delta I_{qa1} = j\omega C_1 U_a \tag{5}$$

$$\Delta I_{2a} = j\omega C_2 U_a + [j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_b + j\omega(C_1 + C_2 + C_b)\sqrt{3}U_c] \tag{6}$$

由式(5)、式(6)可以看出,故障馈线的故障相无功电流变化最大。

2 基于无功电流的小电流接地选线判据

根据上节分析,小电流接地系统中,单相故障后的相电流变化主要为无功电流变化。通过比较各回馈线中故障相无功电流变化量可识别故障馈线。设故障相为 φ ,故障前各回馈线 φ 相的无功电流可表示为 $I_{q\varphi n}$,其中 n 为母线上的馈线序号。故障后各回馈线故障相无功电流可表示为 $I_{q\varphi nf}$,单相故障后各回馈线的故障相无功电流变化量可表示为 $\Delta I_{q\varphi n}$

$$\Delta I_{q\varphi n} = |I_{q\varphi n} - I_{q\varphi nf}| \tag{7}$$

其中,

$$\text{Max}(\Delta I_{q\varphi 1}, \Delta I_{q\varphi 2}, \cdots, \Delta I_{q\varphi n}) \tag{8}$$

所对应的馈线即为故障馈线。例如,当 A 相发生单相接地故障后,若 $\text{Max}(\Delta I_{qA1}, \Delta I_{qA2}, \cdots, \Delta I_{qAn})$ 为 ΔI_{qA3} ,则故障位于馈线 3。

故障相的故障前无功电流可通过相电流 $I_{\varphi n}$ 与母线电压夹角 $\theta_{\varphi n}$ 计算, $\theta_{\varphi n}$ 表示馈线 n 的 φ 相电流与母线电压的夹角,电压超前电流时夹角为正。

$$I_{q\varphi n} = I_{\varphi n} \times \sin(\theta_{\varphi n}) \tag{9}$$

考虑到金属性单相接地故障后故障相电压有可能降为 0,此时故障相电压与电流的夹角难以准确测量,因此单相故障后以超前非故障相线电压与故障电流夹角 90° 的位置作为参考电压角度。以 A 相单相接地故障为例,故障后各回馈线 A 相无功电流可表示为

$$I_{qAnf} = I_{An} \times \sin(\theta_{BC} + 90) \tag{10}$$

将式(9)和式(10)代入式(7)后根据式(8)即可选出故障线路。

3 仿真研究与验证

3.1 仿真模型

利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建如图 1 所示的仿真模型,其为一个单电源供电的 10 kV

配电网,变压器低压侧为星型不接地连接。母线共有 5 回馈线,为检验此方法在电缆线路和架空线线路中的适应性,其中馈线 1 至馈线 3 为电缆线路,馈线 4 和 5 为架空线。仿真模型中各回馈线均使用频率特性模型。仿真验证中分别将短路点设置在馈线首端和末端,故障在仿真开始 0.2 s 后发生,且在仿真结束前故障不消失。各回馈线的长度和所带负荷如表 1 所示。

表 1 仿真模型中各回馈线参数

馈线编号	架设形式	线路长度 /km	有功负荷 /MW	无功负荷 /MVA
馈线 1	电缆	17.0	1.0	0.620
馈线 2	电缆	12.0	2.0	1.240
馈线 3	电缆	8.0	0.5	0.310
馈线 4	架空线	8.5	0.2	0.124
馈线 5	架空线	17.6	4.0	2.480

3.2 仿真结果及研究

分别以线路分布电容最大和最小的馈线 1 和馈线 4 为例,对所提小电流单相接地选线判据的性能进行仿真验证。

馈线 1 末端发生 A 相金属性短路时,各回馈线 A 相无功电流变化量如图 3 所示。

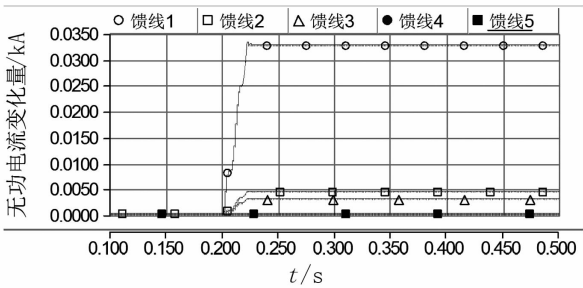


图 3 馈线 1 的 A 相金属性接地后各回馈线的无功电流变化情况

如图 3 所示,故障发生后,各回馈线的故障相无功电流变化量上升。其中馈线 1 的故障相无功电流变化量远大于其他馈线,根据所提选线判据,可正确判断馈线 1 发生单相接地故障。

当馈线 1 末端发生带 100 Ω 过渡电阻的 A 相短路接地故障时,各回馈线的故障相无功电流变化情况如图 4 所示。

如图 4 所示,与金属性故障相比,带 100 Ω 过渡电阻后,各回馈线故障相无功电流变化量的最大值降低,但馈线 1 的故障相无功电流变化量仍明显大于其他馈线,利用所提选线判据仍可实现故障馈线的正确识别。

表 2 不同馈线发生单相短路故障后选线判据可靠性对比

过渡电阻/ Ω	故障线	无功电流变化量/A					选线结果	选线结果 正确性
		馈线 1	馈线 2	馈线 3	馈线 4	馈线 5		
0	1	33.0	4.5	3.1	0.08	0.1	馈线 1	正确
	2	5.0	27.0	2.7	0.07	0.1	馈线 2	正确
	3	6.0	4.8	40.0	0.09	0.1	馈线 3	正确
	4	6.5	5.1	3.5	47.0	0.1	馈线 4	正确
	5	4.0	3.0	2	0.05	21.0	馈线 5	正确
100	1	20.0	2.5	1.7	0.03	0.2	馈线 1	正确
	2	3.0	18.0	1.6	0.03	0.2	馈线 2	正确
	3	3.5	2.6	23.6	0.04	0.2	馈线 3	正确
	4	3.6	2.7	1.9	26.00	0.2	馈线 4	正确
	5	2.6	2.0	1.4	0.02	15.0	馈线 5	正确

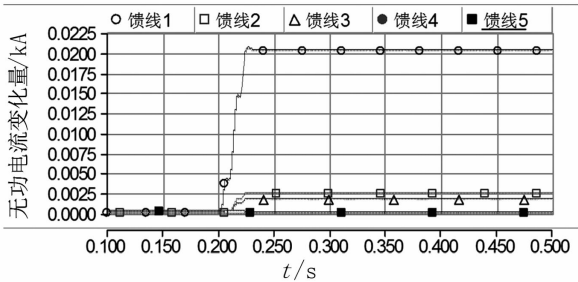


图 4 馈线 1 的 A 相带 100 Ω 过渡电阻接地后
各回馈线的无功电流变化情况

对其他线路上的单相短路故障进行仿真研究，分别对金属性故障和带 100 Ω 过渡电阻时的选线判据可靠性进行验证，仿真结果如表 2 所示。

由表 2 结果可知，金属性接地故障时，故障馈线的故障相无功电流变化量远大于非故障馈线。利用所提选线方案能可靠选出故障馈线。当单相接地故障带过渡电阻时，考虑 100 Ω 过渡电阻，由表 2 中所示的仿真结果可知，虽然无功电流变化量的最大值较金属性故障时有所减少，但故障馈线和非故障馈线之间仍存在明显差异，所提选线方案有较强的耐受过渡电阻能力。前面仿真中考虑了架空线和电缆线路，由仿真结果可知所提选线方案对于中性点不接地系统中架空线和电缆线路的单相接地故障均具有较高精度的选线结果。

4 结 语

针对中性点不接地系统单相接地故障后故障馈线难以准确识别的问题，分析了各馈线故障相无功电流变化情况，并在此基础上提出了基于故障相无功电流变化量的故障选线方案。通过理论分析，中性点不接地系统发生单相接地故障后，故障馈线的故障相无功电流变化量远大于非故障馈线故障相。

基于此特征构造故障选线判据，实现了对中性点不接地系统故障馈线的识别。利用 PSCAD 软件搭建中性点不接地系统仿真模型，考虑到架空线和电缆的混合架线方式，对所提选线方案进行验证，仿真结果表明所提选线方案能准确识别故障线路，有较高的带过渡电阻能力。

参考文献

[1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 水利电力出版社,1985.

[2] 潘贞存. 比相式和比幅式小接地电流系统接地选线保护[J]. 山东电力技术,1991(3):60-64.

[3] 张尔桦,潘贞存,桑在中,等. 群体比幅原理接地选线保护[J]. 继电器,1991(2):15-17.

[4] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(6):84-89.

[5] 胡佐,李欣然,石吉银. 基于餐流与首半波综合的接地选线方法研究[J]. 继电器,2006,34(7):6-9.

[6] 王耀南,霍百林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(6):54-58.

[7] 李荣明,王官洁,罗建. 基于神经网络的小电流接地系统综合智能选线[J]. 重庆大学学报,2004,27(5):85-89.

[8] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化,2004,28(8):88-91.

[9] 齐郑,艾欣,王炳革,等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术,2005, 29(12):43-46.

作者简介：
李世龙(1989),博士,研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期:2018-11-26)

基于 B 样条二进小波变换的故障选相研究

李 晨,张 阔
(国网天津滨海供电公司,天津 300450)

摘 要:利用暂态行波的特征提出了一种基于小波变换的故障选相方法。该方法的实现原理是通过解耦变换将不独立的三相故障电流变换为解耦的零模电流分量和 3 个线模电流分量,并运用 B 样条二进小波对解耦变换得到的模电流分量进行分析,计算得到零模电流分量和线模电流分量初始行波的模极大值;并根据 4 个模电流分量极大值在不同故障类型下的不同特征进行对比分析选出故障相。所提出的故障选相方法充分运用了故障时电流初始行波中的模电流分量特征,克服了现有选相方法选相速度慢、受波形畸变影响等缺点,采用所提方法可得到准确、可靠的选相结果。最后通过 PSCAD 软件进行了仿真,运用 Matlab 分析了各种故障时的数据,验证了所提选相方法在选相方面的准确性和优越性。

关键词:电流行波;故障选相;B 样条二进小波变换;解耦变换;模极大值

中图分类号:TM77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)02 - 0024 - 06

Research of Fault Phase Selection with Dyadic B – spline Wavelet Transform

Li Chen,Zhang Kuo
(State Grid Tianjin Binhai Electric Power Supply Company ,Tianjin 300450 , China)

Abstract:A fault phase selection method is put forward according to the characteristics of transient travelling wave. The proposed method is implemented based on the difference of fault features of transient current travelling waves, whose modulus maxima of B – spline wavelet transform is obtained by the decoupled transform of non – independent three – phase fault current. The fault phase selection method fully considering the features of the four modular fault components remedies the defects of conventional fault phase selection methods. Compared with the traditional fault phase selection methods, the correctness and reliability of fault phase selection method based on the dyadic B – spline wavelet transform are improved, which is verified by the simulation of PSCAD and data analysis of Matlab.

Key words:current travelling waves;fault phase selection;dyadic B – spline wavelet transform;decoupled transform; modulus maxima

0 引 言

当输电线路发生故障后,在故障电气量中会包含一种频率很高的暂态量信号,该信号被称为行波信号,其包含了与故障情况相关的丰富信息。正确地 从行波信号中识别和提取与故障相关的信息可以为快速准确地识别故障相、选择性地切除故障相提供依据。在继电保护现有工程实际和研究中,为了保证选相的快速性,故障选相方法采用行波信号的特征直接构成判别方法。目前对于采用行波信号进

行故障相别判别的方法主要包括以下几种:1)采用行波方向判别方法作为故障相别判别的方法,当根据方向判别方法判断某相为正方向时,该相即判断为故障相。这种选相判别方法在 RALDA 型行波保护中^[1]得到了应用。2)基于各相电流行波峰值进行故障选相的方法,通过比较检测期间三相行波电流故障分量峰值与电流最大的一相的故障分量最大值进行故障相判别。当任意一相电流的最大值大于电流最大一相的故障分量最大值的 1/2 时,判断该相为故障相。这种选相方法是对选相方法 1)的改进,在工程实践中已经有应用^[2]。3)基于电流行波

比较原理的选相方法,通过比较三相行波电流之差($I_A - I_B, I_B - I_C, I_C - I_A$)的极性进行判别。当两两之间的极性相反时,相邻元件输出正值并判定为故障相^[2]。

上述方法通过利用故障时行波信号中的暂态量信息,为故障时选相提供了思路,但在选相正确性方面仍存在一些问題。其中,方法 1)和方法 2)利用行波方向判别方法进行选相,无法避免因不同相间的电磁耦合引起的选相不正确问题。同时,与方法 3)一样,由于选相元件采用故障时行波瞬时值的特征进行故障相选择,而瞬时值受波形畸变、瞬变干扰的影响较大,容易造成分析结果的不可靠。此外,由于故障发生地点具有随机不可控的特性,这将造成行波波头在瞬时采样过程中采样值的数目不易确定。

小波变换因其在信号处理过程中具有使信号时频特性局部化的优点,近年来在数学和数字信号处理领域得到了充分的应用和发展^[3-5]。在电力行业应用方面,小波变换被广泛应用于行波信号的分析。这里的基本出发点是充分利用小波变换在暂态信号处理上的优点,避免选相受电磁耦合、波形畸变、瞬变等干扰的影响。考虑到行波信号在到达测量点时的突变性质以及小波变换具有将行波信号的特征进行时频局部化的作用^[6-7],因此结合行波信号和 B 样条二进小波变换,对电流行波信号进行时频分析,通过模故障分量构成更完善、更快速、更准确的故障选相方法。首先对 B 样条二进小波的优点进行分析,然后运用 B 样条二进小波对解耦变换后的模电流分量进行分析,计算得到模电流分量初始行波的模极大值,并根据模电流分量极大值在不同故障类型下的不同特征进行对比分析从而构建出故障选相原理。最后,通过仿真验证选相原理的正确性。

1 B 样条小波及其优点

在小波分析中,由于 B 样条小波具有优良的光滑性和紧支撑性,因此,在现代行波故障分析中一般使用 B 样条函数的导函数作为基小波函数。B 样条函数是一种半正定的、分段光滑的函数, m 次 B 样条函数的表达式为

$$\beta^m(x) = \beta^{m-1}(x) \cdot \beta^0(x), m \geq 1 \quad (1)$$

其中:

$$\beta^0(x) = \begin{cases} 1 & x \in (-0.5, 0.5) \\ 0 & x \notin (-0.5, 0.5) \end{cases} \quad (2)$$

由表达式可知 B 样条函数是分段多项式,这使得其处理非常简化。此外 B 样条函数具有对称性,可以由它构造出对称或反对称的样条小波,且可以达到非常高的近似精度。

以 B 样条函数构造的二进小波变换具有平移不变性,使信号奇异点的检测变得简单。当行波到达信号测量点时,测量点将测得一发生“突变”的信号,对该信号进行小波变换,即可获得对应于信号突变的模极大值。因此,借助 B 样条二进小波变换即可将行波信号的分析转化为其小波变换下的模极大值的分析,从而使基于行波信号的故障选相简单易行。

根据已有文献的分析结论有:三次 B 样条函数对提取含噪声信号的奇异性是渐进最优的。因此,采用三次样条函数作为二进小波变换的基函数,其对应表达式为

$$\beta^3(x) = \begin{cases} (x+2)^3/6 & x \in [-2, -1) \\ -x^3/2 - x^2 + 2/3 & x \in [-1, 0) \\ x^3/2 - x^2 + 2/3 & x \in [0, 1) \\ (2-x)^3/6 & x \in [1, 2) \end{cases} \quad (3)$$

对故障时的行波信号进行三次 B 样条二进小波变换即可获得故障时行波信号特征。

2 故障电流的解耦变换与小波变换

当输电线路发生故障时,可运用小波变换对量测点的信号进行处理得到该信号的模极大值,通过模极大值即可对该信号进行表征。运用模极大值的表征作用即可通过工频电流信号的分析实现基于模故障分量的故障选相,从而将工频量信号应用于行波选相中,实现仅通过故障时电流的初始行波判断故障相别的目的。

由于三相输电线路中各相电流不独立,因此无法完全消除非故障相对故障相电流的影响,需要通过解耦变换得到独立的模电流分量进行故障选相。以下假定在故障发生后母线流向故障点的三相故障电流分别为 I_A, I_B, I_C ,计算在不同类型故障条件下的母线流向故障点的行波电流。运用相模变换对三相故障电流进行解耦变换与分析,建立非独立的三相电流与解耦的模电流之间的数量关系。相模变换可采用的变换方法主要包括 Karenbauer 变换、

Clarke 变换等几种常用的解耦变换方法。以 Karenbauer 变换为例建立故障后三相电流的模电流分量, Karenbauer 变换因子的表达式为

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

(4)

利用上述 Karenbauer 变换因子对故障电流进行变换可得三相故障电流与各模电流的关系如下:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \\ I_\alpha = \frac{1}{3}(I_A - I_B) \\ I_\beta = \frac{1}{3}(I_A - I_C) \end{cases}$$

(5)

式中:零模电流分量 I_0 通过大地和导线构成电流回路,该回路的波阻抗相对较大,波传播的速度相对较小,传播过程中的损耗相对较大;线模电流分量 I_α 、 I_β 通过导线构成电流回路,该回路的波阻抗相对较小,波传播的速度与光速基本接近,且比较稳定,传播过程中的损耗相对较小。为便于故障选相,引入“ γ 模”:

$$I_\gamma = \frac{1}{3}(I_B - I_C)$$

(6)

γ 模不是独立的,它由 α 模和 β 模的线性组合而得到。需要注意的是, γ 模的定义是建立在三相平衡系统上的。根据式(5)、式(6)和故障边界条件可以分别得到对应于接地型短路、非接地型短路和三相短路时各电流模量的情况,如表 1 所示。

在获得解耦的各模量电流后即可进行 B 样条二进小波变换,对故障后的模量电流进行特性分析。

表 1 不同故障类型和故障相下的模量电流

故障类型	故障相	边界条件	$3I_0$	$3I_\alpha$	$3I_\beta$	$3I_\gamma$
单相接地	A	$I_B = I_C = 0$	I_A	I_A	I_A	0
	B	$I_A = I_C = 0$	I_B	$-I_B$	0	I_B
	C	$I_A = I_B = 0$	I_C	0	$-I_C$	$-I_C$
两相相间	AB	$I_C = 0; I_A = -I_B$	0	$2I_A$	I_A	$-I_A$
	BC	$I_A = 0; I_B = -I_C$	0	$-I_B$	I_B	$2I_B$
	AC	$I_B = 0; I_A = -I_C$	0	$-I_C$	$-2I_C$	$-I_C$
两相接地	AB	$I_C = 0$	$I_A + I_B$	$I_A - I_B$	I_A	I_B
	BC	$I_A = 0$	$I_B + I_C$	$-I_B$	$-I_C$	$I_B - I_C$
	AC	$I_B = 0$	$I_C + I_A$	I_A	$I_A - I_C$	$-I_C$
三相短路	ABC	$I_A + I_B + I_C = 0$	0	$I_A - I_B$	$I_A - I_C$	$I_B - I_C$

3 故障特征分析及选相原理

根据上述分析可以得到发生不同类型故障及不同相故障时的故障电流模分量的特征。

1)故障情况下的零模分量

在无干扰的情况下,如果线路发生接地故障,此时的零模分量 I_0 不等于 0,而如果发生的故障为相间或者三相短路时零模分量 I_0 等于 0。因而可以根据零模电流的大小判断故障为接地故障还是相间或三相短路。

2)各种情况下的线模分量

两相相间短路时,线模电流满足关系式 $\max(|3I_\alpha|, |3I_\beta|, |3I_\gamma|) = 2\min(|3I_\alpha|, |3I_\beta|, |3I_\gamma|)$,再根据最大模量电流及对应线模电流可以确定故障相。

单相短路时,3 个线模电流中有 1 个为 0,其他 2 个线模电流相等。根据模量电流为 0 的线模电流可以确定故障相。

两相接地故障时,零模电流与线模电流存在 3 种情况:当满足 $I_0 = I_\beta + I_\gamma$ 时,两相接地故障的故障相为 AB 相;当满足 $I_0 = I_\alpha - I_\gamma$ 时,两相接地故障的故障相为 CA 相;当满足 $I_0 = -I_\beta - I_\alpha$ 时,两相接地故障的故障相为 BC 相。

综上,基于 B 样条二进小波变换模极大值的故障相判别原理及其过程可总结为:通过三相电流计算得到故障情况下各个模量电流初始行波的 B 样条二进小波模极大值;通过电流模量中零模电流的小波模极大值与 0 的大小关系判断是否为接地故障,不为 0 时为接地故障,否则为非接地故障;通过电流模量中线模分量的关系可以判断故障时的相别。

故障类型、故障相与零模、线模电流的对应关系如式(7)、式(8)、式(9)所示。

$$I_0 \neq 0, \begin{cases} |I_0| = |I_\alpha| = |I_\beta|, \text{ 则为 A 相接地} \\ |I_0| = |I_\alpha| = |I_\gamma|, \text{ 则为 B 相接地} \\ |I_0| = |I_\beta| = |I_\gamma|, \text{ 则为 C 相接地} \end{cases} \quad (7)$$

$$I_0 = 0, \begin{cases} |I_\alpha| = 2|I_\beta| = 2|I_\gamma|, \text{ 则为 AB 两相短路} \\ |I_\beta| = 2|I_\alpha| = 2|I_\gamma|, \text{ 则为 CA 两相短路} \\ |I_\gamma| = 2|I_\beta| = 2|I_\alpha|, \text{ 则为 BC 两相短路} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_0 \neq 0, \begin{cases} I_0 = I_\beta + I_\gamma, \text{ 则为 AB 相接地} \\ I_0 = I_\alpha - I_\gamma, \text{ 则为 CA 相接地} \\ I_0 = -I_\beta - I_\alpha, \text{ 则为 BC 相接地} \end{cases} \quad (9)$$

不满足上述 3 种条件者,判为三相故障。故障类型的判别与选相过程如图 1 所示。

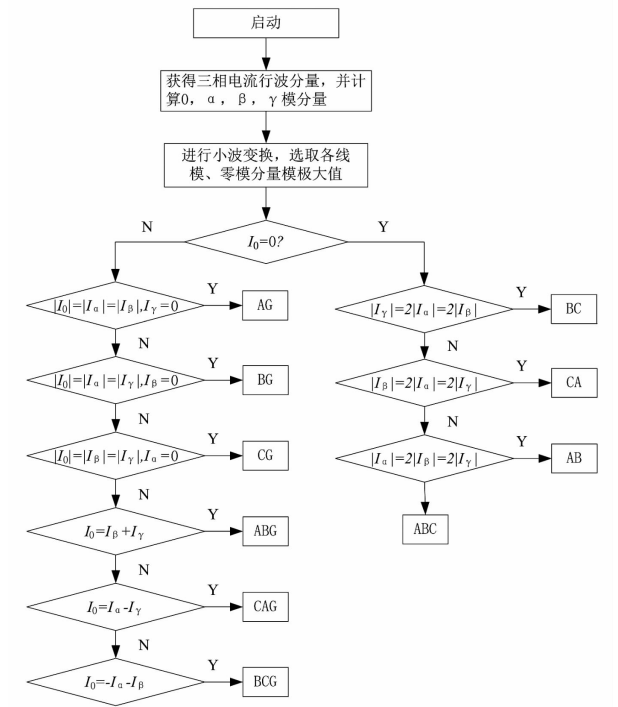


图 1 故障类型判别与选相流程

理论上可以根据上述等式条件准确判别出故障类型及故障相,然而实际信号的提取和处理过程中存在各种误差和近似,因而需将上述判别故障类型和故障相的等式条件变为不等式条件,即当等式两边的差值在一定的误差范围内即认为等式成立,从而可在实际工程中实现上述判别方法。

4 仿真验证

为了验证了上述故障选相方法在不同故障类型

和故障相别情况下的准确性和优越性,针对图 2 所示的仿真系统,采用 PSCAD 软件对其进行分析,获得系统故障时测量端处的暂态电流行波信号。并将 PSCAD 中获得的数据导入 Matlab 中进行数据处理,根据处理后的结果进行故障选相。数据处理采用基于三次 B 样条的小波函数进行小波变换,获得所需各个模量的模极大值。

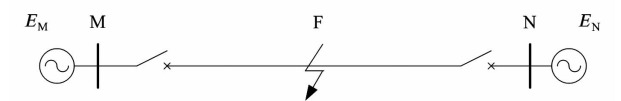


图 2 仿真系统

系统参数为:线路总长为 100 km,单位长度的电阻值为 0.035 7 Ω,单位长度的电抗值为 0.507 8 Ω,单位长度电导为 0.1 × 10⁻⁶ S,单位长度电纳为 3.272 3 × 10⁻⁶ S; $\dot{E}_M = 220 \angle 0^\circ$ kV, $\dot{E}_N = 220 \angle 20^\circ$ kV。

仿真中每隔 0.000 002 s 取一个点,即采样频率为 0.5 MHz。以 A 相接地短路为例,故障发生在距离 M 侧母线 90 km 处,过渡电阻为 0.01 Ω。保护安装处获得的 A 相接地短路电流及其模电流、小波变换结果如图 3 所示(故障发生在第 1096 个采样点处)。根据零模电流不为 0,可知故障类型为接地故障,又由于 $I_0 \approx I_\alpha \approx I_\beta$, $I_\gamma \approx 0$,对比表 1 和式(7)可知该故障类型为单相接地短路,故障相为 A 相。

同样地,利用 B 样条小波变换对其他单相接地短路、相间短路、相间接地短路和三相短路进行分析,可以得到对应不同故障类型下的零模电流和线模电流的小波模极大值如表 2 所示。对比表 1 和式(7)、式(8)、式(9)的故障模量特征即可由模电流的小波模极大值判断故障类型。

5 结 语

基于 B 样条二进小波变换,提出了一种根据暂态行波信号特征进行故障相别判断的方法,该方法利用模电流极大值数据进行故障相别判别,充分显示了选相时故障特征量的显著性,使选相的物理概念更加清晰;故障选相判据执行流程简单,选相逻辑清晰、速度快、可靠性高。该选相方法对故障点的过渡电阻、故障前的负荷电流、系统阻抗等因素具有很强的鲁棒性。此外,由于选相过程中合理利用了故障电流中的零模分量,使该方法在接地故障电流波形严重畸变的情况下也能够正确选相,克服了现有

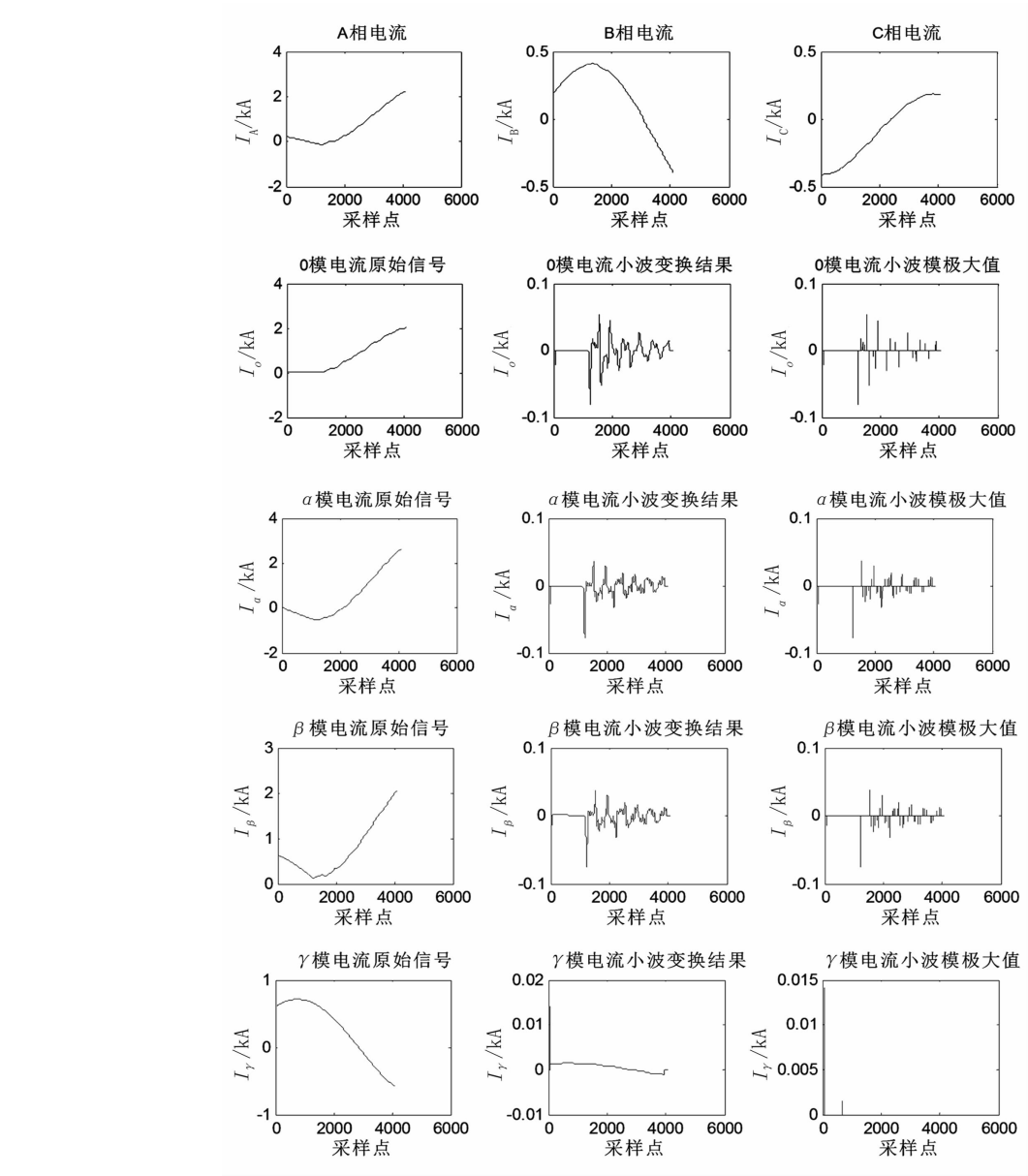


图 3 A 相故障电流及各模电流小波变换结果

表 2 模电流小波模极大值仿真试验结果

故障类型	故障相	模电流小波模极大值/kA			
		$3I_0$	$3I_\alpha$	$3I_\beta$	$3I_\gamma$
单相接地	A	-0.081 8	-0.076 8	-0.075 5	0
	B	0.335 7	-0.312 6	0	0.312 8
	C	-0.254 1	$1.406\ 0\times10^{-3}$	0.236 2	0.237 3
两相 接地	AB	$3.442\ 0\times10^{-13}$	-0.451 3	-0.224 9	0.226 4
	BC	$4.530\ 0\times10^{-13}$	-0.319 4	0.318 6	0.638 0
	AC	$2.761\ 4\times10^{-13}$	0.092 2	0.186 9	0.094 6
两相 接地	AB	0.223 0	-0.451 3	-0.121 4	0.329 9
	BC	-0.462 7	0.219 4	0.247 3	-0.101 6
	AC	-0.294 6	-0.045 7	0.186 9	0.231 2
三相接地	ABC	$5.587\ 0\times10^{-13}$	-0.451 3	0.186 9	0.638 0

故障选相判别方法因相间电磁耦合作用造成选相错误的问题。

参考文献

[1] Chamia M, Liberman S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines – Development, Design and Application[J]. IEEE Transactions on PAS, 1978, 97(6):1 – 6.

[2] 贺家李,葛耀中. 高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京:科学出版社,1987.

[3] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(4):23 – 27.

[4] 董新洲,耿中行,葛耀中,等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6):62 – 65.

[5] 王渝红,黄雯莹,任震,等. 离散二进小波变换及其在电机故障分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12):20 – 24.

[6] 董新洲,贺家李,葛耀中,等. 基于小波变换的行波故障

障选相研究:第1部分 理论基础[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12):24 – 26.

[7] 董新洲,贺家李,葛耀中,等. 基于小波变换的行波故障选相研究:第2部分 仿真试验结果[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12):20 – 22.

[8] 高志勇,成建军,张昕. 基于小波变换的变压器差动保护算法[J]. 四川电力技术, 2011, 34(4):72 – 74.

[9] 马爱平,刘磊. 基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(5):16 – 18.

[10] 喻敏,王斌,王文波,等. 基于同步挤压小波变换的电力系统时变谐波检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1):50 – 57.

[11] 李国庆,王丹,姜涛,等. 基于递归连续小波变换的电力系统振荡模式辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9):8 – 16.

作者简介:

李 晨(1983), 学士、助理工程师,从事配电运维及继电保护工作;

张 阔(1986), 硕士、工程师,从事配电运维及继电保护工作。

(收稿日期:2018 – 12 – 03)

(上接第14页)

[7] 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):64 – 70.

[8] 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 – 2330.

[9] 王官宏,陶向宇,李文锋,等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34):80 – 86.

[10] 王官宏,黄兴. 汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4):87 – 90.

[11] 张建新,刘春晓,陈亦平,等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7):35 – 39.

[12] 廖梦君,郭琦,李鹏,等. 基于RTDS的云南电网与南方电网主网异步联网运行控制特性分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7):40 – 44.

[13] 李建,王彪,刘程卓,等. 基于直流频率限制控制器的超低频振荡抑制方案[J]. 高电压技术, 2018, 1 – 8.

[14] 汤华,王渝红,魏亮,等. HVDC孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2016, 40(4):1066 – 1072.

[15] 陈亦平,程哲,张昆,等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4):96 – 102.

[16] 梅勇,周剑,吕耀棠,等. 直流频率限制控制(FLC)功

能在云南异步联网中的应用[J]. 中国电力, 2017, 50(10):64 – 70.

[17] 王曦,李兴源,赵睿. 基于相对增益和改进粒子群算法的PSS与直流调制协调策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6177 – 6184.

[18] 左剑,张程稳,肖逸,等. 基于灰狼优化算法的多机电力系统稳定器参数最优设计[J]. 电网技术, 2017, 41(9):2987 – 2955.

[19] 杜文娟,王海风,曹军. 稳定器设计的就地相位补偿法在多机电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2012, 32(22):73 – 78.

[20] 陈磊,路晓敏,陈亦平,等. 利用暂态能量流的超低频振荡在线分析与紧急控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17):9 – 14.

[21] 李阳海,黄莹,刘巨,等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14):84 – 91.

作者简介:

王渝红(1971), 博士、教授、博士生导师,从事高压直流输电、电力系统的稳定与分析、新能源并网研究;

陈 阳(1992), 硕士研究生,从事高压直流输电、电力系统稳定与控制研究;

曾 琦(1977), 博士、讲师,从事高压直流输电、柔性直流输电、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期:2018 – 10 – 19)

基于系统可靠性的主动配电网置信容量评估

陈 谦¹, 张文涛¹, 王思露², 张景瑞², 张 伟³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;
2. 厦门大学仪器与电气系, 福建 厦门 361005; 3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要:评估主动配电网的置信容量, 可以充分利用新能源, 为主动配电网的优化配置提供有效参考。以新增电源的有效载荷能力表征主动配电网的置信容量, 建立基于等可靠性指标的评估模型。在蒙特卡洛仿真基础上, 考虑网络中线路的故障情况, 对各时刻网络分类计算。采用基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长, 最后利用中点分割迭代法求解。IEEE 33 节点系统的仿真计算验证了所提方法的可行性和有效性。仿真时改变分布式电源参数和可靠性指标, 发现风机额定功率对置信容量的结算结果影响较大。

关键词:主动配电网; 置信容量; 分布式电源; 可靠性

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2019)02-0030-06

Credible Capacity Evaluation of Active Distribution Network Based on System Reliability

Chen Qian¹, Zhang Wentao¹, Wang Silu², Zhang Jingrui², Zhang Wei³
(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Department of Instrumental and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Jicheng Electronics Corporation, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: Credible capacity evaluation of active distribution network (ADN) can make full use of distributed generations (DGs), which provides valid reference for the optimal allocation of ADN. The credible capacity of ADN is defined as the payload capacity of DGs, and the evaluation model is established based on reliability indexes. Different situation with considering the fault of lines are classified and calculated on the basis of Monte Carlo simulation. The load adjustment steps are calculated by the method which is based on relative growth of loads. Finally, the credible capacity of ADN is calculated using the mid-point segmentation iteration method. The feasibility and validity of the proposed method are verified in IEEE 33 nodes system. In the simulation it can find that the rated power of wind powers has a greater influence on the calculation results of credible capacity when DGs parameters and reliability indexes are changed.

Key words: active distribution network; credible capacity; distributed generations; reliability

0 引 言

电源的置信容量(容量可信度)反映电源的容量价值即可被信用的容量,可以用来衡量分布式电源对电力系统充裕度所做的贡献^[1-2]。由于分布式电源的不稳定性和随机性,通常不考虑其容量价值^[3]。随着分布式能源的快速发展,将会有大量分布式电源接入主动配电网,如果仍不考虑其容量价值,可能会造成大量的资源浪费。为高效利用能源,

提高系统的稳定性、可靠性和安全性,对分布式电源的置信容量评估是十分必要的。

国内外对分布式电源的置信容量展开了相关研究。文献[4-5]总结了基本的分布式电源置信容量计算方法。文献[6]利用割线法和二分法相结合的混合算法来计算光伏/风机混合系统的置信容量。文献[7]利用基于动态潮流的方法计算主动配电网中间歇电源的置信容量。文献[3,8-12]针对光伏发电置信容量进行研究。文献[8]针对光伏发电的随机性和间歇性,提出一种考虑太阳辐射时变性和

功率相关性的方法计算光伏电站群的置信容量。文献[3, 12]利用粒子群优化算法计算光伏电站的置信容量,并且考虑了不同天气因素的置信容量。文献[13-19]基于风电的容量可信度进行相关研究。文献[13]建立了多状态风电机组出力模型,提出了最大因子步长法,兼顾风电置信容量计算的准确性和计算速度。文献[15]考虑了空间中多个风电场之间的出力相关性,构建了多风电场出力模型,在此基础上计算多风电场的出力模型。

上述关于分布式电源置信容量的研究,多是对单种类型间歇能源置信容量的研究以及不同研究条件对置信容量的影响。目前对混合分布式电源的置信容量和主动配电网置信容量的研究相对较少。在此基础上提出了基于可靠性的主动配电网综合资源置信容量的评估算法及实施流程。计算可靠性指标时考虑网络中线路的故障情况,对网络进行分类计算。在蒙特卡洛仿真基础上,利用中点分割迭代法同步调整所有负荷节点的负荷。考虑负荷点处负荷变化趋势,利用基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长。利用 IEEE 33 节点系统进行算例仿真,并且基于 IEEE 33 节点系统研究了不同的分布式电源参数和不同可靠性指标对置信容量结果的影响。

1 置信容量评估模型

1.1 置信容量计算方法

解析法和仿真法是计算电源置信容量的主要方法^[3]。解析法是推导出一个解析式来计算系统置信容量。对于主动配电网而言,系统的变量很多且是非线性的,还会受到分布式电源波动性的影响,构建一个合理的解析式非常复杂,所以一般不采用解析法计算置信容量。目前基本上都是运用仿真法来计算系统置信容量^[3, 5, 16]。

现有置信容量的表征定义可大致分为以下 4 类^[11, 17]:

- 1) 等效可靠容量 (equivalent firm capacity, EFC),是指在等可靠性水平下,分布式电源可以替代 100% 可靠的常规机组的容量;
- 2) 等效常规机组容量 (equivalent convectional capacity, ECC),是指在等可靠性水平下,分布式电源可以替代考虑停运率的常规机组的容量;
- 3) 新增电源有效载荷能力 (equivalent load car-

rying, ELCC),是指在等可靠性水平下,分布式电源可以额外满足的负荷量;

4) 一定置信度下保证出力 (guaranteed capacity, GC),是指在一定置信度水平下,主动配电网发电侧可用电量。

对于这 4 种定义,EFC、ECC、ELCC 是从系统可靠性角度出发,GC 是从发电侧不确定性角度出发。ECC 的计算结果会受到常规机组可靠性参数的影响,GC 的计算结果取决于人为设定的保证率参数,参数的选取对 ECC 和 GC 的计算结果影响很大。EFC 和 ELCC 两种定义能够保证较为一致的计算结果,因此研究中多采用这两种方法,其中基于 ELCC 的方法对于大规模新能源发电的置信容量计算效率更高^[13]。主动配电网中分布式电源渗透率增加可以更好地满足负荷需求,因此这里选用基于 ELCC 的方法计算置信容量。

1.2 评估模型

在主动配电网中,当系统中增加新的电源时,一般系统的可靠性会增加。对于主动配电网,ELCC 就是指调整系统的负荷水平,当系统可靠性水平与原始系统(不含分布式电源)一致时负荷的改变量。用负荷水平的改变量来表征主动配电网的置信容量,具体可以表现为

$$R = F(C, L) = F(C + W, L + \Delta L) \tag{1}$$

式中: R 为可靠性指标; F 为可靠性估算函数; C 和 W 分别为外电网可提供的电量和加入新能源后新增加的装机容量; L 和 ΔL 分别为系统的初始负荷和负荷改变量。由 ELCC 的定义可得系统的置信容量 C_N 为

$$C_N = \Delta L \tag{2}$$

2 序贯蒙特卡洛仿真

为简化计算,对于系统中的元件,只考虑正常运行和故障停运两种状态。抽样的元件考虑了风机、光伏、蓄电池以及线路。一般来说,系统元件的正常运行持续时间和故障修复时间均服从指数分布,它们的概率密度函数为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{3}$$

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \tag{4}$$

式中: λ 为故障率; μ 为修复率。

对概率密度函数求积分得到概率与时间的关

系,然后通过产生 $[0,1]$ 之间随机数的方式,反过来抽样正常运行持续时间 T_{TF} 和故障修复时间 T_{TR} ,其抽样公式为

$$T_{TF} = -\frac{1}{\lambda} \ln R_1 \quad (5)$$

$$T_{TR} = -\frac{1}{\mu} \ln R_2 \quad (6)$$

式中, R_1, R_2 为 $[0,1]$ 均匀分布的随机数。对正常运行时间和故障修复时间进行如图 1 所示的状态持续时间抽样,即可得到周期内各时刻系统元件的状态。

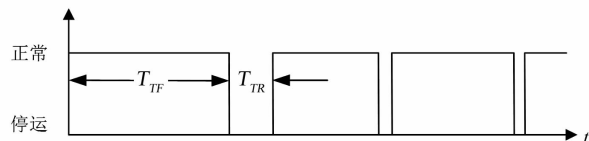


图 1 二状态抽样

序贯蒙特卡洛仿真法是按照时间顺序对元件进行模拟,仿真时保留了元件的时序性^[14]。对于主动配电网来说,首先对各元件进行状态抽样,得到各元件的状态,再结合风机、光伏的出力模型^[1, 12, 20]和负荷模型^[21],即可得到主动配电网各时刻网络状况,包括分布式电源的出力、负荷需求值以及线路状况。

3 可靠性指标计算

3.1 可靠性指标

主动配电网的置信容量计算是在系统可靠性的基础上进行的,此处选择电量不足期望(expected energy not supplied, EENS)和孤岛电力不足期望(expected demand not supplied when being island, EDNSI)作为主动配电网可靠性指标,具体如下:

$$EENS = \sum_{t=1}^T (C(t) \times P(t)) \quad (7)$$

$$EDNSI = \sum_{t=1}^T (C_g(t) \times P_g(t)) \quad (8)$$

式中: T 为计算周期; $C(t)$ 和 $C_g(t)$ 分别为正常运行时和孤岛运行时 t 时刻系统负荷削减量; $P(t)$ 和 $P_g(t)$ 分别为正常和孤岛运行时电量不足发生的概率。

3.2 线路故障时的计算

当出现故障时,系统网络可能解列为多个小网络。根据解列的小网络情况,将可能出现的情况进行分类,分别设计相应的处理办法。小网络分类及处理办法如下:

1) 如果小网络内部不含任何供电电源,则认为

该网络内部的负荷全部为缺供电量;

2) 如果小网络与外电网相连接,则将与外电网相连的节点作为平衡节点,潮流计算后得出各负荷点实际供电量,与需求电量相比较统计电量不足值;

3) 如果小网络没有与外电网相连,但网络内部包含 PV 节点,则选取其中一个 PV 节点作为临时平衡节点进行潮流计算,然后比较负荷点实际值与需求值来统计电量不足值。

根据不同的网络情况分类计算相应的可靠性指标值。

4 置信容量评估步骤及流程

4.1 负荷调整步长

考虑到网络现有负荷分布状况会影响负荷调整计算的准确性,这里采用简单的基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长^[22]。

周期内负荷点 i 处的相对增长比例为

$$r_i = \frac{P_{Li}^{\max}}{P_{Li}^{\min}} \quad (P_{Li}^{\min} \neq 0) \quad (9)$$

式中, $P_{Li}^{\max}$ 和 $P_{Li}^{\min}$ 分别为周期内负荷点 i 处负荷的最大值和最小值,当周期内负荷点 i 处最小值为 0 时,就取第二最小值作为 $P_{Li}^{\min}$ 进行计算。

因此,配电网中基于相对增长比例的负荷调整步长可以表示为

$$h_i = P_{Li}(0) \times r_i \% \quad (10)$$

式中, $P_{Li}(0)$ 为负荷点 i 处负荷初始值。当负荷增长比例较小时,求出的调整步长也会较小,在实际应用中可以使所有负荷点的调整步长扩大适当倍数来加快计算速度。

4.2 中点分割迭代法

关于 ELCC 的计算,实质上是一个一维搜索过程,传统的中点分割迭代法、弦截法即可满足要求。当负荷调整步长一定时,用中点分割迭代法会更加简单,并且其算法简单容易实现,因此这里选择中点分割迭代法求解。

下面对中点分割迭代法求解新增负荷的迭代原理进行简单说明。如图 2 所示,A 点为系统可靠性指标值 R ,G 点为原始系统可靠性指标值 R_0 。从 A 点开始根据负荷调整步长来调整负荷,此处以增长负荷为例,减小负荷方法相同。每调整一次负荷计算一次可靠性指标值,直至超过 R_0 ,此时可以确定

目标解位于最后一次调整后的负荷值和前一次负荷值之间,即图中 C 点和 D 点之间。判断是否满足精度,即图中 GD 距离小于 e (给定的一个较小值),若满足则终止迭代,若不满足则更新负荷增长步长为 一半值,从 C 点开始重复之前的搜索步骤,如此不断迭代,逐步逼近目标点 F。F 点负荷水平与 A 点负荷水平的差值 ΔL 即为主动配电网的置信容量。

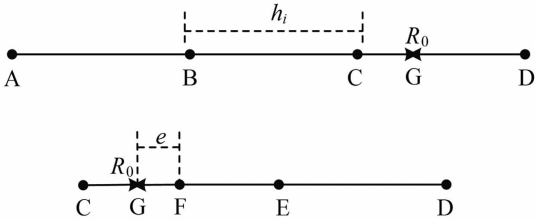


图 2 中点分割迭代法原理

4.3 评估步骤与流程

选定了可靠性指标和搜索方法,主动配电网置信容量的评估流程如图 3 所示,具体的步骤如下:

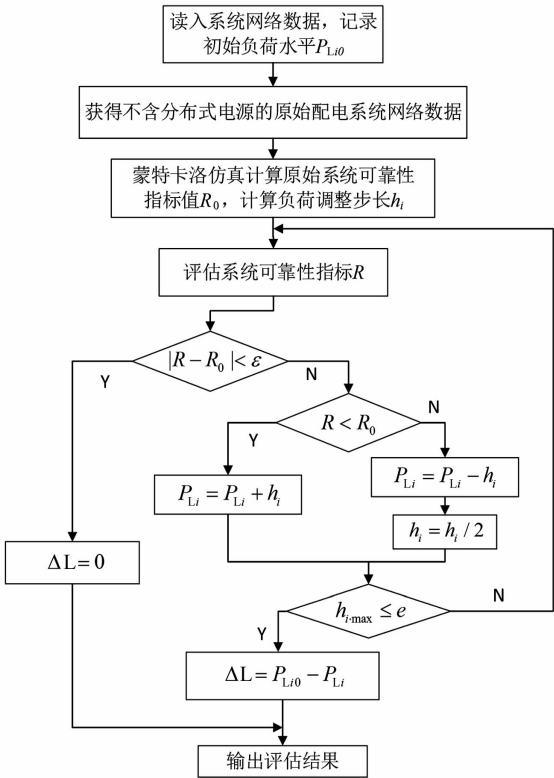


图 3 主动配电网置信容量评估流程

- 1)输入主动配电网的网络数据,调整蓄电池获得蓄电池状态,计算负荷调整步长 h_i ;
- 2)修改网络数据,去掉分布式电源数据,保留负荷信息,得到基于该主动配电网的原始系统数据,利用序贯蒙特卡洛模拟法对原始系统的可靠性进行评估,得到可靠性指标值 R_0 ;

- 3)利用序贯蒙特卡洛法得出各时刻系统网络状况,计算主动配电网的可靠性指标值 R ;
- 4)利用中点分割迭代法调整负荷水平,不断迭代调整,当负荷调整步长小于给定精度 ε 时,此时的负荷水平与初始负荷水平的差值 ΔL 即为主动配电网的置信容量。

5 案例分析

5.1 算例简介

以 IEEE 33 节点系统作为置信容量评估对象,其网络如图 4 所示,节点 6、13、24、30 为 PV 节点,节点 1 是平衡节点与外电网相连,其他节点都是 PQ 节点。为了简化模型,假设只有 PQ 节点带负荷,节点负荷最大值与各支路参数参考 IEEE 33 节点系统参数^[23]。假设各节点电压幅值标幺值和相角初始值都分别为 1 和 0,电压上、下限标幺值分别为 1.05 和 0.95,基准功率和基准电压分别为 10 MVA 和 12.66 kV,各支路线路功率都为 7000 kW,各元件故障率和修复率分别为 0.1% 和 60%。

针对分布式电源参数,设计了 5 种研究方案,表 1 列出了各方案系统中分布式电源的接入情况。

依据系统网络参数,各时刻分布式电源出力和各节点负荷需求值由蒙特卡洛仿真得出。

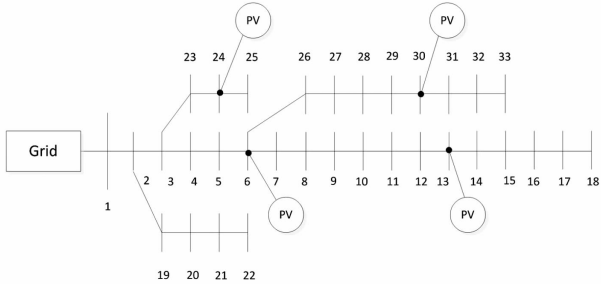


图 4 仿真算例的系统网络

5.2 计算结果

以方案 1 为研究对象,选择第 1 个小时的负荷值为初始值,计算负荷增长步长 h_i ,表 2 列出了各负荷节点负荷调整步长的计算值。计算出的负荷调整步长较小,根据光伏板面积和风机额定功率,将所有调整步长都扩大 40 倍来缩短计算时间。

假设大电网供电上限 P_{0max} 为 5000 kW,计算周期为 8760 h。由于分布式电源出力是根据一定概率密度函数仿真出来的,并且还存在着故障率和修复率,每次计算时仿真所得值不会完全一样。这里以

表 1 各研究方案分布式电源参数

参数	节点编号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
光伏板面积 /m ²	6	200	300	180	300	300
	13	—	300	200	300	300
	24	200	350	170	350	350
	30	300	300	200	300	300
	总计	700	1250	750	1250	1250
风机额定功率 /kW	6	100	400	400	200	400
	13	100	—	—	—	—
	24	300	400	400	300	400
	30	320	450	450	250	450
	总计	820	1250	1250	750	1250
蓄电池容量 /kWh	6	90	100	100	100	100
	13	50	150	150	150	90
	24	180	130	130	130	100
	30	150	150	150	150	80
	总计	470	530	530	530	370

表 2 负荷调整步长

节 点	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17
调整步长	1.585	1.427	1.902	0.951	3.171	3.171	0.951	0.951	0.713	0.951	1.902	0.951	0.951	0.951
节 点	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	31	32	33
调整步长	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	6.658	0.951	0.951	0.951	1.902	2.378	3.329	0.951

表 3 方案 1 置信容量计算结果

仿真计算参数	仿真 1	仿真 2	仿真 3	仿真 4	仿真 5	仿真 6
迭代次数	21	21	22	19	17	16
R_0	27.767 8	25.978 9	28.201 1	31.175 7	26.851 8	27.036 9
R	27.761 3	25.973 1	28.198 2	31.171 1	26.851 3	27.031 7
总计 /kW	1 434.48	1 472.25	1 429.39	1 419.23	1 515.10	1 418.55
平均值 /kW	43.47	44.61	43.31	43.00	45.91	42.99

EENS 作为可靠性指标列出了 6 次计算结果,如表 3 所示。图 5 展示了多次计算后所得的系统各节点负荷改变值。由表 3 可以看出,迭代 20 次左右可以得到结果,调整负荷后的 R 和 R_0 基本一致。图 5 中多次计算所得的负荷改变量柱状图基本一致,说明多次计算求得的置信容量相接近。实际应用中应该多次求解,取其最小值。

5.3 分布式电源参数的影响

以方案 2 至方案 5 为计算对象,各方案的分布式电源参数不同,以 EENS 作为可靠性指标分析不同分布式电源参数下主动配电网的置信容量。表 4 列出了各方案的置信容量计算结果。

由表 4 可以看出,迭代 16 次左右可以得到结果,方案 2、方案 3 和方案 5 所计算出来的结果相近,而方案 4 的结果明显减小。相较方案 2,方案 3 减小了光伏板面积,方案 4 减小了风机额定功率,方

表 4 方案 2 至方案 5 置信容量计算结果

计算参数	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
迭代次数	15	15	16	17
R_0	28.922	26.609	25.922	25.542
R	28.815	26.604	25.916	25.541
总计 /kW	1 953.7	1 892.0	1 150.5	1 923.3
平均值 /kW	59.20	57.33	34.86	58.28

案 5 减小了蓄电池的容量。可以看出在该实验环境下,蓄电池容量和光伏板面积对系统置信容量的计算影响不大,风机额定功率对置信容量的计算影响较大,较大的额定功率会获得较大的置信容量值。

5.4 可靠性指标的影响

以方案 1 为计算对象,在不同可靠性评价指标条件下进行计算,分析不同可靠性指标对置信容量的影响。每个可靠性指标分别进行 2 次仿真计算,表 5 列出了相应的结果。

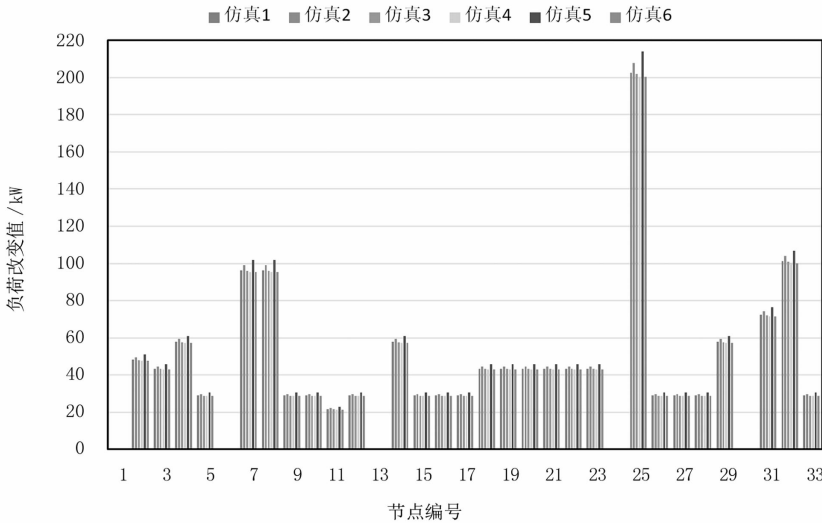


图5 多次计算各节点的负荷改变值

表5 不同可靠性指标下的计算结果

计算参数	EENS		EDNSI	
	第1次	第2次	第1次	第2次
迭代次数	19	21	20	18
R_0	24.893	27.768	34.805	32.578
R	24.889	27.761	34.780	32.577
总计 /kW	1 408.3	1 434.5	1 398.3	1 484.9
平均值 /kW	42.68	43.47	42.37	44.99

由表5可以看出,两个指标条件下都是迭代20次左右即可以得到结果,并且计算出来的置信容量接近。两个可靠性指标的计算方法类似,EENS是针对整个系统所有情况进行计算的,EDNSI是针对故障时孤岛网络的缺供电量,当 P_{0max} 设置较大时,两者计算结果相近,因此所得置信容量结果相差不大;当 P_{0max} 较小时,两者就可能有明显差异。实际应用中可以进行多次计算,取最小结果表征系统的置信容量。

6 结 语

在现有关于新能源可靠性和置信容量研究的基础上,采用等可靠性水平下主动配电网与原始系统可供应负荷改变量来评估其置信容量。用蒙特卡罗仿真法计算系统可靠性指标,计算时根据电源情况对网络进行分类。采用基于负荷相对增长比例的方法计算所有负荷点的调整步长,并且利用中点分割迭代法搜索等可靠性水平下负荷的改变量,以此表征主动配电网的置信容量。

所提方法在IEEE 33节点系统进行了示范和验证,并且计算了不同分布式电源参数和不同可靠性

指标条件下的置信容量。发现在实验环境下风机额定功率对置信容量计算结果的影响更大,较大的额定功率会获得较大的置信容量值,光伏板面积、蓄电池容量和较大外电网功率限制下可靠性指标改变对置信容量评估结果影响较小。在后续研究中,可以考虑增加供电不足概率、供电质量等可靠性指标进行计算,并且可以改变外电网供电上限,研究其对置信容量结果的影响。

参考文献

[1] 王秀丽,武泽辰,曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1): 15-21.

[2] 蔡霖霖,徐青山,王旭东. 基于加速时序蒙特卡洛法的风电场置信容量评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(5): 86-93.

[3] 方鑫,郭强,张东霞,等. 考虑天气不确定性的光伏电站置信容量评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(10): 27-32.

[4] 葛少云,王世举,路志英,等. 基于分布式电源置信容量评估的变电站规划方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(19): 61-67.

[5] 隋国富. 大规模新能源发电容量可信度分析[J]. 科技创新导报,2015(24): 48-49.

[6] Zhang P, Zhang W, Jia C, et al. Credible Capacity of Wind/PV Hybrid System Research Based on Hybrid Algorithm[C]. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2015), 2015: 2068-2073.

基于极化去极化电流法的 冲击电容器油膜绝缘老化检测

谭思文¹, 张晨萌²

- (1. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:利用极化去极化电流法(PDC)对冲击电容器油膜绝缘老化状态进行检测。介绍了该方法的理论依据,搭建了极化去极化电流测试平台,对未老化油膜以及不同老化程度的油膜进行了极化去极化电流的测试,得到了对应的极化去极化电流曲线、介质损耗以及直流电导率,分析了极化去极化电流曲线产生差异的原因。试验结果表明,通过对冲击电容器油膜的极化去极化电流进行分析,可以合理检测油膜的老化状态。

关键词:极化去极化;冲击电容器;油膜;老化;绝缘检测

中图分类号:TM855 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0036-05

Aging Detection of Oil Film Insulation for Surge Capacitor Based on Polarization – depolarization Current Method

Tan Siwen¹, Zhang Chenmeng²

- (1. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The polarization – depolarization current (PDC) method is used to detect the aging state of oil film insulation of surge capacitor. The theoretical basis of the proposed method is introduced, and the testing platform for polarization – depolarization current is built. Polarization – depolarization current of the unaged oil film and the oil film with different degree of aging are measured. The corresponding polarization – depolarization current curve, dielectric loss and DC conductivity are obtained. The causes for the difference in polarization – depolarization current curves are analyzed. The experimental results show that the aging state of oil film can be reasonably detected by analyzing the polarization – depolarization current of oil film of surge capacitor.

Key words:polarization and depolarization; surge capacitor; oil film; aging; insulation detection

0 引言

近年来,高压直流输电由于其大容量、低损耗、远距离电力传输等优势而逐渐成为输电网中的重要组成部分^[1]。冲击电容器作为高压直流输电工程中重要的电力设备,起到吸收中性母线雷电流或其他接地故障电流的作用^[2]。长时间的运行在热、电老化的作用下容易导致冲击电容器绝缘发生老化^[3],一旦老化程度加剧,就会大大增加冲击电容器绝缘失效的概率,严重威胁电力系统的稳定运行。因此,油膜绝缘作为冲击电容器内绝缘组成部分,对

其老化状态的检测与研究就显得十分有必要。

目前,冲击电容器内绝缘材料主要由绝缘油和有机薄膜构成,绝缘油用到苜基甲苯油,有机薄膜则主要采用聚丙烯薄膜,冲击电容器内绝缘的老化过程也主要是在这两大组成成分中发生^[4-5]。在冲击电容器正常工作中,电、热两种应力是绝缘薄膜老化的两个主要因素,这两种因素会使得固体介质微观结构缺陷逐渐加大,生长成电树枝直到介质击穿失效。当电场达到一定程度,电老化在薄膜老化中起主导作用,直流电压下,浸渍对薄膜老化的影响很小。冲击电容器使用的聚丙烯薄膜则是随着温度的升高其耐压值逐渐降低,而一旦处于高温环境下,击

穿所需要的电压幅值将会大大降低^[6-7]。国外,印度学者 V. Krishnan 研究表明局部放电严重程度与聚丙烯介质的老化程度密切相关,随着局部放电的发展,聚丙烯绝缘介质的绝缘强度逐渐下降,放电部位周围介质的电导率也会随之发生变化^[8]。学者 F. Guastavino 在研究 3 层不同结构的 25 μm 的聚酰亚胺绝缘膜的表面局部放电中发现当电场强度接近介质的击穿场强,电老化成为介质的主要劣化过程^[9]。国内,西南交通大学吴广宁教授研究团队研究了脉冲电容器的局部放电信号,在试验中先对脉冲电容器进行电老化,然后检测局部放电信号,得到了最大放电量、平均放电量 and 放电重复率与老化程度的关系曲线。另外还进行了微观形貌观察试验,认为电极边缘区域存在的局部绝缘缺陷是电容器绝缘失效的主要原因^[4]。冲击电容器油膜绝缘除了在电的作用下会加速老化之外,在热的作用也会加速老化。在热的作用下,电介质的老化过程会加速,热老化在宏观上可能会导致绝缘介质热融化以及介质质量减小;微观上会使得高分子聚合物的分子量降低,内部晶体结构发生变化,交联程度降低。当介质内发生局部放电时,放电产生的能量会导致局部温度快速升高,加速了电介质的热老化。当电容器绝缘介质处于高温环境时,其机械特性和外观形貌都会随温度出现相应的改变。尤其是金属化膜型电容器,介质表面喷涂有金属薄膜,介质和金属膜这两种材料的热膨胀系数不一样,在热老化的过程中就会出现应力,应力容易使得薄膜表面撑开,导致绝缘介质出现物理缺陷的可能性大大增加,而且还容易导致介质损耗增大^[10]。

当前,电容器绝缘状态检测的技术主要有油中气体组分检测(dissolved gas analysis, DGA)、tanδ 的在线检测、电容器极间绝缘检测以及电容器局部放电在线检测技术^[11]。油中气体组分检测作为化学检测手段发展成熟,但取油与检测过程繁琐。tanδ 的在线检测设备庞大且接线复杂,对设备早期绝缘缺陷的识别效果不佳。电容器极间绝缘检测对高绝缘性能介质不够理想。而电容器局部放电在线检测技术也由于噪声的存在导致检测效果不佳。

对比上述检测技术后,下面利用一种新型的检测方法——极化去极化电流法对冲击电容器油膜绝缘进行检测。极化去极化电流法是一种快速、高效、不具有破坏性的电气测量方法,其主要依据介质响

应理论,利用介质极化以及去极化过程的电流可以得到介质本身绝缘状态信息。目前此技术主要用于对变压器油纸绝缘以及电力电缆绝缘老化的研究^[12-14]。

下面主要对冲击电容器油膜绝缘进行电热老化处理,测得不同老化状态下油膜的极化去极化电流,分析不同老化状态下油膜极化去极化电流的变化规律,同时通过计算得到相应介质损耗以及直流电导率的变化规律。研究结果奠定了利用去极化电流曲线可以进行冲击电容器油膜绝缘老化状态检测的基础。

1 试验的检测原理

1.1 基本原理

利用极化去极化电流对冲击电容器油膜绝缘老化状态进行检测的主要原理是介质响应。理论上讲冲击电容器内绝缘本身就是一种电介质,其油膜绝缘可以看成是油和薄膜的复合介质。当外加电场作用介质时,介质内部的束缚电荷出现电极化现象。通过仪器对介质极化过程产生的电流以及去极化过程产生的电流进行检测并分析,达到利用宏观测量方法对介质微观机制进行解释的目的。

当外加电场 $E(t)$ 作用在各向同性质地均匀的电介质材料上,则此时介质材料内部的全电流为

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} U(t) + \epsilon_\infty \frac{dU(t)}{dt} + \frac{D}{dt} \int_0^t f(t-\tau) U(\tau) d\tau \right] \tag{1}$$

式中: $i(t)$ 为极化过程的全电流; C_0 为电极间的几何电容; σ_0 为介质的直流电导率; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_∞ 为光频介电常数; D 为极板间的间距; $f(t)$ 为介质极化响应函数。响应函数 $f(t)$ 是一个连续衰减的函数,主要与电介质的成分、结构以及温度等因素有关,而 $f(t)$ 与 $U(t)$ 的卷积表示电介质对历史信息的记忆。

由式(1)可以得到,当电介质在极化过程时,电介质中的极化电流为

$$i_p(t) = C_0 U(t) \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + f(t) \right] \tag{2}$$

去极化电流过程时,介质短路放电去极化电流为

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

一般极化去极化电流波形如图 1 所示。测量极化去极化电流时需在试品的两端加上直流电压源,

在外电场的作用下试验回路出现电流 i_p , 该电流主要是由试品的电导电流以及试品内部各种极化电流组成, 经过 t_1 时间后移除直流电压源, 将试品短接, 试品进入去极化阶段。

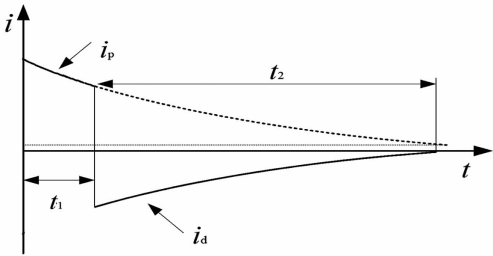


图 1 极化去极化电流波形

此时测得的电流 i_d 即为去极化电流, 由于移除了直流电压源, 去极化电流全部由极化后的试品产生, 因此也具有更高的研究价值, 由于其电流方向与极化时的电流方向相反, 形式上表现为负值。

1.2 检测平台

根据极化去极化电流测量法的基本原理, 搭建了图 2 的测试平台。当检测试验开始时, 将高压灭弧开关拨至 S1 时为极化回路, 进入极化阶段, 通过直流电源给电容器加压, 使其极化。经过一定的极化时间之后, 将开关拨至 S2, 试品两端短接, 极化时积累的电荷就会释放, 通过限流电阻放电, 进入去极化阶段。

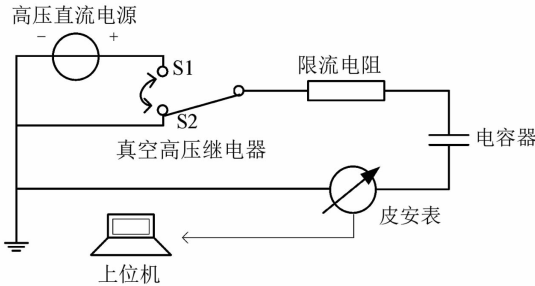


图 2 测试平台

试验主要设备为 1 台 Keithley6485 型皮安表, 该皮安表测量分辨率为 10^{-16} A, 以每秒最快读取 1000 个数据的速度进行测量。皮安表精度的高低直接决定了测量出的极化去极化电流是否涵盖介质极化去极化过程的大部分信息。

2 试验设计

2.1 试品结构及老化

单层薄膜会分布着一些缺陷点或者绝缘弱点, 通常行业内采用双层来降低绝缘弱点的影响, 因为

两层薄膜弱点重合的概率是非常小的。图 3 为冲击电容器油膜绝缘的结构图, 试验油膜绝缘模型采用两层薄膜重叠来减小薄膜导电弱点带来的影响, 单层薄膜厚度为 12 μm 。

电容器的老化方法通常以热加速老化居多, 而针对冲击电压下电老化的研究较少。而实际运行中由于冲击电压导致的电容器击穿故障时有发生, 因此在电老化的过程中依旧考虑到热老化, 为的是能够尽可能地模拟冲击电容器实际工作所处环境。老化采用标准的操作冲击电压, 双层薄膜击穿电压约为 14 kV, 老化试验冲击幅值选为 12 kV。一个老化周期内施加 200 次操作冲击, 每次操作冲击的间隔时间为 1 min, 最后再置于 90 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内热老化 15 h, 电热老化总共进行 12 个周期。

2.2 试验步骤

- 测试各个试品极化去极化电流的试验步骤如下:
- 1) 将试验油杯的高低电压端短接 24 h, 使得介质内部电荷尽可能中和或使其均匀分布。
 - 2) 高压直流电源、油杯、皮安表按图 2 连接。
 - 3) 直流源的电压设置为 500 V。
 - 4) 打开皮安表电源, 进行自检校准。

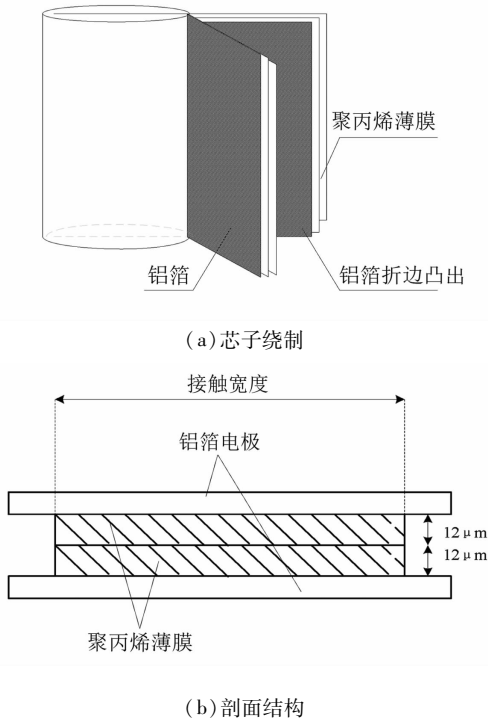


图 3 油膜绝缘结构

- 5) 设置极化去极化时间, 极化时间为 90 s, 去极化时间为 120 s。开始采集试品极化去极化电流, 并以 txt 文件格式进行数据保存。

6) 试品测试完毕后, 进入下一个老化周期, 然后继续以步骤 1) 至步骤 5) 进行新一轮的极化去极化电流测试。

另外, 由于极化去极化试验中, 电流幅值非常小, 通常是纳安乃至皮安的级别。所以需要通过种种方式尽量抑制噪声对测量结果的干扰。试验时要保证接线简单, 接线长度合适, 不相互靠近或者交叉, 回路接地点只选用一处, 以防止电路中的环流影响测试精度。

3 试验结果分析

试验得到未老化、老化 3 周期、老化 6 周期、老化 9 周期以及老化 12 周期的薄膜极化电流, 图 4 为对应的极化电流曲线。可以看出极化电流在极化初期便迅速衰减至逐渐平稳, 且随着老化程度的加深电流曲线整体呈上移趋势, 极化电流由未老化时的 2.0×10^{-8} A 上升至老化后期的 3.6×10^{-8} A。由于去极化电流衰减迅速, 且难以区分不同老化周期下对应的去极化电流曲线, 因此利用对数坐标来对测得的去极化电流曲线进行分析。从图 5 可以看出, 去极化电流在 10 s 左右便迅速衰减, 最后逐渐趋于平稳, 随着老化周期的增加, 去极化电流曲线有明显的上移趋势。去极化电流起始值相较于未老化下测得的 476 pA, 老化 12 周期后测得的电流值升高到 882 pA。稳定时的去极化电流值未老化时是 175 pA, 而老化 12 周期后达到 792 pA。

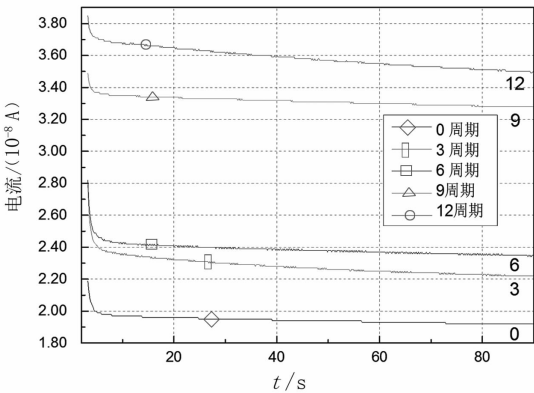


图 4 极化电流波形

这种规律可以解释成将双层油膜绝缘等效为一个 RC 并联电路, 那么在外界老化因素作用下, 油膜绝缘等效电容 C 增大, 在极化的过程中, 油膜积累

了更多的剩余电荷, 使得在油膜去极化过程中测得的去极化电流起始值和稳定值出现明显上升。由试验所得的去极化电流曲线可知这种差异具有一定的规律性, 随着油膜老化时间的增加, 去极化电流曲线有明显的上移趋势, 当达到 800 pA 以上时, 油膜老化程度达到了试验老化的后期。

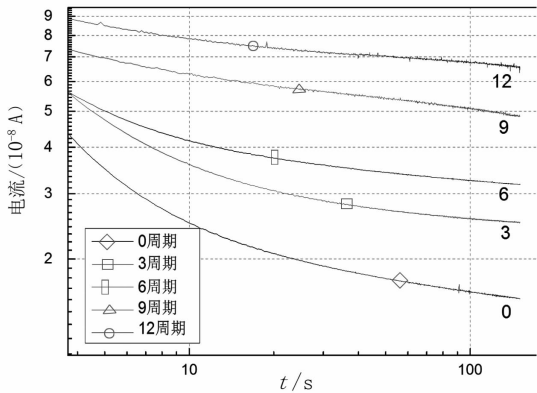


图 5 去极化电流波形

为了验证极化电流与去极化电流所呈现规律的有效性, 试验得到了对应老化周期的直流电导率和介质损耗, 因为电导率和介质损耗常被用来衡量电力设备的绝缘状态。时域中, 介质的直流电导率携带了电介质部分绝缘信息, 油膜绝缘可以看成是绝缘油和薄膜两种电介质组成的复合电介质, 测得的直流电导率是由绝缘油的直流电导率和薄膜的直流电导率两者组合而成的复合电导率。而频域中, 介质损耗角正切值与测量样品的大小和形状没有关系, 是电介质自身的属性, 测试电介质损耗角正切值也是电力设备绝缘试验的重要项目之一。

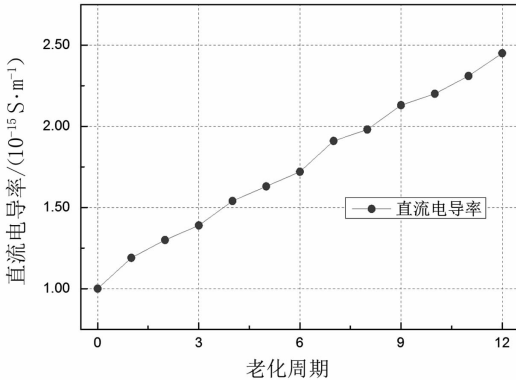


图 6 直流电导率

从图 6、图 7 可以看出随着老化周期增加, 油膜的直流电导率和介质损耗明显上升, 直流电导率由 1×10^{-15} S/m 上升至 2.5×10^{-15} S/m, 而介

质损耗由 0.006 5 上升至 0.022 0。说明随着老化周期的增加,油膜的绝缘状态在逐渐降低,这一点与通过极化去极化电流判断油膜老化状态的变化规律是一致的,因此可以利用极化去极化电流判断油膜老化状态。

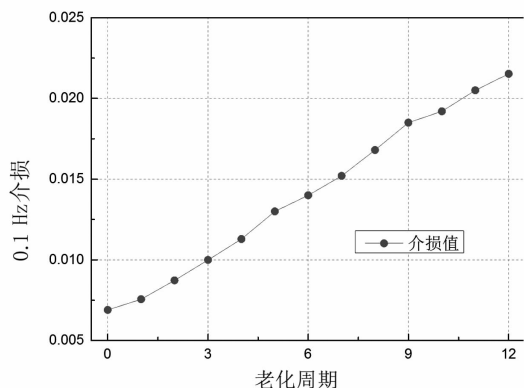


图7 介质损耗

4 结 语

通过加速老化冲击电容器油膜绝缘得到不同老化程度下的油膜,利用极化去极化电流(PDC)测试法,对不同老化程度下的油膜进行了极化去极化电流测试,并通过获得的极化去极化电流数据得到了对应油膜的介质损耗和直流电导率参数。试验结果表明,加速老化后的油膜与未老化油膜在极化电流、去极化电流衰减速度上有明显差异。随着老化程度的加深,极化电流、去极化电流幅值有明显区分且呈上升趋势,得到的介质损耗与直流电导率随油膜老化程度的加深而逐渐增大。试验表明利用极化去极化电流法可以有效地对冲击电容器油膜绝缘老化状态进行合理的评估。

另外,需要指出的是加速老化油膜时只考虑了电、热两种老化因素,且只对油膜进行了研究,实际冲击电容器绝缘老化过程肯定更加复杂,利用极化去极化电流对冲击电容器老化状态进行准确、完备的评估,还需要更多的试验以及大量的研究。

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] 吴娅妮,蒋卫平,朱艺颖,等. 特高压直流输电线路故障过电压的研究[J]. 电网技术, 2009, 33(4):6-10.

[3] 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.
[4] 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.
[5] 张文斌. 电力电容器浸渍剂应用概况与预测[J]. 电器工业, 2002(7):48-49.
[6] Ratra M C, Nagamani H N, Ganga S. Ageing of Impregnated Polypropylene Film for Capacitor Application under Combined Electrical and Thermal Stress[C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2002:295-300.
[7] Hammal R, Rain P, Gosse J P, et al. Study and Characterization of PD in Impregnated Polypropylene Capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 7(3):446-457.
[8] 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.
[9] Centurioni L, Coletti G, Guastavino F. An Experimental Study to Investigate the Effects of Partial Discharges (PD), of Electric Field and of Relative Humidity During Surface PD Tests on Thin Polymer Films[C]. 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 1999:239-242.
[10] Ramasamy, Natara, 徐政,等. 电力电容器[J]. 华东电力, 2007(9):96-96.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 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.

作者简介:

谭思文(1993),硕士研究生,研究方向为高压绝缘与电力系统过电压。

(收稿日期:2018-10-17)

基于有限元法的 IGBT 模块复合 材料等效导热率计算研究

张蓐方¹, 罗 锦², 陈映秀¹, 吴建雪¹, 李 月¹, 江 浩¹
(1. 国网四川省电力公司遂宁供电公司, 四川 遂宁 629000;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:在柔性直流输电飞速发展驱使下, IGBT 模块日益小型化, 其内部发热问题愈加严重, 因此, 对 IGBT 模块内部散热问题的研究具有很实际的价值。针对现有材料导热率研究的计算均有相应的局限性问题, 采取有限元分析方法建立 ANSYS 有限元分析模型, 研究了复合材料等效导热率计算的方法, 对比 Maxwell – Eucken 方程、文献中的试验数据以及所提方法的计算结果, 说明所提方法的可行性。最后利用所提方法, 得出了考虑填料的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率、填料颗粒团聚等因素对复合材料等效导热率的变化规律。

关键词:柔性直流输电; IGBT; 复合材料; 导热率; 有限元法

中图分类号: TQ314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 – 6954(2019)02 – 0041 – 06

Research on Calculation Method for Equivalent Thermal Conductivity of Polymeric Composites of IGBT Modules Based on Finite Element Method

Zhang Rufang¹, Luo Jin², Chen Yingxiu¹, Wu Jianxue¹, Li Yue¹, Jiang Hao¹
(1. State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to adapt to the development of flexible HVDC transmission technology, IGBT modules are becoming smaller, but the internal heating problem of IGBT modules is becoming more and more prominent. Therefore, the issues related to thermal dissipation of IGBT module packages for further exploration have an important guiding significance and practical value. The numerical calculation has its own scope of application and limitation, and the experimental studies are reliable but high cost. At present, ANSYS finite element method to calculate equivalent thermal conductivity of polymeric composites is seldom reported. Then, the method to calculate equivalent thermal conductivity of polymeric composites is studied based on finite element method. The comparison of Maxwell – Eucken equations, experimental results of reference and the obtained results shows the feasibility of this method. Finally, The change regulations of equivalent thermal conductivity of composites considering the factor of filler shape, size, volume fraction, the thermal conductivity of filler particles, particles agglomeration are obtained.

Key words: VSC – HVDC; IGBT; polymeric composites; thermal conductivity; finite element method

0 引 言

在柔性直流输电技术飞速发展的驱使下, 作为柔性直流输电换流阀开关器件的 IGBT 模块日益小型化。在同样的功率情况下, IGBT 体积的减小会导致电流密度增大, 内部发热增加。如果模块材料散热性能不好, 会直接导致内部热量的堆积, 温度不断的升高会引起热应力变形严重; 如果器件长期在此条

件下运行, 轻者缩短 IGBT 的寿命, 重者影响其运行可靠性, 进而有造成大面积停电的可能: 因此, IGBT 模块材料的导热性研究俨然已经成为其发展的一个重心, 如何改善 IGBT 模块材料的导热性能成为现阶段的重点工作。

IGBT 在柔性直流输电中的应用受到其封装材料及其导热性能的制约。为了得到性能优良的 IGBT 模块封装复合材料, 近年来越来越多的研究者致力于复合材料导热性能的研究^[1], 结果表明, 在基体中加入

高导热率的填料可以改善复合材料的导热性能。国内外学者也有很多致力于对材料导热率的理论计算模型进行研究,取得了相应的成果与进展^[2-9],但各计算模型也都有一定的局限性,并且适用范围也有限。现有研究中,利用有限元分析方法对 IGBT 模块复合材料的导热性能进行的研究相对较少^[10-14]。

为了提高材料导热性能,下面采用有限元分析方法,在 ANSYS 软件中建立材料的微观模型并对材料的等效导热率进行仿真计算。同时考虑各种可能的因素,如填料的新装、大小、填料的导热率等对负荷材料导热性能的影响,仿真计算得出各影响因素对复合材料的变化规律,大大节省时间和成本。所提方法对 IGBT 模块复合材料导热性能研究及 IGBT 在柔性直流输电中的应用具有十分重要的意义。

1 等效导热率计算方法

1.1 固体热传导

热传导是指发生在物质本身各部分之间或直接接触的物质之间热量传递的现象^[15]。由热力学相关定律可以知道,热量是物质运动的一种形式,从微观的角度来看,当粒子的能级轨道发生变化,其能量就会发生相应的改变,由此就会引起物质能量的改变。

由傅里叶公式有:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} \tag{1}$$

式中: q 为稳态热通量, W ; λ 为导热率, $W/(m \cdot K)$; ΔT 为热流方向上的温度差, K ; Δl 在热流方向上的垂直距离, m 。

由式(1)可以得到导热率的计算式为

$$\lambda = -\frac{q \times \Delta l}{\Delta T} \tag{2}$$

1.2 等效导热率理论预测模型 (Maxwell - Eucken 方程)

填充型复合材料的导热性能与基体和填料的导热率有关,同时也与填料颗粒的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率、填料在基体中的分布状态等因素有关^[16]。

Maxwell 等人^[5]提出了基于微粒是孤立存在,彼此之间不存在相互作用的假设的材料导热率计算模型,其模型为

$$\lambda = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V(\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{3}$$

式中: V 为填料颗粒的体积分数; λ 为复合材料的导热率; λ_1 为基体材料的导热率; λ_2 为填料颗粒的导热率。

在微粒之间相互独立的假设下,得到了 Maxwell - Eucken 数学模型。从数学表达式可以看出,复合材料的导热率受到填料的体积分数、基体及填料导热率的影响。并且试验表明:当 V 很小时,复合材料导热率 λ 的实际值与模型计算值能很好吻合;当 V 较高时,复合材料导热率 λ 的实际值与该模型的预测值就相差甚远。因此,Maxwell 等人提出的 Maxwell - Eucken 模型有一定的局限性,只能在填料体积分数较低时才适用。

1.3 基于有限元法的等效导热率预测模型

这里基于有限元分析软件 ANSYS 对复合材料等效导热率的计算方法进行研究,建立模型并与理论预测模型以及文献[17]进行对比分析。对比结果见表1:Vol. % 为体积百分数; D 为颗粒的平均直径; λ_1 为基体的导热率; λ_2 为填料的导热率; λ 为文献[17]计算的等效导热率; λ' 为理论模型计算出来的等效导热率; λ'' 为所提有限元方法计算出来的等效导热率。由表1 可以看出,所提方法的计算结果与 Maxwell - Eucken 模型理论值以及文献[17]的试验结果吻合度很高。由此可见,所采用 ANSYS 的仿真计算方法是可行的。

2 基于有限元法的等效导热率预测方法

2.1 有限元 ANSYS 介绍

在没有内热源、稳态条件下,温度 t 的分布遵循导热方程^[18] 为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \tag{4}$$

要求解此方程,有3 类边界条件,分别为:

表1 导热率结果对比

单位: $W/(m \cdot K)$

复合材料	(Vol. %) /%	$D/\mu m$	λ_1	λ_2	λ'	λ	λ''
ER - Al ₂ O ₃	31.2	4	0.17	20 ~ 30	0.70 ~ 0.71	0.67	0.61
ER - SiO ₂	45.0	20	0.17	0.7 ~ 1.7	0.46 ~ 0.87	0.72	0.69

1) 规定边界上的温度值 t 为一个恒定常数。

$$t = \text{const} \tag{5}$$

2) 规定边界上的热流密度值为一个恒定常数。

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \text{const} \tag{6}$$

式中： n 为表面的法向量； λ 为材料的导热系数。

3) 规定周围流体的温度、材料与流体间导热系数。

下面的仿真过程中, 仅仅只涉及前两种边界条件。

2.2 建模与边界条件设置

在有限元分析软件 ANSYS 中建立复合材料模型: 基体是边长为 300 nm 的正方体; 填料颗粒平均分布 27 个颗粒, 颗粒形状为球体、正方体。

边界条件: 微观模型相对两面的壁面温度分别为 100 ℃ 和 0 ℃, 另外 4 个面绝缘。

仿真考虑了: 填料颗粒的形状为球体、正方体; 填料颗粒的体积分数为 5%、10%、15%、20%、30%、40%; 填料颗粒的导热率为 10 W/(m·K)、20 W/(m·K)、30 W/(m·K); 填料颗粒的团聚等因素对复合材料等效导热率的影响。

经过建立模型、设置材料参数、划分网格并求解。求解后, 根据模型温度场的分布, 按公式对复合材料等效导热率进行计算。

2.3 有限元法对复合材料等效导热率预测

图 1 为用 ANSYS 建立的模型, 其中填料颗粒均匀分布在基体材料内部。边界条件为微观模型左、右壁面温度分别为 100 ℃ 和 0 ℃, 另外 4 个面绝缘。

图 2 至图 4 均为球形颗粒均匀分布, 在体积分数为 10% 情况下的结果。图 2 是温度场分布图, 其中: 图 2(a) 是基体材料的温度分布; 图 2(b) 是填料颗粒的温度分布; 图 2(c) 是中间 9 个填料颗粒的温度分布。由图 2 可以得出, 温度沿着 x 轴依次减小, 热流量方向是由 x 负向指向 x 正向。

图 3 和图 4 分别是热梯度分布和热通量分布图。填料颗粒附近的热梯度和热通量比基体材料的热梯度和热通量大, 因为填料颗粒的导热率大于基体的导热率。

根据模型温度场的分布, 对复合材料等效导热率进行分析计算。

$$\lambda = \left| \frac{q \times \Delta l}{\Delta T} \right| = \left| \frac{\sum q_i \times \Delta l}{\Delta T} \right|$$

$$= 0.2635 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \tag{7}$$

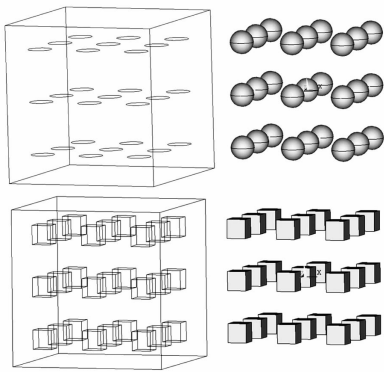


图 1 均匀分布模型

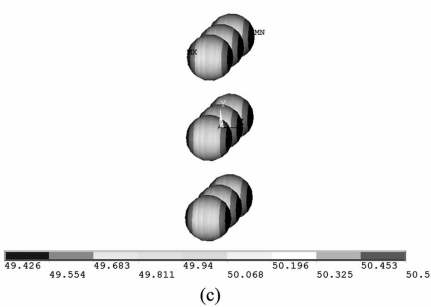
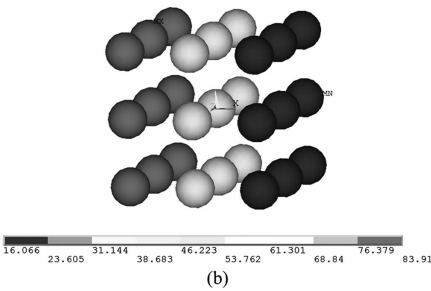
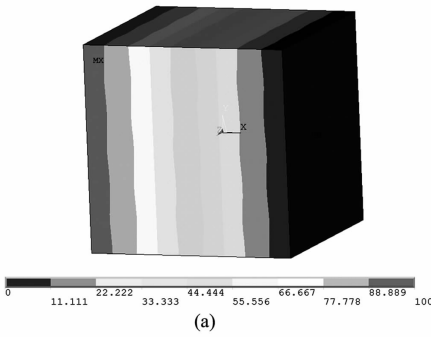


图 2 温度场分布

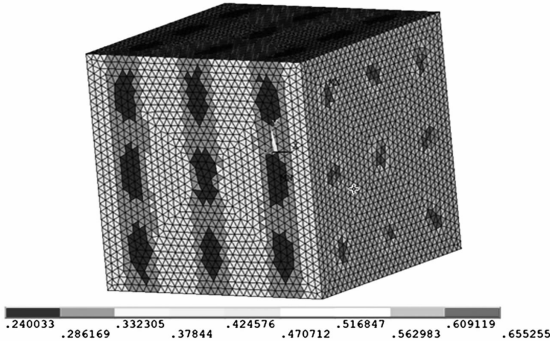


图 3 热梯度分布

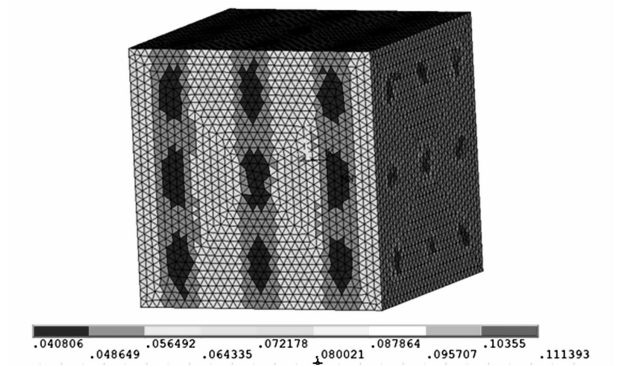


图 4 热通量分布

用 Maxwell – Eucken 理论模型计算体积分数为 10% ,球形颗粒均匀分布时,复合材料等效导热率为 0.223 6 W/(m · K)。用有限元方法得到复合材料等效导热率为 0.249 8 W/(m · K),与 Maxwell – Eucken 理论值的误差为 11.72%,进一步说明有限元方法预测复合材料等效导热率是可行的。

3 复合材料等效导热率的影响因素

复合材料的导热性能最终取决于填料及其在基体的分布情况^[16]。当填料含量较低时,其对材料导热性能的贡献并不大;当填料含量较多时,复合材料的力学性能受到影响,其含量增至某一值时,填料微粒之间相互作用并形成一定的链状和网状。当热流的方向与链条的方向一致时,材料的热阻最小,宏观反应就是导热率高,导热性能好;反之则导热性能差。

填充型复合材料导热性能的影响因素^[16]有:聚合物基体的种类、特性;填料的导热率、形状、大小、体积分数、分布情况等。

3.1 填料颗粒导热率的影响

为了得到更好导热性能的复合材料,可以向基体材料中添加高导热率的填料颗粒来提高复合材料的等效导热率^[7]。采用所提方法计算的结果见表 2 和表 3,表中的填料 1、填料 2、填料 3 的导热率分别为 10 W/(m · K)、20 W/(m · K)、30 W/(m · K)。图 5 中 4 幅图分别是体积分数为 10%、20%、30% 和 40% 时,复合材料等效导热率与填料颗粒导热率的关系。从图 5 中可以看出随着填料颗粒的导热率增加,复合材料的导热率也增加。

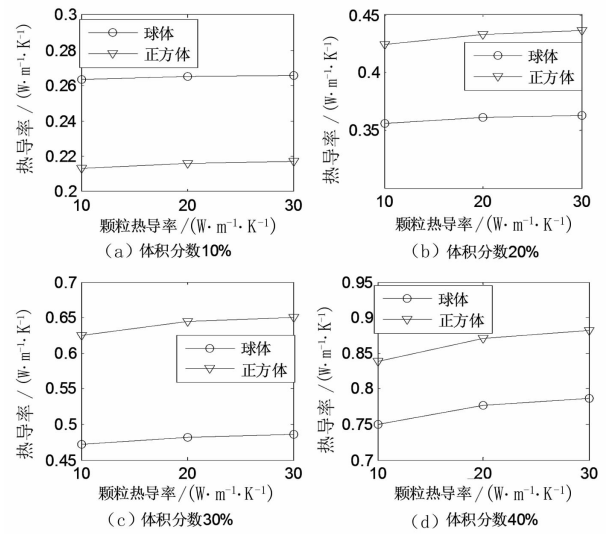


图 5 复合材料等效导热率与填料颗粒导热率的关系

表 2 球状颗粒对复合材料导热率的影响

体积分数 /%	复合材料导热率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)		
	填料 1	填料 2	填料 3
5	0.231 2	0.232 0	0.232 0
10	0.263 5	0.265 3	0.265 3
15	0.357 6	0.361 8	0.3618
20	0.3561	0.3611	0.3611
30	0.4713	0.4816	0.4816
40	0.749 2	0.776 3	0.7763

表 3 正方体颗粒对复合材料导热率的影响

体积分数 /%	复合材料导热率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)		
	填料 1	填料 2	填料 3
5	0.165 0	0.166 5	0.167 0
10	0.213 3	0.216 1	0.217 1
15	0.297 3	0.302 3	0.304 1
20	0.424 2	0.433 3	0.436 5
30	0.625 3	0.643 9	0.650 4
40	0.838 3	0.870 9	0.882 5

3.2 填料颗粒体积分数的影响

在基体材料中添加高导热率的填料颗粒,这种方法提高了复合材料的等效导热率。但随着填料的增加对复合材料的热性能到底有什么影响,还需要用仿真来进行验证。

图 6 中的 3 条曲线代表填料颗粒的导热率 λ₂ 分别为 10 W/(m · K)、20 W/(m · K) 和 30 W/(m · K) 时不同体积分数下的导热率变化情况。从图 6 可以看出,无论是球状颗粒还是正方体颗粒,复合材料的

导热率随着填料颗粒体积分数的增加而增加,但非线性的关系。

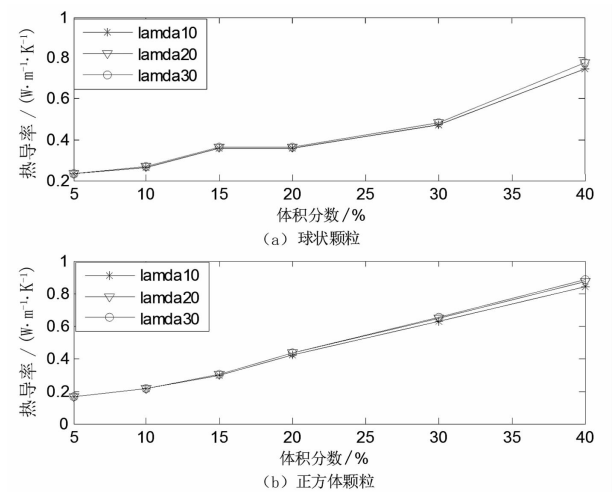


图 6 复合材料等效导热率与填料体积分数的关系

3.3 填料颗粒形状的影响

研究表明,填料颗粒的形状对复合材料的导热率有一定的影响^[17,19-21]。由图 7 可以看出填料体积分数在 15% ~ 20% 区间,方形填料和球形填料的复合材料导热率有一个交叉点 A:

当体积分数 $V < A$ 时,球形填料复合材料的等效导热率大于方形填料;
当体积分数 $V > A$ 时,方形填料复合材料的等效导热率大于球形填料。

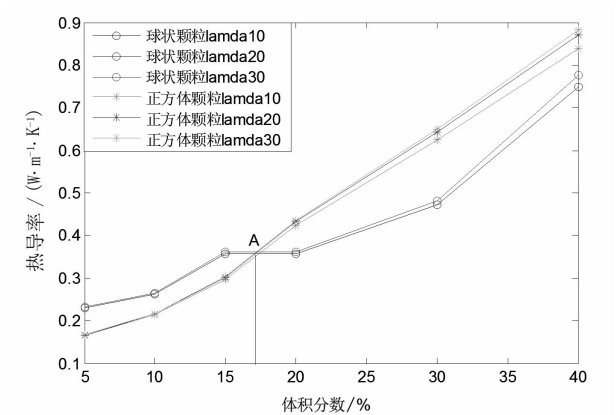


图 7 复合材料等效导热率与填料颗粒形状的关系

3.4 粒子群的影响

实际情况中,复合材料的填料不论是方形还是球形,都不可能均匀分布在基体材料中,为此建立了填料有粒子团聚的模型与填料粒子均匀分布模型(见图 8),在填料颗粒导热率为 10 W/(m · K) 时,分别计算复合材料的等效导热率并进行对比,得到的结果见表 4 和图 9。

从表 4 和图 9 的计算结果表明,有粒子团聚的

填料与均匀分布的填料相比,复合材料的等效导热率差别微乎其微,甚至可以说几乎没有影响,由此就说明粒子团聚现象几乎对复合材料等效导热率没有影响。同时,这个结论与文献[20]中得到的试验结论相吻合。

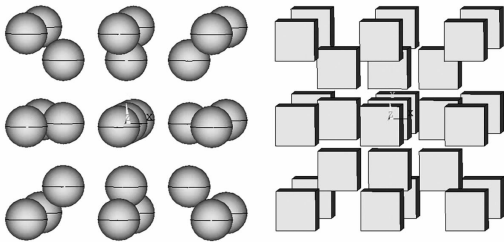


图 8 ANSYS 颗粒团聚模型

表 4 $\lambda_2 = 10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,不同颗粒形状对等效导热率的影响

体积分数 /%	球状颗粒 /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)		正方体颗粒 /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	
	均匀	团聚	均匀	团聚
5	0.231 2	0.260 8	0.165 0	0.162 9
10	0.263 5	0.267 3	0.213 4	0.209 0
15	0.357 6	0.367 9	0.297 3	0.280 4
20	0.356 1	0.367 2	0.424 2	0.423 7
30	0.471 3	0.470 7	0.625 3	0.635 8
40	0.749 2	0.749 1	0.838 3	0.839 8

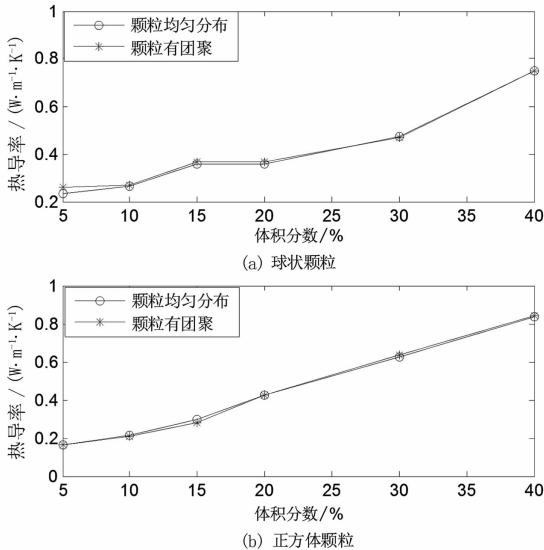


图 9 复合材料中填料均匀分布与有粒子团聚对比

4 结 语

基于现有文献研究的基础上对 IGBT 封装复合材料的导热率进行的研究,利用先进的有限元数值

分析方法,同时考虑实际情况,分别分析了填料的大小、形状、体积分数等因素对复合材料导热率的影响规律,进而对复合材料的导热性能进行有效的预测,得到以下结论:

1)对比 Maxwell - Eucken 模型、参考文献中的试验数据以及所提有限元法对有效导热率的计算结果,三者结果一致,说明有限元法仿真计算的可行性。

2)填料的形状、大小、体积分数、填料颗粒导热率等对复合材料导热率的影响:随着体积分数的增加,复合材料导热率增加;复合材料在填料体积分数很低时,添加球状颗粒的复合材料等效导热率大于添加正方体颗粒的复合材料;在体积分数较高时,添加正方体颗粒的复合材料等效导热率大于添加球状颗粒的复合材料;随着填料颗粒的导热率增加,复合材料的导热率增加。

3)粒子团聚现象几乎对复合材料等效导热率没有影响。

参考文献

[1] 曾俊. 环氧树脂封装材料的导热模拟与导热性能[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

[2] 叶宏,徐 斌,王军,等. 陶瓷微球填充型隔热涂料的有效导热系数[J]. 中国科学技术大学学报(自然科学版). 2006,36(4):361 - 363.

[3] 陈则韶,钱军,叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算[J]. 中国科学技术大学学报(自然科学版), 2004,34(4):417 - 423.

[4] 刘祥宽, Mehari Salomon, 胡献国, 等. 基于球型填充相复合材料有效导热系数的计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008,31(9):1378 - 1381.

[5] 王璞玉,胡旭晓,周洁,等. 聚合物基复合材料导热模型的研究现状及应用[J]. 材料导报:综述篇, 2010,24(5):108 - 112.

[6] 刘金世,薛庆忠. 碳纳米管复合材料的有效导热率[J]. 石油大学学报, 2004,28(5):142 - 144.

[7] 闵新民,安继明,饶宝林,等. 聚合物基纳米复合材料导热率计算[J]. 武汉理工大学学报, 2007,29(7):26 - 29.

[8] 周远翔,郭绍伟,聂琼,等. 纳米氧化铝对硅橡胶空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2010,36(7):1605 - 1611.

[9] 徐晓英,王世安,王辉. 复合导电高分子材料微观网络结构及导电行为仿真分析[J]. 高电压技术, 2012,38(9):2221 - 2229.

[10] Kumlutas D, Tavman I H. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Poly-

mer Composites [J]. Journal of Thermoplastics Composite Materials, 2006,19(4):441 - 455.

[11] Atila M. Optimization of High Pin Count Cavity - up Enhanced Plastic Ball Grid Array (EPBGA) Packages for Robust Design [C]. In: Pacific Rim/ASME International Intersociety Electronic and Photonic Packaging Conference, INTERPACK'97, New York: IEEE, 1997: 376 - 388.

[12] Yin Y, Tu S T. Thermal Conductivities of PTFE Composites With Random Distributed Graphite Particles [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002,21(18):1619 - 1627.

[13] Tu S T, Cai W Z, Yin Y, et al. Numerical Simulation of Saturation Behavior of Physical Properties in Composites with Randomly Distributed Second - phase [J]. Journal of Composite Materials, 2005,39(7):617 - 631.

[14] 张朝晖. ANSYS 热分析工程与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.

[15] 杨强生,浦保荣. 高等传热学:热传导和对流传热与传质[M]. 上海:上海交通大学出版社,1996.

[16] V. J. Ervin, J. W. Klett, C. M. Mundt. Estimation of the Thermal Conductivity of Composites[J]. Journal of Materials Science, 1999,34(14):3545 - 3553.

[17] R. Kochetov. Thermal and Electrical Properties of Nanocomposites, Including Material Processing, Ph. D. Degree Dissertation[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2012.

[18] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:北京高等教育出版社,2006.

[19] Z. Han, J. W. Wood, H. Herman, et al. Thermal Properties of Composites Filled with Different Fillers [C]. Conference Record of the IEEE International 2008:497 - 501.

[20] W. Evans, R. Prasher, J. Fish, et al. Effect of Aggregation and Interfacial Thermal Resistance on Thermal Conductivity of Nanocomposites and Colloidal Nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008,51:1431 - 1438.

[21] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P. H. F. Morshuis, et al. Modeling the Thermal Conductivity of Polymeric Composites Based on Experimental Observations [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014,21(2):412 - 423.

作者简介:

张蕾芳(1989), 硕士研究生、工程师, 主要从事电力设备高压及油化试验工作。

(收稿日期:2019 - 01 - 28)

某 110 kV 变电站 35 kV 侧相间故障 分析及治理措施研究

方 欣¹, 李晓东², 罗维斯³, 崔 涛¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网凉山供电公司, 四川 凉山 615000; 3. 国网眉山供电公司, 四川 眉山 620010)

摘 要:在中国, 35 kV 电网直接向大客户供电, 由于客户情况较复杂且相关保护措施不到位, 经常出现相间故障继而引起设备损坏。以四川电网某 110 kV 变电站 35 kV 侧 12 个月内发生的 4 次相间故障为对象, 详细分析了每次故障现象并指出了故障原因, 提出了避免故障重演的治理方案。所分析的结论对 35 kV 相间故障的防治具有重要意义。

关键词:相间接地; 三相接地; 故障分析

中图分类号: TM63 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2019)02-0047-05

Analysis of Phase – to – phase Fault in 35 kV Side of a 110 kV Substation and Its Treatment Measures

Fang Xin¹, Li Xiaodong², Luo Weisi³, Cui Tao¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Liangshan 615000, Sichuan, China;
3. State Grid Meishan Electric Power Supply Company, Meishan 620010, Sichuan, China)

Abstract: In China, 35 kV power grid directly supplies to large customers, because of the complexity of the customers and the inadequate protection measures, there often occurs phase – to – phase faults which lead to the equipment damage. Taking the phase – to – phase faults which occurred in 35 kV side of a 110 kV substation in Sichuan power grid for 4 times as an object, the phenomenon of each fault is analyzed in detail, the causes of the failure are pointed out, and a treatment plan is proposed to avoid the repeated failures. The conclusion is of great importance to the prevention of 35 kV phase – to – phase faults.

Key words: phase – to – phase grounding; three – phase grounding; fault analysis

0 引 言

35 kV 电网承担着直接向大用户(工业用户)供电的重任。大用户生产情况复杂并缺乏相应保护措施常引发电网故障^[1-3]。

四川电网某 110 kV 变电站 35 kV 侧在 12 个月内连续发生 4 起因用户作业引起相间击穿进而发展为三相故障,造成严重电网损失和较大影响,是现有 35 kV 供电系统存在安全风险的典型案例。

下面以此案例为分析对象,仔细梳理各次故障的发展过程,找出了引起故障的根本原因,指出现有设备在过电压防护方面存在的缺陷,并提出了治理措施。

1 故障情况

故障 1:该变电站 1 号主变压器中后备保护复压过流 I 段动作,主变压器 35 kV 侧断路器跳闸。当天该地区天气良好。

根据故障时刻 1 号主变压器保护装置后备保护录波表明,在 03:25:56:00 时,1 号主变压器 35 kV 侧发生 A、B 相间短路,40 ms 后演变为 A、B、C 三相短路故障,主变压器中压侧电流电压如图 1 所示。

故障发生后,经检查 35 kV I 母 PT 避雷器柜内有多点放电痕迹,35 kV I 母 PT 避雷器柜内 A 相避雷器第 1 片瓷套裙边破损严重,A、B、C 相避雷器法

兰金属部分有多处放电痕迹,避雷器内部未发生故障,如图 2 所示。

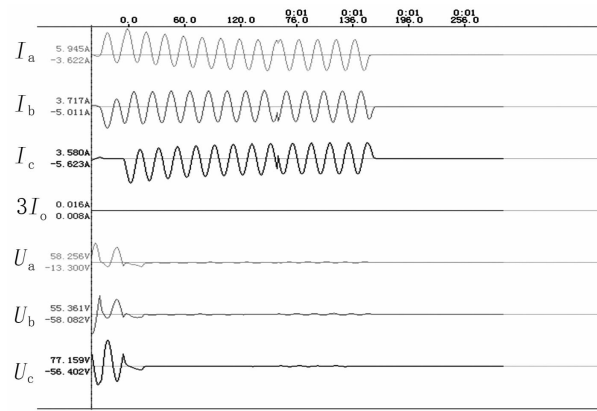


图 1 第 1 次故障 1 号主变压器保护装置后备保护录波



图 2 避雷器瓷套放电

经现场查勘,故障现象为相间短路,而非相对地短路,故障现象与录波情况符合。

故障 2: 3 个月后,该站 1 号主变压器 301 断路器跳闸,35 kV I 母失电。故障时刻,变电站周边天气良好,无暴雨、雷电等恶劣天气。

根据 1 号主变压器跳闸时刻故障录波记录波形,在 22:09:41:850 时,1 号主变压器 35 kV 侧发生 A、B 相间短路,15.6 ms 后演变为 A、B、C 三相短路故障,如图 3 所示。

经检查,35 kV I 母 PT 避雷器间隔有烟雾,C 相第 1、2、3、4 片瓷瓶炸裂,B 相避雷器顶端金属部分有烧伤痕迹,B 相引流排有三角形缺口,C 相避雷器顶端金属部分有灼伤痕迹,如图 4 所示,地面有炸裂的瓷瓶碎片。

从现场故障现象来看,该次故障为相间短路,故障现象与录波情况符合。

故障 3:距第 1 次故障 9 个月后,1 号主变压器中后备保护限时速断 T1、T2 动作出口,1 号主变

器 301 断路器跳闸,35 kV I 母失电。

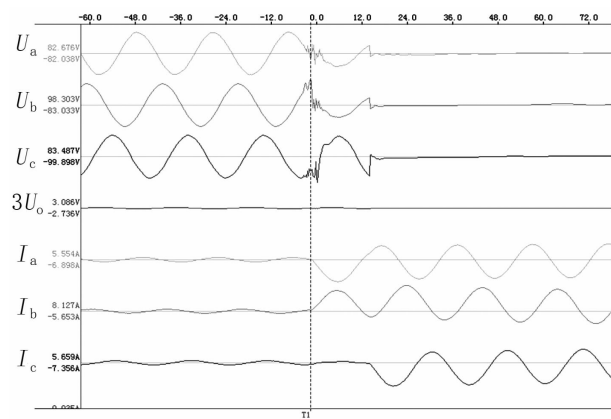


图 3 第 2 次故障 1 号主变压器保护装置录波



图 4 避雷器柜内放电

根据 1 号主变压器跳闸时刻故障录波记录波形,在 11:58:43 时变电站 35 kV 分段 313 断路器间隔内发生 B、C 相间短路故障,经过 48 ms 发展为 A、B、C 三相短路故障。录波图如图 5 所示。

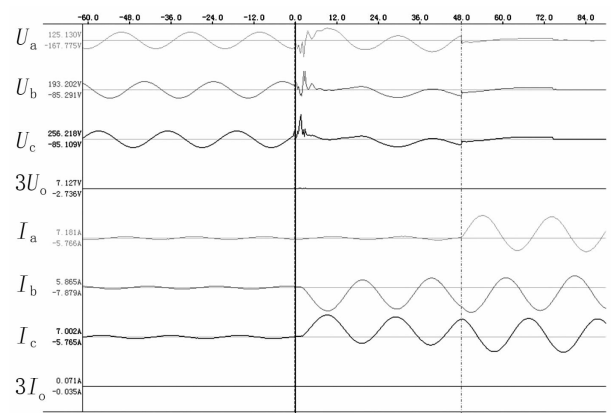


图 5 第 3 次故障 1 号主变压器保护装置录波

经检查,发现 35 kV 分段 313 断路器手车下触头三相触头臂间存在相间放电痕迹,其中 A 相下触头触指灼伤严重,如图 6 所示。

经现场查勘,从现场故障现象来看,该次故障为相间短路,故障现象与录波情况符合。

故障 4:距第 1 次故障 11 个月后,1 号主变压器

35 kV 后备保护装置启动,1 号主变压器 301 断路器跳闸。



图6 35 kV 分段 313 断路器手车故障情况

经检查发现 35 kV 分段 313 断路器手车上、下触头三相触头臂间存在相间放电痕迹,手车断路器本体有较大的烟熏、灼伤的痕迹,如图 7 所示。



图7 35 kV 分段 313 断路器手车烧蚀情况

根据 1 号主变压器跳闸时刻故障录波记录波形,21:23:43 时变电站 35 kV 分段 313 断路器间隔内,发生 B、C 相间短路故障,经过 65.6 ms 发展为 A、B、C 三相短路故障。

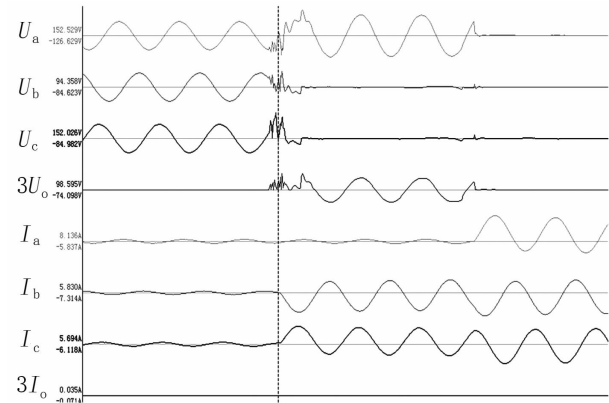


图8 第4次故障1号主变压器保护装置录波

经现场查勘,从现场故障现象来看,该次故障为相间短路,故障现象与录波情况符合。

2 故障分析

以上 4 次故障地点位于 35 kV 侧I母避雷器柜或热备用的 35 kV 分段 313 断路器,故障前 35 kV I母出线某蓝线运行、某矾线长期处于冷备用、某马线在热备用。35 kV 某蓝线用户为锻造厂,由于该厂缺少记录装置,无法确定故障时刻该厂准确的工作程序。通过检查运行操作纸质记录,得知第 4 次故障发生时,该锻造车正在进行钢水的补料作业,精炼炉在运行。由此推测,4 次故障均为该厂进作业时引起。

通过对故障近期录波文件的调取,发现 35 kV 某蓝线常有电压、电流波动,引起录波启动如图 9、图 10 所示。图 9 中,保护启动后,电压出现闪动,距保护启动 612 ms,C 相达到 48.89 kV。在第 4 次故障当天 21:00 到发生故障前,共出现了 3 次电压异常波动。根据录波启动数据记载,多次出现 35 kV 某蓝线异常波动。

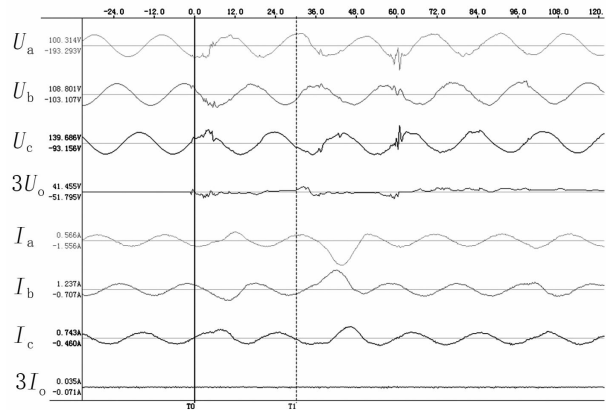


图9 第4次故障录波文件

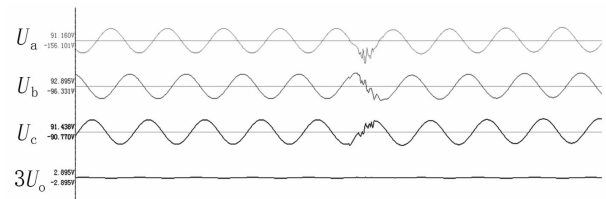


图10 第3次故障录波文件1

在第 2 次故障前一周内发生了多次 35 kV 侧某蓝线间隔内短路,但由于蓝侧保护先切除故障。这两次故障也为相间故障,且故障前出现了较高的过电压,如图 11 录波。其中 B 相为 -52 kV,C 相为 70 kV,BC 相间已达 122 kV,由于录波装置的采集频率有限,存在对波形的采集有缺失,该相间电压可能更高,影响相间绝缘水平。

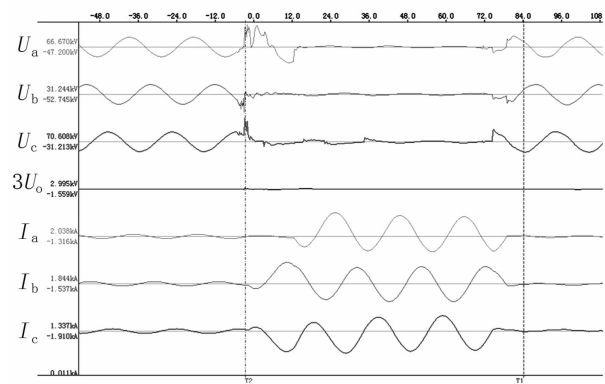


图 11 第 3 次故障录波文件 2

在第 2 次故障发生后,对 35 kV I 母柜内避雷器更换了计数器,第 3、4 次故障发生后对避雷器动作情况进行抄录,35 kV I 母避雷器计数器动作情况见表 1。

表 1 避雷器计数器动作情况

抄录时间	A	B	C
初始值	42	0	12
第 3 次故障后	43	01	12
第 4 次故障后	45	01	12

35 kV I 母避雷器动作,说明避雷器起到了一定的过电压保护作用,但是在避雷器动作的情况下设备仍然在损坏,且故障均为相间故障后发展为三相故障。对于部分特殊负荷,相间过电压不容忽视,据实测数据表明,相间操作过电压最大幅值可达 3.7 p. u.。但避雷器仅能保护相对地,缺少相对相之间的保护。当本案例中的锻造厂开展生产时,由于负荷的特殊工作方式,多次发生 35 kV 侧设备相间击穿,引起设备损坏。

3 治理措施分析

1)35 kV I 母避雷器多次动作,能有效保护相 - 地的过电压,但是对于相 - 相间缺少保护措施。针对这种情况,可以采用避雷器或者阻容吸收装置来限制过电压。据了解,用户侧的电弧炉和精炼炉已安装了阻容过电压吸收器,但用户侧和变电站 35 kV 侧依然出现设备相间击穿,因此建议增加相间避雷器进行保护^[4]。

2)目前,可以实现相间保护的避雷器有四元件和六元件。

四元件避雷器宜选择四柱式避雷器,而非三柱式,避雷器额定电压为 51 kV,其直流参考电压、雷电冲击电流残压满足规程 JB/T 10496 - 2005《交流

三相组合式无间隙金属氧化物避雷器》的要求^[5],具体见表 2。

表 2 避雷器直流参考电压、雷电冲击电流残压要求

接线方式	陡波冲击 电流残压 (峰值)/kV	雷电冲击 电流残压 (峰值)/kV	操作冲击 电流残压 (峰值)/kV	直流 1 mA 参考电压 /kV
相 - 相	≤170	≤150	≤134	≥84
相 - 地	≤154	≤134	≤114	≥73

若与被保护设备 A、B、C 三相高压端连接的元件称为相元件,与地线连接的元件称为地元件,为保证其多次动作容量要求,其容量应满足相元件等效方波冲击耐受不低于 400 A,地元件应耐受不低于 1200 A 等效方波冲击电流,其他试验要求满足 GB/11032 - 2010《交流无间隙金属氧化物避雷器》的要求^[6-7]。

避雷器各元件的 4/10 μs 大电流冲击耐受按照等效方波后选取,相元件大电流冲击 65 kA,地元件 100 kA,应耐受 4/10 μs 大电流冲击试验 6 次,其他要求满足 GB/11032 - 2010 的要求。

未提及试验应满足 JB/T 10496 - 2005 和 GB/T 11032 - 2010 的要求。

六元件目前尚未有成熟产品,体积较大,若采用六元件,要求对地元件进行各元件电流分布试验,各元件平均参考电流值下的参考电压偏差不得大于参考电压规定值的 ±1%。

3)增加的相间保护避雷器必须带有有效的监测装置,分别监测地元件、相元件的动作次数、泄漏电流(或阻性电流)。

4)对避雷器各元件的动作次数及泄漏电流要定期抄录,一旦出现泄漏电流异常要及时更换,动作次数过多也需要考虑缩短周期更换。

4 结 语

1)大用户作业是引起相间电压升高的直接原因,保护缺失是导致故障扩大、设备损坏的根本原因。

2)35 kV 系统未根据用户特点在一次设备相间过电压防治上采取措施且缺少保护,是导致故障扩大直至引起一次设备损坏的原因。

3)根据 35 kV 避雷器动作情况可知,避雷器实现了可靠的相对地保护。对于这类炼钢用户冲击负荷,为防治 35 kV 系统因相间过电压引起的故障,建议采用四元件或六元件避雷器进行防治。

参考文献

[1] 严玉婷,江健武,钟建灵,等. 金属氧化物避雷器事故分析及测试方法的比较研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(5):63-69.

[2] 张益民,申萌,罗六寿,等. 带外串联间隙线路避雷器续流切断试验探讨[J]. 电瓷避雷器,2012,(6):91-96.

[3] 王光旭,李士庆,谢超,等. 交流三相组合式氧化锌避雷器的研究[J]. 华北电力技术,2011(4):49-54.

[4] 李广军. 三相组合式 MOA 在高功率电弧炉供电系统中的应用[J]. 电瓷避雷器,2002(4):47-48.

[5] 全国避雷器标准化技术委员会. 交流三相组合式无间隙金属氧化物避雷器:JB/T 10496-2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[6] 闫中华. 提高 MOA 阀片 4/10 大电流冲击耐受能力的研究[J]. 电瓷避雷器,2000(1):42-46.

[7] 全国避雷器标准化技术委员会. 交流无间隙金属氧化物避雷器:GB 11032-2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010.

作者简介:
方 欣(1987), 硕士, 主要从事高电压试验技术、过电压和接地方面的研究工作。 (收稿日期:2018-10-18)

(上接第 9 页)

表 3 不同温度控制目标下的各补偿方法情况 单位:万元

控制目标 温度/℃	弃风 率/%	全风电 利润	供热供暖	风电利润	供热成本	供热补偿			用户 原成本	用户 新成本	用户 补偿
						S1	S2	S3			
20	6.0	252.4	1 237.8	180.6	68.0	145.6	36.5	41.5	152.3	164.8	12.5
21	4.5	261.4	1 340.8	183.7	78.3	149.9	39.1	44.5	157.8	170.4	12.6
22	3.2	270.4	1 457.4	186.0	83.3	154.9	42.7	48.5	163.2	176.0	12.8
23	2.2	279.5	1 579.2	187.9	88.5	159.8	46.4	52.7	168.7	181.7	13.0
24	1.4	288.5	1 709.0	189.4	94.1	164.7	50.4	57.2	174.1	187.2	13.1

表 4 不同补偿方法效率指数对比

控制目标 温度/℃	S1	S2	S3	S3 比 S1 提高/%	S3 比 S2 提高/%
20	0.56	0.62	0.37	33.7	40.5
21	0.59	0.59	0.35	41.6	40.1
22	0.61	0.59	0.33	45.4	43.0
23	0.63	0.59	0.32	48.7	45.1
24	0.64	0.58	0.31	51.8	47.1

参考文献

[1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.

[2] 范高锋,张楠,梁志锋,等. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术,2016(12):55-59.

[3] 李明,胡殿刚,周有学. 基于“两个替代”战略的甘肃新能源就地消纳模式研究与实践[J]. 电网技术,2016,40(10):2991-2997.

[4] 孙玲玲. 空调负荷聚合建模及其在电力系统中的应用[D]. 南京:东南大学,2017.

[5] 王恺文,朱全胜,吕泉,等. 计及非常规调峰的省级电网调峰形势评估[J]. 电网技术,2018,42(7):2168-2177.

[6] 葛晓琳,金言,夏澍,等. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J/OL]. 电网技术. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2042>.

[7] 覃琴,郭强,周勤勇,等. 国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J]. 中国电力,2015,48(1):25-32.

[8] 孙伟卿,谈一鸣,曾平良,等. 考虑电能替代的全球负荷变化趋势分析[J]. 电网技术,2019,43(2):678-686.

[9] 丁继为. 楼宇柔性负荷建模及其调峰组合优化策略研究[D]. 南京:东南大学,2016.

[10] 李娟,周红莲,周二彪,等. 计及风速电锅炉等电采暖负荷相关性的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):26-31.

[11] 黄亚峰,朱玉杰,穆钢,等. 基于温度预报的户用电采暖负荷可调节能力评估[J]. 电网技术,2018,42(8):2487-2493.

[12] 刘兆霆,袁铁江,李国军,等. 新能源电采暖资源与环境价值分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(4):177-183.

[14] 李兆坚,江亿,燕达. 住宅间歇供暖模拟分析[J]. 暖通空调,2005,35(8):110-113.

[15] 崔永军,刘兆霆,李渝,等. 新能源电采暖电力负荷建模[J]. 电器与能效管理技术,2016(18):61-66.

[16] 舒畅,钟海旺,夏清. 兼顾效率与公平的用电市场竞争价机制研究[J]. 电网技术,2014,38(3):681-686.

作者简介:
樊国伟(1976), 本科、高级工程师, 研究方向为电力系统调度与新设备管理。

(收稿日期:2019-02-05)

基于变电站汽吊作业安全距离告警系统研发

赵文君,施 逸,梁植淇,王宇翔
(国网宜宾供电公司,四川 宜宾 644000)

摘 要:针对变电站检修过程中吊车斗臂距离带电设备安全距离难以实时监测、阻挡物多等问题,通过设置边界点构建虚拟“口”型三维空间,吊车斗臂在“口”型空间内作业;采用 UWB 定位模块实时采集斗臂距离所设置边界点的距离传递至装置后台,利用空间三角锥模型测算斗臂与带电设备安全距离,通过测试距离与安全距离比较,当小于安全距离时,实现告警功能。

关键词:虚拟“口”型三维空间;UWB 定位模块;吊车斗臂

中图分类号:TM63 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0052-04

Research and Development of Safety Distance Warning System Based on Substation Steam Crane Operation

Zhao Wenjun, Shi Yi, Liang Zhiqi, Wang Yuxiang
(State Grid Yibin Electric Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract:Aiming at the problems of difficult real-time monitoring of the safe distance between crane bucket arm and live equipment, and many obstructions in the process of substation maintenance, the virtual "mouth" three-dimensional space is constructed by setting boundary points. The crane bucket arm works in the "mouth" space. UWB positioning module is used to collect the distance of the bucket arm from the set boundary points in real time and transmit it to the device backstage. The space triangular cone model is used to calculate the safe distance between bucket arm and live equipment. Comparing the testing distance with safe distance, the alarm function is realized when the testing distance is less than the safe distance.

Key words:virtual "mouth" three-dimensional space; UWB positioning module; bucket arm of crane

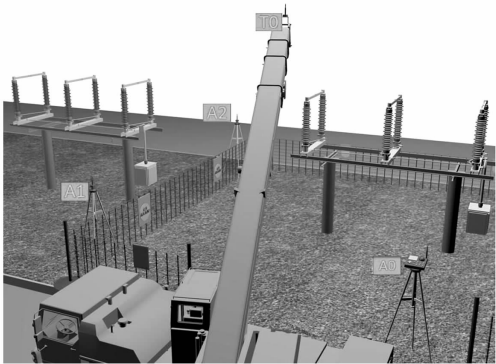
0 引 言

在变电站进行基础设施建设或部分间隔停电检修时,需要用到吊车等设备进行辅助工作。在吊车工作时,会有旁边间隔带电的情况发生。而吊车斗臂在旋转移动的过程中,按照《国家电网公司电力安全工作规程》^[1]的相关规定,应保持一定的安全距离。在实际操作过程中,没有相应的测量措施,只能依靠现场指挥人员目测安全距离来提醒吊车司机,这样会造成与带电设备及母线的距离小于安全距离的情况,最后导致安全生产事故的发生。

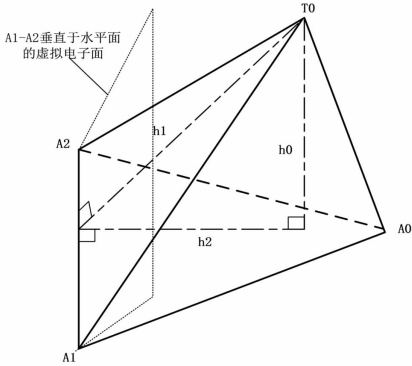
为了避免吊车斗臂转动过程中误碰带电设备,减少安全事故发生,所以决定研制吊车作业距离带电设备自动检测报警系统。

1 模型及原理

吊车作业安全告警系统检测 3D 模型如图 1 所示。假定图 1 中围栏内为待检修设备,围栏以外为带电设备,吊车斗臂作业范围必须在围栏以内。作业过程中,吊车斗臂距离地面高度远远大于围栏 0.8 m 高度,那么吊车斗臂距离旁边带电设备距离唯有依靠人眼经验判断,存在极大误差,难以准确把握。结合传感器检测技术,在作业范围内构件虚拟“口”型三维空间,即将围栏高度向上无限延伸。利用 UWB 定位模块实时采集斗臂与所设置边界点的距离并传递至仪器后台,利用海伦模型算出斗臂与虚拟墙壁的垂直距离。当检测距离小于《国家电网公司安全工作规程》规定的安全距离时,进行告警提示。



(a)3D 示意



注:T0 - A0、T0 - A1、T0 - A2、A0 - A1、A0 - A2、A1 - A2 的距离通过测距模块测量, h_2 为最终需要计算出的吊车斗臂到带电区域(A1 - A2 构成的垂直于水平面的面)的空间垂直距离。

(b)理论计算模型

图 1 吊车作业安全告警系统检测

理论计算模型中相关计算公式如下:

三棱锥 T0 - A0 - A1 - A2 体积 V 为

$$V = \sqrt{\{[4a^2b^2c^2 - a^2(b^2 + c^2 - m^2)^2 - b^2(c^2 + a^2 - n^2)^2 - c^2(a^2 + b^2 - l^2)^2 - (a^2 + b^2 - l^2)(c^2 + a^2 - n^2)(b^2 + c^2 - m^2)]\} / 12}$$

式中: a 为 T0 - A0 距离; b 为 T0 - A1 距离; c 为 T0 - A2 距离; l 为 A0 - A1 距离; m 为 A1 - A2 距离; n 为 A0 - A2 距离。

三角形 A0 - A1 - A2 面积 S_1 为

$$S_1 = \frac{\sqrt{(I + m + n)(I + m - n)(I + n - m)(m + n - I)}}{4}$$

三棱锥 T0 - A0 - A1 - A2 以 A0 - A1 - A2 为底面的高 h_0 为

$$h_0 = \frac{3V}{S_1}$$

三角形 T0 - A1 - A2 面积 S_2 为

$$S_2 = \frac{\sqrt{(m + b + c)(m + b - c)(m + c - b)(b + c - m)}}{4}$$

三角形 T0 - A1 - A2 高 h_1 为

$$h_1 = \frac{2S_2}{m}$$

T0 到 A1 - A2 形成的垂直面的空间距离(最终吊车到带电区域的空间垂直距离) h_2 为

$$h_2 = \sqrt{h_1^2 - h_0^2}$$

根据现场检测数值 h_2 与《国家电网公司电力安全工作规程》吊车作业安全距离 D 进行判断, D 值如表 1 所示:当 h_2 大于 D 时,装置正常运行,告警装置不动作;当 h_2 小于 D 时,告警装置动作,发出告警信号。

表 1 吊车斗臂与带电体最小安全距离 D

电压 /kV	<1	1~10	35~66	110	220	330	500
最小安全距离 /m	1.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.5

2 方案优选及装置研制

2.1 方案优选

根据现场实际需求,该装置的总体设计方案分为 3 部分,即距离测试(步骤 1)、数据分析(步骤 2)和距离判断及告警(步骤 3),如图 2 所示。其中距离测试基本原理如图 1 所示,但图中吊车斗臂定点 t_0 空间位置随机运动,因此,该装置研发的重点难度为(步骤 1)。根据传感器技术应用情况,提出了两套不同的解决方案:方案 1 是采用超声波^[2]进行距离的测量;方案 2 是采用 UWB^[3]方案进行距离测量。两种方案对比如表 2 所示。

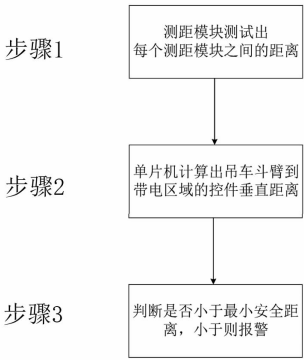


图 2 总体方案流程

综合测量角度和最大测量距离分析,最终采用 UWB 方案进行距离测量。

2.2 装置研制

根据系统的要求以及需要实现的功能,将装置分为三大板块:传感器板块、单片机板块以及报警器板块,如图 3 所示,硬件结构如图 4 所示。

表 2 方案对比分析

主要需求	方 案	方案分析		结论
		测量角度	最大测量距离	
360°无死角测量， 测量距离大于 50 m	超声波测距	接收端接收超声波信号的接收角度不大于 90°	发送端和接收端超声波测量的最大距离为 7 m	采用
	UWB 电磁波测距	360°	发送端和接收端超声波测量的最大距离为 500 m	不采用

表 3 测量数据和实际数据对比

实际距离 /cm	测量数据和实际距离(通过卷尺测量两点距离)的差值(测量数据 - 实际距离)															
	/cm															
200	49	52	47	51	48	55	51	50	51	53	...	49	47	48	46	48
400	47	51	52	45	56	42	47	49	48	52	...	52	46	54	50	56
600	46	51	51	48	51	45	46	51	49	52	...	52	44	47	46	49
800	54	53	54	53	54	57	53	51	54	53	...	54	51	48	53	54
1000	55	59	58	56	55	57	57	56	57	58	...	56	53	53	58	53
1200	54	56	51	54	55	55	53	58	57	57	...	51	52	55	56	54
1400	48	55	56	57	51	47	42	51	45	46	...	45	49	56	52	54
1600	50	50	54	56	54	58	48	50	59	50	...	56	57	56	45	54
1800	57	51	58	56	52	54	53	57	60	57	...	51	56	53	53	54
2000	58	50	56	58	54	56	55	54	53	52	...	52	53	57	53	53

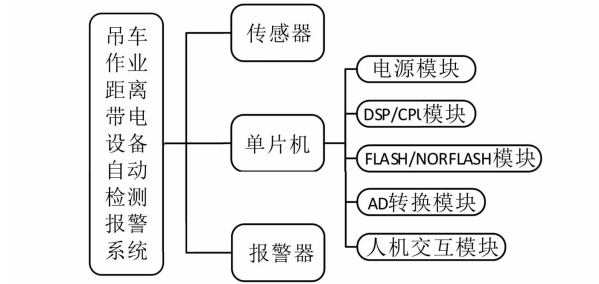


图 3 汽吊作业安全距离告警系统装置

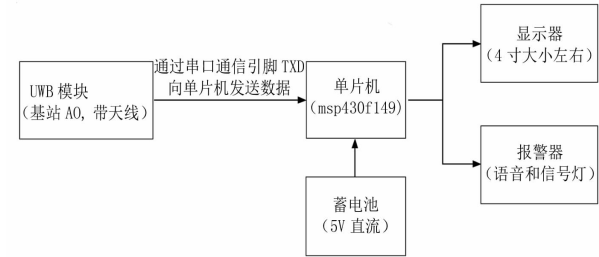


图 4 硬件结构

报警器板块由单片机模块、UWB 传感器和警示装置组成,对超过安全距离的情况进行报警。

单片机模块,是整个装置的神经中枢,用以处理数据,设计相应算法完成距离检测,并控制报警器。UWB 传感器板块主要负责距离测量的发射与接收,其测距的原理为 $s = vt$, 式中: s 为发送端和接收端之间的距离(每个模块既可以做发送端也可以作为

接收端); v 为光速; t 为传输的时间,通过获取发送端和接收端的时间差即可计算出距离。由于 UWB 采用电磁波的传输模式,其理论上没有传输角度上的限制,且市面上现有的测量距离模块可高达到 500 m,能够极大满足现场应用要求。警示装置,对超过安全距离的情况进行报警。

该装置于现场进行实际应用,其效果良好。

3 测试数据分析

由图 1 可知,整个装置最原始的测量数据是 $T0 - A0$ 、 $T0 - A1$ 、 $T0 - A2$ 、 $A0 - A1$ 、 $A0 - A2$ 、 $A1 - A2$ 的距离,但实际距离和装置测量距离存在一定的误差,如表 3 所示。

从表 3 中数据可以看出,实际距离和装置测量距离似乎存在一定的线性关系,因此,通过最小二乘法^[4]拟合出一个线性关系,如图 5 所示。拟合之后实验数据如表 4 所示。

通过算法拟合后的数据和实际距离的最大误差在 ± 7 cm 内,很大程度上降低了直线距离的测量误差。

为检测装置的最终效果,进行了现场检验,如图 6 所示。

现场实验数据如表 5 所示,装置报警的时候,报

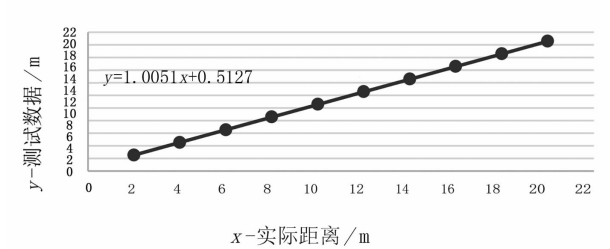


图 5 数据拟合曲线及拟合公式

表 4 拟合后的数据对比

实际距离 /cm	拟合之后的数据和实际距离的差值 (拟合之后的数据 - 实际距离) /cm				最大误差绝对值 /cm
200	-3	2	...	2	3
400	1	1	...	1	2
600	2	3	...	3	4
800	4	-2	...	3	4
1000	5	6	...	3	6
1200	-3	4	...	3	4
1400	6	-2	...	3	7
1600	4	5	...	2	5
1800	-2	4	...	4	4
2000	2	2	...	3	3



图 6 某 220 kV 变电站现场应用

警器设定的安全距离和实际测量距离误差均小于 ±40 cm,满足最初设计要求和现场实际需求。

表 5 某 220 kV 变电站现场实验数据

编号	电压等级 /kV	安规规定最小安全距离/m	装置设定的报警距离 /m	实际距离 /m	误差 /m
1	220	6.00	6.00	6.30	0.30
2	220	6.00	6.00	6.25	0.25
3	220	6.00	6.00	5.70	-0.30
4	220	6.00	6.00	5.65	-0.35
5	220	6.00	6.00	6.00	0.00
6	220	6.00	6.00	6.10	0.10
7	220	6.00	6.00	6.15	0.15
...	...	...	...	...	...
19	220	6.00	6.00	6.25	0.25
20	220	6.00	6.00	6.11	0.11

为进一步分析误差数据的合理性,对其误差值采用单因子二项分析^[5],分析结果如图 7 所示。

从图中可以看出,其样本误差值比率均在 0.133% ~1.767% 之间,进一步论证数据满足要求,能够在现场得以应用推广。

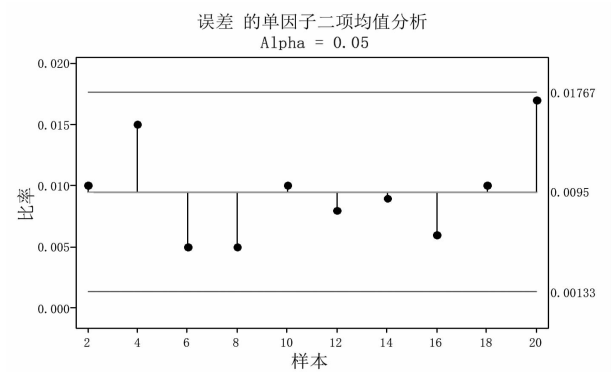


图 7 误差二项均值分析

4 结 语

通过单片机技术与运动物体测距传感器技术结合构建虚拟“口”型三维空间,研发变电站汽吊作业安全距离告警系统。根据研究成果得出以下结论:

- 1)虚拟“口”型三维空间建立消除了变电站阻挡物(杆塔等)对测试精度的影响,其虚拟空间根据实际需要进行调试设置。
- 2)对于监测随机运动物体间距离,传统超声波传感器受测试角度、精度影响满足不了现场实际需求;采用了 UWB 电磁波技术进行测试,测试信号不受变电站强电磁场干扰。
- 3)该装置在现场应用过程中,能实时采集斗臂距离虚拟空间壁面距离,并发出告警信号。

参考文献

[1] 电力安全工作规程—发电厂和变电站电气部分: GB 26860-2011[S],2011.

[2] 李颖. GIS 局部放电超声波检测技术的研究及应用[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[3] 朱刚. 超宽带(UWB)原理与干扰[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[4] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[5] 张文彤,董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京:高等教育出版社,2013.

作者简介:

赵文君(1985),高级工程师,主要研究方向为高电压与绝缘技术专业。

(收稿日期:2019-12-06)

小水电站流域径流量的评估方法

曾思明¹, 吴杰康², 陈永进¹, 赵俊浩², 翁兴航¹

(1. 广东电网有限责任公司韶关供电局, 广东 韶关 512000;
2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:现今对于河流径流量的预测方法有许多模型,但各种模型都有其优劣,而且预测的精度都有差异。以韶关的南水河作为研究对象,利用南水1978—2015年径流量的数据,分别使用灰色系统理论、基于遗传算法的BP神经网络以及支持向量机3种方法对南水河年径流量预测的模型。结果表明:GA-BP神经网络的预测精度为84.30%,但其拟合精度不高;灰色系统预测以及拟合的精度分别为86.70%和84.24%;用支持向量机对南水河年径流量的预测,无论在拟合精度为95.67%,还是预测精度为99%上,比灰色预测和GA-BP神经网络都要高。因此,支持向量机可以很好地应用在南水河年径流量的预测研究中。

关键词:小水电站;径流量;支持向量机

中图分类号:TM622 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0056-06

Evaluation Method for Watershed Runoff of Small Hydropower Stations

Zeng Siming¹, Wu Jiekang², Chen Yongjin¹, Zhao Junhao², Weng Xinghang¹

(1. Shaoguan Electric Power Supply Bureau of Guangdong Power
Grid Corporation, Shaoguan 512000, Guangdong, China;
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Nowadays, there are many models for river runoff prediction, but each model has its advantages and disadvantages, and there is difference in prediction accuracy. Taking Nanshui river in Shaoguan as the research object and using the runoff data of Nanshui river from 1978 to 2015, the grey system theory, BP neural network based on genetic algorithm (GA-BP) and support vector machine (SVM) are used to predict the annual runoff of Nanshui river respectively. The results show that the prediction accuracy of BP neural network based on genetic algorithm is 84.30%, but its fitting accuracy is not high; the prediction accuracy and the fitting accuracy of grey system are 86.70% and 84.24% respectively; whether the fitting accuracy is 95.67% or the prediction accuracy is 99%, the prediction of annual runoff of Nanshui river by SVM is better than that by grey prediction and GA-BP neural network. Therefore, SVM can be well applied to the prediction of annual runoff in Nanshui River.

Key words: small hydropower stations; watershed runoff; support vector machine

0 引言

韶关市地理位置是在广东省的中北部,由于地处温带而且受湿润的季风气候影响^[1],所以全年降水量充足,而且河流数目非常多,水量以及水力资源都十分丰富,非常有利于小水电的开发与建造。

基金项目:国家自然科学基金项目(50767001);广东省公益研究与能力建设专项资金项目(2014A010106026);广东电网有限责任公司科技项目(030200QQ00180001)

其中,南水河作为韶关主要河流之一,其集水面积是1489 km²,多年的平均年径流量是1.34 × 10⁹ m³,由于南水河地貌的特点为峡谷非常多、河流落差较大,所以流域内已经建造了中大型的水库^[2]。因此,如果能对南水河的径流量进行研究以及准确的预测,对于合理利用南水河的水资源有着重要的意义,也为开发小水电提供重要的科学依据。

近年来,许多学者已经使用了多种预测方法对径流量进行了预测与研究^[3-6]。例如针对流溪河水

库,文献[7]使用 BP 神经网络方法预测该水库的径流量。文献[8]以石泉水库为例,研究了 BP 神经网络以及马尔科夫预测的优劣,提出了 BP 神经网络马尔科夫模型来预测河流径流量。文献[9]采用灰色系统理论中的 GM(1,1)模型,研究了黄河年径流量的变化特点,拟合并预测了唐乃亥河花园口的年径流量。在此基础上,文献[10]结合了 R/S 分析,采用 R/S 灰色预测的方法对黑河出山年径流量进行预测。文献[11]使用了支持向量机预测模型,以黄河上游兰州站为例,预测该水文站的年径流量。文献[12]则在支持向量机的基础上作出了改进,将改进后的模型应用在开都河年径流量的预测上。综合上述学者的研究,现在用于径流量的预测基本是利用多年的径流量数据作为模型的输入输出,利用各种算法找到输入输出之间的数学关系,以此来拟合并预测河流的径流量。

由于不同预测模型都有自己不一样的特点,如何在某一地点选择恰当的预测模型成为评估该地区水资源的一个难点。下面首先分析了灰色系统预测、基于遗传算法神经网络以及支持向量机 3 种预测方法对韶关市南水河径流量预测结果;然后对比 3 种方法的预测值与实际值的误差;最后评价各模型的性能,为研究南水河区域水资源以及评估该区域水资源丰富度提供科学的决策依据,对于在该区域研究以及建立微电网有着重要的意义。

1 径流量预测方法

由于韶关市南水河的径流量数据较少,而且该河流径流量的随机性以及波动性较大,为了更好研究韶关水资源的变化趋势,在预测方法中,采用了灰色系统理论中的 GM(1,1)模型、基于遗传算法的 BP 神经网络以及支持向量机 3 种方法对南水河的年径流量进行拟合以及预测。

1.1 灰色预测

在传统的系统行为分析中,大多数的数据分析法都是要通过分析大量的历史数据,从中得到数据相关的数学规律。但是对于径流量这一物理量来说,其变化一般是随机波动的且历史数据量难以获取。而在灰色系统中,其预测方法是可以从少量的数据寻找系统的变化规律,并且灰色预测方法计算较为简单,所以首先使用灰色系统理论中的 GM(1,1)模

型^[13-15],并在此模型基础上作出改进用于径流量的预测。

1.1.1 GM(1,1)模型

首先把原始的数据生成一个序列 $X^{(0)}(n)$,为了弱化原始数据的随机性,该模型采用数据累加的方式对原始的数据进行弱化处理,处理后生成的新序列为 $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$,其中, $X^{(0)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n$ 。

GM(1,1)模型所对应的白化形式微分方程为

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + \alpha X^{(1)} = \mu \tag{1}$$

记 $\hat{\alpha} = (\alpha, u)^T$, 其中

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \tag{2}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X_{(1)}^{(1)} + X_{(2)}^{(1)}) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X_{(2)}^{(1)} + X_{(3)}^{(1)}) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X_{(n-1)}^{(1)} + X_{(n)}^{(1)}) & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} X_{(2)}^{(0)} \\ X_{(3)}^{(0)} \\ \dots \\ X_{(n)}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

求解模型的微分方程,可以得到径流量的预测模型方程为

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(1)}(k+1) &= (X_{(1)}^{(0)} - \frac{\mu}{\alpha})e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} \\ k &= 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{5}$$

1.1.2 改进 GM(1,1)模型

由于 GM(1,1)模型只能应用于一阶线性微分方程,但是南水河的年径流量的变化是不符合这一条件的,直接使用 GM(1,1)模型对南水河的年径流量进行预测是很难得到一个理想结果的,需对 GM(1,1)模型进行改进。具体步骤如下:

1)在坐标轴上绘出南水河年径流量的逐年变化曲线图;

2)选取一系列阈值 L , 其中最大径流量记为 $X_{\max}^{(0)}$,最小径流量记为 $X_{\min}^{(0)}$,则

$$X_{\min}^{(0)} \leq L_i \leq X_{\max}^{(0)} \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{6}$$

3)作阈值 L 与曲线的交点图,可以得到递增的时间序列;

- 4) 将 GM(1,1) 模型用在该时间序列中,得到该阈值的预测模型;
- 5) 作出其他阈值的 GM(1,1) 预测模型;
- 6) 根据上述得到的一系列预测模型,作出径流量的预测图。

1.2 基于遗传算法的 BP 神经网络

由于 BP 神经网络在全局中的搜索能力差,比较容易陷入局部极值且算法的收敛速度较慢,当 BP 神经网络的权值和阈值选择不恰当的时候,网络输出的结果不理想,模拟精度较低,误差较大。所以针对径流量的预测,利用遗传算法在全局搜索能力强且速度较快的优点,将 BP 神经网络的权值和阈值放进遗传算法中进行优化,以 BP 神经网络输出的径流量预测值与实际值的误差作为遗传算法的适应度函数,得出最优的权值阈值。最后使用 BP 神经网络在这一组权值和阈值中进行仿真,得到最后的径流量预测输出值^[16-20]。该优化模型的具体步骤如图 1 所示。

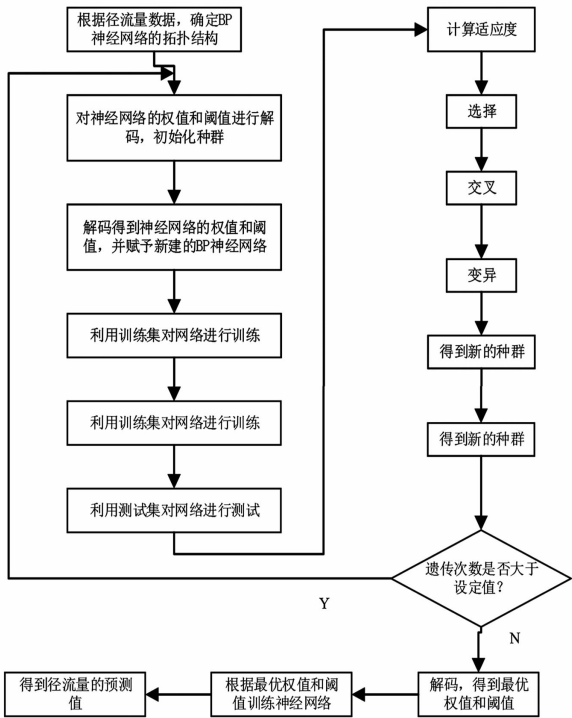


图 1 基于遗传算法的 BP 神经网络流程

1.3 支持向量机

在统计学习的理论当中,认为当经验风险函数最小的时候,模型对于训练集的学习是最好的。但是这存在着约束条件,训练样本的数目需要足够大,这样经验风险最小化的模型才能够更好地进行学习。当训练样本较少的时候,根据这一经验风险最

小化的理论来对模型进行训练则会出现过拟合。1995 年,Corinna Cortes 和 Vapnik 两位学者首次提出了支持向量机这一概念,这是基于上述统计学习理论所提出的一种新的算法。他们认为当某一数据集遵循某一规律分布的时候,如果要使得模型的实际输出值能更好地模拟实际值,就要使得结构风险最小化,而不是经验风险最小化。而支持向量机(support vector machine, SVM)则能很好地实现这一结构风险最小化的理论,在小样本的条件下,支持向量机可以在统计学习中的分类和回归的研究中起到非常理想的效果^[21-25]。

支持向量机回归(support vector regression, SVR)是使用核函数将样本数据从地位空间映射到高维空间,然后在这个高维空间求解问题的回归方程。SVR 对于径流量的预测回归步骤如下:

- 1) 利用多年的径流量数据,径流量的回归预测函数在高维空间的形式为

$$f(x)=\omega x+b \tag{7}$$

式中: ω 是权值向量; b 为偏置量。

- 2) 若样本数据点在超平面与支持向量之间,则认为该数据点没有损失,定义如下:

$$e=\begin{cases} 0, & |y-f(x)|\leq \varepsilon \\ |y-f(x)|-\varepsilon, & |y-f(x)|>\varepsilon \end{cases} \tag{8}$$

式中: y 为实际的径流量; ε 为反应允许偏差的参数。

- 3) 引入松弛系数,则径流量回归问题可以表示为

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\zeta_i + \zeta_i^*) \tag{9}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i^* \\ y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \zeta_i \\ \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0, i = 1, \dots, n \end{cases} \tag{10}$$

式中: C 为惩罚系数; ζ_i, ζ_i^* 是松弛系数。

- 4) 根据拉格朗日乘子,将径流量回归问题变成对偶形式:

$$\begin{aligned} &\max \sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) - \\ &\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) x_i^T x_j \end{aligned} \tag{11}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \end{cases} \tag{12}$$

式中, $k=x_i^T x_j$ 为核函数。

- 5) 最后求解可得径流量回归预测函数为

表 1 南水河年径流量预测模型

阈值/(10 ⁸ m ³)	预测模型	阈值/(10 ⁸ m ³)	预测模型
6.5	16.131 2e ^{0.289 5k} - 14.349 9	7.0	43.051 5e ^{0.168k} - 41.493 5
7.5	55.308 2e ^{0.146 6k} - 53.973 4	8.0	64.683 7e ^{0.1554k} - 63.72
8.5	67.621 1e ^{0.137 5k} - 64.698 9	9.0	101.998 9e ^{0.129 7k} - 97.636 1
9.5	101.924 4e ^{0.129 8k} - 97.316 6	10.0	104.501 6e ^{0.127 8k} - 99.648 7
10.13	112.682 8e ^{0.115k} - 107.766 1	10.5	203.244 3e ^{0.084 9k} - 186.720 8
11	201.023 8e ^{0.085 6k} - 184.164 7	11.11	159.293 1e ^{0.103k} - 142.360 2
11.5	127.434 8e ^{0.141 5k} - 107.289 9	11.8	366.226 6e ^{0.057 8k} - 345.996 5

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) x_i^T x + b \tag{13}$$

2 实验分析

为了对比上述 3 种方法对于径流量预测的结果,以韶关市的南水河为研究对象,利用 Matlab 软件^[26 - 28] 分别使用灰色预测、基于遗传算法的 BP 神经网络以及支持向量机对南水河 1978—2015 的年径流量进行仿真研究。

2.1 灰色预测结果

由于根据南水河 1978—2010 年径流量的数据,该流域在这 33 年最大流量为 1.451 × 10⁹ m³,最小流量为 5.35 × 10⁸ m³,所以使用灰色预测时,在设定阈值时,从最小值开始每次往上增加 0.5 × 10⁸ m³,直到最大值,且当某些年份没有相对应的阈值,则设定该年份实际值也作为一个阈值,要求每个阈值对应的样本数不少于 4 个,因此对于南水河一共建立了 14 个模型,结果如表 1 所示。

图 2 是灰色预测对南水河径流量的拟合值与实际径流量的对比,可以看出拟合出来的曲线大部分年份的拟合值与实际值相差不大,灰色系统对于南水河年径流量的拟合精度为 84.24%,而且拟合曲线与实际曲线的变化趋势基本一致,可见灰色系统可以较好拟合出南水河年径流量。表 2 为利用灰色系统的预测模型对 2011—2015 年南水河年径流量进行预测。根据水文预报的标准(误差低于 20%)来看,可见预测的合格率为 80%,而且最高年份的误差为 22.80%,最低误差为 2.71%,因此灰色预测模型对于南水河年径流量的预测结果较为理想。

2.2 基于遗传算法的 BP 神经网络预测结果

对于南水河的年径流量预测,使用基于遗传算法的 BP 神经网络是在 Matlab 软件下进行实验编程

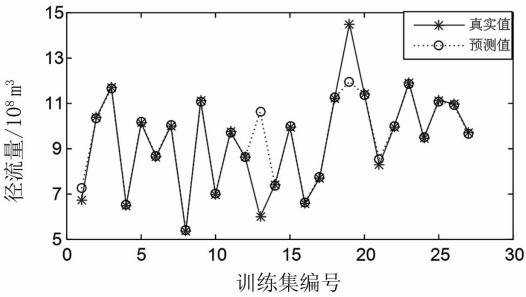


图 2 灰色预测径流量拟合值与实际值的比较

表 2 灰色系统径流量预测结果

年份	预测值 /(10 ⁸ m ³)	实际值 /(10 ⁸ m ³)	误差 /(10 ⁸ m ³)	相对误差/%
2011	10.18	8.29	-1.89	22.80
2012	10.50	11.14	0.64	5.75
2013	11.11	11.42	0.31	2.71
2014	11.80	9.96	1.84	18.47
2015	8.00	9.46	1.46	15.43

仿真的,具体参数设置如下:遗传算法中适应度函数选为模型输出值与实际径流量的误差;个体数目为 50;选择方法采用随机遍历采样方法;最大遗传代数设为 100 代;代沟为 0.95;使用单点交叉算子以及离散变异算子,交叉概率以及变异概率的参数分别为 0.7 和 0.001。在 BP 神经网络中使用 3 层网络,使用 traingdm 作为网络的训练函数,隐含层的激活函数选择 S 型的正切函数,输出层则选择纯线性函数作为激活函数,迭代次数为 1000,径流量预测误差取值为 0.001,学习速率则设为 0.001。

经过 Matlab 对于 GA - BP 神经网络对南水河年径流量的仿真,如表 3 所示,可以知道 GA - BP 神经网络对于南水河往年径流量的拟合误差过大,有部分年份误差甚至超过 100%,所以此模型不适用于南水河径流量的拟合。但是从表 3 可以看出,GA - BP 神经网络对于未来年份径流量的预测中,除了

2012 年的相对误差为 38.45%，其他年份以水文预报误差标准来看，都是满足水文预报的标准的，该模型对于这 4 年的预测都是合格的。

表 3 GA-BP 神经网络径流量预测结果

年份	预测值 /(10 ⁸ m ³)	实际值 /(10 ⁸ m ³)	误差 /(10 ⁸ m ³)	相对误差/%
2011	9.850	8.29	-1.560	18.82
2012	6.857	11.14	4.283	38.45
2013	9.828	11.42	1.592	13.94
2014	9.656	9.96	0.304	3.05
2015	9.862	9.46	-0.402	4.25

2.3 支持向量机预测结果

在对南水河年径流量预测的支持向量机模型中，采用 1978—2010 年作为模型的训练集，2011—2015 年作为模型的测试集。支持向量机的具体参数设定为：核函数类型选择 RBF 径向基函数；SVM 设置类型选为 epsilon-SVR 回归分析，设置损失函数 p 为 0.01；核函数的 γ 参数设为 0.022 097，惩罚系数设为 1024。在 Matlab 软件的环境下进行径流量的拟合预测仿真。

图 3 为支持向量机对南水河 1984—2010 年径流量的拟合图。可见支持向量机模型对于这 27 年的拟合结果非常接近，除了少量年份外，其他年份的拟合值与实际值基本重合，支持向量机对于南水河往年年径流量拟合的平均精度为 95.67%。根据水文预测的相对误差标准，其中只有 1 年的拟合值相对误差大于 20%，合格率达到 96%，故支持向量机模型用于南水河年径流量的拟合效果非常理想。

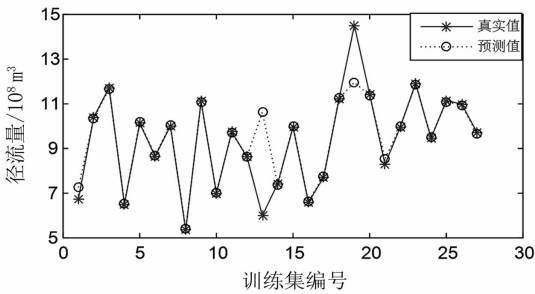


图 3 支持向量机径流量输出值与实际值的比较

表 4 为支持向量机径流量预测，从表中可以看出，支持向量机对 2011—2015 年南水河径流量的预测值与实际值的变化趋势基本一致，除了 2011 年误差为 3.05% 之外，其他 4 年误差低于 1%，因此该支持向量机径流量预测模型用于韶关南水河十分合适，预测效果非常理想。

表 4 支持向量机径流量预测结果

年份	预测值 /(10 ⁸ m ³)	实际值 /(10 ⁸ m ³)	误差 /(10 ⁸ m ³)	相对误差/%
2011	8.548	8.29	-0.258	3.05
2012	11.092	11.14	0.048	0.43
2013	11.374	11.42	0.046	0.40
2014	10.008	9.96	-0.048	0.48
2015	9.505	9.46	-0.045	0.48

2.4 南水河径流量预测

图 4 为利用上述支持向量机模型对南水河未来年份进行预测，可以看出，2016—2025 年南水河年径流量的波动趋势基本与往年一致，其中最大年径流量是 2019 年的 $1.197 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，最小年径流量预计在 2025 年，大小为 $5.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

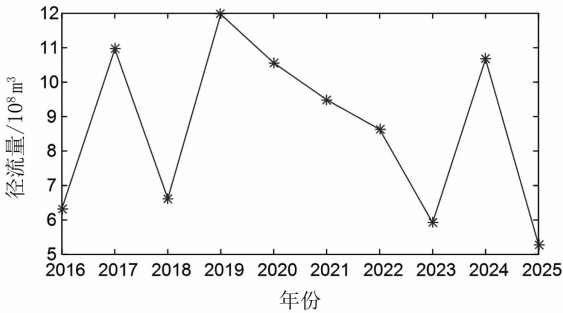


图 4 2016—2025 年南水河年径流量预测

3 结 语

1) 灰色系统理论、基于遗传算法的 BP 神经网络以及支持向量机 3 种方法对于南水河年径流量的预测合格率都在 80% 以上。其中，基于遗传算法的 BP 神经网络虽然预测合格率高，但是其对南水河往年径流量的拟合度低，所以这种方法不适用于南水河径流量的拟合。灰色系统理论则可以应用于南水河年径流量的拟合及预测中，但其拟合精度以及预测精度不是非常高。而支持向量机无论是对南水河往年年径流量的拟合，还是对年径流量的预测，两者的精度都非常高，所以支持向量机在南水河径流量研究中的效果是十分理想的。

2) 通过支持向量机对南水河 2016—2025 年的年径流量的预测中，可以看出，该流域未来径流量的变化趋势基本与往年一致，说明南水河的水资源比较稳定，对于微电网的建设来说，可以利用南水河水资源补给比较稳定，建设合理数量以及容量的小水电站。

参考文献

[1] 薛宇峰. 近 50 年来湛江、韶关气候变化的小波分析[J]. 广东气象, 2006(1):29–32.

[2] 许小娟, 周舫. 韶关地区水文特性分析[J]. 广东水利水电, 2005(1):45–48.

[3] 于兴杰, 畅建霞, 黄强, 等. 基于灰色马尔柯夫预测模型的径流量预测[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1):69–72.

[4] 顾海燕. 加权马尔可夫链在松花江哈尔滨站径流量预测中的应用[J]. 黑龙江大学工程学报, 2008, 35(3):112–115.

[5] 张丽霞, 雷晓云. 时间序列分解模型在乌拉斯台年径流量预测中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(2):22–24.

[6] Yinfeng Q I, Tan R. Application of BP Neural Network in the Prediction of Reservoir's Monthly Runoff Based on Genetic Algorithm[J]. Hydropower & Pumped Storage, 2018.

[7] 王其虎, 钱新, 张玉超, 等. BP 神经网络在流溪河水库径流量预测中的应用[J]. 环境保护科学, 2010, 36(3):19–21.

[8] 王义民, 于兴杰, 畅建霞, 等. 基于 BP 神经网络马尔科夫模型的径流量预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(5):14–17.

[9] 饶素秋, 霍世青. 灰色系统模型在黄河径流量分析预测中的应用[J]. 人民黄河, 1997(7):39–42.

[10] 李建林, 咎明军, 李宝玲. 基于 R/S 分析的黑河出山年径流量灰色预测[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(5):127–131.

[11] 李彦彬, 黄强, 徐建新, 等. 河川径流中长期预测的支持向量机模型[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5):28–32.

[12] 王娟娟. 基于改进支持向量机模型的开都河年径流量预测[J]. 西北水电, 2015(4):1–5.

[13] 张永波. 基于灰色系统理论的预测模型的研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2005.

[14] 徐建新, 李振全, 张福芬, 等. 用灰色系统理论进行径流预测研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2005, 26(3):1–3.

[15] 吴丽娜, 黄领梅, 沈冰. 大峪河年径流量的灰色拓扑预测与趋势分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(1):62–64.

[16] 马晋弢, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5):347–353.

[17] 李玲纯, 田丽. 基于遗传算法和 BP 神经网络的短期电力负荷预测[J]. 安徽工程科技学院学报, 2009, 24(3):57–60.

[18] 赵宇红, 李兰君, 王丽君. 基于遗传算法的人工神经网络负荷预测研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2005, 19(4):72–75.

[19] 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 人工神经网络原理及其应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

[20] 王广宇, 解建仓, 张建龙. GA–BP 组合预测方法在北洛河年径流量预测中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1):203–207.

[21] 顾万龙, 朱业玉, 潘攀, 等. 支持向量机方法在太阳辐射计算中的应用[J]. 太阳能学报, 2010, 31(1):56–60.

[22] Shahraiyini H, Ghafouri M, Shouraki S, et al. Comparison between Active Learning Method and Support Vector Machine for Runoff Modeling[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2012, 60(1):16–32.

[23] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8):8–13.

[24] 汪丽娜, 李粤安, 陈晓宏. 基于支持向量机的降雨–径流预测研究[J]. 水文, 2009, 29(1):13–16.

[25] 畅明琦, 刘俊萍. 兰州站径流支持向量机预测[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4):32–38.

[26] 楼顺天, 施阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.

[27] 葛哲学. 精通 MATLAB[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.

[28] 罗建军. MATLAB 教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

作者简介:

曾思明(1988), 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制;

吴杰康(1965), 博士生导师、教授, 研究方向为电力系统运行与控制;

陈永进(1976), 工学博士、高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制;

赵俊浩(1994), 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

翁兴航(1983), 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2018–10–31)

工业园区混合能源优化配置方法应用与实践

马超,夏雪,焦宗,李嘉逸

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:为了充分挖掘多能源之间的互补潜力,使工业园区混合能源系统的配置方式由传统粗放式转变为精确优化配置并降低系统配置方案的保守性,基于粒子群联合 CPLEX 求解算法对工业园区的系统配置和运行调度方案进行分析优化,并以某生物园区为例进行了实例分析,得到了目标函数下的最优设计方案和运行策略。仿真分析结果表明,优化配置方法的应用能够协调冷热电多种能源的混合利用,提升系统的综合经济性。同时,为工业园区能源供应项目的规划、设计提供参考性支撑,丰富设计手段。

关键词:工业园区; 粒子群算法; CPLEX; 冷热电; 优化配置

中图分类号:TK01 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0062-06

Application and Practice of Optimal Configuration Method of Hybrid Energy in Industrial Park

Ma Chao, Xia Xue, Qiao Zong, Li Jiayi

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:In order to fully excavate the potential in complementarity between multiple energy sources, the configuration of the hybrid energy system in industrial park is transformed from traditional extensive type to accurate optimization, and the conservatism of system configuration scheme is reduced. Based on PSO and CPLEX algorithm, the system configuration and operation scheduling of industrial parks are analyzed and optimized. A biological park is taken as an example for analysis, and the best design and operation strategies under the objective function are obtained. The simulation results show that the application of the proposed optimal configuration method can coordinate the utilization of various kinds of energy sources and enhance the comprehensive energy economic benefit of the system. At the same time, it provides a reference support for the planning and design of energy supply projects in industrial parks, and enriches design methods.

Key words:industrial park; particle swarm optimization; CPLEX; cooling heating and power; optimal configuration

0 引言

工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统,涵盖多种产能及用能主体,涉及电、冷、热等多种能源的生产、转移和利用。工业园区负荷具有需求量大、负荷特性复杂、供电可靠性要求高的特点。随着分布式可再生能源和清洁能源发电的高渗透率应用、多元化储能设备规模化推广,用户通过智能化手段参与需求响应,各类能源供应系统耦合互补,社会综合能效进一步提升,促使工业园区的用能向更加绿色、高效的方向转变。如何统一对园区用能优化,提高系统的运行效率和经济环境效益将是未来工业

园区规划设计的重点^[1-5]。

现有研究多针对带有电热联产系统的综合能源系统。文献[6-7]研究了以能量集线器最小运行费用为优化目标,采用鲁棒优化算法计及负荷需求的不确定性,最终对调度方案从经济性、可靠性、清洁性角度加以设计。文献[8]中建立了冷热电联供系统的经济优化调度模型,并采用 Hessian 矩阵迭代的内点法对模型进行求解,进而对系统开展优化规划。在文献[9-12]中,应用了带约束的粒子群算法对多目标规划模型进行求解。文献[13]建立了含有风机、光伏发电、冷热电联供以及蓄能系统的 CCHP 系统,以能源利用率最大和系统运行成本最小为优化目标进行设计。文献[14]提出一种双层

优化配置模型,用于应对多能源的运行复杂性。

综合来看,目前对混合能源系统的研究偏重于理论分析,存在优化配置变量多、模型理论化等问题,为实际工程的求解带来了很多问题,缺乏在实际工程中应用的可操作性。下面基于具有冷、热、电需求的分布式能源系统,首先通过传统配置方式的粗放式分析确定设备集,然后构建同时优化系统配置和运行方案的非线性混合整数规划模型,综合考虑系统投资费用、方案年运行费用指标,即从经济性的角度对系统的设备容量和运行策略进行了优化配置分析,实现园区规划设计的经济性最大化。

1 优化配置模型与方法

研究可知,园区供能有:冷热电联供运行模式,即燃气分布式能源供能用于满足园区内的冷热电负荷需求,地区电网作为有益补充;热电联产运行模式,即采用燃气分布式能源供能用于满足园区内的冷热负荷需求,发电上网。不同的供能运行模式将对应不同的优化配置结果,下面主要对冷热电联供的运行模式进行阐述。

园区冷热电混合能源系统的优化配置模型是以经济为目标,经济目标是使整个规划期内系统的总投资运行费用的年费用最小。

1.1 优化目标函数

经济目标函数可选择系统总的投资运行等年值费用,该费用由设备初始投资和工业园区混合能源系统年运行费用两部分构成。

$$f_c = C_C^{\text{ann}} + C_{\text{TEI}}^{\text{ann}} \quad (1)$$

式中: f_c 为能源系统总的投资运行等年值费用; C_C^{ann} 为设备初始投资折合年费用; $C_{\text{TEI}}^{\text{ann}}$ 为能源系统运行年费用。

工业园区混合能源系统内的运行年费用包括年购电费用、年运行维护费用以及年运行所需燃料费用,可表示为

$$C_{\text{TEI}}^{\text{ann}} = C_{\text{ONM}}^{\text{ann}} + C_{\text{fuel}}^{\text{ann}} + C_{\text{grid}}^{\text{ann}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{TEI}}^{\text{ann}}$ 为能源系统运行年费用; $C_{\text{ONM}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{fuel}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{grid}}^{\text{ann}}$ 分别为年运行维护费用以及年消耗燃料费用、年购电费用。

设备初始投资等年值费用数学表达式为

$$C_C^{\text{ann}} = \sum_i C_{\text{I},i} r_{\text{CR},i} = \sum_i C_{\text{I},i} \frac{r(1+r)^{l_i}}{(1+r)^{l_i} - 1} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{I},i}$ 为第 i 个设备初始投资费用,一般与设备容量相关; $r_{\text{CR},i}$ 代表资金收回系数; r 为贴现率; l_i 为第 i 个设备的运行寿命期望值, a_0 。

设备的年运行维护费用可表示为

$$C_{\text{ONM}}^{\text{ann}} = \sum_i C_{\text{ONM},i}^{\text{ann}} \quad (4)$$

式中, $C_{\text{ONM},i}^{\text{ann}}$ 为第 i 个设备的年运行维护费用,依据不同情况的,可以表达为不同的形式。

设备年消耗燃料费用主要指 DGs 的年消耗燃料费用,与 DGs 年发电量成正比,其数学表达式为

$$C_{\text{fuel}}^{\text{ann}} = \sum_i C_{\text{fuel},i}^{\text{ann}} = c_{\text{fuel},i} F_i^{\text{ann}} = c_{\text{fuel},i} \frac{W_{\text{E},i}^{\text{ann}}}{\mu_i} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{fuel},i}^{\text{ann}}$ 为第 i 个 DGs 的年发电消耗燃料费用; $c_{\text{fuel},i}$ 为第 i 个 DGs 发电所需燃料的单位热值费用,元/kWh; F_i^{ann} 为第 i 个 DGs 年发电消耗的燃料热能,kWh,其大小等于第 i 个 DGs 年发电量 $W_{\text{E},i}^{\text{ann}}$ 与其发电效率 μ_i 的比值。

工业园区混合能源系统向电网的购电费用的构成和区域电价机制有关,一般可归纳为基本容量、功率、电度(电量)3 类费用。

$$C_{\text{grid}}^{\text{ann}} = C_{\text{f}}^{\text{ann}} + C_{\text{d}}^{\text{ann}} + C_{\text{e}}^{\text{ann}} \quad (6)$$

式中, $C_{\text{grid}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{f}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{d}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{e}}^{\text{ann}}$ 分别为年总购电总费用、基本容量费用、功率费用和电度费用。

1.2 约束条件

模型的约束条件分为不等式约束和等式约束。等式约束主要为满足用能端逐时对电、冷、热 3 种能源的需求,即供给能源量等于能源需求量:

$$\begin{aligned} P_{\text{grid}} + P_{\text{ge}} &= P_{\text{req}} + P_{\text{x}}^i \\ Q_{\text{gehot}} + Q_{\text{xhot}}^i &= Q_{\text{reqhot}} \\ Q_{\text{xcool}}^i &= Q_{\text{reqcool}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: P_{grid} 、 P_{ge} 、 P_{req} 、 P_{x}^i 分别为电网购电功率、机组发电功率、电负荷需求、其他供能设备耗电功率; Q_{gehot} 、 Q_{xhot}^i 、 Q_{reqhot} 分别为余热回收装置输出热功率、其他供热设备输出热功率、热负荷需求; Q_{xcool}^i 、 Q_{reqcool} 分别为供冷设备输出冷功率、冷负荷需求。

除上述冷热电需求平衡约束外,针对供能设备的运行特性,还可能包含设备运行工况出力约束、各设备的转换效率和能源消耗量等约束条件。

根据上述系统结构描述和优化配置模型,以系统备选设备的数量或容量作为优化变量,采用基于粒子群联合 CPLEX 求解器的算法进行求解,其具体

流程如图 1 所示。

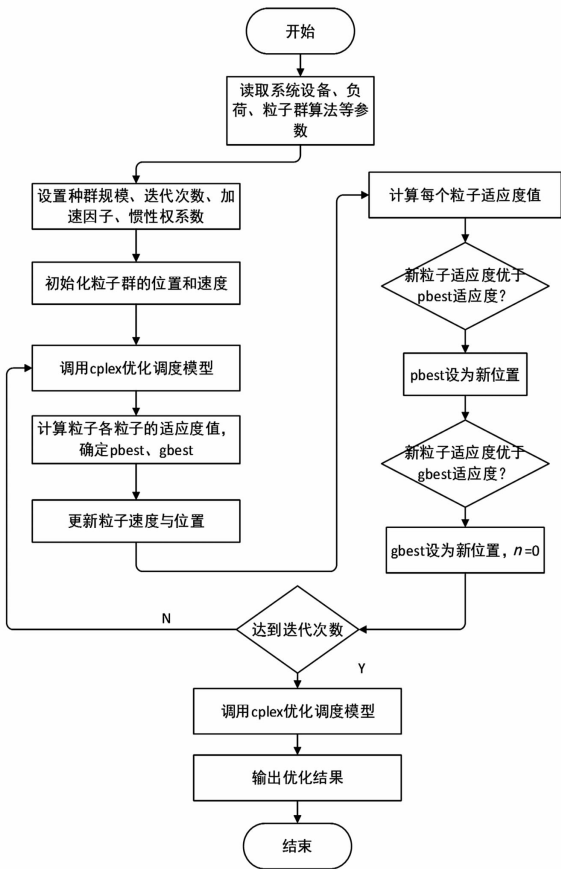


图 1 配置优化流程

2 工程案例介绍

选取成都市某生物园区为应用对象进行优化研究。为了成功打造绿色低碳能源基础设施,该生物园区拟投资建设天然气分布式能源站及配套使用的天然气管网和配电网项目,为生物园区内的企业、居民和其他单位提供蒸汽、热水、冷水、电力等综合能源服务,在生物园区内构建环保、高效、稳定、便捷的智慧能源保障体系。

由于生物园区存在较大的电负荷,拟通过 220 kV 变电站与大电网连接,保障园区的电负荷需求。燃气分布式能源供能主要用于满足生物园区内的冷热电负荷需求,地区电网作为园区负荷的有益补充。

2.1 电负荷

生物园区近期建设范围为起步区 1 期、2 期,通过选取各负荷分类指标、用地指标,计算出近期生物城的饱和最大负荷为 139.55 MW。根据园区典型负荷特征曲线预测得到生物园区的日负荷需求曲线,如图 2 所示。

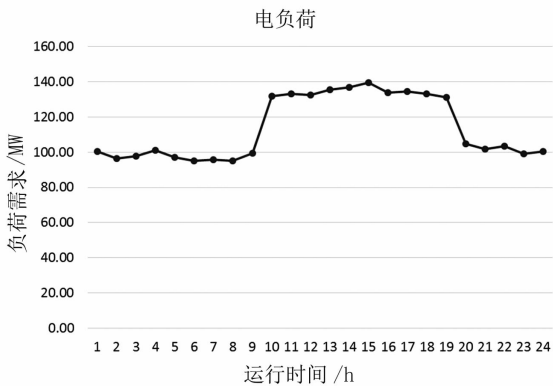


图 2 生物园区电负荷

2.2 热负荷

供热区域所需热负荷以工业生产性蒸汽热负荷为主,参数为 0.7 MPa(g) 的饱和蒸汽。考虑由能源站集中供应以利于节能环保。根据收资、调查情况,本项目工业热负荷逐时变化曲线如图 3 所示。

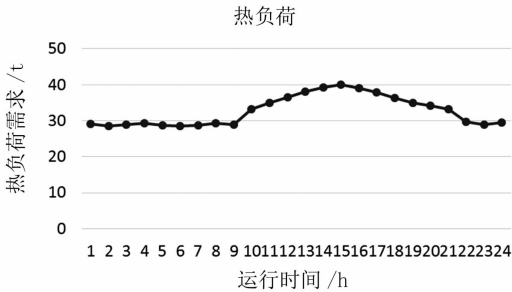


图 3 生物园区热负荷

2.3 冷负荷

冷负荷主要包括工艺制冷负荷及空调制冷负荷。根据园区收资、调查可知,园区冷负荷主要有工艺制冷及空调制冷负荷需求。在冷负荷调研的过程中,通过业主和用户初步协商,供冷方式采用将制冷蒸汽通过蒸汽管道送往用户侧,在用户侧建造制冷站的方式来满足用户的用冷需求。本项目冷负荷逐时变化曲线如图 4 所示。

工业园区生产型企业居多,且其倒班轮换的工作机制使得工业园区一般都具有较为稳定的电、热、冷负荷。工业园区各类负荷都比较大,受季节性变化影响较小。

设备选型主要遵照“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”的原则,合理进行电力、供冷、供热设备的配置,做到按需供给、适时匹配,达到冷热电负荷的相对平衡。同时,综合考虑到工程冷热负荷需求大,该地区以水电为主的电力结构以及电力“丰裕枯余”、弃水问题突出等因素,为有效扩大天然气应用,统筹协调地区电力行业发展,天然气分布



图4 生物园区冷负荷

式能源项目系统配置应首选燃气单循环机组。

通过统筹考虑该地区可用资源潜力、冷热电负荷需求分析以及投资方需求情况,选取燃气轮机组、燃气锅炉、电锅炉、蒸汽型溴化锂制冷机组、电制冷机组为备选设备集进行园区供能优化配置设计,从而满足生物园区的冷、热、电负荷需求。

根据前述备选设备集,建立生物园区供能结构如图5所示。

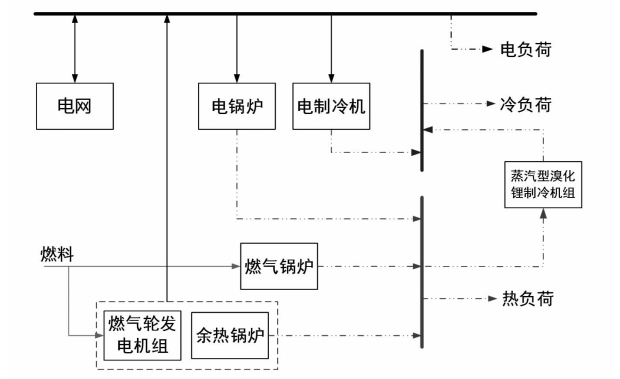


图5 生物园区的供能结构

3 仿真分析

3.1 配置参数及边界条件

从园区综合热负荷分析可知,工程设计综合平均负荷为 50.9 t/h。通过传统配置方式粗放式分析燃机的发电效率、工程的综合能源利用效率和经济性,工程选取 SGT400 燃气轮机组作为主要供能设备,并配置燃气锅炉等其他供储能设备进行能源供应。各设备的单位投资建设成本如表 1 所示。

按照当前电价,设定容量电价和功率电价为 0,电度电价采用分时电价。丰枯季节划分:丰水期为 6 月至 10 月,枯水期为 1 月至 4 月、12 月,平水期为 5 月、11 月。销售侧丰枯电价调整为枯水期电价上浮 5%,丰水期电价下浮 5%。峰谷分时浮动电价继续按高峰时段在丰枯浮动基础上上浮 50%,低谷时

段在丰枯浮动基础上下浮 50%。该地区天然气价为 1.8 元每标准立方米,不同季节、不同时段电价如表 2 所示。

表 1 备选供储能设备成本

燃气机组 (万元/台)	燃气锅炉 (万元/t)	电锅炉 (万元/t)	蒸汽型溴化锂机 (元/kW)	电制冷机 (元/kW)
4997	13	38	1500	1300

注:机组成本包含了余热锅炉投资。

表 2 园区购电电价(丰、枯、平期)

价格类型	价格/元	时间段
容量电价	0	-
功率电价	0	-
电度电价 (丰)	0.374 6	23:00 - 7:00
	0.749 2	11:00 - 19:00
	1.123 8	7:00 - 11:00、19:00 - 23:00
电度电价 (枯)	0.410 2	23:00 - 7:00
	0.820 3	11:00 - 19:00
	1.230 5	7:00 - 11:00、19:00 - 23:00
电度电价 (平)	0.394 3	23:00 - 7:00
	0.788 6	11:00 - 19:00
	1.182 9	7:00 - 11:00、19:00 - 23:00

3.2 优化配置方案

如前所述,该优化设计问题是一个多变量、多约束的非线性规划问题。这里选粒子群算法予以求解,粒子群个数为 100,最大迭代次数 1000,个体加速因子设置为 2,全局加速因子设置为 2。通过求解优化配置模型,得到该系统的优化配置为燃气轮机系统配置 2 台燃气轮机组(含余热锅炉),配套 20 t/h 燃气锅炉,1.9 MW 电制冷机组,9.2 MW 蒸汽型溴化锂机组。

在基础配置之上,考虑在一台燃机或余热锅炉故障或检修停运时,另一台机组满负荷运行可提供约 26.05 t/h 蒸汽,因此需考虑 2 台 20 t/h 的燃气锅炉进行备用。

系统基本运行策略如下:

1)在非检修月,两台燃机优先满足热负荷需求,不足部分有燃气锅炉补足。冷负荷夜间以余热部分通过蒸汽型溴化锂机组供冷为主,电制冷机制冷为辅。在高峰期,机组热出力都用于热负荷供能,则冷负荷由电制冷机组制冷满足需求。

2)在检修月,由于一台燃机检修停运,另一台机组满负荷运行可提供约 26.05 t/h 蒸汽,将 2 台 20 t/h 的燃气锅炉均投入运行,以满足最大冷热负

荷需求,保障工业园区供能的稳定性和安全性。

图6、图7给出了生物园区非检修月和检修月的供能调度计划方案。

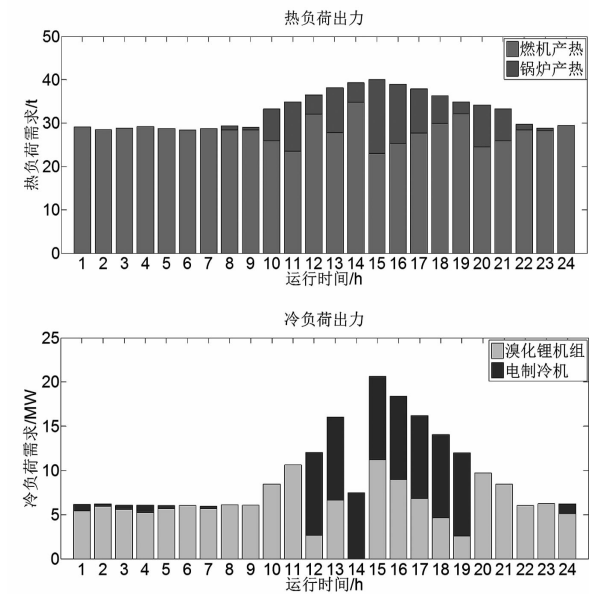


图6 非检修月供冷、热调度计划

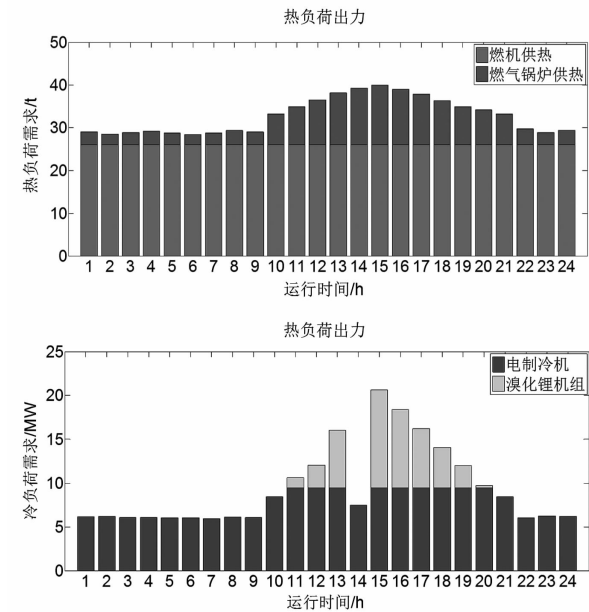


图7 检修月供冷、热调度计划

4 经济性对比

该园区企业居多,一般都具有稳定的电、热和冷负荷,各项负荷都比较大,该园区根据传统配置方法“以热定电”的原则配置设备。配置方案为2台燃气轮机组(含余热锅炉)、2台20 t/h的燃气锅炉、4.8 MW电制冷机组、42 kW蒸汽型溴化锂机组。优化配置方法和传统配置方法的经济性对比结果如表3所示。

表3 优化配置方法与传统方法经济性对比

配置方式	投资成本 /万元	运行费用 /万元	等年值费用 /万元
传统配置方式	11 265	82 975	84 344
优化配置方式	12 173	80 403	81 701

由经济性对比可知,传统配置方案更多采用电制冷机组供冷为主,在现行丰枯峰谷电价机制和气价条件下,该方案从电网购电比例相比于优化配置方案更高,导致其运行成本费用增大。冷、热、电耦合的优化配置方案虽然增加了设备投资成本,但达到降低系统年运行费用及总的等年值费用,提高了工程整体的经济性。

5 结 语

研究了混合能源系统的规划问题,把混合能源系统设计转化为了非线性规划问题进行求解。建立以投资成本和运行成本最小为目标的优化函数,提出了以粒子群结合 CPLEX 的方法对优化问题进行求解,在备选供能设备中寻找最优配置组合方案。

仿真结果表明,通过对混合能源优化配置方法和典型调度运行策略研究可充分挖掘多能源之间的互补潜力,使工业园区混合能源系统的配置方式由传统粗放式转变为精确优化配置,降低系统配置方案的保守性;通过多种能源混合利用,提升了系统的综合经济性。优化配置方法的应用能够为工业园区能源供应项目的规划、设计提供参考性支撑,丰富了设计手段。

参考文献

[1] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.

[2] 任洪波,邱留良,吴琼,等. 分布式能源系统优化与设计综述[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 49-55.

[3] 林世平. 工业园区小型分布式能源系统应用研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 7(2): 103-106.

[4] 金红光,隋军,徐聪,等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3160.

[5] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.

- (收稿日期:2019-03-04)

(上接第 35 页)

- (收稿日期:2018-11-22)

站用变压器用电流互感器变比选择研究

高 松,何立新,胡德峰,王亚莉
(四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610041)

摘 要:为了同时满足测量精度和继电保护整定的需求,站用变压器高压侧电流互感器变比选择常常面临困难。通过分析站用变压器保护的配置和整定原则,结合保护装置精确工作电流范围,计算出了电流互感器变比的上下限范围。在此基础上,通过分析电流互感器测量、保护绕组的变比关系得出了常用 10 kV、35 kV 站用变压器保护和测量的变比推荐值,以便工程实际应用。

关键词:站用变压器;电流互感器;变比;继电保护

中图分类号:TM452 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2019)02 - 0068 - 05

Research on Transformation Ratio Selection of Current Transfer for Auxiliary Transformer

Gao Song, He Lixin, Hu Defeng, Wang Yali
(Sichuan Electric Power Design & Consulting Co. , Ltd. , Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to satisfy the requirements of measurement accuracy and relay protection setting simultaneously, the transformation ratio selection of current transformer in high voltage side of auxiliary transformer is a common problem faced in projects. Based on the research about the principle of relay protective configuration, the setting calculation of protection relaying and the precise work current range of protection devices, the upper and lower limits for the transformation ratio of current transformer are derived. And then, by analyzing the relationship between measuring winding and protection winding, the recommended transformation ratios of measuring winding and protection winding used in high voltage side of 10 kV and 35 kV auxiliary transformer are given for practical using.

Key words:auxiliary transformer;current transformer; transformation ratio;relay protection

0 引 言

变电站的低压侧短路水平通常为 20 ~ 40 kA,而站用变压器额定电流仅为几安到几十安。若为方便测量和保护整定,按站用变压器额定负荷电流选择,则故障短路时电流互感器可能因承受数百上千倍短路电流而产生严重过饱进而影响其性能;若按故障短路时不饱和为条件选择电流互感器,则其电流将远大于负荷电流,且需要较高的准确限值系数,易造成测量误差难以保证、保护整定困难、投资费用增加等问题^[1-4]。

根据 DL/T 866 - 2015《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》第 8.2.4 条、8.2.5 条文解释可知:1)在外部短路故障时,3 ~ 35 kV 系统电流互感

器在给定暂态系数不小于 2 条件下,通常难以满足准确限值系数要求,因此在保证装置可靠动作的前提下,允许有较大误差;2)当最大限值电流小于系统最大短路电流时,准确限值电流大于微机保护整定值 2 倍,可保证装置可靠动作^[5]。

为方便电流互感器选型,在分析站用变压器保护配置和整定计算的基础上,结合保护装置精确工作电流范围,计算出了电流互感器变比的上下限范围。结合电流互感器测量、保护绕组的变比关系给出了常用 10 kV、35 kV 站用变压器保护和测量的变比推荐值。

1 保护的配置

根据 GB/T 14285 - 2006《继电保护和安全自动

装置技术规程》规定,站用变压器一般配置电流速断保护、过电流保护及装设在其低压侧中性线的零序过流保护^[6]。

电流速断保护应能保证在电流互感器深度饱和之前,快速、可靠切出站用变压器电源侧引出线和套管及变压器内部部分线圈故障;过电流保护应能准确检测到站用变压器低压侧母线或馈线支路发生短路故障电流,并经一定延时切出故障。这就要求电流互感器既能在大短路电流时避免深度饱和,又能在小电流过负荷时准确检测,因此其变比选择十分重要。

2 整定计算

站用变压器额定容量 S_e ,站用变压器高压侧额定电压 U_e ,取基准容量 $s_j = S_e$,基准电压 $U_j = 1.05U_e$ 。站用电低压系统短路电流计算宜按高压侧保护电气的开断容量或高压侧的短路容量确定。

设断路器开关电流为 I_k ,系统短路容量 $S_d'' = \sqrt{3}U_jI_k$,折合到容量 S_e 电抗值为

$$X_s^* = \frac{S_j}{S_d''} \tag{1}$$

站用变压器阻抗标么值为

$$X_{syb}^* = \frac{U_d\%}{100} \times \frac{S_e}{S_e} = \frac{U_d\%}{100} \tag{2}$$

2.1 电流速断保护^[7-8]

电流速断保护具有接线简单、动作迅速等优点,能瞬时切除变压器电源侧引出线和套管及变压器内

部部分线圈的故障。站用变压器电流速断保护整定值,按躲过变压器负荷母线短路时流过保护的最大短路电流计算,即

$$I_{op-I} = K_{rel}I_{1k2.max}^{(3)} \tag{3}$$

式中: K_{rel} 为可靠系数,取 1.4; $I_{1k2.max}^{(3)}$ 为最大运行方式下,变压器负荷侧母线短路时流过保护的最大短路电流。

站用变压器低压侧三相短路后,高压侧保护安装处的电流值为

$$I_{1k2.max}^{(3)} = \frac{1}{X_s^* + X_{syb}^*} \times \frac{S_e}{\sqrt{3}U_e} \times 10^3 \tag{4}$$

2.2 过电流保护^[7-8]

过流保护可以反应外部故障引起的变压器绕组过流,同时作为变压器内部故障时的气体保护的后备保护和低压母线保护的主保护。其保护动作电流 I_{op-II} 应按躲过变压器可能出现的最大负荷电流 $I_{L.max}$ 来整定,即

$$I_{op-II} = \frac{K_{rel}}{K_r} \times I_{L.max} \tag{5}$$

式中: K_{rel} 为可靠系数,取 1.4; K_r 为返回系数,取 0.85。

站用变器的最大负荷电流按其额定电流选取,即

$$I_{L.max} = I_g = 1.05 \times \frac{S_e}{\sqrt{3}U_e} \tag{6}$$

2.3 常用站用变保护整定计算结果

根据上述电流速断保护和过电流保护整定值的计算方法,计算出 DL/T 5155-2016 中常用站用变压器电流速断保护整定值和过电流整定值,如表 1、表 2 所示^[9]。

表 1 常用 10 kV/0.4 kV 变压器保护整定值计算结果

容量 /kVA	$U_d\%$	一次电流 /A	系统阻抗 $X_s/(p.u.)$			电流速断保护整定值/A			过电流整定值 /A
			25 kA	31.5 kA	40 kA	25 kA	31.5 kA	40 kA	
160	4.0	9.237 604	0.000 352	0.000 279	0.000 220	305.234 8	305.785 1	306.236 3	15.214 88
200	4.0	11.547 010	0.000 440	0.000 349	0.000 275	380.713 4	381.569 9	382.272 7	19.018 60
250	4.0	14.433 760	0.000 550	0.000 436	0.000 344	474.601 2	475.932 9	477.026 8	23.773 25
310	4.0	17.897 860	0.000 682	0.000 541	0.000 426	586.596 4	588.632 1	590.306 5	29.478 83
400	4.0	23.094 010	0.000 880	0.000 698	0.000 550	753.233 5	756.593 4	759.361 8	38.037 19
500	4.0	28.867 510	0.001 100	0.000 873	0.000 687	936.503 3	941.702 7	945.995 4	47.546 49
630	4.5	36.373 070	0.001 386	0.001 100	0.000 866	1 045.527 0	1 052.011 0	1 057.371 0	59.908 58
800	4.5	46.188 020	0.001 760	0.001 396	0.001 100	1 317.037 0	1 327.343 0	1 335.887 0	76.074 39
1000	4.5	57.735 030	0.002 199	0.001 746	0.001 375	1 630.953 0	1 646.788 0	1 659.960 0	95.092 99

表 2 常用 35 kV/0.4 kV 变压器保护整定值计算结果

容量 /kVA	$U_d\%$	一次电流 /A	系统阻抗 $X_s/(p.u.)$			电流速断保护整定值/A			过电流整定值 /A
			25 kA	31.5 kA	40 kA	25 kA	31.5 kA	40 kA	
160	6.5	2.771 281	0.000 106	0.000 083 788	0.000 065 983	56.754 62	56.773 61	56.789 15	4.564 463
200	6.5	3.464 102	0.000 132	0.000 104 735	0.000 082 479	70.914 52	70.944 18	70.968 44	5.705 579
250	6.5	4.330 127	0.000 165	0.000 130 918	0.000 103 098	88.598 27	88.644 58	88.682 46	7.131 974
310	6.5	5.369 358	0.000 205	0.000 162 339	0.000 127 842	109.795 20	109.866 30	109.924 50	8.843 648
400	6.5	6.928 203	0.000 264	0.000 209 469	0.000 164 957	141.542 30	141.660 50	141.757 20	11.411 160
500	6.5	8.660 254	0.000 330	0.000 261 837	0.000 206 197	176.749 10	176.933 50	177.084 50	14.263 950
630	6.5	10.911 920	0.000 416	0.000 329 914	0.000 259 808	222.411 90	222.703 90	222.943 10	17.972 570
800	6.5	13.856 410	0.000 528	0.000 418 939	0.000 329 914	281.944 30	282.413 80	282.798 60	22.822 320
1000	6.5	17.320 510	0.000 660	0.000 523 674	0.000 412 393	351.722 10	352.452 90	353.052 50	28.527 900

表 3 10 kV 站用变各变比(数值上等于 CT 额定电流)限值及站用变高压电流

容量 /kVA	上 限		下 限			一次电流 I_g /A	$5I_g$ /A
	$A=0.1$	$A=0.05$	$K_{alf}=20$	$K_{alf}=30$	$K_{alf}=40$		
160	152	304	31	21	16	9.24	46.19
200	190	380	39	26	20	11.55	57.73
250	237	475	48	32	24	14.43	72.17
310	294	589	60	40	30	17.90	89.49
400	380	760	74	51	38	23.09	115.47
500	475	950	95	64	48	28.86	114.34
630	599	1198	106	71	53	36.37	181.87
800	760	1521	134	90	67	56.19	230.94
1000	950	1901	166	111	83	57.74	288.67

根据高压侧保护电气的开断容量折算出的系统阻抗与站用变压器阻抗相比,至少相差一两个数量级,因此计算站用变压器低压侧短路电流时,高压侧开断容量的影响有限。从表 1 和表 2 可以看出,高压侧断路器开断水平分别选取 25 kA、31.5 kA、40 kA 时,电流速断保护的整定值相差很小,对保护整定而言可以忽略^[10-11]。

3 变比的选取

3.1 影响变比的因素

一方面,站用变压器容量相对较小,高压侧正常工作时电流很小,因而 CT 不能选得过大,即便为满足测量精度和保护准确限值系数的要求,保护和测量计量二次绕组选用不同变比,其变比也不宜过大,宜采用 1:2。

同时,站用变压器保测一体化装置的精确工作电流有一定范围,而站用变压器过流保护的整定值

较小,若变比过大,可能造成过流保护整定值超过电流保护启动元件的电流下限,导致过电流无法整定。

另一方面,系统发生短路后,短路电流较大,为保证保护装置的可靠动作,电流变比不宜过小。

3.2 电流变比上限的确定

设变比最大值(上限)为 N_{max} , N_{max} 需要满足的条件为^[12-13]

$$I_{op-II}/N_{max} \geq A \times I_{20}$$

(7)

式中: I_{op-II} 为过流保护整定值; A 为站用变压器保护装置精确工作电流下限值; I_{20} 为电流互感器二次侧额定电流,取 1 A 或 5 A,按 $I_{20}=1$ A 考虑。二次电流额定电流为 1 A,则变比与一次额定电流在数值上相等。

3.3 电流变比下限的确定

设变比最小值(下限)为 N_{min} ,为满足电流互感器最大限值电流大于保护最大动作电流整定值的 2 倍的要求^[14],即 $I_{pr}K_{alf} \geq 2I_{op-I}$ 。 N_{min} 需要满足的条件为

$$N_{\min}K_{\text{alf}}\geqslant 2I_{\text{op}-1}\tag{8}$$

3.4 推荐变比的选择

根据上述变比上下限计算方法,计算出 10 kV 站用变压器各变比(数值上等于 CT 额定电流)限值及站用变压器高压一次额定电流如表 3 所示。

从表 3 可以看出,随着容量的增加,变比的上下限值均增大。

保护用电流互感器变比上限值主要由保护装置的精确工作电流下限值和过电流保护整定值决定。在过电流保护整定值一定的情况下,保护装置的精确工作电流下限值越小,则变比上限值越大。

不同厂家生产的保护装置过流整定值范围见表 4。

表 4 不同厂家保护装置过流整定范围

生产厂家	过流整定值范围
南京南瑞继保电气有限公司	$0.1I_n\sim 20I_n$
长园深瑞继保自动化有限公司	$0.05I_n\sim 20I_n$
国电南京自动化股份有限公司	$0.04I_n\sim 20I_n$
北京四方继保自动化股份有限公司	$0.05I_n\sim 20I_n$

由于南京南瑞继保电气有限公司生产的保护装置过流整定范围最小,为了变比选择的普适性,10 kV 站用变压器 CT 变比选择时过电流整定范围按 $0.1I_n\sim 20I_n$ 考虑。

变比下限值由电流速断保护的整定值决定,从表 3 中可以看到容量为 1000 kVA 的 10 kV 站用变压器,电流互感器变比选择 166/1,准确限值系数取 20,即可保证保护可靠动作。因此一般电流互感器准确限值系数选择 20 即可,不需要再放大准确限值系数。

但在变比满足最大上限值的情况下,变比选择越大,准确限值系数越大,则当发生故障时,电流互感器的过饱和系数越低,裕度越大,保护装置不易因

CT 过饱和而导致保护拒动或越级跳闸。

同一台电流互感器,各二次绕组变比宜一致。为满足计量、测量准确性,电流互感器额定电流应尽量接近较小的负荷电流;而为了避免互感器深度饱和,应避免选用较高的准确限值系数,电流互感器额定电流应尽量选择较大一些。若根据实际需要,保护和测量计量二次绕组选用不同变比,其变比也不宜过大,宜采用 1:2。测量计量也可采用中间抽头方式,以获得小电流。一般 0.2 级测量电流互感器在 20%~120% 额定电流范围内,能保证测量精度。

综上所述,推荐 10 kV 站用变压器电流互感器变比选择如表 5 所示。同理可计算出 35 kV 站用变压器各变比(数值上等于 CT 额定电流)限值及站用变高压一次额定电流如表 6 所示。从表 6 中可以看出,当保护装置的精确工作电流范围为 $0.1I_n\sim 20I_n$ 时,160 kVA、200 kVA、250 kVA 站用变压器变比值上限均小于 100,若精确工作电流范围为 $0.05I_n\sim 20I_n$ 时,比值上限可提高一倍。分别考虑精确工作电流范围的不同,推荐互感器变比如表 7 所示。

表 5 10 kV 站用变压器电流互感器变比推荐值

容量 /kVA	保护 (10P20)/A	测量(0.2 级) /A	实际电流与 CT 额定电流 比值/%
160	100/1	(50-100)/1(50/1)	18
200	100/1	(50-100)/1(50/1)	23
250	100/1	50-100/1(50/1)	29
310	100/1	50-100/1(50/1)	36
400	100/1	50-100/1(50/1)	56
500	100/1	50-100/1(50/1)	58
630	200/1	(100-200)/1(100/1)	36
800	200/1	(100-200)/1(100/1)	46
1000	200/1	(100-200)/1(100/1)	58

表 6 35 kV 站用变压器各变比(数值上等于 CT 额定电流)限值及站用变高压电流

容量 /kVA	上 限		下 限			一次电流 I_g /A	$5I_g$ /A
	$A=0.1$	$A=0.05$	$K_{\text{alf}}=20$	$K_{\text{alf}}=30$	$K_{\text{alf}}=40$		
160	45	91	6	4	3	2.77	13.86
200	57	114	8	5	4	3.46	17.32
250	71	142	9	6	5	4.33	21.65
310	88	176	11	8	6	5.37	26.87
400	114	228	15	10	8	6.93	34.64
500	142	285	18	12	9	8.66	43.30
630	179	359	23	15	12	10.91	54.56
800	228	456	29	19	15	13.86	69.60
1000	285	570	36	24	18	17.32	86.60

表 7 35 kV 站用变电流互感器变比推荐值

容量 /kVA	保护 (10P20)/A	测量 (0.2 级)/A	测量变 比选	实际电流与 CT 额定电 流比值/%
160	2×50/1	2×(25－50)/1	25/1	11
200	2×50/1	2×(25－50)/1	25/1	14
250	2×50/1	2×(25－50)/1	25/1	17
310	2×50/1	2×(25－50)/1	25/1	21
400	2×100/1	2×(50－100)/1	50/1	14
500	2×100/1	2×(50－100)/1	50/1	17
630	2×100/1	2×(50－100)/1	50/1	21
800	200/1	(100－200)/1	100/1	14
1000	200/1	(100－200)/1	100/1	11

当保护装置的精确工作电流范围为 $0.1I_n \sim 20I_n$ 时,一次绕组串联,范围为 $0.05I_n \sim 20I_n$ 时一次绕组并联,即可满足变比上下限要求。

3.5 变比选择的进一步分析

35 kV 容量为 160~310 kVA 的站用变压器,其电流互感器变比较小,动、热稳定需要满足较高要求时,可能制造困难。

一方面,变比较小是受到电流变比上限的影响,变比上限与精确工作电流范围及过电流整定值有关,若保护装置招标文件中明确精确工作电流范围为 $0.05I_n \sim 20I_n$,则变比上限可提高。过电流整定值以变压器可能出现的最大负荷电流 $I_{L,max}$ 来整定, K_{rel} 可靠系数取 1.4,返回系数取 0.85。过电流保护的灵敏度需为

$$K_{sen} = \frac{K_{k,min}}{I_{op}}$$

(9)

式中, $K_{k,min}$ 为最小运行方式下,在灵敏度校验点发生两相短路时,流过保护装置的最小短路电流。低压侧两相短路,保护安装处的电流值大约为三相短路时的 $\sqrt{3}/2$ 倍,经计算得过流保护的灵敏度大约在 7.65~7.69,远大于在被保护变压器低压母线上短路时要求的 $K_{sen} \geq 1.5$ 。因此可以将过流保护的整定值可适当提高 1~2 倍,则变比上限也会同步提高。

另一方面,站用变压器高压侧实际电流较小,若额定电流较大,可能会影响测量精度,可以采用精度在 1%~120% 额定范围满足要求的 0.2S 级测量绕组。

综上分析,最终推荐 35 kV 站用变电流互感器变比选择如表 8 所示。

表 8 35 kV 站用变电流互感器变比最终推荐值

容量 /kVA	保护 (10P20)/A	测量 (0.2 级)/A	实际电流与 CT 额定电流比值/%
160	100/1	(50－100)/1(50/1)	6
200	100/1	(50－100)/1(50/1)	7
250	100/1	(50－100)/1(50/1)	9
310	100/1	(50－100)/1(50/1)	11
400	200/1	(50－100)/1(50/1)	12
500	200/1	(50－100)/1(50/1)	18
630	200/1	(50－100)/1(50/1)	22
800	200/1	(50－100)/1(50/1)	28
1000	200/1	(50－100)/1(50/1)	34

4 结 语

通过保护整定计算并结合保护装置的电流精确工作范围,得到了站用变压器保护用 CT 的保护变比上下限值。根据上下限值结果可知,以保证保护装置正确动作为原则选择电流互感器时,其准确值限值系数一般取 20 即可。

以测量电流互感器额定电流选择保护与测量绕组宜采用同一变比,若不同变比时宜采用 1:2 的原则,给出了 10 kV、35 kV 常用站用变压器保护、测量的变比推荐值。

35 kV 站用变压器高压侧实际电流较小,若电流互感器额定电流较大时,可考虑采用 0.2S 精度互感器。

35 kV 过电流保护整定值过小可能导致保护变比上限很小,影响电流互感器的选择,可在满足灵敏度的前提下,适当增大过电流保护定值,从而选择较大变比的互感器。

参考文献

[1] 袁季修. 电流互感器和电压互感器[M]. 北京:中国电力出版社,2011.

[2] 沈诗佳. 电力系统继电保护及二次回路[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[3] 姜百超. 220 kV 开关站站用变电流互感器参数选择[J]. 供用电, 2016,33(2):69-72.

[4] 张航. 论变电站站用变压器保护用电流互感器的配置[J]. 科技资讯, 2012(25):119-120.

(下转第 90 页)

现代飞机发电系统及差动保护误动的机理分析与优化策略

李红,邓乐武,吕素,罗强

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,四川 成都 610092)

摘要:目前飞机常用的交流发电机仍采用三级式交流励磁同步发电机,通过引入定速传动驱动装置可消除发动机转速对该结构的影响。通常需要在发电机侧和线路侧安装互感器元件用于检测电流差值大小,并通过发电机控制器触发用于保护发电机与主汇流条供电线路间的接触器,从而实现差动保护。有效的差动保护能确保发电机和发电馈线的安全,但差动保护误动将会严重干扰飞机的正常运行。分析了飞机主交流发电系统结构及保护区内正常短路的差动保护方案,进一步考虑当一次电流含直流分量、互感器两相误接、互感器接入方向反相对差动保护可能造成的影响。通过理论分析和图形模拟方法证明了三种情形均会造成主交流发电系统差动保护误动,并通过 Matlab/Simulink 验证了分析的正确性,并提供了改进方案实现了飞机电气系统的进一步优化,同时为飞机整体的安全性能提供了思路 and 保障。

关键词:飞机发电系统;差动保护;差动保护误动;直流分量;互感器

中图分类号:TM77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0073-07

Analysis and Optimization Strategy of Power Generation System and Differential Protection in Modern Aircraft

Li Hong, Deng Lewu, Lv Su, Luo Qiang

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, Sichuan, China)

Abstract: Nowadays, the aircraft using a three-stage wound-field synchronous generator has received more and more attention. In this system, the constant speed drive (CSD) adopted for AC power systems is used to eliminate the influence caused by the rotational speed of engine. Usually, the current transformers (CT) of the generator and lines are used for ensuring the proper operation of electrical system, which can avoid severe damage due to a defect. However, the mal-operation of differential protection will seriously interfere the security of aircraft. The structure of main AC power generation system of the aircraft and the differential protection scheme are discussed. In addition, the effect of differential protection caused by the primary current with DC component, the wrong connection of two phases of CT and the different join order of CT are all considered, which are further discussed by the theoretical analysis and graphical simulation. Finally, Matlab/Simulink simulation results are utilized to validate the correctness of the proposed analysis, and an improved scheme to optimize the effectiveness of differential protection of the system are provided, which can be further used to improve the security of aircraft.

Key words: power generation system of aircraft; differential protection; mal-operation of differential protection; DC component; current transformers

0 引言

目前波音、空客的新型飞机系列及国内外主要的军用飞机,大多都采用恒速恒频(constant speed constant frequency, CSCF)交流电源系统^[1]。恒速恒

频交流电源系统最重要的是恒速传动(constant speed drive, CSD)装置。利用恒速传动装置可将发动机变速输出转换为发电机恒速输入,并进一步驱动交流发电机输出恒频交流功率^[2-4]。恒速传动结构存在结构复杂、成本高、维护困难、能量利用率低等缺点,虽然在近几十年的发展中性能得到了很好

的提升^[5-7],但针对发电系统的故障隐患仍时常出现,严重影响飞机性能和飞行安全。

飞机上设备所需的电能大多离不开主交流发电系统。为了保证飞机可靠运行,除了需对主交流发电系统结构和系统进行优化,还需在系统安全性和保护上进行改善。为保护在区域内发生短路故障时的主交流发电机和系统馈线,需通过检测保护电路部分两侧互感器的差动电流,通过发电机控制器触发线路接触器,实现差动保护。但电流互感器(current transformers, CT)饱和、选型错误,互感器负荷不平衡等因素都会影响电流差值检测精度,并进一步影响差动保护性能^[8]。文献[9]提到长时间的直流分量、大的交流分量、混合交直流电流都易导致互感器的饱和,从而影响互感器电流检测的精度。

为了提高发电机差动保护的可靠性,有部分学者提出采用偏置技术和高阻抗技术^[10]。偏置技术即随故障电流增加,动态设置继电器值。高阻抗技术即设定继电器阻抗值为高阻抗值。因此,通过限制差动元件的电流小于继电器动作电流,在一定程度上提高了差动保护的可靠性。然而,上述方法在现代飞机领域使用中的效果不佳^[10-13]。研究表明CT具有线性区域和饱和区域^[10]。在线性区域内,CT能较准确地将一次电流转换到差值检测控制器中。但在实际飞机故障发生时,需考虑故障发生时刻与读取偏差电流及其作用于继电器时刻间存在的时间差值^[12]。为了避免在外部故障发生时差动保护误动作,文献[13]提出了一种基于大电流约束的差值判定方法,但当发生内部故障时,差动保护灵敏度较差。文献[14]对发电机差动保护中电流互感器饱和问题进行了探究。文献[15]对大容量发电机差动保护用电流互感器的选型作了分析。文献[16]分析了电厂大型发电机组中互感器检测一次和二次电流发生了相位变化的原因。文献[14-16]对电流互感器分析及差动保护研究,对飞机的发电系统保护有一定的启示,但对飞机差动保护误动原因以及存在的隐患并未作出明确的解释和分析。目前国内对外对飞机发电系统差动保护的研究并不完善,若不能提前发现供电系统的安全隐患,一旦发生事故将会造成无法挽回的后果,严重影响国内民生及飞机的发展。

下面详细描述飞机主交流发电系统及其差动保护原理,并分析了典型的短路故障及差动保护策略。

提出了3种可能会造成差动保护误动作的情形,并提出相应的改进措施。然后,通过电路方程和图形模拟证明了所提理论分析的正确性,为飞机电气系统的设计和改善整体安全性能提供了思路和保障。

1 飞机发电系统原理

目前飞机上最常用的交流发电机仍为三级式交流励磁同步发电机,其原因是该结构可对励磁进行直接控制,并能实现在发电机断开电源的瞬间移除激励信号,确保发电机内部的安全^[1-3]。

1.1 飞机三级式交流发电机结构

图1为简化的三级同步交流发电机示意图,包括副励磁机、主励磁机和主发电机。在图1所示的发电机系统中:由第1级的副励磁机产生电能,该部分的永磁铁在运动过程中产生固定电枢中所需的三相电压;进一步可通过发电机控制单元,调整交流电压后作用于第2级主励磁机部分,以产生稳定的直流磁场;永磁铁励磁级产生足够的能量在转子中形成磁场,通过对主励磁级磁场的控制调节主转子的磁场强度,即可产生恒压115 V输出。

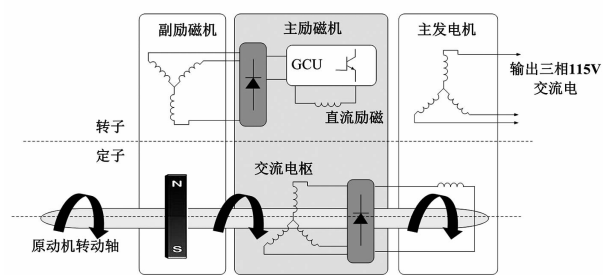


图1 三级式交流励磁同步发电机结构

发电机控制单元需保证:控制直流电压幅值,调节第3级主发电机的励磁电流;在发电机异常运行时(如过载、短路等故障),断开直流电路的电源。直流场通过第2级主励磁机运动的电枢产生三相交流电压,该交流电压随后转换为直流电压再反馈给第3级主发电机的运动的磁场电路。随原动机同步旋转的整流器再将交流电压转换为直流电压。最终可在主发电机电枢的输出端得到飞机供电系统所需求的115 V/200 V三相交流电压,该电压的频率由主发电机的极对数(p)和原动机轴的机械转速共同决定。

1.2 飞机恒速交流发电机结构

通常情况飞机的原动机为主发动机,在发动机

从空转到全功率过程中,发动机轴转动速度变化范围较大,原动机的变速特性严重影响了三级式励磁同步交流发电机性能的发挥。为了解决三级式同步交流发电机变速的问题,引入定速传动驱动装置,将发动机和三级发电机轴通过变速传动齿轮箱机械耦合^[1-5]。恒速驱动将驱动交流发电机的变速输入量转换为恒速输出量,从而消除发动机转速大范围变化对三级式发电机造成的影响。目前有不少机型的飞机采用这种改进的恒速恒频交流发电机结构,以产生稳定的 115 V/200 V、400 Hz 的三相交流电为飞机上的交流负荷供电,或通过整流器转换为直流电后为直流负载提供电能。

2 系统差动保护原理

与飞机发电机直接相连的主交流汇流条上,通常需安装接触器与线路互感器(current transformers of lines,CTL)。通过比较线路互感器采集的电流与发电机内部互感器(current transformers of generator,CTG)采集的电流的差值,用于触发保护发电机与主汇流条供电线路的差动保护^[16-20]。

2.1 差动保护基本要求

在保护区内发生馈线短路等故障时,在不影响飞机设备和其他功能前提下,差动保护的速度应越快越好。考虑实际发电机励磁控制继电器(generator control relay,GCR)和发电机控制断路器(generator control breaker,GCB)从命令发出到跳闸所需的延迟时间,以及 GCR 跳闸到励磁机励磁电流降到 0 所需的动作时间,通常需在 60 ms 内发出断开 GCR 和 GCB 的命令,确保在含额外的延迟和动作期的整段时间内,防止发生馈线短路等故障导致火灾等事

故情况。

若保护区外发生短路等故障,保护电路不应产生故障信号,此时若发电机控制器控制 GCR 和 GCB 跳闸产生保护,属于差动保护误动作,应防止该情况发生。

2.2 典型的短路故障差动保护

根据差动保护基本要求,建立如图 2 所示的含线路和发电机互感器的主交流供电电路。

假设互感器 CTG 接于发电机侧,互感器 CTL 放置于接触器与负载间、GCB 的外侧。两互感器间为保护区,包括发电机定子绕组和发电机馈电线。图 2 中两组电流互感器 CTG 与 CTL 之间的部分,为差动保护区,由 GCR 和 GCB 触发差动保护动作。

如图 2 所示,改变电流电压转换电路中电阻 R_1 和 R_2 可改变流向整流滤波电路的电压和电流。将输入的交流电通过整流滤波后,可以滤掉电流中部分谐波并转换输出直流电;最终利用电压检测电路部分,协调 R_{k1} 、 R_{k2} 和 R_{k3} 阻值,当差动值过大后将击穿二极管 DW,最终触发 GCR 故障信号放大器,断开线路解除器实现差动保护。

在飞机主交流发电系统中,通常使用电流互感器测量各相电流,即线路上 A、B、C 相各放置一个电流互感器,发电机侧 A、B、C 相也各有一个电流互感器。忽略互感器间材料差异以及线路损耗,系统正常运行时保护区内没有短路点。以 A 相为例,若 a 点没有短路电流,则流过 CTG 的原边电流 i_{ga} 和 CTL 的原边电流 i_{la} 相同,即 $i_{ga} = i_{la}$ 。忽略互感器导出误差时,互感器各副边电流为

$$\frac{1}{k_g}i_{ga} = \frac{1}{k_l}i_{la} \tag{1}$$

式中, k_l 和 k_g 为互感器变比。由于两互感器副边首

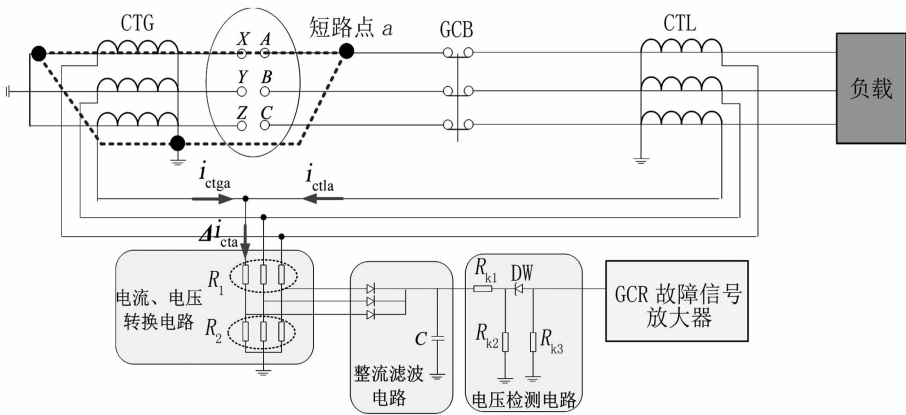


图 2 飞机主交流发电系统差动保护电路

尾相接,另一端共同接地,则此时没有电流流入电阻 R_1 和 R_2 ,即有

$$\Delta i_{cta} = \frac{1}{k_g} i_{ga} - \frac{1}{k_l} i_{la} = 0 \tag{2}$$

式中, Δi_{cta} 为流入电压电流转换电路的电流。
若 a 点短路时,将短路点 a 接地,此时流入电阻 R_1 、 R_2 的电流为

$$\Delta i_{cta} = i_{ctga} - i_{ctla} = \frac{1}{k_g} i_{ga} - \frac{1}{k_l} i_{la} = \frac{1}{k} (i_{ga} - i_{la}) \tag{3}$$

式中: i_{cta} 为流过 CTG 的二次侧电流; i_{ctla} 为流过 CTL 的二次侧电流。

因此过大的短路电流,在 R_2 上产生足够大的压降以击穿稳压管 DW。此时系统输出短路故障信号,并断开 GCR 和 GCB。保护区内任一点短路时的短路电流超过系统设定的限制电流时,发电机控制器则在短时间内会向 GCR 和 GCB 发出跳闸命令,如 B747 飞机规定,当判断短路电流达到 (20 ± 5) A 时,40 ms 内将向 GCR 和 GCB 发出跳闸命令,以达到短路保护的目的。

3 差动保护误动作

下面分析一次电流含直流分量、互感器两相误接与互感器接入方向相异对差动保护的影响。

3.1 一次侧电流含有直流分量

忽略发电机侧和线路侧的两组互感器材料差异,当飞机主交流发电系统正常运行时,根据图 4 可以写出线路侧电流互感器的一次和二次侧电流关系式为

$$\frac{L_{CTL}}{R_1} \frac{di_{La}}{dt} + i_{La} = i_{la}, \frac{1}{k_1} i_{la} - i_{La} = i_{cta} \tag{4}$$

式中: i_{la} 、 i_{La} 、 i_{cta} 分别为一次侧电流、互感器上电流与二次侧电流; L_{CTL} 、 R_1 、 k_1 分别为互感器电感值、忽略漏抗的二次绕组侧电阻、互感器一次侧和二次侧匝数之比。

由于故障发生后的一次电流可表示为^[19]

$$i_{la} = I_{la} [e^{-\frac{t}{T_1}} \cos \theta - \cos (\omega t + \theta)] \tag{5}$$

式中: I_{la} 为一次电流的幅值; T_1 为系统的一次时间常数; θ 为短路初始时 ($t=0$) 电压相角; ωt 为电流相角。

假设主交流发电系统发生的短路为馈线上常规短路,则正常电压波形过零时刻发生短路,能使得短路电流非周期分量达到最大值。即当 $\theta=0$ 时,假设

L_{CTL} 为恒定常数,互感器一次二次绕组匝数相同,联合式(4)和式(5)可以求解得到如下方程:

$$\begin{cases} i_{La} = I_{la} \frac{(L_{CTL}/R_1)}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} (e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{1}{(L_{CTL}/R_1)}}) - I_{la} \frac{1}{\omega T_1} \sin \omega t \\ i_{cta} = I_{la} \frac{T_1}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} e^{\frac{t}{(L_{CTL}/R_1)}} - I_{la} \frac{(L_{CTL}/R_1)}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} \cdot \\ e^{\frac{t}{T_1}} - I_{la} \frac{(\omega L_{CTL}/R_1)}{\sqrt{2\omega^2 L_{CTL}^2 + 2R_1^2}} \cos \omega t \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可以看出,励磁电流 i_{La} 与二次侧电流均由非周期直流分量与交流分量组成。励磁电流 i_{La} 随等式右侧第一项的直流分量增加,易导致铁心饱和,而互感器铁心饱和后将对测量带来极大的干扰和误差。二次侧电流 i_{cta} 随等式右侧第一项直流分量的引入,波形将产生畸变,若将畸变后的电流再作为差动保护的判据,易导致差动保护误操作;甚至可能在系统短路时,检测的畸变电流与发电机侧电流未达到保护设定值不触发差动保护,将烧坏馈线与发电机。

以上表明,保护区内短路产生的直流分量会影响互感器电流检测精度,影响系统差动保护性能;同样地,若负载侧发生短路且向线路侧引入了直流分量,未知的直流分量值可能造成互感器铁心饱和,最终导致互感器二次侧的电流畸变,其值严重偏离真实值会导致差动保护误动(负载侧短路应为过电流保护或负载断路器断开,而非触发主交流发电机供电线路上的差动保护)。

3.2 互感器方向反向串接

如图 3 所示,以 A 相电流为例,在互感器反向连接时,线路侧采电流波形的正半周波形,而发电机侧仍采取负半周波形。考虑互感器检测为交流电流绝对值,对于系统和设备运行正常时,反向连接时,正半波检测的最大值与负半波检测最大值相等,考虑通信延时和误差情况下,电流差值不会出现连续 6 拍均超过差动门限的情况下。

但飞机上负载种类繁多,功率范围较大,特别是大功率设备和常用设备会出现异常短路。如图 3 所示为非线性负载短路异常的一种可能情况,若电路中 A 相正半轴出现了高频率震荡的非线性电流,会在电流中产生间歇性震荡电流尖峰;而由于短路为间歇性负载短路导致负半轴影响较小。

飞机上互感器间存在差异、线路存在阻抗,发电

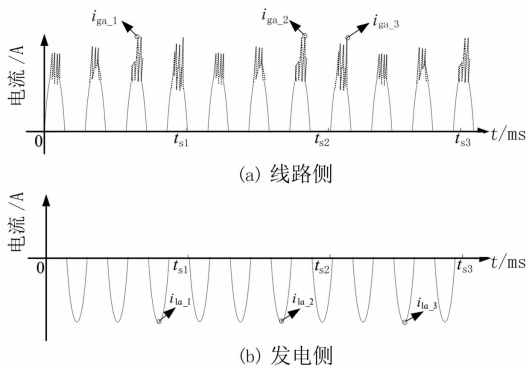


图 3 互感器方向反向串接各互感器测试电流

机和线路侧电流检测始终存在一定的差异性;而方向反接后,则很可能出现连续 6 次的差值均超过差动范围,若系统判定连续 6 个变量差值满足式(7),发电机控制器将会触发差动保护。

$$\begin{aligned} &||i_{ga-1}| - |i_{la-1}|| > i_{ctmax}, ||i_{ga-2}| - |i_{la-2}|| > i_{ctmax}, \\ &||i_{ga-3}| - |i_{la-3}|| > i_{ctmax}, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

式中, i_{ctmax} 为预设差动保护的差值上限。

由于该电流异常属于负载侧短路,而非保护区域内引起,因此系统正确执行的逻辑应为触发过电流保护或断开负载断路器,发电机触发的差动保护属于误动作,应杜绝该误动保护发生。

3.3 互感器两相误接,负载短路将引起差动误保护

飞机实际运行过程中,负载设备繁多,线路复杂,电流很可能在外界干扰下产生瞬时波动,因此若仅仅比较单次瞬时电流差值与门限值就作为差动保护判定依据并不可靠。通常,在飞机实际差动保护触发的条件为:在 20~30 个电流周期内(约 50~75 ms),由两侧互感器检测出任意一相电流差连续 6~9 次超过差动电流值,则通过发电机控制器触发线路继电器断开线路。

这里考虑判定条件为连续 25 个电流周期,单个周期为 8.5 ms,连续采样 6 次共计 51 ms,此时电流运行 20.4 个电流周期。互感器每次检测的电流值为该段时间内的电流最大值,考虑涵盖约 3.5 个正常电流的周期。因此,即使 A 相、B 相连接错误,在系统正常运行情况下,测量时间段内最大值之差也不会超过差值范围。

如图 4 所示,当负载端 A 相短路时,A 相电流近乎为 0,而 B 相仍存在电流值。此时 A、B 相差值在数值上接近 B 相的电流值,进而满足差值大于差动电流门限。

从图 4 可以看出,在持续 20.4 个电流周期后,

理论上完全满足差动要求,发电机控制器会直接触发差动保护。但实际负载短路产生大电流理应过电流或断路器断开保护,但由于差动保护时间远远高于过电流和断路器保护时间。因此此时为差动保护误动作,且在系统正常运行情况无法通过数据发现(正常情况下互感器错接,不会产生故障情况,没有故障数据无法判断互感器是否接错)。

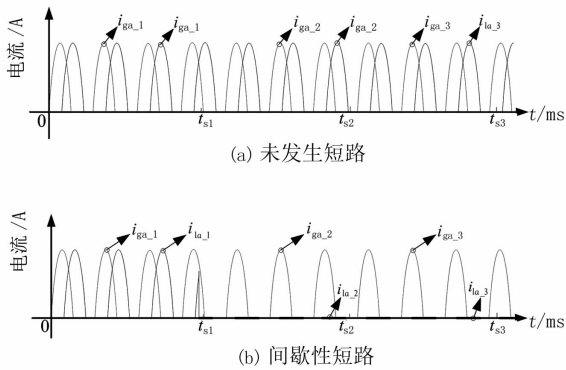


图 4 互感器两相误接时二次侧电流

因此,一次电流含直流分量、互感器两相误接与互感器接入方向相异均会对差动保护的精确度造成影响,甚至会产生差动保护误动作,严重影响飞机的安全运行。

4 仿真验证

为了验证所提理论分析的正确性,在 Matlab/Simulink 仿真平台,结合图 1 和图 2 搭建飞机交流电源系统仿真模型,进行了交流供电系统仿真。

图 5 和图 6 为负载与系统正常运行情况下,输出电压和频率仿真测试图。其中各相电压幅值为 115 V,频率为 400 Hz,满足 GJB572A-2006 飞机外部电源供电特性及一般要求的标准。

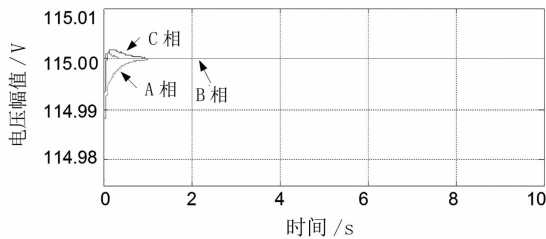


图 5 飞机正常运行时输出电压幅值波形

图 7 和图 8 为互感器相序误接且发生单相短路时电源系统输出电流和电压波形,其中线路互感器 CTL 采集 A 相电流波形,发电机端电流互感器 CTG 采集 B 相电流波形。

从图 7 可以看到在 5.985 s 时, A 相发生单相短路, 根据差动保护定义, 连续 6 个脉冲电流差值超过差动保护限值时, 差动保护动作, 主交流发电机断电, 如图 8 所示, 电压在 6.000 s 逐渐跌落至 0 V。然而, 此时系统理应作出断路保护而非断开主交流电源(因实际主交流电源端正常), 由于未正确检测出负载故障, 未断开断路器而直接进行差动保护, 属于差动保护误动作行为。

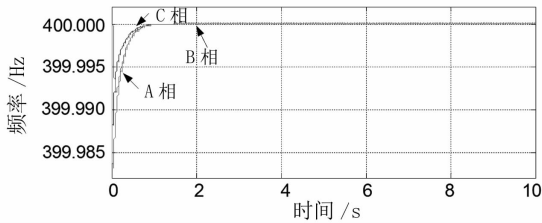


图 6 飞机正常运行时输出电压频率波形

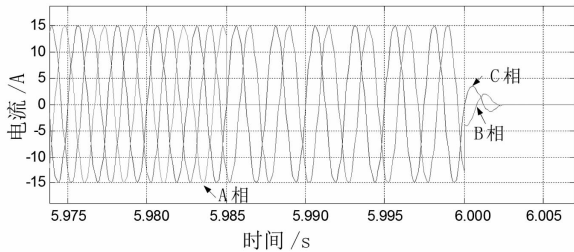


图 7 互感器相序误接且发生单相短路时输出电流波形

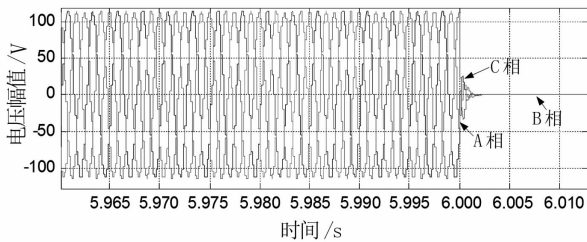


图 8 互感器相序误接且发生单相短路时输出电压波形

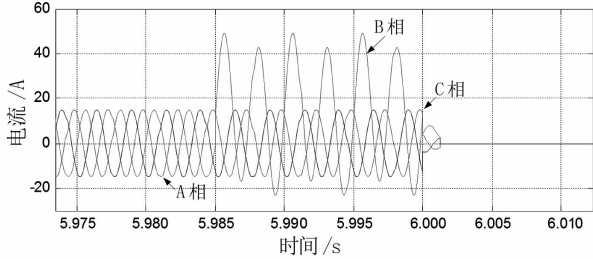


图 9 负载电流异常且互感器检测电流正负半波不同时输出电流波形

图 9 和图 10 为负载出现异常电流(不满足飞机供电兼容性)时电源系统输出的电流和电压波形, 其中线路互感器 CTL 采集 B 相正半波电流波形, 发电机端电流互感器 CTG 采集 B 相负半波电流波形。从图 9 中可以看到在 5.985 s 时, B 相正半波发生畸变, 但该畸变在负半波无法测出。同理, 在 6 次采样后差

动保护动作, 主交流发电机断电。如图 10 所示, 由于正负半波最大值大于差动门限, 电压在 6.000 s 逐渐跌落至 0 V。由于实际主交流电源端正常, 但因未正确检测出负载故障, 未断开断路器而直接进行差动保护, 属于差动保护误动作行为。

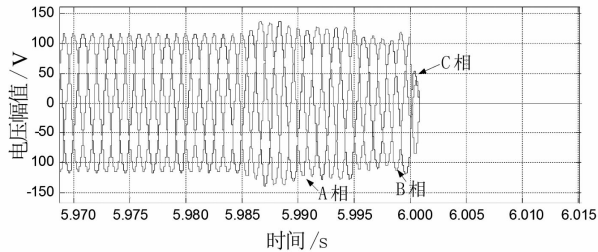


图 10 负载电流异常且互感器检测电流正负半波不同时输出电压波形

5 互感器差动保护误动作解决方案

针对前述问题, 对飞机的差动保护系统给出以下建议:

1) 使用抗直流分量互感器。当一次侧电流还有大量直流分量时, 受直流分量的影响易使测量回路的电流互感器出现偏磁饱和, 造成常规互感器测量不准。但选择抗直流分量互感器后, 由于磁心采用具有极佳线性且易激磁的非晶合金做成, 在原边通过一定直流分量时磁心不会饱和, 在一定程度上可以提高检测精度, 减少差动保护误动概率。

2) 飞机安装前, 需反复确认互感器方向, 保证线路侧和发电机侧采样的是相同半轴的波形, 即同为正半波或者负半波。目前国内外飞机大多将发电机侧互感器集成在恒速传动装置内, 可让发电机厂家严格检测互感器方向, 并给出发电机内互感器材料、规格等详细数据, 以便线路侧 CTL 能尽可能选用匹配发电机侧互感器的材料。

3) 飞机安装时, 需确认互感器各相是否连接正确。在确认发电机侧互感器的连接方向是否正确后, 再根据发电机侧互感器 CTG 的各相标识, 一一匹配接入线路侧各相互感器。最后通过人工检查、系统通电检查等保证飞机线路连接正确, 进一步保证飞机运行安全。

6 结 论

有效的差动保护能保护发电机、主交流发电馈

线及飞机供电的安全,但差动保护误动作将会严重干扰飞机的正常飞行和安全。分析了一次电流含直流量、互感器两相误接、互感器接入方向对差动保护的影响,通过理论分析和图形模拟方法对发电机特性及差动保护误动作进行了分析,并证明了以上3种情形均会造成主交流发电系统差动保护误动。通过 Matlab/Simulink 验证了所提出分析的正确性,并提供了改进方案,优化了飞机电气系统的设计,为改善飞机整体的安全性能提供了思路和保障。

参考文献

[1] 李冰洁,张晓斌,吴小华,等. 基于 Dymola 及 Modelica 语言的飞机三级发电机的建模与仿真[J]. 微电机, 2016,49(3):40-44.

[2] Rosero J A, Ortega J A, Aldabas E, et al. Moving towards A More Electric Aircraft[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 2007, 22(3):3-9.

[3] Cao W, Mecrow B C, Atkinson G J, et al. Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA)[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9):3523-3531.

[4] Sarlioglu B, Morris C T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1):54-64.

[5] Zhang H, Mollet F, Saudemont C, et al. Experimental Validation of Energy Storage System Management Strategies for A Local DC Distribution System of More Electric Aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12):3905-3916.

[6] Eid A, El-Kishky H, Abdel-Salam M, et al. On Power Quality of Variable-speed Constant-frequency Aircraft Electric Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1):55-65.

[7] El-Kishky H, Ibrahimi H, Dakka M A, et al. Modeling and Characterization of VSCF Aircraft Electric Power Systems with Nonlinear Loading[C]. 18th IEEE International Pulsed Power Conference, 2011:1482-1485.

[8] Moscoso M., Lloyd G. J., Liu K., et al. Improvements to Transformer Differential Protection — Design and Test Experience[C]. Developments in Power Systems Protection, 11th International Conference on, 2012:1-6, 23-26.

[9] Hunt R. Dimensioning CTs for Small Generator Differential Protection[C]. Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for, 2010:1-14.

[10] Zhu J, Tai N, Chen C. A Novel Differential Protection Scheme for the Generator[C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007:1-6.

[11] Protective Relays Application Guide[M]. GEC Measurements, 1985.

[12] 邵能灵, 吴宏晓, 候志俭, 等. 基于小波滤波器的单元件横差保护方案[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20):49-53.

[13] B Kasztenny, D Finney. New Algorithm for Generator Differential Protection. [C]. 2004 Eight IEE International Conference on Developments in Prey System Protection, 2004, 1:144-147.

[14] 朱琳. 变压器及发电机差动保护应用中电流互感器饱和问题探讨[J]. 科技信息:科学·教研, 2007(22):367.

[15] 白忠敏. 关于大容量发电机-变压器组差动保护用电流互感器的选型问题[J]. 电气应用, 1983(3):7-13.

[16] 陈尚发. 大型发电机电流互感器的误差研究[J]. 上海大中型电机, 2005(4):20-21.

[17] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20):44-49.

[18] 毛安澜, 王欢, 王晓琪, 等. 直流偏磁对电流互感器性能影响的研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(10):69-72.

[19] 束洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学建模及其仿真的比较研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4):11-14.

[20] 赵永福, 焦彦军, 姚进岐. 基于 EMTP-ATP 的电流互感器饱和特性仿真[C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会, 2009.

作者简介:

李红(1993), 助理工程师、硕士, 研究方向为飞机电气系统及供电保护;

邓乐武(1982), 研究员, 研究方向为飞机总体系统及飞机机载综合系统测试;

吕素(1965), 高级工程师, 研究方向为供电系统测试及系统维护;

罗强(1966), 高级工程师, 研究方向为飞机机电系统测试。

(收稿日期:2019-01-08)

电网直购电极限规模及评估指标体系研究

王正风¹, 吴旭¹, 陈实¹, 宋云亭², 陈得治², 张晨²
(1. 国网安徽省电力有限公司调度通信中心, 安徽 合肥 230061;
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:直购电规模的扩大,可能降低低谷调节能力、加剧输电断面载荷,使得不同容量机组利用小时数不均衡,增加了电网调度难度。因此需要根据发输电约束确定直购电规模,量化评估影响因素。提出了直购电规模上限的量化计算方法。根据历史负荷数据,预测电网负荷。增加大机组开机,减小小机组开机,从而量化直购电规模上限。构建评估指标体系,量化调峰能力、断面载荷、扣减系数等对直购电规模的影响。算例结合实际电网数据验证了所提模型的可行性与正确性。

关键词:直购电;评估算法;量化指标;开机方式;影响因素

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0080-06

Research on Upper Limit and Evaluation Indices of Direct Power Purchase

Wang Zhengfeng¹, Wu Xu¹, Chen Shi¹, Song Yunting², Chen Dezhi², Zhang Chen²
(1. Dispatch and Communication Center, State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, Anhui, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract:The increase of direct power purchase may reduce the regulation capability to peak/valley loads and intensify the loading of transmission sections, which yield more diverse utilization hours of the thermal units with different capacities, thus add difficulty to power dispatching. Therefore, it is necessary to decide the upper limit of direct power purchase and analyze the influencing factors. The quantitative calculation method for the upper limit of direct power purchase is proposed. Based on the historical load data, the load is forecasted. The upper limit of direct power purchase can be quantified by adjusting the thermal units with large or small capacities. The relative factors, such as the regulation capability to the peak/valley loads, transfer capability of critical transmission sections and the reduction coefficients are analyzed to derive the evaluation indices. The numerical results of a practical system verify the feasibility and accuracy of the proposed algorithm and indices.

Key words:direct power purchase; evaluation algorithm; quantitative index; unit commitment; influencing factors

0 引言

随着中国电力市场发展,继厂网分开后,在售电侧逐步引入竞争机制,在现行售电体制下增加了直购电交易,从而形成了“直购电+传统计划”的不完整市场体系^[1]。参加直购电交易,用电企业可以减少成本,增加产品竞争力,扩大生产规模;发电企业可以增加机组利用小时数和效益^[2];因此直购电对于中国电力市场改革具有积极意义。

目标电网作为直购电试点单位,在 2014 年建成

交易平台,同年直购电直接交易 5.201×10^9 kWh。随着中共中央国务院《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9 号文)发布,大用户直购电规模进一步增大,2017 年目标电网直购电规模接近 5.5×10^{10} kWh,占比在所有省级电网中最高,但也遇到了很多问题。随着直购电规模增大,不同容量机组利用小时数偏差增大,电网调峰空间降低,部分输电断面的流经功率增加,增加了电网调度工作的压力。为保证电网安全稳定运行,需要计算所能承受的直购电规模上限。

国内外针对直购电已经做了一定的研究。文献[3]

针对含大用户直购电系统,分析了直购电对电网调度以及效益的影响。文献[4]构建了大用户最优直购电合同电量模型,给出电网最优合同电量解。文献[5]在直购电准入标准之上,计算了各企业所能获得的直购电量。文献[6]提出了考虑新能源消纳的大用户直购电模型。文献[7]提出一种基于双边形态技术匹配的撮合交易模型。但上述研究成果无法量化电网所能承受的直购电规模上限。

为进一步研究直购电规模上限,需要量化电网参数对直购电规模的影响。文献[8-11]研究了直购电与电网政策、运营以及运行等的关系。文献[12]分析了直购电对可利用输电能力的影响。文献[13]量化了直购电对网损的影响。文献[14-15]建立模型,分析了直购电价变化对电厂、大用户及电网公司利润的影响。目前,尚未有量化指标分析各参数对直购电规模的影响。

下面依托目标电网网架结构与历史负荷数据,预测2018年负荷,选取典型日并确定开机方式,提出量化直购电规模上限的计算方法。针对相关影响因素,提出指标体系以量化各参数对直购电规模上限的影响。通过实际电网数据分析,验证了所提模型的可行性与正确性。

1 目标电网直购电极限规模计算

为计算直购电规模,在保证有功负荷与出力平衡的情况下,要尽可能压缩小机组(300 MW 机组)出力,提高大机组(600 MW 及以上机组)利用时间。直购电规模的上限 W_{zmax} 可以通过式(1)求取。

$$W_{zmax} = (T_{60} - T_{30})P_{N60} \tag{1}$$

式中: T_{60} 和 T_{30} 分别为大机组和小机组的利用小时数; P_{N60} 为大机组的额定容量总和。

由此可见,为了计算电网小机组的最小利用小时数,需要提前对电网进行负荷预测与典型日的选取,并针对各典型日确定机组的开机方式。

1.1 目标电网负荷预测

首先根据历史负荷数据,确定2018年夏天和冬天的最高峰负荷。假设2018年统调用电量增长比例为6%。考虑负荷预测采用的历史数据应遵循时效性原则,选取2016年9月至2017年8月的负荷数据作为预测基础。2018年各月的最大负荷由历史负荷按6%的年增长率确定。

虽然负荷有一定随机性,但年负荷曲线同期相似程度较高,因此可通过对往年负荷曲线的平移和拉伸得到2018年负荷,保留了日负荷曲线变化规律。

全年负荷预测见式(2)。

$$L^i = L_{min}^i + \frac{L_{max}^i - L_{min}^i}{L_{Hmax}^i - L_{Hmin}^i} \times (L_H^i - L_{Hmin}^i) \tag{2}$$

式中: L^i 为第*i*个月的负荷; L_{max}^i 和 L_{min}^i 分别为预测负荷的最大、最小值; L_{Hmax}^i 和 L_{Hmin}^i 为第*i*月历史负荷数据最大、最小值。

1.2 典型日选取

由于开机方式的优化及确定过程中需要对目标电网的潮流、静态安全和暂态安全进行校核,选取覆盖2018年目标电网安全稳定边界的典型日进行安全稳定校核。

典型日选取应遵循同类型日选取原则,分为工作日和节假日。从安全角度考虑,典型日选取应覆盖各月峰荷及节假日谷荷。全年按照各月不同负荷情况选取典型日,各月所选的典型日平均负荷应真实反映该时间段总体负荷水平。

1.3 火电机组开机优化

图1给出了火电机组开机方式优化及安全稳定校核时遵循算流程。

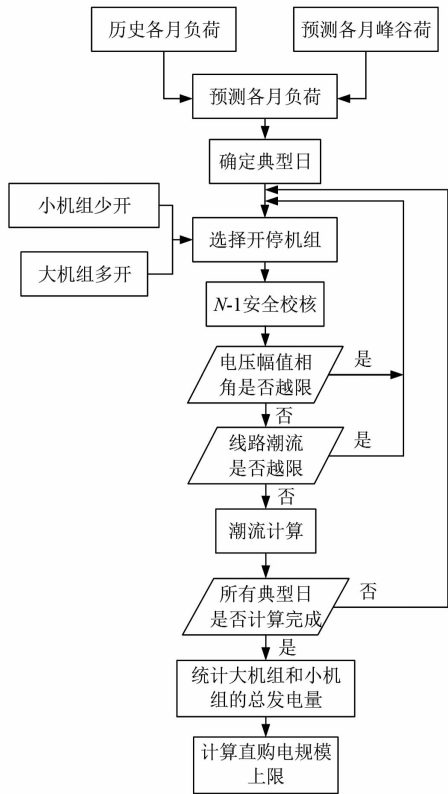


图1 开机方式优化及直购电规模计算

首先根据典型日负荷计算火电机组总输出功率,确定机组开机规模。根据2018年火电机组检修计划,在该典型日检修的机组应停机。从备用及稳定角度出发,运行中应避免电厂全停,至少保留1台开机。然后根据开机规模安排其他机组开机方式,应尽量减少300 MW机组开机,增加600 MW及以上机组开机。

优化开机方式后,对电网进行潮流、静态安全、暂态安全校核,确保该开机方式下:基础潮流无线路及主变压器过载,电压水平符合要求;静态N-1无线路及主变压器过载,电压水平符合要求;暂态N-1系统保持稳定。

典型日最大负荷通过安全校核后,再对腰荷、谷荷情况进行电网安全校核,通过后即可确定该开机方式,若不通过,根据安全校核中存在的问题重新调整开机方式后继续进行安全校核。

2 目标电网直购电指标体系

选取相关敏感参数,构建评估指标体系,为进一步研究直购电规模提供了依据。

2.1 直购电对系统调峰能力的影响

处于运行状态机组的调峰能力,理论值等于最大可能出力和最小出力间差值。随着国民经济发展和用电结构变化,各区域电网不同程度出现了峰谷差越来越大的情况,对系统调峰要求也日趋苛刻。随着交易电加入,固化了部分机组的部分甚至全部出力空间,缩小了可调出力范围,如图2所示。

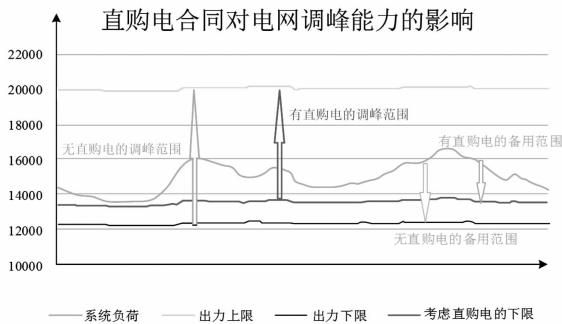


图2 直购电对电网调峰能力的影响

在计算承担直购电交易机组最低出力时,比较其所承担直购电发电负荷 P_{zi} 与其最小出力 P_{imin} 间关系,如果 $P_{zi} > P_{imin}$,则最小出力为 P_{zi} ,否则为 P_{imin} 。除了深度调峰机组外,一般取机组最小出力为额定容量的40%。

2.2 基于直购电合理分配确定单笔交易是否可行

为了扩大交易电规模,需要尽可能保证交易电在不同容量机组间的合理分配,杜绝交易电集中于大机组,造成机组发电不均衡。因此审核每笔交易时,可规定交易电量与该机组正常发电量间比值应小于当前时间点目标电网交易电量剩余量与系统总发电剩余量间比值。

$$K_i = \frac{W_{zi}}{T \sum_{j=1}^n k_j P_{Ni} t_j} < K_N = \frac{W_{zN} - W_{z1}}{W_N - W_1} \tag{6}$$

式中: W_{zi} 为机组*i*在一段时间之中签订的交易电量; P_{Ni} 为其对应的额定功率; k_j 为当前时间负荷占每一天最高峰负荷的比例; T 为交易电交易持续的时间; W_{z1} 和 W_1 为当前时间点已经发出的交易电量和总的发电量; W_{zN} 和 W_N 为预测的全年交易电量和系统总发电量。

2.3 扣减系数对各机组直购电量不均衡度的影响

每年年初,政府会下达各电厂经磋商获得的交易电量。根据各机组的扣减系数,可以得到各发电机组的年度市场电量上限。如果根据交易电计算得到的全年总电量和利用小时数太低或者太高,则认为校核不通过,需要调整个别机组的交易电量。

假设某发电机组分到的交易电量为 W_z ,则其剔除容量

$$P_T = \frac{W_z}{T_D} k_T \tag{7}$$

式中: T_D 为大用户利用小时数,一般取5800 h; k_T 为扣减系数,300 MW机组取1,600 MW机组取0.9,1000 MW机组取0.85。因此机组的计划容量 $P_J = P_N - P_T$ 。

如果机组没有分配到交易电量,则其基础利用小时数为3174 h,考虑交易电量后的计划容量,机组的基础利用小时数为

$$T_J = 3174 \times \frac{P_J}{P_N} \tag{8}$$

其基本电量为

$$W_J = T_J P_J \tag{9}$$

基本电量和交易电量之和即为该机组的全部电量。

通过对比不同扣减系数下各机组的总发电量,分析不同机组不同扣减系数对总电量的影响,从而确定最优扣减系数,防止不同容量机组之间获得电量偏差过大。

2.4 负荷增长对直购电规模上限的影响

为了探究目标电网负荷增长率对系统所能承受的直购电规模上限的影响,需要先得到不同增长比例下各时间点电网的总负荷。通过调整夏高顶峰负荷的大小,按照原有的各时间点对顶峰负荷所占比例,可以计算出各时间点的负荷。再根据各典型日所对应的负荷,重新制定开机计划。同样,应尽量减少300 MW 机组开机,增加600 MW 及以上机组开机。

获得不同负荷增长率下全年300 MW 和600 MW 机组的利用小时数,通过式(1)求得所对应的直购电规模上限。

3 计算分析

3.1 目标电网直购电规模上限

3.1.1 2018 年目标电网负荷预测

根据目标电网2016 年9 月至2017 年8 月的历史负荷数据,提取各月的高峰和低谷负荷,预测出2018 年全年目标电网各月的负荷如表1 所示。可以看出,最大负荷逐年显著增大,但低谷负荷增加幅度不显著,因此2018 年各月的最大负荷按照增长率6% 计算。预测的2018 年每小时的全年统调负荷曲线如图3 所示。

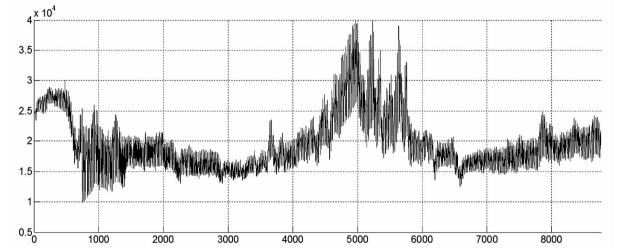


图3 目标电网统调负荷曲线

3.1.2 典型日的选取

按照2.2 节中所提典型日的选取办法,得到2018 年目标电网的典型日如表2 所示。

3.1.3 直购电规模上限

在满足电网安全稳定运行、迎峰度夏度冬及供热需求等约束下,2018 年目标电网300 MW 火电机组的年最低利用小时数为3228 h(对应发电量 3.13×10^{10} kWh,此时的600 MW 及以上火电机组的最大利用小时数为5092 h(对应发电量 1.166×10^{11} kWh)。2018 年目标电网统调用电量为 1.741×10^{11} kWh,吉泉直流送入电量为 4.0×10^9 kWh,具有参与市场交易资格的统调火电机组(不计自备电厂)发电总量为1.479

$\times 10^{11}$ kWh。

表1 目标电网统调负荷 单位:MW

月份		2016 年	2017 年	2018 年	增长率
1 月	峰荷		24 630	30 000	指定冬高
	谷荷		9882	9900	
2 月	峰荷		24 680	26 200	1.06
	谷荷		11 960	12 000	
3 月	峰荷		20 690	22 000	1.06
	谷荷		15 040	15 000	
4 月	峰荷		19 250	20 400	1.06
	谷荷		13 140	14 200	
4 月	峰荷		20 920	22 200	1.06
	谷荷		12 770	14 200	
6 月	峰荷		22 520	23 900	1.06
	谷荷		14 260	14 500	
7 月	峰荷		36 220	40 000	指定夏高
	谷荷		15 430	16 000	
8 月	峰荷		32 650	40 000	指定夏高
	谷荷		15 610	16 000	
9 月	峰荷	20 790		23 400	1.06×1.06
	谷荷	13 240		14 000	
10 月	峰荷	18 950		21 300	1.06×1.06
	谷荷	12 020		13 000	
11 月	峰荷	23 680		26 600	1.06×1.06
	谷荷	14 310		15 000	
12 月	峰荷	24 000		27 000	1.06×1.06
	谷荷	15 270		16 000	

若300 MW 及以下机组最低利用小时数为3228 h (年发电量 3.13×10^{10} kWh),600 MW 及以上大机组满足电网正常运行的最低利用小时数也取300 MW 机组的计算值3228 h(年发电量 7.39×10^{10} kWh),则利用统调用电量减去满足电网正常运行的最低发电量,可得2018 年目标电网大用户直购电交易规模上限为 4.27×10^{10} kWh。

3.2 目标电网直购电指标研究

3.2.1 直购电对电网调峰能力的影响分析

图4 给出了目标电网每天处于运行状态下机组的最大最小出力,图5 给出有无直购电情况下的系统调峰能力。在夏高和冬高时期,交易电将导致系

统调峰能力的下降。

表 2 目标电网典型日		单位:MW		
类型	日期	最大负荷	谷荷	腰荷
春节	2018-1-28	17 210	10 900	13 340
清明节	2018-4-4	18 170	14 690	16 040
劳动节	2018-5-1	17 540	14 500	15 680
中秋节	2018-9-15	18 440	15 420	16 630
国庆节	2018-10-1	17 470	14 510	15 500
月最大 负荷 典型日	2018-1-20	26 200	16 520	20 760
	2018-2-8	30 000	16 190	23 840
	2018-3-13	22 000	15 000	18 820
	2018-4-10	20 400	15 390	18 100
	2018-5-28	20 710	16 500	18 170
	2018-6-29	23 900	18 350	20 830
	2018-7-26	40 000	26 960	33 530
	2018-8-6	40 000	24 450	30 780
	2018-9-2	23 400	17 470	20 950
	2018-10-29	21 300	15 530	18 090
工作 典型日	2018-11-24	26 600	18 020	22 260
	2018-12-27	27 000	17 420	22 330
	2018-2-16	22 280	15 500	18 730
	2018-6-9	21 060	16 040	18 500
	2018-7-5	26 420	19 050	22 580
	2018-7-13	30 720	21 790	25 640
	2018-7-30	30 450	23 180	26 630
	2018-8-15	27 200	18 700	22 480
	2018-9-20	20 600	16 690	18 420
	2018-11-1	21 300	15 000	17 870

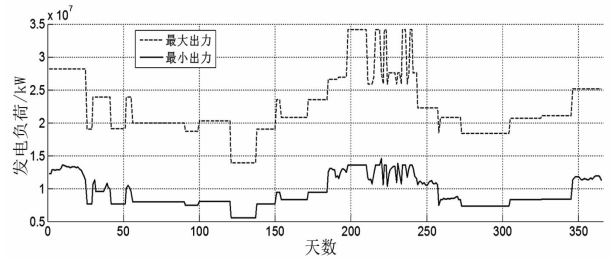


图 4 机组每天最大最小出力

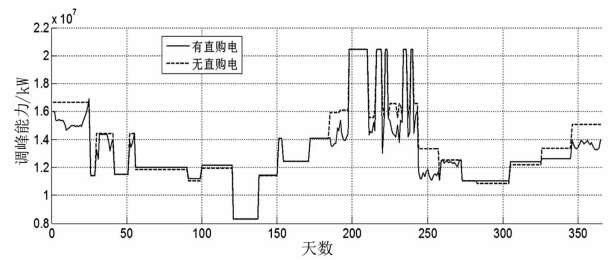


图 5 直购电对系统调峰能力的影响

3.2.2 确定单笔交易是否可行

假设某电厂签订了一份在 2 月份的 1.0×10^8 kWh 的交易电量,在此时间点,剩余的交易电量假设为 4.2×10^{10} kWh,根据 1 月份的发电预测,剩余的总发电量为 $1.434\,31 \times 10^{11}$ kWh,因此 $K_N = 0.293$,根据式(6)可以计算出 $K = 0.178\,1$ 大于 $0.5K_N$,所以满足直购电的合理分配。

3.2.3 扣减系数对机组分配电量的影响分析

对于单台机组,改变其扣减系数,其交易电量对应的利用小时数见图 6。无论是 300 MW、600 MW 还是 1000 MW 机组,当其扣减系数增加后,其全部电量的利用小时数随之减小。因此为了控制不同容量机组间所分配电量不平衡度,可以考虑增加大容量机组扣减系数、减小小容量机组的系数。

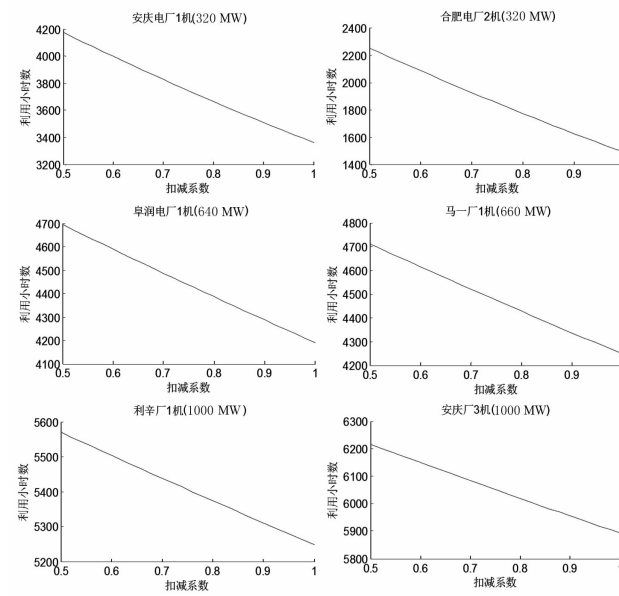


图 6 机组利用小时数随扣减系数的变化

3.2.4 负荷增长对直购电规模的影响分析

调整夏高顶峰负荷,得到各负荷增长率下电网 300 MW 机组和 600 MW 机组利用小时数如表 3 所示,对应的直购电规模上限如图 7 所示。可以看出,当 2018 年目标电网负荷增长率逐渐增加时,系统的整体交易电量上限趋于稳定,大约为 5.27×10^{10} kWh。对于 300 MW 和 600 MW 机组的利用小时数,二者增长幅度基本一致。

4 结 语

结合目标电网网架结构和历史负荷数据,预测 2018 年负荷,确定开机方式,计算直购电规模上限。

表 3 不同负荷增长率对应的各机组利用小时数

负荷增长比例	T_{300}/h	T_{600}/h
1.02	2382	4706
1.03	2411	4768
1.04	2413	4864
1.05	2489	5027
1.06	2548	5190
1.07	2618	5305
1.08	2642	5348
1.09	2664	5394
1.10	2690	5452
1.11	2796	5527
1.12	2845	5637
1.13	2917	5736
1.14	3025	5826
1.15	3064	5890
1.16	3088	5993

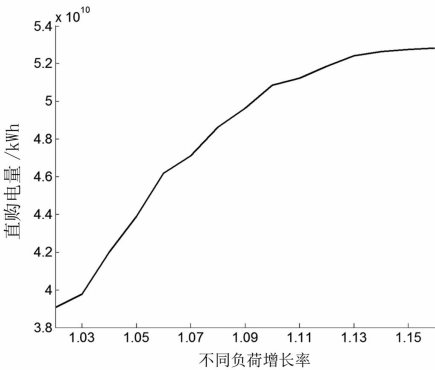


图 7 不同负荷增长比例对应直购电规模上限

对敏感参数构建指标体系,量化各参数对交易电规模的影响,得出以下结论:

- 1)由于市场作用,直购电逐渐向大机组倾斜,在量化电网所能承受直购电规模上限时,可以在确定开机方式时尽量多开 600 MW 及以上机组。按照年负荷增长率为 6% 计算,目标电网 2018 年所能承受的直购电规模上限为 4.27×10^{10} kWh。
- 2)直购电会固化机组的一部分调峰能力,对比有无直购电下目标电网的调峰能力,可以看出,在夏高和冬高时,直购电导致系统调峰能力下降。
- 3)随着扣减系数增加,机组全部电量利用小时数随之减小。为了保证不同容量机组电量的不均衡度较小,考虑增加大机组的扣减系数,同时减少小机组的扣减系数。
- 4)当目标电网负荷增长率逐渐增加时,系统的整

体交易电量上限,趋于稳定,大约为 5.27×10^{10} kWh。对于 300 MW 和 600 MW 机组的利用小时数,二者增长幅度基本一致。

参考文献

[1] 陈皓勇,张森林,张尧. 电力市场中大用户直购电交易模式及算法研究[J]. 电网技术,2008,32(21):85-90.

[2] 何永秀,黄文杰,赵晓丽,等. 大用户直购电辅助服务成本分摊机制[J]. 华北电力大学学报,2004,31(4):70-74.

[3] 张文韬,王秀丽,吴雄,等. 大规模风电接入下含大用户直购电的电力系统调度模型研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):2927-2935.

[4] 郭兴磊,张宗益,亢娅丽,等. 基于 CVaR 模型的大用户直购电决策分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(18):32-37.

[5] 王雁凌,孙健,李艳君. 大用户直购电量模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):1-5.

[6] 张小东,杨廷天,任景,等. 考虑新能源消纳的大用户直购电机制及其在西北电网的应用[J]. 电力建设,2017,38(1):138-143.

[7] 胥威汀,刘俊勇,刘友波,等. 直购电交易下的双边形态技术匹配模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):52-56.

[8] 刘春辉,刘敏. 电力市场环境下考虑大用户直购电的电网公司风险管理研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):94-101.

[9] 刘春辉,林品扬,欧家祥,等. 大用户直购电环境下电网公司的风险管理[J]. 电网与清洁能源,2009,25(10):51-55.

[10] 关勇,王绵斌,谭忠富,等. 基于区间法下的大用户直购电风险度量模型[J]. 华东电力,2009,37(3):365-369.

[11] 张宗益,亢娅丽,郭兴磊. 基于谱风险度量的大用户直购电组合模型分析[J]. 电工技术学报,2013,28(1):266-270.

[12] 林照航,李华强,王羽佳,等. 基于可利用传输能力与保险理论的大用户直购电决策[J]. 电网技术,2016,40(5):1564-1569.

[13] 刁强,鲍海,王俊梅,等. 大用户直购电中的网损分摊问题[J]. 电网技术,2007,31(s2):236-237.

[14] 王鹏,吴素华,戴俊良,等. 基于激励相容原理的大用户直购电模型与机制研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):91-96.

[15] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽. 基于随机生产模拟的直购电交易成本效益分析[J]. 电网技术,2016,40(11):3287-3292.

(收稿日期:2019-03-04)

印尼电力能源建设投资环境 PEST 分析

李 洁

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:中国“21 世纪海上丝绸之路”和印尼“全球海洋支点”的发展战略高度契合,而印尼旺盛的能源需求和落后的基础设施状况给中资企业投资印尼能源建设带来了新一轮的机遇和风险。根据 PEST 模型对印尼电力能建投资市场外部宏观环境的分析结果,提出应对策略,有利于中资企业投资活动的持续开展。

关键词:印度尼西亚;投资环境;PEST 分析模型

中图分类号:F125 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2019)02-0086-05

PEST Analysis on Investment Environment of Indonesia Power Energy Construction

Li Jie

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:The development strategy of "21st Century Maritime Silk Road" in China and "Global Maritime Axis" in Indonesia are closely matched, and the booming energy demand and the poor infrastructure in Indonesia have brought a new round of opportunities for Chinese investment enterprises. According to the analysis results of macroscopic environment of Indonesia power energy construction investment market based on PEST model, the proposed strategies would be advantageous to guide the Chinese enterprises to invest the power energy construction market in Indonesia.

Key words:Indonesia;investment environment;PEST analysis model

0 引 言

印度尼西亚共和国(以下简称印尼)国土面积为 1 913 578.68 km²,人口 2.58 亿,是仅次于中国、印度、美国的世界第四人口大国。印尼与巴布亚新几内亚、东帝汶和马来西亚等国家相接,由约 17 508 个岛屿组成,是马来群岛的一部分,也是全世界最大的群岛国家,疆域横跨亚洲及大洋洲,也是多火山多地震的国家,面积较大的岛屿有加里曼丹岛、苏门答腊岛、伊里安岛、苏拉威西岛和爪哇岛。印尼有 100 个民族,其中爪哇族人口占 45%,巽他族 14%,马都拉族 7.5%,马来族 7.5%,其他 26%。印尼是东盟创立国之一,不仅是东南亚最大的经济体,更是 20 国集团成员国^[1]。印尼自公元 7 世纪起便是重要的贸易区,有着丰盛的石油资源,现今也是东南亚地区

最大的能源生产及消费国。印尼作为备受瞩目的新兴发展中国家有着旺盛的能源需求,而其落后的基础设施状况也给印尼能源建设市场培育了肥沃的土壤^[2]。随着“一带一路”政策的不断推进,印尼这个“海上丝绸之路”的重要枢纽也发掘出了更多的潜力。

PEST 分析模型即宏观环境分析模型,针对研究对象从 4 个关键方面进行分析:P 指政治环境(political factors);E 指经济环境(economic factors);S 指社会文化环境(social and cultural factors);T 指技术环境(technological Factors)。通过运用 PEST 分析模型对印尼电力能源投资市场的外部宏观环境进行分析,有利于中资企业运用有限的资源积极应对外部环境的状况并把握变化趋势;有利于中资企业在进入市场和长期生存发展中选择应对策略,及早规避环境可能带来的风险威胁,最大程度获得投资回报。

1 PEST 分析

1.1 政治环境

1) 印尼国家政策

印尼自 2014 年底佐科政府掌权以来发布了一系列促进生产、刺激经济的政策措施,其中《印尼政府 2015—2019 年中期改革日程和经济发展规划》就包含了新增电力装机容量 35 000 MW。规划中燃煤电站装机容量占比 55.92%,燃气和联合循环电站占比 37.30%,其他类型占 6.72%。电站项目总计规划 109 个,其中约 70% 的份额计划由 IPP(独立电力生产商)投资建设,总装机 25 904 MW,项目数 74 个,余下部分由 PLN(印尼国家电力公司)自己投资建设,另外还配套规划建设输电线路约 46 000 km。截至 2017 年,“35 000 MW 电力规划”已完成容量占比 47%,剩余份额预计到 2024 年可全部完成。而截至 2018 年,印尼电气化率已达到 98.3%,预计 2019 年将实现全面电气化的目标。

佐科政府对印尼能源产业发展十分看重,除了“35 000 MW 电力规划”之外,其还在爪哇岛之外设立了多个经济特区,以促进其他地区的经济发展,其中 2017 年于苏门答腊岛亚齐省设立的阿伦洛司马威经济特区就突出了能源加工业务。另外,印尼政府按照国家总体规划和各地区资源分布特点制定了重点发展六大“区域综合经济走廊”政策,其中苏门答腊走廊—能源储备、自然资源生产与处理中心和加里曼丹走廊—矿业和能源储备生产与加工中心,这两大经济走廊都着重发展能源矿务产业,充分体现了能源行业对印尼经济发展的重要性。

2) 与中国的政策合作

中资企业在印尼能源市场上耕耘已久,自 20 世纪 70 年代中国与印尼外交关系恢复后,两国之间能源合作规模逐步扩大,而近年来随着中国“走出去”和“一带一路”倡议的提出,更为很多中资企业进军印尼市场提供了强大的政策支持。2017 年第五届中—印尼能源论坛签署的《中华人民共和国国家能源局与印度尼西亚能源矿产部关于能源合作的谅解备忘录》,更突显了两国能源领域合作的进一步加强。另外,由于印尼政府财政和其国有银行的资金限制,且佐科政府不再愿意提供担保,这为中资金融

机构参与能源项目信贷业务提供了新的机遇,也为中资企业占领能源投资市场带来机会。

3) 印尼政策变动风险

国家政策法规的战略性、稳定性是保证国家经济保持增长的重要支撑,而印尼国家政策法规相对变动频繁,部分国家政策与地方政策有冲突和矛盾之处,这必然会动摇或打击投资商的热情和信心。例如 2014 年印尼出台原矿石出口禁令,禁止出口一切原矿,并不断上调金属精矿出口关税。这一政策出台迫使矿产投资商必须在印尼当地建设精炼加工厂,但由于受制于落后的基础设施水平,矿产投资商需要耗费巨大的资金进行投入,极大影响了企业收益,因而很多企业选择了减产或者暂停部分业务。

4) 腐败问题严重

根据国际从事反腐败研究的非政府组织“透明国际”发布的 2018 年全球清廉指数,印尼的得分从 2017 年的 37 分上升至 38 分,腐败情况已有所改善,但从全球来看印尼依然是腐败问题最严重的国家之一。自苏哈托政府开始,腐败问题逐步在印尼的立法、司法、行政各个机构蔓延,虽然过去几十年印尼的民主化进程在不断推进,但腐败成风已经渗透到印尼官僚系统的各个层面,涉及政治家族、军人集团以及政府部门等多方势力,这无疑会威胁到印尼的社会政治稳定^[3]。而中资企业在印尼开展投资活动也常疲于应付其相关行政机构和垄断企业官僚的行事作风、频繁的索贿行为、低下的工作效率和轻视的服务态度,这也必将影响到中资企业在印尼投资的积极性^[4]。

1.2 经济环境

1) 印尼国家经济形式总体向好

印尼对基础设施建设的大力支持和对能源矿务建设的加重力度是推动其经济快速发展的重要动力。根据世界银行对印尼 2019 年的经济发展发出的预估增长率,世行认为印尼 2018 年的经济增长率约达 5.2%。据印尼经济统筹部的数据显示,2018 年印尼国家收支预算案的落实将超出原定的全年指标,截至 2018 年年底的其国家收入预计为 1936 万亿盾,或超过 2018 年国家收支预算案列定的 1894 万亿盾指标,这是印尼国家收入首次超过国家收支预算案所制定的指标。而从印尼能矿部电力总司设定的电力投资指标来看,2019 年设定投资额为 120.4

亿美元(包括 PLN 和 IPP 等投资),虽较去年实际投资额 122 亿美元略低,但投资数额依然可观,电力能源建设在印尼经济发展中仍处于重要地位。

2) 电力市场需求潜力大

印尼是东南亚第一人口大国,每年人口增长率高达 1.06%,其中一半以上的人口居住在城市。但从印尼国家建设部的数据来看,目前印尼人均电力消费还处于较低水平,低于邻国马来西亚,仅为马来西亚的 1/4。2017 年印尼人均电力消费 1012 kWh,而邻国马来西亚 2016 年已达到 4460 kWh。均衡电力供应依然是印尼电力发展的主旋律,尤其是针对偏远地区。

截至 2015 年年底,印尼全国电力装机容量总计 45 587 MW,其中 PLN 约占 86%,IPP 约占 14%。而根据 RUPTL 2018—2027 的统计,截至 2017 年年底,印尼全国电力装机容量达到 54 557.9 MW;预估到 2020 年印尼电力总装机容量将达到 73 151.9 MW。从地域分布上看,印尼地区之间的电力发展极不平衡,爪哇岛约占全国装机容量的 74.2%,苏门答腊岛约占 16.7%,其余地区约占 9.1%^[5]。从供需关系上看,印尼大部分地区都存在供不应求的状况,除苏拉威西岛的装机容量基本满足当地负荷需求外,其余地区均处于电力紧缺状态。从配套设施上看,因受制于客观地理环境,印尼还未形成统一的电网系统,除了全国最大的电网爪哇—巴厘—马都拉电网以及加速建设中的苏门答腊岛电网外,印尼其他地区基本都是小型电网或是电站孤立辐射周边供电,整体电网系统都比较落后。而“35 000 MW 电站项目”的 46 831 km 配套电网,截至 2017 年已完成建设并投入使用的电网达 6819 km,占比仅 15%,待建余量依然很大。

3) 印尼新能源发展势头良好

积极开发绿色低碳的清洁能源已是全球化的趋势,印尼作为东南亚的能源大国也必将顺应全球能源行业的发展。印尼有着丰富的地热能、太阳能、风能等清洁能源资源储备,作为全球第一大地热能储藏国,地热发电是其可再生能源发展的重要领域。2017 年印尼可再生能源发电在国家电力供应中占 12.62%,比年初既定目标将近翻了一番。2017 年印尼地热发电在国家整体供电结构中占了 5%,其中地热能发电量较 2016 年增长了 8.48%,风能、

潮汐能等发电量占 0.25%^[6]。根据 PLN 在 2016 年发布的 10 年期 2016—2025 电力发展规划(RUPTL),印尼计划自 2016 年起 10 年内新增装机 80 538 MW,其中新能源发电份额占 25% 左右。除了优先保证新能源项目建设的政策支持,印尼政府还积极采取措施鼓励本国和外国投资方加大力度联合开发印尼可再生能源市场,如适度降低地热能开发技术门槛、放宽间接投资的管制、税收减免等。印尼能矿部还表示,合理的电价与适度的补贴是可再生能源发电发展的核心,也是私营部门投资该领域的主要驱动因素。另外,印尼政府还积极从立法层面对新能源发电强化保障。印尼国会正积极呼吁尽快出台除《国家能源法》和《国家能源政策条例》外能更好指导可再生能源发电的法案,以促进新能源产业的优质发展。

4) 印尼盾汇率变动风险

能源建设项目通常有着建设周期长、投资时间长、投资金额大的特点,例如印尼火电机组建设周期通常都在 33 个月以上。对于中资企业投资印尼,必须充分并及时了解其兑汇政策、通胀变化、外汇储备等情况,以做出投资回报预测和判断。近年来印尼盾持续走低,2018 年 9 月印尼央行的数据显示,印尼盾对美元汇率再次下跌,收盘报 1 美元兑 14 927 印尼盾,接近 1998 年以来的最低水平。虽然印尼已采取包括加息、买入印尼盾国债等多项措施稳定本币汇率、遏制印尼盾进一步贬值,但总的来说这些举措收效甚微。

1.3 社会文化环境

1) 社会结构

印尼是东南亚人口最多的国家,也是一个“多民族、多宗教、多党派、多种族、多元文化”并存的复杂社会。1997 年亚洲金融危机爆发之后,印尼开始了向民主化的转型过程,而经过 20 多年、前后 7 次全国大选的更迭,印尼已形成比较稳定的政权和社会结构。虽然每次大选之前都会出现来自多方力量的干扰和阻挠,但是长期来看印尼的社会环境仍处于一个稳步发展的状况,有利于稳定投资商的信心。

2) 对华态度

中资企业对印尼能源投资要注意对华态度和策略的变动。从印尼政府和中国政府 1950 年建交到 1965 年“9·30”事件再到佐科政府推行积极的两国

多领域合作政策,印尼对华政策的制定和执行是一个波动且复杂的过程,而印尼日益上升的民族主义对中资企业在印尼的投资活动也产生一定的消极影响,甚至埋下安全隐患。印尼民众对华的消极情绪由来已久,不论是社会精英还是普通民众,都有受到负面舆论的长期影响^[7]。相对于美、日在印尼市场上的长期且未间断的耕耘,中资公司进入印尼投资市场的时间较短。一方面印尼民众对中资公司的产品和服务认同度相对较低;另一方面中资公司在开展投资、建设相关活动时,对当地文化和社会环境的理解和处理不当,也会引起当地民众的反感情绪。

3) 社会安全

东南亚是全球受到恐怖袭击最多的地区,印尼作为东南亚人口最多的国家,一直受到恐怖主义、宗教冲突、分裂主义的冲击^[8]。虽然印尼政府做了一系列的努力,但其境内一些偏激的组织一直试图在政治、经济、社会各方面不断激化矛盾,引起社会动荡^[9]。从 2002 年的巴厘岛炸弹袭击到 2009 年的万豪酒店爆炸事件再到 2016 年的雅加达自杀式袭击,印尼的恐怖主义势力一直在蔓延并且难以在短时间内消灭,这一问题势必影响中资企业的投资热情和积极性。

1.4 技术环境

印尼工业制造产业相对比较落后,并不能适应电力能源建设需求的高速发展,因此印尼大型电力成套设备都需进口,而能建市场上专业技术人员的稀缺也迫使印尼逐渐开放电力能源建设市场,通过国际招标的方式引入外商投资,以此降低建设成本,加快项目建设进度。印尼通过设立审查验收机构的方式确保电力项目的安全落地,从对项目参与方资质、标准、业绩等方面准入检验,到 PLN 对项目图纸的审查验收,再到产品鉴定机构 LS-Pro 对电力设备和仪器的鉴定,印尼以一系列的技术标准和要求对电力能源建设投资项目进行控制和管理。而中资企业通过 EPC 总承包和 IPP 的方式越来越多地进入到印尼电力能建市场,目前超过 80% 的装机已由中资企业供应和建设。中资企业在技术标准、施工标准、成本控制各方面充分发挥优势,在目前的电力能源建设项目中,在满足印尼当地标准及规范要求的情况下,中国标准和规范基本都可作为项目可接受的标准和规范之一使用,对中资企业而言,投资印

尼电力能源建设市场基本不存在技术壁垒。经过 20 多年的耕耘,中资企业以优质的技术方案和合理的价格赢得了可观的市场份额,并且多年来电站项目的良好运行也为中资企业在电力建设市场上树立了良好的口碑。

2 应对策略

从对印尼电力能源建设市场宏观环境的分析来看,机遇与风险的并存将是一个长期状况,中资企业开展投资活动可以从以下几个方面入手把握机遇,应对风险。

2.1 正确看待市场环境

电力能源投资涉及政治、经济、社会方方面面的问题,中资企业进行项目投资前要对宏观环境、已出台的行业计划和现行政策和法令条列进行充分研究、解读和评估,选择政策稳定、法律健全、社会稳定的地区和业务板块进行投资。要重点关注“21 世纪海上丝绸之路”和印尼“全球海洋支点”发展战略契合对接的项目,充分运用政策支持以发挥优势,利用丝路基金和亚洲基础设施投资银行强大的融资平台充实实力^[10]。

2.2 做好项目调研分析

印尼电力能源建设市场存在一定的不确定性,项目投资信息可能通过多种渠道、多种方式获得,信息内容全面程度和时效性都会在信息传递过程中大打折扣,因此项目调研评估是影响投资成败的关键。中资企业必须对项目本身的现场条件、物质供应、自然资源、文化风俗、人力成本、原料成本等进行充分调研和评估。

2.3 分时、分步做好投保工作

中资企业进行海外投资可能涉及到外汇限制、战争内乱、政策变动等方方面面的风险,根据项目情况和进展程度分时、分步做好投保工作是转移风险的有效方式。尤其在佐科政府不再愿意提供担保后,对印尼能建项目进行投资必须对保险公司的选择、保险期限、保险范围、保险金额、保费缴纳、赔付条款等内容进行充分深入的研究,同时在确保满足权益的情况下尽量降低投保成本。目前中国出口信用保险公司基本处于中资企业投资印尼投保选择的垄断地位。

基于 AHP – FCM 的热电联产投资风险评估

邱金鹏

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:热电联产集中供热是一种公认的节能环保技术,近年来,该技术得到迅速发展,其也是未来发展的主要方向。构建了包括自然风险、社会风险、政治风险、经济风险、技术风险、其他风险这6个指标的一级指标体系,并形成了包括18个指标的二级指标体系。采用层次分析法计算评价的权重集,结合模糊综合评价模型对投资风险进行评估。实例表明,所建立的指标体系与 AHP – FCM 模型可操作性强、效果较好。

关键词:热电联产;投资;风险;AHP;FCM

中图分类号:TK11⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 – 6954(2019)02 – 0091 – 04

Investment Risk Assessment of Co – generation Based on AHP – FCM

Qiu Jinpeng

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Central heating of co – generation is a kind of recognized energy saving and environmental protection technology. In recent years, this technology has been developed rapidly, and it is also the main direction of future development. A primary index system including 6 indicators, that is, natural risk, social risk, political risk, economic risk, technical risk and other risks, is constructed, and the two level index system including 18 indicators is established. The analytic hierarchy process is used to calculate the weight of the evaluation, and combining with the fuzzy comprehensive evaluation model, the investment risk is evaluated. Examples show that the established index system and the AHP – FCM model can be operated and have a good effect.

Key words: co – generation; investment; risk; AHP; FCM

0 引言

相比于传统的热电分产能源供应模式,热电联产能节省大量的燃煤消耗,目前中国北方也主要采用该模式进行集中供热。该技术是一种趋于分布式的能源供应系统,在发达国家已有20多年的发展历史。其具有节约能源效果明显,保护环境作用突出,节约用地提高效益,煤种适应性更强,电力供给的安全性和可靠性增强等优点^[1]。

综上优势,热电联产供能模式在近几年得到了大力发展。但实际工程面临的各种不确定风险常常导致高额的建设资本投入,对热电联产投资进行风险评估以便做出更好的投资决策对电厂管理者具有现实的指导意义。

1 热电联产投资风险评估指标体系

大型工程项目中,工程建设往往存在着造价高、建设时间长、影响条件多的特点,而在电力工程中,这些特点同样存在。并且在建设过程中,需要建设单位、设计单位、施工单位等相关部门合作,任何一个参与方或者外部条件因素的变化都会对工程建设带来一定的风险和影响^[2],因此,对热电联产投资风险应该从多方面、全方位进行分析,力求做到客观全面。

1) 自然风险。自然环境对于每一项工程来说都是未知的,并且所带来的风险破坏也是无法计量的^[3],例如台风、地震、滑坡、泥石流等。因此工程选址至关重要,好的站址能避免很多自然环境所带

来的风险,并且能节约资源、控制成本。

2) 政治风险。工程建设期间,宏观政策以及相关法律法规的调整同样对项目的建设起到关键作用。针对电力工程,发改委以及能源局相关政策文件将直接影响工程的建设。

3) 社会风险。电厂所处的地理位置、经济水平以及区域内社会发展水平也直接影响工程建设情况。例如,区域内能源需求饱和、社会发展缓慢、对电力需求较小等情况直接影响工程运行的效益风险。

4) 技术风险。设计单位出具的设计方案、组织方案等都会带来一定的技术风险,而项目部管理人员对工程进度的把控、对物资采购的管理等对工程质量也都有较大的影响^[4]。

5) 经济风险。外部经济汇率变化、银行贷款政策、工程融资以及使用计划都直接影响工程建设进度。

6) 其他风险。其他风险主要包括管理人员水平、合同风险、项目控制风险等。

基于前面对该热电联产技术改造投资风险因素的分析,建立了适用于热电联产的投资风险指标体系。在实际工程中,不同阶段的风险是不完全相同的,并且是动态变化的^[5-8],因此选取了主要的风险因素,根据上述的构建原则,进行了科学的归纳概括,所建立的热电联产投资风险指标体系见表1所示。

表 1 热电联产投资风险指标体系

目标层	准则层	指标层
热电联产 投资风险 A	自然风险 B1	煤炭资源风险 C11
		水资源风险 C12
		其他不可抗风险 C13
	社会风险 B2	市场竞争激烈 C21
		社会需求前景 C22
	政治风险 B3	法规变更风险 C31
		行政性风险 C32
	经济风险 B4	利率变化风险 C41
		汇率变化风险 C42
		物价、人工成本上涨 C43
		财务风险 C44
	技术风险 B5	施工方案的变化 C51
		质量等级的要求 C52
		设计质量 C53
		技术的复杂程度 C54
	其他风险 B6	管理人员水平 C61
		合同风险 C62
		项目控制风险 C63

2 AHP – FCM 风险评估模型

模糊综合评价的原理是通过评价指标的隶属度进行计算,以此量化处理后得到的权重集经模糊变换得到最终的综合评价得分^[9]。

该评价模型包括了以下几个主要步骤:

1) 确定评价指标

p 个评价指标: $u = \{u_1, u_2, \cdots, u_p\}$

2) 确定评语等级

确定等级集合: $v = \{v_1, v_2, \cdots, v_p\}$, 其中每一个评语等级都可对应一个模糊子集。

3) 构建模糊关系矩阵 R

在确定等级集合后,需要针对因素 u_i ($i = 1, 2, \cdots, p$) 将评价事物进行量化计算隶属度 $(R|u_i)$, 模糊关系矩阵 R 则为

$$R = \begin{bmatrix} R|u_1 \\ R|u_2 \\ \cdots \\ R|u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & r_{ij} & \cdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m} \tag{1}$$

式中, r_{ij} 为因素 u_i 相对模糊子集中的 v_j 等级的隶属度。

4) 计算权向量

综合评价理论中最关键的步骤即是权重计算。设权向量 $A = (a_1, a_2, \cdots, a_i, \cdots, a_p)$, 式中元素 a_i 为因素 u_i 对模糊子集的隶属度。并且有 $\sum_{i=1}^p a_i = 1, a_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots, p$ 。

5) 综合评价得分

将向量权重 A 以及模糊关系矩阵 R 进行合并计算,可以得到最终的模糊综合评价结果向量 B 。

$$\begin{aligned} A \cdot R &= (a_1, a_2, \cdots, a_p) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pm} \end{bmatrix} \\ &= (b_1, b_2, \cdots, b_m) = B \end{aligned}$$

3 实证分析

结合实际工程面临风险大小,将可能遇到的风

险等级划分为 5 个等级,即{小,较小,一般,较大,大},设 5 个风险等级为 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$,分别对应风险的大小^[10]。针对风险等级为{小,较小}的待建工程,该类型工程在建设过程中面临的风险较小,具有较大的建设意义;而针对风险等级为{一般}的待建工程,应该进一步分析哪些指标元素的风险较大,建设过程中应重点关注潜在风险较大的因素;而风险等级为{较大,大}的工程,建议设计及建管单位应进一步分析工程是否具有建设前景。

运用前面建立起来的模糊综合评价模型对该热电联产项目的投资风险进行综合评价。为了得到客观权威的评价结果,以某规划的热电联产电厂工程为例,结合实际情况,对评价指标的隶属度进行平均统计计算,得出各一级指标权重如表 2 所示。

权重计算之后,所得到的判断矩阵还需要进一步的一致性检验,计算得到检验指标为

$$\lambda_{\max} = 6.013, CI = 0.002\ 6, RI = 1.248\ 2 \quad (3)$$

因此, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.002 < 0.1$,通过一致性检验,说明计算结果满足综合评价理论要求。

根据上述计算的得到的一级指标权重向量 W ,可得二级指标的评判向量为

$$B = WR = \{0.415, 0.214, 0.142, 0.125, 0.104\} \quad (4)$$

根据 $V = B \cdot C^T$ 计算出投资风险值 $V = B \cdot C^T = 2.289$ 。该风险值介于风险等级较小与一般之间,根据临近原则,确定该工程建设投资风险为较小,具有实际投资意义。

表 2 一级指标权重

准则层	B1	B2	B3	B4	B5	B6	W
B1	1	1/9	1/3	1/6	1/9	1/2	0.026 9
B2	9	1	5	1/6	1/8	3	0.133 8
B3	3	1/5	1	1/4	1/6	3	0.064 4
B4	6	6	4	1	2	7	0.375 7
B5	9	8	6	1/2	1	6	0.359 7
B6	2	1/3	1/3	1/7	1/6	1	0.039 5

进一步计算分析,可以计算出各个二级指标的权重值,如表 3 所示。

通过计算综合评价指标可知,虽然该工程所面临的投资风险较小,从长远角度上看,仍具有一定的投资价值,但具体分析每一项风险指标可发现,该工程所面临的市场竞争较大,当该区域电力需求逐渐饱和,电力供应下降时,企业所面临的风险增大。因此,考虑到企业的长远发展前景,应该扩展市场,探索技术革新,节能减排以提高生产效率,针对电力生产中的副产品,例如煤灰等,应该考虑综合利用,形成企业新的利润增长点,加强企业的抗风险能力。

表 3 二级指标权重

指标层	权重
煤炭资源风险 C11	0.526 1
水资源风险 C12	0.321 5
其他不可抗风险 C13	0.152 4
市场竞争激烈 C21	0.427 6
社会需求前景 C22	0.572 4
法规变更风险 C31	0.743 7
行政性风险 C32	0.256 3
利率变化风险 C41	0.137 6
汇率变化风险 C42	0.109 3
物价、人工成本上涨 C43	0.472 1
财务风险 C44	0.281 0
施工方案的变化 C51	0.276 5
质量等级的要求 C52	0.138 5
设计质量 C53	0.361 2
技术的复杂程度 C54	0.223 8
管理人员水平 C61	0.387 1
合同风险 C62	0.326 5
项目控制风险 C63	0.286 4

4 结 语

构建了较为全面的热电联产投资风险评价指标体系,包括自然风险、社会风险、政治风险、经济风险、技术风险、其他风险 6 个一级指标体系,并形成了包括 18 个指标的二级指标体系。同时,采用层次分析法计算评价的权重集,结合模糊综合评价模型对投资风险进行评估,克服了传统评价模型主观性较强的缺点。在实例分析中,运用模糊综合评价对该项目的投资风险评价基本符合其面临的实际风险情况,并且通

过分析二级风险指标可以有效判断在实际生产过程中风险性较强的方面,做到防范于未然,反映了所提出的的热电联产综合评价模型的实用性。

参考文献

[1] 王振铭,郁刚.我国热电联产的现状、前景与建议[J].中国电力,2003,36(9):43-49.

[2] 龙虹毓,马建伟,吴锴,等.含热电联产和风电机组的电网节能调度[J].电力自动化设备,2011,31(11):18-22.

[3] 陈洁,杨秀,朱兰,等.基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):7-15.

[4] 陈建华,吴文传,张伯明,等.消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J].电力系统自动化,2012,36(24):21-27.

[5] 崔杨,陈志,严干贵,等.基于含储热热电联产机组与

电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4072-4080.

[6] 郭佳欢,沈宏,黄伟.含小型冷热电联产的微电网系统经济运行[J].电网与清洁能源,2009,25(10):21-24.

[7] 孟安波,梅鹏,卢海明.基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J].电力系统保护与控制,2016,44(6):90-97.

[8] 何青,罗宁.燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J].热力发电,2018,47(5):49-56.

[9] 魏兵,王志伟,李莉,等.微型燃气轮机冷热电联产系统经济性分析[J].热力发电,2007,36(9):1-5.

[10] 刘卫平,沙威,刘新利,等.评价热电联产机组经济性的节能比分析方法[J].中国电力,2010,43(9):41-44.

作者简介:

邱金鹏(1991),硕士,主要研究方向为电力技术经济。
(收稿日期:2018-12-19)

(上接第 19 页)

UPFC 投入进入稳态后,在 10 s 时发生尖山—彭祖 N-2 故障后川渝通道有功功率波动对比如图 15 所示。

5 结 语

结合 UPFC 等效模型以及功率注入法和电流注入法,详细介绍了利用 PSASP 自定义功能实现 UP-FC 潮流模型与暂稳模型搭建过程;研究计算 UPFC 用于改善川渝断面潮流分布的可行性;详细计算川渝断面 UPFC 安装容量与改变潮流分布的关系;最后结合切入式暂稳模型,分析计算了川渝断面动态特性以及暂态能量的振荡特性。结果表明,安装在功率输送通道的 UPFC 对于改善川渝断面潮流分布有一定的作用,从计算结果可以看出,UPFC 单位容量改变所安装通道的潮流不到 0.5 单位,杠杆效应小,所需的 UPFC 容量较大。另外,由于 UPFC 串联侧控制可以对所安装线路功率进行动态控制,并联侧控制动态地补偿电压变化,UPFC 对抑制功率振荡方面有良好的效果。

参考文献

[1] 张扬,毛雪雁,徐政.用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J].电网技术,2002,26(7):30-33.

[2] 陈业飞,李林川,张芳,等.基于节点电流注入法的 UP-FC 潮流控制新方法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(2):69-74.

[3] 谢小荣,姜齐荣.柔性交流输电系统的原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2006.

[4] 刘前进,孙元章,黎雄,宋永华,肖颖.基于功率注入法的 UPFC 潮流控制研究[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(3):55-58.

[5] Kannan S, Jayaram S, Salama M M A. Real and Reactive Power Coordination for A Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1454-1461.

[6] 陈磊,王文婕,王茂海,等.利用暂态能量流的次同步强迫振荡扰动源定位及阻尼评估[J].电力系统自动化,2016,40(19):1-8.

作者简介:

韩连山(1986),工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制;
王新宝(1978),高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制;
李 建(1977),高级工程师,主要从事电力系统安全稳定运行管理工作;
王 彪(1977),高级工程师,主要研究方向为电力系统仿真与分析。

(收稿日期:2018-11-11)