

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.33

2010

No.6

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 郭小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2010年第 33卷第 6期总 210期(卷终)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

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] CN 51-1315/TM* 1978 *

b* A4* 94* 24* P* ¥6.00* 4300* 26 *

2010-12

目 次

·基金栏目·

基于灵敏度特征决策的 GRNN 短路容量智能辨识

..... 潘 睿 刘俊勇 郭晓鸣 等(1)

基于 PSM 的光伏模块建模与电气特性仿真 刘俊杰 张新燕(6)

基于阻抗源的单相光伏并网系统研究 李 杨 谢 柱 郑连清(9)

·电网技术·

基于改进遗传算法的可用传输能力对比研究

..... 赵 磊 李华强 康 勇(14)

次同步谐振频率扫描法的电磁暂态仿真实现

..... 杨 帆 康海燕 伍文城 等(19)

省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统建设

..... 毛 锐 张 毅 何 明 等(23)

基于概率分布统计原理新疆风电运行分析

..... 张新伟 常喜强 孙谊娟 等(26)

几种负荷预测方法在西藏电网的应用分析 艾建平 杜秀琳(30)

智能配电网无功优化应用研究 杜 兵(34)

电力系统连锁故障评估综述 张 建 刘 鑫 蒲春林(36)

10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析 刘从洪 邓晓林(40)

宜宾 200 kV 环网光纤保护安全性分析 张 雪 张全明 赵 强(43)

基于 S 变换图像灰度量化的短时电能质量扰动识别分类 张中全 赵 俊(45)

·输配电技术·

分支及流经变压器中性点的单相短路电流计算方法 何永德(51)

论特高压输电技术在促进四川水电资源开发中的关键作用 金健可(55)

城市高压电网中紧凑型输电线路技术 苏恒博 李 阳(58)

接电阻是不可重复测量的物理量的研究 李秋锦 郭治天(60)

四川电网防污闪技术对策分析 何 松(63)

电力电缆无线测温系统研究 胡 娟 巫京励 程文婷(67)

变电站挡位远方检测探讨及技术改进 刘祖惠(71)

智能变电站光纤通信链路检测方法探讨 贾 维(74)

·发电厂技术·

300 MW 循环流化床锅炉耐火材料施工及维护 袁 杰 张文清(77)

进口亚临界锅炉高温再热器长时过热原因与对策探讨 彭卫红(81)

ABB—SYMPHONY 系统在 DEH 改造中的应用 王 梅(83)

300 MW 机组高压电动机差动保护误动分析 杜振海 雷光利(85)

发电机空气间隙对横差电流的影响 程德蓉 刘启俊(88)

2010《四川电力技术》总目录 (92)

封面照片由曾逸农提供

CONTENTS

Intelligent Identification of GRNN Short—circuit Capacity Based on Decision—making of Sensitivity Characteristics	Pan Rui Liu Junyong Guo Xiaoming et al(1)
Modeling and Electrical Characteristic Simulation of Photovoltaic Module Based on PSM	Liu Junjie Zhang Xinyan(6)
Research of Single—Phase Grid—connected Photovoltaic System Based on Z—Source	Li Yang Xie Zhu Zheng Lianqing(9)
Comparative Study of Available Transfer Capacity Based on Improved Genetic Algorithm	Zhao Lei Li Huaqiang Kang Yong(14)
Realization on Electromagnetic Transient Simulation of Frequency Scanning Method for Subsynchronous Resonance	Yang Fan Kang Haiyan Wu Wencheng et al(19)
Construction of Province—Prefecture—country Integration System with Support Ability Assessment of Dispatching Safety	Mao Rui Zhang Yi He Ming et al(23)
Analysis on Wind Power Operation in Xinjiang Power Grid Based on Probability Distribution Statistic Theory	Zhang Xinwei Chang Xifang Sun Yifan et al(26)
Analysis and Application of Several Load Forecasting Methods to Tibet Power Grid	Ai Jianping Du Xulin(30)
Application Research of Reactive Power Optimization in Intelligent Distribution Network	Du Bin(34)
Overview of Assessment of Cascading Failure in Power System	Zhang Jian Liu Xin Pu Chunlin(36)
Analysis and Application of 10 kV Reactive Power Compensation Technology to Rural Power Grid	Liu Conghong Deng Xiaolin(40)
Security Analysis of Optical Fiber Protection for Yibin 220 kV Ring Network	Zhang Xue Zhang Mingquan Zhao Qiang(43)
Identification and Classification of Short Duration Power Quality Disturbance Using S—transform and Grey Scale Method	Zhang Zhongquan Zhao Jun(45)
Calculation Method of Single—Phase Short—circuit Current for Branches and via Neutral Point of Transformer	He Yongde(51)
Discussion on Key Role of Ultra—high Voltage Transmission Technology in Advancing Development of Hydropower Resources in Sichuan	Jin Jianke(55)
Compact Technique of Transmission Line for Urban HV Power Grid	Su Hengbo Li Yang(58)
Research on Grounding Resistance not Being Physical Quantity Measured Repeatedly	Li Qiu jin Guo Zhitian(60)
Analysis on Pollution Flashover Prevention in Sichuan Power Grid	He Song(63)
Research on Wireless Temperature Measuring System of Power Cable	Hu Juan Wu Jingli Cheng Wenting(67)
Discussion on Remote Monitoring of Transformer Tap Position and Its Technical Reconstruction	Liu Zuhui(71)
Discussion on Detection Method for Optical Fiber Communication Link in Intelligent Substation	Jia Wei(74)
Construction and Maintenance of Refractory Material of 300 MW CFB Boiler in Sichuan Bajia CFB Boiler Demonstration Plant	Yuan Jie Zhang Wenqing(77)
Causes and Countermeasures for Long—time Reheating of High—temperature Reheater of Imported Subcritical Boiler	Peng Weihong(81)
Application of ABB—SYMPHONY System to DEH Transformation	Wang Mei(83)
Malfunction Analysis on Differential Protection of High—voltage Motor of 300 MW Unit	Du Zhenhai Lei Guangli(85)
Impact of Generator Air Gap on Transverse Differential Current	Cheng Derong Liu Qijun(88)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2010 Vol.33 No.6
(Oct. No.210)

Monthly Started in 1978

Address: No.24 Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China
Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

基于灵敏度特征决策的 GRNN 短路容量智能辨识

潘 睿, 刘俊勇, 郭晓鸣, 贺星棋, 刘友波, 方 涛

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:针对当前局部地区短路容量水平已接近现有设备额定值的情况, 提出一种短路容量智能辨识方法。利用基于潮流的短路计算方法计算系统各母线的最大短路容量, 通过对典型潮流下灵敏度的计算, 选择对短路容量贡献程度较大的发电机、负荷的有功出力作为输入特征向量, 建立训练样本, 对广义回归神经网络 (GRNN) 进行训练, 构成该电网结构下的短路容量辨识的人工神经网络。应用该模型对运行中电网的母线短路容量水平进行快速扫描, 为智能电网与智能调度中的故障识别快速仿真建模 (FSM) 提供了一种新思路。通过 IEEE 30 节点系统验证了该方法的可行性与有效性。

关键词:短路容量; 广义回归神经网络; 灵敏度; 智能辨识; 快速仿真建模

Abstract: Aiming at the situation that the level of short-circuit capacity is close to the rating of the existing equipment in local area at present, an intelligent identification approach of short-circuit capacity is proposed. Maximum short-circuit capacity of each bus is calculated using the short-circuit calculation method based on power flow. By calculating the sensitivity in typical power flow, the active efforts of generators and loads which have greater contribution to short-circuit capacity are selected as input eigenvectors, and the training samples are established to train general regression neural network (GRNN). Then an artificial neural network of short-circuit capacity identification is formed. The model is applied to fast scanning of short-circuit capacity of buses that are in operation in power grid, which is providing a new thought of fast simulation modeling (FSM) for fault recognition in smart grid and intelligent dispatch. Simulations on IEEE 30 system are performed to verify the feasibility and validity of the approach.

Key words: short-circuit capacity; general regression neural network (GRNN); sensitivity; intelligent identification; fast simulation modeling (FSM)

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0001-05

0 引 言

随着中国电力系统的迅速发展, 电网联网进程的不断推进, 网络结构日趋复杂, 电网最大短路容量逐渐增加, 局部地区短路容量水平已接近现有设备额定值, 短路容量、短路电流超过设备额定值的问题日益突出。虽然电力设备更新很快, 但投资普遍很大, 有部分设备到目前已经使用二、三十年, 现有的部分电力系统的运行水平已经超过其额定值。以西南某省级电网 220 kV 等级为例: 截至到 2008 年年末, 运行在 20 年以上的输电线有 65 条, 总长度为 3 052.26 km; 运行在 20 年以上的变压器有 19 台/组; 有 9 个厂站的最大短路电流已经超过了开关开断电流能力。

智能电网是指一个完全自动化的供电网络, 其中

的每一个用户和节点都得到实时监控, 并保证从发电厂到用户端电器之间的每一点上的电流和信息的双向流动^[1]。根据 IBM 中国公司高级电力专家 Martin-Hauske 的解释, 智能电网有 3 个层面的含义^[2]。智能电网有个很重要的方面就是对电网可能出现的问题提出充分的告警。短路是现代电力系统的一种主要故障。短路容量辨识可以对电网中所有节点的短路容量进行实时监测, 对电网可能发生的短路故障进行预估分析, 成为未来智能电网的有效组成。

文献 [3-8] 介绍了一些比较精确的短路电流计算方法。这些方法虽然精度较高, 但计算速度都相对较慢, 不太适合实时要求, 无法进行在线监测扫描。文献 [7-8] 对于短路电流的预测进行了研究。文献 [9] 通过在最大运行方式下进行计算得出最大供电规模与 220 kV 电网短路电流间的关系。文献 [10] 虽然能够进行当前运行方式下的短路电流预测, 但是

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50977059)

没有考虑发电机组的出力分配变化,与实际运行情况存在较大差距,并且只对重要节点进行预测,不能实现对全网短路水平的有效监测。文献[11]虽然是实时在线计算短路电流,但是是快速获取故障后瞬间短路电流的基波准确参数,不是短路水平的辨识。

当前,电网中短路容量大都是在离线状态下根据电网的最大运行方式进行计算,但是对于快速变化的电网,其运行方式是不断变化的,不同的运行方式下电网的短路水平可能相差很大,为了及时掌握电网运行中最大短路容量位置及其水平,预防短路电流超过额定值,有必要进行短路容量的快速辨识。根据当前研究现状及以上分析,提出了一种短路水平智能辨识的方法,通过可对结构相对固定的电网在不同发电机出力分配、不同的负荷水平下进行短路容量水平的扫描,为智能电网与智能调度中的故障识别快速仿真建模(fast simulation modeling FSM)提供了一种新思路和技术支持。通过仿真结果可知,该方法在计算的精度和速度上都能达到比较满意的效果。

1 模型分析及设计

1.1 建模分析

短路容量是反映电力系统中某点电气性能的一个特征量。首先,短路容量是对电力系统的某点而言的,其次,短路容量也和整个系统的容量水平有关。随着电力系统容量的扩大,系统短路容量的水平也会增大。短路容量是系统电压强度的标志,短路容量大(对应于低阻抗),表明网络强,负荷、并联电容器或电抗器的投切不会引起电压幅值大的变化;相反,短路容量小表明网络弱^[12]。

在电力系统实际运行中,单相短路故障占全部故障的绝大部分,其次是两相接地和两相短路故障,出现三相对称故障的概率是很少的。但是,三相短路对于系统稳定的影响最大,通常用来校验电气设备的遮断能力。由于母线在运行中,有巨大的电能通过,短路时,将承受很大的发热和电动力效应,因此,母线短路容量的计算对电力系统影响巨大。

1.2 短路计算模型

传统短路电流计算是采用叠加原理的基于潮流的对称短路计算。其模型基于以下假设条件。

(1)基于潮流的短路计算,所以突然短路前,三相交流系统是在对称状况下运行;

(2)短路瞬间为纯金属性短路,不计导体之间或导体对地之间的电阻。

(3)同步电机均采用次暂态电抗后电势恒定模型;转子结构完全对称;定子三相绕组结构完全相同;

(4)电力系统各元件的磁路不计饱和,电气设备的参数不随电流大小发生变化;

(5)在潮流方式基础上计算短路电流,所以是计及负荷(负荷采用恒阻抗模型表示)和发电机出力的;

(6)负荷和发电机采用恒功率因数。

基于潮流的短路计算,短路电流主要和潮流结果的节点电压和故障节点的自阻抗相关。在一个结构固定的电网中,短路电流变化主要源于潮流的变化,而固定结构的电网中潮流主要是随发电机和负荷的变化而变化。所以在智能短路容量辨识中,把发电机和负荷的出力作为辨识模型的特征输入量。

1.3 GRNN智能辨识模型

为实现短路容量智能辨识,选择人工神经网络进行辨识。广义回归神经网络(general regression neural network GRNN)是一种局部逼近网络,与传统神经网络不同^[13-14],模型具有明确理论基础,是一种建立在数理统计基础上的神经网络^[15]。其优点包括:①只要样本数据确定,则相应的网络结构和神经元之间的连接权值也随之确定;②训练过程不需要迭代;③当运行方式改变时,GRNN网络只需相应修改训练样本并重构和训练网络^[16,17];④不必进行循环的训练过程,在训练过程中不调整神经元之间的连接权值;⑤即使样本数据较少,也可以收敛于样本量集聚最多的优化回归面;⑥网络训练过程实际上只是确定平滑参数的过程,网络的学习全部依赖数据样本,这个特点决定了网络得以最大限度地避免人为因素对辨识结果的影响。

广义回归神经网络的理论基础是根据样本数据逼近其中隐含的映射关系^[15]。设随机向量 x 和 y 随机变量的联合概率密度函数为 $f(x, y)$ 。如果 $f(x, y)$ 已知,容易得到 y 在 x_0 上的回归值(y 对 x_0 的条件均值)为

$$E(y | x_0) = y(x_0) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f(x_0, y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x_0, y) dy} \quad (1)$$

对 $f(x_0, y)$ 进行泊松(Parzen)非参数估计,由于积分 $\int_{-\infty}^{\infty} x e^{-x^2} dx = 0$, 所以整理得

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^n y_j \exp(-\sum_{i=1}^R (x_{0j} - x_{ij})^2 / 2\sigma^2)}{\sum_{j=1}^n \exp(-\sum_{i=1}^R (x_{0j} - x_{ij})^2 / 2\sigma^2)} \quad (2)$$

式中, n 为样本容量; p 为 x 的维数; σ 在此称为平滑参数(唯一需要人为设定的值, 值越小, 神经网络越逼近函数)。

GRNN 由一个径向基网络层和一个线性网络层组成, 网络结构如图 1 所示。第一层为径向基隐含层, P 表示输入样本数据; R 为训练样本输入的维数, 也就是该电网所有发电机和负荷的总个数; Q 表示每层网络中神经元的数目, 也就是训练样本的个数; a_i 表示第一层输出 a 的第 i 个元素; w_{1i} 表示第一层权值矩阵 w_{1i} 的第 i 行元素。此层的权值函数为欧几里德距离度量函数(用 $\| \text{dist} \|$ 表示)。

$$\| \text{dist} \| = \sqrt{\sum_{j=1}^R (x_i - w_{ji})^2} \quad (j=1, 2, 3, \dots, Q) \quad (3)$$

其作用是计算网络输入与第一层的权值 w_{1i} 之间的距离。 b 为隐含层阈值, $\| \text{dist} \|$ 的输出与阈值 b 的元素相乘, 将结果 n 传送到传递函数。传递函数常用高斯函数

$$R_i(x) = \exp(-\frac{\| x - c_i \|^2}{2\sigma_i^2}) \quad (4)$$

网络的第二层为线性输出层, 其权函数为规范化点积权函数(用 nprod 表示), 计算出网络的向量 n' , 它的每个元素就是向量 a 与权值矩阵 W_{2i} 每行元素的点积再除以向量 a 各元素之和的值, 并将结果 n' 送入线性传递函数 $a' = \text{purelin}(n')$, 计算网络输出。输出的是电网所有节点(母线)在该运行方式下的三相短路容量。

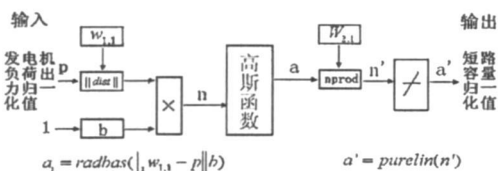


图 1 基于 GRNN 的短路容量辨识模型

2 算法设计

2.1 基于灵敏度的特征值选择

通过样本值训练人工神经网络, 一般来说训练样本数越多, 训练结果越能正确反映其内在规律, 但是, 当样本数多到一定程度时, 网络的精度也很难再提高, 并且, 样本数太多反而会造成训练时间过长, 工作

量过大。

在所提出的基于 GRNN 的短路容量辨识的神经网络中, 如果把所有的发电机和负荷的出力都作为网络的输入, 单个输入样本的输入量太多, 这样训练网络的样本量也就会随之增加。所以综合效率和精度的考虑, 采用灵敏度的方法来评价输入的特征量, 从而选择对短路容量影响较大的特征量作为输入。在典型运行方式下(最大、最小、随机运行方式)对各发电机、负荷节点进行灵敏度计算, 灵敏度分析可以表征特征参数(控制变量)对状态变量的敏感程度^[19]。

$$F(P_i + \Delta P, Q_i + \Delta Q) = S_i + \Delta S_i,$$

$$S_2 + \Delta S_2, \dots, S_m + \Delta S_m \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中, F 表示基于潮流的短路容量计算; ΔP_i 是某台发电机或者某负荷的有功出力的增量; ΔQ_i 是某台发电机或者某负荷的无功出力的增量; ΔS_m 是该节点短路容量的增量; n 是发电机和负荷的总个数; m 是节点总个数。

利用式(6)左右两边的增量来求得状态参数(某节点短路容量)对控制参数(某节点有功出力)的灵敏度 $\xi(P_i | S_j)$ 。

$$\xi(P_i | S_j) = \frac{\Delta S_j}{\Delta P_i} = \frac{\partial S_j}{\partial P_i} \quad (6)$$

式中, $(i=1, 2, \dots, n); (j=1, 2, \dots, m)$ 。

通过灵敏度指标判断节点出力对电网各节点短路容量影响程度来选择训练网络的特征输入量。

$$\sum_{j=1}^m \frac{|\partial S_j / \partial P_i|}{m} \geq S_b \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式(7)左边为系统所有节点短路容量对某节点有功出力的平均灵敏度; S_b 为提取特征量的灵敏度特征的指标。

分别确立发电机节点和负荷节点的 S_b , 当在典型潮流下分别都满足式(7)时就把该点选为输入样本特征值。 S_b 的选择是自动的, 是根据灵敏度计算的结果的排序取靠前的一个比例的发电机和负荷的有功出力(这个百分比是人工定的, 根据网络情况确定)作为输入样本的特征值。

2.2 样本空间建立

训练样本不但要足够多以满足训练网络的精度, 而且为了使网络能够适应电网各种运行方式, 样本值的选取要尽可能全面的覆盖电网运行的所有方式。

电网所有运行方式都是在该电网最大运行方式和最小运行方式之间, 所以可以通过最大、最小运行

方式来确定样本值抽取空间。根据文献 [20] 的叙述:最大运行方式是指系统中投入运行的机组最多、容量最大时,通过继电保护装置的短路电流为最大数值的运行方式。反之为最小方式。在电网中最大运行方式可以从并网机组出力直接得到,而最小运行方式在算例中设定为零。对每个节点在最大和最小方式中均匀分布取点,并且输入样本一定要满足发电机出力与负荷出力在忽略网损下大约相等的条件。

$$\sum_{j=0}^m P_{Lj} \approx \sum_{i=0}^n P_{Gi} \quad (8)$$

为了便于样本值对神经网络进行训练,将数据归一化处理为区间 $[0, 1]$ 之间的数据。设 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别代表训练样本集中有功出力的最大值和最小值, x 为实际值, X 为归一化后的输入值, 则^[9]

$$X = \frac{(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (9)$$

使输入数据能够在有效数据空间均匀分布开。

2.3 算法流程

整个算法的流程如图 2 所示。

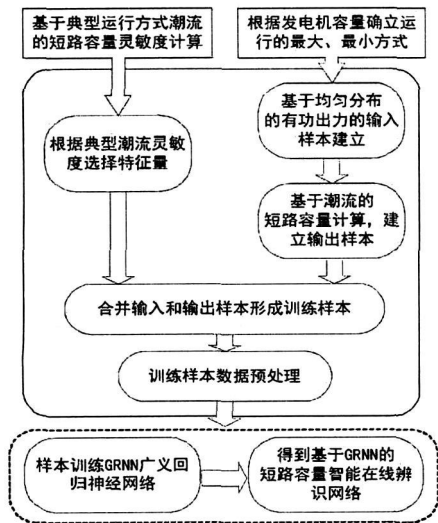


图 2 基于 GRNN 的短路容量智能辨识算法流程

3 算例

3.1 IEEE 30 算例样本构造

以 IEEE 30 节点系统作为算例,对该网络进行短路容量辨识。该系统有 6 台发电机, 21 个负荷节点。如果不进行基于灵敏度的特征样本值选取,样本共有 26 个输入值(平衡节点的出力根据负荷和其他发电机的出力自动确定)。在典型运行方式下对各有功出力点进行灵敏度计算,确立发电机的 $S_b=0.06$, 负

荷的 $S_b=0.1$, 从而选择了 3 个发电机(发电机输入特征样本的选择比例是灵敏度排名的前 60%)和 15 个负荷节点的有功出力(负荷节点输入特征样本的选择比例是灵敏度排名的前 60%)为输入样本特征值。

由于是 IEEE 30 标准节点,所以设定各个发电机的额定容量,从而通过最大容量之和来确定系统最大运行方式(最小方式为发电机总的有功出力为零),在最大运行和最小运行方式之间对每个有功出力节点进行基于均匀分布的随机抽样。为了使平衡节点的有功出力在其最大容量之内,对随机样本进行选择处理。

$$0 \leq \sum_{j=0}^m P_{Lj} - \sum_{i=0}^{n-1} P_{Gi} \leq \max P_{Gp} \quad (10)$$

式中, m 是系统负荷总个数; n 是系统发电机总个数; $\max P_{Gp}$ 是平衡节点发电机最大有功出力。

通过满足均匀分布和有功出力条件的随机输入样本,进行基于潮流的短路容量计算,从而组成完整的输入输出样本,通过灵敏度指标建立 GRNN 网络的训练样本。在该算例中,随机产生 1 200 个样本,经过筛选有 329 个样本符合样本条件。

3.2 IEEE 30 短路容量智能辨识

用生成的 329 个样本值对 GRNN 广义回归神经网络进行训练,通过对平滑参数的调整比较选取合适的值(平滑参数选择为 0.05),可以快速得到训练后的网络。

随机产生测试样本输入,利用训练后的网络对随机测试样本输入进行短路容量辨识,得到结果,对比该测试样本输入通过基于潮流的短路精确计算方法计算出的短路容量值。

表 1 基于潮流的计算方法和基于 GRNN 智能辨识方法的计算结果对比(任选 9 个节点)

节点名	短路容量 /MVA		相对误差 /%
	基于潮流的 短路算法	GRNN 智能辨识	
BUS-10	109.24	105.98	-2.98
BUS-11	218.22	213.70	-2.07
BUS-12	309.58	299.85	-3.14
BUS-13	226.17	218.85	-3.24
BUS-14	404.62	387.89	-4.13
BUS-15	290.60	276.48	-4.59
BUS-16	857.46	837.51	-2.33
BUS-17	165.41	159.49	-3.58
BUS-18	101.32	97.42	-3.85

通过表 1 可以看到,通过 GRNN 智能辨识方法计

算的短路容量值相对于基于潮流的计算的结果, 相对误差基本都在 5% 以内, 结果比较精确。用平均绝对百分比误差 (式 (11)) 来评价 GRNN 辨识模型的辨识精度, 该算例的平均绝对百分比误差为 2.508%。

$$\overline{|\delta_p|} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i' - y_i| / y_i}{n} \times 100\% \quad (11)$$

从图 3、图 4 可以看到通过 GRNN 智能辨识方法计算的短路容量值相对于基于潮流计算结果的对比。

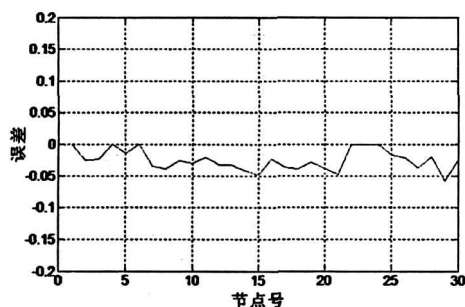


图 3 基于 GRNN 智能辨识方法和基于潮流的短路计算方法的误差

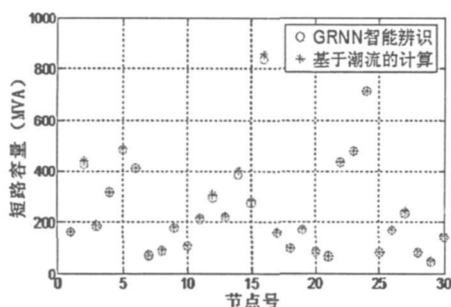


图 4 基于潮流的短路计算方法和基于 GRNN 智能辨识方法计算结果对比

从表 2 可以看到, 对于短路容量的计算, 基于潮流的短路电流计算时间的方法是先进行当前运行方式下的潮流计算, 根据潮流计算结果得到各节点电压, 然后根据节点电压和该网络的节点阻抗矩阵计算短路电流及短路容量, 每一次短路容量的计算都要进行当前运行方式下的潮流计算, 计算的绝对时间较大, 所以基于 GRNN 智能辨识方法计算时间远小于基于潮流的短路计算时间, 并且随着网络规模的扩大, GRNN 智能辨识方法的优势会更加明显。

表 2 基于潮流的短路计算方法和基于 GRNN 智能辨识方法单次全网短路容量水平扫描的时间对比

	基于 GRNN 智能辨识	基于潮流的计算
绝对时间 /s	0.009 72	0.062 5

注: 基于 GRNN 智能辨识的绝对时间是指采用训练之后的网络进行计算某个母线的短路电流的时间

3.3 对比分析

将前面的方法与传统 BP 神经网络 (隐含层 32 节点) 进行对比: 采用相同的样本数量和样本值; 用相同的测试值进行测试。误差和时间对比如下。

(1) 传统神经网络 (如 BP) 在确定权值时具有随机性, 导致每次训练后输入、输出间的关系不定, 输出结果存在差异, 并且样本太少会导致其不精确。而 GRNN 网络即使样本数据较少, 也可以收敛于样本量集聚最多的优化回归面。传统神经网络计算结果的平均绝对百分比误差为 2.124% (结果不稳定, 选择多次结果中较好的一次结果), 而 GRNN 方法的平均绝对百分比误差为 2.508% (结果稳定), 虽然该方法误差稍大, 但是结果稳定, 而传统神经方法虽然最好的结果稍好, 但是结果极其不稳定, 不适合进行辨识。

(2) 在训练时间上

$$t_{\text{GRNN}} = 0.242 \text{ s} \quad t_{\text{BP}} \geq 446 \text{ s}$$

GRNN 网络在训练时间上远远小于 BP 网络。主要是因为 GRNN 网络训练过程不需要迭代, 当运行方式改变时, 只需相应修改训练样本并重构和训练网络, 不必进行循环的训练过程, 在训练过程中不调整神经元之间的连接权值。

从上面分析可知, 综合速度与精度考虑, GRNN 网络的计算相对于传统的 BP 网络, 具有明显的优势, 适用于短路容量的智能辨识。

4 结 论

中国电力系统的发展目标是要建成坚强的智能电网, 随着电力系统规模增大, 传统的短路容量计算方法大都是基于潮流的计算, 速度较慢。所提出的短路容量辨识方法, 在电网结构不变的情况下, 通过对少量基于潮流的短路容量计算样本训练后, 对当前运行方式下电网母线的最大短路容量水平进行扫描, 通过算例验证, 该方法速度较快, 精度较高, 可以为电力部门及时掌握、了解电力系统实时运行状况, 及时采取应急措施提供了参考性的依据, 为智能监测和智能调度中快速仿真建模提供了一种新思路与技术支持。如何在考虑电网变结构、大系统边界适应性、辨识网络的实时更新的情况下实现快速辨识是未来工作的发展方向。

参考文献

(下转第 13 页)

DC/DC 升压变换器, 形成 Z 源型逆变器; 利用文献 [1] 的光伏阵列电路模型结合改进的电导增量法进行 MPPT 仿真; 设计了整套系统的控制策略, 对一套功率为 3 000 W 基于 Z 源的单相光伏并网系统进行仿真, 并对仿真波形进行了分析。证明改进的电导增量法跟踪速度和跟踪精度有所提高, 基于阻抗源的单相光伏并网装置节约成本的同时改善了系统的输出, 并增加了系统的可靠性。

参考文献

- [1] 郑连清, 谢柱. 基于特性参数的太阳能电池和光伏阵列建模研究 [J]. 低压电器, 2010(8): 21—25.
- [2] 吴理博. 光伏并网逆变系统综合控制策略研究及实现 [D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2006.
- [3] 丁新平. Z 源逆变器关键技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2007.
- [4] 蔡磊. Z 源逆变器并网应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学

硕士学位论文, 2008.

- [5] Jong-Hyoung Park, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun. A Control Strategy for the Grid-connected PV System Using a Z-Source Inverter [C]. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December.
- [6] Poh Chiang Loh, Vilathgamuwa D. M., Yue Sen Lai, Geok Tin Chua, Yunwei Li. 2004. Pulse-width Modulation of Z-source Inverters [J]. Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record Oct. 2004.
- [7] 张超, 何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 51—53.

作者简介:

李 杨 (1962), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化及电力电子技术的应用。

(收稿日期: 2010—09—15)

(上接第 5 页)

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7—11.
- [2] IBM 论坛. 2009, 点亮智慧的地球 [EB/OL] [D]. <http://www-900.ibm.com/cn/forum2009/wisdom.shtml>
- [3] Giuseppe Parise. A New Approach to Calculate the Decaying AC Contributions to Short Circuit [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31(1): 214—221.
- [4] 赵敏. 基于电流变化率的电网短路保护原理 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 105—108.
- [5] 王建元, 师旭, 师耀林, 等. VB 与 Matlab 混合编程在电力系统短路计算中的应用 [J]. 电网技术, 2007, 32(2): 143—146.
- [6] 罗庆跃, 李晓明. 变结构模型短路电流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 77—80.
- [7] 邵玉槐, 李肖伟, 程晋生. REI 等值法用于多节点配电系统短路电流计算的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 64—67.
- [8] 范忠, 张慧媛. 基于 GIS 数据平台的配电网短路电流计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 76—79.
- [9] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 103—106.
- [10] 刘波, 张焰, 陈煜. 基于 GA2 改进 BP 神经网络算法在大电网短路电流预测中的应用 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 43—46.
- [11] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 66—70.

- [12] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [13] 王文成. 神经网络及其在汽车工程中的应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [14] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [15] Specht D. F. A General Regression Neural Network [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1991, 2(6): 568—576.
- [16] 张际先, 宓霞. 神经网络及其在工程中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [17] 冯志鹏, 宋希庚, 薛冬新, 等. 基于广义回归神经网络的时间序列预测研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(2): 106—109.
- [18] 谷志红, 牛东晓, 王会青. 广义回归神经网络模型在短期电力负荷预测中的应用研究 [J]. 中国电力, 2006, 39(4): 11—14.
- [19] 王尔智, 赵玉环. 电力网络灵敏度分析与潮流计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [20] 万千云等. 电力系统运行实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介

潘 睿 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

刘俊勇 (1963), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。研究方向为电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期: 2010—10—06)

基于 PSIM 的光伏模块建模与电气特性仿真

刘俊杰, 张新燕

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 光伏模块依靠光伏逆变器将产生的直流电转变为交流电用于负载供电, 光伏逆变器的设计需要考虑光伏模块的电气特性。根据光伏电池物理机制的数学模型, 采用 PSM 软件中已有的器件搭建光伏模块仿真模型。利用该仿真模型, 通过 PSM 软件模拟实际光伏模块在不同太阳光照强度、环境温度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 特性。通过仿真分析串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 变化对模块输出特性的影响, 更加深入地了解光伏模块的电气特性。模型为将来光伏逆变器设计时的动态仿真研究提供了一个准确的仿真电源。

关键词: 光伏模块; 数学模型; PSM; 电气特性

Abstract: DC from photovoltaic (PV) module is converted into AC to supply load through the PV inverter. The electrical characteristics of PV module need to be considered in the design of PV inverter. According to the mathematic model based on physics mechanism of PV cell, the simulation model of PV module is constructed with the element in the PSM library. Using the simulation model, $I-V$ and $P-V$ characteristics of actual PV module are simulated in different light intensity and ambient temperature by PSM. Through the simulation, the effect of the series and parallel resistances on the output characteristics of PV module is analyzed, and the electrical characteristics of PV module are acquired more clearly. The model has provided an accurate simulation power source for dynamic simulation study of PV inverter design.

Key words: photovoltaic module; mathematic model; PSM; electrical characteristic

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0006-03

一般说来, 在光伏发电系统的研究设计过程中, 对整个系统进行仿真是一个必不可少的环节, 而建立一个能准确反映光伏模块输出特性的仿真模型是完成系统动态仿真的关键^[1]。用于研究光伏发电系统的仿真软件主要有 MATLAB、PSPICE、PSM 等。光伏模块的电气特性对逆变器设计非常重要, 对光伏模块的电气特性进行计算和仿真分析, 以提供最优的控制策略, 使逆变器提供最大的转换效率。对于 PSPICE 来说, 其主要应用于电子电路的仿真, 虽然人们在 PSPICE 下实现了电力电子器件模型, 但是在将这些模型用于电路的仿真并采用比较灵活的控制策略时仍有很大的局限性。然而, MATLAB/Simulink 虽然在实现控制策略方面有很大的优势, 但是功率器件模型过于简单。PSM 是专门为电力电子控制设计的一款仿真软件。它可以快速地仿真和便利地与用户接触。另外, PSM 软件具有 C 语言和 MATLAB/Simulink 接口, 充分扩展了控制策略的实现方式, 集合了几个仿真软件的优势^[2]。在 PSM 软件下搭建模型和进行光伏模块电气特性的仿真分析, 为以后进一步研究光

伏发电系统和进行光伏逆变器的设计和研究提供了一个良好的仿真平台。

1 光伏电池物理机制的数学模型^[3]

光伏电池就是利用半导体光伏效应制成, 它是一种直接将光能转换成电能的转换器件。根据电池的实际特性, 为达到工程精度要求, 光伏电池的等值电路模型选择既考虑串联电阻, 又考虑并联电阻较精确的仿真模型, 其等效电路模型如图 1 所示。

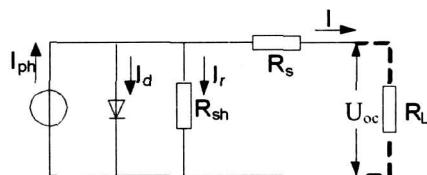


图 1 光伏电池的等效电路模型

根据图 1 所示的光伏电池等效电路模型, 应用基尔霍夫电流电压定律, 可得流过负载的电流 I 与其端口电压 U 之间的关系。

$$I = I_{ph} - I_d - I \quad (1)$$

其中

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50767003)

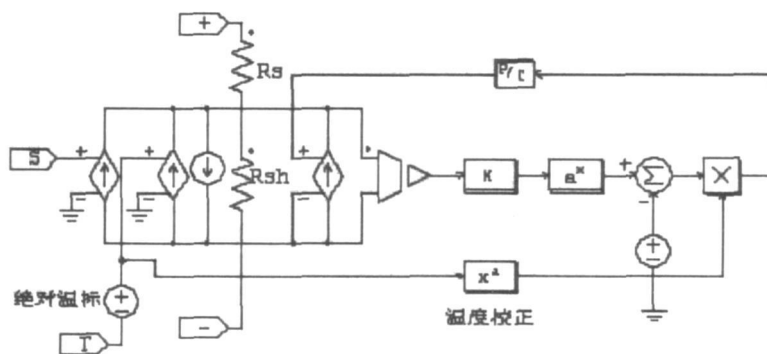


图 2 光伏模块的电路模型

$$I_{ph} = I_c \left(\frac{S}{1000} \right) + C_T (T - T_{ref})$$

$$I_l = I_l \left[e^{\frac{q(U+R_s)}{AKT}} - 1 \right]$$

$$I = I_{l0} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]}$$

$$I_r = \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中, I_{ph} 为光生电流; I_c 为短路电流; I 为负载电流; U 为端口电压; E_g 为禁带宽度电压 ($1.12e$); S 为光照强度 (W/m^2); k 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23}); T 为电池温度 (K); T_{ref} 为参考温度; q 为电子电量 (1.6×10^{-19}); R_s 为串联电阻 (Ω); R_{sh} 为并联电阻 (Ω); C_T 为温度系数; A 为 PN 结理想因子 (1.2); I_{l0} 为 T_{ref} 下电池饱和电流。

2 光伏模块的 PSM 仿真模型

在实际应用中,按照所需要的功率等级和电压等级将若干光伏电池串并联组成光伏模块,以光伏模块方式进行输电。在考虑整个光伏模块的模型时,通常要用一些假设后对实际情况加以简化。此时,光伏模块的输出将满足以下方程组。

$$U_a = N_s U_c$$

$$I_a = N_p I_c$$

$$P_a = N_s N_p P_c \quad (3)$$

其中, U_a 、 I_a 、 P_a 分别为整个光伏模块的输出电压、电流及功率; N_s 、 N_p 分别为光伏模块中串联和并联电池个数; U_c 、 I_c 、 P_c 分别为单个光伏电池的输出电压、电流及功率。则根据上一节的光伏电池数学模型,可以得到如下光伏模块表达式。

$$I_a = I_{sc} - I_l \left[e^{\frac{q(U+R_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I_a}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$\text{其中, } I_l = C_0 T^3 e^{\left(-\frac{qE_g}{AKT} \right)} \quad (5)$$

根据以上光伏模块的数学表达式及确定公式中的各个参数,在 PSM 软件中采用已有的器件模块直接搭建实现该模型,光伏模块的电路模型如图 2 所示。

其中,端口 S、T、+ 和 - 分别为用于设置光照强度、温度以及光伏模块的输出电压与外围主电路相连接的端口。

3 光伏模块 PSM 模型的仿真分析

采用了 MSX-60 的光伏模块,模型所需的电池结构参数如表 1 所示。

表 1 光伏电池模型参数表

R_s	R_{sh}	E_g / q	C_T	A
0.008	1.000	1.12	0.002 4	1.2

建立如图 3 所示仿真电路,用 PSM 软件进行仿真验证^[4]。

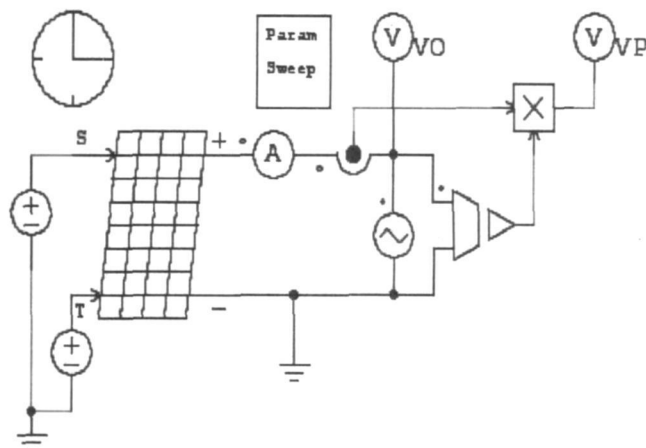


图 3 光伏模块 PSM 仿真电路

图中 S、T 分别模拟光照强度与电池温度;用电流表 A 检测光伏模块的输出电流。用表 V_o 测量模块端口输出电压;然后分别引电压和电流进乘法器用

表 V_p 显示模块功率。仿真时,通过对 S、T 输入端的电压分别进行参数扫描,来模拟光照强度和温度的变化,从而得到不同光照强度和环境温度条件下,光伏模块的输出电流、输出功率随端口电压变化的关系。

首先,设置 T 端口的电压为 25 V,对 S 输入端的电压进行参数扫描,使其电压分别从 400 V 增加到 1 000 V,步长为 200 V。分别可以得到光伏模块在相同环境温度 (25 °C) 不同光照强度 S 条件下的模块输出电流 I 输出功率 P 对应输出电压 V 关系的 I-V 和 P-V 输出特性曲线,如图 4、图 5 所示。

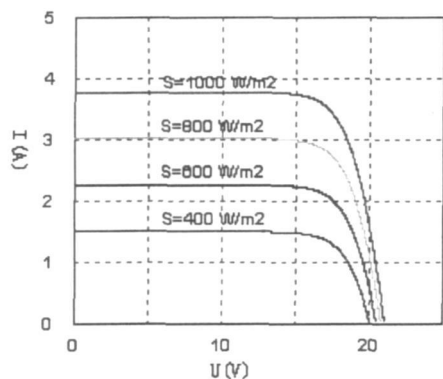


图 4 不同光照强度下 I-V 特性曲线 (T=25 °C)

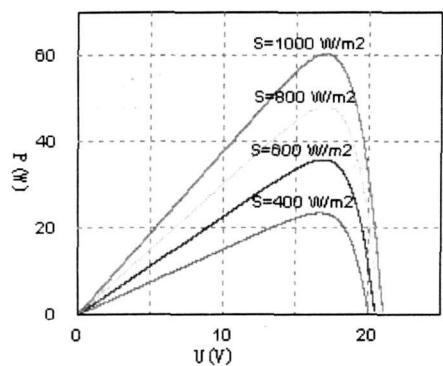


图 5 不同光照强度下 P-V 特性曲线 (T=25 °C)

从上图可知,随着光照增强,输出电流和输出功率增大,最大功率点的值也越大。输出电压从零逐渐开始增大,输出电流基本不变;而输出功率随着电压线性增大,当输出电压增大到一定值,输出电流和输出功率迅速减小,即光伏模块存在最大功率点。

然后,设置 S 端口的电压为 1 000 V,对 T 输入端的电压进行参数扫描,使其电压分别从 0 V 增加到 75 V,步长为 25 V。分别可以得到光伏模块在相同光照强度 (1 000 W /m²) 不同环境温度 T 条件下的模块输出电流 I 输出功率 P 对应输出电压 V 关系的 I-V 和 P-V 输出特性曲线,如图 6、图 7 所示。

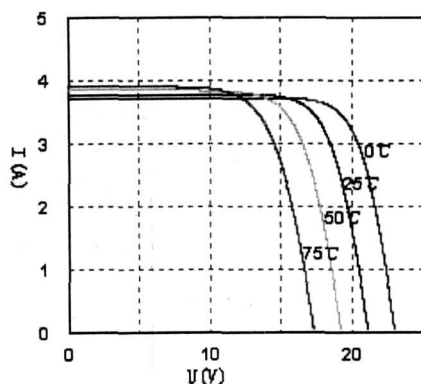


图 6 不同温度下 I-V 特性曲线 (S=1 000 W /m²)

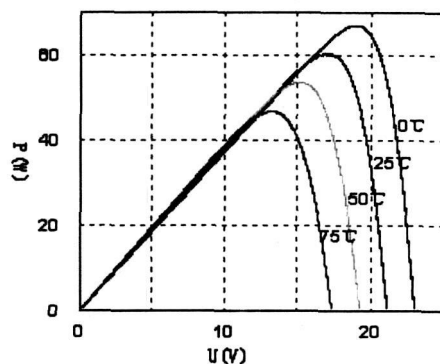


图 7 不同温度下 P-V 特性曲线 (S=1 000 W /m²)

从上图同样可知,光伏模块的输出电流随着环境温度的增大而略有减小,而短路电压有所增大。输出功率由环境温度的增大而减小。

用以上仿真结果与文献 [5] 数据手册的输出特性相比具有极好的一致,体现了模型的合理、有效性。

4 串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 对模块输出特性的影响分析

理想光伏电池的转换效率为

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (6)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (7)$$

式中, P_{in} 为太阳辐射功率; FF 为填充因子,填充因子是最大功率矩形对 $I_{sc} \times V_{oc}$ 矩形的比例,若要得到最大效率, P_{in} 不变时,要使式中分子 $I_m V_m$ 最大。但是,对于实际光伏电池,有各种因素影响转换效率。还对串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 对转换效率的影响进行了分析。

(下转第 50 页)

- 分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1—6.
- [6] GAI NG Z L Wavelet-based Neural Network for Power Disturbance Recognition and Classification [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1560—1568.
- [7] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26—30.
- [8] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16—18.
- [9] 王晶, 束洪春, 陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40—45.
- [10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum: the S Transform. IEEE Trans On Signal Process, 1996, (44): 998—1001.
- [11] I W. C. Lee P. K. Dash S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance Sig-

- nals [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2003, 50(4).
- [12] M. V. Chilukuri P. K. Dash Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2004, 19(1).
- [13] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(4): 51—56.
- [14] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相识别度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67—71.
- [15] 边肇祺, 等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

作者简介:

张中全 (1974), 男, 大学本科, 电力工程师, 成都电业局青白江供电局调控中心主任, 从事多年调度运行管理工作;

赵俊 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与电力市场。
(收稿日期: 2009—11—19)

(上接第 8 页)

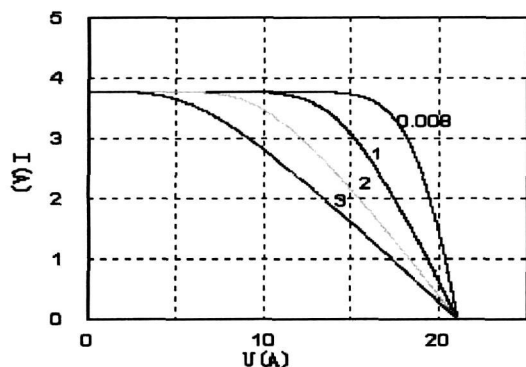


图 8 不同串联电阻 R_s 下 I - V 特性曲线

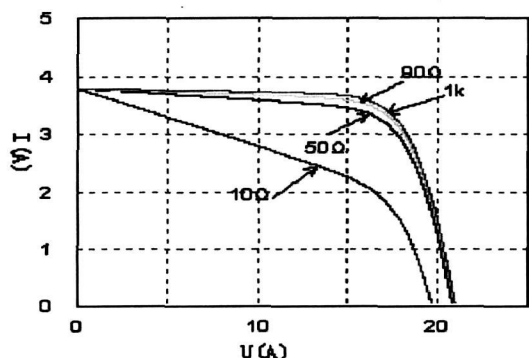


图 9 不同并联电阻 R_p 下 I - V 特性曲线

图 8、图 9 为不同串并联电阻下的 I - V 特性曲线, 曲线表明光伏模块的等效串并联电阻对输出特性都有影响。但是, 串联电阻对输出特性的影响较大, 并联电阻影响较小。而且, 随着等效串联电阻越大, 并联电阻越小, 填充因子下降越快, 进而影响模块转换效率。

5 结束语

根据物理机制的光伏电池数学表达式, 在满足工程精度条件下简化处理光伏模块模型。同时建立了基于 PSM 软件的仿真模型。对其模拟仿真结果和数据手册进行对比分析, 发现仿真结果和数据手册信息具有极好的相关性, 同时也证明了该仿真模型正确性和可行性。在 PSM 软件下建立的光伏模块仿真模型, 为下一步研究光伏并网逆变器受温度和光照强度影响的特性提供有效的仿真模型和依据^[6]。

参考文献

- [1] 王章权, 张超, 何湘宁. 基于 Pspice 模拟行为模型的光伏阵列建模 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 225—240.
- [2] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 233—243.
- [3] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 34—36.
- [4] Powersin Inc PSM User's Guide [Z]. USA: Powersin Inc, 2003.
- [5] Sharp. NU-SOE3E Single-Crystalline Silicon Photovoltaic Module with 180W Maximum Power Datasheet [Z]. 2005.
- [6] 戴训江, 晁勤. 太阳能光伏模块电气特性的数学建模与仿真 [J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 47—49.

作者简介:

刘俊杰 (1986) 男, 汉族, 在读硕士研究生, 研究方向为光伏发电及其并网技术。
(收稿日期: 2010—10—12)

基于阻抗源的单相光伏并网系统研究

李 杨¹, 谢 柱², 郑连清²

(1 重庆市电力公司江北供电局, 重庆 401147; 2 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要:近年来太阳能并网发电系统得到广泛应用, 并网逆变器是系统核心部件, 系统中逆变器多采用多级式结构。采用阻抗源代替 DC/DC 升压装置, 在升压的同时稳定逆变桥直流侧电压, 保证后级逆变器的稳定工作, 使并网电流相位严格跟踪电压相位, 实现单位功率因数的并网。由于阻抗源不含开关管, 允许桥臂直通短路状态的出现, 消除了死区时间, 降低成本的同时减小了并网电流的谐波畸变, 改善了系统输出。采用文献 [1] 中的光伏阵列模型, 利用改进的电导增量法实现最大功率点, 解决跟踪速度及精度的矛盾, 证明基于阻抗源的单相光伏并网系统的可靠性。

关键词: Z 源型逆变器; 并网; 功率点跟踪 (MPPT); 光伏阵列

Abstract: In recent years the grid-connected photovoltaic (PV) system has been widely used. Grid-connected inverter is the key component of the system. In the system, most of the inverter adopts the hierarchical structure which simplifies the system control but reducing the system efficiency. The impedance source is adopted to replace the DC/DC device. It boosts and stabilizes the DC link voltage. The phase current follows grid phase voltage strictly in unity power factor. The Z-source does not contain the switch tubes and the switch tubes in the same arm can conduct at the same time so it can reduce the costs, eliminate the dead-zone time and reduce the harmonic distortion. Using the photovoltaic array model in reference [1], the maximum power point tracking (MPPT) and the grid-connected operation in unity power factor are achieved. It proves the reliability of single-phase grid-connected photovoltaic system based on Z-source.

Key words: Z-source inverter; grid-connected; maximum power point tracking (MPPT); photovoltaic array

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0009-05

0 引 言

近些年太阳能作为可靠能源得到广泛应用。太阳能并网发电系统以其机动灵活、转换效率高的优势, 成为太阳能利用的主要形式之一。由光伏阵列特性可知, 为增大其输出功率, 须使阵列电压稳定在最大功率点电压附近, 实现最大功率点跟踪 (maximum power point tracking MPPT)。利用改进的电导增量法进行仿真研究, 实现 MPPT。为降低成本提高效率和系统可靠性, 采用阻抗网络代替 DC/DC 变换器, 实现升压和稳定逆变器直流侧电压的功能, 保证后级逆变器的稳定工作。为尽可能地将光伏阵列输出的电能

送上电网, 采用单位功率因数的并网方式, 使并网电流相位严格跟踪并网电压相位。通过仿真研究一套基于阻抗源的单相光伏并网系统, 实现 MPPT、升压和逆变并网功能, 证明系统可靠性。

1 主电路结构及控制策略

控制系统的目的是最大可能地将光伏阵列输出的直流电转化为交流电, 并通过对电流幅值、频率、相位的控制, 实现单位功率因数的并网。系统主电路结构框图如图 1, 控制结构框图如图 2。

控制系统有 3 个闭环结构^[2-4]: 交流并网电流环、Z 源电容电压环和光伏阵列电压环。交流并网电

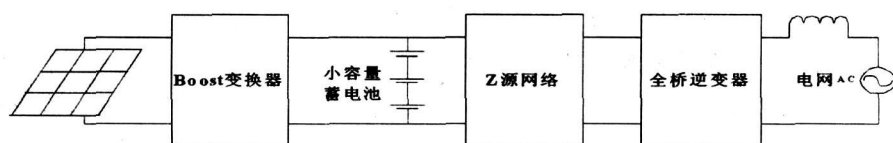


图 1 主电路结构框图

基金资助项目: 重庆市自然科学基金 (CSTC 2006BB2218)

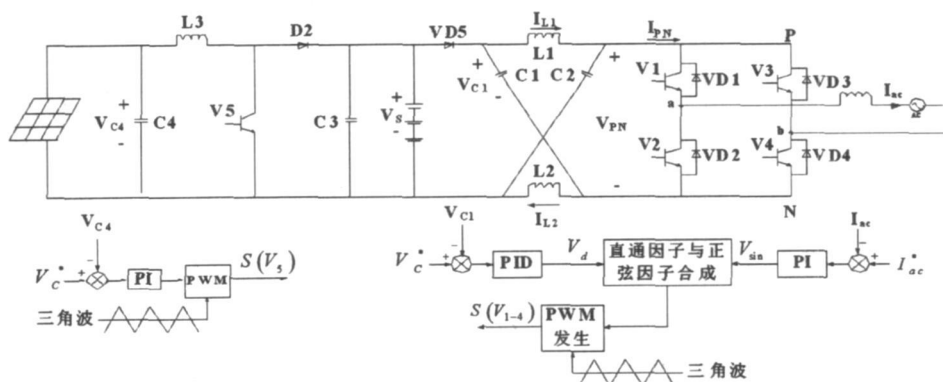


图 2 Z源并网逆变器控制结构框图

流闭环实现并网电流对电网电压的相位跟踪; Z源电容电压环稳定 Z源电容电压; 光伏阵列电压环控制其输出电压, 实现最大功率点跟踪。并网电流环正弦指令的正弦量为与电网同相的单位正弦信号, 幅值量利用光伏阵列功率计算得到。采用简单升压控制方法实现 Z源网络的升压功能^[5-7]。小容量蓄电池起到稳定电压的作用。

2 最大功率点跟踪

为增大光伏阵列能量输出, 需进行最大功率点跟踪, 常用的电导增量法通过比较光伏阵列的瞬时电导及其变化量判断跟踪方向, 步长设置、跟踪速度和精度之间存在矛盾。下面尝试对经典电导增量法进行改进, 设置步长为 $K |dP/dU|$ 由开路电压比例系数法得到启示, 最大功率点电压约为开路电压的 0.76 倍, 尝试先设定光伏阵列电压为此电压, 再利用电导增量法以动态步长继续跟踪。跟踪流程图如图 3 所示。

图 1 中 Boost 变换器用于跟踪最大功率控制。利用文献 [1] 封装好的光伏阵列电路进行 MPPT 仿真, 电路如图 4 所示。仿真中设置初始环境为标准测试条件 (STC: 光照 1000 W/m^2 , 温度 25°C)。 $t=0.5 \text{ s}$ 时环境条件阶跃变化为标称温度条件 (NOCT: 光照 800 W/m^2 , 温度 48°C), $t=1 \text{ s}$ 时环境条件阶跃变化为任意条件 (光照 900 W/m^2 , 温度 40°C), 光照和温度变化曲线和对应的光伏阵列输出曲线如图 4 所示。

仿真开始后控制系统设置光伏阵列电压为 0.76 倍开路电压 (76 V), 通过电导法搜寻最佳工作点, 0.1 s 后基本稳定。电压波动幅度为 0.1 V, 电流波动幅度小于 0.05 A, 功率波动太小, 可忽略。在 0.5 s 和 1 s 环境发生阶跃变化时, 控制系统能快速跟踪并

寻找到新的最大功率点, 很快进入稳态。

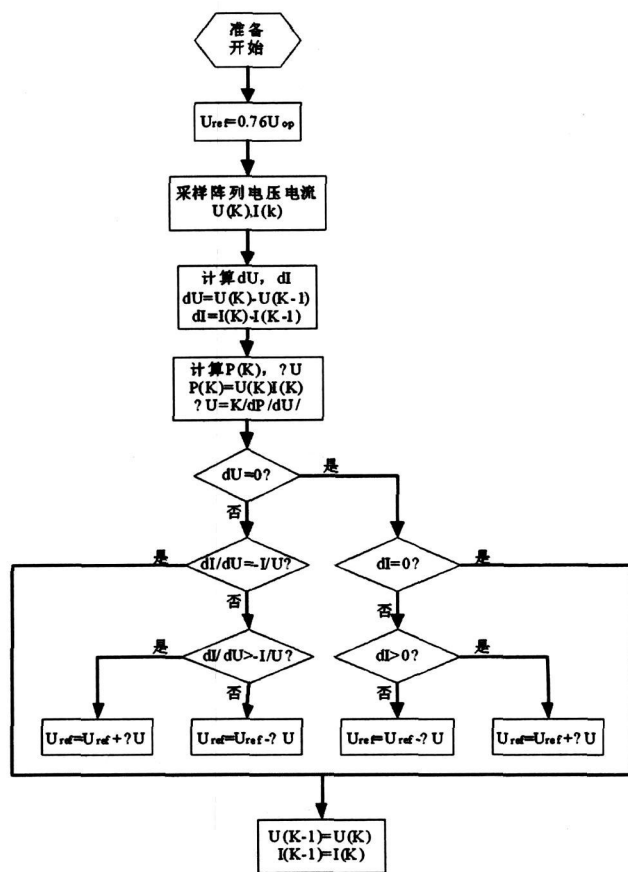


图 3 变步长电导增量法控制流程图

3 系统仿真

根据系统主电路结构、各个闭环控制策略和改进的电导增量法, 对整套系统进行仿真。仿真中采用峰值 310 V, 频率 50 Hz 的正弦交流电压源作为等效电网, $t=1 \text{ s}$ 时环境条件发生阶跃变化, 稳定逆变器直流侧电压于 630 V。设置仿真条件及参数如下。

环境 1: 光照强度 966 W/m^2 、温度 25°C ;

环境 2: 光照强度 600 W/m^2 、温度 48°C ;

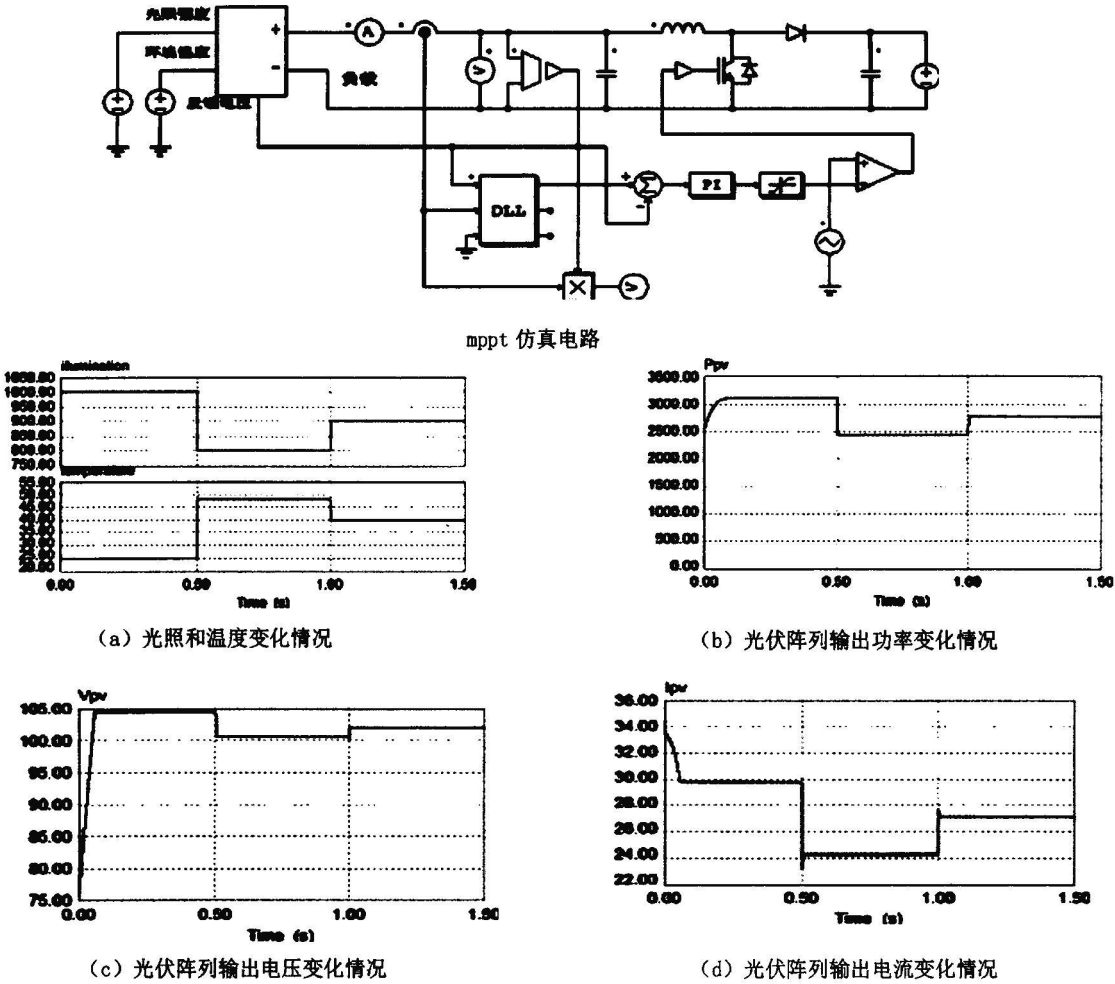


图 4 仿真电路及光伏阵列输出特性

输入电压: 100 V 至 105 V;
电网频率: 50 Hz 峰值 310 V;
逆变桥直流侧电压: 630 V DC
Z源电容电压: 368 V DC 波动幅度 3%;
开关频率: 10 kHz
光伏阵列输出电容: $C_{pv}=220\text{ }\mu\text{f}/200\text{ V}$;
并网电感: $L_{ac}=9\text{ mH}/30\text{ A}$;
Z源电容: $C=2\text{ }000\text{ }\mu\text{f}/600\text{ V}$;
Z源电感: $L=8\text{ mH}/60\text{ A}$;
输入二极管: 反向耐压 额定电流 (350 V /70 A)
开关管: 反向耐压 额定电流 (800 V /25 A)
并联二极管: 反向耐压 额定电流 (800 V /25 A)
表 1 为稳态时系统重要的电气参数, 可与仿真结果对照。其中 E_g 为等效电网电动势峰值; I_{ic} 为交流并网电流峰值; T_{PWM} 为开关周期; T_s 为直通状态调制周期; V_{PN} 为非直通状态母线电压; ω 为基波角频率; V_c 为稳态时 Z源电容电压; V_{pv} 为光伏阵列输出电压; I_{pv} 为光伏阵列输出电流; I_L 稳态时为 Z源电感电

流。

表 1 单相 Z源并网逆变系统电气参数

参数	数值	参数	数值
E_g	310 V	I_{ic}	13 65 A /8 27 A
T_{PWM}	0.1 ms	T_s	0.05 ms
V_{PN}	630 V	ω	314 rad
V_c	390 V	V_{pv}	104 V
I_L	20 A /12.4 A	I_{pv}	29 A /18 A

3.1 并网电流

环境 1 下, 稳态时并网电流和电网电压波形及频谱分析如图 5、图 6。t=1 s 环境阶跃变化时并网电

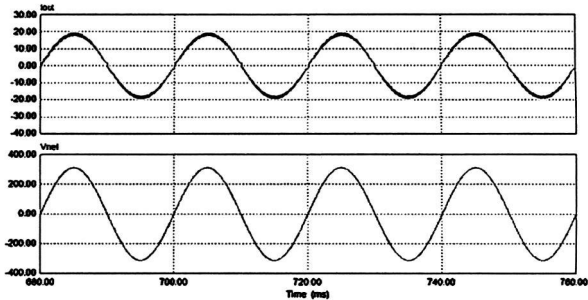


图 5 环境 1 下稳态时并网电流时域波形

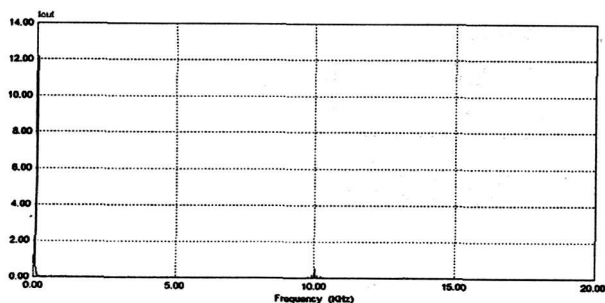


图 6 环境 1 下稳态时并网电流 FFT 波形

流和电网电压波形如图 7。环境 1 下稳态时, 并网电流和电网电压基本同相, 并网电流峰值 19.3 A, 在开关频率 10 kHz 及边频带处存在较小的谐波, 并网功率 2 991.5 W。环境阶跃变化时, 并网电流大小发生变化, 稳定后电流峰值 11.7 A, 并网功率为 1 813.5 W。

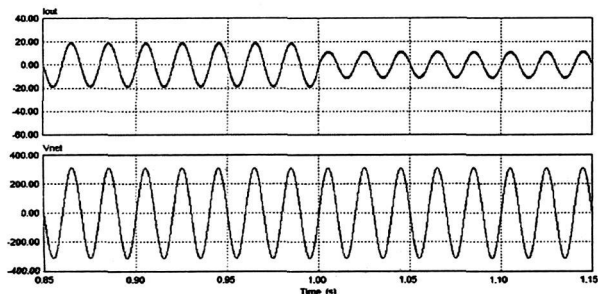


图 7 环境阶跃变化时的并网电流波形

3.2 光伏阵列输出

光伏阵列输出电压、电流、功率波形如图 8—图 10。环境 1 时, 光伏阵列电压从 0.76 倍开路电压追踪最大功率点电压, 在 56 ms 左右稳定于 104 V。环境阶跃变化时, 光伏阵列重新开始追踪最大功率点电压, 10 ms 以后调整稳定于 100 V。环境 1 下稳态时, 输出电流 28.7 A, 功率 3 000 W; 环境 2 下稳态时, 输出电流 18.2 A, 功率 1 820 W。

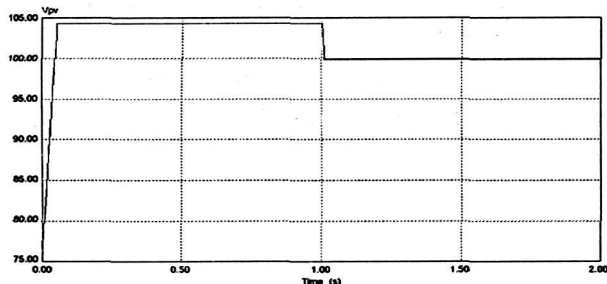


图 8 光伏阵列输出电压

3.3 逆变桥交流侧电压

环境 1 下逆变桥交流侧电压波形如图 11。环境发生阶跃变化导致阻抗网络输入电压变化时, 逆变桥直流侧电压波形如图 12。逆变桥交流侧电压的非零

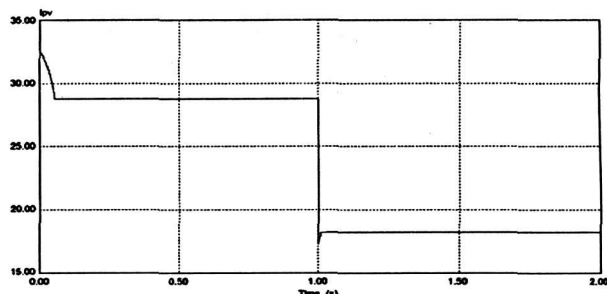


图 9 光伏阵列输出电流

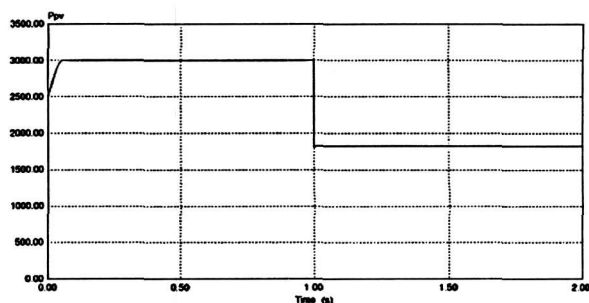


图 10 光伏阵列输出功率

值存在波动, 波动频率 100 Hz 由非直通状态时直流母线电压的波动引起。环境阶跃变化时, 逆变桥交流侧电压对应直流侧电压变化。

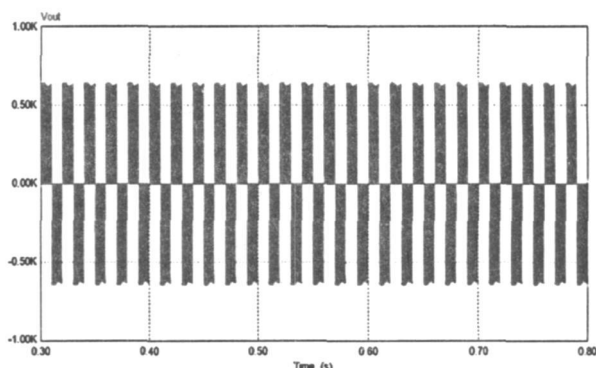


图 11 环境 1 下逆变桥交流侧电压

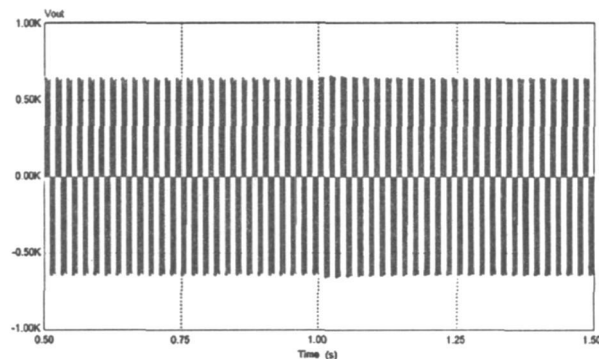


图 12 环境阶跃时的逆变桥交流侧电压

4 结 论

在常规并网逆变器中引入阻抗网络代替传统的

DC/DC 升压变换器, 形成 Z 源型逆变器; 利用文献 [1] 的光伏阵列电路模型结合改进的电导增量法进行 MPPT 仿真; 设计了整套系统的控制策略, 对一套功率为 3 000 W 基于 Z 源的单相光伏并网系统进行仿真, 并对仿真波形进行了分析。证明改进的电导增量法跟踪速度和跟踪精度有所提高, 基于阻抗源的单相光伏并网装置节约成本的同时改善了系统的输出, 并增加了系统的可靠性。

参考文献

- [1] 郑连清, 谢柱. 基于特性参数的太阳能电池和光伏阵列建模研究 [J]. 低压电器, 2010(8): 21—25.
- [2] 吴理博. 光伏并网逆变系统综合控制策略研究及实现 [D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2006.
- [3] 丁新平. Z 源逆变器关键技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2007.
- [4] 蔡磊. Z 源逆变器并网应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学

硕士学位论文, 2008.

- [5] Jong-Hyoung Park, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun. A Control Strategy for the Grid-connected PV System Using a Z-Source Inverter [C]. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December.
- [6] Poh Chiang Loh, Vilathgamuwa D. M., Yue Sen Lai, Geok Tin Chua, Yunwei Li. 2004. Pulse-width Modulation of Z-source Inverters [J]. Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record Oct. 2004.
- [7] 张超, 何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 51—53.

作者简介:

李 杨 (1962), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化及电力电子技术的应用。

(收稿日期: 2010—09—15)

(上接第 5 页)

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7—11.
- [2] IBM 论坛. 2009, 点亮智慧的地球 [EB/OL] [D]. <http://www-900.ibm.com/cn/forum2009/wisdom.shtml>
- [3] Giuseppe Parise. A New Approach to Calculate the Decaying AC Contributions to Short Circuit [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31(1): 214—221.
- [4] 赵敏. 基于电流变化率的电网短路保护原理 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 105—108.
- [5] 王建元, 师旭, 师耀林, 等. VB 与 Matlab 混合编程在电力系统短路计算中的应用 [J]. 电网技术, 2007, 32(2): 143—146.
- [6] 罗庆跃, 李晓明. 变结构模型短路电流计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 77—80.
- [7] 邵玉槐, 李肖伟, 程晋生. REI 等值法用于多节点配电系统短路电流计算的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 64—67.
- [8] 范忠, 张慧媛. 基于 GIS 数据平台的配电网短路电流计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 76—79.
- [9] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 103—106.
- [10] 刘波, 张焰, 陈煜. 基于 GA2 改进 BP 神经网络算法在大电网短路电流预测中的应用 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 43—46.
- [11] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 66—70.

- [12] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [13] 王文成. 神经网络及其在汽车工程中的应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [14] Carson W. Taylor 著, 王伟胜译. 电力系统电压稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [15] Specht D. F. A General Regression Neural Network [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1991, 2(6): 568—576.
- [16] 张际先, 宓霞. 神经网络及其在工程中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [17] 冯志鹏, 宋希庚, 薛冬新, 等. 基于广义回归神经网络的时间序列预测研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(2): 106—109.
- [18] 谷志红, 牛东晓, 王会青. 广义回归神经网络模型在短期电力负荷预测中的应用研究 [J]. 中国电力, 2006, 39(4): 11—14.
- [19] 王尔智, 赵玉环. 电力网络灵敏度分析与潮流计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [20] 万千云等. 电力系统运行实用技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介

潘 睿 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

刘俊勇 (1963), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。研究方向为电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期: 2010—10—06)

基于改进遗传算法的可用传输能力对比研究

赵 磊, 李华强, 康 勇

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:根据可用传输能力(ATC)问题求解的特点,构建了基于标准遗传算法的ATC优化模型。目标函数为在满足系统的静态安全约束条件的基础上,使受电区域所有负荷节点有功功率增量累加达到最大。并通过对传统遗传算法的改进,采用了自适应遗传算法,并引入了混沌理论,加入了三角函数选择算子,有效改善了ATC的求解特性。最后,以IEEE-30节点系统为例,对遗传算法的性能进行剖析,验证了文中所建模型和算法的有效性。

关键词:可用传输能力;自适应遗传算法;混沌理论;静态安全约束;三角函数选择算子

Abstract: According to the features of available transfer capacity (ATC), an ATC optimization model is constructed based on standard genetic algorithm. Considering the static safety constraints of power system, the objective function is the incremental cumulative maximum to all load node active power of the power-receiving area. Through improving the traditional genetic algorithm, the adaptive genetic algorithm and chaos theory are used, and using the trigonometric function selection operators the solution features of ATC are improved. At last, taking IEEE-30 bus system for example, the performance of genetic algorithm is analyzed, and it proves that both the proposed model and method are effective.

Key words: available transfer capability (ATC); adaptive genetic algorithm; chaos theory; static safety constraints; trigonometric function selection operator

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0014-05

全世界范围内的电力市场^[1]自由竞争向充分合理的利用现有的电力系统发输电资源提出了更高要求。输电网络大规模的互联使得系统的电力资源共享成为可能,从而在很大程度上满足了电力系统运行的灵活性、可靠性和经济性的要求。在这种新环境下,需要得到一种可靠的、准确显示电力网络传输水平的电力市场交易的ATC信息。因此,电力市场的引入使得利用现有的输电网络来输送更多的电力以最大限度地降低成本越来越成为必要,现代电力系统的特点和要求以及电力市场的发展决定了对输电网可传输能力的计算必须快速、准确。

目前,计算ATC的方法主要包括:直流潮流法(LPF)^[2],连续潮流法(CPF)^[3],最优潮流法(OPF)^[4]以及基于交流灵敏度法^[5]等。LPF利用功率传输分布因子(PTDF)的概念,优点是计算速度快,缺点是无法考虑无功和电压影响,很难保证计算的准确性。CPF从基准潮流出发,计算系统的临界最大潮流点,优点是能够考虑多种系统约束,缺点是功率增长按指定方向变化,没有考虑系统无功和电压的分布优化,可能会使计算结果略微保守,并包括了重复预测和校正的过程,计算时间长,不能快速有效地获得

ATC的值。基于OPF的ATC计算方法能方便地考虑各种物理约束,但不易考虑中间控制过程。

传统优化算法在求解ATC这类问题时,也存在一些不足:鲁棒性差,采用单一搜索机制,易陷入局部最优。近年来,智能算法在计算大规模复杂问题方面有突出表现:鲁棒性好,采用并行随即搜索策略,更能找到全局最优解,结果更符合实际情况。其中遗传算法、粒子群算法等已经成功地被引入了ATC的研究领域^[6]。针对智能算法对复杂问题常常出现的早收敛和收敛性能差等缺点,在种群初始化,选择、交叉和变异环节进行改进,通过对比验证了模型的有效性。

1 ATC的数学模型

1995年,北美电力可靠性委员会给出了可用传输能力的定义:可用传输能力是指在现有输电合同基础上,实际物理输电网络中剩余的、可用于商业使用的传输容量。

数学表达式: $ATC = TTC - TRM - ETC - CBM$

式中,TTC是最大输电能力;TRM是输电可靠性裕度;ETC是现存输电协议;CBM是容量效益裕度。

计算 ATC 首先要计算 TTC。TTC 是指电力系统在没有热过载, 发电机出力没有越限, 节点电压没有越限, 系统在各种运行状态下有足够的阻尼以保持系统安全和稳定的前提下, 指定输电线路上的最大传输能力。而 TRM、CBM 这两项裕度通常被忽略。因此, 确定性 ATC 就是在系统某一确定的运行状态下, 保持非送电区域的发电机有功出力, 和非受电区域的有功负荷均不变, 使送电区域的发电机有功出力与受电区域的有功负荷同时增加, 在不违反系统约束情况下的区域之间最大传输容量。

由此可见, ATC 的计算式在满足一定约束条件下, 求解两个区域的最大传输功率, 相当于一个约束优化求极值问题。

1.1 潮流约束方程

研究基于静态安全约束条件下的 ATC 问题^[7], 先考虑潮流约束等式, 即节点有功功率和无功功率的平衡约束。

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i - V_i \sum_{j \in n} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_i - V_i \sum_{j \in n} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, P_i 、 Q_i 为节点 i 的注入有功功率、无功功率; V_i 、 V_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电导、电纳和电压相角差; n 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合。

1.2 变量约束

ATC 在实际计算中应该同时考虑系统的两种运行状态: 正常运行状态和预想事故状态。在这两种状态下, 系统运行约束条件应该包括线路热过载约束、节点电压约束、发电机有功无功出力约束、动态稳定约束和暂态稳定约束。而在实际中, ATC 受制于动态稳定约束和暂态稳定约束的情况较少, 因此采用只包含潮流等式约束、发电机有功无功出力约束、节点电压约束、负荷功率约束和线路热过载约束的静态安全约束条件。

$$\begin{aligned} P_{Gmin} &\leq P_G \leq P_{Gmax} & Q_{Gmin} &\leq Q_G \leq Q_{Gmax} \\ P_{Lmin} &\leq P_L \leq P_{Lmax} & Q_{Lmin} &\leq Q_L \leq Q_{Lmax} \\ U_{imin} &\leq U_i \leq U_{imax} \\ |G_{ij}^* U_i^2 - U_i U_j (G_{ij}^* \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})| &\leq S_{ij}^{max} \end{aligned}$$

其中, P_G 、 Q_G 分别表示供电区域上发电机的有功出力和无功出力; P_L 、 Q_L 分别表示受电区域负荷的有功功率和无功功率; U_i 表示节点电压; S_{ij}^{max} 表示第 i 、 j 节点直接接之路的热稳定极限。

1.3 目标函数

ATC 目标函数有两种形式: λ 参数形式和功率累加形式^[11-12]。文中采用的目标函数为受电区域内的所有负荷的有功功率累加之和为最大。

$$ATC = \max_{\sum_{i \in R} P_{Li}} \quad (2)$$

其中, R 表示受电区域所有负荷节点数; P_{Li} 为受电区域所有负荷的有功功率。

采用罚函数的形势处理约束优化问题, 其基本思想是将约束优化问题变为无约束优化问题来求解节点的电压越限, 以及发电机无功越限和线路潮流过载约束, 以罚函数的方式即将目标函数和约束函数重新组合得到的函数来定义并且优化原目标函数。目标函数为

$$ATC = \max_{\sum_{i \in R} P_{Li}} \sum (P_{Li}) + C_1 \sum (\Delta U_i)^2 + C_2 \sum (\Delta Q_{Gi})^2 + C_3 \sum (\Delta S_{ij})^2 \quad (3)$$

又遗传算法不需要目标函数的可微性, 可以不必加平方处理^[8]。可以改为

$$ATC = \max_{\sum_{i \in R} P_{Li}} \sum (P_{Li}) + C_1 \sum (\Delta U_i) + C_2 \sum (\Delta Q_{Gi}) + C_3 \sum (\Delta S_{ij}) \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta U_i &= \begin{cases} U_{imin} - U_i & U_i < U_{imin} \\ 0 & U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \\ U_i - U_{imax} & U_i > U_{imax} \end{cases} \\ \Delta Q_G &= \begin{cases} Q_{Gmin} - Q_{Gi} & Q_{Gi} < Q_{Gmin} \\ 0 & Q_{Gmin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gmax} \\ Q_{Gi} - Q_{Gmax} & Q_{Gi} > Q_{Gmax} \end{cases} \\ \Delta S_{ij} &= \begin{cases} 0 & |S_{ij}| \leq S_{ij} \\ |S_{ij}| - S_{ij} & |S_{ij}| > S_{ij} \end{cases} \end{aligned}$$

其中, ΔU_i 为节点电压越限之和; ΔQ_G 为发电机节点无功功率越限之和; ΔS_{ij} 为线路的潮流越限之和。

2 应用于 ATC 计算的遗传算法改进研究

2.1 基于改进遗传算法的 ATC 计算

遗传算法^[13]作为一种群优的迭代算法, 随着迭代次数的增加, 遗传算法的种群会被具有某种“染色体基因”特征的个体充斥, 容易出现早熟收敛, 导致陷入局部最优问题。

另外遗传算法的参数中, 交叉概率和变异概率的选择是影响遗传算法性能的关键所在, 直接影响算法

的收敛性。针对以上两点不足,在遗传算法中引入混沌运动,利用混沌运动中的“遍历性”、“随机性”和“规律性”来改善遗传算法的收敛特性;选择操作中选用基于三角函数的选择算子,使算法在保持种群多样性和克服早熟方面具有良好的性能;并在交叉、变异环节引入自适应遗传算法的特性,使交叉概率和变异率能够随着适应度自动改变,有效改善遗传算法爬坡速度。

2.1.1 编码

编码是初始化群体过程中的关键步骤。常见编码方式有二进制编码和十进制编码。

二进制编码表示的变量范围大,适合于表示离散变量,而对于连续变量,只要群体总数足够多,就可以达到一定的精度。

采用十进制编码方式,即个体的每个基因值用变量范围内的十进制数表示,个体的编码长度等于其控制变量的个数。基于前面的数学模型,文中个体染色体编码 X 可以表示为

$$X = [P_G / P_L, Q_L] = [P_{G1}, P_{G2} \cdots P_{Gi} / P_{L1}, Q_{L1} / P_{L2}, Q_{L2} / \cdots / P_{Lk}, Q_{Lk}]$$

式中, i, k 分别为供电区域的发电节点数和受电区域的负荷节点数。

2.1.2 混沌初始化种群

目前,对混沌^[9]尚无严格的定义,一般将由确定性方程得到的具有随机性的运动状态称为混沌。Logistic映射就是一个典型的混沌系统,迭代公式如下。

$$Z_{i+1} = \mu \times Z_i \times (1 - Z_i) \quad (5)$$

$$i=0, 1, \cdots, \mu[2, 4]$$

式中, μ 为控制变量,当 $\mu=4$ 且 $0 \leq Z_0 \leq 1$ 时, Logistic 完全处于混沌状态。

设 ATC 问题中受电区域有功负荷的个数为 n 则种群中染色体的长度也为 n 且设置种群规模为 m ,混沌扰动范围为 $[-\beta, \beta]$,随即产生一个 n 维,每个分量数值在 $0 \sim 1$ 之间的向量 $Z_1 = (Z_{11}, Z_{12}, \cdots, Z_{1n})$ 。根据式 $Z_{ij} = \mu \times Z_{(i-1)j} \times (1 - Z_{(i-1)j})$ ($j=1, 2, \cdots, \mu=4; i=2, 3, \cdots, N$) 得到 $N(N > m)$ 个 Z_i 向量,即 $Z_1, Z_2, \cdots, Z_N$ 将 Z_i 的各个分量载波到优化变量的扰动范围,根据式 $x_{ij} = -\beta + 2 \times \beta \times z_{ij}$ ($j=1, 2, \cdots, N$) 可得到第 i 条染色体的第 j 个基因变量值 x_{ij} 这样产生 N 条染色体,根据目标函数和约束条件,从 N 条染色体中选择性能较好的 m 条染色体作为初始种群。

2.1.3 基于三角函数的选择操作

选择算子模拟自然选择中的优胜劣汰机制,它建立在适应值评价的基础上,适应值高的个体,被选中的概率也越大。把适应值进行了变换为三角函数值^[10]的处理,并与轮盘赌策略相结合,克服了后者对适应值非负的要求。

把适应度函数值 f 等比例映射到值为 $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$,通过求 $\sin \theta$ 最终把 f 映射到 $P_i \in [0, 1]$,经过正

弦选择算子,与个体对应的正弦值为 $P_i = \sin(\frac{\pi}{2} \cdot$

$$\frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}), \text{记 } \theta = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, \text{当 } f_i = f_{\min} \text{ 时, } \theta = 0; \text{当}$$

$$f_i = f_{\max} \text{ 时, } \theta = \frac{\pi}{2}; \text{当 } f_i \in [f_{\min}, f_{\max}] \text{ 时, 都有 } \theta \in [0,$$

$$\frac{\pi}{2}], \text{所以 } P_i \in [0, 1]。 \text{设同一种群内的任意两个进}$$

化个体 x_i 和 x_j 的适应值 f_i 和 f_j 满足: $f_i < f_j$ 因为正弦

函数 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 是在单调递增的,容易得到 $P_i < P_j$ 可见,

正弦选择算子能确保适应值较优的个体具有较高的被选择概率。

采用了三角函数算子和轮盘赌策略相结合的方法,令 $PP_i = \sum_{j=1}^i P_j$, 其中 PP_i 为累加概率, P_i 为个体的选择概率,其计算公式为

$$P_i = \frac{\text{fitness}(x_i)}{\sum_{i=1}^{NP} \text{fitness}(x_i)} \quad (6)$$

其中 $\text{fitness}(x_i)$ 为个体的适应。共转轮 NP 次 (NP 为种群的个体数)。每次转轮时,随即产生 0 到 1 之间的随机数,当 $PP_{i-1} \leq r \leq PP_i$ 时选择个体 i

由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性,为了防止最优个体在进化过程中被淘汰,同时采用了最优保存法,使适应度高的最优个体跳过交叉和变异而直接进入下一代,该方法的实施保证了算法的收敛。

2.1.4 交叉操作

交叉是指按一定的概率选择参与交叉的父代,把父代个体中的部分基因加以替换重组而成新的个体。交叉概率的取值是影响遗传算法的关键所在,直接影响算法的收敛性,交叉概率越大,新个体产生的速度越快。同时,遗传模式被破坏的可能性也越大;交叉概率越小,搜索过程缓慢。

采用基于方向的交叉,即

$$\begin{aligned} x' &= \alpha \cdot x + (1-\alpha) \cdot y \\ y' &= (1-\alpha) \cdot x + \alpha \cdot y \end{aligned} \quad (7)$$

式中, α 为事先给定或者随即产生的一个数。

2.1.5 变异操作

变异操作是遗传算法中的一个重要操作, 它模拟生物进化过程中偶然的基因突变。根据均匀分布选择出要变异的 $l = P_m \cdot N$ 个个体 (P_m 为变异概率, N 为种群大小), 然后对选中个体进行变异。

设父代染色体 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 经变异后子代染色体为 $X' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n)$ 。

采用均匀变异, 即分别用符合某一范围内均匀分布的随机数, 以概率 P_m 来替换个体编码串中各个基因上的原有基因值。

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i \quad i \neq k \\ x'_i &= \alpha_i \quad i = k \end{aligned}$$

其中, k 为变异点; α_i 是对应变量值域之间的随机数。

2.1.6 自适应遗传操作

在传统遗传操作基础上进行改进, 引入自适应遗传算子, 即交叉概率和变异概率随适应度自动改变。当种群各个体适应度趋于一致或者局部最优时, 使交叉概率和变异概率两者相加, 而群体适应度比较分散时, 使交叉概率和变异概率减少。

同时, 对于适应值高与群体平均适应值的个体, 对应于较低的交叉概率和变异概率, 使该个体得以保存进入下一代; 而低于平均适应值个体, 相对应于较高的交叉概率和变异概率, 使该个体被淘汰。因此, 自适应遗传算法能够提供相对某个解的最佳交叉概率和变异概率。

自适应遗传操作中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的计算公式如下。

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1 (f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3 (f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $f_{\max}$ 为群体中最大适应值; f_{avg} 为群体中平均适应值; f 为要交叉的两个个体中交叉的适应度值; f' 为要变异个体适应值; k_1, k_2, k_3, k_4 为常数。

3 算例分析

为了验证改进后的遗传算法相比于标准遗传算

法应用于 ATC 研究的有效性, 对 IEEE-30 节点系统进行算例分析。该算例系统共有 6 台发电机, 41 条线路, 划分为 3 个区域, 每个区域有两个发电节点, 区域 1 包括节点 1~9、11、28; 区域 2 包括节点 12~20、23; 区域 3 包括节点 10、21、22、24~27、29、30; 具体参数可参考文献 [14]。

表 1 遗传参数设置

遗传操作	标准算法	改进算法
编码方式	十进制	十进制
选择方式	比例选择	三角函数选择算子
最大迭代次数	200	150
种群数	35	35
交叉方式	实值交叉	实值交叉
交叉概率	0.85	$k_1=0.5, k_2=0.9$
变异概率	0.05	$k_3=0.02, k_4=0.05$
初始化群体	采用潮流校验初始群体	混沌初始化群体
最优保留	采用	采用

罚因子的设定: 节点电压越限的罚因子为 0.6, 线路的潮流越限的罚因子也为 0.6, 发电节点的无功越限罚因子为 0.8。

分别用标准遗传算法和改进遗传算法计算区域 1→2、1→3 的 ATC, 并将各自 20 次计算值的平均值作为最终 ATC 值。篇幅所限, 其他区域间的传输能力不再计算, 方法一样。

表 2 计算结果对比

区域	标准遗传算法 ATC / MW	改进遗传算法 ATC / MW
1→2	110.68	119.32
1→3	101.55	110.28

表 3 迭代时间

算法	计算 1→3 ATC 时间 / s
标准遗传算法	238.65
改进遗传算法	136.12

图 1 为计算 ATC_{1→3} 为例的遗传算法收敛特性曲线。

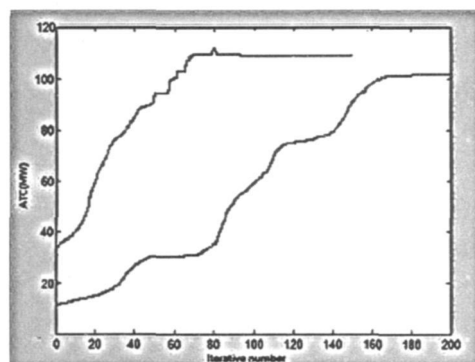


图 1 遗传算法收敛曲线

根据图 1 所示,标准遗传算法在第 50 代至 70 代区间段,110 代至 130 代区间段,均出现了曲线近乎水平的情况,经过数次迭代之后,标准遗传算法才跳出局部收敛区域,继续向最优解方向搜索。导致这种情况出现的原因主要是交叉概率过小,致使搜过过程缓慢。然而,交叉概率过大时遗传模式被破坏的可能性也越大,使得具有高适应度的个体结构很快就会被破坏;加入自适应因子的遗传算法在这方面得到很大改进,特性曲线上改进遗传算法从 20 代开始进入阶梯状上升,可见搜索效率大大提高,进入收敛区域的时间大大缩短,并且计算结果和迭代时间较前者有了很大进步。

改进后的遗传算法在种群初始化过程中引入混沌运动,利用混沌运动的“随机性”、“遍历性”的特点,并引入了三角函数的选择算子,改善种群质量,大大提高了爬坡速度,如图 1 所示,在前期的搜索过程中,改进遗传算法的曲线斜率远远大于标准遗传算法的曲线斜率。通过对曲线的观察可以发现,改进遗传算法克服局部极值能力强,不会局限于某个局部极值区域。

4 结 论

运行标准遗传算法和改进遗传算法对电力系统的可用输电能力进行了计算。目标函数为最大化受电区域的负荷节点的有功之和。通过对 IEEE-30 节点系统进行了测试,验证了所建的 ATC 优化模型和算法改进的有效性。

1) 考虑了电压发电机有功无功出力约束、负荷功率约束、节点电压约束、线路热过载约束,使 ATC 模型更加完善。

2) 在遗传算法的基础上,引入了混沌因子,有效改善了种群的质量,大大提高前期进化的效率。

3) 基于三角函数的选择操作,使选择环节中适应值高的个体更容易被选择,保证了性状优良个体尽可能保存下来,改良了种群,避免了陷入早熟收敛。

4) 在交叉变异环节上,加入了自适应算子,对算法搜索速度上起到了加速的作用。同时保证了基因不被破坏的可能性。

5) 进行比较后,改进后的遗传算法在计算结果和迭代时间上较前者有了很大提高,并且鲁棒性良好,克服局部收敛能力强。

参考文献

- [1] 曹建权,许琦,等. 电力市场下电网可用输电能力的研究[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(5): 39—41.
- [2] LANDGREN G L, TERHUNE H L, ANGEL R K. Transmission Interchange Capability Analysis by Computer[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1992, 91(6): 748—754.
- [3] 王成山,李国庆,余贻鑫,等. 电力系统区域间功率交换能力的研究(一):连续型方法的基本理论及应[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 23—26.
- [4] 汪峰,白小民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 35—40.
- [5] 程超,李华强,等. 可利用传输能力的快速计算[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 49—52.
- [6] B. Mozafari A. M. Ranjbar A. R. Shirani and A. Barkeseh. A Comprehensive Method for Available Transfer Capability Calculation in a Deregulated Power System[C]. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies(DRPT2004), Hong Kong 2004.
- [7] 潘雄,徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 86—91.
- [8] 李敏强,寇纪淞,等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [9] 李眉眉. 电力负荷混沌特性分析及其预测研究[D]. 成都:四川大学, 2004.
- [10] 郝国生,严玉若,等. 基于三角函数的遗传算法选择算子[J]. 江南大学学报, 2010, 9(2): 162—163.
- [11] 王国庆,沈杰,申艳杰. 考虑暂态稳定约束的可用功率交换能力计算的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 67—71.
- [12] 李国庆,李雪峰,沈杰,等. 牛顿法和内点罚函数法相结合的概率可用功率交换能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 17—23.
- [13] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [14] 潘雄. 电力市场的输电能力和主辅市场交易问题研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.

作者简介:

赵 磊(1984),男,硕士研究生,主要研究方向电压稳定及电压无功控制。

李华强(1965),男,教授,博士.从事电压稳定及无功优化问题研究。

(收稿日期:2010—09—10)

次同步谐振频率扫描法的电磁暂态仿真实现

杨帆¹, 康海燕², 伍文城¹, 郑勇¹, 丁君¹, 陈谦¹

(1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 频率扫描法是规划阶段分析串补系统是否存在次同步谐振风险快捷而有效的方法。借助 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件实现了频率扫描法。该实现方法具有技术门槛较低、所需输入数据低少、结果直观等优点, 可以快速分析在不同运行工况下串补系统发生次同步谐振的可能性。

关键词: 次同步谐振; 频率扫描法; 串联补偿; PSCAD/EMTDC

Abstract: During the early planning stage, frequency scanning is a rapid and highly effective method for subsynchronous resonance (SSR) analysis of the series compensated transmission network. The frequency scanning method for SSR analysis is carried out by a powerful electromagnetic time domain transient simulation program PSCAD/EMTDC. This implementation method has lower technical threshold, less requirements of input data and the direct-viewing result. This method provides a powerful tool to research the SSR instability in the series compensated power system under different operating conditions.

Key words: subsynchronous resonance; frequency scanning; series compensation; PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0019-04

串联补偿技术是一种提高电力系统稳定极限的经济有效的手段。串联补偿技术在带来巨大经济效益的同时, 也给系统运行带来了新的挑战。当串联补偿输电网络形成的电气谐振回路的固有频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补时 (其和等于同步频率), 二者就会彼此互激, 这种现象习惯上称为次同步谐振^[4] (subsynchronous resonance 缩写为 SSR)。第一起次同步谐振事故发生于 1970 年 12 月, 导致了在美国南加利福尼亚的 Mohave 发电厂汽轮发电机大轴损坏事故^[5]。之后不到一年的时间, 在 1971 年 10 月该电厂再次发生大轴损坏的同类事故。这两次事故的发生使人们第一次认识到了次同步谐振问题的严重性。

中国正处在电力发展的高峰期。为满足华北、东北地区经济发展对电力能源的需求, 中国将在“十二五”期间兴建多条的西电东送通道, 其中部分 500 kV 交流线路计划加装串联补偿装置。能否避免串补电容所带来的次同步谐振问题, 最大限度的提高线路功率传输能力, 将直接关系到电力系统运行的安全性和经济性。

常用的次同步谐振研究方法包括: 频率扫描法、复转矩系数法、特征值分析法和时域仿真分析法^[6, 7]。频率扫描 (frequency scanning) 法是分析系统是否存在次同步谐振风险最快捷而有效的方法。该

方法所需的原始数据较少, 不需要发电机组的轴系参数, 计算方法简单, 物理概念明确, 所得结果可以作为进一步精确分析次同步谐振问题的基础。

目前可用于实现频率扫描法的电磁暂态仿真软件主要有 EMTP 和 PSCAD/EMTDC 软件。其中 PSCAD 软件凭借其强大的图形化用户界面, 使用户能更方便地进行频率扫描法分析, 提高研究工作的质量和效率^[8, 9]。下面首先简要介绍频率扫描法的基本原理, 然后采用 PSCAD 软件对 IEEE 第二基准模型进行频率扫描, 通过对扫描结果的分析得到了一些有意义的结论。

1 用于 SSR 分析的频率扫描法

1.1 频率扫描法原理

频率扫描法是一种近似的线性方法。具体分析时, 需要研究的相关系统用正序网来模拟; 除待研究的发电机之外的网络中的其他发电机用次暂态电抗等值电路来模拟; 待研究的发电机用感应发电机等值电路来模拟, 如图 1 中的虚线部分所示, 其中的电阻和电感随频率而变化^[6]。

频率扫描法针对某一特定的频率, 计算从待研究的发电机转子后向系统侧看进去的等效阻抗, 即从图 1 的端口 N 向系统侧看进去的等效阻抗, 通常称该等

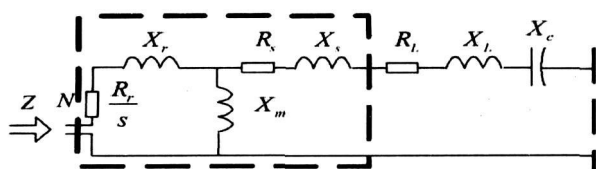


图 1 频率扫描法等值电路示意图

值阻抗为 SSR 等值阻抗;通过频率扫描,可以分别得到等值阻抗的实部(即 SSR 等值电阻)和虚部(即 SSR 等值电抗)随频率而变化的曲线,根据这两条曲线可以对次同步谐振的 3 个方面的问题(即感应发电机效应、扭振相互作用和暂态力矩放大作用)作出初步的估计。

1.2 频率扫描法判据

如果 SSR 等值电抗等于零(包括串联谐振点和并联谐振点两种情况,串联谐振点是指 SSR 等值电抗随频率增加由负到正的过零点,并联谐振点是指 SSR 等值电抗随频率增加由正到负的过零点)或等值电抗接近于零对应的频率点上的 SSR 等值电阻小于零,则可以确定存在感应发电机效应;如果 SSR 等值电阻在整个频率范围内都大于零,则不存在感应发电机效应。而等值电阻负值的大小则决定着电气振荡发散的速度。该电气振荡并不意味着会引起轴系的负阻尼振荡,但对电气设备而言,可能是不能容忍的。

如果 SSR 等值电抗跌折达到极小值的频率点与机组轴系扭振固有频率接近互补(考虑到计算分析与实际参数的误差,频率互补时记及 ± 3 Hz 的范围)并且跌折度(其定义见图 2)大于 5%,就有可能存在扭转相互作用或扭矩放大作用。如果 SSR 等值电抗达到极小值的频率点与机组轴系扭振固有频率的互补值相差大于 3 Hz 则可以排除暂态扭矩放大作用。

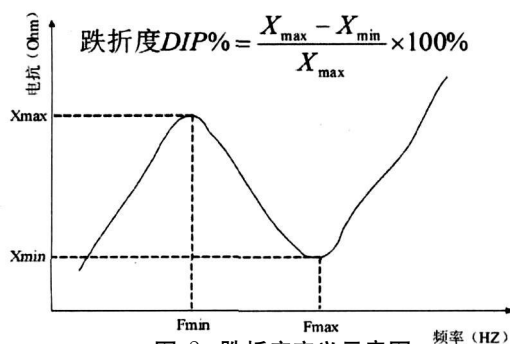


图 2 跌折度定义示意图

1.3 频率扫描法对模型的处理

待研究的系统用正序网络模拟。较短的传输线路用集中参数 RLC 模拟,较长传输线路用 π 形等值电路或分布参数模型表示。变压器用集中阻抗等值,

一般忽略电阻仅用集中电抗等值。

待研究的发电机用感应发电机等值电路模拟,其电阻和电感都随频率而变化。网络中的其他发电机用发电机短路等值电路(即次暂态电抗)模拟。由于待研究发电机及其升压变压器的特性对于频率扫描结果有很大影响,而变压器的电抗比发电机暂态电抗大得多,所以变压器的电抗表示的越准确越好。

电力系统中的负荷能够改变系统阻尼,为了得到保守的研究结果,通常予以忽略。然而电力系统中的负荷对于抑制扭转相互作用有较大影响,所以当大量的负荷位于待研究发电机附近时,负荷可以用恒阻抗模型表示。

2 用于 SSR 分析的算例模型

2.1 IEEE 基准模型

1970 年和 1971 年美国 Mohave 电站连续两次因 SSR 造成机组大轴断裂,这一典型事故引起了国际学术界和电力工程界的严重关注,从此掀起了 SSR 研究的热潮。IEEE(国际电气电子工程师协会)于 1973 年专门成立了一个次同步谐振专题组(SSR working group),组织、协调有关 SSR 的研究工作。该专题组多次召开有关机组轴系与电力系统扭振耦合作用问题的专题学术会议^[10-12],先后提出的两种基准模型^[13-14]成为了日后研究电力系统次同步谐振的经典模型。

在这两种基准模型中,汽轮机轴系模型采用 4~6 个集中质量块和联结它们的理想弹簧所组成的简单质量弹簧模型来表示。这种模型对频率较低的扭振模态具有一定的精度,且建模过程简单,因此在 SSR 分析研究中得到普遍应用。

研究 SSR 问题需要有足够精度的发电机模型及参数。IEEE 两种基准模型中,发电机采用经典的 6 阶 Park 方程模型。

由于次同步谐振频率范围较低频振荡宽得多,大约在 10~50 Hz 之间,为了保证足够的分析精度,线路模型不能再采用代数方程来描述,而需要采用考虑电磁暂态过程的微分方程模型,同时计及发电机转速变化所带来的影响。

对于系统中的汽轮机调速系统以及发电机励磁系统等,由于其响应速度相对较慢,忽略它们不会对串补系统次同步谐振特性带来显著影响。因此 IEEE 基准模

型在建模时没有考虑汽轮机调速系统和励磁调节系统。

2.2 算例模型描述

本次研究所采用算例系统是基于 IEEE 第二基准模型构建的,如图 3 所示。其中发电机及其升压变压器的参数用某国产型号的 600 MW 汽轮机组和配套变压器参数代替。

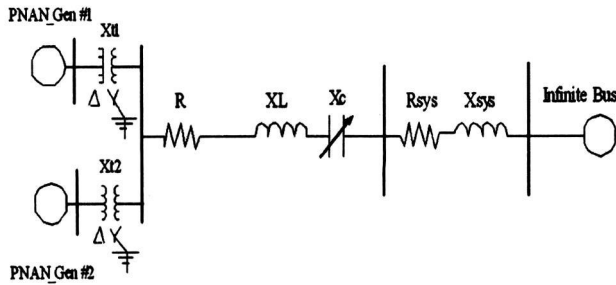


图 3 算例系统示意图

该型号机组轴系机械转子的固有振荡模态频率如表 1 所示。

表 1 算例机组固有振荡模态频率

模态阶次	模态 1	模态 2	模态 3
固有频率 /Hz	13.60	25.60	30.70
电气谐振模态频率 /Hz	36.40	24.40	19.30

PSCAD/EMTDC 程序中实现的算例系统模型如图 4 所示。PSCAD 中所有的模型及其参数设置都是图形化地实现,因此准备和系统模拟试验的速度特别是计算大型复杂系统的速度,通常都要比用 EMTTP 快得多。PSCAD/EMTDC 提供有比较完整的电力系统元件模型库,其中包括谐波分析模块,可以很方便地实现频率扫描法。

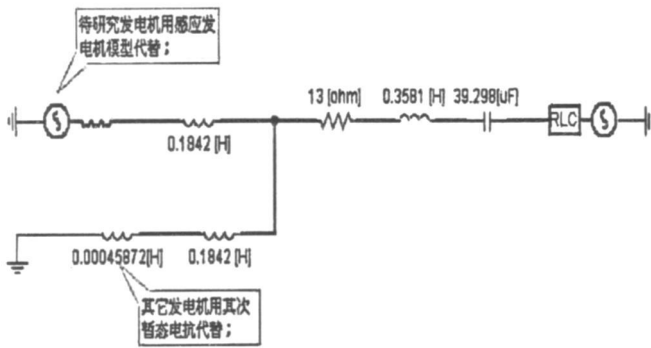


图 4 PSCAD 程序中的算例系统模型

3 频率扫描法结果分析与验证

频率扫描法可以对不同运行方式下的待研究系统进行扫描,包括正常运行、任一条线路故障切除以及机组跳闸等方式。本次研究主要考虑以下 3 种运行方式:①串补度为 50%,两机运行;②串补度为

50%,一机运行;③串补度为 35%,一机运行。图 5—图 7 所示为该 3 种运行方式的等值阻抗随频率变化的曲线图。

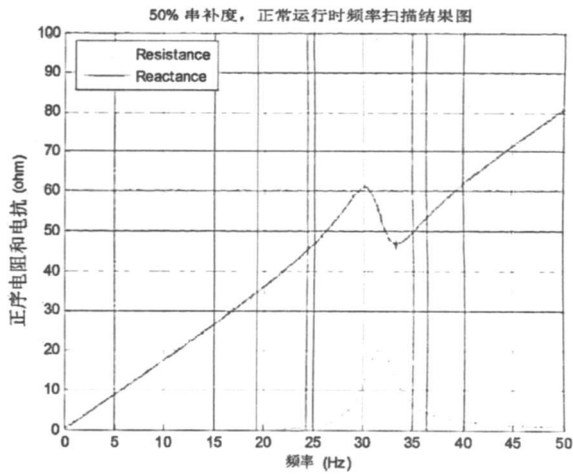


图 5 运行方式 1 等值阻抗扫描结果

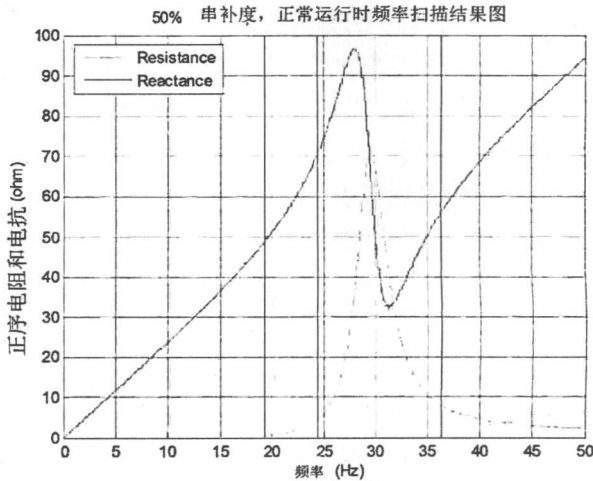


图 6 运行方式 2 等值阻抗扫描结果

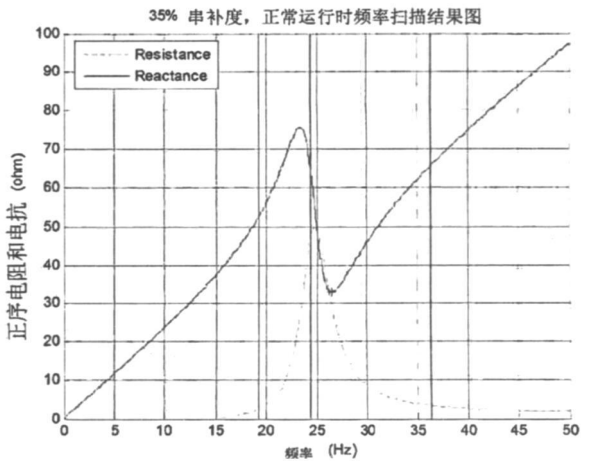


图 7 运行方式 3 等值阻抗扫描结果

从以上计算结果可见:

(1)对于所考虑的 3 种运行方式,在次同步频率范围内,等值电阻均大于 0 不会产生感应发电机效应。

表 2 3 种运行方式频率扫描结果表

	$F_{\min}$ /Hz	$F_{\max}$ /Hz	$X_{\min}$ /Ω	$X_{\max}$ /Ω	DIP /%
方式 1	30.14	33.25	46.77	61.13	23.5
方式 2	28.07	31.32	32.67	96.64	66.2
方式 3	23.33	26.48	32.85	75.65	56.57

(2)方式 1 和方式 2 等值电抗跌折达到极小值的频率分别为 33.25 Hz 和 31.32 Hz 与发电机轴系机械转子各模态的电气谐振模态频率相差均大于 3 Hz 可以基本排除发生次同步谐振的可能。

(3)方式 3 等值电抗跌折达到极小值的对应频率为 26.48 Hz 与发电机转子模态 2 的电气谐振模态频率 24.4 Hz 相差小于 3 Hz 且跌折度大于 5%，因此方式 3 可能发生扭转相互作用和扭矩放大现象。

(4)串补度越大，等值电抗跌折达到极小值的频率也越大。只有当极小值频率与机组轴系固有频率互补时，才有可能发生次同步谐振。因此并不是串补度越大就越容易发生次同步谐振。

(5)系统是否发生次同步谐振受运行方式影响较大，计算时应充分考虑各种可能的运行方式。

由于等值电抗极小值频率随运行方式的不同，会在一定的频率范围内变化 (0~10 Hz)，因此在机组轴系选型时，理论上可以尽量避免轴系固有振荡频率与等值电抗跌折处频率互补，减小发生次同步振荡的风险。然而一般大型火电机组的轴系采用典型化设计，轴系固有振荡频率可以调整的范围极小。因此在规划设计阶段不能期望通过调整轴系固有振荡频率来避开次同步振荡区域，而应该考虑采用其他手段和抑制方法。

4 结 论

在规划设计阶段，频率扫描法是分析串补系统是否存在次同步谐振风险最快捷而有效的方法。前面以 IEEE 第二基准模型为算例，采用目前应用广泛的 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件实现了频率扫描法。该方法具有技术门槛较低、所需输入数据低少、结果直观等优点，可以快速分析在不同运行工况下串补系统发生次同步谐振的可能性。

参考文献

- [1] P. M. Anderson, R. G. Farmer. Series Compensation of Power Systems[M]. California, USA: PUBLISHER, 1996.
- [2] Jancke Gunnar and K. F. Akerstrom. Developments and Experience with Series Capacitors in Sweden [J]. AIEE Trans., 1952, 71(12): 1118—1123.
- [3] Maneatis J. A., E. J. Hubacher, W. N. Rothenbuhler and J. Sabath. 500kV Series Capacitor Installations in California [J]. IEEE Trans. on PAS, 1970, PAS—89: 1138—1149.
- [4] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Trans. on PAS, 1985, PAS—104(6): 1326—1334.
- [5] M. C. Hall, D. A. Hodges. Experience with 500KV Subsynchronous Resonance and Resulting Turbine Generator Shaft Damage at Mohave Generating Station [J]. IEEE Pub., 76CH1066—0—PWR, 1976: 22—29.
- [6] 徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述 [J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36—39.
- [7] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] 周翊炜, 李兴源. 基于 PSCAD/EMTDC 的不平衡负载的静止无功功率补偿研究 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(3): 45—48.
- [9] 王淑慧, 余锐, 安莲淑, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的电压跌落评估方法 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(2): 25—28.
- [10] IEEE PES Publications. 76CH1066—0—PWR. Analysis and Control of Subsynchronous Resonance[C]. IEEE Power Engineering Society 1976 Winter Meeting.
- [11] IEEE PES Publications. 79TH0059—6—PWR. State-of-the-art Symposium—Turbine Generator Shaft Torsionals[C]. IEEE Power Engineering Society 1979 Winter Meeting.
- [12] IEEE PES Publications. 81TH0086—9—PWR. Symposium on Countermeasures for Subsynchronous Resonance [C]. IEEE Power Engineering Society 1981 Summer Meeting.
- [13] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Trans. PAS, 1977, PAS—96(5): 1565—1572.
- [14] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Trans. PAS, 1985, PAS—104(5): 1057—1066.

作者简介:

杨帆 (1980), 男, 工程师, 博士, 毕业于上海交通大学, 主要从事电力系统规划、交直流电力系统低频振荡及次同步振荡方面研究。(收稿日期: 2010—06—22)

省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统建设

毛 锐¹, 张 毅¹, 何 明¹, 丁贤勇², 韦 锐²

(1. 四川电力调度中心, 四川 成都 610041; 2. 宁波四维科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要:四川电力调度中心在多年持续开展电网调度安全性评价工作的基础上, 针对传统查评方式效率低下、数据挖掘分析不够等问题, 革新传统查评手段, 在全国率先建设了四川电网省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统, 实现了电网运行风险的超前预控与定量分析, 大大提高了调度安全性评价工作的质量及效率, 电网安全管理步入了标准化、信息化、常态化运转的轨道, 充分保障了电网安全稳定运行。

关键词:省地县一体化; 调度安全; 保障能力评估

Abstract: Based on the evaluations of grid dispatching safety for many years and aiming at the inefficient traditional assessment method which is lack of in-depth analysis, Sichuan Electric Power Dispatching Center has built the support ability assessment system of dispatching safety firstly in China, which has realized the province-prefecture-country integration and the precontrolling and quantitative analysis of grid operational risk. It can improve the quality and efficiency of dispatching safety assessment greatly, which represents the standardization, information and normalization of grid safety management.

Key words: province-prefecture-country integration; dispatching safety; support ability assessment

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0023-03

调度安全性评价工作是电网安全管理的重要内容, 传统查评方式多采用手工查评, 工作周期长且效率低下, 数据共享程度低。四川电力调度中心按照国网公司“四化”管理要求, 按照“统一调度, 分级管理”原则, 建立了先进省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统, 为电网安全管理提供了科学、客观、量化的评价手段, 通过评价促使各单位清醒认识到在本级企业中所处的位置, 及时采取整改措施查漏补缺, 不断完善调度安全内控机制, 保障了电网安全运行。

1 系统总体技术要求

根据系统建设前期需求分析, 系统将被建设成覆盖全省、市、县级调度安全性评价管理系统, 其建设过程分为两个阶段: (1) 省、市级系统的建设阶段。在系统建设完成后能有效开展省级及地市级电网的调度安全性评价工作, 实现各地区调度机构数据的共享, 动态实现数据跟踪、分析, 为决策提供依据。 (2) 县级系统的建设阶段。在系统建设完成后能有效开展对县级电网的调度安全性评价工作, 实现省、市、县数据共享, 最终建设成为四川电网省、地、县一体化调度安全生产保障能力评估系统。

四川电网省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统的设计方案要求采用目前先进的信息技术, 建立新型的信息体系结构: 在统一的运行平台 (计算机硬件及网络、操作系统、数据库、应用软件等) 支撑下, 实现省、市、县的调度安全性评价工作一体化运作, 使硬件资源和软件资源得到合理的优化。系统体系结构图如图 1 所示。

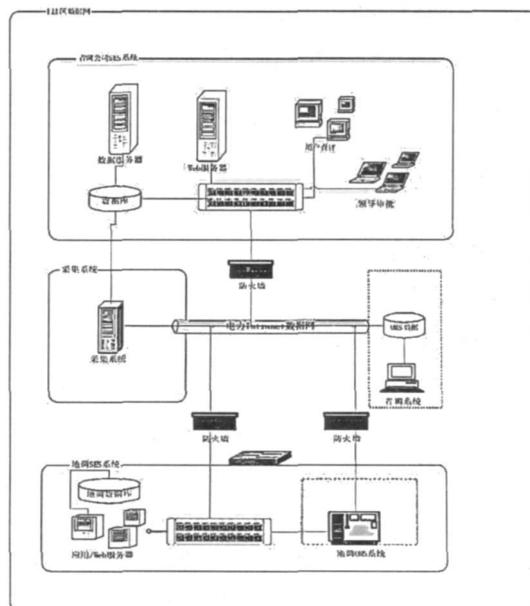


图 1 系统体系结构图

2 系统的设计思想与原则

本系统依据《电网调度系统安全生产保障能力评估(网、省调部分)》、《华中电网调度系统安全性评价标准(地调部分)》,以及四川省电力公司制定的县级调度系统安全性评价标准,分别建立数据库,使系统覆盖了省公司、20 个地区供电企业、包含控股、代管公司的各县级供电企业。在系统设计开发中,按照如下原则进行开发。

(1)该系统作为一个安全管理平台而存在,各级单位调度生产关键环节、关键流程的危险点均通过依托完善的评估标准在该平台上集中评估展现,从而将省、市、县三级调度安全管理进行有机互联互通和数据共享,形成一个广域协调动作的整体。

(2)该系统承担四川省、市、县级电网调度安全生产保障能力评估工作,应具备高可靠性、方便性,因此系统设计主要采用 Browser/Server(浏览器/服务器)分布式架构,系统网络环境采用四川电网现有的局域网,这样的结构有利于软件的版本控制和日常维护,提高查评效率,减少查评工作量,促进安全性评价工作的系统化、标准化、流程化、信息化管理。

(3)该系统应充分利用四川电网调度系统标准化建设成果,将最新的规章制度、标准体系、工作流程与安全性评价工作及时对接,为查评提供真实的查评依据,尽可能减少人为因素,做到查评有据可依,有据可查。

(4)该系统应与调度生产管理系统(OMS)进行有机结合,充分利用 OMS 系统中的信息资源,尽可能多地实现自动查评,从而降低查评的人为因素,提高查评的客观性。

3 技术要点

3.1 流程化管理

系统采用流程化管理模式,通过“自评估—专业评估—审核评估—专家评估”固化了四级评估程序,按照岗位划分权限,实行逐级管理,评估范围涵盖调度运行、运行方式、继电保护、通信自动化、技术综合管理等各专业,打破了传统的按专业分段管理、生产环节覆盖程度不佳、工作随意性大造成的条块分割,职责不清,无法全局优化等管理弊端,将各单位的安全性评价工作纳入规范化、标准化管理的轨道(见图 2)。

3.2 以 B/S 为主 C/S 为辅的开发模式

系统主体上采用新型的 B/S 开发模式,但由于各地县调网络建设水平存在差异,同时存在调度安全性评价覆盖范围广,涉及厂站现场查评等情况,需考证、讨论、商量后才能得出准确的结果,因此,离线查评的可能性很大。本系统提供了离线单机版系统,通过将查评任务下载到本地进行离线查评,查评结果可上传到服务器实现数据同步,极大的增加了专家查评工作的灵活性,加快了查评速度。

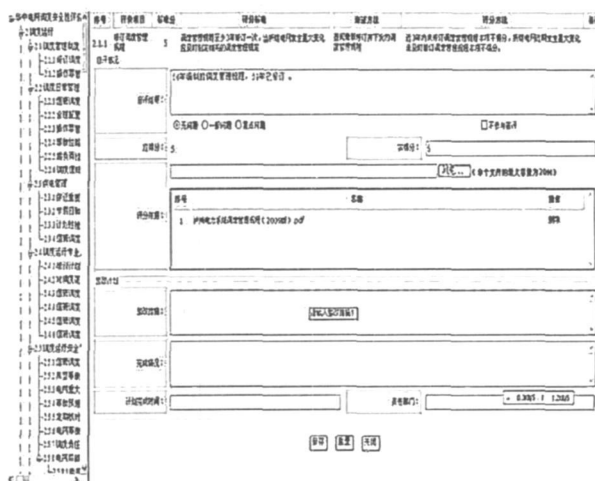


图 2 系统专家评估界面

3.3 自动查评技术

通过分析 OMS 系统中现有的调度运行及管理数据,针对各个评价项目的特点,建立数学模型,实现了部分项目的自动查评功能,充分利用了调度系统现有信息化管理成果,避免了信息孤岛。

3.4 自动生成报告

专家查评需要编写总体查评报告,报告工作量大(一般几十页),评分过程复杂,人工需要反复统计、多次校核才能得出正确的结果。本系统实现了自动统计分数和生成查评报告的功能,将原有的工作时间减少了一半以上,大大提高了工作效率。

3.5 数据整合技术

该系统强调基础结构的规范设计和开发,规范了对外数据交换方式和交换格式,强调数据复用和关联,尽可能消除信息孤岛,避免由于信息多重维护而产生的额外工作量和数据不一致性,提高应用集成性。

系统针对网络环境状况,采用数据库访问和页面访问两种方式实现数据的共享,以适应不同的网络环境要求。通过该数据共享手段,有效地实现省、市、县数据的共享,以达到内部数据以及外部其他系统的数据共享。

数据共享一般采用形式:①授权数据库访问方式

基于概率分布统计原理新疆风电运行分析

张新伟¹, 常喜强², 孙谊嫔², 姚秀萍², 晁 勤¹

(1 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:通过对新疆电网现有风电的发展情况的相关数据进行统计, 结合数理统计原理中的概念和原理, 在对新疆电网风力发电研究的基础上, 对风力发电存在问题的分析, 从数理概念角度分析了如何减少大规模风电发展对新疆电网的影响, 从新的角度提出了风电大规模发展的思路和建议, 为风力发电的发展提供一定的参考和借鉴。

关键词:新疆电网; 概率分布; 风力发电; 开发利用

Abstract: Through combining with the mathematics statistics conception and theory, the related development of the existing wind power generation in Xinjiang power grid is investigated. Based on the research about wind power generation and the analyses of its existing bottle-neck, how to reduce the disadvantages of wind power is analyzed from the point of view of mathematics, and the ideas and advices for large-scale development of wind power are proposed, which can provide a certain reference for the further wind power development.

Key words: Xinjiang power grid; probability distribution; wind power generation; development and application

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0026-04

0 引言

由于化石能源资源日益紧缺, 发展和应用风力发电及其他可再生能源是节约能源的重要举措。发展风电作为实施能源可持续发展战略的重要措施, 近几年在全国得到了快速的发展应用。新疆特有的地理环境和气候条件造就了风能资源十分丰富, 目前新疆风电已形成多家办电的建设格局, 风力发电发展迅速, 装机容量快速增长, 为风电研究提供了广阔的平台。然而, 风电的大量快速开发, 集中接入, 又因为风电自身发电特点, 给电网安全稳定运行带来了许多新的问题, 国内大量的文献对风电接入后对系统产生的影响进行了深入的分析, 并提出了许多解决措施, 如对风电大规模接入后的调峰问题、对系统产生的谐波问题、暂态稳定性问题、风力发电功率预测问题等方面, 下面结合数理统计原理中的概念和原理, 在对新疆电网风力发电研究的基础上, 对风力发电存在问题的分析, 从数理概念角度分析了如何减少大规模风电发展对新疆电网的影响。

1 风力发电的特点

由于风力发电功率的不稳定性, 对于系统的影响

是显而易见的。主要表现在: 风电的间歇性发电特征与电网连续、可靠、稳定、经济供电相矛盾; 风速变化的随机性造成容量可信度低, 给电网有功、无功平衡调度带来困难; 同时还将产生电能质量问题, 并对电网稳定性产生一定影响。

2 新疆风电发展及运行情况

2.1 新疆风电发展建设状况

新疆特有的地理环境和气候条件, 造就了风能资源十分丰富, 全疆风能资源总储量巨大, 理论上估算新疆全年可提供 2.77 PW·h 电量, 居全国前列。风区总面积达 $15.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 疆内年平均风功率密度 $\geq 150 \text{ W/m}^2$ 的面积为 $12.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 技术开发量 234 GW。形成了新疆风多、风大的气候特点。新疆的风能资源品质好, 风频分布较合理, 破坏性飓风十分少见。新疆多数地区风速变化规律是以春秋季节大、夏季次之, 冬季偏小。即 4 月、5 月风速最大, 12 月和 1 月最小, 风力资源有利于开发, 同时在新疆部分地区呈现冬春季多风, 可弥补枯水期水能资源的缺乏。随着新能源政策的出台, 新疆风力发电进入快速发展时期。

2.2 风电规模及分布

目前,建成运行具备一定规模的风力发电场共计 9 家,分别是天风风电场、水利厅风电场、玛依塔斯天润风电场、布尔津天润风电场、白杨河风电场、中节能风电场、达风风电场、小草湖风电场、农五师风电场。风电总装机容量为 663.15 MW,占新疆电网总装机容量的 5.8%,分别分布在新疆达坂城地区、塔城地区、阿勒泰地区、吐鲁番地区、博州地区。

新疆电网 2001—2010 年风电装机容量和 2007—2008 年全网风力发电机组发电量曲线分别如图 1、图 2 所示。

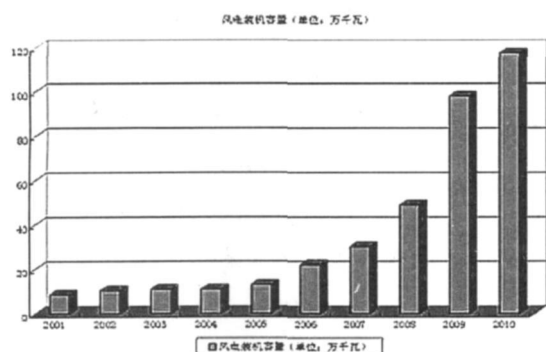


图 1 2001—2010 年风电装机容量

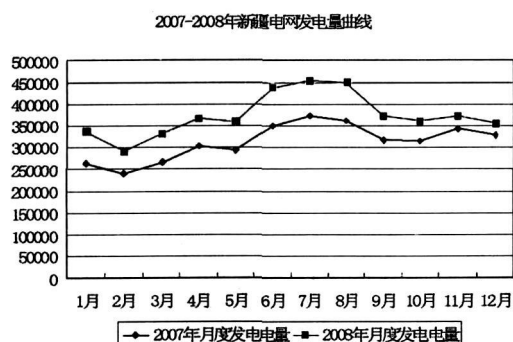


图 2 2007—2008 年全网风力发电电量

从上面的数据看出,虽然新疆电网目前为独立电网,对风电发展有一定的制约,但是新疆电网开发利用风能资源的力度仍然很大,新疆风力发电,清洁能源的利用在新疆得到更大的发展和利用。从曲线中可以看出新疆电网总发电量和风力发电量都是逐年显著增加。2008 年,风力发电总电量 777.29 GWh,风力发电量明显增加,较 2007 年增加了 56.5%。

3 概率统计理论

随机事件表现出不确定性,在大量的重复试验中,随机事件发生的可能性是稳定的,具有统计规律性,随机事件的概率就是描述这种规律性,在大量的

重复试验中,事件 A 发生的概率逐渐稳定与某一个数值 $P(0 \leq P \leq 1)$ 的这种特点就是定义概率的基础,易知,数值 P 较大时,事件 A 发生的可能性就较大,反之亦然,数值 P 是事件 A 固有属性的一种表现,因此用它来度量事件发生的可能性大小是客观的。

在相同的条件下进行大量的重复试验,若当试验次数逐渐增大时,事件 A 发生的频率逐渐稳定于某一个数值 P,则称为事件 A 发生的概率,它说明频率的稳定性是概率的经验基础,而频率的稳定值就是概率,在大量的重复试验中,概率通过频率表现出来,在实际工作中往往把大量实验中得到的频率作为概率的近似。

概率理论方法在不确定性的事件和确定事件中建立起了一个桥梁和纽带,对于研究不确定问题有很好的启示。

4 新疆风电运行的概率统计分析

通过概率数理统计原理可以知道,不确定性的事件是可以得到一些确定的事件的,因此,由此可以考虑风电发电出力是不确定的因素,各个风力发电场的风力发电出力也是不确定的因素,但是通过大量的数理统计,引入概率统计理论原理,可以通过现有风电场的风力发电运行数据,确定出每个风力发电厂的最低技术出力(不确定事件的概率),再结合新疆电网所接纳的风力发电厂的同时性,进而就可以确定出新疆电网目前在运风力发电厂的最低技术出力,从而找出风电场出力变化波动的范围,进而可以研究出集中接入风电和分散接入风电的优缺点,从而进一步分析得出电网对风电的调峰、调频的承受能力,以及接入方式的依据,对风电发展建设和接入方式提供一定的技术支撑,为电网接纳风电提出借鉴。

4.1 单个电厂的出力统计分析

对新疆电网 6 个风力发电厂 1—10 月的 10 个月的 3 个典型日 4 个时刻 120 个点的出力和总出力进行抽取和统计分析,结果如图 3 所示。

从上述数据可以看出,取出力概率分布最大的数据作为基准,则天风风电和小草湖风电发电出力为 0 的概率最大,其余均有出力,玛依塔斯风电场、水利厅风电场、中节能风电场概率最大的出力分布区为 $0 < m \leq 20\% P_{\max}$,达坂城风力发电场概率最大的出力分布区为 $20 < m \leq 40\% P_{\max}$,进而几个风电场的概率最

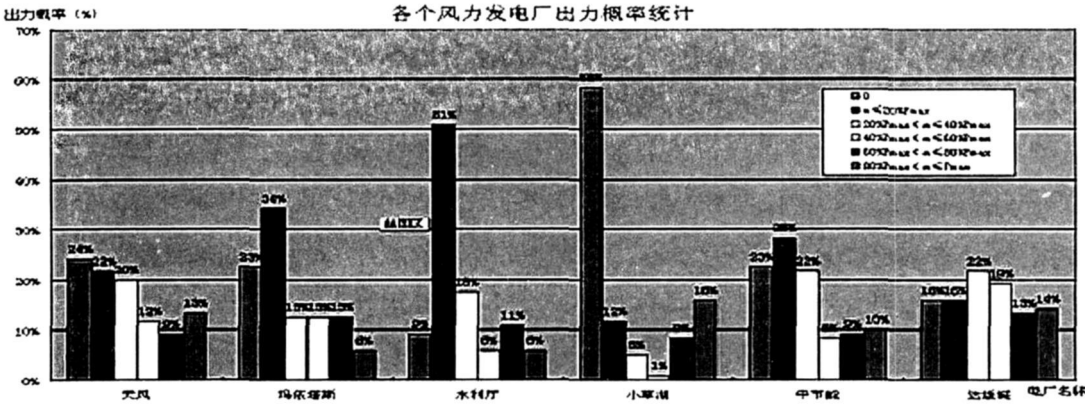


图 3 各个风力发电厂出力概率统计

大的分布区间为 $0 < m \leq 20\% P_{\max}$, 故从新疆电网单个风电场出力分布上可以认为是各个电厂出力 20% 的叠加。当然, 如果统计样本更大, 电厂更多, 则规律性和准确性越高。

4.2 新疆电网的出力统计分析

在考虑新疆电网风力发电场发电出力同时率问题之后, 对新疆电网风力发电厂总出力数据与上述各个风力发电场出力数据累加进行对比分析, 结果如表 1、表 2 所示。

从上述数据可以看出, 新疆电网风电总出力实时累计之和 (同时刻) 也在 $0 < m \leq 20\% P_{\max}$ 范围内波动, 故可以认为新疆电网风电场最小出力为 $20\% P_{\max}$, 而不是 $0MW$, 通过进一步统计分析, 细化样本空间和样本数据, 发现新疆电网中风电场最小出力在 $10\% P_{\max} < m \leq 20\% P_{\max}$ 范围内波动, 如果统计样本更大, 电厂更多, 则规律性和准确性越高。

从上述数据中可以看出, 不同地区的风电场由于地理空间分布不同, 风资源时空分布的差异性, 减少了风电出力波动对系统的影响, 弥补了风力发电随机性的部分不足。对于新疆电网总体接纳的风电装机容量一定的情况下, 接入到不同风区的风电越多, 分布越分散, 则风电波动的范围将减小越多, 如果上述风电均建在吐鲁番地区, 从小草湖风电场概率分布数据统计可以看出, 最低出力为 0 的概率最大, 则波动范围在 $0 \sim P_{\max}$ 也越大, 而安装在不同地区后, 则缩小了 10% , 即使同一个风区 (达坂城风区), 在风能资源跨度较大时, 风力发电的出力波动范围也减小了 10% 。达坂城风区中的水利厅风电场和达风风电场的出力概率分布可以明显的看出。

故在一个电网接纳风电能力有限的时期, 如果要最大限度的承受和利用风力资源, 应分散布局, 分散的点越多, 则减少风电的波动越大, 即使同一个风区

表 1 各风电场出力及风电累计总出力范围数据统计表

	天风	玛依塔斯	水利厅	小草湖	中节能	达坂城	总出力
0	29	27	11	70	27	19	2
$0 < m \leq 20\% P_{\max}$	26	41	61	14	34	19	33
$20\% P_{\max} < m \leq 40\% P_{\max}$	24	15	21	6	26	26	29
$40\% P_{\max} < m \leq 60\% P_{\max}$	14	15	7	1	10	23	24
$60\% P_{\max} < m \leq 80\% P_{\max}$	11	15	13	10	11	16	17
$80\% P_{\max} < m \leq P_{\max}$	16	7	7	19	12	17	15
样本点最大出力 /MW	51.9	45.7	31.96	79.7	91.06	160.49	371

表 2 各风电场出力及风电累计总出力范围概率统计表

	天风	玛依塔斯	水利厅	小草湖	中节能	达坂城	总出力
0	24%	23%	9%	58%	23%	16%	2%
$m \leq 20\% P_{\max}$	22%	34%	51%	12%	28%	16%	28%
$20\% P_{\max} < m \leq 40\% P_{\max}$	20%	13%	18%	5%	22%	22%	24%
$40\% P_{\max} < m \leq 60\% P_{\max}$	12%	13%	6%	1%	8%	19%	20%
$60\% P_{\max} < m \leq 80\% P_{\max}$	9%	13%	11%	8%	9%	13%	14%
$80\% P_{\max} < m \leq P_{\max}$	13%	6%	6%	16%	10%	14%	13%

也可以考虑分散接入,当然,需要在条件和经济性合理可控范围之内。

4.3 接入通道故障概率分析

风电大规模开发后,在风电出力较大时,一点接入和多点接入方式,联络通道故障概率也不同,N点接入,单通道故障概率降低为 $1/N$,则联络通道故障后引起整个电网风电出力波动的幅度也大大减小,风电引起的潮流波动,转移也大大降低。以新疆达坂城风区风电建设为例,从接入系统的通道电气设备故障的概率上来看,达坂城风区几个风电场分别以 110 kV 茭风一、二线和 220 kV 达风变电站两个通道与新疆电网联络,则从联络通道故障引起风电甩出力的概率将为 $1/4$ (四线、四主变压器),对联络通道故障后造成风电停运对系统的冲击也将为 $1/4$ 。由联络通道故障引起的风电的变化对系统的稳定性、潮流分布、电压控制也大大降低。

4.4 风资源波动概率分析

同容量的风电装机容量,接入不同的风区后,风资源变化对系统的影响程度也大大降低,风能的突然消失将造成风电停运,集中接入的风电会因为风的消失而停运,造成功率变化幅度较大,分散接入不同风区可以最大限度地减少风资源对电网的影响。即减少风电集中送出对系统电压、功率转移造成的影响,减少风的消失对风机功率的影响,进而减少风电对电网功率波动造成的影响,从而减少系统功率的波动。又可以利用各风场来风的不同时性,分布式风电较强的“错峰效应”,使全网风电总出力变化趋于平缓,减少电网调峰调频压力。若集中大容量一点接入,风能的消失和变化以及因为气候变化造成风资源的变化将很大程度地影响集中接入一点风电出力,风电出力变化将增大,进而风能的波动对系统的稳定性、潮流分布、电压控制产生的影响也越大,就如同一个大型发电厂电煤供应突然中断一样,电厂装机容量越大,电煤中断供应对系统的影响越大,汽轮机突然停运造成发电机组出力波动到 0 对系统的影响也越大。

5 发展风电采取措施的效果分析

新疆电网目前为独立电网,风电发展在新疆电网将有与别的电网不同的问题。风电的快速发展,给新疆电网的运行带来很大的调峰、调频问题。然而新疆电网能接纳较高比例的风电而不限风电出力,

接纳风电并网容量超过了国际上通常认为的 $6\% \sim 8\%$ 。风电装机容量占新疆电网 2008 年最小负荷比例约为 16% ,电网后夜风电发电比例占负荷高于 10% 以上,大大超过了大型电网容纳风电的比例。几年来新疆风电机组没有发生因电网原因限制发电的现象,基本实现了全额收购风电。几年来风电机组没有发生因电网原因限制发电的现象,基本实现了全额收购风电。新疆风电的建设与电网同步和谐展开,达到了保证风电效益和电网安全运行双赢。

通过对风电场分布、风资源情况、风电出力情况、同容量的不同接入方式从数理统计角度进行了分析,新疆电网风电发展建设与电网运行控制,风电的等效装机、风电出力波动量及系统的调节能力和运行达到了一个相对的平衡。

新疆电网在发展风电建设中充分考虑以下因素:电网规模、电网中不同类型电源的比例及其调节特性、负荷水平及其变化特性和风电场的地域分布、可预测性与可控制性等。充分利用了分散布点、不同方式接入等来削弱风电随机性和不确定性因素给新疆电网的带来的影响,减少风电的变化对系统的稳定性、潮流分布、电压分布、功率转移、功率波动造成的影响,又利用各风场来风的不同时性,分布式风电较强的“错峰效应”,使全网风电总出力变化趋于平缓,减少电网调峰调频压力。

6 小 结

新疆电网在风电接纳能力一定的情况下,通过概率数学方法研究,得出分散布局方式建设风电思路,总量相同,分散格局,星点接入方式,减少风电对电网的影响程度。目前,电网分别在 6 个地区建成了不同容量规模的风电场,而避开了集中在一个地区开发风电场、减少风资源对风电出力的影响。

通过对新疆风电出力波动、新疆电网对风电接纳能力以及对采取的各种措施效果的分析,与新疆电网实际运行情况证明这些应对风电波动出力及保证电网安全运行的方法是有效的。无论风电的等效装机、风电出力波动量及系统的调节能力和运行,电网的配合建设方面,对新疆电网最大程度接纳更多的风电是有一定的成效的。

只要积极开展对风电特殊性的研究,积极采取各
(下转第 73 页)

际不一致,造成两台主变压器内部环流的严重问题。

3.2 电流环带负载的限制

电流环监测挡位是在较小负载的情况下,满足恒流输出。当负载超过一定量时,就不能准确反映挡位。如某某变电站在低挡位时,能正确显示挡位,当超过 13 档时开始出现输出不稳定,15 档后完全饱和,即当主变压器挡位调至 15~19 档时,监控机全部显示为 15 档的缺陷。经检查主变压器配套用的挡位测控装置带上监控装置和 VQC 两个负载后,输出电压仅 8 V,由于监控机上内阻为 500 Ω ,VQC 装置内阻为 250~500 Ω ,通过 4~20 mA 电流后产生接近 4~20 V 的压降,当把 VQC 装置取消后,监控机上就能正确显示挡位。根据这种现象,将监控机与 VQC 装置分别接入不同通道,分别降低了所带负载,同时实现了监控机测档和 VQC 的远方监控。

4 挡位远方监测的技术改造

目前变压器挡位远方监测的主要方式中一对一全遥信方式、电阻分压方式、电流环方式和 BCD 码传输方式都各有优缺点。一对一全遥信方式有时会产生在 17 档制和 19 档制之间的转换矛盾。电阻分压监测方式中由于变压器在调档时,若触头压紧不牢固,会有电弧发生,将串接在辅助刷形开关上高精密度电阻烧坏,影响挡位的监测。电流环方式存在带负载能力不

够强。BCD 码传输是用电信号传递,而不是用模拟量传递,没有误差,是纯摇信方式,具有抗干扰能力强、误码率低、施工方便等优点,综合比较是最佳选择。

改造方法:分解开关的分解位置信号由分解开关电动机构通过 19 芯航空插座输入到 BMQ-Y19YB2 挡位编码器内,经过隔离送 CPU 中央控制器编码,输出一一对应无源接点和 2 组 BCD 码无源接点。BCD 码传输到主控室内,监控系统和 VQC 装置上的摇信开入回路,按照 BCD 编码规则进行还原计算即可算出变压器实际挡位。无论是 17 档还是 19 档的变压器,与监控系统接口都仅需要一根 6 芯的电缆,占用 5 个摇信资源。现通过采用 BMQ-Y19YB2 挡位编码器以成功将 110 kV 三河站、110 kV 金江站、110 kV 金堂站等站挡位远方监测方式改为 BCQ 码输出方式。

参考文献

- [1] 有载分接开关的应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [2] 刘伟,汤雨海主编. 变电站综合自动化实用技术问答 [M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [3] 变电站综合自动化实用技术 1000 问 [M]. 北京:中国电力出版社, 2008.

作者简介:

刘祖惠 (1965), 女, 工程师, 从事电测计量、热工计量。

(收稿日期: 2010-09-28)

(上接第 29 页)

种技术措施,如:分散接入系统;选择相对稳定的风力资源建设风电厂;通过与气象部门的合作,准确预测风力发电功率;配套建设调峰调频电源,合理安排机组备用容量进行峰谷调节;积极进行谐波治理,采用动态电压补偿和控制等技术,加快建设高电压等级联络线 (750 kV 电网),实现与外部电网的联系 (与西北电网联网),扩大电网规模和电网的综合调节能力,就能真正充分利用清洁能源,实现风力、水电和火电等资源的优化配置。大大推进利用可再生能源的规模,为实现节能减排、保障能源安全、实现能源工业的可持续发展发挥重要作用。

参考文献

- [1] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
- [2] 耿华,杨耕,崔扬,等. 并网型风力发电系统的现状与发

展 [J]. 东方电气评论, 2006, 20(2): 1-7.

- [3] 计崔. 大型风力发电场并网接入运行问题综述 [J]. 上海电力. 2008, 21(1): 59-63.
- [4] 靳静,艾芊. 我国风电场建设及运行现状评估与发展前景研究 [J]. 华东电力. 2007, 35(8): 44-49.
- [5] 岑海堂,薛正福. 大型风电机组发展现状与关键技术 [J]. 科技创新导报. 2008(24): 78-79, 81.
- [6] 陈树勇. 大型并网风力发电场规划方法研究 [D]. 电力部电力科学研究院, 1998.
- [7] 田华,朱莉. 三门峡黄河风电场一期工程并网方案研究 [J]. 电网技术. 2009, 33(4): 98-103.

作者简介:

张新伟 (1986), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统调度运行和控制;

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 主要研究方向为现代电力系统分析与控制, 电力系统调度运行及电力系统稳定。

(收稿日期: 2010-07-15)

几种负荷预测方法在西藏电网的应用分析

艾建平¹, 杜秀琳²

(1. 湖北省宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 西藏电力有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 电力负荷预测在电力系统规划和电网运行方面发挥着越来越重要的作用, 利用电力负荷预测常用的几种方法 (比例系数增长法、线性趋势预测法、弹性系数法、灰色模型预测法) 对西藏电网未来几年负荷情况进行了预测, 并给出了相应的结论。

关键词: 西藏电网; 负荷预测; 分析方法

Abstract: Power load forecasting plays an increasingly important role in the power system planning and power grid operation. Several common methods (proportion coefficient increasing, linear trend prediction, elastic coefficient and grey model prediction) are used to forecast the power load of Tibet power grid in coming years, and the corresponding conclusions are given.

Key words: Tibet power grid; load forecasting; analyzing methods

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0033-04

目前西藏地区电网呈西藏中部、昌都、阿里“一大两小”格局, 均为独立电网, 没有与外部电网相连, 缺少大电源支撑。随着西藏地区的经济发展, 同时受冬、夏季来水的影响, 电源建设相对落后的矛盾日渐突出, 近几年电力、电量缺额巨大。而电网负荷预测工作是制定发供电计划和电力供需平衡分析的前提, 同时也是提前做好电网规划的理论依据。电网负荷预测工作近两年才在西藏地区开展, 经验较少。因昌都、阿里地区两小独立电网负荷较小, 在此不做分析。以下通过比例系数增长法、线性趋势预测法、弹性系数法、灰色模型预测法等几种负荷预测方法对西藏中部电网未来几年的负荷情况 (最大电力及年电量) 进行预测说明, 为发电计划安排、电力供需平衡分析以及电源规划提供一定参考意见。

1 比例系数增长法

比例系数增长法是经典预测技术中的一种方法。

表 1 西藏电网近年电力、电量情况

时间/年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
最大电力/MW	182.00	218.60	246.4	291.90	324.40	357.90	406.60
电量/GWh	780	955	1 100	1 276	1 433	1 536	1 752

表 2 比例系数增长法预测结果

时间/年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
最大电力/MW	182	208.1	237.94	272.06	311.07	355.68	406.68	465.01	531.69	607.93
电量/GWh	780	893	1 022	1 169	1 338	1 531	1 752	2 005	2 295	2 626

它假定今后的电力负荷与过去的有相同的增长比例, 用历史数据求出比例系数, 按比例预测未来发展。通过对西藏近 7 年来最大电力负荷、电量实际需求情况来看, 负荷如表 1。

按比例来预测西藏 2010 年至 2012 年电力、电量负荷预测情况。

据从第 n 年至第 m 年的平均增长率为 K

$$K = \sqrt[m-n]{A_m/A_n} - 1$$

A_m 为第 m 年的电力、电量; A_n 为第 n 年的电力、电量 (其中 $m > n$)。

预测第 I 年情况 $A_I = A_n (1+K)^{I-n}$

A_I 为第 I 年的电力、电量, 其中均以 2003 年为基年分别可得平均增长率 $K_{\text{电量}}$ 、 $K_{\text{电力}}$ 为

$$K_{\text{电量}} = 0.1444 \quad K_{\text{电力}} = 0.1434$$

据公式: $A_I = A_n (1+K)^{I-n}$

由此可得 2004 年至 2012 年预测值如表 2。

2003 年—2009 年西藏电力变化趋势图

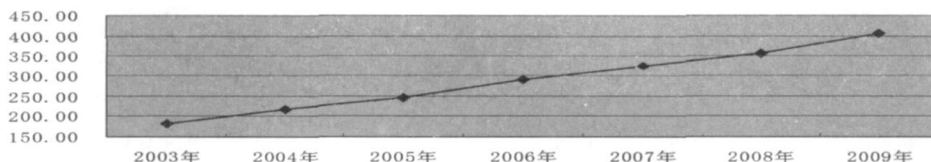


图 1 西藏 2003—2009 年西藏电力变化趋势图

2003 年—2009 年西藏电量变化趋势图

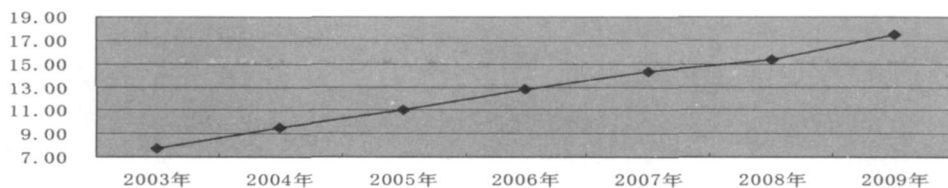


图 2 西藏 2003—2009 年西藏电量变化趋势图

2 线性趋势预测法

趋势预测法就是根据负荷的变化趋势对未来负荷情况作出预测,是迄今为止研究最多,也是最为流行的定量预测方法,包括水平、线性、多项式、季节型、增长趋势预测技术等多种方法。电力负荷虽然具有随机性和不确定性,但在一定条件下,仍存在着明显的变化趋势。根据西藏 2003 年至 2009 年的电力、电量变化趋势来看呈一种较好的线性增长趋势,所以采用线性趋势预测法来预测后几年西藏最大电力、电量增长情况(历史数据以表 1 为准)。

线性趋势预测技术包括二次滑动平均法、二次指数平滑法及二阶自适应系数预测方法。其预测值为

$$x_{t+1} = a_t + b_t \cdot 1 \quad (l=1, 2, \dots)$$

通过计算一次、二次滑动平均值可得

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{N} (x_{t-N+1} + x_{t-N+2} + \dots + x_t) \quad (t=N, N+1, \dots, T)$$

$$M_t^{(2)} = \frac{1}{N} (M_{t-N+1}^{(2)} + M_{t-N+2}^{(2)} + \dots + M_t^{(1)}) \quad (t=2N, 2N+1, \dots, T)$$

其中线性趋势预测的截距和斜率分别为

$$a_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)}$$

$$b_t = \frac{2}{N-1} [M_t^{(1)} - M_t^{(2)}] \quad (t=2N, 2N+1, \dots, T)$$

则可得如表 3 的结果。

当 $t \geq 7$ 时,预测电力、电量方程分别为

$$\hat{x}_{t+1} = 402.80 + 41.11$$

$$\hat{x}_{t+1} = 17.45 + 2.07$$

(l=1, 2, \dots)

3 弹性系数预测法

表 3 利用二次滑动平均预测电力、电量 $a_t, b_t (N=2)$

时间 年	电力数据 x_t	一次滑动 平均 $M_t^{(1)}$	二次滑动 平均 $M_t^{(2)}$	截距 a_t	斜率 b_t	电量数据 x_t	一次滑动 平均 $M_t^{(1)}$	二次滑动 平均 $M_t^{(2)}$	截距 a_t	斜率 b_t
2003	182.00					7.80				
2004	218.60	200.30				8.93	8.37			
2005	246.40	232.50	216.40	248.60	32.20	10.22	9.58	8.97	10.18	1.21
2006	291.90	269.15	250.83	287.47	36.64	11.69	10.96	10.27	11.65	1.38
2007	324.40	308.15	288.65	327.65	39.00	13.38	12.54	11.75	13.33	1.58
2008	357.90	341.15	324.65	357.65	33.00	15.31	14.35	13.44	15.25	1.81
2009	406.60	382.25	361.70	402.80	41.10	17.52	16.42	15.38	17.45	2.07

表 4 线性趋势预测法预测结果

时间 年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
最大电力 /MW	182	200.3	232.5	280.8	324.11	366.65	390.65	443.9	485	526.1
电量 /GWh	780	837	958	1139	1303	1491	1706	1952	2159	2366

表 5 2004—2009 年电力弹性系数统计表

时间/年	2004	2005	2006	2007	2008	2009	年平均增长
用电量增速/%	22.440	15.180	16.000	12.300	7.190	14.060	14.528
电力增速/%	20.110	12.717	18.466	11.134	10.327	13.607	14.394
全区 GDP 增速/%	12.100	12.100	13.300	14.000	10.100	12.400	12.333
电量弹性系数/%	1.855	1.255	1.203	0.879	0.712	1.134	1.173
电力弹性系数/%	1.662	1.051	1.388	0.795	1.022	1.097	1.169

表 6 弹性系数预测法预测结果

时间/年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
最大电力/MW	182.00	207.54	236.66	269.88	307.75	350.93	400.18	456.34	520.37	593.40
电量/GWh	780	890	1 015	1 158	1 321	1 507	1 719	1 961	2 237	2 552

电力弹性系数是反映电力消费的年平均增长率和国民经济的年平均增长率之间的关系的宏观指标。弹性系数法是从宏观上确定电力发展同国民经济发展的相对速度,是衡量国民经济发展和用电需求的重要参数。近年来西藏经济一直处在平稳发展时期,区内电力消费与经济发展紧密联系,未来几年西藏经济结构和产业结构不会急剧变化,所以用弹性系数的值是可以较准确地预测未来几年电力需求。

据了解“十一五”期间西藏国民经济年均增长预计在 12%。事实上 2006 年和 2007 年国民经济增长均高于 12%,分别达到 13.4%和 14%。从 2003 年至 2009 年年均 GDP 保持在 12%以上的增长率。

电力弹性系数可用下式表示。

$$E = K_Y / K_X$$

式中, E 为电力弹性系数; K_Y 为电力消费年平均增长率; K_X 为国民经济年平均增长率。

$$A_t = A_0 (1 + E a_k)^t$$

其中, A_t 为规划期所需的电力、电量; A_0 基年的实际用电量; a_k 规划期的国民生产总值年均增长率

根据上述情况,据了解预计 2010—2012 年西藏国民经济年均增长率为 12%,电力增长速度高于西藏国民经济年均增长速度,电力、电量负荷弹性系数按照 1.169、1.173 考虑,以 2003 年为基年。

则电力、电量分别为

$$A_{\text{电力}} = 182(1 + 1.1694 \times 0.12)^t = 182 \times 1.14033^t$$

$$(t=1, 2, \dots)$$

$$A_{\text{电量}} = 7.8(1 + 1.173 \times 0.12)^t = 7.8 \times 1.14076^t$$

$$(t=1, 2, \dots)$$

4 灰色模型预测法

灰色系统理论是 20 世纪 80 年代由中国邓聚龙

教授提出,它将无规律的原始数据进行累加生成,得到规律性较强的生成数列后再重新建模,由生成模型得到的数据再通过累加生成的逆运算,累减生成得到还原模型,由还原模型作为预测模型进行负荷预测。灰色系统理论中的 GM(1,1)模型是最常用的一种灰色模型,它是由一个只含单变量的一阶微分方程构成的模型,是作为电力负荷预测的一种有效模型。下面就通过建立 GM(1,1)模型对西藏地区 2010 年至 2012 年负荷进行预测。历史数据仍采用表 1 数据。

$$\text{根据灰色模型: } x_{(k+1)}^{(0)} = x_{(k+1)}^{(1)} - x_{(k)}^{(1)} = (1 - e^{-a})(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a})e^{-ak} \quad (k=0, 1, 2, \dots)$$

其中, u , a 需通过原始数列矩阵取得,用电量数据作为原始数列。

$$x^{(0)} = [x_{(1)}^{(0)}, x_{(2)}^{(0)}, x_{(3)}^{(0)}, x_{(4)}^{(0)}, x_{(5)}^{(0)}, x_{(6)}^{(0)}, x_{(7)}^{(0)}]$$

$$= (7.8, 9.55, 11.00, 12.76, 14.33, 15.36, 17.52)$$

$$x_{(k)}^{(1)} = \sum_{i=1}^k x_{(i)}^{(0)}$$

$$= (7.8, 17.35, 28.35, 41.11, 55.44, 70.8, 88.32)$$

$$\text{据 } A = (B^T B)^{-1} B^T Y_n = [a \ u], \text{ 其中,}$$

$$Y_n = (x_{(2)}^{(0)}, x_{(3)}^{(0)}, \dots, x_{(7)}^{(0)})$$

$$= (9.55, 11.00, 12.76, 14.33, 15.36, 17.52)$$

其中, B 矩阵第一列数值为

$$B = -\frac{1}{2} [x_{(k)}^{(1)} + x_{(k+1)}^{(1)}] = (-12.58, -22.85,$$

$$-34.73, -48.28, -63.12, -79.56) \quad (k=1, 2, \dots)$$

其中, B 矩阵第二列数值均为 1。

$$\text{据以上公式 A 解矩阵方程可得: } u = 8.395715,$$

$$a = -0.115448.$$

可得电量灰色预测模型:

$$x_{(k+1)}^{(0)} = (1 - e^{-a})(x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a})e^{-ak}$$

$$= 80.5229(1 - e^{-0.115448})e^{0.115448k}$$

$$(k=0, 1, 2, \dots)$$

表 7 灰色模型预测法预测结果

时间/年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
最大电力 /MW	182	222.1	250.74	283.07	319.58	360.79	407.32	459.85	519.15	586.1
电量 /GWh	78	985	1 106	1 241	1 393	1 564	1 755	1 970	2 211	2 483

同样计算可得电力灰色预测模型:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{(k+1)}^{(0)} &= (1 - e^{-a})(\hat{x}_1^{(0)} - \frac{u}{a})e^{-ak} \\
 &= 1\,722.213\,0(1 - e^{-0.121\,297})e^{0.121\,297k} \\
 &\quad (k=0, 1, 2, \dots)
 \end{aligned}$$

5 结果比较

根据以上分析,可以看出比例系数增长法、弹性系数法、灰色模型预测法这 3 种方法的结果与实际值的误差较小,而线性趋势预测法的结果与实际值偏差较大,较其他 3 种方法最为不可取。其他 3 种方法中灰色预测法对电力的预测均较实际值误差小于 2%、电量较实际值误差小于 3%,是最为准确的一种预测方法,其他 2 种多年平均误差在 3% 以上,但是随着时间的推移,误差越来越小,呈收敛趋势,结果也是可取的。用图 3、图 4 可以表示如下。

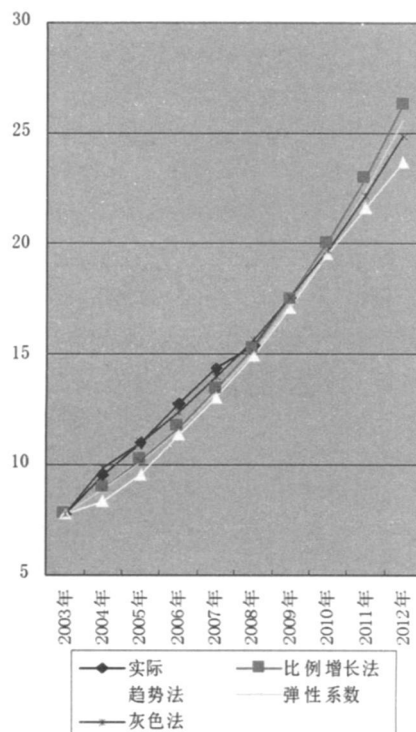


图 4 西藏电网实际电量与预测值变化趋势

6 结束语

根据西藏电网近几年的负荷情况,对未来几年西藏的电力、电量情况进行了预测分析。比较了几种常用的负荷预测方法,从结果上可以看出灰色模型预测法在预测结果整体上优于其他预测结果。建议在未来几年电力、电量规划中可以尽量采用这种预测方法,同时可以采用比例系数增长法、弹性系数法等其他多种预测法对结果进行比较分析。

参考文献

- [1] 牛东晓,曹树华,赵磊,张文文. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

作者简介:

艾建平 (1975), 男, 湖北宜昌人, 电力工程高级工程师, 工学学士, 西藏电力公司运行方式处;

杜秀琳 (1973), 女, 四川达州人, 助理工程师, 西藏电力公司运行方式处。

(收稿日期: 2010-08-19)

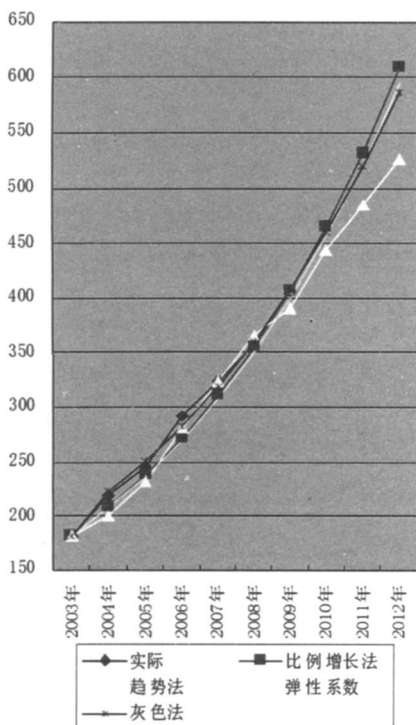


图 3 西藏电网实际电力与预测值变化趋势图

智能配电网无功优化应用研究

杜 兵

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘 要:无功优化是降低网损、提高电压质量的重要措施,分析了分散调压和无功优化的差异,构建了一种智能配电网无功优化系统,将潮流计算与灵敏度分析相结合,形成无功优化最优控制策略,实现全网电压无功优化,同时,对无功补偿设备进行实时监控。

关键词:无功优化;潮流计算;配电网

Abstract: Reactive power optimization is the important measures for reducing the network losses and improving the quality of voltage. The differences between decentralized voltage regulation and reactive power optimization are analyzed. A reactive power optimization system of intelligent distribution network is constructed which combines power flow calculation with sensitivity analysis to obtain the optimal control strategy of reactive power optimization and realize the reactive power optimization of whole network. At the same time, the real-time monitoring is carried out for reactive power compensation equipment.

Key words: reactive power optimization; power flow calculation; distribution network

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0034-02

0 引 言

社会的现代化进程日益扩大,对电能的需求飞速膨胀,电网结构也日趋复杂。社会的发展对电力企业提出了更高的要求,一方面要保证电网本身的安全性和可靠性,并尽可能地降低无功损耗,提高电网运行经济性;另一方面,要满足用户对电能高质量的要求。这种矛盾的存在必然要求引入新的技术以改善电能质量,提高电网本身的智能化水平。

电力系统无功优化是保证系统安全性、稳定性、经济性、降低网络有功损耗、提高电压质量的重要措施。但这些措施的实施,又反过来对电网的稳定和经济运行产生影响,两者相互作用,共存于电网这个高度复杂、关乎国计民生的重大网络之中。因此,必须在电能质量和电网经济运行之间寻找平衡点,有效的方法是对电网的电压和无功进行优化控制^[1~3]。

1 无功优化的现状

中国目前大多数地区电网采用分散调整的方式实施无功电压控制,即在各变电站内利用本身所具有的无功资源实施对变电站电压无功控制^[4]。比较常用的方法是根据系统当前的运行状态在九区图^[5]上

所处的位置来决定相应的控制方案,调节变压器的分接头挡位或者投切电容器,从而保证一定的电压合格率和功率因数。这种方法相对简单,但是难以完全实现全范围的无功电压最优控制。就单个站而言,提高了电压合格率和电容器利用率,但是在二级有载调压电网会出现电压频繁调整,容易造成电压调节不合理现象。随着城市配网的不断扩大,越来越多的电网中的有载调压分接开关和电容器补偿装置投入使用。为了充分发挥此类设备的作用,必须从当前的人工调节方式转变为利用专家决策系统进行自动调节的方式。

2 传统无功补偿方法存在的问题

无功补偿其目前的补偿方法存在的问题如下。

2.1 变电站无功补偿容量问题

无功补偿容量配置不合理,大多数变电站补偿电容分组投切,不能根据负荷变化需要做到就地平衡,高负荷时功率因数太低,低负荷时又出现补偿。

2.2 存在无功向配电网倒送现象

无功倒送会增加电网损耗,加重配电线路负担,尤其是采用固定电容器补偿方式的,可能在负荷低谷时造成无功倒送。如果一个城市 10 kV 及以下配电网长期以来无功补偿不足,由此造成的电网线损

严重。

2.3 无功补偿监测不力

无功补偿都是通过置于现场的无功补偿装置进行,现场装置的工作情况不能及时报送监控中心,导致管理人员对无功补偿装置性能监测滞后,不仅容易引起事故,同时系统不能根据现场情况自动调节补偿装置的投切容量,以达到更好的补偿效果。

3 无功优化新思路的提出

随着电力调度自动化程度的不断提高,通道可靠性的增强以及变电站设备遥控功能的不断成熟完善,建立基于调度自动化 SCADA(监控与数据采集)系统的全局无功电压优化集中控制系统已经成为可能。

这里提出的研究思路是将潮流计算^[6]与灵敏度分析相结合,实现配电网电压无功优化运行与调节设备动作次数的最佳组合,从而提高系统电压稳定性,降低网损和可靠减少设备动作次数,同时,系统对无功补偿设备的分布情况、工作情况、投切状态等进行实时展示和评估。

4 配电网无功优化系统设计

4.1 实现原理

配电网无功优化系统通过 SCADA 系统或独立的无功补偿装置监控系统采集全网各节点运行电压、无功功率、有功功率等在线数据,并依据全网历史资料,以配电网区域电能损耗最少、设备动作次数最少为约束条件,运行优化算法,形成相应控制策略,对有载调压变压器分接开关、无功补偿设备投切进行控制。系统控制指令借助调度自动化系统的“四遥”功能,通过调度控制中心自动执行,或通过独立的无功补偿装置监控系统下达和执行控制策略,从而实现地区电网电压无功优化运行。

4.2 系统结构

4.2.1 无功补偿装置监控子系统

无功补偿装置监控子系统基本体系结构如图 1 所示,包括通讯控制、数据处理、数据库和数据分析等功能模块,负责采集无功补偿装置所在工作点的电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率等多种电气参数的测量,并获取无功补偿装置自身的工作情况,包括动作次数、当前电容器的投切组数、设备温

度、工作电压、电流等。另一方面,系统根据数据分析模块下达的控制指令完成现场电容器组的投切,真正实现区域配电网的无功优化。同时,系统设置报表分析、故障报警等功能,进一步扩展系统功能。

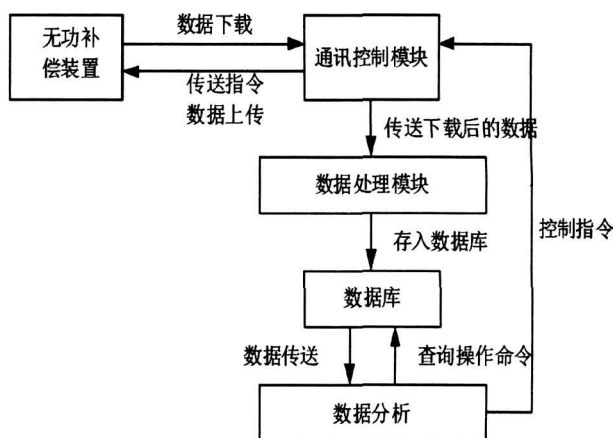


图 1 无功补偿装置监控子系统体系结构图

4.2.2 无功优化智能分析软件子系统

无功优化智能分析软件如图 2 所示,该软件系统首先从 SCADA 系统或独立的无功补偿装置监测子系统获取数据,包括:馈线的电网结构与配电变压器的基础参数、馈线出口及配电变压器日有功与无功负荷曲线数据、馈线所带配电变压器低压无功补偿装置的补偿容量、组数等信息。经过网络拓扑分析、潮流计算和无功优化计算,并最终形成变电站主变分接头开关调节指令和无功补偿装置投切指令,通过 SCADA 系统或独立的无功补偿装置监控子系统下达给执行机构,实现无功优化。

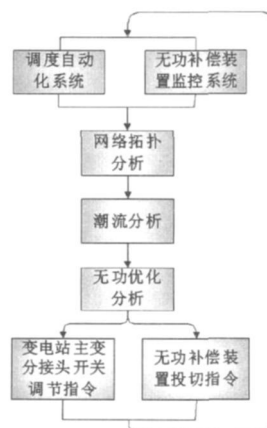


图 2 无功优化智能分析软件体系结构图

4.2.3 系统管理

系统管理是管理系统的用户、权限、基础参数、日志、数据库等,主要包括用户与权限管理、日志管理、

(下转第 80 页)

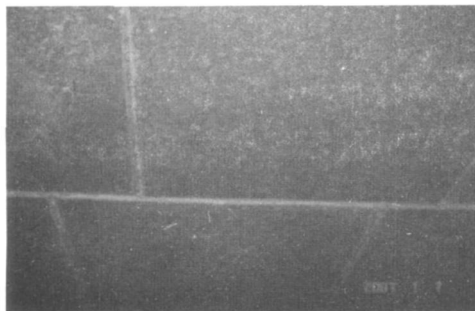


图 6 运行一年后炉膛上部耐火材料

择生产质量好的耐火材料厂家的产品,严格按照耐火材料的施工工艺及生产厂家的技术要求进行施工、浇注,严格按照耐火材料的生产厂家提供的养护曲线完成耐火材料的养护,在锅炉正常启动、停炉及负荷变化过程中,严格按照耐火材料的生产厂家提供的升温、降温速度控制锅炉的升温、降温速度,只有从设计

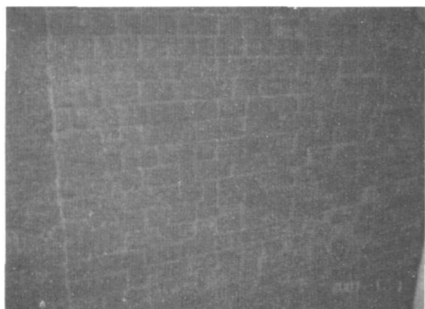


图 7 运行一年后分离器入口耐火材料

(上接第 35 页)

数据备份与恢复、基础参数设置、接口管理等子功能模块。其中基础参数设置模块负责设置采集参数类型、采集点、采集周期、统计指标等,接口管理为外部系统提供开放的数据接口,便于功能扩展。

5 结论和展望

电力系统无功潮流分布是否合理,不仅关系到电力系统向电力用户提供电能质量的优劣,而且还直接影响电网自身运行的安全性和经济性,这在与用户直接相关的配电网中显得尤为重要。由于电网容量的增加,对电网无功要求也与日俱增,若无功电源容量不足,系统运行电压将难以保证。此外,网络的功率因数和电压的降低将使电气设备得不到充分利用,降低了网络传输能力,并引起损耗增加。

进行配电网的区域无功优化研究,合理选择无功补偿点以及补偿容量,通过新的技术手段和科学的计算方法,在全网范围内实现全局无功补偿,对当前的

到使用全过程进行了有效的质量控制,大型 CFB 锅炉耐火材料的寿命和性能才能得到保证,也才能保证 CFB 锅炉的正常运行。

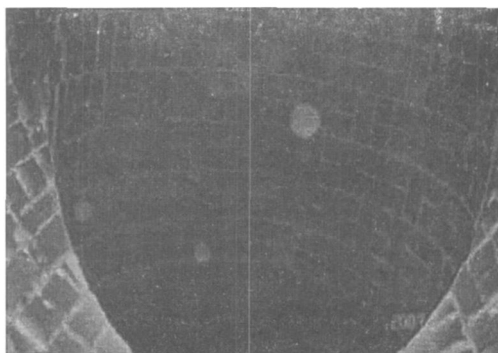


图 8 运行一年后回料器耐火材料

参考文献

[1] 法国阿尔斯通提供的循环流化床锅炉运行与维护手册 [Z]

作者简介:

袁 杰 (1968), 男, 四川宜宾人, 工程师, 四川省电力工业调整试验所四川通能电力科技有限公司开发部副经理, 从事循环流化床机组的调试、测试和新技术研发等工作。

张文清 (1969), 男, 四川成都人, 工学学士, 高级工程师, 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司生技部主任, 从事 300 MW 循环流化床机组技术管理工作。

(收稿日期: 2010-09-13)

电网企业具有重要的现实意义:一是能够有效地维持系统的电压水平,增强系统的电压稳定性,提升电网企业的服务水平;二是解决好配电网无功补偿的问题,有效避免大量无功的远距离传输,降低线损,增加售电量,提高电网企业的经营效益。

参考文献

[1] 许苑, 王科. 电力系统无功优化综述 [J]. 机电信息, 2010(18): 153-154.

[2] 王淳, 程浩忠, 陈恳. 配电网动态无功补偿的整体优化算法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 109-114.

[3] 杨丽徙, 丁荣刚, 王西训. 工业企业配电网无功电源的两阶段优化规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 32-36.

[4] 李忠诚. 地区电网电压无功优化运行控制系统的应用研究 [D]. 硕士学位论文, 山东大学, 2007.

[5] 孙宏斌. 电力系统全局无功优化控制的研究 [D]. 博士学位论文, 北京:清华大学, 1996.

[6] 兰强, 方勇杰, 鲍颜红, 等. 基于 EEAC 的考虑暂态安全稳定约束的最优潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2010, 4, 34(8): 34-38.

(收稿日期: 2010-10-20)

电力系统连锁故障评估综述

张 建, 刘 鑫, 蒲春林

(泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘 要: 比较全面地对系统连锁故障发生、演化机理以及预防措施进行了综述。首先阐述了连锁故障发生原因和产生机理; 其次从系统宏观和微观物理特性的角度将故障模型分为基于复杂网络理论和基于电力系统理论两大类。对连锁故障模型进行详细分析, 给出了不同模型的实现方式以及存在的缺陷, 并进一步指出了由于电网所具有的存在复杂性和演化复杂性, 使得准确对连锁故障的演化机理进行研究存在较大困难。最后提出了预防及缓解大停电事件的有效方法和途径。

关键词: 电力系统; 连锁故障; 复杂网络; 演化机理

Abstract: The occurrence causes, evolution mechanism and preventive measures of cascading failures in a power system are reviewed in detail. Firstly, the occurrence causes and generation mechanism of cascading failures are introduced. Then in view of the macro- and micro-physical properties of the power system, the failure models are divided into two categories which are based on complex network theory and power system theory respectively. Each failure model is analyzed in detail and the implementation styles and the existing limitations are presented. Furthermore, due to the existence complexity and evolution complexity of the power system, the great difficulties indeed exist to assess the evolution mechanism of cascading failures accurately. Finally, the effective measures to prevent and mitigate major blackouts are proposed.

Key words: power system; cascading failures; complex network; evolution mechanism

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0036-04

0 前 言

随着电力系统的日益扩大, 系统内元件间联系也日趋复杂, 如何保证系统安全稳定运行是关键。近年来, 因自然灾害和突发事件引起的电力系统事故时有发生, 其直接后果导致系统发生灾难性事故, 进而引发大面积停电^[1-3]。1996年 7、8 月份美国西部接连发生两次大停电事故; 2003 年下半年在北美和加拿大、英国伦敦、瑞典和丹麦、意大利都先后发生了大面积停电事故; 2008 年 1 月中国南方的冰雪大灾难造成的大面积停电事件, 都给社会甚至是国家安全带来了严重的影响。

大量研究表明, 电力系统大面积停电事件是由多重故障, 特别是连锁故障引起的^[4]。连锁故障是一种发生概率较低但后果非常严重的事故, 定义为系统内某一元件 (可能是输电线路或电力设备) 发生故障后, 引起相邻线路过负荷或保护动作连锁跳闸, 如此传递扩散, 最终导致大面积停电甚至整个电网的停运^[4]。因此, 在建设坚强智能电网的今天, 强化电网

安全, 保证可靠供电就必须对系统连锁故障的产生、形成及演化机理进行研究分析, 以便找到更有效的预防性措施。

1 电力系统连锁故障的特点

1.1 连锁故障发生原因

电力系统遭受一定程度的扰动时, 可能导致系统发生连锁故障。从电力系统事故发生的原因看, 主要包括外部因素和内部因素两种^[3], 具体如下。

1) 自然因素。如冰雪、地震、高温、海啸、暴雨等。其中最典型的例子是 2008 年年初中国南方发生的冰雪灾, 以及 2008 年 5 月 12 日中国四川汶川发生里氏 8.0 级特大地震, 均导致了大规模的停电事件。这些扰动发生概率较低, 但危害极其严重。统计表明约 20% 的故障由自然因素引起。

2) 电力设备故障因素。设备自身老化、失修导致其电气性能和机械性能出现故障和失效。

3) 人为因素。包括人为误操作导致设备误动或拒动、设备生产及维护不当等。

4)电力供需不平衡的电力危机因素。负荷和发电量突变引起两者之间的不平衡,如系统解列,联络线断开等。

其中,自然因素属于外部因素,其他三类属于内部因素。

1.2 连锁故障诱因及发生机理

当系统发生故障时,系统内的保护和控制措施动作,以确保系统安全稳定运行。因此,系统连锁故障导致的大停电事件往往不是某个简单的故障事件,而是一系列事件和诸多偶然因素共同发展和演化的结果。大停电事件一般有四个核心诱因,即功角稳定破坏、电压崩溃、频率崩溃和过负荷连锁反应^[4]。这些诱因往往不是孤立存在的,而是诸多因素相继和综合作用的结果。例如,系统失步将引起电压波动,可能诱发电机跳闸,导致系统电压和频率恶化而崩溃;系统解列,功率不平衡加剧引起线路过负荷而连锁跳闸,同时,功率的严重短缺又引起系统频率下降等。

电力系统连锁故障强调故障发生的关联性,即上一层故障是如何诱发下一层故障的。连锁故障的发生机理可简单描述为^[5]:电力系统正常运行时每个元件都带有一定的初始负荷,当由于某种原因导致系统发生故障时,继电保护装置动作,使得系统某一个或几个元件过负荷,此时系统潮流平衡引起负荷在其他节点上的重新分配。如果原先正常工作的元件不能承受多余的负荷,将引发过负荷故障,依次传递,并最终导致系统大面积瘫痪和大规模停电事故的发生。

2 系统连锁故障模型

2.1 电网的复杂性

电力系统作为最复杂的人工网络之一,它的复杂性主要体现在其存在复杂性和演化复杂性^[6],表现如下。

1)电网的大规模性和行为的统计性:电网自形成起经过短短一百多年的发展,所涉及到的节点数成千上万,甚至是更多。超大规模网络的行为具有统计特性。

2)连接结构的复杂性:电网虽然是一个人工网络,但其连接结构却既非完全规则,又非完全随机,具有内在的自组织规律。

3)节点动力学行为的复杂性:电网拓扑结构中的各个节点,包括发电机、变压器和变电站,本身就是

典型的非线性系统,具有分岔和混沌等非线性动力学行为。

4)故障的不可预测性:电网中故障受天气、环境、网络拓扑等诸多因素的影响,具有不确定性。

5)网络时空演化的复杂性:随着技术的不断发展,电网的层次结构历经多次改革和连接方式的大幅度变化,表现出空间和时间演化上的复杂性。

6)故障演化的复杂性:电力系统故障在较长的时间内,既表现为无序的非稳定性,又表现为有序的节律性和周期性;在较短的时间内,多时间尺度的动态行为以及各种失稳模式和振荡模式复杂变化。电力系统故障在空间上既存在普遍性,又具有区域性。

上述特征 1)~4)属于存在复杂性,5)和 6)属于演化复杂性。电力系统的复杂性为连锁故障研究提出了新的挑战。

2.2 系统连锁故障模型

连锁故障模型的研究涉及到电力系统、统计物理学、非线性控制论等多个领域。这些模型从不同的程度上反映了电力系统宏观及微观的物理特性,可分为基于复杂网络理论和基于电力系统理论的连锁故障模型。其中,前者包括小世界模型^[7]和无标度模型^[8]、相隔中心性模型^[9]、Motter-Lai模型^[10]等;后者包括 OPA 模型^[11]、Cascade模型^[12]、隐性故障模型^[13]等。

2.2.1 小世界模型和无标度模型

20世纪 60年代以来,随机图理论在将近 40年的时间里一直都是研究复杂网络的基本理论,但实际中绝大多数网络并不是完全随机的。20世纪末,对复杂网络的科学探索发生了革命性的转变,其中小世界网络模型及无标度网络模型可以看作是复杂网络研究新纪元开始的标志。

Watts及 Strogatz于 1998年首次提出了小世界网络模型。和随机网络相比,小世界网络具有相似的特征路径长度以及很大的聚类系数。大量的研究表明,小世界网络广泛存在于社会的复杂网络中,例如神经网络、基因网络、人际关系网、互联网等。文献[7]验证了美国西部电网是基于规则网络和随机网络之间的小世界网络。随后,巴西电网和中国电网也被证明具有小世界特性。

研究发现很多大型复杂网络都呈现无标度特性,即网络的节点度概率分布遵循幂律分布。为解释这种现象,Barabasi及 Albert于 1999年提出无标度网络

模型^[8]。模型指出增长和择优连接是无标度网络的两个重要因素。文献^[9]指出美国西部的高压电网度分布近似服从幂律分布,其幂指数为 4.0。

电网的小世界特性主要反映节点间联系的紧密程度,而无标度特性则反映了节点边的分布特性。两者基于图论的思想,采用节点和边来表示电网中的电气设备以及设备间的联系。通过对网络特征量,例如聚类系数、平均路径长度、度分布等的提取,使得人们对含有成千上万甚至是数百万节点复杂网络的探索成为可能。

2.2.2 相隔中心性模型

相隔中心性模型又称 Holme-Kim 模型^[9],该模型主要关注网络演化所导致的过负荷效应,其基本假设是任意两个节点之间信息或能量的交换都通过最短路径进行。该模型通过定义相隔中心性的概念来评估网络中节点和边的负荷和容量。该模型以无标度网络为基础,然而实际中电力网络并非都是无标度网络;模型的网络任意生长变化,以及假设网络中各个节点的容量相同,这都与实际电力系统不符合。

2.2.3 Motter-Lai 模型

该模型^[10]与相隔中心性模型基本类似,也采用某节点最短路径的总数来定义节点负荷。该模型假设节点的容量正比于其初始负荷,且按一定的比例增长。该模型与相隔中心性模型不同之处在于,该模型假设各节点容量不同,节点故障时将该节点从网络中移除,连锁故障的发生时间远小于网络生长时间。

2.2.4 OPA 模型

OPA 模型是由美国橡树岭国家实验室、Wisconsin 大学电力系统工程研究中心和 Alaska 大学的多位研究人员共同提出的。该模型包含传输线路、负荷及发电机的直流潮流模型,其核心是以研究负荷变化为目的,探讨输电系统大停电的全局动力学行为特征。该模型将电力系统比作沙堆。模型涵盖了快速和慢速两个动态过程。其中,快动态过程模拟系统的日运行情况,并采用线路开断表示连锁故障的发生;慢动态过程模拟电网的长期演化过程,包括系统负荷水平的持续增长以及网络的规划建设,是在外部驱动力作用下发生的。

该模型以一定概率随机开断线路,通过最优潮流调整发电机出力以及负荷值,检验传输线路潮流是否接近传输容量,并以一定的概率开断这样的线路,依次递推,直到快动态过程结束。对于开断的线路进行

改造以增加其传输容量。

该模型的不足之处在于:所用网络节点数目少;假设所有元件的特性相同;电网控制仅仅通过调节模型中少数参数实现;模型参数与系统实际参数间对应关系不清晰;无法反映电网的频率及电压无功特性等。

2.2.5 Cascade 模型

Cascade 连锁故障模型基于元件级联失效思想,假设系统由 n 个相同的元件构成,所有元件初始时都处于正常运行状态,且具有相互独立的初始负荷,其大小在某一区间内随机变化。在每个负荷上加一随机扰动,当元件的负荷超过某一故障阈值时,判断该元件发生故障。该故障元件上的负荷随之转移到其它未发生故障的元件,依次类推,从而引发系统发生连锁故障。

虽然 Cascade 连锁故障模型可对大停电事故进行定性的分析,但存在以下不足:①假设系统中元件相同;②故障元件上负荷的再次分配未考虑网络拓扑的影响;③未考虑发电侧功率的变化情况。

2.2.6 隐性故障模型

隐性故障为系统继电保护装置的永久性故障,一般由硬件缺陷或保护整定值不当造成。这种缺陷只有当系统处于不正常运行状态时才会表现出来,其直接后果将导致被保护元件的误动。按照形成原因的不同,可将隐性故障分为两类,即由线路保护及发电机母线低电压引起的隐性故障。前者为当线路断开时,与该线路两端相连的所有线路存在发生隐性故障的可能;后者为系统无功不足导致发电机跳闸时,与该发电机相连所有线路存在发生隐性故障的可能。

隐性故障模型基于电力系统自身的特点,仿真由随机选取的初始线路跳闸开始,如果连接在该线路两侧的线路潮流超过其传输容量则判定该线路跳闸,否则按照隐性故障原理和发生概率判断不受保护的线路是否跳闸,直至连锁故障结束。

该模型的缺点在于未考虑到系统的动态特性。

3 连锁故障大停电的预防

现阶段研究关于预防和缓解大停电事件的方法和途径可以概括为:降低初始扰动的概率;及时阻断连锁故障的传播;释放系统压力,使系统远离临界运行状态^[14]。

对连锁故障这种小概率的事故进行预防控制,虽然可以提高系统的抗干扰能力,但考虑到故障发生的随机性,因此,对于降低大停电故障风险的作用十分有限。同时,电网互联导致电网规模的扩大,元件故障所波及的范围也随之扩大,采用常规方法对所有故障可能组合进行在线分析,从计算能力和计算精度方面都遇到了很大的困难。

从运行和规划的角度研究如何释放系统压力,使系统远离大停电前的临界状态。采用适当的切换操作和负荷管理可以有效地降低输电系统压力。同时,合理的规划可以引导系统向更均衡的方向发展。

4 结 论

近年来世界范围内发生了多起大停电事件,大多表现为连锁故障,因此对系统连锁故障进行研究引起了国内外学者的广泛关注。以上较详细对连锁故障产生、形成、演化机理以及预防措施进行综述。从连锁故障的特点出发,指出连锁故障强调故障发生的关联性,然后从系统宏观和微观的角度对故障模型进行分类,给出了各类模型的实现方式和存在的缺陷,这些模型为揭示电网连锁故障及由其引发的大停电提供了有益的理论基础。最后提出了预防及缓解大停电事件的有效方法和途径。

参考文献

- [1] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及其防治措施 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 1—6.
- [2] 甘德强,胡江溢,韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1—5.
- [3] 张文亮,周孝信,白晓民,等.城市电网应对突发事件保障供电安全的对策研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 1—7.
- [4] 宋毅. 电力系统连锁故障机理及风险评估方法研究 [D]. 天津:天津大学, 2008.
- [5] 孙可,韩祯祥,曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述 [J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1—9.
- [6] 丁理杰. 复杂电网连锁故障大停电分析与预防研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [7] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-world Networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440—442.
- [8] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999, 286: 509—512.
- [9] Home P. Edge Overload Breakdown in Evolving Network [J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 036119. 1—036119. 7.
- [10] Lai Y C, Motter A E, Nishikawa T. Attacks and Cascades in Complex Networks [J]. Lecture Notes in Physics, 2004, 650: 299—310.
- [11] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts [C]. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2001, 1: 710—718.
- [12] Dobson I, Chen J, Thorp J S, et al. Examining Criticality of Blackouts in Power System Models with Cascading Events [C]. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2002, 1: 7—10.
- [13] Phadke A G, Thorp J S. Expose Hidden Failures to Prevent Cascading Outages [J]. IEEE Computer Application in Power, 1996, 9(3): 20—23.
- [14] 任惠. 电力系统连锁故障风险分析 [D]. 北京:华北电力大学, 2009.

作者简介:

张 建 (1968), 男, 工程师, 主要从事电网运行管理的工作;

刘 鑫 (1983), 男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化等方面的研究;

蒲春林 (1986), 男, 助理工程师, 主要从事配网方面的工作。
(收稿日期: 2010—07—05)

• 简讯 •

低碳背景下核电发展趋势思考

核电装机容量到 2020 年实现 70 000 MW 以上的目标, 届时我国天然铀需求量将达到近 14 000 t/a。我国必须在加大国内勘探开发力度的同时, 充分利用海外资源和国际市场, 但由于铀资源的特殊性, 海外开发和天然铀贸易难度大、风险高、不确定因素多, 使之成为能否保证核电加快发展的又一重要因素; 2020 年以前能否实现核电发展目标, 与三代核电技术的消化、吸收、再创新息息相关, 只有建立起真正的核蒸汽系统供应商, 才能保障我国核电主设备领域实现技术的不断升级, 最终拥有自主知识产权。

10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析

刘从洪, 邓晓林

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘要:无功补偿是节能降耗、改善电网电压质量、提高功率因数最方便、最经济有效的方法之一。随着农村用电负荷的迅速增长, 部分供电半径大、负荷重的 10 kV 配电线路无法满足用户的需求, 将线路无功补偿技术应用到 10 kV 农网线路中, 是一种积极可行的手段。首先介绍了无功补偿的配置原则, 然后介绍了 10 kV 线路无功补偿安装容量和安装位置的确定方法, 最后介绍了 10 kV 线路无功补偿技术在德阳农网中的成功应用案例。

关键词:农网; 无功补偿; 应用; 分析

Abstract: Reactive power compensation is one of the most convenient and cost-effective methods for saving energy, improving the voltage quality of power grid and increasing the power factor. With the rapid growth of rural electricity load, some 10 kV distribution lines with large radius of power supply and heavy load can not meet the needs of users, applying the reactive power compensation to the circuit of 10 kV rural grid is an active and feasible means. The configuration principle of reactive power compensation is introduced firstly, and then the method to determine the installation capacity and installation location of reactive power compensation in 10 kV line is introduced. At last, the successful application cases of reactive power compensation for 10 kV line in Deyang rural power grid are introduced.

Key words: rural power grid; reactive power compensation; application; analysis

中图分类号: TM714 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0040-03

0 引言

德阳是“5.12”地震的重灾区, 灾后电网 10 kV 综合线损持续偏高、电压质量急剧下降、客户反映电压偏低的情况越来越多。为有效降低线损、提升供电质量, 决定从管理和技术两方面入手解决, 制定了一系列管理措施, 取得了一定成效。但是部分负荷重、供电半径大的 10 kV 公用线路, 线损仍然居高不下、电压质量偏低的状况未得到根本解决。经过全面细致地分析和现场查勘, 决定在这些农网线路上加装线路无功补偿装置此项技术手段来实现降损、提高线路的传输功率和功率因数、提升供电质量的目的。

1 10 kV 农网线路无功优化和补偿的原则

目前国内配电系统无功补偿方式主要有: 一是变电站集中补偿; 二是线路无功补偿; 三是低压集中补偿; 四是用户终端分散补偿^[1]。以下主要讨论的是 10 kV 线路无功补偿方式, 10 kV 农网线路无功补偿配置应遵循以下原则。

(1) 确定线路无功补偿方案时应遵循“全面规划、合理布局、分散补偿、就地平衡”和“集中补偿与分散补偿相结合, 以分散补偿为主”的原则, 以提高功率因数、损耗最小、提高末端电压、年运行检修费用最小等为目标^[2]。

(2) 配电网的无功补偿以配电变压器低压侧集中补偿为主, 以高压补偿为辅。配电变压器的无功补偿装置容量可按变压器最大负载率为 75%, 负荷自然功率因数为 0.85 考虑, 补偿到变压器最大负荷时其高压侧功率因数不低于 0.95, 或按照变压器容量的 20%~40% 进行配置。

(3) 配电线路上装设的并联电容器在线路最小负荷时不应向变电站倒送无功。如配置容量过大则必需装设自动投切装置。

2 10 kV 农网线路的无功补偿

2.1 补偿方式的种类

10 kV 线路无功补偿主要补偿线路感性电抗所消耗的无功功率和配电变压器励磁无功功率损耗。线路无功补偿装置可选用无功功率、功率因数、电压、

时间、无功电流等各种不同的投切控制方式^[3]。10 kV 线路无功补偿的典型应用模式主要有四类:混合补偿(即“固补+动补”)、全自动补偿、固定补偿和滤波式补偿。

2.2 确定最佳补偿度、安装位置的方法

10 kV 线路中的无功补偿装置目前一般是固定投入,为了最大限度地减少配电线路的电能损耗,使其补偿获得最佳效果,分散补偿的电容器在线路上的安装位置应尽量合理,一般可通过下列公式计算、确定电容器安装组数、最佳安装位置和损耗下降率之间的关系为

$$Q_x = 2nQ(2n+L)$$

$$\Delta(\Delta P)\% = 4n(n+L)/(2n+L)^2 \times 100\%$$

式中, Q_x 为线路所补偿的电容器容量; $\Delta(\Delta P)\%$ 为线路线损的下降率; L 为线路长度。

通过计算得到配电线路所补偿的电容器分组数、安装位置及线损下降率之间的关系,见表 1。

表 1 线路负荷呈均匀分布时电容器安装位置表

电容器 分组数	电容器安装位置			降低线损百分数 /%
	第一组	第二组	第三组	
1	2/3	/	/	88.9
2	4/5	2/5	/	96.0
3	6/7	4/7	2/7	98.0

从上表可见,线路上安装电容器组数越多,降损效果也越好。但所安装的电容器装置往往受成本的限制,为了提高电容器组的补偿效益及减少投资,电容器组的布点不宜过多,一般按 1~3 个考虑即可。农网线路供电半径一般不超过 15 km,当线路长度为 1~5 km 时,可在其 2/3 处安装一组补偿电容;当线路长度为 5~10 km 时,可分别在其 2/5 和 4/5 处各安装一组补偿电容;当线路长度为 10~15 km 时,可分别在其 2/7、4/7 和 6/7 处安装一组补偿电容。

2.3 计算无功补偿容量和确定分散补偿容量

(1) 从提高功率因素计算线路无功补偿容量

如果电力网最大负荷日的平均有功功率为 P_{pj} , 补偿前的功率因数为 $\cos\varphi_1$, 补偿后的功率因数为 $\cos\varphi_2$, 则补偿容量可用下述公式计算。

$$Q_c = P_{pj}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$

$$= P_{pj} \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_2} - 1} \right)$$

式中, Q_c 为所需补偿容量; P_{pj} 为最大负荷日平均有功功率; $\cos^2\varphi_1$ 为最大负荷日平均功率因数; $\cos^2\varphi_2$ 为

功率因数期望值。

通常,将功率因素从 0.9 提高到 1 所需的补偿容量与将功率因素从 0.72 提高到 0.9 所需的补偿容量相当。因此,在高功率因数下进行补偿其效益将显著下降。这是因为在高功率因数下,功率因数的上升率变小,因此在实际的应用中,根据实际情况确定功率因数的期望值。

(2) 分散补偿容量确定方法

10 kV 线路上需要安装的补偿并联电容器的容量,应根据线路布局,以最佳降损为原则,通过计算确定。一般可按各条分支线的负荷电流来计算补偿容量,即

$$Q_{x1} = \frac{I_1}{I} Q_x, Q_{x2} = \frac{I_2}{I} Q_x \cdots Q_{xn} = \frac{I_n}{I} Q_x$$

式中, $I_1, I_2 \cdots I_n$ 为各分支线首端负荷电流(A),如图 1 所示。

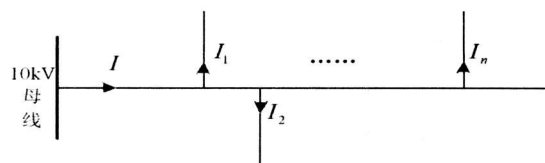


图 1 各分支线首端负荷电流图

I 为线路首端的总电流(A);

Q_x 为线路需要补偿的容量(kvar)

$Q_{x1}, Q_{x2}, \cdots, Q_{xn}$ 为各分支线需要补偿的容量(kvar)。

一般情况下,对于负荷均匀分布或接近均匀分布的线路:①当安装 1 组电容器时,其容量为线路平均无功功率的 2/3;②当安装 2 组电容器时,每组容量为线路平均无功功率的 2/5;③当安装 3 组电容器时,每组容量为线路平均无功功率的 2/7;也就是说,按网损最小的原则,每条 10 kV 线路所需补偿的总容量应按一定比例分配。一般首端补偿容量(即变电站为本线路首端提供的补偿容量)与线路上各分布点上的补偿容量之间的比例为

①当安装 1 组电容器时,容量比为 $\frac{1}{3} : \frac{2}{3}$;

②当安装 2 组电容器时,容量比为 $\frac{1}{5} : \frac{2}{5} : \frac{2}{5}$;

③当安装 3 组电容器时,容量比为 $\frac{1}{7} : \frac{2}{7} : \frac{2}{7} : \frac{2}{7}$ 。

在实际 10 kV 线路中,线路负荷分布往往不均匀,因此在确定分散补偿容量时,需根据实际线路负荷分布情况,灵活运用上述方法确定分散补偿容量。

表 2 线路参数及负荷情况表

线路名	长度 /km	配变台数 /台	配变容量 /kVA	有功电量 /MW·h	无功电量 /MW·h	功率因数	最高负荷 /MW	最小负荷 /MW	平均负荷 /MW
线路 a	11.5	95	9 665	1 398.9	873.4	0.848	3.79	1.15	1.87
线路 b	14.6	111	10 760	1 595.6	1 076.5	0.828	3.88	1.36	2.12
线路 c	8.9	87	9 115	1 188.7	763.2	0.841	2.89	0.85	1.54

表 3 线路无功补偿技术实施前后效果表

	2009 年 上半年	2010 年 上半年	2009 年 上半年	2010 年 上半年	2009 年 上半年	2009 年 上半年
	线路 A		线路 B		线路 C	
线损率 /%	26.83	19.86	23.80	13.02	26.57	16.67
降损百分比 /%		25.97		45.29		37.2%
功率因素	0.851	0.948	0.812	0.964	0.838	0.962
节约电量 /kW·h		614 057		837 606		478 170
节约电费 /元		305 800.38		417 127.78		238 128.66

3 补偿案例及效益分析

3.1 补偿线路现状及参数

通过对所管辖 10 kV 农网线路基本情况进行分析,作为试点,选择以下三条线路:线路 A、线路 B 和线路 C 进行线路无功补偿技术的实施,三条线路的基本参数及 2009 年 8 月份负荷情况见表 2 所示。

3.2 补偿方式确定

考虑到三条农网线路供电半径较长,有功负荷较重,无功负荷比较稳定且有一定的无功量叠加起伏,因此选用混合补偿(即“固补+动补”)的方式,在线路上进行分散补偿。

3.3 补偿容量确定

线路 A 配电变压器容量为 9 665 kVA,线路配电变压器无功损耗为固定损耗,损耗因素主要为配电变压器的励磁涌流,故线路 A 的固定无功损耗为 387 kvar(配电变压器的励磁涌流为 4%~5%)。如果要将功率因数提高到 0.95 则需要补偿容量为

$$Q_c = P_{pj} (\lg \varphi_1 - \lg \varphi_2) = P_{pj} \left(\frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right)$$

$$= 139.89 \times 10^4 / (24 \times 31) \times \left(\frac{1}{\sqrt{0.848^2} - 1} - \frac{1}{\sqrt{0.95^2} - 1} \right) = 592 \text{ kvar}$$

通过计算,线路 A 共需补偿容量近似取为 600 kvar 其中固定补偿部分近似取为 350 kvar 动态补偿部分近似取为 250 kvar

同理可以求得线路 B 和线路 C 的无功补偿容量分别为:750 kvar(固补:400 kvar 动补:350 kvar),500 kvar(固补:350 kvar 动补:150 kvar)。

3.4 补偿装置安装位置及分散补偿容量确定

考虑到线路 A 长为 11.5 km,大于 10 km,线路 A 负荷分布中端负荷比线路首端和尾端重一些,因此,综合考虑下将无功补偿装置安装在线路 A 的 2/7、4/7、6/7 处,各处相应的补偿容量分别为固补 150 kvar 动补 250 kvar 固补 200 kvar 同理可以设置线路 B 和线路 C 的补偿装置安装位置和容量。

3.5 效益分析

线路无功补偿装置于 2010 年 1 月在三条农网线路成功投运,表 3 为三条线路 2010 年上半年与 2009 年下半年的实施效果对比,可以看出线路加装补偿装置后,使电网降低了损耗,提高了线路的功率因数,提高了电压质量,为企业提升优质服务、树立社会形象具有积极的意义。

4 结束语

该项目自 2010 年年初启动以来,取得了良好的效果,并且在 7 月份已成功通过专家组验收,作为试点项目的成功运行,项目组还编制了《35 kV 变电站及其 10 kV 配电线路无功补偿配置技术规范》,为 10 kV 线路无功补偿技术在省内大规模应用奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 刘建强. 配电网四种无功补偿技术方案比较 [J]. 电工技术杂志, 2003(3): 31-34.
- [2] 倪健立, 马放端. 农村电网节能降损与自动化适用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 肖崇礼. 正确选用柱上无功补偿装置的投切方式 [D]. 2003 年电力电容器学术论文, 2003: 25-30.

作者简介:

刘从洪 (1981), 男, 硕士, 工程师, 从事电网电力调度工作;
邓晓林 (1971), 男, 本科, 工程师, 从事电网电力调度工作。
(收稿日期: 2010-08-10)

宜宾 220 kV 环网光纤保护安全性分析

张 雪¹, 张全明², 赵 强³

(1 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2 宜宾电业局, 四川 宜宾 644002; 3 超(特)高压公司, 四川 成都 610041)

摘 要:随着电网通信技术的发展, SDH 光纤通信得以快速发展, 专用纤芯保护也逐步应用。随着电网的发展, 单一的专用光纤保护通道的网络安全性(也称网络生存能力)较低, 可靠性受到严重威胁, 基于 SDH 环网的复用光纤保护通道作为专用光纤保护通道的辅助通道, 提高了网络安全性, 但由于误码、时延、同步等方面问题将影响继电保护通道的可靠性和稳定性。以光纤环网为基础, 分析光纤保护通道的安全策略。

关键词: SDH 环网; 复用保护; 安全; 分析

Abstract: Along with the development of communication technology for power grid, SDH (synchronous digital hierarchy) optical fiber communication has developed rapidly, and the appropriate fiber protection is put into service gradually as well. But the security level of the single appropriate fiber protection channel is low, and the reliability is under serious threat. As the secondary channel of the appropriate fiber protection channel, the multiplexed optical fiber protection channel of SDH ring network enhances the network security. But the reliability and stability of relay protection are affected by some problems such as the bit error rate, time delay and synchronization etc. Based on the fiber ring network, the security strategies for fiber protection channel are analyzed.

Key words: SDH ring network; multiplexed optical fiber protection; safety; analysis

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0043-02

随着宜宾电网和电网通信技术的发展, 以 OPGW 和 ADSS 光缆为传输介质的 SDH 光纤通信在宜宾电网得以快速发展, 专用纤芯保护在宜宾电网也逐步应用。随着电网的发展和以 500 kV 宜宾站为中心的 220 kV 环网即将形成, 单一的专用光纤保护通道的网络安全性(也称网络生存能力)较低, 可靠性受到严重威胁, 基于 SDH 环网的复用光纤保护通道作为专用光纤保护通道的辅助通道, 提高了网络安全性, 但由于误码、时延、同步等方面问题将影响继电保护通道的可靠性和稳定性。下面以光纤环网为基础, 分析光纤保护通道的安全策略, 为光纤保护通道的规划、建设提供参考。

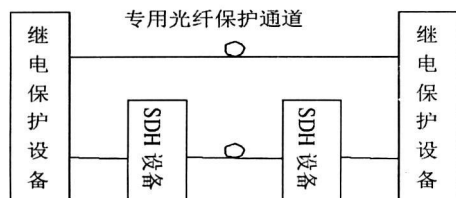


图 1 光纤保护系统结构

1 光纤保护通道

按照保护设备与光纤通道的连接方式, 可将保护

通道划分为专用光纤保护通道和复用光纤保护通道, 其结构如图 1 所示。

专用光纤保护通道是将两端继电保护设备按照点对点方式通过光纤直连, 可提供高速传输通道, 但光纤故障将直接威胁其可靠性; 专用光纤保护仅传输保护信息, 光纤资源利用率低, 但具有维护简单、误码率低、传输速率快, 因此专用光纤保护在现阶段逐步得以广泛应用。

复用光纤保护通道是将保护信号与其他信号一起复用到 SDH 光纤传输网络, 具有光纤资源利用率高、可靠性高、组网灵活等特点, 但由于误码、时延、同步等问题并未得到广泛应用。

2 通道特性对继电保护业务的影响

随着宜宾 220 kV 环网的建设, 基于 SDH 的 2 M 数字复用保护方式将在宜宾电网不断发展和应用, 一系列的技术问题也必然显现出来。

(1) 通道时延问题。通道时延对继电保护动作的影响是累加计算, 有时甚至是 2 倍的时延影响。

(2) 自愈环网通道切换时延一致性问题。在

SDH 自愈环通道切换时,由于通信电路长度、传输节点等不一致,极可能造成通道收发时延不一致,这将影响纵差保护采样同步。

(3)通道误码影响。继电保护信息通常采用 HDLC 格式,按固定间隔发送报文。由于通道误码将使报文或者 CRC 校验值的某一位值发生错误或缺失,导致报文通不过校验或者得到非完整报文。

(4)通信设备维护的影响。通信设备难免要进行插拔、复位等操作,检修操作时可能引起通道中断时间较长,造成继电保护装置通道报警。

(5)2 M 通道再定时的影响。SDH 传输网逐级采用跟踪时钟,能确保系统时钟的一致性。但 PDH 支路输出信号质量较差,不能作为下级定时基准,必须增加再定时功能。支路输出信号再定时功能打开时,不管对方信号发送频率如何,接收方信号都要以系统标准的 2 bit/s 频率输出信号。

3 宜宾 220 kV 环网保护存在的安全问题

随着宜宾 220 kV 环网的建设,其光纤通信网采用 ADSS+OPGW 光缆,系统设备均为 SDH 设备。如图 2 所示。

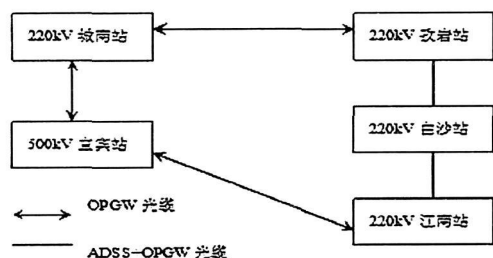


图 2 光缆线路结构

系统保护以专用纤芯保护为主,以复用光纤保护为辅。但结合光缆线路实际和通道特性对继电保护通道的影响,宜宾 220 kV 环网保护还存在以下几个安全问题需要解决。

(1)光缆线路对专用纤芯保护的影响。如图 2 所示,宜宾 220 kV 环网专用纤芯保护纤芯除 220 kV 江南—500 kV 宜宾—220 kV 城网—220 kV 孜岩采用 OPGW 光缆外,其余段为 ADSS+OPGW 光缆方式,而 ADSS 光缆易受外力破坏,直接影响继电保护通道的可靠性。

(2)传输特性的影响。结合宜宾 220 kV 网架规划,图 2 所示光缆通道今后还将随线路建设开接进其他变电站,开接后环网节点增多,系统距离增长。这

些因素将影响传输通道的时延、误码等特性,从而影响继电保护通道的可靠性。

4 结论及建议

通过以上对 SDH 传输特性和宜宾 220 kV 环网光缆线路结构等方面的分析,为确保继电保护动作同通道时延同消长,在提供通道时延极限范围内,满足通道双向时延一致性要求的前提下,各类保护都能正常工作,在复用光纤保护通道设计时,可采取以下措施。

(1)鉴于网络节点和 SDH 复用造成的时延占据较大份额,在设计光纤复用保护通道时应尽量减少经过的网络节点数,采用相对简单的网络结构,充分利用设备资源优化路由设计。

(2)考虑自愈环网保护倒换可能引起继电保护误动或拒动,复用光纤保护电路采用 1+0 方式配置,并尽量减少网元节点。

(3)为尽量避免传输时延,在设计时主保护采用专用纤芯纵动保护,复用光纤保护为距离或方向保护,以提高系统的可靠性。

(4)为避免设备检修引起的保护误动,在条件允许的情况下尽量采用点对点方向建设保护专用通道。

(5)对于必须采用不同厂家的 SDH 设备 2 M 对接时,应充分考虑 SDH 设备 2 M 支路再定时功能默认为打开状态,必须与保护专业充分沟通的基础上关闭 2 M 支路再定时功能,继电保护装置时钟采用主—主或主—从方式较好;若不关闭 2 M 支路再定时功能,则设置为从—从方式较好。

参考文献

- [1] 李端生,马益平,王伟. 光纤电路差动保护通道时钟设置[J]. 电力系统通信, 2006, 27(2): 8—10;
- [2] 张文瀚. SDH 光纤自愈环网传输时延的分析及解决[J]. 电信科学, 2004(11): 59—62;
- [3] DL/T 547—1994 电力系统光纤通信运行管理规程[S].

作者简介:

张雪(1981),女,助理政工师,从事档案管理、情报检索工作;

张全明(1971),男,高级工程师,从事电力系统通信管理及运行、维护;

赵强(1975),男,高级工程师,从事电力系统生产安全管理。

(收稿日期: 2010—09—28)

基于 S 变换图像灰度量化的短时电能质量扰动识别分类

张中全, 赵 俊

(成都电业局, 四川 成都 610041)

摘 要:针对短时电能质量扰动分类大多依赖分类器, 分类准确率不高这一难题, 提出了基于 S 变换模时频矩阵灰度图像法。首先对常见的几种扰动进行 S 变换分析, 得到模时频矩阵, 再应用数字图像灰度方法, 将模矩阵各元素值用灰度图方式表示, 分析其灰值分布特征, 引入灰度期望和灰度方差两指标, 量化灰度图像灰值分布, 并根据量化结果建立扰动标准判据, 实现扰动分类。仿真实验表明, 该方法不依赖于分类器, 能准确地对扰动进行分类且对噪声不敏感, 是一种有效的短时电能质量分类方法。

关键词:短时电能质量扰动; S 变换; 模时频矩阵; 灰度图像; 扰动分类

Abstract: A classification method for short duration power quality disturbance by measuring the grey scale image of S-modal time-frequency matrix is proposed. Firstly, the common power quality disturbance signals are decomposed with S-transform analysis and the S-modal time-frequency matrix is constructed. the grey scale image of which could be easily calculated according to digital image grey scale method. Then, the grey value and grey variance are introduced to quantify the characteristics of S-modal time-frequency image in order to achieve the disturbance classification. The simulation results show that the proposed method can classify the disturbances exactly and is not sensitive to noise, so it is an effective classification method of short duration power quality.

Key words: short duration power quality disturbance; S-transform; module time-frequency matrix; disturbance classification of grey scale image

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)06-0045-06

0 引 言

随着科学技术和国民经济的快速发展, 电能的需求量也极大增长, 同时电能质量越来越显示其重要性, 电力部门和用户对电能质量的关注也日益增加^[1]。典型的短时电能质量扰动 (short duration power quality disturbance SDPQD) 现象有: 电压凹陷、电压凸起、电压中断、谐波、振荡暂态等。对各种电能质量扰动进行准确辨识和分类是控制和治理电能质量问题的前提^[2]。

从国内外的研究情况来看, 在短时电能质量扰动分析领域中, 大多采用傅里叶变换 (FFT)^[3,4]、小波变换 (WT)^[5-9]、S 变换 (S-Transform, ST)^[10] 等进行扰动检测及特征提取, 然后采用人工神经网络 (ANN)^[6,11]、模糊分类^[12]、支持向量机 (SVM)^[13]、相似度^[14]等方法进行扰动的识别及分类。傅里叶变换只适用于平稳信号的分析, 如谐波, 对时变非平稳信号难以充分描述。小波变换具有良好的时频局部化

特性, 适合于分析暂态、突变信号而得到广泛应用^[5-9]。但是小波变换易受噪声影响, 且结果缺乏直观性。S 变换克服了短时傅里叶变换窗函数长度不易确定的问题, 变换结果在时频表明上比小波变换直观, 信号在高频部分分解得更细致, 并逐渐应用于电能质量扰动识别中^[11-14]。文献 [11] 将 S 变换与神经网络方法相结合对多种短时电能质量扰动进行了分类识别, 分类正确率比较高, 但该方法存在神经网络学习样本不易收敛、对噪声敏感且计算量大等问题。文献 [12] 提出基于模糊分类的电能质量扰动分类识别, 通过简单明了的 “IF-THEN” 形式的知识规则形成判断, 识别率较高, 但该方法存在提取特征量较多、分类规则复杂等问题。文献 [13] 提出支持向量机理论, 取得了很好的分类效果, 该方法克服了人工神经网络对噪声敏感、训练时间长、计算量大等问题。但该方法仍然需要一定量的样本, 且分类过程不够直观。以上文献方法均依靠分类器实现扰动分类。文献 [14] 提出基于数字图像处理中相似度的思想, 通过直接计算不同扰动 S 变换模时频矩阵间相似度, 量化其特征差异来实现

分类, 由于不依赖分类器, 简化了分类算法并取得了良好的分类效果。但不同持续时间的扰动建立的标准模时频矩阵不唯一, 使分类有局限性。

下面结合 S 变换局部化时频特性的优势和各种 SDPQD 特征频率处灰度图像灰值分布的差异性, 提出基于 S 变换模时频矩阵灰度图像法。通过直接计算扰动模时频矩阵灰度图像的灰度期望和灰度方差, 量化灰度图像的灰值分布, 根据量化结果建立扰动标准判据, 实现扰动分类。大大简化了分类算法, 克服了现有分类方法大多采用分类器建立分类判据所带来的分类不明确、计算量大等问题。

1 S 变换基本原理及灰度图像特征提取

1.1 S 变换基本原理

S 变换由 Stockwell 于 1996 年提出, 是一种可逆的局部时频分析方法, 其思想是对连续小波变换和短时傅里叶变换的发展。信号 $x(t)$ 的 S 变换 $S(\tau, f)$ 定义如下。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(\tau - t, f) \exp(-2\pi i f t) dt \quad (1)$$

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right] \quad (2)$$

其中, $w(\tau - t, f)$ 为高斯窗口 (Gaussian Window), τ 为控制高斯窗口在 t 轴位置的参数。由式 (2) 中可以看出, S 变换不同于短时傅里叶变换之处在于高斯窗口的高度和宽度随频率而变化, 这样就克服了短时傅里叶变换窗口高度和宽度固定的缺陷。

S 变换的离散表示形式为 ($n \neq 0$)

$$S[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} H[n+k] \exp\left(-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (3)$$

$$\text{式中: } H[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (4)$$

当 $n=0$ 时的离散 S 变换定义为

$$S[m, n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (5)$$

式中, $h[k]$ 是对连续时间信号, $h[t]$ 进行采样得到的离散时间序列。S 变换可以由 FFT 实现快速计算。 $h[k]$ 经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 对矩阵中的各个元素求模值后便得到与之对应的模时频矩阵。

1.2 灰度图像构造

数字图像是在空间坐标上和亮度上都已经离散化了的图像; 一幅数字图像可以考虑为一个矩阵, 其行和

列标出了图像中的一个点, 而矩阵中的相应元素的值则标出了该点的灰度等级^[11]。模时频矩阵中各个元素表示扰动信号在对应时刻和频率上的幅值, 这样的矩阵类似于数字图像。应用数字图像灰度方法, 将模时频矩阵各元素值用灰度图的方式表示出来, 元素值越大, 则能量越大, 颜色越亮。这种表示方法能直观地表达 SDPQD 信号 S 变换分析的结果。几种典型 SDPQD 信号 S 变换时频模矩阵灰度图 1、图 2、图 3 所示。

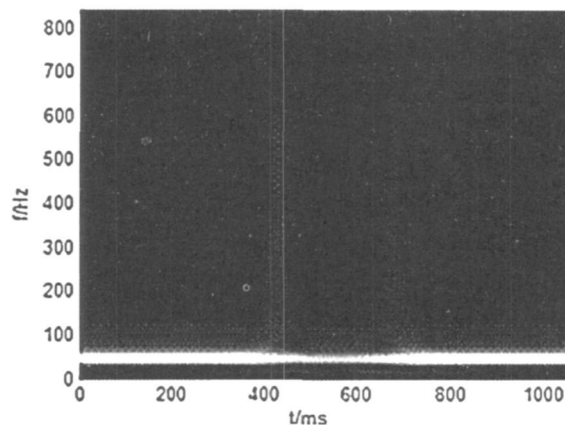


图 1 电压暂降 S 变换时频模矩阵灰度图

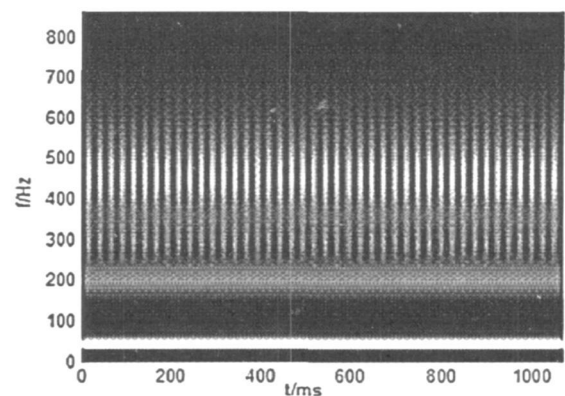


图 2 谐波 S 变换时频模矩阵灰度图

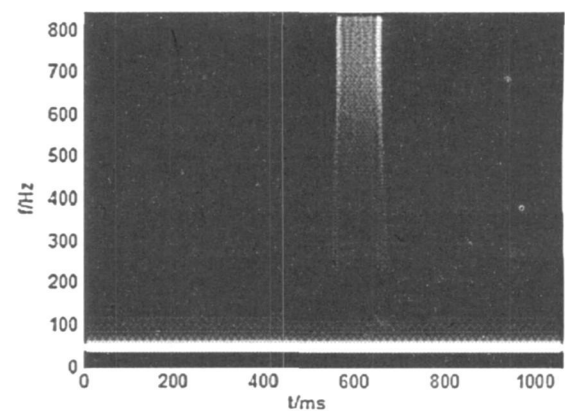


图 3 振荡暂态 S 变换时频模矩阵灰度

出于便于分析和突出各类 SDPQD 灰度图像灰值分布差异性的考虑, 需要将各类 SDPQD 模时频矩阵

灰度图像灰值调整到一个固定的灰度级别,实际上它是对图像整体灰值分布的平移,把不同类 SDPQD 灰度图像灰值分布统一到同种比较标准下,即灰度图像标准化。标准化规则为:设标准化灰度图像的灰度级为 1~128,特征频率 50 Hz 处的矩阵元素中最大值的两倍对应于最大灰度级,0 对应于最小灰度级。

1.3 SDPQD 特征频率选择

S 变换模时频矩阵可以全面刻画信号从工频到高频范围内幅值的分布情况。但模时频矩阵包含大量冗余信息,如果不对矩阵进行处理直接用于扰动分类,需要对矩阵每一行元素进行处理,不但计算繁琐,而且其中相当一部分的行对扰动分类不起作用。不同 SDPQD 具有在幅值、频率成份上随时间分布的不同特征,例如,电压暂降(暂升)、电压缺口(尖峰)的特征集中在 50 Hz 处,电压暂降(暂升)波形有较长时间的幅值跌落(隆起)过程;电压缺口(尖峰)表现为周期性的短时电压波形下凹(上凸),基波幅值会略小于(大于)正常波形幅值;谐波的特征则体现在含有显著的工频整数倍频率成份;振荡暂态在 500 Hz 以上频率,有较宽的频率成份。因此,可以在模时频矩阵中选取扰动特征集中的 50 Hz、150 Hz、250 Hz、350 Hz 和 500 Hz 以上,5 个频率作为特征频率,简化计算,突出特征量,进而提高分类正确率。

1.4 灰度图像特征提取

描述数字图像的灰度分布情况最常用的是一阶灰度直方图,即图像灰度的一阶概率分布。假设图像灰值量化为 L 个灰级,令 $i=1, 2, \dots, L$ 的 i 个灰级的像素总数为 $N(i)$,而整幅图像的像素总数为 M ,则灰级 i 出现的概率为

$$P(i) = \frac{N(i)}{M}, i=1, 2, \dots, L \quad (6)$$

以 i 为横坐标, $P(i)$ 为纵坐标,就得到一阶灰度直方图,也就是灰值的一阶概率分布。这里令图像灰值量化为 128,即 $L=128$ 。

这里引入灰度一阶矩,二阶矩量作为灰度图像概率分布的特征。计算公式如下。

① 灰度一阶矩

$$M_1 = \sum_{i=1}^{128} P(i) \quad (7)$$

显然一阶矩 M_1 就是灰度的均值 μ ,即 $\mu=M_1$ 。均值 μ 是对图像灰值分布集中在某个灰值附近的度量。

② 灰度二阶矩

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^{128} (i-\mu)^2 P(i) \quad (8)$$

显然二阶矩 η_2 就是灰值分布的方差 σ^2 ,即 $\sigma^2=\eta_2$ 。方差 σ^2 是对图像灰值分布离散性的度量。

1.5 灰度图像识别分类原理

基于数字图像灰度处理思想,提取 SDPQD 模时频矩阵各特征频率矩阵行灰度化。发现各种不同类型的 SDPQD,在特征频率处表现出不同的灰度图像的一阶概率分布。例如,电压暂降波形幅值跌落过程,表现为模时频矩阵特征频率 50 Hz 处灰度图像部分灰值下降(如图所示)。统计灰度图像灰值分布,按式(7)、(8)求取灰值分布特征,发现灰度均值会小于灰度级 64;部分灰值的下降,使图像有较宽的灰值分布范围,即灰度方差较大。电压暂升与电压暂降相似的,波形幅值隆起过程,使灰度图像特征频率 50 Hz 处,会大于灰度级 64,且有较大的 σ^2 。可以得出,特征频率处扰动幅值的跌落或隆起和持续时间长短共同决定了灰度图像灰值的分布。各类 SDPQD 信号在幅值和频率成分分布上的差异,决定了其模矩阵在特征频率处灰度图像具有明显差异的灰值概率分布;不同持续时间,不同幅值的同一类 SDPQD 在特征频率处具有相似的灰度概率分布。可以由此建立各种 SDPQD 的标准判据,实现对抗动的分类。

2 基于 S 变换模时频矩阵灰度 SDPQD 分类

结合 S 变换局部化时频特性和各种 SDPQD 特征频率处灰度图像灰值分布的差异性,提出基于 S 变换模时频矩阵灰度的识别分类算法,该算法的原理如下:未知类型的 SDPQD 进行 S 变换分析,得到其模时频矩阵并提取代表各特征频率附近矩阵行灰值化,求得各特征频率处 μ 和 σ^2 ,若特征频率处 μ 和 σ^2 符合该特征频率某种扰动的标准判据,则可判断未知类型的 SDPQD 属于该种标准判据曲线对应的那一类 SDPQD。

2.1 SDPQD 信号

这里考虑的 SDPQD 有电压暂降(voltage sag)、电压暂升(voltage swell)、电压缺口(notch)、电压尖峰(spike)、谐波(harmonics)和振荡暂态(oscillatory)。信号模型和参数设置如表 1 所示。以振荡暂态为例,其中 A 为振荡幅值; $\mu(t)$ 为单位阶跃函数; t_1 和 t_2 分别是振荡开始和结束时刻; T 为一个周波的时间; ω_0

表 1 信号模型

扰动类型	信号模型	参数设置
电压暂降	$v(t) \{1 - A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin \omega_0 t$	$0.1 \leq A \leq 0.9 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$
电压暂升	$v(t) \{1 + A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin \omega_0 t$	$0.1 \leq A \leq 0.9 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$
电压缺口	$v(t) = \sin \omega_0 t - \operatorname{sgn}(\sin \omega_0 t) \cdot \sum_{i=0}^{50} A_i [u(t - (t_1 + i \cdot 0.02)) - u(t_1 + i \cdot 0.02)]$	$0.1 \leq A \leq 0.4$ $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数
电压尖峰	$v(t) = \sin \omega_0 t + \operatorname{sgn}(\sin \omega_0 t) \cdot \sum_{i=0}^{50} A_i [u(t - (t_1 + i \cdot 0.02)) - u(t_1 + i \cdot 0.02)]$	$0.1 \leq A \leq 0.4$ $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数
谐波	$v(t) = \sin \omega_0 t + A_3 \sin 3\omega_0 t + A_5 \sin 5\omega_0 t + A_7 \sin 7\omega_0 t$	$0.02 \leq A_3, A_5, A_7 \leq 1$
振荡暂态	$v(t) = \sin \omega_0 t + A e^{-\alpha(t-t_1)} \sin \alpha \omega_0 t \cdot [u(t - t_1) - u(t - t_2)]$	$5 \leq A \leq 0.8, 10 \leq \alpha \leq 15$ $5 \leq t_2 - t_1 \leq 10, 0.5T \leq t_1 \leq 3T$

为基波角频率; σ 为波动频率相对系数; c 为振荡衰减系数。

2.2 标准判据的形成

首先生成不含噪声 6 类 SDPQD, 对每类 SDPQD 的 100 个随机波形作为试验样本, 进行 S 变换, 将每个随机波形变换后所得模时频矩阵在特征频率附近各行灰值化后, 按式 (7)、(8) 求得 μ 和 σ^2 , 这样每类 SDPQD 在特征频率处各得到 100 个 μ 和 σ^2 , 共 5 组。将各组数据在直角坐标系上描述出来, 纵坐标为 μ , 横坐标为 σ^2 , 则可以直观地观察出它们之间的变化关系。图 4—图 8 为试验样本在各特征频率处 $\mu - \sigma^2$ 散点图。

由图容易看出, 电压暂降 (暂升) 在 50 Hz 频率处, μ 随着 σ^2 的增大而减小 (增大), μ 均小于 (大于) 64 级灰度。这种灰度图像灰值分布特征明显异于其他 SDPQD 在该特征频率处分布特征, 可将该分布特征作为电压暂降 (暂升) 的标准判据。而在其他频率处扰动特征不明显, 无需作为分类判据条件。

电压缺口 (尖峰) 在 50 Hz 频率处, 表现为 μ 变化明显, 且均小于 61 级灰度 (大于 67 级灰度), 而 σ^2 变化不明显, 在 0 附近波动。可将该分布特征作为电压暂降 (暂升) 的标准判据。而在其他频率处扰动特征不明显, 无需作为分类判据条件。

谐波在 50 Hz 频率处, μ 和 σ^2 变化均不明显, μ 恒等于 64 级灰度, σ^2 恒等于 0, 表明这两种扰动在此频率处无扰动特征, 标准判据需在其余特征频率处建立。在特征频率 150 Hz、250 Hz 及 350 Hz 频率处, 均有较大 μ 且随着 σ^2 的增大而增大。可将该分布特征作为谐波的标准判据。而在 500 Hz 以上频率处, 有较明显的 μ , σ^2 在 0 附近波动, 此现象是各次谐波在高频处产生的暂态分量所致, 无需作为分类条件。

振荡暂态在 50 Hz、150 Hz、250 Hz 及 350 Hz 处频段处, 具有较大的, 这是之前任何类型都不具有的

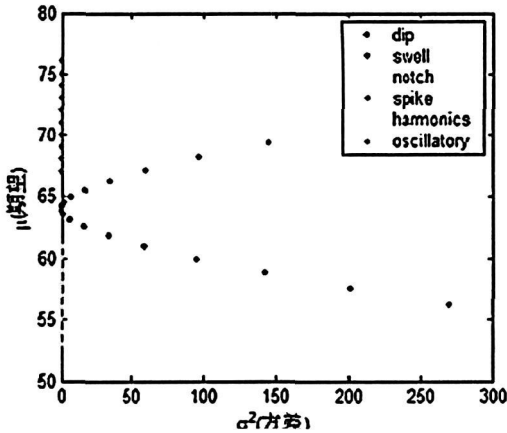


图 4 特征频率 50 Hz 处各 SDPQD 灰度分布 $\mu - \sigma^2$ 散点图

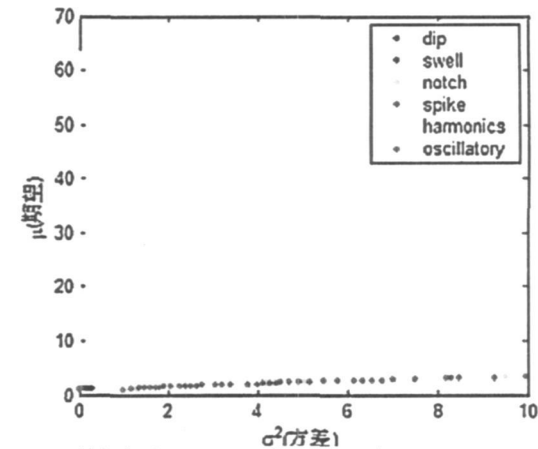


图 5 特征频率 150 Hz 处各 SDPQD 灰度分布 $\mu - \sigma^2$ 散点图

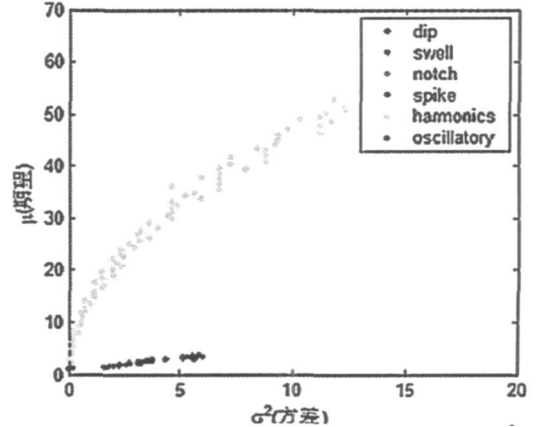


图 6 特征频率 250 Hz 处各 SDPQD 灰度分布 $\mu - \sigma^2$ 散点图

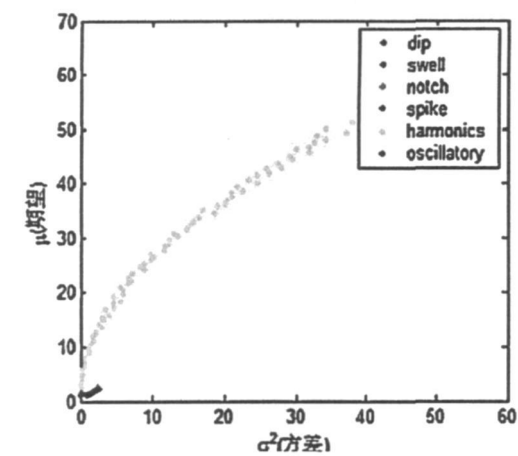


图 7 特征频率 350 Hz 处各 SDPQD 灰度分布 $\mu-\sigma^2$ 散点图

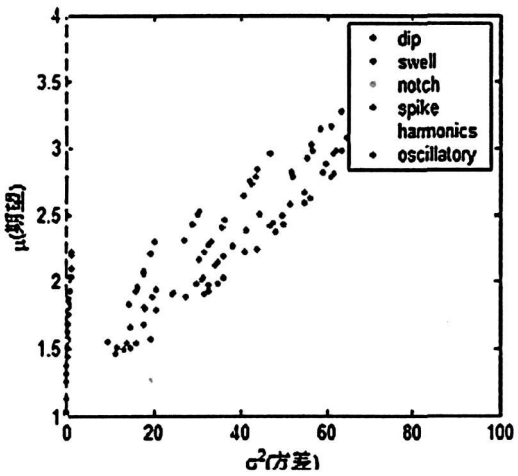


图 8 特征频率 500 Hz 以上各 SDPQD 灰度分布 $\mu-\sigma^2$ 散点图
特征, 可将该分布特征的作为振荡暂态的标准判据。

3 仿真验证

3.1 仿真算例一

按表 1 给出的 SDPQD 信号模型生成测试信号, 扰动持续时间及幅值参数变化限值在表 1 所述范围内。每种 SDPQD 随机生成 100 个测试样本, 测试结果如表 2 所示。

表 2 分类结果

参考	测 试					
	电压 暂降	电压 暂升	电压 缺口	电压 尖峰	谐波	振荡 暂态
电压暂降	100	0	0	0	0	0
电压暂升	0	100	0	0	0	0
电压缺口	0	0	100	0	0	0
电压尖峰	0	0	0	100	0	0
谐波	0	0	0	0	100	0
振荡暂态	0	0	0	0	0	100
准确率	100%	100%	100%	100%	100%	100%

表 3 分类识别准确率

噪声	信 号					
	电压 暂降	电压 暂升	电压 缺口	电压 尖峰	谐波	振荡 暂态
20dB	93%	94%	100%	100%	94%	100%
30dB	100%	100%	100%	100%	100%	100%
40dB	100%	100%	100%	100%	100%	100%

由表 2 可以看出, 该算法对各种 SDPQD 有很好的适应性, 在不含噪声水平下分类准确率均为 100%。

3.2 仿真算例二

在测试样本信号上分别添加信噪比为 40 dB、30 dB、20 dB 的白噪声。每一类 SDPQD 分别在 3 种噪声环境下随机各取 100 个样本, 总计 1 800 个测试样本进行测试, 分类识别准确率如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 该算法在各种噪声环境均有较好的适应性, 因为分类结果比较理想。只是在 20 dB 噪音环境下, 分类正确率有所下降, 那些发生误分类的样本, 主要是因为 SDPQD 信号的扰动幅值变化不明显以及扰动持续时间过短的情况。

4 结 论

(1) 基于 S 变换模时频矩阵灰度图像的 SDPQD 分类方法, 建立了各种 SDPQD 的标准判据, 可直接根据标准判据进行扰动分类, 摆脱现行分类方法对分类器的依赖, 方法简单, 分类正确率高。

(2) 对扰动幅值变化不明显以及扰动持续时间过短的扰动, 在高噪音的情况下, 扰动特征被噪音所淹没, 下一步的工作可以对该情况下的扰动设计滤波器, 除去噪声的影响, 提高分类的正确率。

参考文献

[1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5—12

[2] 郑岗, 石梅香, 刘丁, 等. 基于时频、多分辨率分析和规则基的电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2004, 28(3): 65—68

[3] Heydt G T et al. Application of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1411—1416.

[4] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63—66

[5] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与

- 分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1—6.
- [6] GAI NG Z L Wavelet-based Neural Network for Power Disturbance Recognition and Classification [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1560—1568.
- [7] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26—30.
- [8] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16—18.
- [9] 王晶, 束洪春, 陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40—45.
- [10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum: the S Transform. IEEE Trans On Signal Process, 1996, (44): 998—1001.
- [11] I W. C. Lee P. K. Dash S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance Sig-

- nals [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2003, 50(4).
- [12] M. V. Chilukuri P. K. Dash Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2004, 19(1).
- [13] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(4): 51—56.
- [14] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相识别度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67—71.
- [15] 边肇祺, 等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

作者简介:

张中全 (1974), 男, 大学本科, 电力工程师, 成都电业局青白江供电局调控中心主任, 从事多年调度运行管理工作;

赵俊 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与电力市场。
(收稿日期: 2009—11—19)

(上接第 8 页)

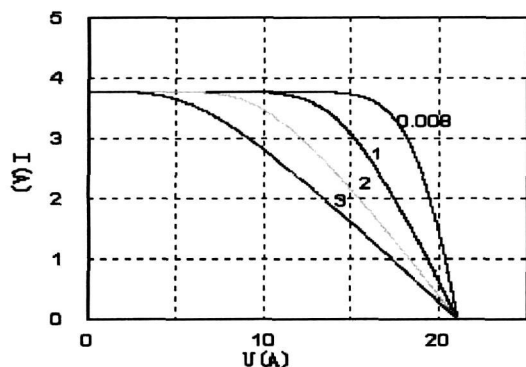


图 8 不同串联电阻 R_s 下 I - V 特性曲线

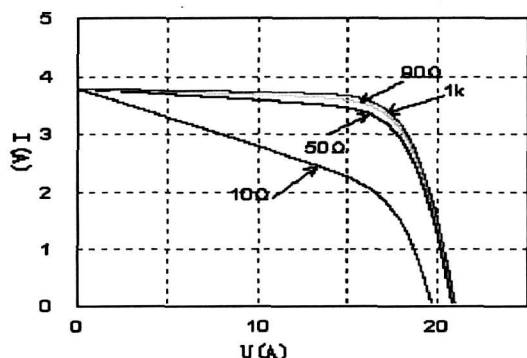


图 9 不同并联电阻 R_p 下 I - V 特性曲线

图 8、图 9 为不同串并联电阻下的 I - V 特性曲线, 曲线表明光伏模块的等效串并联电阻对输出特性都有影响。但是, 串联电阻对输出特性的影响较大, 并联电阻影响较小。而且, 随着等效串联电阻越大, 并联电阻越小, 填充因子下降越快, 进而影响模块转换效率。

5 结束语

根据物理机制的光伏电池数学表达式, 在满足工程精度条件下简化处理光伏模块模型。同时建立了基于 PSM 软件的仿真模型。对其模拟仿真结果和数据手册进行对比分析, 发现仿真结果和数据手册信息具有极好的相关性, 同时也证明了该仿真模型正确性和可行性。在 PSM 软件下建立的光伏模块仿真模型, 为下一步研究光伏并网逆变器受温度和光照强度影响的特性提供有效的仿真模型和依据^[6]。

参考文献

- [1] 王章权, 张超, 何湘宁. 基于 Pspice 模拟行为模型的光伏阵列建模 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 225—240.
- [2] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 233—243.
- [3] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 34—36.
- [4] Powersin Inc PSM User's Guide [Z]. USA: Powersin Inc, 2003.
- [5] Sharp. NU-SOE3E Single-Crystalline Silicon Photovoltaic Module with 180W Maximum Power Datasheet [Z]. 2005.
- [6] 戴训江, 晁勤. 太阳能光伏模块电气特性的数学建模与仿真 [J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 47—49.

作者简介:

刘俊杰 (1986) 男, 汉族, 在读硕士研究生, 研究方向为光伏发电及其并网技术。
(收稿日期: 2010—10—12)

分支及流经变压器中性点的单相短路电流计算方法

何永德

(四川省电力设计院, 四川 成都 610072)

摘要:通过典型算例详细直观地介绍了分支单相短路电流及流经变压器中性点短路电流的计算方法,供工程设计参考,对其他种类的不对称短路,可参照此思路和方法进行计算。

关键词:各序网络;分支短路电流;中性点电流;入地电流

Abstract: The calculation methods for branch single-phase short-circuit current and short-circuit current via the neutral point of transformer are introduced in detail through the typical cases which gives a reference for engineering design. And for other kinds of asymmetrical short circuit it can also be calculated using the proposed idea and calculation method as a reference.

Key words: sequential impedance network; branch short-circuit current; neutral point current; grounding current

中图分类号: TM744 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0051-04

0 概述

根据目前所掌握的设计资料,对短路点总的不对称短路电流有明确的计算方法,在工程设计和分析电力系统故障时,不仅需要计算短路点的电流和电压,而且还要算出流过电网中某些支路的电流和某些节点的电压以及流回变压器中性点的电流。例如:流经每套保护装置的电流和各保护装置安装处母线上的电压;主变压器零序电流电压保护的整定和灵敏度校验;在变电所设计中,特别是山区地方,由于布置紧凑、占地面积小、土壤电阻率高,接地电阻普遍达不到要求,为此需要计算发生不对称短路时,短路点的总电流和流经变压器中性点的电流,才能计算入地电流,以便计算接地电阻要求值或验算接触电势和跨步电势。下面将针对单相短路的情况,通过典型算例,提出分支和流经变压器中性点的短路电流计算方法,

供工程设计人员参考,对其他种类的不对称短路,可参照此思路和方法进行计算。为了让读者对概念的认识更加清晰,在算例中,加入了部分验证公式,以证明算法的正确性,实际计算中,步骤可简化。

1 算例

图 1 所示的某变电所接线示意图中,主变压器高、中压侧中性点直接接地,高、中压侧系统按无穷大

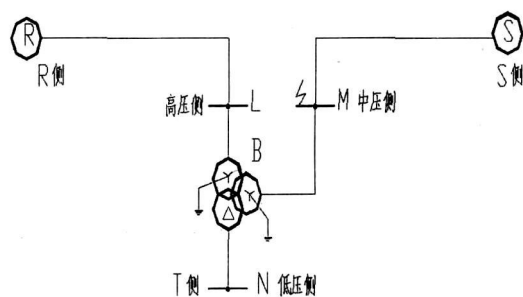


图 1 接线示意图

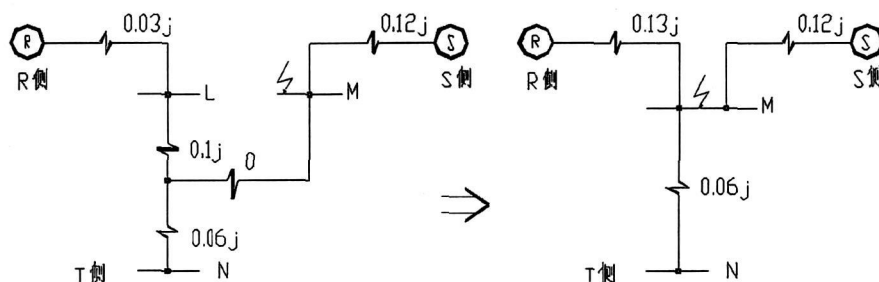


图 2 正序(负序)阻抗图

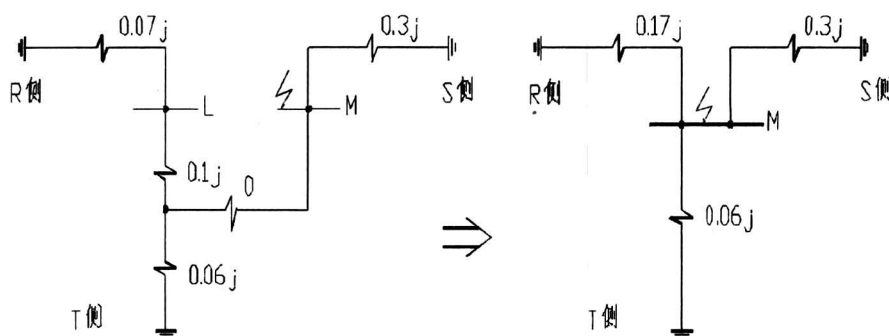


图 3 零序阻抗图

电源考虑, 低压侧无电源, 图 2—图 3 为各序阻抗图, 假定在主变压器中压侧母线上发生 A 相金属性接地短路, 求 R 侧和 S 侧分支单相短路电流、流经变压器中性点短路电流和入地电流。计算中未标明单位者均为标幺值。

因低压侧无电源, 故总正序 (负序) 阻抗为 $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 0.12j / 0.13j = 0.0624j$; 总零序阻抗为 $X_{0\Sigma} = 0.17j / 0.3j / 0.06j = 0.03864j$

1.1 短路点总的短路电流计算

短路点边界条件为 $\dot{U}_A = 0$ $\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$ (1)

$$\dot{I}_{DA1} = \dot{I}_{DA2} = \dot{I}_{DA0} = \frac{\dot{E}}{2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \frac{j}{2 \times 0.0624j + 0.03864j} = 6.11845 \quad (2)$$

$$\dot{I}_{DA} = 3\dot{I}_{DA1} = 3 \times 6.11845 = 18.3554 \quad (3)$$

1.2 短路点各序电压计算

$$\dot{U}_{DA1} = \dot{I}_{DA1} (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = 6.11845 (0.0624 + 0.03864)j = 0.6182j \quad (4)$$

$$\text{或 } \dot{U}_{DA1} = \dot{E} - \dot{I}_{DA1} X_{1\Sigma} = j - 6.11845 \times 0.0624j = 0.6182j \quad (5)$$

$$\dot{U}_{DA2} = \dot{I}_{DA1} X_{2\Sigma} = -6.11845 \times 0.0624j = -0.3818j \quad (6)$$

$$\dot{U}_{DA0} = -\dot{I}_{DA1} X_{0\Sigma} = -6.11845 \times 0.03864j = -0.2364j \quad (7)$$

$$\dot{U}_{DA} = \dot{U}_{DA1} + \dot{U}_{DA2} + \dot{U}_{DA0} = 0.6182j - 0.3818j - 0.2364j = 0 \quad (8)$$

与短路点边界条件吻合。

1.3 分支短路电流计算

以 A 相为基准作出各序网络图, 分别计算出各分支正序、负序、零序电流分量, 然后进行叠加, 得出各分支短路电流。

1.3.1 正序网络

$$\dot{I}_{RDA1} = \frac{\dot{E}_R - \dot{U}_{DA1}}{X_{R1\Sigma}} = \frac{j - 0.6182j}{0.13j} = 2.9369 \quad (9)$$

$$\dot{I}_{SDA1} = \frac{\dot{E}_S - \dot{U}_{DA1}}{X_{S1\Sigma}} = \frac{j - 0.6182j}{0.12j} = 3.1817 \quad (10)$$

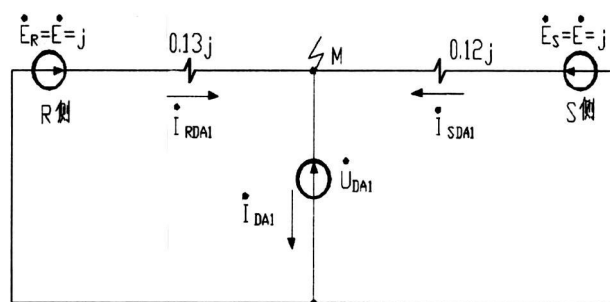


图 4 正序网络图

$$\dot{I}_{DA1} = \dot{I}_{RDA1} + \dot{I}_{SDA1} = 2.9369 + 3.1817 = 6.1186 \quad (11)$$

1.3.2 负序网络

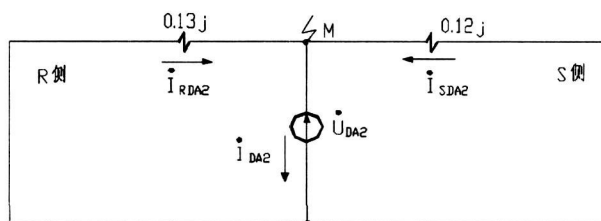


图 5 负序网络图

由于各分支正序、负序阻抗完全相同, 故各分支正序、负序电流分量相等, 验算如下。

$$\dot{I}_{RDA2} = \frac{\dot{U}_{DA2}}{X_{R2\Sigma}} = \frac{-0.3818j}{0.13j} = 2.9369 \quad (12)$$

$$\dot{I}_{SDA2} = \frac{\dot{U}_{DA2}}{X_{S2\Sigma}} = \frac{-0.3818j}{0.12j} = 3.1817 \quad (13)$$

$$\dot{I}_{DA2} = \dot{I}_{RDA2} + \dot{I}_{SDA2} = 2.9369 + 3.1817 = 6.1186 \quad (14)$$

1.3.3 零序网络

$$\dot{I}_{RDA0} = \frac{\dot{U}_{DA0}}{X_{R0\Sigma}} = \frac{-0.2364j}{0.07j + 0.1j} = 1.3906 \quad (15)$$

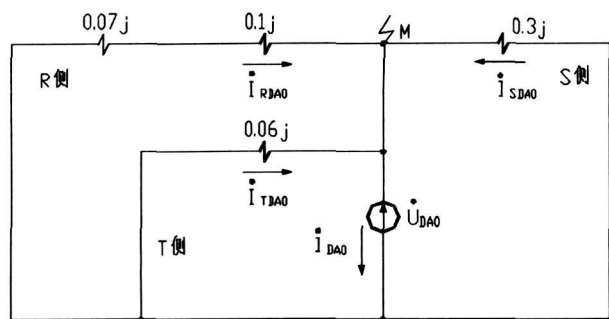


图 6 零序网络图

$$\dot{I}_{SDA0} = -\frac{\dot{U}_{DA0}}{X_{S0\Sigma}} = -\frac{-0.2364j}{0.3j} = 0.788 \quad (16)$$

$$\dot{I}_{TDA0} = \frac{\dot{U}_{DA0}}{X_{S0\Sigma}} = \frac{-0.2364j}{0.06j} = 3.94 \quad (17)$$

$$\dot{I}_{DA0} = \dot{I}_{RDA0} + \dot{I}_{SDA0} + \dot{I}_{TDA0} = 1.3906 + 0.788 + 3.94 = 6.1186 \quad (18)$$

式 (11)、(14)、(18) 与式 (2) 的计算结果相同。

1.3.4 分支单相短路电流及流经变压器中性点短路电流计算

① R 侧支路 (相当于变压器高压侧绕组) 各相电流及流经变压器高压侧中性点的电流为

$$\dot{I}_{RDA} = \dot{I}_{RDA1} + \dot{I}_{RDA2} + \dot{I}_{RDA0} = 2.9369 + 2.9369 + 1.3906 = 7.2644 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{RDB} &= a^2 \dot{I}_{RDA1} + a \dot{I}_{RDA2} + \dot{I}_{RDA0} = \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 2.9369 + \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 2.9369 + 1.3906 \\ &= -1.5463 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{I}_{RDC} = a \dot{I}_{RDA1} + a^2 \dot{I}_{RDA2} + \dot{I}_{RDA0} = -1.5463 \quad (21)$$

流经变压器高压侧中性点 (或 R 侧系统中性点) 的电流为

$$\dot{I}_{RDZ} = \dot{I}_{RDA} + \dot{I}_{RDB} + \dot{I}_{RDC} = 7.2644 - 1.5463$$

$$-1.5463 = 4.1718 \quad (22)$$

$$\text{或 } \dot{I}_{RDZ} = 3 \dot{I}_{RDA0} = 3 \times 1.3906 = 4.1718 \quad (23)$$

② W 侧支路 (相当于变压器中压侧绕组) 各相电流及流经变压器中压侧中性点的电流, 参照图 6、图 7 可知, W 侧支路各序电流分量为

$$\dot{I}_{WDA0} = \dot{I}_{RDA0} + \dot{I}_{TDA0} = 1.3906 + 3.94 = 5.3306 \quad (24)$$

$$\dot{I}_{WDA1} = \dot{I}_{RDA1} = 2.9369 \quad (25)$$

$$\dot{I}_{WDA2} = \dot{I}_{RDA2} = 2.9369 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{WDA} &= \dot{I}_{WDA1} + \dot{I}_{WDA2} + \dot{I}_{WDA0} = 2.9369 \\ &+ 2.9369 + 5.3306 = 11.2044 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{WDB} &= a^2 \dot{I}_{WDA1} + a \dot{I}_{WDA2} + \dot{I}_{WDA0} = \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 2.9369 + \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 2.9369 + 5.3306 \\ &= 2.3937 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\dot{I}_{WDC} = a \dot{I}_{WDA1} + a^2 \dot{I}_{WDA2} + \dot{I}_{WDA0} = 2.3937 \quad (29)$$

流经变压器中压侧中性点的电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{WDZ} &= \dot{I}_{WDA} + \dot{I}_{WDB} + \dot{I}_{WDC} = 11.2044 \\ &+ 2.3937 + 2.3937 = 15.9918 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{或 } \dot{I}_{WDZ} = 3 \dot{I}_{WDA0} = 3 \times 5.3306 = 15.9918 \quad (31)$$

③ S 侧支路各相电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{SDA} &= \dot{I}_{SDA1} + \dot{I}_{SDA2} + \dot{I}_{SDA0} = 3.1817 + 3.1817 \\ &+ 0.788 = 7.1514 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{SDB} &= a^2 \dot{I}_{SDA1} + a \dot{I}_{SDA2} + \dot{I}_{SDA0} = \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 3.1817 + \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right) \times 3.1817 + 0.788 \\ &= -2.3937 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\dot{I}_{SDC} = a \dot{I}_{SDA1} + a^2 \dot{I}_{SDA2} + \dot{I}_{SDA0} = -2.3937 \quad (34)$$

流经 S 侧系统中性点的电流为

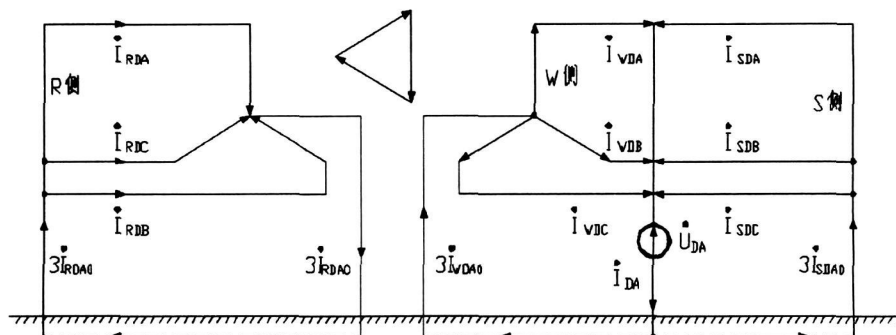


图 7 单相短路三相电流路径图

$$\dot{I}_{SDZ} = \dot{I}_{SDA} + \dot{I}_{SDB} + \dot{I}_{SDC} = 7.151 - 2.3937 - 2.3937 = 2.364 \quad (35)$$

$$\text{或 } \dot{I}_{SDZ} = 3 \dot{I}_{SDA0} = 3 \times 0.788 = 2.364 \quad (36)$$

1.4 验证短路点总的短路电流

$$\dot{I}_{DA} = \dot{I}_{WDA} + \dot{I}_{SDA} = 11.2044 + 7.1514 = 18.3558 \quad (37)$$

$$\dot{I}_{DB} = \dot{I}_{WDB} + \dot{I}_{SDB} = 2.3937 - 2.3937 = 0 \quad (38)$$

$$\dot{I}_{DC} = \dot{I}_{WDC} + \dot{I}_{SDC} = 2.3937 - 2.3937 = 0 \quad (39)$$

式 (37) 与式 (3) 的计算结果相同, 式 (38)、(39)

与 1.1 节的边界条件吻合。

1.5 流经变压器中性点短路电流和入地电流计算

假设变压器高压侧电压为 220 kV (基准电流 $I_{220} = 0.251 \text{ kA}$), 中压侧电压为 110 kV (基准电流 $I_{110} = 0.502 \text{ kA}$), 从图 7 可以看出, 流经变压器中性点的短路电流有两部分, 分别经过变压器高压侧和中压侧绕组的中性点, 两者方向相反。计算时需注意, 由于两中性点侧电压不同, 不能先用标幺值相减后换算成有名值, 而应该用两者的有名值相减。

(1) 短路点总的短路电流为

$$I_b = \dot{I}_{DA} I_{110} = 18.3554 \times 0.502 = 9.2144 \text{ kA} \quad (40)$$

(2) 流经变压器中性点的短路电流为

$$I_z = \dot{I}_{WDZ} I_{110} - \dot{I}_{RDZ} I_{220} = 15.9918 \times 0.502 - 4.1718 \times 0.251 = 6.9808 \text{ kA} \quad (41)$$

(3) 入地电流为

① 短路发生在接地网内时 (K_d 取 0.5):

$$I = (I_b - I_z)(1 - K_d) = (9.2144 - 6.9808) \times (1 - 0.5) = 1.1168 \text{ kA} \quad (42)$$

② 短路发生在接地网外时 (K_e 取 0.1):

$$I = I_z(1 - K_e) = 6.9808 \times (1 - 0.1) = 6.28272 \text{ kA} \quad (43)$$

K_d 、 K_e 分别为所内、所外短路时, 避雷线的工频分流系数。

2 总 结

通过以上计算并结合理论知识可得下列结论。

2.1 三相序网基本概念

正序网络中, 经过系统中性点的电流为 0, 离故

障点愈近正序电压愈低; 负序网络中, 不存在电源电动势, 经过系统中性点的电流为 0, 离故障点愈近负序电压愈高; 零序网络中, 不存在电源电动势, 经过系统中性点的电流等于线路三相电流之和, 即等于线路零序电流分量的 3 倍, 离故障点愈近零序电压愈高。

2.2 对单相接地短路, 短路点边界条件

A 相电压、B 相和 C 相电流等于 0, 故障点三序电流分量大小相等方向相同, 不能由此认为各分支线上的 B 相和 C 相电流也等于 0 以及三序电流分量也大小相等方向相同。

2.3 分支及流经变压器中性点的单相短路电流计算方法

(1) 根据故障点位置画出三序网络图。

(2) 通过对三序网络图的简化, 求出故障点的正序电流分量和总的单相短路电流。

(3) 求出故障点的各序电压分量。

(4) 通过三序网络图求出各分支的三序电流分量, 然后进行叠加可得各分支的短路电流, 流经分支线上接地中性点的电流等于该分支零序电流分量的 3 倍。

(5) 画出单相短路三相电流路径图, 可求出流经变压器中性点的短路电流。

① 流经变压器各绕组接地中性点的短路电流等于对应绕组中零序电流分量的 3 倍。

② 如果仅算流经变压器接地中性点的短路电流, 则在步骤 (3) 中只需要零序电压分量, 在步骤 (4) 中只需要零序网络图即可。

参考文献

- [1] 许建安. 电力系统继电保护 [M]. 水利电力出版社, 2005.
- [2] 王显平主编. 电力系统故障分析 [M]. 北京: 电力出版社, 2010.
- [3] 卓乐友主编. 电力工程电气设计手册 [M]. 水力电力出版社.

作者简介:

何永德 (1964), 男, 高级工程师, 四川省电力设计院总工程师, 长期从事火力发电厂和变电站设计和技术管理工作。

(收稿日期: 2010-08-24)

欢迎投稿

欢迎订阅

论特高压输电技术在促进四川水电资源 开发中的关键作用

金健可

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:四川省水电资源丰富, 加快开发并实现大规模外送是四川省变资源优势为经济优势的重要举措, 对促进全省经济社会发展、能源消费结构调整、减少温室气体排放具有重要意义。随着四川水电资源开发进度的进一步加快, 输电走廊瓶颈问题日益凸显, 迫切需要应用特高压输电技术, 发挥特高压电网在促进四川优势资源开发, 实现更大范围内电力资源优化配置的关键作用。

关键词:特高压输电; 水电资源; 资源配置

Abstract: Sichuan province has abundant hydroelectric resources. As an important measure accelerating the development of hydro-power plants and realizing the large-scale transmission of electric power is critical for Sichuan to turn natural resources into economic advantages, which is of great significance in promoting the economic and social development of Sichuan, adjusting the structure of energy consumption and reducing greenhouse gas emissions. With the further acceleration of hydro-power plants development, the constraints in transmission line corridor have become an increasingly prominent issue. Now it is of urgent need to adopt ultra-high voltage transmission technology and exert its significant advantages in promoting the development of hydroelectric resources in Sichuan and achieving optimal allocation of electric power resources to the full extent.

Key words: ultra-high voltage; power transmission; hydroelectric resource; resource allocation

中图分类号: TM723 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0055-03

0 引 言

近年以来, 应对气候变化、减少温室气体排放、保护生态环境已成为世界热点, 大力开发包括水能、风能、太阳能等可再生能源在内的清洁能源, 改变传统能源消费结构已成为世界各国的共同选择, 能源发展进入新的重要转折时期。水电是现阶段最优质的可再生能源, 四川作为全国重要的水电基地, 发展前景十分广阔。为进一步促进四川水电开发, 带动经济社会全面发展, 积极应用特高压输电技术, 加快特高压输变电工程建设已十分迫切和必要。

1 四川水电资源及开发情况

1.1 四川省水电资源概况

四川省拥有丰富的水电资源, 根据 2004 年全国水力资源复查成果, 四川省水力资源理论蕴藏量 143.51 GW, 技术可开发装机容量 120.04 GW, 年发

电量 612 200 GWh, 占全国的 27% 左右, 位居全国之首。四川省幅员面积大, 因地形和降水条件差异, 形成了全省水力资源在地域上分布的不均衡, 全省水力资源分布西多东少, 西部金沙江、雅砻江、大渡河三大流域, 大中小型电站众多, 尤其大型电站特别集中, 可开发资源占全省的 84.5%。一直以来, 四川省历届政府都非常重视水电资源开发, 将开发丰富水电资源, 变资源优势为经济优势作为发展经济的一项重要的重要的既定方针。在国家启动新一轮西部大开发, 重点支持西部地区发展优势产业的政策扶持下, 四川水电开发还将进一步加快。

截至 2009 年年底, 全省电源总装机容量 38.72 GW, 其中水电装机容量 26.47 GW, 占总装机容量 68.4%, 水电年发电量 95 600 GWh, 占总发电量 65.4%。四川已建成水电主要集中在海拔较低的盆地和盆周山区, 且多为中小型电站, 开发程度相对较高的河流主要有岷江、嘉陵江、渠江等流域, 主要大型电站有雅砻江干流二滩 (3 300 MW), 大渡河干流龚嘴 (730 MW)、铜街子 (600 MW)、瀑布沟 (360 MW),

表 1 四川省各水系水力资源分布表

流域	理论蕴藏量 /MW	技术可开发量		经济可开发量		论蕴藏 量比重 /%	技术可开 发量比重 /%	经济可开 发量比重 /%
		装机容量 /MW	年发电量 /GW·h	装机容量 /MW	年发电量 /GW·h			
金沙江	33 440	31 720	156 800	26 290	133 200	23	26	26
雅砻江	38 140	34 610	184 000	30 570	161 300	27	29	30
大渡河	33 620	31 480	154 400	28 940	141 200	23	26	25
青衣江	5 820	3 680	18 700	3 320	16 900	4	3	3
岷江	14 770	7 920	43 900	5 830	32 000	10	7	7
沱江	1 300	490	2 700	460	2 500	1	0	0
涪江	4 070	3 010	14 300	2 950	14 000	3	3	2
嘉陵江	4 580	3 480	15 500	3 410	15 200	3	3	3
渠江	1 530	900	4 300	900	4 300	1	1	1
长江上游干流	5 760	2 690	17 200	560	2 500	4	2	3
其它	490	70	400	40	200	0	0	0
合计	143 510	120 040	612 200	103 270	523 300	100	100	100

表 2 四川省电源建设规模

电源类型	2009 年		2010 年		2015 年		2020 年		2030 年	
	容量 /MW	比例	容量 /MW	比例	容量 /MW	比例	容量 /MW	比例	容量 /MW	比例
合计装机	38 720	100.00	44 210	100.00	92 320	100.00	133 110	100.00	176 950	100.00
1. 煤电	11 980	30.94	12 590	28.48	14 440	15.64	16 680	12.53	20 680	11.69
2. 气电	250	0.65	250	0.57	1 370	1.48	1 740	1.31	1 740	0.98
3. 水电	26 470	68.36	31 350	70.91	76 290	82.64	114 470	86.00	150 310	84.94
4. 抽蓄										
5. 核电									4 000	2.26
6. 风电										
7. 太阳能										
8. 生物质能	24	0.05	24	0.05	224	0.24	224	0.17	224	0.12

白龙江宝珠寺 (700 MW)、岷江干流福堂 (360 MW)、紫坪铺 (760 MW) 等。目前全省已建成水电装机仅占技术可开发量 24.3%，后续具有广阔的发展前景。

1.2 四川省水电开发规划

四川的水电资源按其地理特性可以岷江为界，分为东、西两大部分。目前东部地区的水电已基本开发完毕，后续开发的水电项目主要分位于省内西部“三江（金沙江、雅砻江、大渡河）”流域。这些电站装机容量大，调节能力较好，计划在“十二五”、“十三五”期间陆续建成投产，四川电网即将迎来水电项目投产高峰期。

“十二五”期间，四川规划新增水电装机 44 950 MW，2015 年四川全省水电装机将达到 76 290 MW。西部“三江”流域共规划新增 40 600 MW，占“十二五”新增水电装机的 90.3%，其中金沙江 17 030 MW，雅砻江 14 610 MW，大渡河 8 950 MW；其他流域 4 360 MW，占规划新增水电电源的 9.7%。

“十三五”期间，四川规划新增水电装机 38 180 MW，2020 年四川全省水电装机将达到 114 470 MW。

西部“三江”流域共规划新增 35 550 MW，占“十三五”新增水电装机的 93%，其中金沙江 12 920 MW，雅砻江 7 240 MW，大渡河 15 400 MW；其他流域 2 630 MW，占规划电源的 7%。“十三五”以后至 2030 年，四川还规划有新增水电装机约 35 840 MW，到 2030 年四川水电资源将基本开发完毕，全省水电总装机规模将达到 150 310 MW。

2 大力实施水电外送战略

中国能源生产和消费结构以煤为主，污染物和温室气体排放量较大，环境保护压力日益加重。根据测算，要实现中国 2020 年单位产值能耗降低 40%，可再生能源在能源消费中占到 15% 的目标，非化石能源发电装机占电力总装机的比例要达到 35%。水电是现阶段技术最为成熟的可再生能源，四川水力资源得天独厚，作为国家重要水电产业基地，后续开发潜力巨大。因此，加快四川水电资源开发，推进水电基地建设，将在调整能源消费结构、减少温室气体排放、应对

表 3 四川电力需求预测

项 目	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2030 年	平均增长率 /%			
						十一五	十二五	十三五	2021~2030
全社会用电量 /GW·h	94 300	150 000	250 000	335 000	498 000	9.7	10.8	6.0	4.0
最高负荷 /MW	16 220	26 000	43 800	58 800	88 000	9.9	11.0	6.1	4.1

气候变化,保障国家能源安全等方面发挥关键作用。

按照四川国民经济和社会发展“十二五”规划基本思路,预计 2010 年全省 GDP 将达到 17 000 亿元,2015 年突破 30 000 亿元,“十二五”期间年均增长 12%。根据负荷预测,2015 年全省全社会用电量、最大负荷将分别达到 250 000 GW·h、43 800 MW,“十二五”期间实现年均增长 10.8%、11.0%,电力需求将保持较快增长;2020 年全社会用电量、最大负荷将分别达到 335 000 GW·h、58 800 MW,“十三五”期间年均增长 6.0%、6.1%。

根据电源开发规划和负荷预测结论,显示出四川在满足自身用电需求以后,“十二五”、“十三五”期间逐年均有较多的富余电力,到 2015 年和 2020 年将分别达到 35 600 和 55 350 MW。因此,大力实施四川水电外送战略,开拓省外电力市场,让本省水电资源参与全国一次能源平衡,在更大范围进行电力资源优化配置也就成为消纳四川丰富水电,促进四川水电资源加快开发,和实现国家能源消费结构优化调整的必然选择。

3 特高压输电技术的应用

目前四川正在开发和将要开发的水电项目大部分位于省内西部,尤其以甘孜、阿坝、凉山等地最为集中,这些地区距离成都、德阳、绵阳、乐山等主要负荷中心均在 600 km 以上,沿途地势险峻,地形复杂,气候恶劣,交通困难,国家级、地方级保护区众多。根据目前已经开展的电力送出通道勘察工作,四川西部地区由于输电通道极为有限,线路走廊十分紧张,不具备新建大量输电线路的条件。而且四川西部地区生态较为脆弱,自身也难以承受新建大量输电线路对环境所带来的巨大压力,如果电网建设仍然延续以 500 kV 电压等级为主导,势必将因为输电线路走廊不足因素而使电网发展受到严重制约。因此,为满足四川水电大规模开发和送出的需要,必须大幅度提高单位输电通道的送电能力,最大限度地节约有限的线路走廊。

2009 年 1 月 6 日,中国第一条特高压交流线路——晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压交流试

验示范工程投运,目前已持续安全稳定运行近两年。2010 年 7 月 8 日,世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远的直流输电工程——向家坝—上海±800 kV 特高压直流示范工程投入运行。这两项特高压工程的顺利投产和在运行中的良好表现,显示了特高压输电技术在实现更大范围内电力资源优化配置的突出能力和不可替代的地位,并为后续特高压输电技术的大范围应用积累了宝贵的经验。

随着四川水电资源的加快开发,输电走廊的瓶颈问题日益凸显。由于特高压输电线路在远距离、大容量输电上具有明显优势,其送电能力为 500 kV 输电线路的 4~6 倍。在四川积极应用特高压输电技术,加快建设特高压输变电工程,实现电网输电能力的跨越式升级,是破解电力送出走廊瓶颈难题,保障水电大规模外送的唯一途径。

4 四川特高压电网发展展望

四川作为中国重要的水电基地,“十二五”到“十三五”期间有相当规模的大中型水电站陆续建成投产,在满足四川自身的用电需求之后仍有较大规模的富余电力需要外送。在下一步电网发展中,积极采用特高压输电技术,加快特高压输变电工程的建设,不仅可以提高线路走廊利用效率,节省宝贵的土地资源,同时也能够简化 500 kV 网架,避免大量川电东送潮流穿越重庆、华中东四省及华东 500 kV 电网,降低了输电网损。针对川电外送大容量、远距离的特点,遵循远近结合、统筹兼顾的原则,应考虑采用特高压交直流混合输电方式,提高电网的适应性和灵活性。

4.1 特高压直流输电

“十二五”期间,为满足雅砻江锦屏 I、II 级和官地水电站(总装机容量 10 800 MW),以及金沙江溪洛渡电站左岸机组(容量 9×770 MW)送电华东的需要,将建成锦屏—苏南、溪洛渡—浙西两回±800 kV 特高压直流线路,送电容量分别为 7 200 MW、7 500 MW。

“十三五”期间,为满足金沙江乌东德电站(容量 8 700 MW)和白鹤滩电站(容量 14 400 MW)送电华

(下转第 66 页)

表 3 四川电网输变电设备污闪按瓷绝缘爬距统计
(1971—2009 年)

污闪瓷件爬电比距 (cm/kV)	16~17	17~19	≥ 20	总计
污闪次数	115	19	4	138
占总污闪 /%	83.23	13.86	2.91	100

表 4 四川电网输变电设备污闪事故每 6 年平均值

起止年份	平均污闪事故率 / (次 / 百公里 · 年)
1980—1985	0.006 2
1986—1991	0.097 0
1992—1997	0.040 0
1998—2003	0.001 9
2004—2009	0.000 7

表 5 四川电网变电设备污闪事故每 6 年平均值

起止年份	平均污闪事故率 / (次 / 百站 · 年)
1980—1985	1.1772
1986—1991	1.5405
1992—1997	0.7392
1998—2003	0
2004—2009	0

(上接第 57 页)

东、华中的需要,将建成乌东德—福建 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流线路,送电容量 $9\,500\text{ MW}$,以及白鹤滩—湖北和白鹤滩—湖南两回 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流线路,送电容量均为 $7\,500\text{ MW}$ 。

4.2 特高压交流电网

在满足省内自身用电需求和直流特高压外送电力后,在 2015、2020 年四川电网仍有约 $11\,600\text{ MW}$ 和 $19\,300\text{ MW}$ 剩余电力,主要考虑通过交流特高压通道外送。“十二五”期间将建成雅安、乐山两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,形成雅安—乐山—重庆 $1\,000\text{ kV}$ 特高压交流送电通道,实现川渝与华中东四省交流特高压联网。“十三五”期间,还将建成绵阳、成都两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,形成雅安—绵阳—万县第二回 $1\,000\text{ kV}$ 特高压交流送电通道,进一步加强川渝特高压电网结构。

为满足四川西部雅砻江、大渡河等流域大中型水电站的外送,“十三五”期间将建成甘孜、阿坝两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,以及甘孜—雅安、阿坝—绵阳特高压交流送电通道,通过交流特高压电网实现电力大规模外送。其中甘孜特高压变电站主要汇集雅砻江中、上游两河口、牙根、新龙等梯级大型电站,最终汇集容量约 $9\,000\text{ MW}$,阿坝特高压变电站主要汇集大渡河上游双江口、巴底、丹巴等大型梯级电站及部分中小型水电,最终汇集容量约 $10\,000\text{ MW}$ 。

到 2020 年,四川电网将与重庆电网通过 4 回

中的各类型绝缘子,尤其是大吨位绝缘子的积污特性、污闪特性,四川电网应将运行情况深层次加以论证研究。

参考文献

- [1] 顾乐观,孙才新编著.电力系统的污秽绝缘[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [2] 张仁豫主编.绝缘污秽放电[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [3] 日本电气学会通文教育会编.绝缘子[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [4] 西安高压电器研究所翻译.高电压外绝缘电气强度[M].北京:水利电力出版社,1977.
- [5] GB 311—83.高压输变电设备的绝缘配合[S].
- [6] 四川电网历年防污闪工作总结[R].

(收稿日期:2010—08—19)

$1\,000\text{ kV}$ 特高压交流线路联网,与西北、华中、华东电网形成 $\pm 500\text{ kV}$ 、 $\pm 800\text{ kV}$ 、 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 共计 7 回特高压直流线路联网的“多直、多交”并列运行格局,输电能力将实现跨越式升级,电力资源配置能力显著增强,四川电网作为全国电力交换大枢纽、大平台的地位进一步确立。

5 结 论

大力开发水电并实现大规模外送是变资源优势为经济优势的重要举措,对促进四川经济社会发展具有重要意义。随着四川水电资源加快开发,为破解日益凸显的输电走廊瓶颈问题,迫切需要应用特高压输电技术,加快特高压输变电工程建设。四川特高压电网通过“十二五”和“十三五”期的发展,输电能力将实现跨越式升级,外送能力超过 $60\,000\text{ MW}$,将为四川水电加快开发创造有利条件,对促进四川由能源资源大省向电力大省、经济强省的转变具有极其重要的意义。

参考文献

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 陈秀山主编.西电东送工程区域效应评价[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 四川省发改委.四川水电基地调研报告[R].

作者简介:

金健可(1976),男,工程师,从事电力市场和电网规划方面的管理工作。
(收稿日期:2010—10—09)

城市高压电网中的紧凑型输电线路技术

苏恒博¹, 李 阳²

(1. 四川电力设计咨询有限公司, 四川 成都 610016; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘 要:随着土地资源越来越紧张, 架空输电线路走廊的选择已受到较大的制约, 紧凑型输电技术能够提高线路的自然输送功率, 减小线路走廊。为在城市高电压电网中进一步推广和应用紧凑型线路, 简要论述了紧凑型输电线路的输电能力、紧凑化技术、绝缘配合等问题。

关键词:紧凑型输电线路; 自然功率; 线路走廊; 紧凑化技术; 绝缘配合

Abstract: With more and more seriously lacks of land resources, the selection of overhead transmission line corridor has been greatly restricted. The compact transmission technology can increase the natural transmission power of the lines and reduce line corridors. For further promotion and application of compact lines in the urban HV power grid, the transmission capacity, compact technique and insulation coordination of compact transmission lines are briefly discussed.

Key words: compact transmission line; natural power; line corridor; compact technique; insulation coordination

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0058-02

随着中国城市化规模的扩大和发展和人口增加, 用电需求的不断增长需要, 目前, 中国电网输电能力不足的问题十分突出, 而在输电线路扩容改造中, 尤其是在经济发达人口稠密地区, 可供线路走廊用地日趋紧张, 因此提高单位线路走廊宽度输电能力的要求日益迫切。紧凑型线路在不提高输电电压等级和不增加线路回数条件下, 提高线路输送能力和节约线路走廊占地, 大幅度提高单位走廊宽度的利用率。

1 紧凑型线路输电能力分析

高压输电线路的输送功率一般按线路自然功率确定, 并用经济电流密度和发热等技术条件加以校验, 对长距离输电线路, 输送功率还决定于系统稳定条件。输电线路传输的自然功率计算公式如下。

$$P_A = U_A^2 / Z_A$$

P_A 为输电线路的自然功率; U_A 为线路额定电压; Z_A 为线路波阻抗。

其中, 线路波阻抗的计算公式为 $Z_A = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$

L_0 为单位线路长度电抗; C_0 为线路单位长度电容。

紧凑型输电线路技术与常规线路技术相比, 其特点是采用多分裂导线、大分裂间距、压缩相间距离、优

化导线排列, 使电荷在导线表面分布均匀, 表面场强趋于一致。随着导线相间距离减小, 线路电感随之减小, 而线路的电容随之增加, 所以线路波阻抗减小, 提高了线路输送容量。

压缩相间距离, 增加子导线的分裂间距固然可以使自然功率增加, 但也会导致导线表面场强增加, 无线电干扰及电晕损耗增加。对此, 通常采取增加导线截面的办法解决, 在导线总截面与常规线路基本相同的前提下, 增加分裂导线根数, 减小子导线截面。

以中国第一条 500 kV 紧凑型输电线路 (北京昌平至房山) 为例, 500 kV 常规线路的每相导线为 $4 \times \text{LGJ}-400/35$, 紧凑型输电线路导线的总面积考虑与之相同, 紧凑型输电线路按等边倒三角形布置, 相间中心距离为 6.7 m, 较常规水平排列的 24.6 m 压缩了 17.9 m; 每相采用 6 根 $\text{LGJ}-240/30$ 钢芯铝绞线, 六分裂导线的分裂间距为 37.5 cm, 即分裂圆直径为 75 cm, 分裂导线组成的六边形的底边为水平方向。对于 500 kV 紧凑型线路, 其对地距离为 10 m, 超过 4 kV/m 高电场区的宽度约 16 m, 较常规线路的 48 m 减少了 32 m。自然功率为 1 340 MW, 较常规线路的 1 000 MW 提高了 34%。

2 架空输电线路的紧凑化技术研究

紧凑型输电线路的目的是在保证安全运行和经

济的前提下,使线路导线所占走廊的空间及宽度最小,使铁塔的体积及质量最小,从而节省线路的总体占地面积。

紧凑型输电技术是通过导线优化排列,将三相导线置于同一塔窗内,相间只有空气间隙而没有接地构件,从而在根本上压缩了相间距离。三相导线间无接地构件,达到提高自然输送功率。

紧凑型输电线路的三相导线在空间上按等边倒三角形布置,使任意两相之间的距离都压缩到同一长度,从而使得三相导线的几何均距(GMD)就等于相间距离。这是三相导线最紧凑的布置形式。

三相导线全部采用 V 形绝缘子串悬挂,使导线在塔窗中的位置固定,不因风力或电动力而摆动。考虑到安全因素,3 个 V 形串各自独立,2 个上相 V 型串夹角均约 90° ,下相 V 形串夹角约 140° 。但对于某些垂直档距较大的铁塔,下相导线垂直荷载较大,夹角为 140° 的 V 形绝缘子,即使采用 300 kN 大吨位的绝缘子,其张力仍然不能满足要求。需再增加一个垂直绝缘子串,专门用来承担导线的垂直荷载。此时夹角 140° 的 V 形串只起到防止导线摆动的作用。由于垂直串中间的连接金具处于三相导线中间,金具上产生的悬浮电位对塔窗内电场分布的影响,尤其是对相间操作冲击绝缘强度的影响问题,是超高压线路中从未遇到过的。通过专题研究和相关试验证明,只要连接金具尺寸不大,即使不在此处加设屏蔽环,其影响极小。

在大档距中间位置的水平两相之间加装相间绝缘间隔棒。这是中国特有的一项紧凑化技术。档距分别超过 830 m 和 800 m 时,则需要在档距中央安装水平方向的相间间隔棒,在任何非水平方向上的上下两相导线间均无需装设间隔棒。

3 紧凑型输电线路的绝缘配合

紧凑型线路的绝缘配合原则与常规线路是一致的,线路绝缘包括绝缘子和空气间隙。此外,由于相间距离大大缩小,相间空气间隙、相间绝缘间隔棒的参数亦需根据相间操作过电压水平及保护装置特性进行设计、校核,以使线路操作过电压闪络概率控制在可以接受的水平之内。考虑到安全可靠,对于与紧凑型压缩相间距离关系不大的一些设备及参数的实

际选择,仍然按常规线路同样选取,如绝缘子串长仍然按常规 28 片 160 kN 绝缘子的长度 4 340 mm 选取,铁塔窗内相对地间隙长度仍按常规的 3.7 m 选取。

由于三相导线布置在同一塔窗内,使相间绝缘距离比常规线路减少了 5 m 以上,因此引起了空间电场分布的巨大变化,导致相对地的绝缘水平和相对相的绝缘水平之间产生特殊的关系。通过进行大量的操作冲击电压试验,得到了一些非常重要的放电规律。首先,在考虑相间操作冲击绝缘水平时,随着相间总电压中正、负极性操作冲击电压所占的比例不同,即相应的电位系数 $\alpha = U - / (U + + U -)$ 由 0 过渡到 1,会出现由正极性单相对地放电过渡到相间放电,再由相间放电过渡到负极性单相对地放电。当第三相接地时,若 $\alpha = 0.5$,放电主要表现为相间放电;当 $\alpha = 0.4$ 时,放电主要表现为相对地放电。其次,正极性的相对地操作冲击绝缘水平,受另外两相所加的反极性电压影响会有所下降,最严重情况约下降 10%。

4 结 语

高电压紧凑型输电线路自然功率较常规线路高,有利于电网稳定运行,对长距离输电可增加 30% 左右的输送功率,压缩线路走廊宽度,减少走廊占地,有利生态环保;线路地面电场强度超过 4 kV/m 的宽度仅为 16 m,比常规线路 48 m 减小 23 m,降低了电磁污染。在经济发达人口稠密、线路走廊资源的日益紧张、环保压力的不断加大的大都市,紧凑型输电线路在线路走廊宽度和自然传输功率方面所具有的优势,是当前城市电网建设与国家可持续发展战略方针相协调的新技术之一,有着积极的经济效益和社会意义。

参考文献

- [1] 马志坚,傅春衡. 500 kV 紧凑型输电线路技术应用研究[J]. 电网技术, 2005, 10(26): 26—29.
- [2] 于幼文,金永纯,高毅,等. 我国 500 kV 紧凑型输电线路的研究与应用[J]. 电力设备, 2004, 5(6): 9—12.
- [3] 刘亚芳,袁亦超,王惠仁,等. 500 kV 紧凑型输电技术的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(2): 55—58.

(收稿日期: 2010—10—13)

接地电阻是不可重复测量的物理量的研究

李秋锦, 郭治天

(中国矿业大学徐海学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:通过对传统接地电阻的理论计算和测量方法的了解,设计了一个接地电阻的测量模型,有别于传统的测量方法,结果表明大地电阻是不可重复测量的物理量,说明古老的一套以“路”为基础的引雷入地说在当今的防雷领域已不再适用,克斯韦电磁场理论才是研究雷电规律最重要性的理论。

关键词: 避雷针;欧姆定律;接地电阻

Abstract: Through the understanding of the traditional calculation theory and measuring method of grounding resistance, a measurement model for grounding resistance is designed which is different from the traditional measurement method. The results prove that the earth resistance is the physical quantity which can not be repeatedly measured, so it is indicated that the argument of triggering lightning into the earth based on "way" is no longer applicable to the protection against lightning nowadays. Maxwell electromagnetic field theory is the most important law in the lightning study.

Key words: lightning arrester; Ohm's law; grounding resistance

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0060-03

0 前言

目前国内外大部份建筑都采用避雷针防雷,但实践早已证明,避雷针对于 IT 设备有极大的危害^[1],例如:1992 年 6 月 20 日 20 时 05 分中国气象局气象中心大楼的避雷针引雷入地,计算机系统损坏,为此停止工作 46 小时,待维修完才能向全国播报气象预报^[2]。接地是富兰克林避雷针思维中绝对的必需,各种国内外防雷规范中都强调它的绝对必需,并且对接地电阻作出严格规定。但接地电阻的定义是否科学?国际公认的标准电阻是金属制的,它遵守欧姆定律,但大地由土壤、砂、石等各种非金属材料构成,大都不一定遵守欧姆定律,另外地基中有金属管道等材料,通入不同的电流 I 值,测得的 R 值是不相同的。所以,对于大地这样的材料引入电阻这个概念,并作出“接地电阻”这个物理量的定义值得商榷。何况闪电的强弱差异很大,又有极不相同的频谱,防雷规范所制定的接地电阻值并没有说明是对于何种强弱何种频谱的闪电而言,难以进行实验测量操作^[3]。希望通过实验说明接地电阻没有测量的可重复性。

1 接地电阻测量方法

富兰克林提出接地并没有想到接地电阻值,到了

20 世纪初电力输送的大发展涉及到人身安全,从跨步电压而产生了对大地电阻的测量,逐步形成了一套工频接地电阻的理论计算和测量方法。在电力系统开始年代,接地极形状很简单,接地极附近小范围内是比较均匀的土壤,其导电特性可以近视地看作遵守欧姆定律。随着建筑防雷范围的扩大,防雷接地的要求逐渐提高,于是庞大复杂的接地网工程的接地电阻如何就成了一个困惑的难题^[3]。

1.1 传统的接地电阻检测仪

传统的接地电阻检测仪是依据欧姆定律制作的,装置如图 1。

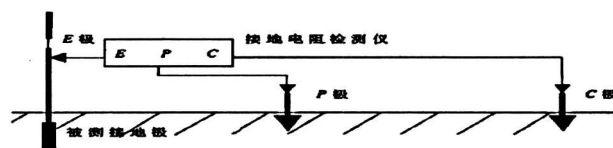


图 1 接地电阻检测仪

使用直流电池的接地电阻检测仪^[4],如 4102 型通过电池将直流电压变为较高电压加到接地极上,接地电阻值 $R = V/I$ 。但欧姆定律只适用于金属,大地由土壤、砂、石等各种非金属材料构成,大都不一定遵守欧姆定律;另外地基中有金属管道等材料,通入不同的电流 I 值,测得的电阻值是不相同的,即接地电阻不是一个常量。所以,对于大地这样的材料引入电阻这个概念,并作出“接地电阻”这个物理量的定义

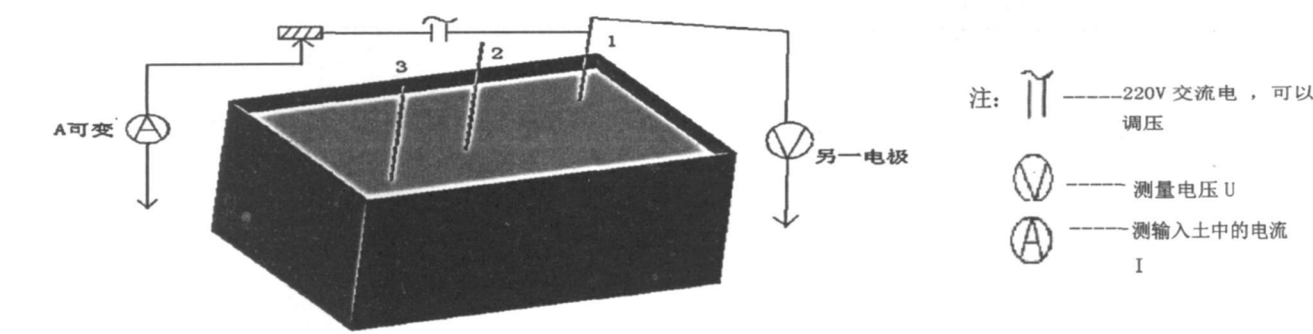


图 2 接地电阻的测量实验模型

是值得探讨的,无法进行实验测量操作^[5]。

即使不考虑频率和火花效应,纯粹从静电学范畴探讨接地电阻的定义,也无法躲开最基本的理论问题,测量的电流是从接地极注入,这个电流从哪里流回来?按理论规定,电流应均匀分布在地下无穷大的空间内,以保证电流线与电场力线的一致,辐射到无限远。如果回收电流的电极是针尖状,则电流就弯曲会聚在针尖处,电力线与电流线不可能吻合一致,因为运动电荷有惯性质量,这是不可违反的力学规律,而且电流线开头和分布与回收电流极的位置紧密相关。再者从静电学原理看,接地极的电位,也就是该点与无限远处的电位差,它是由两点之间的电场力对单位电荷所作的功决定的,这个功的数值与电力线的分布紧密相关。由此可见电流回收电极的位置的变动,必影响地极的电位^[6]。

可见,传统接地电阻的测量已把大地理想化,简化为均匀无限大的服从欧姆定律的介质,而实际情况要复杂得多,它是极不均匀的介质,它是否服从欧姆定律?故设计了一个物理模型进行分析研究。

1.2 设计的接地电阻的测量模型

物理模型和实验装置如图 2 所示,容器中装满泥土,1 为一根带铜球的铜棒,2、3 为细铜棒,把电流表的一端和电压表的一端分别接入细棒,调节变阻器改变电流的大小,即可测定接地电阻。

2 测量结果与分析

测得数据如表 1、表 2、表 3。

从表 1 中的实验数据可以看出,当输出电源电压 35 V 时,在同一点,改变 I 大小,沙子两端的电阻 R 值不同,并且 I 越大,沙子两端的电阻 R 值越大。而在同一平面不同深度,改变 I 大小,沙子两端的电阻 R 值也不同。

从表 2 中的实验数据可以看出,当输出电源电压 35 V 时,在同一点,改变 I 大小,土壤两端的电阻 R 值不同,并且 I 越大,土壤两端的电阻 R 值越小。而在同一平面不同深度,改变 I 大小,土壤两端的电阻 R 值也不同。

从表 3 中的实验数据可以看出,当输出电源电压 100 V 时,在同一点,改变 I 大小,土壤两端的电阻 R

表 1 沙子两端接地电阻测量数据

棒间距 /cm	棒插入深度 /cm	沙子电压 U/V	电流 $I/\mu\text{A}$	沙子的电阻 R/Ω
20	6	29.6	300.0	98 666.7
		20.6	222.2	92 700.0
		17.6	206.9	85 066.7
	9	29.7	340.9	87 120.0
		21.3	256.6	83 022.0
		17.0	208.3	81 600.0
30	6	29.7	267.9	110 880.0
		20.1	188.3	106 083.0
		17.0	175.4	96 900.0
	9	29.8	288.5	103 306.7
		20.9	217.4	96 140.0
		16.1	173.2	92 977.5

注:输出电源电压 35 V 测量数据的不确定度是 0.1%。

表 2 土壤两端接地电阻测量数据

棒间距 /cm	棒插入深度 /cm	土壤电压 $U^{\prime}/V$	电流 $I/\mu A$	土壤的电阻 $/\Omega$
20	6	27. 6	339. 0	81 420. 0
		21. 4	229. 9	93 090. 0
		15. 2	148. 1	102 600. 0
	9	27. 8	367. 0	74 665. 0
		21. 7	250. 0	86 800. 0
		15. 0	164. 4	95 508. 3
30	6	27. 4	285. 7	95 900. 0
		21. 2	205. 1	103 350. 0
		14. 8	127. 7	115 933. 0
	9	27. 0	363. 6	75 900. 0
		21. 6	250. 0	6 400. 0
		15. 5	162. 2	95 583. 3

注: 输出电源电压 35 V 测量数据的不确定度是 0. 1%。

表 3 土壤两端接地电阻测量数据

棒间距 /cm	棒插入深度 /cm	土壤电压 $U^{\prime}/V$	电流 $I/\mu A$	土壤的电阻 $/\Omega$
15	6	25	765. 3	32 667. 0
		46	1 483. 5	31 007. 8
		65	2 201. 3	29 528. 0
	9	30	1 489. 4	20 142. 3
		50	2 551. 0	19 600. 2
		70	3 658. 5	19 133. 5

注: 输出电源电压 100 V 测量数据的不确定度是 0. 1%。

值不同, 并且 I 越大, 土壤两端的电阻 R 值越小。而在同一平面不同深度, 改变 I 大小, 土壤两端的电阻 R 值也不同。

由以上实验结果可知, 用细铜棒作介质的电极时(防雷界测量接地电阻的检测棒), 回收电流的电极是针尖状, 则电流就弯曲会聚在针尖处, 电力线与电流线不可能吻合一致, 通过实验可看到, 当在相同的位置改变电流的大小和在同一平面不同深度改变电流的大小, 接地电阻的测量值有无穷个, 没有测量的可重复性。

3 结 论

对于大地这样的由土壤、砂、石等各种非金属材料引入电阻这个概念, 并作出“接地电阻”这个物理量的定义是不全面的, 在实际操作中容易引起误导, 应给出一个合理的适用范围, 人们在使用接地电阻这一概念时, 要注意它的适用范围以及可能带来的误差。

参考文献

[1] 虞昊. 关于建筑物防雷保护问题的探讨 [J]. 雷电防护与标准化, 2002(1).
[2] 虞昊. “接地电阻”是不可测的物理量, 应予废弃 [J]. 中国防雷参考, 2005.
[3] 虞昊. 用避雷针还是用等离子避雷技术 [J]. 雷电防护与标准化, 2004.
[4] 虞昊等. 现代防雷技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
[5] 虞昊. 物理与防雷 [J]. 雷电防护与标准化, 2004.
[6] 何金良, 陈水明. 雷电主放电电流模型及雷电放电电磁场的计算方法综述 [J]. 雷电防护与标准化, 2004.

作者简介:

李秋锦 (1982), 女, 汉族, 籍贯辽宁省喀左县, 职称助教, 学士学位, 现任中国矿业大学徐海学院数理教研室副主任, 主要研究电磁学;

郭治天 (1964), 男, 汉族, 籍贯河南洛阳, 职称副教授, 硕士学位, 主要研究摩擦学。

(收稿日期: 2010—07—08)

节约能源 保护环境

四川电网防污闪技术对策分析

何 松

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:对四川电网历年来的污闪情况进行了统计分析,在此基础上提出了相应的防止输变电设备污闪的措施,四川电网的污闪跳闸持续下降,近几年很少发生污闪事故。

关键词:输变电设备;污闪

Abstract: The statistical analysis for the flashover of polluted insulators over the years is carried out. On the basis of the analysis, the corresponding measures of flashover prevention for transmission and transformation equipment are proposed. Accordingly, the tripping caused by pollution flashover has a steady decline in Sichuan power grid, and the accidents of pollution flashover happened infrequently in recent years.

Key words: transmission and transformation equipment; pollution flashover

中图分类号: TM732 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0063-04

0 概 述

随着中国西部地区的大开发,四川电网迅猛壮大。截至 2009 年年底,110~500 kV 输变电设备统计如表 1。

表 1 截至 2009 年年底四川 110 kV 以上输变电设备

电压等级 /kV	110	220	500	±500	合计
输电线路 /km	15 774	12 495	6 400	240	30 298
发电站 /座	511	131	20	1	540

这些输变电设备座落在四川的高山、河谷、丘陵、平原,承受着各种不同性质的污秽和春、夏、秋、冬气候变化的侵袭。20 世纪 80 年代初,四川的工农业发展加快步伐,随之而来的各种污秽,给电网的安全运行带来了危害,污闪跳闸和污闪事故逐年上升,演变成电网的大面积污闪。

1 四川电网污闪统计分析

四川电网污闪统计详见附表 1~表 5 和图 1~图 2。

四川电网 1971—2009 年连续 39 年中,共发生污闪事故 208 次,其中输电线路污闪 113 次,电站污闪 95 次。1991 年 1 月 22 日,川西北电网发生大面积污闪事故,有 24 条线路、66 基杆塔、3 个 220 kV 变电站、74 处瓷绝缘对地闪络放电,当时的成都电网激烈振荡,解列为广元、绵阳、成都城区独立电网,引起四

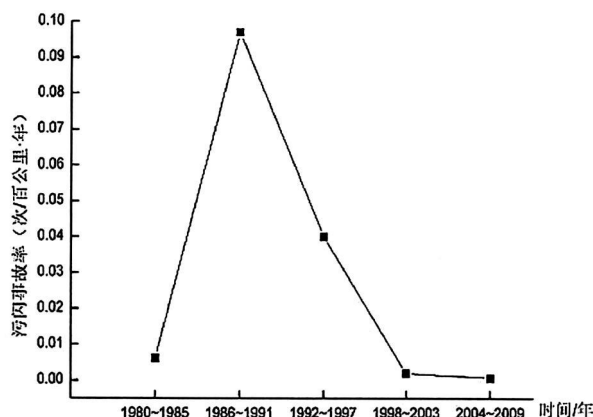


图 1 四川电网输电设备污闪事故示意图

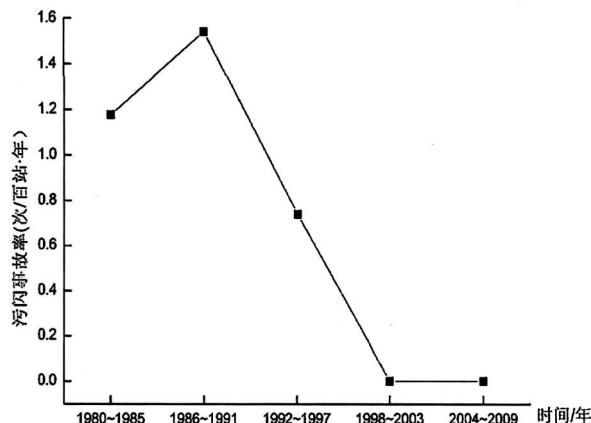


图 2 四川电网变电设备污闪事故示意图

川化工厂、成都钢厂、江油钢厂和 812 厂停电达 2 小时之久。在 1992 年度中,线路污闪 21 次,污闪事故率为 0.137 次/百公里·年,是 1981 年污闪事故率的 13.7 倍。发电设备污闪 16 次,事故率高达 4.113

表 1 四川电网输变电设备污闪事故统计

年份	污闪次数	输电线路污闪事故		发变电站污闪事故		发送电 /kW h
		次数	事故率 /(次 百公里·年)	次数	事故率 /(次 百站·年)	
1971— 2009	208	113	0. 035	95	1. 062	18 002. 7
1980	1	0	0	1	0. 465	2
1981	3	1	0. 01	2	0. 858	1
1982	5	1	0. 009	4	1. 667	3
1983	5	1	0. 009	4	1. 639	26
1984	4	1	0. 009	3	1. 095	8
1985	4	0	0	4	1. 339	486
1986	7	4	0. 032	3	1. 274	218
1987	11	5	0. 039	6	1. 911	57
1988	25	18	0. 136	7	2. 096	3 692
1989	8	4	0. 029	4	1. 194	5 050
1990	13	7	0. 048	6	1. 681	19
1991	15	11	0. 074	4	1. 087	317
1992	37	21	0. 137	16	4. 113	6 920
1993	16	13	0. 081	3	0. 076	0
1994	4	3	0. 015	1	0. 246	0
1995	0	0	0	0	0	0
1996	1	1	0. 007	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0
1998	1	1	0. 006	0	0	1
1999— 2001	1	1	0. 005	0	0	0
2002— 2004	0	0	0	0	0	0
2005	1	1	0. 004	0	0	0
2006— 2009	0	0	0	0	0	0

注：1998 年以后未统计 35 kV 及以下电网污闪事故

次 /百站·年,四川电网污闪事故的上升趋势令人非常关注担忧,已形成电网安全运行的头等大事。1994 年 1 月 1 日,某局 220 kV 华代线污闪,诱发了某电厂烧坏主变压器几乎全厂报废的重大事故。

沉痛的污闪事故教训,给四川电网敲起了警钟。对于如何防止电网污闪,世界各国已经历了近 100 年的研究。由于影响污闪的因素太多,且大都是随机的,分散性很大,难于找到一个有效而完善的防污闪技术对策。四川电网的防污闪工作者通过电网发生的大量污闪事故统计分析,深入研究,结合国内国际防污闪的经验,提出了四川电网防污闪的技术对策。

2 防污闪技术对策

2.1 制定污区分布图,指导调爬工作

四川电网的电瓷绝缘配置,有 80% 左右是按清洁区和轻污区配置的,大都在 1.7 cm /kV 及以下,显然电瓷绝缘配置强度不够,是四川电网频发多发污闪

事故的根本原因。四川地处中国西南部,地域辽阔。高原、山地、丘陵和平原样样都有。多呈现山高谷深、山大谷窄的地貌特点。风小多云雾、逆温效应显著,是易于污闪的气象条件。人口密集区工农业生产发达,铁路公路多,各种污染源随处可见。由于电网所处地区的情况各不相同,因而对电网提出污区划分成为首要课题。为此大量搜集污染源、气象等技术资料,同时对四川电网长达 12 年之久的现场盐密实测,有 1 334 个检测点,在对这些检测点数据统一归算整理后,得到可用数据 8 768 个,于 1992 年制定四川地区污区分布图(目前已经修订再版 3 次),这给四川的电力设计、电力基建和电力运行部门提供依据,严格按照污区等级进行电瓷外绝缘配置,并据此提出四川电网的调爬工程。要调整爬距加强绝缘,这是一个投资巨大,人力物力消耗巨多的一个重大技措工程,难度不小。只有在保证电网正常运行的情况下,分期分批、分轻重缓急有计划地逐步实施。同时还要根据污湿特征的变化,盐密值检测提供的数据和电网运行情况,适时的动态调整。

2.2 坚持清扫保持瓷绝缘抗污闪强度

绝缘子表面清除污秽,能恢复原有的抗污闪水平。要掌握好合理的清扫周期、清扫时间和清扫顺序,才能提高清扫的有效性,使绝缘子在污闪季节中积污量最小。

2.3 做好绝缘子检零,保证瓷瓶串完好

运行中的绝缘子,长期经受着电场、负载和大自然中阳光、雨、雪、露的作用,必然逐渐老化。通常将单片绝缘子绝缘电阻值在 $0 \sim 30 \text{ M}\Omega$ 的称低、零值瓷瓶,瓷瓶串中有一个零值存在,就相当于一串少一个瓷瓶,无疑增加发生污闪的可能性。当含有不良绝缘子串污闪时,其短路电流从绝缘子串的内部通过产生的热效应常使钢帽炸开,导线落地扩大事故。中国根据数十年的运行经验,悬式绝缘子的年劣化率为 0.3% 左右,相当于 220 kV 耐张杆年平均每基杆约有一片零值。其中统计到超高压 500 kV 平武线,年劣化率为 0.56% ,由此可见绝缘子检零的重要性。排除绝缘子串中的零值瓷瓶,可大大提高电网的抗污闪能力。

2.4 慎重使用硅橡胶增爬裙,提高抗污闪强度

将硅橡胶伞裙装在绝缘子伞裙上,用粘胶剂把它与绝缘子粘紧,和绝缘子一起形成整体的组合绝缘结构。利用它可以增加绝缘子的爬距,改善绝缘子的受污条件、受潮条件,改变绝缘子的放电路径和切断污水桥接短路的作用。通常可提高污闪电压 50% 。实践证明, 110 kV 的瓷棒在上、中、下安装三个伞裙为最佳。若每个伞裙都安装,因片间间隔太小不易隔断污水线和放电电弧,而提高污闪电压不多。

安装硅橡胶增爬裙,能适用于各种变电瓷件。特别能解决运行中变电设备难于调整爬距的空白,如电压互感器、电流互感器,主变压器套管、油开关套管等。但硅橡胶增爬裙材质要求高,对粘合剂和施工工艺的要求也高,制造工艺较复杂,难于形成系列产品,影响了普遍推广应用。

2.5 采用 RTV (PRTV) 涂料提高电网的抗污闪性能

室温硫化硅橡胶 (简称 RTV) 长效防污涂料有优良的憎水性、电气性能和耐气候、耐老化性能,达到提高防污闪能力的目的。在难以调整爬距而爬距又不能满足污秽度要求的地方应用,实践证明效果很好。

RTV 涂料的有效期长,四川电网已有多年的运行经验。当 RTV 失效后,多数是采取直接重涂的方法,不需将失效的涂层消除。一般续涂 $3 \sim 4$ 次对绝缘子本身无不良的后果。如发现 RTV 涂层有局部破损,可

只在破损处补涂一层。RTV 涂层表面可用水冲洗。

在运行中判断 RTV 涂层是否失效采用的方法是在大雾、毛毛雨和空气湿度大的夜间 (晚上),对有涂料绝缘子进行观察,看其是否发生局部放电、滑闪放电,如有较为强烈放电,且放电声明显大于涂涮不久的放电声,涂料可能失效。如遇暴雨,绝缘子可能出现滑闪放电,但随时间推移,滑闪减弱至消失,说明涂料还有效。观察涂料憎水性的变化,憎水性减弱至消失,RTV 涂料也就失效。

2.6 使用合成绝缘子,提高电网的防污闪性能

合成绝缘子是以高分子有机材料硅橡胶为主制造的复合结构绝缘子,具有良好的防污闪性能,通常比瓷绝缘子高 $2 \sim 3$ 倍。它具有良好的憎水性,难于受潮;它杆径小、形状系数大、表面电阻大;它可塑性大,成型方便利于结构形状的优化。据前苏联的研究,伞裙上、下表面倾角差在 $1^\circ \sim 15^\circ$ 范围,伞裙与杆径之比值不超过 $4 \sim 6$ 倍,伞距与杆径之比为 $0.7 \sim 1.3$ 时积污量最小,要实现这种造型,瓷绝缘子是较难的,而硅橡胶很容易实现。在电压相同时,合成绝缘子的杆径小,长度比瓷质绝缘子短,这可减小线路的相间、对地距离,便于架设紧凑型线路,大大减少线路走廊占用的土地降低造价。合成绝缘子重量轻、金具部件少,便于运输安装,运行中不清扫、不检零等。

4 结 语

四川电网防污技术工作的有序开展已 40 余年,取得进展,有一定成效,但要做的工作还很多很多,任重而道远。电网的防污闪技术还要进一步拓展和深化。要把防污闪技术对策延伸到城网和农网的改造,对于四川电网的主网架更应居安思危,要特别注意污闪出现的随机性。要密切关注污湿特征的变化。要认真思考污秽变化大环境污染湿沉降的新理论。对科学的污区等级划分、防污闪技术措施、防污闪新技术的开发应用和防污闪的相关数据库等有大量的工作要做。对长串绝缘子、双串绝缘子和 V 型串绝缘子和直流绝缘子串的污闪特性、合成绝缘子的雷电冲击特性及在线监测技术等要立项研究。对目前电网

表 2 四川电网输变电设备按电压统计 (1971—2009 年)

电压 /kV	6~10	35	110	220	500	±500	总计
污闪次数	15	52	114	24	0	0	208
占总污闪 /%	8.65	25	54.8	11.55	0	0	100

表 3 四川电网输变电设备污闪按瓷绝缘爬距统计
(1971—2009 年)

污闪瓷件爬电比距 (cm/kV)	16~17	17~19	≥ 20	总计
污闪次数	115	19	4	138
占总污闪 /%	83.23	13.86	2.91	100

表 4 四川电网输变电设备污闪事故每 6 年平均值

起止年份	平均污闪事故率 / (次 / 百公里 · 年)
1980—1985	0.006 2
1986—1991	0.097 0
1992—1997	0.040 0
1998—2003	0.001 9
2004—2009	0.000 7

表 5 四川电网变电设备污闪事故每 6 年平均值

起止年份	平均污闪事故率 / (次 / 百站 · 年)
1980—1985	1.1772
1986—1991	1.5405
1992—1997	0.7392
1998—2003	0
2004—2009	0

(上接第 57 页)

东、华中的需要,将建成乌东德—福建 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 特高压直流线路,送电容量 $9\,500\text{ MW}$,以及白鹤滩—湖北和白鹤滩—湖南两回 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流线路,送电容量均为 $7\,500\text{ MW}$ 。

4.2 特高压交流电网

在满足省内自身用电需求和直流特高压外送电力后,在 2015、2020 年四川电网仍有约 $11\,600\text{ MW}$ 和 $19\,300\text{ MW}$ 剩余电力,主要考虑通过交流特高压通道外送。“十二五”期间将建成雅安、乐山两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,形成雅安—乐山—重庆 $1\,000\text{ kV}$ 特高压交流送电通道,实现川渝与华中东四省交流特高压联网。“十三五”期间,还将建成绵阳、成都两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,形成雅安—绵阳—万县第二回 $1\,000\text{ kV}$ 特高压交流送电通道,进一步加强川渝特高压电网结构。

为满足四川西部雅砻江、大渡河等流域大中型水电站的外送,“十三五”期间将建成甘孜、阿坝两座 $1\,000\text{ kV}$ 特高压变电站,以及甘孜—雅安、阿坝—绵阳特高压交流送电通道,通过交流特高压电网实现电力大规模外送。其中甘孜特高压变电站主要汇集雅砻江中、上游两河口、牙根、新龙等梯级大型电站,最终汇集容量约 $9\,000\text{ MW}$,阿坝特高压变电站主要汇集大渡河上游双江口、巴底、丹巴等大型梯级电站及部分中小型水电,最终汇集容量约 $10\,000\text{ MW}$ 。

到 2020 年,四川电网将与重庆电网通过 4 回

中的各类型绝缘子,尤其是大吨位绝缘子的积污特性、污闪特性,四川电网应将运行情况深层次加以论证研究。

参考文献

[1] 顾乐观,孙才新编著. 电力系统的污秽绝缘 [M]. 重庆:重庆大学出版社,1990.
[2] 张仁豫主编,绝缘污秽放电 [M]. 北京:水利电力出版社,1993.
[3] 日本电气学会通文教育会编. 绝缘子 [M]. 北京:机械工业出版社,1990.
[4] 西安高压电器研究所翻译. 高电压外绝缘电气强度 [M]. 北京:水利电力出版社,1977.
[5] GB 311—83. 高压输变电设备的绝缘配合 [S].
[6] 四川电网历年防污闪工作总结 [R].

(收稿日期:2010—08—19)

$1\,000\text{ kV}$ 特高压交流线路联网,与西北、华中、华东电网形成 $\pm 500\text{ kV}$ 、 $\pm 800\text{ kV}$ 、 $\pm 1\,000\text{ kV}$ 共计 7 回特高压直流线路联网的“多直、多交”并列运行格局,输电能力将实现跨越式升级,电力资源配置能力显著增强,四川电网作为全国电力交换大枢纽、大平台的地位进一步确立。

5 结 论

大力开发水电并实现大规模外送是变资源优势为经济优势的重要举措,对促进四川经济社会发展具有重要意义。随着四川水电资源加快开发,为破解日益凸显的输电走廊瓶颈问题,迫切需要应用特高压输电技术,加快特高压输变电工程建设。四川特高压电网通过“十二五”和“十三五”期的发展,输电能力将实现跨越式升级,外送能力超过 $60\,000\text{ MW}$,将为四川水电加快开发创造有利条件,对促进四川由能源资源大省向电力大省、经济强省的转变具有极其重要的意义。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京:中国经济出版社,2005.
[2] 陈秀山主编. 西电东送工程区域效应评价 [M]. 北京:中国电力出版社,2007.
[3] 四川省发改委. 四川水电基地调研报告 [R].

作者简介:

金健可 (1976),男,工程师,从事电力市场和电网规划方面的管理工作。
(收稿日期:2010—10—09)

电力电缆无线测温系统研究

胡娟¹, 巫京励², 程文婷³

(1 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610041

2 成都电业局高新供电局, 四川 成都 610041; 3 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:交联聚乙烯(XLPE)电力电缆具有无油、附属设备少、安装敷设和运行维护简单等优点,得到了越来越广泛应用。作为一种简便的电缆绝缘运行状态监测方法——电缆温度监测有利于及时发现 XLPE 电力电缆绝缘缺陷,防止事故发生,保证电缆的安全运行。在综合分析国内外电缆温度监测方法和技术研究现状的基础上,给出了缆芯温度和表面温度间关系以及电缆温度与载流量间关系的数学模型,详细论述了电缆温度无线监测系统的硬、软件设计,并就现场安装方案等问题进行了深入的研究。

关键词:交联聚乙烯电缆;表面温度;缆芯温度;载流量;有限元;无线监测

Abstract: XLPE power cable has so many merits such as oil-free, less auxiliary equipment, easy installation and operation maintenance, and has been widely used. Cable temperature monitoring can help identify the insulation defects of power cable, prevent fault occurring in time and ensure the safe operation of the cable as the simple monitoring way of cable insulation operation. Based on the present research of cable temperature monitoring technologies and methods at home and abroad, the relationship between core temperature and surface temperature is studied, and the mathematical model of the relationship between the cable temperature and the current capacity is established. The design of hardware and software for wireless monitoring system is discussed in detail, and the on-site installation programs and other issues are also studied deeply.

Key words: XLPE cable; surface temperature; core temperature; current capacity; finite element; wireless monitoring

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0067-04

0 引言

交联聚乙烯电力电缆具有运行可靠、不易受外界影响、不需架设电杆、不占地面、不碍观瞻等优点^[1-3]。随着现代工业的发展和城市化水平的提高,电力电缆作为传输电能的重要工具,越来越得到人们的重视。

电缆敷设环境与使用状态会极大地影响电缆的寿命。电缆投入运行后在外界环境作用下,常发生绝缘老化,同时伴随以温度过高、局部放电、树枝老化等形态表现出来,但最终都归结于电树枝而导致绝缘击穿^[4,5]。电力电缆一旦发生故障,寻找起来十分困难,不仅要浪费大量人力物力,而且还将带来难以估计的停电损失。为了保证电力电缆可靠运行,有必要在运行过程中掌握电缆绝缘的劣化状况,并对之进行在线的绝缘检测及诊断^[6]。研究发现,载流量估算过高,电缆运行于过热状态,造成导体工作温度超过允许值,电缆绝缘寿命就比期望值缩短^[7-10],若估算

过低,则导体铜材或铝材就未获充分利用,传输能力浪费。

电力电缆温度在线监测系统可很好地反映高压电力电缆及其附件的运行状况。通过对 XLPE 电力电缆的温度在线监测,可有效评估 XLPE 绝缘老化状况,及时发现电缆故障隐患。实验研究表明电力电缆运行中的这些温度指标与水树引发速率、水树长度等主要绝缘指标有较好的相关性。另外,通过温度的在线监测能准确地确定其载流量,保障电力电缆安全可靠运行。综上所述,通过温度在线监测来反映电力电缆绝缘状态是一种切实可行的方法。

目前广泛应用的几种典型温度在线检测技术有:红外测温技术、热电阻测温法、光纤测温技术、无线测温技术和数字传感器测温技术。

这里提出的无线测温系统由于采用无线方式传输数据,测温点无需有线连接,测温终端可放置于电缆的任何部位,不受环境影响,机动性好、灵活性强、运行管理灵活、维护操作简单。应用所提出的无线测温技术可提高电力电缆运行可靠性和稳定性,减轻管

理人员和巡查人员的工作强度,具有较好社会效益。

1 电缆缆芯温度与表面温度间的关系

无线测温系统的测试终端是对电缆表面温度进行采集和无线传输的设备。由于电缆表面温度并不能完全显示电缆运行的全部状态,因此准确掌握电缆运行状态的关键是找出电力电缆内部导体温度和表面温度之间的相互关系。当电力电缆在运行中产生的热能,一部分存贮在导线及绝缘材料内,其余的热能以传导形式经绝缘材料传递到电缆连接头的表面,然后通过对流及辐射传递给周围环境。由于导线与绝缘之间、绝缘与周围环境之间存在着热阻,导线温度将上升,其电阻率也随之增加并产生更多的热能,直至线路处于稳态。在这种情况下所产生的全部热量传递给周围环境,而导线的温度将保持恒定。电力电缆内部导体温度和表面温度的基本关系为:电流使内部导体温度变化,而表面温度由于导体热能经过能量传递而随之产生变化,两者间存在着因果关系。

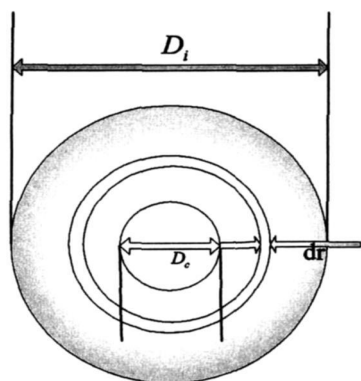


图 1 电缆热流平衡示意图

① 电力电缆缆芯温度与表面温度间对应关系的数学模型

由于电缆均为圆柱形体,在电缆热场计算中故采用柱面坐标。为便于分析,先以单芯电缆进行计算。如图 1 所示。

② 建立导热散热物理模型的基本假设

本系统采用温度场有限单元法。这种方法将研究对象从宏观转为微观,由总体转到局部单元,求得每一个微点的温度和温升。模型中所采用的电缆敷设情况假设如下。

(1) 电缆的外径远远小于电缆的长度,因此取一个截面来研究。设定传热的各个平壁间紧密接触,电缆可看成是一种发热热源。

(2) 任意相邻的两根电缆之间的温度分布中间截面对称,因此中间截面是一个绝热面。没有热流流量。可以认为热流密度为 0,即 $q = 0$ 。

(3) 取得一个二维平面问题来研究。

(4) 电缆敷设的周围媒质是固体,彼此接触紧密,认为是通过导热来传递热量的。固体和空气接触层表面应该看成对流换热,那么边界的条件采用第三类边界条件。

根据以上假设,可完成电缆散热物理模型的建立。

③ 传热过程数学模型

采用有限元方法建立电缆温度场的分布模型,相比热路法具有明显的优点:能反应局部温度和温升情况,改善传统热路方法中因受环境温度、土壤热阻系数等各种外界因素影响较大的缺点等等,因此采用有限元方法建立的模型更准确、更具可靠性。

电力电缆的稳态温度场属于二维稳态导热稳态。有热源区域(如电缆导体、金属屏蔽层和铠装层)和无热源区域,它们的温度控制方程如式(1)和式(2)所示。

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{d^2 \theta}{dy^2} = \frac{w_i}{\lambda} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{d^2 \theta}{dy^2} = 0 \quad (2)$$

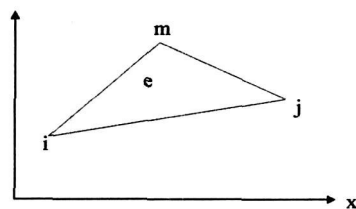


图 2 三角形网格单元

任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件。第一类边界条件为已知边界温度;第二类边界条件为已知边界法向热流密度;第三类边界条件为对流边界条件,即已知对流换热系数和流体温度。在本模型中,采用三角形划分网格,根据线性插值函数知,如图 2 所示,在每个平面三角形单元内的泛函形式为

$$J[\theta] = \iint_e \left[\frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 - q \theta \right] dx dy - \int_{jn} q \theta ds + \theta \int_{jn} \alpha \left(\frac{1}{2} \theta^2 - \theta_r \alpha \theta \right) ds \quad (3)$$

总之,在有限单元法中,把单元的系数相叠加到整体的系数相中去就称作“贡献”。同一单元中的相邻节点,在合成时对该节点方程的系数值有所“贡

献”，而在不同单元中的其余节点就不会有所“贡献”，这是总体合成的关键。对 n 个节点温度都求偏导，并使之等于零，就可以得到 n 个代数方程，写成或者简写成： $[K][T]=[P]$

其中， $[K]$ 为温度刚度矩阵；

$[T]$ 为未知温度值的列向量；

$[P]$ 为等式右端项组成的列向量。

最后，用变带宽一维压缩存储的高斯消去法求解上面的线性方程组，从而得到各节点的温度值。

④ 电力电缆温度场和载流量的数值算法

对给定的传热问题，首先是要写出它的控制方程和定解条件，有了这个前提，才能利用正确的数值方法，借助于计算机，得到反映传热过程内涵的数值结果，获得几何参数、初始状态、工质的物性、流动状况和边界条件等对系统内的温度分布及其变化规律，边界处的热流或热换系数等的影响关系。

(1) 导热微分方程式的确立

在某一时刻，物体内部所有各点的温度分布的总称，称为该物体在此时刻的温度场。一般，温度场是空间坐标和时间的函数，在直角坐标系中可表示为

$$t=f(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

式中， x, y, z 为空间直角坐标；

τ 表示时间， t 为 τ 时 (x, y, z) 点的温度。

(2) 确定单值性条件

导热微分方程式是描述导热过程中物体的温度随空间坐标及时间变化的一般性关系式，它描述的是同类导热过程的共性而没有涉及特定过程的具体特点，所以适用于所有同类导热体内部的导热过程，由它得到的解释这类问题的通解。要获得某个具体导热问题的特解，还必须说明特定导热过程的具体特点，这些说明导热过程具体特点使导热微分方程式获得唯一解的条件称为单值性条件或定解条件。因此，对于一个具体的导热问题，其完整的数学描述应包括相应的导热微分方程式和单值性条件。单值性条件一般包括以下几项。

1) 几何条件：导热体的几何形状、尺寸大小及相对位置等；

2) 物理条件：所研究导热体的物理特性。如物体的物性参数的数值及其特点（是否随温度变化），内热源的大小及分布情况等；

3) 时间条件：通常说明导热过程初始时刻导热体的温度分布规律，又称为初始条件；

4) 边界条件：说明导热物体边界上的热状态以及与环境相互作用的情况，常用的边界条件有三类。

⑤ 有限元法求解地下电缆温度场

在地下电缆温度场整体区域变分求解遇到困难的情况下，采用网格剖分技术，使变分计算在每一个局部的网格单元中进行，最后再合成为整体的线性代数方程组进行求解。此方法将研究对象从宏观转为微观，由总体转为局部单元，可以求得每个单元的温度，从而确定整个求解区域的温度分布。

地下电缆温度场导热微分方程的确立具有内热源的固体导热偏微分方程如式 (5)。

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = -Q + c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

式中， T 表示温度场内各点温度； k, c 及 Q 各为微元体的导热系数、比热容、单位体积中内热源的生成热； t 表示时间。

确立了地下电缆温度场的导热微分方程，接下来就是根据边界条件对方程进行求解。任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件。第一类边界条件为已知边界温度；第二类边界条件为已知边界法向热流密度；第三类边界条件为对流边界条件，即已知对流换热系数和流体温度。

2 电力电缆无线测温系统设计

系统主要由一台上位监控计算机（上位机）和多台现场无人值守自动测温站点（下位机）组成，构成集散型监控网络，并在实际工程中应用，实现了电缆温度的无线监测，并具有结构简单、可靠性高、可扩展性强等一系列特点。软件部分的设计是交联聚乙烯电力电缆温度在线监测系统的核心之一。

① 系统硬件设计

根据实际使用要求，系统由一台上位监控计算机（上位机）和多台现场无人值守自动测温站点（下位机）组成，现场下位机和中心监控计算机通过 GPRS 无线公网和公共数据互联网进行沟通，将来根据系统管理的需要，现场下位机容量扩容及检测点区域分布要求，可扩展成多级监控网络，一个监控中心可同时管理几个中心计算机。系统构成如图 3 所示。

本系统是以计算机应用技术、数字通信技术、数字测温技术为基础的大型监控系统，具有技术含量

高、覆盖面广、使用简单可靠,功能齐全、可靠性要求高等特点,它可保证电缆系统的实时监控,达到建设周期合理、性价比优越,能及时发现电缆运行中所存在的问题。

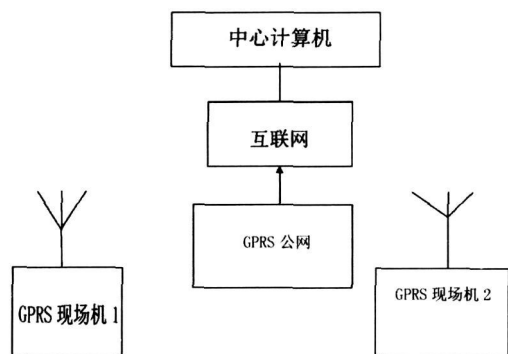


图 3 系统硬件结构图

② 系统软件设计

根据集中控制的原则和设计思路,将系统控制、数据采集、数据处理、数据和信息的显示等功能都集中于控制主机,并给出了软件设计的总体框图。该软件系统主要包括子站软件,工作站软件和通讯软件,并给出了数据采集、数据处理、子站接收和发送数据、工作站发送命令、接收数据等子程序的流程图。XLPE 电缆接头温度在线监测系统的软件为系统运行人员提供了直观、简洁的数据显示和系统控制界面。电力电缆温度在线监测系统软件设计的总体目标是在软件系统的控制下,实现在线监测系统现场各部件的协同工作,完成对温度信号采集以及数据的相关处理等主要功能。主要包括下位机监测软件、通讯控制程序、上位机工作站程序三个主要功能部分,其总体框图如图 4 所示。

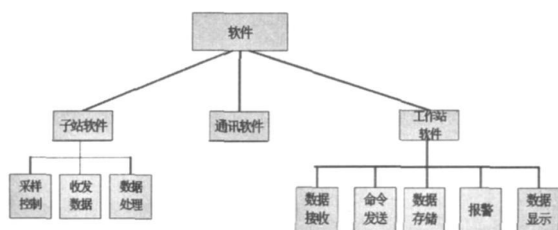


图 4 系统软件总体框图

3 结束语

前面建立了缆芯温度和表面温度间关系以及电缆温度场与载流量间的数学模型,并对电缆温度无线监测系统的硬、软件设计进行了介绍,对现场安装方案及其应用问题进行了深入讨论。通过所提出的电缆温度无线监测系统的应用表明,对电力电缆温度的监测可实时确定交联聚乙烯电力电缆载流量及其绝缘的运行情况,及时发现其绝缘缺陷,防止事故发生,保证电缆安全运行。

参考文献

- [1] 郑肇骥,王侃明. 高压电缆线路 [M]. 北京:水利电力出版社, 2003.
- [2] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [3] 高自伟. 电力电缆在线载流能力预测系统的研究 [D]. 哈尔滨理工大学硕士学位论文, 哈尔滨理工大学, 2005; 12—29.
- [4] 李常禧. 电气设备诊断技术概论 [M]. 北京:水利电力出版社, 2004.
- [5] 电力部电力科学研究院. 1994—2006 年 110 千伏及以上等级变压器事故统计分析 [N], 2007.
- [6] 王东星. 电缆在线监测系统的应用研究 [D]. 东北大学, 2005.
- [7] 孙林,刘惠民. 我国电网及输变电技术的回顾和展望 [J]. 华东电力, 200(12): 21—26.
- [8] 何旭东. 交联聚乙烯电缆绝缘的劣化机理及在线监测方法的研究 [D]. 重庆大学, 1996; 5—35.
- [9] 李忠旺,王庆雄. 电力电缆温度的在线监测 [J]. 宝钢科技, 2007(33): 41—43.
- [10] John S, Johnson et al. Detection of Slot Discharge in High-voltage Stator Windings during Operation [J]. AIEE Trans Part II 2001(7): 9—19.

(收稿日期: 2010—09—15)

• 简讯 •

当前中国核电出现了快速发展的强劲势头

当前中国核电出现了快速发展的强劲势头。根据中国中长期核电发展规划,到 2020 年核电运行装机容量要达到 40 000 MW。据了解,这个指标还要突破,即要达到 70 000~80 000 MW。

这种大规模的发展核电会使中国天然铀供应出现严重不足,而要解决天然铀供应问题必须大力发展快堆,彻底解决天然铀的供应问题。现在实验堆建成了,就应该抓紧建设商用快堆。而要实现这个目标必须尽快实现关键技术和设备的国产化,而产、学、研相结合应是最佳途径。这在中国实验快堆上已经有成功的先例。

变压器挡位远方监测探讨及技术改造

刘祖惠

(成都电业局修试所, 四川 成都 610041)

摘 要:成都电业局新建的变电站均采用了变电站无人值班的监控方式。为保证有载调压变压器挡位监控方式的顺利实施,对变电站挡位远方监测数据的正确性提出了较高的要求。现在新建的变电站对变压器有载分接开关要求能实现遥调,其位置遥信,采用了直接接线采集和挡位变送器方式,能较好地实现主变压器挡位的非电量—电量转换监测问题。

关键词:变压器挡位;远方监测;变送器

Abstract: The newly-built substations all adopt non-attended style in Chengdu Electric Power Bureau. In order to ensure the successful implementation of tap position monitoring of load-ratio voltage transformer, the higher requirements are put forward for the correctness of remote monitoring data of transformer tap position. Now newly-built substations are all required remote control of on-load tapping switch of transformer and remote signaling of its position. It adopts direct grounding acquisition and the tap position transducer, which can realize the monitoring of conversion between electrical quantity and non-electrical quantity of transformer tap position.

Key words: transformer tap position; remote monitoring; transducer

中图分类号: TM761 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0071-03

电压是衡量电能质量的重要指标之一,保证用户处的电压接近额定值是电力系统运行调整的基本任务之一。电压偏移过大不仅对用户的正常工作产生不利影响,还可能使电网损失增大,甚至危及系统运行的稳定性。作为变电站调压的主要手段,一般都采用有载调压变压器。有载调压变压器可以在带负荷条件下切换分解头,从而改变变压器的变压比,起到调整电压、降低损耗的作用。为了使有载调压变压器挡位的位置能在监控系统后台机上和 VQC 装置上显示出来,采用了多种多样方法,根据变压器挡位信号的采集方式,可分为两种方式:一种是通过综自站的测控装置直接接线采集挡位值;另一种是通过挡位变送器进行采集。

1 直接接线采集挡位方式

1.1 直接一对一方式

这种方式是将变压器有载调压分解头分别对应的辅助接点,利用调节所在挡位之辅助接点闭合(其余的接点分开)的关系,用电缆一对一连接,分别引入挡位单元位置,按开关量方式输入,送到变电站控制室内,接入监控系统或 VQC 装置上,实现挡位测

量。如变压器最高挡位为 19 档,则当主变压器为 1 档时,摇信 1 接通,2 档时,摇信 2 接通,19 档时,摇信 19 接通。如果有载调压机构每档二次触头只有一对时,为了同时接入到监控系统和 VQC 装置接口上,必须加装转换盒扩展接点。其优点是直观,监测准确,但缺点非常明显,需要占用很多开关量遥信通道资源,所需电缆芯数多,接线复杂,在实际生产运用中造成一定的资源浪费。

1.2 个位加十位方式

有的变压器有载调压机构提供了一个十位档触点,当主变压器挡位在 1~9 档时,十位档触点断开,在 10~19 档时,十位档触点接通。监控系统或 VQC 装置将个位档与十位档接点接入摇信开入回路,通过简单的计算即可算出变压器实际挡位。这种方式比一对一方式减少了将近一半的电缆芯数及摇信资源。缺点是有载调压机构挡位二次触点不够时,仍需加装开关量转换盒扩展接点。

1.3 BCD 编码方式

变压器有载调压机构通过有载调压挡位控制变送器,使挡位位置动转换成模拟电压、开关信号、BCD 码供监控系统和 VQC 装置遥讯、遥测、遥控。变压器挡位按照 BCD 编码规则,将挡位的“个位”0~9 十个

输入状态按“8、4、2、1”编码,“十位”仅需“0”、“1”两种状态。故个位上 4 根线,十位数上 1 根线即可表述分接头 0~19 间的挡位位置,用 1 根线作为 BCD 码输出公共端。公用一根 6 芯电缆即可完成信号的传输。BCD 编码与挡位对应关系见表 1。

监控系统和 VQC 装置将主变压器挡位的 BCD 编码接入到摇信开入回路,按照 BCD 编码规则通过译码还原即可得出变压器挡位实际位置。该方式所占摇信资源少,电缆芯数也只有 6 根,抗干扰能力强。

表 1 BCD 编码与挡位对应关系

挡位值	BCD—5	BCD—4	BCD—3	BCD—2	BCD—1
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0
---	---	---	---	---	---
19	1	1	0	0	1

2 通过挡位变送器方式

2.1 电阻分压方式

在有载调压机构辅助刷形开关上找准实际挡位起止点,如主变压器最高挡位为 19 档,则串接入 18 个电阻为 $1\text{ k}\Omega$ 的高精密等值电阻,将直流控制母线电压 V_{KM} 接到其首尾端,取滑盘的抽头电阻上电压 V_{F} ,当主变压器实际挡位变化时,抽头电压值也随之对应变化。将抽头电压 V_{F} 与直流全压同时接入到监控系统直流电压采样电路及 A/D 转换,数据送 CPU 处理,取抽头电压与直流全压之比,按站端机数据库中预定公式进行计算,而得出变压器实际挡位。

如主变压器最高挡位为 19 档,则计算公式为

$$\text{挡位}[(18 \times V_{\text{F}}) / V_{\text{KM}}] + 1 + 0.3$$

式中, V_{F} 表示分接头当前位置返回的调档电压; V_{KM} 为直流全压取样的控母电压; 18 表示等值电阻个数(即分压的级数);“+1”为有载开关挡位没有 0 档,即分压系数为 0 时,实际为 1 档;“0.3”为修正系数,鉴于分压电阻的离散性, V_{F} 、 V_{KM} 测量通道亦存在误差,则每次测量后计算结果将出现带小数位的挡位,为此先将计算结果通加上 0.3 档,让其全部计算均满足正数,然后取整,将小数点后的值舍掉,修正原则是把负数误差结果能补正,但是又不能让本身就是正误差的修正后出现误进一档的极端情况。

例如当主变压器实际在 1 档时, $V_{\text{F}} = 0\text{ V}$, $V_{\text{KM}} =$

220 V,得出挡位为 1.3 档,取整后为 1,当主变压器实际在 10 档时, $V_{\text{F}} = 110\text{ V}$, $V_{\text{KM}} = 220\text{ V}$,得出挡位为 10.3 档,取整后为 10,当主变压器实际在 19 档时, $V_{\text{F}} = 220\text{ V}$, $V_{\text{KM}} = 220\text{ V}$,得出挡位为 19.3 档,取整后为 19。该种方式接线简单,只需要三芯电缆,占用 2 个直流遥测点。缺点是抗干扰性差。

2.2 4~20 mA 电流环方式

变压器有载调压机构利用辅助刷形开关选择的相应电阻变化经过智能分接位置监控器的比例运放、恒流源放大等电路处理后,形成 4~20 mA 恒流输出送至监控数采系统,再通过 I/U 转换器或直接用 $250\text{ }\Omega$ 精密电阻采样,得到 1~5 V DC 变化作为遥测输入,送模拟量数据采集,监控系统通过计算得出 1~19 档实时挡位。

此种方式的优点是接线简单、占用资源少,只需要两芯电缆,占用监控系统一个遥测点,抗干扰能力强。缺点是带负载能力有限,因工作电压偏低(9~12 V),仅带监控采样 $250\text{ }\Omega$ 尚可,再增加 VQC 上的 $250\text{ }\Omega$ 负载后,将出现高挡位数据饱和现象。

3 存在的问题

3.1 监控机上无法识别等电位档

现在变电站上主变压器挡位主要有 17 档和 19 档两种类型,二者的主要区别在于中间等电位档标识的差异。19 档类型按 1~19 档十进制进位,但是 9 档、10 档、11 档三档为等电位档。而 17 档类型则将三个等电位档分别标记为 9A 档、9B 档、9C 档。而微机监控系统却无法识别变制式的 9A 档、9B 档、9C 档等电位档,有载调压机构进退一档时,监控机上就增减一档,当有载调压机构调到 9B 档时,而监控机上却显示 10 档,当有载调压机构调到 9C 档时,而监控机上却显示 11 档,这样监控机上的挡位在高挡位上与有载调压机构箱上显示的挡位就不一致。

如果有载调压机构挡位监测是电阻分压监测方式,将 9A 档、9B 档、9C 档三个取样电阻直接短接为同一个电阻,同时修改站、控端计算机的挡位计算公式,将公式中的系数 18 改为 16。

当同一变电站若有两台以上主变压器,主变压器有载调压机构使用了不同厂家型号生产设备后,容易出现 17、19 档两者混用的问题。将出现本体、远方挡位不一致的情况,若控制中心按监控机主接线图显示将挡位调整为一致时,将出现两台主变压器挡位实

际不一致,造成两台主变压器内部环流的严重问题。

3.2 电流环带负载的限制

电流环监测挡位是在较小负载的情况下,满足恒流输出。当负载超过一定量时,就不能准确反映挡位。如某某变电站在低挡位时,能正确显示挡位,当超过 13 档时开始出现输出不稳定,15 档后完全饱和,即当主变压器挡位调至 15~19 档时,监控机全部显示为 15 档的缺陷。经检查主变压器配套用的挡位测控装置带上监控装置和 VQC 两个负载后,输出电压仅 8 V,由于监控机上内阻为 500 Ω ,VQC 装置内阻为 250~500 Ω ,通过 4~20 mA 电流后产生接近 4~20 V 的压降,当把 VQC 装置取消后,监控机上就能正确显示挡位。根据这种现象,将监控机与 VQC 装置分别接入不同通道,分别降低了所带负载,同时实现了监控机测档和 VQC 的远方监控。

4 挡位远方监测的技术改造

目前变压器挡位远方监测的主要方式中一对一全遥信方式、电阻分压方式、电流环方式和 BCD 码传输方式都各有优缺点。一对一全遥信方式有时会产生在 17 档制和 19 档制之间的转换矛盾。电阻分压监测方式中由于变压器在调档时,若触头压紧不牢固,会有电弧发生,将串接在辅助刷形开关上高精密度电阻烧坏,影响挡位的监测。电流环方式存在带负载能力不

够强。BCD 码传输是用电信号传递,而不是用模拟量传递,没有误差,是纯摇信方式,具有抗干扰能力强、误码率低、施工方便等优点,综合比较是最佳选择。

改造方法:分解开关的分解位置信号由分解开关电动机构通过 19 芯航空插座输入到 BMQ-Y19YB2 挡位编码器内,经过隔离送 CPU 中央控制器编码,输出一一对应无源接点和 2 组 BCD 码无源接点。BCD 码传输到主控室内,监控系统和 VQC 装置上的摇信开入回路,按照 BCD 编码规则进行还原计算即可算出变压器实际挡位。无论是 17 档还是 19 档的变压器,与监控系统接口都仅需要一根 6 芯的电缆,占用 5 个摇信资源。现通过采用 BMQ-Y19YB2 挡位编码器以成功将 110 kV 三河站、110 kV 金江站、110 kV 金堂站等站挡位远方监测方式改为 BCQ 码输出方式。

参考文献

- [1] 有载分接开关的应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [2] 刘伟,汤雨海主编. 变电站综合自动化实用技术问答 [M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [3] 变电站综合自动化实用技术 1000 问 [M]. 北京:中国电力出版社, 2008.

作者简介:

刘祖惠 (1965), 女, 工程师, 从事电测计量、热工计量。

(收稿日期: 2010-09-28)

(上接第 29 页)

种技术措施,如:分散接入系统;选择相对稳定的风力资源建设风电厂;通过与气象部门的合作,准确预测风力发电功率;配套建设调峰调频电源,合理安排机组备用容量进行峰谷调节;积极进行谐波治理,采用动态电压补偿和控制等技术,加快建设高电压等级联络线 (750 kV 电网),实现与外部电网的联系 (与西北电网联网),扩大电网规模和电网的综合调节能力,就能真正充分利用清洁能源,实现风力、水电和火电等资源的优化配置。大大推进利用可再生能源的规模,为实现节能减排、保障能源安全、实现能源工业的可持续发展发挥重要作用。

参考文献

- [1] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
- [2] 耿华,杨耕,崔扬,等. 并网型风力发电系统的现状与发

展 [J]. 东方电气评论, 2006, 20(2): 1-7.

- [3] 计崔. 大型风力发电场并网接入运行问题综述 [J]. 上海电力. 2008, 21(1): 59-63.
- [4] 靳静,艾芊. 我国风电场建设及运行现状评估与发展前景研究 [J]. 华东电力. 2007, 35(8): 44-49.
- [5] 岑海堂,薛正福. 大型风电机组发展现状与关键技术 [J]. 科技创新导报. 2008(24): 78-79, 81.
- [6] 陈树勇. 大型并网风力发电场规划方法研究 [D]. 电力部电力科学研究院, 1998.
- [7] 田华,朱莉. 三门峡黄河风电场一期工程并网方案研究 [J]. 电网技术. 2009, 33(4): 98-103.

作者简介:

张新伟 (1986), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统调度运行和控制;

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 主要研究方向为现代电力系统分析与控制, 电力系统调度运行及电力系统稳定。

(收稿日期: 2010-07-15)

智能变电站光纤通信链路检测方法探讨

贾 维

(四川电力送变电建设公司, 四川 成都 610051)

摘 要:针对电力系统智能变电站大量采用光纤进行数据通信的现状,分析了智能变电站光纤通信链路的特点和测试需求。并对光纤工程施工和检测过程中需要进行的测试项目,提出和归纳了一些解决方案。

关键词:智能变电站;光纤通信;测试方法;光时域反射仪(OTDR)

Abstract: Aiming at the current situation that a mass of intelligent substations adopt optical fiber for data communication in power system, the characteristics and testing demands of optical fiber communication link in intelligent substation are analyzed. Furthermore, the solutions are put forward and concluded for the necessary testing items during the construction and detection of optical fiber project.

Key words: intelligent substation; optical fiber communication; testing method; optical time domain reflectometer (OTDR)

中图分类号: TM733 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0074-03

0 概 述

现阶段在中国的电网建设过程中,智能变电站已经成为一个建设的重点。智能变电站技术充分体现了一次设备智能化和二次设备网络化的设计理念。一次设备智能化主要体现在光电互感器和智能断路器的应用,二次设备网络化主要体现在 IEC 61850 标准的实施。智能变电站系统一般按过程层、间隔层、站控层三层结构设计,解决了 TA 饱和问题、二次电缆问题、数据采集设备重复投资问题、二次智能设备互操作问题等,不仅实现了最大范围内的信息共享,同时大大降低了整个变电站的造价。

1 智能变电站通信链路的特点

由于智能变电站的一次和二次设备间、二次设备相互之间均采用计算机通信技术,一条信道可传输多个通道的信息,因此智能变电站的二次接线得到了大幅度简化。智能变电站的信号传输均用计算机通信技术实现。通信系统在传输有效信息的同时传输信息校验码和通道自检信息,一方面杜绝误传信号,另一方面在通信系统故障时可及时告警。这些数字信号基本上都采用绝缘的光纤来连接和传输,电磁干扰和传输过电压没有影响到二次设备的途径,而且也没

有二次回路两点接地的可能性。由于取消了 TV、TA 的 100 V/5 A 回路,屏柜间除了通信线外只需要装置电源连线,彻底避免交直流系统误碰的可能,从根本上解决抗干扰问题。

2 智能变电站通信链路的测试需求

智能变电站的二次设备和一次设备大量使用了光纤作为通信介质,光纤链路成为了采样、控制、告警及计量等二次设备的唯一数据来源通道,特别是在采样通道部分,基本上不可能实现链路冗余配置,因此如何保障光纤链路通道的通信质量和可靠性就成为了一个比较重要的问题。

现阶段电力系统的光纤通讯测试和管理方法更多的是偏重于基建项目完成后的日常定期检测和维护,如果在初期的光缆敷设和检测工作出现问题,则后期的检修工作会面临故障点难以定位、消缺工作牵涉面繁杂、故障易重复出现等困难,因此应当在首次的光纤施工过程中就加强测试工作,以保障光纤链路通道的通信质量和可靠性。针对智能变电站光纤链路的特点,在光纤施工过程中应该分阶段对光纤进行长度、线序、衰耗、端面污秽等项目的测试。

3 智能变电站通信链路的测试方法

根据光缆施工的特点和工序,应将智能变电站光

缆测试分为以下几个时间阶段:①单盘光缆测试:目的在于检测工厂产品出厂后运输到现场的质量;②施工布放后的测试:为检查布放过程有无损伤,并作为接续前的检查;③接续中的测试是:为了检查接头是否达到低损耗;④接续后组成单元光缆段的测试:目的在于检查是否达到设计对传输总衰减和总基带响应要求,作为连接光端设备的准备(有关光纤的几何特性、机械特性和环境性能的检测暂不讨论)。

目前智能变电站的保护、测控系统所使用的光纤类型主要是 $62.5/125\ \mu\text{m}$ 、 $850\ \text{nm}$ 的多模光纤,线路差动保护及远动系统用 $8/125\ \mu\text{m}$ 、 $1310\ \text{nm}$ 的单模光纤。针对这两种光纤应该进行下列的测试。

3.1 光缆长度测试

测试设备为光纤时域测试仪 (OTDR)。光缆长度的获得可以参看图 1 图 2 的衰减—距离关系曲线。将光标置于试样前端反射脉冲上升边缘的一点,确定 Z_0 (如试样前无光纤或光缆段,则 Z_0 为零;如试样前有已知长度为 Z_0 的光纤或光缆段,则 Z_0 为 Z_0)。如果由于不连续性极小而不宜确定 Z_2 和 Z_0 的位置,就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位;对于 Z_2 的定位,如有可能,试切割试样远端,使那里产生反射。试样长度为: $Z_2 - Z_0$ 。

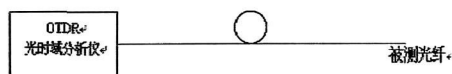


图 1 光缆长度测试接线

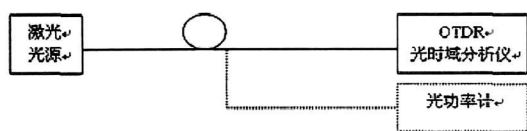


图 2 OTDR 曲线 (长度测定)

3.2 光缆线序测试

测试设备为激光光源、光功率计或光纤时域测试仪。光缆线序测试主要是为了建立光缆的配缆表和光芯的配芯表,便于以后查线和故障定位。测试接线图如图 3。

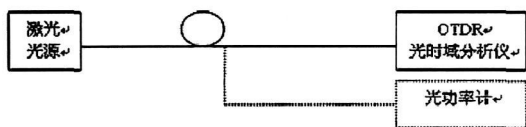


图 3 光缆线序测试接线

3.3 光缆衰减测试

测试设备为激光光源、光功率计或光纤时域测试

仪。该项测试是光纤工程中最重要测试内容,它直接反映了光纤链路的通道质量,应该给予足够的重视。

光信号沿光纤传输时,光功率的损失即为光纤的衰减,衰减 A 以分贝 (dB) 为单位。

$$A = 10 \lg(P_1 / P_2) \quad (\text{dB})$$

P_1 和 P_2 分别是注入端和输出端的光功率。

目前对光纤衰减的测试一般有 3 种方法,即剪断法、介入损耗法和后向散射法。

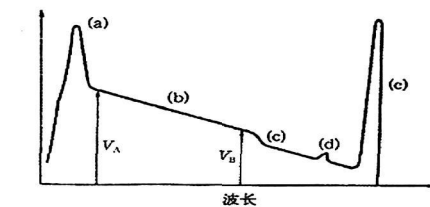
剪断法:精度高但有破坏性,且不可能获得整个光纤长度上的衰减信息,在变化的条件下很难测出光纤衰减变化;

介入损耗法:非破坏性,精度不如剪断法,也不可能获得整个光纤长度上的衰减信息,但有可能在环境条件 (温度和受力) 变化时连续测量光纤衰减变化;

后向散射法:精度不如剪断法,用光时域反射仪 (OTDR) 测量,功能全、精度高和无破坏性,可以获得整个光纤长度上的衰减信息及故障点检查和定位,在变化的条件下可以测出光纤衰减变化;测量数据可直接打印出来。

3.3.1 用 OTDR 测量光纤衰减

用 OTDR 测试只需在光纤的一端进行,接线图如图 1 所示,图 4 为后向散射功率的典型曲线。用这种仪器不仅可以测量光纤的衰减系数,还能提供沿光纤长度衰减特性的详细情况,检测光纤的物理缺陷或断裂点的位置,测定接头的衰减和位置,以及被测光纤的长度,并可以把测绘的曲线打印出来用于分析和存档。



说明:
(a) 由纤维输入端的耦合器件产生的反射;
(b) 恒定斜率的区域;
(c) 段的衰减为 $A(A) = 1/2 (V_A - V_B)$ dB;
(d) 由局部缺陷、接头或模合引起的不连续性;
(e) 由电介质缺陷引起的反射;
(f) 在纤维末端的反射。

图 4 光时域反射仪的接线图

现场光纤接续可由 OTDR 监视进行,熔接机在熔接完一根芯后都会给出熔接点的估算衰耗值,其估算一般都是本地纤芯直观监测,即通过观察纤芯对接前后几何形状改变的程度来估算衰耗值。接续工作是否完好,由 OTDR 监视者测量后通知接续工作者。这种方法的优点:一是 OTDR 固定不动,省略了仪表转

移所需的车辆和人力物力;二是测试点选在有市电而不需配发电机的地方;三是测试点固定,可减少光缆开剥。

3.3.2 OTDR 测量参数的选择

(1)选择适当量程:OTDR 有不同的量程,操作者可以结合测试的光缆长度选择比较恰当的量程,使测试曲线尽量显示在屏幕中间,这样读数才能准确,误差才会小。

(2)选择适当脉冲宽度:OTDR 可以选择注入被测光纤的光脉冲宽度参数,在幅度相同的情况下,宽脉冲的能量要大于窄脉冲的能量,能够测试较长距离,但误差较大。因此,操作者可以结合待测光纤的长度选择适当的脉冲宽度,使其在保证精度的前提下,能够测试尽可能长的距离。

(3)选择适当的折射率:由于不同厂家光纤选用的材质不同,造成光在光纤中传输速度不同,即不同的光纤有不同的折射率,因此在测试时应选择适当的折射率,这样在测量光纤长度时才能准确。

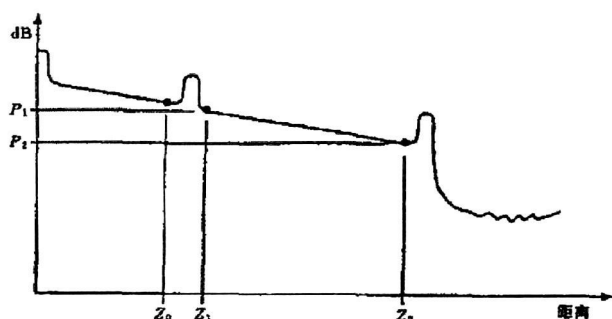


图 5 OTDR 曲线 (衰减测定)

(4)损耗和衰减参数的测定:在图 5 中将光标置于试样首端反射脉冲上升边缘的一点,确定 Z_0 (如试样前无光纤或光缆段,则 Z_0 为零);将光标置于试样曲线线性段始端 (紧挨近端),确定 Z_1 、 P_1 ;将同一光标或另一光标置于试样末端反射脉冲上升边缘的一点,确定 Z_2 、 P_2 。如果由于不连续性极小而不易确定 Z_0 和 Z_2 的位置,就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位;对于 Z_2 的定位,如有可能,试切割试样远端,使那里产生反射。

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减: $A = (P_1 - P_2) \text{ dB}$

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减系数: $\alpha = (P_1 - P_2) / (Z_2 - Z_1) \text{ dB/km}$

光纤或光缆段的单向后向散射衰减: $A_{\text{总}} = \alpha (Z_2 - Z_1) \text{ dB}$

通常,OTDR 能直接给出 A 值和 α 值。衰减测试应进行双向测量,将双向测量获得的数据取平均值得到精确的衰减和衰减系数;如光纤两端均匀性好,亦可进行单向测量。

3.3.3 光缆接头损耗单向测试法

该测试法适用于光纤熔接接头和机械式接头。测试设备为 OTDR 光纤时域测试仪。此种方法就是在接续方向的始端放置一台 OTDR,对所有接头点进行单向测试。接线如图 6 所示。

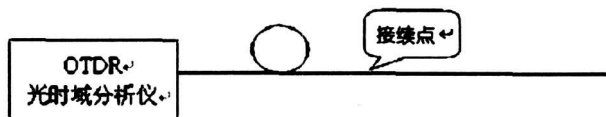


图 6 头单向测试接线图

当中继段长度较短,光缆接头不多,对接头衰减要求不很精确时,可以用光时域反射仪从一端监视,指挥接续者调整接续器达到相对最佳值即可正式接续,从图 4 观察到图内 (c) 点的波形出现小的“台阶”,衰减的大小可以由“台阶”的大小估计。

这种方法精度不如比较法,但比较简便,只要一点监视两点配合,适宜于中继段衰减余量较大的光缆段施工,可增快进度。

3.3.4 光缆接头损耗双向环测法

该测试法适用于光纤熔接接头和机械式接头。测试设备为 OTDR 光纤时域测试仪。此种方法就是在接续方向的始端将两根光纤分别短接,组成回路,OTDR 在接续开始点的前一点对所有接头点进行双向测试。由于增加了环回点,所以能在 OTDR 上测出接续损耗的双向值,这种方法的优点是能准确评估接头的好坏。测试示意图如图 7。

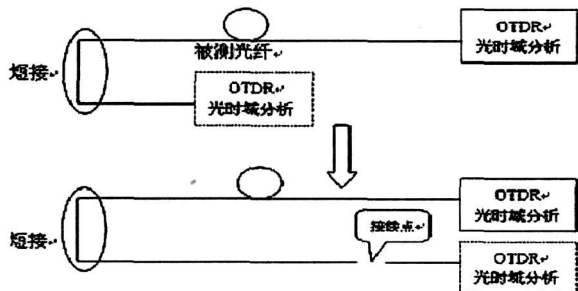


图 7 接头双向环测接线及步骤

由于测试原理和光纤结构上的原因,用 OTDR 单向监测会出现虚假增益的现象,相应地也会出现虚假大损耗的现象,对于一个接头来说,用两个方向衰减值的数学平均数才能准确反映其真实的损耗值。竣

(下转第 91 页)

气隙越小,额定励磁电流下磁极铁心的磁化强度越强,保持磁场的能力越强,衰减就越慢(磁极的剩磁衰减曲线如图 5 所示)。对于同一台发电机而言,停机过程中的剩磁远远大于开机时的剩磁。灭磁过程中,发电机定子磁场是励磁电流产生的磁场和剩磁的总和。因此,剩磁的偏差导致各支路间电势差的进一步增大,横差电流也会进一步增大。

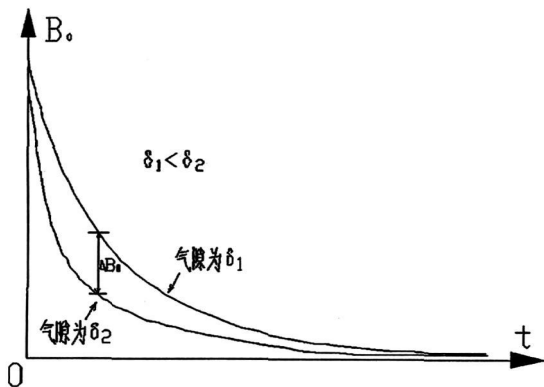


图 5 发电机剩磁的衰减曲线

在灭磁过程中,各磁极的剩磁偏差远远大于启动时的剩磁偏差,导致灭磁过程中的横差电流远远大于启动过程中的横差电流。通常,灭磁时间比启动时间长。因此,在灭磁过程中,气隙偏差导致横差保护动作可能性最大。

通过上面的分析,推导出的横差电流的特征,与机组故障录波录制的横差电流波形的特征完全一致。由此可以断定,正是由于空气间隙偏差过大导致了此次横差保护动作。为了进行验证,根据发电机的绕组

结构,引入空气间隙的参数,进行了仿真计算,绘出了在空载运行时横差电流的波形。由于计算过程中忽略了发电机剩磁、转子偏心、机组振动等影响,其波形与现场录制的波形有一定的差异,但其大致形状、周期都与实际的电流波形相符。

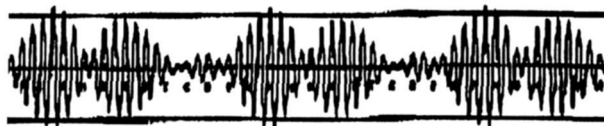


图 6 仿真计算出的横差电流波形

4 结 语

通过以上分析可以看出,发电机空气间隙偏差过大,是导致发电机横差保护动作的又一重要原因。横差保护动作后,应根据机组故障录波装置采集的数据,进行综合分析,找出故障的原因,从而采取相应的对策。要使发电机空气间隙绝对均匀是不可能的,大修中应尽可能地降低空气间隙的偏差。运行中应根据实际情况,适当增大发电机横差保护的定值。

参考文献

- [1] 刘学军. 继电保护原理 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [2] 许实章. 电机学 [M]. 武汉:机械工业出版社, 1986.
- [3] 杨宪章. 电磁场原理 [M]. 武汉:高等教育出版社, 1985.

(收稿日期: 2010-08-16)

(上接第 76 页)

工后用光源和光功率计对全程进行双向测试,其衰耗值必须符合设计要求。并用 OTDR 双向进行检查后向散射曲线是否符合要求。

3.4 端面污秽及破损测试

测试设备为 OTDR 光纤时域测试仪、200/400 倍视频探头或 200 倍光学放大镜。

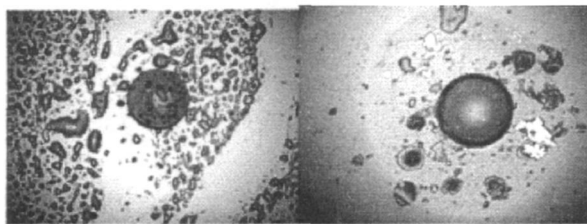


图 8 光纤端面污秽放大图像

放大光纤端接面的目的是识别质量不佳的连接。由于 85% 以上的光缆故障都是由于光缆端接面的污

染造成的,因此使用端面放大系统就可以方便地查看光缆端接面的这些污染状,为光缆定义通过 (PASS) 或失败 (FAIL) 的级别,并附加注释。图 8 为光纤端面污秽放大图像。可以根据一种尺寸来确定光缆类型和保存图象,用于生成认证测试报告和其他文档备案。

4 小 结

基于光纤通信的测试还有许多项目,例如中心波长、色散、收发功率等测试,由于施工现场条件和进度所限不一定都能进行测试,只是在出现异常和故障时才有针对性地做测试。同时,光纤通讯技术的发展也促进了测试技术的日新月异进步,不断地学习和应用新的测试手段就成为了工程技术人员的重要使命。

(收稿日期: 2010-09-13)

300 MW 循环流化床锅炉耐火材料施工及维护

袁 杰¹, 张文清²

(1 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072;

2 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641005)

摘 要: 主要介绍四川白马循环流化床示范电站工程 300 MW 循环流化床锅炉耐火材料使用情况, 包括耐火材料的选择、主要施工工艺、养护、运行及维护情况等。

关键词: 耐火材料; 循环流化床锅炉; 旋风分离器; 回料器; 外置床

Abstract: The usage of refractory materials of 300 MW circulating fluidized bed (CFB) boiler in Sichuan Baima 300MW CFB Demonstration Plant is mainly introduced including the selection of refractory material the main installation technology the operation and the maintenance of refractory material etc

Key words: refractory material circulating fluidized bed boiler cyclone separator loop seal external bed

中图分类号: TK226 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0077-04

四川白马循环流化床示范电站工程是根据国务院批准的《中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展纲要》大力发展洁净煤燃烧技术的要求, 采用技贸合作方式, 在引进大型循环流化床锅炉设计制造技术和系统设计技术的同时, 引进一台 300 MW 常压循环流化床 (以下简称 CFB) 锅炉建设的大型 CFB 洁净煤发电示范工程, 建设规模为 1×300 MW。锅炉为引进法国 ALSTOM 公司设计制造、目前世界上最大的 1 025 t/h 燃煤常压 CFB 锅炉, 配套东方汽轮机厂、东方电机厂生产的 300 MW 汽轮发电机组。工程于 2003 年 5 月正式开工, 2005 年 12 月 30 日首次并网发电, 2006 年 4 月 17 日通过 168 h 满负荷试运后正式投入商业运行, 同年 7 月 24 日按照中法双方签订的《锅炉设备供货合同》完成 336 h 满负荷运行考核。

1 耐火材料的设计选型

由于大型 CFB 锅炉采用在较低燃烧温度下循环燃烧的独特燃烧组织方式, 使其具有燃烧效率高、燃煤适应性广、调峰幅度大、脱硫效率高等很多优点, 也由于这种循环燃烧方式有大量的循环物料 (主要为辅助床料、煤、灰及脱硫用石灰石等的混合物) 在炉膛、旋风分离器、回料器、外置床及各种灰道中不断循环, 这些部位将承受高速度、高浓度不断循环的高温灰流的冲刷和磨损, 因此为保证大型循环流化床锅炉

长期、安全、稳定运行, 在以上部位均设计覆盖有一定厚度的耐火材料。耐火材料运行的好坏直接关系到锅炉运行的好坏, 一旦耐火材料在运行中出现大面积损坏、脱落, 将导致锅炉被迫停运, 所以耐火材料对循环流化床锅炉来讲是至关重要的关键部件之一。

为降低工程造价, 同时又能保证 CFB 锅炉的安全运行, 耐火材料的设计和选型是至关重要的。白马 300 MW 循环流化床锅炉耐火材料由 ALSTOM 公司设计选型并供货。由于四川白马示范工程进口 300 MW CFB 锅炉是目前世界上容量最大的燃煤常压 CFB 锅炉, 其结构复杂, 耐火材料的设计相对也复杂, 使用种类繁多。整个锅炉使用的耐火材料接近 5 000 t 涉及耐火、保温材料的种类较多, 总计 20 多种材料, 每种材料又有多种规格。耐火浇注料、耐火砖主要由辽宁奥美耐火材料有限公司、四川青龙耐火材料有限公司及河北天达耐火材料有限公司供货, 仅少量特殊区域使用的耐火砖和耐火材料从欧洲进口。耐火材料主要安装在锅炉磨损严重的区域, 如旋风分离器、回料器、外置床、底灰冷却器、炉膛以及相关的进出口烟道、灰道等部位。各个部位设计使用的耐火材料主要结构如下。

(1) 旋风分离器

旋风分离器锥段、直段耐火材料设计采用 3 层结构, 第一层为轻质保温砖; 第二层为绝热耐火砖; 第三层根据运行工况分别采用一般重质耐火砖或特种耐

火砖,厚度 350~400 mm;旋风分离器顶部采用耐火喷涂料,厚度 350 mm,见图 1。

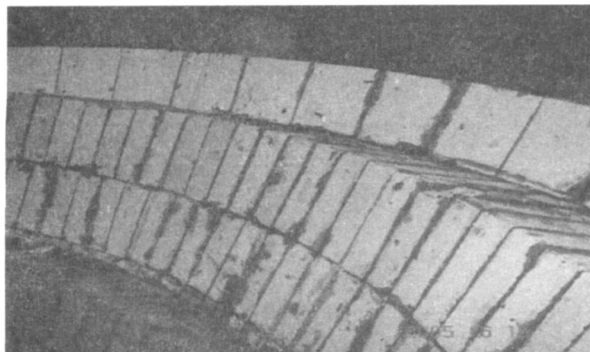


图 1 旋风分离器耐火材料结构

(2) 回料器

回料器耐火材料设计采用 3 层结构,第一层为绝热耐火砖;第二层为超轻质浇注料;第三层为熔硅基质低水泥浇注料,厚度 430 mm。

(3) 炉膛

炉膛耐火材料设计采用 1 层结构,为重质耐火浇注料,厚度约 100 mm,见图 2。



图 2 炉膛耐火材料结构

(4) 外置床

外置床耐火材料设计采用 2 层结构,第一层为绝热耐火砖;第二层为熔硅基质低水泥浇注料,厚度 300~380 mm,见图 3。



图 3 外置床耐火材料结构

(5) 底灰冷却器

底灰冷却器耐火材料设计采用 2 层结构,第一层为绝热耐火砖;第二层根据使用部位分别采用喷涂料或熔硅基质低水泥浇注料,厚度 200~415 mm;目前底灰冷却器已经换型为青岛松灵环保有限公司生产的滚筒式冷渣器。

2 耐火材料的主要施工工艺

大型 CFB 锅炉耐火材料的施工工艺对质量影响很大,其施工主要注意以下几点。

(1)施工前耐火材料的储存。耐火材料应储存在干燥和通风良好的环境中,注意监测环境温度和湿度。耐火浇注料的有效期一般为 6 个月,使用前应进行检查,看是否超过保质期及是否有受潮结块现象,检查合格后方可使用。

(2)耐火材料安装开始之前,钢板内表面必须清理干净。

(3)焊接不锈钢抓丁前,安装抓丁的钢板必须将油漆、铁锈打磨掉,抓丁两侧进行对称焊接,确保焊接后焊缝不出现裂纹,然后按照规定采用一定重量的榔头逐个敲击检查。见图 4。

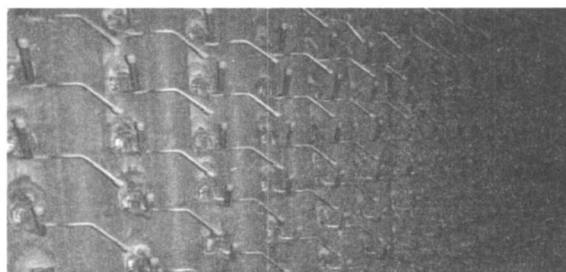


图 4 完成焊接后的不锈钢抓丁

(4)检查所有抓丁端头是否都带有塑料套,如果没有则自抓丁端头起,至少应刷上 12 mm 长的防腐沥青,确保运行中不锈钢抓丁和耐火材料的自由膨胀。

(5)耐火材料浇注时必须使用满足要求的水,最好为可饮用水,对水的 pH 值、硫酸根、磷酸根及氯离子等的含量均应进行化验,检查是否满足使用要求。

(6)施工现场温度对耐火材料的浇注有很大的影响,浇注过程中必须随时检查记录水温、耐火材料温度,最理想的施工温度为 15~25℃。如果在冬天进行施工,当温度低于 10℃时,最好不要进行施工,如果必须施工,应进行加热。反之如果在夏天进行施工,当温度高于 40℃,最好不要进行施工,如果必须施工,应采取加冰块进行降温,确保耐火材料浇注后的使用性能。

(7)必须使用强力强制搅拌机进行耐火材料浇注前的搅拌,搅拌机叶片与机壳之间的间隙最好控制在 2 mm。连续施工时,每次搅拌,都必须将机器内余料清除干净,搅拌不同的材料前要认真清理搅拌机。

搅拌方法:将要搅拌的全部浇注料倒入搅拌机,开机进行干搅拌,预混合 1 min 然后按照耐火材料生产厂家要求的加水量,先加入 $2/3$ 的水,待浇注料混合层颜色一致后加入其余水,混合 6 min 即可。在搅拌过程中,反复用“手球法”检查加水量是否合适。

(8)浇注时应注意:①混合好的浇注料在 20~30 min 内要浇注完毕;②浇注时要尽量避免浇注料分层;③填满所有空隙,特别是抓丁附近和角落处,并消除所有气泡;④应连续浇注不得中断,采用振动棒进行振动浇注。

(9)浇注前应检查是否按照图纸要求设置好了工作缝和膨胀缝,模板是否按照要求大小进行架设,固定是否牢固。

(10)耐火材料浇注时应同时按照浇注区域进行取样,制作试样块。

(11)耐火材料浇注完成的质量验收:浇注完成后一般 24 h 后可以拆除模板,拆模后首先检查耐火材料表面是否平整、是否存在超标气孔、与相邻耐火材料块厚度是否一致等,然后采用一定重量的榔头敲击检查内部是否存在空洞,不满足质量要求的必须打掉重新浇注。

3 耐火材料的养护

锅炉耐火材料施工完成,模板拆除后,首先采用自然通风养护。但是由于耐火材料内部含有大量的水分,必须通过阶段加热升温、恒温烘烤,除去耐火材料衬层中的外在和内在水分,并使其形成陶瓷性粘结,达到锅炉正常运行要求的物理、机械性能。

目前大型 CFB 锅炉耐火材料的养护一般委托专业的烘炉公司采用数台烘炉机进行烘烤。耐火材料养护一般分为中低温和中高温养护两个阶段,严格按照耐火材料供应商和锅炉制造厂提供的耐火材料养护曲线进行。白马 300 MW 循环流化床锅炉耐火材料养护低、中温烘炉温升曲线见图 5。

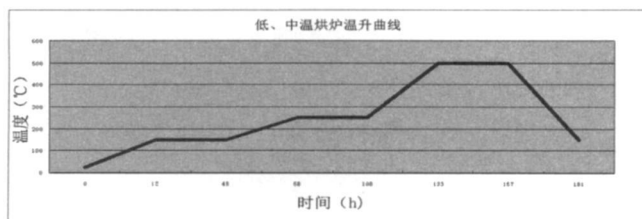


图 5 低、中温烘炉温升曲线

4 耐火材料的运行

为保证耐火材料的使用寿命,确保锅炉安全运行,在运行中主要应注意以下几点:①运行中严格按照耐火材料生产厂家及锅炉制造厂提供的升、降温幅度限制进行,特别在锅炉冷态启动过程中,在 600℃ 以内的升温速度控制尤其重要;②注意防止运行中床温频繁的大幅波动;③锅炉承压部件泄漏对耐火材料影响较大,运行中应尽量减少承压部件的泄漏次数。

5 耐火材料的维护

在循环流化床锅炉正常运行中,随着负荷的变化、温度的升降,耐火材料也随之不断地膨胀和收缩,加之高速、高温的循环灰的不断冲刷,耐火材料表面会出现较多的裂纹,膨胀缝内由于灰的进入也会导致耐火材料膨胀受阻边缘出现脱落等,因此为保证循环流化床锅炉的长期、安全运行,一旦有停炉机会时应耐火材料进行全面的检查和维护。

(1)对耐火材料区域全面清除积灰,搭设牢固的脚手架。

(2)检查耐火材料的裂纹、脱落和磨损情况,同时采用榔头进行敲击检查,对磨损超标、裂纹超标、脱落严重、内部出现空洞起层的耐火材料进行更换,更换方法同安装工艺一样。

(3)检查各膨胀缝内硅酸铝纤维毡的填充情况,对已经脱落和变形严重的重新进行填充,填充完成后可以采用耐火胶泥在膨胀缝表面涂一层。

6 实际使用效果

四川白马 300 MW CFB 锅炉耐火材料在设计、施工、养护、运行及维护方面均严格按照上述方法进行全过程控制,严把质量关,经过这一年多的实际运行来看,锅炉各部位耐火材料完好,无脱落,充分说明上述方法对大型循环流化床锅炉耐火材料的选型、施工、运行、维护是完全可行的。图 6~8 为运行一年后的耐火材料图片。

总之,大型 CFB 锅炉耐火材料是否能够很好的使用取决于多方面因素,必须坚持对耐火材料质量全过程控制的原则,精心设计,并严格按照设计要求选

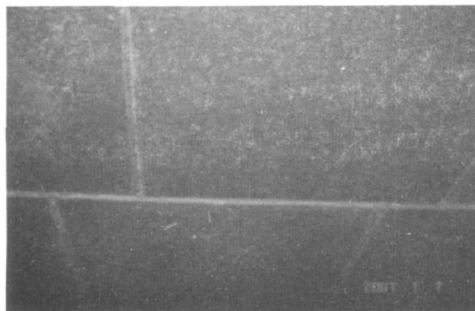


图 6 运行一年后炉膛上部耐火材料

择生产质量好的耐火材料厂家的产品,严格按照耐火材料的施工工艺及生产厂家的技术要求进行施工、浇注,严格按照耐火材料的生产厂家提供的养护曲线完成耐火材料的养护,在锅炉正常启动、停炉及负荷变化过程中,严格按照耐火材料的生产厂家提供的升温、降温速度控制锅炉的升温、降温速度,只有从设计

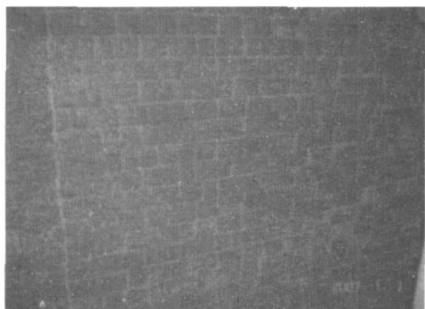


图 7 运行一年后分离器入口耐火材料

(上接第 35 页)

数据备份与恢复、基础参数设置、接口管理等子功能模块。其中基础参数设置模块负责设置采集参数类型、采集点、采集周期、统计指标等,接口管理为外部系统提供开放的数据接口,便于功能扩展。

5 结论和展望

电力系统无功潮流分布是否合理,不仅关系到电力系统向电力用户提供电能质量的优劣,而且还直接影响电网自身运行的安全性和经济性,这在与用户直接相关的配电网中显得尤为重要。由于电网容量的增加,对电网无功要求也与日俱增,若无功电源容量不足,系统运行电压将难以保证。此外,网络的功率因数和电压的降低将使电气设备得不到充分利用,降低了网络传输能力,并引起损耗增加。

进行配电网的区域无功优化研究,合理选择无功补偿点以及补偿容量,通过新的技术手段和科学的计算方法,在全网范围内实现全局无功补偿,对当前的

到使用全过程进行了有效的质量控制,大型 CFB 锅炉耐火材料的寿命和性能才能得到保证,也才能保证 CFB 锅炉的正常运行。

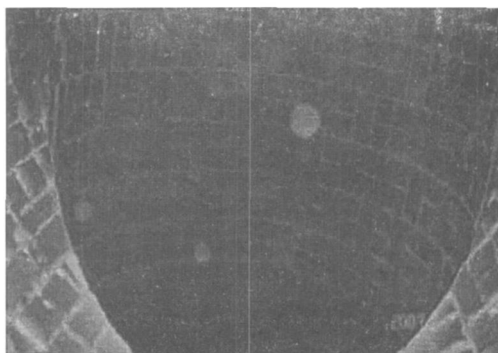


图 8 运行一年后回料器耐火材料

参考文献

[1] 法国阿尔斯通提供的循环流化床锅炉运行与维护手册 [Z]

作者简介:

袁 杰 (1968), 男, 四川宜宾人, 工程师, 四川省电力工业调整试验所四川通能电力科技有限公司开发部副经理, 从事循环流化床机组的调试、测试和新技术研发等工作。

张文清 (1969), 男, 四川成都人, 工学学士, 高级工程师, 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司生技部主任, 从事 300 MW 循环流化床机组技术管理工作。

(收稿日期: 2010-09-13)

电网企业具有重要的现实意义:一是能够有效地维持系统的电压水平,增强系统的电压稳定性,提升电网企业的服务水平;二是解决好配电网无功补偿的问题,有效避免大量无功的远距离传输,降低线损,增加售电量,提高电网企业的经营效益。

参考文献

[1] 许苑, 王科. 电力系统无功优化综述 [J]. 机电信息, 2010(18): 153-154.

[2] 王淳, 程浩忠, 陈恳. 配电网动态无功补偿的整体优化算法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 109-114.

[3] 杨丽徙, 丁荣刚, 王西训. 工业企业配电网无功电源的两阶段优化规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 32-36.

[4] 李忠诚. 地区电网电压无功优化运行控制系统的应用研究 [D]. 硕士学位论文, 山东大学, 2007.

[5] 孙宏斌. 电力系统全局无功优化控制的研究 [D]. 博士学位论文, 北京:清华大学, 1996.

[6] 兰强, 方勇杰, 鲍颜红, 等. 基于 EEAC 的考虑暂态安全稳定约束的最优潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2010, 4, 34(8): 34-38.

(收稿日期: 2010-10-20)

进口亚临界锅炉高温再热器长时过热原因与对策探讨

彭卫红
(巴蜀江油发电厂,四川 江油 621709)

摘 要:进口亚临界锅炉高温再热器在运行过程中因长时过热多次造成泄漏,影响机组的安全稳定运行。经过从烟气侧、蒸汽侧、锅炉高温再热器本体、运行检修维护等多方面查找原因进行分析和研究,制定措施。通过改善煤质、提高空气预热器效率、改变高温再热器材质、改进燃烧器摆角机构结构、调整炉膛负压设计值、治理炉膛吹灰器、加强检修运行管理等,进行了系统的综合治理应用,提高了锅炉高温再热器的安全性,保证了机组的安全经济运行。

关键词:进口亚临界锅炉;高温再热器;长时过热;原因与对策

Abstract: Through the analysis and research, the measures are proposed that is to improve the quality of coal and the efficiency of air preheater, change the material of high-temperature reheater, perfect the structure of burner tilt, adjust the design value of furnace draft, improve the soot blower of furnace, enhance the management of maintenance and operation etc, which will guarantee the safe and economic operation of the unit.

Key words: imported subcritical boiler; high-temperature reheater; long-time reheating; cause and countermeasure

中图分类号: TK227 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0081-02

四川巴蜀江油发电厂 2×330 MW 机组配套的 1 004 t/h 锅炉系法国斯坦因工业公司制造的亚临界参数、强制循环、四角切圆、固态排渣、π 型布置的煤粉炉。两台锅炉分别于 1990 年和 1991 年投产,随着运行时间的增长,特别是 2005—2007 年,高温再热器管频繁泄漏。经过对爆口形状、金相实验、理化实验、运行数据等综合分析,每次的泄漏原因均为长时过热。再热器管泄漏严重影响了机组的安全、经济运行。

1 锅炉高温再热器长时过热原因分析

高温再热器发生长时过热,通过对运行数据、锅炉设计、燃烧系统、汽水系统等的综合分析,造成高温再热器管长时过热的原因如下。

1) 锅炉实际燃煤长期偏离设计煤种和煤粉细度超标。锅炉设计煤种为 60% 的渭北煤与 40% 的广旺煤(重量比)构成的混煤,其成分分析如表 1。

在实际运行过程中,锅炉实际燃煤主要为广旺煤。进入 2000 年以来,因广旺煤质量下降,热值低(13 000~14 000 kJ/kg,最低甚至不足 12 000 kJ/kg),挥发份低,灰分高(50% 左右,最高达 60%)。为保证机组出力,单位时间锅炉燃料消耗量增加,高温再热器区域烟温升高。因一台锅炉配两套制粉系统

(国产 300 MW 等级机组一般配四套),设计裕度小。随着煤质的变差,单位时间锅炉燃料消耗量的增加,迫使制粉系统超出力运行,煤粉细度变粗,着火、燃烧、燃烬推迟,高温再热器区域烟温升高。

2) 空气预热器的堵塞和漏风,使换热性能下降,一、二次热风温度下降。容克式空气预热器因换热元件腐蚀、积灰堵塞,使换热面积减小,风量不足。送粉的一次风温度从设计的 330℃ 降至 270℃,助燃的二次风温从设计的 312℃ 降为 260℃,一、二次热风温

表 1 混煤成分分析

项目符号单位	数 据		
	设计煤种	渭北煤	广旺煤
收到基碳 Car /%	51.9	60.4	39.4
收到基氢 Har /%	2.9	3.2	2.3
收到基氧 Oar /%	3	2.6	3.7
收到基氮 Nar /%	1	0.8	1.4
收到基硫 Sar /%	1.8	2.6	0.5
收到基水份 War /%	7	6.5	7.8
收到基灰份 Aar /%	32.4	23.8	44.9
收到基挥发份 Var /%	13.4	14.7	11.6
高位发热量 Qgr,ar /kJ/kg	20 352	23 713	15 316
低位发热量 Qnet,ar /kJ/kg	19 542	22 835	14 605
哈氏可磨性系数 HGI	>80	>80	>80
灰的变形温度 DT /℃	1 260	1 320	1 160
熔融软化温度 ST /℃	1 544	1 540	1 475
特性溶化温度 FT /℃	1 560	1 544	1 480

度下降且风量不足造成着火热减少,燃烧、燃烬推迟。这也是高温再热器区域烟温升高的原因之一。

3)设计选材对温度的裕度较小。经检查,高温再热器长时过热泄漏全部位于高温再热器中下部, TU10CD9-10 管段上,金相分析表明珠光体球化达 4~5 级。而同标高的 Z10CDNbV9-2 未出现类似状况。高温再热器位于炉膛出口,设计选材根据温度环境采用了多种材质,在高温区采用高温性能较好的 Z10CDNbV9-2、TU10CD9-10 高合金材质、在高温再热器穿顶棚及以上至联箱的管段采用 TU15CD205 的低合金材质,设计合理。但由于煤质变差、燃烧推后等原因,高温再热器区域烟气温度高于设计值,特别是高温再热器管屏中下部,辐射、对流换热增加较多,管壁温度易超过 TU10CD9-10 容许的温度上限 (Z10CD9-10 设计允许温度 $\leq 540^{\circ}\text{C}$),使其长时过热失效。而 Z10CDNbV9-2 高温组织稳定性相对 Z10CD9-10 较高,未出现失效现象。

4)锅炉燃烧器无法正常摆动,再热汽温调节困难。高温再热器位于炉膛出口,设计上锅炉燃烧器可上下摆动 30° ,以调节再热汽温。由于摆动机构设计不合理,转动部件卡涩、卡死,造成摆动机构无法正常运行,启停炉或煤质变化时无法及时调整而使高温再热器区域烟温超温。

5)锅炉炉膛高度的设计加剧了高温再热器管的过热。锅炉设计选用的容积热负荷较高,锅炉炉膛偏低。从水冷壁下联箱到顶棚管高差只有 49.7 m,炉膛内燃烧停留时间短。高温再热器区域烟气流速经测试达 10.8 m/s,热交换强。煤质的恶化加剧了高温再热器区域烟温的升高和热交换的增加。

6)炉膛辐射受热面吸热的减少,是高温再热器区域温度升高的原因之一。为保证炉膛内水冷壁吸热,在锅炉标高 27 m 和 32 m 设计了两层共 24 只吹灰器。每 8 h 自动吹扫一次,因吹灰器运行中的检查不及时和检修维护质量不高,吹灰器故障较高,吹灰不正常或无法投运,最高时有 8 台不能正常工作。造成水冷壁吸热量减少,低温再热器、高温再热器烟气温度增高。

7)低温再热器减温水量不足。正常运行时喷水减温设计流量为 0 t/h,但由于上述原因,减温水阀即使全开,也仅能勉强控制再热汽温在允许范围。加上减温水调节阀故障,实际阀开度与远方显示不一致,远方显示全开,阀门实际开度仅 50%,减温水量长期

不足,31 号锅炉高温再热器入口温度高于设计值 415°C (平均高 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$)。

8)高温再热器进出口管设置壁温监测,温度远传进入 DCS 但因测温元件损坏、虚焊、线路断裂等原因,温度显示不正常,不能给运行调节提供及时准确的数据。

9)炉内空气动力场紊乱,因配风不当,各层燃烧器切圆有不同程度偏斜,假想切圆偏大。火焰中心偏斜,火焰中心上抬。

10)运行控制和参数调整不当。特别是升停炉时偏离规定启停曲线,热负荷变化过大,使管壁承受附加温度应力和超温过热。

2 防止锅炉高温再热器长时过热对策

通过分析,找出了高温再热器运行中长时间超温的原因,针对原因采取对策。

1)加强燃煤管理,使锅炉实际燃用煤种接近设计煤种。①针对煤质是过热器过热的主因,引进甘肃、青海、内蒙等地的优质燃煤。同时加强入厂煤管理,严格控制劣质煤以次充好。②认真落实煤场管理,根据来煤热值分类定置堆放,根据锅炉燃烧及时调整取煤。③加强配煤工作,通过筒仓、翻车机、煤场堆取料机、地下皮带等多种方式对火车煤、汽车煤、煤场煤进行有效地配煤,保证入炉煤稳定。④建立入炉煤供应和锅炉燃烧控制的有效双向沟通机制,燃料运行人员预先将上煤信息提供给锅炉运行人员以提前做好准备,调节锅炉燃烧。锅炉运行人员根据燃烧情况及时通知燃料运行人员调整上煤。

2)对空气预热器进行综合治理。①投巨资将空气预热器受热面换热元件换新,已使用近十年的换热元件,腐蚀、积灰严重,换热能力严重不足,通过更换,提高了换热效率,一、二次风温提高到 300°C 以上,为着火和燃烧提供了良好的条件。②治理漏风,进一步改进和完善了豪顿华公司密封系统,对一次风扇形板结构、材质,径向、周向密封等进行了技术改造,把漏风率降低到 8% 以下。

3)在高温再热器工况最恶劣的部位采用高温组织稳定性相对较高的材质,“好钢用在刀刃上”,提高其可靠性。利用大修全部更换高温再热器中下部过热管段,材质由 TU10CD9-10 改变为 Z10CDNbV9-2 规格不变。

(下转第 85 页)

电超速保护为两套并联的以测速发电机为测速元件的超速保护系统。在改造中,将测速发电机改为三个磁阻传感器转速信号进行三取中运算,因而超速保护只有一套,为响应原电力部颁发标准 DL/T 590—1996 中对汽轮机保护系统的要求以及“汽轮机应有两种独立的、不同原理的超速保护装置”的要求,在 31 号机增加了一套 Bently 3500 电涡流测速传感器的超速保护系统。

2) 手动打闸按钮串接在保护的出口继电器上

原 GSE 系统中,手动打闸按钮信号送至 GSE 中,经继电器逻辑运算后,再出口到保安电磁阀 GSEUY517/518 上。改造后,为提高手动打闸按钮的绝对可靠性,将手动打闸按钮串接在 ETS 的出口继电器上,直接断开保安电磁阀 GSEUY517/518 电源。

3) 保安电磁阀 GSEUY517/518 采用失电动作,即使厂用电中断,也可确保汽轮发电机组处于安全方式。

4) 所有跳闸信号的传输均采用硬接线,可以有效地避免因通讯故障所造成的不安全因素。

5) 为保证系统对转速信号的快速反应,DEH 系统用了一对冗余的 BRC300 处理器来进行转速信号

的处理,而且该对处理器只处理转速信号。经运行中实测,该处理器负荷率极低,保证了对转速信号的快速响应。

3 结束语

巴蜀江油电厂 31 号机组汽轮机电液调节系统 DEH 改造,机组改造工作量大、难度大,改造后,于 2009 年 11 月 18 日机组一次启动并网发电,使控制系统达到技术指标的要求,为机组安全稳定运行提供了重要保证。DEH 这次改造不只是控制系统,而且还有汽轮机本体主汽门、调门伺服阀和 EH 油站,特别把 ETS 纳入 DCS 中,采用同一硬件平台,要求更高,改造之所以取得成功,主要是设计周密、完善,施工组织有条不紊,领导高度重视,相关工作人员兢兢业业、一丝不苟。以上关于巴蜀江油发电厂 31 号机组 ALSTOM 控制系统的 DEH 改造的介绍,希望对将要进行 DEH 系统改造或将使用 Symphony 系统的人员有所帮助。

(收稿日期:2010—08—16)

(上接第 82 页)

4) 改进燃烧器摆动机构结构,保证再热汽温的正常调节。对上下共 8 组摆动机构全部进行改造,将钢轴承改为石墨轴承、高温专用油润滑改为石墨自润滑,高温单道密封改为多道密封,加装轴向定位环等。通过改造,燃烧器摆动机构投运正常。

5) 适当降低炉膛负压水平,经阿尔斯通设计部门确认,将炉膛负压从 150 Pa 降为 120 Pa 以弥补炉体高度不足,延长炉内燃烧时间。同时为防止改变负压水平对炉膛可能造成过大的正压冲击,将锅炉 MFT 动作后引风机挡板自动关闭后再开启延迟时间由 20 s 减少为 15 s。

6) 加强吹灰器的检修管理;改进了提升阀结构;利用大小修时间,对所有炉膛吹灰器吹扫角度进行了调整,保证吹扫效果;调整备品储备;做好质量过程监督,提高检修质量。加强吹灰器的运行管理;明确运行巡检时间、检查项目、责任人等,对故障吹灰器加强巡检力度,确保吹灰器的正常投运。

7) 利用小修的机会对低温再热器减温水调节阀进行了更换,并通过试验确保减温水调节性能曲线达到设计值。

8) 利用大修,对高温再热器进出口管壁测温元件进行全面的检查,对损坏、虚焊、线路断裂等进行了处理,并试验合格。保证提供的数据全面、准确、及时。

9) 注重大修后的冷态空气动力场试验,保证炉内燃烧的可靠性、经济性。针对运行中一次风管节流圈等部件磨损后一次风管系统总阻力会发生变化,在每次小修后也做一次一次风调整试验,保证炉内最佳空气动力场。

10) 加强运行升停炉控制,严格按照规定启停曲线,减小热负荷变化,避免管壁承受附加温度应力和超温过热。

3 实施效果

1) 高温再热器管壁温度从普遍 535~570℃,最高 572℃ 降至 530℃ 以下,彻底消除了再热器管金属超限运行情况。

2) 喷水减温水从最高的 50 t/h 下降至 10 t/h 在锅炉正常运行时降低接近 0 t/h 基本达到设计值,机组经济性得到提高。

经过综合治理,进口亚临界机组 1 004 t/h 锅炉高温再热器的运行安全性得到了显著提高,2×330 MW 机组从 2008 年至今未发生一次因高温再热器泄漏造成的非计划停运,每年的金属专项检测数据显示正常。在避免亚临界锅炉承压部件泄漏、经济运行方面取得了明显效果。

(收稿日期:2010—09—15)

ABB—SYMPHONY 系统在 DEH 改造中的应用

王 梅

(四川巴蜀江油电厂, 四川 江油 621701)

摘 要: 目前国内越来越多的电厂都在进行或即将进行自动控制系统的改造, 而且自动控制系统的改造方案和技术也越来越成熟。针对巴蜀江油电厂 330 MW 机组 DEH (ALSTOM 公司产品) 的结构和特点、改造实施以及 ABB Bailey 公司的 DCS 系统 Symphony 在巴蜀江油电厂 DEH 控制系统改造中的实际应用, 进行技术交流, 进一步了解进口机组控制系统的改造经验。

关键词: 330 MW 机组; ALSTOM; DEH 系统改造; EH

Abstract: Currently, more and more power plants are conducting or will conduct the transformation of automatic control system, and both the transformation scheme and technique for automatic control system are getting mature. It focuses on the configuration, the characteristics and the transformation implementation of digital electro-hydraulic (DEH) system (produced by ALSTOM) of 330 MW unit in Bashu Jiangyou Power Plant, as well as the practical application of distributed control system (DCS)—Symphony from ABB Bailey Company in the process of the transformation of DEH automatic control system in Bashu Jiangyou Power Plant. The purpose is for technical exchange and is going to get better transformation experiences of control system of the imported units.

Key words: 330 MW units; ALSTOM; digital electro-hydraulic (DEH) system transformation; EH

中图分类号: TK325 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0083-03

1 ALSTOM 控制系统 DEH 结构 and 特点

巴蜀江油电厂 330 MW 机组及其控制系统是 ALSTOM 公司 20 世纪 80 年代初期产品, 其中汽轮机控制系统 MICROREC 是由 DEM 公司配套提供。它是一个完全独立的系统, 与 CENTRALOG T20 没有任何联系, 其软件的可维护性差, 基本不能对其作任何修改甚至具体程序参数的阅读。它有自己的较高级和基本级, 但是在基本级故障的情况下, 无论较高级处于何种状态机组依然会跳闸。机组自 20 世纪 90 年代初投运以来, 运行 10 余年, 卡件逐渐老化, 故障率日趋增高, 且备品备件得不到充足的保障, 在 1999 年, ALSTOM 就明确提出其很多卡件的生产线已经停产或即将停产, 因此, 机组控制系统性能不稳定, 严重威胁机组的安全运行, 存在一定的隐患。

2 Symphony 系统在 DEH 改造中的应用

四川巴蜀江油发电厂 31 号机组 T2A-330-30

—2F1044 型汽轮机为法国阿尔斯通公司生产的亚临界、三缸、双排汽中间再热、凝汽式机组, 其原配调节保安系统为 MICROREC 电子调节保安系统。此次针对 DEH 改造的主要包括两个部分: 液压部分改成由东汽自控公司提供的液压系统, 改造后的系统为电液控制系统, 电气部分由原来的 MICROREC 系统改为 ABB—SYMPHONY 系统, 同时 ETS 也由 DCS 来实现。DEH 采集机组转速、功率等信号, 并进行比较、鉴别、计算, 按启动、运行要求控制高、中压油动机的开度, 使机组转速、功率等满足要求。

2.1 DEH 系统基本硬件配置

巴蜀江油发电厂 31 号机汽轮机电液调节系统 DEH 由电气和液压两部分组成, 其中液压部分改成由东汽自控公司提供的液压系统, 改造后的系统为电液控制系统, 电气部分改为 ABB—SYMPHONY 系统, 核心部件是 FCS01 汽轮机转速控制专用子模件和液压伺服控制模件 HSS03。

液压伺服模件 HSS03 接受 BRC-300 桥控制器来的指令, 控制伺服阀 (或电液转换器) 去驱动油动机, 通过调整伺服阀的电流, 它能够改变油动机的位

置,完成汽轮机的阀位控制,一个线性的差动变压器 LVDT提供了一个油动机的位置反馈至 HSS03模块。

HSS03模块在汽轮机转速控制系统中,位置给定值通过 I/O扩展总线至 HSS03模块,微处理器读该给定值,而后进入 D/A转换器进行转换,最终由模拟值驱动伺服阀,伺服阀将控制油动机的液动流体,当油动机向开或关方向移动时,实现对汽门开度的控制,就改变了汽轮机的转速。

2.2 DEH系统的软件结构

作为对 BRC³⁰⁰组态工具,工程师站为一台挂在 Cnet环路中的通用 PC机,其操作系统为 Windows XP 系统,应用程序为 Camposer^{5.0}软件包。它用于完成控制逻辑的组态、编译、校验、下装以及诊断等功能。

2.3 DEH系统的液压系统 EH

EH 高压抗燃油系统 (液压) , 由四川东方电气自动控制工程有限公司提供两套与之匹配的汽轮机 EH 液压伺服系统。 EH 液压控制系统主要由供油系统 (EH 油站、再生装置、抗燃油)、执行机构 (高主油动机、高调油动机、中主油动机、中调油动机)、危急遮断系统 (危急保安装置、隔膜阀、手动打闸阀)、EH 油压低试验模块及油管路系统 (油管路、高压蓄能器) 组成。

2.3.1 EH系统工作原理

开调门或加负荷: DEH 给定一开调门或加负荷指令,经运算比较后输出一正偏值电流 ΔX 并作用在伺服阀上,伺服阀动作,从而驱动油动机动作并往上开启调门。此调门位移经油动机 LVDT 反馈回 DEH 进行比较运算,直至其偏值电流 ΔX 为零后,调门便停止移动,并停留在一个新的工作位置上。关调门或减负荷:作用过程与上相反。图 1 为原理框图。



图 1 电液调节原理框图

2.3.2 EH系统执行机构

执行机构是 EH 系统中的重要部件,它直接控制着汽轮机蒸汽阀门的关闭及其阀门的开度。该系统共有 10 个执行机构: 2 个高主油动机、4 个高调油动机、2 个中主油动机、2 个中调油动机。

2.3.3 危急遮断系统

危急遮断系统由危急保安装置和隔膜阀组成。当汽轮机出现故障需要停机时,危急遮断系统动作并

泄掉危急保安油 (AST) 和超速保护控制油 (OPC), 关闭全部汽轮机蒸汽阀门, 使汽轮机停机, 以保护汽轮机安全。原理图见图 2。

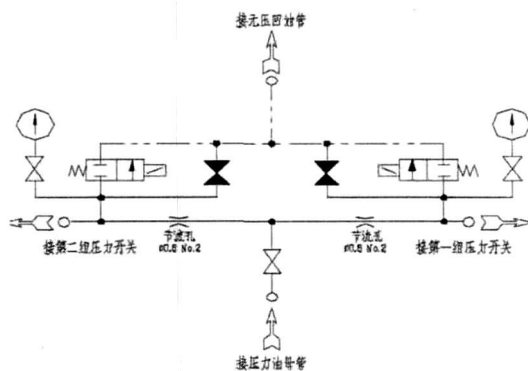


图 2 EH 油压低试验模块原理图

2.3.4 EH油压低试验模块

EH 油压低试验模块主要用于在线试验压力开关,以检测压力开关的状态并提高其可靠性。它主要由油路块、压力开关箱及支架组成,配置有节流孔、四只压力开关、两只压力表、两只二位二通电磁阀及三只截止阀。

正常运行时,通到压力开关的油压为系统压力(14.5 MPa),压力开关接点闭合(整定值为9.5 MPa)。给一侧的电磁阀带电或手动打开截止阀,则经过节流孔进入到该侧压力开关的压力油泄掉,压力开关接点断开并对外发信。由于两侧压力开关同时动作才会发出停机信号,因此,试验不会造成汽轮机遮断。

2.4 DEH系统的安全性

2.4.1 系统采用的安全措施

Symphony系统是一个采用多种安全和冗余措施的分布式控制系统,它能保证系统在异常状况下逐渐降级。除 Symphony系统的冗余措施外,对处理器还采取以下几种措施来提高系统的可靠性:①处理器具有特殊的故障保护方式,即可设置并选择处理器在故障时的输出位置。这样在出现故障时,模件输出保持在最终值或所设定的全开或全关等状态,从而保证控制系统可预期的降级。②当有控制模件出现故障,操作人员在处理时,过程控制可通过一个独立的旁路单元,对输出和过程变量进行完整的显示和控制。通过这些措施,并加上系统采用的冗余配置,使 Symphony系统成为一个具有极高可用率的自动化控制系统。

2.4.2 提高 ETS 系统安全性而采取的措施

1)增加了一套电超速保护 (Bently超速保护)

由于 ALSTOM 汽轮机未设计机械超速保护, 而

电超速保护为两套并联的以测速发电机为测速元件的超速保护系统。在改造中,将测速发电机改为三个磁阻传感器转速信号进行三取中运算,因而超速保护只有一套,为响应原电力部颁发标准 DL/T 590—1996 中对汽轮机保护系统的要求以及“汽轮机应有两种独立的、不同原理的超速保护装置”的要求,在 31 号机增加了一套 Bently 3500 电涡流测速传感器的超速保护系统。

2) 手动打闸按钮串接在保护的出口继电器上

原 GSE 系统中,手动打闸按钮信号送至 GSE 中,经继电器逻辑运算后,再出口到保安电磁阀 GSEUY517/518 上。改造后,为提高手动打闸按钮的绝对可靠性,将手动打闸按钮串接在 ETS 的出口继电器上,直接断开保安电磁阀 GSEUY517/518 电源。

3) 保安电磁阀 GSEUY517/518 采用失电动作,即使厂用电中断,也可确保汽轮发电机组处于安全方式。

4) 所有跳闸信号的传输均采用硬接线,可以有效地避免因通讯故障所造成的不安全因素。

5) 为保证系统对转速信号的快速反应,DEH 系统用了一对冗余的 BRC300 处理器来进行转速信号

的处理,而且该对处理器只处理转速信号。经运行中实测,该处理器负荷率极低,保证了对转速信号的快速响应。

3 结束语

巴蜀江油电厂 31 号机组汽轮机电液调节系统 DEH 改造,机组改造工作量大、难度大,改造后,于 2009 年 11 月 18 日机组一次启动并网发电,使控制系统达到技术指标的要求,为机组安全稳定运行提供了重要保证。DEH 这次改造不只是控制系统,而且还有汽轮机本体主汽门、调门伺服阀和 EH 油站,特别把 ETS 纳入 DCS 中,采用同一硬件平台,要求更高,改造之所以取得成功,主要是设计周密、完善,施工组织有条不紊,领导高度重视,相关工作人员兢兢业业、一丝不苟。以上关于巴蜀江油发电厂 31 号机组 ALSTOM 控制系统的 DEH 改造的介绍,希望对将要进行 DEH 系统改造或将使用 Symphony 系统的人员有所帮助。

(收稿日期:2010—08—16)

(上接第 82 页)

4) 改进燃烧器摆动机构结构,保证再热汽温的正常调节。对上下共 8 组摆动机构全部进行改造,将钢轴承改为石墨轴承、高温专用油润滑改为石墨自润滑,高温单道密封改为多道密封,加装轴向定位环等。通过改造,燃烧器摆动机构投运正常。

5) 适当降低炉膛负压水平,经阿尔斯通设计部门确认,将炉膛负压从 150 Pa 降为 120 Pa 以弥补炉体高度不足,延长炉内燃烧时间。同时为防止改变负压水平对炉膛可能造成过大的正压冲击,将锅炉 MFT 动作后引风机挡板自动关闭后再开启延迟时间由 20 s 减少为 15 s。

6) 加强吹灰器的检修管理;改进了提升阀结构;利用大小修时间,对所有炉膛吹灰器吹扫角度进行了调整,保证吹扫效果;调整备品储备;做好质量过程监督,提高检修质量。加强吹灰器的运行管理;明确运行巡检时间、检查项目、责任人等,对故障吹灰器加强巡检力度,确保吹灰器的正常投运。

7) 利用小修的机会对低温再热器减温水调节阀进行了更换,并通过试验确保减温水调节性能曲线达到设计值。

8) 利用大修,对高温再热器进出口管壁测温元件进行全面的检查,对损坏、虚焊、线路断裂等进行了处理,并试验合格。保证提供的数据全面、准确、及时。

9) 注重大修后的冷态空气动力场试验,保证炉内燃烧的可靠性、经济性。针对运行中一次风管节流圈等部件磨损后一次风管系统总阻力会发生变化,在每次小修后也做一次一次风调整试验,保证炉内最佳空气动力场。

10) 加强运行升停炉控制,严格按照规定启停曲线,减小热负荷变化,避免管壁承受附加温度应力和超温过热。

3 实施效果

1) 高温再热器管壁温度从普遍 535~570℃,最高 572℃ 降至 530℃ 以下,彻底消除了再热器管金属超限运行情况。

2) 喷水减温水从最高的 50 t/h 下降至 10 t/h 在锅炉正常运行时降低接近 0 t/h 基本达到设计值,机组经济性得到提高。

经过综合治理,进口亚临界机组 1 004 t/h 锅炉高温再热器的运行安全性得到了显著提高,2×330 MW 机组从 2008 年至今未发生一次因高温再热器泄漏造成的非计划停运,每年的金属专项检测数据显示正常。在避免亚临界锅炉承压部件泄漏、经济运行方面取得了明显效果。

(收稿日期:2010—09—15)

300 MW 机组高压电动机差动保护误动分析

杜振海, 雷光利

(四川白马循环流化床示范电站, 四川 内江 641005)

摘 要: 针对高压电动机差动保护误动的原因进行分析、测试, 找出原因并提出解决办法。

关键词: 高压电动机; 差动保护; 误动分析测试

Abstract: The reasons are analyzed and tested which cause the malfunction of differential protection of high-voltage motor. After the cause is found, the method which can deal with this problem is proposed.

Key words: high-voltage motor; differential protection; malfunction analysis and testing

中图分类号: TM581 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0086-02

对于大型火力发电机组, 原则上 2 500 kW 以上的高压电动机须配备电动机差动保护, 因其高压电动机的跳闸均会引起锅炉的连锁保护动作, 导致机组故障停机, 后果相当严重。因此须仔细检查, 防止高压电机差动误动作。在某火力发电厂 300 MW 机组的试运期间, 就曾出现在电动机启动时, 其差动保护误动作的情况。下面以引风机为例进行分析。

某 300 MW 机组的引风机由一台异步高压电动机拖动, 电动机的主要参数为 6 kV、2 500 kW, 功率因数为 0.85, 其差动保护配置电流互感器 1H_A、1H_C、4LH_A、4LH_C均为 LZZBJ9-10A2 型, 动稳定电流 18 75 kA, 准确级为 0.5 级, 额定电流比为 400/5, 差动保护定值为: 差动速断 36 A, 比率差动 0.2, 中性点到高压配电室的电缆长约 237 m。

1 存在的问题及测试分析

1.1 电流互感器的特性误差分析

根据差动保护的原理, 差动保护比较的是进入差动继电器的电流差值, 而差动保护所采集的电流是由电动机首尾两端的电流互感器提供, 当没有故障或区外故障的时候, 电流相抵, 没有差流, 差动保护不动作, 而电机内部故障的时候, 电流相加, 达到差流定值, 差动保护动作出口。因此当首尾两端的电流互感器特性相差太大的时候, 虽然电动机没有故障, 也会导致电流有误差而引起差动保护误动作。因此在保证电流互感器的极性没有接错的情况下, 首先判定首尾两端的电流互感器的特性有无相差太大。电流互感器的电流误差和一次电流倍数有关, 也和二次负载

的大小有关。由于现场条件有限, 测量方法一般采用在二次测得电流互感器二次负载及伏安特性, 并以此计算出电流互感器的电流数值误差。现取 1H 和 4LH 分别作伏安特性测试, 结果分别见表 1、表 2。

表 1 1H 的伏安特性测试值

电 流 / A		0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1
电 压 / V							
A相	2S ₁ 2S ₂	49	66	73	76	83	86
C相	2S ₁ 2S ₂	63	85	91	94	99	102

表 2 4LH 的伏安特性测试值

电 流 / A		0.05	0.1	0.15	0.2	0.35	0.5	1
电 压 / V								
A相	2S ₁ 2S ₂	35.1	53.1	62.9	72.5	80.4	82.6	90.9
C相	2S ₁ 2S ₂	46.5	78.4	89.6	92.3	96.8	98.8	101.8

可见这两组电流互感器的特性基本一致, 其电动机启动时不会因电流互感器特性差异而出现差流, 差动保护不会误动作。

1.2 电流互感器二次负载特性分析

经过进一步分析、测试电流互感器的二次负载, 发现引风机 6 kV 母线侧为柜内线, 电缆长约 2 m, 而中性点在电机安装处, 电缆较长约 237 m。LZZBT9-10A2 型的电流互感器的额定二次负荷在 0.85 时只有 0.6 Ω, 超出这个范围就会不准确。电流互感器的二次线圈所接的负载有仪表、继电器的线圈绕组、导线绕组等阻抗, 实测发现电阻约 2 Ω, 10% 误差时只允许 4 倍电流, 而电动机启动时电流有 7 倍, 因此误差已经超过定值。

另外 6 kV 配电室到电机安装处的电缆长约 237 m, 选用的电缆为 2.5 mm² 的铜芯线, 则可得

$$R_1 = 2 \times PL/S = 2 \times 0.0175 \times 237 / 2.5 = 3.31 \Omega$$

而 6 kV 配电室的电流互感器到保护装置的距离很短,只有 2 m 左右,则

$$R_2 = 2 \times PL/S = 2 \times 0.0175 \times 2/2.5 = 0.028 \Omega$$
$$R_1/R_2 = 118.21$$

则 R_1 的值比 R_2 的值大了约 118 倍。当电动机的额定电流为 295 A,起动电流为额定电流的 7 倍,则二次瞬时电流可达 $295 \times 7/80 = 25.8$ A,而串入保护装置的回路阻抗相差太大,流进保护装置的电流差值也相差太大。因此启动时差流越限导致差动保护误动作出口跳闸。为了解决这个问题,并结合现场的实际条件进行改造,首先要将首尾两端的二次线的阻抗保持基本平衡,因此将中性点到高压配电室的电缆改为横截面为 6 mm^2 的电缆,并将在高压配电室的电流互感器公共接地端改在现场电机安装处接地,使两端阻抗基本相等;其次,将差动回路的二次负载减少,以保证电流互感器的带负载能力,则经过改造,让差动回路使用专用电流互感器,再次启动,差动保护出口跳闸,故障未消除。

1.3 谐波误动作分析

经过进一步分析,在保证回路的二次阻抗以及电流互感器的伏安特性后,为什么差动保护仍然还要出口。在排除电动机故障后,经过多方查找资料,认真分析,结合发电机差动保护原理,一般发电机差动保护有比例制动和谐波制动的功能,而在高压电机保护装置中,只有比例制动,而没有谐波制动这一个定值整定,这会不会是保护装置对谐波干扰无法制动,而导致谐波干扰误动作呢?经过进一步的查找资料,得知在高压电机启动时电流很大,此时电流波形不是一个标准的正弦波,而是含有许多高次谐波分量,而其中主要是二次谐波。而这个二次谐波的大小以及周期不是一个固定的值,和电机的制造工艺、线圈材质都有关系。因此要将示波器接入装置的电流回路,进行监视电流波形,以确定谐波分量的大小以及周期。

当启动电机,从示波器果然显示在电机启动初始阶段的电流波形不再是一个标准的正弦波,而是含有许多的高次谐波,其中主要是二次谐波分量,且维持有 6 个周期后才逐渐减弱。据此在保护装置上将差动保护出口延时了 0.5 s 以躲过启动时的二次谐波分量。再次启动,启动成功,差动保护没有再误动。根据这一个思路,联系保护厂家将保护装置升级,引入谐波制动功能,使用至今,运行正常,差动保护没有再出口。

2 结 论

由于引风机中性点电缆较长,芯截面积小,使二次回路阻抗较大,超过电流互感器的 10% 误差要求,此时电流互感器已深度饱和。在电机启动瞬间引起差动保护回路严重不平衡,差流增加。且高压电机启动时电流中的谐波分量太大,导致不平衡分量增加,这些都是差动保护误动作的主要原因。通过测试计算,增大二次电缆截面积,改变接地点,使保护装置的差动保护具有谐波制动功能,差动保护没有再出现误动现象。综上所述,继电保护工作要细心、谨慎,合理分析才能消除隐患,保证机组安全、稳定的运行。

参考文献

- [1] 苏文博,李鹏博,张高峰.继电保护事故处理技术与分析[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 朱志宏.继电保护[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 王翔.发电机及电气分册[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 熊为群,陶然.继电保护自动装置及二次回路[M].北京:中国电力出版社,1999.

作者简介:

杜振海,男,四川白马循环流化床示范电站电热班副班长;

雷光利,女,四川白马循环流化床示范电站电热班专责工。
(收稿日期:2010-06-13)

· 简讯 ·

向上特高压工程显著推动川电外送,跨区域优化配置资源优势突出

世界上输送容量最大、送电距离最远、技术水平最先进、电压等级最高的向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电示范工程已安全稳定运行 100 d 并在今年电网迎峰度夏和在更大范围内优化配置能源资源发挥了显著作用。

今年夏季,华东地区经历持续时间较长的罕见高温,上海地区气温 35 摄氏度及以上高温天数累计达 30 d,世博会迎来暑期客流高峰,电网保障任务重大。同时,我国大部分地区不同程度遭遇洪涝灾害,多省灾情严重,长江等主要水系来水较往年增多。西起四川宜宾、东至上海奉贤的向上特高压直流输电工程,将华中地区清洁水电送入华东地区,为保障上海平安度过用电高峰提供了有力支撑。

发电机空气间隙对横差电流的影响

程德蓉¹, 刘启俊²

(1 成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:通常, 发电机定子绕组或转子绕组匝间短路是导致横差保护动作的主要原因。但是, 如果机组检修后, 定、转子间的空气间隙偏差过大, 也会使横差电流超过设定值, 导致横差保护动作。根据以往的案例, 着重分析了在发电机启励、空载、灭磁过程中空气间隙对定子横差电流的影响。

关键词:空气间隙; 剩磁; 横差保护

Abstract: Usually, the motion of generator transverse differential protection is mainly caused by the turn-to-turn fault on the stator windings or on the rotor windings. But after the repair, if the difference among all air gaps between the stator and the rotor is too large, it also can make the transverse differential current exceed the setting value which will cause the motion of transverse differential protection. Based on a case, the impacts of air gap on the transverse differential current of stator in the course of generator startup, no-load operation and excitation suppression are analyzed.

Key words: air gap; remanence; transverse differential protection

中图分类号: TM772 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0088-04

大型发电机各相绕组一般由多个分支 Y 接而成。在运行中, 同一分支或同相不同分支有可能发生匝间短路。发生匝间短路时, 短路环中的电流可能很大, 故障处的温度急剧升高, 损坏发电机定子绝缘。如不及时处理, 很可能发展成定子绕组单相接地或相间短路。为了防止定子绕组发生匝间短路时造成巨大的破坏, 发电机配备了横差保护。发电机横差保护动作后, 应根据横差电流的波形和发电机运行工况, 找到横差保护动作的原因, 提出相应的改进措施。

2008 年 5 月, 某电厂 2 号机组大修完毕, 进行开机试验。在停机灭磁过程中, 发电机横差保护动作。通过对电气设备的检查, 确认定子绕组和磁极无故障后, 重新开机试验。在灭磁过程中, 发电机横差保护再次动作。通过分析机组故障录波装置监录的定子横差电流发现:

(1) 在启动过程中, 横差电流先逐渐增大, 在某一时刻到达最大值, 然后又逐渐减小。横差电流有固定的频率。

(2) 在空载运行中, 2 号机组的横差电流比其他机组偏大, 但未超过横差保护的设定值。横差电流有固定的频率。

(3) 在停机灭磁过程中, 横差电流先逐渐增大, 在某一时刻到达最大值, 然后又逐渐减小。在一段时间内, 横差电流超过了横差保护的设定值。横差电流的频率逐渐变低。

在发电机启动、空载、灭磁过程中, 由故障录波器录制的横差电流波形如图 1、图 2、图 3 所示。图中同时录制了两相的横差电流曲线。

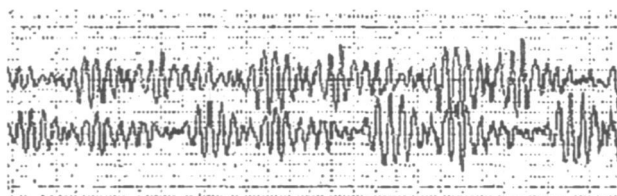


图 1 启动过程中横差电流波形图

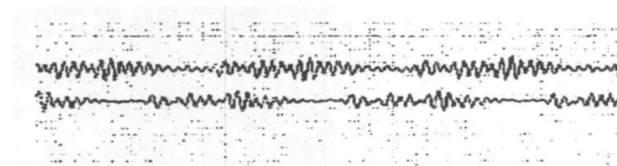


图 2 空载运行时横差电流的波形图

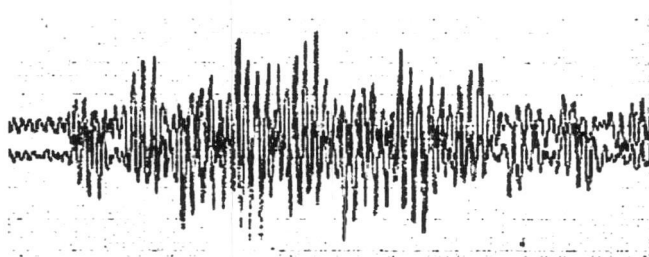


图 3 发电机停机灭磁过程中的横差电流波形

通常, 发电机定子绕组匝间短路和转子绕组匝间短路是导致横差保护动作的主要原因。但是, 如果机

组检修后,定、转子间的空气间隙偏差过大,也会使横差电流超过设定值,导致横差保护动作。下面对引起横差保护动作的三种可能进行分析,找出本次横差保护动作的真正原因。

1 定子绕组发生匝间短路

某电厂发电机单机容量为 550 MW。发电机定子绕组为双层叠绕组,每相绕组有 6 个支路,呈 Y 接线。在一个线槽内的两根线棒之间有 4 mm 的温度传感器 (RTD)或中心填料,每根线棒的两侧有内应力降低层、云母低塑运输填料和环氧粘胶层 (用于短路保护)。同槽的两根线棒在七层绝缘材料的保护下,发生短路的可能性很小。由于两根线棒间绝缘的厚度远远大于线棒与定子铁心间绝缘的厚度,如果某根线棒绝缘损坏,通常会造成单相接地,很难发展成为匝间短路。

如果定子绕组发生匝间短路,在短路环中就会有很大环流产生,形成很大的横差电流,导致横差保护动作。此时,横差电流波形应是突然剧增,没有周期性,且电流幅值应很大。由于定子线棒的绝缘击穿后是不能自动恢复的,在启励过程中,在很低的电压下,横差保护应会再次动作。

然而,这些特征并没有出现。当电压达到额定电压时,横差保护没有动作。在空载运行中,横差电流最小。并且,横差电流有恒定的频率。这些现象都与定子绕组发生匝间短路的现象不一致。可以判断,定子绕组没有发生匝间短路。电气试验结果也证明了这一点。

2 转子磁极发生匝间短路

发电机运行过程中,转子磁极中通过励磁电流,产生稳定磁场。发电机大轴带动转子旋转,定子绕组与转子磁场之间发生相对位移,定子线棒切割磁力线,产生交流电势。在旋转的过程中,如果某一个磁极发生匝间短路,该磁极的磁场强度会显著降低,导致该磁极所对应的定子线棒感应电势显著降低。由这些线棒组成的支路上的电势就会低于其他支路上的电势。由于支路电势不平衡,就会在各支路形成的闭合回路中产生横差电流,严重时就会导致横差保护动作。

如果励磁绕组发生匝间短路,横差电流应具有一

定的周期性。励磁电流越大,支路之间的电势差越大,横差电流就越大。断开励磁开关后,横差电流应逐渐减小。励磁绕组发生匝间短路后,由于电磁力矩不平衡,发电机组的各导轴承的振动会明显加大。另外,磁极发生匝间短路后,其交流阻抗会大大降低,通过电气试验,测试各个磁极的交流阻抗,就可以查找到短路故障点。

从试验录取的横差电流波形看出,横差电流不随励磁电流的增大而增大,反而随着励磁电流的增大而减小,并且试验中发电机各导轴承的振动无任何异常。由此可以判断:发电机磁极没有发生匝间短路。电气试验结果也表明,发电机励磁回路没有匝间短路。

3 定子和转子间的空气间隙偏差过大

目前大型发电机都装有一套空气间隙检测装置。通过此装置,可以测量发电机运行过程中,定子和转子之间的空气间隙。发电机的空气间隙在机组大修后一定会有所改变。2009 年 5 月,某电厂对 2 号机组进行了一次大修。分析空气间隙的测试数据后发现:磁极间的空气间隙偏差很大。大修后的空气间隙值见表 1 所示。

表 1 大修后空气间隙

磁极 编号	0°方向 传感器	90°方向 传感器	磁极 编号	0°方向 传感器	90°方向 传感器
1	29.43	29.43	22	31.17	30.52
2	29.20	29.25	23	32.11	31.26
3	29.33	29.40	24	33.39	32.75
4	29.75	29.62	25	34.78	34.62
5	30.02	30.02	26	35.99	36.26
6	30.41	30.51	27	37.23	37.23
7	30.67	30.72	28	38.01	37.96
8	30.87	30.90	29	38.35	38.36
9	31.1	31.11	30	38.53	38.54
10	31.24	31.24	31	38.28	38.33
11	31.4	31.39	32	37.98	38.04
12	31.39	31.39	33	37.52	37.68
13	31.57	31.58	34	36.89	37.27
14	31.49	31.56	35	36.09	36.51
15	31.32	31.42	36	35.22	35.77
16	31.13	31.31	37	34.30	34.74
17	30.77	31.00	38	33.25	33.46
18	30.59	30.78	39	32.24	32.63
19	30.17	30.34	40	31.36	31.61
20	29.98	29.98	41	30.65	30.65
21	30.30	29.96	42	30.06	29.98

发电机空气间隙的改变,改变了磁路的磁阻,影响了磁极所建立的磁场强度。空气间隙的偏差必然会使各个磁极所建立的磁场强度存在偏差,从而导致各相各支路间的电势出现偏差。支路间的电势差必然产生横差电流。空气间隙偏差严重时,会导致横差电流超过保护设定值,导致发电机横差保护动作。由于在发电机启动、运行、灭磁过程中,剩磁大小和铁心饱和程度不同,空气间隙对横差电流的影响也是不相同的。下面分别就这三种工况进行讨论,分析空气间隙对横差电流的影响。

3.1 发电机启动过程中,空气间隙对横差电流的影响

发电机启动过程中,励磁电流在磁极上建立固定磁场。随着转子的转动,在定子上建立起旋转磁场。随着励磁电流的增加,铁心逐渐饱和。不同气隙下,铁心中的磁感应强度随励磁电流的变化曲线如图 4 所示(图中 B_m 为铁心完全饱和的磁感应强度,对应的励磁电流为 I_m , B_n 为产生额定电压的磁感应强度,对应的励磁电流为 I_n , B_0 为转子剩磁产生的磁感应强度)。

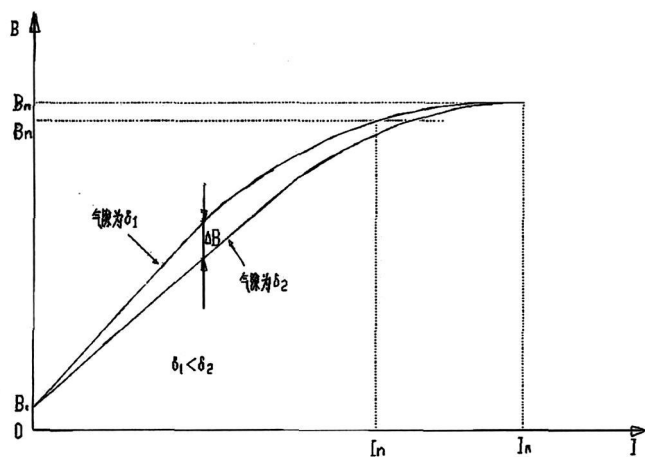


图 4 不同气隙下,磁感应强度与励磁电流的关系图

由于每个磁极所对应的气隙不同,磁极通过相同的励磁电流,在定子铁心中产生的磁感应强度是不同的。但是随着励磁电流的增加,铁心饱和程度加深,气隙的影响越来越小,完全饱和时,磁感应强度趋于相同。由于磁感应强度不同,导致同相的各个支路的电势存在偏差。支路间电势偏差,就会在支路间形成横差电流。启动过程中,发电机的转速保持额定转速不变,因此,横差电流的周期不会改变。由于磁感应强度的差值 ΔB 随着铁心的饱和程度逐渐变化,横差电流也会随着 ΔB 逐渐变化。在启动过程中,横差电

流随着 ΔB 先逐渐增大,到达最大值后,又逐渐减小。

如果空气间隙偏差过大,或者保护定值设定值过低,在启动的过程中,横差电流就有可能超过设定值。通常,横差保护都有一定的延时。横差电流超过电流设定值的时间如果大于延时,横差保护就会动作。某电厂就曾经发生过在启动过程中,发电机横差保护动作的情况。

3.2 发电机空载及负载时,空气间隙对横差电流的影响

空载运行时,发电机出口电压为额定值。此时铁心并没有完全饱和,空气间隙的影响并没有完全消除,各磁极所产生的磁场强度仍有一定的差异。因此,仍会有一定的横差电流,但启动过程中出现的最大值小。由于发电机的转速保持额定转速不变,横差电流的周期也不会改变。这些特征在故障录波装置录制的横差电流波形上看起来。

在负载的情况下,定子磁场是由励磁电流和定子电流共同建立的。机组迟相运行时,出口电压较高,绕组电势高于出口电压,定子铁心的饱和程度较深,空气间隙对横差电流的影响较小。机组发出的无功功率越大,横差电流越小。机组进相运行时,出口电压较低,绕组电势低于出口电压,定子铁心的饱和程度较浅,空气间隙对横差电流的影响增大。机组吸收的无功功率越大,横差电流越大。

3.3 发电机停机灭磁过程中,气隙对横差电流的影响

发电机停机灭磁过程中,转速逐渐降低,励磁电流迅速减小,磁极剩磁也逐渐减小。由于转速逐渐降低,定子的感应电势的频率逐渐减小,横差电流的频率也会随着降低。励磁电流按指数方式衰减,衰减的快慢由发电机灭磁回路参数决定。通常励磁电流的变化函数为

$$i_{(t)} = I_0 e^{-\frac{t}{T_m}}$$

I_0 为励磁电流的初始值; T_m 为励磁绕组的灭磁时间常数。

励磁电流减小,磁感应强度沿着磁滞曲线下降,各个磁极产生的磁感应强度之差会逐渐增大,在某一时刻到达最大值后,又逐渐减小。横差电流也会逐渐增大,在某一时刻到达最大值后,又逐渐减小。此过程与启动过程相反。

发电机的励磁电流减小的过程中,剩磁也会逐渐减小。发电机剩磁的衰减速度与磁化程度有关系。

气隙越小, 额定励磁电流下磁极铁心的磁化强度越强, 保持磁场的能力越强, 衰减就越慢 (磁极的剩磁衰减曲线如图 5 所示)。对于同一台发电机而言, 停机过程中的剩磁远远大于开机时的剩磁。灭磁过程中, 发电机定子磁场是励磁电流产生的磁场和剩磁的总和。因此, 剩磁的偏差导致各支路间电势差的进一步增大, 横差电流也会进一步增大。

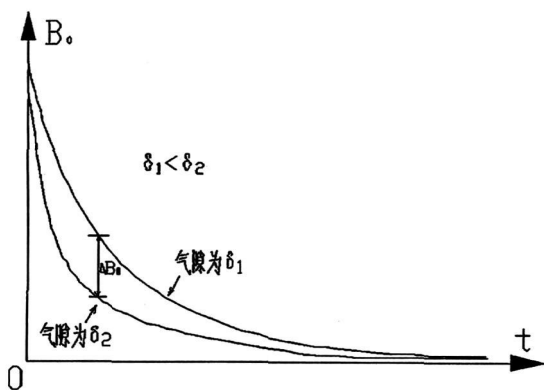


图 5 发电机剩磁的衰减曲线

在灭磁过程中, 各磁极的剩磁偏差远远大于启动时的剩磁偏差, 导致灭磁过程中的横差电流远远大于启动过程中的横差电流。通常, 灭磁时间比启动时间长。因此, 在灭磁过程中, 气隙偏差导致横差保护动作可能性最大。

通过上面的分析, 推导出的横差电流的特征, 与机组故障录波录制的横差电流波形的特征完全一致。由此可以断定, 正是由于空气间隙偏差过大导致了此次横差保护动作。为了进行验证, 根据发电机的绕组

结构, 引入空气间隙的参数, 进行了仿真计算, 绘出了在空载运行时横差电流的波形。由于计算过程中忽略了发电机剩磁、转子偏心、机组振动等影响, 其波形与现场录制的波形有一定的差异, 但其大致形状、周期都与实际的电流波形相符。

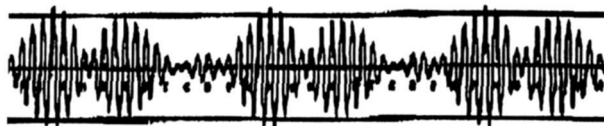


图 6 仿真计算出的横差电流波形

4 结 语

通过以上分析可以看出, 发电机空气间隙偏差过大, 是导致发电机横差保护动作的又一重要原因。横差保护动作后, 应根据机组故障录波装置采集的数据, 进行综合分析, 找出故障的原因, 从而采取相应的对策。要使发电机空气间隙绝对均匀是不可能的, 大修中应尽可能地降低空气间隙的偏差。运行中应根据实际情况, 适当增大发电机横差保护的定值。

参考文献

- [1] 刘学军. 继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 许实章. 电机学 [M]. 武汉: 机械工业出版社, 1986.
- [3] 杨宪章. 电磁场原理 [M]. 武汉: 高等教育出版社, 1985.

(收稿日期: 2010-08-16)

(上接第 76 页)

工后用光源和光功率计对全程进行双向测试, 其衰耗值必须符合设计要求。并用 OTDR 双向进行检查后向散射曲线是否符合要求。

3.4 端面污秽及破损测试

测试设备为 OTDR 光纤时域测试仪、200/400 倍视频探头或 200 倍光学放大镜。

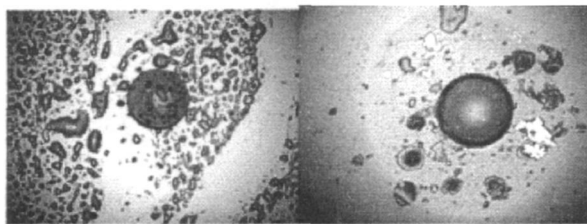


图 8 光纤端面污秽放大图像

放大光纤端接面的目的是识别质量不佳的连接。由于 85% 以上的光缆故障都是由于光缆端接面的污

染造成的, 因此使用端面放大系统就可以方便地查看光缆端接面的这些污染状, 为光缆定义通过 (PASS) 或失败 (FAIL) 的级别, 并附加注释。图 8 为光纤端面污秽放大图像。可以根据一种尺寸来确定光缆类型和保存图象, 用于生成认证测试报告和其他文档备案。

4 小 结

基于光纤通信的测试还有许多项目, 例如中心波长、色散、收发功率等测试, 由于施工现场条件和进度所限不一定都能进行测试, 只是在出现异常和故障时才有针对性地做测试。同时, 光纤通讯技术的发展也促进了测试技术的日新月异进步, 不断地学习和应用新的测试手段就成为了工程技术人员的重要使命。

(收稿日期: 2010-09-13)

2010 年《四川电力技术》总目录

第 1 期

基于混沌理论及小波理论的短期负荷预测	李凌舟 赵华阳 席 川 (1)
误差准则在负荷模型动态仿真中的应用研究	李红军 杨 茹 (5)
配电网单相接地故障定位分析及其自动定位检测实现	蒋春敏 杨 力 (9)
永磁同步电动机矢量控制仿真研究	邹 慧 (12)
交直流系统的快速复故障过滤算法	叶晓峻 李华强 赵周芳 (16)
超高压线路单相接地故障类型识别的新方法	胡亚平 吕飞鹏 (20)
基于 Matlab/Simulink 的直流输电系统的建模与仿真	赵晓娜 方 玉 李天明 (22)
高压直流输电电磁影响相关参数的计算分析	许 懿 雷 雨 马晓雷 (25)
加动量项且变学习速率的 BP 算法应用于变压器故障诊断	许 虎 明志强 侯 勇 (30)
氧化锌避雷器交流分量带电测试的应用及分析	乔明忠 倪 燕 (34)
电气设备绝缘在线监测宽频带电流传感器研究	曾 伟 (37)
数字化变电站过渡方案的研究	古树平 陈奇志 陈旺虎 等 (41)
几种自动重合闸误动作行为的分析	李立军 杨 舒 王洪梅 (44)
新疆电网主变压器过载的应对措施	孙立成 刘德福 樊国伟 等 (47)
基于改进人工鱼群算法的输电网规划	李传虎 王林川 刘 萍 等 (52)
基于变尺度标杆的短时电能质量分类法	李康瑞 徐方维 杨洪耕 (56)
电力系统谐波分析的有效方法	周立东 滕 欢 (61)
负荷凹陷敏感度最佳平方逼近估计法	涂 建 陈卫东 肖先勇 (66)
一种新型孤立小受端系统的低频减载设计	景 宇 巫 柯 金 勇 等 (70)
基于混合算法的多目标配电网重构	张海军 马万松 (74)
三相组合互感器两种检定方法的比较研究	刘 鹏 蒋映霞 (79)
变压器用绕组温控仪原理及应用	谢崇宇 刘翔宇 (82)
基于温度场的单芯电缆载流量研究	谢光彬 谢 伟 (86)
110 kV 主变压器中性点间隙击穿跳闸分析及对策	胡晓松 陈旭峰 赵 强 (89)
220 kV 双母线接线倒母线操作危险点分析与防范措施	

杨 兵 (92)	
第 2 期	
汽轮发电机组 OPC 控制策略的分析及优化	廖 堃 封 颖 李兴源 等 (1)
变速恒频双馈风力发电机并网控制策略仿真研究	赵 宇 王 奔 张喜海 等 (7)
宝鸡—德阳 HVDC 换相失败仿真分析	张 强 欧阳瑞 冯 中 (10)
新疆电网 300 MW 机组甩负荷的频率特性研究分析	孙开宁 常喜强 杨永利 等 (14)
输电线路雷击概率及影响因素研究	李瑞芳 吴广宁 马御堂 等 (18)
大规模互联电网区域间低频振荡实用分析方法	姚天亮 杨德洲 徐宏雷 (21)
新型串并联混合有源电力滤波器研究	刘 燕 蒋志为 蒋 卫 (24)
真空开关操作过电压统计分析研究	张 伟 胡 蓉 杜 颖 等 (28)
分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响研究	随新鲜 王 倩 杨亚强 等 (31)
城市中压配网典型接线模式研究	都健刚 刘治新 (34)
雷电回击模型在雷电电磁场计算中的应用分析	蒋宝忠 滕 欢 (38)
基于分布参数模型的混合线路故障测距和重合闸的研究	陈 宾 陈 皓 刘 伟 (42)
新疆电网采取集中切负荷出现的特殊问题的思考	常喜强 张 娟 黄 净 等 (45)
增强电网安全的思路	邓明燕 (49)
分布式电源的选址及定容	冯 宁 王 倩 马峰超 等 (53)
变电站综合自动化改造存在的问题	黄 胜 (57)
110 kV 变电站接地电阻的降低与核算	李 彬 郑连清 (60)
集控型微机五防系统在监控中心的应用探讨	刘人礼 (64)
新型绝缘材料在变压器中的应用	于德运 (66)
输电线路合闸于故障保护原理综述	钟 超 陈 皓 (70)
110 kV 电网后备保护灵敏度改善方案	陈晓娟 刘 科 郝文斌 (74)
基于 RFID 的变电站巡检系统	王 越 麻赛军 (77)
基于无线 ZigBee 网络技术的用电需求侧全面监测	李 毅 (80)
系统反相序二次电流正序接入对微机保护的影响	罗永刚 罗建华 张 凯 (83)

铜包钢接地棒及热熔焊接技术在 GIS 变电站的应用	曹 海 (85)
电力储能技术及其在四川电力系统中的应用前瞻	高希为 滕 欢 (89)

第 3 期

接地装置暂态特性分析	杨 琳 田晓菲 李建明 (1)
MMS 协议及其在数字化变电站中的应用研究	李琪林 樊留敬 (3)
电力系统网损分摊方法研究	董世勇 倪广魁 (6)
面向不平衡负荷补偿的 SVC 的研究	林 峰 施进平 王伟甲 (11)
基于小波变换和遗传算法优化神经网络负荷预测	刘 绚 刘天琪 (15)
考虑线路阻塞情况下的 ACOPF 节点电价研究	李 平 李建兵 揭海宝 (19)
基于近似线性规划和暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算	廖 萍 李兴源 (23)
空热备用输电线路电能计量分析	熊晓岚 李 琦 (27)
110 kV 线路覆冰防范措施及对策	魏长喜 (30)
不受波速和噪声影响的雷击定位模式识别法	唐启红 汪 颖 肖先勇 (33)
用麦也尔电弧模型分析雷击引起的电压凹陷	黄建康 (38)
小电网负荷低谷时段谐波电压问题的研究	马志远 贺建闽 (42)
事故中双跳圈开关操作回路的电源研究	罗永刚 薛永原 龚在礼 (47)
"V"型悬垂绝缘子串设计研究	刘 然 (50)
电力系统中谐波对电容的影响及对策	黄 胜 (53)
接地网地面电位分布计算分析	李 欣 龙辉 戴玉松 等 (56)
基于小波变换的直流系统接地故障检测	阳细斌 (58)
四川特高压投运初期的问题和对策	朱国俊 王 滨 (62)
提高电力系统稳定性综合措施效能分析及 MATLAB 仿真	熊来红 (64)
感应电动机参数对小干扰电压稳定影响	李 林 康积涛 张学群 等 (68)
电力系统云计算初探	杨旭昕 刘俊勇 季宏亮 等 (71)
储能装置提高电力系统暂态稳定最优位置安装	李 勇 刘俊勇 (77)
普光气田 220 kV 变电站 35 kV 系统接地设计	刘永寿 (81)
电容式电压互感器负介损值现象分析与解决措施	李 辉 姚龙泉 (84)
四川电网输电线路近年一季度故障原因分析及防治措施	

	李龙江 (87)
水电厂励磁系统数学建模中存在的问题及解决方法	毕 坚 夏 潮 (92)

第 4 期

电力系统低频减载优化整定研究	吴 丹 王晓茹 陈义宣 (1)
基于序贯仿真和概率密度分析的四川电网可靠性评估	王 松 杨 树 (5)
基于分布式发电的微网系统建模研究	陈亚宁 (9)
高压直流输电系统的非线性附加控制器设计	温苾芳 陈 可 (13)
一个县级电网 AVC 系统的应用和技术特点	何 东 吴端华 洪行旅 等 (17)
IEC 60870—5—101/104 保护扩展及应用	李明生 唐建中 (19)
基于 IEC 61850 的数字化变电站技术综述	陈 愚 (21)
浅析 110 kV 同塔双回输电线路保护装置的配置	陈 平 (24)
大容量 10 kV 线路保护整定计算及配合	冯成铭 陈 曦 (25)
变压器分接开关烧蚀对绕组变形测试的影响及仿真研究	范海炉 甘德刚 (29)
高压交流输电线路电场生态效应研究	张格红 韩耀霞 于 进 等 (33)
基于欠补偿原理的电力电缆串联谐振耐压分析	杨新春 李 化 杨 帆 (36)
基于谐波小波变换的电力系统谐波检测研究	杨润田 党国营 胡智慧 (39)
电缆沟敷设方式下电缆温度场计算模型	周华东 (43)
内悬浮抱杆的优化设计	王光祥 吴开贤 景文川 等 (46)
一种暂态分量故障测距方案	邓 华 (48)
基于优化算法的三相不平衡补偿控制研究	宋芳超 吴章辉 张 竞 (53)
集中抄表系统在线损管理中的应用	余柏林 (57)
成都市电力市场需求侧管理分析	李 杰 李小莉 刘治新 (59)
电网实测负荷建模在德阳五里堆的应用	杨 坤 李辛奇 唐永红 等 (61)
双馈异步发电机滞环矢量控制策略的研究	郑 岗 熊列彬 刑桂凤 等 (67)
浅析调速器调节参数设定对系统稳定性的影响	赵喜成 燕 京 (70)
220 kV 母线保护改造技术原则探讨	左可飞 崔明德 李中华 等 (74)
兴安直流阀冷系统主过滤器堵塞原因分析及改进建议	田兴旺 (80)
水轮发电机定子单相接地的继电保护技术分析	宋全林 桂 林 党晓强 (83)

法国 330 MW 汽轮机胀差异常的原因分析及应对措施	张德泽 (88)
大型锅炉启动投油工况投电场研究	黄 杉 (91)
第 5 期	
500 kV 同塔双回直线塔挂线方式的研究	田 峻 钟顺洪 (1)
惠州地区雷电参数统计分析	谢 鹏 魏 莱 赵紫辉 等 (4)
新型电力节能金具的试验研究	袁 刚 尹德君 曾 宏 (7)
变电站投切电容器组过电压研究	林 静 胡 红 郭 飞 (11)
基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究	马爱平 刘 磊 (16)
基于行波的电力电缆故障测距组合方法研究	古树平 陈奇志 谢 建 等 (19)
地县继电保护整定管理体系研究	杜凌翔 吴端华 何 东 等 (23)
基于虚拟电交易的水火电置换机制研究	陈 岭 李 俊 (26)
继电保护整定单管理系统的应用研究	周建群 吕 华 李志文 等 (31)
火力发电厂冷却塔安装空气动力涡流调节装置的研究	熊 涛 (35)
相间距离保护 III 段在线路过负荷时的动作特性分析	刘高会 王朝霞 刘 敏 等 (36)
电网网络等值方法分析与讨论	常喜强 周 悦 梁 静 等 (39)
电容式电流互感器额定电压下介质损耗试验分析	刘 超 苏明虹 何 松 等 (44)
ABB 主变压器保护跳旁路开关出口回路的改进	沈 彦 林天佑 (47)
大型发电厂封闭母线绝缘低的解决办法	林 睿 黄旭丹 (50)
两种国内外典型微机母线保护原理的比较	董世勇 (53)
300 MW 机组冲车过程中振动大的原因及对策	荆永昌 陈荣轩 袁 波 等 (57)
大型发电厂厂用电源切换的再思考	张新伟 晁 勤 常喜强 (60)
德宝直流四川电网安全稳定控制系统方案设计	吴 冲 刘汉伟 蔡 华 (65)
四川绵竹首例智能化配网系统的设计与实现	刘从洪 邓晓林 (69)
基于 NSGA II 的变电站电压无功控制方法	杨 坤 魏小淤 (71)
基于量子进化算法的配电网架规划	王 腾 王 倩 张红涛 等 (75)
基于 MST 和 IGA 的全局多目标电网优化	吕后勇 周步祥 (79)
德阳电网 AVC 系统省地协调控制的实现	刘青丽 尹 琦 周 鹏 等 (85)
基于电压凹陷敏感度不确定性和能量损失的敏感负荷电压凹陷经济损失评估	李 浩 刘春芳 (89)

关于气体纯度对色谱仪影响的认识	赵海峰 刘贞群 赵燕梅 等 (93)
第 6 期	
基于灵敏度特征决策的 GRNN 短路容量智能辨识	潘 睿 刘俊勇 郭晓鸣 等 (1)
基于 PSM 的光伏模块建模与电气特性仿真	刘俊杰 张新燕 (6)
基于阻抗源的单相光伏并网系统研究	李 杨 谢 柱 郑连清 (9)
基于改进遗传算法的可用传输能力对比研究	赵 磊 李华强 (14)
次同步谐振频率扫描法的电磁暂态仿真实现	杨 帆 康海燕 伍文城 等 (19)
省地县一体化调度安全生产保障能力评估系统建设	毛 锐 张 毅 何 明 等 (23)
基于概率分布统计原理新疆风电运行分析	张新伟 常喜强 孙谊嫒 等 (26)
几种负荷预测方法在西藏电网的应用分析	艾建平 杜秀琳 (30)
智能配电网无功优化应用研究	杜 兵 (34)
电力系统连锁故障评估综述	张 建 刘 鑫 蒲春林 (36)
10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析	刘从洪 邓晓林 (40)
宜宾 200 kV 环网光纤保护安全性分析	张 雪 张全明 赵 强 (43)
基于 S 变换图像灰度量化的短时电能质量扰动识别分类	张中全 赵 俊 (45)
分支及流经变压器中性点的单相短路电流计算方法	何永德 (51)
论特高压输电技术在促进四川水电资源开发中的关键作用	金健可 (55)
城市高压电网中紧凑型输电线路技术	苏恒博 李 阳 (58)
接电阻是不可重复测量的物理量的研究	李秋锦 郭治天 (60)
四川电网防污闪技术对策分析	何 松 (63)
电力电缆无线测温系统研究	胡 娟 巫京励 程文婷 (67)
变电站挡位远方检测探讨及技术改进	刘祖惠 (71)
智能变电站光纤通信链路检测方法探讨	贾 维 (74)
300 MW 循环流化床锅炉耐火材料施工及维护	袁 杰 张文清 (77)
进口亚临界锅炉高温再热器长时过热原因与对策探讨	彭卫红 (81)
ABB—SYMPHONY 系统在 DEH 改造中的应用	王 梅 (83)
300 MW 机组高压电动机差动保护误动分析	杜振海 雷光利 (86)
发电机空气间隙对横差电流的影响	程德蓉 刘启俊 (88)
2010《四川电力技术》总目录	(92)