

# 四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网巴中供电公司

ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.37

2014

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 鄢小端

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:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2014年第37卷第6期(总234期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdscdljs@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] CN51-1315/TM \* 1978 \*

b \* A4 \* 94 \* zh \* P \* ¥6.00 \* 4300 \* 21 \*

2014-12

## 目 次

### · 基金项目 ·

最小生成树算法在配电网重构中的应用

..... 李 超 王 华 刘 丽 韩 燕 许 瑾(1)

高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究

..... 常喜强 樊艳芳 钟 显 段天元 李泽燃 张 锋(5)

### · 高电压技术 ·

一起变压器夹件多点接地故障的原因及处理 ..... 蒋一平 许 强(10)

一起110 kV主变压器中性点间隙击穿的原因分析与故障查找

..... 李馨博 程昌奎 巫京励 陈 娇 干建伟(13)

检测桥电阻对直流电源系统安全运行的影响分析

..... 李 晶 罗 洋 陈轲娜(16)

10 kV架空绝缘导线防雷击断线措施研究 ..... 朱世东 黄飞龙(20)

特高压直流输电线路1250 mm<sup>2</sup>截面导线选型研究 ..... 周 唯 吴子怡(24)

两种变压器绕组等值电容模型的联系 ..... 李 林(29)

±500 kV永富直流输电工程分极送电接地方案造价分析 ..... 吴子怡 周 唯(32)

运用“十二节点工作法”精益提升变电设备大型检修工作效率

..... 杜仁杰 郑雨欣 聂雅卓(36)

### · 电网技术 ·

大规模风电并网系统控制问题综述 ..... 罗 亘 汪万平(40)

基于无源动态滤波器和TSC的无功补偿滤波仿真 ..... 沙宏哲 冯媛硕(44)

基于改进蚁群优化算法的电力谐波和间谐波的检测与分析

..... 王志川 刘丹莉 彭祥华 周 群(49)

基于改进爬山算法的风机最大功率点控制策略研究

..... 田永贵 王 奔 薛禾雨 李 鹏 高鲁峰 李 晓(54)

并网小电源对电力系统的影响和对策探讨 ..... 孙文成 崔明德(61)

继电保护在线校核系统的研究 ..... 王 佼 刘 钊(65)

含源配电系统孤岛运行状态特征识别与诊断 ..... 伍 盛(69)

±800 kV特高压直流输电工程保护闭锁策略分析

..... 孙 文 禹 佳 滕予非(73)

某大型水电站20 kV系统一点接地后铁磁谐振现象分析

..... 康 娣 蔡显岗 季 杰 黄建琼(78)

基于GPRS的电网供电电压监测管理系统应用研究

..... 何小飞 王 锐 叶茂青 杨 华(81)

基于改进引力搜索算法的配电网多目标优化重构 ..... 谭守国(87)

2014年总目录 ..... (91)

## CONTENTS

|                                                                                                                                           |                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Application of Minimum Spanning Tree Algorithm to Distribution Network Reconfiguration .....                                              | Li Chao Wang Hua Liu Li Han Yan Xu Jin(1)                                 |
| Analysis and Research on Voltage Fluctuations in High Density Wind Power Region .....                                                     | Chang Xiqiang Fan Yanfang Zhong Xian Duan Tianyuan Li Zeran Zhang Feng(5) |
| Reasons for Multi - point Earth Fault of Clamping Piece of Transformer and Its Treatment .....                                            | Jiang Yiping Xu Qiang(10)                                                 |
| Cause Analysis and Fault Location for Breakdown Accident of Neutral Point Gap in 110 kV Main Transformer .....                            | Li Xinbo Cheng Changkui Wu Jingli Chen Jiao Gan Jianwei(13)               |
| Influence Analysis of Detecting Bridge Resistor on Safe Operation of DC Power System .....                                                | Li Jing Luo Yang Chen Kena(16)                                            |
| Research on Protection Measures against Wire Breakage Caused by Lighting Stroke in 10 kV Overhead Insulated Conductors .....              | Zhu Shidong Huang Feilong(20)                                             |
| Study on 1250 mm <sup>2</sup> Conductor Selection of UHV DC Transmission Line .....                                                       | Zhou Wei Wu Ziyi(24)                                                      |
| Connection between Two Equivalent Capacitance Models of Transformer Winding .....                                                         | Li Lin(29)                                                                |
| Engineering Cost Analysis on Grounding Scheme of Split Electrode? Power Transmission in $\pm 500$ kV Yongfu DC Transmission Project ..... | Wu Ziyi Zhou Wei(32)                                                      |
| Improving Maintenance Efficiency of Large - scale Transformation Equipment by Using 12 - Node Work Method .....                           | Du Renjie Zheng Yuxin Nie Yazhuo(36)                                      |
| A Review on Grid - connection Control Techniques of Large - scale Wind Power .....                                                        | Guo Gen Wang Wanping(40)                                                  |
| Reactive Compensation Filter Simulation Based on Passive Dynamic Filter and TSC .....                                                     | Sha Hongzhe Feng Yuanshuo(44)                                             |
| Detection and Analysis of Power Harmonic and Inter - harmonic Based on Improved ACO .....                                                 | Wang Zhichuan Liu Danli Peng Xianghua Zhou Qun(49)                        |
| Research on Control Strategy of Maximum Power Point Based on Improves Climbing Search Method .....                                        | Tian Yonggui Wang Ben Xue Heyu Li Peng Gao Lufeng Li Xiao(54)             |
| Discussion on Influence of Grid - connected Small Power Supply on Power System and Its Countermeasures .....                              | Sun Wencheng Cui Mingde(61)                                               |
| Research on On - line Checking System of Relay Protection .....                                                                           | Wang Jiao Liu Zhao(65)                                                    |
| Feature? Identification and Diagnosis for Islanding Operation Condition of Active Distribution Systems .....                              | Wu Sheng(69)                                                              |
| Analysis on Protection Block Strategy for $\pm 800$ kV UHVDC Transmission system .....                                                    | Sun Wen Yu Jia Teng Yufei(73)                                             |
| Analysis on Ferro - resonance after One - point Grounding of 20 kV System in a Large - scale Hydroelectric Station .....                  | Kang Di Cai Xiangang Ji Jie Huang Jianqiong(78)                           |
| Application Research on Power Supply Voltage Monitoring and Management System Based on GPRS .....                                         | He Xiaofei Wang Rui Ye Maoqing Yang Hua(81)                               |
| Multi - objective Optimization of Distribution Network Reconfiguration Based on Improved Gravitation Search Algorithm .....               | Tan Shouguo(87)                                                           |

SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY

2014 Vol. 37 No. 6

(Ser. No. 234)

Bimonthly, Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY

# 最小生成树算法在配电网重构中的应用

李超<sup>1</sup> 王华<sup>2</sup> 刘丽<sup>3</sup> 韩燕<sup>1</sup> 许瑾<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500;

2. 国网成都供电公司客服中心, 四川 成都 610046;

3. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为使配电网运行达到最优, 提出了一种基于最小生成树算法的配电网重构方法。该方法首先假设配电网为一个无向赋权图, 基于环网潮流计算结果对每一条边赋权值后进行最小生成树计算, 并通过反复迭代更新权值的方式使网络目标达到最优。所提方法以有功损耗最小为目标函数并考虑了电压质量, 该方法能有效降低有功损耗, 提高电压质量和均衡负荷, 优化效果良好, 以33节点和69节点为仿真算例, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 最小生成树; 配电网; 网络重构; Kruskal 算法

**Abstract:** In order to achieve the optimal operation of distribution network, a distribution network reconfiguration method based on Kruskal minimum spanning tree algorithm is proposed. Firstly, the distribution network is assumed as an undirected weighted graph, and the minimum spanning tree can be calculated by the empowering weighted values on each branch with the results from the weakly meshed power flow method. Then, the optimal objective of the network can be achieved by updating the weights iteratively. The proposed method takes the minimum network loss as the objective function and considers the voltage quality. This method can effectively reduce network losses and improve voltage quality and load balancing. The test results of the 33-bus and 69-bus systems verify its feasibility and validity.

**Key words:** minimum spanning tree; distribution network; network reconfiguration; Kruskal algorithm

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0001-04

## 0 引言

作为电力系统重要组成部分的配电系统, 由于直接面向终端用户, 所以对其供电可靠性和电能质量方面的要求也越来越高, 而它的完善与否直接关系到广大用户的用电可靠性和用电质量<sup>[1]</sup>。随着电力用户逐渐增多, 配电线路经常出现超负荷或轻负荷现象, 出现电压降低, 并且有功损耗增加。

而通过配电网重构可以很好地解决上述问题, 实现负荷的均衡和降低有功损耗。通过配电网重构可以实现降低配电网线损, 提高系统经济性; 均衡负荷, 消除过载, 提高供电电压质量, 提高供电可靠性。配电网重构的方法有很多, 文献[2]采用最短路径算法对配电网进行重构, 利用最短路径算法寻找所有负荷节点的供电最短路径, 在形成的树状网络中利用最小点电压法进行支路交换操作。该方法

基金项目: 四川省教育厅理科一般项目(12ZB161)

对降低系统有功损耗和提高供电质量作用明显, 但由于需要寻找根节点向每个负荷节点供电的最短路径, 计算复杂。文献[3]采用基于图论的改进遗传算法进行重构优化, 在初步连接图的基础上寻找最优的生成树, 基于破圈法和环路的性质进行编码操作, 得到最优解, 该算法在配电网重构中具有理想的效果, 能以较大概率保证收敛到全局最优解, 但该方法计算量较大, 速度较慢。文献[4]提出了一种利用节点电压进行配网重构的方法, 将电压均衡指数作为目标函数, 通过连续的支路交换操作来寻求配电网的最佳结构, 该方法即使在严重缺乏量测点时, 仍可以进行。文献[5]提出了通过组合负荷实现寻优的重构方法, 利用最短路径法按照某一顺序为每个负荷分别寻找供电路径, 然后利用遗传算法选择最优的负荷排列顺序, 从而实现在局部最优解中寻求全局最优解。因算法不依赖于网络初始结构, 可以得到全局最优解, 但存在“维数灾”问题。此外, 还有应用于智能电网的配电网重构<sup>[6]</sup>, 最小供电成

本的配电网重构<sup>[7]</sup>等,及基于各种智能优化算法<sup>[8-10]</sup>的配电网重构。

基于图论的最小生成树算法是网络最优化算法中最重要的算法之一,在很多工程技术领域中得到应用。例如,在若干城市之间架设通信线缆,铺设线路、铁路或各种管道,要求总的路线长度最短或材料最省、成本最低等。而目前常用的最小生成树算法有 Prim 算法和 Kruskal 算法,这里选用改进 Kruskal 算法进行配电网重构。通过数学建模建立目标函数后利用潮流算法计算环网节点电压,并对每一条边赋权值后进行最小生成树计算,并通过反复迭代更新权值的方式使网络达到最优。33 节点和 69 节点算例验证了算法的有效性。

## 1 配电网重构算法

### 1.1 数学模型

#### (1) 目标函数

配电网重构一般以降低配电网的线路损耗、提高配电网的电压质量、提高供电可靠性和均衡负荷等为目标,也可以综合上述多个指标为目标。采用以最小有功损耗为目标,其表达式为

$$\min f = \sum_{i=1}^m \Delta P \quad (1)$$

$$\text{其中 } \sum_{i=1}^m \Delta P = \sum_{i=1}^m R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (2)$$

式中  $m$  为网络中支路总数;  $P_i$  和  $Q_i$  为流过支路的有功功率和无功功率;  $R_i$  为支路电阻;  $U_i$  为支路的首端电压;  $U$  为最低节点电压值;  $\Delta P$  为网络中所有线路的有功损耗之和。

#### (2) 约束条件

配电网重构的目标是使  $f$  最小,且满足下面的约束条件。

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (3)$$

$$I_i \leq I_{i \max} \quad (4)$$

$$S_i \leq S_{i \max} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $U_{i \min}$  和  $U_{i \max}$  分别为节点  $i$  的电压下限和上限;  $I_{i \max}$  为支路电流最大值;  $S_{i \max}$  为支路  $i$  或配电变压器的

最大负载能力;  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别为节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\delta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电导、电纳和电压相角差;  $n$  为系统总节点数;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值。网络辐射状运行,无环路及孤立节点。

### 1.2 基于 Kruskal 算法的最小生成树计算原理

由于配电网是闭环设计,开环呈辐射状运行,配电网重构问题所求的最优解可看作是在赋权图中寻找以根节点为起点,满足目标函数的最小生成树问题<sup>[11]</sup>。将 Kruskal 算法应用于配电网重构的一个显著优势就是可以建立所有负荷节点与根节点的连接,并自动形成辐射状网络。

为便于描述,可用  $G = (V, E)$  来描述一个配电网(其中  $V$  为节点集合、 $E$  为边集合)<sup>[12]</sup>,配电网重构问题所求的最优解可以认为是满足目标函数中的一棵最小生成树  $T$ 。用  $l(e)$  表示边的权值,则所有负荷节点和根节点的最小生成树可以表示为<sup>[8]</sup>

$$T = \min \sum_{e_i \in T} l(e_i) \quad (7)$$

Kruskal 算法是目前公认的求最小生成树问题的最好方法。对于一个连通赋权图  $G = (V, E)$ ,图  $G$  的最小生成树  $T$  按下述方法构造:在  $E$  中选择权值最小的边,作为  $T$  的第一条边,相继选择  $E$  剩下的边中权值最小的边加入  $T$ ,且该边满足不与前面所选的边构成圈,持续这种做法,直至产生一个生成树<sup>[9]</sup>。

### 1.3 配电网重构的搜索算法

由于 Kruskal 算法不依赖网络的初始结构,使得形成树状网络变得较容易,并且易于解决复杂结构网络的寻优问题。具体步骤如下。

由文献[4]可知,在仅能够获得配电线路沿线柱上开关处的量测信息的情况下,仍然能够求解出网络重构后沿线各处的电压降落,因此对于量测不足的配电系统,也可以认为其电压降落是已知的。所以对于配电网来说其各节点电压值是很容易得到的。由此,文献[4]提出基于电压的平衡指数来调整联络开关和分段开关的位置,最终得到一个满足约束的最优网络。定义网络中各联络开关和分段开关的电压平衡指数为  $VBL_{i-j}$ 。

$$VBL_{i-j} = \max(U_{Ni}, U_{Nj}) / \min(U_{Ni}, U_{Nj}) \quad (8)$$

式中  $\min(U_{Ni}, U_{Nj})$  表示取小值;  $\max(U_{Ni}, U_{Nj})$  表示取大值。

所提算法主要步骤如下。

(1) 求电压平衡指数: 闭合配电网中的所有联络开关, 通过计算环网潮流得到节点电压, 以此来求得各开关的电压平衡指数。

(2) 初始最小生成树的生成: 以各开关的电压平衡指数为求最小生成树的边的权值, 利用最小生成树算法 Kruskal 算法求得最小树  $T(K)$ , 这是对配电网的初次优化, 得到一个辐射状运行的网络, 通过潮流计算得到最小生成树  $T(K)$  的有功损耗和最低节点电压。

(3) 联络开关排序: 将得到的除最小生成树  $T(K)$  外断开的开关按权值从小到大的顺序放入队列  $Q$  中, 在下面所用的标准算例中, 得到断开的开关有 5 条, 作为联络开关处理。

(4) 联络开关排序: 取出队列  $Q$  之首的开关  $k$  放到  $T(K)$  中, 由此产生一个环路, 计算当前网络的权值, 选择除新加边外环路上所有开关, 按权值从小到大排列放入队列  $Q_1$  中。

(5) 迭代更新: 断开队列  $Q_1$  之首的开关  $n$ , 即可构成一棵新的树  $T(N)$ 。进行潮流计算, 比较  $T(N)$  和  $T(K)$  的有功损耗。

比较结果分为以下两种情况。

1) 若  $T(N)$  的有功损耗小于  $T(K)$  的有功损耗, 且满足约束, 则此联络开关闭合为最优结果, 将  $Q_1$  中断开的开关  $n$  放入队列  $Q$  的末端, 并且清空队列  $Q_1$ , 返回步骤(4)。

2) 若  $T(N)$  的有功损耗大于  $T(K)$  的有功损耗, 将  $Q_1$  中首元素  $n$  置于  $Q_1$  队列末端, 返回步骤(5), 反复迭代。

在此过程中可能会出现依次断开  $Q_1$  队列的所有开关后依然无法得到使  $T(N)$  的有功损耗小于  $T(K)$  的有功损耗的开关  $n$ 。在这种情况下, 开关  $k$  为最优开关, 将开关  $k$  放入队列  $Q$  的末端, 并且清空队列  $Q_1$ , 返回步骤(4)。

当初始队列  $Q$  中的联络开关全部动作完时算法结束。

## 2 算例分析

为验证所提方法的正确性和可行性, 选择文献[4]所用的 2 个标准算例 33 节点系统和 69 节点系

统进行验证, 并将计算结果和不同算法重构的运算结果进行比较。

### 2.1 33 节点系统

该配电网为 12.66 kV 的配电系统, 有 33 个节点、37 条支路, 其中的 5 条为联络开关, 系统总有功负荷为 3 715 kW, 初始有功损耗为 202.68 kW。采用所提方法得到的优化结果如表 1 所示。

表 1 33 节点系统配电网络重构结果

| 项目      | 重构前     | 所得结果    | 文献[4]结果 |
|---------|---------|---------|---------|
| 开关集合    | 8-21    | 6-7     | 6-7     |
|         | 9-15    | 8-9     | 8-9     |
|         | 12-22   | 13-14   | 13-14   |
|         | 18-33   | 24-28   | 24-28   |
|         | 25-29   | 31-32   | 31-32   |
| 有功损耗/kW | 202.68  | 139.55  | 139.55  |
| 最低节点    | 18 节点   | 32 节点   | 32 节点   |
| 电压/p.u. | 0.913 1 | 0.941 3 | 0.926 5 |

由表 1 结果可以看出所提算法与文献[4]的结果一致。重构前系统最低电压为 0.913 1 p.u., 重构后系统最低电压为 0.937 8 p.u., 提高了 2.7%, 从一定程度上改善了电压质量, 系统重构前后电压变化如图 1 所示。重构前系统有功损耗为 202.68 kW, 重构后系统有功损耗为 139.55 kW, 降低了 31.1%。

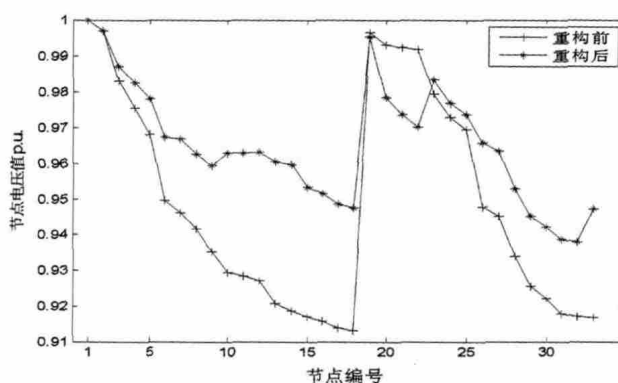


图 1 33 节点系统重构前后节点电压比较

### 2.2 69 节点系统

该配电网为 12.66 kV 的配电系统, 有 69 个节点、73 条支路, 其中的 5 条为联络开关, 系统总有功负荷为 3 802.19 kW, 初始有功损耗为 226.05 W。采用所提方法得到的优化结果如表 2 所示。由于所采用的节点编号与文献[4]不同, 所以得到的开关编号不同, 但最终结果是一致的。

在系统规模增大后,所得计算结果仍与文献[4]的结果保持一致,这说明了针对不同规模的配电系统所提算法仍然适用。由表 2 可知,重构前系统最低电压为 0.901 8 p. u.,重构后系统最低电压为 0.942 8 p. u.,提高了 4.5%,改善了整个配电系统的电压质量;重构前系统有功损耗为 226.05 kW,重构后系统有功损耗为 99.67 kW,降低了 56.03%。

表 2 69 节点系统配电网络重构结果

| 项目       | 重构前     | 所提结果    | 文献[4] 结果 |
|----------|---------|---------|----------|
| 开关集合     | 10-70   | 13-14   | 13-14    |
|          | 12-20   | 47-48   | 47-48    |
|          | 14-90   | 50-51   | 50-51    |
|          | 38-48   | 10-70   | 10-70    |
|          | 26-54   | 12-20   | 12-20    |
| 有功损耗/kW  | 226.93  | 99.67   | 99.67    |
| 最低节点     | 54 节点   | 55 节点   | 55 节点    |
| 电压/p. u. | 0.901 8 | 0.942 8 | 0.942 8  |

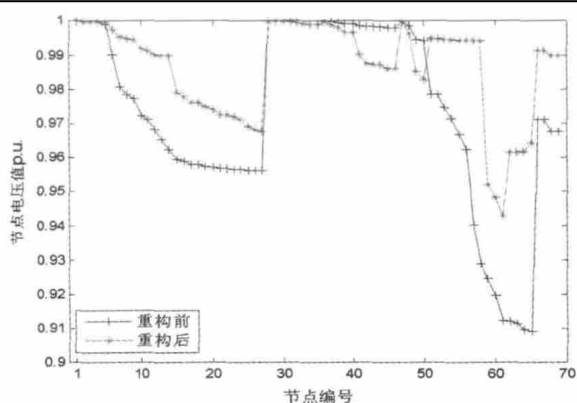


图 2 69 节点系统重构前后节点电压比较

### 3 结 论

(1) 提出了以有功损耗最小为目标函数的配电网络重构方法,该方法利用 Kruskal 算法在配电网所有开关闭合的情况下,将线路电压平衡指数为权值,通过寻找图的最小生成树初步优化网络,为后续的细致优化提供一个可行的初始解。通过 Kruskal 算法的初步优化使得所提算法不依赖网络的初始结构,具有更好的适用性。

(2) 通过动态调整各条边的权值并反复迭代进行支路交换操作,细致优化网络,进一步寻找满足目标函数的网络拓扑,两个常用算例表明该算法取得了满意的效果。

通过对以上算例的分析可知,利用算法对网络进行重构后,网络的供电电压质量明显提高,有功损耗也大为降低,重构效果明显,与此同时适用不同规模的配电网。

### 参考文献

- [1] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [2] 王磊,柯丽芳,姚李孝,等.基于最短路算法和最小节点电压法的配电网络重构[J].电网与清洁能源,2011,27(6):4-7.
- [3] 杨建军,战红.基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):122-125.
- [4] 毕鹏翔,刘健,张文元.以提高供电电压质量为目的的配网重构[J].电网技术,2002,26(2):41-43.
- [5] 余贻鑫,段刚.基于最短路算法和遗传算法的配电网络重构[M].中国电机工程学报,2000,20(9):44-49.
- [6] Daniel P Bernardon, Luciano L Pfister, Luciane N Canha. Smart Grid Concepts Applied to Distribution Network Reconfiguration[C]. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 47th International 2012: 1-6.
- [7] Miguel Arias-Albornoz. Distribution Network Configuration for Minimum Energy Supply Cost[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004(1): 538-542.
- [8] 许立雄,吕林,刘俊勇.基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2006,30(7):27-30.
- [9] 李振坤,陈星莺,余昆,等.配电网重构的混合粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,31(28):35-41.
- [10] 陈春,汪润,刘蓓,等.基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
- [11] 王磊,吕娟,张强.基于最小生成树算法的配电网重构[J].陕西电力,2009(1):13-17.
- [12] 龚勋.图论与网络最优化算法[M].重庆:重庆大学出版社,2009.

作者简介:

李超(1989),硕士研究生在读,控制科学与工程,研究方向:配电系统自动化;

王华(1978),研究生,助理工程师,从事电力系统营销相关工作。

(收稿日期:2014-09-13)

# 高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究

常喜强<sup>1</sup> 樊艳芳<sup>2</sup> 钟 显<sup>2</sup> 段天元<sup>2</sup> 李泽燃<sup>2</sup> 张 锋<sup>1</sup>

( 1. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047 )

**摘 要:** 依托新疆哈密地区网架结构, 针对高密度风电、光伏等新能源接入后哈密地区电网无功电压波动问题, 基于风电有功出力随机变化、大规模风电及光伏脱网、电铁冲击负荷变化以及动态无功补偿装置( SVC) 控制不协调等因素, 仿真分析哈密地区电网电压的波动情况, 诊断高密度风电接入地区无功电压存在的风险, 并提出改善电压波动的措施。研究结果阐明风电送出点短路容量偏小, 风电出力波动易造成电压波动越限; 动态无功补偿装置( SVC) 控制不协调易引起弱风电送出系统振荡。因此, 通过高密度风电接入地区电压运行风险分析, 对提高高密度风电接入地区电压稳定水平及减小对风机脱网的影响具有一定的参考价值。

**关键词:** 高密度风电; 光伏; 电气化铁路; SVC; 间歇性能源; 电压波动

**Abstract:** Depending on grid structure in Xinjiang Hami and aiming at the reactive and voltage fluctuation problems in the region with the access of high density wind power, solar and other new energy, the voltage fluctuations in Hami region are analyzed and the reactive voltage risk in high density wind region is diagnosed, based on the factors such as the random change of active wind output, the large-scale wind power and photovoltaic tripping, the shock load change of electrified railway and the control incoordination of dynamic reactive power compensation device ( SVC). Then, the measures to improve the voltage fluctuations are proposed. The research results show that the short-circuit capacity of wind power at sending point is too small, and the wind power output fluctuations could easily make voltage fluctuations exceed the limit. And the incoordination of dynamic reactive power compensation device makes the weak wind power system swing. Therefore, the factor analysis for voltage fluctuations in the high density wind region will provide a reference for improving the voltage stability and reducing the impact on wind turbine generator tripping.

**Key words:** high density wind; photovoltaic; electrified railway; static var compensator ( SVC); intermittent energy; voltage fluctuation

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0005-05

## 0 引 言

近年来, 大规模间歇性能源( 如风电、光伏等) 集中接入电网, 并网后给大电网的稳定、运行带来极大的挑战, 尤其是对系统电压波动的影响。一方面, 风力发电场( 或光伏电站) 会吸收过多的无功功率, 冲击性负荷( 如电铁) 易产生电压不平衡、谐波, 如不采取相应的控制措施, 可能对电网的电压稳定造成影响; 另一方面, 动态无功补偿装置的协调控制问题也极易造成电压的波动<sup>[1-4]</sup>。

目前, 针对间歇性能源并网引起电压波动问题, 主要集中于理论方面进行了初步研究。文献[5-6]考虑稳态下的风电场波动, 未考虑故障的暂态过程对电压

波动影响; 文献[7-8]考虑含有光伏的电网中, 研究了光伏的不确定性和无功优化协调控制策略对电压波动的影响, 但未考虑多种间歇性能源的交互影响; 文献[9]分析风电与电铁牵引负荷集中接入地区电网的交互影响, 提出电铁牵引站装设 SVC 装置有效改善电压的波动; 文献[10-11]针对大规模并网风电场电压稳定问题, 分析了 SVC 的控制策略研究、振荡机理, 且以并网风电和电网交换功率为控制目标进行 SVC 的协调控制, 改善电压波动。

可见, 现有研究主要依托于单一间歇性能源, 提出了一系列改善电压稳定的措施。对于含有多种间歇性能源集中接入地区, 电网运行本身存在一定的复杂性, 尤其是在高密度风电地区, 光伏、电铁等间歇性能源共存, 对高密度风电地区电压波动问题则

需进一步的探讨研究。

依托新疆哈密地区网架结构,该地区形成了哈密北、十三间房及哈密南三大风电集群区域。针对高密度风电地区电网无功电压波动问题,考虑风电有功出力变化、风机及光伏大规模脱网、电铁冲击负荷及动态无功补偿装置(SVC)控制不协调等因素,仿真分析不同因素对该地区电压波动的影响,诊断该地区无功电压存在的风险,并提出改善电压波动的措施,对提高高密度风电接入地区电压稳定水平有一定的参考价值。

## 1 哈密高密度风电地区电网规模

### 1.1 哈密高密度风电地区网架结构

根据 2014 年新疆电网建设,哈密地区网架结构已形成含有  $\pm 800$  kV、750 kV、220 kV 电压等级的主网架,其中 110 kV、35 kV 电压等级构成覆盖该地区的输、配电网络。并且,  $\pm 800$  kV 哈郑(天中)特高压直流、750 kV 新疆与西北主网联网一、二通道及哈密高密度风电,构成了疆电外送的送端电网,图 1 为哈密局部电网示意图。

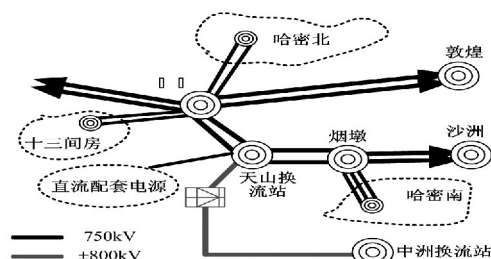


图 1 局部电网示意图

### 1.2 哈密高密度风电地区电源规模

如图 1 所示,目前哈密地区高密度风电汇集于哈密北、十三间房及哈密南三大风电集群区域。依托直流配套电源建设,截至 2014 年年底,哈密地区风电总装机容量达 7 580 MW,并在哈密东南部地区形成大规模的光伏并网,光伏总装机容量达 970 MW,哈密南部地区天山换流站直流配套电源火电 6 台机组将在 2014 年年底陆续投入运行,哈密地区火电总装机容量达 4 850 MW。图 2 为哈密地区电源装机容量。

## 2 电压运行波动机理分析

电压波动主要取决于系统的短路容量以及系统

无功的动态补偿容量。在网架结构及规划电源都已确定前提下,为了适应风电出力波动对电压的影响,需要风电场配置动态无功补偿(SVC 或 SVG)并跟踪风电出力的变化进行无功调控,同时,辅以主网无功控制手段的协同动作,进而将风电出力变化对电压波动的影响降到最低。

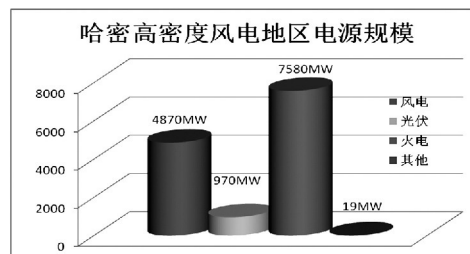


图 2 哈密地区电源规模

### 2.1 短路容量对电压运行波动分析

短路容量是指电力系统在规定的运行方式下,关注点三相短路时的视在功率,它是表征电力系统供电能力强弱的特征参数,其大小等于短路电流与短路处的额定电压的乘积,即

$$S_{sc} = \sqrt{3} U_{av} I_{sc} \quad (1)$$

从式(1)可知,短路容量与电力系统的运行方式有关,并且反映了该点的某些重要性能:①该点带负荷的能力和电压稳定性;②该点与电力系统电源之间联系的强弱;③该点发生短路时,短路电流的水平。随着电力系统容量的扩大,系统短路容量的水平也会增大。

根据《电能质量——电压波动与闪变》标准,电压波动  $d$  定义为

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \quad (2)$$

式中,  $\Delta U$  电压方均根值曲线上相邻两个极值电压之差;  $U_N$  为系统的标称电压。

当已知三相负荷的有功和无功功率的变化量分别为  $\Delta P_i$  与  $\Delta Q_i$  时,电压波动  $d$  为

$$d = \frac{R_L \Delta P_i + X_L \Delta Q_i}{U_N^2} \quad (3)$$

式中,  $R_L$ 、 $X_L$  为电网阻抗的电阻、电抗分量。在高压电网中,一般  $R_L \ll X_L$ , 则

$$d = \frac{\Delta Q_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $S_{sc}$  为考察点(较小方式下)的短路容量。由式(4)可见,系统的短路容量越大,电压损失越小,更利于电压的稳定;由于计算短路容量时,电压选取等

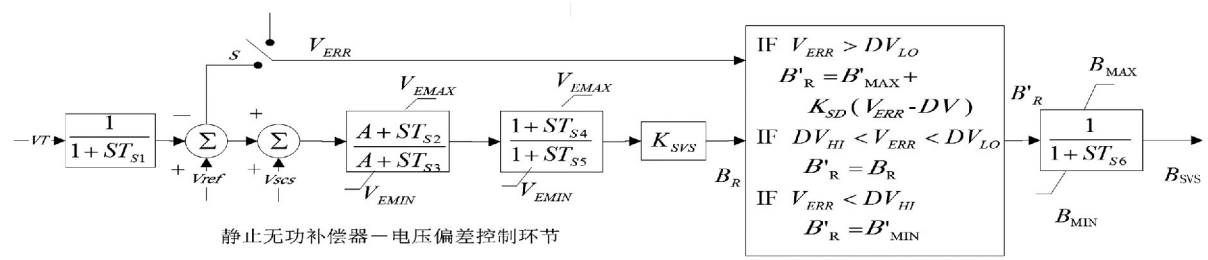


图 3 模拟 SVC 外特性的数学模型框图

级为线路平均电压,由式(1)、式(4),系统的短路容量水平取决于系统的短路电流水平。

2.2 SVC 控制不协调对电压波动分析

动态无功补偿 SVC 具有吸收和发出无功电流的能力,用于提高电力系统的功率因数,稳定系统电压,抑制系统振荡等功能。模拟 SVC 外特性的通用静止无功补偿器模型,如图 3 所示。

图 3 中  $K_{SIS}$  为连续控制比例增益系数,  $K_{SD}$  为间断控制比例增益系数。电压偏差  $DV$  是连续控制和间断控制的电压变化门槛值。 $DV = 0$ ,为连续控制; $DV > 0$ ,为间断控制,如果不考虑连续控制可用将  $DV = 0$   $K_{SIS}$  很大,或  $DV$  设为很小的值。在应用 SVC 仿真中发现,控制增益设置及多个 SVC 之间的协调控制是功率振荡的重要原因,进而引起电压的波动。

3 仿真分析

根据 2014 年新疆哈密高密度风电地区网架结构,针对高密度风电、光伏等间歇性电源接入后哈密地区电网无功电压波动问题,基于电压波动机理,考虑风电有功出力随机变化、风电及光伏大规模脱网、电铁冲击负荷变化以及动态无功补偿装置(SVC)控制不协调等因素,仿真分析哈密地区电网电压的波动情况。

3.1 短路容量引起电压波动分析

利用 PSASP 仿真可知哈密地区部分风电汇集母线短路电流如表 1 所示。

由于三塘湖麻黄沟东最小短路容量为 900 MVA,而麻黄沟地区的风电装机容量已经达到了 650 MW,短路比不到 1.4,属于极弱电网,不利于风电上网稳定运行,在如此小的短路电流之下,风电出力波动必将引起接入厂站较大的电压波动。

3.2 风电有功出力随机变化对电压影响

哈密北部地区麻黄沟西变电站,汇集接入的电

场由于风速变化发生 100 MW 的功率波动时,220 kV 麻黄线功率曲线和麻黄沟西电压变化的仿真曲线如图 4 所示。

表 1 风电场汇集母线短路电流

| 220 kV 母线名称 | 最小短路 /kA | 短路容量 /MVA |
|-------------|----------|-----------|
| 麻黄沟西        | 1.89     | 753       |
| 麻黄沟东        | 2.26     | 900       |
| 山北          | 5.02     | 2 000     |
| 淖毛湖         | 1.92     | 765       |
| 十三间房        | 1.67     | 665       |
| 三道岭         | 3.64     | 1 450     |
| 石城子         | 5.01     | 1 996     |
| 思甜          | 4.96     | 1 976     |
| 烟墩北         | 3.37     | 1 342     |

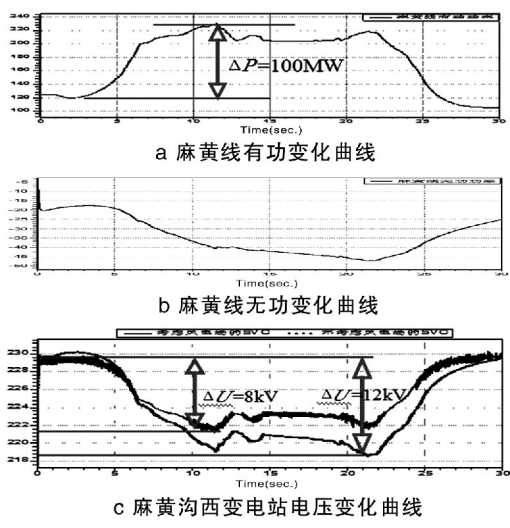


图 4 麻黄沟西有功变化引起电压波动

从图 4 可以看出,当麻黄沟西接带汇集接入的风电场因为风速变化引起出力变化超过 100 MW 时,不考虑 SVC 作用时造成 12 kV 的电压波动。考虑 SVC 作用后造成 8 kV 的电压波动。SVC 有效地抑制了电压波动的幅度,但是从图中可以看出 SVC 参与调节后,麻黄沟西变电站的 220 kV 母线电压出现了轻微的振荡现象。

3.3 大规模风电、光伏脱网对电压影响

风电、光伏通过换流器并网,当电网发生扰动,出

于换流器的电力电子器件安全等考虑,风电、光伏自身的保护往往将电力切除,给电网带来一定程度扰动,尤其是并网规模的增大,这种扰动将给电网运行带来更大的运行风险。按照不同运行工况下,当风电机组、光伏电源脱网容量分别为:工况 1 脱网 437 MW、工况 2 脱网 733.6 MW、工况 3 脱网 1 040.6 MW,分别仿真 3 种脱网工况对系统 220 kV 电压的影响,仿真结果如图 5 所示。

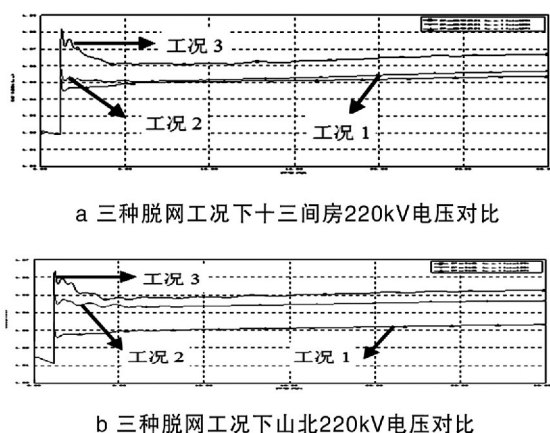


图 5 大规模风电、光伏脱网电压波动

由仿真结果图 5(a)、(b) 可知,随着新能源脱网容量的逐渐增大,母线电压的攀升幅度也依次增大。当新能源脱网 437 MW 时,十三间房 220 kV 母线电压超过 220 kV 电压上限 242 kV;随着脱网容量的逐渐加大,当脱网达到 1 040 MW 时,十三间房、麻黄沟以及山北 220 kV 母线电压幅值都已增大,并超过 242 kV 电压上限,给电网设备安全带来隐患;对比分析不同程度的脱网可知,哈密地区新能源脱网地区电网潮流较轻,充电无功增大,哈密电网 220 kV 母线电压增长幅度较大,近区 750 kV 母线电压影响较小。

### 3.4 电铁冲击负荷对电压影响

目前哈密地区中西部的 220 kV 十三间房变电站接带了 3 个牵引站(黑山牵引站、了墩牵引站、红台牵引站)。仿真时每个牵引站考虑接带 20 MW 的冲击负荷,功率因数为 0.9。负荷设置为:列车驶入时该供电段时负荷先由 0 MW 逐步上升到 20 MW,列车驶出该供电段时负荷从 20 MW 逐步下降到 0 MW。该冲击负荷下 220 kV 十三间变电站和石城子变电站电压曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,电气化铁路负荷(每个牵引站 20 MW)的变化引起该变电站电压波动约 4 kV。

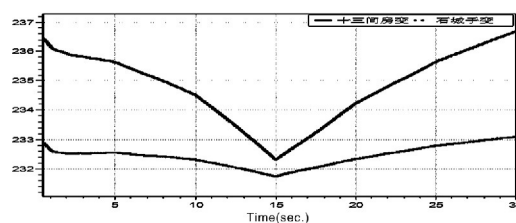


图 6 电铁冲击负荷对电压影响

### 3.5 动态无功补偿装置控制不协调对电压影响

电压波动主要取决于系统的短路容量、系统的动态补偿容量。为了适应风电出力波动对电压的影响,需要风电场配置动态无功补偿(SVC 或 SVG)并跟踪风电出力的变化进行无功调控。根据 SVC 运行情况,针对单个 SVC 和多个 SVC 运行进行仿真,仿真结果如图 7 所示。图 7(a) 所示为控制增益  $K_{SES} = 5$  时,为典型设置;图 7(b) 所示为多个 SVC 之间的协调控制时,控制增益  $K_{SES}$  远大于典型值时,引起系统振荡功率,进而引起电压的波动较大。

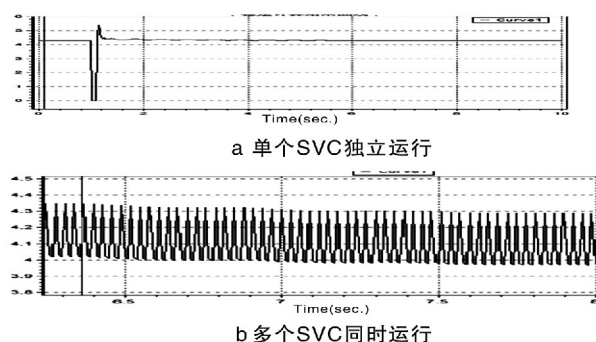


图 7 无功补偿装置控制不协调对电压影响

## 4 改善电压波动的相关措施

根据上述仿真分析可知,短路电流偏小的情况下,风电有功出力的随机波动、大规模新能源的脱网以及无功装置控制不协调极易引起高密度风电地区电压的波动。因此,可采取如下措施改善电压波动问题。

(1) 针对风电场有功随机变化对电压的影响,加强风电场有功功率控制管理,确保风电场有功每分钟变化率满足《风电场接入电网技术规定》的要求,即装机容量 30 ~ 150 MW 风电场有功功率每分钟有功变化不超过装机容量的 20%;

(2) 针对高密度风电地区短路容量偏小的问题,提高该地区短路容量,加强网架机构建设,提升哈密地区风电消纳能力;

(3) 针对动态无功补偿装置(SVC),一方面确保风电场动态无功补偿装置的可用度和动态响应能力,开展风电机组、风电场内动态无功补偿、电网无功补偿装置综合协调控制研究,统一控制策略,协调控制,避免在弱风电送端系统产生功率振荡;另一方面,开展动态无功补偿装置建模工作,通过仿真计算合理确定设置相关控制参数,将动态无功补偿装置纳入哈密地区无功电压控制综合协调系统中,实现动态无功补偿装置之间在站间、区域内的协调控制。

## 5 结 论

通过对哈密高密度风电地区无功电压影响分析,可得出如下结论。

(1) 哈密高密度风电地区由于接入大规模风电、光伏、电气化铁路,引起该地区电压波动的主要因素有风电有功出力的随机变化、规模化新能源脱网、电铁冲击性负荷及 SVC 控制不协调;

(2) 由于哈密高密度风电地区接入风电、光伏以及电气化牵引站的厂站多处于电网末端(十三间房、山北地区),网架结构较薄弱,短路电流偏小;并且在外界电压因素扰动下,由于电网调节能力有限,极易造成电压波动超限(超过 11 kV);

(3) 针对改善高密风电地区电压波动问题,一方面,由于短路电流偏小,可加强风电场有功功率控制管理,确保风电场有功每分钟变化率满足《风电场接入电网技术规定》的要求;另一方面,由于动态无功补偿装置(SVC)参数设置不合理及控制不协调,造成系统功率振荡,进而引起电压波动问题,可进一步采取仿真建模研究,确定相关合理的参数,协调多个 SVC 之间控制的同时,与哈密地区无功控制系统相协调,实现站间、区域内的电压稳定控制。

因此,针对高密度风电接入地区,分析该地区风电、光伏、电铁及动态无功补偿装置(SVC)等因素对电压的影响,对提高高密风电地区电压稳定及减小风机脱网具有一定的应用研究价值。

### 参考文献

- [1] 陈昌松,段善旭,蔡涛,等.基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J].电工技术学报,2011,26(7):83-89.
- [2] CAI Xia-wang, ZONG Xiang-lu, YING Qiao. A Consideration of the Wind Power Benefits in Day-ahead

Scheduling of Wind-coal Intensive Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1):236-245.

- [3] 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.
- [4] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等.大容量并网光伏电站技术综述[J].电力系统自动化,2011,31(12):101-107.
- [5] 张永武,孙爱民,张源超,等.风电无功补偿容量配置及优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2012,23(6):150-156.
- [6] Muhammad Jafar, Marta Molinas. A Transformer Less Series Reactive/Harmonic Compensator for Line-commutated HVDC for Grid Integration of Offshore Wind Power[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronic, 2013, 60(6):2410-2419.
- [7] Ruifeng Yan, Saha, T. K. Voltage Variation Sensitivity Analysis for Unbalanced Distribution Networks Due to Photovoltaic Power Fluctuation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2012, 27(2):1078-1089.
- [8] Yashodhn P. Agalgaonkar, Bikash C. Pal, Rabih A. Jar. Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):182-192.
- [9] 张新伟,晁勤,常喜强,等.风电场与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究[J].电力系统自动化,2011,33(1):62-65.
- [10] 赵欣,高山,张宁宇. SVC 接入位置对次同步振荡的影响机理与 SVC 控制策略研究[J].中国电机工程学报,2013,33(25):107-114.
- [11] 赵利刚,房大中,孔祥玉,等.综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):45-53.

作者简介:

常喜强(1976),高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

樊艳芳(1971),副教授、硕士生导师,研究方向为电力系统稳定与控制,微电网稳定控制研究;

钟 显(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

段天元(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

李泽燃(1988),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

张 锋(1978),工程师,研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期:2014-08-19)

一起变压器夹件多点接地故障的原因及处理

蒋一平, 许 强  
( 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 通过对一起 500 kV 变压器夹件多点接地故障进行了调查分析, 结合现场测试、现场调查指出: 此次变压器夹件多点接地故障的直接原因是由于该型号变压器夹件定位销的特殊结构, “5. 12”大地震是造成此次故障的间接原因。通过测量夹件对地绝缘电阻和夹件接地电流的在线监视可以有效地发现此类故障, 对于预防此类变压器事故的发生发挥了重要作用。

关键词: 变压器多点接地; 原因分析; 夹件对地绝缘电阻; 接地电流

**Abstract:** The multi - point earth fault of the clamping pieces of a 500 kV transformer is checked and analyzed , and based on the field test , it is pointed out that the direct reason of the multi - point earth fault of the transformer is the special structure of the location pin in the given type of the transformer , and the indirect reason is 5. 12 Wenchuan earthquake. This kind of fault can be effectively found through the measurement of insulation resistance against ground of the clamping pieces and the on - line monitoring of its grounding current , which can play an important role in preventing the similar transformer faults.

**Key words:** multi - point grounding of transformer; cause analysis; clamp insulation resistance against ground; grounding current

中图分类号: TM862 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954( 2014) 06 - 0010 - 03

0 引 言

国网四川省电力公司检修公司在对所辖 500 kV 某变电站 2 号主变压器进行年检预试, 并对 B 相铁心接地套管漏油缺陷进行处理。高压试验班在 2010 年 9 月 12 日对 B 相主变压器进行摸底试验, 试验结果合格。而在 9 月 17 日对 B 相主变压器进行例行试验时, 发现夹件对地绝缘为 0 MΩ, 其他试验项目均合格, 说明夹件存在多点接地故障。

1 现场测试

1.1 摸底试验情况

高压试验班在 9 月 12 日对 B 相主变压器进行摸底试验, 测量数据如表 1 所示。

表 1 9 月 12 日主变压器摸底试验数据

| 试验仪器                  | 环境温湿度       | 铁心绝缘电阻      | 环境温湿度       |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| 2 500 V<br>/10 000 MΩ | 5 000<br>MΩ | 5 000<br>MΩ | 26 ℃<br>64% |

随后, 对变压器放油处理 B 铁心接地套管漏油

缺陷, 于 9 月 17 日缺陷处理完成, 重新注油, 并进行热油循环。

1.2 例行试验情况

高压试验班在 2010 年 9 月 17 日对 B 相主变压器进行例行试验, 测量数据如表 2 ~ 表 6 所示。

表 2 套管绝缘试验

| 位置 | 末屏绝缘 /MΩ | tgδ/% | Cx/pF | C <sub>标准</sub> /pF | 互差 /% |
|----|----------|-------|-------|---------------------|-------|
| B  | 2 500    | 0.254 | 516   | 517                 | 0.19  |
| Bm | 2 500    | 0.292 | 455.6 | 461                 | 1.17  |
| Y  | 2 500    | 0.290 | 536.8 | 541                 | 0.78  |
| Y  | 2 500    | 0.281 | 529.9 | 533                 | 0.58  |
| B  | 2 500    | 0.281 | 535.1 | 538                 | 0.54  |

表 3 主体绝缘试验

| 位置      | 吸收比<br>( $R_{60s}/R_{15s}$ )<br>/GΩ | tgδ/% | Cx/nF | 泄露电流<br>/μA |
|---------|-------------------------------------|-------|-------|-------------|
| 高中低 - 地 | 27.8/22.8                           | 0.2   | 13.66 | 2           |
| 高中 - 低地 | 35.2/30.6                           | 0.195 | 8.807 | 19          |
| 低 - 高中地 | 49.0/31.5                           | 0.184 | 8.344 | 4           |

注: 使用仪器为 5 000 V/100 000 MΩ 电动摇表、AI - 6000F 介损测量仪、ZV - 60/5 直流发生器。

表 4 绕组直流电阻试验

| 位置                                                 |   | 直流电阻/ $\Omega$ |
|----------------------------------------------------|---|----------------|
| 高压 - 中性点 (B - Y)                                   |   | 0.173 5        |
| 中<br>压<br> <br>中<br>性<br>点<br>(B <sub>m</sub> - Y) | 1 | 0.052 03       |
|                                                    | 2 | 0.049 69       |
|                                                    | 3 | 0.047 30       |
|                                                    | 4 | 0.045 00       |
|                                                    | 5 | 0.042 63       |
| 低压侧 (b - y)                                        |   | 0.006 638      |

注: 变压器油温为 32 ℃ ,使用保定金达 3391B 直流电阻测试仪。

表 5 铁心/夹件绝缘电阻试验

| 使用仪器                            | 铁心绝缘电阻/ $M\Omega$ | 夹件绝缘电阻/ $M\Omega$ |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 2 500 V<br>/100 00 $M\Omega$ 摇表 | 5 000             | 0                 |

从表 2 ~ 表 5 中可以看出 ,除夹件绝缘电阻为 0  $M\Omega$  ,其他绝缘试验均合格 ,说明是单纯性夹件多点接地故障。

2 故障的现场处理情况

针对上述存在的故障 ,公司组织相关人员现场分析后 ,在详细了解变压器夹件结构的基础上 ,决定再次对变压器放油至顶盖下方 ,检查夹件定位销绝缘情况 ,查找故障点。

在将变压器放油之后 ,打开高压侧夹件定位销箱盖 ,其原理和结构如图 1、图 2 所示。

松开紧固螺钉 ,绝缘纸板沿定位销轴向向上方位移 3 cm ,但未发现高压侧夹件定位销绝缘纸未破损。将绝缘纸取下 ,更换新绝缘纸板后 ,进行绝缘电阻测试 ,夹件接地故障仍然存在。

再将低压侧夹件定位销箱盖打开 ,打开箱盖后 ,发现大量绝缘纸碎末 ,定位销外层白漆裸露 ,如图 3 所示 ,同时采用 2 500V/10 000  $M\Omega$  的摇表测量夹件绝缘 ,听到定位销绝缘纸破损处有放电声。

对低压侧夹件定位销绝缘纸板进行更换 ,在更换新的绝缘纸板后 ,重新测量夹件绝缘 ,测得夹件绝缘电阻为 2 000  $M\Omega$  ,注油后重新测量夹件绝缘电阻为 5 000  $M\Omega$  ,满足试验要求。

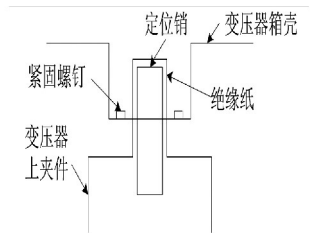


图 1 变压器夹件定位销剖面示意图



图 2 变压器夹件定位销实际情况图

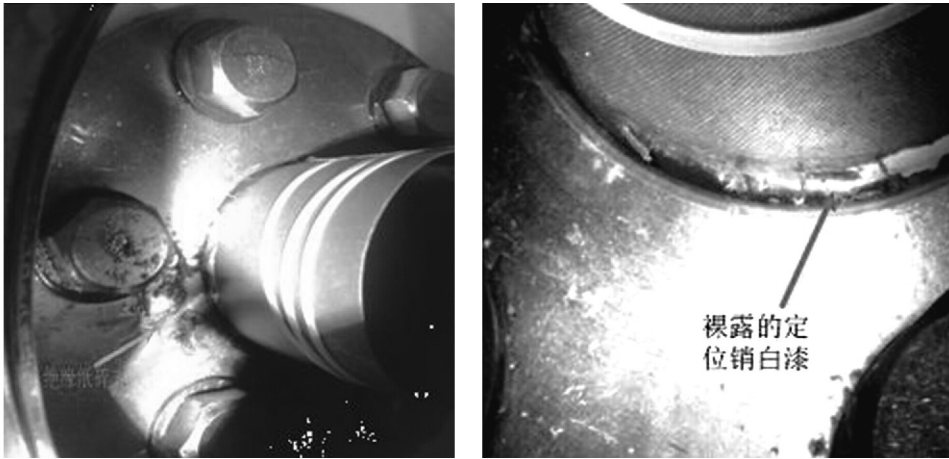


图 3 右夹件定位销绝缘纸破损情况

### 3 故障原因的分析

油浸式变压器中主要的绝缘材料是变压器油,具有良好的绝缘和散热性能。绝缘纸板主要用未经漂白的硫酸盐纤维制成,具有很强的透气性、吸油性和吸水性,未经浸油的纸的击穿强度、机械强度和耐热强度均不高;但干燥并浸油后,电气性能就大为提高。作为主绝缘的绝缘纸筒不仅能够有效阻止杂质形成“小桥”,而且能够提高油间隙的击穿电压。

在变压器正常运行中,带电的绕组和引线油箱间构成的电场为不均匀电场,铁心、夹件和其他金属构件处于该电场中,当出现两点或多点接地时,由于铁心、两个接地点之间所构成的回路与铁心内磁通相交链而产生电位差,造成环流。该环流会引起局部过热,导致油分解,产生可燃性气体,还可能使接地片熔断,产生放电,使变压器不能继续运行。

从现场分析来看,故障点的产生主要是因为低压侧夹件定位销外层绝缘纸板破损造成定位销与变压器外壳相连,产生接地点,造成夹件多点接地。而绝缘纸的破损是由于“5.12”地震,在巨大应力作用下,夹件与变压器箱盖之间相互错动,导致绝缘纸板向上位移,并直接造成低压侧绝缘纸板部分破损成纸屑。在摸底试验时,定位销上部空间变压器油由于无循环通路,几乎不参与正常运行时在潜油泵带动下的油流循环,所以绝缘纸碎末依然填塞在夹件定位销和顶盖定位法兰之间,所以在摸底试验中测得的夹件绝缘电阻为 5 000 MΩ,满足试验要求。

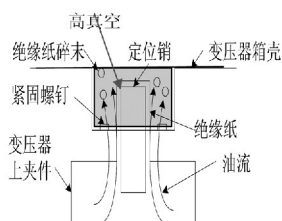


图 4 注油过程中绝缘纸碎末冲散示意图

但此次对 B 相铁心接地套管更换过程中,需要将变压器油放出,冲入干燥空气,在套管更换完成后抽真空重新注油。在重新注油过程中,由于定位销上方空间是真空,变压器油会快速通过夹件定位销处绝缘纸板缝隙填充,产生较快的油流,使得大量的绝缘纸碎末随油流带出,从而造成了夹件定位销与顶盖定位法兰盘之间直接接触,导致夹件直接接地,

如图 4 所示。

### 4 结 论

通过对故障的分析,可以看出此次夹件多点接地故障是由于“5.12”地震,造成了变压器顶盖与夹件定位销之间在应力作用下相互错动,使两者之间绝缘纸板向上位移并部分破损成纸屑,在真空注油过程中,碎屑被油流冲散,从而造成夹件定位销与变压器顶盖定位法兰相连,形成夹件多点接地故障。

此次故障的产生主要是由于“5.12”地震和变压器夹件定位销结构造成的。因此,应加强对地震影响较大地区变电站运行的常州东芝变压器厂生产的 ODFPS-334000/500 型变压器夹件接地电流的监视,如发现夹件接地电流出现增大的情况,应在停运后,首先检查夹件定位销处绝缘纸板是否破损,并进行消缺处理。

#### 参考文献

- [1] 刘庆宁. 变压器铁芯多点接地故障判断[J]. 四川电力技术, 1998(3): 25-27.
- [2] 唐芳轩. 变压器铁芯多点接地的诊断及处理[J]. 四川电力技术, 2001(2): 26-27.
- [3] 曹海. 变压器绝缘故障在线监测技术[J]. 四川电力技术, 2005(2): 47-48.
- [4] 包玉树, 王建凯. 变压器套管末屏的应用实例与分析[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 315-316.
- [5] 刘敬民, 王志源. 变压器铁芯故障处理[J]. 四川电力技术, 1994, 17(4): 55-56.
- [6] 王新国. 变压器铁芯多点接地故障的检测及临时处理[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2000, 3(2): 76-77.
- [7] 唐茂林. 变压器铁芯在线监测限流装置的应用[J]. 宁夏电力, 2009(4): 40-42.
- [8] 史广利, 杜波. 变压器检修时预知铁芯两点接地故障的检测方法[J]. 大众用电, 2007(6): 36-37.
- [9] 程显福, 王海宽, 杨衡. 变压器铁芯故障分析[J]. 东北电力技术, 2004(11): 21-22.
- [10] 查军. 变压器铁芯故障的分析及处理[J]. 高电压技术, 2002(3): 53-54.

(收稿日期: 2014-07-30)

# 一起 110 kV 主变压器中性点间隙击穿的原因分析与故障查找

李馨博 程昌奎 巫京励 陈 娇 干建伟  
( 国网成都供电公司 四川 成都 610021 )

**摘 要:** 介绍了一起 110 kV 变压器中性点间隙击穿事故, 通过故障录波分析了事故发生的原因, 并采取电气试验的方法对故障点进行定位, 缩短了故障查找时间。

**关键词:** 变压器; 中性点间隙; 故障; 分析

**Abstract:** A breakdown accident of neutral point gap in 110 kV transformer is introduced. The cause for the accident is analyzed with fault record, and the fault position is located by adopting the electrical testing method, which improve the efficiency of troubleshooting.

**Key words:** transformer; neutral point gap; fault; analysis

中图分类号: TM41 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)06-0013-03

## 0 引 言

目前, 电力系统中使用的 110 kV 变压器都是属于半绝缘变压器, 即位于中性点附近变压器绕组部分对地绝缘比其他部位弱, 中性点的绝缘容易被击穿。对于中性点装设接地刀闸和放电间隙的变压器, 根据电网运行方式, 变压器中性点可直接通过接地刀闸接地运行, 也可经间隙接地运行, 即不接地运行。在中性点不接地运行时, 配置中性点间隙零序过流零序过压保护作为主变压器的后备保护。

介绍了一起 110 kV GIS 刀闸缺相导致的主变压器中性点间隙击穿事故, 结合故障录波, 证明了中性点间隙保护动作的正确性, 并详细分析了该事故发生的原因, 通过采取电气试验的方法, 排查出故障位置, 及时对故障进行了修复, 缩短了故障处理时间。

## 1 事故描述

2012 年 12 月 8 日早上, 九河变电站进行倒闸操作, 将 2 号主变压器由 182 开关通过 130 母联开关供电倒闸至 181 开关供电时, 2 号主变压器中性点间隙发生放电, 中性点间隙过流 II 段保护动作, 跳开 181 开关和 901 开关。

### 1.1 故障前电网运行方式

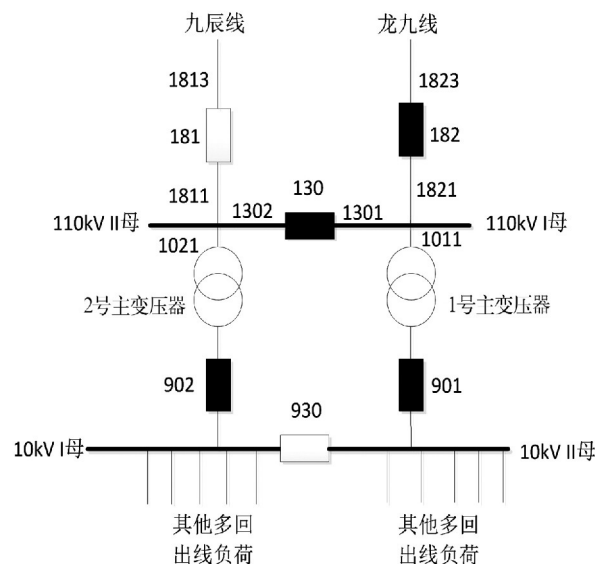


图 1 九河变电站故障前运行方式图

九河变电站为户内 GIS 变电站, 该站采用内桥式接线, 110 kV I、II 母并联运行, 全站负荷由 110 kV 龙九线 182 开关主供, 九辰线 181 开关热备用, 110 kV 备自投投入, 1、2 号主变压器分别供 10 kV I、II 段母线负荷, 930 开关热备用, 10 kV 分段备自投投入, 10 kV I 段母线和 10 kV II 段母线供多条 10 kV 出线负荷, 详见图 1。

### 1.2 事故经过

7 点 54 分 50 秒, 运维人员根据调度命令将 181

由热备用转为运行。

8 点 03 分 20 秒 ,运维人员根据调度命令将 130 开关由运行转热备用。

8 点 03 分 24 秒 2 号主变压器间隙过流 II 段保护动作( 动作电流值 5.83 A) 跳开 181、901 开关。

事故发生后 ,运维人员立即到 2 号主变压器室进行查看 ,发现 2 号主变压器中性点间隙发生严重的放电现象 ,中性点间隙铜棒被烧融了一截 ,详见图 2。

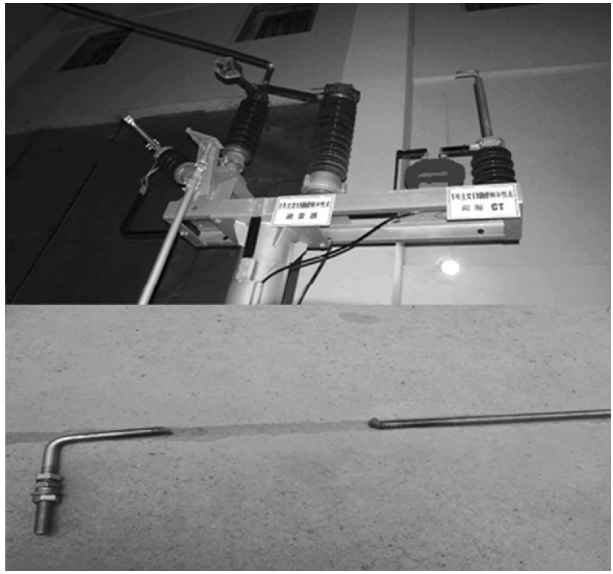


图 2 主变压器中性点放电间隙棒被烧损情况

2 原因分析与故障定位

从故障录波装置上调出故障时的电流电压波形图 ,详见图 3 和图 4。图 3 中  $2U_a$ 、 $2U_b$ 、 $2U_c$  为 110 kV II 母电压 , $4U_a$ 、 $4U_b$ 、 $4U_c$  为 10 kV II 母电压 ,由于九河站 110 kV I、II 母线上无 TV ,其母线电压的监测来自线路 TV ,从图 3 中看出 ,故障前后 ,110 kV II 母电压皆正常 ,但 10 kV II 母电压在故障时明显发生畸变 ,C 相电压在故障录波启动( 0 ms) 时刻 ,变为 0 ,A、B 相电压相序反向 ,电压峰值稍有降低; 902 开关 TA 电流值在 0 ms 时刻也发生变化 ,A、B 相电流出现反向 ,C 相电流几乎为 0; 181 开关 B 相在 0 ms 前无电流 ,在 0 ms 时出现反向的电流。图 4 为故障持续时间内的录波图 ,从图中可以看出故障持续 3 s ,随后故障消失 ,此刻 2 号主变压器跳闸 ,退出运行。

根据故障录波分析可知 ,此次故障是由于变压器缺相运行 ,三相电压不平衡 ,中性点电压被抬高 ,超过中性点间隙的击穿电压( 110 kV 变压器的中性

点间隙调整距离为 140 mm 左右 ,击穿电压为 60 kV 左右) ,使中性点间隙被击穿。



图 3 故障开始时的录波图

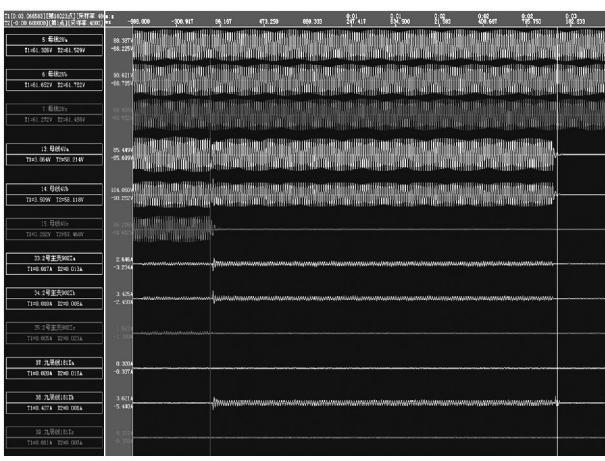


图 4 故障持续 3 s 内的录波图

2.1 缺相原因查找

故障发生后 ,检修人员对变压器、GIS 设备依次进行了诊断试验 ,对故障点进行查找定位。

(1) 变压器试验情况

变压器型号为 SFZ10 - 63000/110 ,出厂日期 2012 年 4 月 ,厂家为正泰变压器厂 ,故障时变压器运行在 5 档 ,对 2 号主变压器进行了诊断试验 ,主要包括变压器空载试验和绕组直流电阻测试 ,试验数据详见表 1 和表 2。

表 1 变压器空载试验数据(5 档)

| 加压 | 短路 | 试验电压 /kV | 空载电流 /mA | 空载损耗 /W |
|----|----|----------|----------|---------|
| AB | CO | 20       | 32.0     | 375     |
| BC | AO | 20       | 32.0     | 375     |
| AC | BO | 20       | 45.0     | 550     |

表 2 变压器绕组直流电阻试验数据

| ( 高压线圈变温: 38℃) |           |           |           |              |
|----------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 分接位置           | AO/Ω      | BO/Ω      | CO/Ω      | 相间不平衡度<br>/% |
| 1              | 0.504 2   | 0.506 9   | 0.506 5   | 0.53         |
| 2              | 0.497 2   | 0.499 9   | 0.499 3   | 0.54         |
| 3              | 0.490 2   | 0.493 1   | 0.492 7   | 0.59         |
| 4              | 0.483 3   | 0.486 3   | 0.485 5   | 0.62         |
| 5              | 0.476 4   | 0.479 3   | 0.478 6   | 0.61         |
| 6              | 0.469 4   | 0.472 3   | 0.471 7   | 0.62         |
| 7              | 0.462 5   | 0.465 4   | 0.464 8   | 0.62         |
| 8              | 0.455 5   | 0.458 5   | 0.458 0   | 0.66         |
| 9b             | 0.447 3   | 0.450 0   | 0.449 1   | 0.60         |
| 10             | 0.455 7   | 0.458 9   | 0.458 1   | 0.70         |
| 17             | 0.505 1   | 0.508 0   | 0.507 2   | 0.57         |
| 低压线圈           |           |           |           |              |
| ab             | bc        | ca        | 线间不平衡度 /% |              |
| 0.006 384      | 0.006 365 | 0.006 390 | 0.39      |              |

根据测得的变压器空载试验数据和直流电阻试验数据,未发现绕组内部存在断线和短路的故障,表明变压器无明显故障,运行正常。

(2) GIS 试验情况

GIS 设备型号为 120-SFMT-32CA,厂家为西电三菱电机厂,出厂日期为 1997 年 5 月,投运日期为 1997 年 9 月。对 110 kV II 母所属间隔设备的气室进行了 SF<sub>6</sub> 分解产物测试,开关刀闸回路电阻测试,开关机械特性测试,试验结果见表 3~表 5。

表 3 开关刀闸气室 SF<sub>6</sub> 分解产物

| 气室   | SF <sub>6</sub> 气体分解产物含量/(μL·L <sup>-1</sup> ) |                                    |     | 结论 |
|------|------------------------------------------------|------------------------------------|-----|----|
|      | CO                                             | SO <sub>2</sub> + SFO <sub>2</sub> | HF  |    |
| 1021 | 0.7                                            | 0                                  | 0   | 正常 |
| 1302 | 1.0                                            | 0                                  | 0   | 正常 |
| 1811 | 0.8                                            | 0                                  | 0   | 正常 |
| 1813 | 0.2                                            | 0                                  | 0   | 正常 |
| 181  | 5.2                                            | 0.5                                | 0.1 | 正常 |
| 130  | 9.1                                            | 0.7                                | 0.2 | 正常 |

表 3 所示为 GIS 各个气室的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物,试验结果表明 SF<sub>6</sub> 气体组分正常,GIS 各气室内未发生明显的放弧痕迹。表 4 所示为刀闸和开关的回路电阻测试值,1813 刀闸的回路电阻值 A、C 相

显示无穷大,表明 1813 刀闸内部存在故障,没有合上。表 5 所示为 181 和 130 开关的分合闸时间,分合闸时间值皆为正常范围内,表明开关设备运行正常。

表 4 110 kV II 母所属开关设备回路电阻

| 刀闸   | 回路电阻/μΩ |     |     |
|------|---------|-----|-----|
|      | A       | B   | C   |
| 1021 | 152     | 147 | 169 |
| 1302 | 134     | 142 | 145 |
| 1811 | 168     | 157 | 147 |
| 1813 | ∞       | 142 | ∞   |
| 181  | 67      | 59  | 62  |
| 130  | 54      | 51  | 49  |

表 5 开关的分合闸时间

| 断路器 |    | 分合闸时间/ms |    |    |
|-----|----|----------|----|----|
|     |    | A        | B  | C  |
| 181 | 合闸 | 58       | 58 | 57 |
|     | 分闸 | 41       | 40 | 41 |
| 130 | 合闸 | 56       | 55 | 56 |
|     | 分闸 | 42       | 43 | 42 |

2.2 缺相原因

从试验结果判断出故障点出现在 1813 刀闸,随后检修人员打开 1813 刀闸气室顶盖,发现 1813 刀闸三相合闸不一致,B 相刀闸合闸到位,而 A、C 未合闸到位,见图 5。

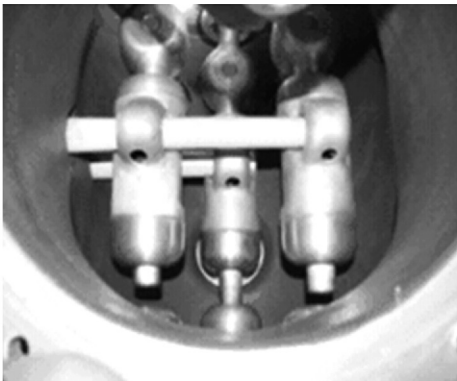


图 5 1813 刀闸 AC 相合闸不到位

1813 刀闸气动机构箱采用的两根传动轴带动动触头进行分合闸,B 相用一根传动轴,A、C 相共用一根传动轴,传动轴通过连接叉条拐臂使动触头进行分合闸。由于该叉条拐臂在当时制作过程中工艺控制不严格,叉条拐臂与传动轴在尺寸上存在正公差,配合不紧密,再加上气动机构分、合闸对罐内导

(下转第 39 页)

- [3] 赵清. “状态检修 + 大检修”管理模式的必要性研究 [C]. 2012 年全国电网企业设备状态检修技术交流研讨会论文集 2012.
- [4] 国家电网公司生产技术部. 国家电网公司设备状态检修规章制度和技术标准汇编 [M]. 北京: 中国电力出版社 2008.
- [5] 吴晓晖, 甘德刚, 王红梅 等. 四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设与应用 [J]. 四川电力技术, 2012, 35(5): 64 - 67.
- [6] 四川省电力公司. 四川省电力公司输变电设备状态检

修试验规程实施细则(试行) [Z]. 2009.

- [7] 谷月雁, 司刚, 刘清瑞. 智能变电站中顺序控制的功能分析与实现 [J]. 电气技术 2011(1): 58 - 62.

作者简介:

杜仁杰(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统变电运维管理工作;

郑雨欣(1986), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统变电运维技术工作;

聂雅卓(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统变电运维技术工作。  
(收稿日期: 2014 - 09 - 16)

(上接第 15 页)

体冲击较大, 经过十多年来多次操作, 紧固叉条拐臂的螺栓发生松动且磨损严重并发生变形, 见图 6 所示。图 7 为叉条拐臂与传动轴相互摩擦磨损, 配合不紧密的照片。



图 6 动触头传动轴件磨损情况

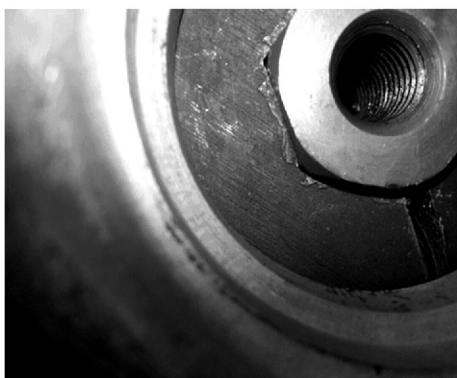


图 7 叉条拐臂与传动轴摩擦变形图

通过以上分析可知, 1813 刀闸 A、C 相刀闸共用一根传动轴, 该传动轴与叉条拐臂存在磨损, 配合不紧密, 紧固螺栓出现松动。当 1813 刀闸进行合闸时, 因 A、C 相传动轴未能固定住 A、C 相叉条拐臂, 在进行传动时未能可靠带动动触头合闸, 使得 A、C 相刀闸动触头处于半分半合的状态, 导致了 1813 刀闸处于缺相运行的状态。

### 3 故障处理

在找到故障点后, 在厂家的协助下, 检修人员更换了 1813 刀闸 A、C 相拐臂叉条和传动轴, 经过多次传动试验, 确保了 1813 刀闸能可靠分闸, 同时对 2 号主变压器的中性点间隙铜棒进行更换, 及时恢复了送电。

由于九河站 GIS 运行了 15 年, 到了中期检修的阶段, 为了防止该类刀闸再次出现此类故障, 随后检修人员对全站 GIS 刀闸的拐臂叉条都进行了检查, 发现其 1301、1021 刀闸传动轴内部已出现部分螺栓松动、拐臂等配件存在磨损, 都进行了相应的更换与紧固处理。

### 4 结 论

(1) 变压器高压侧 A、C 相缺相运行时, 中性点电压会抬高, 间隙会发生击穿, 通过设置中性点间隙过流保护能有效的保护变压器。

(2) 当电气设备发生故障时, 可通过故障录波分析得出故障的原因, 并通过高压化学试验等技术监督手段对故障进行查找, 缩短故障查找时间, 提高了效率。

(3) 国内运行了 15 年以上的 GIS 到了中期检修的期限, 部分传动件可能会出现松动和变形, 应对其进行开罐检查, 及早发现并及时处理事故隐患。

作者简介:

李馨博(1985), 工程师, 主要从事变电检修的技术工作;

程昌奎(1983), 工程师, 主要从事变电设备检修管理工作。

(收稿日期: 2014 - 09 - 01)

# 检测桥电阻对直流电源系统安全运行的影响分析

李 晶, 罗 洋, 陈轲娜

( 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 变电站采用两套独立运行的直流电源系统, 提高了站用电系统的可靠性, 但实际运行中一些不当因素会使两段直流母线发生互串。微型绝缘监测装置不仅提高了接地故障的监测能力, 而且还能进行直流互串检测。探讨了微型绝缘监测装置的检测桥电阻值选取, 同时还对直流互串时检测桥电阻对直流电源系统运行状态的影响作了仿真分析, 为检测桥电阻的选择提供了参考。

**关键词:** 直流电源系统; 绝缘监测装置; 直流互串; 检测桥电阻

**Abstract:** It can improve the reliability of the auxiliary power system for substations by using two independent DC power systems. However, some factors in the actual operation will make the two DC buses occur DC crosstalk. The monitoring ability of the grounding fault is improved by microcomputer insulation monitor, and the DC crosstalk is also detected by the device. The selection criteria of the detecting bridge resistor for microcomputer insulation monitor are discussed. Meanwhile, a simulation analysis on the influence of detecting bridge resistor on the safe operation of DC power system is carried out during DC crosstalk, which provides a reference for the selection of detecting bridge resistor.

**Key words:** DC power system; insulation monitor; DC crosstalk; detecting bridge resistor

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0016-04

## 0 引 言

变电站直流电源系统是站用电系统的重要组成部分, 而直流电源系统绝缘监测仪作为监测直流电源系统绝缘状态的专用装置, 对直流电源系统正负极接地、系统外电源串入等故障造成的电压异常进行监测和告警<sup>[1-3]</sup>。然而, 由于直流电源系统绝缘监测仪技术规范的长期缺失, 造成目前在运的大部分直流电源系统绝缘监测装置与国家电网公司企业标准 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》的要求存在较大差距。其中, 该企业标准明确规定了微型绝缘监测装置中检测桥对直流电源系统直流电压的影响范围和对直流互串故障的查找能力。因此, 确定检测桥中平衡桥电阻值和不平衡桥电阻值的合理范围, 并开展直流互串下的微型绝缘监测装置运行分析就显得尤为关键。

这里探讨了变电站双套直流电源系统的平衡桥电阻和不平衡桥电阻的选取, 并仿真分析了发生直流互串时绝缘监测装置的运行情况, 为检测电阻的

选择提供了参考。

## 1 站用直流电源系统中直流互串问题

变电站双套直流电源系统的直流母线正常时, 均采用母线分段运行方式。在系统需要时, 也可合上两段直流母线间的联络刀闸成为并列运行方式, 即 I 段母线的正、负极分别与 II 段母线的正、负极对应相连。而直流互串是指一段直流母线一极与另一段直流母线一极出现非正常联接, 两段直流母线的剩余一极并不相连的情况, 典型直流互串有共正(负)极和异极相连两种情况<sup>[4]</sup>。直流互串不仅会造成变电站两段直流母线的正、负极对地电压及其绝缘状况发生变化, 若此时直流电源系统中再出现接地故障, 必将给直流电源系统带来巨大的安全问题。

据调查分析, 产生直流电源系统直流互串的原因主要有<sup>[5]</sup>以下 3 点。

① 在新建、扩建或技术改造的施工过程中, 将负荷的电源线分别接入两段直流母线。

② 在倒负荷操作时, 将某些负荷从一段母线转

移到另一段母线后,未将其原来的一路空气开关断开,致使两套直流电源系统并列运行。

③ 老旧站由绝缘性能下降或外力等因素电缆芯线间的绝缘,造成同一根电缆中有两套直流电源系统的供电回路相连。

## 2 绝缘监测装置的基本工作原理

目前,在电力系统中广泛应用的微机型绝缘监测装置的工作原理如图 1 所示。其主要由平衡桥检测电阻  $R$ 、不平衡桥检测电阻  $R_s$ 、直流电源系统正极对地绝缘电阻  $R_z$ 、直流电源系统负极对地绝缘电阻  $R_f$ 、采用计算电路模块、通信电路模块等构成<sup>[6]</sup>。

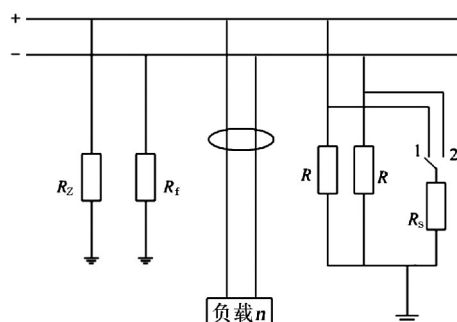


图 1 微机型绝缘监测装置原理图

装置分别处于平衡桥或不平衡桥运行方式<sup>[7]</sup>。平衡桥运行方式下,不平衡桥电阻  $R_s$  不投入,平衡桥电阻  $R$  运行。而不平衡桥的运行是通过手动或定期自动投入不平衡桥实现的,主要是为了检测平衡桥运行方式下无法发现的正、负两极绝缘等值接地故障,由不平衡桥运行下正、负极对地电压,从而计算出正、负极对地绝缘电阻值。

## 3 直流互串下的仿真分析

(1) 单套绝缘监测装置平衡桥电阻  $R$  与不平衡桥电阻  $R_s$  的选择

带有一套微机型绝缘监测装置的直流电源系统等值电路如图 2 所示,图中  $V_{DC1}$  为蓄电池组电压, $R$  为平衡桥电阻, $R_s$  为不平衡桥电阻,直流电源系统正负极对地绝缘电阻分别为  $R_{z1}$  和  $R_{f1}$ ,这里只讨论 220 V 的直流电源系统。

根据国家电网公司 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》要求,当 220 V 直流电源系统一极(正极或负极)绝缘处于良好状

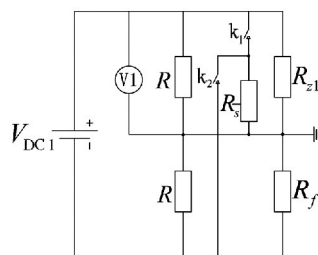


图 2 带绝缘监测装置的直流电源系统等值电路图

态,另一极绝缘降低到预警整定值 100 kΩ 时,平衡桥引起的直流对地电压偏移不得超过 10 V。同时,平衡桥电阻值  $R$  应大于直流电源系统的报警整定值 25 kΩ。设正极对地绝缘下降到预警整定值 100 kΩ,有  $R_{z1} = 100 \text{ k}\Omega < R_{f1}$ ,则直流电源系统正极对地电压偏移为

$$\left| 110 - V_{DC1} \cdot \frac{RR_{z1} + R_{z1}R_{f1}}{R(R_{z1} + R_{f1}) + 2R_{z1}R_{f1}} \right| \leq 10 \quad (1)$$

将  $V_{DC1} = 220 \text{ V}$ ,  $R_{z1} = 100 \text{ k}\Omega$  带入式(1),可推导出平衡桥电阻值  $R$  的范围为

$$25 \text{ k}\Omega < R \leq \frac{1}{\frac{1}{20} - \frac{6}{R_{f1}}} \text{ k}\Omega \quad (2)$$

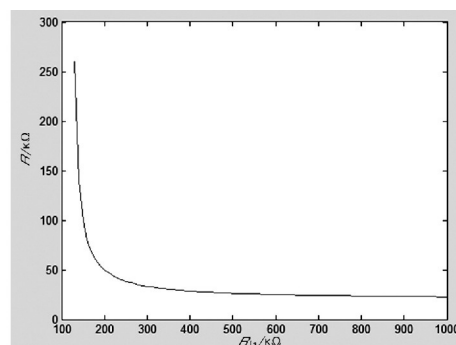


图 3  $R$  与  $R_{f1}$  的关系图

根据式(2),随着直流电源系统负极对地绝缘电阻  $R_{f1}$  的变化,为了满足电压偏移的要求,其平衡桥电阻值  $R$  应满足如图 3 所示曲线。由图可知,直流电源系统负极对地绝缘电阻  $R_{f1}$  越大,则要求平衡桥电阻  $R$  越小,电压偏移也越小。但实际监测中,若平衡桥电阻  $R$  过小,又将直接影响系统的检测灵敏度。

当 220 V 直流电源系统一极(正极或负极)绝缘降低到接地电阻报警限值 25 kΩ 时,投切不平衡桥电阻  $R_s$  引起的直流对地电压波动不得超过 22 V。设正极对地绝缘下降到接地电阻报警限值 25 kΩ,有  $R_{z1} = 25 \text{ k}\Omega$ ,合上开关  $k_1$  将不平衡桥电阻  $R_s$  投入正极,则直流电源系统正极对地电压波动的计算

公式为

$$\left| V_{DC1} \cdot \frac{RR_{z1} + R_{z1}R_{f1}}{R(R_{z1} + R_{f1}) + 2R_{z1}R_{f1}} - V_{DC1} \cdot \frac{R^2(R_{z1}R_s + R_{f1}R_s + R_{z1}R_{f1}) + 2RR_{z1}R_{f1}R_s}{(R + R_{f1}) \cdot (RR_s + RR_{z1} + R_{z1}R_s)} \right| \leq 22 \quad (3)$$

## (2) 两段直流电源系统共正极或共负极运行

两段直流电源系统共正极或共负极运行,往往是误接线或电缆绝缘下降造成的,若此时其中一段直流电源系统再发生接地故障,必将导致整个系统接地。两段直流电源系统共正极的等值电路如图 4 所示。

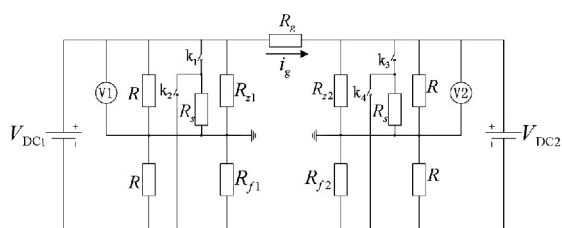


图 4 两套绝缘监测装置共正极的等值电路图

如图 4 所示,设直流电源系统中  $V_{DC1} = V_{DC2} = 220 \text{ V}$ ,  $R$  为  $25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_s$  为  $120 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g$  为两套直流电源系统互串电路的等值电阻。两套直流电源系统正负极对地绝缘良好,系统正常运行  $0.5 \text{ s}$  后发生共正极互串,并在故障发生  $0.5 \text{ s}$  后,每  $0.5 \text{ s}$  交替投入第一套直流电源系统的不平衡桥电阻至正极和负极。设互串电路的等值电阻  $R_g$  分别为  $1 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \text{ k}\Omega$ ,其  $V_1$ 、 $V_2$  的仿真电压波形见图 5。

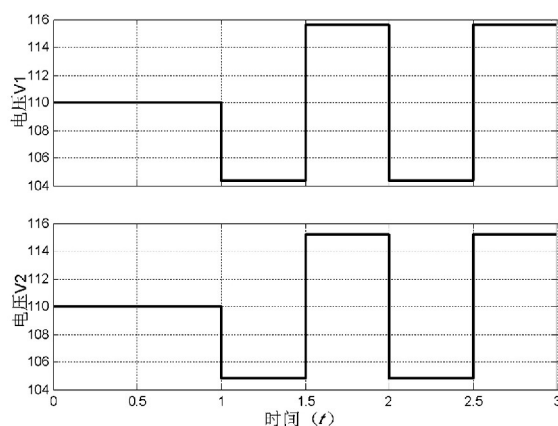
由图 5 可知,共正极互串并不会引起绝缘良好的直流电源系统出现电压偏移,不平衡桥电阻的投入使得电压出现波动,互串电路等值电阻越大,则电压波动越明显。

## (3) 一段直流电源系统正极与另一段直流电源系统负极互串

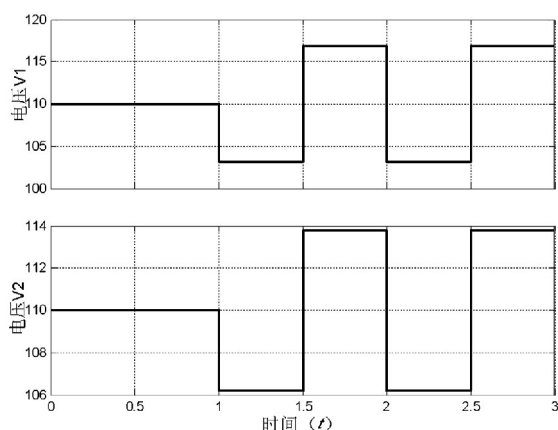
一段直流电源系统正极与另一段直流电源系统负极互串,往往是直流电源系统在改造中接线错误等人为因素造成的,这时直流电压将出现较大偏移。两段直流电源系统正负极互串的等值电路如图 6 所示。

设两套直流电源系统正、负极对地绝缘良好,系统正常运行  $0.5 \text{ s}$  后发生正、负极互串,并在故障发生  $0.5 \text{ s}$  后,每  $0.5 \text{ s}$  交替投入第一套直流电源系统的不平衡桥电阻至正极和负极。设互串电路的等值

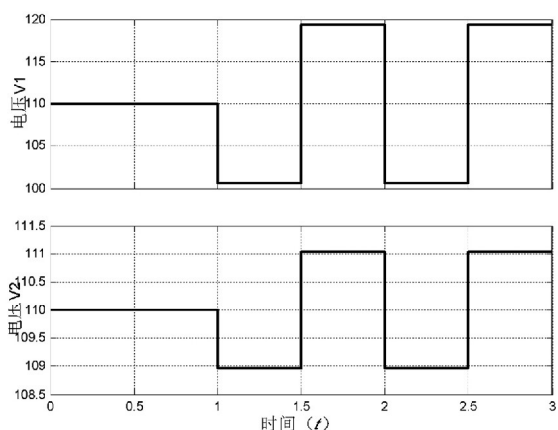
电阻  $R_g$  分别为  $1 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \text{ k}\Omega$ ,其  $V_1$ 、 $V_2$  的仿真电压波形见图 7。



(a) 等值电阻  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$



(b) 等效电阻  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$



(c) 等值电阻  $R_g = 100 \text{ k}\Omega$

图 5 共正极互串下的电压波形图

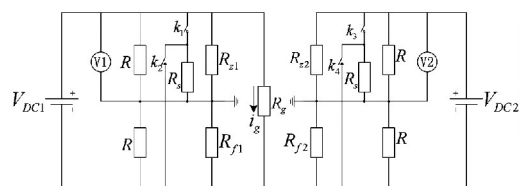
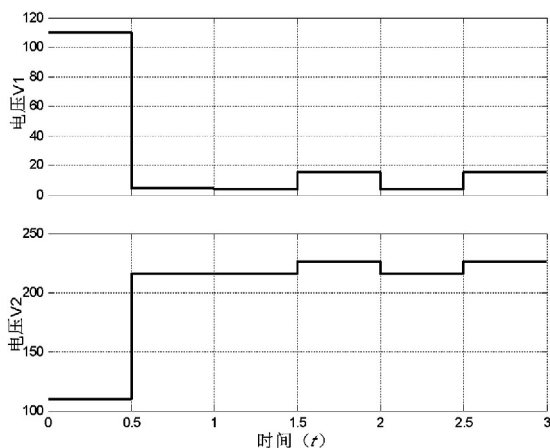
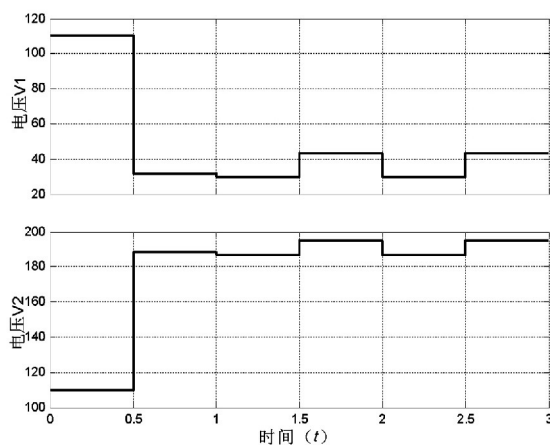


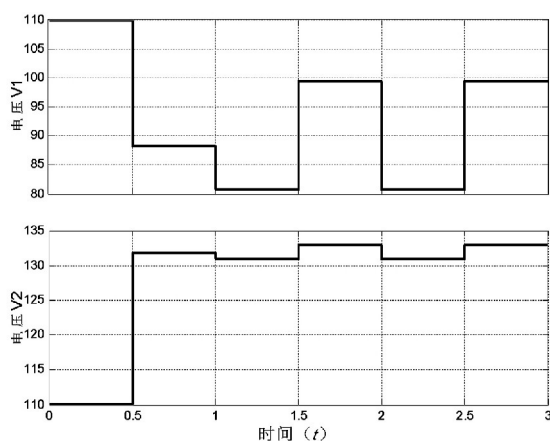
图 6 两段直流电源系统正负极互串的等值电路图



(a) 等值电阻  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$



(b) 等值电阻  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$



(c) 等值电阻  $R_g = 100 \text{ k}\Omega$

图 7 正负极互串下的电压波形图

由图 7 可知,正、负互串将直接引起绝缘良好的直流电源系统出现电压偏移,互串电路等值电阻越小,电压偏移越大。不平衡桥电阻的投入使电压出现波动,互串电路等值电阻越大,则电压波动越明显。

由图 5、图 7 可见,双套直流电源系统的两段直流母线绝缘监测宜采用一台绝缘监测装置监测两段母线或采用具备交互信息、协调控制功能的两台绝缘监测装置,实现在系统出现直流互串时避免投切不平衡桥电阻,以减少电压波动。

### 3 结 论

依据对微机型绝缘监测装置检测电阻安全性验证研究,从降低直流母线电压偏移和波动范围的角度,对装置的平衡桥检测电阻和不平衡桥检测电阻值的选择进行分析。同时,针对直流电源系统直流互串的问题,分别对共正极和正负极互串两种方式进行了仿真研究,探讨了互串电路等值电阻对直流母线电压偏移和波动的影响,为微机型绝缘监测装置的运行和参数选择提供了参考。

#### 参考文献

- [1] 赵梦欣,陈国峰,余成伟. 直流电源系统绝缘监测的直流漏电流改进方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 83-88.
- [2] 李瑞平,温泉. 直流系统接地故障的分析[J]. 华电技术, 2008, 30(2): 58-61.
- [3] 徐卫,李晶. 加强直流电源系统运行维护和专业管理[J]. 电源技术应用, 2007(3): 84-85.
- [4] 赵兵,胡玉岚. 直流系统微机型绝缘监察装置问题的探讨[J]. 广东电力, 2007, 22(4): 43-45.
- [5] 罗志平,熊迪,谢智超,等. 变电站直流系统存在的环网问题及解决办法[J]. 继电器, 2008, 36(3): 71-74.
- [6] 赵兵,张曼诗,徐玉凤. 直流系统微机型绝缘监察装置电阻选择的依据[J]. 中国新技术产品, 2009(23): 160-161.
- [7] 孙鸣,马娟. 直流系统微机型绝缘监测装置电阻选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 128-131.

(收稿日期: 2014-08-29)

# 10 kV 架空绝缘导线防雷击断线措施研究

朱世东, 黄飞龙

( 国网成都供电公司, 四川 成都 615000)

**摘 要:** 架空绝缘导线在配电网中应用广泛且已成为主流。但在其实际运行中, 雷击绝缘导线后断线概率较高, 因此, 探究行之有效的绝缘线防雷措施对促进配电网的健康发展具有非常重要的意义。通过对所在单位 2010—2013 年 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数进行统计分析, 印证了采用绝缘子改造、变电站改用中性点经消弧线圈接地运行方式以及在绝缘导线上加装防雷金具三种方式对架空绝缘导线防雷的有效性, 所提措施具有有效的推广实用价值。

**关键词:** 绝缘导线; 耐雷水平; 建弧率; 灼烧路径; 防雷措施

**Abstract:** Overhead insulated conductors are widely applied in the distribution network and has become the mainstream. But in the actual operation, the breakage of insulated conductors caused by lightning stroke has a higher probability. Therefore, to explore the effective protection measures against lightning for insulated wires has a very important significance for promoting the healthy development of the distribution network. A statistical analysis is carried out for the times of lightning trip-out of 10 kV distribution network from 2010 to 2013. The effectiveness of three ways are confirmed for the lightning protection, that is, transforming the insulators, using neutral ground via arc extinguishing coil in substation and mounting lightning fittings in insulating conductors. The proposed protection measures against lightning for overhead insulated conductors have the effective practical value.

**Key words:** insulated conductor; lightning withstanding level; arc over rate; burning path; protection measures against lightning

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0020-04

## 0 引 言

10 kV 架空绝缘导线与裸导线相比, 因绝缘性能提升, 线路相间安全距离缩短, 可通过增加同杆架设线路回路的方式有效提高线路走廊利用率。同时, 绝缘导线还可有效缓解城市化中的线树矛盾, 减少环境污秽对导线的直接影响, 降低线路接地故障率和运维人员工作量。与电缆相比, 又具有投资省、建设快的经济优势, 因此在配电网建设中广泛使用架空绝缘导线已成为主要发展方向<sup>[1]</sup>。但在实际运行中, 绝缘导线遭受雷击的可能性不比裸导线少, 且雷击绝缘导线后断线概率较高, 故障查找和恢复困难, 不利于供电可靠性的提升。同时, 绝缘导线断线后不一定会引起保护动作, 在此情况下掉落的导线极易造成人身触电伤害和公众财产损失。因此, 探究行之有效的绝缘线防雷措施对促进配电网的健康发展具有非常重要的意义。

## 1 绝缘导线雷击断线原因分析

当雷击导线或线路附近时, 直击雷或感应雷过电压作用于导线, 若该电压超过线路的耐雷水平, 将导致线路绝缘发生冲击闪络<sup>[2]</sup>。雷电过电压的持续时间很短, 通常情况下只有几十微秒, 此时若闪络电弧熄灭, 则线路绝缘恢复, 不会造成严重影响。但闪络发生后, 弧道内因有游离电子的存在, 通常情况下容易在工频电压作用下于闪络通道内持续流过短路电流, 即形成工频短路电弧, 该电弧的弧根温度达到数千摄氏度。对于裸导线, 电弧在电磁力的作用下, 弧根沿导线表面不断滑移, 在严重灼伤导线或绝缘子前, 断路器动作, 电弧被切断。而对于绝缘线, 因受周围绝缘的阻凝, 电弧只能在闪络位置处(对于绝缘导线该位置呈针孔状)持续燃烧, 能量集中于一点。铝材在高温下强度低、塑性差、易产生裂纹, 因此导线在自身拉力和电弧电磁力的多重作用

下将在极短的时间内发生断线。

## 2 绝缘导线防雷击断线措施分析

根据上述架空绝缘导线线路雷击断线机理分析可以看出,防雷击断线措施可考虑以下三方面:一是提升线路本身的耐雷水平,防止线路绝缘子等发生冲击闪络;二是降低冲击闪络发生后的建弧率,遏制工频短路电弧的产生;三是改变电弧的灼烧路径,使其至少不集中于一点灼烧导线。

### 2.1 提升线路耐雷水平

当雷电过电压超过线路绝缘子 50% 放电电压时,绝缘子将发生闪络。而架空导线上的雷电过电压与线路高度、雷击点与线路的距离、雷电参数、杆塔型式、高度和接地电阻等有关。提升线路耐雷水平,一是可采取增加绝缘子片数、更换绝缘子型号(如将瓷绝缘子更换为硅橡胶复合绝缘子等)、改善绝缘子性能等方式提升绝缘子 50% 放电电压,并可通过将裸导线更换成为绝缘导线、在导线与绝缘子之间增加绝缘皮、将铁横担更换为绝缘横担等方式增加线路的绝缘水平;二是可以通过架设避雷线、加装避雷器、降低杆塔高度、改善杆塔接地电阻等方式降低导线上的雷电过电压,避免绝缘子发生闪络。

架设避雷线和加装避雷器均是希望借助避雷线和避雷器的对雷电流的分流作用,降低杆塔与导线之间的电位差,确保其小于绝缘子 50% 放电电压而保护绝缘子不发生闪络。避雷线对导线有屏蔽和耦合作用,可以有效降低导线的感应过电压<sup>[3]</sup>。但因 10 kV 线路本身绝缘水平设计较低,架设避雷线后线路感应过电压仍易导致绝缘子闪络,防护效果没有高电压等级的线路防护效果好,因此除在直击雷频繁的区域可选择架设避雷线外,一般原则上不采用。

相对来讲,安装避雷器是比较好的防雷措施。线路避雷器并联在绝缘子附近,当线路上的过电压超过避雷器的放电电压时,避雷器先行放电,加在绝缘子上的电压始终被限制在避雷器的残压范围,可有效防止绝缘子发生闪络,雷电流过后避雷器还能限制工频短路电弧的产生,因此其具有优越的保护性能。但避雷器的保护范围仅为装设避雷器的当基杆塔,全线使用建设成本较高,且避雷器本体长期工作在运行电压下,加上雷击时的过电压冲击,容易发

生老化并且不易被察觉,运行维护难度较高。为弥补上述不足,出现了带外间隙的氧化锌避雷器,亦称线路过电压保护器(如图 1 所示)。

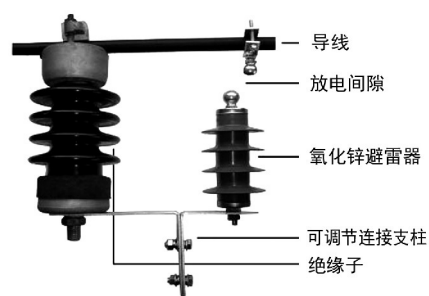


图 1 线路过电压保护器示意图

避雷器只有在一定幅值的雷电过电压作用下串联间隙击穿后才处于工作状态,正常运行时不承受工频电压,且因并联了放电间隙,其绝缘外套的爬电距离可以有所减小,即可减少避雷器的阀片数量,降低造价。因串联间隙的隔离作用,即使避雷器电阻片劣化,也不至于影响线路的正常运行,工作可靠性较高。但在实际应用中,因避雷器需要接地良好,敷设接地体不仅增加额外成本而且在很多场合难于实现,限制了线路过电压保护器的应用范围。

此外,适当考虑降低杆塔高度亦是降低雷电过电压的有效方式。根据规程 DL/T 620 - 1997<sup>[4]</sup>,在距架空线路 > 65 m 处,雷云对地放电时,线路上产生的感应过电压最大值可按下列式计算。

$$U_i \approx 25 \frac{I h_c}{s}$$

式中,  $U_i$  为雷击大地时感应过电压最大值, kV;  $I$  为雷电流幅值, kA;  $h_c$  导线平均高度, m;  $s$  为雷击点与线路的距离, m。

可见,导线的感应过电压与杆塔高度密切相关,有学者研究表明,在同等条件下,12 m 的杆塔雷击跳闸率较 15 m 的杆塔相比可以下降 11%<sup>[5]</sup>。

### 2.2 降低绝缘子闪络后的建弧率

线路绝缘发生冲击闪络后形成的工频短路电弧是导致架空绝缘导线雷击断线的根本原因。工频短路电弧的产生与系统运行方式和闪络路径密切相关。

工频短路电弧的建立很大程度上依赖于系统电容电流的大小。当线路绝缘子在雷击闪络后,若系统的电容电流大于绝缘子的自然熄弧值,则会形成持续的工频短路电弧。工频短路电弧的持续燃烧不仅会造成绝缘导线断线,还因其对周围空气存在电

离作用,降低空气间隙的绝缘强度,容易使故障发展为相间短路和多回线短路,造成线路跳闸。因此在配电网中采用中性点经消弧线圈接地运行方式,对电网电容电流进行实时检测和调整补偿,使补偿后的电容电流小于绝缘子的自然熄弧值,将是控制配电网雷击绝缘子闪络后建弧率的良好方式<sup>[6]</sup>。

另一方面,通过增长闪络后的电弧放弧路径也是降低工频短路电弧建弧率的有效措施。俄罗斯国家电力公司就提出可以在横担上安装一 U 形绝缘棒。在 U 形绝缘棒头部将绝缘剥开,使 U 形绝缘棒头部与导线之间空气间隙的冲击放电电压比绝缘子 50% 放电电压低,当线路上出现雷电过电压时,此间隙先于绝缘子击穿闪络,闪络路径由此段间隙与绝缘棒构成,当闪络路径长度增至足够长时,就可阻止工频续流建弧。但此种方式存在间隙选择即绝缘配合难度大且不利于同杆多回线路的架设,因此应用范围有限。

### 2.3 改变电弧的灼烧路径

绝缘导线断线的原因主要是短路电弧只能集中于一点持续灼烧,因此如果能够改变电弧的灼烧路径,则绝缘导线的断线概率将大大降低。基于此,出现了用于改变电弧路径的放电线夹,亦称防弧(雷)金具,其安装示意图如图 2 所示。

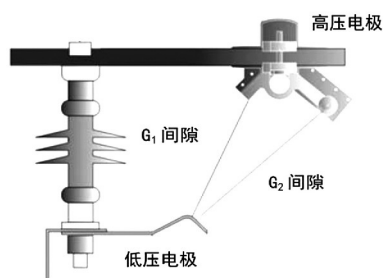


图 2 防弧金具安装示意图

其工作原理为高压电极与低压电极构成  $G_1$ 、 $G_2$  两个间隙,其中  $G_1$  为雷电放电间隙, $G_2$  为工频电弧燃烧间隙。在雷电冲击过电压的作用下, $G_1$  间隙首先放电,冲击放电后形成的工频短路电弧在电磁力的作用下由  $G_1$  迅速移动至  $G_2$  间隙上燃烧,从而保护了绝缘导线免于断线<sup>[7]</sup>。从放电线夹的工作原理可以看出,其只能防止绝缘导线断线而对于降低雷击跳闸率,作用不明显。放电线夹还分为穿刺型和裸露型,穿刺型线夹因安装时无须剥离绝缘导线绝缘层,避免了可能引起的绝缘导线线芯进水,防止

了导线弧垂处电化学腐蚀断线事故,因此实用价值比裸露型要高。基于相同的工作原理,日本东京电力公司开发了放电钳位绝缘子(防雷绝缘子),芬兰研发了闪络保护悬垂线夹。其工作原理均为在绝缘导线固定处剥离绝缘层,并加装特殊设计的金属线夹。当雷电过电压闪络引发工频短路电弧后,电弧在金属线夹两极之间燃烧直至线路跳闸,保护了导体免受损伤<sup>[1]</sup>。

## 3 实际应用情况分析

本单位自 2009 年以来开始对所辖配电网进行大规模的绝缘化改造,之后的新建配电网工程基本全部采用架空绝缘线与电缆混合架设方式。随着配电网架空绝缘线路及电缆的增多,架空绝缘导线雷击断线的矛盾日益突出。为确保线路的安全稳定运行及防止因雷击断线导致的伤害事故,本单位根据现有技术条件,采取了一系列措施,对配电网线路进行了防雷整治。

一是公司在对 10 kV 配电网线路进行绝缘化改造的同时,除将架空裸导线更换为绝缘导线外,还将原瓷横担绝缘子更换为复合绝缘子,增加了绝缘子的爬电距离,提升了线路的耐雷水平。二是对 110 kV 桂湖变电站等进行了消弧线圈改造,将原有的 10 kV 中性点不接地系统改为经消弧线圈接地,实现了对大电容电流的补偿,降低了闪络后的建弧率。三是在重要道路跨越处两侧,分段开关、配电变压器电源侧及电缆引下线处加装了避雷器,同时在绝缘导线每基杆塔进行了防雷金具安装。实际运行情况表明,上述措施有效降低了配电网雷击故障跳闸率及断线概率。

表 1 为某单位近 4 年 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数统计值。

表 1 新都 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数统计表

| 年份      | 2010  | 2011  | 2012 | 2013  |
|---------|-------|-------|------|-------|
| 配电网线路条数 | 131   | 142   | 171  | 177   |
| 总雷电数*   | 2 928 | 4 879 | 739  | 2 580 |
| 雷击跳闸次数  | 74    | 92    | 18   | 31    |
| 断线次数    | 9     | 11    | 0    | 6     |

\* 数据采自“四川电网雷电智能监测系统”

从表 1 中可以看出,2013 年新都地区总雷电数

与 2010 年基本相当,但雷击跳闸次数和断线次数在  
线路总条数增加 35% 的情况下分别下降了 58.1%  
和 33.3%。

在 2013 年发生的断线事故中,未安装防雷金具  
的占两起,断线处防雷金具安装质量不合格的占三  
起。从统计数据可以看出,防雷金具作为防止绝缘  
导线雷击断线的最后一道屏障,应用效果还是比较  
明显的。绝缘导线安装了防雷金具后仍然发生雷击  
断线事故,主要还是因为防雷金具的安装工艺不满  
足要求引起。在防雷金具安装质量不合格的三起断  
线事故中,一起是因为防雷金具安装在了绝缘子的  
电源侧,而另两起存在防雷金具安装时穿刺线夹未  
完全刺透绝缘层,高压电极与导线接触不充分以及  
防雷金具高低压电极之间的间隙距离过大等问题。

回到防雷金具的工作原理可以看出,其安装过  
程中需要注意的技术关键点至少包括以下 3 点:一  
是高低压电极之间的距离即  $G_1$  间隙要与绝缘子的  
闪络电压良好配合,既要保证其先于绝缘子放电又  
不能在正常过电压作用下发生闪络,厂家附带的产  
品说明书中会根据绝缘子型号对该间隙给出推荐数  
值,一般为 125 ~ 180 mm。二是  $G_1$ 、 $G_2$  间隙的排列  
方向应为电源侧到负荷侧的方向(即防雷金具应安  
装于线路绝缘子的负荷侧),因为电弧在电动力作  
用下,是由电源侧向负荷侧移动,若安装方向相反,  
电弧在电动力作用下依然会集中灼烧导线。三是对于  
穿刺型防雷金具,安装时一定要对称拧紧压力螺  
母(对有备紧螺母的还应拧紧备紧螺母以防止压力  
螺母松动),使穿刺线夹刺透绝缘层后与高压导线  
形成良好接触,达到足够的导流截面,才能对电弧起  
到良好的疏导作用。

## 4 结 论

综上所述,从实际运行角度出发,10 kV 架空绝

缘导线防雷击断线措施:一是进行绝缘子改造,选用  
具有高放电电压的绝缘子,提升线路本身耐雷水平,  
降低线路遭受雷击后的绝缘子闪络概率;二是在电  
缆线路较多,系统电容电流较大的变电站改用中性  
点经消弧线圈接地运行方式,降低绝缘子闪络后的  
工频短路电弧建弧率;三是除在特殊重点部位进行  
避雷器安装外,在绝缘导线其余杆塔上应逐基加装  
防雷金具,并且在安装过程中严格执行工艺要求,确  
保防雷金具发挥应有作用。

## 参考文献

- [1] 章伟. 10 kV 架空配电线路防雷措施研究与应用[D].  
上海:上海交通大学,2012.
- [2] 邵学俭,周浩. 10 kV 架空绝缘导线防雷击技术研究  
[J]. 浙江电力,2006(4):22-25.
- [3] 陈俊,施中郎. 10 kV 架空绝缘导线防雷措施[J]. 电力  
设备,2007,8(8):51-55.
- [4] 中华人民共和国电力工业部. 交流电气装置绝缘的过  
电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,  
1997.
- [5] 10 kV 架空配电线路防雷水平分析及提高方法的研究  
[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [6] 陈维江,孙昭英,周小波,等. 防止 10 kV 架空绝缘导线  
雷击断线用穿刺型防弧金具的研制[J]. 电网技术,  
2005,29(20):82-84.
- [7] 李景禄. 配电网自动跟踪补偿消弧装置[J]. 高压电  
器,1999,35(5):42-44.

作者简介:

朱世东(1965),国网四川省电力公司成都市新都供电  
分公司总经理,研究方向为配网运维管理及故障诊断;

黄飞龙(1986),国网四川省电力公司成都市新都供电  
分公司安全专责,研究方向为配网防雷技术及运维管理。

(收稿日期:2014-04-08)

# 促节能减排和低碳发展 改善环境保护生态

# 特高压直流输电线路 1 250 mm<sup>2</sup> 截面 导线选型研究

周 唯 吴子怡

(西南电力设计院 四川 成都 610021)

**摘 要:** 特高压直流输电线路导线选型及分裂形式研究是特高压直流输电技术的重要课题,它对线路的输送容量、传输性能、环境问题、线路走廊宽度、房屋拆迁范围、技术经济指标都有很大的影响。中国经济发达地区用电量日益增长,新建电网系统规划输送容量也随之增大,大截面导线在特高压线路中亟待广泛应用。通过对多种 1 250 mm<sup>2</sup> 大截面线型进行详细的技术经济比较分析,提出特高压直流输电线路导线的选型方案,希望能对中国电网工程设计起到一定的借鉴和帮助作用。

**关键词:** 特高压; 直流输电线路; 导线; 输送容量

**Abstract:** The study on the conductor type selection and division mode of UHV DC transmission line is an important subject of UHV DC transmission technology, which will have a great impact on transmission capacity, transmission performance, environmental issues, corridor width, housing demolition scope, technical and economic indicators. The electricity demand of the developed area in China is growing, so the transmission capacity of newly-built power grid increases and the large section conductor will be widely used in UHV transmission lines. Based on the detailed technical and economical comparison and analysis for the types of 1 250 mm<sup>2</sup> section conductors, the type selection scheme for the conductors of UHV DC transmission lines is proposed, which provides some useful references for the power engineering design.

**Key words:** ultra high voltage (UHV); DC transmission line; conductor; transmission capacity

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0024-05

## 0 引 言

近年来,国家电网公司从中国能源战略高度出发,综合分析中国能源分布、能源传输需求和发展变化趋势,确定了建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强智能电网。众所周知,特高压直流输电线路具有输送容量大、送电距离远、输电损耗小、节省线路走廊等优点。国家电网公司先后开工建设了 ±660 kV 宁东—山东、±800 kV 向家坝—上海、±800 kV 锦屏—苏南、±800 kV 哈密—郑州以及 ±800 kV 宁东—浙江等特高压直流输电线路工程,同时开展了 720、900、1 000、1 250、1 520 mm<sup>2</sup> 等大截面导线研制及工程应用研究。

特高压直流输电线路导线选型及分裂形式研究是特高压直流输电技术的重要课题,它对线路的输送容量、传输性能、环境问题包括电场效应(静电场、合成场强、离子流密度、人或物体的感应电压)、

无线电干扰、电视干扰及可听噪声等、对线路走廊宽度及房屋拆迁范围、对输电线路的技术经济指标都有很大的影响。因此,进行特高压直流输电线路导线截面及分裂形式的研究对攻克特高压输电线路技术难关和降低造价有着十分深远的意义。

特高压直流线路架线工程投资一般占本体投资的 30% 左右,再加上导线方案变化引起的杆塔和基础工程量的变化,其对整个工程的造价影响是极其巨大的,直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的技术特性和运行成本,所以在整个输电线路的技术经济比较中,应该对导线的截面和分裂型式进行充分的技术经济比较,推荐出满足技术要求而且经济合理的导线截面和分裂型式。通过对 1 250 mm<sup>2</sup> 截面多种线型开展详细的技术经济比较分析,提出特高压直流输电线路 1 250 mm<sup>2</sup> 截面导线选型推荐方案,希望能对中国电网工程设计起到一定的借鉴和帮助作用。

## 1 导线选择控制参数

输电线路的导线截面和分裂型式,宜根据系统需要按照经济电流密度选择,也可根据系统输送容量结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选,并应满足可听噪声和无线电干扰等技术条件的要求,通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定。

根据中国 GB 50790-2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》规定,钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度可采用 +70 ℃(大跨越不得超过 90 ℃),钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线)的允许温度可采用 +80 ℃(大跨越不得超过 100 ℃);钢绞线的允许温度可采用 125 ℃。合成场强和离子流密度: ±800 kV 直流线路下方最大地面合成场强的控制指标为 30 kV/m。邻近民房的最大合成场强的控制指标为 25 kV/m;线路下方离子流密度的控制指标为一般地区为 100 nA/m<sup>2</sup>,居民区为 80 nA/m<sup>2</sup>。地面磁场强度:对直流磁场,国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则给出一般公众的磁场暴露参考水平(1 Hz 以下)为 40 mT。实际情况下直流磁场对人的影响比交流磁场小得多。而且实际计算结果远远小于此参考值,故不必考虑磁场干扰影响问题。无线电干扰限值:距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20 m 处由电晕产生的 0.5 MHz 无线电干扰场强 80% / 80% 值,一般地区不超过 58 dB(μV/m)。海拔 1 000 m 以上,按照每增加 300 m,增加 1 dB(μV/m)修正。可听噪声限值:海拔 1 000 m 及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20 m 处由电晕产生的可听噪声( $L_{50}$ )不超过 45 dB(A);海拔高度大于 1 000 m 且线路经过人烟稀少地区时,控制在 50 dB(A)以下。机械强度:导线设计安全系数不小于 2.5,悬挂点的设计安全系数不小于 2.25,平均运行应力不大于拉断应力的 25%。验算覆冰气象条件时,弧垂最低点的最大张力不超过拉断力的 60%,悬挂点的最大张力不超过拉断力的 66%<sup>[1]</sup>。

## 2 分裂间距选择

从电气方面看,导线存在最佳分裂间距,使得表

面电场强度最小,但根据计算分析,限制次档距振荡要求的分裂间距才是控制条件。

限制次档距振荡要求的分裂间距与最佳电气性能要求的分裂间距是矛盾的,中国已建 500 kV 交、直流线路的  $S$ (截面)/ $d$ (直径)比值在 13.80 ~ 18.7,但由于特高压线路导线的分裂数较多,电气要求又比较苛刻,因此布置上要比 500 kV 线路困难得多,一般难以满足上述要求。由于特高压线路由于分裂根数的增加,在采用大截面导线时,很难保证  $S/d > 13.8 \sim 18$ 。但根据国内外已建特高压直流线路设计和运行的情况分析, $S/d$  的比值在 10 ~ 18 之间也能满足线路的安全运行。同时,次档距振荡还可通过采用适当增加间隔棒安装数量的方法加以限制。根据国内外已建工程情况和有关研究成果,推荐特高压直流线路 1 250 mm<sup>2</sup> 截面导线分裂间距按表 1 选取。

表 1 导线分裂间距及  $S/d$  值一览表

| 分裂根数 | 分裂间距 $S$<br>/mm | 分裂导线圆直径 $D$<br>/mm | $S/d$         |
|------|-----------------|--------------------|---------------|
| 6    | 500             | 1 000              | 10.44 ~ 11.68 |

注:  $d$  为子导线直径,mm。

## 3 导线选择类型

中国超高压、特高压输电线路采用的大截面导线类型包含:钢芯铝绞线、钢芯铝型线绞线、铝合金绞线、铝合金芯铝型线绞线等线型。

### 3.1 钢芯铝绞线

钢芯铝绞线是由硬圆铝线及镀锌钢线组合绞制而成,它是输电线路最常用的一种导线。这里选取了 JL1/G3A-1250/70 和 JL1/G2A-1250/100 两种 1 250 mm<sup>2</sup> 截面的钢芯铝绞线参与导线选择比较<sup>[3]</sup>。

### 3.2 钢芯铝型线绞线

国家电网公司和中国电科院组织相关导线生产厂家补充开展了 1 250 mm<sup>2</sup> 大截面型线导线的研制工作。根据研制情况,这里选择了 JL1X1/G3A-1250/70 和 JL1X1/G2A-1250/100 两种大截面钢芯铝型线绞线参与导线选型比较。

### 3.3 铝合金绞线

目前在世界许多国家的输电线路已广泛使用铝合金导线,它们主要是高强度铝合金线。为了在一般轻、中冰区线路中采用铝合金导线,国内外开发

表 2 机械特性比较表

| 项 目                                   | JL1/G3A<br>- 1250/70 | JL1X1/G3A<br>- 1250/70 | JL1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/LHA1<br>- 800/550 | JLHA3<br>- 1350 |
|---------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| 导线类型                                  | 钢芯<br>铝绞线            | 钢芯铝<br>型线绞线            | 钢芯铝<br>绞线             | 钢芯铝型<br>线绞线             | 铝合金芯铝<br>型线绞线           | 中强度全铝<br>合金导线   |
| 铝丝直径 /mm                              | 4.58                 | 5.07                   | 4.35                  | 5.17                    | 4.82                    |                 |
| 铝丝股数                                  | 76                   | 62                     | 84                    | 60                      | 44                      |                 |
| 结 构<br>钢( 铝合金) 丝直径 /mm                | 3.57                 | 3.57                   | 2.61                  | 2.61                    | 4.35                    |                 |
| 钢( 铝合金) 丝股数                           | 7                    | 7                      | 19                    | 19                      | 37                      |                 |
| 铝( 铝合金) 绞丝                            | 1 252.09             | 1 259.88               | 1 248.38              | 1 259.57                | 802.86                  | 1 352.41        |
| 截面积<br>/mm <sup>2</sup>               |                      |                        |                       |                         |                         |                 |
| 铝合金芯                                  | 0                    | 0                      | 0                     | 0                       | 549.88                  |                 |
| 钢芯                                    | 70.07                | 70.07                  | 101.65                | 101.65                  |                         |                 |
| 总计                                    | 1 322.16             | 1 329.95               | 1 350.03              | 1 361.22                | 1 352.74                | 1 352.41        |
| 导线直径 /mm                              | 47.35                | 43.11                  | 47.85                 | 43.71                   | 45.15                   | 47.85           |
| 钢芯外径 /mm                              | 10.7                 | 10.7                   | 13.1                  | 13.1                    | 0                       | 0               |
| 单位重量 /( kg · km <sup>-1</sup> )       | 4 011.1              | 4 055.1                | 4 252.3               | 4 303.7                 | 3 726.8                 | 3 738.7         |
| 计算拉断力 /N                              | 294 230              | 289 180                | 329 850               | 325 350                 | 289 000                 | 295 500         |
| 弹性模量 /( N · mm <sup>-2</sup> )        | 62 200               | 62 100                 | 65 200                | 65 100                  | 55 000                  | 55 000          |
| 线性膨胀系数 [ × 10 <sup>(-6)</sup> ]( 1/℃) | 21.1                 | 21.1                   | 20.5                  | 20.5                    | 23                      | 23              |
| 20 ℃ 时直流电阻 /( Ω · km <sup>-1</sup> )  | 0.02 291             | 0.022 92               | 0.023                 | 0.022 92                | 0.022 46                | 0.022 1         |

了 LHA3 中强度铝合金线,其导电率为 58.5% IACS,允许温度为 90 ℃。这里选择了 6 × JLHA3 - 1350 中等强度铝合金绞线参与导线选择比较<sup>[2,4]</sup>。

3.4 铝合金芯铝型线绞线

将钢芯铝绞线中的钢芯换为铝合金,可降低导线电阻,减少能损,即新型节能导线。这里选择了与 JL1/G2A - 1250/100 钢芯铝绞线的电气性能、结构型式相近的 JL1X1/JLHA1 - 800/550 铝合金芯铝型线绞线进行比较<sup>[5]</sup>。

三种导线的机械特性比较详见表 2 所示。

4 导线基本电气性能计算

导线电气性能的计算主要包括导线电流密度、过负荷温度、传输功率及功率损耗等,并对参选导线方案进行计算比较。双极直流输电线路电力线和带电离子分布详见图 1 所示。双极直流输电线路地面电力线解析图详见图 2 所示。

特高压直流输电线路导线选择的关键因素之一是使电磁环境参数满足设计规范要求的限值。通过对各种导线方案,进行合成场强、无线电干扰和可听噪声的估算,参选各大截面导线方案在电气性能各

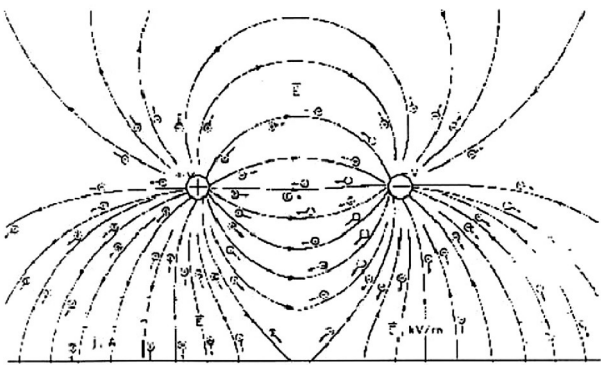


图 1 双极直流输电线路电力线和带电离子分布示意图

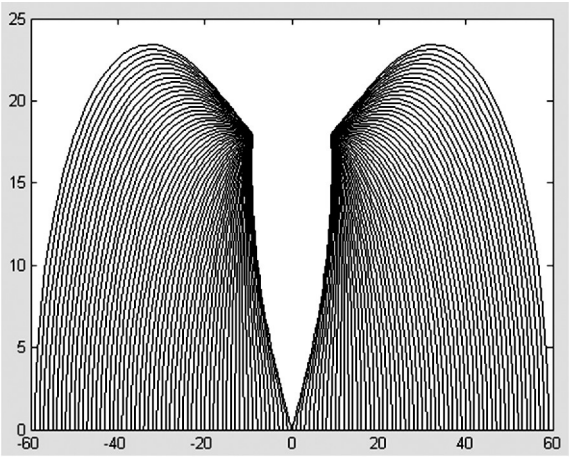


图 2 双极直流输电线路地面电力线解析图

表 3 导线电气特性一览表

| 序号                                | 1                    | 2                      | 3                     | 4                       | 5                       | 6               |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| 导线型号                              | JL1/G3A<br>- 1250/70 | JL1X1/G3A<br>- 1250/70 | JL1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/LHA1<br>- 800/550 | JLHA3<br>- 1350 |
| 分裂数                               | 6                    | 6                      | 6                     | 6                       | 6                       | 6               |
| 电流密度 $I/(A \cdot mm^{-2})$        | 0.666                | 0.661                  | 0.668                 | 0.662                   | 0.616                   | 0.616           |
| 过负荷导线温度 $/^{\circ}C$              | 64.3                 | 63.9                   | 64.6                  | 64.1                    | 64.5                    | 64.3            |
| 传输效率 $/\%$                        | 95.30                | 95.30                  | 95.20                 | 95.2                    | 95.4                    | 95.6            |
| 导线表面最大电场强度 $I/(kV \cdot cm^{-1})$ | 18.39                | 19.63                  | 18.22                 | 19.45                   | 18.62                   | 18.22           |
| 地面合成场强 $I/(kV \cdot m^{-1})$      | 26.95                | 26.88                  | 26.59                 | 26.84                   | 26.71                   | 26.59           |
| 地面离子流 $I/(nA \cdot m^{-2})$       | 34.82                | 34.55                  | 33.47                 | 34.4                    | 33.92                   | 33.47           |
| 电阻功率损耗 $I/(kW \cdot km^{-1})$     | 102.866              | 102.738                | 103.308               | 102.892                 | 101.743                 | 99.155          |
| 电晕损耗 $I/(kW \cdot km^{-1})$       | 11.82                | 12.66                  | 11.53                 | 12.47                   | 12.05                   | 11.53           |
| 无线电干扰 $/dB$                       | 53.3                 | 53.7                   | 53.2                  | 53.7                    | 53.5                    | 53.2            |
| 可听噪声 $/dB$                        | 40.12                | 43.03                  | 39.8                  | 42.6                    | 41.1                    | 39.8            |

注:表中各性能中合成场强、地面离子流特性的计算导线高度取 18 m,其余各特性导线对地高取平均高 23 m,极间距离取 16.5 m,海拔高度为 2 000 m,晴天。

表 4 导线弧垂、过载性能一览表

| 比较项目            |             | JL1 /G3A<br>- 1250/70 | JL1X1 /G3A<br>- 1250/70 | JL1 /G2A<br>- 1250/100 | JL1X1 /G2A<br>- 1250/100 | JL1X1 /LHA1<br>- 800/550 | JLHA3<br>- 1350 |
|-----------------|-------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 最大应力 10 MPa     |             | 8.623                 | 8.423                   | 9.468                  | 8.623                    | 8.423                    | 9.468           |
| 年均应力 10 MPa     |             | 5.389                 | 5.264                   | 5.917                  | 5.389                    | 5.264                    | 5.917           |
| 安全系数            |             | 2.5                   | 2.5                     | 2.5                    | 2.5                      | 2.5                      | 2.5             |
| 铝钢截面比           |             | 17.869                | 18.002                  | 12.281                 | 17.869                   | 18.002                   | 12.281          |
| 过载冰厚 /mm        | $L_p = 400$ | 32.42                 | 33.51                   | 34.73                  | 35.81                    | 30.18                    | 30.32           |
|                 | $L_p = 500$ | 30.43                 | 31.62                   | 32.37                  | 33.54                    | 29.66                    | 29.78           |
|                 | $L_p = 600$ | 29.28                 | 30.52                   | 30.98                  | 32.2                     | 28.32                    | 28.4            |
| 最大弧垂<br>40 ℃ /m | $L_p = 400$ | 12.619                | 12.922                  | 12.008                 |                          |                          |                 |
|                 | $L_p = 500$ | 19.045                | 19.525                  | 18.1                   | 18.51                    | 18.112                   | 17.975          |
|                 | $L_p = 600$ | 26.844                | 27.544                  | 25.487                 | 26.084                   | 25.44                    | 25.24           |

注:过载时,导线最低点的最大张力达到其计算拉断力 60% 时相应的计算覆冰厚度。

表 5 导线荷载一览表

| 导线型号                        | JL1/G3A<br>- 1250/70  | JL1X1/G3A<br>- 1250/70 | JL1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/G2A<br>- 1250/100 | JL1X1/LHA1<br>- 800/550 | JLHA3<br>- 1350 | 备注          |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------|
| 导线分裂数                       | 6                     | 6                      | 6                     | 6                       | 6                       | 6               |             |
| 每公里导线 $I/(t \cdot km^{-1})$ | 48.13                 | 48.71                  | 51.03                 | 51.64                   | 44.88                   | 44.86           | 两极          |
| 无冰垂直荷重 $(kN/极)$             | 141.61                | 143.31                 | 150.12                | 151.94                  | 132.03                  | 131.99          |             |
| $/\%$                       | 100.00%               | 101.20%                | 106.01%               | 107.29%                 | 93.23%                  | 93.21%          | 垂直档距        |
| 有冰垂直荷重 $(kN/极)$             | 200                   | 197.37                 | 208.98                | 206.58                  | 190.99                  | 190.96          | $L_w = 600$ |
| $/\%$                       | 100.00%               | 98.68%                 | 104.49%               | 103.29%                 | 95.50%                  | 95.48%          |             |
| 大风时线条风荷<br>重 $(kN/极)$       | 90.01                 | 81.99                  | 90.96                 | 83.15                   | 90.96                   | 90.96           | 水平档距        |
| $/\%$                       | 100.00%               | 91.09%                 | 101.06%               | 92.38%                  | 101.06%                 | 101.06%         | $L_h = 500$ |
| 纵向最大张力 $(kN/极)$             | 590                   | 568                    | 651                   | 630                     | 599                     | 604             |             |
| $/\%$                       | 100.00%               | 96.30%                 | 110.36%               | 106.76%                 | 101.48%                 | 102.31%         |             |
| 配合耐张串型                      | 4 × 550 kN、3 × 760 kN |                        |                       |                         |                         |                 |             |

注:采用 4 联 550 kN 耐张串时, JL1/G2A - 1250/100 导线的安全系数需放松为 2.55,最大荷载时安全系数大于 2.7,满足强度要求。根据弧垂特性计算情况,档距 800 m 时,15 mm、20 mm 冰区的弧垂增加约 1 m,对塔高影响较小。

表 6 本体投资及投资差额比较

| 注: 单位( 万元/km) |                           |          |          |          |          |            |           |
|---------------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|------------|-----------|
| 序号            | 导线型号<br>及分裂数              | 塔材<br>费用 | 基础<br>费用 | 架线<br>费用 | 附件<br>费用 | 估算本<br>体投资 | 本体<br>投资差 |
| 1             | 6 × JL1 /G3A - 1250/70    | 135.7    | 48.90    | 133.94   | 64.41    | 382.95     | 0         |
| 2             | 6 × JL1X1 /G3A - 1250/70  | 131.7    | 47.45    | 135.08   | 64.19    | 378.42     | -4.53     |
| 3             | 6 × JL1 /G2A - 1250/100   | 141.2    | 50.89    | 139.38   | 64.19    | 395.66     | 12.71     |
| 4             | 6 × JL1X1 /G2A - 1250/100 | 136.5    | 49.19    | 140.85   | 64.19    | 390.73     | 7.78      |
| 5             | 6 × JL1X1 /LHA1 - 800/550 | 136.2    | 49.06    | 141.05   | 64.19    | 390.5      | 7.55      |
| 6             | 6 × JLHA3 - 1350          | 136.3    | 49.11    | 152.05   | 64.19    | 401.65     | 18.7      |

方面指标均满足 GB 50790 - 2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》规定的电磁环境限值要求。三种导线的电气特性参数详见表 3 所示。

5 导线机械性能比较

比选导线的最大应力、年均应力、安全系数、铝钢截面比、过载冰厚、最大弧垂 40 ℃ 及导线荷载等比较详见表 4 和表 5。

所选 6 种导线而言,电磁环境限值指标不是导线选择的控制条件,对于 15 mm、20 mm( 中、重) 冰区导线,主要受导线机械性能控制。通过以往大量输电线路 10 mm、15 mm、20 mm( 中)、20 mm( 重) 冰区导线设计及运行经验,从线路的安全运行、导线的机械和电气性能方面考虑,在 10 mm 轻冰区的平丘地段建议采用 JL1 /G3A - 1250/70 钢芯铝绞线、JL1X1 /G3A - 1250/70 钢芯铝型线绞线,在平丘及一般山地段可采用节能新型 JL1X1 /LHA1 - 800/550 铝合金芯铝型线绞线; 在 10 mm 山区段、15 mm、20 mm( 中、重) 冰区均可采用 JL1 /G2A - 1250/100 钢芯铝绞线、JL1X1 /G2A - 1250/100 钢芯铝型线绞线、JLHA3 - 1350 全铝合金绞线等导线型式。

6 导线经济性比较

对于每一种导线方案,在不同的工程条件下本体投资均有所不同,在假定边界条件下对各导线方案初期本体投资进行估算,重点比较导线投资的差额。这里按目前设计原则及假定工程边界条件,对各导线方案的初期投资进行估算,本体投资及投资差额比较详见表 6 所示。

根据导线的年费用比较,年费用最低的是

JL1X1 /G3A - 1250/70 钢芯铝型线绞线,其次是 JL1 /G3A - 1250/70 钢芯铝绞线,再次是 JL1X1 /LHA1 - 800/550 铝合金芯铝型线绞线。通过导线价格变化对年费用敏感性进行分析,在考虑不同导线对铁塔及基础工程量产生影响的条件下,即按照型线和圆线分别设计铁塔,在钢芯铝型线的单价不高于同型号圆线钢芯铝绞线单价的 10% 时,采用钢芯铝型线绞线具有长期运行经济性。同样,对于 JL1 /LHA2 - 800/550 铝合金芯铝型线绞线,其机电性能满足工程要求,在目前导线单价情况下,其年费用高于圆线和钢芯铝型线绞线,当其单价下降 7% 左右时,其年费用将低于圆线和钢芯铝型线绞线<sup>[6]</sup>。

7 结 论

通过电气性能、机械性能及对铁塔荷载设计的影响,综合设计、杆塔规划、导线制造、架线施工、运行维护及经济性等多方面因素,并结合中国国情和自然条件的实际情况,建议采用 1 250 mm<sup>2</sup> 大截面导线输电的特高压直流线路工程,在 10 mm 冰区的平丘地形推荐采用 JL1 /G3A - 1250/70 钢芯铝绞线; 在一般山地及 15 mm、20 mm 中、重冰区推荐采用 JL1 /G2A - 1250/100 钢芯铝绞线,导线分裂间距均为 500 mm。在交通运输方便地区,可适当选用 JL1X1 /G3A - 1250/70、JL1 /G2A - 1250/100 钢芯铝型线绞线作为输电导线,为以后特高压直流输电线路设计应用积累工程经验。

参考文献

[1] GB 50790 - 2013, ±800 kV 直流架空输电线路设计规范[S]. (下转第 48 页)

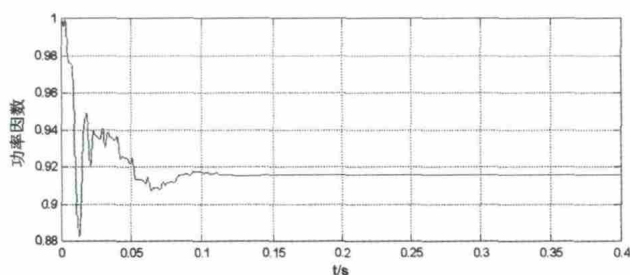


图 13 并入滤波器 A 相功率因数

于补偿了谐波消耗的无功功率,从而提高了功率因数。此时的功率因数并未达到国家标准,还需要结合使用无功补偿装置。从而将无源动态滤波器和 TSC 并联在电网中来达到提高电能质量的目的。

## 5 结 论

基于双可控电抗器的双调谐滤波器,具有较强的自动调节能力,较为精准的调谐结果。作为传统无源滤波器的改进,弥补了现行双调谐滤波器的缺点。因其兼顾无功补偿作用,选择与 TSC 组合使用,从而达到消除谐波和无功补偿的作用。

### 参考文献

- [1] 苏恒. 双调谐滤波器设计与失谐问题的研究[D]. 江门: 五邑大学 2013.
- [2] 马世贤. 基于可控电抗器的双调谐滤波器研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学 2006.
- [3] 徐平凡, 陈忠仁, 肖星. TSC 动态无功补偿装置的仿真研究[J]. 电源技术应用 2012(3): 32-35.

- [4] 倪常茂. 基于多调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学 2012.
- [5] 崔士杰, 汪建华. 基于 MATLAB 的单相全控整流电路功率因数测定[J]. 武汉工程大学学报 2010(1): 90-92.
- [6] 王会涛, 钱希森, 任开春. 基于 Matlab 的功率因数校正电路的仿真分析[J]. 电源世界 2007(3): 40-42.
- [7] 倪常茂, 刘振兴. 基于双调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波装置[J]. 电力自动化设备 2012(7): 124-128.
- [8] 马世贤, 康明才, 黄锦安. 全控/部分可控双调谐滤波器仿真试验[C]. 2006 中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集 2006: 4.
- [9] 徐永海, 王铭诚. 双调谐滤波器的参数选择[J]. 现代电力 1995(2): 6-11.
- [10] 肖遥. 双调谐滤波器和三阶滤波器的参数计算[J]. 湖北电力 2000(2): 5-6.
- [11] 董海波, 张丽, 罗剑锋. 双调谐滤波器在矿井电网谐波治理中的应用研究[A]. 中国煤炭学会自动化专业委员会 2008: 3.
- [12] 李崇. 基于双可控电抗器的双调谐滤波器研究[D]. 南京: 南京理工大学 2007.
- [13] 陈敏. 无源动态谐波滤波器的建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学 2012.

### 作者简介:

沙宏哲(1990), 工学硕士研究生, 主要研究无源动态滤波器和 TSC 的无功补偿、电力系统及其自动化;

冯媛硕(1988), 工学硕士研究生, 主要研究高压直流输电系统仿真、电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2014-07-17)

(上接第 28 页)

- [2] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用[J]. 吉林电力 2011, 15(2): 45-49.
- [3] GB/T 1179-2008 圆线同心绞架空导线[S].
- [4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用[J]. 电力建设 2010, 31(12): 10-20.
- [5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用[J]. 电力建设 2013, 34(8): 105-106.

- [6] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究[J]. 电力建设 2013, 34(9): 102-104.

### 作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 从事电网工程造价设计工作。

(收稿日期: 2014-07-25)

# 两种变压器绕组等值电容模型的联系

李 林

( 国网德阳供电公司 , 四川 德阳 618000)

摘 要: 介绍了两种变压器绕组等值电容模型, 从数学角度阐述了两模型的联系, 从而得出了一致性。

关键词: 变压器; 绕组变形; 等值电容

**Abstract:** Two kinds of equivalent capacitance models of transformer winding are introduced. The connection between two kinds of models is described in mathematical perspective and the consistency is concluded between the two models.

**Key words:** transformer; winding deformation; equivalent capacitance

中图分类号: TM406 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)06-0029-03

## 0 引 言

目前电容量法已作为诊断变压器绕组变形的重要项目之一。在现场试验时, 变压器绕组的电容值同变压器绕组的绝缘介质损耗因素一起测量出来, 与历史数据进行对比。国家电网公司制定的《输变电设备状态检修试验规程》中明确规定, 若电容值发生明显变化, 应予以注意。因此, 对电容值发生明显变化的绕组做出正确的诊断分析具有重要意义。

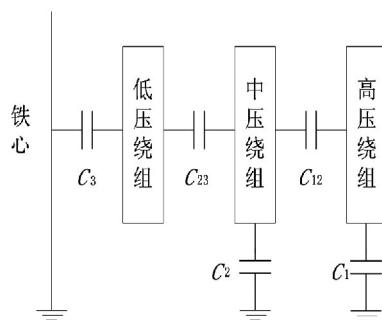
在现有的文献中以及大多变压器出厂试验数据中, 三绕组变压器等值电容电路都忽略了高压绕组与低压绕组间的电容, 通过 5 次接线测得的结果可以计算出 5 个电容值; 而在现场试验中都计及高压绕组与低压绕组间的电容, 通过 6 次接线测得的结果计算出 6 个电容值。采用矩阵理论对这两种方式进行了阐述, 并找出两者之间的联系, 从而得出两者的一致性。

## 1 变压器绕组等值电容模型

### 1.1 模型 1: 忽略高压绕组与低压绕组间电容

忽略高压绕组与低压绕组间电容后, 三绕组变压器绕组等值电容电路图如图 1 所示。

由于高压绕组与低压绕组间的电容  $C_{13}$  数值较小, 被忽略。通过高对中、低及地  $C_{H-ML}$ , 中对高、低及地  $C_{M-HL}$ , 低对高、中及地  $C_{L-HM}$ , 高、中、低对地



$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为高、中、低压绕组对地电容;  $C_{12}$  为高压绕组与中压绕组间电容;  $C_{23}$  为中压绕组与低压绕组间电容

图 1 模型 1 中三绕组变压器等值电容电路图  
 $C_{HML}$  高、中对低及地  $C_{HM-L}$  共 5 组数据。通过下列方程可以计算得到  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_{12}$  和  $C_{23}$ 。

$$\begin{cases} C_{H-ML} = C_1 + C_{12} \\ C_{M-HL} = C_2 + C_{12} + C_{23} \\ C_{L-HM} = C_3 + C_{23} \\ C_{HML} = C_1 + C_2 + C_3 \\ C_{HM-L} = C_1 + C_2 + C_{23} \end{cases} \quad (1)$$

写成矩阵形式为

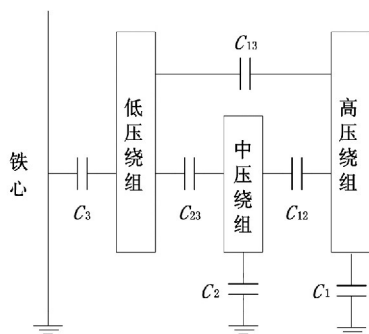
$$AX = P \quad (2)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_{12} \\ C_{23} \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} C_{H-ML} \\ C_{M-HL} \\ C_{L-HM} \\ C_{HML} \\ C_{HM-L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 1.2 模型 2: 计及高压绕组与低压绕组间电容

计及高压绕组与低压绕组间电容后,三绕组变压器绕组等值电容电路图如图 2 所示。



$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为高、中、低压绕组对地电容;  $C_{12}$  为高压绕组与中压绕组间电容;  $C_{23}$  为中压绕组与低压绕组间电容;  $C_{13}$  为高压绕组与低压绕组间电容

图 2 模型 2 中三绕组变压器等值电容电路图

通过 6 次不同的接线就可以得到 6 组不同的数据,分别是高对中、低及地  $C_{H-ML}$ ,中对高、低及地  $C_{M-HL}$ ,低对高、中及地  $C_{L-HM}$ ,高、中、低对地  $C_{HML}$ ,高、中对低及地  $C_{HM-L}$ ,中、低对高及地  $C_{ML-H}$ 。通过解下列方程可以得到  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{23}$  和  $C_{13}$ 。

$$\begin{cases} C_{H-ML} = C_1 + C_{12} + C_{13} \\ C_{M-HL} = C_2 + C_{12} + C_{23} \\ C_{L-HM} = C_3 + C_{23} + C_{13} \\ C_{HML} = C_1 + C_2 + C_3 \\ C_{HM-L} = C_1 + C_2 + C_{23} + C_{13} \\ C_{ML-H} = C_3 + C_2 + C_{12} + C_{13} \end{cases} \quad (4)$$

写成矩阵形式为

$$BY = Q \quad (5)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_{12} \\ C_{23} \\ C_{13} \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} C_{H-ML} \\ C_{M-HL} \\ C_{L-HM} \\ C_{HML} \\ C_{HM-L} \\ C_{ML-H} \end{bmatrix} \quad (6)$$

需要说明的是式(6)矩阵  $Y$  中的元素与式(3)矩阵  $X$  中的元素不相等。

## 2 两种等值电容模型的联系

把式(5)中矩阵  $B$ 、 $Y$ 、 $Q$  进行分块,于是有

$$\begin{bmatrix} A & K \\ L & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ M \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_{12} \\ C_{23} \end{bmatrix} \quad R = [C_{13}] \quad M = [C_{HM-L}] \quad (8)$$

根据分块矩阵的乘法,于是有

$$AT + KR = P \quad (9)$$

把式(2)代入式(9),可以得到

$$T = X - A^{-1}(KR) \quad (10)$$

式中  $A^{-1}(KR)$  为一常数,计算出其值为

$$A^{-1}(KR) = C_{13} [1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (11)$$

从式(10)相应的可以得到

$$\Delta T = \Delta X - A^{-1}(K\Delta R) \quad (12)$$

式中  $A^{-1}(K\Delta R)$  的值为

$$A^{-1}(K\Delta R) = \Delta C_{13} [1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (13)$$

从式(12)可以看出,两种模型计算出的电容值变化量仅与高低压绕组间的电容  $C_{13}$  变化量有关,一方面  $C_{13}$  数值较小,另一方面即使在变压器绕组发生变形的情况下  $C_{13}$  的变化量也较小。因此两种模型计算出的电容值变化量不会发生明显变化。

## 3 案例

某变电站 1 号主变压器,型号为 SFSZ10-50000/110,额定电压为  $(110 \pm 8 \times 1.25\%) / (38.5 \pm 2 \times 2.5\%) / 10.5$  kV,额定电流为 262.4/749.8/2749.3 A。进行例行试验中,发现绕组电容量异常。出厂试验、交接试验和本次试验的测试数据如表 1 所示。表 1 中出厂试验只通过 5 次接线测得数据,交接试验和例行试验采用了 6 次接线测得数据。

(1) 忽略高压绕组与低压绕组间电容,采用模型 1 进行计算。经计算后各绕组的电容量如表 2 所示。

表 1 出厂试验、交接试验和本次试验电容量测试值

| 测试部位        | 出厂<br>电容值 /nF | 交接<br>电容值 /nF | 本次<br>电容值 /nF |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| $C_{H-ML}$  | 15.43         | 15.482        | 14.99         |
| $C_{M-HL}$  | 23.21         | 23.352        | 25.9          |
| $C_{L-HM}$  | 19.51         | 19.678        | 22.96         |
| $C_{HML}$   | 14.47         | 14.593        | 14.85         |
| $C_{HML-L}$ | 13.61         | 13.679        | 16.76         |
| $C_{ML-H}$  | /             | 24.598        | 24.31         |

表 2 采用模型 1 各绕组电容量的计算值

| $C_x$    | 出厂<br>电容<br>值/nF | 交接<br>电容<br>值/nF | 本次<br>电容<br>值/nF | $\Delta C_{x\text{本次}-\text{出厂}}$ | $\Delta C_{x\text{本次}-\text{交接}}$ |
|----------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $C_1$    | 2.915            | 2.9045           | 2.925            | 0.34%                             | 0.71%                             |
| $C_2$    | 1.37             | 1.3925           | 1.4              | 2.2%                              | 0.54%                             |
| $C_3$    | 10.185           | 10.298           | 10.525           | 3.3%                              | 2.2%                              |
| $C_{12}$ | 12.515           | 12.5775          | 12.065           | -3.73%                            | -4.25%                            |
| $C_{23}$ | 9.325            | 9.389            | 12.435           | 33.35%                            | 32.44%                            |

(2) 计及高压绕组与低压绕组间电容,采用模型 2 进行计算。由于出厂试验只有 5 组数据,无法比较,因此只比较了交接试验和例行试验的数据。经计算后各绕组的电容量如表 3 所示。

表 3 采用模型 2 各绕组电容量的计算值

| $C_x$    | 交接电容值<br>/nF | 本次电容值<br>/nF | $\Delta C_{x\text{本次}-\text{交接}}$ |
|----------|--------------|--------------|-----------------------------------|
| $C_1$    | 2.7395       | 2.765        | 0.93%                             |
| $C_2$    | 1.5575       | 1.56         | 0.16%                             |
| $C_3$    | 10.298       | 10.525       | 2.2%                              |
| $C_{12}$ | 12.5775      | 12.065       | -4.25%                            |
| $C_{23}$ | 9.224        | 12.275       | 33.08%                            |
| $C_{13}$ | 0.165        | 0.16         | -3.1%                             |

通过表 2 与表 3 的对比,可以看出采用两种模型计算出的电容值变化量几乎是一致的,不会影响

对变压器绕组变形的诊断分析。

从表 2 和表 3 都可以直观地看出,中压绕组与低压绕组之间的电容量增加了 33% 左右,变化最大,高压绕组与中压绕组之间电容量小幅度降低,减小了 4.25%,低压绕组对地的电容量增加了 2.2%,说明了中压绕组在电动力作用下向铁心收缩,导致中压绕组与低压绕组间的距离大幅度减小,高中压绕组之间的距离小幅增大。

4 结 论

通过两种变压器绕组等值电容模型的计算可以得到以下启示。

(1) 在计算各绕组电容量时,先通过模型 2 计算出各个绕组对地、各绕组之间的电容量,通过式(10)轻松得出模型 1 的值,避免了再次解方程组的麻烦。

(2) 对于出厂试验只采用 5 次不同接线数据的,每次的试验数据都通过模型 1 方式计算出进行对比分析。

参考文献

[1] Q/GDW 168-2008,输变电设备状态检修试验规程[S].  
[2] 李建国,朱康.高压电气设备试验方法[M].北京:中国电力出版社,2001.  
[3] 丁伟,丁天祺.变压器绕组电容量异常变化实例分析[J].变压器,2012,49(2):71-74.  
[4] 同济大学数学系.线性代数[M].北京:高等教育出版社,2007.

作者简介:

李林(1984),硕士,工程师,主要从事高压电气试验工作。

(收稿日期:2014-07-28)

提高供电可靠性  
加快建设现代配电网

# $\pm 500$ kV 永富直流输电工程分极送电接地方案造价分析

吴子怡, 周 唯

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

**摘 要:**  $\pm 500$  kV 永富直流输电线路采取分极送电云南、广西电网时, 由于两侧负荷需求及特性不一致可能导致两极输送功率不一致, 从而带来较大的不平衡电流, 与常规直流工程设计存在极大差异。因此, 结合永富直流分极送电时的不平衡电流规模、持续时间, 对直流工程采用双极两端中性点接地方案或采用双极金属回线方案进行造价分析比较, 从而为相似直流输电工程的投资决策提供参考。

**关键词:** 直流输电线路; 分极送电; 造价分析; 不平衡电流; 接地极

**Abstract:** Because of different load demand and different transmission power, there are vast differences between the grounding scheme of  $\pm 500$  kV Yongfu DC power transmission project and the conventional design. So the costs are compared and analyzed for bipolar two-terminal neutral grounding scheme or bipolar metallic return scheme of DC transmission project based on the unbalanced current and duration time of split electrode power transmission, which provides some useful references for the investment decision of similar DC power transmission projects.

**Key words:** DC transmission line; split electrode power transmission; cost analysis; unbalanced current; earth electrode

中图分类号: F407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0032-04

## 0 引言

滇西北五地州水电资源丰富, 可开发电源装机容量约 60 000 MW, 将成为云南省重要的水电基地, 滇西北电网将成为南方电网“十二五”及中长期西电东送的主要送端电网。根据当前云南水电开发情况, “十二五”及“十三五”期间, 金沙江中、下游以及澜沧江流域梯级电站将陆续建成投产。根据当前电力平衡计算, 在满足当地用电需求的基础上, 滇西北地区“十二五”期间将有超过 10 000 MW 电力需要送出, 现有的输电通道无法满足外送条件。在建的  $\pm 500$  kV 永富直流输电线路正是肩负着分极送电云南、广西电网的重要任务, 采用了双极两端中性点接地的设计方案, 对类似工程的设计起到了借鉴作用, 为加强中国  $\pm 500$  kV 直流网架建设提供了技术创新<sup>[1-3]</sup>。

## 1 永富直流运行方式特点

永富直流额定电压为  $\pm 500$  kV、额定输送功率为 3 000 MW, 存在 3 种运行方式, 交流侧接线示意

图分别如图 1~图 3 所示。

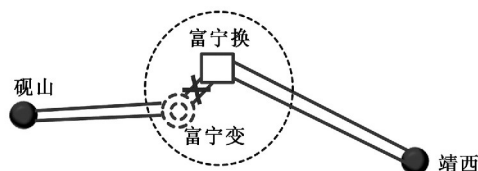


图 1 永富直流 3 000 MW 全送广西时受端换流站接线方式

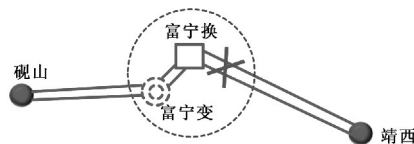


图 2 永富直流 3 000 MW 全送云南时受端换流站接线方式

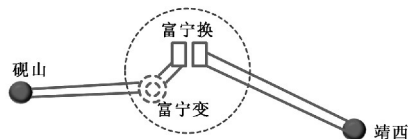


图 3 永富直流送云南、广西各 1 500 MW 时受端换流站接线方式

永富直流全送广西、全送云南运行方式的不平

衡电流规模、持续时间均与常规的  $\pm 500\text{ kV}$ 、3 000 MW 直流相同。永富直流两极分送两异步交流电网方式,由于两侧电网负荷需求不一致,有可能导致两极输送功率不一致而不平衡电流规模较大,对接地极系统或金属中线系统提出了更高要求。这里主要对永富直流两极分送方式的不平衡电流规模及持续时间进行估算,为永富直流的接地极系统和金属中线的设计提供参考意见<sup>[4-5]</sup>。

2 最大规模不平衡电流

永富直流两极分送两个异步电网方式,直流最小功率按双极 10% (300 MW)、单极 20% (300 MW) 考虑最极端情况下,永富直流两极分送时的最

大规模不平衡电流需满足 1.1 倍的长期过负荷能力、2 h 的 1.3 倍过负荷能力、3 s 的 1.4 倍暂态最大过负荷能力<sup>[6]</sup>。

3 两极分送时永富直流持续不平衡电流规模及时间

永富直流两极分送云南、广西时,除由控制误差以及由故障引起的不平衡电流外,能持续导致两极不平衡电流较大的方式主要由直流受端云南、广西两侧负荷需求规模以及需求特性差异引起,根据两极分送时的云南、广西两侧的负荷需求及特性,最大、最小持续不平衡电流、年运行按时数、等效损耗小时数如表 1 所示。

表 1 永富直流分极运行时的不平衡电流及持续时间

| 项目                           | 最大不平衡电流<br>/A | 最小不平衡电流<br>/A | 年运行按时数<br>/kAh | 年等效损耗小时数<br>(h,等效至 3 000 A) |
|------------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------------|
| 情景 1(按两地区负荷特性差异估算)           | 640           | 30            | 1 656          | 68                          |
| 情景 2(按富宁变电容量的两地区负荷特性差异估算)    | 1 000         | 590           | 5 222          | 478                         |
| 情景 3(按富宁变电站下网容量的两地区负荷特性差异估算) | 1 580         | 1 030         | 9 168          | 1 473                       |

注:上述计算不包括由控制误差引起的不平衡电流以及由故障引起的不平衡电流。

表 2 金属中线方案投资估算

单位:万元

| 序号      | 项 目           | 直流线路<br>(不架设金属中线) | 同塔架设 JNRLH60/<br>LB1A-800/70 | 同塔架设 JNRLH60/<br>LB1A-630/55 |
|---------|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1       | 架空输电线路本体工程    | 109 987           | 136 737                      | 135 207                      |
| 2       | 辅助设施工程        | 590               | 590                          | 590                          |
| 1~2 项小计 | 小 计           | 110 577           | 137 327                      | 135 797                      |
| 3       | 编制期价差         | 5 527             | 7 851                        | 7 689                        |
| 4       | 其他费用          | 38 654            | 41 280                       | 41 158                       |
|         | 其中:建设场地征用及清理费 | 18 846            | 18 847                       | 18 846                       |
| 5       | 基本预备费 2%      | 3 095             | 3 729                        | 3 692                        |
| 6       | 特殊项目          | 0                 | 0                            | 0                            |
| 1~6 项合计 | 工程静态投资        | 157 854           | 190 188                      | 188 336                      |
| 7       | 动态费用          | 4 237             | 5 104                        | 5 055                        |
| 7.1     | 价差预备费         | 0                 | 0                            | 0                            |
| 7.2     | 建设期贷款利息       | 4 237             | 5 104                        | 5 055                        |
| 1~7 项合计 | 工程动态投资        | 162 091           | 195 292                      | 193 391                      |

表 3 武屯极址及接地极线路投资估算比较表

| 序号 | 单极大地回路方式<br>持续运行时间 | 不平衡<br>安时数                                         | 接地极投资<br>/万元 | 接地极线路投资<br>/万元 | 接地极和接地极线路<br>总投资 /万元 |
|----|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|----------------|----------------------|
| 1  | 1 个月               | 1 656<br>kA · h/a                                  | 5 100        | 7 058          | 12 158               |
|    | 3 个月               |                                                    | 6 400        |                | 13 458               |
|    | 5 个月               |                                                    | 7 800        |                | 14 858               |
| 2  | 1 个月               | 5 222<br>kA · h/a                                  | 7 000        | 7 058          | 14 058               |
|    | 3 个月               |                                                    | 8 900        |                | 15 958               |
|    | 5 个月               |                                                    | 9 800        |                | 16 858               |
| 3  | 1 个月               | 9 168<br>kA · h/a                                  | /            | 7 058          | /                    |
|    | 3 个月               |                                                    | 16 400       |                | 23 458               |
|    | 5 个月               |                                                    | /            |                | /                    |
| 4  | 1 个月               | 1 656 kA · h/a 运行 30 年 ,<br>5 222 kA · h/a 运行 10 年 | /            | 7 058          | /                    |
|    | 3 个月               |                                                    | 6 551        |                | 13 609               |
|    | 5 个月               |                                                    | /            |                | /                    |

表 4 郎冲极址及接地极线路投资估算比较表

| 序号 | 单极大地回路方式<br>持续运行时间 | 不平衡<br>安时数                                         | 接地极投资<br>/万元 | 接地极线路投资<br>/万元 | 接地极和接地极线路<br>总投资 /万元 |
|----|--------------------|----------------------------------------------------|--------------|----------------|----------------------|
| 1  | 1 个月               | 1 656<br>kA · h/a                                  | 7 585        | 4 117          | 11 702               |
|    | 3 个月               |                                                    | 8 683        |                | 12 800               |
|    | 5 个月               |                                                    | 9 842        |                | 13 959               |
| 2  | 1 个月               | 5 222<br>kA · h/a                                  | 8 497        | 4 117          | 12 614               |
|    | 3 个月               |                                                    | 9 385        |                | 13 502               |
|    | 5 个月               |                                                    | 10 567       |                | 14 684               |
| 3  | 1 个月               | 9 168<br>kA · h/a                                  | /            | 4 117          | /                    |
|    | 3 个月               |                                                    | 10 358       |                | 14 475               |
|    | 5 个月               |                                                    | /            |                | /                    |
| 4  | 1 个月               | 1 656 kA · h/a 运行 30 年 ,<br>5 222 kA · h/a 运行 10 年 | /            | 4 117          | /                    |
|    | 3 个月               |                                                    | 9 385        |                | 13 502               |
|    | 5 个月               |                                                    | /            |                | /                    |

表 5 总投资比较表

| 序号 | 不平衡<br>安时数                                         | 接地极方案工程总投资 A |              |           | 金属中线方案       | B - A 差值 |
|----|----------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|--------------|----------|
|    |                                                    | 直流线<br>路投资   | 接地极及<br>线路投资 | 工程<br>总投资 | 金属中线<br>方案 B |          |
| 1  | 1 656 kA · h/a                                     | 162 091      | 26 258       | 188 349   | 195 292      | 6 943    |
| 2  | 5 222 kA · h/a                                     | 162 091      | 29 460       | 191 551   | 195 292      | 3 741    |
| 3  | 9 168 kA · h/a                                     | 162 091      | 37 933       | 200 024   | 195 292      | -4 732   |
| 4  | 1 656 kA · h/a 运行 30 年 ,<br>5 222 kA · h/a 运行 10 年 | 162 091      | 27 111       | 189 202   | 195 292      | 6 090    |

根据不平衡电流及持续时间的对比分析,综合考虑永富直流分极运行方式持续时间和输送功率的不确定性,从兼顾运行灵活性和节约工程建设投资考虑,在直流工程 40 年使用寿命可按情景 2 运行 10 年、情景 1 运行 30 年进行工程设计。

#### 4 同塔架设金属中线投资估算

永富直流输电线路工程额定电流为 3 000 A,最大过负荷电流为 3 300 A(即 1.1 倍额定电流)。金属中线导线截面按允许载流量选择,导线允许载流量按最大过负荷电流(3 300 A)考虑。初步选择 JNR-

LH60/G3A - 300/40、JNRLH60/LB1A - 800/70、JNR-LH60/LB1A - 630/55 等 3 种导线进行分析比较。综合考虑系统远期规划及长期运行安全,推荐采用与极导线弧垂匹配性较好且载流量储备较充足的 JNRLH60/LB1A - 800/70 耐热导线方案。采用 JNRLH60/LB1A - 800/70、JNRLH60/LB1A - 630/55 两种导线的金属中线方案投资估算比较见表 2 所示。

#### 5 极址及接地极线路投资估算

##### 5.1 武屯送端接地极及接地极线路投资估算

武屯接地极按长环异形考虑,长边约 1 200 m,

表 6 各方案特点及问题汇总表

| 项目     | 对系统运行方式的影响                                                                                                                        | 优势                                                  | 存在问题                                                                                                                                                                              |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 接地极方案  | 仅能满足情景 1(最大不平衡电流 640 A)、情景 2(最大不平衡电流 1 000 A) 2 种可能存在的运行方式,难以满足情景 3(最大不平衡电流 1 580 A)的运行方式。但是,即使是不平衡较小情景 1,国内接地极亦无长期的运行经验,存在一定的风险。 | 1) 投资比金属中线方案低; 2) 线路损耗比接地极方案低; 3) 有成熟的运行经验。         | 1) 系统运行方式受到限制; 2) 对环境影响大,近年暴露出腐蚀管道等问题; 3) 长期较大电流入地,土壤温度升高对当地居民生产生活存在长期的不利影响; 4) 外部因素增多,施工和运行易受影响; 5) 武屯极址离中学约 150 m; 郎冲极址距西侧洞司村约 130 m,距尾洞村约 200 m,现有一些换流站接地极工程已暴露出与周边村庄协调难度大的问题。 |
| 金属中线方案 | 能满足不平衡电流大于 1 580 A 的各种正常或不正常运行方式; 除非出于节能降耗考虑,运行方式基本不受限制。                                                                          | 1) 运行方式灵活,基本不需要限制系统运行方式; 2) 对环境影响小,利于环保; 3) 便于运行维护。 | 1) 国内尚无同塔架设金属中线的先例,国外运行经验也较少,需进一步开展金属中线防雷保护、绝缘配合、电磁环境、交叉跨越及对地距离等研究工作; 2) 投资较比接地极方案高; 3) 线路损耗比接地极方案高。                                                                              |

短边 240 m,环长约 2 800 m,埋深约 5 m。武屯极址接地极线路长度 65 km,全线 10 mm 冰区。武屯极址及接地极线路投资估算比较表详见表 3 所示。

5.2 郎冲受端极址及接地极线路投资估算

郎冲极址的极环采用水平紧凑型,三同心圆环布置(半径 165/115/80 m)。外环分为四段,中环和内环分为两段,并由导流电缆从极环中心引接至馈电棒处,加装均流电阻。郎冲极址接地极线路长度 51.5 km,全线 5 mm 冰区。郎冲极址及接地极线路投资估算比较表详见表 4 所示。

6 总 结

接地极方案与金属中线方案总投资比较见表 5 所示。

在表 5 总投资比较表中,金属中线方案相对接地极方案而言,在不平衡安时数小于 9 168 kA·h/a 情况下,具有总投资低的特点,但国内尚无同塔架设金属中线的先例,国外运行经验也较少,需进一步开展金属中线防雷保护、绝缘配合、电磁环境、交叉跨越及对地距离等研究工作。通过对永富直流输电工程采用双极两端中性点接地方案或采用双极金属回线方案进行的技术经济比较,总结归纳出的比较结

论及方案特点,也为以后拟建相似工程的投资决策提供参考。各方案特点及问题汇总详见表 6 所示。

参考文献

[1] 黄成果. 云南电网十年展望[J]. 硅谷, 2012(3): 33 - 34.  
[2] “十二五”云南多直流送端电网研究[J]. 云南电力技术, 2013, 41(8): 97.  
[3] 李品清, 郑外生, 吴安平, 等. 云南“十二五”500 kV 规划电网结构和特征分析[J]. 南方电网技术, 20104(1): 35 - 38.  
[4] 鲁志伟. 直流放射形水平接地体接地电阻的简化计算[J]. 华东电力, 1990, 18(10): 24 - 26.  
[5] 黄海鹏. 500 kV 直流系统单极运行地电流对中性点接地变压器的影响及处理措施[J]. 广东输电与变电技术, 2004(1): 25 - 27, 28.  
[6] 王子强, 巫玲玲, 李豹, 等. 接地极线路不平衡保护分析及改进措施[J]. 电工技术, 2013(11): 34 - 37.

作者简介:

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 从事电网工程造价设计工作;  
周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作。

(收稿日期: 2014 - 07 - 28)

欢迎订阅 欢迎投稿

# 运用“十二节点工作法”精益提升变电设备大型检修工作效率

杜仁杰 郑雨欣 聂雅卓

( 国网成都供电公司 四川 成都 610041)

**摘 要:** 针对不断增加的变电设备检修工作和优质服务之间的矛盾,提出了“十二节点工作法”应用于运检工作管理中。总结并抽取整个变电设备大型检修工作流程中的十二个关键节点,实现对变电设备大型检修工作的“三定”(定人、定责、定时间)。在明确电力企业各专业分工的前提下进一步促进了专业间合作,达到了确保操作安全性、提升检修效率、缩短停电时间的效果。将变电设备大型检修这一高频常规工作流程化,从管理手段上提升电网供电可靠性。通过在运检管理中的实际应用证明了该方法的可用性和有效性。

**关键词:** 变电设备大型检修工作; 十二节点工作法; 优质服务

**Abstract:** Aiming at the contradictions between the increasing maintenance work and high-quality service requirement, 12-node work method is introduced to the operation and maintenance management of transformation equipment. 12 key nodes are summarized and extracted to achieve the targets in all 3 dimensions critical to maintenance of the large-scale transformation equipment (staff, responsibility and time). It clarifies the responsibilities of different electric power supply companies and enhances the cooperation among them as well, for the purpose of shortening outage time while achieving both operation security and maintenance efficiency. Furthermore, this method aims to routinize the highly frequent large-scale maintenance work, and to improve power supply reliability. A practical application in operation and maintenance management verifies its adaptability and validity.

**Key words:** maintenance of large-scale transformation equipment; 12-node work method; high-quality service

中图分类号: TM51 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0036-04

## 0 引 言

随着国民经济发展和坚强智能电网建设的不断提速,城市电网各电压等级变电站数量节节攀升。以成都地区为例,预计 2014 年年底,该市供电公司 110 kV 及以上变电站数量将达 218 座,其中 220 kV 变电站 43 座,110 kV 变电站 175 座。如此庞大的变电站数量,带来了变电设备大型检修工作的开展频次不断增加;另一方面,随着客户用电需求的日益提高,在固定时间节点(冬季 18:30,夏季 19:00)前将停电检修变电站的低压侧线路送出,是支撑供电企业优质服务工作的硬指标。如何在安全生产和优质服务之间找到平衡点,在保证安全生产的前提下,提升变电设备大型检修工作效率,缩短整个停电检修时间,进而为企业优质服务提供更好的后台支撑,是变电专业面临的新课题<sup>[1-2]</sup>。

## 1 变电设备大型检修工作

变电设备大型检修工作指 110 kV 及以上电压等级变电站单台主变压器停电进行检修,或更大规模的变电设备检修工作,如单台主变压器及其高压侧一段母线及出线停电检修、内桥变电站半边停电等。变电设备大型检修工作由四大步骤组成。一是前期准备,包括现场查勘、编制标准化作业书、编制并审核工作票、下达并接收预发调令等前期准备工作;二是停电作业,即运维人员根据调度命令进行停电操作,根据检修工作内容设置安全措施,并将设备交予检修人员;三是检修作业,即由检修人员开展变电设备检修;四是送电作业,即检修人员将设备交还运维人员,运维人员根据调度命令将设备恢复运行状态<sup>[3-6]</sup>。

## 2 十二节点工作法

变电设备检修工作由运维、检修人员共同完成,由调度统一协调指挥,若其中任何一个步骤出现卡滞,都会影响最终的送电时间。在传统工作模式下,变电设备大型检修工作的各工作流程无明确的时间控制节点,仅由调度根据现场工作情况进行掌控,整个工作进度推进刚性较差。此外,由于工作环节完成时间随意性较大,各专业班组都客观存在人员组织不到位和工作拖沓的情况,这是造成整个检修工作效率降低、最终导致对外送电延迟的原因之一。第三,若前端工作流程出现进度延迟,调度通常会大幅压缩最终的送电作业时间以确保准时对外送电,这将给执行送电作业的运维人员带来较大压力,极易发生不安全事件。针对上述问题,明确变电设备大型检修工作流程中各专业工作界面以提升检修效率,是解决当前困境的当务之急。

“十二节点工作法”通过抽取整个变电设备大型检修工作流程中的十二个关键节点,在确保安全的前提下,以此为坐标精确确定每个工作环节的责任人和耗时,实现对整个变电设备大型检修工作的“三定”(定人、定责、定时间),最终达到提升整个检修工作效率的效果。

以下对“十二节点工作法”中各节点做一具体说明。

节点 1: 工作前三天,运维人员完成停电申请办理工作,检修人员将工作票送达运维班组。

节点 2: 工作前两天,运维人员完成操作现场查勘,编制标准化倒闸操作查勘书。

节点 3: 工作前一天,运维人员在 12:00 以前完成工作票审定工作,调度部门在 18:00 以前将调度指令票预发到运维班组,24:00 以前运维人员完成次日操作票编写和工作现场辅助类工作。

节点 4: 工作当日 6:00,运维人员到达变电站,查看设备状态,召开操作前小会,再次明确操作重点和危险点。

节点 5: 工作当日 6:30,调度下令,运维人员开始停电操作。

节点 6: 工作当日 8:30,运维人员完成停电操作并开始布置现场安全措施。

节点 7: 工作当日 9:00,运维人员完成安全措施

设置,并向调度申请停电申请开工,向检修工作负责人交代工作现场。

节点 8: 工作当日 9:30,运维人员许可检修工作票开工,检修人员开始设备检修工作。

节点 9: 工作当日 16:00,检修人员完成检修工作并与运维人员一道进行设备验收,运维人员结束工作票并进行送电操作准备。

节点 10: 工作当日 16:30,运维人员向调度申请结束停电申请并开始送电操作。

节点 11: 工作当日 18:30,运维人员完成送电操作。

节点 12: 工作当日 19:30,运维人员完成变电站送电后的设备巡视,完善各项记录,返回运维班驻地。

表 1 为各时间节点中不同专业的职责分工。

## 3 “十二节点工作法”在检修工作中的应用

### 3.1 “十二节点工作法”在变电设备大型检修工作中的应用

2014 年春检期间,“十二节点工作法”已在成都供电公司试行,在提升整个变电检修工作效率方面成效显著。以成都供电公司变电运维工区所辖中心城区共 82 座变电站为例,2014 年春检期间,成都供电公司变电运维工区共完成各类变电设备检修工作任务 467 次,其中变电设备大型检修工作 113 次,执行倒闸操作 87 112 次,完成一种工作票 1 102 张。在此期间严格按照“十二节点工作法”把控工作进度,无一例延迟送电事件发生,且由于各工作流程安排得当、各环节分工明确、操作前准备时间充裕,停、送电操作平均耗时较去年大幅降低。以 110 kV 内桥接线变电站一半设备停电检修为例,停、送电操作耗时平均降低约 0.8 h,提升倒闸操作效率 17%。此外,作业人员现场查勘效果、工作票正确率等方面都相较于去年同期有大幅改善。

### 3.2 “十二节点工作法”在变电设备一般检修工作中的简化应用

对于单条线路、单一断路器、单一断路器及其线路停电检修,或母差保护、备用电源自动投切装置停电检修等变电设备一般非大型检修工作,由于涉及变电设备较少,在停送电操作复杂程度、检修难度、现场规模等方面都较大型检修工作简单,且工作时

表 1 “十二节点工作法”专业职责分工表

| 节点 | 时间       | 职责分工                                            |                      |        |
|----|----------|-------------------------------------------------|----------------------|--------|
|    |          | 运维                                              | 检修                   | 调度     |
| 1  | 前三天      | 完成停电申请办理                                        | 将工作票送达运维班组           | 停电申请批复 |
| 2  | 前两天      | 操作现场查勘,编制标准化倒闸操作查勘书                             |                      |        |
| 3  | 前一天      | 12:00 前完成工作票审定工作;<br>24:00 前完成次日操作票编写和工作现场辅助类工作 | 18:00 前将调度指令票预发到运维班组 |        |
| 4  | 当日 6:00  | 到达变电站,查看设备状态,召开操作前小会,再次明确操作重点和危险点               |                      |        |
| 5  | 当日 6:30  | 开始停电操作                                          | 下达停电操作调令             |        |
| 6  | 当日 8:30  | 完成停电操作并开始布置现场安全措施                               |                      |        |
| 7  | 当日 9:00  | 完成安全措施设置,并向调度申请停电申请开工,向检修工作负责人交代工作现场            | 运维人员向检修工作负责人交代工作现场   | 停电申请开工 |
| 8  | 当日 9:30  | 许可检修工作票开工                                       | 开始设备检修工作             |        |
| 9  | 当日 16:00 | 与检修人员一道进行设备验收;结束工作票并进行送电操作准备                    | 完成检修工作,与运维人员一道进行设备验收 |        |
| 10 | 当日 16:30 | 向调度申请结束停电申请并开始送电操作                              | 结束停电申请,下达送电操作调令      |        |
| 11 | 当日 18:30 | 完成送电操作                                          |                      |        |
| 12 | 当日 19:30 | 完成变电站送电后的设备巡视,完善各项记录,返回运维班驻地                    |                      |        |

间较为宽裕,可由各专业人员根据实际情况对“十二节点工作法”中相关节点进行合并简化,但必须满足检修工作票开工时间、运维人员送电操作开始时间这两个时间节点,以保证在固定时间节点前送电这一硬性指标。

在实际工作中,适用于一般检修工作的“十二节点工作法”简化应用同样取得了良好的效果。2014 年春检期间成都供电公司变电运维工区 354 次变电设备一般检修工作中,在保证安全的前提下,停送电操作平均节约时间 0.32 h。

4 结论与展望

可以看出,采用“十二节点工作法”后,整个变电设备大型检修工作流程更加清晰,在明确分工的前提下进一步促进了各专业间合作,达到了确保操作安全性、提升检修效率、缩短停电时间的效果。同时将变电设备大型检修这一高频常规工作流程化,使各专业分工明确、各司其责,共同提升供电可靠性,保障全局优质服务指标完成。

除了运用“十二节点工作法”提升变电设备大型检修效率外,从管理和技术两个方面强化变电运

维日常工作也是提升检修效率的有效途径。在管理方面一是倡导合理分工,多站、多电压等级配合操作时,整合资源,提前做好人员、车辆安排;二是强化横向协同,检修人员介入老旧变电站的停、送电操作环节,提升突发事件处理速度。在技术层面上从完善常规工作、精益个例操作、运用新型技术三个方向入手,建立运规、典票标准化模块库,加强运规、典票对现场工作的指导作用;优化操作步骤,根据每次操作实际情况减少不必要的操作项目,缩短操作时间;引入新技术,通过引入顺控<sup>[7]</sup>技术操作等新技术,直接缩减人工操作耗时的 80%。

综上,“十二节点工作法”及其他变电运维管理、技术措施的运用,能够在当前变电站数量急速增加的新形势下,在保证安全生产的基础上,不断提升变电设备大型检修工作效率,为供电企业供电可靠性和优质服务指标的完成提供更好的生产保障。

参考文献

[1] 解基干. 电力检修制度的改革[J]. 四川电力技术, 2005(1): 22-23, 55.  
[2] 张怀宇,朱松林,张扬等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 70-73.

- [3] 赵清. “状态检修 + 大检修”管理模式的必要性研究 [C]. 2012 年全国电网企业设备状态检修技术交流研讨会论文集 2012.
- [4] 国家电网公司生产技术部. 国家电网公司设备状态检修规章制度和技术标准汇编 [M]. 北京: 中国电力出版社 2008.
- [5] 吴晓晖, 甘德刚, 王红梅 等. 四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设与应用 [J]. 四川电力技术, 2012, 35(5): 64 - 67.
- [6] 四川省电力公司. 四川省电力公司输变电设备状态检

修试验规程实施细则(试行) [Z]. 2009.

- [7] 谷月雁, 司刚, 刘清瑞. 智能变电站中顺序控制的功能分析与实现 [J]. 电气技术 2011(1): 58 - 62.

作者简介:

杜仁杰(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统变电运维管理工作;

郑雨欣(1986), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统变电运维技术工作;

聂雅卓(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统变电运维技术工作。  
(收稿日期: 2014 - 09 - 16)

(上接第 15 页)

体冲击较大, 经过十多年来多次操作, 紧固叉条拐臂的螺栓发生松动且磨损严重并发生变形, 见图 6 所示。图 7 为叉条拐臂与传动轴相互摩擦磨损, 配合不紧密的照片。



图 6 动触头传动轴件磨损情况

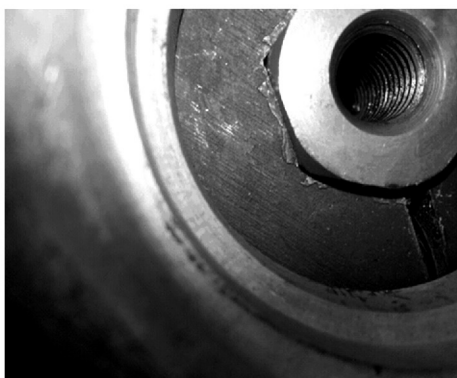


图 7 叉条拐臂与传动轴摩擦变形图

通过以上分析可知, 1813 刀闸 A、C 相刀闸共用一根传动轴, 该传动轴与叉条拐臂存在磨损, 配合不紧密, 紧固螺栓出现松动。当 1813 刀闸进行合闸时, 因 A、C 相传动轴未能固定住 A、C 相叉条拐臂, 在进行传动时未能可靠带动动触头合闸, 使得 A、C 相刀闸动触头处于半分半合的状态, 导致了 1813 刀闸处于缺相运行的状态。

### 3 故障处理

在找到故障点后, 在厂家的协助下, 检修人员更换了 1813 刀闸 A、C 相拐臂叉条和传动轴, 经过多次传动试验, 确保了 1813 刀闸能可靠分闸, 同时对 2 号主变压器的中性点间隙铜棒进行更换, 及时恢复了送电。

由于九河站 GIS 运行了 15 年, 到了中期检修的阶段, 为了防止该类刀闸再次出现此类故障, 随后检修人员对全站 GIS 刀闸的拐臂叉条都进行了检查, 发现其 1301、1021 刀闸传动轴内部已出现部分螺栓松动、拐臂等配件存在磨损, 都进行了相应的更换与紧固处理。

### 4 结 论

(1) 变压器高压侧 A、C 相缺相运行时, 中性点电压会抬高, 间隙会发生击穿, 通过设置中性点间隙过流保护能有效的保护变压器。

(2) 当电气设备发生故障时, 可通过故障录波分析得出故障的原因, 并通过高压化学试验等技术监督手段对故障进行查找, 缩短故障查找时间, 提高了效率。

(3) 国内运行了 15 年以上的 GIS 到了中期检修的期限, 部分传动件可能会出现松动和变形, 应对其进行开罐检查, 及早发现并及时处理事故隐患。

作者简介:

李馨博(1985), 工程师, 主要从事变电检修的技术工作;

程昌奎(1983), 工程师, 主要从事变电设备检修管理工作。

(收稿日期: 2014 - 09 - 01)

# 大规模风电并网系统控制问题综述

罗 亘<sup>1</sup> 汪万平<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 随着国家能源结构的调整, 风电并网系统的规模迅速扩大, 大规模风电并网对电网安全稳定运行会带来很大冲击。介绍了中国风电发展的整体概况, 分析了风电并网对电力系统运行的影响因素, 综述了风电并网系统控制技术的研究现状与发展方向。

**关键词:** 风力发电; 控制技术; 风电并网; 电力系统

**Abstract:** With the adjustment of national energy structure, the scale of wind power integration increases rapidly. Large-scale wind power integration has a great impact on the safe and stable operation of power grid. The general situation of wind power development in China is introduced, and the influence of wind power integration on the operation of power system is analyzed. Finally, a review of the research status and development trend of control technique in wind power integration is given.

**Key words:** wind power generation; control technique; wind power integration; power system.

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0040-04

## 0 引 言

随着电力系统中风力发电水平持续保持高速增长, 越来越多的风电场开始接入电压等级更高的电网。风电的大规模接入对电网的运行带来诸多影响, 如电网安全稳定、调峰调频、电能质量、备用配置等问题。这些问题不仅影响到大电网的安全运行, 同时也是制约电网接纳风电的瓶颈<sup>[1]</sup>。通过研究风电并网关键技术, 对风电并网过程进行有效控制, 能在现有的网架结构、电源结构、负荷特性、风电功率预测水平、风机制造技术水平等前提条件下, 提高电网接纳风电的能力, 从而保障电网的安全稳定运行<sup>[2]</sup>。

## 1 中国风电发展整体概况

近十年来, 风电技术快速发展, 中国风力发电的发展尤为突出。从 20 世纪 90 年代以来, 中国风电并网容量以年均 20% 左右的速率高速增长, 在各类新能源中, 风电装机增长速度居于首位, 截至 2013 年, 风电并网总容量达到 62.4 GW, 居世界第一位。华北、东北、西北、华东、华中电网风电并网容量分别达到 24 GW、19.2 GW、12.6 GW、4.7 GW、0.88

GW, 分别占各自总装机容量的 11.85%、19.01%、10.64%、2.15% 和 0.43%。其中, 北方地区的风电并网容量占总并网容量的 90% 以上。目前, 有 12 个省级电网的风电成为第二大装机电源, 分别是天津、冀北、蒙东、山东、山西、蒙西、辽宁、吉林、黑龙江、宁夏、江苏和上海。可见, 风电已成为中国支柱能源之一<sup>[3]</sup>。

## 2 风电并网对电力系统的影响

### 2.1 风电并网对电网稳定性的影响

(1) 风电并网对电网暂态稳定性的影响。在风电装机比重较大的区域电网中, 由于风电并网改变了电网原有的潮流分布、线路传输功率和整个系统的惯量, 风电接入和电网的暂态稳定性会发生变化<sup>[4]</sup>。如果区域电网足够坚强, 则在系统发生故障后, 风电机组故障清除并恢复机端电压并稳定运行, 区域电网的暂态稳定性能得到基本保证; 如果地区电网相对薄弱, 则风电机组在系统故障清除后, 无法重新建立机端电压, 风电机组运行失去稳定, 从而引发地区电网暂态电压稳定性的破坏。此时, 需要利用风电场或风电机组的保护将风电场或风电机组切除以保证区域电网的暂态稳定性; 或者通过在风电场侧安装动态无功补偿装置, 在暂态过程中及故障

后电网恢复过程中支撑电网电压,保证区域电网的暂态电压稳定性。

(2) 风电机组低电压穿越能力问题。低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)是指在风机并网点电压跌落时,风电机组能保持并网,甚至向电网提供一定的无功功率,支撑电网恢复电压,直到电网电压恢复正常,从而“穿越”低电压时间<sup>[5]</sup>。当风电装机在区域电网中所占的比例较低时,若电网出现故障,风电机组能实施被动自我保护而立即解列,不需考虑故障的持续时间及严重程度,从而最大限度地保障风电机组安全。然而,当风电装机容量在区域电网中所占的比例较大时,如果风电机组在系统发生故障时仍然采用被动保护式解列方式,则会增加整个系统的恢复难度,甚至可能加剧故障严重程度,最终导致电网电压崩溃和系统其他机组的彻底瓦解。此时必须要求风电机组具有相应的低电压穿越能力,且必须采取有效的低电压穿越措施,以维护风电场电网的安全稳定。不同国家和地区电网所提出的低电压穿越要求不尽相同。

在德国,由于风电装机比例很高,电网运营商对风电机组的低电压穿越能力要求高。如果风电机组丧失低电压穿越能力,则在故障发生后风电场切除、风机转速为零,风电场出线上有功功率、无功功率发生震荡并最终趋近于零。如果风电机组具备低电压穿越能力,则故障发生后,风电机组仍然能对系统提供有功支援,从而维持整个系统的有功平衡。

## 2.2 风电并网对电能质量的影响

风电场并网运行会在一定程度上影响电网电能质量。主要包括电压、频率、谐波、电压波动和闪变以及电压降落等方面,其影响程度与风电机组的类型、控制方式、风电场布置、接入系统的短路容量以及线路参数等诸多因素有关<sup>[5]</sup>。随着风电装机容量的增大,对电网电能质量的影响也越来越大。

(1) 无功电压。电压偏差问题属于电网的稳态问题。大幅度波动的风速引起风电机组出力大幅波动,因此风电功率的波动导致电网内某些节点电压偏差超过国家标准规定的限值。这种情况下可以采取在风电场装设一定的无功补偿装置或切除部分风电机组等措施来改善电压水平或使注入电网的风电功率减少,进而缓解风电接入对系统电压的影响<sup>[6]</sup>。另外,加强网架结构,采用具有电压无功控制能力的双馈变速风电机组等方法都可以更好地改

善风电接入区域电网的电压水平和电压稳定性。在电网的实际运行中,在风电功率波动大、无功需求量大且变化相对较快时,单纯依靠电容器组快速投切不能满足控制的要求,需要在风电场内安装能够在风速波动时提供快速的无功支撑,有利于电网和风电场的无功电压调节的动态无功电压补偿装置。

(2) 频率。风电场与常规能源最大的区别在于其输出功率的间歇性。间歇性波动的风电功率使风电场所接入系统的潮流长期处于一种重新分配的过程。除影响电压外,也在一定程度上影响系统的频率特性<sup>[7]</sup>。对于一个区域电网而言,如果风力发电容量超过区域总装机容量的一定比例,就必须采取有效的频率控制策略,增加调频容量。

(3) 谐波。含功率变换器的电力电子设备是电网产生谐波畸变的主要根源。无论何种类型的风电机组,发电机本身产生的谐波是可以忽略不计的,谐波产生的主要来源是风电机组中的变换器,谐波干扰的程度取决于变换器及滤波系统的结构状况,而且与电网的短路容量及风电机组的输出功率密切相关,即与风速的大小相关<sup>[8]</sup>。对于固定转速风电机组,在持续运行过程中没有电力电子元件的参与,几乎不产生谐波电流。实际需要考虑谐波干扰的是变速恒频风电机组,因为其运行过程中变速恒频的变换器始终处于工作状态。运用 PWM 开关变流器和合理设计的滤波器可以有效降低谐波畸变率从而抑制谐波。

(4) 电压波动和闪变。风电机组并网运行引起的电压波动及闪变,源于波动的功率输出。由风速动力特性诱发的有功功率波动取决于当地的风况和湍流强度,频率不定;与此不同,风电机组输出功率的波动主要由风速快变、塔影效应、风剪切、偏航误差等因素引起,其波动频率与风力机的转速有关。固定转速风电机组引起的闪变问题相对较为严重,某些情况下已经成为制约风电场装机容量的关键因素<sup>[9]</sup>。

(5) 电压降落。风电并网带来的电压降落通常是由风电机组的突然启动引起的,以感应电机作发电机的固定转速风电机组投入运行时引起的电压暂降较为严重<sup>[5]</sup>。为了减小风电机组投入操作引起的电压暂降,可以通过风电场中心管理系统来控制风电机组启动时的电压和出力,避免同时投入多台机组。除启动条件之外,风电并网电压降落的另一

个原因是风的变化性。

### 2.3 风电并网对系统运行成本和电网调度运行的影响

(1) 风电并网对系统运行成本的影响。风力发电的运行成本与火电机组相比很低,甚至可以忽略不计。但是风力发电的波动性和间歇性使风电场的功率输出具有很强的随机性,目前的预报水平难以满足电力系统实际的运行需要。为了保证风电并网后系统运行的可靠性,需要在原有运行方式基础上,额外安排一定容量的旋转备用以维持电力系统的功率平衡与稳定。可见风电并网对整个电力系统具有双重影响:一方面分担了传统机组的部分负荷,降低了电力系统的燃料成本,另一方面又增加了电力系统的可靠性成本<sup>[10]</sup>。

(2) 风电并网对电网调度运行的影响。风电接入给电网带来的调度问题及额外备用容量的要求完全是由于风的随机及间歇特性引起的<sup>[11]</sup>。在风电功率无法预测时,电网必须按比较保守的方案为风电留出足够的备用容量以平衡风电功率的波动;而当风电功率可以预测并且有足够的精度时,将风电功率作为负的负荷叠加到负荷预测曲线上,就可以像传统的电力系统调度方式一样根据预测的负荷与风电功率安排常规机组的发电计划,从而优化发电机组的开机组合,降低整个电网运行的费用。

## 3 风电并网系统控制技术的研究现状

国内外电网企业和研究机构风电接入及风电并网控制技术开展了深入的研究。

西班牙作为欧洲第二大风电国家,于 2006 年 6 月成立了世界上第一个可再生能源电力控制中心。对全国以分散接入为主的装机容量大于 10 MW 的风电场进行集中控制,提高了电网公司对风电的实时监控能力,有效降低了瞬时风电波动对电网的影响,提高了西班牙电网的安全运行水平。

2006 年,德国人 M Wolff 等对风电场的集群控制进行了研究,将地理上相邻分布的几个大型海上风电场汇成一个百万千瓦级的集群,控制系统协调运行该风电集群,使其从运行性能上如同一个大风电场,优化间歇性能源接入电网的性能指标。

中国在提高电网接纳风电能力的控制领域也开展了一些有益的技术实践和探索。主要包含电网安

全稳定控制、考虑电网约束条件的风电有功控制、无功电压控制 3 个方面<sup>[11-13]</sup>。

### 3.1 电网安全稳定控制现状

安全稳定控制是提高电网输送能力,保证电网安全稳定运行的重要手段,目前在电网中已有大量的应用。如二滩送出安全稳定控制、华中-西北直流背靠背联网安全稳定控制、三峡发输电系统安全稳定控制、江苏苏北安全稳定控制等。但国内电网用于提高风电送出能力的电网安全稳定控制系统还处于探索阶段,如甘肃嘉酒电网区域稳定控制系统、承德地区风电电网安全稳定控制系统等。其实现方法都是在电网故障情况下,通过采取紧急控制措施来提高正常情况下的风电送出能力。

风电场往往远离负荷中心,而这些地区的网架结构一般比较薄弱,电网送出能力有限。如甘肃酒泉千万千瓦级风电基地目前已实现风电并网 5 600 MW 左右,到 2015 年风电装机容量将大于 12 000 MW,但刚投产的 750 kV 送出通道,以及原有的 330 kV 送出通道,由于电网安全稳定问题,送出能力不能满足需求。因此,考虑风电特性的电网安全稳定控制系统还有待进一步研究和探索。

### 3.2 风电有功控制现状

风电发展初期,从电网角度,一般将其作为负的负荷考虑,通过采取一些手段,提高电网接纳风电能力,不考虑控制风电。随着风电的快速发展,通过其他手段,如改善负荷特性、优化开机方式、部署安全稳定控制提高风电送出能力等,提高电网接纳能力已经不能满足风电全部并网的需求,需要控制风电。

电网公司在控制风电有功时,初期采取调度员人工控制的模式,经过一段时间的运行,发现人工控制存在如下问题。

(1) 若调度端调节不及时,将威胁电网安全。

(2) 场站端调节速率慢,电网需要留较大的裕度保证安全。

(3) 在电网最大允许及风电出力一定的情况下,由于风电出力的随机性、间歇性,人工控制难以根据各风电场来风情况实时优化控制,易造成分配不公,且难以保证风电出力的最大化。

(4) 风电运行单位众多,调度员压力较大。

(5) 各风电场看不到其他风电场的计划及出力,不利于网源和谐。

因此,风电有功控制需考虑电网的约束条件,实

时计算电网最大可接纳风电能力,根据接纳能力的变化以及各风电场当前出力和风电场提出的加出力申请、风电功率预测,利用各风电场风资源的时空差异优化计算各风电场的计划,并下发至各风电场,各风电场有功功率控制装置根据该计划值进行控制。

目前控制风电有功功率主要考虑 2 个约束条件,一个是送出问题,另一个是调峰。风电场是否参与调频控制,国家尚没有相关规定。无论是送出还是调峰原因对风电进行控制时,一般分为 3 种控制级别:超前控制、正常控制、紧急控制。风电控制中心系统将对应的控制计划量下发至各风电场,风电场根据收到的控制级别的不同,采用不同的控制手段,超前控制一般通过变桨、启停风机实现;正常控制通过变桨、启停风机、优化切除风电场 35 kV 或 10 kV 馈线实现;紧急控制,应对紧急突发情况,通过优化切除风电场 35 kV 或 10 kV 馈线实现。

目前风电场参与有功功率控制时主要有 2 种模式:一种是最大出力控制模式,即在保证电网安全稳定的前提下,根据电网风电接纳能力计算各风电场最大出力上限值,风电场低于上限值时处于自由发电状态(爬坡速率必须满足要求),超出本风场上限值时,可根据其他风场空闲程度占用其他风场的系统资源,以达到出力最大化和风电场之间风资源优化利用的目标;二是出力跟踪模式,即以各风电场风功率预测(经控制中心站安全校核后下发的各风电场发电计划)为依据,各风电场必须实时跟踪发电计划进行有功功率的调整。

为满足风电大规模接入电网的需求,电网公司、科研院所考虑对风电有功功率进行智能控制,旨在提高电网对风电的接纳能力,保证电网的安全稳定运行,实现电网对风电有功功率控制的智能性、公平性、公开性、快速性、可靠性、经济性,提高风电的可控性,实现风电出力的最大化、最优化。

### 3.3 风电无功控制现状

目前国内实际投产应用的无功电压控制技术和装置,主要是通过对常规电厂、变电站的调节来实现无功电压控制的,并未将风电场纳入进来进行调节控制。

风电的随机性和间歇性易造成电网电压波动大,无功补偿设备投切频繁,传统电压调节控制方式已不再适用。目前国内电网对风电场接入的技术管理规范均是针对单个风电场并网点的技术指标进行

考核的。一般要求首先充分利用风电机组的无功容量及其调节能力,仅靠风电机组的无功容量不能满足系统电压调节需要的,需在风电场集中加装无功补偿装置。实际运行的风电场都是根据自身并网点的考核指标进行无功电压控制来满足电网要求。

随着风电的大规模集中开发,现有的以风电场为单位、各自独立的无功电压调节方式无法兼顾地区电网的调压需求,从而影响电网接纳风电能力。

因此,有必要研究集群风电的无功电压协调控制,提高整个区域电网的电压水平。

## 4 结论与展望

随着大规模风力发电的快速发展,其接入电网的比例逐渐增大,其对系统的影响也日益明显。对风电进行有效的控制是其大规模并网的必然选择。如何提高并网可控性,最大程度降低电网运行风险,增强其替代常规火电机组的能力成为亟待解决的问题。

此外,风电场集中控制策略的研究在国内也处于初级阶段,主要集中在基于不同目标的各类风电机组控制策略、双馈风电场的有功功率控制、无功电压控制策略,如何改善地区电压稳定性的风电控制策略等。但是在网源如何协调控制,风电接入如何影响原有的控制系统,如何实现分层分区控制等方面,还值得进一步研究。

目前,风电控制技术还处于初期阶段,随着电网企业、风电场对风电控制的持续关注及运行管理水平的提高,风电控制将面临巨大的机遇和挑战。

### 参考文献

- [1] 丁宇,陈永华,李雪明,等.大规模风电并网控制技术现状与展望[J].广东电力,2011,24(5):24-28.
  - [2] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(3):77-81.
  - [3] 潘华君,许晓峰.风电并网对电力系统稳定性影响的研究综述[J].沈阳工程学院学报,2013,9(1):54-58.
  - [4] 张红光,张粒子,陈树勇,等.大容量风电场接入电网的暂态稳定特性和调度对策研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):46-51.
  - [5] 王伟胜.风电并网:联网与系统运行[M].北京:机械工业出版社,2011.
- (下转第 64 页)

关,同时应联切小电源岩通线 151 开关和金通线 154 开关(即无论跳进线 I 或 II,两段母线上的小电源均须联切)。

(2) 分段备自投方式 3 运行,备自投跳崇通线 152 开关同时应仅联切小电源岩通线 151 开关(只联切本段母线的小电源)。

(3) 方式 4 运行,备自投跳隆通线 153 开关同时应仅联切小电源金通线 154 开关(只联切本段母线的小电源)。

根据第 2 节“并网小电源联切原则”第(6)条,联切岩通线 151 开关和金通线 154 开关的取自 110 kV 备自投跳主供电源崇通线 152 开关和隆通线 153 开关的备用跳闸出口接点的重动接点。在二次回路上,增加备自投跳 152 开关分别配置联切 151 开关(1LP1)和 154 开关(1LP3)的出口压板;备自投跳 153 开关分别配置联切 151 开关(1LP2)和 154 开关(1LP4)的出口压板。回路示意图见图 4。

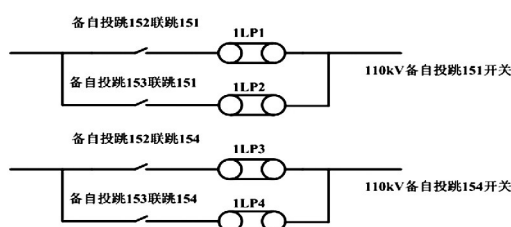


图 4 110 kV 备自投联切 110 kV 小电源回路示意图

在实际运行中,可根据不同的运行方式投入不同的出口压板,来实现上述联切要求。当投进线备自投方式 1 或 2 时,同时投入 1LP1、1LP2、1LP3 和 1LP4;当投分段备自投方式 3 或 4 时,只投 1LP1 和 1LP4。

## 4 结 论

通过分析并网小电源对电力系统各相关元件保护的影响,较全面概括了 110 kV 负荷终端变电站相关保护及自动装置动作后应采取的联切措施,在此基础上归纳提出了并网小电源联切原则,根据该原则制定了四川某 110 kV 变电站相关保护和备自投联切并网小电源方案,经过现场调试和实际运行检验表明:该方案能切实可靠地联切并网小电源,并且联切装置及回路简单,便于实现,有利于变电站的安全稳定运行。

### 参考文献

- [1] 梁兆庭,黄金. 110 kV 终端变电站小电源故障解列实例研究[J]. 四川电力技术, 2011(2): 30-31.
- [2] 方学智. 小电源上网对系统内保护影响及解决方案[J]. 贵州电力技术, 2012(9): 75-76.
- [3] 杨萍,王翠霞,张杏元. 并网小电源故障解列的探讨[J]. 陕西电力, 2003(6): 30-31.
- [4] 黎瀚. 小电源并网可靠性及故障解列问题探讨[J]. 机械与电气, 2009(11): 46-47.
- [5] 雍丽华. 小电源接入电网相关继电保护的配置和整定[J]. 电工技术, 2013(2): 27-28.
- [6] 周晨. 地方小电源对备自投控制策略的影响研究[J]. 中国科技信息, 2012(23): 39-40.

### 作者简介:

孙文成(1985),本科,助理工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制;

崔明德(1981),硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制。(收稿日期:2014-07-07)

(上接第 43 页)

- [6] 王虹富. 并网风电场的有功功率补偿与稳定性控制[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [7] 师楠,朱显辉. 风电并网的频率控制问题[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(2): 84-88.
- [8] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [9] 史保壮, Jason MacDowell, Richard Piwko, 等. 风电并网技术的新进展[J]. 电力设备, 2008, 9(11): 20-24.
- [10] 范高锋,裴哲义. 2011 年中国“三北”地区风电并网运

行及反事故措施[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 86-90.

- [11] 康潇. 风电并网对系统稳定性的影响及改善措施研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.
- [12] 张少泉,仇英辉,刘超,等. 风电并网对云南电网潮流分布与电网调峰的影响[J]. 南方电网技术, 2012, 6(5): 36-38.
- [13] 李正然,洪祖兰. 云南电网吸纳大容量风电的若干问题讨论[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 80-84.

(收稿日期:2014-09-13)

# 基于无源动态滤波器和 TSC 的无功补偿滤波仿真

沙宏哲, 冯媛硕

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 为达到消除电网谐波及无功补偿的目的, 提出了基于双可控电抗器的双调谐滤波器与 TSC(晶闸管投切电容器)相结合的方法, 传统无源滤波器中的两个固定电抗器用两个可变电抗器替代, 构成了无源动态滤波器, 改善了传统无源滤波器易受参数影响而失谐的缺点; TSC 能够快速跟踪补偿电网中的无功功率, 并且具有不产生谐波等优势。通过仿真证明了可通过调节两电抗器值来纠正双调谐滤波器因两个电容值改变引起的失谐; 并仿真验证了滤波器在消除谐波的同时有无功补偿的作用, 从而与 TSC 并联结合来提高电能质量。

**关键词:** 谐波; 无功补偿; 双调谐滤波器; TSC; 可变电抗器; 电能质量

**Abstract:** In order to eliminate the harmonic and compensate the reactive power in power grid, the double-tuned filter based on double-controlled reactor combined with TSC (thyristor-switched capacitor) is proposed. Two fixed reactors in traditional passive filter are replaced by two variable reactors, thus a passive dynamic filter is formed which improves the disadvantages that the traditional passive filter is easy to detune affected by the parameters. TSC can fast track and compensate the reactive power in power grid, and has the advantages of not producing harmonic. The simulation proves that the mistuning of double-tuned filter which is caused by the change of two capacitances can be corrected by changing the values of two reactors. And the simulation verifies the effectiveness of the filter to eliminate the harmonic and compensate the reactive power, thereby improving the power quality by paralleled with TSC.

**Key words:** harmonic; reactive compensation; double-tuned filter; thyristor-switched capacitor (TSC); variable reactor; power quality

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0044-05

## 0 引言

近年来, 随着对电能质量问题的重视, 谐波抑制和无功补偿成为了电网中研究的重要问题。无源滤波器以其低廉的成本、成熟的技术, 成为现行滤波的主要方法。谐波抑制和无功补偿之间有着密不可分的联系, 首先, 无功功率由两部分构成, 一部分是电网基波消耗的, 另一部分由谐波消耗, 所以无源滤波器在消除谐波的同时, 相当于补偿了谐波消耗的无功功率。其次, 无源滤波器对于电网基波呈现容性, 也会补偿部分无功功率。

传统无源滤波器的元件参数都是固定的, 当由于电网频率偏差、元件参数漂移、环境温度变化等原因造成滤波器失谐时, 不能使其保持在理想的谐振状态, 为使无源滤波器在失谐的情况下能够调整自身参数并自动恢复到谐振状态, 提出了基于双可控电抗器的双调谐滤波器。将此滤波器和无功补偿

装置结合使用, 能有效地消除谐波和进行无功补偿。

## 1 主电路结构

装置的主电路如图 1 所示, 将基于双可控电抗器的双调谐滤波器和晶闸管投切电容器(thyristor-switched capacitor, TSC)并联在电网中, 其中左侧为无源动态滤波器, 该滤波器可同时滤除两种次谐波, 在两个电容器值改变时可通过调节两个可控电抗器使滤波器恢复到谐振状态。无源动态滤波器中的可变电抗器采用正交磁化式可变电抗器, 该电抗器具有谐波含量低、电感值连续可调等优点。TSC 作为静止无功补偿装置, 自身不产生谐波, 投资小, 可实现对无功功率的动态补偿。

## 2 无源动态滤波器的设计

无源滤波器是由电感、电容利用串联谐振原理

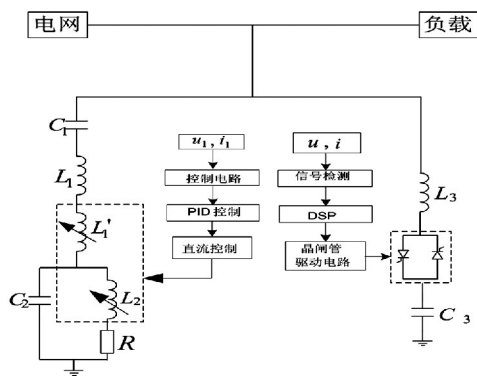


图 1 装置的主电路图

组合而成,对谐波电流呈低阻特性,从而使电网中的谐波电流最大程度地流入滤波器,起到消除电网谐波的目的。常用的无源滤波器有单调谐滤波器和双调谐滤波器。双调谐滤波器相比于单调谐滤波器不仅可以同时滤除两个不同频率的谐波,而且只需其中一个电感承受较高的冲击电压,对其余元件的设计要求降低,从而节约了成本。双调谐滤波器的显著优势,使其越来越多地被使用,因此研究双调谐滤波器具有重要的科研意义。

传统双调谐滤波器的参数都是固定的,当滤波器由于电容值改变造成谐振点偏移时,不能自动恢复到谐振状态。为使双调谐滤波器能够调整因元件参数改变引起的失谐,提出基于双可变电抗器的双调谐滤波器。在双调谐滤波器的基础上,用两个可控电抗器代替固定电抗器,通过实时检测滤波支路中的各项参数,利用控制器调节滤波器的电感值,从而达到精确调谐的目的。

## 2.1 无源动态滤波器的结构及参数计算

无源动态滤波器结构如图 2 所示,其中  $L_1$  为固定电抗器,  $L'_1$ 、 $L_2$  为可变电抗器。

双调谐滤波器由串联谐振回路和并联谐振回路两部分串联组成,设串联电路调谐频率为  $\omega_s$ ,等值阻抗为  $Z_s$ ;并联电路调谐频率为  $\omega_p$ ,等值阻抗为  $Z_p$ ;设基波频率为  $\omega_0$ ,滤波器的两个谐振频率分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 。

双调谐滤波器总阻抗为

$$Z = Z_s + Z_p = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} + \frac{\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2}\right) \quad (1)$$

当双调谐滤波器工作在理想谐振状态时,虚部为 0,即

$$-\omega^4 L_1 C_1 L_2 C_2 + \omega^2 (L_1 C_1 + C_1 L_2 + L_2 C_2) - 1 = 0 \quad (2)$$

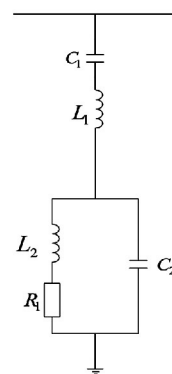


图 2 双调谐滤波器

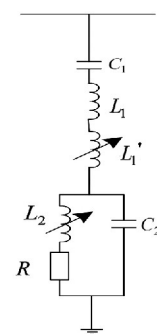


图 3 无源动态滤波器

由韦达定理解得

$$\omega_1^2 \omega_2^2 = \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2} \quad (3)$$

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = \frac{L_1 C_1 + L_2 C_1 + L_2 C_2}{L_1 C_1 L_2 C_2} \quad (4)$$

$$\omega^2 = \omega_1 \omega_2 \quad (5)$$

按给定基波无功设计方法设计双调谐滤波器参数时,当

$$\omega_s = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (6)$$

调谐滤波器的复合频率最好,将式(6)带入式(3)得到

$$\omega_s = \omega_p = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (7)$$

双调谐滤波器相对基波的无功功率为

$$Q = \frac{U^2}{\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} + \frac{\omega_0 L_2}{1 - \omega_0^2 L_2 C_2}} \quad (8)$$

当双调谐滤波器处于谐振状态时,虚部为 0,所以

$$\omega_1 L_1 - \frac{1}{\omega_1 C_1} + \frac{\omega_1 L_2}{1 - \omega_1^2 L_2 C_2} = 0 \quad (9)$$

$$\omega_2 L_1 - \frac{1}{\omega_2 C_1} + \frac{\omega_2 L_2}{1 - \omega_2^2 L_2 C_2} = 0 \quad (10)$$

由式(6)~(10)解得

$$C_1 = \frac{Q(\omega_0^4 + \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_0^2\omega_1^2 - \omega_0^2\omega_2^2)}{U^2\omega_0\omega_1\omega_2(\omega_0^2 - \omega_1\omega_2)} \quad (11)$$

$$L_1 = \frac{U^2\omega_0(\omega_0^2 - \omega_1\omega_2)}{Q(\omega_0^4 + \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_0^2\omega_1^2 - \omega_0^2\omega_2^2)} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{Q(\omega_0^4 + \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_0^2\omega_1^2 - \omega_0^2\omega_2^2)}{U^2\omega_0(\omega_0^2\omega_1^2 + \omega_0^2\omega_2^2 + 2\omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1\omega_2^3 - \omega_1^3\omega_2 - 2\omega_0^2\omega_1\omega_2)} \quad (13)$$

$$L_2 = \frac{U^2\omega_0(\omega_0^2\omega_1^2 + \omega_0^2\omega_2^2 + 2\omega_1^2\omega_2^2 - \omega_1\omega_2^3 - \omega_1^3\omega_2 - 2\omega_0^2\omega_1\omega_2)}{Q\omega_1\omega_2(\omega_0^4 + \omega_1^2\omega_2^2 - \omega_0^2\omega_1^2 - \omega_0^2\omega_2^2)} \quad (14)$$

以电容器  $C_2$  为例,计算电容变化量、电感变化量及系统频率变化量之间的关系。设系统频率的相对变化量为  $\alpha = \Delta\omega/\omega$ ,  $L_1$  的变化量为  $\beta = \Delta L_1/L_1$ ,  $L_2$  的变化量为  $\varphi = \Delta L_2/L_2$ , 电容器  $C_2$  的变化量为  $\gamma = \Delta C_2/C_2$ 。

则由公式(5)可得

$$\alpha = -\frac{\omega^2(\omega^2 - \omega_0^2)}{2(\omega^4 - \omega_1^2\omega_2^2)}\beta - \frac{(\omega^2\omega_0^2 - \omega_1^2\omega_2^2)}{2(\omega^4 - \omega_1^2\omega_2^2)}\varphi - \frac{\omega^2(\omega^2\omega_0^2 - \omega_1^2\omega_2^2)}{2\omega_0^2(\omega^4 - \omega_1^2\omega_2^2)}\gamma \quad (15)$$

求式(15)中  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  的变化量,可得

$$\frac{\Delta\omega_1}{\omega_1} = -\frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}\frac{\Delta L_1}{L_1} - \frac{\omega_0^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}\frac{\Delta L_2}{L_2} - \frac{\omega_2^2(\omega_0^2 - \omega_2^2)}{2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}\frac{\Delta C_2}{C_2} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta\omega_2}{\omega_2} = -\frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}\frac{\Delta L_1}{L_1} - \frac{\omega_0^2 - \omega_1^2}{2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}\frac{\Delta L_2}{L_2} - \frac{\omega_1^2(\omega_0^2 - \omega_1^2)}{2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}\frac{\Delta C_2}{C_2} \quad (17)$$

经分析计算可知,如果电容器参数发生变化时,

$\frac{\Delta\omega_1}{\omega_1}$ 、 $\frac{\Delta\omega_2}{\omega_2}$  均不为 0,滤波器没有工作在理想谐振状态,此时可通过调节电抗器,使  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的相对变化量为 0,从而滤波器重新回到谐振状态。

## 2.2 无源动态滤波器的控制策略

当双调谐滤波器工作在谐振状态时,相对要滤除的谐波,滤波器支路阻抗应为纯阻性,此时电压电流的相位差为 0。因此以相位差为 0 作为控制目标,对电抗器进行调节。在滤波支路中通过电压互感器、电流互感器采集电压电流信号,经信号调理后对电压、电流相位进行比较,将相位差送入 PID 调节器进行控制,控制器输出控制信号调节电抗器,从而实

现对滤波器的调整。

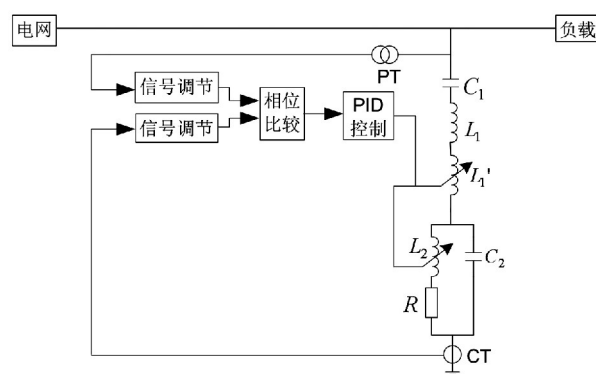


图 4 无源动态滤波器控制图

## 3 TSC 的投切控制

TSC 属于静止无功补偿器,在组合装置中作为无功补偿的主要设备,能实现系统整体的无功补偿。

TSC 装置的核心问题是电容器投切时刻的选择,为了避免电容器组在投切过程中的冲击电流,需要选择合适的时刻来触发晶闸管导通和关断,在选取晶闸管触发点时,总的原则是:TSC 投入电容器组的时刻,必须是电源电压与电容器预先充电电压相等的时刻。为此选择在晶闸管两端安装电压检测器件,因为电容器两端的电压难以确定,很难精准地确定电容器投切时间,通过安装零电压触发装置,将晶闸管两端的电压参数通过光电耦合器送到过零检测器件。当检测到器件两端电压相等,即晶闸管两端的电压差为 0,这时过零检测信号和投切信号同时作用触发晶闸管,实现了晶闸管的零电压触发。

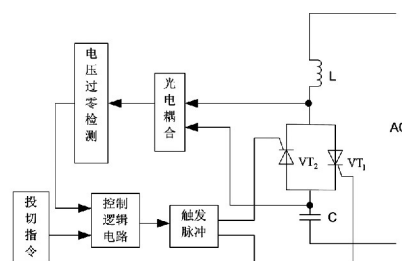


图 5 零电压触发原理图

## 4 仿真分析

本装置通过 Matlab/Simulink 进行仿真分析,谐波源采用三相不可控整流桥电路,可用来模拟实际电网中的  $6k \pm 1$  次谐波分量,这些谐波中又以 5、7

次谐波的含量最多,且对电网的影响最大。电网峰值为 311 V,然后设计一组双调谐滤波器,主要用于滤除三相不可控流桥电路产生的 5、7 次谐波,双调谐滤波器的参数为:  $L_1 = 25 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 11.579 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $L_2 = 2.857 \text{ mH}$ ,  $C_2 = 101.32 \text{ }\mu\text{F}$ 。然后设计一组容量为 5 kvar 的单相 TSC 型无功补偿装置,作为主要的无功补偿设备。

双调谐滤波器正常工作时,具有较好的滤波效果,参数漂移及环境影响会使电容值发生改变,以  $C_1$ 、 $C_2$  为例,当  $C_1$  减少 6%,  $C_2$  减少 8% 此时  $C_1$  变为  $10.885 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2$  变为  $93.219 \text{ }\mu\text{F}$ ,经计算可知,  $L_1$  需增加  $1.596 \text{ mH}$ ,  $L_2$  需增加  $0.248 \text{ mH}$ ,以此来达到新的谐振状态。以 A 相为例,调节  $L_1$ 、 $L_2$  前后 A 相电流波形对比。

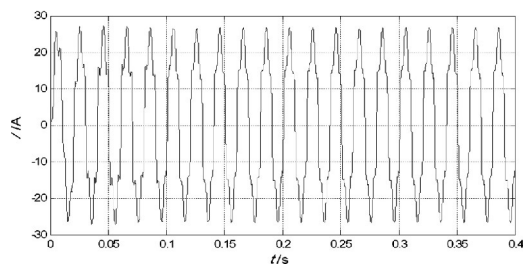


图6 电容  $C_1$ 、 $C_2$  改变后 A 相电流波形

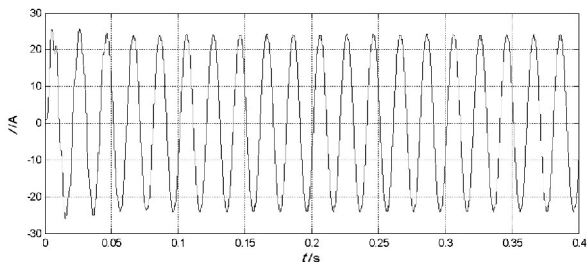


图7 调节电感  $L_1$ 、 $L_2$  后 A 相电流波形

由图 6、图 7 可知,当双调谐滤波器因电容值改变时可通过调节电感值使其恢复得到谐振状态。

在电路中未投入滤波器和 TSC 时, A 相中因谐波存在出现波形畸变。此时,谐波畸变率为 16.51%,功率因数为 0.88,当接入双调谐滤波器后,5、7 次谐波被滤除。电流波形有了明显改善,谐波畸变率降为 3.51%,谐波含量减少的同时系统的功率因数也提高。并入滤波器前后 A 相电流波形及谐波畸变率对比如图 8、图 9、图 10、图 11 所示。

滤波器投入前后,谐波畸变率降低,电流波形明显改善。滤波器在滤除谐波的同时,会对功率因数产生影响。滤波器投入前后功率因数变化如图 11、图 12 所示。

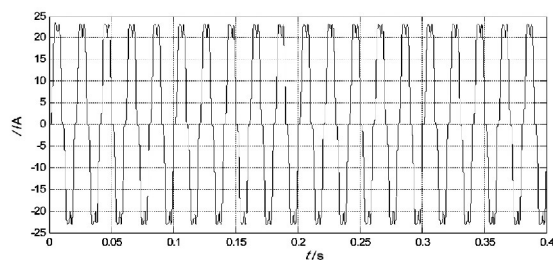


图8 未并入滤波器 A 相电流波形

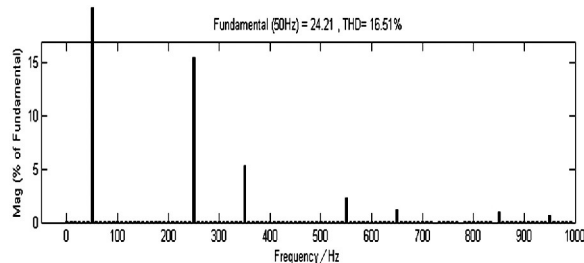


图9 未并入滤波器谐波畸变率

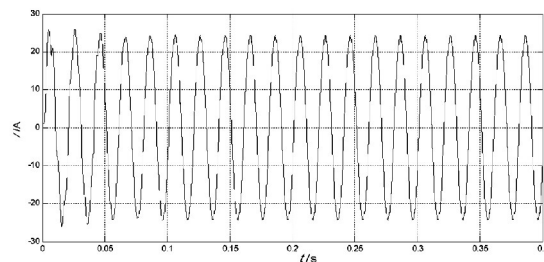


图10 并入滤波器 A 相电流波形

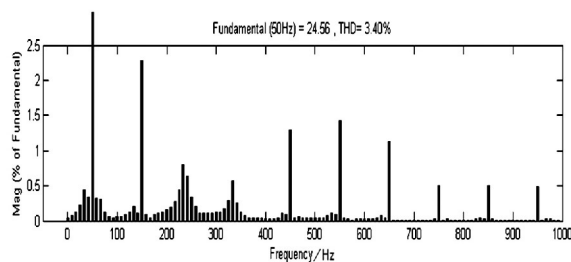


图11 并入滤波器谐波畸变率

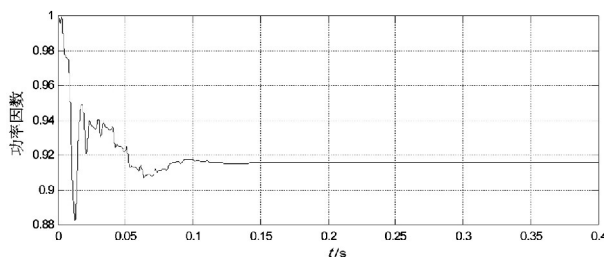


图12 未并入滤波器 A 相功率因数

经以上仿真可知,在双调谐滤波器因两电容值改变导致失谐时,通过改变两电感值使滤波器重新回到谐振状态。滤波器在消除谐波的同时,也相当

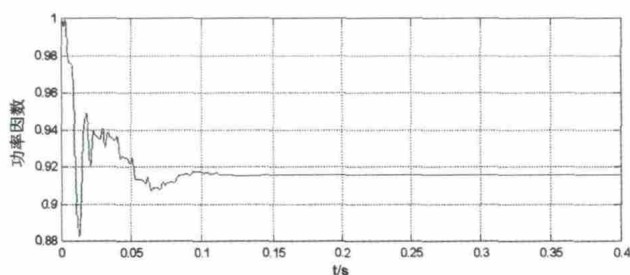


图 13 并入滤波器 A 相功率因数

于补偿了谐波消耗的无功功率,从而提高了功率因数。此时的功率因数并未达到国家标准,还需要结合使用无功补偿装置。从而将无源动态滤波器和 TSC 并联在电网中来达到提高电能质量的目的。

## 5 结 论

基于双可控电抗器的双调谐滤波器,具有较强的自动调节能力,较为精准的调谐结果。作为传统无源滤波器的改进,弥补了现行双调谐滤波器的缺点。因其兼顾无功补偿作用,选择与 TSC 组合使用,从而达到消除谐波和无功补偿的作用。

### 参考文献

- [1] 苏恒. 双调谐滤波器设计与失谐问题的研究[D]. 江门: 五邑大学, 2013.
- [2] 马世贤. 基于可控电抗器的双调谐滤波器研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [3] 徐平凡, 陈忠仁, 肖星. TSC 动态无功补偿装置的仿真研究[J]. 电源技术应用, 2012(3): 32-35.
- [4] 倪常茂. 基于多调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [5] 崔士杰, 汪建华. 基于 MATLAB 的单相全控整流电路功率因数测定[J]. 武汉工程大学学报, 2010(1): 90-92.
- [6] 王会涛, 钱希森, 任开春. 基于 Matlab 的功率因数校正电路的仿真分析[J]. 电源世界, 2007(3): 40-42.
- [7] 倪常茂, 刘振兴. 基于双调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波装置[J]. 电力自动化设备, 2012(7): 124-128.
- [8] 马世贤, 康明才, 黄锦安. 全控/部分可控双调谐滤波器仿真试验[C]. 2006 中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集, 2006: 4.
- [9] 徐永海, 王铭诚. 双调谐滤波器的参数选择[J]. 现代电力, 1995(2): 6-11.
- [10] 肖遥. 双调谐滤波器和三阶滤波器的参数计算[J]. 湖北电力, 2000(2): 5-6.
- [11] 董海波, 张丽, 罗剑锋. 双调谐滤波器在矿井电网谐波治理中的应用研究[A]. 中国煤炭学会自动化专业委员会, 2008: 3.
- [12] 李崇. 基于双可控电抗器的双调谐滤波器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [13] 陈敏. 无源动态谐波滤波器的建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

### 作者简介:

沙宏哲(1990), 工学硕士研究生, 主要研究无源动态滤波器和 TSC 的无功补偿、电力系统及其自动化;

冯媛硕(1988), 工学硕士研究生, 主要研究高压直流输电系统仿真、电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2014-07-17)

(上接第 28 页)

- [2] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用[J]. 吉林电力, 2011, 15(2): 45-49.
- [3] GB/T 1179-2008 圆线同心绞架空导线[S].
- [4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用[J]. 电力建设, 2010, 31(12): 10-20.
- [5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 105-106.

- [6] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究[J]. 电力建设, 2013, 34(9): 102-104.

### 作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 从事电网工程造价设计工作。

(收稿日期: 2014-07-25)

# 基于改进蚁群优化算法的电力谐波 和间谐波的检测与分析

王志川<sup>1</sup>, 刘丹莉<sup>1</sup>, 彭祥华<sup>2</sup>, 周 群<sup>2</sup>

(1. 国网自贡供电公司, 四川 自贡 643000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 为了准确测量电力系统中的谐波和间谐波参数, 提高电能质量, 提出一种将 FFT 频谱区间连续细化算法与改进的蚁群优化相结合的混合算法。通过改进蚁群算法的适应度函数和转移概率, 降低了算法的复杂度, 提高了算法的速度。算法的原理是通过 FFT 频谱区间连续细化算法检测谐波和间谐波频率值, 根据频率检测值构建幅值和相位的适应度函数, 运用改进的蚁群算法对幅值和相位参数进行估计, 从而实现电力谐波和间谐波参数的检测与分析。通过对比仿真实验, 验证了该混合算法能够获得较高精度的谐波和间谐波参数值, 具备较强的抗噪声干扰能力。

**关键词:** 频谱区间细化; 改进蚁群优化; 混合算法; 谐波分析; 谐波检测

**Abstract:** In order to accurately measure the harmonic and inter-harmonic parameters in power system and to improve the power quality, a hybrid algorithm combining FFT spectrum interval continuous refinement algorithm and improved ant colony optimization (ACO) is proposed. By improving the fitness function of ACO algorithm and the transition probability, the complexity is reduced and the speed is improved. FFT spectrum interval continuous refinement algorithm is used to detect the frequency values of harmonics and inter-harmonics, then according to the frequency detection values the fitness function of the amplitude and phase parameters is established. And then the improved ACO algorithm is used to estimate the parameters of amplitude and phase so as to realize the detection and analysis of harmonic and inter-harmonic parameters. The comparison of computer simulation results verifies that the proposed hybrid algorithm can accurately estimate the parameters of harmonics and inter-harmonics, and have a stronger ability to resist noise.

**Key words:** frequency interval refinement; improved ant colony optimization; hybrid algorithm; harmonic analysis; harmonic detection

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0049-05

## 0 引 言

在现代电力系统中, 由于接入了大量的电力电子装置和非线性负载, 使得系统中产生了大量的谐波和间谐波, 这给电力系统设备的安全经济运行带来严重的危害。因此, 对谐波和间谐波的精确检测和分析具有重要的工程实际意义。

谐波分析的主要任务是确定谐波的成分以及在有效精度范围内计算谐波或者间谐波的频率、幅值和相位。谐波分析方法主要有: 快速傅里叶变换法及其改进算法<sup>[1-4]</sup>、小波分析法<sup>[5-6]</sup>、神经网络法<sup>[7-8]</sup>、粒子群算法<sup>[9]</sup>等等。对谐波参数的检测和分析, 大多采用 FFT 及其改进算法<sup>[1-4]</sup>, 改进算法中大多采用加窗谱线插值, 谱线已由单谱线发展到三

谱线<sup>[2-4]</sup>。但随着谱线的增多, 算法的复杂程度也在增加, 另外, 窗函数的选取在很大程度上也影响算法的复杂性。小波变换相比于 FFT 具有优良的时频特性, 文献[5-6]验证了该方法的有效性, 但小波变换可能存在的混频现象和算法复杂的问题, 影响了算法的计算精度和速度。文献[7-8]通过神经网络算法实现谐波信号的并行处理和自学习能力, 获得较高精度的谐波参数, 但算法复杂, 对硬件要求高, 且自学习时间较长。文献[9]提出粒子群算法分析谐波, 在已知谐波频率的情况下, 能够有效估计幅值和相位, 但要获得较高精度的谐波参数, 需要进一步改进算法。

蚁群优化(ant colony optimization, ACO)<sup>[10]</sup>是由意大利学者 M. Dorigo 等人于 1991 年首先提出的一种基于种群寻优的启发式搜索算法。研究显示,

该算法在求解复杂优化问题(特别是离散优化问题)等方面有一定的优势,是一种很有发展前景的优化算法<sup>[11]</sup>。将结合 FFT 频谱区间连续细化算法和改进的蚁群优化算法,利用 FFT 频谱区间连续细化算法检测谐波或间谐波频率,再利用改进的蚁群优化算法估计相应的谐波或间谐波的幅值和相位,实现对电力系统谐波和间谐波参数的高精度检测。通过仿真实验,验证了改进蚁群算法在电力间谐波分析中的正确性和有效性,为谐波治理提供了一种检测和分析的新方法。

## 1 算法原理

### 1.1 频率的 FFT 谱区间连续细化算法

首先通过 FFT 对间谐波信号进行全景谱分析,获得各谐波或间谐波频率的粗略范围,再对关注的频谱区间插入相应点数进行连续细化,利用改进的 DFT 算法进一步估计精确的频率值。其原理<sup>[12]</sup>为:对于采样频率为  $f_s$ ,采样点数为  $N$  的间谐波时间序列  $f(t)$ ,其中  $t = k\Delta t$ ,  $\Delta t = 1/f_s$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。则离散的傅里叶级数为

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \cos(2\pi kn/N) \\ b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \sin(2\pi kn/N) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n = 0, 1, 2, \dots, N/2$ 。此时  $n\Delta f$  处幅值矢量表达式为  $a_n - ib_n$ ,经离散傅里叶变换后频率分辨率为  $\Delta f = f_s/N$ ,当采样点数固定时,频率分辨率无法再提高。

根据采样定理可知,间谐波时间序列  $f(t)$  包含于从 0 到  $f_s/2$  的频率信息,如果用连续傅里叶变换对频谱进行计算,把频谱线看成连续的,即把式(1)中的  $n$  看成是一个在区间内  $0 \leq n \leq N/2$  的连续实数,则式(1)变换为

$$\begin{cases} a(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \cos(2\pi kf/f_s) \\ b(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(t) \sin(2\pi kf/f_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $0 \leq f \leq f_s/2$ ,此时的频率分辨率不再受采样点数的限制,  $f$  变成一个连续的频率。

对包含于全景谱  $[0, f_s/2]$  内的频率子区间  $[f_1, f_2]$ ,利用式(2)进行  $M$  点等间隔频谱分析,以获取该区间内频谱线最大峰值所对应的频率  $f_i$  ( $i$  为谐波

和间谐波个数),其实现步骤如下。

- (1) 确定频率分辨率  $\Delta f = (f_2 - f_1) / M$ ;
- (2) 计算频率序列  $\{f_1, f_1 + \Delta f, f_1 + 2\Delta f, \dots, f_1 + M\Delta f = f_2\}$ ;
- (3) 根据式(2)计算  $M+1$  点频率序列的幅值;
- (4) 搜索谱线最大幅值点对应的频率  $f_i$ ,即为细化后的频率。

### 1.2 幅值和相位检测的改进蚁群优化算法

#### 1.2.1 适应度函数的改进

ACO 与其他进化算法相似,通过对候选解组成的群体进化来寻求最优解。对于给定的含间谐波的谐波信号

$$f(t) = \sum_{i=1}^H A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + n(t) \quad (3)$$

式中  $H$  为谐波信号的个数;  $\omega_i = 2\pi f_i$ ;  $A_i, \omega_i, \varphi_i$  分别为谐波或间谐波信号的幅值、角频率和初相位,当  $i = 1$  时  $A_1, \omega_1, \varphi_1$  分别表示为基波的幅值、角频率和初相位;  $n(t)$  表示白噪声。

对式(3)谐波和间谐波项分解得

$$g(t) = \sum_{i=1}^H [a_i \sin(\omega_i t) + b_i \cos(\omega_i t)] \quad (4)$$

这样各谐波或间谐波幅值  $A_i$  和初相位  $\varphi_i$  的计算就转化为对参数  $a_i, b_i$  的估计。由于受算法和噪声的影响,检测频率往往不完全等于实际频率。因此,要利用蚁群算法优化参数  $a_i, b_i$ ,式(4)应修改为  $g'(t) = \sum_{i=1}^H [a_i \sin(\omega'_i t) + b_i \cos(\omega'_i t)]$  ( $\omega'_i$  为检测频率),此时只需设置蚁群的最终位置为  $\{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_H, b_H)\}$ ,在一定的谐波分析时间  $T_A$  下,使得适应度函数  $fitness$  取得最小,即

$$\min fitness = \int_0^{T_A} [f(t) - g'(t)]^2 dt \quad (5)$$

考虑到谐波项数  $H$  比较大时,式(5)的计算量较大,不利于对参数  $a_i, b_i$  的快速检测,于是令  $\delta = A_i \sin(\omega'_i t + \varphi_i) - a_i \sin(\omega'_i t) - b_i \cos(\omega'_i t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, H$ ,则式(5)适应度函数变为

$$fitness = \int_0^{T_A} (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_H + n(t))^2 dt \quad (6)$$

对式(6)展开得

$$fitness = \int_0^{T_A} [\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_H^2 + n^2(t) + 2(\delta_1 \sum_{i=2}^H \delta_i + \delta_2 \sum_{i=3}^H \delta_i + \dots + \delta_{H-1} \delta_H + n(t) \sum_{i=0}^H \delta_i)] dt \quad (7)$$

考察平方项和交叉项易知,平方项积分  $\int_0^{T_A} \delta_i^2 dt$  的极值寻优决定了幅值和相角参数的最优解( $a_i$ ,

$b_i$ ) ,即交叉项的极值包含于平方项 ,因此可以提取平方项之和的积分作为新的适应度函数。此外  $\mu^2(t)$  积分后为一常数 ,不影响参数  $a_i$ 、 $b_i$  的估计 ,在一定程度上起到了消除噪声的作用 ,同时提高了参数估计的运算速度。

综上所述 ,关于幅值和相角参数  $a_i$ 、 $b_i$  的改进适应度函数为

$$fitness(a_i, b_i) = \int_0^{T_A} \sum_{i=1}^H [A_i \sin(\omega'_i t + \varphi_i) - a_i \sin(\omega'_i t) - b_i \cos(\omega'_i t)]^2 dt \quad (8)$$

式中  $\omega_i$ 、 $\omega'_i$  分别表示第  $i$  项谐波或简谐波的实际频率和检测频率 ,经改进蚁群算法优化参数  $(a_i, b_i)$  后 ,谐波和间谐波的幅值和相角可由式 (9) 估计

$$\begin{cases} A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \\ \arctan\left(\frac{b_i}{a_i}\right) \times 180 \\ \varphi_i = \frac{\arctan\left(\frac{b_i}{a_i}\right) \times 180}{\pi} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, H) \quad (9)$$

### 1.2.2 转移概率的改进

在蚁群算法中 ,转移概率是指导算法进行全局寻优和局部寻优的参数 ,在很大程度上决定了算法的收敛速度和寻优精度。为了提高算法的全局和局部寻优能力 ,基于轮盘赌选择的原理 ,结合文献 [13] 通过评价最优蚂蚁与普通蚂蚁的适应度值来构建转移概率 ,即

$$P_{ij} = (fitness(j) - fitness(i)) / fitness(j) \quad (10)$$

式中  $i$ 、 $j$  分别表示普通蚂蚁个体和最优蚂蚁个体 ;  $fitness$  为适应度函数值。相比传统的转移概率  $P_{ij} =$

$$\begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in allowed} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta} & j \in allowed \\ 0 & else \end{cases}$$

改进的转移概率减少了算

法的参数 ,在一定程度上也提高了算法的稳定性。

于是 ,谐波和间谐波幅值和相角的优化流程可表述如下。

(1) 初始化蚁群。主要包括设置蚁群的数量、迭代次数、搜索范围、局部搜索阈值以及信息素挥发系数等。

(2) 随机生成蚂蚁在解空间中的初始位置并根据适应度函数构造信息素矩阵  $\tau_{ij}(t)$ 。

(3) 每只蚂蚁执行由城市  $i$  到城市  $j$  的转移。当前蚂蚁根据前面蚂蚁所留下的信息素 ,修改自己的解结构 ,完成一次循环。

(4) 蚂蚁集体循环移动。将转移概率  $P_{ij}$  与设置

的局部搜索阈值比较 ,指导蚂蚁执行局部搜索或全局搜索。

(5) 评价蚁群。对每只蚂蚁的适应度值  $fitness(a_i, b_i)$  做出评价 ,并记录蚁群最优解位置  $(a_i, b_i)$ 。

(6) 更新信息素矩阵。信息素更新的具体方式为  $\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + fitness(a_i, b_i)$  ,其中 ,  $fitness(a_i, b_i)$  为适应度函数 ,也称信息素更新算子  $\rho$  为信息素挥发系数。

(7) 判断是否满足终止条件。若满足 ,输出最优解  $(a_i, b_i)$  ,由式 (9) 计算谐波和间谐波的幅值和相位 ;否则 ,信息素挥发 ,算法返回继续进行步骤 (3)。

## 2 仿真实验

### 2.1 无噪声干扰下的谐波和间谐波参数检测

为了验证所提算法设待检测的谐波和间谐波信号为

$$f(t) = \sum_{i=1}^9 A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (11)$$

式中 ,各谐波、间谐波的频率、幅值和相角如表 1 所示。

表 1 谐波、间谐波参数

| 频率 / Hz | 幅值 / p. u. | 相角 / ° |
|---------|------------|--------|
| 50      | 1          | 0      |
| 75      | 0.18       | 0      |
| 250     | 0.097      | 30     |
| 275     | 0.1        | 30     |
| 350     | 0.02       | 45     |
| 450     | 0.03       | 45     |
| 550     | 0.04       | 45     |
| 560     | 0.01       | 0      |
| 650     | 0.024      | 0      |

采样频率为 2 000 Hz ,采样点数为 1 024 ,频率细化插入点数为 100 ;经过多次尝试 ,蚁群优化参数设置为 :蚁群数目为 80 ,迭代步数为 500 ,搜索范围为  $a_i, b_i \in [-1, 1]$  ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ) ,局部搜索阈值为 0.1 ,信息素挥发系数为 0.5 ,仿真结果如表 2 所示。

由表 2 的仿真结果可知 ,当谐波或间谐波频率检测精度较低时 ,相角的估计精度相对较低 ,但绝对误差都低于 1.1 ;而幅值的估计精度保持在较高水

平,其相对误差均低于 0.056%。

表 2 谐波和间谐波参数的仿真结果

| 频率/Hz | $a_i$ /p. u. | $b_i$ /p. u. | 幅值/p. u. | 相角/ $^{\circ}$ |
|-------|--------------|--------------|----------|----------------|
| 50.0  | 1.000 0      | 0.010 0      | 1.000 0  | 0.000 0        |
| 75.1  | 0.180 1      | -0.001 1     | 0.180 1  | -0.362 1       |
| 249.9 | 0.083 7      | 0.044 1      | 0.097 0  | 30.369 5       |
| 275.0 | 0.086 6      | 0.050 0      | 1.000 0  | 30.005 4       |
| 349.9 | 0.014 1      | 0.014 2      | 0.020 0  | 45.271 5       |
| 450.0 | 0.021 2      | 0.021 2      | 0.030 0  | 45.004 5       |
| 550.0 | 0.028 3      | 0.028 3      | 0.040 0  | 45.007 5       |
| 560.3 | 0.010 0      | -0.000 2     | 0.010 0  | -1.056 1       |
| 650.0 | 0.024 0      | 0.000 0      | 0.024 0  | 0.013 4        |

在蚁群算法中,参数初值的设定对算法性能的影响很大,合适的参数设定有利于提高算法收敛能力和快速寻找到最优解。下面就上述算例在不同参数下进行对比分析,经过多次尝试,对比分析分为两组,一组保持信息素挥发系数和局部搜索阈值为定值,讨论蚁群数目和迭代次数对算法的影响;另一组设置蚁群数目和迭代次数为定值,讨论信息素挥发系数和局部搜索阈值对算法的影响,根据式(10)转移概率,局部搜索阈值取为宜。定义综合误差为

$$C_{error} = \sum_{i=1}^H (|A_i \cos \varphi_i - a_i| + |A_i \sin \varphi_i - b_i|) \quad (12)$$

在两组仿真实验中,通过计算综合误差来评价不同参数对算法影响的差异。综合误差仿真结果如图 1、图 2 所示。

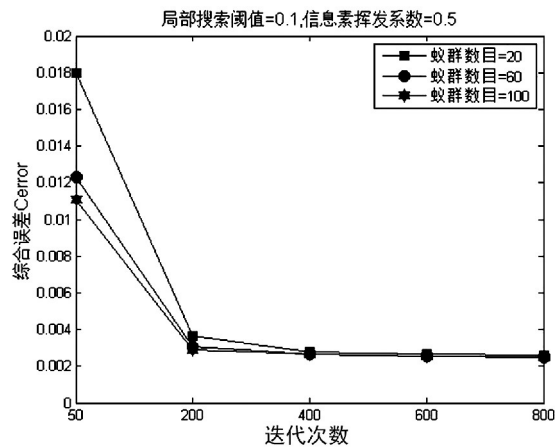


图 1 蚁群数目和迭代次数变化时的综合误差

如图 1、图 2 所示,蚁群数目和迭代次数决定了算法的整体性能,迭代次数尤为显著。在图 1 中,当蚁群数目从 60 增加到 100 时,估计精度的提高明显减缓(60 时综合误差为 0.012 左右,100 时综合误差

为 0.012 5 左右);迭代次数从 400 增加到 600 时,综合误差基本收敛于某一值,继续增加迭代次数(增加到 800 时)综合误差基本没有变化。但无论是增加蚁群数目或者迭代次数都会增加优化时间,因此应合理地选取蚁群数目和迭代次数。在图 2 中,当蚁群数目和迭代次数选定时,信息素挥发系数和局部搜索阈值的变化对降低综合误差的影响不大(综合误差在 0.002 5~0.002 7 之间波动)。

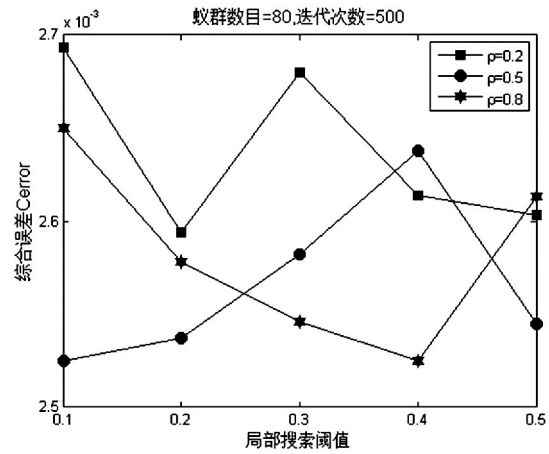


图 2 信息素挥发系数和局部搜索阈值变化时的综合误差

2.2 噪声干扰下的谐波和间谐波检测

对比分析文献[14]算法的谐波与间谐波检测精度,文献[14]算法是在快速独立分量分析(FastICA)的基础上,针对分离后信号的畸变问题,改进该算法以提高分量估计的稳定性和有效性。待测信号为

$$f(t) = 0.08 \sin(80\pi t + \pi/6) + \sin(100\pi t) + 0.6 \sin(300\pi t) + 0.04 \sin(420\pi t/\pi/4) + 0.4 \sin(500\pi t + \pi/3) + n(t) \quad (13)$$

式中,基波频率为 50 Hz,  $n(t)$  为高斯白噪声。设采样频率为 1 000 Hz,采样点数为 512,频率细化插入点数为 100,蚁群算法参数设置与 2.1 节相同,仿真结果如图 3 和表 3 所示。

如表 3 所示,谐波信号中混有较强的高斯白噪声时,文献[14]算法估计的频率值精度均高于 FFT 频谱区间连续细化算法,但频率的检测精度不是此处的重点,对比幅值和相角的估计精度,在频率检测精度相对较低的情况下,所提算法除了基波相角估计精度低于文献[14]的算法外,其余幅值和相角的精度都要比该文献的算法高出许多,尤其是幅值的估计精度,相对误差均低于 0.25%,相角的估计精度波动也比较平缓,其绝对误差均保持在 2.1 以下。

表 3 信噪比为 10 dB 下的谐波和间谐波参数的仿真结果

| 所提算法      |         |          | 文献[14]算法  |         |           |
|-----------|---------|----------|-----------|---------|-----------|
| 频率/Hz     | 幅值/V    | 相角/°     | 频率/Hz     | 幅值/V    | 相角/°      |
| 39.404 0  | 0.079 8 | 32.097 6 | 39.924 7  | 0.080 6 | 36.595 0  |
| 49.989 9  | 0.999 9 | 0.034 5  | 50.016 2  | 1.026 2 | -0.006 5  |
| 150.040 4 | 0.600 1 | -0.146 2 | 150.001 5 | 0.604 0 | -5.323 5  |
| 210.146 5 | 0.040 0 | 44.486 6 | 210.044 1 | 0.044 5 | 260.147 4 |
| 249.888 9 | 0.400 0 | 60.411 3 | 250.034 1 | 0.398 5 | 55.647 0  |

由图 3 可知,不同信噪比条件下,各次谐波和间谐波的幅值和相位误差都在较小的范围内波动,除了信噪比为 5 dB 时 210 Hz 间谐波相位误差较大以外,其余谐波和间谐波的幅值和相位误差都比较小。其中,谐波(基波、3 次谐波和 5 次谐波)的幅值和相位误差要明显低于间谐波(40 Hz 和 210 Hz 间谐波)的误差,这主要是由于谐波频率的检测精度较高所致。另外,注意到 40 Hz 间谐波的幅值相对误差与其他谐波和间谐波的变化相反,这也是由于信噪比 5 dB 时频率(检测值为 39.555 6 Hz)的估计精度要高于信噪比 15 dB、30 dB 时的频率(均为 39.454 5 Hz)。

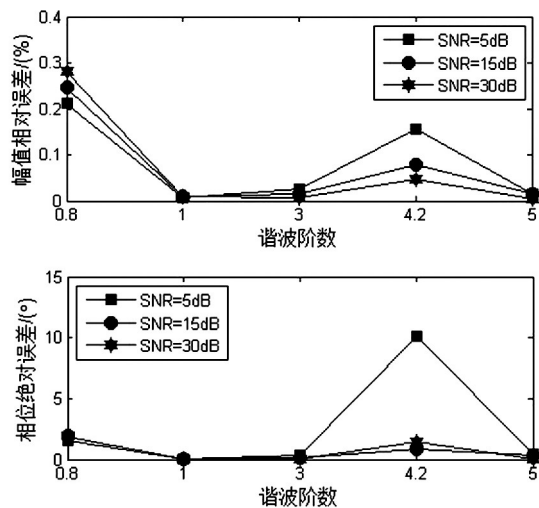


图 3 不同信噪比下的幅值和相位误差

3 结 论

采用 FFT 频谱区间连续细化算法和改进蚁群优化算法进行电力谐波和间谐波的分析与检测,在无噪声干扰下,分析了蚁群算法参数对算法检测谐波和间谐波幅值和相角精度的影响,也在噪声干扰下与文献[14]的算法进行了对比分析。通过两个

仿真实验,结果表明:在改进蚁群优化算法的适应度函数和转移概率的基础上,降低了算法的复杂性,在一定程度上提高了算法的速度。仿真试验验证了该算法的正确性和有效性,并且在谐波和间谐波频率估计精度不高的情况下,也能获得较高精度的幅值和相角。由于所提算法在计算蚁群适应度函数时比较耗时,因此该算法适用于离线检测。

参考文献

[1] 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.

[2] 肖先勇,王楠,刘亚梅. 基于多项式逼近的单峰谱线插值算法在间谐波分析中的应用[J]. 电网技术,2008,32(18):57-61.

[3] 卿柏元,滕召胜,高云鹏,等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):153-158.

[4] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):130-136.

[5] 薛蕙,杨仁刚,罗红. 利用小波包变换实现电力系统谐波分析[J]. 电网技术,2004,28(5):41-45.

[6] 张鹏,李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报,2012,27(3):252-259.

[7] 向东阳,王公宝,马伟明,等. 基于 FFT 和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):35-39.

[8] 汤胜清,程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(18):90-94.

[9] 吕干云,方奇品,蔡秀珊. 一种基于粒子群优化算法的间谐波分析方法[J]. 电工技术学报,2009,24(12):156-161.

(下转第 68 页)

生较大的影响。实际复杂电力系统中,对保护影响较大的环网开断线路绝大部分仍然分布于保护所在线路两侧母线以及配合保护所在线路两侧母线连接的线路中。

若同时将主保护以及配合保护两侧母线上连接的线路加入到开断的线路范围中,必须考虑到大部分环网开断对保护定值的影响。

为此,可以采用自动扩大搜索和确定环网涉及的保护相结合的方法来解决环网的在线校核问题。其基本思想是:以电力系统拓扑结构变化部分为中心,自动搜索其外层三层元件和确定与其构成环路的元件,校核以上阐述所涉及的保护。此研究可以避免搜索全网所有范围,避免对满足灵敏性和选择性的保护定值进行校核,这样大大减少计算时间,并且能够满足实时性的要求。

## 4 结 语

通过对继电保护在线校核系统的软件功能分析,给出了其系统的结构设计和各模块的实现功能设计,并就其中的关键技术进行了研究。该方案结合了许多工程实际,能够为在线校核软件的应用提供很大的参考价值。

### 参考文献

- [1] 李志. 电网继电保护定值仿真校验系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学 2010.

(上接第 53 页)

- [10] Dorigo, M, Maniezzo, V and Colomi, A. The Ant System: An Auto Calytic Optimizing Process [R]. Technical Report No. 91 - 016 Revised, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [11] 杨淑莹, 张桦. 群体智能与仿生计算——Matlab 技术实现[M]. 北京: 电子工业出版社 2012: 225.
- [12] 刘进明, 应怀樵. FFT 谱连续细化分析的富里叶变换法[J]. 振动工程学报, 1995, 8(2): 162 - 166.
- [13] 马卫, 朱庆保. 求解函数优化问题的快速连续蚁群算法[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2120 - 2124.
- [14] 何川, 舒勤, 李旻. 基于改进单通道 FastICA 的谐波与

- [2] 迟福建. 地区电网继保定值在线校验分析系统的深入研究与实现[D]. 保定: 华北电力大学 2004.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规程汇编(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社 2000.
- [4] 马丽萍, 焦彦军. 电力系统继电保护在线校验系统的研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(1): 41 - 44.
- [5] 吕颖, 吴文传, 张伯明, 等. 电网保护定值在线整定系统的开发与实现[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 15 - 20.
- [6] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51 - 56.
- [7] 朱文东, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30 - 33.
- [8] 陈建民, 倪腊琴, 韩学军, 等. 继电保护整定在线评估及预警系统研究[J]. 华东电力, 2012, 40(4): 608 - 612.
- [9] 郑太一. 故障信息系统构建及继电保护专家系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学 2006.
- [10] 马丽萍. 基于广域测量系统的后备保护在线校验[D]. 保定: 华北电力大学 2010.
- [11] 罗栋梁. 新型配电网继电保护的研究[D]. 南京: 河海大学 2007.
- [12] 高虹霞. 电网继电保护整定计算软件的研究[D]. 保定: 华北电力大学 2009.
- [13] 任龙. 继电保护定值在线校核系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学 2012.

### 作者简介:

王 佼(1987), 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。 (收稿日期: 2014 - 06 - 30)

间谐波检测[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2959 - 2964.

### 作者简介:

王志川(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事变电运维检修工作;

刘丹莉(1974), 大学本科, 高级工程师, 主要从事变电运维检修工作;

彭祥华(1985), 硕士研究生, 研究方向为智能检测与计算机网络技术;

周 群(1966), 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电工理论与新技术、智能检测、电能质量。

(收稿日期: 2014 - 07 - 08)

# 基于改进爬山算法的风机最大功率点控制策略研究

田永贵,王 奔,薛禾雨,李 鹏,高鲁峰,李 晓  
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘 要:** 爬山搜索法是风力发电最大功率点的跟踪控制策略的主要方法之一。传统的爬山搜索法对于惯量大的风力发电系统,由于时间常数大使转速滞后,导致无法进行正确的搜索控制,因此,提出了改进变步长爬山搜索法,并与基于斜率变步长爬山搜索法做对比,仿真结果表明,改进之后的爬山搜索法对小型风电系统的最大功率点的跟踪有良好的效果,能够避免在风速稳定时的机械振荡和提高风能利用率。

**关键词:** 风力发电; 爬山搜索法; 最大功率跟踪; 变步长

**Abstract:** Climbing search method is one of the major methods on maximum power point tracking of wind power system. For the wind power system with large inertia, the traditional climbing search method cannot carry out the correct search control because of the rotating speed lag caused by large time constants. Therefore, an improved variable step climbing search method is proposed, and compared with the climbing search method based on slope. The simulation results indicate that the improved method has a good effect on maximum power point tracking of small wind power system, and it not only increases the utilization of wind energy, but also avoids the mechanical oscillations when wind speed is stable.

**Key words:** wind power generation; climbing search method; maximum power point tracking; variable step size

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0054-07

## 0 引 言

风力发电是可再生能源发电中发展速度最快、技术最成熟的一种发电方式,然而风电并网功率的波动性和间歇性会对电网的稳定性和电能质量产生重要影响<sup>[1-3]</sup>。研究风力发电最大功率跟踪点控制成为了国内外学者研究的重要课题之一。

目前常见的最大功率点跟踪策略主要有 3 种方法: 叶尖速比法 (tip speed ratio, TSR)、功率信号反馈法 (power signal feedback, PSF)、爬山搜索法 (hill-climb searching, HCS)。文献 [4-6] 阐述了传统的叶尖速比法、功率反馈法、爬山法的 3 种控制策略,针对传统的 3 种最大功率点方法的缺点,很多学者提出了很多改进的控制策略。对于最大功率反馈法,文献 [7] 实时在线修正最大功率曲线的来保证最大功率点跟踪的精度,文献 [8-9] 考虑了风力机在运行中的动态过程风轮的储能以风轮为控制对象来减少过度时间。文献 [10] 分析了叶尖速比法中风速仪在不同地方对最大功率点跟踪的影响并提取了补偿机制来更精确地跟踪最大功率点。文献 [11]

中考虑风机的动态性能提出风速频率分离的双闭环直接控制来减小系统的机械振荡。文献 [12-13] 分别运用支持向量机和神经网络对有效风速估计和文献 [14-15] 基于线性和非线性系统中变量的状态进行最优转速估计来进行叶尖速比控制完成最大功率点的跟踪。文献 [16-18] 分别给出通过模糊控制、变增益的极值搜索、三点法的变步长爬山法,这些算法在最大功率的跟踪性能上比定步长爬山法优越。

不管哪种改进的爬山法都是考虑如何在搜索的过程中给出合适的步长使搜索时间短和造成的振荡小,针对这个问题,引用变斜率的变步长思想采用考虑 3 个时刻的采样对应的斜率关系给出搜索步长,旨在避免因为两个时刻的转速差接近于 0 时造成的搜索步长过大,而且在风速稳定的情况下可以实现停止扰动。

## 1 小型风力发电机组特性和数学模型

小型发电系统的拓扑结构如下图 1 所示。本节根据小型风力发电系统的各个组成部分特性进行分析,并建立了风力机、传动链、三相异步电机、变流

器的数学模型。

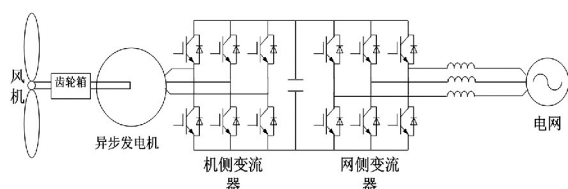


图1 小型风力机拓扑结构

## 1.1 风力机特性

风力机是一个风能利用装置,因此,功率随风速变化而变化是风力机性能的主要指标。当气流流过风机时,就会产生一个与本地气流流动方向垂直的气动力,叶片因此带动风轮运转,并将风能转化为机械能。风力机主要特性包括以下3个部分<sup>[19]</sup>。

### 1.1.1 叶尖速比与风能利用系数

根据空气动力学基本原理得,风力机捕获的功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p = 0.22 \left[ \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_p$  为风能利用系数;  $\rho$  为空气密度,  $\text{Kg/m}^3$ ;  $R$  为风轮半径,  $\text{m}$ ;  $V$  为风速;  $\beta$  为桨距角。

由式(1)可得:在风速和密度不变的条件下,风力机的输出功率与  $C_p$  成正比关系。其中  $C_p$  为叶尖速比  $\lambda$  和  $\beta$  的函数。 $\lambda$  可以表示为

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2)$$

式中,  $\Omega$  为风轮角速度。

因此,  $C_p$  与  $\lambda$  的关系体现了风力机的转换效率。图2为风力机的  $C_p - \lambda$  关系曲线,由图2可知:当风速一定时,叶尖速比不同其转换效率也不同,对于一个特定的风机只存在一个  $\lambda_{opt}$  使得  $C_p$  取得最大值。

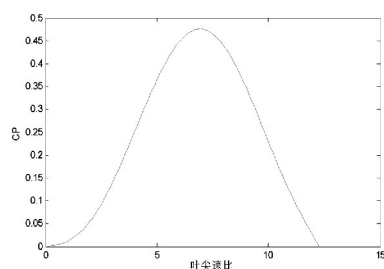


图2 风力机  $C_p - \lambda$  关系曲线

## 1.1.2 最大功率曲线

在桨距角一定时,将式(2)带入式(1)得

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \Omega^3 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可知:在同一风速下随着风轮转速不同,风力机输出的功率也不同,但是存在一个转速使得风力机的输出功率最大,此时对应的点称为最大功率点,如图3中的A点,把不同的风速下风力机的输出功率曲线簇中的最大点连接起来就得到了一条最大功率曲线。

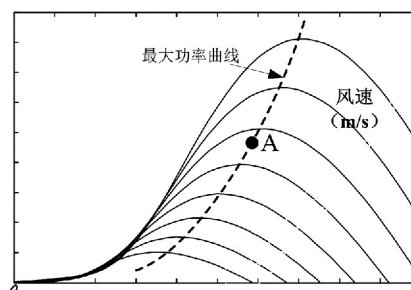


图3 风机最大输出功率曲线

## 1.2 传动链数学模型

传动系统作为风力发电机组的重要组成部分,其作用使风力机捕获的风能传递给发电系统。但是风力机的转速慢导致发电机无法达到切入转速,这样必须经过齿轮箱的升速来提高发电机的转速。图4为单质量模块的简图。

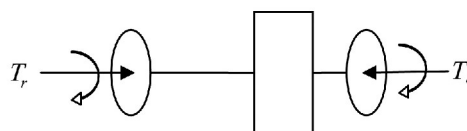


图4 传动链单质量模块简图

由图4可知  $T_r$  为输入量,  $T_g$  为输出量,其传动动态模型<sup>[20]</sup>为

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = T_r(\Omega_r, p) - \frac{i}{\eta} T_g(\Omega_g) - B\Omega_r \quad (4)$$

$$J = J_r + J_l + \frac{I^2}{\eta} (J_h + J_g) \quad (5)$$

式中,  $J$  为机组总惯量;  $B$  为传动系统阻尼;  $J_r$  为风轮转子转动惯量;  $J_l$  为低速轴惯量;  $J_h$  为高速轴惯量;  $J_g$  为发电机转子转动惯量;  $I$  为齿轮箱变速比。

## 1.3 三相异步发电机数学模型

三相异步电机是一个多变量、非线性、强耦合的

系统。在研究其动态数学模型时常作如下假设。

(1) 三相绕组对称, 在空间的电角度相差  $120^\circ$ , 磁动势延气隙周围正弦分布;

(2) 忽略磁饱和, 各绕组的自感与互感都是恒定的;

(3) 不计铁心损耗;

(4) 不考虑温度对绕组的阻值影响。

则三相异步电机在  $d-q$  坐标下的数学模型<sup>[21]</sup>

为

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{V_{sd}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{sd} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s (i_{sq} + \frac{L_m}{L_s} i_{rq}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{V_{sq}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_s (i_{sd} + \frac{L_m}{L_s} i_{rd}) \\ \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rd} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sd}}{dt} + (\omega_s - \omega) (i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} i_{sq}) \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rq} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sq}}{dt} - (\omega_s - \omega) (i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_{sd}) \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot L_m (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (7)$$

令

$$\begin{cases} x = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)] = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}] \\ u = [V_{sd} \ V_{sq}] \end{cases}$$

为状态矢量和输入矢量。

则 SCIG 的模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = A(\Omega_h) \cdot x + B \cdot u \\ y = \frac{3pL_m}{2} (x_2 x_3 - x_1 x_4) \end{cases} \quad (8)$$

## 2 最大功率点跟踪控制策略

### 2.1 最大功率点跟踪原理

风力发电最大功率点的跟踪就是控制风力机运行在最大功率曲线上, 由风力机特性可知: 处于这条线上的点, 其转速与风速为最佳叶尖速比关系。当风速变化时调节风轮转速为最优转速  $\Omega_{opt}$ , 将叶尖速比维持在  $\lambda_{opt}$  处。根据式 (1), 此时风能利用系数为最大值  $C_{pmax}$ , 使风力机捕获功率最大。

### 2.2 最大功率点跟踪策略

目前常见的最大功率点跟踪策略主要有 3 种方法: 叶尖速比法 (TSR)、功率信号反馈法 (PSF)、爬山搜索法 (HCS)。这里主要是研究爬山搜索法, 并将改进的爬山搜索法与传统的基于斜率变步长爬山

搜索法进行了对比。

#### 2.2.1 爬山搜索法

爬山搜索法是为了克服前两种算法的缺点提出来的, 是通过搜索的方式来找到当前风速的最大功率点。该跟踪策略主要依靠当前的工作点位置和电机功率、电机转速。通过计算得到期望的搜索信号, 经过 PI 控制器得到电磁转矩使风力机转速改变, 反复执行上述过程直到达到最大功率点, 图 5 为控制原理图。

算法的优点: 需要的系统信息少, 不需要知道具体的  $C_p - \lambda$  关系, 只需要知道采样每个时刻的电机转速和功率值。

算法的缺点: 对于惯量大的风力发电系统, 由于时间常数大使转速滞后, 导致无法进行正确的搜索控制。

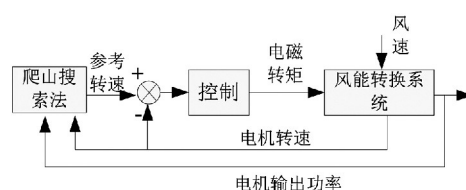


图 5 爬山搜索法

#### 2.2.2 基于斜率的变步长爬山法

基于变斜率的最大功率点跟踪算法是根据输出功率与转速为一凸函数, 有且只有一个极值点, 利用斜率变化的大小来决定搜索步长的大小, 图 6 所示为小型风发电系统的  $P - \omega$  曲线, 可得: 在离最大功率点较远的地方,  $\Delta\omega$  对应的发电机的输出功率变化较大, 在离最大工作点附近时, 发电机的转速变化  $\Delta\omega$  对输出功率影响较小。即在功率曲线上每个工作点对应的斜率也不一样, 在一固定风速下在图中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别作切线, 其中

$$\left| \frac{dP_{k1}}{d\omega} \right| < \left| \frac{dP_{k2}}{d\omega} \right| < \left| \frac{dP_{k3}}{d\omega} \right|$$

在最大功率点  $b$  时  $\frac{dP_{k1}}{d\omega} = 0$ 。当采样时间很小时, 两个采样时刻的差可以近似地认为  $\Delta\omega = d\omega$ 。

同理输出的功率  $\Delta P$  也一样, 得到  $\frac{dP}{d\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$ 。带斜率

因素的改进步长算法由式 (9) 确定搜索步长。

$$\begin{cases} \Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)} \\ \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)} = \Delta D \end{cases} \quad (9)$$

式中  $K_{MPPT}$  为步长调节系数, 一般由实验和仿真结果得到。

该算法理论上能够有效克服定步长爬山法的缺点,当斜率大的时候给出较大的搜索步长,当斜率小时搜索步长也变小,从而实现了变步长的跟踪控制。这样可以较快地搜索到最大功率点,而且在最大功率点附近产生的机械系统振荡小。

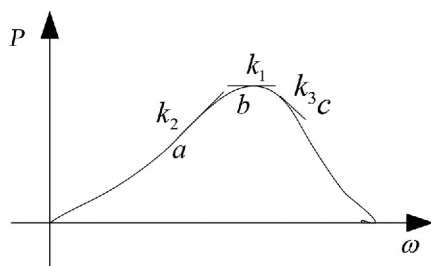


图 6 风力机  $p-\omega$  曲线  
算法流程图如图 7 所示。

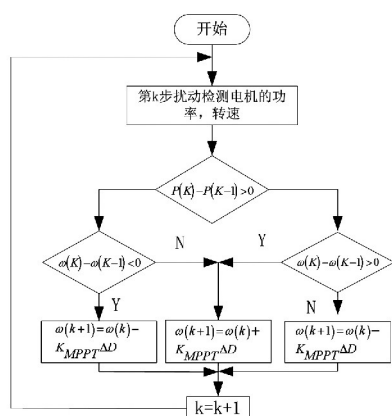


图 7 基于斜率的变步长算法流程图

### 2.2.3 改进的变步长爬山法

由上面所阐述的,基于斜率改进的变步长虽然引入了变的策略,但是其比例因子  $K_{MPPT}$  的选择是个难题,选择过大的值造成爬山搜索过程步长一直保持一个比较大的值,选择较小的值时,搜索步长会一直处在一个很小步长特别是在最大功率点附近的地方会造成搜索时间长,而且在实际采样的过程中由于惯性转速的变化不会太快或者是其他干扰因素使两个时刻采样的差值  $\Delta\omega$  可能很小或者是接近于 0。由式:

$$\Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)}$$

可得:因为  $\Delta\omega$  很小而且无论  $\Delta P$  是大还是小,那么下一时刻给定搜索步长  $\Delta\omega(k+1)$  一定很大,这样一个错误的步长对下一时刻的步长也会造成连锁反应。

为了进一步提高最大功率点跟踪的速度和精

度,根据上面变步长爬山法的思想对爬山搜索算法进行改进。改进的爬山法依然是通过主动去扰动转速来实现。改进的爬山法原理如下。

如图 8 所示:在爬山搜索过程中,采样周期很短,在同一功率曲线下两个时刻的斜率应该近似相等。如式(10)所示。

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta\omega_1} = \frac{\Delta P_2}{\Delta\omega_2} \quad (10)$$

电机的输出功率可以表示为

$$P = T_e \cdot \omega \quad (11)$$

对式(11)求导得

$$\frac{dP}{dt} = \omega \frac{dT_e}{dt} + T_e \frac{d\omega}{dt} \quad (12)$$

系统的切入转速为 50 rad/s,由式(12)可知电机的功率变化  $\Delta P$  值相对于转速的变化  $\Delta\omega$  的值较大,能够很快地反映出风速的变化,所以利用  $\Delta P$  的信号去给出搜索步长,为了避免基于斜率变步长爬山法中由于  $\Delta\omega$  过小会造成  $\frac{\Delta P}{\Delta\omega}$  值很大问题,将式(10)变为

$$\Delta\omega_2 = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega_1 \quad (13)$$

连续检测  $\Delta P$ 、 $\Delta P_2$  和  $\Delta\omega_1$  值如图由图 8 中 A 区所示,由式(13)得到下一时刻的搜索步长为  $\Delta\omega = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega$ 。当检测到  $\Delta P_2$  的值都小于一个阈值  $\varepsilon_1$  且  $\Delta P_1 \cdot \Delta P_2 > 0$ ,表明此时的工作点在最大功率点附近并且正在靠近最大功率点。由图 8 中 B 区可知:连续检测到的  $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  都很小,如果按式(13)给出的步长很小,则无法满足系统的快速性,为了解决这个问题引入了黄金分割比例因子。此时的搜索步长为。

$$\begin{cases} \Delta\omega = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega = \Delta\omega / 0.618 \end{cases}$$

通过对搜索步长放大能够快速靠近并越过最大功率点。当  $\Delta P_2$  检测都小于一个  $\varepsilon_2$  时,给出的搜索步长为 0,认为此时已经搜到最大功率点,如图 8 中 C 区所示。进而完成了在风速一定的情况下搜索到最大功率点并实现停止功能,来避免在最大功率点时由主动扰动造成的机械系统损害。重启过程根据连续检测  $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  的值来判定,如果检测到  $\Delta P_1 = 0$   $\Delta P_2 \neq 0$  时判定系统重新给出搜索步长,若

$\Delta P_1 = 0$   $\Delta P_2 = 0$  则判定风速没有改变, 搜索步长为 0。改进的爬山法流程图如图 9 所示。

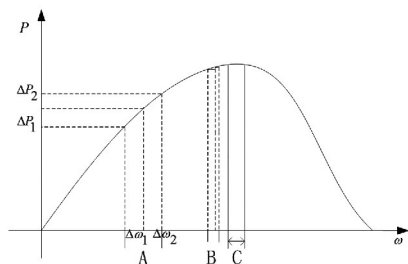


图 8 改进爬山法的原理图

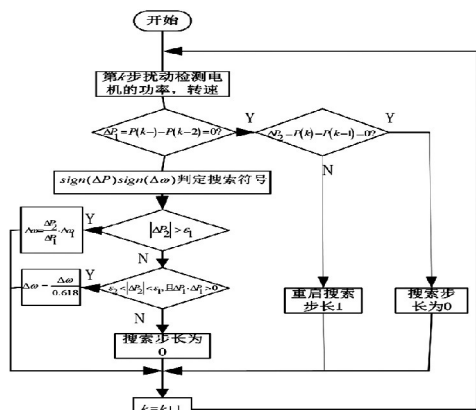


图 9 改进的变步长爬山法流程图

### 3 仿真结果

基于 Matlab/Simulink 的仿真总体框图如图 10 所示: 其中被控模块为风力机子模块和电机子模块, 控制模块为电机转速控制模块、电机矢量控制模块、MPPT 爬山法控制模块。MPPT 模块根据寻优策略给出电机的参考转速, 作为转速控制模块的输入, 然后经过 PI 控制器输出相应的参考电磁转矩, 最后经过矢量控制策略得到三相交流电压, 驱动电机。由于为了验证改进爬山算法的优越性, 选定了在理想风速下, 对基于变斜率爬山算法和改进爬山算法进行对比。

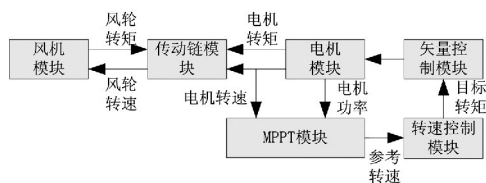
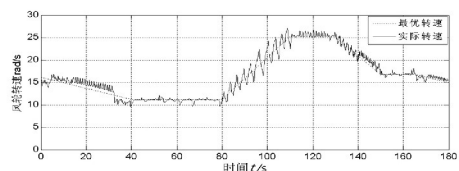


图 10 小型风机总体仿真框

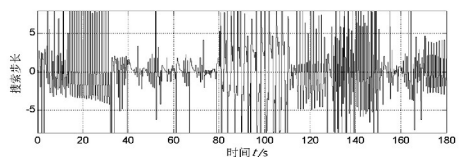
#### 3.1 基于斜率的变步长爬山法仿真

根据图 7 的流程图设计算法, 其中搜索步长由式 (9) 中  $\Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)}$  给出, 其中搜索步

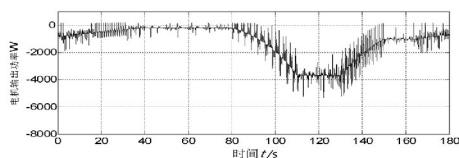
长的最大值为 8。分别给出  $K_{MPPT} = 0.1$ 、 $K_{MPPT} = 0.5$  的仿真结果, 如图 11(a)、(d)、(e)、(h) 所示, 两种情况下都能实现最大功率点的跟踪, 在  $K_{MPPT} = 0.5$  时风能利用系数比  $K_{MPPT} = 0.1$  时高。由图 11(b) 和 (f) 可知: 在比例系数为 0.1 时搜索步长会一直以一个比较小的步长去搜索, 当比例系数放大为 0.5 时, 在相同的风速下得到的搜索步长会整体放大, 其值很容易就达到步长的限幅值 8。从图 11(c) 和 (g) 可以看出电机的输出功率在最大功率点附近的振荡会随着比例系数的增大而增大。同时不管  $K_{MPPT}$  取值的大小, 从结果(这里没有加入转速干扰的条件下)中可以看出在风速(60~100 s)恒定的情况下, 该算法的搜索步长有时也会达到限幅值, 这样一个错误的步长会影响下一个时刻搜索步长正确性。所以可以得出在  $K_{MPPT}$  较小时, 搜索步长一直比较小无法快速精确地跟踪风速变化, 随着  $K_{MPPT}$  的增大虽然能够快速跟踪风速的变化, 但该方法会越来越接近于一个固定的大步长爬山法, 那么也会造成比较大的电磁转矩振荡, 失去了变步长爬山法的意义。



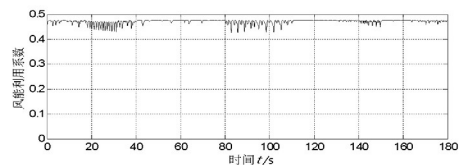
(a) 步长系数为 0.5 的风轮转速



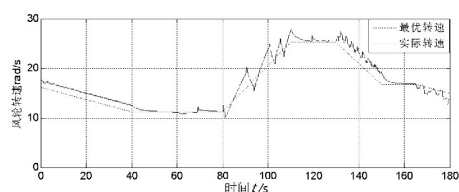
(b) 步长系数为 0.5 时搜索步长



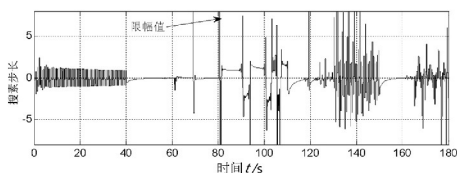
(c) 步长系数为 0.5 时电机输出功率



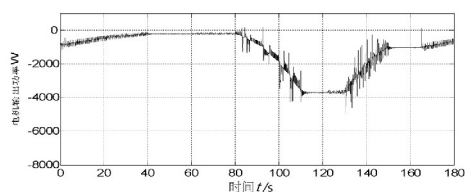
(d) 步长系数为 0.5 时风能利用系数



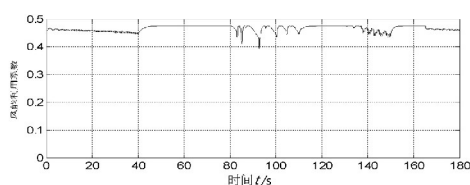
(e) 步长系数为 0.1 时风轮转速



(f) 步长系数为 0.1 时搜索步长



(g) 步长系数为 0.1 时电机输出功率



(h) 步长系数为 0.1 时风能利用系数

图 11 基于斜率变步长 MPPT 仿真结果

### 3.2 基于改进爬山算法仿真

改进的爬山法同样是变步长的爬山法,与前两种变步长算法相比该算法实现了停止功能。同样根据流程图 9 设计控制算法,改进的变步长 MPPT 模块如图 12 所示。

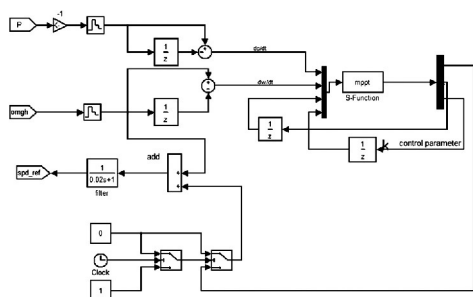
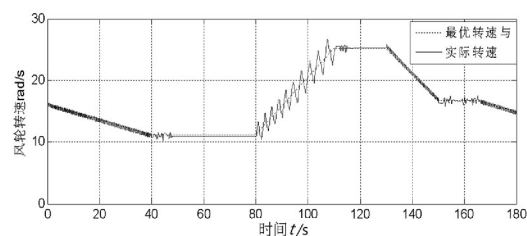
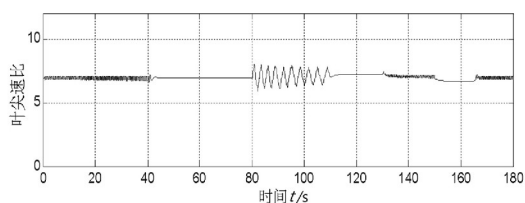


图 12 改进变步长的 MPPT 仿真图

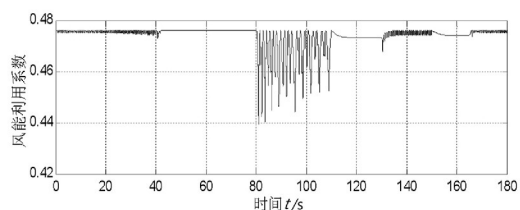
采用图 9 变步长爬山搜索策略,其中设定阈值  $\varepsilon_1 = 1$ ,  $\varepsilon_2 = 50$ ,步长最大值为 4。结果如图 13 所示:从仿真结果图(a)、(b)和(c)可以看出该算法能够很快而且精确地跟踪最佳转速保持很高风能利用效率,在风速稳定的情况下(40~80s、110~130s、150~170s)



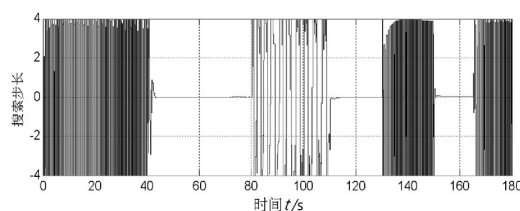
(a) 风轮转速与最优转速



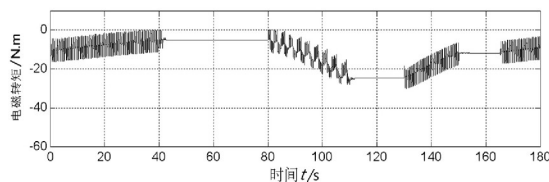
(b) 叶尖速比



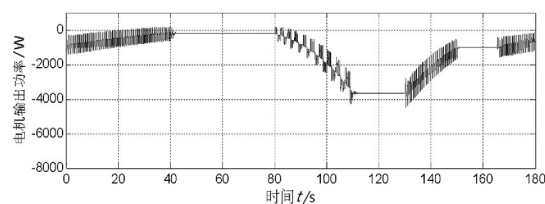
(c) 风能利用系数



(d) 搜索步长



(e) 电磁转矩



(f) 电机输出功率

图 13 改进变步长 MPPT 仿真结果

实现停止功能。从图(d)中可以看出改进的策略在风速变化时给出了比较合适的搜索步长,使得电磁转矩的振荡减小,电机的输出功率相对平滑,如图(e)和(f)所示。虽然该算法停止搜索时,实际转速与最优转速存在一个小的误差,但是该策略避免了由于主动扰动产生的机械振荡。

通过对图 11、图 13 的结果分析可以得出:在理想风速情况下,基于斜率的变步长爬山法在搜索过程中,存在搜索步长容易出现错误的缺点。改进的爬山法能够比较好完成最大功率点的跟踪任务,使风轮转速接近最优转速,保持比较高的风能利用系数和风能捕获效率,其中改进的爬山法在风速稳定时实现了停止,解决了爬山法由于主动扰动造成机械振荡的问题。

## 4 总 结

针对当前小型风电系统中最大功率点跟踪存在问题:在增加风能捕获效率的同时会影响系统的使用寿命,即能量捕获效率和机械振荡的矛盾,介绍了变速恒频的风力发电系统常用的 3 种最大功率点跟踪策略,即爬山法,并阐述了爬山法存在的缺点,在这个基础上分析了基于斜率变步长爬山法,针对它的缺陷给出了一种改进的变步长爬山法:采用连续采样三点的信息,通过两个相邻的斜率相近给出搜索步长,并实现停止功能。

通过分析小型风力发电系统各个组成部分的数学模型,在 Matlab 中完成系统模型的搭建。在理想风速条件下对斜率变步长和改进变步长爬山法两种搜索策略进行仿真,仿真结果验证了两种策略的基本理论。通过对比,改进的变步长爬山法在系统要求的快速性和稳定性上有良好的效果。

### 参考文献

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
- [2] 裴哲义,董存,辛耀中. 我国风电并网运行最新进展[J]. 中国电力, 2010(11): 78-82.
- [3] 李善颖,石庆鑫. 大规模风电场并网运行无功补偿研究[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 71-74.
- [4] Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems: towards a Global Approach[M]. Springer, 2008.
- [5] 程启明,程尹曼,汪明媚,等. 风力发电系统中最大功率点跟踪方法的综述[J]. 华东电力, 2010, 38(9): 1393-1399.
- [6] Abdullah M A, Yatim A H M, Tan C W, et al. A Review of Maximum Power Point tracking Algorithms for Wind Energy Systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 3220-3227.
- [7] 程显忠. 风力发电试验系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [8] Narayana M, Putrus G A, Jovanovic M, et al. Generic Maximum Power Point Tracking Controller for Small-scale Wind Turbines[J]. Renewable Energy, 2012(44): 72-79.
- [9] 夏安俊,胡书举,许洪华. 风电机组 MPPT 动态功率曲线控制策略的研究[J]. 电气传动, 2011, 41(12): 61-65.
- [10] Ciprian V. MPPT Algorithm for Small Wind Systems Based on SpeedControl Strategy[J]. Annals of Dunarea de Jos 2008, 31(1): 23-28.
- [11] Munteanu I, Cutululis N A, Bratcu A I, et al. Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(7): 903-912.
- [12] Lin W M, Hong C M, Cheng F S, et al. MPPT Control Strategy for Wind Energy Conversion System Based on RBF Network[C]//Energytech, 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-6.
- [13] Abo-Khalil A G, Lee D C. MPPT Control of Wind Generation Systems Based on Estimated Wind Speed Using SVR[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 55(3): 1489-1490.
- [14] Rocha R. A sensorless Control for a Variable Speed Wind Turbine Operating at Partial Load[J]. Renewable Energy, 2011, 36(1): 132-141.
- [15] Boukhezzer B, Siguerdidjane H. Comparison Between Linear and Nonlinear Control Strategies for Variable Speed Wind turbines[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(12): 1357-1368.
- [16] 肖运启,徐大平,吕跃刚. 双馈风电机组一种新型模糊最大风能追踪控制[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(6): 1-7.
- [17] 纪志成,朱芸,孟涛. 风能转换系统的 MPPT 变增益极值搜索控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 414-418.
- [18] 黄守道,余峰,黄科元. 三点比较法在风力发电系统中的应用[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 764-767.

(下转第 72 页)

$R_g$  和  $L_g$  的大电网通过断路器 BRK 接于 PCC, 负荷也接于 PCC。断路器 BRK 在  $t = 3$  s 时断开, 在  $t = 7$  s 时重新合上。

仅从理论上分析应该得到的仿真波形。对于 82 kW 的负荷  $P_{ref}$  设为 100 kW 恒定值, 电压稳定在 1.1 p. u. 附近, 负荷的有功功率自动调节为 100 kW。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 1.1 p. u. 和 100 kW 更大的值, 对应的 D 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将低于 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 D' 点。所以, DG 的  $P-V$  特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。

对于 100 kW 的负荷, 3 个 DG 的  $P-V$  特性曲线的电压和有功功率稳定在 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于点 E 和点 M。OVP/UVF 方法在这样的条件下将很难检测出孤岛情形。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 0.88 p. u. 和 100 kW 更小的值, 对应的 C 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将略大于 0.88 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 C' 点。同样的, DG 的  $P-V$  特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。对于 129 kW 的负荷条件下也有同样的结论。

所以, 理想的仿真波形应该是能支持所提的改进后的 OVP/UVF 孤岛检测方法。调节 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为正能减小 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区, 调节 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为负将增大 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区。

## 4 结 论

孤岛情况可能会对电力系统和运行检修人员产生极大的危害, 因此, 必须重视并逐步完善孤岛检测

方法。首先分析了孤岛形成的原因, 目前孤岛检测方法分类以及各种方法的原理和优缺点。所研究的方法主要对 OVP/UVF 方法进行了改进。通过修正 DG 的  $P-V$  特性曲线的斜率来减小 OVP/UVF 方法的不可检测区。当 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为正时, 能有效减小 OVP/UVF 方法的不可检测区; 当 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为负时, 反而会增大 OVP/UVF 方法的不可检测区。当斜率为额定运行点(电压为 1 p. u., 功率为额定功率 100 kW)的切线时, 不可检测区可以控制到最小。

## 参考文献

- [1] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [3] 伞国成, 赵清林, 郭小强, 等. 光伏并网逆变器的间歇性频率扰动正反馈孤岛检测方法 [J]. 电网技术, 2009, 33(11): 83-86.
- [4] 程明, 张建忠, 赵俊杰. 分布式发电系统逆变器侧孤岛检测及非检测区描述 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 44-52.
- [5] 姚丹. 分布式发电系统孤岛效应的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [6] 殷桂梁, 孙美玲, 肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(1): 1-6.
- [7] 褚小莉. 光伏并网中的孤岛效应研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [8] 曾议. 分布式并网发电系统孤岛检测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

作者简介:

伍 盛(1981), 国网德阳供电公司, 工程师。

(收稿日期: 2014-07-21)

(上接第 60 页)

- [19] Pucci M, Cirrincione M. Neural MPPT Control of Wind Generators with Induction Machines without Speed Sensors [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(1): 37-47.
- [20] Welfonder E, Neifer R, Spanner M. Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(1): 63-73.

- [21] Leonhard W. Control of Electrical Drives [M]. Springer, 2001.

作者简介:

田永贵(1988), 硕士研究生, 研究方向为风力发电、非线性变结构控制;

王 奔(1960), 博士, 教授, 研究方向为电力系统非线性变结构控制与电能质量控制。

(收稿日期: 2014-07-07)

# 并网小电源对电力系统的影响和对策探讨

孙文成 崔明德

( 国网成都供电公司 四川 成都 611021)

**摘 要:** 随着国家提倡对可再生能源和清洁能源的开发利用,各类以小型发电机组为独立系统的小电源得以快速发展,小电源的大量并网对电力系统带来的影响日益突出。在分析并网小电源对电网系统各类保护的影响的基础上,提出了各类保护及备自投装置联切并网小电源的技术原则,最后通过四川地区某 110 kV 变电站小电源联切方案验证了该联切原则的正确性,有利于电网的安全稳定运行。

**关键词:** 并网; 小电源; 联切; 解列; 电力系统

**Abstract:** With the development and application of renewable energy and clean energy, a variety of small power supply which takes small generating set as the independent system has rapidly developed, so the influence brought by the integration of the large amount of small power supply on power system become increasingly outstanding. Based on the analysis of the influence of grid-connected small power supply on various protections, the technical principle is proposed, that is, the grid-connected small power supply is intertripped by various protections and automatic transfer switching equipment. Finally, the small power supply intertripping scheme for a 110 kV substation in Sichuan verifies the correctness of the proposed intertripping principle, which is beneficial to the safe and stable operation of power grid.

**Key words:** grid integration; small power supply; intertripping; off-the-line; power system

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0061-04

## 0 引 言

许多大型厂矿和企业拥有自备电源,这些电源发电除自用外,有时通过 35 kV、10 kV 馈线向电网倒送电能。随着国家提倡对可再生能源以及清洁能源的开发利用,各类以小型发电机组为独立系统的小电源也得以迅速发展。随着这类电源容量和数量的增加和并网运行,对电力系统实际运行带来的影响日益突出<sup>[1]</sup>。

首先分析了并网小电源对系统相关保护的影响,提出了受小电源影响的一些元件保护,如:母线保护、主供线路保护、主变压器保护、备自投保护以及故障低压解列保护等,确定了并网小电源联切原则,最后结合某 110 kV 终端变电站保护和备自投联切并网小电源的方案,验证了该联切原则的正确性,以期以后变电站入网的小电源联切提供技术指导。

## 1 并网小电源对电力系统的影响

小电源并网对电力系统的影响主要体现在以下

几个方面:一是小电源与电力系统并网后,在电力系统发生故障时,若小电源系统无法正常解列,容易引起电力系统和电力用户设备受损;二是电力系统内保护及自动装置与小电源保护配合、整定困难,容易引起保护及自动装置误动或拒动造成事故扩大,给电力系统的安全稳定运行造成一定的影响<sup>[2]</sup>。下面将具体介绍一下并网小电源在变电站内各类继电保护动作后对电力系统的影响。

### 1.1 110 kV 母差保护动作

110 kV 变电站单母分段接线方式下,110 kV 母线一般都配置母差保护。当 110 kV 母差保护动作跳开变电站内一主供电源时,在上网小电源的支撑下,通常变电站站内电压能持续一段时间,从几分钟到几十分钟<sup>[3]</sup>。在小电源的低压解列或低周解列保护动作跳开小电源线路之前,由于失去主供电源的母线仍然有电压,必将导致中低压侧备自投拒动,或者即使电压跌落满足了中低备自投的动作条件,但在合闸备用电源时可能会造成系统与小电源系统的非同期合闸,对电力系统造成巨大的冲击。

### 1.2 主供电源线路保护动作

通常情况下,对于接入小电源上网的110 kV 负荷终端变电站与电力系统主电网联络的线路两侧开关保护重合闸方式为:系统侧整定为“投检母有压线无压”,负荷侧整定为“投检同期或检线有压母无压”。当该类变电站与电力系统主电网联络的线路发生故障时,线路两侧的开关保护动作跳开两侧开关,此时若负荷终端侧开关重合闸投“检同期”,由于站内小电源所支撑的母线电压很难满足同主电网一样的频率、电压和相位,那么终端侧开关检同期重合闸基本上无法满足重合条件<sup>[4]</sup>;若终端侧开关重合闸投“检线有压母无压”,由于站内小电源提供电源支撑,母线电压也不会较快地降到无压条件,那么终端侧开关检线有压母无压重合闸也很难满足重合条件。由此可以看出,接入小电源系统的负荷终端变电站与主网联络的线路一旦发生故障,若小电源系统容量足够大,则该类变电站将由小电源带载形成孤网运行,否则将造成全站失压事故。

### 1.3 主变压器高后备保护动作

一般情况下,110 kV 负荷终端变电站主变压器中性点为不接地运行方式,接地点一般由进线电源端的220 kV 变电站或110 kV 枢纽变电站主变压器中性点直接接地来保证110 kV 系统为大电流接地系统。

当110 kV 主供电源线路发生单相接地故障,由于某种原因造成本侧开关未跳开,假设该类变电站中低压侧有小电源并网,此时该站将成为带接地故障运行的小电流接地系统,从而导致110 kV 系统侧会出现很大的零序过电压,系统变电站和小电源系统升压变压器的中性点电位会升高到相电压,将可能造成变压器绝缘损坏或击穿<sup>[5]</sup>,从而造成巨大的经济损失。

### 1.4 备自投动作

目前,备自投的故障掉电检测信号一般是电压,检测信号单一往往易导致备自投的误动和拒动现象的发生,对于存在大量地方小电源的地区,由于地方小电源对系统电压的支撑作用,该问题尤为突出<sup>[6]</sup>。另外,当主供电源失电后,备自投检测到一段母线失压,将会启动备自投逻辑,合上备用电源,但是备自投合闸不具备检同期功能,在有小电源并网的情况下,可能造成备自投非同期合闸,对电力系统造成冲击。

## 2 并网小电源联切原则

综上所述,在有小电源并网的110 kV 负荷终端变电站,该站配置的相关保护动作必须联切并网小电源,其联切的一般原则如下。

(1) 110 kV 母差保护动作,须联切并网小电源。

(2) 主供电源线路保护动作,须联切并网小电源。

(3) 主变压器间隙过流或零序过压保护动作,第一时限联切中低压侧并网小电源,第二时限跳主变压器各侧。

(4) 备自投动作,备用电源投入前须联切并网小电源。

(5) 若并网小电源线路保护具备低频和低压解列功能(根据《3~10 kV 电网继电保护装置运行整定规程》,在小电源侧应装设低频和低压解列装置),联切原则可进行简化,以简化联切回路,但必须保留上述原则的第(3)条和(4)条。

(6) 各相关保护联切小电源接点原则上与保护动作出口接点为同一组出口继电器。

## 3 110 kV 负荷终端变电站保护和备自投装置联切并网小电源的方案

### 3.1 110 kV 终端变电站典型保护配置

110 kV 负荷终端变电站比较常见的主接线方式是单母分段或内桥接线,为概括一般性,选择单母分段接线方式的变电站进行分析。110 kV 单母分段变电站典型配置如下。

(1) 110 kV 母线配置母差保护;

(2) 110 kV 联络或小电源线路配置光纤差动保护、距离保护、零序保护等;

(3) 主变压器保护:主保护配置差动保护和非电量保护;高后备保护配置复压方向过流保护、零序保护和间隙保护;中低后备保护配置复压方向过流保护;

(4) 110 kV 主供电源配置进线和分段备自投装置,中低压侧总路开关均配置分段备自投装置;

(5) 35 kV 或10 kV 小电源线路配置复压方向过流保护,低频和低压解列保护。

### 3.2 某110 kV 单母分段接线方式变电站及小电源

并网情况介绍

该站 110 kV、35 kV 和 10 kV 系统均为单母分段接线方式,110 kV 主电源为 110 kV 崇通线 152 间隔和 110 kV 隆通线 153 间隔。110 kV 电压等级小电源为 110 kV 岩通线 151 间隔和 110 kV 金通线 154 间隔。35 kV、10 kV 各段母线也均有并网小电源,主接线图及小电源情况如图 1 所示。

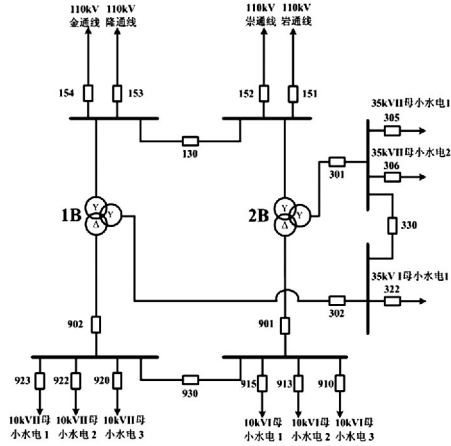


图 1 某 110 kV 变电站主接线方式图

保护配置为典型配置,其中 35 kV 和 10 kV 小电源线路保护均具备低频和低压解列功能。

3.3 确定联切并网小电源方案

由于该站 35 kV 和 10 kV 小电源线路保护具备低频和低压解列功能,根据上述并网小电源联切原则,该站联切并网小电源的方案如下。

(1) 主变压器间隙过流或零序过压保护动作,第一时限联切中低压侧所有并网小电源,第二时限跳主变压器各侧。

(2) 备自投动作,备用电源投入前须联切并网小电源,其中 110 kV 备自投动作跳闸时联切 110 kV 小电源和中低压侧所有小电源;35 kV 和 10 kV 分段备自投动作跳各总路开关时,联切各自相应母线上小电源。

根据以上联切方案,该站联切并网小电源启动回路,如图 2 所示,由于该站小电源路数较多,所以主变压器后备保护动作出口和各电压等级备自投跳闸出口分别启动各自的重动继电器,其中 10 kV 小电源联切启动回路与 35 kV 小电源联切启动回路类似。

联切并网小电源的出口回路见图 3,其中联切 10 kV 小电源回路与联切 35 kV 小电源出口回路类似。

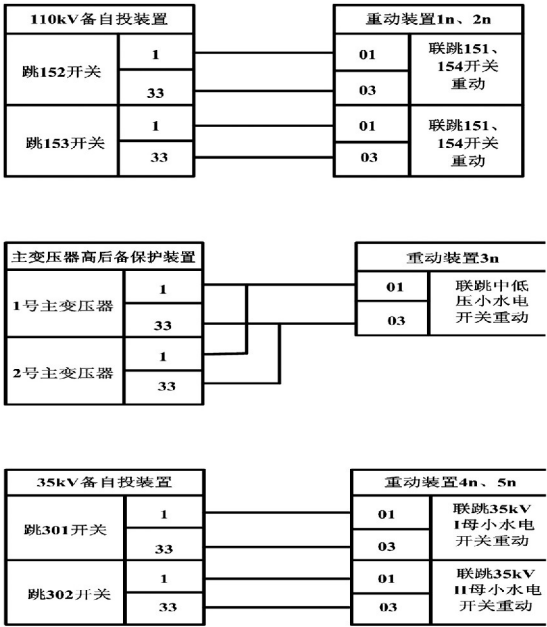


图 2 某 110 kV 变电站联切并网小电源的启动回路

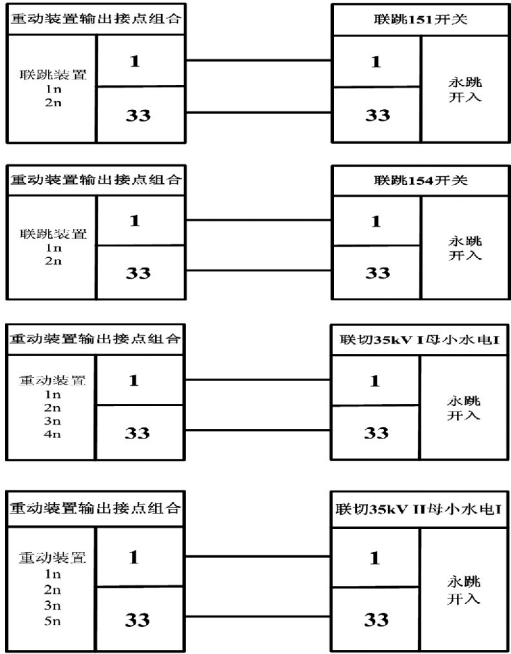


图 3 某 110 kV 变电站联切并网小电源的出口回路图

3.4 110 kV 备自投联切 110 kV 小电源注意事项

该站 110 kV I、II 母各有 1 条小电源线路。当变电站主供电电源消失时,应正确联切该站的 110 kV 小电源。不仅要避免少切,而且也要避免误切,同时尽量简化联切回路以便运行维护。联切功能应满足以下要求。

(1) 备自投方式 1、2 运行(进线备投方式),备自投跳电源进线崇通线 152 开关或隆通线 153 开

关,同时应联切小电源岩通线 151 开关和金通线 154 开关(即无论跳进线 I 或 II,两段母线上的小电源均须联切)。

(2) 分段备自投方式 3 运行,备自投跳崇通线 152 开关同时应仅联切小电源岩通线 151 开关(只联切本段母线的小电源)。

(3) 方式 4 运行,备自投跳隆通线 153 开关同时应仅联切小电源金通线 154 开关(只联切本段母线的小电源)。

根据第 2 节“并网小电源联切原则”第(6)条,联切岩通线 151 开关和金通线 154 开关的取自 110 kV 备自投跳主供电源崇通线 152 开关和隆通线 153 开关的备用跳闸出口接点的重动接点。在二次回路上,增加备自投跳 152 开关分别配置联切 151 开关(1LP1)和 154 开关(1LP3)的出口压板;备自投跳 153 开关分别配置联切 151 开关(1LP2)和 154 开关(1LP4)的出口压板。回路示意图见图 4。

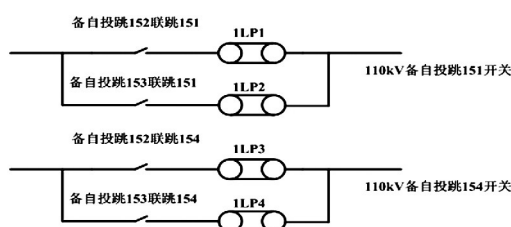


图 4 110 kV 备自投联切 110 kV 小电源回路示意图

在实际运行中,可根据不同的运行方式投入不同的出口压板,来实现上述联切要求。当投进线备自投方式 1 或 2 时,同时投入 1LP1、1LP2、1LP3 和 1LP4;当投分段备自投方式 3 或 4 时,只投 1LP1 和 1LP4。

## 4 结 论

通过分析并网小电源对电力系统各相关元件保护的影响,较全面概括了 110 kV 负荷终端变电站相关保护及自动装置动作后应采取的联切措施,在此基础上归纳提出了并网小电源联切原则,根据该原则制定了四川某 110 kV 变电站相关保护和备自投联切并网小电源方案,经过现场调试和实际运行检验表明:该方案能切实可靠地联切并网小电源,并且联切装置及回路简单,便于实现,有利于变电站的安全稳定运行。

### 参考文献

- [1] 梁兆庭,黄金. 110 kV 终端变电站小电源故障解列实例研究[J]. 四川电力技术, 2011(2): 30-31.
- [2] 方学智. 小电源上网对系统内保护影响及解决方案[J]. 贵州电力技术, 2012(9): 75-76.
- [3] 杨萍,王翠霞,张杏元. 并网小电源故障解列的探讨[J]. 陕西电力, 2003(6): 30-31.
- [4] 黎瀚. 小电源并网可靠性及故障解列问题探讨[J]. 机械与电气, 2009(11): 46-47.
- [5] 雍丽华. 小电源接入电网相关继电保护的配置和整定[J]. 电工技术, 2013(2): 27-28.
- [6] 周晨. 地方小电源对备自投控制策略的影响研究[J]. 中国科技信息, 2012(23): 39-40.

作者简介:

孙文成(1985),本科,助理工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制;

崔明德(1981),硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行分析与控制。(收稿日期:2014-07-07)

(上接第 43 页)

- [6] 王虹富. 并网风电场的有功功率补偿与稳定性控制[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [7] 师楠,朱显辉. 风电并网的频率控制问题[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(2): 84-88.
- [8] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [9] 史保壮, Jason MacDowell, Richard Piwko, 等. 风电并网技术的新进展[J]. 电力设备, 2008, 9(11): 20-24.
- [10] 范高锋,裴哲义. 2011 年中国“三北”地区风电并网运

行及反事故措施[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 86-90.

- [11] 康潇. 风电并网对系统稳定性的影响及改善措施研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.
- [12] 张少泉,仇英辉,刘超,等. 风电并网对云南电网潮流分布与电网调峰的影响[J]. 南方电网技术, 2012, 6(5): 36-38.
- [13] 李正然,洪祖兰. 云南电网吸纳大容量风电的若干问题讨论[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 80-84.

(收稿日期:2014-09-13)

# 继电保护在线校核系统的研究

王 佼, 刘 钊

( 国网保定供电公司, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 电力系统继电保护的主要任务是反应一次设备的工作状态, 控制和调节一次设备。随着电网结构越来越复杂, 继电保护定值的整定工作量日益增加, 这必然导致保护定值间的配合日趋困难。就此问题, 提出了解决方案并对继电保护在线校核软件的结构和功能进行了探讨, 对其中关键问题进行了研究。

**关键词:** 继电保护; 在线校核; 扰动域; 整定计算

**Abstract:** The main objectives of any relay protection schemes in power system are to response the working state of primary equipment and to monitor and control them. Nowadays, with more and more sophisticated structure of power grid, the adjustment of relay protection setting values increases gradually, which inevitably leads to the hard coordination among the protection setting values. As the result, some solutions are proposed, the structure and function of on-line checking software for relay protection are discussed, and the key problems and technical difficulties are investigated.

**Key words:** relay protection; on-line checking; perturbation threshold; setting calculation

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0065-04

## 0 引 言

继电保护装置在电力系统中起着非常重要的作用, 它能够保证电网安全、稳定的运行。而保护定值的准确性又决定着设备故障是否能够灵敏、可靠、选择性地切除<sup>[1]</sup>。在传统离线整定系统中, 在最大运行方式下整定、最小运行方式下校验灵敏性的方法已经很难满足所有运行方式的要求, 因为容易导致某些保护发生误动或者拒动的情况, 这将影响电网的稳定性, 造成供电可靠性能的降低。

## 1 在线校核的优势

在线校核模式较离线整定计算模式的优点在于以下两点。

(1) 传统的整定计算在运行方式的选择上, 给出的定值只是考虑了系统基本的运行方式和正常的检修方式。当电网的运行方式比较特殊时, 调度就要专门另行计算保护定值。而保护定值的在线校核只对系统当前运行方式下定值的合理性进行考虑, 能够适应当前电网存在多运行方式变化的需求<sup>[4]</sup>。

(2) 在大多数运行方式下, 离线整定的继电保

护定值都不是最合理、最精确的保护定值, 这就必然造成保护的定值范围缩小、保护的延时变长和保护的不匹配率升高<sup>[5]</sup>; 而在线校核模式所校核的保护定值是针对当前的运行方式, 它能够对不满足保护要求的定值发出报警信号, 从而有效地避免保护误动或拒动。

下面将介绍继电保护在线校核系统的功能与结构, 并就其实现的关键技术的解决给出了解决方法。

## 2 在线校核系统

所谓在线校核系统, 就是从 EMS 系统中获取电网运行的实时状态来实现在线校核。当监测到系统运行方式发生变化后, 在线校核系统就会针对变化后的电网结构进行故障计算并校核保护定值。在定值不能满足保护的选择性或灵敏性要求时, 在线校核系统会报警并生成定值计算书供工作人员查看阅读<sup>[8]</sup>。在线校核系统拥有完全支持电网拓扑结构的图形环境(系统提供图形编辑环境, 在制图的过程中同时自动生成描述电网构架的网络拓扑数据), 在系统运行时仅需获得 EMS/SCADA 的遥测和遥信数据, 即可完成系统实时状态的获取功能, 为系统在实时状态下获取在校校核关心的数据及基于网

络模型部分个性化的处理方法奠定了基础。

在线校核系统采用模块化的设计,它利用图形工具和电网资源模型<sup>[12]</sup>来分析电力系统故障并整定保护定值。该系统模块主要包括了故障计算模块、系统维护模块、在线分析故障集模块、仿真校验模块和整定计算模块<sup>[1]</sup>。其整体结构如图 1 所示。

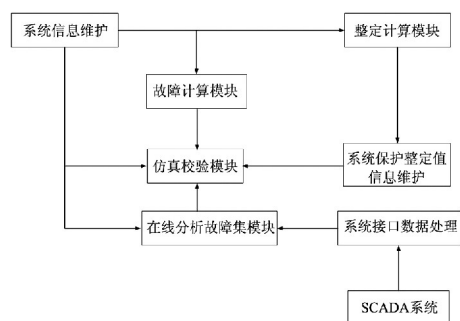


图 1 系统结构

## 2.1 系统维护模块

系统维护模块利用计算机来实现电网结构和电网资源的录入。电网中的母线和各节点的位置由用户合理设置,各母线和节点之间的连接要求设置合理的路径,用来自动生成电力系统网络拓扑图和各个厂站图。并且可以自动生成保护配置图、各序网图和主接线图,同时可根据用户的实际需求对其进行打印输出和修改等操作。

## 2.2 故障计算模块

故障计算模块既可以单独分析电网的故障,又可以和保护定值作比较,成为在线校核系统的一个模块。使用该模块,用户可以通过故障计算的界面来设置不同的故障类型、故障点位置以及电网的运行方式,并能利用其强大的故障计算功能,输出故障计算结果。

## 2.3 整定计算模块

整定计算模块的整定界面是根据保护定值的整定原则来设计的<sup>[4]</sup>,并且遵守《220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程》和《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》的相关规定。而且,该模块允许用户凭借以往的系统运行经验参与保护定值的整定计算过程,这使得系统能够兼顾专业性和通用性。整定计算模块由整定计算和保护配置两部分组成,可以实现设备的保护定值管理和保护定值的整定计算。

## 2.4 在线分析故障集模块

在线分析故障集模块<sup>[4]</sup>可以依据电网当前运

行方式和电网配置的保护类型,针对电网不同电压等级对应的常见故障过渡电阻或用户设置的典型过渡电阻的范围值等信息,自动针对保护校验生成相应的故障集,通过启动仿真功能模块完成故障集下的电网保护整定情况分析,将存在运行隐患的保护整定项以报告的形式给出,为用户进一步分析和调整保护整定值提供依据,使得保护整定值在当前运行方式下处在合理的配合状态。

## 2.5 仿真校验模块

在线校核系统的核心组成模块就是仿真校验模块。该模块作用是将整定计算模块所提供的保护整定信息和故障计算模块所提供的故障量信息进行比较,从比较结果来判断保护装置的动作是否具有合理性。而且,在系统的各种运行方式下,该模块可以设置不同的故障类型、电网故障点和保护拒动情况。当仿真校验完成之后,用户就可以很直观地检查系统内各保护装置动作是否正确。并且,仿真校验报告的输出有图形和文字两种方式可供选择。

# 3 关键问题的解决

## 3.1 关于实时状态的获取

在线校核系统从监视控制与数据采集系统中获取电力系统的实时数据。当系统的运行方式改变后,在线校核系统就会发出报警信号而且自动启动保护定值整定计算。其中,对定值有影响的主要运行方式的变化包括如下。

(1) 发电机、线路、变压器等一次设备的投退和由设备故障所引起的断路器跳闸。

(2) 发电机出力和负荷的变化,这主要表现为电力系统潮流的改化。

其中,线路电流的变化可以通过定值的比较来实现。对于开关位置的变化,由实际分析可知,在实时数据里只有少数断路器或隔离开关的状态发生了变化,这时的电网结构相对于前一次的状态并没有完全发生改变,只是局部发生了变化。

在电力系统中,一定电压等级下断路器状态的变化所造成的网络物理结构的改变,不会产生跨电压等级的影响,只能影响到本电压等级下母线的模型。可以结合电力系统的这种特点,采取适当的方法来缩小拓扑扫描的范围,并对网络进行局部拓扑处理,从而避免全网拓扑关系重新形成,进而准确、

快速地来反映网络的接线状态。

系统采用静态形成拓扑结构和动态修改拓扑结构的方法追踪开关发生变化后的实时拓扑结构。

静态拓扑分析主要完成对电网初始状态进行全网的拓扑分析,形成电网的初始拓扑结构。静态拓扑分析包括等值节点的形成和电气岛的形成两部分。采用广度搜索的思想,以等值节点的形成为例,其流程图如图 2 所示。

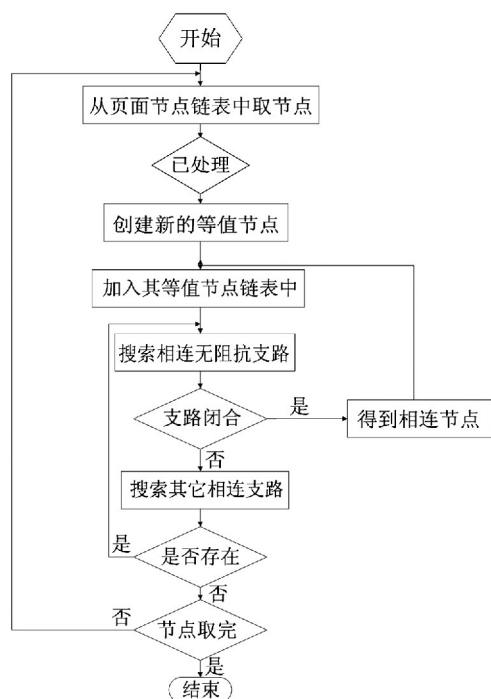


图 2 静态拓扑分析流程

动态拓扑分析主要是搜索状态变化的开关或者刀闸,并考虑其电压等级的因素对初始拓扑结构进行快速的局部修改。动态拓扑分析主要分为无阻抗设备的合上和无阻抗设备的断开两种情况。其无阻抗设备操作合上的情况处理比较简单,只需通过判断无阻抗设备两端的节点所属的等值节点是否是同一个等值节点、两端的节点所属的电岛是否为同一个电岛即可。即等值节点和电气岛的变化。对于无阻抗设备断开的情况则复杂一些,动态拓扑追踪需要分析两个层次:①等值节点分析;②等值电岛分析。以断路器的分闸操作为例说明动态拓扑追踪算法流程图如图 3 所示。

### 3.2 启动在线校核的方法及影响域的确定

在线校核系统的启动模式不仅可以采用定时间间隔启动和指定时间启动,而且可以采用事件启动模式,即保护投退的变化和电网运行方式的变化所

触发的启动方式。这种启动方式能够实时地反应保护投退的变化及电网运行方式的变化所引起的继电保护定值的改变。

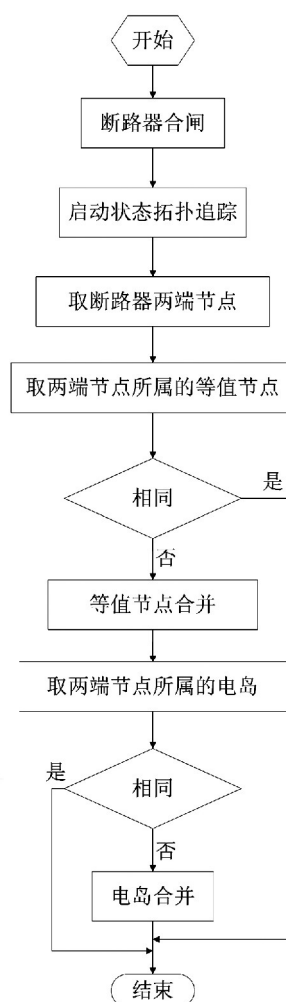


图 3 动态拓扑分析流程

在电力系统的实际运行中,电网拓扑结构的变化大都是小范围的,是局部的。所以这种变化影响继电保护定值的程度并不大,并且具有一定的局限性。而且这一范围之外的继电保护定值仍保持着相对良好的配合关系。因此,最好能确定拓扑结构变化影响的保护范围,即扰动域的范围。

### 3.3 环网系统的在线校核

研究发现,对保护影响较大的元件主要分布在保护所在线路对侧母线和背侧母线及其配合保护所在线路的对侧母线上。

大小环交错的环网结构中某些线路的投切操作也可能大幅度地变更电力系统局部网络间的物理拓扑结构,并对一定范围内的保护定值及正确动作产

生较大的影响。实际复杂电力系统中,对保护影响较大的环网开断线路绝大部分仍然分布于保护所在线路两侧母线以及配合保护所在线路两侧母线连接的线路中。

若同时将主保护以及配合保护两侧母线上连接的线路加入到开断的线路范围中,必须考虑到大部分环网开断对保护定值的影响。

为此,可以采用自动扩大搜索和确定环网涉及的保护相结合的方法来解决环网的在线校核问题。其基本思想是:以电力系统拓扑结构变化部分为中心,自动搜索其外层三层元件和确定与其构成环路的元件,校核以上阐述所涉及的保护。此研究可以避免搜索全网所有范围,避免对满足灵敏性和选择性的保护定值进行校核,这样大大减少计算时间,并且能够满足实时性的要求。

## 4 结 语

通过对继电保护在线校核系统的软件功能分析,给出了其系统的结构设计和各模块的实现功能设计,并就其中的关键技术进行了研究。该方案结合了许多工程实际,能够为在线校核软件的应用提供很大的参考价值。

### 参考文献

- [1] 李志. 电网继电保护定值仿真校验系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.

(上接第 53 页)

- [10] Dorigo, M, Maniezzo, V and Colomi, A. The Ant System: An Auto Calytic Optimizing Process [R]. Technical Report No. 91 - 016 Revised, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [11] 杨淑莹, 张桦. 群体智能与仿生计算——Matlab 技术实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 225.
- [12] 刘进明, 应怀樵. FFT 谱连续细化分析的富里叶变换法[J]. 振动工程学报, 1995, 8(2): 162 - 166.
- [13] 马卫, 朱庆保. 求解函数优化问题的快速连续蚁群算法[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2120 - 2124.
- [14] 何川, 舒勤, 李旻. 基于改进单通道 FastICA 的谐波与

- [2] 迟福建. 地区电网继保定值在线校验分析系统的深入研究与实现[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规程汇编(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] 马丽萍, 焦彦军. 电力系统继电保护在线校验系统的研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(1): 41 - 44.
- [5] 吕颖, 吴文传, 张伯明, 等. 电网保护定值在线整定系统的开发与实现[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 15 - 20.
- [6] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51 - 56.
- [7] 朱文东, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30 - 33.
- [8] 陈建民, 倪腊琴, 韩学军, 等. 继电保护整定在线评估及预警系统研究[J]. 华东电力, 2012, 40(4): 608 - 612.
- [9] 郑太一. 故障信息系统构建及继电保护专家系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [10] 马丽萍. 基于广域测量系统的后备保护在线校验[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- [11] 罗栋梁. 新型配电网继电保护的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [12] 高虹霞. 电网继电保护整定计算软件的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [13] 任龙. 继电保护定值在线校核系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

### 作者简介:

王 佼(1987), 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。 (收稿日期: 2014 - 06 - 30)

间谐波检测[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2959 - 2964.

### 作者简介:

王志川(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事变电运维检修工作;

刘丹莉(1974), 大学本科, 高级工程师, 主要从事变电运维检修工作;

彭祥华(1985), 硕士研究生, 研究方向为智能检测与计算机网络技术;

周 群(1966), 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电工理论与新技术、智能检测、电能质量。

(收稿日期: 2014 - 07 - 08)

# 含源配电系统孤岛运行状态特征识别与诊断

伍 盛

( 国网德阳供电公司 ,四川 德阳 618000)

**摘 要:** 孤岛效应是分布式发电中较为重要的问题。现有的孤岛检测方法通常分为三类: 即有源孤岛检测方法、无源孤岛检测方法和基于通信的孤岛检测方法。重点研究了 OVP/UVF 方法, 并通过修正分布式电源 DG 的  $P-V$  特性斜率来改进了 OVP/UVF 方法, 修正其斜率为正能有效地减小不可检测区, 修正其斜率为负将增大其不可检测区。

**关键词:** 分布式发电; 逆变器; 孤岛; 不可检测区; 特征识别; 诊断

**Abstract:** Islanding is a relatively important problem in distributed generation. The existing islanding detection methods are usually divided into three kinds, namely active islanding detection method, passive islanding detection method and islanding detection method based on communication. The OVP/UVF method is mainly studied and it is improved through correcting the slope of  $P-V$  characteristics in distributed generation (DG). It can effectively decrease the non-detection zones by amending the slope to be positive, and it can increase its non-detection zones by amending the slope to be negative.

**Key words:** distributed generation; inverter; island; non-detection zone; feature identification; diagnosis

中图分类号: TM763 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0069-04

## 1 形成孤岛的原因和影响

### 1.1 孤岛形成的原因

(1) 频率或电压越限。当系统频率或者电压超过上下边界条件时, 将引起联网电气保护装置的动作。如果是线路和变压器的后备保护装置动作, 将使得电网与分布式电源断开连接, 形成孤岛。

(2) 并网设备故障。电力系统的设备均是通过线路与分布式电源连接于并网耦合点 (point of common coupling, PCC)。如果并网设备故障, 将引起线路保护装置动作, 跳开故障线路。如果连接于 PCC 所有电网线路均断开, 分布式电源与系统电网隔离开来, 形成孤岛。

(3) 失步保护动作。在配电网中, 分布式电源与主系统之间的联系很微弱, 如果包含分布式旋转电源的配电网与主电网失步时, 失步保护装置将动作, 断开并网线, 形成孤岛。

### 1.2 孤岛形成的影响

(1) 孤岛情况使得电压和频率失去控制, 如果分布式发电装置没有电压调节能力和频率调节能力, 并且也没有电压和频率保护继电器来限制电压和频率的偏移, 孤岛部分的电压和频率可能发生大

的波动, 这可能将对用户设备造成危害。

(2) 孤岛部分重新接入电网时, 可能由于失步问题对电网中的断路器等设备造成损坏, 并可能产生很大的冲击电流, 产生的冲击电流可能损坏孤岛部分的分布式发电设备, 甚至引起电网的再次跳闸。

(3) 孤岛情况可能导致不能清除接地故障或相间短路故障, 可能对电网设备造成损坏, 并且干扰电网的正常供电的自动和手动恢复。

(4) 孤岛情况使得一些被认为与电网断开连接的电路带点, 这使得运行检修人员误将孤岛带电部分作为断电部分, 如果此时不正规的操作, 可能危及检修人员的人身安全。

## 2 孤岛检测方法

目前对于孤岛研究的方法多种多样。基本可以分为 3 类: 有源孤岛检测方法、无源孤岛检测方法和基于通信的孤岛检测方法。

有源孤岛检测方法通常是对系统施加一定的扰动量, 这种扰动量可以是正序电流或负序电流幅值、电流相位、输出有功功率、输出无功功率等。然后观察这些扰动量对系统的影响。如果受扰后的系统能保持频率和电压幅值在规定范围内的稳定运行, 那

么可以判定系统处于分布式电源与电网并列运行的正常状态;如果受扰后负荷侧的频率或电压幅值超过其上下边界,可以判定分布式电源与电网已经断开连接。

无源检测方法就是通过监测系统的实际运行时的参数,并与规定的对应参数的上下边界相比较,来判定系统参数在监测的时候是否越界,进而通过比较分析来判定分布式电源是否与电网隔离开来。

基于通信的孤岛检测方法的不可检测区小到可以忽略,但是这种方法比前两种方法更昂贵,虽然可靠却不经济,也没能得到最广泛的应用。

### 3 OVP/UVF 孤岛检测法

采用大电网经过断路器与分布式电源和负荷接于并网耦合点 PCC。图 1 所示的系统由一个具有阻抗的大电源,用并联 RLC 支路表示的负荷和一个基于逆变器的输出有功功率为 100 kW 的分布式发电装置组成。

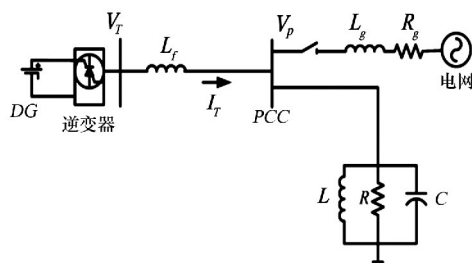


图 1 待研究的系统结构

#### 3.1 孤岛检测方法

下面重点研究了 OVP/UVF 孤岛检测方法下的不可检测区问题。所以着重讨论负荷的  $P-V$  特性曲线。负荷和分布式电源的  $P-V$  曲线如图 2 所示。

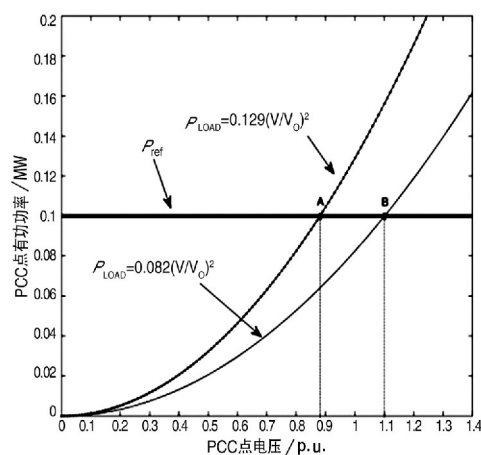


图 2 负荷和分布式电源的  $P-V$  曲线

分布式电源输出恒定有功功率 100 kW,它与 129 kW 和 82 kW 的负荷分别交与点 A 和点 B,点 A 和点 B 称作孤岛运行点。从图 2 上可以看到,点 A 对应的电压为  $0.88 V_{p.u.}$ ,点 B 对应的电压为  $1.1 V_{p.u.}$ ,其中  $V_{p.u.}$  为额定电压标么值 1。根据 IEEE Std 1547 的标准规定,电压为额定电压的 88% ~ 110% 均为正常范围。所以,如果 OVP/UVF 方法测量得到的电压在额定电压的 88% 到 110% 之间时,将无法检测出孤岛情况,也就是说如果负荷的  $P-V$  曲线处于上述 129 kW 和 82 kW 的  $P-V$  特性曲线之间时,那么该负荷处于不可检测区。

可以看到,造成不可检测区的原因之一就是恒功率输出曲线。不可检测区的大小与分布式发电的参考功率设置有关。下面分别讨论斜率正或为负的情况。

#### 3.2 参考有功功率曲线斜率为正的情况

假设参考有功功率斜率为正,例如  $a = 0.05$ ,  $b = 0.05$ 。参考有功功率  $P_{ref}$  的表达式为

$$P_{ref} = 0.05 V_{p.u.} + 0.05$$

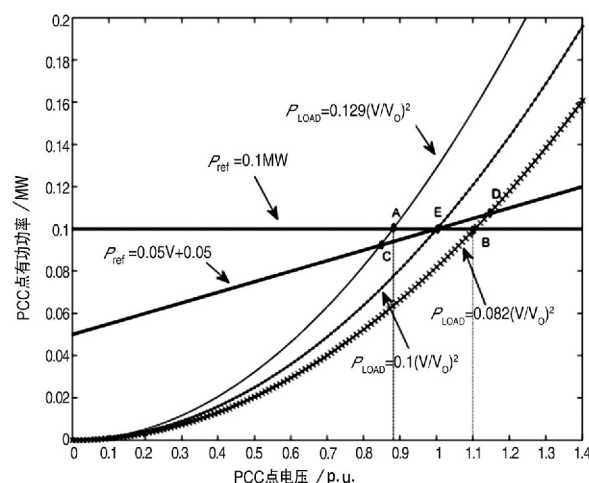


图 3 斜率为正时的 DG 和负荷  $P-V$  特性曲线

如图 3 所示,100 kW 的负荷与 DG 的有功功率曲线交于点 E,此时输出有功功率 100 kW,电压的标么值为 1.82 kW 和 129 kW 的负荷分别与恒 DG 参考有功输出曲线 ( $P_{ref} = 0.1$ ) 交于点 A 和点 B,与修正后的 DG 参考有功功率曲线 ( $P_{ref} = 0.05 V_{p.u.} + 0.05$ ) 交于点 C 和点 D。从图上可以看出,点 A 和点 B 正好处于电压的边界条件上;点 C 的电压小于 0.88 p.u.,小于电压边界的下限;点 D 的电压大于 1.1 p.u.,大于电压边界的上限。此时,运用 OVP/UVF 方法将很容易地检测出电压越限,判断出孤岛

情况的发生。如果 DG 参考有功功率的曲线为恒定的直线 0.1 MW, 对于 82 kW 和 129 kW 负荷所对应的电压正好位于电压的边界条件上, 即点 A 和点 B, 将无法检测出孤岛情况。所以, 通过修正使 DG 参考有功功率曲线的斜率  $a$  为正, 在一定程度上减小了 OVP/UVF 方法的不可检测区。

### 3.3 参考有功功率曲线斜率为负的情况

下面讨论当 DG 的参考有功功率曲线斜率为负的情况。具体方法同上, 假设  $a = -0.06$   $b = 0.16$ 。参考有功功率  $P_{ref}$  的表达式为

$$P_{ref} = 0.06 V_{p.u.} + 0.16$$

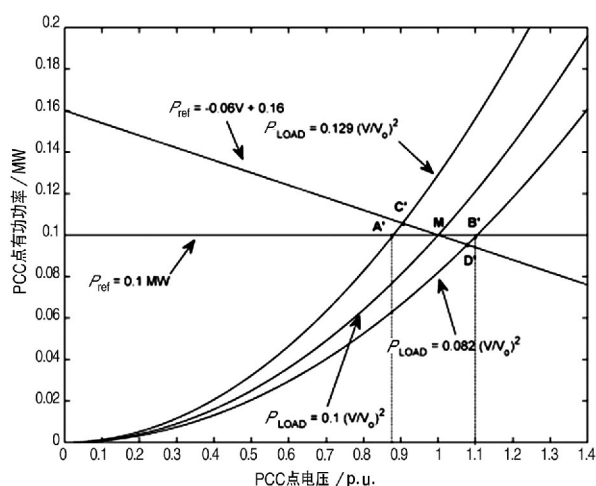


图 4 斜率为负时的 DG 和负荷  $P-V$  特性曲线

图 4 表示了 3 种负荷状态和 DG 的  $P-V$  特性曲线。类似的, 100 kW 负荷曲线与 DG 的修正后的参考有功功率曲线交于点 M, 点 M 的有功功率输出为 0.1 MW, 电压为 1 p.u.。82 kW 和 129 kW 的负荷曲线与修正后的 DG 输出功率曲线分别交与点 C' 和点 D'。点 C' 的电压在 0.9 p.u. 到 1 p.u. 之间, 点 D' 的电压在 1 p.u. 到 1.1 p.u. 之间, 均在电压的允许范围内。此时, 情况比恒有功功率输出时更加糟糕, 运用 OVP/UVF 方法将不能检测出孤岛情况。当斜率为负时, 使运行点的电压更加接近于 1 p.u., 这使得不可检测区不但没有减小, 反而扩大了。假如负荷是接近于边界负荷的某个值, 例如 130 kW 和 80 kW, 如果是恒定的有功输出曲线, 交点应该超过了电压的边界条件, 用 OVP/UVF 方法能测出孤岛状态。但是由于修正后的 DG 参考有功功率曲线使得交点电压将更加接近于额定值, 即原本运用 OVP/UVF 孤岛检测方法能测到的负荷情况变得不能检测到, 扩大了不可检测区。所以, 通过修正 DG 参考有功功率曲线为负斜率的方法不可行。

### 3.4 寻找减小不可检测区的最优斜率

比较图 3 和图 4, 可以看出用正斜率的  $P-V$  特性曲线能减小不可检测区, 用负斜率的  $P-V$  特性曲线反而会增大不可检测区。为了更好地减小不可检测区, 所选择的  $P-V$  特性斜率必然为正, 不妨考虑斜率为正时的极限情况, 即将 DG 参考有功功率曲线的斜率设置为点 C 的切线。

$$P_{ref} = 0.2 V_{p.u.} - 0.1$$

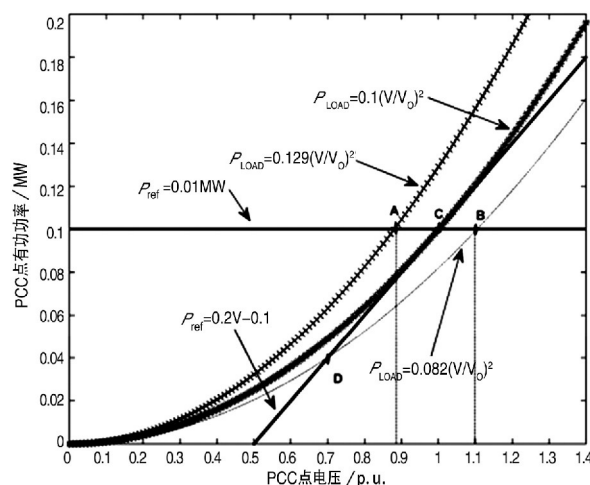


图 5 斜率为点 C 的切线时 DG 和负荷  $P-V$  特性曲线

图 5 表示了 3 种负荷状态和上式中的 DG 的  $P-V$  特性曲线。100 kW 负荷和 DG 的有功功率曲线相交于点 C, C 点的有功功率为 100 kW, 电压为 1 p.u.。对于大于 100 kW 的负荷, DG 的参考有功功率曲线与负荷曲线不相交, 即当负荷大于 100 kW 时, DG 和负荷没有交点, 也就是说 DG 不能带动大于 100 kW 的负荷稳定运行。对于 82 kW 负荷, DG 的参考有功功率曲线与负荷曲线交于点 D, 另外一点不在框图内。通过这样的修正, 最大程度地使孤岛运行电压偏离了额定值, 这使得用 OVP/UVF 方法能很好地检测出孤岛情况, 即最大程度地减小了不可检测区。

### 3.5 建模与仿真

在 PSCAD/EMTDC 环境下完成了对系统的建模和仿真。对于图 1 所示的待研究的系统结构, 选择一个恒定直流电压源代替 DG, 取  $dcV = 0.9$  kV  $L_f = 2.1$  mH, DG 的输出有功功率为 100 kW。负荷参数  $R = 2.304 \Omega$   $L = 3.395$  mH  $C = 2.075$  mF。电网参数频率  $f = 60$  Hz, 电抗  $L_g = 0.3056$  mH, 电阻  $R_g = 0.012 \Omega$ 。控制器参数  $K_i = 0.0008$   $K_p = 2.5$   $K_i' = 0.1$   $K_p' = 20$ 。直流电压源通过逆变电路逆变为三相交流电压, 然后经电抗  $L_f$  接于 PCC, 阻抗分别为

$R_g$  和  $L_g$  的大电网通过断路器 BRK 接于 PCC, 负荷也接于 PCC。断路器 BRK 在  $t = 3$  s 时断开, 在  $t = 7$  s 时重新合上。

仅从理论上分析应该得到的仿真波形。对于 82 kW 的负荷  $P_{ref}$  设为 100 kW 恒定值, 电压稳定在 1.1 p. u. 附近, 负荷的有功功率自动调节为 100 kW。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 1.1 p. u. 和 100 kW 更大的值, 对应的 D 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将低于 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 D' 点。所以, DG 的  $P-V$  特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。

对于 100 kW 的负荷, 3 个 DG 的  $P-V$  特性曲线的电压和有功功率稳定在 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于点 E 和点 M。OVP/UVF 方法在这样的条件下将很难检测出孤岛情形。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 0.88 p. u. 和 100 kW 更小的值, 对应的 C 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将略大于 0.88 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 C' 点。同样的, DG 的  $P-V$  特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。对于 129 kW 的负荷条件下也有同样的结论。

所以, 理想的仿真波形应该是能支持所提的改进后的 OVP/UVF 孤岛检测方法。调节 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为正能减小 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区, 调节 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为负将增大 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区。

## 4 结 论

孤岛情况可能会对电力系统和运行检修人员产生极大的危害, 因此, 必须重视并逐步完善孤岛检测

方法。首先分析了孤岛形成的原因, 目前孤岛检测方法分类以及各种方法的原理和优缺点。所研究的方法主要对 OVP/UVF 方法进行了改进。通过修正 DG 的  $P-V$  特性曲线的斜率来减小 OVP/UVF 方法的不可检测区。当 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为正时, 能有效减小 OVP/UVF 方法的不可检测区; 当 DG 的  $P-V$  特性曲线斜率为负时, 反而会增大 OVP/UVF 方法的不可检测区。当斜率为额定运行点(电压为 1 p. u., 功率为额定功率 100 kW)的切线时, 不可检测区可以控制到最小。

## 参考文献

- [1] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [3] 伞国成, 赵清林, 郭小强, 等. 光伏并网逆变器的间歇性频率扰动正反馈孤岛检测方法 [J]. 电网技术, 2009, 33(11): 83-86.
- [4] 程明, 张建忠, 赵俊杰. 分布式发电系统逆变器侧孤岛检测及非检测区描述 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 44-52.
- [5] 姚丹. 分布式发电系统孤岛效应的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [6] 殷桂梁, 孙美玲, 肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(1): 1-6.
- [7] 褚小莉. 光伏并网中的孤岛效应研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [8] 曾议. 分布式并网发电系统孤岛检测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

作者简介:

伍 盛(1981), 国网德阳供电公司, 工程师。

(收稿日期: 2014-07-21)

(上接第 60 页)

- [19] Pucci M, Cirrincione M. Neural MPPT Control of Wind Generators with Induction Machines without Speed Sensors [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(1): 37-47.
- [20] Welfonder E, Neifer R, Spanner M. Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(1): 63-73.

- [21] Leonhard W. Control of Electrical Drives [M]. Springer, 2001.

作者简介:

田永贵(1988), 硕士研究生, 研究方向为风力发电、非线性变结构控制;

王 奔(1960), 博士, 教授, 研究方向为电力系统非线性变结构控制与电能质量控制。

(收稿日期: 2014-07-07)

# ± 800 kV 特高压直流输电工程保护闭锁策略分析

孙 文<sup>1</sup> 禹 佳<sup>1</sup> 滕予非<sup>2</sup>

(1. 国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 对 ±800 kV 特高压直流输电工程的保护闭锁策略进行了详细阐述。首先,对特高压直流工程故障隔离一般措施进行了介绍,特别地对旁通对投入的方式及作用进行了分析。其次,对特高压直流闭锁的 4 种类型进行了阐述,详细分析了 4 种闭锁的应用范畴及动作特性。最后,分析了直流两侧换流站有无通讯情况下,系统的闭锁策略。±800 kV 宾金直流调试录波数据验证了动作策略的正确性。

**关键词:** 特高压直流输电; 保护闭锁; 换流站; 通讯

**Abstract:** The protection block strategy for ±800 kV UHVDC transmission system is introduced in detail. Firstly, the routine measures to isolate the fault in UHVDC system are introduced, and especially the function and the strategy of the by-pass pair are analyzed. Secondly, the application domains and the characteristics of four block strategies in UHVDC transmission system are summarized. Finally, the influence with and without communication between two converter stations on the block strategy is analyzed. The recording data of commissioning for ±800 kV Bin-Jin UHVDC transmission system verifies the validity of the proposed strategy.

**Key words:** UHVDC transmission system; protection block; converter station; communication

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0073-05

## 0 引 言

随着中国西部大开发和电力能源战略的推进,集中于四川金沙江、雅砻江流域的多条特高压直流输电工程已逐渐投运<sup>[1-4]</sup>。华东电网通过 3 条特高压直流从四川吸收电能高达 2 160 MW。因此特高压直流已经成为“西电东送”重要的电力通道。

与交流系统类似,直流系统两端的换流阀组、直流输电线路以及接地极系统也会由于雷击、过压等原因造成故障<sup>[5,6]</sup>。

直流输电系统在运行中发生故障,直流保护或控制系统启动的停运称为故障紧急停运。其操作要达到两个目的:一是迅速切除故障点的直流电流;二是断开交流断路器与交流系统隔离。当直流输电工程的一次系统出现故障时,必须以尽可能快的速度停运、隔离故障系统或设备,以保证系统和设备的安全。

然而当一次设备出现问题时,由于目前没有可以直接切断直流电流的断路器,因此只能通过直流

控保系统对故障元件进行隔离,通过闭锁换流阀、投入旁通对等方式,将故障元件与正常系统进行隔离,使得故障电流降低为 0。

首先对 ±800 kV 特高压直流输电工程的控制保护系统在故障工况下的清除程序进行了介绍;并综述了特高压直流工程中常用 X、Y、Z、S 闭锁的适用范围及动作时序。其次,介绍了直流工程在两侧有无通信情况下的故障闭锁逻辑。现场试验录波验证了逻辑的正确性。

## 1 特高压直流工程故障隔离方法

### 1.1 特高压直流工程故障隔离一般措施

由于直流输电工程故障种类以及造成故障的原因很多,因此每种故障均会有自己特定的隔离方式。但一般来说,直流保护系统会利用如下一项或几项故障清除程序清除故障。

(1) 切换到备用控制系统。

(2) 移相并闭锁换流器。其中移相策略指的是改变换流阀的触发相位。当移相用于隔离故障时,

通常是将整流器的触发角快速移动至  $90^\circ$  以上(最终移至  $160^\circ$  左右),使两端换流器均处于逆变状态,这时直流系统中的能量(线路电感、电抗器、电容器等)将反送至交流系统,并阻止直流回路继续导通,因此直流电流将很快衰减。

(3) 换流器功率瞬降。该方式多用于再启动保护,其控制策略为触发角先移相使换流器至逆变状态,当瞬降命令消失时,换流器触发角减小直至换流器恢复至正常运行状态。

(4) 跳换流变交流侧断路器。

(5) 启动断路器失灵保护。

(6) 闭锁交流断路器。

(7) 换流器功率回降(快速降低输送功率至系统稳定,用于系统过负荷)。

(8) 极隔离。

(9) 极平衡。

(10) 重合方式转换断路器。

(11) 合中性母线接地断路器(NBGS)。

## 1.2 旁通对投入在故障隔离中的作用

在故障隔离过程中,有时还会投入旁通对。旁通对的投入主要是隔离交流侧和直流侧。旁通对投入后与正常运行情况下对比,阀组的导通状态如图 1 所示。

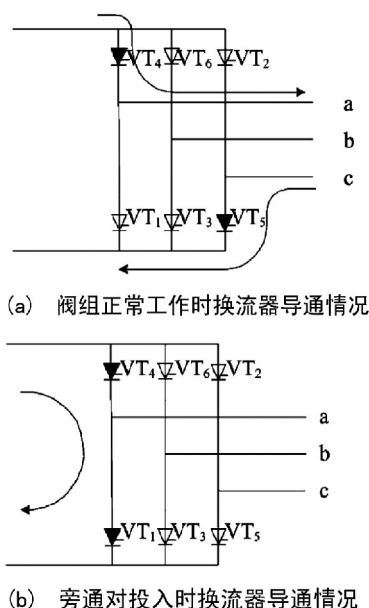


图 1 旁通对投入后与正常工作时对比

当旁通对投入时,相当于将直流回路短接,这时直流电流将无法进入换流变压器;此外如果发生阀内短路故障,投入旁通对可以将故障电流转移到旁通对上,从而保护设备。对于特高压工程,由于设计

有高速旁路开关,直流保护的策略比常规直流复杂。是否投旁通对或是合上旁路开关,需视故障类型来决定。一般情况下本站故障的 12 脉动换流器动作后需要移相时,对端站相应的极需要投旁通对来释放线路上的残余电荷,以避免重新恢复功率时出现过电压。

通常投旁通对的策略是:收到紧急停运命令后,保持最后在导通状态阀的触发脉冲,同时发出与其同一相的另一个阀的触发脉冲,并闭锁其他阀的触发脉冲。

对于部分特殊故障,由于投入旁通对时可能会造成故障电流过大,对避雷器等设备造成冲击,因此控制系统会发“禁止投旁通对”指令。

## 2 特高压直流工程 4 种闭锁类型

由于直流系统故障种类较为复杂,不同的故障类型会有不同的动作组合实现故障隔离,这不同的动作组合就形成了不同的闭锁类型。根据换流阀闭锁的时候是否投旁通对,可以把特高压直流保护闭锁分为 4 种,定义为 X、Y、Z、S 闭锁。

X 闭锁——不投旁通对闭锁;

Y 闭锁——条件投旁通对闭锁;

Z 闭锁——投旁通对闭锁;

S 闭锁——特殊条件闭锁。

上述 4 种闭锁具有如下 4 种特点。

(1) S、X、Z、Y 闭锁,优先等级依次降低。例如:当有 S 闭锁在执行过程中时,X、Z、Y 闭锁均不执行。

(2) 对整流站而言,任何一种闭锁,如果是有最后一个阀组,或者是极闭锁,均会给换流阀下发移相指令。

(3) 逆变站闭锁必需合上旁通开关,整流站非极闭锁或最后一个阀组闭锁会合上旁通开关,否则不合。但 Z 闭锁例外,均需合上旁通开关。

(4) 如果投旁通对失败,延时 100 ms 后执行 X 闭锁(不投旁通对闭锁)。

以下将对 4 种类型的闭锁进行简要介绍。

### 2.1 S 闭锁

S 闭锁是在阀短路电流保护以及直流差动保护中使用的,它是特高压直流工程新增加的一种闭锁方式。由于阀短路保护较为特殊,逆变站阀短路保

护采用 S 闭锁,整流站阀短路保护采用 X 闭锁。S 闭锁的特殊之处在于整流站会延时 30 ms 闭锁触发脉冲。对于整流站、逆变站故障 S 闭锁的动作逻辑如表 1 所示。

表 1 直流两侧故障时 S 闭锁的动作逻辑

| 故障换流站     | 整流站                                         | 逆变站                                    |
|-----------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| 移相        | √                                           | ×                                      |
| 投旁通对      | ×                                           | 交流开关<br>earlymake&BPS<br>分位,投旁通<br>对。√ |
| 合旁路<br>开关 | 条件<br>非极闭锁或最<br>后一组阀闭锁,<br>合旁路开关;否<br>则不合。√ |                                        |
| 闭锁        | √<br>延时 30 ms,发<br>block 命令                 | √<br>BPS 或 BPI 合上<br>后发 block 命<br>令。  |

2.2 X 闭锁

X 闭锁通常用于阀故障,主要由阀短路所引发的保护下令触发。同时当触发电路出现正确选择的旁通对没有被投入的故障时,也会触发 X 闭锁。对于整流侧的运行,阀短路会导致一个大的初始短路电流流过此阀所在的三脉动阀组中一个正常的阀。为了将此过电流限制在一个阀上,故障检测必须足够迅速且换流器必须要在不投旁通对的情况下闭锁。对于逆变侧的运行,阀短路不会导致大的初始短路电流。因此,没有必要立即闭锁换流器。为了限制短路电流的幅值,换流器将移相,即换流器将保持在最小换相裕度角直至换流器闭锁。

对于整流站、逆变站故障,X 闭锁的动作逻辑如表 2 所示。

表 2 直流两侧故障时 X 闭锁的动作逻辑

| 故障换流站 | 整流站                                                                | 逆变站                      |
|-------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 移相    | √                                                                  | √                        |
| 投旁通对  | ×                                                                  | ×                        |
| 合旁路开关 | 条件<br>非极闭锁或最<br>后一组阀闭锁,<br>合旁路开关;否<br>则不合。合闸<br>命令为 100 ms<br>脉冲。√ | √<br>合闸命令为 100<br>ms 脉冲。 |
| 闭锁    | √                                                                  | √<br>延时 100 ms           |

2.3 Y 闭锁

Y 闭锁通常用于不会对设备施加严重压力的直流侧故障、交流侧故障和极手动闭锁。当控保系统下达 Y 闭锁指令时,若整流侧的直流电流在低压限流环节所决定的限值以下,整流侧将在不投旁通对的状态下闭锁。否则整流侧将通过投旁通对闭锁。在逆变侧,换流器通过直接投逆变器的旁通对闭锁,这点与 Z 闭锁类似。在整流侧,为了使电流在闭锁前熄灭,闭锁指令将被延迟。当对站保护动作后,通信正常的情况下,通常本站也执行 Y 闭锁。

对于整流站、逆变站故障,Y 闭锁的动作逻辑如表 3 所示。

表 3 直流两侧故障时 Y 闭锁的动作逻辑

| 故障换流站     | 整流站                                                                                                        | 逆变站                                                                                                       |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 移相        | 条件<br>极闭锁或最后<br>一组阀闭锁,移<br>相;否则不移<br>相。×                                                                   |                                                                                                           |
| 投旁通对      | 条件<br>极闭锁或最后<br>一组阀闭锁,延<br>时 50 ms 后如果<br>IDL_low ≠ 1 投<br>旁通对,否则不<br>投旁通对;非极<br>闭锁或最后一<br>组阀闭锁,投旁<br>通对。√ |                                                                                                           |
| 合旁路<br>开关 | 条件<br>非极闭锁或最<br>后一组阀闭锁,<br>合旁路开关;否<br>则不合。√                                                                |                                                                                                           |
| 闭锁        | √<br>极闭锁或最后<br>一组阀闭锁,延<br>时 200 ms& IDL<br>_ low = 1 发<br>block 命令;否则<br>BPS 或 BPI 合上<br>后发 block 命<br>令。√ | √<br>极闭锁或最后<br>一组阀闭锁,延<br>时 200 ms& IDL<br>_ low = 1 发<br>block 命令;否则<br>BPS 或 BPI 合上<br>后发 block 命<br>令。 |

2.4 Z 闭锁

Z 闭锁通常用于接地故障或直流侧的过电流故障,在换流变压器电气量保护与旁通开关故障保护中经常性使用。Z 闭锁无论整流站还是逆变站,总是无条件地合上旁通断路器,而不判断整流站是否是最后一个发闭锁或是极闭锁。

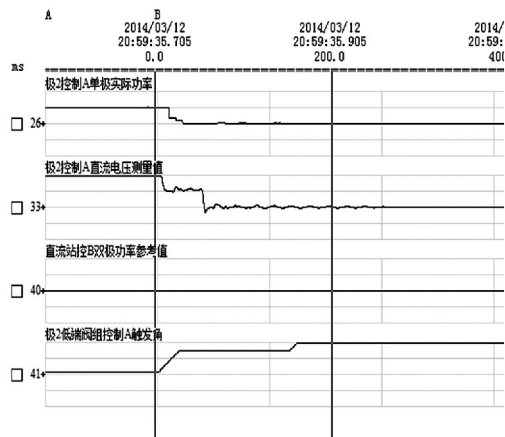
对于整流站、逆变站故障 Z 闭锁的动作逻辑如表 4 所示。

表 4 直流两侧故障时 Z 闭锁的动作逻辑

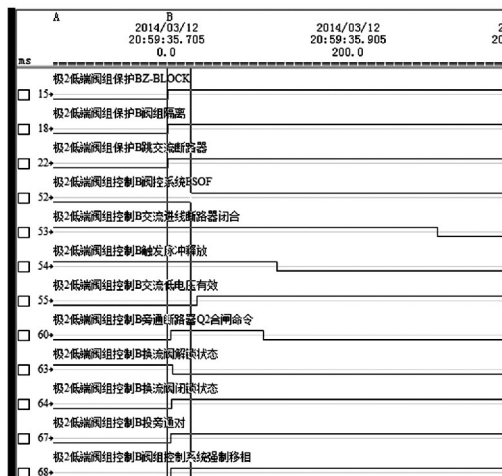
| 故障换流站 | 整流站                       | 逆变站                       |
|-------|---------------------------|---------------------------|
| 移相    | 极闭锁或最后一组阀闭锁,移相;否则不移相。     | ×                         |
| 投旁通对  | √                         | √                         |
| 合旁路开关 | √                         | √                         |
| 闭锁    | BPS 或 BPI 合上后发 block 命令。√ | BPS 或 BPI 合上后发 block 命令。√ |

2.5 试验算例

以 ±800 kV 宾金直流调试试验时 Z 闭锁策略为例,说明特高压直流的闭锁逻辑策略。



(a)模拟量录波波形



(b)开关录波波形

图 2 整流站模拟阀组快速过流保护动作时开关量录波图

该试验是利用控保系统软件置位的方式,模拟阀组快速过流保护动作。根据控制保护系统设计说明,在该故障情况下,系统的保护动作顺序如下。

(1) 换流器 Z 闭锁;

(2) 交流断路器跳闸;

(3) 换流器隔离。

试验开始前,宾金直流双极运行,电流控制模式,双极电流控制指令为 500 A。在阀组快速过流保护动作后,录波系统得到的部分模拟量信号以及开关量变位信号波形如图 2 所示。

由图 2 可知,当整流站模拟阀组快速过流保护动作时,保护值班系统(B 系统)系统 Z 闭锁。阀组控制强制移相,同时投入了旁通对以及旁通断路器 Q2。从模拟量录波中也可以看出,保护动作后触发角从 15°左右移相至 120°,同时直流电压以及功率随之下降至 0 左右,成功实现了故障隔离。

3 双端通信状况对直流闭锁的影响

3.1 双端不同通信状态下直流闭锁策略

正常情况下,特高压直流整流、逆变站之间均会有通信进行信息交换。因此,当某一侧换流站因为换流阀故障出现闭锁时,其闭锁信号会传递给对站。当某一侧换流站接受到对站的闭锁信号时,本站将自动进入正常 Y 闭锁逻辑。

然而,如果由于光纤故障等原因导致两侧换流站通信中断,当对站出现闭锁时,由于本站接收不到对站的闭锁信号,因此只能依靠自身保护进行闭锁。

当双端换流站通信中断时,若整流站出现闭锁,逆变侧会进入空载运行状态,当运行会持续一段时间后(西门子逻辑为 60 s,ABB 的逻辑为 900 s),自动闭锁。在逆变侧空载运行阶段,逆变侧的电压控制会自动将电压控制在允许范围之内。若逆变侧出现闭锁,由于逆变侧旁通开关的投入,对整流侧而言相当于线路短路故障。因此整流侧强制移相并重启一次后自动闭锁。

3.2 试验算例

同样以 ±800 kV 宾金直流调试试验项目为例,说明特高压直流的闭锁逻辑策略。

该试验是在两侧通讯断掉的情况下,利用控保系统软件置位的方式,模拟逆变侧阀组快速过流保护动作。

试验开始前,宾金直流单机大地回线运行,电流控制模式,电流控制指令为 500 A。在逆变侧阀组快速过流保护动作后,录波系统得到整流侧的部分模拟量信号波形如图 3 所示。

由图 3 可知,在无通信的情况下,当逆变站模拟阀组快速过流保护动作时,直流系统电流出现突增,然后整流侧触发角强制移相至  $120^\circ$ 。强制移相发生 150 ms 后,直流系统重启失败,整流侧闭锁。该逻辑与上述逻辑相同。

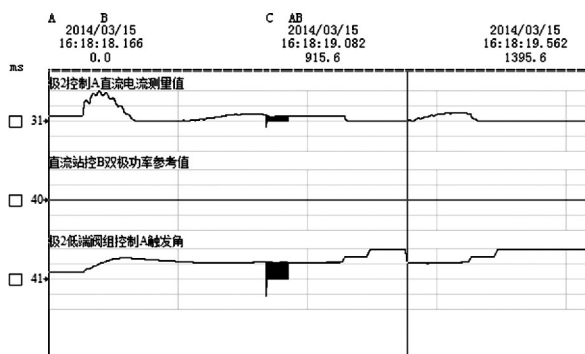


图 3 逆变站模拟阀组快速过流保护动作时开关量录波图

## 4 结 论

详细阐述了  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程的保护闭锁逻辑,并对两端换流站通信对闭锁的影响进行了分析,并通过调试试验波形得以验证。得到了以下结论。

(1) 当直流系统出现故障时,直流保护系统采用切换备用控制系统、移相并闭锁换流器、换流器功率瞬降、跳换流变压器交流侧断路器、启动断路器失灵保护、闭锁交流断路器、换流器功率回降等策略对故障进行隔离。

(2) 在故障隔离过程中,有时还会投入旁通对。旁通对的投入主要是隔离交流侧和直流侧。通常投旁通对的策略是:收到紧急停运命令后,保持最后在导通状态的阀的触发脉冲,同时发出与其同一相的另一个阀的触发脉冲,并闭锁其他阀的触发脉冲。

(3) 根据换流阀闭锁的时候是否投旁通对,可以把特高压直流保护闭锁分为 4 种,定义为 X、Y、Z、S 闭锁。X 闭锁为不投旁通对闭锁、Y 闭锁为条

件闭锁;Z 闭锁为投旁通对闭锁;S 闭锁为特殊条件闭锁。

(4) 当双端换流站通信中断时,若整流站出现闭锁,逆变侧会进入空载运行状态,当运行会持续一段时间后(西门子逻辑为 60 s,ABB 的逻辑为 900 s),自动闭锁。在逆变侧空载运行阶段,逆变侧的电压控制会自动将电压控制在允许范围之内。若逆变侧出现闭锁,由于逆变侧旁通开关的投入,对整流侧而言相当于线路短路故障。因此整流侧强制移相并重启一次后自动闭锁。

## 参考文献

- [1] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10 - 14, 61.
- [2] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10 - 16.
- [3] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi - infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 923 - 931.
- [4] IEEE PES Transmission and Distribution Committee. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short - circuit Capacities [R]. Newyork: IEEE, 1997.
- [5] 韩昆伦,蔡泽祥,贺智,等. 高压直流输电线路故障行波传播特性极其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20 - 25.
- [6] 李少华,刘涛,苏匀,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84 - 87.

作者简介:

- 孙 文(1980),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;  
禹 佳(1983),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;  
滕予非(1984),工程师,研究方向为电力系统稳定分析。  
(收稿日期:2014 - 08 - 28)

# 发展绿色电力

# 建设美丽中国

# 某大型水电站 20 kV 系统一点接地后 铁磁谐振现象分析

康 娣<sup>1</sup> 蔡显岗<sup>2</sup> 季 杰<sup>2</sup> 黄建琼<sup>2</sup>

(1. 国电大渡河瀑布沟水力发电总厂, 四川 雅安 625000;

2. 锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615000)

**摘 要:** 首先对某大型水电站 20 kV 系统 TV 保险烧毁事故进行分析, 同时结合故障录波波形, 发现保险烧毁可能是由于铁磁谐振引起的, 最后给出预防铁磁谐振的措施。

**关键词:** 铁磁谐振; 电压互感器; 措施

**Abstract:** Firstly, the fuse burnout accident of voltage transformer in 20 kV system of a large-scale hydroelectric station is analyzed. Based on the fault recorder waveform, it is found out that the fuse burnout is caused by ferro-resonance. Finally, the measures against ferro-resonance are given.

**Key words:** ferro-resonance; voltage transformer; measures

中图分类号: TM864 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)06-0078-03

## 0 引 言

电力系统中存在着许多电容和电感元件, 当系统进行操作或发生故障时, 这些电容和电感元件可能构成各种振荡回路, 在一定的条件下会产生串联谐振现象, 从而导致系统中某些部分或元件出现严重的过电压。谐振是一种稳态性质的现象, 谐振过电压持续时间较长, 当电力系统出现谐振过电压时, 会危及电气设备的绝缘、烧毁系统中的电压互感器及影响保护装置的可靠性。在 35 kV 及以下电压等级的中性点不接地电网中, 当线路电容和母线上的电磁式电压互感器参数配合不当时, 易引起铁磁谐振, 激发起零序性质的工频过电压或谐波谐振过电压, 其大小和频率可从母线上的电压互感器开口三角绕组测量出来。这种铁磁谐振不仅引起虚幻接地, 有时还会酿成事故, 烧毁电气设备<sup>[2]</sup>。

## 1 事故现象分析

### 1.1 事故现象

某大型水电站 A 相发生定子一点接地后定子接地保护动作, 跳开发电机出口断路器, 随即发现主变压器保护柜 A、B 相均报 TV 异常信号, 且无法复

归, 查看故障录波波形如图 1, 发现 A、B 相电压正常, C 相电压仅为 34.5 V, 测量主变压器保护柜端子电压与故障录波数据一致, 由于发电机 20 kV 系统为不接地系统, 大致猜测为 TV 回路出现故障, 在主变压器低压侧 TV 柜测量电压同样与故障录波数据一致, 带电拉开主变压器低压侧 C 相 TV 后取下一次保险, 用万用表测量通断后发现 TV 保险烧毁, 换上同型号保险后故障现象消失。

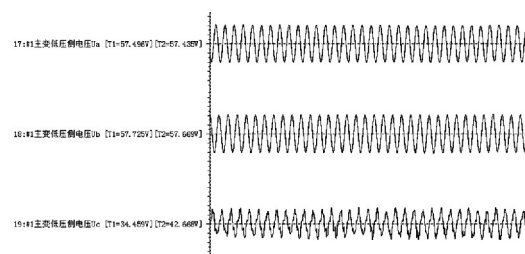


图 1 保险烧毁后主变压器低压侧 TV 故障录波波形

### 1.2 事故原因分析

由于发电机中性点为不接地系统, 当发电机 A 相发生定子接地后 B、C 相电压升为线电压, 此时存在一定的可能性导致主变压器低压侧 C 相 TV 保险击穿, 但考虑到发电机定子一点接地为常见故障, 且经查证 TV 一次保险型号为 RN2-20 kV/0.5 A, 当发电机定子一点接地后相电压升高为线电压 20 kV 后并不会导致保险烧毁。



当系统在操作或有故障、扰动时系统对地电压有低频自由分量出现,使 TV 对地电压升高,TV 一次线圈中出现涌流。涌流可能使铁心深度饱和,其电感值随铁心的饱和而减小,这时,有可能出现两种情况:一是 TV 的一次电流继续增大,烧断 TV 一次侧的熔断器或烧坏 TV;另一种情况是当电感降至  $\omega PL = 1/\omega PC$  时,就会导致铁磁谐振。谐振使得电网三相对地电压不稳定,常使两相电压升高,另一相对地电压降低。

在中性点不接地系统中,当发生单相接地故障时,电网电压、相位维持不变,故障相电压下降为近似零值,非故障相上升为额定电压近似值的 1.732 倍,当系统接地故障消除后,非接地相在过电压期间,由于线路电容的作用,已对线路充入电荷,这部分电荷在中性点不接地系统中,只能对电压互感器的高压绕组电感线圈放电,而流入大地,在这个电压瞬变过渡过程中,非接地相电压互感器一次绕组励磁电流突然出现数倍于额定电流的峰值电流,可将一次电压互感器保险熔断甚至烧毁 TV。另外除三相电压互感器外,其余的主变压器、配电变压器中性点均不接地,当系统发生一个周波重燃多次的弧光断续接地时,电压互感器成为系统对地放电的通道。其放电电流可达 2 A 左右,是一般电压互感器一次额定电流 200 倍左右,这样重燃多次断续放电,可能造成电压互感器因剧烈发热而烧毁<sup>[3]</sup>。

### 3 TV 铁磁谐振治理措施

随着中国电力事业的飞速发展,配电系统铁磁谐振的治理办法也得到了飞速的发展,其形式和方法多种多样,但从其防止铁磁谐振原理可分 4 类。

(1) 降低铁心的磁通密度来改善互感器的伏安特性单相三线圈电压互感器,主要用于系统单相接地保护。系统发生单相接地故障时,会引起工频电压升高,铁心出现过激磁。用于中性点直接接地系统的电压互感器,过激磁达 1.5 倍,为使铁心不致过饱和,正常工作磁通密度应选得低些;用于中性点不直接接地系统的电压互感器,过激磁达 1.9 倍,而且还要考虑防止铁磁谐振,为此,正常工作磁通密度应选得更低些。并且将铁轭截面比铁柱放大 5% ~ 10%,使其磁通密度再低些。采用伏安特性好的 TV,当系统在操作或有故障、扰动时,TV 铁心不易

饱和,从而有效地抑制铁磁谐振。

#### (2) 调整线路参数中 $C$ 与 $L$ 的配合

由上面的分析得到,当系统的感抗大于或等于系统容抗的倒数时,系统不会发生铁磁谐振,所以在 35 kV 以下的母线上加装一组对地电容器可避免谐振;当系统容抗的倒数不小于电感线圈在铁心饱和时的系统感抗时,系统不会发生铁磁谐振,所以可以在电感回路中串接电感元件避免谐振,但这样降低了系统负载的功率因数,不可取;此外投入事先规定的某些线路或设备,改变线路参数中  $C$  与  $L$  的配合,消除铁磁谐振。

#### (3) 系统中性点改为消弧线圈接地

众所周知,铁磁谐振过电压产生最根本的原因是电源中性点对地绝缘和电压互感器一次绕组中性点直接接地。因此,如将电源中性点改为经接地变压器、消弧线圈接地方式,该系统零序回路的电感参数将主要由接地变压器、消弧线圈的零序阻抗决定。而零序阻抗远小于 TV 的励磁阻抗,相对地稳住了系统中性点电位,即使 TV 励磁阻抗发生突变,也不会出现铁磁谐振。

(4) 在电压互感器开口三角端子上或在一次线圈中性点上接入适当阻尼电阻这种方法是消除铁磁谐振最简单最有效的措施,这种办法在工业化应用方面得到了很大的发展,其方法多种多样,具体有以下几种。

#### ① TV 中性点经消谐器和小电阻接地

中性点串入的电阻等价于每相对地接入电阻,能够起到消耗能量、阻尼和抑制谐波的作用。在线路单相接地时,由于中性点对地带有一定电位,故能相应减少非故障相 TV 绕组的电压,使 TV 的饱和程度降低,不至于发生铁磁谐振。但是电阻的接入使 TV 开口三角绕组输出电压相应降低,会影响接地指示装置的灵敏性。除了要考虑  $R \geq 6\% X$  (TV 阻抗)外,还要考虑电阻的热容量。当直接采用线性电阻时,往往由于电阻元件的容量及绝缘水平选择不当,使引线烧断,电阻烧毁,沿面闪络等。若采用 RXQ-10 型消谐器,其内部由 SiC 非线性电阻片与线性电阻(6 ~ 7 k $\Omega$ )串接,在低压时呈高阻值,使谐振在初始阶段不易发展起来。在线路出现较长时间单相接地时,消谐器上将出现千余伏电压,电阻下降至稍大于 6 ~ 7 k $\Omega$ ,使其不至于影响接地指示装置的灵

(下转第 86 页)

电电压监测系统,通过对电网监测点分析合理布点,通过 GPRS 传输将 D 类监测装置数据上传到监测系统,同时将调度 OMS 系统和用电信息采集系统数据接入到系统中,实现了各类电压监测点完全监测管控。该系统对数据做进一步挖掘分析处理,实现构建层次分明、拓展性强的电压监测系统,为电网决策人员提供有效数据。

#### 参考文献

- [1] 程浩忠,艾芊.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 林海雪.现代电能质量的基本问题[J].电网技术,2001,25(10):5-12.
- [3] 孙毅,龚钢军.电能质量在线监测系统的设计和实现[J].继电器,2004,32(17):60-63.
- [4] 章作瑛.舟山电网无功补偿技术降损实例分析[J].电气应用,2010,29(1):62-64.
- [5] 张勇军,刘瀚林,朱心铭.地区电网感性无功补偿优化

(上接第 80 页)

敏度,同时非线性电阻片的热容量相当大,可满足放电电流的要求。

②在 TV 开口三角绕组接电阻。由于电阻接在开口三角绕组两端,必然会导致一次侧电流增大,也就是说 TV 的容量要相应增大。从抑制谐波方面考虑  $R$  值越小,效果越显著,但 TV 的过载现象越严重,在谐振或单相接地时间过长时甚至会导致保险丝熔断或 TV 烧毁。一般来说接入 10 kV TV 开口三角绕组的电阻取 16.5 ~ 33  $\Omega$ 。

③TV 中性点串单相 TV。在中性点串单相 TV 这种装置,在线路单相接地时能够使 TV 各相绕组电压均能保持在正常相电压附近而不会饱和,从而很好地抑制铁磁谐振,降低 TV 一次侧电流,同时亦保持了接地指示装置对零序电压幅值和相位的灵敏度。

④在 TV 开口三角绕组并联多功能微机消谐器当发生铁磁谐振时,TV 开口三角出现伴有不同频率成分的零序电压。将该电压输入微机,微机装置根据不同频率、不同电压值,自动识别系统是接地故障还是谐振故障。若为谐振故障则根据不同频率输出脉冲,控制可控硅导通,自动吸收谐振能量,动态消除铁磁谐振。

## 4 总 结

首先阐述了发电机注入式和基波 + 三次谐波定

配置方法[J].电网技术,2011,35(11):141-145.

- [6] 杨玉琴,刘国贤,邱吉福.基于广域网的电压合格率管理信息系统[J].继电器,2006,34(9):57-59.
- [7] 郑圣,丁文俊.基于 GPRS 无线传输的电压合格率检测管理系统的开发和应用[J].浙江电力,2010,29(6):46-48.
- [8] 肖湘宁,韩民晓.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [9] 李辛中,上官帖.开放式电能质量综合监测系统的研究[J].江西电力,2007,31(1):4-6.
- [10] 李鹏,游大海.基于 IEC 61850 的对象模型在电能质量监测 IED 中的应用[J].电力系统通信,2006,27(12):66-70.

作者简介:

何小飞(1986),硕士,工程师,目前从事电压无功管理工作;

王锐(1975),本科,高级工程师,主要从事变电运检管理工作。

(收稿日期:2014-08-06)

子接地保护原理,并根据锦屏电厂实际情况计算出保护范围,再对一次典型的接地故障进行分析,从发电机中性点零序电流和零序电压着手,验证了保护动作的正确性;最后结合故障点位置,计算出接地电阻的阻值,与现场检查时测量值一致,为故障检修提供了依据。

#### 参考文献

- [1] 高国芳.电力系统电压互感器铁磁谐振原因分析及治理措施[J].电工电气,2009(11):40-42.
- [2] 王兵峰,刘俭勤.羊湖电厂 10 kV 系统电压互感器引起的铁磁谐振及消谐方法[J].水力发电,2001(3):11-13.
- [3] 张凯,王建恩,韦宏伟.电力系统铁磁谐振的产生及消除措施[J].中国新技术新产品,2010(13):14.

作者简介:

康娣(1986),本科,助理工程师,从事发电厂自动化系统工作;

蔡显岗(1987),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

季杰(1987),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

黄建琼(1984),硕士,工程师,从事发电厂监控系统工作。

(收稿日期:2014-08-18)

# 基于 GPRS 的电网供电电压监测管理系统应用研究

何小飞<sup>1</sup> 王 锐<sup>1</sup> 叶茂青<sup>2</sup> 杨 华<sup>2</sup>

(1. 国网乐山供电公司 四川 乐山 614000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 针对以往电压监测装置需现场采集数据,电压采集系统功能较单一的情况,构建了基于 GPRS 的电网供电电压监测管理系统。通过 GPRS 传输将终端电压数据上传到采集系统中,并通过与两大系统:调度 OMS 系统以及用电信息采集互联实现电压数据共享,从而使得各类电压数据的全面准确监测,同时该系统还提供了各类分析手段,为技术人员采取提升电压合格率措施提供了有效技术支撑。应用实例准确反映出电网电压合格率状况,通过本系统可以有针对性地改善电网电压从而提高经济效益,从而进一步促进电网电压无功精益化管理。

**关键词:** 电压监测; 电压合格率; GPRS; 精益化管理

**Abstract:** The function of voltage acquisition system is quite single when voltage monitoring device needs collecting the data in the field, so power supply voltage monitoring and management system based on GPRS is established. The terminal voltage data is uploaded to the voltage acquisition system through GPRS transmission, and at the same time through the interconnection between two major systems, that is, the operation management system (OMS) and the electric energy data acquisition system, it realizes the voltage data sharing so as to achieve the comprehensive and accurate monitoring of various voltage data. Meanwhile, the system also provides all kinds of analysis methods for the technical personnel to take measures to improve the voltage qualification rate. The application examples accurately reflect the condition of voltage qualification rate. The proposed system can improve the voltage of power grid with specific purpose so as to increase the economic benefit and to enhance the lean management of voltage and reactive power.

**Key words:** voltage monitoring; voltage qualification rate; GPRS; lean management

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0081-06

## 0 引 言

电压合格率是衡量电能质量的重要指标,电压质量的好坏直接关系到电力系统的安全和经济运行,最大限度提高电压合格率是电力企业向客户提供优质服务的重要体现。根据国家电网公司供电电压监测管理网络建设要求,提出了目前乐山供电的供电电压采集分析系统,该系统可真实反映用户端供电电压合格率的实际情况,同时还能对全网电压合格率进行多角度分析,通过分析得到改进策略,从而提高电压合格率指标。

以往的电压监测装置需要人员到现场采集数据,同时采集系统软件功能软件,只能对前一日(月)各电压合格率进行统计,不具备辅助分析能力。所提出基于 GPRS 的电网供电电压监测系统是

根据国家电网公司全面推广应用的供电电压自动采集系统发展而来,它通过 GPRS 数据传输将终端装置数据采集进入系统进行实时监测,并提供多种方式辅助分析,为技术人员做出相应决策改进供电电压质量提供有效依据。目前该系统在乐山供电公司应用情况良好。

## 1 电压无功管理现状

目前乐山供电公司已建成供电电压采集系统,通过该系统能实现各类电压监测点的监测分析,同时 AVC 系统已经投入运行替代了过去各个变电站的 VQC 装置,实现对所辖变电站的电容器投切及主变压器档位的升降,电压无功管理进一步加强,电压合格率指标得到提升,但目前公司无功电压管理方面仍存在一些不足,主要体现在以下 4 个方面。

(1) 主网变电站中仍存在部分无载调压变压器,电压调整的能力仍然不足。另外部分变电站无功补偿容量配置仍然不足,未遵照《并联电容器设计规范》(GB 50227-2008)要求,设置变电站并联电容器安装容量应占主变压器容量的 10%~30% 的规定。导致高峰时段功率因数不能满足要求。

(2) AVC 系统运行可靠性较差,时常出现运行缺陷,一些变电站没有安装 VQC 装置,基本靠人工判断和投切,不能完全做到及时跟踪和调整。

(3) 无功补偿不能做到完全就地平衡。部分变电站中低压出线功率因数偏低,一是部分配电网台区无功补偿不足,二是部分用户无功配置不足。

(4) 客户需求侧无功设备管理难度较大。用户无功补偿设备普遍存在设备老旧、补偿容量不足、运行维护不当或无补偿设备的情况,这些都有待于进一步加强用电监察等管理力度。

按照相关技术规程规定,电压合格率分为城市综合电压合格率和农网综合电压合格率。城市综合电压合格率主要涵盖城区范围,农网综合电压合格率主要包含直供直管地区农村以及控股代管县公司范围。这里只研究城市综合电压合格率的分析管理。

## 2 供电电压电能质量基本理论

### 2.1 供电电压合格率理论

根据 GB/T 12325-2008《电能质量 供电电压偏差》(以下简称《规程》),电压合格率是指实际运行电压在限值范围内累计运行时间与对应的总运行统计时间的百分比。对于供电电压偏值的限值,《规程》规定有以下 4 点。

① 35 kV 及以上用户电压正、负偏差绝对值之和不超过额定电压的 10%; ② 10 kV 用户的电压允许偏差值,为额定电压的  $\pm 7\%$ ; ③ 380 V 用户的电压允许偏差值,为额定电压的  $\pm 7\%$ ; ④ 220 V 用户的电压允许偏差值,为额定电压的  $+7\% \sim -10\%$ 。

### 2.2 供电电压监测点设置

《规程》中规定电网电压监测分为 A、B、C、D 4 类监测点。对于 4 类监测点,分别定义如下。

(1) A 类监测点: 带供电负荷的变电站 10 kV 母线电压。其中变电站正常运行方式下 10 kV 母线为分段运行,每段母线均设置监测点; 若变电站正常运

行方式下 10 kV 母线为并列运行,只需在一段母线设置监测点。

(2) B 类监测点: 35 kV 及以上专线和 110 kV 及以上非专线用户供电电压。其中 35 kV 及以上专线监测点设置在公用变电站供电母线侧; 110 kV 及以上非专线监测点设置在用户变电站供电母线侧; 用户变电站高压侧无电压互感器,监测点设置在公用变电站母线侧。

(3) C 类监测点: 35 kV 非专线供电和 10 kV 供电用户电压。其中每 10 MW 负荷至少应设一个监测点。负荷的大小为 C 类用户年度售电量与统计小时数之比,监测点应选取高压侧有电压互感器的用户,不考虑设在用户变电站低压侧。

(4) D 类监测点: 380 V/220 V 低压网络和用户端的电压。每百台公用配电变压器至少设两个电压监测点,不足百台的按百台计算,超过百台的按每 50 台设一个电压监测点。监测点应设在有代表性的低压配电网首末两端和部分重要用户。

### 2.3 电网监测点合格率统计

根据《规程》相关规定,各电压监测点电压合格率(统计时间单位为分)为

$$V_i(\%) = \left( 1 - \frac{\text{电压超上限时间} - \text{电压超下限时间}}{\text{电压监测总时间}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

根据国家电网公司相关技术规程规定: 城市综合电压合格率为

$$V_{\text{供}}(\%) = 0.5V_A + 0.5 \left( \frac{V_B + V_C + V_D}{3} \right) \quad (2)$$

式中,  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 、 $V_D$  分别为 A、B、C、D 类电压监测点合格率。

## 3 基于 GPRS 的电压监测系统设计

### 3.1 基于 GPRS 的电压监测装置原理

对于 D 类电压监测点,分别装设带有 GPRS 功能的电压监测装置,目前乐山公司采用的 DT9 系列多功能电压监测统计仪。它利用 GPRS 通讯方式与电压监测管理系统进行通讯。将监测仪各种参数、数据和统计结果以及运行中的信息和告警信息主动上报或者召测上报。该装置具有日(月)监测统计等功能。包括日(月)平均电压值、日(月)总谐波含有率整点值及平均值、日(月)电压合格率; 日(月)

表 1 乐山供电公司部分 D 类电压监测点设备台账

| 序号 | 监测点名称   | 所在地区 | 电压等级  | 通讯方式 | 通讯编码              | SIM 卡号      |
|----|---------|------|-------|------|-------------------|-------------|
| 1  | 发展大厦公配  | 五通   | 220 V | GPRS | 19M00000000004897 | 18381514457 |
| 2  | 佑君街公配   | 五通   | 220 V | GPRS | 19M00000000004918 | 18381514463 |
| 3  | 养路段宿舍公配 | 五通   | 220 V | GPRS | 19M00000000004917 | 18381514464 |
| 4  | 假日广场公配  | 五通   | 220 V | GPRS | 19M00000000004904 | 18381514472 |
| 5  | 沫若高中    | 沙湾   | 220 V | GPRS | 19M00000000004907 | 18381514474 |
| 6  | 供电局     | 沙湾   | 220 V | GPRS | 19M00000000004898 | 18381514484 |
| 7  | 水电局(末)  | 沙湾   | 220 V | GPRS | 19M00000000004908 | 18381514494 |
| 8  | 同发公变 1  | 沙湾   | 220 V | GPRS | 19M00000000004910 | 18381514514 |
| 9  | 局办公大楼   | 城区   | 220 V | GPRS | 19M00000000004906 | 18381514524 |
| 10 | 东进路公变   | 夹江   | 220 V | GPRS | 19M00000000004911 | 18381514554 |

电压超上限/下限累计时间和次数; 日(月)电压超上限率/下限率。

目前乐山供电公司已与某通信公司签订协议, 通过租用一条 GPRS 传输网络线路接入供电电压采集系统, 并为每个监测点办理 1 个传输卡号(类似于手机的 SIM 卡), 每个点以自己的通讯编码将数据通过 GPRS 传输线路上传到服务器, 然后进入供电电压采集系统供技术人员监测分析。

公司根据实际在部分重要的监测点设置了 28 只 D 类电压监测装置, 布点在中市区、峨眉山市、五通、沙湾、夹江、井研等 6 区县。表 1 为部分 D 类监测点台账。

3.2 系统设计思路

根据自动采集系统设计要求, A 类电压监测点数据全部由省级调度管理系统(OMS)数据接入。系统提供各监测点实际运行电压值, 以及电压监测统计数据; 最小采集频度不能大于 1 min。B、C 类电压监测点与用电信息采集系统做接口, 将对应的 B、C 类监测点电压数据(用电信息采集系统提供的每 15 min 冻结的实际电压值)接入供电电压自动采集系统, 作为数据展示。供电电压自动采集系统如图 1 所示。

根据图 1 所示, D 类电压监测装置采集各现场终端的实时统计数据, 通过 GPRS 传输数据至服务器, 数据库服务器对这些数据进行分析, 同时 A、B 类和 C 类电压监测点数据分别通过调度 OMS 系统和营销用电信息采集系统直接传输至供电电压采集系统中, 用户只要在任何一台内网电脑即可查看电压合格率管理各类信息。

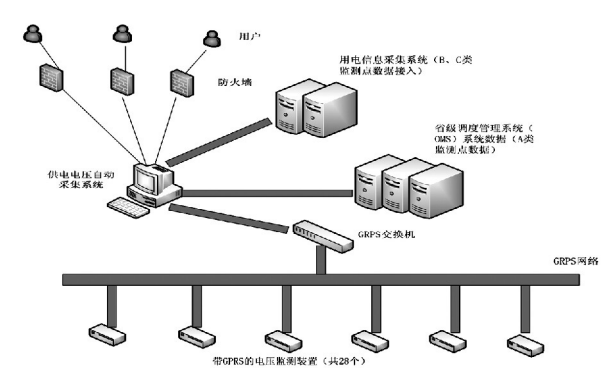


图 1 供电电压自动采集分析系统设计图

3.3 软件设计思路

供电电压自动采集系统是生产管理信息系统(以下简称 PMS)的重要组成部分, 功能与 PMS 系统融为一体。系统功能以供电电压管理为核心, 涵盖电压监测点管理、电压数据管理、告警事件管理、报表管理以及可视化展示等业务内容。通过采集、统计与分析功能, 具有实用化应用场景和分析功能。在供电电压自动采集系统建设基础上, 充分考虑后续电能质量接入、无功电压管理等方面的应用需求, 系统功能应操作便捷、界面友好, 符合各级用户使用习惯。

供电电压采集系统界面如图 2 所示, 系统主要功能主要包括以下 3 点。

(1) 电压数据监测。每 5 min 间隔电压监测数据; 前一日(月)合格率统计数据: 合格率、超上限率、超下限率、统计时间、超上限时间、超下限时间、合格时间; 前一日(月)极值统计数据: 最大值、最小值、平均值、最大值发生时间、最小值发生时间。

(2) 装置/测点基本属性查看: 包括所属单位、监测点名称、监测点电压、监测点类别、装置厂家、装



图 2 供电电压自动采集系统界面

置型号、通信方式、投运日期、安装地点等。装置/测点参数信息: 通信参数有主站 IP 地址和端口有主站电话号码和短信中心号码、默认网关地址、无线通讯 APN、装置地址码等以及 SIM 卡号。

(3) 事件告警: 电压越限告警事件包括越上限开始时间、越上限结束时间、越下限开始时间、越下限结束时间、越上限值; 电压装置停电、上电事件包括装置停电时间、装置上电时间。

## 4 实例分析

目前乐山公司共有 A 类监测点 14 个、B 类监测点 23 个、C 类监测点 22 个、D 类监测点 28 个, 公司采用的 D 类电压监测仪于 2013 年 8 月份安装并投入运行, 目前运行良好。

下面对乐山地区 2014 年 1 月份的各电压监测点进行分析, 通过分析日报表抽取其中电压合格率波动相对大的 4 个点进行分析, 如图 3 所示。

如图 3 所示: 在金盛广场监测点, 在 1 月 4 日发生小波动, 当日电压合格率为 93.959%, 在 1 月 7 日发生一次较大波动, 当日电压合格率为 81.875%, 随后在 1 月 10 日, 电压合格率为 84.445%, 在 1 月 17 日, 电压合格率降低为当月最低点 60.00% (以上数据均为越上限时间)。

在玉皇小区监测点, 1 月 14 日, 电压越下限, 当日合格率为 67.279%, 随后在 15、16、17 日连续 3 天电压合格率都偏低 (低于 80%), 其他两个监测点 (嘉州花城、东进路公变) 分析同理。

D 类监测点设置在 220 V 低压侧, 与居民用户

用电质量相关联, 因此应引起高度重视。根据式 (2) 得知, 城市综合电压合格率通过 4 类监测点加权计算得到, 因此做好电压合格率分析工作, 需要对各类指标逐一分析, 可通过该系统软件得到 4 类监测点的电压值分析, 如图 4 所示。

如图 4 所示, 在各类监测中, B、C 类监测点相对稳定, 当月两类电压合格率为 99.95% 和 99.96%, D 类监测点波动最大, 先后在 1 月 2、7、10、14~17、21~16 日期间出现较大波动。当日电压合格率为 99.21%。A 类电压监测点在 1 月 2、14~17、20~22 日期间波动较大。

事实上, 本月城市综合电压合格率为 99.26%, 其中 A 类监测点合格率为 98.25%, B 类监测点合格率为 99.21%, C 类监测点的合格率为 99.24%, D 类监测点的合格率为 91.23%。

通过对 2014 年 1 月份的电压合格率分析发现, A、D 类电压合格率偏低, 分析发现 A 类电压监测点中, 110 kV 黄土站、井研站 10 kV 母线越上限时间较长, 经与调度部门联系得知是由于 AVC 系统控制中在分片区内存在一定异常, 造成 10 kV 母线电压偏高。而在 D 类监测点中, 图 2 中分析的 4 个点 (嘉州花城、金盛广场、玉皇小区、东进路公变) 是造成 D 类电压合格率偏低的主要原因。经现场检查发现金嘉州花城主要是此台区居民用户三相负荷不均, 使电压波动较大; 而玉皇小区是居住大量外来务工人员, 由于春节将至, 外来人员已返乡, 造成负荷偏高; 金盛广场和东进路公变主要集中了商业用电负荷, 晚上商户停业后负荷均将为较低, 造成电压越上限。

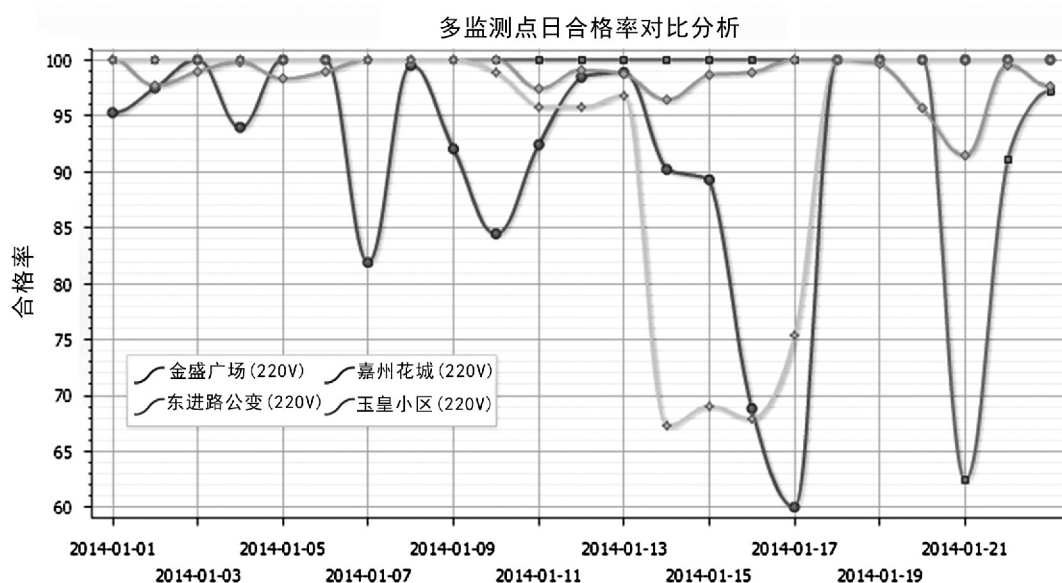


图 3 2014 年 1 月部分监测点对比分析

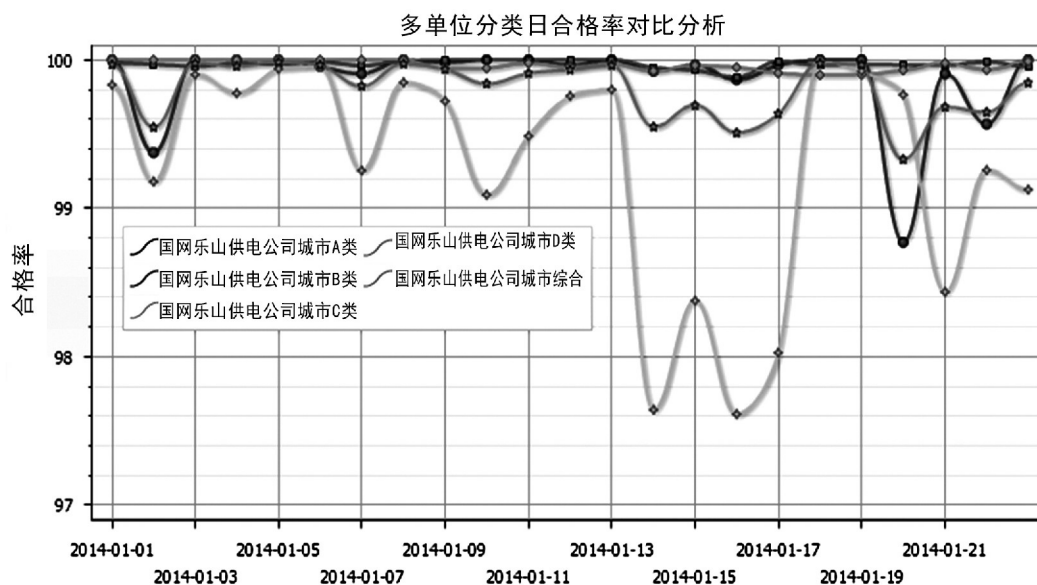


图 4 2014 年 1 月各类监测点对比分析

## 5 提高电压合格率措施

基于 GPRS 的电压监测管理系统的应用,能够实现电压合格率管理工作精益化,借助该系统提出提升各类监测点的举措。

(1) 对于 A 类监测点,开展无功优化,合理选择主变压器调压档位,及时下达变压器档位更改定值,满足系统运行方式变化的需要。已建成 AVC 系统的地区电网,不断提高覆盖面,在具备条件时,接入省公司 AVC 系统,实现全网的无功优化运行,充分发挥设备的技术优势,保证电压质量。

(2) 对于 B、C 类电压监测点,若是电源点母线电压不合格,应对母线电压进行优化;如果是线径

过小,应加大线路线径;线路过长,应选择合适的线路通道,储备技改项目;如果用户负荷重载及过载,应加强用户负荷管理。

(3) 对于 D 类监测点,加强配电变压器管理,对低压台区无功补偿装置加强巡视检查,对不满足自动投切无功补偿的进行整改;尽可能做到三相负荷平衡,减少电压偏移;定期检查维护配电变压器接地电阻,防止接触不良或接地电阻过大引起电压偏移,加强配电网无功规划,增加台区布点,减小供电半径。

## 6 结 论

结合乐山电网实际构建出基于 GPRS 的电网供

电电压监测系统,通过对电网监测点分析合理布点,通过 GPRS 传输将 D 类监测装置数据上传到监测系统,同时将调度 OMS 系统和用电信息采集系统数据接入到系统中,实现了各类电压监测点完全监测管控。该系统对数据做进一步挖掘分析处理,实现构建层次分明、拓展性强的电压监测系统,为电网决策人员提供有效数据。

#### 参考文献

- [1] 程浩忠,艾芊.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 林海雪.现代电能质量的基本问题[J].电网技术,2001,25(10):5-12.
- [3] 孙毅,龚钢军.电能质量在线监测系统的设计和实现[J].继电器,2004,32(17):60-63.
- [4] 章作瑛.舟山电网无功补偿技术降损实例分析[J].电气应用,2010,29(1):62-64.
- [5] 张勇军,刘瀚林,朱心铭.地区电网感性无功补偿优化

(上接第 80 页)

敏度,同时非线性电阻片的热容量相当大,可满足放电电流的要求。

②在 TV 开口三角绕组接电阻。由于电阻接在开口三角绕组两端,必然会导致一次侧电流增大,也就是说 TV 的容量要相应增大。从抑制谐波方面考虑,  $R$  值越小,效果越显著,但 TV 的过载现象越严重,在谐振或单相接地时间过长时甚至会导致保险丝熔断或 TV 烧毁。一般来说接入 10 kV TV 开口三角绕组的电阻取 16.5 ~ 33  $\Omega$ 。

③TV 中性点串单相 TV。在中性点串单相 TV 这种装置,在线路单相接地时能够使 TV 各相绕组电压均能保持在正常相电压附近而不会饱和,从而很好地抑制铁磁谐振,降低 TV 一次侧电流,同时亦保持了接地指示装置对零序电压幅值和相位的灵敏度。

④在 TV 开口三角绕组并联多功能微机消谐器,当发生铁磁谐振时,TV 开口三角出现伴有不同频率成分的零序电压。将该电压输入微机,微机装置根据不同频率、不同电压值,自动识别系统是接地故障还是谐振故障。若为谐振故障则根据不同频率输出脉冲,控制可控硅导通,自动吸收谐振能量,动态消除铁磁谐振。

## 4 总 结

首先阐述了发电机注入式和基波 + 三次谐波定

配置方法[J].电网技术,2011,35(11):141-145.

- [6] 杨玉琴,刘国贤,邱吉福.基于广域网的电压合格率管理信息系统[J].继电器,2006,34(9):57-59.
- [7] 郑圣,丁文俊.基于 GPRS 无线传输的电压合格率检测管理系统的开发和应用[J].浙江电力,2010,29(6):46-48.
- [8] 肖湘宁,韩民晓.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [9] 李辛中,上官帖.开放式电能质量综合监测系统的研究[J].江西电力,2007,31(1):4-6.
- [10] 李鹏,游大海.基于 IEC 61850 的对象模型在电能质量监测 IED 中的应用[J].电力系统通信,2006,27(12):66-70.

作者简介:

何小飞(1986),硕士,工程师,目前从事电压无功管理工作;

王 锐(1975),本科,高级工程师,主要从事变电运检管理工作。

(收稿日期:2014-08-06)

子接地保护原理,并根据锦屏电厂实际情况计算出保护范围,再对一次典型的接地故障进行分析,从发电机中性点零序电流和零序电压着手,验证了保护动作的正确性;最后结合故障点位置,计算出接地电阻的阻值,与现场检查时测量值一致,为故障检修提供了依据。

#### 参考文献

- [1] 高国芳.电力系统电压互感器铁磁谐振原因分析及治理措施[J].电工电气,2009(11):40-42.
- [2] 王兵峰,刘俭勤.羊湖电厂 10 kV 系统电压互感器引起的铁磁谐振及消谐方法[J].水力发电,2001(3):11-13.
- [3] 张凯,王建恩,韦宏伟.电力系统铁磁谐振的产生及消除措施[J].中国新技术新产品,2010(13):14.

作者简介:

康 娣(1986),本科,助理工程师,从事发电厂自动化系统工作;

蔡显岗(1987),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

季 杰(1987),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

黄建琼(1984),硕士,工程师,从事发电厂监控系统工作。

(收稿日期:2014-08-18)

# 基于改进引力搜索算法的配电网多目标优化重构

谭守国

( 国网巴中供电公司 ,四川 巴中 636600)

**摘 要:** 在含分布式电源( distributed generation ,DG) 的配电网重构中 ,综合考虑网络经济性、电能质量以及供电可靠性等因素 ,通过基于模糊满意度的多目标处理方法将多目标函数进行归一化处理 ,将精英策略思想引入到万有引力搜索算法中 ,并采用此改进引力搜索算法对问题进行求解。以 IEEE 33 标准节点系统为例进行网络重构 ,仿真结果表明 ,多目标重构后系统的网损有较大的降低 ,同时节点电压质量和供电可靠性也得到提高 ,从而验证了所提算法的有效性和可行性。对比其他算法 ,所提算法有效避免了结果陷入局部最优解 ,提高了算法的稳定性且具有较强的寻优性能。

**关键词:** 分布式电源( DG) ; 配电网重构; 改进引力搜索算法; 模糊满意度

**Abstract:** In the distribution network reconfiguration with distributed generation ( DG) , the network economy , power quality and reliability of electricity supply are comprehensively considered. The multi - objective function is normalized based on fuzzy satisfying method , and the elite strategy is introduced to the idea of universal gravitation search algorithm. This improved gravitation search algorithm is used to solve the issues effectively , avoiding the results into local optimal solution to improve the stability of the algorithm. In IEEE 33 standard bus system for network reconfiguration , the simulation results show that the loss of system is greatly reduced after the reconfiguration of multi - objective network system , while the node voltage quality and supply reliability are also improved , which verifies the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm. Compared with other algorithms , the proposed algorithm has the strong performance optimization.

**Key words:** distributed generation ( DG) ; distribution network reconfiguration; improved gravitation search algorithm; fuzzy satisfying method

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954( 2014) 06 - 0087 - 04

## 0 引 言

配电网重构( distribution network reconfiguration , DNR) 是配电网重要的优化手段之一 ,其研究的本质即通过改变网络的拓扑结构同时满足一定的约束条件确定开关的开闭状态 ,以使得系统的某一指标或多个指标达到最优。

目前 ,关于配电网重构问题的研究主要集中在: ①传统数学优化算法<sup>[1-2]</sup>; ②启发式方法 ,即最优流模式法<sup>[3]</sup>、支路交换法<sup>[4]</sup>; ③人工智能算法<sup>[5-7]</sup> ,包括和声搜索算法、遗传算法、粒子群算法等。以上研究多以单目标作为配电网重构优化目标。此外 ,分布式电源( distributed generation , DG) 凭借其发电灵活、环境友好等特点 ,引起了人们广泛关注。当分布式电源接入配电网 ,系统的潮流将会

发生变化 ,其电压水平、可靠性、辐射状结构也会受到一定程度的影响。

但目前研究计及 DG 的配电网重构的文献相对较少。文献[8]研究了故障条件下含 DG 的配电网重构 ,并分析了加入 DG 前后对配电网电压和网损的影响; 文献[9]将 DG 作为可调度设备 ,以配电网的网损和电压偏差最小作为目标函数 ,并采用简单加权求和法将多目标优化问题转化为单目标优化问题求解; 文献[10]采用 Tabu 搜索方法对含有可调度 DG 的配电网进行重构从而实现降损; 文献[11]考虑多种 DG 的影响 ,以网损最小为优化目标 ,运用邻域搜索免疫算法 ,有效克服了免疫算法在迭代末期局部搜索能力差的弊端; 文献[12]以配电网网损最小为目标函数 ,将 DG 处理为 PQ、PV 两种模型 ,通过对配电网拓扑结构和佳点集的研究 ,提出一种基于佳点集的改进蜜蜂进化型遗传算法 ,算法在全

局寻优能力和收敛速度上表现出色。

上述文献或为单目标,或通过简单处理将双目标转化为单目标对问题进行求解;优化目标也大多只考虑了网络的经济性和电能质量,或只是其中之一。因此,在配电网中接入分布式电源后,构建兼顾网络经济性、电能质量以及供电量可靠性的多目标重构模型,并采用基于模糊满意度的多目标处理方法将多目标函数进行归一化处理,通过改进引力搜索算法对问题进行求解。最后,通过标准的 IEEE 33 节点系统对所提模型进行校验。

## 1 多目标配电网重构模型

### 1.1 目标函数

将构建兼顾网络经济性、电能质量以及供电量不足率的多目标重构模型,于是配电网重构的目标函数含网络有功损耗、节点电压偏移量以及供电不足率(energy not supplied, ENS)三方面内容,如下。

目标 1: 有功损耗最小为目标函数,即

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^L R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

式中,  $F_1$  表示网络中总的有功损耗;  $L$  为线路总数;  $R_i$  表示支路  $i$  的电阻值;  $U_i$  表示支路  $i$  末节点的节点电压;  $P_i$  表示支路  $i$  末端流过的有功功率;  $Q_i$  表示支路  $i$  末端流过的无功功率。

目标 2: 节点电压偏移量最小为目标

节点电压相对于额定电压偏差的大小,表示着节点电压质量的好坏。因此,在配电网中引入节点电压偏移量指标,电压偏移量越小,电压质量就越好,配电网也越稳定,其表达式可表示为

$$F_2 = \min \sum_i^N \left( \frac{V_i - V_N}{V_N} \right)^2 \quad (2)$$

式中,  $F_2$  表示网络中总的节点电压偏移量;  $N$  为配电网节点数;  $V_i$  为节点  $i$  的实际电压值;  $V_N$  为节点  $i$  的额定电压值。

目标 3: ENS 最小为目标

因电网停电导致用户的总电量缺少可表示为供电不足率,可作为可靠性目标函数。其数学表达式可表示为

$$F_3 = \min \sum_i^N Ls_i Lf_i(T) \quad (3)$$

式中,  $F_3$  表示总电量亏损;  $N$  为配电网节点数;  $T$  为系统中隔离开关的状态;  $Ls_i$  表示为节点  $i$  的年停运

行时间;  $Lf_i$  表示为节点  $i$  的年平均负荷。

### 1.2 约束条件

含分布式电源的网络重构必须满足以下约束条件。

#### (1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $P_i$ 、 $Q_i$  分别是节点  $i$  注入的有功功率、无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  为节点  $i$ 、 $j$  处的电压幅值。

#### (2) 节点电压约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (5)$$

式中,  $U_i$ 、 $U_{i \min}$ 、 $U_{i \max}$  分别为节点  $i$  的电压及该节点电压的上下限。

#### (3) 支路容量约束

$$S_{(i,j+1)} \leq S_{(i,j+1) \max} \quad (6)$$

式中,  $S_{(i,j+1)}$  为节点  $i$ 、 $i+1$  之间线路传输功率;  $S_{(i,j+1) \max}$  为节点  $i$ 、 $i+1$  之间线路传输功率的最大值。

#### (4) 开关操作次数限制

$$0 \leq OPT \leq OPT_{\max} \quad (7)$$

式中,  $OPT$  是总的开关操作次数;  $OPT_{\max}$  表示最大的开关操作次数。

#### (5) DG 注入功率约束

$$M_i \leq M_{i \max} \quad (8)$$

式中,  $M_i$  为节点  $i$  处分布式电源的注入功率;  $M_{i \max}$  为节点  $i$  处分布式电源的最大安装容量。

#### (6) 网络拓扑约束

配电网的结构通常是闭环设计、开环运行,故在网络重构前后,系统均不存在环路、孤岛以及独立节点。

## 2 基于模糊满意度的多目标处理方法

由于前面提出的 3 个目标函数彼此在不同的范围内,没有统一的量纲,并且目标函数相互作用,它们之间还可能发生冲突,因此,提出一种基于模糊满意度的多目标决策方法,将所提及的 3 个目标函数综合考虑,进行归一化处理。

多目标配电网重构模型中的 3 个目标均是越小越优型目标,目标隶属度函数可统一用如图 1 所示的递减连续函数表示。

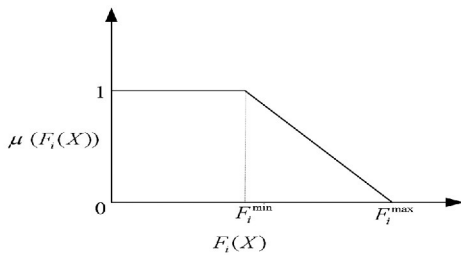


图 1 目标隶属度函数

其数学表达式表示为

$$\mu(F_i(X)) = \begin{cases} 1 & F_i(X) \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i(X)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & F_i^{\min} \leq F_i(X) \leq F_i^{\max} \\ 0 & F_i(X) \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\mu(F_i(X))$  为目标函数  $F_i(X)$  对应的隶属度;  $X$  为决策向量;  $F_i^{\max}$  和  $F_i^{\min}$  分别为目标  $F_i(X)$  的上限和下限;  $i$  为目标的编号  $i=1, 2, 3$ ; 当  $\mu(F_i(X))=1$  时, 表示决策者对  $F_i(X)$  完全满意; 当  $\mu(F_i(X))=0$  时, 则表示决策者完全不满意。

为了把多目标问题进行归一化处理, 决策者需先对各目标设定一个期望达到的隶属度水平  $\mu_{ip}$ , 亦称为参考隶属度值, 然后将各目标函数的隶属度值与参考隶属度值之差的最大绝对值最小作为优化准则, 就可把多目标问题转化为单目标问题进行求解, 其目标函数如式(10)所示。

$$\min \{ \max |\mu_{ip} - \mu(F_i(X))| \} \quad p=1, 2, 3 \quad (10)$$

这里采用改进万有引力搜索算法对此单目标问题求解, 问题求解过程中, 决策者可先判断所求出解的满意性, 如果决策者对当前解不满意, 则可通过重新设定参考隶属度值, 进行再次求解, 直到决策者认为找到满意解为止。

### 3 改进万有引力搜索算法

#### 3.1 万有引力搜索算法

万有引力搜索算法(gravitation search algorithm, GSA)由 Esmat Rashedi 等在文献[13-15]中所提出, 该算法源于对物理学中的万有引力进行模拟而产生的群体智能算法。GSA 中的搜索粒子是在空间运行的物体, 通过万有引力的作用相互吸引。因为万有引力的存在, 使得较小的物体会朝着质量最大的物体移动, 而质量最大的物体则占据了整个搜索空间的最优位置, 通过不断的移动, 即可以求出优

化问题的最优解。

假设某一  $D$  维搜索空间包含  $N$  个物体, 定义第  $i$  个物体的位置为

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D); i=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中  $x_i^k$  表示第  $i$  个物体在第  $k$  维上的位置。在某一时刻, 物体  $j$  对物体  $i$  的万有引力如下所示。

$$F_{ij}^k(t) = G(t) \cdot \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \alpha} [x_j^k(t) - x_i^k(t)] \quad (12)$$

$$G(t) = G_0 \times e^{-\frac{\beta \cdot t}{T}} \quad (13)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t) - X_j(t)\|_2 \quad (14)$$

式中  $\alpha$  表示一个较小的常数;  $M_{aj}(t)$  表示作用物体  $j$  的惯性质量;  $M_{ai}(t)$  表示作用物体  $i$  的惯性质量;  $R_{ij}(t)$  表示物体  $i$  与  $j$  之间的欧氏距离;  $G(t)$  表示  $t$  时刻万有引力常数;  $G_0$  表示宇宙在初始时刻的万有引力常数, 通常为 100;  $\beta$  等于 20;  $T$  为最大迭代次数。

在万有引力算法中,  $t$  时刻在第  $k$  维上作用在第  $i$  个物体上的总作用力  $F_i^k(t)$  等于其他左右物体对它的作用力之和, 计算方法如式(15)所示。

$$F_i^k(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rank}_j \cdot F_{ij}^k(t) \quad (15)$$

式中  $\text{rank}_j$  表示  $[0, 1]$  之间的一个随机数;  $F_{ij}^k(t)$  表示  $k$  维空间上第  $j$  个物体作用在第  $i$  个物体上的万有引力, 根据牛顿第二定律,  $t$  时刻物体  $i$  在第  $k$  维上的加速度如式(16)所示。

$$a_i^k(t) = \frac{F_i^k(t)}{M_i(t)} \quad (16)$$

通过以上分析, 可得 GSA 在每一次迭代运算过程中, 可以利用下式进行物体速度和位置的更新, 即

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = \text{rank}_i \times v_i^k(t) + a_i^k(t) \\ x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \end{cases} \quad (17)$$

物体的惯性质量依据其适应度值的大小来计算, 惯性质量越大表明它越接近最优值, 同时意味着该物体的吸引力越大, 但其移动速度却越慢。假设引力质量与惯性质量相等, 物体的质量可以通过适当的运算规则去更新, 更新算法如下所示。

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} \quad (18)$$

$$m_i(t) = \frac{\text{Fit}_i(t) - \text{Worst}(t)}{\text{Best}(t) - \text{Worst}(t)} \quad (19)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (20)$$

式中  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $Fit_i(t)$  表示第  $i$  个物体在  $t$  时刻的适应度值。对求解最小值问题,  $Best(t)$  为所有  $Fit_i(t)$  的最小值,  $Worst(t)$  为所有  $Fit_i(t)$  的最大值。

3.2 改进引力搜索算法

在基本万有引力算法中,为使算法避免陷入局部最优解,这里将文献[16]的精英策略思想引入到优化过程中。首先,将新解与原来的解组合并按照适应度大小排序,划分出前 20% 和后 20% 的解,为了提高搜索过程中解的质量,改进的万有引力算法只允许排名前 20% 的解按照以下方法产生新解,并替代排名靠后的 20% 的解,而中间的解则保持不变。

假设  $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)$  为前 20% 可以产生新解的物体所处的位置,他们产生的新解可以用  $X_{i\_new}$  表示,产生新解的规则可以通过定义一个新的因子  $P$  描述,如下所示。

$$P = \frac{R_{i\_star} \times rand(-0.5, 0.5)}{D} \tag{21}$$

$$X_{i\_new} = X_i \times P \tag{22}$$

$$X_{i\_worst} = X_{i\_new} \tag{23}$$

式中  $R_{i\_star}$  表示最优解与距离最优解最近的解之间的欧氏距离;  $rand(-0.5, 0.5)$  为一个  $[-0.5, 0.5]$  范围内的随机数;  $D$  为搜索空间的维数;  $X_{i\_worst}$  为被替代的后 20% 的解向量。

4 算例分析

利用 Matlab7.0 平台对改进万有引力搜索算法求解配电网重构问题进行编程,并在 IEEE 33 节点系统进行仿真测试。IEEE 33 节点配电网系统的额定电压为 12.66 kV,系统负荷为 3 715 kW + j2300 kvar,包含 37 条支路、5 个联络开关;假设在 6、12、16、31 号节点接入分布式电源 DG,其容量均为 500 kW,如图 2 所示。

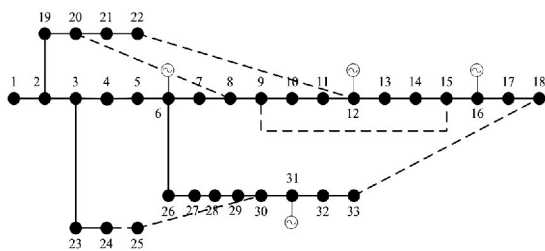


图 2 IEEE 33 节点配电网系统  
改进万有引力搜索算法的参数设置如表 1 所

示。表 2 分别只考虑网损、电压、ENS 指标单一目标进行重构,加入 DG 后,DG 的出力均未做优化,所有 DG 均设定为满发,即为 500 kW。表 3 则表示综合考虑网损、电压、ENS 指标以及 DG 优化出力之后系统的优化运行结果。

表 1 算法参数的设置

| 种群  | 最大迭代次数 | $K$ | $G_0$ | $\beta$ |
|-----|--------|-----|-------|---------|
| 100 | 200    | 100 | 100   | 20      |

表 2 重构前后结果对比

|                                 | 配电系统无 DG                        |                               | 配电系统含 DG                        |                               |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
|                                 | 重构前                             | 重构后                           | 重构前                             | 重构后                           |
| 开关组合                            | 7-20, 8-14, 11-21, 17-32, 24-28 | 6-7, 8-9, 13-14, 31-32, 24-28 | 7-20, 8-14, 11-21, 17-32, 24-28 | 6-7, 8-9, 13-14, 29-30, 24-28 |
| 网损/kW                           | 202.68                          | 139.53                        | 87.2                            | 68.42                         |
| ENS/<br>(kWh·yr <sup>-1</sup> ) | 70 312.56                       | 53 299.34                     | 47 632.13                       | 29 657.71                     |
| 最低点电压<br>/p. u.                 | 0.913 1                         | 0.934 2                       | 0.959 9                         | 0.973 3                       |

表 3 多目标优化后各指标的最优解

| 开关状态             | DG 输出<br>/kW                                                             | 网损<br>/kW | ENS/<br>(kWh·yr <sup>-1</sup> ) | 最低点<br>电压<br>/p. u. |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------|
| 优<br>化<br>结<br>果 | 6-7, 7-8, 31-32, 8-14, 24-28<br>DG1=500<br>DG2=400<br>DG3=500<br>DG4=500 | 81.39     | 32 851.91                       | 0.971 2             |

将所提的改进型万有引力搜索算法同文献[2]、遗传算法及粒子群算法分别对配电系统以网损最小为目标进行优化对比,对比结果如表 4 所示。

从表 4 可知,算法相较于其他优化算法具有更强的寻优能力,能够找到最优解。说明所提的改进万有引力搜索算法在解决配电网重构问题时具有良好的全局寻优能力。

表 4 不同算法寻优性能对比

| 求解算法  | 开关状态                            | 网/kW   |
|-------|---------------------------------|--------|
| 文献[2] | 6-7, 9-10, 13-14, 31-32, 24-28  | 140.26 |
| GA    | 6-7, 8-9, 29-30, 8-14, 24-28    | 140.28 |
| PSO   | 6-7, 18-19, 13-14, 29-30, 24-28 | 139.98 |
| 所提算法  | 6-7, 8-9, 13-14, 31-32, 24-28   | 139.53 |

(下转第 94 页)

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| ..... 张福州 江 波(31)                |             |
| 电流互感器移动检定实验室的研制                  |             |
| ..... 史 强 焦 阳 艾 兵(36)            |             |
| 低压电流互感器一体式自动检定系统                 |             |
| ..... 侯兴哲 冯 凌 魏 东(40)            |             |
| 电子式电压互感器现场检测新型升压方法               |             |
| ..... 贺 强 艾 兵 黄嘉鹏(44)            |             |
| 互感器现场测试仪与传统测差法的比较与分析             |             |
| ..... 谭炳源 蒋 卫 何 娜 张福州(49)        |             |
| 电子式互感器校验方式的比较                    |             |
| ..... 张 翔 江 波 陈贤顺(54)            |             |
| 基于 IEC 61850-8-1 协议的数字化电能计量系统通信协 |             |
| 议的研究与实现 .....                    | 牛三草 吴君明(56) |
| 基于有限元仿真的 EVT 电场影响误差分析            |             |

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| ..... 罗睿希 艾 兵 江 波(61) |         |
| 电压互感器的铁磁谐振过电压分析       |         |
| ..... 何 娜 艾 兵 蒋 卫(66) |         |
| 智能电能表运行故障分析与处理        |         |
| ..... 周 泳 李启明 周 敏(70) |         |
| 数字电能计量的误差来源探讨         |         |
| ..... 唐 毅 江 波 陈贤顺(76) |         |
| 智能变电站整站计量溯源技术研究       |         |
| ..... 吴章宪 魏 鹏(80)     |         |
| 新型高压电能表原理及应用 .....    | 刘娅丽(84) |
| 单相智能电表故障分析 .....      | 孔 翼(87) |
| 关于对用电信息采集系统拓展应用的思考    |         |
| ..... 穆雅玲(91)         |         |
| 《四川电力技术》投稿需知 .....    | (35)    |

(上接第 90 页)

## 5 结 语

配电网重构是一个多目标优化问题,所提出的改进的万有引力搜索算法在重构过程中考虑了系统有功损耗、节点电压偏移量以及 ENS,并利用基于模糊满意度的多目标决策方法对多目标进行处理,使其转化为单目标函数,通过改进引力搜索算法对问题进行求解,多目标重构后系统的网损有较大的降低,同时节点电压质量和供电可靠性也得到提高,验证了模型和算法的有效性。

### 参考文献

- [1] 于永哲,黄家栋. 基于改进模拟植物生长法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):40-43.
- [2] Shirmohammadi D, Hong HW. Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Loss Reduction[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1989,4(2):1492-8.
- [3] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术,1995,19(7):47-50.
- [4] 何禹清,彭建春,文明,等. 配电网重构的最小可行分析对象及其快速算法[J]. 中国电机工程学报,2011(31):50-56.
- [5] 陈春,汪峰,刘蓓,等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
- [6] 麻秀范,张粒子. 基于十进制编码的配电网重构遗传算法[J]. 电工技术学报,2004,19(10):65-69.
- [7] Abdelaziz A Y, Mohammed F M, Mekhamer S F, et al. Distribution Systems Reconfiguration Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Electric Pow-

- er Systems Research, 2009,79(12):1521-1530.
- [8] Yasin Z M, Rahman T K A. Influence of Distributed Generation on Distribution Network Performance during Network Reconfiguration for Service Restoration[C]//Power and Energy Conference, IEEE International, 2006:566-570.
- [9] 赵晶晶,李新,彭怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术,2009,33(17):162-166.
- [10] Rugthaicharoencheep N, Sirisumrannukul S. Feeder Reconfiguration with Dispatchable Distributed Generators in Distribution System by Tabu Search[C]//Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, IEEE, 2009:1-5.
- [11] 刘畅,黄民翔. 含多种分布式电源的配电网重构优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):13-18.
- [12] 王超学,吕志奇,董慧,等. 基于改进蜜蜂进化型遗传算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):52-56.
- [13] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: A Gravitational Search Algorithm[J]. Information Sciences, 2009,179(13):2232-2248.
- [14] 张维平,任雪飞,李国强,等. 改进的万有引力搜索算法在函数优化中的应用[J]. 计算机应用,2013,33(5):1317-1320.
- [15] 李春龙,戴娟,潘丰. 引力搜索算法中粒子记忆性改进的研究[J]. 计算机应用,2012,32(10):2732-2735.
- [16] 杨磊,于舒娟. 基于精英策略的逆向蚁群优化盲检测算法[J]. 计算机技术与发展,2012,20(12):1673-629.

作者简介:

谭守国(1965),工程师,本科,从事电力营销及配网相关的工作。

(收稿日期:2014-09-11)

## 2014 年《四川电力技术》总目录

### 第 1 期

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 基于电压下降方式的 VSC – MTDC 控制方式研究     | 伍 欣 李兴源(1)                     |
| 基于小波去噪和随机子空间算法的广域低频振荡估计         | 刘 畅 李长松 李华强 许海青(5)             |
| 不同控制方式对交直流系统潮流计算的影响             | 陶奕杉 闫广新(10)                    |
| 电力系统运行动态监视的可视化设计与实现             | 王 波 杨洪耕(13)                    |
| 实时电力调度系统的分析及应用                  | 银涛 王彦沣 张宏图 张弛 吴璇 胡翔 张勤勤 蒋科(19) |
| 四川电力信息安全集中监测分析平台研究与应用           | 刘姝梅 柴继文(23)                    |
| 基于节点脆弱性的电力系统抗毁性分析               | 李艳卿 李华强 李 迁 黄昭蒙(26)            |
| 基于 $L$ 指标节点无功注入量快速确定方法研究        | 王 涛 龚 雪 邓亚文(29)                |
| 面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识研究             | 陈科屹 阮 征 何 强 贺静波(33)            |
| 空载轻载新设备启动送电继电保护向量测试的思考          | 梁 静 冯小萍 常喜强 肖 雪 印 欣(39)        |
| 浅谈 500 kV 液压机构断路器控制回路对自适应重合闸的影响 | 李利红 尧 广 杨晓涛(43)                |
| 110 kV 备用电源自动投切装置自适应模型研究        | 张大伟 彭 海 刘 宇(47)                |
| 变电站继电保护装置状态检修实际应用研究             | 何小飞 王 锐 甄 威(50)                |
| 一起发电机保护定值计算错误引起的励磁过负荷报警分析       | 陈熙平 季 杰 曹 钢 蔡显岗 王文松 张伟(55)     |
| 双回线并列运行方式探讨                     | 吴 玲 刘 勤(59)                    |
| 特高压交流输电线路工频电磁环境分析               | 许翠娥 文 艺 李建明(63)                |
| 高压直流换流站设备可听噪声的分析与降噪探讨           | 叶春燕 王方强 陈 巍 王 杰 任志超(68)        |
| 电铁牵引负荷对风电场运行特性的影响分析             | 张新伟 李 波(71)                    |
| 超导储能装置应用于风电场平滑功率输出的研究           | 闫广新 王 凯(76)                    |
| 基于积分器零漂的罗氏线圈电流互感器稳态采样误差         | 郭又华(81)                        |
| 750 kV 变电站 3/2 母线接线与倒闸操作方式优化    | 徐 闯 石 辉 印 欣 常喜强 王 飞(84)        |
| 水电站主变压器高压侧接地故障传递电压对发电机定子        |                                |

接地保护的影响

|                     |
|---------------------|
| 黄建琼 季 杰 蔡显岗 陈熙平(88) |
| 变压器绝缘油中微生物生长研究      |
| 王 杰 刘 虹 唐 平 李 博(92) |

### 第 2 期

|                                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 基于小波去噪的配电网 C 型行波故障测距           | 郑莹莹 舒 勤(1)                  |
| 变压器微水在线控制与延长变压器寿命技术的研究         | 尧 广 李利红 曾明贵 熊 攀 王 勇(6)      |
| 利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压可行性分析      | 滕予非 汤 凡 魏 巍 李 甘 丁理杰 张华(10)  |
| 影响 BZT 装置正确动作的原因分析及自适应改进措施     | 王 红 常喜强(14)                 |
| 光伏电站与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究        | 胡仁祥 白生荣 常喜强 罗金玉(18)         |
| 基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估法          | 田立伟 肖先勇(22)                 |
| 风电场宏观选址综合决策方法的研究               | 陶奕杉 闫广新 王建军 马 乐 张同宇(27)     |
| 基于保护矩阵和网络化简的最小断点集计算新方法         | 张向亮 徐 文 姚 强(31)             |
| 降低 10 kV 配电网损耗及提高供电质量措施        | 张 迺 胡晓阳 胡建川 王主丁(36)         |
| 基于模糊滑模变结构的直流伺服系统控制器设计          | 冉 鸿 陈 静 罗 洪(42)             |
| 精简监控系统遥测越限告警信号量                | 袁建党 易炳星 李 军 聂文萍 王 亮 李敏瑞(45) |
| 配电网投切无功补偿装置的过电压与抑制分析           | 庄 琛 姚圣平 陈少卿 聂鸿宇 谢同平 黄小琼(48) |
| 考虑波形起始点的特高压变电站雷电入侵过电压分析        | 梁 玲 肖先勇(52)                 |
| 直流支柱绝缘子电场影响因素分析                | 许 安 何大猛 刘守豹(56)             |
| 110 kV 零值瓷绝缘子电场仿真分析研究          | 白 欢 陈洪波 黄道春(62)             |
| 高压开关柜中 TEV 信号仿真分析              | 邵 菲 魏力强 吴 昊 茹满辉(68)         |
| 电容式套管末屏接线法在绕组变形测试中的应用研究        | 杨 洋(72)                     |
| GW16A – 252DW 型隔离开关拒动故障原因分析及处理 | 李运涛 刘同杰(75)                 |
| 对某 35kV 开关柜绝缘缺陷造成全厂停电的事故分析     | 陈海平(78)                     |
| 电力企业厂界噪声监测中背景噪声测量和修正的探讨        |                             |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| …… 叶春燕 兰新生 王志高 周易谦 林巧红 刘虹(81) |  |
| 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定(溶解平衡法)    |  |
| 浅析                            |  |
| …… 胡仕红 鲁登峰 王杰 刘虹(86)          |  |
| 四川省新能源发电发展研究                  |  |
| …… 袁川 黎岚 刘洋 金键可 邵霄(91)        |  |

### 第 3 期

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 基于新疆继电保护故障信息系统的思考与深化应用          |  |
| …… 段天元 樊艳芳 常喜强 印欣(1)            |  |
| 风电场送出线路距离保护的探究                  |  |
| …… 王银萍 王维庆 张新燕 王海云(7)           |  |
| 基于生物电阻抗频率散射特性的触电特征识别仿真研究        |  |
| …… 李浩 刘继勋 赵恒 范康林 肖先勇(10)        |  |
| 含 STATCOM 的不同阻尼控制器对次同步振荡抑制的影响   |  |
| …… 王敏华 苏永丽 裴超志(14)              |  |
| 链式供电结构下受端电网的稳切负荷策略的优化研究         |  |
| …… 王衡 姚秀萍 常喜强 周专 张锋(19)         |  |
| 基于 D5000 系统的风电优先调度工作方案设计与应用     |  |
| …… 肖桂莲 宋明曙 郭小龙 张彦军(24)          |  |
| 不平衡牵引负荷对电网容量占有的探讨               |  |
| …… 仇龙刚 张永岚 安娜 刘浩 崔中一 刘洋(29)     |  |
| TSC + STATCOM 的混合无功补偿装置协调控制策略研究 |  |
| …… 张翔 王奔 冯阳 马明智(34)             |  |
| 直流输电系统利用大地回线自动转为金属回线抑制直流偏磁策略研究  |  |
| …… 孙文 禹佳 滕予非(39)                |  |
| 基于可中断负荷的阻塞管理研究                  |  |
| …… 魏林 魏东 彭格(44)                 |  |
| 一种改进的 SVC 在风电系统霍普夫分岔控制中的应用      |  |
| …… 袁义桃 康积涛 何龙(48)               |  |
| 异步风力机风速突变对并网系统影响分析与防护措施         |  |
| …… 罗洪 陈静 冉鸿(53)                 |  |
| 基于分布式参数的双端测距优化算法                |  |
| …… 印吉景 刘宏君 潘军军 余传坤(57)          |  |
| 考虑脆弱性的复杂环网最小断点集计算新方法            |  |
| …… 张向亮 徐文 张向军 吕飞鹏(61)           |  |
| 含风电的配电网中线损计算方法改进                |  |
| …… 陶奕杉 闫广新 石岩 蒋燕 王玉蓉(67)        |  |
| 并联电容器对变压器差动保护的影响                |  |
| …… 陈实 郭晓 张尧 史华勃(70)             |  |
| 一种光伏系统控制策略仿真分析                  |  |
| …… 余涛 梁植淇 李武强(73)               |  |
| 三次产业用电特性及负荷结构研究                 |  |
| …… 任志超 张全明 杜新伟 王海燕 曹开江(77)      |  |
| 汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算             |  |
| …… 张志恒 孙戈 钟农兵(82)               |  |
| 电力系统中长期稳定分析用联合供水水电机组非线性仿真模型     |  |
| …… 汤凡 丁理杰 张华 滕予非 魏巍(86)         |  |
| 不同通风条件下某水电厂电缆室火灾数值模拟分析          |  |
| …… 孙大根(91)                      |  |

### 第 4 期

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 基于多代理的智能配电网故障恢复                 |  |
| …… 董丽梅 舒勤 谈芳明(1)                |  |
| 新疆电网光伏电站并网参与系统调节的讨论             |  |
| …… 钟显 樊艳芳 常喜强 王衡 周专(6)          |  |
| 风电场并网与重合闸配合的探讨                  |  |
| …… 王银萍 王维庆 张新燕 王海云(10)          |  |
| 自然覆冰条件下的输电线路覆冰形状特征              |  |
| …… 范松海 龚奕宇 刘益岑 薛志航(14)          |  |
| 高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制            |  |
| …… 王敏华 康积涛 裴超志(18)              |  |
| 多馈入直流系统换流母线动态电压稳定性分析            |  |
| …… 井艳清 王森(23)                   |  |
| 舟山多端柔性直流输电系统控制策略分析              |  |
| …… 胡欣 李兴源 朱瑞可(27)               |  |
| 基于风电仿真模型等值的相关讨论                 |  |
| …… 常喜强 赵明君 梁静 周专(31)            |  |
| 利用蓄热式电采暖提高电网风电接纳能力的研究           |  |
| …… 张新伟 耿万梅(36)                  |  |
| 计及需求响应策略的含风电场的机组组合优化模型          |  |
| …… 李阳 蒋正华 徐蔚 周杨(40)             |  |
| ±800 kV 天一中直流对哈密电网变压器直流偏磁的影响    |  |
| …… 王建 马勤勇 常喜强 张媛 金铭 范旭华 刘依梅(46) |  |
| 观音岩电站送出直流工程系统谐波阻抗特性研究           |  |
| …… 李文帆 伍文城 刘小江 杨帆 陈磊 曾雪松(53)    |  |
| 电网频率变化下直驱永磁风力发电机组暂态特性分析         |  |
| …… 冯树辉 杨浩 项丹(58)                |  |
| 电气机车谐波特性及多机车运行谐波电流评估方法          |  |
| …… 沈峰(62)                       |  |
| 国分省三级日前发电计划静态安全校核               |  |
| …… 卢文平(66)                      |  |
| 中压配电网建设改造举措                     |  |
| …… 易强红 霍凯龙 胡晓阳(70)              |  |
| 一种多级安全防护的过滤模型在智能配电网通信系统的应用      |  |
| …… 李貌 滕欢(76)                    |  |
| 县城 10 kV 配电网规划实用方法及其应用          |  |
| …… 冉郑国 周星星 吴勇 王主丁(81)           |  |
| 基于模型诊断在配电网故障诊断中的应用研究            |  |
| …… 胡非 贺攀 干磊 肖锋 黄双双 柯明猛(86)      |  |
| 火力发电厂脱硝自动控制系统的优化与改进             |  |
| …… 曾俊(92)                       |  |

### 第 5 期

|                            |  |
|----------------------------|--|
| 500 kV 重冰区同塔双回路垂直线间距离设计探讨  |  |
| …… 张驰 张海平 周亮(1)            |  |
| “疆电入川”工程对四川电网的影响研究         |  |
| …… 蒋乐 魏震波 刘俊勇 胡国强 陈虎 刘洋(5) |  |
| 新疆电网全数字仿真系统的建设及思考          |  |
| …… 钟显 樊艳芳 常喜强 王衡(9)        |  |

## 变电站视频质量诊断系统的应用研究

..... 朱元全 王印松 常政威(15)

## 特高压交流输电线路重覆冰区地线支架设计研究分析

..... 周 唯 李澄宇 李 力 梁 明(19)

## 某 500 kV 变电站直流融冰装置 35 kV 管母故障分析

..... 郭 飞 邓元实 刘益岑 蓝彬恒(24)

## 两例 500 kV CVT 异常分析及日常运行监视探讨

..... 代英俊(32)

## 智能变电站 SCD 智能比对软件的设计与实现

..... 郑永康 陈 吉 董晓阳 刘明忠 陈沧杨 庄先涛(36)

## 智能变电站监控与视频系统联动方式研究

..... 廖小君 黄忠胜 吕飞鹏(42)

## 罗氏线圈电子式互感器软件积分中高次谐波问题研究

..... 叶有名 刘明忠(46)

## 利用移相变压器提高川渝断面输电能力的研究

..... 陈 刚 丁理杰 汤 凡 滕予非 魏 巍(49)

## 变压器有载调压分接开关动作特性交流测试技术的研究

与应用 .....

..... 何 良 苏明虹 李 健(55)

## 基于旋转多圆柱的多功能人工气候试验室水滴参数分析

方法研究 .....

..... 贺兴容 蒋一平 蒋兴良 胡建林(59)

## 集群接入的风电场联络线单相重合策略研究

..... 辛超山 吕 盼(64)

## 万州电网 AVC 系统遥控成功率低问题探讨

..... 王小波 张长春 刘 钢(68)

## 一种基于 DSP 的变压器绕组温度测量

..... 刘翔宇 杨 明(72)

## 电缆终端绝缘击穿原因分析及对策探讨

..... 刘 丰(75)

## 储能电机时间继电器对重合闸的影响

..... 李文泉 尚振华(78)

## 10 kV XLPE 电缆本体缺陷电场仿真分析

..... 张 轩 杨延霞(82)

## 基于 MAS 的调峰权交易模型 .....

李安均 陈 川(86)

## 四川电力消费特征分析研究

..... 贺星棋 鲜其军 严 平(91)

## 第 6 期

## 最小生成树算法在配电网重构中的应用

..... 李 超 王 华 刘 丽 韩 燕 许 瑾(1)

## 高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究

..... 常喜强 樊艳芳 钟 显 段天元 李泽燃 张 锋(5)

## 一起变压器夹件多点接地故障的原因及处理

..... 蒋一平 许 强(10)

## 一起 110 kV 主变压器中性点间隙击穿的原因分析与故障

查找 .....

..... 李馨博 程昌奎 巫京励 陈 娇 干建伟(13)

## 检测桥电阻对直流电源系统安全运行的影响分析

..... 李 晶 罗 洋 陈轲娜(16)

## 10 kV 架空绝缘导线防雷击断线措施研究

..... 朱世东 黄飞龙(20)

## 特高压直流输电线路 1250 mm<sup>2</sup> 截面导线选型研

..... 周 唯 吴子怡(24)

## 两种变压器绕组等值电容模型的联系

..... 李 林(29)

## ±500 kV 永富直流输电工程分极送电接地方案造价分析

..... 吴子怡 周 唯(32)

## 运用“十二节点工作法”精益提升变电设备大型检修工作

效率 .....

杜仁杰 郑雨欣 聂雅卓(36)

## 大规模风电并网系统控制问题综述

..... 罗 亘 汪万平(40)

## 基于无源动态滤波器和 TSC 的无功补偿波仿真

..... 沙宏哲 冯媛硕(44)

## 基于改进蚁群优化算法的电力谐波和间谐波的检测与分析

..... 王志川 刘丹莉 彭祥华 周 群(49)

## 基于改进爬山算法的风机最大功率点控制策略研究

..... 田永贵 王 奔 薛禾雨 李 鹏 高鲁峰 李 晓(54)

## 并网小电源对电力系统的影响和对策探讨

..... 孙文成 崔明德(61)

## 继电保护在线校核系统的研究 .....

王 佼 刘 钊(65)

## 含源配电系统孤岛运行状态特征识别与诊断

..... 伍 盛(69)

## ±800 kV 特高压直流输电工程保护闭锁策略分析

..... 孙 文 禹 佳 滕予非(73)

## 某大型水电站 20 kV 系统一点接地后铁磁谐振现象分析

..... 康 娣 蔡显岗 季 杰 黄建琼(78)

## 基于 GPRS 的电网供电电压监测管理系统应用研究

..... 何小飞 王 锐 叶茂青 杨 华(81)

## 基于改进引力搜索算法的配电网多目标优化重构

..... 谭守国(87)

## 增刊 1

## 国家电网公司实验室电力互感器运行性能实验室概况

..... (1)

## 小型组合式电抗器在 500 kV 电压互感器现场校验中的应用

..... 蒋映霞 史 强 焦 阳 艾 兵 胡利峰(4)

## 电子式互感器现场无线校验的实现

..... 艾 兵 江 波 陈贤顺 史 强 张雨绮(8)

## 三相检测法对组合互感器误差试验研究

..... 艾 兵 蒋 卫 刘 刚 罗睿希(12)

## 外电流杂散磁场引起 GTA 误差的机理分析

..... 陈贤顺 艾 兵 江 波(16)

## 550 kV 标准电压互感器设计

..... 焦 阳 谷玉华 艾 兵 徐 灿(20)

## 数字化电能表脉冲接口设计对误差检测的影响

..... 李福超 江 波 陈贤顺(24)

## 电子式互感器数据采集系统的研究与实现

..... 黄嘉鹏 江 波(28)

## 超特高压直流电压互感器的原理及误差分析

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| ..... 张福州 江 波(31)                |             |
| 电流互感器移动检定实验室的研制                  |             |
| ..... 史 强 焦 阳 艾 兵(36)            |             |
| 低压电流互感器一体式自动检定系统                 |             |
| ..... 侯兴哲 冯 凌 魏 东(40)            |             |
| 电子式电压互感器现场检测新型升压方法               |             |
| ..... 贺 强 艾 兵 黄嘉鹏(44)            |             |
| 互感器现场测试仪与传统测差法的比较与分析             |             |
| ..... 谭炳源 蒋 卫 何 娜 张福州(49)        |             |
| 电子式互感器校验方式的比较                    |             |
| ..... 张 翔 江 波 陈贤顺(54)            |             |
| 基于 IEC 61850-8-1 协议的数字化电能计量系统通信协 |             |
| 议的研究与实现 .....                    | 牛三草 吴君明(56) |
| 基于有限元仿真的 EVT 电场影响误差分析            |             |

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| ..... 罗睿希 艾 兵 江 波(61) |         |
| 电压互感器的铁磁谐振过电压分析       |         |
| ..... 何 娜 艾 兵 蒋 卫(66) |         |
| 智能电能表运行故障分析与处理        |         |
| ..... 周 泳 李启明 周 敏(70) |         |
| 数字电能计量的误差来源探讨         |         |
| ..... 唐 毅 江 波 陈贤顺(76) |         |
| 智能变电站整站计量溯源技术研究       |         |
| ..... 吴章宪 魏 鹏(80)     |         |
| 新型高压电能表原理及应用 .....    | 刘娅丽(84) |
| 单相智能电表故障分析 .....      | 孔 翼(87) |
| 关于对用电信息采集系统拓展应用的思考    |         |
| ..... 穆雅玲(91)         |         |
| 《四川电力技术》投稿须知 .....    | (35)    |

(上接第 90 页)

## 5 结 语

配电网重构是一个多目标优化问题,所提出的改进的万有引力搜索算法在重构过程中考虑了系统有功损耗、节点电压偏移量以及 ENS,并利用基于模糊满意度的多目标决策方法对多目标进行处理,使其转化为单目标函数,通过改进引力搜索算法对问题进行求解,多目标重构后系统的网损有较大的降低,同时节点电压质量和供电可靠性也得到提高,验证了模型和算法的有效性。

### 参考文献

- [1] 于永哲,黄家栋. 基于改进模拟植物生长法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):40-43.
- [2] Shirmohammadi D, Hong HW. Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Loss Reduction [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1989, 4(2):1492-8.
- [3] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术,1995,19(7):47-50.
- [4] 何禹清,彭建春,文明,等. 配电网重构的最小可行分析对象及其快速算法[J]. 中国电机工程学报,2011(31):50-56.
- [5] 陈春,汪峰,刘蓓,等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
- [6] 麻秀范,张粒子. 基于十进制编码的配电网重构遗传算法[J]. 电工技术学报,2004,19(10):65-69.
- [7] Abdelaziz A Y, Mohammed F M, Mekhamer S F, et al. Distribution Systems Reconfiguration Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Electric Pow-

- er Systems Research, 2009, 79(12):1521-1530.
- [8] Yasin Z M, Rahman T K A. Influence of Distributed Generation on Distribution Network Performance during Network Reconfiguration for Service Restoration [C]// Power and Energy Conference, IEEE International, 2006: 566-570.
- [9] 赵晶晶,李新,彭怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术,2009,33(17):162-166.
- [10] Rugthaicharoencheep N, Sirisumrannukul S. Feeder Reconfiguration with Dispatchable Distributed Generators in Distribution System by Tabu Search [C]// Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, IEEE, 2009: 1-5.
- [11] 刘畅,黄民翔. 含多种分布式电源的配电网重构优化研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):13-18.
- [12] 王超学,吕志奇,董慧,等. 基于改进蜜蜂进化型遗传算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):52-56.
- [13] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: A Gravitational Search Algorithm [J]. Information Sciences, 2009, 179(13):2232-2248.
- [14] 张维平,任雪飞,李国强,等. 改进的万有引力搜索算法在函数优化中的应用[J]. 计算机应用,2013,33(5):1317-1320.
- [15] 李春龙,戴娟,潘丰. 引力搜索算法中粒子记忆性改进的研究[J]. 计算机应用,2012,32(10):2732-2735.
- [16] 杨磊,于舒娟. 基于精英策略的逆向蚁群优化盲检测算法[J]. 计算机技术与发展,2012,20(12):1673-629.

作者简介:

谭守国(1965),工程师,本科,从事电力营销及配网相关的工作。

(收稿日期:2014-09-11)

# 工具箱 内又添 新利器

## — TG165红外成像测温仪

FLIR TG165精准显示即时检修中的  
热点故障。

FLIR TG165红外成像测温仪的问世缩小  
了单点红外测温仪与FLIR多功能红外热  
像仪之间的差距。

# 仅售3999元

图片仅供说明之用，显示图像可能不代表该热像仪的实际分辨率

### 快速精准

直观显示热点故障

104.2°F E: 0.90



### 操作安全

距离系数比24:1



### 坚固可靠

为耐受最严苛环境而精心设计



### FLIR 中国公司总部:

前视红外光电科技(上海)有限公司  
全国咨询热线: 400-683-1958  
邮箱: info@flir.cn  
WWW.FLIR.COM

### FLIR 授权经销商:

成都英孚德科贸有限公司  
咨询电话: 028-8525 0223/8525 9930  
邮箱: xdr\_xiejun@163.com  
www.cainfrared.com

# FLIR

世界第六感