

# 一种基于多目标的微电网无功优化控制策略

刘保磊, 钟俊

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**微电网中分布式电源的随机性和间歇性特性让电网的稳定性面临严重挑战,而目前多数针对微电网最优潮流的研究未考虑系统的稳定性和对波动的快速恢复能力。在此基于简化 $L$ 指标的静态无功优化控制策略,通过建立多目标优化模型系统同时考虑系统经济性、稳定性和动态无功备用最大化,有效保证了电网运行过程中的电压稳定性和波动的快速恢复。将改进的IEEE 14节点系统作为算例进行仿真实验并将所提的多目标函数和传统的经济性目标函数作对比,结果表明采用所提策略在满足经济性的前提下,电网的稳定性更好、动态无功备用也更多,验证了所提方法的有效性。

**关键词:**简化 $L$ 指标;微电网;最优潮流;无功电压协调控制;无功备用

**中图分类号:**TM761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0001-04

## A Reactive Power Optimization Control Strategy Based on Multi-objective for Micro-grid

Liu Baolei, Zhong Jun

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:**The randomness and intermittence characteristics of distributed generation make the stability of power grid face serious challenges, but most of the researches on optimal power flow of micro-grid do not consider the stability of the system and the fast recovery of the wave. A static reactive power control strategy based on simplified  $L$  indicator is presented, and by establishing the multi-objective optimization model with the consideration of economy, system stability and dynamic reactive power reserve maximization, it effectively guarantees the voltage stability and the rapid recovery of voltage volatility during the operation of power grid. Taking the modified IEEE 14 bus system for example, the simulation experiment and the comparison of multi-objective function and the traditional economic objective function are carried out. The results show that the proposed strategy has better stability and more dynamic reactive power reserve while meeting the demand of economy, which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:**simplified  $L$  indicator; micro-grid; optimal power flow; reactive power and voltage coordinated control; reactive power reserve

## 0 引言

以风能和太阳能为代表的新能源发电具有可再生、无污染、分布广泛等特点,有极大的研究价值和实用价值<sup>[1]</sup>。分布式电源发电具有随机性和间歇性的特点,因此含分布式电源的电网稳定性较弱,增加了系统出现电压崩溃的可能性<sup>[2]</sup>。目前微电网的经济性和稳定性较差是制约分布式电源发展的

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2016GZ0145)

重要原因,而很多研究只考虑微电网的经济性却很少考虑系统的稳定性和快速恢复能力。为了保证电网运行的安全,减少系统出现电压崩溃的可能性,在微电网控制策略中有必要考虑系统的电压稳定性和波动的快速恢复能力。

基于多目标的微电网无功电压协调控制问题,众多专家和学者已经进行了很多研究,也取得了很多成果。文献[3]将微电网的经济性和环境代价最小作为目标函数,通过动态调度降低微电网的环境污染和发电成本。文献[4]结合储能技术和电网的分时电价政

策,建立微电网的动态调度模型,进一步提高了经济性。文献[5]在目标函数中考虑了最小无功补偿和基于 $L$ 指标的电压稳定性,增强了风电场的系统稳定性和经济性,但采用传统的 $L$ 指标计算,降低了计算速度。文献[6]讨论了考虑基于 $L$ 指标的电压稳定约束的4种模型,对最优潮流模型的选取有一定的指导意义。以上文献均没有在微电网的稳定性中引入简化的 $L$ 指标,存在计算量大和计算时间长的缺点,也没有考虑电网运行时因动态无功备用不足导致的系统对波动的快速恢复能力较差的问题。

因此,下面根据微电网中电阻值相对于电抗值不能忽略而相角可以忽略的特点,将文献[7]提出的简化 $L$ 指标引入到微电网以衡量电网的稳定性;同时增加了动态无功备用目标函数以增强系统对波动的快速恢复能力。通过建立多目标优化模型系统同时考虑系统经济性、稳定性和动态无功备用,得到的模型更能兼顾微电网经济性、稳定性和对波动的快速恢复能力。

## 1 $L$ 指标及简化 $L$ 指标

### 1.1 $L$ 指标

$L$  指标是一个取值范围为 $0 \sim 1$ ,能对不同电力系统模型给出归一化数值的电压稳定指标。在众多常用电压稳定指标中,除 $L$ 指标和基于灵敏度分析的电压崩溃临近指标(VCPI)外,其他指标需要判断潮流方程的雅可比矩阵奇异性且计算速度慢。而VCPI在系统SNB处的数值趋于无穷大,不能定量地给出电压失稳信息<sup>[8]</sup>。 $L$ 指标具有计算速度快、物理概念清晰、取值有固定的上下限等优点,且能对不同系统给出归一化数值,在实际电网中已经得到应用。

文献[9]提出 $L$ 指标可以表示为

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{k \in \alpha_C} H_{LGjk} \dot{V}_{Gk}}{\dot{V}_{Lj}} \right| = \frac{\left| \sum_{i \in \alpha_L} Z_{LLji} \left( \frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^* \right|}{V_{Lj}} \quad (1)$$

式中: $L_j$ 为负荷节点 $j$ 的局部电压稳定指标; $\alpha_C$ 为PV节点的集合; $\alpha_L$ 为负荷节点的集合, $j \in \alpha_L$ ;  $H_{LGjk}$ 为负荷参与因子矩阵 $H_{LG}$ 的第 $j$ 行、第 $k$ 列元素; $\dot{V}_{Gk}$ 是第 $k$ 个PV节点电压相量, $k \in \alpha_C$ ;  $\dot{V}_i$ 和 $\dot{V}_{Lj}$ 分别为负荷节点 $i$ 、 $j$ 的电压相量; $V_{Lj}$ 为节点的电压幅值; $Z_{LLji}$ 为负荷节点 $i$ 和 $j$ 的互阻抗; $S_i$ 为节点 $i$ 的系统负荷功率;上角标 $*$ 代表共轭。

所有负荷节点的稳定指标共同组成电网的稳定指标向量 $L' = [L_1, L_2, \dots, L_n]$ ,  $n \in \alpha_L$ , 系统的 $L$ 指标定义为

$$L = \max_{j \in \alpha_L} |L_j| = \|L'\|_{\infty} \quad (2)$$

式中: $L$ 代表系统的 $L$ 指标; $\alpha_L$ 为负荷节点的集合。

$L$ 指标与系统电压稳定性之间的关系有:

$$\begin{cases} L < 1.0, \text{系统电压稳定} \\ L = 1.0, \text{系统处于电压稳定临界状态} \\ L > 1.0, \text{系统电压失稳} \end{cases}$$

### 1.2 简化 $L$ 指标

由 $L$ 指标定义,式(2)可以表示为

$$\begin{cases} L_j = \frac{1}{V_j} \sqrt{f^2 + g^2} \\ f = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{f_i}{V_i} \\ f_i = P_i (R_{ij} \cos \theta_i - X_{ij} \sin \theta_i) + Q_i (X_{ij} \cos \theta_i + R_{ij} \sin \theta_i) \\ g = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{g_i}{V_i} \\ g_i = Q_i (R_{ij} \cos \theta_i - X_{ij} \sin \theta_i) - P_i (X_{ij} \cos \theta_i + R_{ij} \sin \theta_i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_j$ 等于式(1)中的 $V_{Lj}$ ;  $f$ 和 $g$ 分别表示式(1)中的

$\sum_{i \in \alpha_L} Z_{LLji} \left( \frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^*$ 的实部和虚部; $P_i$ 和 $Q_i$ 分别为节点 $i$ 注入的有功功率和无功功率; $\theta_i$ 为节点 $i$ 的电压相角; $R_{ij}$ 和 $X_{ij}$ 分别为节点 $i$ 、 $j$ 间的电阻和电抗; $f_i$ 和 $g_i$ 分别表示 $Z_{LLji} \left( \frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^* \times V_i$ 的实部和虚部,其中 $V_i$ 为 $\dot{V}_i$ 的模值。

由于 $L$ 指标的表达式含有复数运算,计算较为复杂,而且随着电网规模的增加,计算量也会快速增加。但在实际低压电网中,线路的电阻相对于电抗往往不能忽略,而电压相位的变化量相对较小<sup>[10]</sup>。结合微电网中 $R$ 相对于 $X$ 不能忽略而相角可以忽略的特点采用适合微电网的简化 $L$ 指标。忽略电压相位变化量的简化 $L$ 指标为

$$\begin{cases} L_{sj} = \frac{1}{V_j} \sqrt{(f_s)^2 + (g_s)^2} \\ f_s = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{f_{si}}{V_i} \\ f_{si} = P_i R_{ij} + Q_i X_{ij} \\ g_s = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{g_{si}}{V_i} \\ g_{si} = Q_i R_{ij} - P_i X_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_{sj}$ 表示忽略电压相位变化量后得到的简化 $L$

指标; $f_s$  和  $g_s$  分别表示式(3)中忽略电压相位变化量后的  $f$  和  $g$ ; $f_{si}$  和  $g_{si}$  分别表示式(3)中忽略电压相位变化量后的  $f_i$  和  $g_i$ 。

## 2 电压协调控制

### 2.1 微电网的优化目标

目前中国全部微电网还属于示范性工程,盈利能力很差。由于分布式电源出力的间歇性和随机性,微电网的稳定性问题不容忽视,而在实际电网运行中动态无功备用常常不足,经常存在出现扰动时系统不能快速恢复的情况<sup>[12]</sup>。同时微电网的经济性差和稳定性不好是制约中国微电网发展的重要因素。因此微电网的调度策略既要保证微电网的安全运行,又要考虑运行的经济性和小干扰时系统的动态无功备用。

#### 2.1.1 经济性

由于利用风能、太阳能等可再生能源的发电成本很低,在实际电网中通常优先利用以使发电成本最小化<sup>[13]</sup>。因此,这里的经济性函数主要考虑利用非可再生能源发电的传统电机的发电成本。为满足电网经济性的要求,采用系统运行成本最小作为目标函数:

$$f_1 = \min \sum_i^m (C_{0i} P_{Gi}^2 + C_{1i} P_{Gi} + C_{2i}) \quad (5)$$

式中: $m$  为微电网中的传统发电机个数; $P_{Gi}$  为微电网中第  $i$  台传统发电机的有功出力; $C_{0i}$ 、 $C_{1i}$ 、 $C_{2i}$  为其燃料耗费曲线参数。

#### 2.1.2 稳定性

微电网包含众多分布式电源,其中利用风能和太阳能的分布式发电机发电具有很强的间歇性,严重影响电网的系统稳定和电压质量。而较差的系统稳定会严重影响系统的安全运行,也会给电网造成难以估量的危害。为增加电网的静态稳定裕度,采用系统中所有的薄弱节点的简化  $L$  指标平方和作为目标函数:

$$f_2 = \min \sum_{j=1}^l L_j^2 \quad (6)$$

式中: $l$  为电网中薄弱节点的个数; $L_j$  表示负荷节点  $j$  的简化  $L$  指标。

#### 2.1.3 动态无功备用

由于以风电为代表的分布式电源出力具有间歇性,系统的暂态电压安全问题不容忽视。目前电网

的无功补偿设备有很多,但动作时间差别很大。其中容抗器需要数分钟才能完成动作,风力发电机需要数秒就能完成动作,而静止无功补偿器和静止无功发生器通常只需要数十毫秒就能完成动作<sup>[14]</sup>。当电网发生扰动时,以并联电容器为代表的普通无功电源不能满足系统稳定快速恢复的需要,为发挥动态无功备用提高系统暂态电压安全性的作用,需要保证快速动作无功设备的无功储备量。通常动态无功补偿设备处于最佳出力处时动态无功储备量最大<sup>[14]</sup>,因此采用各动态无功设备出力偏离最佳出力的平方和最小作为目标函数:

$$f_3 = \min \sum_{k=1}^n (Q_k - Q_{kopt})^2 \quad (7)$$

式中: $n$  为电网中快速动作无功设备的个数; $Q_k$  为第  $k$  个快速动作无功设备的无功出力; $Q_{kopt}$  为第  $k$  个快速动作无功设备的最佳无功出力,一般为动态无功设备出力上、下限的平均值。

### 2.2 多目标方程及求解算法

#### 2.2.1 多目标函数

线性加权法可以通过设置相应目标函数的权重系数来设置该目标函数的重要程度。这里利用线性加权法把多目标求最优问题化为单目标求最优问题来处理。权重系数的选取可以结合具体电网的实际情况作出修改。因此多目标函数可以表示为

$$f = \min ( \sum_i^m (C_{0i} P_{Gi}^2 + C_{1i} P_{Gi} + C_{2i}) + u_1 \sum_{j=1}^l L_j^2 + u_2 \sum_{k=1}^n (Q_k - Q_{kopt})^2 ) \quad (8)$$

式中, $u_1$ 、 $u_2$  分别为目标函数  $f_2$  和  $f_3$  的权重系数,具体取值根据实际情况而定。

#### 2.2.2 等式约束条件

等式约束条件为电网中各个节点的有功功率和无功功率潮流约束,潮流约束方程的极坐标形式为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $j \in i$  表示节点  $j$  属于和  $i$  相连的节点集合; $P_i$  和  $Q_i$  分别为节点  $i$  处注入的有功功率和无功功率; $V_i$  和  $V_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值; $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的相角差; $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵第  $i$  行、第  $j$  列元素的实部和虚部。

#### 2.2.3 不等式约束条件

控制变量的约束包括:微电网中各个发电机有功功率出力的上限、下限约束;各个节点电压的幅值

上限、下限约束;无功补偿设备的补偿上限、下限约束。上述约束可表示为

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \tag{10}$$

式中: $u$  为控制变量; $u_{\min}$  和  $u_{\max}$  分别为控制变量的下限和上限。

依从变量的约束包括:母线电压幅值的上限、下限约束;各个发电机母线无功功率输出上限、下限约束;各节点间线路的最大传输功率限制。上述约束可表示为

$$h_{\min} \leq h(x,u,D,p,A) \leq h_{\max} \tag{11}$$

式中: $x$  为依从变量; $u$  为控制变量; $D$  为干扰变量或不可控变量; $p$  为网络元件参数; $A$  为网络的结构变量,由关联矩阵表示; $h$  为依从变量组成的向量; $h_{\min}$  和  $h_{\max}$  分别为依从变量的下限和上限组成的向量。

2.2.4 求解算法

下面选择内点法作为求解含约束的多目标优化函数的算法。内点法始终在解的可行域内进行寻优,在解决最优解在“突刺点”处无法收敛的问题上效果显著<sup>[15]</sup>。同时内点法的计算速度较快且具有良好的收敛性,在实际电网的优化模型求解问题中得到了广泛应用。

3 算例分析

采用改进后的 IEEE 14 节点系统作为算例并利用 Matlab 平台进行仿真,仿真平台硬件配置为主频 3.2 GHz 的英特尔四核处理器和 4 GB 的内存。设定功率基准值为 100 MVA,节点 1、节点 2 为普通发电机节点,节点 6 为风力发电机节点,节点 3 接有容量为 50 Mvar 的无功补偿装置 SVG,其余节点视为负荷节点,母线电压幅值的上限、下限分别为 1.1 和 0.9。下面对仅考虑经济性的传统控制策略(以下简称策略 1)和所提出的控制策略(以下简称策略 2)进行仿真比较和分析,仿真结果见表 1、表 2。

由表 1 和表 2 可以看出:采用策略 1 得到的第 14 节点电压为 0.900 p. u.,处于节点电压幅值约束的下限,易引起电压越限;采用策略 2 得到的各个系统薄弱节点的  $L$  指标值均比采用策略 1 的更小。由于  $L$  指标值越小表示系统的稳定性越好,因此采用策略 2 后系统稳定性更好;采用策略 1 得到的动态无功备用仅为 0.26 Mvar,而采用策略 2 得到的动态无功备用为 10.42 Mvar,因此采用策略 2 的电网的

动态无功备用量有很大提高;采用策略 1 得到的发电成本相比采用策略 2 时的发电成本较低,因此策略 1 的经济性更好。综上,与传统策略相比,所提出的电压控制策略经济性差别不大,而在电压的稳定性和动态无功备用量方面有明显优势。鉴于微电网经常发生小干扰波动且稳定性较差,相比只考虑经济性的传统策略,所提出的电压控制策略综合考虑了微电网的经济性、稳定性和动态无功备用具有很大的优势。

表 1 采用策略 1 的算例仿真结果

| 系统薄弱节点 | 电压<br>(标幺值) | $L$ 指标值 | 发电成本<br>/元 | 动态无功<br>备用/Mvar |
|--------|-------------|---------|------------|-----------------|
| 5      | 1.026 5     | 0.079 8 |            |                 |
| 7      | 0.996 7     | 0.082 1 |            |                 |
| 9      | 0.959 1     | 0.110 6 | 4 128.6    | 0.26            |
| 10     | 0.946 3     | 0.102 4 |            |                 |
| 14     | 0.900 0     | 0.139 7 |            |                 |

表 2 采用策略 2 的算例仿真结果

| 系统薄弱节点 | 电压<br>(标幺值) | $L$ 指标值 | 发电成本<br>/元 | 动态无功<br>备用/Mvar |
|--------|-------------|---------|------------|-----------------|
| 5      | 1.028 1     | 0.079 5 |            |                 |
| 7      | 0.998 3     | 0.081 9 |            |                 |
| 9      | 0.960 9     | 0.110 2 | 4 347.0    | 10.42           |
| 10     | 0.948 1     | 0.102 0 |            |                 |
| 14     | 0.901 9     | 0.139 1 |            |                 |

为比较采用简化  $L$  指标和  $L$  指标对仿真结果的影响,下面分别将  $L$  指标和简化  $L$  指标应用到策略 2 中稳定性目标的计算,采用策略 2 的算例仿真结果如表 3 所示。

表 3 分别采用  $L$  指标和简化  $L$  指标的仿真结果对比

| 系统薄弱节点 | $L$ 指标值   |             | 计算时间/s    |             |
|--------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|        | 采用 $L$ 指标 | 采用简化 $L$ 指标 | 采用 $L$ 指标 | 采用简化 $L$ 指标 |
| 5      | 0.079 5   | 0.079 5     |           |             |
| 7      | 0.081 9   | 0.081 9     |           |             |
| 9      | 0.110 2   | 0.110 2     | 0.337 912 | 0.308 473   |
| 10     | 0.102 0   | 0.102 0     |           |             |
| 14     | 0.139 1   | 0.139 1     |           |             |

由表 3 可以看出:在策略 2 中采用简化  $L$  指标和  $L$  指标计算得到的  $L$  指标数值相同,即计算得到

(下转第 11 页)



# 风力发电系统可靠性评估体系

张 里<sup>1</sup>,李红军<sup>1</sup>,刘兴海<sup>1</sup>,张健美<sup>1</sup>,王婷婷<sup>1</sup>,黄忠胜<sup>1</sup>,张江林<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心,四川 成都 611133;  
2. 成都信息工程大学控制工程学院,四川 成都 610225)

**摘 要:**由于风电具有随机性、间歇性和波动性等特点,风力发电系统的可靠性对大规模并网电力系统安全性造成较大影响,如何准确评估风力发电系统可靠性,这提出了全新的挑战。首先分析了风力发电系统的结构特点,提出了一种基于期望故障受阻电能相等的方法,用相同容量的发电机等效替代风电机组“组串”,并根据元件状态特性对系统可靠性状态进行划分,最后建立时间、出力、系统等指标体系。通过实际系统进行仿真分析,结果表明该指标体系能够准确地对风力发电系统的可靠性进行评估。

**关键词:**风力发电系统;等效替代;可靠性评估;指标体系

**中图分类号:**TM73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0005-07

## Reliability Evaluation System of Wind Power Generation System

Zhang Li<sup>1</sup>,Li Hongjun<sup>1</sup>,Liu Xinghai<sup>1</sup>,Zhang Jianmei<sup>1</sup>,Wang Tingting<sup>1</sup>,Huang Zhongsheng<sup>1</sup>,Zhang Jianglin<sup>2</sup>

(1. Skill Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 611133, Sichuan, China;  
2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

**Abstract:**Because of the randomness, intermittence and fluctuation of wind resource, its reliability has great influence on the security of large-scale integrated power system. How to accurately evaluate the reliability of wind power generation system poses a new challenge. Firstly, the structure and output of wind power generation system are analyzed. A method based on equal expected energy not supplied (EENS) is proposed to substitute a generator with the same capacity for wind turbine "string" equivalently. In addition, the reliability state is divided by the component state characteristics. At last, the system reliability is comprehensively evaluated by the time, the output and the system. According to the simulation on an actual wind power system, the result shows that the index system can accurately evaluates the reliability of wind power generation system.

**Key words:**wind power generation system; equivalent substitution; reliability evaluation; index system

### 0 引 言

中国“十二五”规划以来,风力发电技术迅猛发展,装机容量大幅增加,已成为可再生能源中技术最成熟、应用最广泛的发电技术之一。由于风电具有间歇性、波动性和随机性等特点,使得大规模风电接入电力系统后带来了不确定的因素,因此如何准确评估风力发电系统的可靠性显得非常重要<sup>[1-2]</sup>。

国内外相关学者对风力发电系统的可靠性评估进行了大量的研究工作。文献[3]从风电接入电网

后对系统备用容量的需求入手,分析了风电并网后的系统可靠性问题。文献[4]建立了计及尾流效应的风电场可靠性模型,为研究风电场对电力系统可靠性的影响以及确定风电场可信度打下基础。文献[5-6]用超拉丁概率抽样方法模拟实际风速分布,以及风力发电机的输出功率概率分布,得到基于超拉丁采样的风力发电系统蒙特卡罗可靠性评估法。

以上文献均未考虑风力发电系统的结构特点及元件状态。下面首先分析了风速与风电机组输出功率的关系、风力发电系统的结构特点;其次提出了期望故障受阻电能相等的方法,根据风资源情况和风力发电系统元件状态对风力发电系统可靠性状态进

基金项目:国家自然科学基金项目(51207098);四川省科技厅项目(2015GZ0204)

行划分,并建立相应的可靠性指标体系;最后结合实际风电场历史运行数据,对可靠性评估指标体系进行统计,从而完成对风力发电系统进行可靠性评估。

## 1 风力发电系统的特点

由于风速具有随机性、波动性和间歇性等特点会导致风电机组输出功率的波动性变大,同时风力发电系统的结构特点和元件的可靠性也决定了风力发电系统的输出功率。

### 1.1 风机输出功率影响因素分析

风机由于其能量转换原理限制,其输出功率主要受季节气候和风速的影响。

#### 1) 季节与时间的影响

中国“三北”地区风资源较为丰富。一般来说,一年中春季和冬季风资源较丰富,夏季风资源较贫乏;在一天中来说,白天风资源较贫乏,而夜晚风资源较丰富<sup>[7]</sup>。

#### 2) 风速大小的影响

风电机组的运行状态和输出功率都与风速息息相关。图1给出了风电机组输出功率与风速的曲线<sup>[8]</sup>。

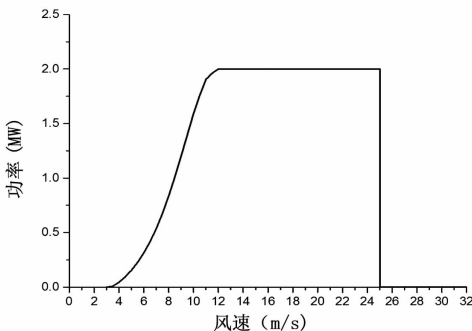


图1 风电机组输出功率曲线

从图中可以看出,曲线分为4段:当风速小于切入风速时,风机输出功率几乎为0;当风速处于切入风速和额定风速区域内时,风机输出功率与风速近似为线性关系;当风速位于额定风速和切除风速区域内时,风机输出功率为额定功率;当风速大于切除风速时,风机输出功率为0。因此,将风力发电系统状态按照风资源的充裕度进行划分:资源停运、资源限制减额运行和全额运行状态。

### 1.2 系统结构特点分析

实际风电场中采用辐射状的连接方式,通过电缆将风力发电机组依次连接起来,并汇集到变压器,

如图2所示。图中 $n$ 台风电机组连接成1“串”,同时 $m$ 串机组并联汇入1台变压器,多台变压器并联接入母线。在同一可靠性标准下,用1台相同容量的发电机组等效替代风电机组“串”。

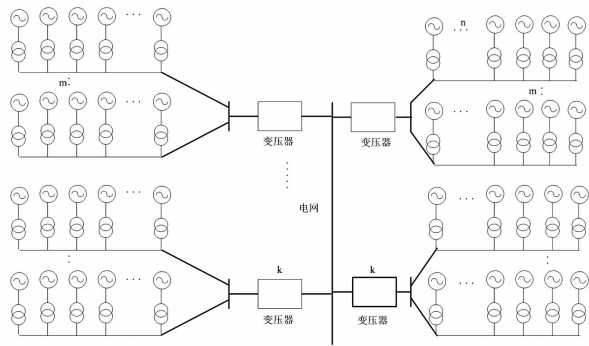
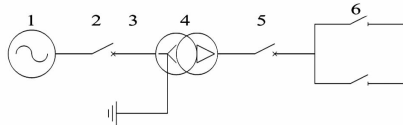


图2 风力发电系统基本构架

根据这些结构特点,可知单台风电机组故障时,会导致所在风电机组“串”输出功率降低,可以认为机组“串”处于部分停运状态;如果变压器出现故障,将会导致与变压器相连的所有风电机组停运。因此按照元件状态对风力发电系统运行状态可划分为:故障停运、故障减额运行和全额运行状态。下面针对风力发电系统结构进行详细分析。



1—风力发电机;2—接触器;3—塔筒内电缆;  
4—风机出口箱式变压器;5—中压断路器;6—隔离开关

图3 单台风力发电机组结构

风力发电机组的结构如图3所示,当风力发电机、接触器、箱式变压器、中压断路器中任何一个元件故障时,这个风电机组将停运。由于中压断路器具有隔离作用,单台风电机组故障停运后,不会影响到同一电缆连接的其他机组正常运行。因此单台风电机组的综合故障停运率为

$$q_{WTG} = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - q_i) \tag{1}$$

与此同时,隔离开关的故障也会引起风电机组的停运。当隔离开关的数量大于1时,隔离开关故障时会导致风电机组停运范围扩大。隔离开关对可靠性的影响主要有2种情况:

1) 当风机位于“串”的末端时,即中压断路器通过隔离开关直接与电缆相连,此时中压断路器、隔离开关、电缆L的故障将造成末端风电机组的停运,如图4所示。其停运率为

$$Q_1 = (1 - q_L) \prod_{i=1}^6 (1 - q_i) \quad (2)$$

式中:  $Q_1$  为末端风机的故障停运率;  $q_L$  为电缆 L 的故障率;  $q_1 \sim q_6$  为图 4 中元件 1~6 的故障停运率。

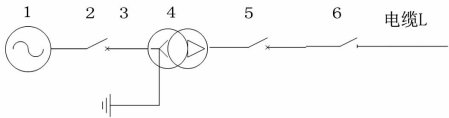


图 4 末端风电机组结构

2) 当风电机组位于“串”的中部时, 2 台隔离开关分别连接前后 2 台风机, 其连接如图 5 所示。导致风机停运的主要原因有: 中压断路器 B、隔离开关  $S_1$ 、 $S_2$  或电缆 L 故障。根据期望故障受阻电能不变的原则<sup>[9]</sup>, 对系统运行状态进行划分, 将系统运行状态出现的概率乘以该状态下系统的输出功率, 并进行累加, 再除以机组装机容量得到等效故障停运率, 即

$$Q_n = 1 - \frac{[n - (n - 1)Q_{n-1} - q_{WTG}]}{n} (1 - q_5)(1 - q_6)^2(1 - q_L) \quad (3)$$

式中:  $Q_n$  为  $n$  台风电机组经串联连接后的等效故障停运率, 采用层次迭代法得到;  $Q_{n-1}$  为  $n - 1$  台风电机组经串联连接后的等效故障停运率;  $Q_1$  可以由式 (2) 计算得到。

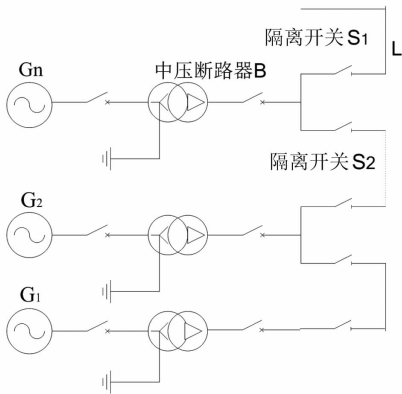


图 5 中部风电机组结构

根据电力系统串并联方式后的可靠性计算公式<sup>[10]</sup>, “ $m$  串”风电机组并联后的停运率  $Q_p$  为

$$Q_p = Q_n^m \quad (4)$$

并联后的风电机组“串”再与变压器串联后, 得到风电 - 变压器组的停运率  $Q_{PI}$  为

$$Q_{PI} = Q_p + Q_1 \quad (5)$$

根据上述分析, 将风力发电系统故障分为系统完全故障和系统部分故障两类:

1) K 组风机 - 变压器组并联发电系统完全故障

概率  $Q_C$  为

$$Q_C = Q_{PI}^K \quad (6)$$

2) 在实际过程中, 由于风力发电系统中风机 - 变压器组较多, 所以发生完全故障的概率并不大, 更多时候是由于风电机组或变压器引起的系统部分故障。

当风力发电机组串发生故障, 由于风力发电机组“串”间相互独立, 且系统停运概率服从二项分布, 风电机组“串”停运率  $Q_{1P}$  可按式 (7) 计算。

$$Q_{1P} = \sum_{i=1}^{mk-1} C_{mk}^i Q_n^i (1 - Q_n)^{mk-i} \quad (7)$$

当变压器故障, 采用类似的分析方法, 得到部分变压器停运率  $Q_{2P}$  为

$$Q_{2P} = \sum_{j=1}^{k-1} C_k^j Q_I^j (1 - Q_I)^{k-j} \quad (8)$$

由于风力发电机组“串”和变压器的故障相对独立, 所以得到系统部分停运率  $Q_P$  为

$$Q_P = Q_{1P} + Q_{2P} \quad (9)$$

综上, 风力发电系统的可靠性取决于风资源和风力发电系统的结构。通过计及风资源和系统架构的特点, 建立多状态风力发电系统可靠性模型。

## 2 可靠性状态的划分

可以根据风资源和元件状态将风力发电系统的可靠性状态划分为以下几种情况:

1) 全额运行状态: 当风速较快时, 即风力发电系统输出功率能够达到总装机容量的 70% 以上。

2) 资源限制减额运行状态: 当风速较慢时, 即风力发电系统输出功率低于总装机容量的 70%。

3) 故障减额运行状态: 风力发电系统部分元件故障导致输出功率减少的状态。

4) 故障停运状态: 风力发电系统全部停运的状态。

5) 无风或风速过快停运状态: 当风速处于无风或者风速过快状态时, 风力发电系统由于风资源停运的状态。

## 3 可靠性指标体系

针对第 2 节中的可靠性状态, 下面从时间、出力、系统等方面建立风力发电系统可靠性指标体系, 该体系可以反映出风力发电系统各状态的特性。

### 3.1 时间指标

将风力发电系统时间指标体系按照图 6 所示方式进行划分。

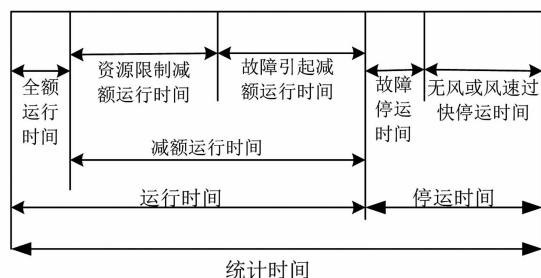


图 6 时间指标体系

结合系统状态,状态时间指标如下:

1) 全额运行时间 FRH (full run hour): 风力发电系统处于全额运行状态(即输出功率达到总装机容量 70%)的累计运行时间。

2) 资源限制减额运行时间 RDH (resource deduction hour): 风力发电系统由于风速的限制,输出功率小于总装机容量的 70% 的累积运行时间。

3) 故障减额运行时间 FDH (fault deduction hour): 风力发电系统中部分元件故障,导致输出功率减小的累积运行时间。

4) 故障停运时间 FOH (fault outage hour): 风力发电系统由于元件故障发生全站停运的累计时间。由  $FOH = PH \cdot Q_c$  计算。

5) 无风或风速过快停运时间 NH (not use hour): 系统处于无风或风速过快状态下的累计时间。

6) 年利用小时数 UH (utilization hours): 风力发电系统的年发电量除以系统总装机容量折算的发电小时数。

7) 减额运行时间 DH (deduction hour): 风力发电系统由于元件故障或者风资源限制,输出功率小于 70% 额定功率的运行时间,  $DH = FDH + RDH$ 。

8) 运行时间 RH (run hour): 风力发电系统处于运行状态的累计时间,  $RH = FRH + DH$ 。

9) 停运时间 OH (outage hour): 风力发电系统处于完全停运的累计时间,  $OH = FOH + NH$ 。

10) 周期时间 PH (period hour): 年统计时间 8 760 h。

### 3.2 出力状态指标

1) 全额等效出力 FEP (full equivalent power): 风力发电系统在全额运行状态下的等效输出功率。

2) 资源限制下减额等效出力 RDEP (resource

deduction equivalent power): 风力发电系统由于风速降低导致减额运行状态下的等效输出功率。

3) 故障减额等效出力 FDEP (fault deduction equivalent power): 风力发电系统由于部分元件故障导致系统减额运行的等效输出功率。

4) 减额等效出力 EDP (equivalent deduction power): 风力发电系统由于风速降低或者部分元件故障导致系统减额运行的等效输出功率。

5) 等效出力 EP (equivalent power): 风力发电系统在年统计时间内等效恒定输出功率。

6) 等效出力系数 ECF (equivalent coefficient factor): 风力发电系统等效输出功率与额定输出功率 RP (rated power) 的比值,  $ECF = EP/RP$ 。

7) 最大出力 MP (maximum power): 风力发电系统实际发电中的最大输出功率。

8) 最大出力系数 MPF (maximum power factor): 风力发电系统实际发电中最大输出功率与额定功率的比值,  $MPF = MP/RP$ 。

### 3.3 系统总体指标

为反映风力发电系统总体情况,其系统指标如下:

1) 设计可用率 DU (design usability): 根据风力发电系统停运概率和修复时间得到系统可用率设计值,  $DU = 1 - Q_c$ 。

2) 运行系数 OF (operating factor): 风力发电系统实际运行状态的概率,  $OF = RH/PH$ 。

3) 年发电设备利用率 EUR (the annual power generation equipment utilization rate): 风力发电系统发电设备利用的概率,  $EUR = UH/PH$ 。

4) 全额运行率 FRR (full run rate): 风力发电系统处于全额运行状态的概率,  $FRR = FRH/PH$ 。

5) 资源限制减额运行率 RDR (resource deduction rate of operation): 风力发电系统实际中由于风速限制导致系统处于减额运行状态的概率,  $RDR = RDH/PH$ 。

6) 设备故障减额运行率 EFDR (equipment fault deduction rate of operation): 风力发电系统由于部分元件故障,导致系统处于减额运行状态的概率,  $EFDR = FDH/PH$ 。

7) 暴露率 EXR (exposure rate): 风力发电系统利用风能的效率, 等于年利用小时数与系统运行时间的比值,  $EXR = UH / RH$ 。

4 算 例

采用实际风电场作为算例, 验证所提出的可靠性模型与指标体系的准确性与可行性。实际风力发电系统总装机容量为 30 MW, 相邻风电机组间的距离为 500 m, 5 台风电机组组成 1 “串”, 3 组风力发电机组串并联接入变压器。

采用文献[12 - 14] 的统计数据作为实际算例的系统元件参数, 如表 1 所示。实际输出功率曲线为张家口某风电场实测数据 (2015 年 9 月 1 日至 2016 年 8 月 31 日), 如图 7 所示。

| 表 1 风力发电系统各元件可靠性参数 |                            |          |
|--------------------|----------------------------|----------|
| 元件名                | 故障率/(次 · a <sup>-1</sup> ) | 故障修复时间/h |
| 风机                 | 1.500 0                    | 490      |
| 低压接触器              | 0.066 7                    | 240      |
| 中压断路器              | 0.025 0                    | 72       |
| 中压隔离开关             | 0.025 0                    | 240      |
| 箱式变压器              | 0.013 1                    | 240      |
| 电缆                 | 0.015 0                    | 240      |
| 升压变压器              | 0.978 0                    | 240      |

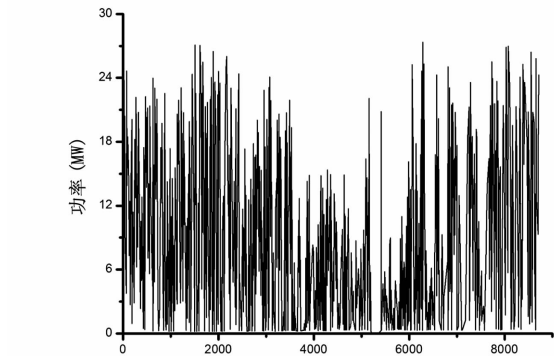


图 7 8 760 h 输出功率曲线

4.1 系统故障分析

分析系统故障情况,  $n = 5, m = 1, k = 3$ , 根据式 (1) 得:

$$q_{WTC} = 0.086\ 3$$

当负荷开关数为 1 时, 其等效故障概率为

$$Q_1 = 0.087\ 1$$

由 5 台风力发电机组成的 “串” 的等效故障概率为

$$Q_5 = 0.089\ 8$$

风电 - 逆变器组的故障概率为

$$Q_{PI} = Q_P + Q_1 = 0.171\ 3$$

当系统完全故障时,  $Q_C = Q_{PI}^3 = 0.005$

若统计时间 PH 取 8 760 h, 由式可得故障停运时间为

$$FOH = PH \cdot Q_C \approx 44\ h$$

当系统部分元件故障时, 由于同一变压器有 3 “串” 风电机组接入, 故将系统的部分元件故障分为单 “串” 风电机组故障和两 “串” 风电机组故障, 其停运概率计算过程分别为

$$Q_{P1} = C_3^1 Q_{PI} (1 - Q_{PI})^2 = 0.352\ 9$$

$$Q_{P2} = C_3^2 Q_{PI}^2 (1 - Q_{PI}) = 0.073\ 0$$

则可得系统部分故障参数如下:

$$Q_P = Q_{P1} + Q_{P2} = 0.425\ 9$$

由  $FDH = PH \cdot Q_P$  得到由于部分元件故障导致系统减额运行的时间大约是 3 731 h。

根据以上分析还可以计算风力发电系统由于故障减额下的输出功率与系统正常状态下输出功率的比值  $K_P$ :

$$K_P = \frac{2}{3} \frac{Q_{P1}}{Q_P} + \frac{1}{3} \frac{Q_{P2}}{Q_P} = 0.609\ 5$$

4.2 指标统计与计算

将图 7 中的实际风电场输出功率数据按照第 3 节中的指标体系进行统计, 对该风力发电系统可靠性进行评估, 结果如图 8 至图 10 所示。

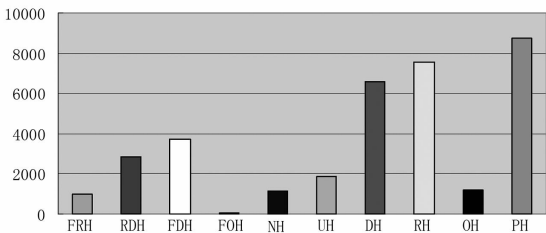


图 8 时间指标结果

从图 8 可以看出, 风力发电系统由于元件故障导致系统全站停运时间最少; 风力发电系统停运时间约为 1 200 h, 占全年的 13.7%; 运行时间远超过停运时间, 说明风电场所处环境和运行状态较好; 系统全额运行时间只占整个运行时间的 13%, 由于风速降低导致系统减额运行时间占运行时间的比例达 87%, 说明本地的风速波动性较大; 年利用小时数仅为 1 882 h, 反映了风力发电系统资源利用效率偏低。

从图 9 可以看出: 风力发电系统全额等效输出功率约占总装机容量的 68.8%, 由于风速降低导致

系统减额等效输出功率占 11% ;由于元件故障导致系统减额等效输出功率占 41.9%,说明风资源的充裕度对风力发电系统的输出功率影响较大。风力发电系统等效输出功率仅占总装机容量的 21.5%,系统统计时间内最大输出功率为 24.485 MW,占总装机容量的 81.6%。

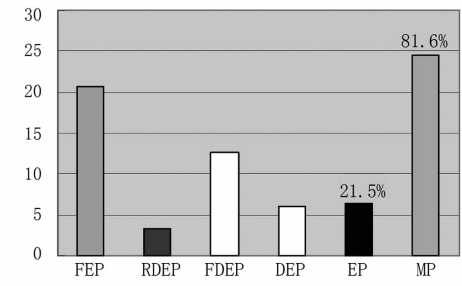


图9 出力状态指标结果

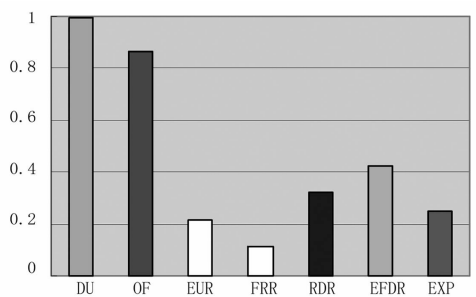


图10 系统总体指标结果

从图 10 可以看出:风力发电系统可用率设计值达到 99.5%,运行系数达到 86.3%,说明风力发电系统的可用率较高;元件故障减额运行率达到 42.59%,这反映了风力发电机组的停运概率偏高,符合风电场实际运行情况。因此,通过提高元件的可靠性是实现降低风电场故障减额运行概率的主要方式之一。年发电设备利用率为 21.48%,暴露率为 24.89%,反映了风能资源的限制造成系统利用能源的效率降低,如果采用变转速风力机组或采用主动式风流动智能控制系统,则可以有效提高风电场暴露率,进一步提高系统可靠性<sup>[15]</sup>。

## 5 结 语

随着风电技术的快速提升,发电成本大幅降低,风力发电的技术优势和经济性将不断显现出来,作为重要的新能源之一,装机容量将不断提高。前面从风力发电系统结构入手,深入研究了基于元件故障和风资源充裕度对风力发电系统可靠性的影响。根据风力发电系统结构特点,按照期望故障受阻电

能相等的方法,用相同容量的发电机来等效替代风电机组“串”,并建立了考虑元件状态和资源约束的系统状态。从时间、出力、系统 3 个方面建立风力发电系统可靠性评估指标体系,并对其进行可靠性评估。算例分析表明,基于元件状态和风资源限制的可靠性模型,可以真实反映实际系统的可靠性。

## 参考文献

[1] Rajesh Karki, Po Hu, Roy Billinton, A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21, (2): 533 - 540.

[2] Francois Vallee, Jacques Lobry, Olivier Deblecker. System Reliability Assessment Method for Wind Power Integration [J]. IEEE Transactions on Power System, 2008, 23 (3): 1288 - 1297.

[3] Ronan Doherty, Mark O Malley. A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems With Significant Installed Wind Capacity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 587 - 595.

[4] 张硕,李庚银,周明,等. 风电场可靠性建模[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 37 - 41.

[5] 吴义纯,丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (12): 70 - 73.

[6] 刘威,赵渊,周家启,等. 计及风电场的发输配电系统的可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32 (13): 69 - 74.

[7] 温敏,张人禾,杨振斌. 气候资源的合理开发利用[J]. 地球科学进展, 2004, 19 (6): 896 - 901.

[8] 梁惠施,程林,刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35 (10): 76 - 81.

[9] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[11] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (15): 18 - 24.

[12] Johan R, Lina M B. Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997 - 2005 [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (1): 167 - 173.

[13] Rajesh Karki, Po Hu. Wind Power Simulation Model for Reliability Evaluation [C]. IEEE CCECE/CCGEI, Saakatoon, 2005.

[14] Ubada J R, Rodriguez G M. Reliability and Production

Assessment of Wind Energy Production Connected to the Electric Network Supply[J]. IEEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 1999, 146(2): 17-19.

[15] 沙非, 马成廉, 刘闯. 变速恒频风力发电系统及其控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 44-47.

(上接第 4 页)

的系统电压稳定性相同;策略 2 采用简化  $L$  指标比采用  $L$  指标计算时间减少 9%。因此采用简化  $L$  指标在满足计算精度的同时能大幅提高效率,更加适应控制策略优化计算的需要。

## 4 结 语

由于分布式电源出力的间歇性和随机性特点,微电网的稳定性和对波动的快速恢复能力较差。上面结合微电网的特点引入简化  $L$  指标计算微电网的稳定性不仅提高了计算速度,更能满足控制策略在线计算的需要。同时所提出的电压控制策略在目标函数中综合考虑了微电网的经济性、稳定性和动态无功备用,并能通过修改目标函数中相应的权重系数可以灵活地适应微电网的不同运行状态。将改进的 IEEE 14 节点系统作为算例进行仿真实验,结果表明提出的控制策略能兼顾微电网的经济性、稳定性和对波动的快速恢复能力,验证了所提方法的有效性。

### 参考文献

[1] 罗剑波,陈永华,刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.

[2] 张谦,廖清芬,唐飞,等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.

[3] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.

[4] 刘天琪,江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 45-50.

[5] 王若松,马平. 基于  $L$  指标的含风电场电力系统无功电压控制[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2016, 31

作者简介:  
张 里(1984), 博士、工程师,研究方向为风电并网运行与控制;  
李红军(1978), 高级工程师,研究方向为电力系统安全风险评估。

(收稿日期:2018-01-01)

(1): 73-77.

[6] 贾宏杰,孙晓彦,张沛. 基于  $L$  指标的电压稳定约束下的最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, (1): 34-38.

[7] 陈厚合,李国庆,姜涛. 计及静态电压稳定约束的交直流系统可用输电能力[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 75-81.

[8] 姜涛,李国庆,贾宏杰,等. 电压稳定在线监控的简化  $L$  指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 13-18.

[9] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the Voltage Stability of a Power System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(3): 346-354.

[10] 张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.

[11] 张海鹏,林舜江,刘明波,等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.

[12] 孙全才,程浩忠,张健,等. 提高暂态电压安全水平的动态无功备用优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2718-2725.

[13] 王运. 新能源发电优先调度评价技术的研究与应用[D]. 北京:华北电力大学, 2016.

[14] 徐峰达,郭庆来,孙宏斌,等. 基于模型预测控制理论的风电场自动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 59-67.

[15] 卫志农,季聪,孙国强,等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95.

作者简介:  
刘保磊(1992), 硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;  
钟 俊(1972), 博士、副教授,研究方向为电力系统中的信号与信息处理、嵌入式系统等。

(收稿日期:2018-01-10)

# 一种 SCD 层次信息集成可视化系统开发研究

廖小君<sup>1,2</sup>,吕飞鹏<sup>3</sup>,黄忠胜<sup>1</sup>,韩花荣<sup>1</sup>,章志刚<sup>1</sup>,张 里<sup>1</sup>,王晓茹<sup>2</sup>,郑永康<sup>4</sup>

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心,四川 成都 610072; 2. 西南交通大学,四川 成都 610031;  
3. 四川大学,四川 成都 610065;4. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

**摘 要:**介绍了目前智能变电站 SCD 配置工具的发展情况,重点分析了目前 SCL 配置工具在层次信息可视化功能方面存在的问题,针对通用的 SCD 配置工具可视化功能较弱,可视化系统局限于虚端子可视化,而不能体现智能变电站信息层次结构的问题,利用层次信息集成可视化技术,将 SCD 文件的层次结构、IED 模型层次和智能变电站三层两网的物理层次结合起来,提出了一种具有良好层次信息架构、集成化的、多层次的 SCD 可视化展示系统。该可视化系统还可将 IED 设备有关图片和二次设计图纸关联整合,便于检修调试运维人员更好地使用和理解 SCD 文件。  
**关键词:**智能变电站;SCD;层次信息;可视化  
**中图分类号:**TM764 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0012-06

## Research on a Visual System for SCD Hierarchical Information Integration

Liao Xiaojun<sup>1,2</sup>, Lv Feipeng<sup>3</sup>, Huang Zhongsheng<sup>1</sup>, Han Huarong<sup>1</sup>,  
Zhang Zhigang<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1</sup>, Wang Xiaoru<sup>2</sup>, Zheng Yongkang<sup>4</sup>

(1. Skill Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, Sichuan, China;  
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China ;  
3. Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;  
4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institution, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:**The development of SCD configuration tool of smart substation is introduced, and the problems existing in visual function of SCL configuration tools are analyzed. Because the hierarchical visualization function of general SCD configuration tools is weak, the visualization function is limited to virtual terminal visualization and cannot reflect the problems about the hierarchical relationship of smart substation information, a kind of SCD display system which has a good level of information architecture, integration and multiple levels is put forward. By using the hierarchical information integration visualization technology, the structure of the SCD file, the IED model and the physical structure of smart substation are combined together. The visual system will integrate the related images with the re-designing drawings of IED device, which is easy for the commissioning, operation and maintenance personnel to have a better use and understanding of SCD files.  
**Key words:**smart substation;SCD;hierarchical information; visualization

### 0 引 言

智能变电站技术是近年大力发展的电力新技术,作为智能变电站技术的重要核心内容,SCD 文件是非常重要的一个描述智能变电站全站配置信息的

项目资助:国网四川省电力公司 2016 年科学技术项目“新一代智能变电站全数字可视化仿真系统研究”(川电发展 2016 年 6 号文)

文件。全站通信配置以及 IED 设备配置信息均包含在 SCD 文件中,许多系统集成商也开发了相应的配置应用工具,即 SCL 配置工具<sup>[1-3]</sup>,用于对 61850 系统建模,导入相关 ICD 模型文件,并进行系统配置,最终生成 SCD 文件并提供相应的规范、规则校验<sup>[4]</sup>。随着智能变电站二次系统设计开发一体化的需求,结合 SCD 配置生成、端口配置、虚端子可视化、图纸设计等一体化的配置工具成为近年来的研



究热点<sup>[5-8]</sup>。这类工具目前仅局限于厂家技术人员开发维护使用,往往针对厂家设备平台进行开发,不具有通用性。

在 SCD 可视化研究工作方面,主要集中在建模可视化和虚端子可视化研究上。文献[9]对目前 SCD 可视化进行了介绍,并针对可视化中忽视压板问题进行了改进,将二次回路可视化进行了实用化处理。文献[10]对虚端子可视化进行了深入研究,开发了基于间隔的信息流的展示方式。文献[11]进行了基于装置的虚回路可视化设计,在调试时提高了应用的方便性。文献[12]从多视角出发对多 IED 之间虚连接的可视化进行了研究。文献[13]不仅实现了配置信息的可视化,还对实时运行信息的可视化进行了尝试。目前的 SCL 配置工具的可视化主要针对虚端子的可视化、SCD 文件管控的可视化<sup>[14]</sup>、SCD 文件对比可视化等,而对于 61850 的层次信息关系并没有很好地进行展示。对于 SCD 文件而言,本身采用 XML 语言,其建模本身具有很强的层次关系,因此采用最新的层次信息可视化技术应用于 SCD 文件的可视化是一种很好的可视化方法。针对前述目前的 SCD 应用工具不具备专门的可视化展示功能,以及可视化缺乏层次结构的缺点,下面提出一种具有良好层次信息架构、集成化的 SCD 层次信息集成可视化系统,它能多层次地显示 SCD 系统层次及 IED 装置完整模型层次信息、虚端子连接层次信息,便于调试运维人员更好地使用和理解 SCD 文件及 IED 模型和虚端子信息。

## 1 目前 SCD 可视化系统问题分析

目前现有的 SCD 应用工具针对设计、开发人员使用较多,并不针对变电站检修调试运维人员,因此对于智能变电站检修调试、运维人员其实用性不强。

其次,现有的 SCD 应用工具不能够将智能变电站实际装置、端口和 SCD 虚回路对应起来,实用功能弱。

而在可视化方面存在的主要问题有:对于一些厂家和设计院采用 AutoCAD 或者其他图形工具开发的 SCD 可视化软件,实现了可视化的 SCL 配置、对比和校验,并具有图形化的虚端子可视化等功能,但可视化主要在于配置信息和连接信息的可视化,

隐藏了许多 61850 体系在调试、维护时所需要的相关信息,尤其 61850 模型的层次信息。

## 2 SCD 层次信息集成可视化系统实现方法

### 2.1 SCD 的层次信息结构分析

层次信息能更好地帮助理解事物。层次结构描述为树(结构),是图的一个特例,它除了包含从属关系以外,其结构也可以表示逻辑上的承接关系。层次结构的数据可存储两类信息,一是结构信息,二是内容信息<sup>[15]</sup>。结构信息由层次结构的亲子关系构建,而内容信息则包含在节点中。对于变电站的 SCD 文件结构本身就是一个 SCL 模型树,其文件结构如图 1 所示。

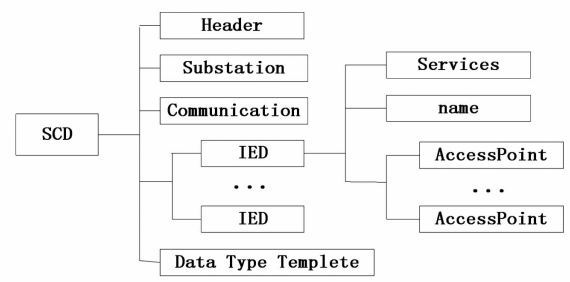


图 1 SCD 文件结构

由图 1 可见,一个典型的 SCL 模型文件树包括 header、substation、communication、IED 等几个部分。其中层次信息最核心的是 IED 部分,共包括 5 个层次,这也是 SCD 文件系统应重点解析并进行可视化的部分。

不仅 SCD 文件结构是层次化,61850 标准的一个突出特点是提出了变电站的信息分层概念,即变电站自动化系统分为站控层、间隔层和过程层等,并通过站控层网络和过程层网络进行连接,构成工程人员熟悉的“三层两网”的信息分层模式。对 SCL 模型树和信息分层结构进行比较,SCL 模型树包含的通信信息包括全网通信配置,如 MMS 网络、SV 网、GOOSE 网的基本信息和相关的通信 IP 地址和 MAC 地址分配等;三层两网根据信息流的交换,分为站控层网络和过程层网络,一般 MMS 网络为站控层,SV 网和 GOOSE 网属于过程层。对于 IED 模型,SCL 模型树并未区别某个 IED 设备属于站控层或者过程层及间隔层,对于“三层两网”的信息分层结构

而言,一般测控、保护、自动装置等属于间隔层,合并单元和智能终端属于过程层。按照三层两网的信息分层结构能更清楚展示信息在间隔层之间、过程层之间以及各层间相关信息交换的信息流和相应的信息接口。因此对于分层信息集成可视化可以考虑将二者有机地结合起来。

对于 IED 的建模是 61850 面向对象建模技术的核心部分,其模型本身也是采用分层的结构化的类模型。其模型信息包含 5 个层次:Server(服务器)、Logical Device(逻辑设备)、Logical Node(逻辑节点)和 DATA(数据)以及 DA(Data Attribute)数据属性。现场调试运维人员一般关心到 LD 逻辑设备这个层次以及包含的相应的数据集信息、控制信息、输入和输出信息,对于更具体的逻辑节点及属性信息并不太关心,典型的分层信息模型示意如图 2 所示。

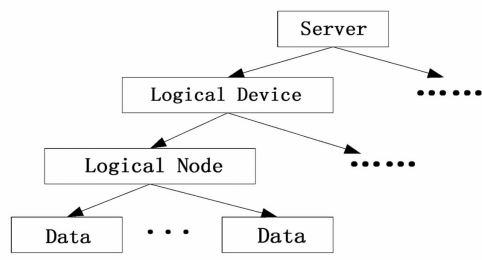


图 2 IED 的分层信息模型

这里将重点对这些结构信息和内容信息及层次关系和相应的逻辑联系进行可视化集成显示。

## 2.2 SCD 的层次信息集成可视化方法

如何对层次信息进行可视化是数据可视化技术中一个很重要的研究内容,由于层次可视化技术在层次结构认知与分析方面具有不可比拟的优越性,它逐渐成为信息时代人们分析和驾驭层次信息的有力工具。层次可视化不是简单地对层次结构进行图形映射,而是要忠实美观地反映层次信息的结构信息和内容信息<sup>[15]</sup>,因此 SCD 文件的可视化系统应兼顾结构信息和内容信息的展示。

层次可视化不仅能改善用户对层次结构数据及数据项之间关系的理解,同时能够辅助信息的操纵。因此,在信息认知阶段,层次可视化技术作为有效的抽象信息展现工具,被广泛应用于辅助理解和分析层次结构数据集。对于 SCD 可视化系统而言,通过进行层次可视化技术处理能更好地帮助调试运维人员掌握 61850 的信息层次结构。

层次可视化技术采用的方法一般包括节点连接

法(空间树、双曲树、径向树等)和空间填充(树图、圆形嵌套、径向填充等)两种基本方法,结合两种基本方法可构成混合法(弹性层次、层次网等)<sup>[15-17]</sup>。由于 SCD 文件系统本身就是一个树结构的文件系统,因此可以直接采用上述的各种层次可视化技术。XML spy 就是一种以树图形式展示 SCD 文件结构的软件工具,而目前的 SCL 配置工具几乎都会采用节点连接法进行 SCD 文件的展示,只是不同工具显示的层次结构和信息有所侧重而已。对于单纯采用空间填充法,由于难以很好兼顾 SCD 的结构和内容信息,所以一般都不采用。一些 SCL 配置工具在具体某个层次进行详细展示时,会采用表格形式或者 Tab 形式展示具体数据内容或者虚端子可视化连接<sup>[10]</sup>,这种方式类似混合法。无论单一的节点连接法或者混合法,由于都单纯针对 SCD 文件系统本身,所以不能体现智能站信息分层结构,同时 IED 在这个体系下相关的数据和接口信息层次也无法展示。

SCD 层次信息可视化设计目标主要应包含以下 4 个方面<sup>[14]</sup>:

1) 可视化结果显示在适当位置,能够概览整体结构和辨认层次结构的特征信息。SCD 文件采用树结构对于 IED 的层次结构显示过于复杂,而且不能体现不同的 IED 的不同层次结构特点,如间隔层和过程层的 IED 其服务器配置和 LD 配置以及接口都有不同特点,保护和测控也有区别。将智能变电站的三层两网结构和 SCD 文件的层次结构结合起来,将便于辨认层次结构的特征信息,智能站的网架特征为:点对点、直跳、信息流的不同特征以及 SCD 文件的架构特征、物理逻辑设备、抽象设备、逻辑节点等。

2) 清晰展示层次结构,同时对关心的属性进行合理显示,易于详细观察细节信息。对于 SCD 文件的层次信息可视化系统而言,如前所述重点展示通信和 IED 部分,IED 层次结构重点在前三层。

3) 拥有人机友好的导航交互机制,浏览过程中保持上下文信息,有效防止迷航。对于 SCD 文件系统而言,采用集成可视化能较好地进行导航交互,并应采用树形工具、鸟瞰图、上下文焦点等交互方式。

4) 可视化结果具有一致性,通过经常使用能轻松辨识在可视化结果的任何区域找到针对任务的特

定信息,采用图形化的界面,同时采用混合法及适当的节点层次配以表格或者子图能够更好地进行展示。

2.3 IED 的层次可视化模块具体实现

SCD 文件中最复杂的 IED 部分,具有 5 个层次,重点展示服务器、逻辑设备及相应的数据集和输入输出。将 SCD 文件和三层两网的结构结合起来,首先需要对 IED 进行分类,由于 SCD 文件中并没有 IED 类型划分,这里采用根据 IED 包含的 LD 类型进行划分,分为保护 IED、测控 IED、保护测控 IED、合并单元 IED、智能终端 IED、其它类型 IED 等 6 大类,并将保护、测控和其他 IED 放于间隔层,智能终端和合并单元 IED 放于过程层,这样便于展示不同层间以及同层间的 SV 信息、GOOSE 信息流。采用分类后,在树形结构的 SCD 文件中还便于统计保护、测控、智能终端及合并单元等数量,也便于分类进行查找和导航。当然根据实际需要还可以对保护按照保护类型进行分类,如线路保护、变压器保护、母线保护等等,而合并单元和智能终端也可细分。

IED 层次可视化模块处理流程如图 3 所示:首先对于每个 IED 设备,对于解析出的通用信息将名称、描述、版本等主要实用性信息以标题栏方式进行直观显示。为加强可视化效果,在该部分可以关联该 IED 实际物理设备图片。

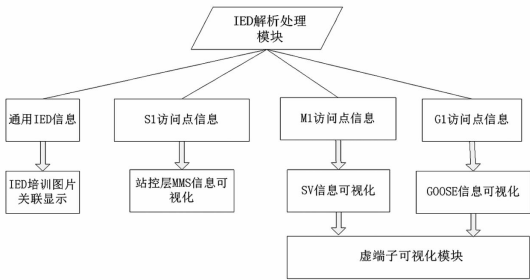


图 3 IED 层次可视化模块处理流程

其次,根据 IED 解析出的模型的第 1 个层次——访问点进行图形化,包含 S1 部分,则进行 S1 访问点信息处理,由于 S1 访问点对应的 MMS 接口的相关内容属于与站控层通信的相关信息,所以将该部分放入站控层进行展示;包含 M1 和 G1 访问点的,进行 M1 和 G1 访问点处理,并将该部分放入过程层进行展示。对于每个服务器所包含的 LD 逻辑设备,采用动态扩展的方式显示各 LD 逻辑设备。将解析出的 LD 所包含的数据集以列表方式进行显

示,并标明所包含的数据集数目。由于每个数据集的具体内容非常多,当选中某个数据集时在相应的图形底部以表格形式展示。对于 M1 和 G1 访问还包含虚端子信息,调用虚端子连接可视化模块进行处理。

对于一些检修调试人员,可能会更详细深入了解到逻辑节点和属性这两个层次,为此,增加采用弹性层次可视化方法,在逻辑设备层次增加子表格方式进行显示。

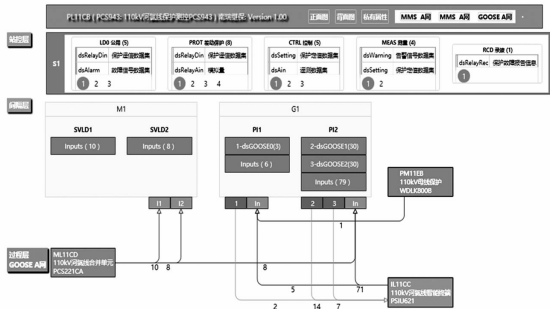


图 4 IED 层次信息可视化显示

经过层次可视化处理后的 IED 模块层次信息图形可视化显示如图 4 所示。

2.4 SCD 文件的通信连接可视化具体实现

目前的 SCD 工具都没有对通信连接进行可视化处理,即使设计院的 SCD 配置工具也主要以虚端子可视化为主,不涉及通信部分,而现场调试运维人员对于通信部分是很关心的,包括网段配置、IP 配置等,因此有必要进行通信部分的可视化。

SCD 文件通信部分层次很简单,包含子网及连接的 IED 通信配置,但并不包括交换机配置。实际工作中,现场人员还需了解实际物理网络配置,因此所考虑的通信可视化还增加了按照交换机进行可视化展示,但需手动进行配置,不能自动展示。对于 SCD 的文件通信部分采用子网和网段进行连接自动显示,并对不同 IED 按照前述分类方法用不同颜色标注,非常直观,如图 5 所示。

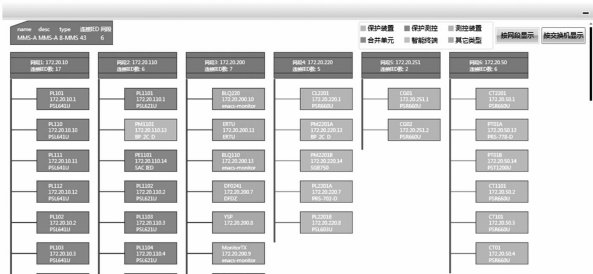


图 5 通信连接层次信息可视化显示

2.5 SCD 的三层两网模式层次信息集成可视化实现

层次信息进行集成可视化将会有更好的效果<sup>[19]</sup>,为便于进行良好的人机交互,同时更好地展示层次信息,将 SCL 模型树、IED 层次模型、虚端子连接、通信网络层次进行集成可视化,导航和信息展示、信息层次更为直观。SCD 可视化系统层次化处理方法及流程图如图 6 所示。

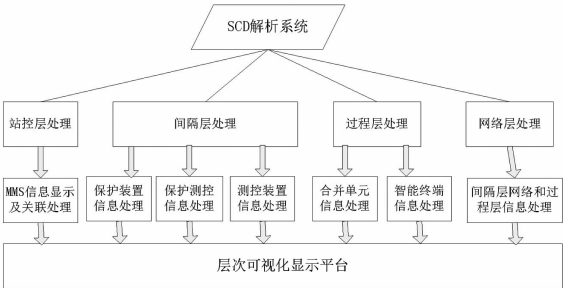


图 6 SCD 层次信息集成可视化流程

首先将全站的 IED 设备根据前述方法分类的结果,如 IED 类型为保护、保护测控或测控装置则归为间隔层设备进行处理,并在间隔层分 4 类显示:保护、保护测控、测控和其他。如 IED 类型为合并单元和智能终端则归为过程层设备进行处理,并在过程层分 2 类显示:合并单元、智能终端。

网络层的处理:根据解析出的 IED 的设备通信信息,将各 IED 设备所属网络进行通信参数显示,展示网络总体组成和包含的 IED 设备。

层次化集成显示:总体展示包含站控层、间隔层、过程层,分别显示如前所述信息;站控层和间隔层间布置间隔层网络(MMS 网络信息展示);过程层设备和间隔层间布置过程层网络(GOOSE 网络和 SMV 网络信息展示)。集成化界面为 SCD 文件树,采用上述设计方法的三层两网总体布局效果如图 7 所示。

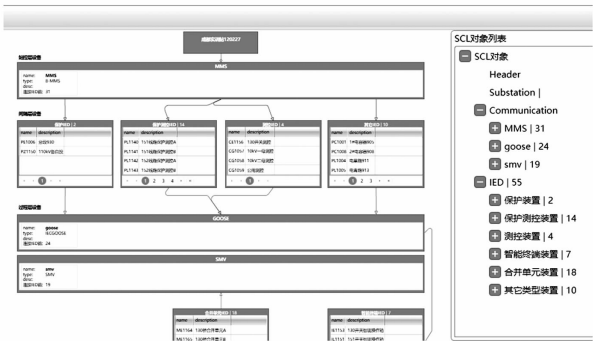


图 7 三层两网层次信息集成可视化

3 SCD 层次信息集成可视化系统的实现架构

根据如前所述的层次信息集成可视化系统主要由矢量图形平台、SCD 文件读取系统、SCD 文件解析系统、层次可视化集成显示系统、IED 层次可视化、虚端子连接可视化、通信连接可视化系统构成。系统结构如图 8 所示。

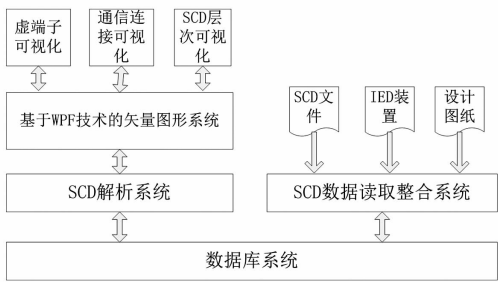


图 8 SCD 层次可视化系统架构

4 系统不足及解决方法

可视化的 SCD 层次信息集成可视化系统体现了智能站层次化的特点,该系统的主要不足是系统展示主要以单个 IED 设备为主,包括相应的虚端子回路的可视化展示,而实际现场应用中,现场人员习惯于按照间隔(如线路、变压器、母线等)进行查看、分析。解决方法是系统增加按照间隔显示的层次化信息,并将信息流进行可视化展示,可借鉴类似设计院间隔 GOOSE 信息流的架构进行可视化展示<sup>[8]</sup>,后续将对间隔的层次信息可视化进一步深入研究。

该层次信息集成可视化还可以针对更多人员类型进行不同的视图切换。可以集成查看比对技术、进行相关模型信息统计分析可视化,结合数据挖掘技术进行建模优化等在 SCL 配置工具中应用层次信息集成可视化配置系统。该系统未考虑对 SCD 文件中的 SSD 部分进行可视化展示,可以利用 SVG 技术与 SCL 组合<sup>[19]</sup>实现一次部分的可视化。

5 结论及展望

所提出的一种 SCD 层次信息集成可视化系统充分结合了 SCD 文件系统的层次性、IED 的层次模

型以及智能变电站信息分层处理的特点,利用层次信息可视化集成技术,按照三层两网的架构对 SCD 文件进行总体层次化处理,在对 IED 进行实用化层次分类基础上进行层次化信息处理,并实现了通信连接可视化及现场资料资源关联,开发出了一套实用的 SCD 层次信息集成可视化系统。该系统成功应用于四川省电力公司智能变电站竞赛和考核,取得了良好效果,并集成于新一代智能变电站仿真培训系统中<sup>[20]</sup>。所提出的 SCD 文件层次信息可视化的处理方法对于 SCL 配置工具也有很大的借鉴意义,能够提升 SCL 一体化配置工具的可视化水平。

参考文献

[1] 尹晨,笃峻. SCL 配置工具可视化实现方案[J]. 软件导报,2012(5):7-10.

[2] 王炎初,胡剑锋,陆鑫,等. 一个可视化 SCL 配置工具 Visual SCD[C]. 中国电机工程学会第十届青年学术会议,吉林,2008:1871-1875.

[3] 王德文,朱永利,邱剑,等. 一种改进的 SCL 系统配置工具[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):75-79.

[4] 梅德冬,樊瑞,周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(3):131-136.

[5] 孙一民,裘愉涛,杨庆伟. 智能变电站设计配置一体化技术及方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):70-74.

[6] 笃峻,叶翔,王长瑞,等. 智能变电站设计配置一体化功能规范研究及工具开发[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):85-89.

[7] 叶翔,刘辉,周永忠. 智能变电站图模一体化设计软件实现方案[J]. 电力工程技术,2014,33(3):41-44.

[8] 修黎明,高湛军,黄德斌,等. 智能变电站二次系统设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(22):124-128.

[9] 严浩军,姚勤丰,许欣. 智能变电站二次回路可视化研究与应用[J]. 浙江电力,2015(9):6-9.

[10] 高亚栋,朱炳铨,李慧,等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):124-127.

[11] 刘蔚,杜丽艳,杨庆伟. 智能变电站虚回路可视化方

案研究与应用[J]. 电网与清洁能源,2014,30(10):21-37.

[12] 刘明忠,童晓阳,郑永康,等. 智能变电站配置描述虚端子多视角图形化查看系统[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):104-109.

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

[14] 熊华强,万勇,杜小智,等. 智能变电站 SCD 文件可视化管理和分析决策系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):166-171.

[15] 肖卫东,孙扬,赵翔,等. 层次信息可视化技术研究综述[J]. 小型微型计算机系统,2011,32(1):137-146.

[16] 周宁,陈勇跃,金大卫. 大型层次化信息的可视化方法研究[J]. 中国图书馆学报,2007,33(4):64-67.

[17] 杨彦波,刘滨,祁明月. 信息可视化研究综述[J]. 河北科技大学学报,2014,35(1):91-102.

[18] 何杨,李伟波,胡维平. 层次信息可视化集成技术的应用[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(10):90-95.

[19] 唐昆明,龙泓吉,张太勤. 一种基于 SVG 的 SSD 文件生成新方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(21):120-125.

[20] 何志鹏,郑永康,李迅波,等. 智能变电站二次设备仿真培训系统可视化研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):111-116.

作者简介:

廖小君(1974),硕士、讲师,从事电力系统继电保护方面及信息系统的研究;

吕飞鹏(1968),博士、教授,从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统的研究;

黄忠胜(1982),硕士、讲师,从事继电保护和智能变电站技术研究工作;

韩花荣(1981),硕士、讲师,研究方向为继电保护及其自动化;

王晓茹(1962),博士生导师,研究方向为电力系统保护和稳定控制;

郑永康(1977),博士、高级工程师,主要研究方向为变电站继电保护、自动化、通信。

(收稿日期:2017-12-08)

# 一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别方法

唐 伦<sup>1</sup>, 史华勃<sup>1</sup>, 袁 川<sup>2</sup>, 丁理杰<sup>1</sup>, 周 波<sup>1</sup>

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

**摘 要:**电力系统拓扑自动识别是电磁暂态自动建模的重要基础。针对现有拓扑识别方法大多局限于单层拓扑描述的不足,结合电磁暂态自动建模进行厂站模块化封装的实际需求,提出一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别算法,实现了基于电网主流仿真数据的“站间拓扑+站内拓扑”自动分层识别。首先给出了算法原理及实现细节,然后利用 CEPRI 36 节点算例及某实际省级主网数据对算法进行测试,验证了算法的正确性及有效性。研究表明,该算法可直接应用于省级复杂电力系统的拓扑自动生成及可视化建模工作。

**关键词:**电力系统拓扑; 分层识别; 孤岛搜索; 可视化建模

**中图分类号:**TM713 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0018-06

## Hierarchical Identification Method for Power System Topology Based on Islanding Search

Tang Lun<sup>1</sup>, Shi Huabo<sup>1</sup>, Yuan Chuan<sup>2</sup>, Ding Lijie<sup>1</sup>, Zhou Bo<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Automatic identification of power system topology is an important foundation for automatic electromagnetic transient modeling. Traditional algorithms for power system topology identification are limited to single tier description, which cannot meet the demands of modular modeling. Therefore, a new hierarchical identification method for power system topology based on islanding search is proposed. This method provides an approach for automatic hierarchical identification of "inter-station topology + in-station topology" based on mainstream simulation data for power system analysis. The algorithm principle and details are given firstly, and then the algorithm is tested on CEPRI 36 nodes system using an actual grid simulation data of a certain province, which proves to be correct and effective. The proposed algorithm can be used directly in automatic topology generation and visual modeling of complex power system in province scale.

**Key words:** power system topology; hierarchical identification; islanding search; visual modeling

### 0 引 言

电力系统拓扑自动识别是电力系统拓扑自动布局、自动可视化建模等工作的重要基础,也是机电-电磁暂态仿真数据自动转换的关键技术之一。相关文献<sup>[1-6]</sup>从不同的应用层面与角度对电力系统拓扑识别方法进行了深入的研究,现有方法主要包括图论搜索法、邻接矩阵法与两者的结合算法。文献[1]提出一种新的 LU 矩阵分解算法。然而这些方法均是根据隐含电网全拓扑信息的邻接矩阵或节点-支路关联矩阵直接进行拓扑分析,并未区分站内

拓扑和站间拓扑,不能满足电磁暂态模块化建模的需求。而目前国内实际电网维护的主流仿真数据(如 PSASP、BPA、PSDB 数据等)中,为模拟变电站内部接线(如 3/2 接线、双母线接线、三绕组变压器等),往往存在数量庞大的短接线及站内节点,这使得数据节点规模急剧增大。一个中等规模的省级主网(220 kV 及以上)节点数可达 1 500~2 000 个。若直接进行拓扑识别,将使得拓扑结构复杂交织,难以清晰布局,且无法区分站间连接和站内连接。在进行机电-电磁暂态仿真数据自动转化时,也无法利用主流电磁暂态仿真软件(PSCAD/EMTDC、EMTP、HYPER-SIM 等)的模块化建模功能,极大影响计算和

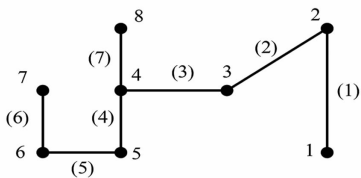
分析速度。

针对上述问题,提出一种电力系统拓扑分层识别的方法,基于电网潮流基础数据,自动进行数据文件的解构分析,并利用图论搜索的方法,将全网节点自动聚类为若干厂站站点,进而分层次给出厂站站点之间和站内元件之间的拓扑连接关系。下面首先给出一种基于图论的孤岛搜索方法,在此基础上提出基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别方法,最后分别用36节点系统和某省实际电网数据对所提算法进行测试和分析。

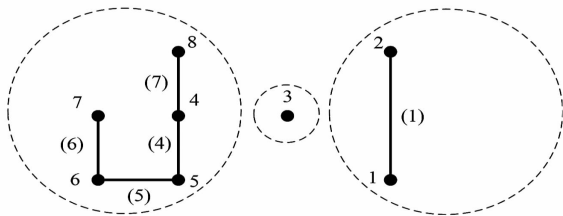
## 1 基于图论的孤岛搜索方法

基于图论的孤岛搜索方法是所提算法的核心模块,先以图1的简单图例说明该方法。

如图1(a)所示,图GA是1个具有8个节点、7条支路的连通图,若移走其中支路(2)和支路(3),如图1(b)所示,原图将解列成3个互不相通的独立部分,即形成3个孤岛,称其为图GB。



(a) 图GA



(b) 图GB

图1 简单图形成孤岛示意

对图GB中的节点进行遍历搜索,即可获得每个孤岛所包含的节点成员。图GB的邻接矩阵B如下所示:

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

根据邻接矩阵B,从节点1开始,依次遍历搜索每一个节点至图中其他7个节点全部可能的连通路经。搜索步骤如下:

1)初始待搜索节点表置为{1,2,3,4,5,6,7,8}。

2)对节点1进行遍历搜索。搜索发现节点1仅通过路径“1-2”与图内其他节点连通,故路径中相异节点{1,2}构成孤岛1。

3)待搜索节点表中删除孤岛1的成员节点,更新为{3,4,5,6,7,8}。

4)对节点3进行遍历搜索。搜索发现节点3不与图内其他任意节点连通,为孤立节点,其本身{3}构成孤岛2。

5)待搜索节点表中继续删除孤岛2的成员节点,更新为{4,5,6,7,8}。

6)对节点4进行遍历搜索。搜索发现节点4与图内其他节点之间存在以下4条可能路径:“4-5”、“4-5-6”、“4-5-6-7”、“4-8”,由于可能路径上的所有节点均相互连通,故取4条路径上所有相异节点{4,5,6,7,8}构成孤岛3。

7)待搜索节点表中继续删除孤岛3的成员节点,待搜索节点清空,搜索结束。

可见,对于图1中的简单图GB,通过对节点1、节点3、节点4的遍历搜索,即可生成图中所有孤岛集合的成员信息。对于含任意多孤岛及环网的复杂网络图,节点路径的遍历搜索可用深度优先搜索(depth-first search, DFS)的方法完成,DFS的具体方法实现参见文献[7],此处不再赘述。根据实际电网搜索规模大且孤岛内节点数存在上限的特点,通过对常规DFS算法设置适当的路径长度上限值来限制路径搜索的长度,以避免搜索陷入深度无限,提高搜索效率。

## 2 基于孤岛搜索的拓扑分层识别方法

在第1节基础上,结合实际电网仿真数据特征,给出基于孤岛搜索的拓扑分层识别方法原理及实现细节。

一般地,电网潮流计算数据确定的拓扑本质上是包含了电网所有节点连接关系的单层拓扑结构,称其为全拓扑结构,表征全拓扑结构的支路表称为全拓扑支路表。若忽略潮流方向,全拓扑结构可抽象为一个仅含节点和支路的无向图,其中节点对应

电气母线,支路对应交流线、短接线、变压器、串(并)联电容(抗)器等电气元件。正常情况下,由于潮流在全网中按物理特征自然分布,全拓扑结构的图是连通的。电网拓扑结构的分层识别,即是从全拓扑结构中挖掘信息,实现厂站站点的自动辨识,并在此基础上同时完成厂站站点之间和厂站内部接线两个层次的拓扑识别。

由于实际厂站站点之间一般均通过输电线路相连,故可将输电线路视为站间设备,而短接线及其他电气元件均视为站内设备。若能从全拓扑支路表中筛选出站间支路(输电线路)并将其移除(移除支路、保留节点),则原来连通的拓扑图就变成了若干孤立的子图,这些子图是由单节点或由若干节点-支路构成的孤岛,称其为孤岛结构图。显然,一个孤岛就对应一个厂站站点,其中单节点孤岛对应单母线站点,这类站点是因原始数据未对站内拓扑详细建模而存在;而多节点-支路孤岛对应多母线站点,站点内存在短接线、变压器、低压电抗(容)器等元件连接形成的站内拓扑。

利用第 1 节给出的图论搜索方法对孤岛结构图进行遍历搜索,可搜索出图中所有的孤岛(站点)及每个孤岛(站点)内的成员节点,从而将全拓扑中的所有节点映射到特定的厂站站点,形成节点-站点对应表,实现厂站站点搜索及全拓扑节点聚类;在此基础上,根据节点聚类结果,将全拓扑支路表中的所有节点名替换为站点名并删除两侧站点名相同的支路,即可形成表示站点之间连接关系的邻接矩阵<sup>cs</sup>A,从而完成站间拓扑识别。

对于站内拓扑,由于站内元件种类较多,要完整描述站内接线,除需给出节点之间的连接关系以外,还需判别每条支路代表的元件类型,故需要利用拓扑搜索及支路类型解析形成含支路类型的邻接矩阵<sup>in</sup>A,以此对站内拓扑进行完整描述。

以上是算法的核心思想,下面从潮流数据解构分析、厂站站点搜索及站间拓扑识别、厂站站内拓扑识别与描述 3 个方面给出算法的具体实现步骤。

2.1 潮流数据的解构分析

潮流数据的解构分析是所提算法的基础,其目的是从仿真数据中得到全拓扑支路表,并根据支路特征信息(如支路阻抗)判别每条支路的元件属性。实际仿真数据中,为方便数据管理,全拓扑信息往往

分散在不同的数据表中。以电力系统仿真综合程序(PSASP Version 7.21)为例,要构造基于潮流的全拓扑支路表,需拼合潮流数据中的“交流线数据表”“变压器数据表”“直流线数据表”等数据表的节点-支路关联信息。如图 2 所示,取上述 3 个数据表中支路的有效标志(Valid)、i 侧节点名(iNode)、j 侧节点名(jNode)、支路编号(brnNum),即可构造完整的全拓扑支路表,若在支路表中增加关键词“支路类型(Type)”,即形成带类型标记的全拓扑支路表。

| Type   | Valid  | iNode | jNode | brnNum |
|--------|--------|-------|-------|--------|
| 交流线数据表 | Acline |       |       |        |
|        | Cmp    |       |       |        |
|        | .....  |       |       |        |
| 变压器数据表 | Tw2    |       |       |        |
|        | Tw3    |       |       |        |
|        | .....  |       |       |        |
| 直流线数据表 | Dcline |       |       |        |
|        | .....  |       |       |        |

图 2 带类型标记的全拓扑支路表结构

标记全拓扑支路表中每条支路的类型可通过对原始数据表的解构来实现。直流线数据表中仅含直流输电线路,其中的支路可全部标记为直流线(Dcline);变压器数据表中含有两绕组变压器支路和三绕组变压器支路两类,可根据同一变压器的支路数来标记两绕组变压器支路(Tw2)和三绕组变压器支路(Tw3);而交流线数据表则可能含交流输电线、短接线、高压并联电抗器、高压并联电容器(换流站交流滤波器)、低压并联电容器、低压并联电抗器、高压串联电容器(串补)、高压串联电抗器(串抗)等多种元件,需充分利用基础数据不同元件的建模特点及支路特征信息,对数据表进行解构。仍以 PSASP 数据为例,给出一组交流线数据表解构原则:

- 1) 若 iNode = jNode, 则初步判定为并联补偿装置,可进一步根据阻抗值的正负及关联母线电压等级来判定其是容性还是感性,是高压还是低压;
- 2) 若 iNode ≠ jNode, 则初步判定为交流输电线路或串联电容、串联电抗器,可通过线路阻抗参数的大小和正负来做进一步判断。

通过潮流数据的解构分析获得的带类型标记的全拓扑支路表,是后续站点搜索及拓扑识别的重要结构。根据该表,易得描述全拓扑结构的邻接矩阵<sup>all</sup>A。

2.2 厂站站点搜索及站间拓扑识别



如图 3 所示,从带类型标记的全拓扑支路表中删除所有交流输电线路及直流输电线路支路(站间设备),即得到孤岛支路表。

|            | Type   | Valid | iNode | jNode | brnNum |
|------------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 交流线<br>数据表 | AcLine |       |       |       |        |
|            | Cmp    |       |       |       |        |
|            | .....  |       |       |       |        |
| 变压器<br>数据表 | Tw2    |       |       |       |        |
|            | Tw3    |       |       |       |        |
|            | .....  |       |       |       |        |
| 直流线<br>数据表 | DcLine |       |       |       |        |
|            | .....  |       |       |       |        |

图 3 由全拓扑支路表构造孤岛支路表

孤岛支路表去除了拓扑中的站间联系,仅保留多母线站点的站内节点和支路,可根据孤岛支路表形成邻接矩阵,利用图论搜索算法求取图中孤岛,从而获得多母线站点内部节点。如站点内部存在发电机节点,则站点判定为发电厂,否则为变电站。而由于删除站间支路的同时也删除了支路两端的节点,孤岛结构图中的孤立节点也随之删除,因此单母线站点需另行给出。显然,在全拓扑支路表中存在而在孤岛支路表中不存在的节点,即为单母线站点。

| Station   | baseV | Type  | sNum  | NodesContained            |
|-----------|-------|-------|-------|---------------------------|
| SA500 kV站 | 525   | 变电站   | 1     | SA500-1, SA500-1B, SA66-1 |
| GenA 电厂   | 230   | 发电厂   | 2     | GenA1#, GenA2#, GenA230   |
| .....     | ..... | ..... | ..... | .....                     |

(a) 站点信息表

| 原始节点名     | 对应站点名     |
|-----------|-----------|
| Node      | Station   |
| SA500-1   | SA 500kV站 |
| SA 500-1B | SA 500kV站 |
| SA66-1    | SA 500kV站 |
| .....     | .....     |

(b) 节点 - 站点对应表

图 4 站点信息表及节点 - 站点对应表

完成所有站点信息的搜索后,根据特定规则对站点进行自动命名,即可形成如图 4(a)所示的站点信息表和图 4(b)所示的节点 - 站点对应表。其中,站点信息表给出了所有站点的站点名、最高电压等级、站点类型、站点编号及站内节点;节点 - 站点对应表给出了每一个原始节点与站点的映射关系。

查询节点 - 站点对应表,将全拓扑支路表中所有节点名替换为站点名,并删除两侧站点名相同的支路,即可形成站间拓扑支路表,根据站间拓扑支路表可直接获得表示站点之间连接关系的邻接矩阵<sup>ex</sup>A。

$$^{ex}\alpha_{ij} = \begin{cases} n & i \in j \\ 0 & i \notin j \end{cases} \tag{1}$$

式中: $n$ 为节点*i*与节点*j*相连线路的回数; $i \in j$ 表示节点*i*与节点*j*相连; $i \notin j$ 表示节点*i*与节点*j*不相连。

2.3 厂站站内拓扑识别与描述

厂站站点搜索可给出每个站点内部的成员节点,而站内元件类型及其连接拓扑需要通过站内拓扑识别获得。带标记的全拓扑支路表中已经给出每条支路的元件类型,对于多母线站点,直接从全拓扑支路表中筛选出两侧节点均为站内节点的支路,即可形成带标记的站内拓扑支路表。若需简化短接线,则将需简化的短接线删除,同时支路表中出现的短接线节点用与其相连的主母线节点替换。

另外,发电机和负荷也是站内拓扑的一部分,由于其均挂载在节点上,故站内拓扑识别还需遍历查询站内节点是否在发电机数据表和负荷数据表中存在,以判断站内是否存在发电机和负荷元件。

根据带标记的站内支路子表及发电机和负荷查询结果,可形成包含元件类别和回数的站内节点间的邻接矩阵<sup>in</sup>A,矩阵的非对角元素表征节点间支路回数及支路类别:

$$^{in}\alpha_{ij} = \begin{cases} n \times 10^3 + k & i \in j \\ 0 & i \notin j \end{cases} \tag{2}$$

式中, $k = 1 \sim 10$ ,分别对应短接线支路、两绕组变压器支路、三绕组变压器支路、交流输电线路支路、串联电容器支路、串联电抗器支路、并联高压电抗器支路、并联高压电容器支路、并联低压电抗器支路、并联高压电抗器支路。

矩阵的对角元素表征发电机或等效负荷挂接情况及个数。

$$^{in}\alpha_{ii} = \begin{cases} -m & i \in \text{Gen} \\ m & i \in \text{Load} \\ 0 & i \notin \text{Gen} \ \& \ i \notin \text{Load} \end{cases} \tag{3}$$

式中, $m$ 为挂载在节点*i*上的发电机或等效负荷个数。若母线挂载发电机,则相应对角元素为负,若挂载负荷,则反之。

2.4 算法流程图

所提算法的总体流程如图 5 所示。

3 算例分析

3.1 36 节点测试系统算例

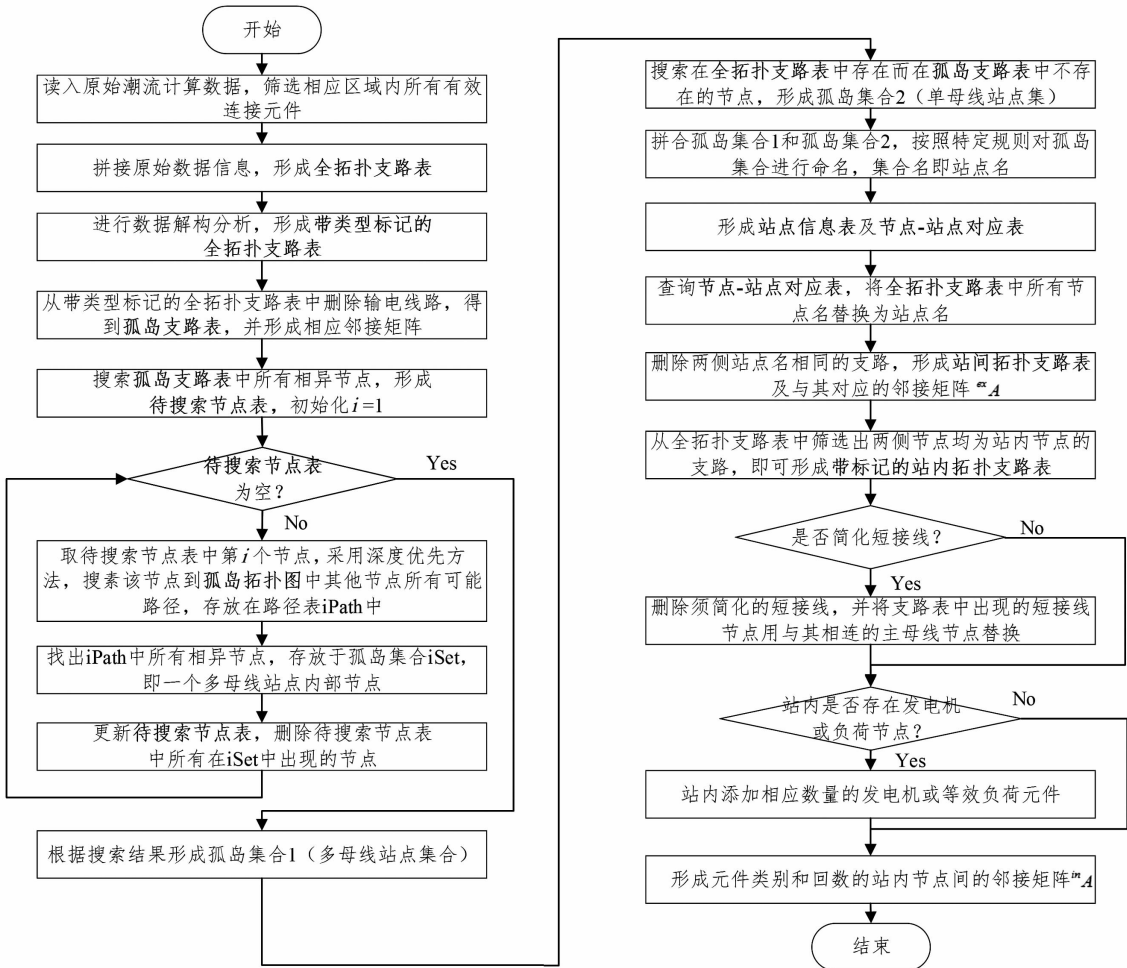


图 5 基于孤岛搜索的电力系统分层识别算法流程

采用中国电科院 CEPRI 36 节点系统对所提算法进行测试。算例单线图(即单层拓扑结构)如图 6 所示。

由图 6 可知,该系统共有 36 个节点,其中发电机节点 8 个,负荷节点 10 个,联络节点 18 个;节点间支路 43 条,其中交流输电线 18 条,短接线 8 条,变压器支路 16 条,直流输电线 1 条。此外,系统中配置有 6 个并联补偿装置。

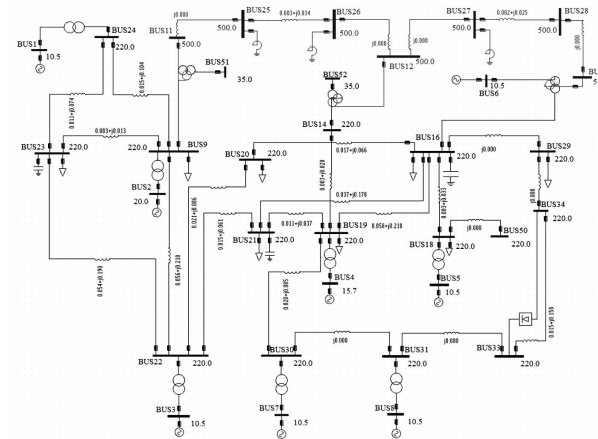


图 6 CEPRI 36 节点测试系统单线图

利用所提分算法对源数据进行搜索分析,可将 36 节点聚类到 11 个厂站站点,搜索出的站间拓扑结构如图 7 所示。

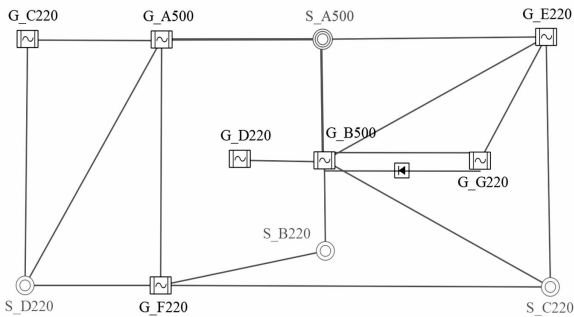


图 7 所提算法得出的厂站站间拓扑图

由站点信息表可知,该测试系统含 3 个单母线站点,其余 8 个均为多母线站点,其中站内母线最多的为站点 G\_B500。根据搜索结果可知,该站点为 1 个发电厂,站内含 7 个节点,其内部接线如图 8 所示。将分层拓扑图 7、图 8 与原始拓扑图 6 进行对比,容易验证算法结果的正确性。

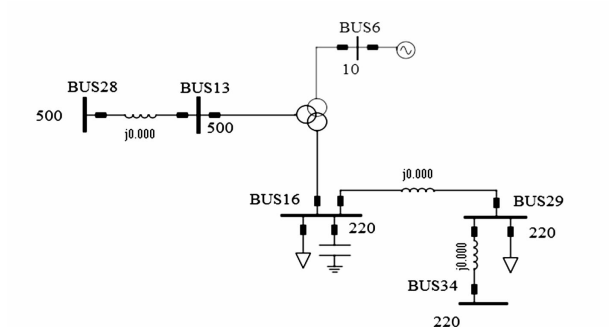


图 8 所提算法得出的站点 G\_B500 站点站内拓扑图

3.2 某实际省级主网算例

为测试算法的通用性,将所提算法应用于某实际省级电网。该省级电网数据为 PASAP 格式,涵盖全省 220 kV 及以上电压等级的电网模型。取丰大典型潮流方式,原始数据共有 2 867 个有效节点,其中含发电机节点 529 个,等效负荷节点 322 个;全拓扑支路 4 342 条,其中交流线支路(含交流输电线、短接线等)2 105 条,变压器支路 2 237 条。

利用所提算法可快速搜索出站点信息表,经过拓扑分层识别,可将原 2 867 个节点聚类至 533 个站点,其中 500 kV 变电站 52 座、上网电厂 27 座,220 kV 变电站 286 座、上网电厂 168 座,如表 1 所示。

表 1 某实际省级电网数据站点搜索结果

|        | 变电站数量 | 发电厂数量 |
|--------|-------|-------|
| 500 kV | 52    | 27    |
| 220 kV | 286   | 168   |

同样,由搜索出的站点信息表可获知每个站点内部的成员节点,统计每个站点内的成员节点数,可做出如图 9 所示的站内节点数分布图。

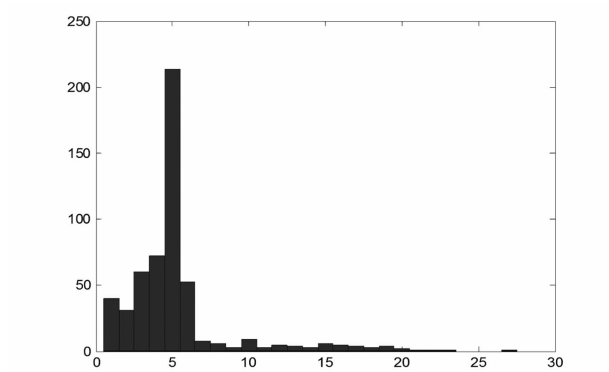


图 9 某实际省级主网仿真数据中站内节点数分布

由图 9 可知,该省电网仿真数据中,站内节点数大多分布在 5~20 之间,节点数最多的站点内部节点数多达 27 个。在基于该仿真数据进行电磁暂态自动建模时,采取所提分层拓扑识别方法可将上层

拓扑极大简化,从而避免传统单层拓扑识别造成布局错综交织的弊端。测试说明,所提算法处理实际省级规模电网数据可取得较好效果。

4 结 语

从电力系统自动拓扑生成及可视化建模等实际需求出发,针对现有拓扑识别方法不能区分站内拓扑和站间拓扑的不足,提出一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别算法,实现了基于现有仿真数据自动进行“站间拓扑+站内拓扑”的分层识别工作。利用 CEPRI 36 节点算例及某实际省级主网数据对算法进行了测试,结果验证了所提算法的正确性及有效性。所提算法可直接应用于省级复杂电力系统的拓扑自动生成及可视化建模工作。

参考文献

[1] 刘鲁锋,付立军. 电力系统拓扑分析的 LU 矩阵分解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2869-2874.

[2] 沈伟,吴文传,张伯明,等. 能量管理系统中电网潮流单线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 48-52.

[3] 章坚民,王云,谷炜,等. 调度大屏输电网潮流图自动生成(一)自动布局[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 43-48.

[4] 廖凡钦,刘东,闫红漫,等. 基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 174-180.

[5] 章坚民,叶义,陈立跃. 基于新型力导算法的省级输电网均匀接线图自动布局[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 107-112.

[6] 赵冬梅,龚群,张旭. 基于组合图元的输电网单线图自动布局方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2979-2984.

[7] 陶华,杨震,张民,等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 120-124.

作者简介:

唐 伦(1988), 硕士,主要从事电力系统分析研究;  
史华勃(1987), 硕士、工程师,主要从事电力系统仿真分析研究;  
袁 川(1980), 高级工程师,从事电网规划工作。

(收稿日期:2017-11-15)

# 基于自组织映射的改进BP神经网络 短期光伏出力预测研究

詹仲强<sup>1</sup>,余金<sup>2</sup>,郭志<sup>3</sup>,王银涛<sup>4</sup>,克帕依吐·吐尔逊<sup>1</sup>

- (1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830011;  
2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院,新疆 乌鲁木齐 830046;  
3. 国网淮南供电公司,安徽 淮南 232007;4. 新奥泛能网络科技股份有限公司,河北 廊坊 065600)

**摘要:**针对光伏发电出力随机波动给电网调度造成困难这一问题,提出了一种基于SOM-PSO-BP的模型对光伏有功功率进行短期预测,用于提高电网对可再生能源的调度能力。首先采用自组织映射对原始数据组进行聚类降维;接着使用粒子群算法对BP神经网络的权重和偏置矩阵进行寻优;然后利用训练集构造SOM-PSO-BP预测模型;最后在对比仿真中验证了所提方法的有效性。

**关键词:**光伏发电;出力预测;自组织映射;BP神经网络

**中图分类号:**TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0024-05

## Study on Prediction of Short-term Photovoltaic Output Power with Improved BP Neural Network Based on Self-organizing Mapping

Zhan Zhongqiang<sup>1</sup>, Yu Jin<sup>2</sup>, Guo Zhi<sup>3</sup>, Wang Yintao<sup>4</sup>, Kepaiyitulla · Tursun<sup>1</sup>

- (1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xijiang, China;  
2. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830046, Xijiang, China;  
3. State Grid Huainan Power Supply Company, Huainan 232007, Anhui, China;  
4. ENN Ubiquitous Energy Network Technology Corporation Limited, Langfang 065600, Hebei, China)

**Abstract:**The random fluctuation of photovoltaic power generation may cause difficulties for power grid dispatching, so a short-term prediction model based on SOM-PSO-BP is proposed, which will improve the dispatching ability of renewable energy by power grid. Firstly, the self-organizing mapping is used to reduce and cluster the dimension of the original data. Secondly, the weight and bias matrix of BP neural network are optimized by using particle swarm algorithm, and then the SOM-PSO-BP prediction model is constructed by using the training sets. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified in the simulation.

**Key words:**photovoltaic generation; output power prediction; self-organizing mapping; BP neural network

### 0 引言

随着环境压力不断增加,中国大力发展光伏发电这种可再生能源<sup>[1-2]</sup>。虽然光伏发电具有无污染等优点,但其出力因气候变化而随机波动给光伏电站并网带来巨大困扰,让电力系统的稳定性受到影响<sup>[3]</sup>。为了解决这一问题,国内外学者提出对光伏出力进行预测,让电力调度部门能够提前做出判断,

降低波动影响以提高稳定性。

目前主流的光伏预测模型有3种,分别为人工智能模型<sup>[4-6]</sup>、统计模型<sup>[7-8]</sup>和混合模型<sup>[9-10]</sup>。人工智能模型使用大数据处理中的神经网络和支持向量机等黑箱模型对光伏出力进行直接或间接预测。文献[4]使用光伏出力的信息熵作为特征,采用极限学习机、广义回归神经网络、径向基神经网络分别建立预测对比,得出极限学习机的预测效果最好。文献[5]首先对原始数据进行小波分解,然后对每

层数据使用神经网络进行预测,最后对预测数据进行重构得到结果。文献[6]使用天气模式下的光伏波动作为特征,使用 EMD 对原始数据进行特征映射,使用 IMF 分量进行 LSSVM 预测,对预测结果进行等权值求和得到光伏出力预测。统计模型采用数理统计的方法,对光伏出力进行联合概率分布拟合,得到光伏出力的概率模型。文献[7]对不同天气下的光伏出力用 K - means 进行聚类,统计有功出力的实际边缘分布和预测边缘分布,以最优拟合作为目标对不同种类的 Copula 函数参数进行识别,得到先验条件下误差的条件概率分布,并对预测结果进行修正。文献[8]使用混沌理论建立光伏出力的向空间,建立其混沌预测模型得到良好的预测结果。混合模型是将人工智能模型与概率模型进行融合的预测模型。文献[9]对径向基神经网络的边界进行评估,以减少预测模型中累计误差,取得良好结果。文献[10]使用灰色模型建立统计后的相似日时刻出力,使用灰色模型回归结果和采样日的温度建立神经网络预测模型得到预测结果。

国内主流预测模型的采样间隔通常选择 1 h,但是采样间隔过大,这会平滑光伏出力的实际波动。在前人基础上,所提出的短期光伏预测方法其采样间隔为 5 min,详细显示了原始数据中的波动,提高了预测精度。采用 SOM 对光伏历史数据组进行聚类降维,采用 PSO 对 BP 神经网络进行优化,最后得到 16 h 的光伏出力预测模型,通过仿真验证所提模型具有良好的预测效果。

## 1 原始数据的降维处理

### 1.1 原始数据说明

光伏发电主要受太阳辐射影响,而太阳辐射又与温度、湿度、风速等气候因素有关。在众多环境参数中如何选择与光伏出力最相关的环境变量,从而降低预测模型输入维数,减少模型训练时间是建立光伏预测模型首先需要考虑的问题。

选用澳大利亚的 Yulara 光伏电站数据,其额定功率为 1 058.4 kW,地面固定式安装。数据中的环境变量有:光伏有功出力 (active power, AP), kW;地面水平辐射 (global horizontal radiation, GHR),  $W/m^2$ ;弥散性辐射 (diffuse horizontal radiation, DHR),  $W/m^2$ ;环境温度 (weather temperature,

WT),  $^{\circ}C$ ;环境相对湿度 (weather relative humidity, WRH), %;风速 (wind speed, WS), m/s;风向 (wind direction, WD),  $^{\circ}$ 。选取 2017 年 8 月光伏电站数据组作为预测模型的训练数据和测试数据。

原始数据总共有  $8\ 912 \times 7$  个点,记录时间从 8 月 1 日至 8 月 31 日,采样间隔时间为 5 min。由于数据过多,故只将 AP、GHR 作为代表给出,见图 1 所示。

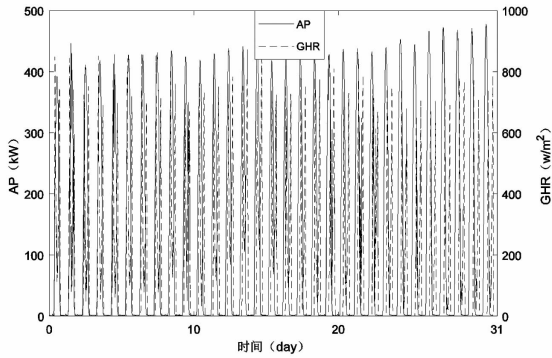


图 1 8 月的 AP 和 GHR 数据

从图 1 中可以得到 AP 最大值为 439.545 3 kW,最小值为 0;GHR 最大值为 955.111 8  $W/m^2$ ,最小值为 0。可以看出 AP 和 GHR 具有很强的趋势相关性,通过皮尔逊相关系数计算可得到 AP 和 GHR 的相关度为 0.503 2。为了提高预测精度,将 7 组环境变量进行归一化,见式(1)。考虑到夜间光伏电站无有功功率输出,故在原始数据中去除输出为 0 的部分,仅将每日有功输出部分进行连接,得到 31 日的光伏电站数据组见图 2。

$$X_{\text{Norm}i} = \frac{X_{\text{actual}} - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

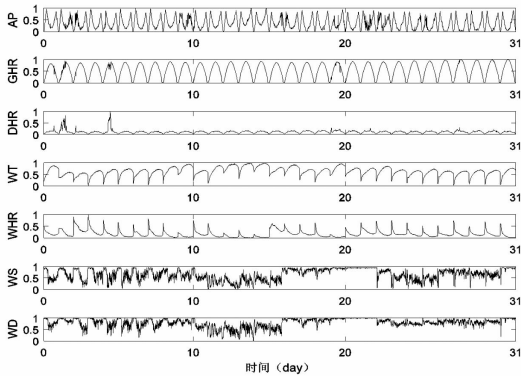


图 2 Yulara 光伏电站归一化后的数据组

从图 2 中可得,在 8 月数据中 AP 变化具有一定周期性,每日出力曲线整体呈现 M 型。在第 2 日 AP 剧烈波动的同时,GHR、DHR 和 WHR 也出现大幅变化,而发生变化时间滞后于 AP,尤其是 WHR 出现类似阶跃信号一般的陡增,暗示此日出现了突

然降雨影响了 AP 输出,WT、WS 和 WD 数据未能直观看出与 AP 波动有何关系;第 10 日,当 AP 发生剧烈变化时,GHR、DHR 没有同步出现波动,但 WT 数据出现增长。从以上数据中可以得到光伏出力在环境没有出现大幅变化时,从每日尺度上看到光伏出力具有周期性,但具体到某 1 日中的某一时刻,其输出具有很强的随机波动。

### 1.2 自组织映射 SOM

自组织映射(self – organization mapping, SOM)于 1982 年由 Kohonen 提出,用于解决非线性空间内的分类问题。它能根据高维数据通过自我竞争学习得到其最大相关组,即最优分类。一个标准的 SOM 结构如图 3 所示。 $x_1, x_2, \cdots, x_m$  为输入信号,经过输入层节点进入竞争层,竞争层由一个二维神经节点阵列组成,在节点权重信号更新过程中,竞争层中获胜的神经节点会自动将输入信号自动向其靠拢,最终得到输入信号的分类。

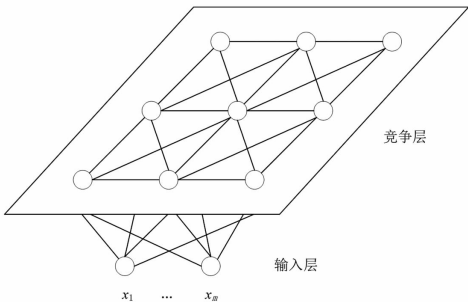


图 3 标准 SOM 结构

建立 SOM 分类模型,首先是根据输出信号种类确定竞争层节点数,并对节点进行随机权重赋值;接着计算节点权重向量与输出数据之间的距离,目前常用的向量距离计算公式见式(2)、式(3)和式(4);然后选择向量距离最小的节点为竞争层获胜节点;使用式(5)更新节点的权重,让获胜节点向最优分类靠近;通过自适应梯度下降法更新学习速率和领域大小,重新计算向量距离;最后经过不断迭代,得到最优分类模式。

Box 距离:

$$d = \max(|x_i - w_{i1}|, |x_i - w_{i2}|, \cdots, |x_i - w_{ij}|) \tag{2}$$

欧式距离:

$$d = |X - W_j| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - w_{ij})^2} \tag{3}$$

曼哈顿距离(出租车距离):

$$d = \sum_{i=1}^m |x_i - w_{ij}| \tag{4}$$

式(2)、式(3)和式(4)中: $X$  为输入层向量,即输入信号  $x_1, x_2, \cdots, x_m$ ;  $W$  为竞争层神经节点权重向量。

更新权重计算公式:

$$W(n+1) = W(n) + \Theta(n)\alpha(n)[X(n) - W(n)] \tag{5}$$

式中: $W$  为权重向量; $n$  为迭代次数; $\Theta$  为领域函数; $\alpha$  为学习速率; $X$  为输入向量。

对图 2 中的数据进行划分,将第 1 日至第 29 日数据作为预测模型的训练数据,将第 30 日和第 31 日数据作为测试数据。使用所提出的 SOM 分类方法,网络结构为  $2 \times 2$ ;向量距离选用欧式距离,分类结果见图 4。

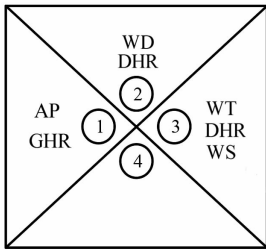


图 4 SOM 对 7 类数据的分类结果

从图 4 的分类结果来看,WT、DHR、WS 被划为 3 组,与之差异较大的 AP 和 GHR 划为 1 组,而 WD 和 DHR 虽与 1 组和 3 组都相似,但又不能单独划为其中一类,故在其后的 BP 神经网络训练模型中使用 AP、GHR、DHR 和 WD 作为输入向量。

## 2 基于 SOM – PSO – BP 的短期预测模型

### 2.1 BP 神经网络

BP 神经网络——反向传播神经网络(back – propagation neural networks)由 3 层节点组成:输入层、隐藏层和输出层,一个结构为  $3 - 4 - 2$ ,即 3 个输入节点、4 个隐藏节点、2 个输出节点的典型神经网络见图 5 所示。输入信号经过输入层向前传播,经过隐藏层和输出层作用得到输出信号。输出信号与实际测量信号之间的误差,又通过反向通道向后修正神经网络节点的权值来减少输出误差,使输出结果不断逼近真实信号,所以称作反向传播神经网络。

以图 5 所示的 BP 神经网络结构为例,输入  $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ ,输出  $Y = [y_1, y_2]^T$ ,  $W$  为神经节点权重

矩阵,见式(6)所示,从输入层到隐藏层的映射见式(7),其中  $\mathbf{B}$  为偏执矩阵,  $\mathbf{U} = [U_{k1}, U_{k2}, U_{k3}, U_{k4}]^T$  为隐藏层的线性组合结果,从隐藏层到输出层的映射见式(8)所示,其中  $f$  为激活函数,在神经网络中常用的有: sigmod、tanh - sig 和高斯径向基。

$$\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} \omega_{k11} & \omega_{k12} & \omega_{k13} \\ \omega_{k21} & \omega_{k22} & \omega_{k23} \\ \omega_{k31} & \omega_{k32} & \omega_{k33} \\ \omega_{k41} & \omega_{k42} & \omega_{k43} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{U} = f(\mathbf{W}_k \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B}_k) \tag{7}$$

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{W}_j \cdot \mathbf{U} + \mathbf{B}_j) \tag{8}$$

输入层          隐藏层          输出层

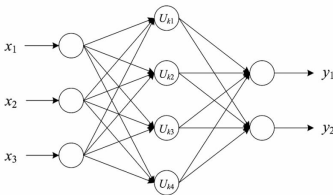


图 5 结构为 3-4-2 的典型神经网络

在 BP 神经网络计算过程中,从输出向输入侧不断传递误差,同时使用梯度下降法对隐藏层和输出层中的权值矩阵进行修改以降低误差,最终将输出误差降低到给定值。

在 BP 算法中,神经网络对初始神经节点权重矩阵  $\mathbf{W}$  和偏执矩阵  $\mathbf{B}$  会进行随机赋值,这有可能让自适应梯度算法陷入局部最优解,导致输出结果差异很大。为了解决这一问题,采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对权重矩阵  $\mathbf{W}$  和偏执矩阵  $\mathbf{B}$  进行寻优,加快 BP 网络收敛速度和精度。

### 2.2 使用 PSO 对 BP 神经网络参数寻优

根据 SOM 的分类结果,选用 4-13-1 的网络结构,即 4 个输入层节点、13 个隐藏层节点和 1 个输出层节点。粒子群算法优化流程见图 6,以权重矩阵  $\mathbf{W}$  和偏执矩阵  $\mathbf{B}$  为优化目标,以均方误差 MSE 为评价函数,如式(9)所示,使用 BP 神经网络进行迭代计算,训练集使用前 29 日的测量数据用于建立 GA-BP 预测模型,最终得到最优结果,迭代结果见图 7。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{\text{forecasted}} - W_{\text{true}})^2 \tag{9}$$

从图 7 可以看到,所采用的粒子群算法在迭代 90 次之后就趋于稳定,均方误差 MSE 为  $7.2401 \times 10^{-3}$ 。从迭代结果可以看出所提出的预测模型具有

很高的精度。

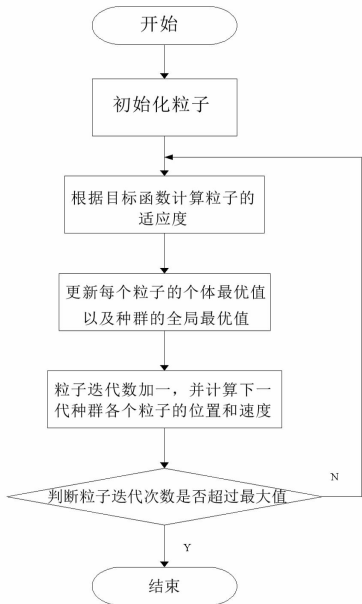


图 6 粒子群算法优化 BP 神经网络流程

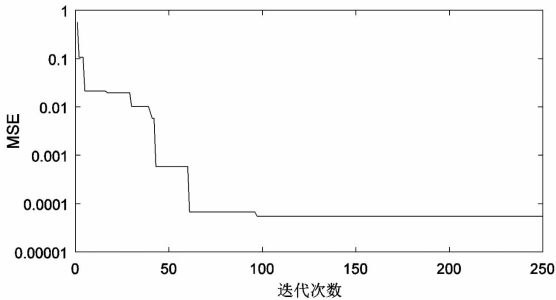


图 7 PSO-BP 的迭代结果

## 3 算例仿真

以 Matlab 作为仿真平台,使用 SOM-PSO-BP 模型和 AMIRA 模型进行仿真对比,以图 2 所示数据中的第 1 日至第 29 日作为训练数据,用于建立两种预测模型,以第 30 日和第 31 日数据对模型进行测试,以均方误差 MSE 作为评价指标检验预测模型的精度。

### 3.1 ARIMA 预测模型及预测结果

累积式自回归滑动平均 (auto regressive integrated moving average, ARIMA) 模型被广泛应用于金融、电价预测<sup>[11-12]</sup>等领域。预测模型通常将非平稳的历史数据进行有限次差分得到平稳时间序列数据,然后采用贝叶斯法则对模型的  $p$  和  $q$  阶数进行寻优,最后使用最大似然估计找到模型中的最优系数,得到 ARIMA 预测模型。ARIMA 的数学模型见式(10)所示。

$$\Delta^d y_t = \theta_0 + \sum_{i=1}^p \Phi_i \Delta^d y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (10)$$

式中： $\Delta^d y_t$  为被  $d$  次差分后的  $y_t$  序列； $\Phi_i$  和  $\theta_j$  为 ARIMA 模型的待评估系数； $\varepsilon_t$  为  $t$  时刻的 0 均值高斯分布误差。采用 ARIMA 对 1 日至 29 日的光伏有功出力进行建模，得到 30 日和 31 日的预测结果和预测误差如图 8 和图 9 所示。

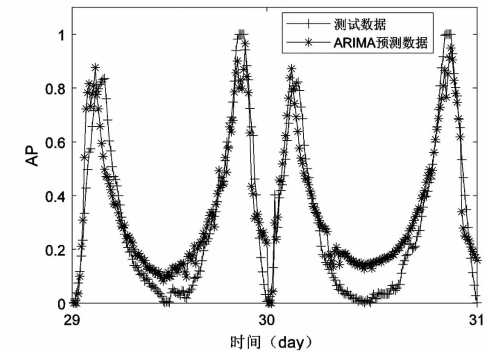


图 8 ARIMA 模型的有功出力 AP 预测结果

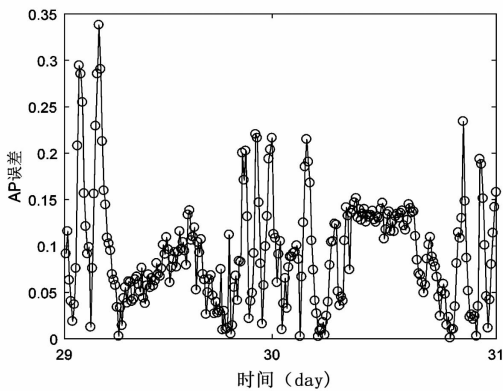


图 9 ARIMA 模型的有功出力 AP 预测误差

从图 8 和图 9 可以得到，基于 ARIMA 的光伏预测模型 MSE 为 0.012 2，误差最大值为 0.338。从误差分布来看，主要集中在 0.15 以下，误差在全部预测期间的波动都剧烈，没有明显的分布特征，由此可以得出 ARIMA 模型具有有限的预测精度。

3.2 SOM - PSO - BP 预测结果

将 30 日、31 日的测试数据带入基于 SOM - PSO - BP 的光伏出力预测模型进行计算，得到预测结果和预测误差如图 10 所示。

从图 10 和图 11 中可以看到，所提出的基于 SOM - PSO - BP 预测模型的 MSE 误差为  $2.172\ 93 \times 10^{-3}$ ，误差最大值为 0.261 6。误差分布主要集中在 0.1 以下，在 AP 的上升段和下降段，预测数据和测试数据相差不大，预测误差主要集中在光伏出力的低谷时段，在这一时段，光伏出力波动变得剧烈，然而其波动幅值并不大，所以即便在图 7 中可以明

显看出预测误差偏离测试数据较大，但总体误差并未出现增加。对比图 8、图 9 和图 10、图 11，可以得出所提出的 SOM - PSO - BP 光伏预测模型在精度上领先 ARIMA 模型，在 MSE 指标上低一个数量级，在误差分布上更加稳定，且幅值低。

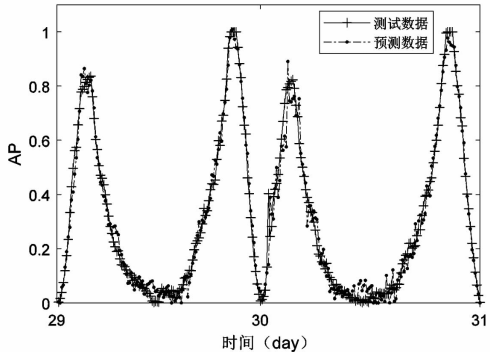


图 10 SOM - PSO - BP 模型的有功出力 AP 预测结果

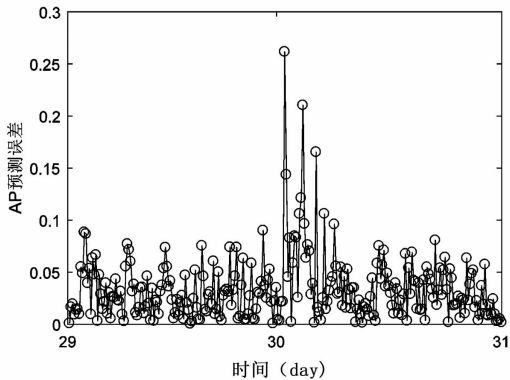


图 11 SOM - PSO - BP 模型的有功出力 AP 预测误差

4 结 语

光伏出力预测对电网调度具有重要意义，通过预测数据能够及时调整调度计划，稳定电网电压、频率在正常范围内，提高电能质量，降低电网运行风险。所提出的基于 SOM 降维、PSO - BP 神经网络的光伏出力预测模型，通过光伏电站 1 个月的数据对预测模型进行训练，对比 ARIMA 预测模型得到了良好的预测效果，为解决光伏并网发电随机波动无法预测问题提供了一些建议。

参考文献

[1] 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，2011，35(12):101 - 107.  
[2] 龚莺飞，鲁宗相，乔颖，等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化，2016，40(4):140 - 151.

(下转第 67 页)



# 采用核主成分分析和随机森林算法的变压器油纸绝缘评估方法

张丽平<sup>1</sup>, 吴杰康<sup>2</sup>, 陶飞达<sup>1</sup>, 曾振达<sup>1</sup>, 梁浩浩<sup>2</sup>, 邹志强<sup>1</sup>, 黄智鹏<sup>1</sup>, 杨 夏<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局, 广东 河源 525000;  
2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 为了实现对电力变压器绝缘状态的智能评估, 提出了一种融合核主成分分析和集成学习理论的电力变压器油纸绝缘评估方法。在特征提取方面, 通过回复电压法 (recovery voltage method, RVM) 提取特征量, 并对特征量进行核主成分分析 (kernel principle component analysis, KPCA), 将低维度的样本空间映射到高维度的核空间, 并按照重要性进行排序; 在评估识别方面, 利用集成学习的思想建立分类器群模型, 克服了单分类器的局限性, 并提高了分类器的分类预测能力。通过实例论证, 融合核主成分分析和集成学习的分类模型在变压器油纸绝缘评估中具有很高的准确性。

**关键词:** 电力变压器; 油纸绝缘; 回复电压法; 分类器群; 集成学习; 核主成分分析  
**中图分类号:** TM855   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1003 - 6954 (2018) 02 - 0029 - 05

## Oil - paper Insulation Evaluation Method of Transformer Based on Kernel Principal Component Analysis and Random Forest Algorithm

Zhang Liping<sup>1</sup>, Wu Jiekang<sup>2</sup>, Tao Feida<sup>1</sup>, Zeng Zhenda<sup>1</sup>,  
Liang Haohao<sup>2</sup>, Zou Zhiqiang<sup>1</sup>, Huang Zhipeng<sup>1</sup>, Yang Xia<sup>1</sup>

(1. Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Heyuan 525000, Guangdong, China;  
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to realize the intelligent evaluation of power transformer insulation status, an evaluation method for oil - paper insulation of transformer is proposed based on kernel principal component analysis and random forest algorithm. Recovery voltage method (RVM) is to study insulation aging status of power transformer. In order to overcome the limitations of single classifier, random forest (RF) is introduced to get classifier groups. The randomness of training samples and feature selection can avoid the problem of overfitting. The differences are small among classifiers built with features when there are few features available. The original samples are analyzed by using kernel principle component analysis (KPCA) so as to increase the number of features. Then random forests are constructed to get classifier groups in high dimensional kernel space. Finally, the voting results show that, the differences among classifier groups are improved effectively by KPCA. And results of the state diagnosis based on KPCA and random forests have a higher accuracy.

**Key words:** power transformer; oil - paper insulation; recovery voltage method; classifier groups; ensemble learning; kernel principle component analysis

### 0 引 言

油浸式变压器是电力系统的核心设备之一, 研

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51567002, 50767001); 广东省公益研究与能力建设专项资金项目 (2014A010106026); 广东电网有限责任公司科技项目 ((031600KK52160004))

究变压器的绝缘老化对电网的安全稳定运行具有十分重要的作用。油浸式变压器的使用寿命取决于其绝缘状态, 复合油纸绝缘状态则是评估变压器绝缘水平的重要指标<sup>[1]</sup>。回复电压法 (recovery voltage method, RVM) 通过提取回复电压极化谱的特征量来评估变压器油纸绝缘状态。利用回复电压法能够

无损诊断绝缘状态,并且准确地反映变压器油纸绝缘内部缓慢的弛豫过程,在实际应用中取得了很好的效果<sup>[2]</sup>。

目前,国内外研究者对回复电压法特征量和变压器绝缘状态展开了定性研究,如文献[3]利用实验证明回复电压最大值越大,变压器油纸绝缘老化越严重。文献[4]通过热加速老化论证了绝缘老化程度随着中心时间常数变小而增大。由于大部分研究都是基于单个特征量进行定性分析,并没有充分挖掘多个特征量之间的内在联系,对于多个特征量变化趋势不一致的情况,将无法做出准确地判断。为了获得变压器绝缘状态更准确的信息,有研究者利用人工智能算法建立了综合评判模型。例如,文献[5]在搜集大量测试数据的基础上,利用层次分析法建立了变压器绝缘的标准状态向量表。文献[6]考虑绝缘状态的不确定性,将各指标模糊化,并结合粗糙集理论对变压器进行状态评估。为了克服单一方法的局限性,研究人员开发出了将不同方法组合起来的综合模型,如粗糙集与贝叶斯理论相结合、神经网络与范例推理、聚类分析和模糊理论的结合等等。

上述方法都是基于单一分类器对绝缘状态进行分类,单一分类器存在局部收敛、过拟合等问题。而分类器群则是基于集成学习的思想,通过不同的样本集和特征集训练多个基分类器,最后对各个分类器的输出进行综合分析得出最终评估结果。研究表明<sup>[7]</sup>,分类器群不仅可以克服单分类器的局限性,还能够提高分类的准确性。不同的属性特征可以从不同的方面进行分类,集成学习将各分类结果加权综合,能有效地降低陷入局部最优的风险。

鉴于以上分析,在回复电压法所得相关特征量较少的情况下,单个的分类器往往不能提取出有效地分类信息。下面融合核主成分分析与集成学习理论,建立变压器油纸绝缘的分类器群模型。首先对所测样本集进行矩阵变换,利用核函数的映射特性,得到高维的特征属性集,有效地提取出分类特征量。然后在核空间中用随机森林法建立集成学习的分类器群,对各基分类器进行加权求和,得到变压器绝缘油纸状态评估结果。

## 1 回复电压法

### 1.1 回复电压法基本原理

RVM 是通过回复电压测试仪,测得回复电压曲线的特征量,进而对变压器油纸绝缘状态进行评估,由于其无损特性,在绝缘状态评估领域得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。基本原理如下:首先用直流高压使绝缘介质两端极化,保持充电状态一段时间  $t_c$ ,使束缚电荷游离到介质表面;然后撤掉直流电压并且短接两极,这时候会发生放电过程,表面电荷释放,内部则会缓慢地去极化,持续放电时间为  $t_d$ ;当  $t_d < t_c$  时断开短接线,停止放电过程,这时候残余电荷将在绝缘介质两端建立一个电势差,即形成回复电压。利用多次测量的电压值可以绘制回复电压极化谱<sup>[9]</sup>,对曲线的特征量进行分析即可以对电力变压器的绝缘状态做出判断。图 1 和图 2 分别为回复电压测试电路和理论曲线。

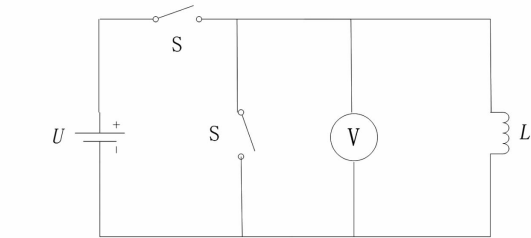


图 1 回复电压测试电路

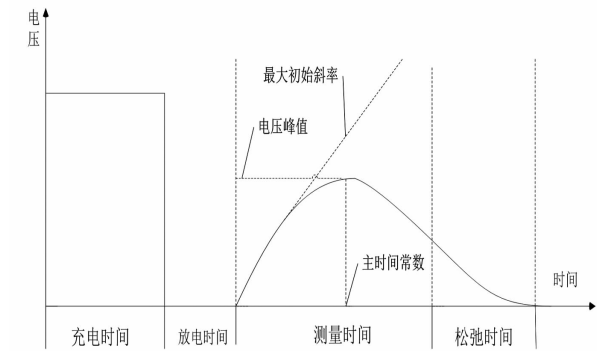


图 2 回复电压曲线

### 1.2 特征量的选取

选取回复电压极化谱峰值电压  $U_{\text{rmp}}$ 、主时间常数  $t_{\text{cdom}}$ 、最大初始斜率  $S_{\text{rmax}}$  作为电力变压器油纸绝缘状态评估指标<sup>[10]</sup>。

极化谱峰值电压  $U_{\text{rmp}}$  取回复电压曲线中的极大值,其值的大小与变压器绝缘状态成反比,其表达式为

$$U_{\text{rmp}} = \max(U_{\text{rmax}}(t_c)) \tag{1}$$

式中:  $t_c$  为测试时间;  $U_{\text{rmax}}$  为回复电压最大值。

主时间常数  $t_{\text{cdom}}$  为极化谱峰值所对应的测量时间,其值越小,变压器绝缘状态越差,其表达式为

$$t_{\text{edom}} = \operatorname{argmax}(U_{\text{rmax}}(t_c)) \quad (2)$$

最大初始斜率  $S_{\text{rmax}}$  反映了绝缘介质极化的速率,其值越大,极化响应速度越快,即绝缘状态越差,其表达式为

$$S_{\text{rmax}} = \max(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{du_t}{dt}) \quad (3)$$

式中,  $u_t$  为回复电压值。

## 2 基于随机森林的分类器群

随着电力系统的不断发展,准确的电力变压器状态评估对电网的规划运行有重大的指导意义。基于变压器状态特征量的分类技术是当前较为常用的分类技术之一,它主要根据变压器的某些属性,例如油中溶解气体、油中糖醛含量、运行年限等统计信息,借助机器学习的分类方法映射到不同的类状态。目前,使用较为广泛的分类技术主要有朴素贝叶斯(naive bayes, NB)、支持向量机(support vector machine, SVM)、决策树(decision tree, DT)、神经网络(neural networks, NN)等。但是这些单分类器存在过拟合、大量调参、局部最优等问题,对于复杂的大数据并不能取得很好的效果,于是使用多个元分类器进行分类,综合分类结果形成最终结果的分类器群的思想应运而生。随机森林作为一种集成算法被提出来,能够有效地克服单分类器的缺陷,且速度快、可扩展,更不需要调整大量参数<sup>[11]</sup>。

集成学习的集成效果取决于单个学习器的准确性和各学习器之间的差异性。如何提高这两方面的性能,是集成学习的研究重点。随机森林中为了提高各基学习器的差异性,对样本和属性都进行了随机选择,差异性的扩大进一步提升了随机森林模型的泛华能力<sup>[12]</sup>。

基本步骤分为两个部分:随机采样与完全分裂。

1) 随机采样:首先对输入的样本矩阵进行行采样,也就是随机抽取一定量的样本,每一次抽取都采用有放回的方式,保证抽取的样本个数小于原始的样本集,这样得到的样本集可能存在重复的样本。用抽样得到的部分样本来训练一个决策树,每棵树输入样本的随机性极大地降低了出现过拟合的概

率;而对于特征量的选取,采用随机的列采样,随机得到的部分属性用于决策树的分裂。

2) 完全分裂:决策树的分裂属性可以选择信息增益<sup>[13]</sup>等策略,并且保证每一个节点都不能继续分裂。

按照上面方法得到的每一棵决策树,并没有用到所有的样本和所有的特征属性,所以单棵树分类性能较低。但是把多个较弱的分类器组合成分类器群后,分类能力就会大大增强,并且只有两个参数需要控制,使得分类过程大大简化。

每个决策树都将得到一个分类结果,对分类结果进行投票,选取票数最多的类别将作为最终的结果,具体流程如图3所示。

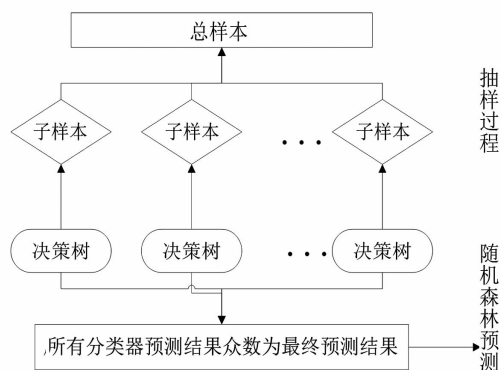


图3 算法流程

## 3 核主成分分析

单个分类器之间的差异性是影响分类器群性能的关键因素,而对于特征量偏少的数据集,将会导致各分类器之间差异性不大,往往不能提取出有效的分类信息。而核主成分分析是一种调整数据集维数,并提取主要特征量的有效手段<sup>[14]</sup>。通过特定的核函数将输入空间的主成分呈非线性关系映射到新的核特征空间,新的特征空间可以是任意维数,甚至是无穷维。核主成分分析可以增加样本特征量维数,广泛应用于特征提取、回归分析等领域<sup>[15]</sup>。

设有一组样本集  $x_k \in R^n (k = 1, \dots, m)$ , 通过核函数进行非线性映射,其协方差矩阵表示为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi(x_i) \cdot (\phi(x_i))^T \quad (4)$$

式中:  $\phi$  为非线性映射函数。

由于  $\varnothing(x)$  无法直接求出,所以引入核函数<sup>[16]</sup>来求解  $C$  的特征值和特征向量,即

$$n\lambda a = K_a \tag{5}$$

式中: $K$  为核矩阵, $K(x_i, x_j) = \varnothing(x_i \cdot x_j)$ ;  $a$  满足  $v = \sum_{i=1}^n a_i \varnothing(x_i)$ 。

为了保证  $\sum_{i=1}^n a_i \varnothing(x_i) = 0$ ,需要对  $K$  进行中心化,即

$$\left\{ \begin{aligned} K' &= K - I_n K - K I_n + I_n K I_n \\ (I_n)_{ij} &= \frac{1}{n} \end{aligned} \right. \tag{6}$$

通过求解矩阵方程,可以得到  $K'$  的特征值和特征向量,利用式(7)可以求得样本矩阵  $X$  经非线性变换  $\varnothing$  后在  $v$  上的投影,即

$$V = v \cdot \varnothing(X) = \sum_{i,j=1}^n a_i K(x_i, x_j) \tag{7}$$

## 4 评估模型的建立

1) 利用回复电压法测量所需特征量,并建立样本矩阵  $X$ 。

2)  $z$ -score 标准化是一种基于均值和标准差的数据处理方法,可有效地减小样本信息的丢失,故采用  $z$ -score 标准化来处理原始数据,其公式为

$$X' = (x - \mu) / \delta \tag{8}$$

式中: $X'$  为标准化后的样本矩阵; $\mu$  和  $\delta$  分别为  $X$  的平均数和标准差。

3) 对  $X'$  进行核主成分分析,核函数用高斯径向基函数,即

$$K = K(x', x_i) = \exp\left(-\frac{\|x' - x_i\|^2}{\sigma^2}\right) \tag{9}$$

式中,核参数  $\sigma$  取 0.1。

4) 由于特征值的大小与特征量对样本集影响呈正相关,所以去掉特征值  $\leq 10^{-6}$  的特征量,剩下的特征量即可看作是核主成分。

5) 将经过核主成分分析的样本集输入随机森林分类器进行训练得到所需评估模型。

## 5 实例分析

为了获取数据样本,在实验室搭建了变压器油

纸绝缘物理模型,并在 130℃ 下进行加速老化试验。将测得的数据分为 3 类:第 1 类是绝缘纸聚合度大于 500 的,认为其绝缘良好;第 2 类是绝缘纸聚合度在 250 ~ 500 范围内的,认为其绝缘较差,需引起注意;第 3 类是绝缘纸聚合度小于 250 的,认为其绝缘劣化严重,需进行检修或退出运行<sup>[17]</sup>。

为验证所建立模型的有效性和正确性,将基于核主成分分析的随机森林分类(RFC)模型、BP 神经网络和模糊 C 均值分类器进行比较。BP 网络分类器分为 3 层,其中输入层为 3 节点,隐含层为 9 节点,输出为对应变压器油纸绝缘状态发展阶段 1 ~ 3。FCM 选用的聚类系数  $m = 2$ ,分类数  $c = 3$ 。

通过实验得到的 330 组样本分为两部分:一部分用于训练分类器;一部分用于分类器的测试。通过对测试结果进行统计分析,分类器群 RFC 模型的准确率达到较高的 92.2%,比单分类器的 BP、FCM 分别高 6.6%、16.7%。比较而言,所建立的 RFC 模型明显优于其他两种典型单分类器。

表 1 BP、FCM 和 RFC 模型性能

| 序号 | 输入特征量 |       |       | 模型输出 |     |     | 实际状态 |
|----|-------|-------|-------|------|-----|-----|------|
|    | $m_1$ | $m_2$ | $m_3$ | BP   | FCM | RFC |      |
| 1  | 0.53  | 38.5  | 0.11  | 1    | 2   | 1   | 1    |
| 2  | 0.29  | 41.1  | 0.12  | 1    | 1   | 1   | 1    |
| 3  | 0.55  | 35.8  | 0.15  | 1    | 1   | 2   | 2    |
| 4  | 0.70  | 24.3  | 0.18  | 2    | 3   | 2   | 2    |
| 5  | 0.83  | 21.5  | 0.17  | 2    | 3   | 3   | 3    |
| 6  | 1.20  | 21.6  | 2.10  | 3    | 3   | 3   | 3    |

由表 1 列出的部分数据可以看出,第 1 个样本应为第 1 类,但其特征量  $m_1$  偏大,导致 FCM 将其误判为第 2 类。第 3 个样本由于  $m_2$  偏大,导致 BP 和 FCM 均误判为第 1 类。第 4 个样本由于  $m_2$  偏小,导致 FCM 误判为第 3 类。第 5 个样本由于  $m_3$  偏小,导致 BP 误判为第 2 类。而 RFC 模型得出的结论则与实际状态完全相符。

由于核主成分分析能够把低维的特征量映射成高维,提取变压器状态信息更为充分,而随机选择不同的核特征量来构造不同的基分类器,能够从不同方面学习数据集的状态信息,从而提高了变压器油纸绝缘评估的准确性。

由于实际样本测试中会存在噪声数据,所以对实

验所得样本集添加了5%的随机噪声。对于加噪的特征量进行分类,BP、FCM和RFC模型的准确率分别为73%、69%和87%。3种模型准确率均有所下降,但是RFC模型受到的影响明显要低于BP和FCM,这是由于随机森林理论构造的分类器群能够将单分类器之间的偶然因素抵消,进而缩小分类器群的误差,体现出更好的抗干扰能力和更好的稳定性。

## 6 结 语

1)利用回复电压法能够无损地诊断电力变压器油纸绝缘状态,并通过对极化谱特征量的提取分析建立油纸绝缘评估体系。

2)分类器群能够克服单分类器的局限性,提高分类预测的能力,具有更好的鲁棒性。

3)采用核主成分分析将低维的特征量非线性地映射到高维的核特征空间,有助于分类器状态信息的提取,并且扩大了单个分类器之间的差异性,提高了分类器群的分类性能。

### 参考文献

[1] 王有元,袁园,李剑,等. 变压器油纸绝缘可靠性的威布尔混合评估模型[J]. 高电压技术, 2010,36(4):842-848.

[2] 郭洪英. 基于回复电压极化谱小波包变换的变压器绝缘老化诊断方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(24):170-175.

[3] 廖瑞金,孙会刚,袁泉. 等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术, 2011,37(1):136-142.

[4] 邹阳,蔡金锭. 油纸绝缘变压器时域极化谱特性实验分析[J]. 电工技术学报,2015,30(12):307-313.

[5] 黄云程,蔡金锭. 融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2083-2090.

[6] 谢松,邹阳,蔡金锭. 基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 仪器仪表技术,2017,38(1):190-197.

[7] 方匡南,吴见彬,朱建平,等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛,2011,26(3):32-37.

[8] 江修波,黄彦婕,张涛. 变压器油纸绝缘水分的回复电压分析法[J]. 高电压技术,2010,36(12):2984-2989.

[9] 周利军,李先浪,王晓剑,等. 基于回复电压曲线的油

纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术,2014,40(2):489-496.

[10] Tapan K Saha, Prithwiraj Purkait, Frank Muller. Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):149-157.

[11] 邱一卉,米红. 基于随机森林和转导推理的特征值提取方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2010,49(3):333-338.

[12] 赵腾,王林童,张焰,等. 采用互信息与随机森林算法的用户用电关联因素辨识及用电量预测方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):604-614.

[13] 贺建章,王海波,季知祥,等. 基于随机森林理论的配电变压器重过载预测[J]. 电网技术,2017,41(8):2593-2597.

[14] 肖慧,刘苏东,黄小燕,等. 基于核主成分的神经网络集合预报建模研究[J]. 计算机仿真, 2010,27(12):163-166.

[15] 胡青,孙才新,杜林,等. 核主成分分析与随机森林相结合的变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术,2010,36(7):1725-1729.

[16] 王向红,朱昌明,毛汉领,等. 基于核主成分分析及支持向量机的水轮机叶片裂纹源定位[J]. 振动与冲击, 2010,29(11):226-229.

[17] 单长星. 基于回复电压法的变压器绝缘测试系统的研制及应用[D]. 成都:西南交通大学,2013.

### 作者简介:

张丽平(1977),工程师,研究方向为配电系统运行与控制等;

吴杰康(1965),教授、博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等;

陶飞达(1986),高级工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

曾振达(1984),高级工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

梁浩浩(1988),硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制等;

邹志强(1987),工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

黄智鹏(1988),助理工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

杨 夏(1982),工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究。

(收稿日期:2018-01-06)

# 工频电场测量仪支架材质对空间电场影响研究

刘守豹<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2,3</sup>, 兰新生<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;  
2. 陕西省智能电网重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:**工频电场测试仪是测量电力设备运行电压对地表 1.5 m 高度处电场强度的设备。为保证电场测试仪测量结果的准确性,需要尽量减小测试仪及其附件对空间电场分布的影响;但是由于电场测试仪及其附件的介电常数与空气不同,实际测试时电场测试仪改变了周围电场,尤其是探头所在区域的电场,因此有必要对电场测试仪支架材质对空间电场的影响进行深入研究。基于有限元法,利用 ANSYS MAXWELL 建立电场测试仪支架材质对空气电场影响的分析模型,通过对不同材质支撑杆对空间电场分布的影响进行分析,为电场测试仪及其附件的材质选取、优化设计制造提供参考。

**关键词:**电场强度;有限元法;ANSYS MAXWELL;介电常数

**中图分类号:**TM863 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0034-04

## Study on Influence of Stent Material of Power Frequency Electric Field Tester on Space Electric Field

Liu Shoubao<sup>1</sup>, Wu Di<sup>2,3</sup>, Lan Xinsheng<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. Key Laboratory of Smart Grid in Shanxi Province, Xi'an 710049, Shanxi, China;  
3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

**Abstract:** The power frequency electric field tester is a device to measure the electric field strength of the power equipment running at the height of 1.5 m. Accurate measurement of the electric field strength requires minimizing the impact of the test equipment itself. However, the space electric field should be studied, especially the electric field in the area where the probe is located, so it is necessary to study the influence of the stent material on the space electric field. Based on the finite element method, ANSYS MAXWELL is used to establish the analysis model for the effect of the electric field tester on the space electric field. By comparing the influence of different materials on the distribution of electric field in the space, it provides a reference for the material selection and optimization of the electric field tester and its accessories.

**Key words:** electric field intensity; finite element method; ANSYS MAXWELL; dielectric constant

### 0 引言

随着社会的发展,高压输变电设备附近所产生的电场和磁场日益受到关注<sup>[1-3]</sup>。因为电磁环境问题引起的纠纷常有报道,准确测量电力设备的电磁场具有重要的意义<sup>[4]</sup>,它关系到设备选择、设计优化和司法鉴定等方面。

工频电场测试仪是测量电力设备运行电压对地表 1.5 m 高度处电场强度的设备,通常由主机、测量

探头、支撑架等部件组成。其中支撑架顶端距离地面 1.5 m,测量探头固定在支撑架的顶端。带电体所在空间的电场分布与其所处空间的介质分布情况有关。为测量空间电场,人为增加了支撑架、测量探头等与空气介电常数不一致的物体,这将会改变空间电场,尤其是探头所在区域的电场<sup>[5]</sup>。下面通过建立电场测试仪支架的有限元仿真模型,计算不同介电常数的支架对电场测试的影响,分析表明电场测试仪及其附件应取介电常数与空气接近的材料制作,且应尽量减小材料重量。



图1 工频电场测试仪实物

1 有限元分析方法原理

有限单元法 (finite - element method, 简称有限元法) 是一种解决工程物理场问题的常用方法<sup>[6]</sup>。

有限元法求解的基本步骤<sup>[7]</sup>如下:

1) 结构离散化: 对整个结构进行离散化, 将其分割成若干个单元, 单元间彼此通过节点相连。

2) 求出各单元的刚度矩阵 $[K]^{(e)}$ :  $[K]^{(e)}$  是由单元节点位移量 $[\Phi]^{(e)}$ 求单元节点力向量 $[F]^{(e)}$ 的转移矩阵, 其关系式为

$$[F]^{(e)} = [K]^{(e)} [\Phi]^{(e)}$$

(1)

3) 集成总体刚度矩阵 $[K]$ 并写出总体平衡方程:  $[K]$ 是由整体节点位移向量 $[\Phi]$ 求整体节点力向量 $[F]$ 的转移矩阵, 其关系式为

$$[F] = [K][\Phi]$$

(2)

这就是总体平衡方程。

如把电极表面取作边界 A, 电极以外的空间称作场域, 则当场域中电位  $\varphi$  满足拉普拉斯方程  $\nabla \cdot \nabla \delta \varphi = 0$  时, 场的计算问题成为求取函数  $\varphi$  的边界值问题。设三维电场区域内, 电位函数  $\varphi$  满足拉普拉斯方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \\ \varphi|_A = u(A) \end{cases}$$

(3)

对电场测试仪所在场域进行网格剖分, 场域分成许多小单元, 指定材料相对介电常数  $\varepsilon$ , 并施加边界条件。

2 有限元分析模型的建立

采用 ANSYS MAXWELL 建立电场测试仪支架

材质对空气电场影响的分析模型, 模型由支架底座、支撑杆、导线组成(为简化分析, 不包括探头部分), 如图 2 所示。

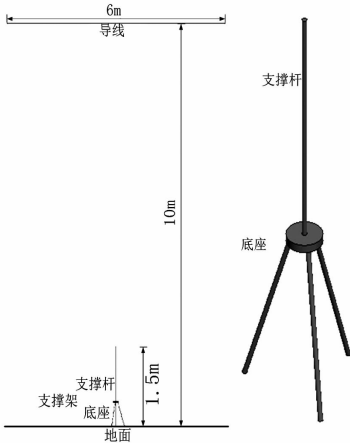


图2 分析模型三维视图

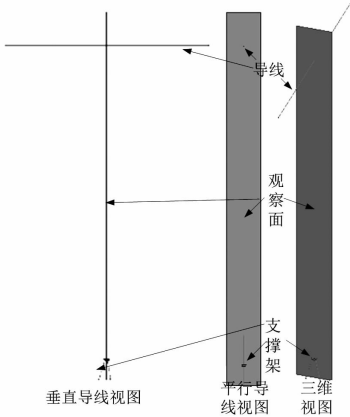


图3 观察面位置示意



图4 观察线位置示意(垂直于地面, 穿过支撑杆)

模型中导线电压为 10 kV (对地幅值), 支撑架由底座和支撑杆两部分组成, 支撑杆长度为 0.9 m, 外径为 20 mm。为了方便对计算结果进行分析, 模型选取了一个观察面和一条观察线, 观察面及观察线的相对位置如图 3 和图 4 所示。

当导线下方未放置电场测试设备及其附件时, 空间电场未受到干扰, 为标准电场。将此种情况下

的电场作为基准与改变支撑杆材质情况下的电场做比较,相关计算结果如图 5 所示。

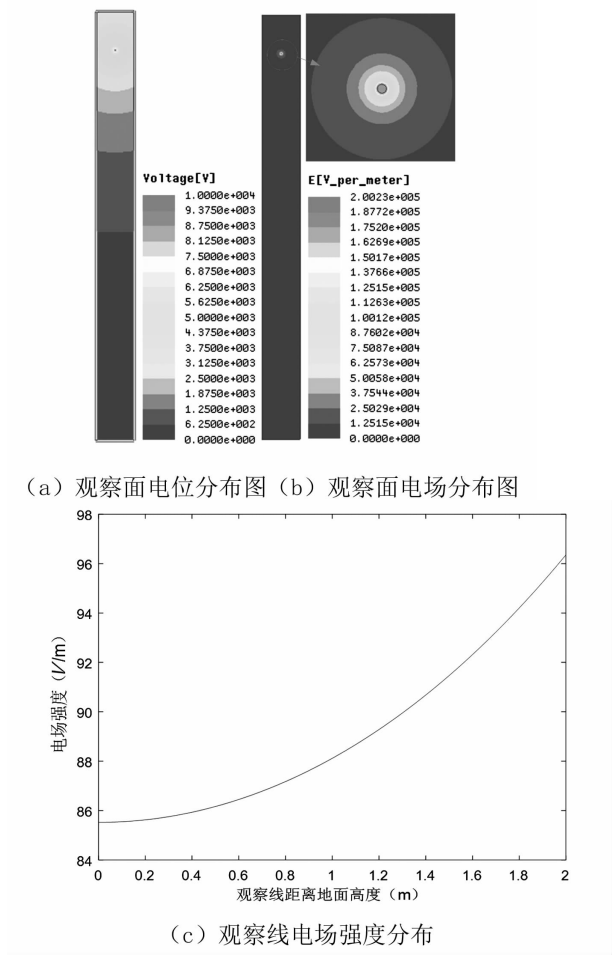


图 5 无电场测试仪情况下的基准计算结果

### 3 材质改变对空间电场分布影响

采用不同材质的支撑杆进行研究。首先选定底座的材质为环氧树脂(相对介电常数为 3.6),支撑杆的材质在后续分析中将分别修改为 PVC(相对介电常数为 2.7)、玻璃(相对介电常数为 5.5)和铝合金(相对介电常数默认为 $\infty$ ),得到不同材质的支撑杆对空间电场分布的影响。

#### 3.1 PVC

当支撑杆为 PVC 时,对应的空间电场计算结果如图 6 所示。

比较图 5(c) 和图 6(c) 可知,由于电场测试仪支架的存在,导致观察线上的电场强度发生了明显变化,在观察线由低到高穿越支撑杆的过程中,当其穿越底座下方和穿出支撑杆上方时,电场强度发生了跳变。

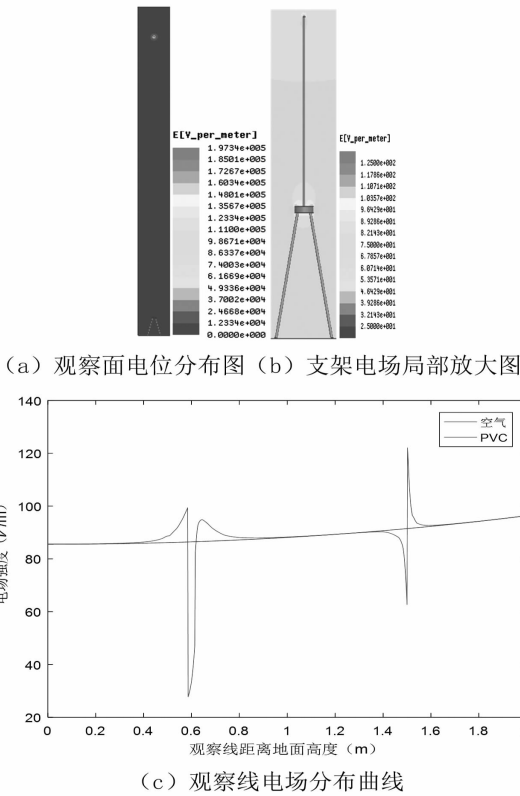


图 6 当支撑杆材质为 PVC 时空间电场计算结果

#### 3.2 玻璃

当支撑杆为玻璃时,对应的空间电场计算结果如图 7 所示。

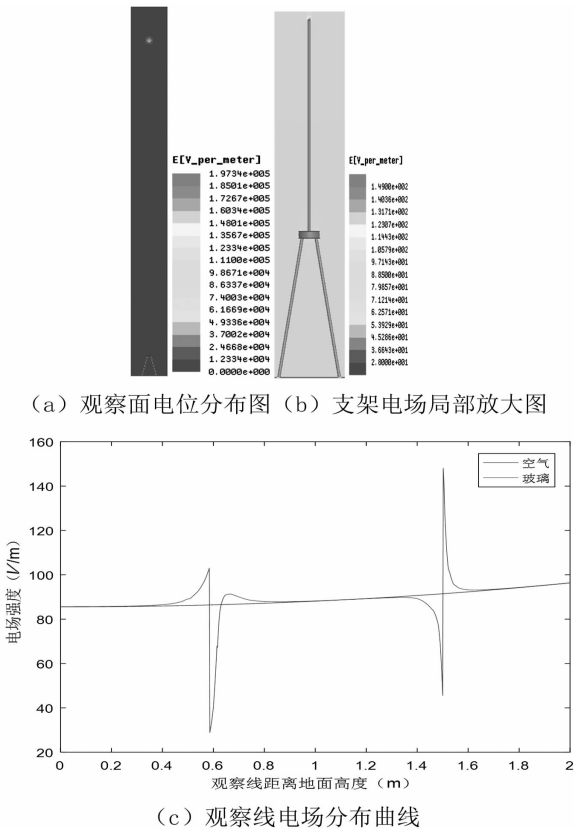


图 7 当支撑杆材质为玻璃时空间电场计算结果



比较图 7(c) 和图 6(c) 可知, 由于支撑杆材料由 PVC 变化为玻璃, 其相对介电常数变大, 导致了在介质界面两次电场跳变的幅值更大。

3.3 铝合金

当支撑杆为铝合金时, 对应的空间电场计算结果如图 8 所示。

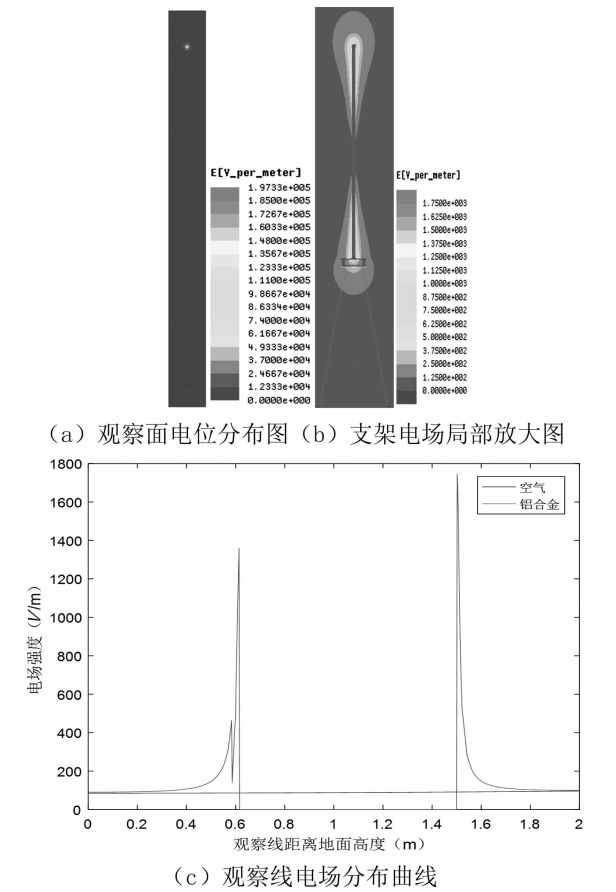


图 8 当支撑杆材质为铝合金时空间电场计算结果

从图 8 可知当支撑杆为铝合金时, 介质交界面上的电场强度发生了最为剧烈的变化(相比支撑杆为玻璃和 PVC 的情况), 此种情况下支撑杆对空间电场的影响最为严重。

4 支撑杆优化设计方案

从上面的分析可知, 3 种材质的支撑杆中, PVC 材质对空间电场分布的影响最小。对于同类型的 PVC 材质支撑杆, 一定还能找到更优化的结构方案。这里采用中空结构的 PVC, 管外径保持 20 mm 不变, 管内径为 16 mm, 进一步考察空心支撑杆对空间电场的分布影响。计算得到电场分布情况如图 9 所示。与图 6 相比, 采用相同外径的空心 PVC 管对空间电场分布影响较小。

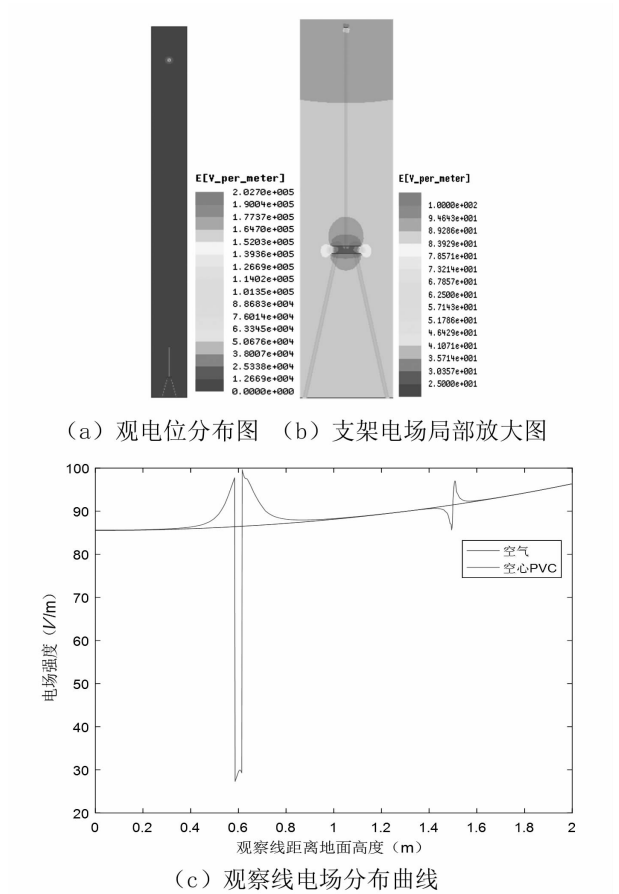


图 9 当支撑杆材质为空心 PVC 时空电场计算结果

5 结 语

- 1) 电场测试仪支架的材质与空气有很大差异, 两者交界面处会发生电场跳变。
- 2) 电场测试仪支架材质的介电常数越大, 对空间电场强度影响越大, 所以应该选用介电常数接近空气(相对介电常数为 1)的材质做为支撑架材料。
- 3) 当采用相对介电常数较低的绝缘材料作为电场测试仪支架时, 空心管对空间电场分布影响小于实心棒。

参考文献

[1] 张晋寅, 蒋龙生, 赵森, 等. 数字式无线工频电场测量仪的研制[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 22-27.  
[2] 张婷, 方志, 陈陶陶, 等. 球形电场测量系统在高压测量领域中的应用[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11): 11-16.  
[3] 李永明, 范与舟, 徐禄文. 超高压输电线路铁塔附近地面工频电场仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 782-787.

(下转第 75 页)

# 功率晶闸管的浪涌性能研究

董汉彬<sup>1</sup>,贾志杰<sup>1</sup>,王嘉易<sup>1</sup>,宁 鑫<sup>1</sup>,李泳龙<sup>2</sup>,戴 玲<sup>3</sup>

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;  
2. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065;  
3. 华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**通态不重复浪涌电流  $I_{TSM}$  是晶闸管的一个重要参数,能够反映该型号晶闸管承受故障电流的能力,为此设计了一种能在低电压、低通态电流上升率条件下产生高浪涌电流的测试平台。通过调整平台的回路参数,得到了被测晶闸管浪涌电流峰值和脉宽间的关系曲线,确定了其安全工作区间。  
**关键词:**晶闸管;通态不重复浪涌电流;换流阀;脉冲功率  
**中图分类号:**TN34 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0038-03

## Study on Surge Performance of Power Thyristor

Dong Hanbin<sup>1</sup>,Jia Zhijie<sup>1</sup>,Wang Jiayi<sup>1</sup>,Ning Xin<sup>1</sup>,Li Yonglong<sup>2</sup>,Dai Ling<sup>3</sup>

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,Chengdu 610041,Sichuan, China;  
2. College of Electrical Engineering and Information Technology,Sichuan University,Chengdu 610065,Sichuan,China;  
3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,Hubei, China)

**Abstract:**Non-repetitive peak on-state current ( $I_{TSM}$ ) is a key parameter of thyristor, which can indicate the short-circuit capacity. A test platform is designed to obtain high surge current under the condition of low voltage and  $di/dt$ . Plenty of tests are carried out to research the safe operation area of thyristor, and the relationship between pulse width and surge current amplitude of the tested thyristor is obtained.  
**Key words:**thyristor; non-repetitive peak on-state current; converter valve; pulse power

## 0 引 言

随着高压直流输电、柔性交流输电、高速铁路、脉冲功率等技术的发展与推广,IGBT、IGCT、GTO、晶闸管等功率半导体开关<sup>[1-8]</sup>一直是研究的热点领域。其中晶闸管由于其通流能力大、耐压水平高、使用寿命长、性能稳定、控制相对简单等优点得到了广泛的应用和持续的改进。

通态不重复浪涌电流  $I_{TSM}$  (以下简称浪涌电流)作为表征晶闸管极限通流容量的参数,能够反映该型号晶闸管承受故障电流的能力。一般的器件生产商仅提供工频情况(10 ms 脉宽)或者特定波形下的浪涌电流值,而晶闸管的浪涌电流能力和浪涌脉宽密切相关。随着晶闸管应用环境的改变,流过晶闸

管的电流波形也不是固定不变的,仅用单个数据点来描述其浪涌电流能力,信息十分有限。尤其对应用于变频电源、脉冲功率等非工频条件下的晶闸管,该指标并不能有效评价晶闸管实际工况中能够承受的浪涌电流能力。

为提高晶闸管实际应用时的可靠性,需要对其在不同脉宽下的浪涌电流性能进行研究,得出两者的关系,以便为晶闸管的选型提供参考和依据。

## 1 晶闸管的原理与结构

晶闸管是一种四层三端(A 阳极、K 阴极、G 门极)的可控型半导体器件,共 3 个 PN 结。通常用双晶体管等效模型来进行分析,如图 1 所示。

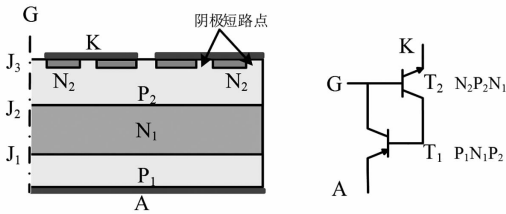


图 1 晶闸管芯片结构与等效模型

功率晶闸管一般采用双面冷却的扁平圆盘形封装,又被称为冰球型封装,如图 2 所示。在此封装中,芯片被固定在 2 个钼层中间。因为两者膨胀系数接近,能够防止芯片被热应力破坏。而上下 2 个钼片固定在两个铜基座间。铜基座作为对外电极,并兼做散热器。管壳内充入略低于大气压的惰性气体,用以防止内部芯片被氧化<sup>[9]</sup>。

晶闸管在开断的动态过程以及完全导通状态下都存在着电压降落,因此并不是理想开关。晶闸管工作时伴随功率损耗,生成焦耳热,当热量超过晶闸管芯片的热极限,就会损坏。一般认为晶闸管的平均耐受结温为 125℃,超过这个温度晶闸管将因热损坏而失效<sup>[10]</sup>。所以浪涌电流实际反映的是晶闸管的暂态热极限,并且和浪涌电流的脉宽相关<sup>[11]</sup>。

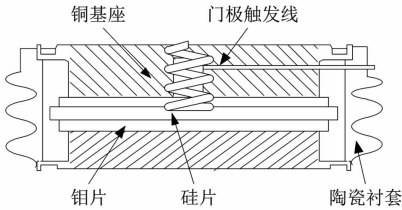


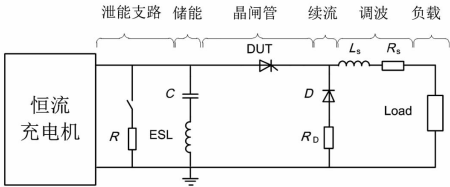
图 2 冰球型封装晶闸管剖面图

2 试验平台的搭建

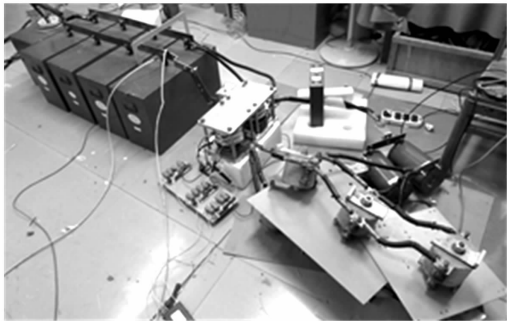
设计所使用的浪涌电流测试平台如图 3 所示。为避免晶闸管在进行浪涌电流能力测试时受到其他因素的影响,应该要求测试平台中晶闸管的断态重复峰值电压  $V_{DRM}$ 、通态电流上升率  $di/dt$  尽量小于其额定值。并且为了降低试验成本,每次测试仅用单片晶闸管做测试,因此试验电压不能选择太高。结合上述原因,测试平台必须具备在较低电压下(远低于晶闸管额定电压)能够输出大电流的能力。

图 3 a) 为该测试平台电路图。根据仿真软件计算结果,图中电容器组容量为储能元件,最大值设置为 5 000  $\mu\text{F}$ 。电感、电阻分别起到调波和阻尼的作用,其值根据所需浪涌电流的脉宽逐级调整。因为测试过程中,浪涌电流的脉宽跨度较大,续流二极管在电路中的位置也根据浪涌电流脉宽进行调整。脉宽较短的情况下,二极管支路被连接在晶闸管阴极

侧,如图 3 b);脉宽较长的情况下,二极管支路被连接在晶闸管的阳极侧。为防止故障时电容器的能量无法释放,必须设计泄能装置用于释放能量。这里采用高压真空陶瓷继电器作为平台的泄能开关、水电阻作为泄能电阻。试验时由高压恒流充电机对电容器组充电,并采用 Pearson 4427 作为电流传感器。

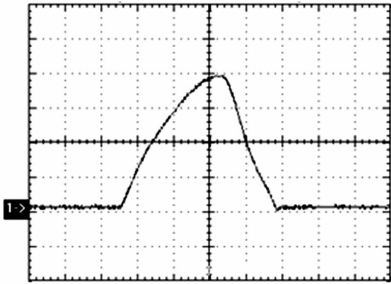


(a) 浪涌测试平台电路图

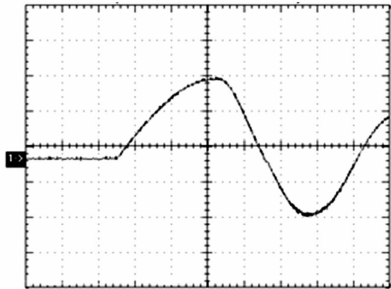


(b) 浪涌电流测试平台实物

图 3 晶闸管浪涌电流测试平台



(a) 正常电流波形



(b) 损坏电流波形

图 4 实验波形

因为测试平台输出的浪涌电流值与电容器组的充电电压为线性关系,所以通过调节充电机的输出电压来控制浪涌电流幅值。

短脉宽测试条件下,由于续流回路不包含晶闸管,因此可以直接根据流过晶闸管的电流波形来判断晶闸管是否已经被浪涌电流损坏。图 4 a) 为晶

闸管尚未损坏时的电流波形,图 4 b) 为晶闸管已经被浪涌损坏后的振荡电流波形,说明晶闸管已经没有阻断能力。长脉宽测试条件下,因为续流回路包含晶闸管,所以晶闸管损坏前后的电流波形没有差异,不能依靠电流波形判别晶闸管的好坏。因此必须在每次试验后对晶闸管进行一次耐压试验。

3 数据分析

利用此浪涌电流测试平台,对某型 5 inch 功率晶闸管产品进行浪涌电流测试。通过调整平台充电电容器与调波电感的参数,获得了该型号晶闸管在不同脉宽下的浪涌电流,具体测试数据如表 1 所示。

| 表 1 试验数据 |         |       |                            |
|----------|---------|-------|----------------------------|
| 序号       | 浪涌电流/kA | 脉宽/ms | $I^2t/\text{kA}^2\text{s}$ |
| 1        | 105     | 13.1  | 144.4                      |
| 2        | 140     | 7.5   | 147.0                      |
| 3        | 180     | 3.0   | 97.2                       |
| 4        | 222     | 1.0   | 49.3                       |

试验对该型晶闸管进行了 4 种脉宽条件下的浪涌电流测试。从表 1 的数据可以看出,随着电流脉宽的减小,晶闸管的浪涌电流值是增加的,但同时晶闸管能够承受的热积分是在逐渐下降的。

由于浪涌电流试验是破坏性试验,每测试出一组浪涌电流,就要损坏一片晶闸管。为了排除其他因素的影响,此次试验采用的晶闸管为同一型号同一批次的产品。

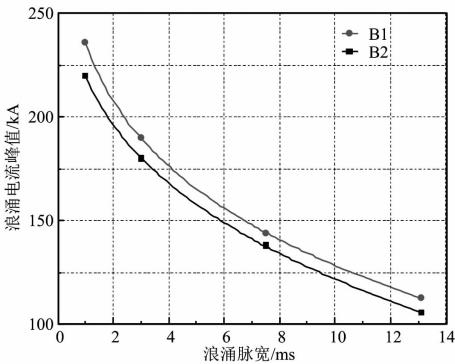


图 5 某型晶闸管的安全工作曲线

根据表 1 的数据,将浪涌电流与脉宽的关系绘制出图 5 中的 B2 曲线,同时将各种脉宽下的损坏电流绘制出图 5 中 B1 曲线。当晶闸管工作在 B2 曲线左侧区域时,能够保证晶闸管不会被浪涌电流损坏。如果晶闸管的工作状态落在了 B1 曲线的右侧区域,则晶闸管就一定会被浪涌电流损坏。B1 曲线和 B2 曲线之间的区域则是一个由于试验平台充电

电压分辨率导致的测试盲区。  
用幂函数  $f(t) = a \cdot t^b + c$  去拟合图 5 中曲线 B2,可得  $a = -110.8, b = 0.2741, c = 330.1$ ,即  
$$f(t) = -110.8 t^{0.2741} + 330.1 \tag{1}$$
  
对该型晶闸管,凡是符合  $f(t) - I_p \leq 0$  的工作情况,晶闸管就可以保证不会因为浪涌电流而热损坏。



图 6 被损坏的晶闸管芯片

4 结 语

通过设计低断态电压、低通态电流上升率和高浪涌电流的测试平台,测试出不同脉宽条件下晶闸管的浪涌电流。通过对试验数据分析,绘制出被测型号晶闸管的浪涌电流和脉宽的对应关系曲线。该曲线将有助于控制晶闸管使用时的安全裕量,为晶闸管的选型提供了更加全面的参考依据。

参考文献

[1] 丁荣军,刘国友.  $\pm 1100\text{ kV}$  特高压直流输电用 6 英寸晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(29):5180-5187.  
[2] 钱照明,盛况. 大功率半导体器件的发展与展望[J]. 大功率变流技术,2010(1):1-9.  
[3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
[4] 周金明,莫正康. 可控硅技术[M]. 北京:机械工业出版社,1978.  
[5] 刘国友. IGCT-GTO 技术的最新进展[J]. 半导体技术,2000,25(3):9-11.  
[6] 王彩琳. 门极换流晶闸管(GCT)关键技术的研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.  
[7] 戴玲,董汉彬,林福昌,等. 脉冲功率晶闸管的小型化[J]. 电工技术学报,2012,27(8):120-125.  
[8] 鲁万新. 脉冲晶闸管的放电特性及热特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.

(下转第 75 页)

# 基于晶闸管的无触点线路调压装置的低电压治理

姚 晓<sup>1</sup>,赵莉华<sup>2</sup>,马啟潇<sup>1</sup>,程胤璋<sup>2</sup>,李 铭<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;  
2. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065;3. 成都亿成科技有限公司,四川 成都 611731)

**摘 要:**为解决农村电网中普遍存在的低电压问题,提出了采用基于晶闸管无触点线路调压装置的治理措施。晶闸管无触点线路调压器将两个晶闸管反并联处理后连接到一台串联变压器的一次侧抽头上,通过设计相对应的单片机控制系统发出相应的触发信号来控制这组晶闸管开关的通断从而调整变压器一次侧绕组接入的多少达到稳定输入电压的作用。在具体控制中,为了防止出现两组晶闸管开关器件之间形成环流,需要找到相应的措施来开通晶闸管开关。经过试验验证,晶闸管无触点线路调压器完全可以起到稳定电压的作用。  
**关键词:**低电压治理;电能质量;晶闸管;无触点调压  
**中图分类号:**TM727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0041-05

## Low Voltage Regulation of Non – contact Regulating Device Based on Thyristor

Yao Xiao<sup>1</sup>, Zhao Lihua<sup>2</sup>, Ma Qixiao<sup>1</sup>, Cheng Yinzhang<sup>2</sup>, Li Ming<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. Chengdu Yicheng Technology Co.,Ltd.,Chengdu 611731, Sichuan, China)

**Abstract:**In order to solve the problem of low voltage in the rural power grid, the control measures of voltage regulating device based on the non – contact line of thyristor are proposed. Thyristor step voltage regulator will be treated as two thyristors in inverse parallel connection to a series on the primary side of transformer tap, with the corresponding design of single chip micro-computer control system, the corresponding trigger signals are released to control the set of thyristor, thus it adjusts the transformer winding connecting in primary side to stabilize the input voltage. In the concrete control, in order to prevent the formation of circulation between thyristor switch devices, the corresponding measures need to be found to open the thyristor switch. It is proved that the thyristor step voltage regulator can be used to stabilize voltage.  
**Key words:**low voltage regulation; power quality; thyristor; voltage regulation without contact

### 0 引 言

新世纪以来伴随着中国对农村建设的一系列扶持政策,广大农村的用电情况发生了天翻地覆的变化,而农网所承受的供电压力也与日俱增,许多地区电网都存在低电压的问题,电网长期处于低电压运行状态会对电网以及用电设备产生严重的影响。在电网方面,低电压会使变压器的输出功率降低,运行线路损耗增加。在用户方面,低电压会导致用电设备、机床电器的电磁开关、电磁铁的吸力不足,操作

控制失效,触头烧毁,普通家用电器也会出现启动困难,缩短使用寿命,甚至烧坏的情况<sup>[1]</sup>。造成低电压问题的原因,一方面是管理的因素,农村供电部门普遍缺少管理经验,同时受地理位置的影响,许多输电线路的铺设难度极大,造成电网延伸点分布众多。另一方面是技术的因素:中国农网电压等级为 35 kV、10 kV、0.4 kV,其中 10 kV 线路的供电负荷大、供电半径长,因此在实际运行中往往存在低电压的情况;由于上一级系统电压较低,造成 10 kV 母线出现电压过低的问题;某些情况下配电变压器的安装位置会偏离用电负荷的中心位置,造成低压线路分

布超出了其供电半径,这也会使电网低电压运行<sup>[2]</sup>。

为了解决这一问题,国内外专家学者进行了广泛的研究,主要提出了以下几种治理方法:文献[3-4]提出了静止型动态无功补偿装置 SVG 进行低电压治理的方案,通过控制其无功输出的大小,就可以调节系统的电压损耗,从而调节系统的电压水平。文献[5-7]提出了通过降低变压器的三相负荷来改善三相不平衡情况,该方法可以有效降低变压器和线路的损耗,尤其是对于传统的采用 Yyn0 接线方式的配电变压器降损效果更显著。一般要求变压器出口处电流不平衡度小于 15%,但就目前农网格局而言,很难做到大规模的负荷调整。文献[8-9]提出了静止无功补偿器 SVC 进行低电压治理的方案。SVC 也是目前市场上较为广泛采用的动态无功补偿装置,它具有连续调节无功功率输出、响应速度快的特点。但 SVC 向系统中输入的高次谐波较多,铁耗和铜耗相对来说都比较大,装置中采用的电抗器的体积也比较大,还需要进一步地改进完善。文献[10-11]提出了安装无功补偿装置的方案,既可以减少线路的损耗,也可以提高线路末端电压,一举两得。安装无功补偿设备的主要目的是平衡系统无功功率和降低损耗,无功补偿设备对线路末端电压抬升幅度取决于线路结构和负载的功率因数高低。文献[12-14]提出了在低压线路末端安装调压装置的解决方案,该方案可在不更换变压器和改造线路的情况下,提高线路末端电压,满足用户用电需求,电压提升幅度可以达到 40%。但这种方法会使调压装置安装处前端电压有所降低,适用于供电半径较大、线路首末端电压差较大而末端负荷功率不是太高的配电台区。

下面所介绍的晶闸管无触点调压器具有无触点、调压范围宽、稳压精度高、动态响应速度快等特点。这种装置无需机械开关的切换,也不会产生电弧,在调节过程中不需要断电,并且成本相对较低,这些特点在电力系统经济运行、改善电网电能质量等方面都具有不可替代的优点。

## 1 无触点线路调压器工作原理

晶闸管无触点调压器主要包括串联调压变压器 T1、调节变压器 T2、反并联晶闸管开关器件 TR、控

制器、旁路开关 K、电压互感器,如图 1 所示。

控制器通过电压互感器从电网采集电压信号,并将其与标准电压进行比较计算,得到需要生成的附加电压  $\Delta U$ ,根据  $\Delta U$  的取值,控制器生成相对应的信号来控制晶闸管开关器件组 TRS 的导通与关断;反并联晶闸管器件组 TRS 与串联变压器一次侧中心抽头相连接,根据晶闸管器件组 TRS 的导通情况决定串联变压器二次侧感应电压的大小,也就是附加电压  $\Delta U$  的大小,最终输出  $U_0 = U_i \pm \Delta U$ 。当检测到电网电压过低时,生成的附加电压  $\Delta U$  为正值,称为升压调压;当电网电压过高时,生成的  $\Delta U$  为负值,称为降压调压;这样就达到了稳定电网电压的目的。

串联变压器的副边上并联有旁路开关 K,用于各种故障的快速旁路以保证线路供电连续性,也便于装置的投运、调试与检修。

由于器件串联在线路上,装置的软件设计充分考虑了短路保护、过载保护和换挡调压的快速性,缩短响应时间、换挡失电时间以及控制任何故障下的旁路时间,以便保证所有时段的供电连续性。

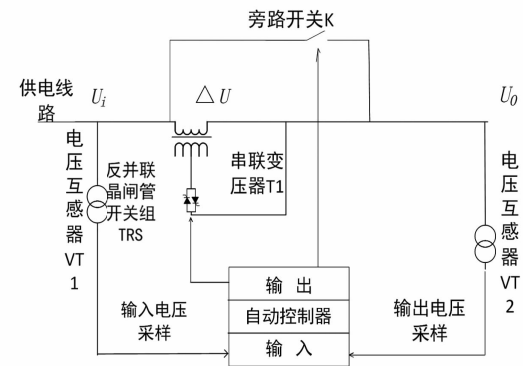


图 1 晶闸管无触点线路调压器工作原理图  
1.1 晶闸管分接开关主电路

晶闸管反并联器件组是整个装置的关键元件,它必须在不影响变压器负载正常工作的情况下实现对变压器一次侧分接抽头的切换,来调节输出电压,即自动稳定有载调压。晶闸管是一种半控型的电力电子器件,它本身没有自关断的能力,可是如果将其运用在交流电系统中,可以借助其过零关断的能力实现晶闸管的导通关断,所以将两只晶闸管反向并联作为交流开关使用。在工作中,反并联的两只晶闸管各自只会通过完整正弦波中的一个半波,实现了开关的无触点化,且器件反应时间可以达到微秒级。正因为这些优点,在所提方案中将其作为有载

调压器的执行元件。具体设计时,把反并联晶闸管组连接到变压器一次侧的每一段绕组与中性点之间,从而形成了调压器执行部分的主电路,如图 2 所示。

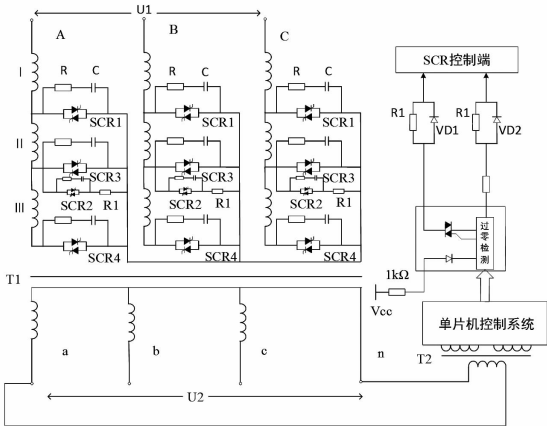


图 2 反并联晶闸管连接方式

由图 2 可知,该方案主电路部分包括安装在变压器 T1 一次侧的 6 组反并联晶闸管器件组 SCR1、SCR3、SCR4 以及并联在晶闸管器件组两侧的 RC 缓冲电路、限流分支电路 SCR2 与 R1,还有连接在变压器二次侧的电压检测变压器 T2 以及单片机控制系统。

在变压器的一次绕组处,从三相绕组中各设置 3 组连接头,标记为 I、II、III。它们与反并联晶闸管开关组 SCR 相连后连到变压器的中性点。单片机控制系统通过隔离变压器来监测变压器二次侧的电压,然后根据采集到的电压信号发出对应的指令信号来触发电路控制晶闸管器件组的开通和关断。除此之外,主电路部分还增加了限流分支 SCR2 和 R1,其目的就是限制环流的大小,从而保证晶闸管器件组在切换工作过程中的供电可靠性以及安全性。

反并联的晶闸管器件组两端装设有 RC 缓冲电路,其目的是减小晶闸管器件长期处在快速开断时器件两端产生的高电压,也就是关断浪涌电压。

装置开始工作后,变压器一次侧的晶闸管开关工作在 II 档位,此时 SCR3 器件组导通,其他 SCR 器件组关断,单片机控制系统通过监测变压器检测二次侧的电压,如果电压是在  $(95\% \sim 105\%) U_N$  内波动时,晶闸管器件组的工作状态将保持在 II 档位;当检测到二次侧电压低于  $95\% U_N$  时,分接开关会调整到 I 档位;当二次侧电压高于  $105\% U_N$  时,晶闸管分接开关就调整到 III 档位。

## 1.2 反并联晶闸管器件组控制策略

变压器调压分接头在调高输出电压的时候会有环流产生,但要调低输出电压时不会出现环流。

反并联晶闸管器件组在工作中,单片机控制系统只能通过触发信号控制器件的导通,如果要关断晶闸管必须选在晶闸管通过的电流过零的时候,所以有必要研究具体操作时的控制方式。

图 3 为变压器正常运行时的等效电路图。

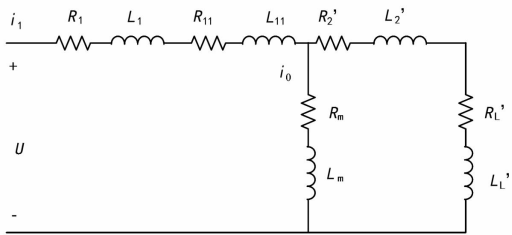


图 3 变压器稳态运行的等效电路

图 3 中,  $L_1$  和  $R_1$  为主绕组的电感和电阻值,  $L_{11}$  和  $R_{11}$  分别为分接开关  $k_1$  和  $k_2$  之间调压绕组的电感和电阻值。  $R_m$ 、 $L_m$  分别为励磁电阻、电抗,  $R_2$ 、 $L_2$  分别为归算后的二次侧绕组电阻、电抗。  $R'_L$ 、 $L'_L$  分别为归算后的负载电阻、电抗。在工作时,  $I_1 \gg I_0$ , 可略去励磁阻抗的存在,变压器简化等效电路如图 4 所示。

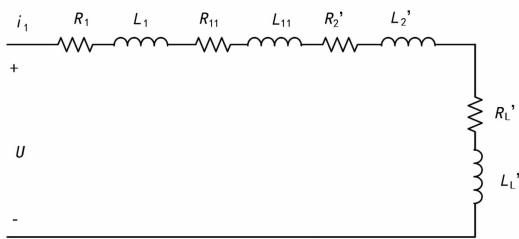


图 4 变压器稳态运行的简化等效电路

假设原边电压  $u = U_m \sin(\omega t + \theta)$ , 原边电流为  $i_1$ , 由图 4 可以得到  $i_1$  在稳态运行时为

$$i_1 = \frac{U}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \sin(\omega t + \theta - \alpha)$$

$$= I_m \sin(\omega t + \theta - \alpha) \tag{1}$$

式中,  $I_m = \frac{U}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}$ ,  $\alpha = \arctan(\omega L/R)$ 。

由于晶闸管开关电流过零关断的特点,如果控制系统同时发出晶闸管关断和导通的信号时,会出现将要开通的开关导通而需要断开的开关还未能关断的情况,在两个开关器件所构成的闭合回路中就会出现环流  $\Delta i$ ,  $\Delta U$  为两晶闸管开关间的电压,  $K_1$ 、 $K_2$  为分接头,等效电路如图 5。

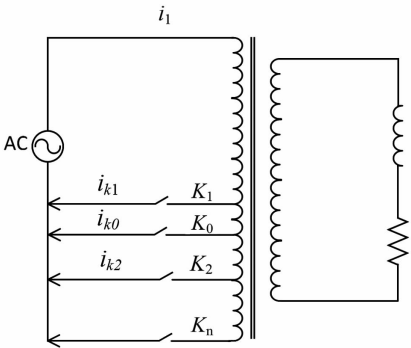


图5 晶闸管器件组等效电路

可以计算得到：

$$\Delta i = \Delta I \sin(\omega t + \theta - \delta) + Ae^{-\frac{R_{11}}{L_{11}}t} \tag{2}$$

式中,  $\Delta I = \frac{\Delta U}{\sqrt{(\omega L_{11})^2 + R_{11}^2}}$ ,  $\alpha = \arctan(\omega L_{11}/R_{11})$ 。

由于  $L_{11}$ 、 $R_{11}$  很小,即使很小的  $\Delta U$  都将产生较大的  $\Delta I$ ,使得  $\Delta I \gg I_m$ 。因为  $\Delta i$  自身就是冲击电流,且  $\Delta I \gg I_m$ ,那么即使不考虑衰减系数  $A$  的大小,也可以得到  $\Delta i \gg i_1$ ,这就会严重危害装置的安全运行,导致变压器无法正常工作。为了避免上述情况的发生,可采用在电流  $i_1$  过零时导通晶闸管有载分接开关。该方法可以确保将要导通的晶闸管器件组  $K_2$  接到控制信号时,晶闸管器件组  $K_1$  已经完全彻底断开连接,电路中不会出现冲击电流  $\Delta i$ 。

2 晶闸管调压器主要技术指标

图6和表7分别为基于晶闸管的无触点线路调压装置的外形及局部尺寸图和对应的装置外形尺寸表。

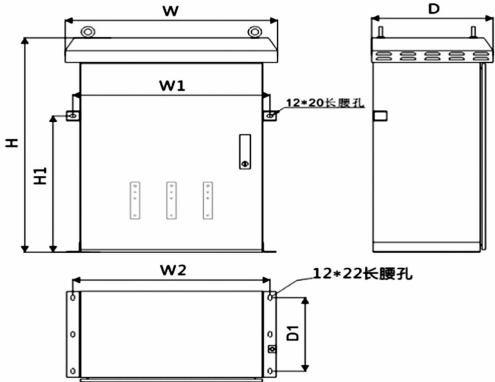


图6 基于晶闸管的无触点线路调压装置结构

图7为基于晶闸管的无触点线路调压装置的使用接线图,其中 L、L3、N 接口分别为火线输入、火线输出和零线接口,分别接电源侧进线 L、N 和用户侧出线 L3、N。

表1 晶闸管无触点线路调压装置技术参数

| 项目             | 技术性能指标                     |
|----------------|----------------------------|
| 额定工作电压/V       | 380/220                    |
| 额定工作频率/Hz      | 50                         |
| 输入电压范围/(p. u.) | 0.4 ~ 1.2                  |
| 输入调压范围/(p. u.) | 0.7 ~ 1.2(可按用户要求设计)        |
| 额定容量/kVA       | 单相 10、20、30<br>三相 30、60、90 |
| 调压响应时间/ms      | < 50                       |
| 调压切换时间/ms      | < 20                       |

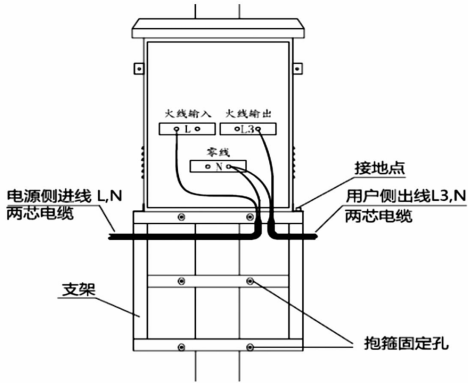


图7 装置使用接线图

3 实验及挂网运行

3.1 调压性能实验

针对调压器的调压性能进行测试。按图8所示,为了显示电压变化,将两台电压表分别接到调压器输入端、输出端,并在输出端连接一台示波器以检测电压波形。



图8 测试接线图

实验时逐渐升压到最大值后再逐渐降压,同时记录调压器输入端的电压以及输出电压。将输入输出电压进行对比,结果见图9、图10。

根据试验结果可知:当输入端电压发生 150 V 到 250 V 之间的波动时,该型调压器具备良好的调压性能,可以将输出电压始终稳定在 220 V 左右。根据实际电网情况,电压下降不会低于 150 V,所以当输入端电压不稳定时,调压器能够很好地调节输



出电压,使得输出电压保持在一个稳定的水平,供用户正常使用。

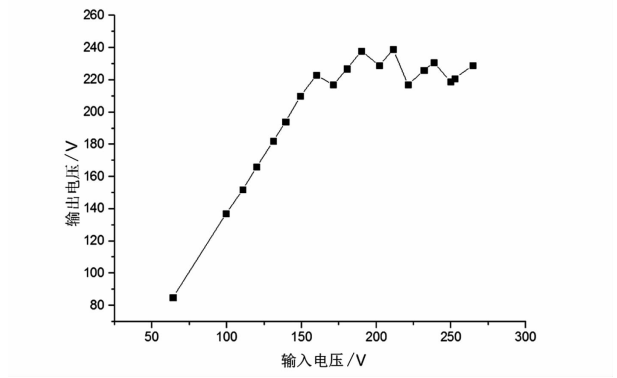


图9 升压实验数据

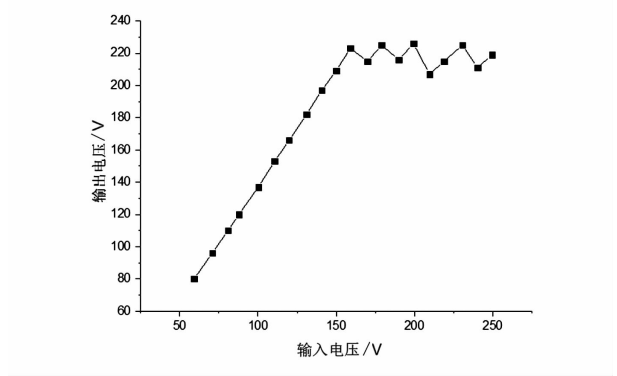


图10 降压实验数据

### 3.2 挂网运行实验

为了更好地检验在实际工作条件下的调压器工作情况,选取了某县郊区的低电压台区作为线路调压装置的挂网试验地点。该台区配电变压器容量为315 kVA,供电半径长400 m左右,支线户数为5户。装置的安装位置选择在该台区某支线线路中的C相末端。根据当地电工提供的信息,所选位置用户长期电压在190 V左右,在用电高峰时期,甚至低至160 V左右,导致居民不能正常使用家用电器,严重影响了正常生活用电。安装效果如图11所示。

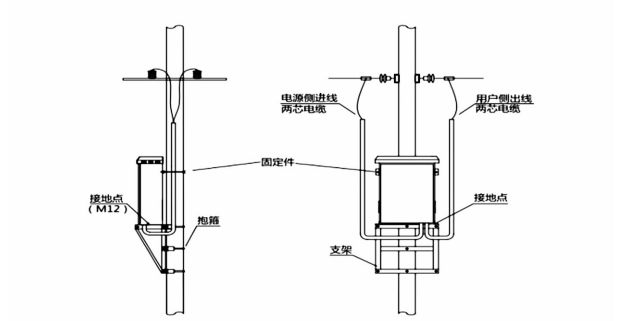


图11 晶闸管无触点线路调压装置安装效果示意

设备投入运行后,通过电能质量分析仪记录的支路农户数据情况如图12所示。

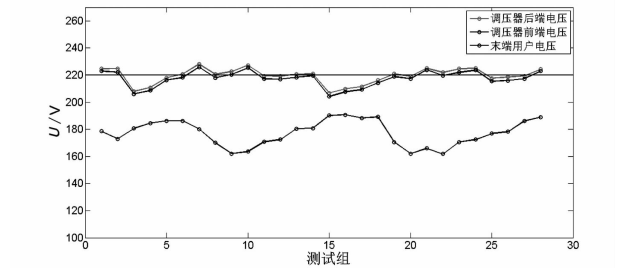


图12 调压装置挂网运行后线路测试数据

由图12分析可知,经过调压器的处理后,低电压问题得到显著改善,线路末端电压始终处于一个稳定的水平。这说明无触点线路调压器解决了该县低电压台区末端电压偏低问题,相比增设变压器等解决方式大大节省了成本。这种调压器配置灵活,能做到快速安装解决低电压问题,无论投入的成本还是人力均较低,简单方便,可以大力推广使用。

## 4 结 论

针对电网中的低电压问题,提出了采用基于晶闸管无触点线路调压装置的治理措施,并通过实验验证了该方案对处理低电压问题的有效性,并得到以下结论:

- 1)晶闸管无触点线路调压器能够对电网电压的波动进行快速频繁的调节,使线路末端电压的合格率得到满足。而且相对于有触点调压器以及其他调压设备有很多优点,如快速性和频繁性。在实验中,可以看到晶闸管无触点线路调压器在输入端不断地进行升降压操作时,均可以将输出电压保持在一个比较稳定的水平,从而很好地解决了电网中的低电压问题。这对整个电力系统而言都具有相当重要的意义。
- 2)基于晶闸管的无触点调压器在控制策略方面需要格外注意,为了防止晶闸管器件组之间形成强大的环流损坏晶闸管以及线路,可采用在电流 $i_1$ 过零时导通晶闸管有载分接开关消除环流的影响。

### 参考文献

[1] 宋秀芳. 基于快速开关型串联补偿的农网低电压治理研究[J]. 电气技术, 2017(1): 92-94.  
[2] 崔晓飞, 许中, 朱明星, 等. 低电压治理装置的适用性分析[J]. 电气应用, 2016(23): 61-65.  
[3] 高生军, 张浩, 姬强. 10kV 串联补偿装置在低电压治理中的应用[J]. 自动化应用, 2016(5): 96-97.

(下转第94页)

# 四川电力发展对新能源建设规模影响分析

陈汉雄

(中国电建四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610016)

**摘要:**根据“十三五”中后期四川未来电力需求负荷预测、电源装机规模、电网规划等电力发展状况,研究分析未来2020年四川新能源合理的规划建设规模容量。一方面根据四川全网电力电量平衡计算分析新能源电力建设市场空间,以及新能源建设对四川省水电丰期弃水以及火电利用小时数影响;另一方面,结合川西水电送出通道以及川电出口外送通道的电网建设规划,分析电网建设与电网输电能力对未来四川新能源规模及电力顺利送出的影响。

**关键词:**电力系统;新能源;电网

**中图分类号:**TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0046-05

## Influence Analysis of Sichuan Power Development on New Energy Construction Scale

Chen Hanxiong

(PCCC Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, Sichuan, China)

**Abstract:**According to the future power development status in Sichuan province including electric power demand, power installed capacity and grid planning etc., the reasonable construction scale for new energy planning of Sichuan province in 2020 are studied and analyzed. On one hand, the power construction market space of new energy in Sichuan is calculated and analyzed based on power and electricity quantity balance of Sichuan power grid, as well as the influence of new energy construction on the quantity of abandoning energy in high flow period and the thermal power utilization hours. On the other hand, the influence of grid construction and power transmission capability on new energy construction scale of Sichuan are analyzed according to Sichuan grid construction planning.

**Key words:**power system; new energy; power grid

截止2016年年底,四川全网新能源(风电、光伏电站)总装机规模达到为2 197 MW,其中风电1 247 MW、太阳能光伏电站950 MW;2016年风电年利用小时数为2 247 h、光伏电站年利用小时数为1 476 h。

根据最新四川省新能源(风电、光伏电站)规划,到2020年四川全省规划及现有风电总装机达到约7 500 MW,太阳能光伏电站达到约3 600 MW。未来“十三五”中后期四川省新能源(风电、光伏电站)的实际电力建设空间、建设时序、建设后经济效益等,则与未来“十三五”中后期四川省的电力系统发展状况(包括电力负荷需求增长、四川省电源建设规划、电网建设规划)、国家及四川省对非水新能源、水电、化石能源等电力消纳政策(包括合理消纳新能源,如何兼顾平衡合理控制四川省水电弃水问

题、火电利用小时数下降问题等)息息相关;此外,电网届时的实际投产建设进度、基于电网安全下的输电通道实际可能输电能力等对新能源(风电、光伏电站)的顺利送出亦有较大影响。若不能顺利送出,则新能源被限电而出现弃风、弃光等问题的概率和风险将加大,将直接影响四川省“十三五中后期”新能源项目建设必要性及项目建设的经济效益。

基于四川全网现有及未来明确的电力边界条件,从四川省2020年全口径电网电力电量平衡、新能源建设对四川省水火电影响、“十三五”中后期电网实际可能输电能力等多方面计算、研究、分析“十三五”期间四川全网电力发展对“十三五”中后期新能源(风电、光伏电站)建设规模影响以及2020年四川新能源合理的规划建设规模容量。

# 1 “十三五”期四川电力发展规划

## 1.1 电力负荷需求预测

2016 年四川电网调度口径最大用电负荷为 35 400 MW, 全年用电量为 186 800 GWh, 外送电量为 130 000 GWh。2016 年四川全网电力供需总体呈现“丰盈枯足”状况。丰、平水期水电快速增长, 水电电量大量富余, 水电丰水期弃水电量高达 141 40 GWh。

根据四川电网“十二五”期历史用电现状, 结合四川省“十三五”期国民经济和社会发展规划, “十三五”期四川全网需电量和最高用电负荷的年均增长率分别按照约 4.64%、4.82% 考虑, 到 2020 年四川电网全口径的需电量和最高负荷需求预测分别为 250 000 GWh 和 47 200 MW (这一数值是以近几年四川全省实际用电现状为基础做的一预测值, 且被四川省发改委认可)。

## 1.2 电源规划

截止 2016 年年底, 四川电网全口径装机容量水电 72 455 MW、火电 16 420 MW、风电 1 247 MW、太阳能光伏电站 950 MW。

2016 年四川电网继续开展节能发电调度试点工作, 并严格执行省政府年度发电机会, 全力保障风电、水电及其他可再生能源发电优先上网。2016 年四川电网水电机组平均年利用小时数为 4 246 h, 火电机组较低为 2 133 h, 风电机组为 2 247 h, 太阳能光伏电站为 1 476 h。

根据四川电网全口径电源规划, 到 2020 年四川水电装机总容量达到为 83 770 MW, 四川火电装机总容量达到为 18 010 MW。根据成都勘测设计研究院有限公司 (以下简称成勘院) 最新提供的四川省新能源 (风电、光伏电站) 规划, 初步规划到 2020 年四川全省风电总装机 (新增规划 + 现有) 规模达到约 7 500 MW, 太阳能光伏电站规模 (新增规划 + 现有) 达到约 3 600 MW<sup>[1]</sup>。

## 1.3 川电出口外送通道建设及规划

截止 2016 年年底, 四川电网与区外电网 (西北电网、重庆电网、华东电网) 通过“4 直 + 4 交” (其中 4 直为: 1 回德阳—宝鸡 ± 500 kV 直流工程、1 回向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流工程、1 回锦屏—苏南 ± 800 kV 特高压直流工程、1 回溪洛渡左—浙西 ± 800 kV 特高压直流工程; “十三五”期 4 回直流

丰水期可实现最大外送电力为 24 600 MW。“4 交”为: 2 回黄岩—万县 500 kV 交流线路、2 回洪沟—板桥 500 kV 交流线路) 交直流输电线路实现电力交换, “十三五”期该 4 回交流线路丰水期大方式下可实现最大外送电力为 4 000 MW。

根据最新四川电网规划, 到 2020 年四川电网与区外电网交换的川电出口交直流输电线路在现有电网基础上发展为“5 直 + 6 交” (其中增加 1 回雅中—江西 ± 800 kV 特高压直流<sup>[2-3]</sup>、2 回资阳—思源 500 kV 交流线路)。

# 2 “十三五”期四川电网新能源建设空间以及对四川本省水火电影响分析

## 2.1 四川“十三五”中后期新能源电力建设空间及电能消纳功能定位

四川电网“十三五”中后期新能源电力建设空间及电能消纳功能定位: 新能源部分电能可在四川省内电力市场消纳; 在不额外增加送电通道条件下, 部分新能源电能借助川西南多回特高压直流输电平台实现远输区外电网。

风电、光伏电站作为非水可再生新能源, 绿色、清洁、环保、占地少, 对于补充四川省电源结构、部分缓解四川省与区外电网环保减排压力等方面将发挥一定的积极作用。

## 2.2 2020 年四川全省电量平衡计算分析

1) 新能源参与 2020 年四川全口径电力平衡影响分析

2020 年四川电网有如下明确的电力边界条件: ①全口径最大电力用电负荷 47 200 MW、需电量 250 000 GWh; ②2020 年四川水、火电装机总容量分别达到 83 770 MW、18 010 MW; ③2020 年丰期 8 月川电经交直流外送通道“5 直 6 交”共可实现最大外送电力 36 600 MW; ④四川风电保证率考虑为 80%; ⑤鉴于太阳能光伏电站出力的随机性与间歇性, 不纳入四川全网电力平衡; ⑥四川电网丰期 8 月、枯期 (2 月与 12 月) 用电负荷大方式。

根据风电出力特性: 考虑保证率为 80% 条件下, 夏季 8 月风电平均出力约为其装机容量的 5%, 冬季 12 月风电平均出力约为其装机容量的 15%; 若考虑 2020 年风电规划装机总容量为 7 500 MW, 其分别对应 8 月、12 月风电利用容量均相对较低, 其中 8 月风电利用容量仅为 380 MW、12 月风电利

用容量有所提升为 1 100 MW;风电利用容量占四川全系统需要容量的比例分别为 0.4% (8 月)、1.7% (12 月),因此四川风电在保证率为 80% 条件下整体出力均较低。

鉴于 12 月(四川火电装机控制月份)风电出力较低,因此四川规模风电在系统高峰负荷时段对常规机组(火电)的替代作用十分有限;亦即四川风电容量效益低,其整体的风电装机容量规模(无论是 7 500 MW 抑或为有所调整)对四川电力平衡的火电装机容量影响很小。

四川太阳能光伏电站总容量小,且其日最大出力出现在 12:00 ~ 15:00 时间段,出力波动亦较大,存在相当的不确定性;而四川电网丰期、枯期日负荷最大出现的主要时刻在 19:00 ~ 20:00 左右,光伏电站出力已很小甚至接近 0,因此四川光伏电站装机容量规模对四川本省火电的装机容量规模没有影响。

总之,四川新能源(风电、太阳能光伏)电站装机容量对满足四川电力平衡的火电装机容量需求影响很小。

#### 2)2020 年四川全口径电量平衡分析计算

具有相当规模容量的新能源(风电+光伏电站)接入系统后,尽管其本身出力特性具有间歇性与不确定性特征,但若其所发电量均全部送入电网后,因其所发电量的累积效应,则势必对四川本省现有的水电所发电量及经济效益产生一定的影响。

考虑到 2020 年四川新能源的初步规划方案 10 100 MW(风电 7 500 MW + 光伏电站 3 600 MW)总容量条件,一方面将较大增加四川水电丰水期弃水电量,鉴于水电本身亦为清洁能源且单位发电上网电价更具竞争力,因此为消纳更多新能源发电量而增加过多丰水期弃水电量的举措不尽合理;另一方面对四川火电利用小时数亦有相当影响,因此尝试研究兼顾水、火、新能源发电相对均衡的 2020 年新能源合理规划装机容量为 6 400 MW(风电场 5 000 MW + 光伏 1 400 MW)。对应初步规划方案与合理规划方案参与四川全网电量平衡计算对比如表 1 所示。

合理规划新能源方案中 2020 年新能源总装机容量考虑两个电力边界条件:①四川的 3 种清洁能源(水电、风电、光伏电站)丰水期(6 ~ 10 月)弃水、弃风、弃光占各对应类型电站丰水期发电量的比例均约为 10%;②风电、光伏电站新能源全年发电总

量占四川负荷所需电量的比例不小于 5%。需要说明的是上述两条件是参考目前国家及四川省能源局所执行的对新能源<sup>[4]</sup>、水电的电能消纳政策综合平衡考虑的。

2020 年风电、光伏电站年利用小时数分别考虑为:风电平均年利用小时数约 2 200 h、光伏电站平均年利用小时数约 1 230 h。

根据表 1 计算结果可知:

1)2020 年四川电网在考虑优先消纳非水清洁能源(风电场、光伏电站)且新能源规模为初步规划方案规模(风电 7 500 MW + 光伏电站 3 600 MW)的条件下:①2020 年四川电网水电全年利用小时数约为 4 170 h,其中丰水期(6 ~ 10 月)调峰弃水电量高达约 28 070 GWh。②由于全年非水清洁能源(风电场、光伏电站)所发电量对四川火电的部分替代效应,2020 年四川火电全年利用小时数降低至为 1 735 h。

2)2020 年若四川全网新能源规模调整为合理规模方案(风电 5 000 MW + 光伏电站 1 400 MW),对应此装机规模条件:①2020 年四川电网水电全年利用小时数基本不变,但其中丰水期(6 ~ 10 月)调峰弃水电量降低到约为 25 360 GWh。②2020 年四川火电全年利用小时数提高至 2 017 h,接近 2016 年火电机组年利用小时数水平。③对应该方案下新能源所发电量占比全省用电负荷需求量的 5%。

3)通过分析比较 2020 年四川电网在两种不同新能源总装机规模条件下的全网电量平衡计算结果可知:相对而言,通过适当降低新能源装机规模容量(风电 5 000 MW + 光伏电站 1 400 MW)对四川电网 2020 年水电丰期弃水量以及降低四川本省火电利用小时数的影响相对更小。具体为:一方面,四川电网 2020 年丰期弃水电量可降低约 2 710 GWh;另一方面,四川火电利用小时数可提高至接近 2016 年火电机组年利用小时数水平。

#### 2.3 “十三五”中后期新能源建设对四川水电丰期弃水问题与四川火电年利用小时数影响分析

“十三五”中后期,根据川西风电、光伏电站全年出力特性,全年风电、光伏电站均有电量送入四川主网。但由于,一方面丰水期四川电网本存在大量调峰弃水电量,在四川丰水期外送电力电量确定的条件下,四川电网实际运行中要么选择弃风(即损失风电丰水期所发电量)和弃光(损失光伏丰期发电

表 1 2020 年四川电网电量平衡表

单位:100 GWh/h

| 项 目/年 月                | 初步规划方案                             |          |       | 合理规划方案                             |          |       |
|------------------------|------------------------------------|----------|-------|------------------------------------|----------|-------|
|                        | 2020 年( 风电 7 500 MW + 光伏 3 600 MW) |          |       | 2020 年( 风电 5 000 MW + 光伏 1 400 MW) |          |       |
|                        | 12 ~ 5 月                           | 6 ~ 10 月 | 全年合计  | 12 ~ 5 月                           | 6 ~ 10 月 | 全年合计  |
| 1. 系统需要电量              | 1 741                              | 2 271    | 4 012 | 1 740                              | 2 271    | 4 011 |
| ①负荷电量                  | 1 406                              | 1 095    | 2 500 | 1 406                              | 1 095    | 2 500 |
| ②外送电量                  | 335                                | 1 176    | 1 512 | 334.9                              | 1 176    | 1 511 |
| 明确送电协议外送电量             |                                    |          | 950   |                                    |          | 950   |
| 尚未确定外送电量               |                                    |          | 562   |                                    |          | 562   |
| 2. 水电可发电量              | 1 380                              | 2 405    | 3 785 | 1 380                              | 2 405    | 3 785 |
| ①水电发电量                 | 1 380                              | 2 124    | 3 505 | 1 380                              | 2 136    | 3 516 |
| ②弃水电量                  | 0                                  | 280.7    | 280.7 | 0                                  | 253.6    | 253.6 |
| 3. 风电可发电量              | 124.9                              | 41.6     | 166.6 | 83                                 | 27.7     | 110.7 |
| ①风电发电量                 | 124.9                              | 37.5     | 162.4 | 83                                 | 24.9     | 108   |
| ②弃风电量                  | 0                                  | 4.2      | 4.2   | 0                                  | 2.8      | 2.8   |
| 4. 光伏发电量               | 21.1                               | 25.7     | 46.8  | 8.2                                | 10       | 18.2  |
| ①光伏发电量                 | 21.1                               | 23.2     | 44.2  | 8.2                                | 9        | 17.2  |
| ②弃光电量                  | 0                                  | 2.6      | 2.6   | 0                                  | 1        | 1     |
| 丰期弃光电量占比               |                                    | 10%      |       |                                    | 10%      |       |
| 5. 火电发电量               | 214.4                              | 86.1     | 300.5 | 269.0                              | 85.2     | 354.2 |
| 6. 全年利用小时数             |                                    |          |       |                                    |          |       |
| ①水电                    | 1 647                              | 2 527    | 4 174 | 1 647                              | 2 568    | 4 216 |
| ②风电                    | 1 666                              | 555      | 2 166 | 1 661                              | 554      | 2 159 |
| ③火电                    | 1 234                              | 501      | 1 735 | 1 549                              | 468      | 2 017 |
| ④光伏                    | 585                                | 715      | 1 229 | 585                                | 715      | 1 229 |
| 7 新能源( 风电/光伏)<br>发电量占比 |                                    |          | 8.3%  |                                    |          | 5.0%  |

量),即丰水期存在非水清洁能源(风电和光伏电站)弃风和弃光风险,此将影响风电和光伏电站运行经济效益;如果四川电网优先消纳风电,则必将加剧四川电网本就存在的大量弃水问题。另一方面,由于全年非水清洁能源(风电、光伏电站)所发电量对四川火电发电量的替代效应,四川火电全年利用小时数则势必降低。

“十三五”期四川省的新能源规划及现有的总装机规模对四川省现有的水火电经济性有相当影响,2020 年四川新能源总装机规模容量需要兼顾平衡考虑其所发电量对四川水电弃水及降低火电利用小时数的影响问题;从兼顾未来“十三五”中后期四川省的新能源规划建设对四川水火电的影响等多方面考虑,四川电网 2020 年新能源总装机规模控制在约 6 400 MW(风电场 5 000 MW + 光伏 1 400 MW),更有利于电网接纳与控制合理装机总容量。

### 3 四川电网输电能力对新能源规模影响分析

根据成勘院最新提供的四川省新能源(风电、光伏电站)规划资料内容,四川规划建设风电总量

的约 87%、太阳能光伏电站总量的约 63% 均主要集中在川西南的凉山州、攀枝花、甘南地区;而该地区亦是四川最大的清洁能源外送基地,局部 220 kV 电网薄弱,500 kV 升压主变压器容量配置不足对整个清洁能源的顺利送出有一定的制约,因此下面主要从“十三五”中后期 2018 年、2020 年川西南规划建设的新能源所在地 220 kV/500 kV 及以上主干电网接纳能力、输电能力分别分析研究其对新能源建设规模的影响。

凉山州规划建设的新能源(风电、光伏电站)主要集中在木里县、盐源县、凉山南部地区(德昌县、普格县、宁南县、会理县、会东县)、凉山中北部地区(西昌市、喜德县、冕宁县、越西县、甘洛县)、凉山东部地区(昭觉县、布拖县、金阳县、美姑县、雷波县)以及攀枝花地区的米易县、延边县、仁和区等地。

川西南地区已建成投产或规划建设的新能源电站均考虑通过就近接入电网、逐级升压、汇集接力送电至四川 500 kV 主干电网及参与部分川电外送,具体为:1)新能源电站经 110 kV/220 kV 汇集升压后通过 1 回或多回 220 kV 线路再送电至凉山、攀枝花 220 kV 主干电网的相关枢纽站点(包括送电至 500

kV 升压变电站的 220 kV 侧);2)经川西南现有及规划新建的 500 kV 升压变电站升压至 500 kV 电压等级;3)借助现有及规划新建的川西南 500 kV 水电送出主干通道的输电能力接力送电至四川 500 kV 主干电网或经规划新建的 1 回雅中特高压直流(计划 2019 年投运)外送至区外电网。

### 3.1 2018 年川西南 220 kV 及以上主干电网输电能力对新能源建设影响分析

主要电网建设及边界条件:1)2018 年盐源 500 kV 变电站(1×750 M 变压器)建成投运,会东 500 kV 变电站(2×750 M 变压器)建成投运;2)凉山南部电网通过周家堡—月城 2 回 220 kV 线路、永郎—月城 3 回 220 kV 线路与凉山主网连接,且 2018 年仍维持:周家堡—普格—杜家湾为单回 220 kV 线路,杜家湾—会东—会理 220 kV 线路导线截面为 400 mm<sup>2</sup>。

“十三五”中后期川西南地区建设已投或规划建设的新能源电站所发电量送电至 220 kV 及以上主干电网后,主干电网某些线路断面潮流增加,为保证电网运行安全:1)满足电网全接线及电网  $N-1$  时各种运行方式下,相关电网线路输送潮流均不超过该线路本身热稳极限;2)汇集升压容量不超过 500 kV 升压变压器容量;3)相关 220 kV/500 kV 线路必须满足系统暂态稳定计算条件要求。

2018 年川西南地区现有及规划(含已核准)新能源(风电、太阳能光伏)总容量约为 4 300 MW,2018 年详细的电网潮流稳定计算结果表明:为满足川西南新能源送出的 220 kV 及以上电网安全稳定运行相关要求,根据 2018 年新能源建设地及周边电网接纳条件以及电网输电能力大小,该地区新能源(风电+太阳能光伏)丰水期约有 2 000 MW,枯水期约有 1 400 MW 容量存在限电风险。

### 3.2 2020 年川西南 220 kV 及以上主干电网输电能力对新能源建设影响分析

主要电网建设及边界条件:1)2019 年规划建设投运 1 回雅中—江西特高压直流输电工程;2)凉山南部电网新建杜家湾—普格—周家堡第 2 回 220 kV 线路。2020 年川西南 500 kV 及以上电网规划图如图 1 所示。

若 2020 年四川全省现有及规划(含已核准)新能源(风电、太阳能光伏)总容量控制在合理规模,约为 6 400 MW(风电 5 000 MW+太阳能光伏 1 400 MW),其中对应川西南(凉山州、攀枝花、甘南)地区现有及规划(含已核准)新能源(风电 4 400 MW+太阳能光伏 900 MW)总容量约为 5 300 MW,则

2020 年详细的电网潮流稳定计算结果表明,该地区新能源(风电+太阳能光伏)接入川西南 220 kV 及以上主网后均基本可实现电力顺利送出。

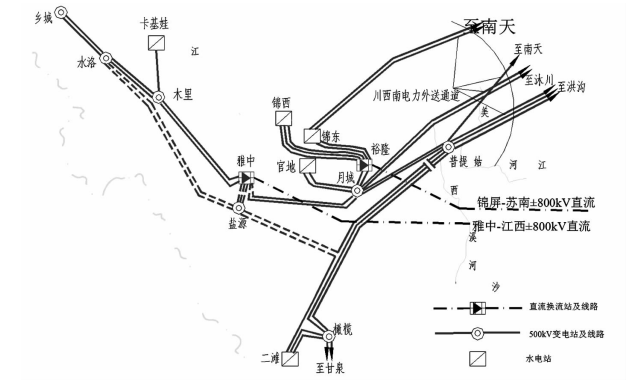


图 1 川西南 500 kV 及以上电网规划

## 4 结 语

“十三五”期四川省的新能源规划建设,对于补充四川省电源结构、部分缓解四川省与区外电网环保减排压力等方面将发挥一定的积极作用;但未来“十三五”中后期新能源(风电、光伏)的总规划装机容量规模,一方面既受本省整体电力建设空间大小制约,又对四川本省的水电丰期弃水及火电利用小时数有影响;另一方面,规划新能源建成投产后最终能否顺利送出亦受电网建设的输电能力影响。其中 2018 年川西南规划建设投产的部分新能源存在丰、枯期被限电风险;随着 2019 年 1 回雅中—江西特高压直流输电工程的建设投运,“十三五”末期川西南一定容量规模的新能源建成投产后,其所发电量基本能顺利送出。

参考文献

[1]

四川电力设计咨询有限责任公司. 四川省凉山州风电基地规划研究[R]. 2014.

[2]

国网四川省电力公司. 四川“十三五”电网发展规划总报告[R]. 2015.

[3]

国网北京经济技术研究院,中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司. 雅中—江西 ± 800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告[R]. 2015.

[4]

国网四川省电力公司. 2016 年四川电网运行方式[R]. 2016.

作者简介:  
陈汉雄(1971), 硕士、教授级高级工程师,从事电力系统规划设计及直流输电系统控制研究工作。  
(收稿日期:2017-11-15)

# 导线防冰雪技术应用展望

唐 巍,梁 明

(西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

**摘 要:**概述了输电线路导线覆冰覆雪与导线自身结构型式、材质的关联性,总结了目前国内外导线防冰雪技术的一些研究进展,提出了在中国开展导线防冰雪技术研究开发的迫切必要性,重覆地区导线采用防冰雪技术是对现有输电线路重冰设计的一个重要补充,是一个相对安全、简单的方法。

**关键词:**防冰雪;导线;临界电流;应用;展望

**中图分类号:**TM75 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0051-05

## Prospects for Application of Anti-icing Technology to Conductors

Tang Wei, Lang Ming

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

**Abstract:** The relationship between the icing of transmission line and the structure and material of conductor is described. The research progress of anti-icing conductor at home and abroad is summarized. It is urgent to develop the research of anti-icing conductor in China. And using anti-icing conductor in the heavy icing area is an important complement to the design of transmission line, which is a relatively safe and simple method.

**Key words:** preventing accumulation of ice and snow; conductor; critical current; application; prospects

### 0 引 言

输电线路的覆冰严重威胁着电网设备的安全运行,轻者引起闪络跳闸,重者导致倒塔断线,使电力设施遭到毁灭性破坏,对电力系统的安全运行产生严重危害。中国是输电线路覆冰灾害严重的国家之一。2005 年华中地区冰灾、2008 年南方地区大面积冰灾、2017 年华中地区输电线路舞动都对当地电网造成极大破坏,给当地经济、社会和人民生活造成了极为严重的影响,因此,开展防覆冰技术研究,开发可靠的导线防冰雪技术,采用有针对性的预防措施和 处 理 方 法 , 已 成 为 一 个 重 要 而 紧 迫 的 课 题 , 对 提 高 电 力 系 统 的 安 全 运 行 具 有 非 常 重 要 的 价 值 。

就目前来讲,根据抗冰雪原理的不同,输电线路导线防冰雪技术又分为以下几种类型<sup>[1-2]</sup>:

1) 发热融冰:使输电线本身或缠绕其上的电阻丝发热,从而使冰融化。

2) 振动除冰:通过使输电线产生振动,实现除

冰的目的。

3) 改进结构减冰:通过改进外层铝股单丝结构,使导线表面光滑,冰雪不容易附着在导线表面。

4) 涂覆材料防冰:通过在导线表面涂覆某些材料减缓和防止导线结冰。

下面对目前国内外导线防冰雪技术的科研成果进行了调研总结,提出了下阶段防冰雪导线应用发展的方向。

### 1 导线的结构型式

中国导线型式普遍选用 GB 1179-83《铝绞线及钢芯铝绞线》及 GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》中的定型产品,具有成熟的生产、运行、施工经验,但由于绞线中单丝均呈圆柱状,因此绞制后单丝间往往存在较大的缝隙、凹槽,而这些缝隙、凹槽使覆冰可以牢牢地粘附在导线表面上。

对此,国外已研制开发出 Z 型结构型式的防冰雪导线,已投入生产并挂网运行。中国 2006 年发布

表 1 不同冰区导线覆冰量比较表

| 导线型号             | 导线直径<br>/mm | 单位长度导线覆冰量/(kg · mm <sup>-1</sup> ) |          |          |          |          |          |
|------------------|-------------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |             | 10 mm 冰区                           | 15 mm 冰区 | 20 mm 冰区 | 30 mm 冰区 | 40 mm 冰区 | 50 mm 冰区 |
| JL/G1A - 400/50  | 27.6        | 1.063                              | 1.807    | 2.692    | 4.886    | 7.645    | 10.970   |
| JLX/G1A - 400/52 | 25.1        | 0.992                              | 1.701    | 2.550    | 4.674    | 7.363    | 10.617   |

注:上表覆冰密度取 0.9 g/cm<sup>3</sup>。

了 GB/5 20141 - 2006 《型线同心绞架空导线》,各电缆厂家在 2008 年特大冰灾后,也加大了这方面产品的研制,中天科技等电缆厂家已研制出梯型和 Z、S 型的型线同心绞导线。该系列导线绞合后,单丝间咬合更紧密,导线表面更光滑,可以减小覆冰在导线表面的附着力,过冷水滴、冰雪等不易聚集在导线表面,从而延缓了导线覆冰的时间;并且在相同铝截面下可以减少导线直径 10% ~ 15%,相应减少了导线上的覆冰量,适合重冰线路使用。普通导线及型线导线结构型式见图 1、图 2。

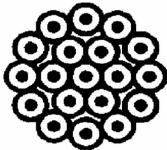


图 1 普通导线结构

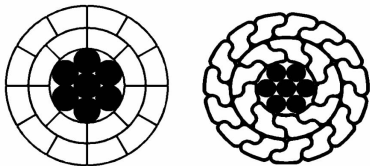


图 2 型线导线结构

分别从 GB/T 1179 - 2008 《圆线同心绞架空导线》及 GB/5 20141 - 2006 《型线同心绞架空导线》标准中选择出相同铝截面、结构相近的 JL/G1A - 400/50 钢芯铝绞线和 JLX/G1A - 400/52 型线结构钢芯铝绞线,对其在不同冰区下的覆冰量进行计算比较,计算结果见表 1。结果表明在未考虑导线粗糙程度对导线覆冰量影响的前提下,型线结构仍较普通圆线结构覆冰量减少了约 3.2% ~ 6.5%。

此外,根据覆冰观测和试验发现,导线覆冰或积雪过程中,总是先在导线迎风侧形成覆冰或积雪,后在冰雪重力作用下,使导线发生扭转,覆冰或积雪继续在导线迎风面堆积,使导线再次扭转,该过程重复发生,使覆冰或积雪在导线表面不断增长。其发展过程如图 3 所示。根据覆冰或积雪这一发展过程,可以优化导线排列结构,如法国耐克森公司的 aero

- z 型架空导线,增大了导线的扭距,可以减小导线的扭转,从而减少覆冰或积雪在导线表面的聚集。

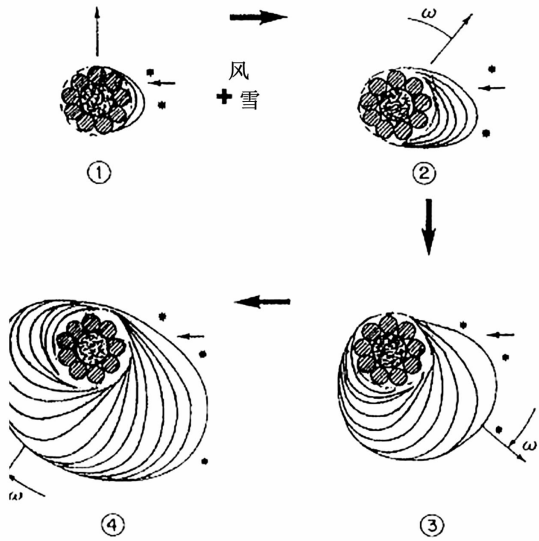


图 3 覆冰或积雪在导线表面的发展过程

综上所述,导线采用型线结构可改善导线表面状况、减小导线直径、提高导线的抗扭转性能,较圆线结构在防冰雪方面具有优势。目前该项技术已在国内外多条线路上推广采用,具有一定的设计和运行经验。

2 发热融冰

2.1 耐热导线

目前中国输电线路通常采用铝、铝合金等良导体与机械性能较好的钢丝绞制而成的钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线,导线允许温度不超过 70℃ ~ 80℃;而钢芯耐热铝合金导线,由于在普通的金属铝中添加了金属锆等成分,提高了材料的再结晶温度,使其能在较高的温度下不降低机械强度,其最高允许温度可达 150℃。

按中国规程要求输电线路一般按经济电流密度选择导线截面,仅对于大跨越线路按照导线允许载流量来选择。对于重冰区线路采用钢芯耐热铝合金



导线后,按导线允许载流量来选择后,较普通钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可减小导线截面积、重量,从而减小杆塔冰风荷载,降低单基塔重,节约线路初投资;虽然导线电晕、电阻产生的电能损失相对增加,但由于重冰区区段长度较短,相对总的电能损失增加不多,并且对于相同的工作负荷电流,钢芯耐热铝合金导线温度较普通导线高,能避免过冷却水滴在导线上冻结,从而使导线不结冰或尽量减少导线覆冰量的可能。下面从 GB/T 1179 - 2008《圆线同心绞架空导线》标准中分别选择在中国 500 kV 线路中广泛采用的 LGJ - 500/45 钢芯铝绞线、A3/S1A - 523/68 钢芯铝合金绞线与中天科技生产的 JGQNR-LHX/EST - 480/90、NRLH60/G1A - 300/40、NR-LH60/G1A - 240/30 钢芯耐热铝合金绞线进行比

较。各导线参数见表 2。

按 GB 50545 - 2010《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》给出的载流量公式计算,各导线相同工作电流情况下导线表面温升比较见表 3。

由表 3 可以看出相同输送功率情况下,耐热铝合金导线由于将导线最高允许温度提高到 150℃,因此耐热铝合金导线的截面、直径可较常规钢芯铝(铝合金)绞线大大降低。表 3 选择的耐热铝合金导线均能满足常规 500 kV 线路极限输送容量的要求。

按导线覆冰形成机理的研究,影响导线覆冰的气象因素主要有 4 种,即空气温度( $T_a$ )、风速风向( $V$ )、空气或云中过冷却水滴直径(MHD)、空气中液态水含量(LWC)。这 4 种因素的不同组合确定了导线覆冰类型,各种类型覆冰形成的气象条件见表 4。

表 2 导线参数表

| 参数和单位                             | LGJ -<br>500/45 | A3/S1A -<br>523/68 | JGQNR-LHX<br>/EST - 480/90 | NRLH60/<br>G1A - 300/40 | NRLH60<br>/G1A - 240/30 |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 铝(铝合金)/根                          | 48/3.6          | 54/3.51            | 25/4.94                    | 24/3.99                 | 24/3.6                  |
| 铝(铝合金)截面积/mm <sup>2</sup>         | 488.58          | 523.00             | 479.16                     | 300.09                  | 244.29                  |
| 钢丝/根                              | 7/2.8           | 7/3.51             | 7/4.1                      | 7/2.66                  | 7/2.4                   |
| 钢丝截面积/mm <sup>2</sup>             | 43.10           | 67.80              | 92.42                      | 38.90                   | 31.67                   |
| 直径/mm                             | 30.00           | 31.60              | 28.82                      | 23.94                   | 21.60                   |
| 单位长度质量/(kg · km <sup>-1</sup> )   | 16 880.00       | 1 974.20           | 2 046.17                   | 1 131.90                | 921.50                  |
| 额定抗拉力/kN                          | 128.10          | 239.26             | 246.44                     | 92.36                   | 75.19                   |
| 导线弹性模量/GPa                        | 65.00           | 69.00              | 76.83                      | 70.49                   | 70.49                   |
| 导线热胀系数/(× 10 <sup>-6</sup> /℃)    | 19.30           | 19.30              | 18.40                      | 19.44                   | 19.44                   |
| 直流电阻(20℃)/(Ω · km <sup>-1</sup> ) | 0.0591 2        | 0.064 3            | 0.066 83                   | 0.097 75                | 0.120 07                |
| 导线截面积/mm <sup>2</sup>             | 531.68          | 591.00             | 571.58                     | 338.99                  | 275.96                  |

表 3 导线表面温升比较表

| 输送功率<br>/MW | 工作电流<br>/A | 导线表面温度/℃        |                    |                            |                         |                         |
|-------------|------------|-----------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
|             |            | LGJ -<br>500/45 | A3/S1A -<br>523/68 | JGQNR-LHX/<br>EST - 480/90 | NRLH60/<br>G1A - 300/40 | NRLH60/<br>G1A - 240/30 |
| 540         | 164        | 55.0            | 55.3               | 55.0                       | 54.8                    | 54.8                    |
| 1 333       | 405        | 60.0            | 60.7               | 60.6                       | 64.0                    | 67.1                    |
| 1 800       | 547        | 65.0            | 66.0               | 66.2                       | 73.5                    | 79.8                    |
| 2 165       | 658        | 70.0            | 71.4               | 71.9                       | 83.2                    | 92.6                    |
| 2 471       | 751        | 75.0            | 76.7               | 77.5                       | 92.8                    | 105.8                   |
| 2 741       | 833        | 80.0            | 82.0               | 83.2                       | 102.8                   | 119.3                   |

注:1)环境温度取 40℃;2)功率因数取 0.95;3)表中按 500 kV 电压等级,单回三相,每相导线四分裂计算输送功率。

表 4 覆冰的形成条件

| 覆冰类型 | 条件  | $V/(m \cdot s^{-1})$ | $T_a/℃$   | MVD/ $\mu m$ | LWC/(g · m <sup>-3</sup> ) |
|------|-----|----------------------|-----------|--------------|----------------------------|
| 雨淞   | 范围  | 3 ~ 20               | -5 ~ 0    | 10 ~ 40      | 0.6 ~ 3                    |
|      | 典型值 | 8                    | -2        | 25           | 1.25                       |
| 混合淞  | 范围  | 1 ~ 15               | -3 ~ -9   | 5 ~ 35       | 0.4 ~ 2                    |
|      | 典型值 | 5                    | -5        | 15 ~ 18      | 0.8                        |
| 雾淞   | 范围  | 1 ~ 10               | -10 ~ -25 | 1 ~ 20       | 0.05 ~ 0.6                 |
|      | 典型值 | 3                    | -10       | 10           | 0.3                        |

表 5 典型覆冰条件下导线不覆冰的临界电流

| 导线型号                | 临界电流/A |     |     | 临界电流密度/(A·mm <sup>-2</sup> ) |       |       |
|---------------------|--------|-----|-----|------------------------------|-------|-------|
|                     | 雨淞     | 混合淞 | 雾淞  | 雨淞                           | 混合淞   | 雾淞    |
| LGJ-500/45          | 494    | 693 | 887 | 1.011                        | 1.418 | 1.815 |
| A3/S1A-523/68       | 476    | 669 | 857 | 0.91                         | 1.279 | 1.639 |
| JQQNRLHX/EST-480/90 | 472    | 663 | 847 | 0.985                        | 1.384 | 1.768 |
| NRLH60/G1A-300/40   | 375    | 524 | 670 | 1.106                        | 1.546 | 1.976 |
| NRLH60/G1A-240/30   | 330    | 461 | 589 | 1.196                        | 1.671 | 2.134 |

按表 4 给出的典型覆冰条件,对 5 种导线不覆冰的临界电流进行计算,计算结果见表 5<sup>[3]</sup>。

通过表 5 可以看出典型覆冰气象条件下,耐热铝合金导线的临界电流均小于普通钢芯铝(铝合金)绞线,其中随着耐热铝合金导线截面的减小其临界电流亦在减小。NRLH60/G1A-240/30 导线在雨淞情况下的临界电流值基本与中国 500 kV 线路一般正常输送容量 1 000 MW 时对应的四分裂导线每根子导线的工作电流 300 A 接近。因此在冬季通过科学调度,提高易覆冰线路输送功率,并选用导线直径、临界电流均较小的耐热铝合金导线,再辅之其他导线防冰雪的措施,可以减少导线覆冰量或使导线不覆冰。但耐热铝合金导线导电率较钢芯铝绞线低,且运行温度高在运行中损耗较大,实际应用中应采用最小年费用法并结合工程施工运行情况,综合比较选用合理的导线型式。

2.2 低居里铁磁材料

铁磁材料的居里点特性,指当材料在其居里点温度以下时,磁感应强度增高,表现为铁磁体;而在居里点温度以上时,磁感应强度显著下降,表现为顺磁体<sup>[4]</sup>。目前常用的铁磁材料有铁(Fe)、镍(Ni)、钴(Co),其中铁(Fe)的居里温度为 1 034 K,镍(Ni)的居里温度为 627 K,钴(Co)的居里温度为 1 397 K。钴(Co)不仅居里温度高且价格昂贵,因此目前普遍采用铁镍合金做为铁磁材料,为降低铁镍合金的居里温度,掺入铬(Cr)、硅(Si)元素,制成 Fe-Ni-Cr-Si 低居里铁磁合金材料。该类材料在居里点温度以下时,受电场影响,其表面磁滞、涡流明显,发热量显著上升,可以融冰或避免导线结冰。并且在居里点温度以下时,在导线电流大到某一数值后,铁磁材料磁感应强度接近饱和,此后随着导线电流的

增加,铁磁材料产生的损耗基本不变,武汉高压研究所等单位研制的一种低居里点铁磁材料发热功率与导线传输电流的特性曲线见图 4<sup>[5]</sup>;而此类铁磁材料在居里温度以上时,材料磁感显著降低,发热很少或不发热,线路损耗相对增加不多。

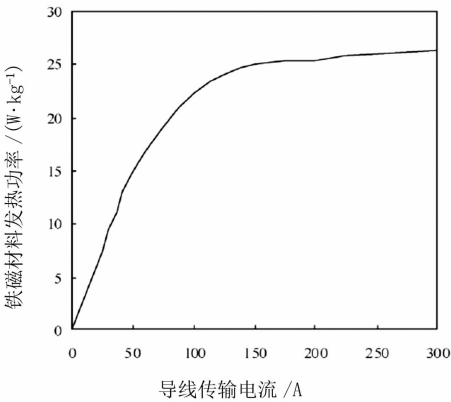


图 4 低居里点铁磁材料发热功率与导线传输电流的特性曲线

英国学者对普通 LN-ACSR-940 钢芯铝绞线、外层缠绕、不缠绕铁磁线的情况进行了试验比较,导线外层缠绕铁磁线后发热明显增加,且通过适当提高铁磁线中镍金属含量,可进一步提高导体的发热量,导体中的电流与发热量的关系曲线见图 5。

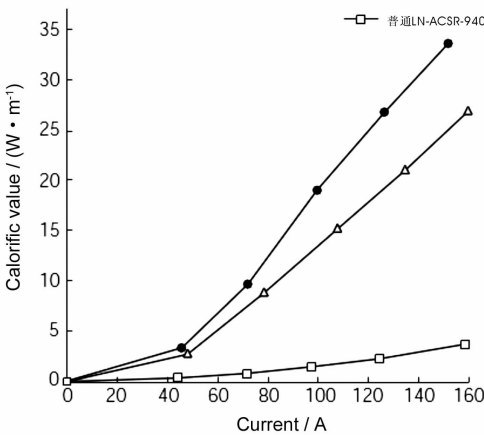


图 5 电流与发热量的关系曲线

英国等其他国家亦已开发出具有同样特性的铁磁线,其中英国学者通过对铁磁材料中镍(Ni)含量的比例进行调节,并通过磁感应强度测试、发热试验及实验室人工降雪模拟试验,合理确定了Fe、Ni、Cr、Si四种元素的含量,该种铁磁线已在覆雪严重的输电线路挂网运行,并取得不错的防雪效果。

由于目前铁磁材料采用Fe、Ni、Cr、Si等元素,原材料费用高,制造工艺复杂;国内对铁磁材料的研究还相对落后,目前研制出的铁磁材料居里点温度在60℃~80℃之间,使线路在大部分时间运行情况下,铁磁线仍发热,线路损耗大大增加,且施工也较为复杂,目前国内外仅有少量线路采用,下阶段能否通过铁磁材料配方的调整优化降低其居里点温度,成为该类低居里铁磁材料推广应用于防冰雪导线的关键。

### 3 涂覆材料

根据覆冰形成机理,覆冰是空气中的过冷却水滴在导线表面冻结并持续发展的过程。因此通过在导线表面涂覆憎水性涂料,一方面可减少冰雪在导线上的粘附力;另一方面也可减少过冷却水滴在导线表面的集聚,从而抑制覆冰的形成和发展。

在人工气候模拟箱中通过温控系统控制覆冰气温和成冰水温,对同种铝单丝涂附不同涂料后的覆冰特性进行了比较,试验表明涂料的表面张力越小,憎水性越强,防止铝单丝覆冰的效果越明显。该试验中铝单丝不同涂料表面覆冰增长情况见图6<sup>[6]</sup>。

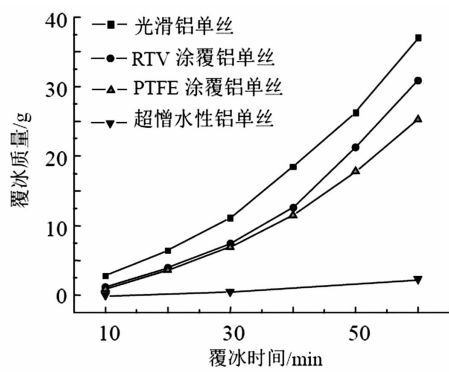


图6 不同铝单丝表面覆冰质量增长情况

用作导线的防冰雪涂料,一方面要有较高的热传导性,另一方面又要有较低的表面张力和较强的憎水性,并在野外恶劣的自然条件下具有很好的抗老化性能及耐候性,否则每次冰雪来临前重新涂刷

的话,运行维护成本太高。由于防冰雪导线用涂料起步较晚,目前各科研院校在实验研究中已开发出部分导线防覆冰涂料,虽然其疏水性能均达到了较高的水平,但除冰效果有限并只在湿雪条件下起作用,在气温低、水雾呈过冷却的情况下,防冰效果均不理想。因此对于涂料中成膜物质的选择、配套颜料的制备、涂料合成工艺等方面还有待进一步科研攻关,但防冰雪涂料应用前景还是非常明朗的。

### 4 结 语

虽然目前导线防冰雪技术的研究仍处于起步阶段,但通过对导线结构型式及材质的优化、型线工艺的成熟、耐热导线的逐步推广、低居里铁磁材料的研发、防冰雪导线涂料的破题,导线防冰雪技术的研究和攻关已取得初步成效。通过以上调研结论,从提高导线防冰防雪能力方面对今后重冰线路设计具有重要的参考和借鉴意义。今后在此基础上继续加大投入力度,并将理论与工程实践紧密结合,必将对以避、抗为主的重冰线路的设计理念产生深远影响,并进一步提高重冰区线路的安全性,降低运行维护的难度。

#### 参考文献

[1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防冰[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[2] 刘和云. 架空导线覆冰防冰的理论与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.

[3] 审屠刚. 电力系统输电线路抗冰除冰技术研究进展综述[J]. 机电工程,2008,25(7):72-75.

[4] 蒋兴良,范松海,孙才新,等. 低居里点铁磁材料在输电线路防冰中应用前景分析[J]. 南方电网技术,2008,2(2):19-22.

[5] 梅冰笑,潘学明. 输电线路防覆冰临界电流密度预测模型研究[J]. 电气应用,2009,28(4):72-76.

[6] 汪佛池,李成榕,吕玉珍,等. 憎水涂层对铝单丝表面覆冰性能的影响[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):123-128.

#### 作者简介:

唐 巍(1979),高级工程师,从事输电线路电气设计;  
梁 明(1973),教授级高工,从事输电线路电气设计。

(收稿日期:2018-10-11)

# 海南联网工程牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘 充油海底电缆技术经济比较

马 凌,赵远涛,吴庆华  
(中南电力设计院,湖北 武汉 430071)

**摘 要:**目前,500 kV 交流自容式充油海底电缆绝缘材料主要有两种型式:牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘<sup>[1]</sup>。由于两者造价、绝缘性能、介质损耗性能均有较大差异,工程应用应综合初始投资、年运行费用、应用经验和安全稳定性等多方面因素进行选择。以海南联网工程为例,介绍上述两种绝缘材料的性能和差异,并结合不同电缆铠装型式、回流导体结构、无功补偿投入等,进行综合技术经济比较,最终得出对工程建设有指导意义的结论。  
**关键词:**海南联网;自容式充油海底电缆;牛皮纸绝缘;PPL 纸绝缘;损耗;技术经济性  
**中图分类号:**TM21 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0056-04

## Technical and Economical Comparison of Submarine Oil – filled Cables with Kraft Paper and PPL Paper Insulation in Hainan Interconnection Project

Ma Ling, Zhao Yuantao, Wu Qinghua  
(Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** The insulating materials of 500 kV AC self – contained oil – filled (SCOF) submarine cables currently consist of two main types: kraft paper and PPL paper. Considering the huge differences between these two types including cost, insulation performance and dielectric loss performance, the first investment, annual operational cost, application experience and safety stability should be taken into consideration to make a final choice. Taking Hainan interconnection project for example, the performance and differences between these two insulating materials are introduced, and the technical and economical comparison is carried out based on different armour type, return conductor structure and reactive power compensation, etc., which may benefit other projects.  
**Key words:** Hainan interconnection; self – contained oil – filled (SCOF) submarine cable; kraft paper; PPL paper; losses; technical economy

### 0 引 言

海南联网工程在确定了 500 kV 交流联网方式和 600 MW 输送容量后,适合于工程具体条件的电缆型式为自容式充油电缆,供选择的绝缘材料和铠装主要有两种型式:牛皮纸绝缘铜铠装和 PPL 纸绝缘钢丝铠装 + 回流导体(以下简称牛皮纸电缆和 PPL 电缆)<sup>[1]</sup>,两种电缆在技术经济性上各有特点,应以技术性能优和工程投资低作为出发点,综合多方面因素选择合适的海底电缆型式。两种电缆的特

点简述如下:

1)牛皮纸电缆。牛皮纸的全称是针叶树木浆牛皮纸(conifer pulp kraft paper)。牛皮纸密度低( $0.7 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ ),可在降低介质损耗的同时,对低粘度绝缘油保持较高的渗透率<sup>[2]</sup>。对于超高压交流电缆,通过去离子水漂洗可以进一步降低损耗。牛皮纸可以按不同的厚度( $50 \sim 180 \text{ }\mu\text{m}$ )制造生产以满足不同的绝缘要求。对于交流海底电缆,靠近导体处电场强度高,可以选用较薄的纸带,增加纸带层数提高绝缘强度;绝缘层外部电场强度较低,可以选用偏厚的纸带,减少层数,提高生产速度和弯曲性

能<sup>[3]</sup>。牛皮纸电缆的制造和使用经验已有半个多世纪的历史,各方面技术成熟、实践经验丰富、价格相对较低。目前来说,牛皮纸仍然是交流海底电缆首选的绝缘材料之一。相对 PPL 电缆,牛皮纸电缆的缺点是损耗较高,制造的电缆电容较大,需要系统提供更多无功补偿。

2)PPL 电缆。20 世纪 80 年代以来,一种新型的绝缘材料 PPL 纸(laminates composed of paper layers and polypropylene layers)出现并成功应用于海底电缆制造。PPL 纸也称聚丙烯牛皮纸复合纸,是一种聚合物薄膜增强纸带<sup>[1]</sup>。这种复合纸有不同的复合方式,如牛皮纸-聚丙烯薄膜-牛皮纸、聚丙烯薄膜-牛皮纸-聚丙烯薄膜等,从而形成绝缘物质不同的 2 层、3 层或更多层结构。PPL 纸在交流条件下比牛皮纸绝缘强度高,而介质损耗低,制造的电缆电容小。PPL 纸绝缘海底电缆已具有多个工程应用实例,均应用在直流海底输电工程,且运行良好。目前的设计方案,PPL 电缆采用的是应用在直流海底输电工程的钢丝铠装。当用于交流输电时,由于钢丝铠装涡流损耗比铜铠装大大增加,为降低损耗,需单独设计铜质回流导体,从而削弱了 PPL 纸绝缘低损耗的优势<sup>[4]</sup>。而牛皮纸绝缘电缆若采用钢丝铠装,则可能导致电缆无法经济运行,从而不得不采用成本较高的铜线铠装。

目前,国际上超高压充油海底电缆厂家对于牛皮纸电缆和 PPL 电缆的生产现状不尽相同<sup>[5]</sup>。有的两种均能生产,有的只能生产一种,有的虽均能生产,但只有一种具有生产经验。由于两种电缆的技术参数具有明显差别,性能各异,因此,必须通过多方面的技术经济比较才能最终确定电缆型式。

根据海南联网工程经验,主要考虑以下因素:电缆价格、系统无功补偿投入、初始投资、运行损耗、利用小时数和电网电价等<sup>[2]</sup>。海南联网工程最终采用了牛皮纸电缆,下面根据工厂 A、工厂 B 和工厂 C 提供的电缆参数进行详细论述,其中工厂 A 以生产牛皮纸电缆为主,工厂 B 和工厂 C 以生产 PPL 电缆为主。

### 1 基本模型和数据

以海南联网工程为例,建立图 1 模型并列相关数据,作为进一步技术经济分析比较的基础。电

缆长度 31 km,徐闻和福山配置高抗补偿。两侧架空线长度各 14 km,架空线为 4×300 导线,电气参数  $R=0.025\ 6\ \Omega/\text{km}$ , $X=0.282\ 3\ \Omega/\text{km}$ , $C=0.012\ 8\ \mu\text{F}/\text{km}$ , $B=4.02\times 10^{-6}\ \text{S}/\text{km}$ <sup>[6]</sup>。

海底电缆运行时分 3 段处于不同的运行环境:空气中、陆地埋设段、海中埋设段。空气中电缆较短,约 10 余米;陆地埋设段是电缆温度控制段,电缆温度最高,单位损耗最大;海中埋设段长度最长,是损耗计算的主体。计算时忽略空气中电缆段,分陆地埋设段、海中埋设段两段计算,长度分别取 4 km、27 km<sup>[7]</sup>。

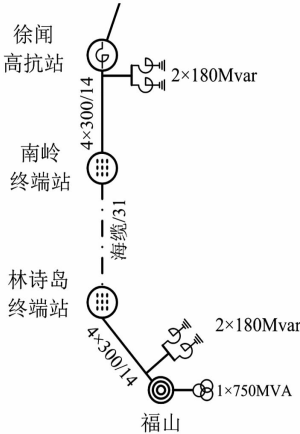


图 1 海底电缆计算模型

### 2 介质损耗

一般介质损耗可用下式计算: $P=U_0^2\times C\times\omega\times\tg\delta$ ,当电缆绝缘部分的尺寸一致时,两种绝缘材料的介质损耗比可以表达为

$$P_1/P_2=(\varepsilon_{r1}/\varepsilon_{r2})\times(\tg\delta_1/\tg\delta_2)$$

两种材料的相对介电常数( $\varepsilon$ )和介质损耗角正切值( $\tg\delta$ )各厂家略有不同,典型值如表 1 所示。

表 1 两种绝缘材料介质参数的典型值

| 材料                                       | 牛皮纸<br>(工厂 A)       | PPL<br>(工厂 B)       | PPL<br>(工厂 C)     |
|------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| 介质损耗角正切<br>$\tg\delta, 90^\circ\text{C}$ | $2.4\times 10^{-3}$ | $1.2\times 10^{-3}$ | $1\times 10^{-3}$ |
| 相对介电常数 $\varepsilon_r$                   | 3.5                 | 2.85                | 2.7               |

根据上述参数进行计算,可见  $P_1/P_2$  或  $(P_1/P_3)$  的比值范围约为 2.46~3.11。根据工厂 A 和工厂 B 提供的电缆详细参数(见表 2),两种电缆的介质损耗设计值分别为 16.6 W/m 和 7.0 W/m(比例为 2.37)。

表 2 海南联网工程采用的牛皮纸电缆和一种 PPL 电缆的主要参数表

| 项目                           | 牛皮纸电缆<br>(牛皮纸 + 铜铠装) | PPL 电缆<br>(PPL + 钢丝铠装 + 回流导体) | 备 注           |
|------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------|
| 电压/kV                        | 525                  | 525                           |               |
| 电流/A                         | 815                  | 774                           |               |
| 导体电阻                         | 0.022 1              | 0.022 1                       | 直流电阻, 20℃     |
| /(Ω · km <sup>-1</sup> )     | 0.027 3              |                               | 交流电阻, 海中      |
|                              | 0.028 6              | 0.028 8                       | 交流电阻, 90℃, 陆地 |
| 电缆阻抗/(Ω · km <sup>-1</sup> ) | 0.043 + j0.081       |                               | 海中, 600 MW 时  |
| 电容/(μF · km <sup>-1</sup> )  | 0.24                 | 0.204                         |               |
| 充电电流/(A · m <sup>-1</sup> )  | 22.8                 | 19.4                          | 每相, 525 kV 时  |
| 1/2 补偿电流/A                   | 353.2                | 301                           | 两端补偿          |
| 介质损耗角正切值                     | 0.002 8              | 0.001 2                       | tgδ           |
| 每相损耗                         | 19.0/18.1            | 17.3/16.4 <sup>①</sup>        | 导体损耗          |
|                              | 16.6/16.6            | 7.0/7.0                       | 介质损耗          |
|                              | 2.0/1.8              | 19.4/18.5 <sup>①</sup>        | 铅套和加强带损耗      |
|                              | 9.6/8.8              | 5.6/5.3 <sup>①</sup>          | 防蛀层和铠装损耗      |
|                              | 0                    | 7.5/7.2 <sup>①</sup>          | 回流导体损耗        |
| /(W · m <sup>-1</sup> )      | 0                    | 4.9/4.7 <sup>①</sup>          | 铠装涡流损耗        |
|                              |                      |                               |               |
| 每相总损耗                        | 515                  | 217 <sup>①</sup>              | 固定部分(介质损耗)    |
| 31 km/kW                     | 897                  | 1 626 <sup>①</sup>            | 动态部分(各金属层损耗)  |

注:①工厂 B 未提供海中电缆的温度和电阻,这里暂按与 N 缆边界一致条件来计算海中交流电阻(0.027 4 Ω/km)及相应电阻损耗,其他损耗(除介质损耗)均根据与导体损耗的比值计算得到<sup>[8-9]</sup>。

3 其他损耗

为便于比较,表 2 列出了海南联网工程采用的牛皮纸电缆(由工厂 A 生产)和一种 PPL 电缆(由工厂 B 生产)的主要参数,后者采用钢丝铠装配合铜质回流导体。

电缆沿线各点的电流幅值和相位都在变化,当两端采用 1/2 等量补偿、保证福山变线路末端功率因数为 0.98 时,电缆末端电流分别达到最大值 815 A 和 774 A,两种电缆导体温度达到 90℃。电缆损耗计算按导体温度均为 90℃且环境条件相同进行计算。

4 补偿装置费用

电缆的电容不同,在系统中采用的补偿容量也不同,从而影响工程总投资。根据海南联网工程招标技术规范书的要求,传输 600 MW 时,福山站电压取 525 kV,功率因数取 0.98。

工厂 A 电缆的充电电流为 22.8 A/m,采取电缆两端同时补偿方式,补偿容量为各两组 180 Mvar 并

联高抗。两端设备总费用(未计安装和基础费用,下同)为 4 320 万元<sup>[6]</sup>。

工厂 B 电缆的充电电流为 19.4 A/m,采取电缆两端同时补偿方式,补偿容量为两组 120 Mvar 并联高抗。两端设备总费用为 2 880 万元。

可见,采用牛皮纸电缆比 PPL 电缆的补偿费用高出 1 440 万元。

5 运行损耗比较

运行损耗费用采用如下年金现值系数公式计算:

$$m = \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n \times r}$$

式中: $n$  为运行年限,本工程取 30 年; $r$  为年利率,分别取 7%、8%、9%,则  $m$  分别为 12.41、11.26、10.27。

电价取 0.4 元/kWh、0.5 元/kWh、0.6 元/kWh,假设年运行小时数取 8 000 h,最大负荷运行小时分别取 3 000 h、4 000 h、5 000 h,两种电缆的年运行损耗费用差值如表 3。

可以看到,当最大负荷运行小时数大于 3 000 h,PPL 电缆的运行费用总体略高于牛皮纸电缆。

根据第 4 节、第 5 节的计算结果,综合考虑无功补偿高抗费用和年运行损耗费用,PPL 电缆与牛皮纸电缆在综合成本上基本相当,当最大负荷运行小时数大于 4 000 h,PPL 电缆略高。

表 3 两种电缆 30 年运行年限损耗费用差值表  
(PPL 电缆 - 牛皮纸电缆) 单位:万元

| 电费<br>/元 | 最大负荷小时<br>/h | 年利率   |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|-------|
|          |              | 7%    | 8%    | 9%    |
| 0.4      | 3 000        | -293  | -266  | -243  |
| 0.4      | 4 000        | 792   | 719   | 656   |
| 0.4      | 5 000        | 1 878 | 1 704 | 1 554 |
| 0.5      | 3 000        | -367  | -333  | -303  |
| 0.5      | 4 000        | 990   | 899   | 820   |
| 0.5      | 5 000        | 2 347 | 2 130 | 1 943 |
| 0.6      | 3 000        | -440  | -399  | -364  |
| 0.6      | 4 000        | 1 188 | 1 078 | 983   |
| 0.6      | 5 000        | 2 817 | 2 556 | 2 331 |

6 电缆价格

影响电缆制造价格的因素较多,根据调研,PPL 电缆一般比牛皮纸电缆高 10% 左右。按工程经验,可取 1 000 元/m 进行计算,则 PPL 的总投资高于牛皮纸电缆,对于海南联网工程,该投资差约为 7 500 万元至 1 亿元。因此,采用 PPL 电缆的经济性并不好。

7 结 语

根据前面论述,可以得出以下结论:

- 1)在 500 kV 交流电压下,PPL 比牛皮纸的介质损耗低、所需高抗补偿设备少,但这种差别不足以使 PPL 电缆在综合投资上具优势。对于直流电缆或其他电压等级,有必要进一步再讨论。
- 2)从表 2 可以看出,所选取的 PPL 电缆铅套和加强带损失、回流导体及铠装的损耗明显高于牛皮纸电缆,对所得结果影响较大。
- 3)海南联网工程路由最大海深 100 m 左右,从机械强度而言,没必要采用钢丝铠装<sup>[10-11]</sup>。因此,若仅将牛皮纸更换为 PPL 纸,同时采用铜铠装,则

消除了回流导体损耗和钢铠装涡流损耗,有助于推广 PPL 电缆的应用;

- 4)关于长期运行温度,早期牛皮纸一般取 85℃,PPL 纸取 90℃,但是现在越来越多的牛皮纸也取 90℃ 运行,从而抵消了 PPL 纸的运行温度优势;
- 5)海南联网工程采用牛皮纸绝缘、铜铠装自容式单芯充油海底电缆在技术经济上是合适的。

参考文献

[1] (德)L. Heinhold, (德)R. Stubbe 著,门汉文等译. 电力电缆及电线[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[2] 陈凌云,朱熙樵,李泰军. 海南联网工程海底电缆的选择[J]. 高电压技术,2006,32(7):39-42.

[3] 李健,郑伟. 交流 500 kV 海底电力电缆结构设计[J]. 电线电缆,2010(1):11-14.

[4] Thomas Worzyk. Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects [M]. Springer - Verlag Berlin Heidelberg,2009.

[5] 赵健康,陈铮铮. 国内外海底电缆工程研究综述[J]. 华东电力,2011,39(9):1477-1481.

[6] Zhao Jiankang, Chen Zhengzheng. Research Overview of Domestic and Oversea Submarine Cable Projects [J]. Eastern China Electrical Power, 2011, 39(9):1477-1481.

[7] 陈政,康义,马怡情. 广东-海南 500 kV 交流跨海联网工程无功补偿及电磁暂态研究[J]. 电网技术,2009,33(19):143-147.

[8] 吴庆华,陈建康,郑伟,等. 中国首条 500 kV 海底电缆线路工程的设计[J]. 中国电业(技术版),2014,(10):46-54.

[9] Nexans. Technical Note, 25694-HKA-MT-15086:ISSUE 1[R]. Norway: Nexans, 2003.

[10] J-Power Systems. Specification: JSP23-F0212A[R]. 2006.

[11] 陈凯华. 海南联网海缆敷设施工与防护[J]. 南方电网技术,2009,3(5):25-26.

作者简介:

- 马 凌(1978),高级工程师,从事架空输电线路及电力电缆工程技术研究和管理工作;
- 赵远涛(1985),硕士、高级工程师,从事架空输电线路及电力电缆工程设计及研究工作;
- 吴庆华(1962),教授级高级工程师,从事输电线路工程技术管理和研究工作。

(收稿日期:2017-11-24)

# 500 kV 变电站简化噪声源衰减特性研究

严 青<sup>1</sup>, 佟如意<sup>2</sup>, 何清怀<sup>1</sup>, 陈 笠<sup>1</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041;  
2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:**基于四川某 500 kV 变电站,将其主变压器分别简化为体声源、面声源和点声源,对噪声衰减情况进行预测分析。结果表明,采用 Cadna/A 软件和噪声导则推荐模式计算的噪声声压级吻合良好,距体源、面源、点源相同距离处采用软件计算的噪声声压级差异较小,最大差值仅为 0.9 dB(A);在近声场( $L\leq 5\text{ m}$ ),体源噪声衰减最慢,面源其次,点源衰减最快, $L$ (距声源距离)相同时,声压级从大到小依次为体源、面源、点源;而在远声场( $L\geq 35\text{ m}$ ),各声源衰减规律一致,声压级从大到小依次为点源、面源、体源。从机理上阐明了变电站噪声预测工作中的声源简化差异问题,具有很强的指导意义。

**关键词:**500 kV 变电站;简化;噪声源;预测;Cadna/A

**中图分类号:**TB53 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0060-03

## Study on Attenuation Characteristic of Simplified Noise Sources for 500 kV Substations

Yan Qing<sup>1</sup>, Tong Ruyi<sup>2</sup>, He Qinghuai<sup>1</sup>, Chen Li<sup>1</sup>

(1. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:**The main transformer is simplified as a volume source, area source and point source respectively to analyze the attenuation characteristic based on a 500 kV substation in Sichuan province. The result indicates that the calculated noise levels of software Cadna/A highly tally with the theoretical formulas, and the difference among three kinds of simplified noise sources at the same distance is as small as just 0.9 dB(A). In the near sound field, attenuation rate of volume source is the slowest, the following is area source ( $L\leq 5\text{m}$ ), and the fastest is point source, so that the sound pressure level of volume source is the highest, the following is area source, and the lowest is point source when  $L$  (distance from the source) is the same from the sources. However, in the far sound field ( $L\geq 35\text{m}$ ), three noise sources perform accordantly in terms of attenuation discipline, and the sound pressure level of point source is the highest, the following is area source, and the lowest is volume source. The divergence of simplified noise sources is explained form the mechanism, which is highly instructive for substation noise prediction.

**Key words:**500 kV substation; simplified; noise source; prediction; Cadna/A

近年来,越来越多的 500 kV 变电站开始出现在有居民分布的区域,为使变电站噪声达标,避免与周围居民的冲突,迫切需要在变电站设计阶段进行噪声模拟预测,进而采取相应的噪声防治措施。500 kV 变电站内噪声源设备较多,其中以主变压器产生的噪声最为明显。主变压器噪声以低频为主,频率集中在 100 ~ 500 Hz 之间<sup>[1]</sup>,低频噪声因波长较长,

具有很强的绕射和透射能力,随距离衰减较慢,对区域声环境影响较大,属于难治理噪声<sup>[2]</sup>。

目前国内针对 500 kV 变电站的噪声模拟预测常采用 Cadna/A 软件,可根据变电站总平面布置、声源源强大小、建(构)筑物尺寸等因素进行噪声预测。由于变电站中噪声源设备组成和噪声产生机理较复杂,难以用 Cadna/A 软件进行准确模拟。为充



分反映变电站投运后产生的噪声影响,通常根据其噪声源强大小、几何尺寸等因素进行等效简化设置。以 500 kV 变电站主变压器为例,一般可将其简化为体声源、面声源或点声源,如文献[3]将变电站主变压器简化为 5 个面源组成的体源;文献[4]将变电站主变压器简化为平行于地面的面声源;文献[5]将变电站主变压器简化为垂直于地面的面声源;文献[6]将变电站主变压器简化为位于设备中心的点声源。不同的简化方式导致变电站的预测方法不一致,预测结果存在一定的分歧,直接影响变电站降噪方案的设置。下面基于四川某 500 kV 变电站,将其主变压器分别简化为体声源、面声源和点声源,分析不同简化声源随距离的衰减特性。

## 1 变电站主变压器简化方法

四川某 500 kV 变电站的主变压器外形尺寸按 13 m×9 m×4 m 考虑,其噪声源强大小按设备外 2 m 处声压级为 62 dB(A) (由设备厂家提供)考虑,再通过 Cadna/A 软件倒推计算出各声源的声功率级大小。主变压器简化为体源、面源和点源的参数情况见表 1,其简化示意图见图 1。

| 表 1 主变压器简化为体源、面源和点源的声功率级情况 |                  |                |
|----------------------------|------------------|----------------|
| 简化类型                       | 简化方式             | 声功率级大小 / dB(A) |
| 体源                         | 由主变压器顶面和四周侧面组合而成 | 85.8           |
| 面源                         | 平行于地面,位于主变压器中心高度 | 85.9           |
| 点源                         | 位于主变压器中心位置       | 86.4           |

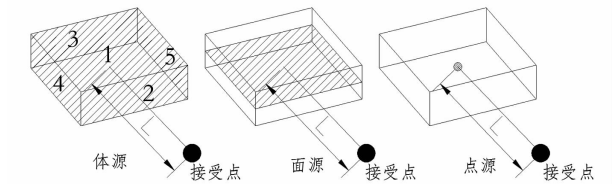


图 1 主变压器简化示意图(图中阴影部分为简化声源)

## 2 变电站主变压器噪声预测方法

### 2.1 噪声导则推荐模式建模计算

根据《环境影响评价技术导则——声环境》(HJ

2.4-2009),若已知无指向性点声源的声功率级,且声源处于自由声场,则距离声源  $r$  处几何发散衰减的基本公式为

$$L_p = L_w - 20\lg(r) - 8$$

式中: $L_p$  为衰减后距声源  $r$  处的声压级; $L_w$  为点声源的声功率级。

面声源可简化为由若干个点源组合而成,如上述 13 m×9 m 面源可简化为 117 个 1 m×1 m 单位面源,可将其近似为位于面源中心的点源;同理,由 5 个面源组合而成的体源,也可将其简化为 293 个点源,因此根据均匀分布的各个点源声功率级,结合上述衰减公式可以建模计算距各个点声源不同距离处的噪声声压级叠加值。

### 2.2 Cadna/A 软件建模计算

采用 Cadna/A 软件,分别建立变电站主变压器的体源、面源、点源模型,根据设备外 2 m 处的声压级倒推出各声源的声功率级,不考虑地面吸收系数和周围屏障的遮挡作用,设置计算网格 0.5 m×0.5 m,预测距声源不同距离处的噪声声压级大小。

## 3 变电站主变压器噪声预测结果

### 3.1 主变压器不同简化方式的噪声预测结果

分别采用噪声导则推荐模式和 Cadna/A 软件对变电站主变压器不同简化类型的声源衰减情况进行建模计算,距各声源不同距离处的噪声声压级见表 2。

由表 2 可知,距各声源不同距离处的噪声导则推荐模式和软件预测值吻合良好,最大差值出现在远声场  $L=200$  m 处,仅为 1.4 dB(A),这表明采用 Cadna/A 软件计算时仅考虑各点声源的能量叠加,而未考虑声波之间的相位影响<sup>[7]</sup>,与点声源的几何衰减模式一致。

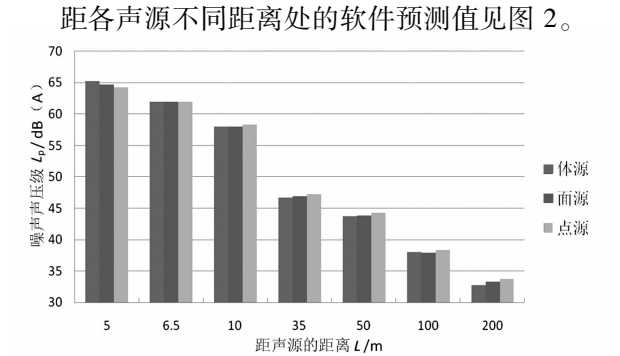


图 2 距各声源不同距离处的软件预测值

表 2 主变压器简化为体源、面源和点源后  
不同距离处的声压级情况

| 距声源距离 <sup>①</sup><br><i>L</i> /m | 声压级 <i>L<sub>p</sub></i> / dB(A) |      |          |      |          |      |
|-----------------------------------|----------------------------------|------|----------|------|----------|------|
|                                   | 体 源                              |      | 面 源      |      | 点 源      |      |
|                                   | 噪声导则推荐模式                         | 软件   | 噪声导则推荐模式 | 软件   | 噪声导则推荐模式 | 软件   |
| 5                                 | 65.3                             | 65.2 | 64.9     | 64.7 | 63.4     | 64.3 |
| 6.5                               | 62.0                             | 62.0 | 62.1     | 62.0 | 62.1     | 62.0 |
| 10                                | 58.0                             | 58.0 | 58.2     | 58.0 | 58.4     | 58.3 |
| 35                                | 46.9                             | 46.7 | 47.1     | 46.9 | 47.5     | 47.3 |
| 50                                | 43.8                             | 43.7 | 44.0     | 43.8 | 44.4     | 44.3 |
| 100                               | 37.8                             | 38.0 | 38.0     | 37.9 | 38.4     | 38.4 |
| 200                               | 31.7                             | 32.8 | 32.0     | 33.3 | 32.4     | 33.8 |

注:①噪声接受点位于主变压器长边一侧中心轴线上,距地面 1.2 m 处。

由表 2、图 2 可知,距体源、面源、点源相同距离处的噪声声压级差异较小,最大差值仅为 0.9 dB(A),由表 1 可看出,各声源的总声功率级相近,最大差值为 0.6 dB(A),这表明不论采取何种简化方式,其噪声接受点的声压级大小主要取决于声源的总声功率级大小。

由表 1 可知,点源反推得出的噪声声功率级最大,面源其次,体源最小。由图 2 可知:在  $L=6.5$  m(主变压器外 2 m)处,体源、面源和点源的软件预测结果相同;但是在  $L=5$  m 处,体源的噪声声压级最大,面源其次,点源最小,与声源噪声声功率级变化规律相反,这表明在近声场( $L\leq 5$  m),面源特征较明显,因此由 5 个面源组成的体源噪声衰减最慢,单个面源其次,点源衰减最快;而在远声场( $L\geq 35$  m),噪声接受点距体源、面源和点源的距离均大于 2 倍各声源的最大尺寸,故均可视为点源,各声源衰减规律一致,声压级与总声功率级变化趋势一致,即声源总声功率级从大到小依次为点源、面源、体源,在远声场距声源相同距离处的声压级从大到小依次也为点源、面源、体源。

3.2 体源各面的噪声衰减特性

组成体源的 5 个面源随距离的衰减情况见图 3。

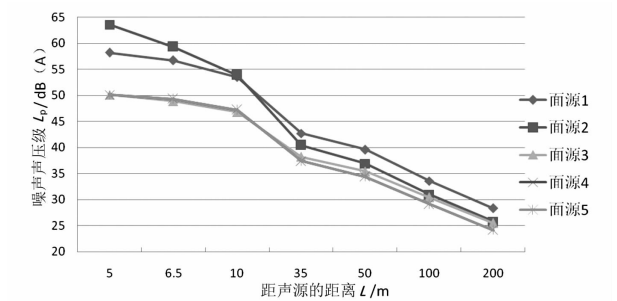


图 3 组成体源的 5 个面源随距离的衰减情况

表 3 体源各面源随距离的衰减情况

| 距声源<br>距离 <sup>①</sup> <i>L</i> /m | 声压级 <i>L<sub>p</sub></i> / dB(A) |      |      |      |      |
|------------------------------------|----------------------------------|------|------|------|------|
|                                    | 面源 1                             | 面源 2 | 面源 3 | 面源 4 | 面源 5 |
| 5                                  | 58.2                             | 63.6 | 50.1 | 50.1 | 50.1 |
| 6.5                                | 56.7                             | 59.3 | 48.9 | 49.3 | 49.3 |
| 10                                 | 53.5                             | 53.9 | 46.8 | 47.2 | 47.2 |
| 35                                 | 42.7                             | 40.4 | 38.2 | 37.4 | 37.4 |
| 50                                 | 39.6                             | 36.9 | 35.4 | 34.4 | 34.4 |
| 100                                | 33.6                             | 31.0 | 30.4 | 29.1 | 29.1 |
| 200                                | 28.3                             | 25.8 | 25.5 | 24.1 | 24.1 |

注:①噪声接受点位于主变压器长边一侧中心轴线上,距地面 1.2 m 处。

由图 3 可知,5 个面源中,面源 2 随距离衰减最快,而面源 1 衰减最慢,这是由于面源噪声主要沿着其中心轴线进行发散,面源 2 为垂直面源,面源 1 为平行于地面的面源,故面源 2 在  $L$  方向的衰减程度大于面源 1;虽然面源 2、面源 3 的总声功率级相同,但是在近声场( $L\leq 5$  m),噪声接受点与面源 3 的距离大于与面源 2 的距离(距离差  $\Delta L=9$  m),故导致面源 2 在噪声接受点的噪声声压级较大,而随着  $L$  增大, $\Delta L$  可逐渐忽略不计,则面源 2、面源 3 在噪声接受点的噪声声压级逐渐趋于相同;距面源 4、面源 5 不同距离处的噪声声压级和衰减规律均相同,相比其他面源,面源 4、面源 5 在远声场( $L\geq 35$  m)的噪声声压级最小,一方面由于这两面面积较小,导致总声功率级较小,另一方面由于面源 4、面源 5 平行于噪声接受点与主变压器中心连线,点源特征较明显,在远声场衰减较快。

总的来说,体源的 5 个面源中与地面平行的面源 1 衰减最慢,且在远声场( $L\geq 35$  m),噪声声压级最大,对体源产生的总声压级贡献值最大。

(下转第 81 页)

# 水轮机调速器主配压阀结构分析与特点论述

朱廷忠, 曹维福, 王丽萍  
( 东方电机控制设备有限公司, 四川 德阳 618000 )

**摘要:**介绍了水轮机调速器主配压阀的原理,分类叙述了中国市场上主流的大型主配压阀结构,说明了其不同之处以及对使用的影响,希望能对水电站调速器选型做一些参考,促进中国水电调速事业健康发展。

**关键词:**调速器; 主配压阀; 选型

**中图分类号:** TM312    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1003 - 6954 (2018) 02 - 0063 - 05

## Structure Analysis and Characteristic Discussion on Main Distribution Valve of Hydro - turbine Governor

Zhu Tingzhong, Cao Weifu, Wang Liping  
( Dongfang Electric Machinery Co. ,Ltd. , Deyang 618000, Sichuan, China )

**Abstract:**The working principle of main distribution valve of hydro - turbine governor is introduced, and their structures and performances are described by classification as well as their differences and influences, which will give some reference for the type selection of governor so as to promote the healthy development of governor system.

**Key words:**governor; main distribution valve; type selection

### 0 引 言

调速器是水轮发电机组中的重要控制设备,主配压阀是调速器的最核心部件之一,其性能和可靠性直接关系到电能质量和机组的可靠运行;因此选择一款性能优秀的主配压阀十分重要。然而因为机组的大小不同、类型不同、保护系统结构不同、电站维护水平不同等因素,对主配压阀的要求不能一概而论,合理分析电站需求、选择合适的设备才能发挥出最大的效能。

### 1 主配压阀原理

主配压阀是调速器机械液压系统中的功率级放大器,液压原理是 1 只超大型 O 型机能的三位四通伺服换向阀,结构上它是 1 只四边滑阀,阀芯的伺服换向控制着接力器开/关操作或保持某一位置不动,如图 1 所示。当阀芯在中间位置时,换向阀的 P、T、A、B 油口各自封闭,使接力器能够稳

定在某一位置<sup>[1]</sup>。

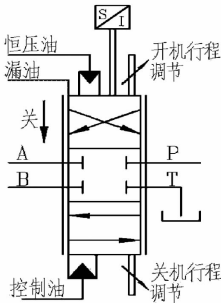


图 1 主配压阀原理

为使接力器快速达到并稳定在指定位置,主配压阀需要有良好的动态响应性能、回中性能和一定的中位密封性能。根据控制原理不同,需要采用不同的方式保证活塞快速准确动作和回中;中位密封性能主要是通过合理设计阀芯与阀套(或壳体)之间的径向间隙和一定的轴向搭叠量来实现的,搭叠量的设计需要兼顾快速响应性能和密封性能,径向间隙也要保证活塞能够自由灵活运动。

主配压阀活塞(阀芯)的伺服运动都是由液压力来推动的,一般采用单腔控制,原理与单作用液压

• 64 •

分为电控回中、液压反馈回中、弹簧对中、定中缸对中等,各种对中形式结构差异较大,配置不尽相同,也形成了不同主配压阀的功能和性能的差异,下面将具体展开分析。

## 4 几种控制原理的主配压阀

### 4.1 电控回中主配压阀

电控回中控制采用电气柜的控制信号,通过电液转换器精确控制主配压阀位置,这种控制方式采集主配压阀位移信号并参与控制,对主配压阀活塞进行闭环位置伺服控制,主配压阀的开启/关闭/回中都由电气控制,典型原理图如图 3 所示。这种控制方式用于 Andritz、Alstom(图 4 左)、GE、东方电机(图 4 中)和南瑞等公司的 MDV 系列主配压阀。

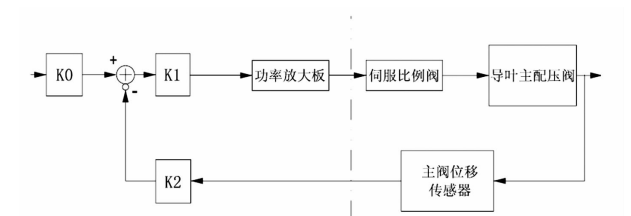


图 3 典型电控回中原理

这种控制方式的特点是:主配压阀关闭方向加载恒液压压力,控制腔的压力作用面积大于恒压腔的面积,通过电液转换器改变控制腔的液压油体积来控制主配压阀活塞的伺服运动,活塞的回中依赖于电液转换器和电气控制,主配压阀活塞的控制精度高,动态响应性能好。

HGS-H 型主配压阀除采用全自动控制外,还可嵌入液压反馈复中装置——流量反馈阀以实现

主配压阀在手动操作时液压复中,与一般液压反馈复中型主配压阀不同,这种流量反馈阀阀芯采用了液压复位,简化了机械结构,可靠性得到了提高。

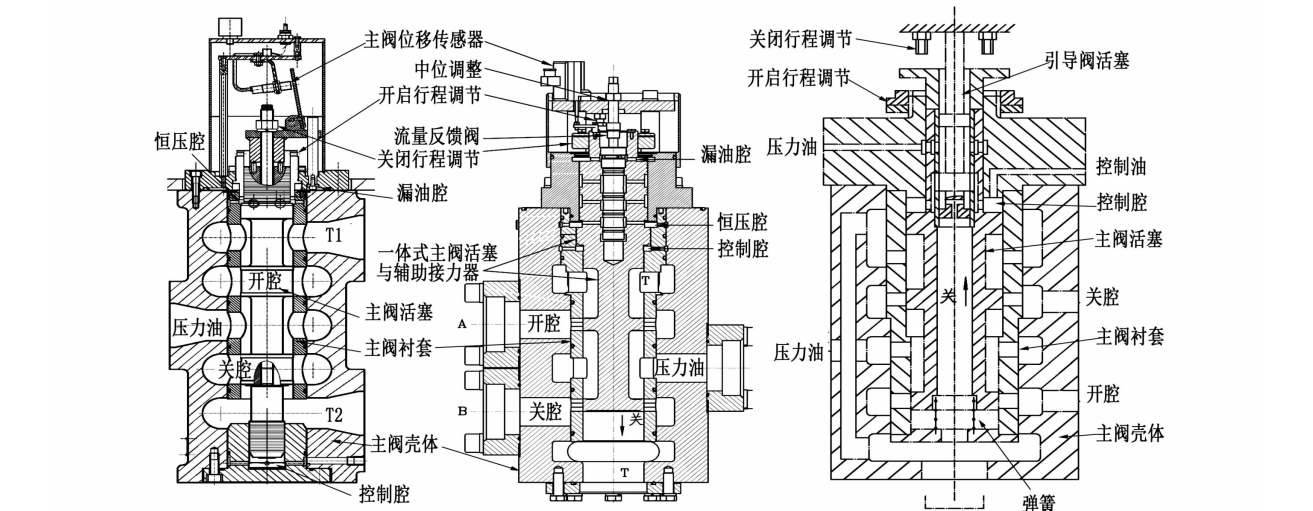
进口的主配压阀一般没有考虑纯手动操作功能和掉电复中功能,在这方面中国处在了领先水平。也可以通过机械结构将进口主配压阀的活塞位移引出外设液压反馈实现自复中,但流量反馈阀的管路无法通过钻孔方式隐藏在主配压阀之中,外部管路复杂。

电气复中的主配压阀当电气控制故障时,活塞的动作规律交由先导液压控制逻辑进行决策,可以切换至纯手动控制使主配压阀复中,也可以将主配压阀控制腔接通回油使主配压阀关闭。

### 4.2 液压反馈复中主配压阀

液压反馈复中式主配压阀也采用单腔控制,一侧通过弹簧或者恒压加载使主配压阀活塞保持关闭方向的作用力,一个调节任务将要完成时,电气控制停止输出,主配压阀活塞在流量反馈阀(也称引导阀)作用下回复到中间位置。流量反馈阀是一个两位三通伺服换向阀,一般地,流量反馈阀的衬套随着主配压阀活塞一起运动,将主配压阀活塞的位移等量地传递到反馈阀上。当阀芯固定不动时,反馈阀输出一个控制主配压阀活塞与当前运动方向相反的流量信号到控制腔,驱动主配压阀活塞回向中间位置。

这种结构的主配压阀有两种控制方式:一种是将电气控制信号转换成液压流量直接输入到主配压阀的控制腔,反馈阀芯固定不动,如图 4 右所示,属于流量输入型,这种控制方式的电液转换元件多



Alstom 主配压阀

东电 HGS 主配压阀

液压复中式主配压阀

图 4 MDV 系列主配压阀

采用比例阀,代表性的产品有能事达、长控、三联等;另一种控制方式是将电气控制信号转换成位移信号加载在流量反馈阀的阀芯上,阀芯具有复中功能,一个调节任务将要完成时,阀芯复中驱动主配压阀活塞复中,这种方式常用于能事达、长控、三联步进/伺服电机型主配压阀,如图 5 所示。

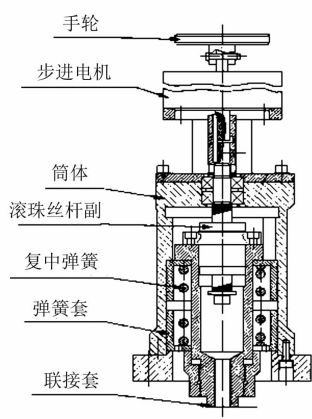


图 5 主配压阀的位移输入

电机输出的角位移信号经过滚珠丝杠转换成直线位移信号连接到反馈阀阀芯,在丝杠的螺母与反馈阀阀芯之间设置了弹簧复中机构,复中机构由复位弹簧、两端的弹簧座、弹簧座限位装置等组成。复位弹簧通过两端的弹簧座将螺母始终推向中间位置,只有当施加外部控制的时候螺母才会偏离中位。螺母、引导阀阀芯、主配压阀活塞,它们通过机械结构耦合在一起,实现自复中<sup>[2]</sup>。

这种主配压阀的特点是:复中与外部控制信号不相关,流量反馈阀始终加载在主配压阀活塞的控制腔,当外部控制信号消失,自动实现复中;反馈阀是主配压阀活塞伺服运动的关键元件,参与伺服控制。主配压阀的动态性能与外部输入与反馈流量耦合程度相关。

### 4.3 弹簧对中主配压阀

弹簧对中主配压阀两端都装有对中弹簧,弹簧力通过弹簧座作用于主阀活塞上,在主配压阀衬套上设有弹簧座限位装置,在没有外部控制输入时,弹簧推动弹簧座压紧在限位止口,使活塞复位到中间位置。这种结构见于南瑞 ZFL 系列主配压阀,它采用双腔控制,比例阀两个输出口分别与活塞两端的控制腔相连,紧急停机时需要有压力油通向关机侧控制腔,推动活塞到关闭位置。在主配压阀的顶部,设置了一根与主配压阀活塞相连的伸出杆,用于主配压阀的位移输出以及开关机时间调整。

弹簧复中型主配采用了机械定位,手动操作时,与液压对中一样有较高的定位精度,中位不漂移,容易实现较精确的手动控制;但弹簧相对液压的操作力较小,主配压阀更容易出现卡阻。自动工况下,弹簧对中采用比例阀双腔控制,设置有主配压阀位移传感器,有很高的定位精度和相应速度,但复位弹簧始终会给主阀活塞施加一个与控制方向相反的阻力,将主配压阀推向中间位置。

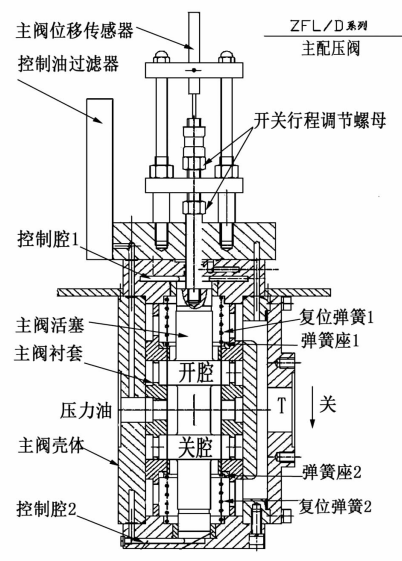


图 6 ZFL 型主配压阀

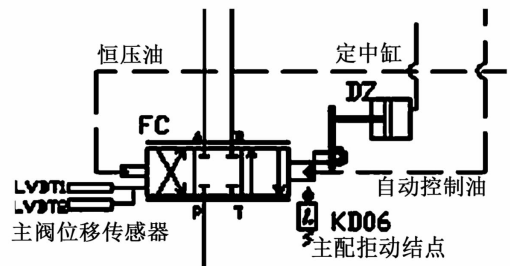


图 7 MDV 型主配压阀原理

### 4.4 定中缸对中主配压阀

定中缸结构主配压阀采用单腔液压控制,电液转换器采用比例阀,另一腔通恒压油,自动工况下由电气控制自动回中,定中缸仅用于手动控制。手动工况下,控制腔接通回油,恒压腔液压力将主配压阀推向关机一侧,定中缸活塞伸出限制主阀活塞行程,使活塞停留在中间位置。当需要关闭操作时,收回定中缸活塞,开启时向主阀控制腔通压力油,开启结束又接通回油。该结构实现了主配压阀复中,能够完成手动控制功能,但在开启、复中、关闭过程中,对控制腔和定中缸之间来回切换操作,比较复杂,不利

于实现较为精确的纯手动控制。

## 5 国产主配压阀现状

目前中国在主配压阀选材、加工、热处理上面具有十分成熟的技术和丰富的应用经验,拥有一批较为成熟的产品,主配压阀通径系列涵盖了从 DN50 至 DN250 各种大小,压力等级适用于 2.5 ~ 6.3 MPa,能够满足各大、中、小型水轮发电机组的控制<sup>[3]</sup>。

由于市场方面原因,国产主配压阀质量参差不齐,但从巨型水电机组上应用的产品来进行技术比较,国产主配压阀的活塞、衬套、引导阀等关键部件在选材、热处理、加工精度、使用寿命等方面与国外同类产品相当甚至更高,在壳体铸造工艺和流道设计上较进口产品还有一些差距,但对使用性能几乎没有影响。功能上国内主配压阀拥有集成的流量反馈装置可用于主配压阀掉电复中和手动控制,领先于国外产品;此外国产主配压阀具有齐全的功能附件,布置合理,便于操作。

应当注意,目前掉电复中型主配压阀应用越来越多,需要指出的是掉电复中必须结合电站的保护系统结构,保证极端故障失电时机组能够可靠停机。

## 6 结 语

通过对各种主配压阀结构和原理的了解,用户可以从安全性、控制性能、可靠性等方面结合电站自身情况进行分析,选择合适的主配压阀和控制逻辑,提高水轮机调节水平,保证水轮发电机组长期安全、可靠运行。

### 参考文献

[1] 李壮云. 液压元件与系统(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] 魏守平. 现代水轮机调节技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[3] 吴应文,余志强,王丽娟. 我国大型水轮机调速器主配压阀[C]. 中国水电控制设备论文集,2009:222 - 231.

### 作者简介:

朱廷忠(1984),工程师,长期从事调速器液压控制系统设计和研究。

(收稿日期:2017 - 09 - 15)



(上接第 28 页)

[3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1):1 - 14.

[4] Pingzhou Tang, Di Chen, Yushuo Hou. Entropy Method Combined with Extreme Learning Machine Method for the Short - term Photovoltaic Power Generation Forecasting [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2015 (89): 243 - 248.

[5] Honglu Zhu, Xu Li, Qiao Sun, et al. A Power Prediction Method for Photovoltaic Power Plant Based on Wavelet Decomposition and Artificial Neural Networks[J]. Energies, 2016, 9(1):1 - 15.

[6] 阳霜,罗滇生,何洪英,等. 基于 EMD - LSSVM 的光伏发电系统功率预测方法研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6):1387 - 1395.

[7] 赵唯嘉,张宁,康重庆,等. 光伏发电出力的条件预测误差概率分布估计方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16):8 - 15.

[8] Wang Yufe, Sun Lu, Xue Hua. Photovoltaic Output Power Chaotic Characteristic and Trend Prediction Based on

the Actual Measurement Data [C]. Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications, 2016, 1(1):326 - 331.

[9] Chen Jun - Ma, Wang Bing, Lu, Zhou - Xin, et al. Photovoltaic Power Generation Prediction Based on MEA - BP Neural Network [C]. 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2017,1(1):387 - 392.

[10] 王守相,张娜. 基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J]. 电力系统自动化, 2012,36(19):37 - 41.

[11] 熊志斌. ARIMA 融合神经网络的人民币汇率预测模型研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2011(6):64 - 76.

[12] 周明,聂艳丽,李庚银,等. 基于小波分析的短期电价 ARIMA 预测方法[J]. 电网技术, 2005,29(9):50 - 55.

### 作者简介:

詹仲强(1987),硕士研究生,主要从事新能源并网技术研究。

(收稿日期:2017 - 12 - 10)

# 九寨沟 Ms7.0 地震四川电网受损分析及处置措施

韩晓言<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>2</sup>, 范少君<sup>3</sup>, 曹永兴<sup>4</sup>

- (1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;  
3. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 西昌 615000;  
4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘 要:**地震能量释放巨大,对电网的破坏力极强。2017年8月8日四川省阿坝州九寨沟县发生了7.0级地震,造成阿坝供电公司所属的110 kV 九寨沟变电站部分重要设备损毁,导致全站失电。依据此次地震中相关地质和电网数据,分析九寨沟变电站重要设备受损原因,利用卫星遥感资料解译了九寨沟变电站周边区域地质破坏的影响,并提出了针对重要设备的隔振减震措施。

**关键词:**地震;重要设备;卫星遥感;隔振减震

**中图分类号:**TM727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0068-04

## Damage Analysis of Sichuan Power Grid in 7.0 – magnitude Earthquake of Jiuzhaigou and Processing Measures

Han Xiaoyan<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>2</sup>, Fan Shaojun<sup>3</sup>, Cao Yongxing<sup>4</sup>

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192;  
3. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Xichang 615000, Sichuan, China;  
4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:**The seismic energy is powerful, so it has extremely destructive force on power grid. On August 8, 2017, a 7.0 – magnittute earthquake hit Jiuzhaigou County of Sichuan province. It made great damage of some important equipment in 110 kV Jiuzhaigou substation of Aba electric power supply company, which caused the total power loss of the station. The relevant geological and grid data in the earthquake are collected. The damage of important equipment in Jiuzhaigou substation caused by the earthquake is analyzed. The influence of regional geological damage around Jiuzhaigou substation is described by satellite remote sensing data, and the vibration isolation and shock absorption measures for the important equipment are put forward.

**Key words:**earthquake; important equipment; satellite remote sensing; vibration isolation and shock absorption

### 0 引 言

2017年8月8日21时19分,在四川省阿坝州九寨沟县(北纬33.20°,东经103.82°)发生7.0级地震,震源深度20 km。

地震能量释放巨大,对电网的破坏力极强,造成阿坝供电公司所属的110 kV 九寨沟变电站部分重要设备损毁,导致全站失电。下面收集了此次地震中相关地质和电网数据,分析了九寨沟变电站重要

设备受损原因,利用卫星遥感资料解译了九寨沟变电站周边区域地质破坏的影响,提出了针对重要设备的隔振减震措施。

### 1 地震情况简介

1.1 中国九寨百河强震台记录及分析

根据四川九寨沟7.0级地震强震动观测简讯,截至8月8日23时50分,共获取了17组强震动观测记录,其中九寨百河强震台(51JZB)的震中距最



小,为 30.50 km,如图 1 所示。

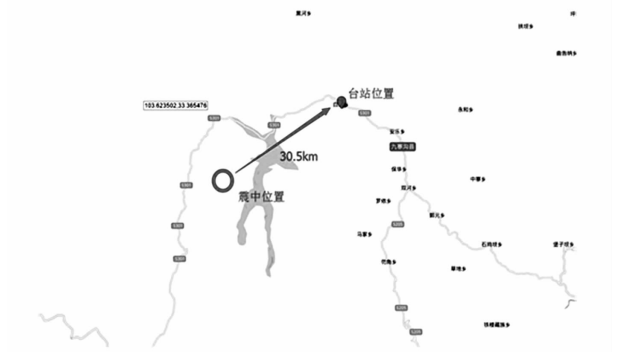


图 1 九寨百河强震台位置

九寨百河强震台位于北纬 33.2°,东经 104.106°,东西、南北、垂直向加速度峰值分别为 -129.5、-185.0、-124.7 cm/s<sup>2</sup>。该地震动与当地设计反应谱,以及近年来中国主要强烈地震震中反应谱的对比如图 2 所示。由图可见该地震动强度比汶川、芦山等地震的记录都要小很多。

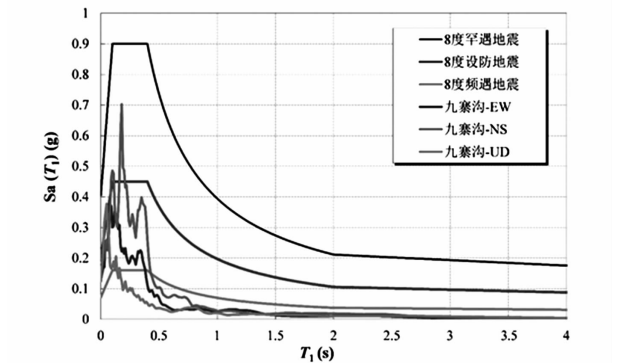


图 2 九寨百河强震台记录反应谱

1.2 国家强震动台网中心记录

根据国家强震动台网中心记录,此次地震的最大烈度为Ⅸ度(9度),等震线长轴总体呈北西走向,Ⅵ度(6度)区及以上总面积为 18 295 km<sup>2</sup>,共造成四川省、甘肃省 8 个县受灾,包括四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县、若尔盖县、红原县、松潘县;绵阳

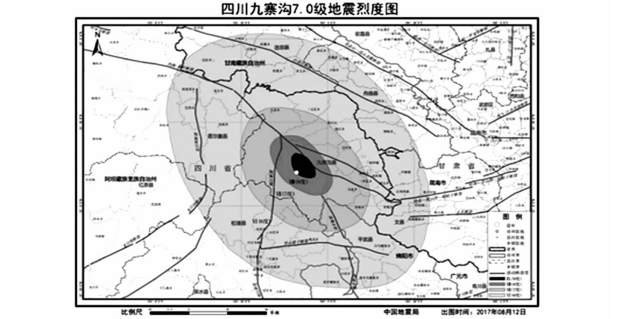


图 3 九寨沟 7.0 级地震烈度分布图

市平武县;甘肃省陇南市文县;甘南藏族自治州舟曲县、迭部县。九寨沟 7.0 级地震烈度分布情况如图 3 所示。

2 110 kV 九寨沟变电站建筑物破坏情况分析

对 110 kV 九寨沟变电站内的建筑物破坏情况进行统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 震中地区九寨沟变电站建筑物的破坏力分析

| 部位        | 完好率<br>/% | 轻微<br>破坏率<br>/% | 中等<br>破坏率<br>/% | 严重<br>破坏率<br>/% | 完全<br>毁坏率<br>/% |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 框架结构      | 11.39     | 3.80            | 84.81           | 0.00            | 0.00            |
| 未设防<br>砌体 | 0.00      | 0.00            | 95.89           | 4.11            | 0.00            |
| 设防砌体      | 0.00      | 0.00            | 100.00          | 0.00            | 0.00            |
| 生土结构      | 0.00      | 0.00            | 76.71           | 23.29           | 0.00            |
| 汇总        | 0.90      | 0.40            | 82.40           | 16.30           | 0.00            |

根据分析结果,可见本次四川九寨沟 7.0 级地震对非设防结构、低矮短周期结构破坏力较大。鉴于变电站现在的建设标准均按照框架典型设计设防,判断震中附近变电站建筑物受损情况较为轻微,仅变电站围墙发生部分倒塌。这与实际勘察的情况也较为吻合。

3 变电站重要设备的破坏情况分析

3.1 主变压器受损情况

九寨沟变电站 110 kV 主变压器受损情况:1 号主变压器高压侧套管 3 相破裂漏油及中性点 1019 刀闸支柱断裂。主变压器未发生倾覆和位移。图 4 为 110 kV 1 号主变压器高压侧套管根部受损破裂漏油情况的实拍照片。

3.2 开关类及四小器设备受损情况

九寨沟县漳扎镇 110 kV 九寨沟变电站 1 号主变高压侧 101 号开关断裂,隔离开关 1011 号、1013 号倾斜及 CT 漏油。川九线 151 号开关(LW25 - 145)断裂,隔离开关 1511 号、1513 号倾斜及 CT 漏油。110 kV 母线 PT 漏油。图 5 为变电站部分开关根部断裂的实拍照片。



图4 九寨沟变电站110 kV 1号主变压器  
高压侧套管根部受损破裂漏油情况



图5 110 kV 九寨沟变电站部分开关根部断裂



图6 35 kV 南黄线输电线路84号杆塔倒塌情况

4 输电线路受损情况

35 kV 南黄线(松潘城南站—黄龙站)84号杆在地震中倒杆,其材质为水泥,原因系滚石砸倒线路杆塔,见图6所示。8月10日用抢修塔临时恢复。

另有1条110 kV 川九线(川主寺—九寨沟)N169~170段因滑坡造成树木倒塌搭在导线上,引发线路跳闸,8月10日17时许已排除故障恢复送电。

5 电网受损原因分析

九寨沟7.0级地震对电网影响情况总体较小:离九寨沟县较近的国网阿坝供电公司有1条110 kV 川九线和1条35 kV 黄龙线以及松潘县35 kV 城南变电站的35 kV 南黄线因地震发生跳闸;阿坝公司控股公司下属九寨沟变电站全站停电;地方电力所属的35 kV 九火线跳闸;110 kV 九寨沟变电站供电的甲蕃古镇、九寨天堂国际会议度假中心失电。分析电网受损原因如下。

1)地震烈度超过了设防标准

此次地震震中附近最大烈度为9度,超过了九寨沟地区地震烈度区划为8度的设防标准。

2)变电站设备套管材料为陶瓷材料,其固有频率与地震波频率接近,容易发生类共振而导致套管受损。

这类设备的固有振动频率在1~10 Hz范围内,与地震波频率相接近,同时这类设备阻尼值较小,其主体材料瓷柱属脆性材料,储能能力小,因此在地震中极易因类共振影响使设备遭受破坏。多数设备破坏位置主要发生在套管根部,这是薄弱部位,与历次地震情况吻合。

3)开关类设备重心高,动力放大效应显著

开关类设备采用支架都是“头重脚轻”,地震时易在瓷套管根部折断。

4)输电线路损坏主要由次生灾害引起

此次地震对输电线路的破坏,主要由滚石砸坏线路杆塔、滑坡冲垮杆塔、树木倒塌引发跳闸等。

6 九寨沟地区地质变化的影响

基于加拿大的radarsat-2数据,已经获得了可以用于干涉的图像。考察数据质量,主要看相干性,产生干涉效果右部较好,左侧较差。获取的SAR图像中的干涉条纹干涉不够充分,但仍可识别并提取地表形变的数据。如图7、图8所示。图9为九寨沟熊猫海子周围震后遥感影像及解译结果。

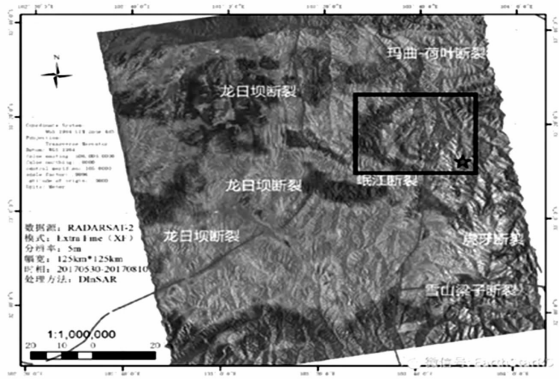


图7 九寨沟地区 InSAR 监测提取地震形变场  
(数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所)

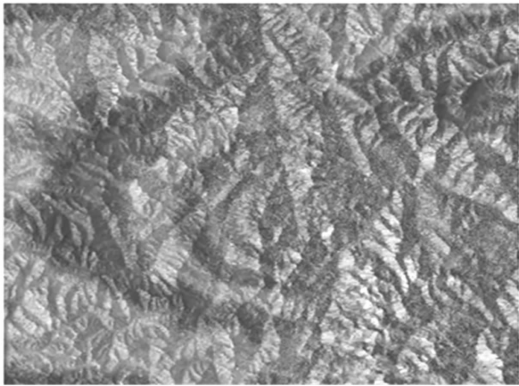


图8 九寨沟地区 InSAR 监测提取地震形变场(局部)  
(数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所)

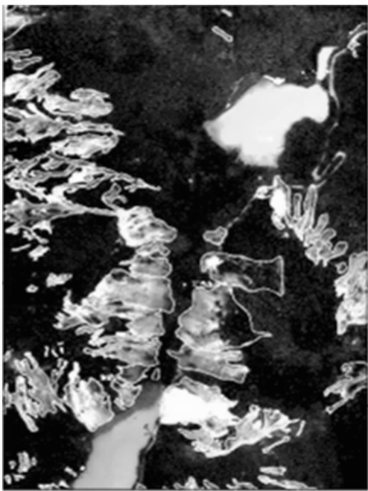


图9 九寨沟熊猫海子周围震后遥感影像及解译结果  
(数据来自四川省测绘局)

监测结果反应,断层东侧失相比较严重,西侧约有5个干涉条纹(如图7黑框所示),可以推断出此次地震形变场的范围。监测得到的同震形变场进一步可用于震源参数反演等后续研究。

图9中除了水体湖泊以外,浅色区域均为地震后地表变化、植被损毁的区域,反应出地震对该地区的地震动作用。

## 7 结 语

1)九寨沟变电站设防标准不足,造成重要设备如变压器无法抗衡地震作用。应该采取措施,对主变压器等重要设备增加隔振减震装置,提高高烈度地区的设防水平。

2)地震导致九寨沟地区产生大量滑坡。应继续关注地震次生灾害链的影响,如滑坡泥石流、强降水、洪灾的影响,以及对道路破坏的影响;加强监测,及时预警,确保电网的安全。

3)应继续利用卫星遥感解译、无人机巡航等先进技术,监测地震次生灾害的影响,特别是对电网的影响。

### 参考文献

[1] 戴岚欣,许强,范宣梅,等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.

[2] 黄民双,陈伟民,黄尚廉. 2017年四川九寨沟 Ms7.0 地震 InSAR 同震形变场及发震构造探讨[J]. 地质力学学报, 2017, 23(4): 507-514.

[3] 李爱国,岳中琦,谭国焕,等. 2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震强震记录及特征分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 652-656.

### 作者简介:

韩晓言(1965),博士、高级工程师,主要从事电网建设、运维及科技创新工作。

(收稿日期:2018-01-15)

欢迎订阅

《四川电力技术》

# 基于红外热像的低零值绝缘子检测技术研究

何良<sup>1</sup>, 刘书弟<sup>2</sup>, 张禹<sup>3</sup>, 何宇航<sup>1</sup>, 周电波<sup>1</sup>, 姚晓<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 华北电力大学, 北京 102206;  
3. 上海海能信息科技有限公司, 上海 201315)

**摘要:**分析了绝缘子串的电压分布及发热功率, 归纳了低零值绝缘子红外热像图谱特征, 采用红外热像技术进行绝缘子带电检测, 现场检测结果表明, 红外热像技术可通过遥测绝缘子串温度特征来判断绝缘子绝缘性能。该方法能有效发现低零值绝缘子, 具有工作效率高、安全等优点。

**关键词:**绝缘子; 红外热像; 低零值; 温度特征

**中图分类号:** TM80   **文献标志码:** B   **文章编号:** 1003-6954(2018)02-0072-04

## Research on Low and Zero Resistance Insulators Detection Technique Based on Infrared Thermal Imaging

He Liang<sup>1</sup>, Liu Shudi<sup>2</sup>, Zhang Yu<sup>3</sup>, He Yuhang<sup>1</sup>, Zhou Dianbo<sup>1</sup>, Yao Xiao<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
3. Hinner Technology Company, Shanghai 201315, China)

**Abstract:** The voltage distribution and heating power of insulator string are analyzed, the spectral characteristics of infrared thermal imaging for low and zero resistance insulators are summarized, and the infrared thermal imaging technique is proposed to detect low and zero resistance insulators. Test results show that it can judge the insulation property of insulators by measuring the temperature characteristics of insulator string, which can effectively detect low and zero resistance insulators with high work efficiency and safety.

**Key words:** insulator; infrared thermal imaging; low and zero resistance; temperature characteristic

## 0 引言

瓷质绝缘子是变电站的重要绝缘部件, 其质量主要体现在机械性能和电气性能两个方面。由于瓷质绝缘子在运行过程中因长期经受强电磁场、机械应力、冷热变化、湿度等作用, 可能出现绝缘性能劣化, 如绝缘电阻降低、瓷件开裂等。特别在变电站内, 绝缘子劣化直接影响电网安全稳定运行<sup>[1]</sup>。若绝缘子串中存在低零值绝缘子, 导致有效绝缘距离变短增加绝缘子串的闪络概率, 严重时出现绝缘子串掉串及导线落地等事故<sup>[2]</sup>。

目前低零值绝缘子检测方法主要有: 绝缘电阻法、工频耐压法、电压分布法、超声波法、紫外成像法

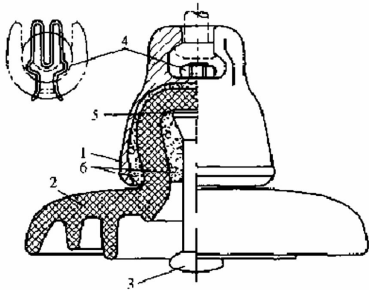
等<sup>[3-7]</sup>。前两种方法精度较高, 但只能停电试验, 具有检测工作量大、成本高等缺点。电压分布法则是将测得的绝缘子串分布电压与标准分布电压进行比较来判断是否存在低零值绝缘子, 需要登高作业, 具有安全隐患大、劳动强度高等不足。后两种方法可在带电情况下进行检测, 但易受干扰, 检测精度低。

绝缘子绝缘性能劣化将导致绝缘子串电压分布异常, 进而影响绝缘子发热功率, 可能会引起相应部位的温度变化, 红外检测是在绝缘子串工作状态下, 通过高精度的红外测温仪检测绝缘子串的红外热像图谱, 可进行远距离带电检测, 具有安全、高效、准确率高等优点<sup>[8-11]</sup>。近年来, 随着红外热像仪性能如温度分辨率和空间分辨率等不断提高, 该方法已得到了较为广泛的应用。

下面对瓷质绝缘子串的电压分布和发热功率进行了理论分析,归纳总结了典型低零值绝缘子的红外热像特征及判据,并结合现场检测验证了基于红外热像的低零值绝缘子检测技术的有效性。

## 1 绝缘子串电压分布特征

瓷质绝缘子由铁帽、钢脚和瓷件等组成,如图1所示<sup>[12]</sup>。由于绝缘子的金具部分(铁帽、钢脚)与接地横担及带电的高压电极间存在杂散电容,使得绝缘子串的电压分布畸变,绝缘子串越长,畸变越明显,电压分布越不均匀。



1 - 铁帽;2 - 瓷件;3 - 钢脚;4 - 锁紧销;5 - 弹性衬垫;  
6 - 水泥胶合剂;7 - 圆柱销;8 - 压口销或驼背销

图1 悬式瓷绝缘子结构

如图2所示<sup>[9]</sup>, $C_E$ 为绝缘子与接地横担间的杂散电容,其值约为 $4 \sim 5 \text{ pF}^{[2]}$ ;  $C_L$ 为绝缘子与高压电极间的杂散电容,其值约为 $0.5 \sim 1 \text{ pF}^{[2]}$ 。可以看出 $C_E$ 的影响比 $C_L$ 大一些,绝缘子串中的电压分布发生畸变,靠近高压电极侧的绝缘子承担的电压降比较大,靠近接地横担的绝缘子承担的电压降较小,因此整串绝缘子的电压分布呈不对称马鞍形。

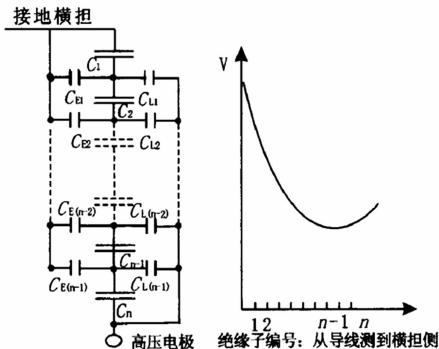


图2 绝缘子串等效电路和电压分布

## 2 绝缘子发热功率分析

瓷质绝缘子等效电路模型如图3所示,图中 $C_0$

为绝缘子极间电容,一般为 $40 \sim 60 \text{ pF}^{[10]}$ ,工频电压下其容抗值约为 $53.1 \sim 79.6 \text{ M}\Omega$ ;  $R_j$ 为极化电阻,一般为 $2.5 \sim 4.3 \text{ G}\Omega$ ;  $R_v$ 和 $R_s$ 分别为体积电阻和表面电阻,一般情况下两者均远远大于 $R_j$ 。绝缘子的等效电阻 $R_{eq}$ 和发热功率 $P_k$ 分别为

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_v}} \quad (1)$$

$$P_k = \frac{U_k^2 R_{eq}}{X_D^2 + R_{eq}^2} \quad (2)$$

$$X_D = \frac{n-1}{nwC_0} \quad (3)$$

式中: $U_k$ 为第 $k$ 片绝缘子的分布电压,V; $X_D$ 为等效容抗, $\Omega$ ;  $n$ 为绝缘子串片数; $w$ 为电压角频率,rad。

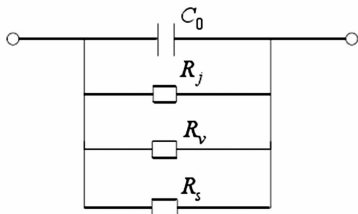


图3 绝缘子等效电路

当绝缘子绝缘性能良好时,其发热主要由介质极化引起,正比于分布电压的平方和介质损耗因素 $\tan\delta$ :

$$P_k = U_k^2 w C_0 \tan\delta \quad (4)$$

式中, $\tan\delta$ 为介质损耗因数。 $\tan\delta$ 值很小,约为 $0.015 \sim 0.025^{[10]}$ ,可以看出正常绝缘子发热功率很小。绝缘子串的红外热象分布为不对称马鞍形,相邻绝缘子间的温差很小。

当绝缘子性能劣化,绝缘电阻降低时,泄露电流主要从绝缘子内部流过,其发热功率为

$$P_k = U_k I_g \quad (5)$$

式中, $I_g$ 为贯穿绝缘子泄露电流,A。

对公式(2)求导可知,当绝缘子的等效电阻 $R_{eq}$ 与等效容抗 $X_D$ 相等时,绝缘子的发热功率最大。即当绝缘子绝缘电阻逐渐减小到等效容抗值时,发热功率逐渐增加;当绝缘电阻继续减小时,发热功率逐渐较小;当绝缘电阻进一步减小到几乎为0时,即劣化为零值绝缘子时,发热功率几乎为0。可以看出,当绝缘电阻值降至某个区段时,发热功率与正常绝缘子相似,为红外检测盲区。

## 3 低零值绝缘子红外热像特征及判据

正常绝缘子串电压分布呈不对称马鞍形,靠近

高压电极的绝缘子分布电压较高,中间绝缘子的电压则相对较低,而靠近接地横担的绝缘子分布电压又有所回升<sup>[8]</sup>。绝缘子的发热功率正比于分布电压的平方,绝缘子串的红外热像分布亦呈不对称马鞍形,相邻绝缘子间温差较小。

当绝缘子劣化为低零值绝缘子时,其发热功率随绝缘电阻值呈非线性变化。随着绝缘电阻逐渐较小,其发热功率先增大后减小。低值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏大,红外热像特征表现为钢帽温度偏高,零值绝缘子的红外热象特征表现为钢帽温度偏低。通过分析整串绝缘子串的温度分布,比较相邻绝缘子间的温差,可以有效判别低零值绝缘子。

DL/T 664 - 2016《带电设备红外诊断应用规范》中指出正常绝缘子串的温度分布同电压分布规律,即呈现不对称马鞍形,相邻绝缘子温差很小;低值绝缘子以铁帽为发热中心的热像图,其比正常绝缘子温度高,温差超过 1 K;零值绝缘子发热温度比正常绝缘子要低,热像特征与绝缘子相比呈暗色调,温差超过 1 K<sup>[12]</sup>。

DL/T 626 - 2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》中指出运行瓷、玻璃同串绝缘子在规定的检测、检查次数中,其劣化片数累计达到规定值必须立即整串更换<sup>[13]</sup>。

因此,通过分析绝缘子串的红外热像图谱,可以快速有效判断出低零值绝缘子,不同类型的绝缘子如标准型和防污型均可通过此种方法进行判断。需要指出的是,由于表面积污引起的发热主要表现为瓷面温度偏高,与低零值绝缘子热像分布存在本质上的区别,能较好地地区分开来。

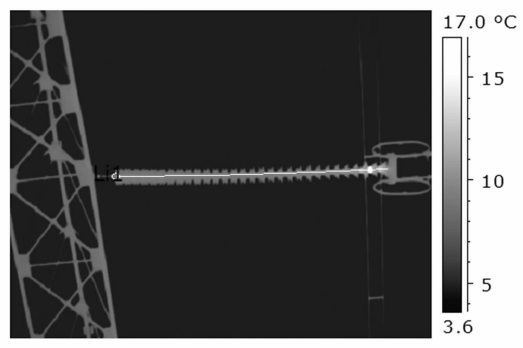
## 4 低零值绝缘子红外检测案例

### 4.1 案例 1

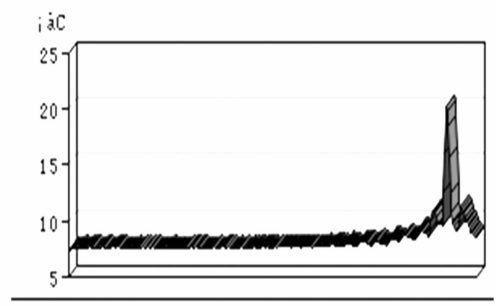
2017 年 2 月,检测人员在某 500 kV 变电站开展站内悬式瓷质绝缘子红外检测。通过对悬式绝缘子串热场分布的分析,发现某 220 kV 绝缘子串温度明显异常,如图 4 所示。

可以看出靠近高压导线侧第二片绝缘子钢帽温度明显偏高,近 20℃,而相邻绝缘子温度近 11℃,温差达 9 K,根据 DL/T 664 - 2016《带电设备红外诊断应用规范》,靠近高压导线侧第二片绝缘子为典型的低值绝缘子;根据 DL/T 626 - 2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》,该串绝缘子中劣化绝缘子片

数较少,可不进行整串绝缘子更换。



(a) 红外热像图谱



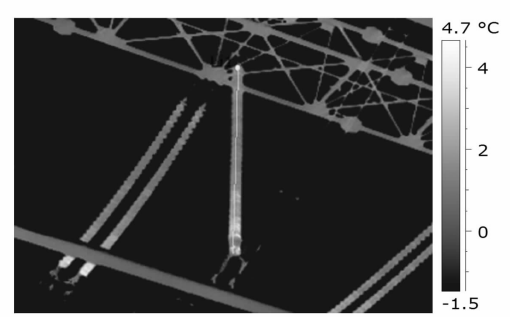
■ Li1 光标: - 最小: 7.3 最大: 20.1

(b) 线温分布图

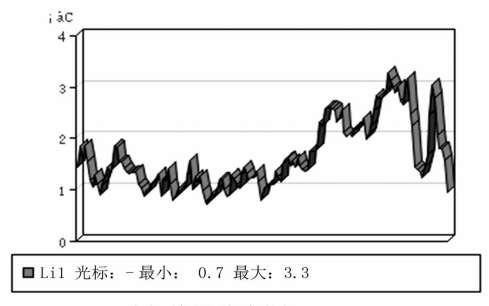
图 4 绝缘子串红外热像结果(案例 1)

### 4.2 案例 2

2017 年 3 月,检测人员在某 500 kV 变电站开展站内悬式绝缘子红外检测。通过对悬式绝缘子串热场分布的分析,发现某 500 kV 绝缘子串温度明显异常,如图 5 所示。



(a) 红外热像图谱



■ Li1 光标: - 最小: 0.7 最大: 3.3

(b) 线温分布图

图 5 绝缘子串红外热像结果(案例 2)

可以看出靠近高压导线侧第二片、第三片绝缘子温度明显偏低,低于相邻绝缘子近 2 K,热像特征呈暗色调,根据 DL/T 664 – 2016《带电设备红外诊断应用规范》,靠近高压侧第二片、第三片绝缘子为典型的零值绝缘子;根据 DL/T 626 – 2005《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》,该串绝缘子中劣化绝缘子片数较少,可不进行整串绝缘子更换。

5 结 论

- 1)正常绝缘子的发热功率正比于分布电压的平方,绝缘子串的红外热像分布呈不对称的马鞍形,相邻绝缘子间温差很小。
- 2)低值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏大,其热像特征表现为钢帽温度偏高,呈亮色调;零值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏小,其热像特征表现为钢帽温度偏低,呈暗色调。
- 3)现场检测结果表明,红外热像技术具有较好的可行性,能有效检测出低零值绝缘子。

参考文献

[1] 张文亮,吴维宁,吴光亚,等. 我国绝缘子的发展现状与应用前景[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 10 – 12.

[2] 谢冰. 基于红外测温的劣质绝缘子在线检测技术研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(4): 116 – 119.

[3] 王剑飞,邵兵,陶军. 基于红外测温法的故障绝缘子在线检测技术研究[J]. 电工技术, 2015 (4): 29 – 31. [4] 祝嘉奇. 基于红外热像的劣化绝缘子诊断技术研究

(上接第 37 页)

[4] 黄子璇,席黎明,樊梦旭,等. 高压输电线下有建筑物时工频电场计算中模拟电荷设置方法的改进[J]. 电网技术,2013,37(3):788 – 793.

[5] Thomas A, Bag inski. Hazard of Low – frequency Electro-magnetic Coupling of Overhead Power Transmission Lines to Electroexplosive Devices[J]. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility,1989,31(4):393 – 395.

[6] 王泽忠,金玉生,卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京:清华

(上接第 40 页)

[9] 维捷斯拉夫·本达,约翰·戈沃,邓肯 A·格兰特. 功率半导体器件——理论及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[10] Taylor P. D. 著,庞银锁译. 晶闸管的设计与制造[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.

[D]. 南昌:南昌大学,2014.

[5] 陈勇,郭俊峰,邬小均. 基于红外测温的零值和污秽绝缘子快速检测试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51 (6): 191 – 194.

[6] 夏德分. 红外热像检测零值绝缘子影响因素研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.

[7] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 44 – 46.

[8] 姚建刚,关石磊,陆佳政,等. 相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 171 – 175.

[9] 黄军凯,曾华荣,杨佳鹏,等. 红外热像技术在低零值绝缘子检测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2013(2):40 – 44.

[10] 陈金法. 绝缘子红外热像检测及诊断技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[11] 伍也凡. 基于红外检测方法的劣化绝缘子便携式带电检测系统研发[D]. 长沙:湖南大学,2015.

[12] 周兆禹. 盘形悬式绝缘子的结构分析与优化[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.

[13] 国家能源局. 带电设备红外诊断应用规范:DL/T 664 – 2016[S]. 北京:中国电力出版社,2017.

[14] 国家能源局. 劣化盘形悬式绝缘子检测规程:DL/T 626 – 2015[S]. 北京:中国电力出版社,2016.

作者简介:

何 良(1987),工程师、硕士研究生,研究方向为输变电设备状态检测。

(收稿日期:2018 – 01 – 11)

大学出版社,2010:46 – 48.

[7] Lee B Y, Myung S H, Min S W. An Effective Modeling Method to Analyze Electric Field Around Transmission Lines and Substation Using a Generalized Finite Line Charge[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1143 – 1149.

作者简介:

刘守豹(1983),博士、工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。

(收稿日期:2017 – 11 – 05)

[11] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

作者简介:

董汉彬(1987),硕士、工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期:2018 – 01 – 08)

# 浅谈变电站 IED 数据在继电保护中的应用

姜 晨<sup>1</sup>, 纪礼君<sup>2</sup>

- (1. 国网上海市电力公司崇明供电公司, 上海 202150;
2. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200435)

**摘 要:**分析了智能变电站的 IED 装置特性,包括其通用的针对对象的建模方法和流程。概括总结出 IED 数据的应用情况、应用方法和应用过程并对其数据的应用情况进行了分类,包含利用 IED 中的算法和数据进行故障区域判别与故障定位、变电站事故自动分析。分析了特定 IED 装置的数据传递过程。最后,提出了以广域继电保护思想为基础,建立 IED 数据在线自适应调整和自动有效分析的数据处理方案,并对其发展做出了展望。

**关键词:**IED;故障区域判别;数据传递;广域继电保护;在线自适应

**中图分类号:**TM771   **文献标志码:**B   **文章编号:**1003-6954(2018)02-0076-06

## Overview of IED Data Application in Substation Relaying Protection

Jiang Chen<sup>1</sup>, Ji Lijun<sup>2</sup>

- (1. Chongming Power Supply Company of SMEPC of SGCC, Shanghai 202150, China;
2. Shibei Power Supply Company of SMEPC of SGCC, Shanghai 200435, China)

**Abstract:**The characteristics of IEDs in smart substation are analyzed, including its general object-oriented modeling methods and processes. The application of IED data is generally summarized and classified as well as the application method and process, which consists of carrying out faulty area identification, fault location and automatic analysis of substation events by using the algorithm and data in IEDs. Specific data transferring process of IED is also analyzed. In the end, on the basis of wide-area relaying protection, the IED data processing program with on-line adaptive adjustment and automatic analysis is proposed, and its future development is discussed.

**Key words:**IED; faulty area identification; data transferring; wide-area relaying protection; on-line adaptive adjustment

### 0 引 言

继电保护是保障大电网安全的第一道防线,而由于保护的误动、拒动以及电网的潮流转移等导致的连锁动作最终造成事故扩大也有发生。因此,在复杂电网环境下审视继电保护中存有的问题,研究出相应的快速识别故障隔离故障,简化保护方案是值得研究的。近年来,随着广域同步测量和智能变电站技术的不断成熟发展,各种智能电子设备也相应地安装到智能变电站中,这就为改善继电保护性能提供了良好的契机。

目前变电站内稳态、动态和暂态信息分别由测

控单元、相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)和故障录波装置、继电保护装置采集。这些装置在功能上存在交叉,因此在一定程度上也造成了不必要的成本增加和管理难度。文献[1]提出一种用于三态(稳态、动态、暂态)数据监控的新型多功能 IED 的实现方案,多功能 IED 通过信息共享和功能优化有效减少网络负担,提高信息利用率。然而,伴随这种多功能 IED 方案而来的又是对系统多种数据类型整合和实时分析的更高要求。由于多功能 IED 将多种功能集成,所以各个功能间的配合问题需要做出深入的研究。

由于 IED 装置数量种类众多,且大多来自不同厂家,有着不同的规格,IEC 61850 国际标准的颁布



切实地解决了此问题,实现了多种 IED 的互换性和一致性。IED 的功能有状态监测、故障检测、故障定位、故障诊断、信息交互以及开关操作控制。IED 的特点包括实现信息的完全交互:IED 之间以及 IED 与控制中心之间进行信息完全交互。信息交互不仅包括节点电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率、谐波、电压波动和闪络、开关位置信号、断路器失效信号、重合闸与录波信号,还包含保护与故障隔离的输出信号、网络重构与故障诊断、决策信号等。而所有这些信号都是以标准格式存储在 IED 中的数据形式。有效采集分析这些数据对提高继电保护性能具有不容忽视的意义。下面将从 IED 模型建立、继电保护算法分析、广域继电保护中 IED 数据传递与配合 3 个方面进行论述,分析各技术路线的研究重点和难点并给出建议,在此基础上进一步展望有效利用 IED 数据的方法。

## 1 IED 模型建模思想

### 1.1 基于 IEC 61850 标准的 IED 模型建立

文献[2-3]介绍了关于特定 IED 装置的建模方法和步骤。其中,基于 IEC 61850 标准的故障选线 IED 模型是将故障选线功能分解为 IEC 61850 定义的逻辑节点,对故障选线 IED 进行应用信息和基本功能的标识和划分,构建新型模型的基本框架。由于需要监测多条线路,检测量众多,所以为了避免数据流量较大、计算复杂的不利情况,考虑采用每条线路作为一个逻辑点再将线路信息汇总到选线算法模块,进而选出故障线路的方法。这样既避免了信息冗余,也使得数据传输能对应逻辑节点,提高了系统可靠性。类似地,借鉴 IEC 61850 功能分层结构、统一对象建模和抽象通信服务接口的特点,对广域电流差动保护智能电子设备进行建模。其中广域电流差动保护新逻辑节点的扩展是实现各 IED 互操作性的关键所在。图 1 是超高压线路保护装置对象的建模实例。

由图 1 可知,按照功能划分原则,将一个或几个性质相似的功能归到一个逻辑设备中,整个模型由几个逻辑设备组成。

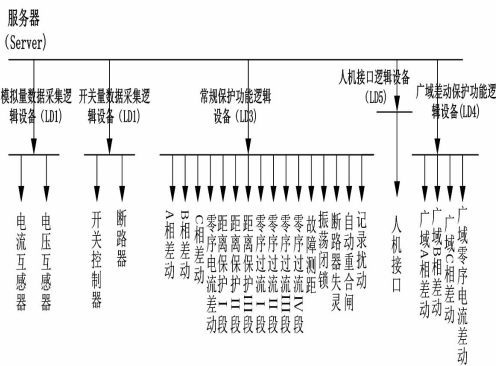


图 1 超高压线路保护的对象模型

### 1.2 功能闭锁 IED 模型建立

随着电力系统规模的不断壮大,IED 数量也相应增加,这带来了数量众多的 IED 数据需要分类并有效处理的问题,而一旦处理有误便会带来严重的影响。功能闭锁机制在避免因电力系统保护误动而导致事故方面具有重要作用。目前国内外的众多研究都只是针对利用 IED 来为整个电力系统服务,提高系统性能,而忽视了 IED 本身的研究。文献[4-5]提出设计数字化变电站运行功能闭锁 IED,以两个设备为例分成正常、预留和释放 3 种控制模式,将相关开关的预留闭锁信息通过通信信道发送给对应的 IED,有效避免了某一个 IED 动作时因为包含其他一个或几个 IED 相关动作信息而导致相应的 IED 发生不正确的动作,实现资源的配置和设备的分布应用,增强了系统运行的灵活和稳定。图 2 阐释了此种功能闭锁 IED 的思想流程。

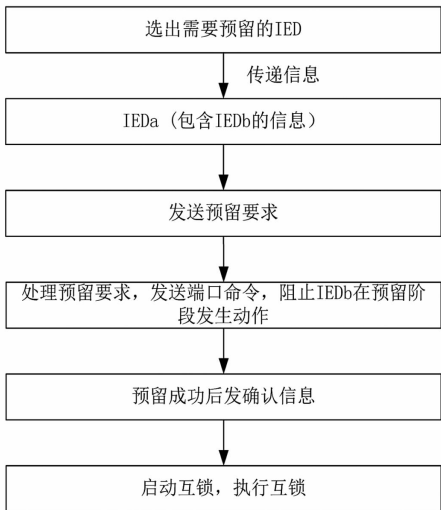


图 2 IED 功能闭锁信息流程

由图 2 可知,此预留闭锁信息的传递过程中,确认信息的成功发送很关键,只有成功预留了 IEDb,才不会发生 IEDb 的误动,有效避免因数据流量大

而导致保护 IED 误动。

### 1.3 基于 IEC 61850 的变电站后备 IED 设计

针对保护 IED 装置本身发生故障的情况,文献[6]提出后备 IED 的概念。传统变电站系统只使用本地数据和时间曲线处理保护与协调,而 IEC 61850 的保护 IED 使用建立在以太网基础上的通信网络,采集其他 IED 的数据,最大化实现广域范围内的数据共享,提高保护与协调的有效性。后备 IED 包含变电站的每一种保护元素,由逻辑节点解析文件决定是否使能后备 IED,根据具体实时的运行情况自动激活后备 IED 而不是由厂家整定。后备 IED 有利于减少整体后备 IED 族的数目,也可以为故障的 IED 提供后备。

后备 IED 建立的要求也十分严格:使用 SCD 文件构造 SCL 基础上的保护 IED;避免物理重启,保证持续运行;储存变电站中的继电保护装置和逻辑节点的所有信息和功能。其中后备 IED 的运行也较为复杂,具体为:后备 IED 启动一个主功能路径监测来自变电站的文件传输并等待后备命令;接收到含有逻辑名的文件之前,后备 IED 一直处于在线状态但并不执行任何动作;接收到文件后,解析文件获取信息并匹配数据,执行对故障 IED 的后备。故障 IED 修复后,站控层发送复位信息,此时后备 IED 销毁所有路径,但仍保留主路径,删除所有之前后备动作的相关信息;复位以后,后备 IED 回到初始状态,监测并等待后备信息<sup>[6]</sup>。这种后备 IED 的优点在于不需要物理重启,有效减少了保护失效的时间,但某种程度上会影响系统的实时动态性能和可靠性。所以可以考虑刷新系统,定期重启后备 IED,避免由整定和算法变化产生的不稳定情况。

## 2 IED 中的保护配合与算法应用

### 2.1 分区域思想与聚类算法

文献[7]提出利用广域状态信息进行模糊 C 均值聚类的方法实行故障区域的判别,利用线路智能电子装置(IED)采集相应的保护动作信息、断路器状态信息等,并以网络各个线路 IED 状态信息作为聚类的对象,定义了电网关联 IED 的含义,将故障元件 IED 归为关联的一类,同方向区外故障 IED 归类关联的另一类。文献[8]提出将广域电网划分为类蜂窝结构,实现分区域系统的继电保护,更采用广域继电保护分布集中式系统结构适应区域电网。系统中

IED 主要完成就地电流互感器和电压互感器测量信息及断路器状态信息的采集功能、断路器操作的执行功能、常规主保护功能等。构成了基于信息拓扑树搜索的保护判据,保护对象为树根,其他相邻元件为树枝,以树枝 IED 为节点建立了多层信息域。

### 2.2 IED 方向比较原理

文献[9]提出了一种基于方向比较原理的广域继电保护算法,建立厂站内一次设备和厂站出线对应的一次设备、方向元件关联矩阵,并据此确定具体的故障元件。文献[10]提出基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法。根据 IED 的安装位置,形成了包含有母线及线路在内的 IED 关联域。系统发生故障后,通过 IED 在关联域内对故障信息的采集和共享,定位故障,并按照预定的 IED 动作策略迅速切除故障。综合比较文献[7-10]的算法思想,可得到聚类算法适应性强,但得依赖同步测量工具;负序功率方向比较原理仅适用于非对称故障情况。因此,可以采用将两种思想融合的改进算法,即联合负序功率方向比较与聚类的新继电保护算法,这样不仅可以对上述的算法进行优势互补,还可以通过增大系统的信息冗余提高系统故障判别的容错性。图 3 阐释的是改进算法的流程图。

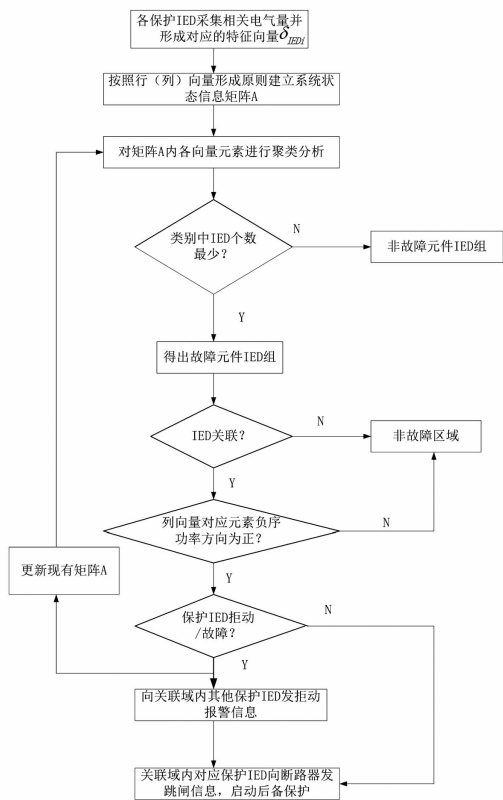


图 3 改进法的故障判别与后备保护流程

### 3 广域继电保护 IED 数据传递与配合

#### 3.1 IED 数据提取与传递

变电站中 IED 的安装改变了保护工程的现状, IED 设备不仅记录大量模拟量和数字量,同时也经由通信系统将数据传送到控制中心。由 IED 产生的动作数据能够分析系统中的故障部分,由非动作数据可以分析出故障的原因所在<sup>[11]</sup>。很明显,IED 的数据具有重要的意义,然而,伴随着 IED 存储数据和传递的过程会积累大量的不必要数据。因此,要求系统能够自动辨识所有 IED 中的信息,提取出高质量的有效信息。图 4 给出了 IED 数据的提取过程。

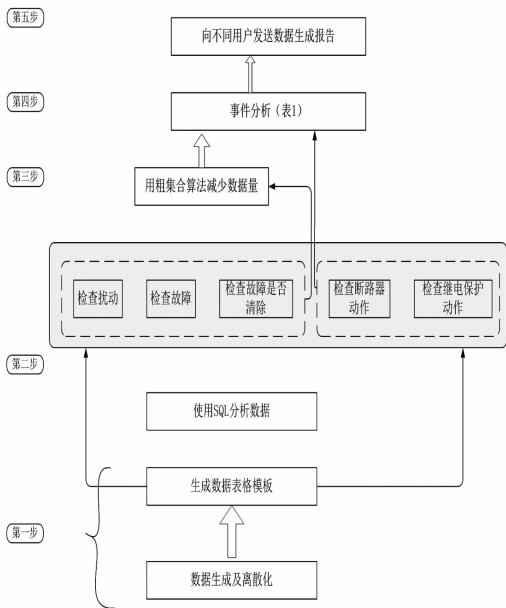


图 4 IED 数据生成提取五步法

#### 3.2 事故分析中的 IED 数据应用

IED 的互换性问题解决之后为系统大流量的数据共享提供了方便,其中利用 IED 数据对变电站进行事故分析具有切实的重要作用。通过分析采集到的 IED 数据,能够得到系统异常的原因,快速恢复供电,阻止事故扩大,保证设备高效率运行;做出基础设施替换维修的决策,延长设备使用寿命,提高系统可靠性。将 IED 数据进行整理和分析可得到事件的分类情况,如表 1 所示。

表 1 变电站事故分析表

| 扰动 | 故障 | 继电保护动作 | 断路器动作 | 故障清除 | 标注                |
|----|----|--------|-------|------|-------------------|
| 否  | 否  | 否      | 否     | ×    | 正常状态              |
| 否  | 否  | 否      | 是     | ×    | 断路器受远端控制跳闸,维修     |
| 否  | 否  | 是      | 是     | ×    | 保护系统故障            |
| 是  | 是  | 是      | 是     | ×    | 保护按预定动作,故障隔离      |
| 是  | 是  | 否      | 否     | 否    | 保护失效              |
| 是  | 是  | 否      | 是     | 否    | 保护失效,断路器直接受远端控制跳闸 |
| 是  | 是  | 是      | 否     | 否    | 断路器失效,后备断路器动作启动   |
| 是  | 否  | 是      | 是     | ×    | 保护误动作             |
| 是  | 否  | 否      | 否     | 是    | 系统自愈              |

#### 3.3 故障隔离与供电恢复 IED 的协调与配合

文献[12]研究了 IED 中不同原理的保护之间相互协调配合问题,指出通过将传统的馈线终端单元换成智能电子设备(IED),利用 IED 的数据信息交互实现网络的故障隔离和供电恢复。以图 5 为例详细介绍 IED 的保护配合。

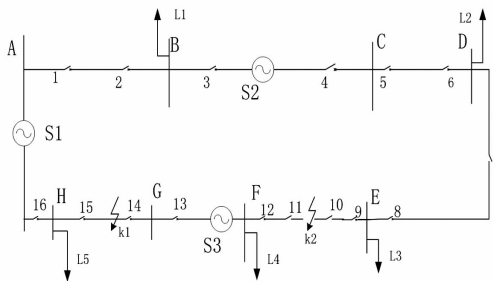


图 5 保护 IED 配合结构

由图 5 可知,当 k1 处发生永久性故障时,IED15 打开断路器 15。同时,IED15 向 IED14 发送开、关命令来控制断路器 14 的操作达到隔离故障的效果。此时,EF 部分是非故障区域,需要恢复供电。IED13 和 IED9 ~ IED12 向系统侧的 IED7 发送恢复电力供应的请求。IED7 合上回路开关 7,此时 EF 部分由 S3 供电。当 S1 发生故障,IED14 ~ IED16 发送恢复供电请求给 IED13,IED13 合上开关,此时 IED14 ~ IED16 由 S3 供电。同样地,IED2 和 IED3 向 IED4 发送恢复供电请求,此时 IED2 ~ IED3 由 S2 供电。当 k2 处发生故障,IED10 和 IED11 预测到故障点位于节点 10 和 11 之间,但节点 10 和 11 之间的开关仅是分段开关,无法切断故障电流。IED11 向

IED12 发送直接跳闸信号, IED12 动作于断路器 12 跳开故障。如果 IED11 检测到馈线上没有电压, 打开分段开关 11, 经过一定延时, 断路器 12 重新合闸, 接着合上分段开关 11。如果故障是暂态故障, 系统恢复到正常工作。如果是永久性故障, IED11 重新监测到故障电流, 再次向 IED12 发送直接跳闸命令, 断开断路器 12。当 IED11 检测到馈线上没有电压, 打开分段开关 11 和分段开关 10, 当 IED11 和 IED10 检测到分段开关 11 和分段开关 10 可靠打开以后, 向 IED12 发送重合闸命令, 断路器重新合上。至此, 节点 12 和节点 11 之间恢复供电。同样地, IED10 向 IED7 发送恢复供电请求, 合上开关 7, 此时由 S2 供电, 节点 7 和节点 10 之间供电恢复。

这种 IED 之间的相互动态配合与协调, 能够及时隔离故障区域, 但每一次动作之后 IED 之间的相互上下级关系会发生变化, 这是在实际应用中需要注意的地方。

关于故障诊断方面, 文献[13-14]提出同时利用不同种类的 IED(DPR、DFR、PMU 等)并嵌入不同的故障定位算法, 通过增加判据, 增强故障定位的快速性, 同时提高故障诊断的容错能力。文献[15-16]在广域继电保护的基础上分析了 IED 数据使用的注意事项, 指出了应当将 IED 较大的数据信息视为研究重点, 并不是数据信息越多越好, 必须提取有用信息, 减少不必要的干扰信息甚至是错误信息。因此, 针对越来越多的 IED 安装于智能变电站中, 有必要研究如何充分有效地利用 IED 数据, 同时精简 IED 装置数量, 实现 IED 数据的在线自适应调整和最有效分析。

## 4 结 语

分析了 IED 数据的产生及提取分析过程, 概括总结出 IED 数据的应用情况、应用方法和应用过程并对其数据的应用情况进行了相关分类。通过具体的实例阐释了利用 IED 中的算法和数据进行故障区域判别与故障定位以及 IED 在广域继电保护领域的配合问题。对具体应用情况指出了研究内容的难点并给出了一定的建议。

### 参考文献

[1] 万博, 苏瑞. 用于三态监控的多功能 IED 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 111-115.

[2] 贾清泉, 石磊磊, 田杰, 等. 数字化变电站中故障选线智能电子设备模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 63-66.

[3] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 遵循 IEC 61850 标准的广域电流差动保护 IED[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 53-57.

[4] Zhaojie Sun, Bin Duan. The Design of Function Block in IED with Digital Substation Operation[C]//IEEE PES ISGT, ASIA; 2012.

[5] Lin Zhu, Dongyuan Shi, Xianzhong Duan, et al. Standard Function Blocks for Flexible IED in IEC 61850-based Substation Automtion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1101-1109.

[6] Tarlochan S. Sidhu, Il-Hyung Lim. Design of a Backup IED for IEC 61850-based Substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2048-2055.

[7] 吴浩, 李群湛, 易东. 基于广域状态信息和模糊 C 均值聚类的电网故障区域判别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 39-45.

[8] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.

[9] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 87-93.

[10] 金恩淑, 汪有成, 王红艳, 等. 基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 1-6.

[11] Mini. S Thomas, D. P. Kothari, Anupama Prakash. Automated Substation Event Analysis Using IED Data[C]//Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA; 2012.

[12] R. Amarnath, N. Kalaivani, V. Priyanka, et al. Prevention of Power Blackout and Power Theft using IED[C]//Global Humanitarian Technology Conference, India; 2013.

[13] Papiya Dutta, Yufan Guan, M. Kezunovicet. Use of Substation IED Data for Improved Alarm Processing and Fault Location[C]//Power Symposium, NAPS 08. 40th North American; 2008.

[14] M. Knezev, M. Knezev. Fault Location Using Sparse IED Recordings[C]//Intelligent Systems Applications to Power Systems, National Sun Yat-sen University, Tai Wan; 2007.

[15] Weeraya Siriawatworasakul, Naebboon Hoongcareon. Conceptual Design of Wide Area Protection in Transmission System[C]//Electrical Engineering/Electronics, Com-

puter, Telecommunica – tions and Information Technology, 2013 IEEE 10th International Conference, Krabi, Thailand; 2013.

[16] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 125 – 129.

[17] Paolo Castello, Paolo Ferrari, Alessandra Flammmini, et al. A New IED with PMU Functionalities for Electrical Substations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(12): 3209 – 3217.

[18] Liu Yiqing, GAO Houlei, Wei Xin, et al. Study on New

Type of IED with Integrated Functions in Intelligent Substation[C]//The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China; 2011.

作者简介:  
姜 晨(1991), 硕士研究生, 从事变电(配电)运检工作;  
纪礼君(1989), 硕士研究生, 从事变电(配电)运检工作。

(收稿日期: 2017 – 11 – 09)

=====

(上接第 62 页)

参考文献

4 结 语

综上所述, 将四川某 500 kV 变电站的主变压器分别简化为体声源、面声源和点声源, 分析不同简化声源随距离的衰减特性, 得出如下结论:

1) 在不考虑声波之间的相位影响, 仅考虑声波的能量叠加时, 采用 Cadna/A 软件和噪声导则推荐模式的计算结果一致。

2) 距体源、面源、点源相同距离处的噪声声压级差异较小, 最大差值仅为 0.9 dB(A), 噪声接受点的声压级大小主要取决于各声源的总声功率级大小。

3) 在近声场( $L \leq 5$  m) 面源特征较明显, 体源噪声衰减最慢, 面源其次, 点源衰减较快,  $L$  相同时, 声压级从大到小依次为体源、面源、点源; 而在远声场( $L \geq 35$  m), 各声源衰减规律一致, 声源的总声功率级起决定性因素,  $L$  相同时, 声压级从大到小依次为点源、面源、体源。

4) 体源的 5 个组成面源中, 垂直面源随距离衰减较快, 平行于地面的面源衰减较慢, 总声功率级相同的两个垂直面源, 随着  $L$  增大,  $\Delta L$  可逐渐忽略不计, 在噪声接受点的噪声声压级趋于相同, 平行于噪声接受点与主变压器中心连线的面源, 点源特征较明显, 在远声场( $L \geq 35$  m) 的噪声声压级最小。

由于 Cadna/A 软件在模拟过程中未考虑声波之间的相位干涉影响, 故软件预测值与变电站实际运行过程中的噪声监测值可能存在一定的差异, 在下一阶段应结合变电站噪声监测结果分析其差异性, 并进一步探讨预测优化方案。

[1] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[2] 陈俩, 陈双, 许超等. 500 kV 变电站噪声特性及控制[J]. 四川环境, 2015, 34(2): 80 – 84.

[3] 孙宇晗, 莫娟, 曹枚根, 等. 基于噪声控制的变电站平面布置优化设计[J]. 电力建设, 2013, 34(12): 18 – 23.

[4] 林旗力, 唐蕾, 施华彪, 等. 500 kV 变电站噪声控制措施比较研究[J]. 电力科技与环保, 2013, 29(6): 4 – 6.

[5] 齐飞, 余寒, 华伟. Cadna/A 在江苏 500 kV 变电站噪声环境预测中的应用[J]. 科技创新与应用, 2015(4): 6 – 7.

[6] 黎文辉. 高压变电站噪声污染预测与防治技术研究[D]. 广东: 广东工业大学环境科学与工程学院, 2015.

[7] 阮学云, 魏浩征, 李志远, 等. 户外噪声相干预测模型及其工程应用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1877 – 1884.

作者简介:  
严 青(1988), 硕士、工程师, 研究方向为环境噪声防治;  
佟如意(1981), 硕士、高级会计师, 研究方向为公司财务管理、运营监控管理;  
何清怀(1966), 本科、教授级高工, 研究方向为输变电和电厂环境污染防治;

陈 笠(1985), 硕士、工程师, 研究方向为电厂污染控制。

(收稿日期: 2017 – 10 – 12)

# 智能变电站顺控技术工程实践

艾飞<sup>1</sup>,茅俊<sup>1</sup>,丁敬<sup>1</sup>,黄继荣<sup>1</sup>,张新来<sup>2</sup>,徐通<sup>1</sup>,胡冬良<sup>1</sup>  
(1. 国网杭州供电公司,浙江 杭州 310000 ;  
2. 邯郸慧龙电力设计研究有限公司,河北 邯郸 056000)

**摘要:**智能变电站是智能电网的重要基础和支撑,顺序控制是智能变电站的基本功能要求。由于智能变电站技术仍处于发展阶段,当前使用顺控技术的变电站较少,实际运行管理经验较欠缺。以国网杭州供电公司 220 kV 彩虹智能变电站为例,介绍了智能变电站对顺控技术的要求,分析了监控后台、顺控系统、操作票系统、五防系统之间的关系,并以实际操作演示了顺控操作执行过程,最后指出了彩虹变电站顺控系统建设方面的不足,并提出了相应的建议。对顺控技术的分析与实践对于智能变电站顺控系统建设有一定的借鉴意义,并可以为运行值班人员对智能变电站设备的顺控操作提供一定参考。

**关键词:**智能变电站;顺序控制;工程实践;操作票

**中图分类号:**TM761 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)02-0082-04

## Project Practice of Sequential Control for 220 kV Caihong Smart Substation

Ai Fei<sup>1</sup>, Mao Jun<sup>1</sup>, Ding Jing<sup>1</sup>, Huang Jirong<sup>1</sup>, Zhang Xinlai<sup>2</sup>, Xu Tong<sup>1</sup>, Hu Dongliang<sup>1</sup>  
(1. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;  
2. Handan Huilong Electric Power Design & Research Co., Ltd., Handan 056000, Hebei, China)

**Abstract:**The construction of smart substation has an important significance for the foundation of smart grid, and the sequential control is one of basic requirements for smart substation. The quantity of smart substations is low at present, and the sequential control technique is not widely used, so there lacks experiences in operation and management of sequential control for smart substation. Taking 220 kV Caihong smart substation for example, the requirements for sequential control technique in smart substation are introduced, and the relationship among monitoring system, sequential control system, operation order and mis-operation prevention system is analyzed. The process of sequential control is also demonstrated by practical operations. The deficiency of sequential control system in 220 kV Caihong smart substation is pointed out, and the corresponding suggestions are put forward. The analysis and practice of sequential control technique for Caihong smart substation provide a reference for the construction and manipulation of smart substations.

**Key words:**smart substation; sequential control; project practice; operation order

## 0 引言

应用在变电站设备的运行操作中的顺序控制是指由顺序控制服务根据操作票对变电站设备进行系列化操作,依据设备的执行结果信息的变化来判断每步操作是否到位,确认到位后自动或半自动执行下一指令,直至执行完成所有的指令<sup>[1]</sup>。

常规变电站站控层多采用 IEC103 规约,而保护

装置站控层通信采用私有规约,难以实现远方切换定值区、远方投退功能软压板、程序化控制等功能。其倒闸操作虽然已经实现了自动化远程操作,但仍需操作人员参与到每一项操作中,通过设备反馈的状态信息来判断操作是否正确,这种操作模式消耗大量人力和时间。智能变电站是建设坚强智能电网的重要组成部分,根据国网公司规划,智能变电站已全面开展建设<sup>[2-3]</sup>。智能变电站最基本的智能控制包括顺序操作、智能操作票、图像联动等。而顺序控

制是变电站智能控制的基础。采用自动化系统实现倒闸操作的顺序控制,通过程序、逻辑来自动判断设备运行状态的变化,避免了操作人员的来回检查,提高了生产效率和供电可靠性,因此近年来智能变电站顺控技术得到了较大发展。

## 1 对顺序控制的要求

### 1.1 总体要求<sup>[1]</sup>

- 1) 变电站侧宜具备完整顺序控制功能,并支持主站(即调度端或集控中心)顺序控制。
- 2) 远方顺序控制操作时操作票宜配置在 I 区数据通信网关机,站内顺序控制操作时操作票宜配置在监控主机中维护。
- 3) 顺序控制需经过五防逻辑校核,五防功能应由监控系统实现。
- 4) 顺序控制需具备操作合理性的自动判断功能,且每步操作步骤需有一定的时间间隔,具备人工干涉的功能。顺序控制需提供控制急停及暂停功能。
- 5) 顺序控制宜具备与智能辅助控制系统接口,以支持与图像监控系统联动。

### 1.2 对设备的要求

- 1) 实现顺控操作的变电站设备应具备完善的防误闭锁功能。
- 2) 实现顺控的变电站保护设备应具备远方投退软压板及远方切换定值区功能。
- 3) 实现顺控操作的封闭式电气设备(无法进行直接验电),其线路出口应安装运行稳定可靠的带电显示装置,反映线路带电情况并具备相关遥信功能。
- 4) 实现顺控操作的变电站母联断路器操作电源应具备遥控操作功能。

## 2 彩虹智能变电站概况

彩虹智能变电站<sup>[4]</sup>(以下简称彩虹变)工程位于杭州市滨江区,目前工程规模:主变压器为 2 × 240 MVA;220 kV 系统采用户内 GIS,双母接线,设专用母联,出线 6 回;110 kV 采用户内 GIS,单母分段接线,出线 6 回;35 kV 采用常规户内开关柜设备,出线 5 回。主变压器配置 2 套电气量保护和 1 套非电量保护。220 kV 母线配置 2 套母差保护,

220 kV 线路配置 2 套线路保护,220 kV 母联配置 2 套母联保护。110 kV 母线配置 1 套母差保护,110 kV 线路配置 1 套线路保护,110 kV 母分配置 1 套母分保护,110 kV 侧还配置备自投 1 套。35 kV 线路、母分各配置 1 套保测一体化装置。如此大型的变电站内,断路器、隔离开关、软压板、空气开关等设备数量极大,按常规逐步操作方式,在操作每个设备时,还要求操作人和监护人输入设备代码、操作密码进行验证,耗费人力和时间巨大,且极易出错。

## 3 彩虹变顺控系统介绍

彩虹变测控装置为南瑞继保产品,保护装置为南瑞继保和四方继保产品,监控后台为南瑞公司 PCS-9700 产品<sup>[5]</sup>。全站站控层采用 IEC 61850 规约统一建模、统一配置实现智能设备互操作,采用一体化信息平台技术,支持电网实时自动控制等高级功能,全站网络按分层分布式来实现站内智能设备间的信息共享和互操作。彩虹变网络在逻辑上分为站控层、间隔层和过程层 3 层<sup>[6]</sup>。在变电站层和间隔层之间的网络通信采用抽象通信服务接口映射到制造报文规范(MMS),站控层设备与间隔层设备间采用双星型拓扑结构以太网相连,即所有测控装置、继电保护装置及监控主机、故障录波器、网络分析仪、对时系统等,均接至 MMS 网。彩虹变站控层网络结构如图 1 所示。

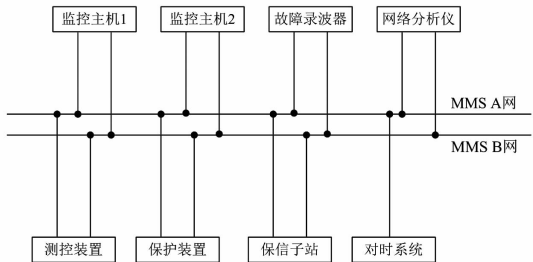


图 1 彩虹变站控层网络结构

目前,彩虹变电站侧具备顺序控制功能,操作中心和调控中心不具备该功能。监控系统集成了顺控模块,并嵌入了逻辑闭锁软件,结合间隔层测控装置的防误联锁模块,对电气设备的操作进行全程、实时的判别。在投产调试阶段已对该监控系统防误和测控装置中防误进行了验收,站内五防逻辑与顺序控制功能的交互是系统内部的交互。

顺控操作票系统分为不可修改式、可修改式和

人工逐步输入方式。不可修改式适用于典型操作,操作票一经试验、审批合格并存入系统后,操作人员无权修改,确保了操作的正确性,但缺乏灵活性。可修改式方便人工进行一定的修改、调整,具有一定的灵活性,但需管理好修改权限。人工逐步输入方式可以灵活适应一些特殊操作,但也具有一定的风险。根据“安全高于一切”的理念,彩虹变顺控典型操作票生成方式选用不可修改式。

彩虹变 35 kV 开关柜内隔离开关、接地开关以及主变压器 35 kV 侧接地刀闸由于设备原因,目前无法顺控。主变压器、消弧线圈分接头调整操作直接遥控进行,除 220 kV 母联开关的控制电源小开关外的其余“控制操作电源小开关”的操作均未列入顺控操作范围。主变压器的停复役操作是多间隔操作,已拆分为主变压器 220 kV 侧和 110 kV 侧单间隔顺序控制执行。

根据文献[1]中第 5.1.1 条:“顺序控制应能完成相关设备运行、热备用、冷备用三种状态间的相互转换”的要求,彩虹变目前可实现单间隔的运行态、热备用态、冷备用态的相互转换(运行态与热备用态之间的转换只是单步操作,彩虹变顺控不实施两态之间的转换)。对于开关检修态和线路检修态,从设备情况来看,也可以实现状态的转换,但根据文献[1]中第 5.1.4 条:“断开或投入操作电源开关等操作不宜列入顺序控制范围”的要求,故彩虹变未将开关检修态和线路检修态列入顺控操作。在保护和自动装置方面,彩虹变可实现跳闸态和信号态之间的转换。具体地讲,220 kV 设备顺控“态”有正母运行态、副母运行态、正母热备用态、副母热备用态、冷备用态。110 kV 设备顺控“态”有运行态、热备用态、冷备用态。220 kV 和 110 kV 保护及自动化设备“态”有跳闸态和信号态。为方便后面实例理解,对 220 kV 线路(主变压器 220 kV 侧)的相关“态”作一定的阐述<sup>[7]</sup>。

副母运行态的定义:

- 1) 开关→合位
- 2) 正母隔离开关→分位
- 3) 副母隔离开关→合位
- 4) 线路闸刀→合位
- 5) 开关母线侧接地刀闸→分位
- 6) 开关线路侧接地刀闸→分位
- 7) 线路接地刀闸→分位

- 8) 线路压变二次交流电压开关→接通
  - 9) 第一路控制直流电源小开关→接通
  - 10) 第二路控制直流电源小开关→接通
- 当间隔设备满足以上状态要求时,顺控系统就认为其处于副母运行态。

冷备用态的定义:

- 1) 开关→分位
  - 2) 正母隔离开关→分位
  - 3) 副母隔离开关→分位
  - 4) 线路隔离开关→分位
  - 5) 开关母线侧接地刀闸→分位
  - 6) 开关线路侧接地刀闸→分位
  - 7) 线路接地刀闸→分位
  - 8) 线路压变二次交流电压开关→切断
  - 9) 第一路控制直流电源小开关→接通
  - 10) 第二路控制直流电源小开关→接通
- 当间隔设备满足以上状态要求时,顺控系统就认为其处于冷备用态。

在顺序控制的实现方式方面,彩虹变采用了集中式顺控实施方式,在发起顺控操作指令时,站端监控主机、通信网关机将操作票解析分解成单步操作指令,并根据操作顺序依次下发给测控装置执行,操作过程中的自动控制、操作条件判别和各类遥信、遥测的数据交换,都在监控主机完成。

## 4 彩虹变顺控实例

以较复杂的单间隔顺控操作为例,来说明彩虹变顺控操作的逐步实现过程。彩虹变 220 kV 线路顺控状态转换如图 2 所示。

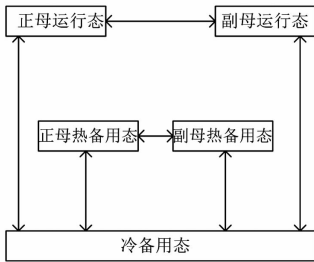


图 2 彩虹变 220 kV 线路顺控状态转换  
操作任务:XX 线由副母运行改冷备用  
操作步骤如下:

- 1) 检查监控后台运行正常,在顺控界面图 2 中“副母运行态”点亮,表示 XX 线初始状态为副母运



行。点击“冷备用态”，此时会弹出“输入操作人密码”对话框。

2)在“输入操作人密码”对话框中输入身份验证,点击确认,若密码正确,会弹出“顺控”对话框,如图 3 所示,框内任务列表显示了操作任务,核对任务正确后,点击“调取”按钮,将顺控操作票从操作票数据库存中调出,如图 4 所示。

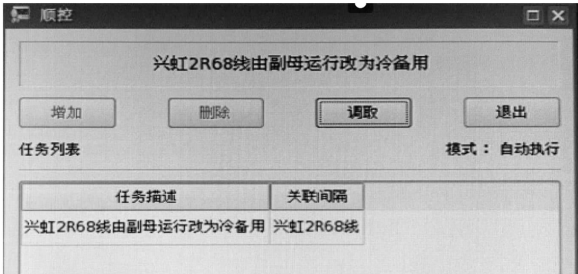


图 3 彩虹变顺控对话框

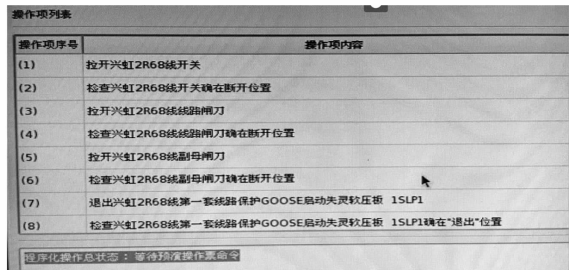


图 4 彩虹变顺控操作票

3)此时图 3 中的“调取”按钮变为“预演”按钮,点击“预演”按钮,程序开始模拟预演,预演过程中每一操作项都经过了五防判断,顺控界面设备状态跟随“预演”的进度实时变化,预演成功结束时图 1 中的“冷备用态”点亮,“顺控”框弹出“确认”对话框。如预演失败,预演程序会提示说明失败原因。

4)预演成功点击“顺控”框弹出的“确认”后,图 3 中“调取”位置的按钮就变为“执行”按钮,点击“执行”按钮,程序开始按照顺序执行每一步操作及设备状态的检查。操作过程中,对于一次设备,采用双辅助接点遥信信号判断设备状态,对于软压板等数字信息则通过装置的信息回传来判断。如因各方面原因(设备、通信等)导致程序无法执行当前操作步骤或反馈条件不满足状态判断条件的情况时,程序经延时执行超时告警信号,并自动暂停操作,提示操作人员核对状态。若此时相应问题得到了解决(设备、通信等),在顺控界面点击“继续”按钮,程序将继续执行后续操作步骤。操作中每一步骤都有一定的时间间隔,当操作至“切断 XX 线线路压变二次电压小开关”步骤时,顺控程序自动暂停,并跳出人

工操作提示,此时操作人员赴现场操作完 XX 线线路压变二次电压小空开,再返回顺控界面,点击“继续”按钮,顺控程序继续执行后面的操作步骤。除了上述人工干预功能外,顺控画面还提供“急停”和“暂停”功能按钮,对误操作也提供了一定程度的挽救措施。

### 5 彩虹变顺控方案的不足与建议

1)顺序控制功能未与视频图像监控系统联动,顺控过程一经开始,操作人员只能通过遥信等信息查看设备状态,建议至少在一次设备区安装图像联动系统<sup>[8]</sup>,便于操作人员在顺控执行的过程中,通过视频画面直观地观察到操作过程中设备指示的变化以及操作结果等,也便于对异常状态随时进行人工干预。

2)顺控操作票为不可修改式,遇有特殊操作时必须借助常规操作票进行常规操作,建议完善顺控票编制和生成系统。

3)顺控中“态”的定义没有涉及到软压板,这样的定义不完整,但如果全部参与判断,那么就对顺控“态”的判断增加了更多的条件。若任一条件不满足,就对应不到相应的“态”,程序无法识别设备状态,设备可顺控率降低。目前还没有“态”定义的相关标准,建议加快此项标准制定。

4)对于操作后软压板状态的判断,程序只判断最终状态是需求状态就认为操作正确,假如操作前软压板就是需求状态,顺控程序照样可以进行,所以程序是否真正执行难以判断,目前只能加大操作人员的工作量,在操作前对于需要操作的软压板的原始状态进行核对。

5)顺控过程中的人工干预操作部分,程序尚不能对所有人工操作做出识别。对于将信号、状态接入监控系统的人工操作,在程序判断出该步操作结束、位置正确后,操作人员只要点击“继续”按钮即可进行剩余顺控操作,但如果位置或状态不正确,顺控将无法进行下去。而对于一些信号、状态未接入监控系统的人工操作,程序对操作结果不加判别,操作人员只需点击“继续”按钮即可进行剩余顺控操作,有一定的安全风险。建议人工操作结束后,以对话框的形式确认该步操作结束,并再次进行身份验

(下转第 89 页)

# 电桥型绝缘油介质损耗测试仪的校验方法研究

胡仕红<sup>1</sup>, 杨 健<sup>2</sup>

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;  
2. 神华四川能源有限公司江油发电厂, 四川 江油 621700)

**摘 要:**绝缘油介质损耗是电力系统开展绝缘油质量监督的一项重要指标。电力系统使用的绝缘油介质损耗测试仪大部分采用西林电桥的原理制成。由于目前没有标准方法和标准物质对电桥型绝缘油介质损耗测试仪的准确性进行校验,导致使用准确性不满足要求的仪器进行测试的情况时有发生,测量结果的准确性也无法保证。为解决该问题,研制了一种绝缘油介质损耗校验装置作为标准物质,通过间接法研究了电桥型绝缘油介质损耗测试仪的校验方法。最后结合实例对两种典型的电桥型绝缘油介质损耗测试仪进行校验,结果表明测量值与示值一致,从而保证了绝缘油介质损耗测试数据的准确性。

**关键词:**绝缘油;西林电桥;介质损耗测试仪;校验

**中图分类号:**TM21 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)02-0086-04

## Study on Calibration Method of Electric Bridge Insulating Oil Dielectric Loss Tester

Hu Shihong<sup>1</sup>, Yang Jian<sup>2</sup>

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. Jiangyou Power Plant of Shenhua Sichuan Energy Co., Ltd., Jiangyou 621700, Sichuan, China)

**Abstract:**The dielectric loss of insulating oil is an important index for the quality supervision of power system. The insulating oil dielectric loss tester used in power system is mainly made of Schering bridge. Because there is no standard method to check the accuracy of insulating oil dielectric loss tester, it results in the instruments whose accuracy does not meet the requirements to carry out the test, and the accuracy of measurement results also cannot be guaranteed. In order to solve the problem, an insulating oil dielectric loss calibration device is developed as the standard material, and the calibration method for electric bridge insulating oil dielectric loss tester is studied through indirect method. Finally combining with the calibration examples of two typical electric bridge insulating oil dielectric loss testers, the results show that the measured value is consistent with the indicating value so as to ensure the accuracy of insulating oil dielectric loss test data.

**Key words:**insulating oil; Schering bridge; dielectric loss tester; calibration

### 0 引 言

绝缘油介质损耗是电力系统开展绝缘油质量监督的一项重要指标。目前大部份绝缘油介质损耗测试仪采用西林电桥的原理制成。在实际使用过程中,由于缺乏标准方法和标准物质对电桥型绝缘油介质损耗测试仪的测量准确性进行校验,导致使用准确性不满足要求的仪器进行测试的情况时有发生,测量结果的准确性无法保证。因此,为提高绝缘

油介质损耗测试数据的准确性和可靠性,保证电力系统充油设备的安全稳定运行,在实验室采用有效的方法对电桥型绝缘油介质损耗测试仪(包括新仪器的到货验收,使用中仪器的质量控制)的准确性进行校验是当前急需解决的问题。

### 1 电桥型绝缘油介质损耗测试仪的基本原理

电桥型绝缘油介质损耗测试仪的测试原理如图 1 所示,通过调节  $R_3$ 、 $C_4$  使电桥平衡,此时 a、b 两点

电压相等,即  $R_3$ 、 $C_4$  两端电压相等。则

$$R_x = \frac{C_4}{C_n} R_3 \tag{1}$$

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} C_n \tag{2}$$

按串联、并联模型的介损定义:  $\text{tg}\delta = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4$ , 由于  $R_4$  是固定的, 通过  $R_3$ 、 $R_4$ 、 $C_n$  可以计算被测样品的电容值  $C_x$ 。

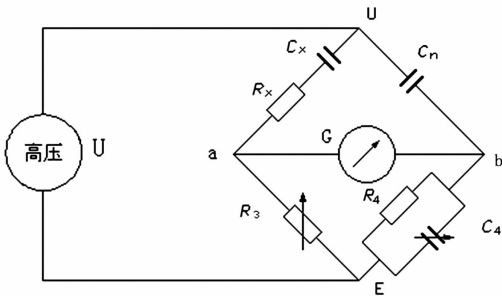


图 1 电桥型绝缘油介质损耗测试仪的测试原理

## 2 绝缘油介质损耗校验装置的研制

为了对电桥型绝缘油介质损耗测试仪的测量准确性进行校验,国网四川省电力公司电力科学研究所和牡丹江市电测仪器厂共同研制了 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置,该装置外观如图 2 所示。



图 2 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置的外观

该装置的使用原理是:先在电路中接入一个已知介质损耗值的样品作为标准物质,即绝缘油介质损耗校验装置,该绝缘油介质损耗校验装置的准确性可以通过国家计量机构校准;然后通过间接法,采用绝缘油介质损耗测试仪,测试绝缘油介质损耗校验装置,得到一个实际的介质损耗测试结果,同时根据公式计算绝缘油介质损耗校验装置的电容  $C_x$  值。如果绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值与绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值一致,同时计算出的绝缘油介质损耗校验装置电容值  $C_x$  与 100

pF  $\pm 1$  pF 一致,则绝缘油介质损耗测试仪的准确性满足要求。

## 3 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪的校验

### 3.1 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪电桥的读数说明

QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪(上海沪光仪器厂)是一种典型的电桥型绝缘油介质损耗测试仪,其外观如图 3 所示。



图 3 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪外观

QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪的电桥为了从  $C_4$  刻度盘上直接读出损耗值  $\text{tg}\delta$ , 取电阻  $R_4$  的阻值为角频率  $2\pi f$  ( $f=50\text{ Hz}$ ) 的若干倍, 当  $R_4 = \frac{10}{\pi} \text{ k}\Omega$  时, 则  $\text{tg}\delta = C_4$ , 当  $R_4 = \frac{1}{\pi} \text{ k}\Omega$  时, 则  $\text{tg}\delta = 0.1 C_4$ 。

从以上原理可以看出,在测试时当  $R_4$  档位发生变化,由  $\frac{10}{\pi} \text{ k}\Omega$  变为  $\frac{1}{\pi} \text{ k}\Omega$  时,介质损耗的读数应由  $C_4$  变为  $0.1 C_4$ 。

### 3.2 绝缘油介质损耗校验装置的使用

使用 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置对 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪进行校验时,先在电路中接入一个已知介质损耗值的样品,即 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置,然后通过 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪测试得到一个实际的介质损耗测试结果  $C_4$  和  $R_3$ , 同时根据式(2) (如  $R_4 = \frac{10}{\pi} \text{ k}\Omega$ ,  $C_n = 92 \text{ pF}$ ) 计算绝缘油介质损耗校验装置的电容值  $C_x$ 。如果 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值与 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值一致,同时计算出的 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置电容值  $C_x$  与 100 pF

表 1 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪校验数据

| BS-100A 介损示值       | QS-37 示值<br>介损值( $\text{tg}\delta = C_4$ )                                   | QS-37 示值<br>$R_3$ 值/ $\Omega$ | 计算 BS-100A 的电容值<br>$C_x = \frac{R_4}{R_3} C_n / \text{pF}$ |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $2 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^{-2} + 9 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-2}$ | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $1 \times 10^{-2}$ | $9 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-2}$                    | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $5 \times 10^{-3}$ | $4 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3}$                    | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $2 \times 10^{-3}$ | $1 \times 10^{-3} + 10 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-3}$                    | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $1 \times 10^{-3}$ | $10 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-3}$                                       | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $5 \times 10^{-4}$ | $4 \times 10^{-4} + 10 \times 10^{-5} = 5 \times 10^{-4}$                    | 2 927.6                       | 100.0                                                      |
| $1 \times 10^{-4}$ | $10 \times 10^{-5} = 1 \times 10^{-4}$                                       | 2 927.7                       | 100.0                                                      |
| $5 \times 10^{-5}$ | $5 \times 10^{-5}$                                                           | 2 927.7                       | 100.0                                                      |

注:试验电压为 1 500 V,试验时 QS-37 的高压端(V)与接地端接通。

$\pm 1 \text{ pF}$  一致,则绝缘油介质损耗测试仪的准确性满足要求。

3.3 校验数据

采用 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置对 QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪进行校验。校验数据见表 1。

3.4 校验结论

从表 1 数据可以看出:QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值与 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值一致,同时计算出的绝缘油介质损耗校验装置电容值与  $100 \text{ pF} \pm 1 \text{ pF}$  一致, QS-37 型绝缘油介质损耗测试仪的准确性满足要求。

4 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪的校验

4.1 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪电桥的读数说明

QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪(牡丹江市电测仪器厂)是另一种典型的电桥型绝缘油介质损耗测试仪,其外观如图 4 所示。QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪的电桥可以直接从刻度盘上读出被测样品的损耗值  $\text{tg}\delta$ , 其中  $C_x(\text{pF}) = \frac{100}{C_4(\mu\text{F})}$ 。

4.2 绝缘油介质损耗校验装置的使用

使用 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置对 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪进行校验时,先在电路中接入一个已知介质损耗值的样品,即 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置,然后通过 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪测试得到一个实际的介质损耗测试结果  $\text{tg}\delta$  和  $C_4$ ,同时根据公式  $C_x(\text{pF})$

$= \frac{100}{C_4(\text{pF})}$  计算绝缘油介质损耗校验装置的电容值  $C_x$ 。如果 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值与 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值一致,同时计算出的 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置电容值  $C_x$  与  $100 \text{ pF} \pm 1 \text{ pF}$  一致,则绝缘油介质损耗测试仪的准确性满足要求。

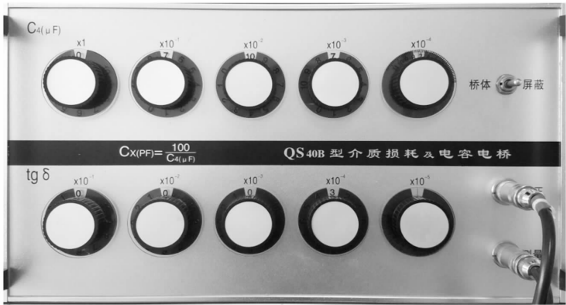


图 4 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪外观

4.3 校验数据

采用 BS-100A 型绝缘油介质损耗校验装置损耗校验装置对 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪进行校验。校验数据见表 2。

表 2 QS-40B 型绝缘油介质损耗测试仪校验数据

| BS-100A<br>介损示值    | QS-40B<br>介损示值         | QS-40B<br>电容示值/pF | 计算 BS-100A<br>电容/pF |
|--------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| $5 \times 10^{-2}$ | $5.006 \times 10^{-2}$ | 0.999 6           | 100.0               |
| $2 \times 10^{-2}$ | $2.002 \times 10^{-2}$ | 0.997 4           | 100.3               |
| $1 \times 10^{-2}$ | $0.998 \times 10^{-2}$ | 0.997 0           | 100.3               |
| $5 \times 10^{-3}$ | $4.95 \times 10^{-3}$  | 0.997 0           | 100.3               |
| $2 \times 10^{-3}$ | $1.98 \times 10^{-3}$  | 0.997 0           | 100.3               |
| $1 \times 10^{-3}$ | $0.98 \times 10^{-3}$  | 0.997 0           | 100.3               |
| $5 \times 10^{-4}$ | $4.80 \times 10^{-4}$  | 0.997 0           | 100.3               |
| $1 \times 10^{-4}$ | $0.80 \times 10^{-4}$  | 0.997 0           | 100.3               |

注:试验电压为 2 000 V,试验时 QS-40B 的高压端(V)与接地端接通。

4.4 校验结论

从表 2 数据可以看出:QS - 40B 型绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值与 BS - 100A 型绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值一致,同时计算出的绝缘油介质损耗校验装置电容值与 100 pF ± 1 pF 一致,QS - 40B 型绝缘油介质损耗测试仪的准确性满足要求。

5 结 语

为解决对电桥型绝缘油介质损耗测试仪的准确性进行校验的难题,在电桥型绝缘油介质损耗测试仪基本原理的基础上,研制了一种绝缘油介质损耗校验装置,研究了电桥型绝缘油介质损耗测试仪的校验方法,最后结合实例对 QS - 37、QS - 40B 两种典型的电桥型绝缘油介质损耗测试仪进行了校验,得到了以下结论:

- 1)要明确电桥型绝缘油介质损耗测试仪的工作原理,明确介质损耗 tgδ 的读数方式和电容值  $C_x$  的计算公式。
- 2)在电路中接入绝缘油介质损耗校验装置,并通过绝缘油介质损耗校验装置选择不同的介质损耗值,通过绝缘油介质损耗测试仪得到实际的介质损耗测试结果 tgδ 和  $C_4$ ,并根据电容值  $C_x$  的计算公式

.....

(上接第 85 页)

证后方可进行后续顺控,这样虽然增加了操作时间,但为安全操作又提供了一层保障。

6 结 语

在智能变电站中,顺控技术能将传统的操作票转变为操作任务,实现复杂任务一键完成,节省了人力和时间,提高了生产效率,这在国网杭州供电公司 220 kV 彩虹智能变电站得到了较好的应用,但其系统建设和使用目前还没有完整的标准,具体生产运行中还存在着较多问题,须根据设备情况做出及时、相应的调整。由于顺控技术的高效性和可靠性,其必将在大规模、高电压等级的智能变电站得到广泛应用。

参考文献

[1] 国家电网公司. 智能变电站顺序控制技术导则:Q/

- 计算出绝缘油介质损耗校验装置的电容值  $C_x$ 。
- 3)判断绝缘油介质损耗校验装置的介质损耗示值与绝缘油介质损耗测试仪的介质损耗示值一致性,同时判断计算出的绝缘油介质损耗校验装置的电容值  $C_x$  与绝缘油介质损耗校验装置标注的电容值的一致性。若两者一致,则绝缘油介质损耗测试仪的准确度满足要求。
  - 4)通过介质损耗校验装置对电桥型绝缘油介质损耗测试仪进行校验,可以对绝缘油介质损耗测试仪的准确性进行控制,从而保证测试数据的准确性。

参考文献

- [1] 全国电流计量技术委员会. 高压电容电桥检定规程: JJG 563 - 2004[S]. 北京:中国计量出版社,2004.
- [2] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 液体绝缘材料相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量:GB/T5654 - 2007[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [3] QS37 型高压电桥使用说明书,上海沪光仪器厂[K].

作者简介:

胡仕红(1975),高级工程师,从事电力用油(气)试验及研究工作;  
杨 健(1992),助理工程师,从事火电厂热工运维检修工作。

(收稿日期:2017 - 12 - 09)

- GDW 11153 - 2014[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 国家电网公司. 智能变电站技术导则:Q/GDW 383 - 2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [4] 艾飞. 220 kV 彩虹变电站现场运行规程[Z]. 2015.
- [5] 南京南瑞继保电气有限公司. PCS - 9700 厂站监控系统说明书[Z].
- [6] 邱智勇,陈健民,朱炳铨. 基于 IEC 61850 标准的 500 kV 三层结构数字化变电站建设[J]. 电力系统自动化, 2009,33(12):103 - 107.
- [7] 黄继荣. 220 kV 彩虹变电站顺序控制典型操作票[Z]. 2015.
- [8] 廖小君,黄忠胜,吕飞鹏. 智能变电站监控与视频系统联动方式研究[J]. 四川电力技术,2014,37(5):42 - 45.

作者简介:

艾 飞(1983),硕士、工程师、技师,主要从事变电运维工作。

(收稿日期:2017 - 12 - 23)

# 基于电价响应的电动汽车充放电策略研究

万寿雄

(广西电网有限责任公司柳州供电局, 广西 柳州 545000)

**摘 要:**电动汽车用户参与电网互动是以获利为出发点,但影响用户经济收益的因素是多方面的,包括电池充放电成本、实时电价以及充放电策略等。从用户的角度出发,在实时电价下,构建了电动汽车充放电的成本模型和收益模型;运用 Matlab 进行求解,分析了电动汽车可盈利的充电时间段和放电时间段。计算结果表明,合理的充放电策略能为用户带来经济收益,且电动汽车的盈利充电时间段为电网负荷低谷期,放电时间段为负荷高峰期,这与电网削峰填谷策略要求一致。

**关键词:**电动汽车;配电网;互动;充放电策略;经济效益

**中图分类号:**TM71   **文献标志码:**A   **文章编号:**1003-6954(2018)02-0090-05

## Research on Charging and Discharging Strategy of Electric Vehicle Based on Price Response

Wang Shouxiong

(Liuzhou Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid  
Limited Liability Company, Liuzhou 545000, Guangxi, China)

**Abstract:**Electric vehicle users to participate in the interaction of the grid is based on the benefits, but there are many factors that influence the economic benefits of users, including battery charge and discharge cost, real-time electricity price and charging and discharging strategy etc. From the user's point of view, the cost and profit models for charging and discharging of electric vehicles are constructed under the real-time electricity price. And the profitable charging time and discharging time of electric vehicles has been analyzed using Matlab. Calculation results show that, the reasonable charging and discharging strategy can bring economic benefits to users, and the profitability of electric vehicle charging time is the trough of load, while the discharging time is the peak of load, which is consistent with the requirements of power grid peak clipping strategy.

**Key words:**electric vehicles;distribution network; interaction;charging and discharging strategy;economic benefit

### 0 引 言

据统计,一辆电动汽车平均每天停车长达 23 h,且全年停驶时间占 96% 左右<sup>[1]</sup>。对于电动汽车用户,在满足基本行车需求的前提下,V2G 模式可以创造额外收入,也会加快车辆投资成本的摊销<sup>[2]</sup>。但是,由于实时电价和电池充放电损耗等因素,电动汽车用户在参与电网互动过程中,还会存在入不敷出的情况。比如当充电电价大于放电电价时,或者在电池放电成本过高,而峰谷电价差过低,以至于放电成本始终高于充电成本;而且不同型号的电池成本也不一样,电池损耗成本过高也会影响用户的收

益。另一方面,对配电网而言,大量电动汽车进行无序充电将加重配电网的负荷负担<sup>[3]</sup>,此外电动汽车充放电行为分散、单辆电动汽车的电池容量小,电网不可能直接对单辆电动汽车进行调控<sup>[4]</sup>。但是电动汽车参与电网互动的实质是参与电网削峰填谷,而电网的削峰填谷策略能实时响应电网负荷。因此,探索合理的调度策略和控制措施,充分考虑用户侧和电网侧需求,是解决大规模电动汽车参与配电网互动的关键<sup>[5]</sup>。

在电动汽车调度策略研究方面,文献[6-7]建立以电网损耗最小为目标的电动汽车充电优化模型,研究结果表明,合理控制电动汽车充电有利于降低电网损耗,提高电网综合经济效益。文献[8]以

包含充电成本、电网损耗成本等因素的充电总成本最小为目标,构建了电动汽车的优化控制模型。文献[9]基于分时电价和用户充电需求,以电动汽车充电总费用最低为目标制定调度计划。

电动汽车用户都希望在电价低的时段对电动汽车充电,而在电价高的时段向电网放电以获得电价差额利益,电动汽车用户的这一期望与电网削峰填谷策略一致<sup>[10]</sup>。通过采用相应的调度策略和控制措施,使电动汽车在电网负荷低谷时段进行充电,在负荷高峰时段进行放电,实现电网削峰填谷的作用,合理利用电动汽车作为储能单元的优势,给用户和电网带来收益<sup>[11]</sup>。鉴于此,从用户侧和电网侧需求出发,提出了基于价格响应的调度策略,并构建了相应的控制模型。

# 1 用户侧和配电网侧需求分析

电动汽车与配电网互动的过程就是双方博弈的过程。互动所产生的红利主要包括两方面:1)降低电网运营成本和投资成本,这主要是通过容量效益、调峰调频、丰富电网调节和控制手段、提供辅助服务等;2)在实时电价机制下,产生峰谷电价差额利润。

## 1.1 用户侧需求

用户侧需求主要包括以下几方面:1)电动汽车作为行驶工具,首先应该满足用户的基本行车需求;2)用户对电动汽车参与电网互动和退出互动具有优先权;3)在空闲时间段以储能单元参与电网互动,以期获得相应的额外收益;4)在参与电网互动的过程中避免电池的不经济放电(电池频繁充放电);5)其他便民服务,如充电向导、电价服务等。

## 1.2 配电网侧需求

配电网侧需求主要包括以下几方面:1)削峰填谷,转移电网高峰负荷,消纳电网低谷负荷;2)容量储备,容量越大越好;3)应急调度,应付紧急情况的调度需求;4)提高电网对清洁能源的消纳能力。

# 2 电动汽车参与电网互动的经济效益分析

## 2.1 电动汽车成本模型

电动汽车参与电网互动的总成本由电池损耗成本和购电成本组成。

$$C = C_b + C_c \tag{1}$$

式中: $C$  为电动汽车参与电网互动的总成本; $C_b$  为电池损耗成本; $C_c$  为购电成本。

### 1) 电池损耗成本

电池损耗与其充放电次数、放电深度、电池材料、温度等有关<sup>[12]</sup>,其折算方法根据文献[13]用电池的吞吐量来计算电池损耗。

电池单位电能吞吐损耗成本  $c_b$  为

$$c_b = \frac{p_b \cdot E_{en}}{L_{c,max} \cdot E_{en} \cdot DOD} = \frac{p_b}{L_{c,max} \cdot DOD} \tag{2}$$

式中: $L_{c,max}$  为电池最大充放电循环次数; $E_{en}$  为电池的额定容量; $p_b$  为电池单位容量价格成本,元/kWh;DOD 为电池的最大放电深度。

电池放电损耗成本为

$$C_b = \int P_d(t) \cdot c_b dt \tag{3}$$

式中, $P_d(t)$  为电池放电功率,kW/h。

### 2) 购电成本

考虑电动汽车充电池放电过程中的能量损耗,购电成本为

$$C_c = \int P_{c,CD} \cdot \frac{p_c(t)}{\eta_c} dt \tag{4}$$

式中: $p_c(t)$  为充电电价,元/kWh; $\eta_c$  为电池充电效率; $P_{c,CD}$  为充放电电能。

则电池的放电总成本价  $p_{dz}(t)$  为

$$p_{dz}(t) = \frac{p_c(t)}{\eta_c} + c_b \quad (\text{元/kWh}) \tag{5}$$

## 2.2 电动汽车收益模型

电动汽车参与电网互动的收益分为两部分:1)电动汽车向电网侧售电收益;2)向电网侧购电费用。

$$M = R_d - C \tag{6}$$

式中: $M$  为电动汽车参与电网互动的收益; $R_d$  为电动汽车售电收益; $C$  为电动汽车购电费用。

### 1) 电动汽车向电网侧售电收益

$$R_d = \int p_{en}(t) \cdot \eta_d \cdot P_d(t) dt \tag{7}$$

式中: $p_{en}(t)$  为实时电价; $\eta_d$  为电池放电效率。

2) 向电网侧放电成本包括电池损耗、充放电功率损耗以及购电费用。

$$C=\int P_d\cdot c_bdt+\int p_{dz}(t)\cdot P_cdt\tag{8}$$

将 1 天分为 48 个时间段,则电动汽车用户 1 天收益的计算模型为

$$M=\sum_{i=1}^{48}[p_{en}(i)\cdot\eta_d\cdot t_{d,i}\cdot P_d(t)]-\sum_{k=1}^{48}p_{dz}(t)\cdot t_{c,i}\cdot P_{c,i}\tag{9}$$

### 3 基于价格响应的调度策略

#### 3.1 目标函数

电动汽车价格响应调度策略就是在负荷高峰时,设定较高的交易电价,来引导电动汽车放电和减少电动车充电行为;在负荷低谷时,设定较低的交易电价,来引导电动汽车充电和减少电动车放电行为。电动汽车是否提供 V2G 服务将取决于市场电价。通过控制充放电功率,使电池在一个产生周期内(完成一次充放电循环),收益大于相应的可变成本。

以经济收益最大为目标函数

$$\max M=R_d-C\tag{10}$$

#### 3.2 约束条件

基于价格响应的调度策略以电价市场引导用户自主参与电网互动,电动汽车的充放电约束条件包括用户侧约束条件、实时电价市场、电池充放电能量和充放状态约束条件。

##### 1) 用户侧约束条件

电动汽车用户自主选择是否参与电网互动,设定当  $SL=1$  表示参与电网互动, $SL=0$  则不参与;电动汽车用户根据自身需求设定最小荷电量  $SOC_{min}$ 。

$$s. \ t. \begin{cases} SL=1 \\ SOC_{min}\leq SOC(t) \end{cases}\tag{11}$$

式中, $SOC(t)$  为电池的实时荷电量。

##### 2) 电池能量约束条件

包括:①电池每次的充/放电能不能高于电池的 可充/放电能量;②电池的实时荷电量不小于最小荷电量;③电池放电功率小于额定放电功率。

$$s. \ t. \begin{cases} \int P_{c,CD}(t)dt < E_{en}\cdot[1-SOC(t)] \\ \int P_d(t)dt < E_{en}\cdot[SOC(t)-SOC_{min}] \\ SOC(t) > SOC_{min} \\ P_d(t) < P_{d,en} \end{cases}\tag{12}$$

##### 3) 收益约束条件

用户的收益约束条件就是实时电价必须大于放电成本价。

$$s. \ t. \ p_{en}(t)\geq p_{dz}(t)\tag{13}$$

##### 4) 电池的状态约束条件

电池状态的约束条件包括:①电池的温度、电压不能越限;②电池的充放电循环次数不能超过最大循环次数。

$$s. \ t. \begin{cases} w_{min} < w(t) < w_{max} \\ v_{min} < v(t) < v_{max} \\ L_c(t) < L_{c,max} \end{cases}\tag{14}$$

式中, $v_{max}$ 、 $v_{min}$ 、 $w_{max}$ 、 $w_{min}$  分别为电池电压上下限和温度上下限。

#### 3.3 电池充放电策略

##### 1) 电池放电策略

当市场电价大于放电成本时,放电功率为  $P_{d,en}$ ;市场电价小于放电成本时,放电功率为 0。

$$P_d(t)=\begin{cases} P_{d,en}, & p_{en}(t)\geq p_{dz}(t) \\ 0, & p_{en}(t)<p_{dz}(t) \end{cases}\tag{15}$$

##### 2) 电池充电策略

电动汽车的充放电的决定因素包括:①用户的选择;②实时电价;③电池运行状态。

电动汽车充放电控制模型流程如图 1 所示。

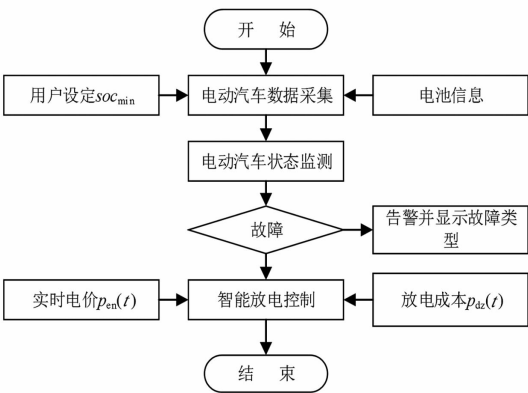


图 1 EVs 充放电流程

### 4 算例分析

将 1 天分 48 个时段电价,即电价的调整是建立在以 30 min 为时间分辨率的序列,如图 2 所示。

以比亚迪 e6<sup>[14]</sup>、荣威 E50<sup>[15]</sup>、日产 Leaf<sup>[16]</sup>、力帆 620<sup>[17]</sup> 4 种电动汽车为例。取电池最大容量降低



到额定容量的 70% 时为电池寿命终止,则电池最大循环次数为 10 000 次。表 1 为 4 种品牌电动汽车的电池参数。

取电池的充电效率和放电效率都为 0.92<sup>[7]</sup>,电池的电能容量服务价格  $p_{cap}$  参照《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》,取 0.012 元/(kWh·h)。由式(2)计算各品牌电动汽车电池的吞吐量成本。表 2 为 4 种品牌电动汽车电池的吞吐量成本。

表 1 4 种品牌 EVs 的电池参数

| 电动汽车品牌                   | e6  | E50 | Leaf | 620 |
|--------------------------|-----|-----|------|-----|
| 额定容量 $E_{en}/\text{kWh}$ | 57  | 18  | 24   | 30  |
| 最大续航 $l_{max}/\text{km}$ | 300 | 120 | 160  | 170 |
| DOD/%                    | 80  | 80  | 80   | 80  |

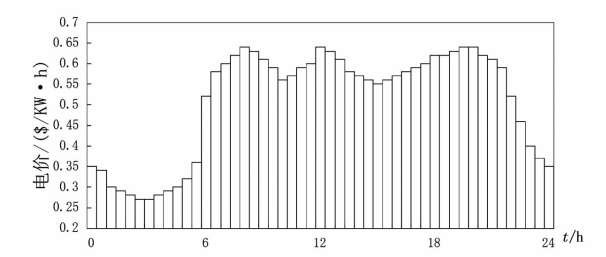


图 2 实时电价

表 2 4 种品牌电动汽车电池的吞吐量成本

| 电动汽车品牌                                 | e6      | E50   | Leaf    | 620   |
|----------------------------------------|---------|-------|---------|-------|
| 电池成本                                   |         |       |         |       |
| $p_b/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$ | 2 500   | 3 000 | 3 500   | 3 000 |
| 吞吐量成本                                  |         |       |         |       |
| $c_h/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$ | 0.312 5 | 0.375 | 0.437 5 | 0.375 |

提供的实时电价,以电池吞吐量成本最低的比亚迪 e6 和最高的日产 Leaf 为例,分析两种电动汽车在实时电价下的盈利情况。取电池的充电效率和放电效率都为 0.92,最小续航值取 20 km。

通过 Matlab 编程计算,得到比亚迪 e6 和日产 Leaf 在一天内各个时间段的放电电价和放电成本价,仿真结果如图 3 所示。

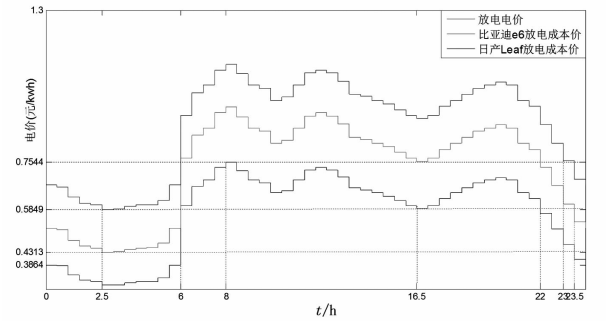


图 3 e6 和 Leaf 各个时间段的放电电价和放电成本价

由图 3 可得比亚迪 e6 和日产 Leaf 的可盈利充电和放电时间段,如表 3 所示。

表 3 比亚迪 e6 和日产 Leaf 的可盈利充电和放电时间段

| 汽车品牌    | 可盈利的充电时间段                       | 可盈利的放电时间段       |
|---------|---------------------------------|-----------------|
| 比亚迪 e6  | 22:00 至次日 06:00                 | 06:00 至 23:30   |
| 日产 Leaf | 06:00 至 16:30、<br>17:00 至 22:00 | 23:00 至次日 06:00 |

由表 3 可以看出比亚迪 e6 的可盈利充电时间段和放电时间段出现了重叠部分,即在 22:00 至 23:30 时间段比亚迪 e6 既可以充电也可以放电。但事实上,比亚迪 e6 并不能在该时段进行先充电再放电。如果在该时段充电,那么只能到第 2 天才有可盈利的放电空间。因此,比亚迪 e6 一天只能进行一次充放电调度。

由图 3 和表 3 可以得出以下几个结论:

1) 由于日产 Leaf 的电池额定容量比比亚迪 e6 小,所以日产 Leaf 的可盈利空间小,且在相同条件下的盈利少;

2) 比亚迪 e6 和日产 Leaf 获得最大利润的情景相同,即在 02:30 至 03:30 进行充电,在 08:00 至 08:30 进行放电,相应的最大电价差分别为 0.323 1 (元/kWh)、0.169 5 (元/kWh);

3) 比亚迪 e6 和日产 Leaf 在该实时电价下,一天只能进行一次可盈利的充放电调度。

此外,当用户选择的最小续航值变大时,或者充电效率变低时,电动汽车的盈利空间将进一步降低,甚至出现无法盈利的情况。

两辆电动汽车可盈利的充电时间段属于电网负荷低谷期,此时段电价低,且电网侧有增加负荷量的需求;放电的 3 个时间段都是用电高峰期,此时段电价高,且电网侧有转移高峰负荷的需求。因此,该充放电选择与电网削峰填谷的策略相符,与电网侧需求一致。

参考文献

[1] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Resource Scheduling under Uncertainty in a Smart Grid With Renewables and Plug-in Vehicles[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6 (1):103-109.

[2] 孙波,廖强强,谢品杰,等. 车电互联削峰填谷的经济成本效益分析[J]. 电网技术,2012,36(10):30-34.

[3] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.

[4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):30-37.

[5] Dominik Pelzer, David Ciechanowicz, H Aydt, et al. A Price-responsive Dispatching Strategy for Vehicle-to-Grid: An Economic Evaluation Applied to the Case of Singapore[J]. Journal of Power Sources,2014,256(3):345-353.

[6] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31):11-18.

[7] 陈加盛,张建华,林建业,等. 以降低电网损耗为目标的电动汽车充电策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3):139-144.

[8] Sortomme E, Hindi M M, Macpherson S D J, et al. Co-ordinated Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):198-205.

[9] He Y, Venkatesh B, Guan L. Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1095-1105.

[10] Sekyung H, Soohye H, Sezaki K. Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.

[11] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):43-49.

[12] Corey D. White, K. Max Zhang. Using Vehicle-to-Grid Technology for Frequency Regulation and Peak-load Reduction[J]. Journal of Power Sources, 2010, 196(8): 3972-3980.

[13] Sarre G, Blanchard P, Broussely M. Aging of Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(127):65-71.

[14] 比亚迪汽车官网. 比亚迪 e6 价格与配置[R/OL]. 2011-10-26. <http://www.bydauto.com.cn/car-param-e6.html>.

[15] 荣威汽车官网. 荣威 E50 价格与配置[R/OL]. 2012-11-05. <http://www.roewe.com.cn/rowee50/>.

[16] 百度百科. 日产 LEAF 参数配置[R/OL]. 2013-09-07. <http://baike.baidu.com/view/2706376.htm>.

[17] 上海中科电动汽车有限公司官网. 力帆 620 纯电动车[R/OL]. 2013-06-24. <http://www.zklf-ev.com/ShowProducts.asp>.

作者简介:

万寿雄(1991),助理工程师,研究方向为配电网的经济运行和控制。

(收稿日期:2017-11-20)

~~~~~

(上接第45页)

[4] 金超,陆争荣,陈志华,等. 配网低电压治理探讨[J]. 科技与企业,2016(9):236-237.

[5] 曹伟. 利用无功补偿解决配电网低电压问题的对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

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

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

[8] 吕志来,沈春雷,徐杰彦,等. 节能模式下的低电压治理方案比选研究[J]. 供用电,2015(11):43-47.

[9] 杨伟奇. 低电压综合治理系统研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.

[10] 张成志. 配电网低电压治理方法探讨[J]. 科技资讯, 2015(8):111.

[11] 李岩. 基于项目成本控制的农村低电压综合治理模式研究[D]. 福州:福州大学,2014.

[12] 韩英. 浅谈“低电压”治理的多种技术措施[J]. 中国高新技术企业,2012(4):142-143.

[13] 潘少华. 基于农村低电压现象的综合治理研究[J]. 中国电机(技术版),2011(11):63-65.

[14] Ming Tsung Tsai. Design of a Compact Series-connected AC Voltage Regulator with an Improved Control Algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004,51(4):933-936.

[15] Faiz J, Siahkolah B. New Solid-state on Load Tap-changers Topology for Distribution Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):136-141.

作者简介:

姚晓(1974),高级工程师,从事带电检测及配电网治理相关工作。

(收稿日期:2017-12-07)