

基于非参数估计的在线电压预测

尤 金

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:随着电网规模扩大、复杂度加深,对在线潮流计算确定节点电压提出严峻挑战,通过电压对无功的响应数据来快速精确预测电压发展趋势具有重要意义。提出基于非参数估计的节点电压快速预测方法,以系统负荷水平、无功激励为输入,节点电压为输出,以均方误差作为电压预测精度的指标,衡量预测效果。最后将该方法的预测结果与传统神经网络、自适应神经网络的预测结果作比较分析。通过 IEEE 24 节点系统标准算例验证表明,非参数估计方法具有较强的电压拟合能力和外推能力,其预测精度与神经网络算法的预测精度相当。

关键词:电压估计;BP 神经网络;遗传算法;非参数估计

Abstract: With the expansion of grid scale and complexity, it is difficult to determine the node voltage by on-line power flow calculation, so it is very important to predict the trend of voltage quickly and accurately by the voltage response data. A fast voltage prediction method based on nonparametric estimation is proposed, which takes the system load level and reactive power as the input and the node voltage as the output. The mean square error is used as the index of the voltage prediction accuracy to measure the prediction effect. Finally, the prediction results of the proposed method are compared with those of the traditional neural networks and adaptive neural networks. The results of standard IEEE 24-bus system shows that the nonparametric estimation method has strong ability of voltage fitting and extrapolation, and its prediction accuracy is equivalent to the prediction accuracy of neural network algorithm.

Key words: voltage estimation; BP neural network; genetic algorithm; nonparametric estimation

中图分类号:TP183 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0001-04

0 引 言

近年来随着中国国民经济的飞速发展^[1],电力负荷增长明显,电网规模日益扩大、结构日趋复杂,为传统在线潮流计算电压带来严峻挑战,但是随着数据采集技术、存储技术和处理技术的提高,使得通过大数据分析技术实现电压在线预测成为可能。

节点电压作为判断电网无功平衡和衡量电能质量的重要指标,其在线预测具有重要意义。目前关于电压预测的方法主要有最小二乘估计^[2]、潮流估计^[3]、灵敏度矩阵估计^[4]以及公共耦合点电压预测^[5],上述方法适用于采集部分信息的中小型网络。随着终端数据采集量的激增,可得到更加完善的信息;但这些信息在现有潮流计算方式下难以充分发挥作用,因此需借助统计学对数据价值进行充分挖掘,实现电压的在线预测。

借助统计学中非参数估计方法,提出基于

Group-Lasso 的电压在线预测方法,通过 IEEE 24 节点标准算例测试 Group-Lasso 方法的电压拟合能力和泛化能力,并将该方法的电压预测结果与传统神经网络、自适应神经网络算法的预测结果进行对比,验证了所提思路的有效性。

1 样本生成

产生样本的总思路是根据各负荷场景下变电站节点的电压和无功功率越限情况,按照九区图控制策略将电压、无功功率拉回至正常范围,并记录下该过程中负荷水平、发电机出力、变压器分接头档位、电容器组投切量和节点电压,作为初始样本集。

1.1 负荷场景产生原理

产生负荷场景所涉及的负荷调整仅针对系统中的 PQ 节点进行,先大致构造日有功负荷曲线和日无功负荷曲线,如图 1 所示。

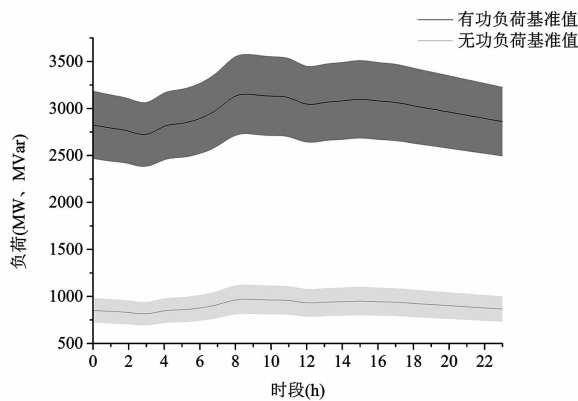


图1 日负荷曲线

图1中浅色曲线代表1天24h的无功负荷基准值,深色曲线代表对应的有功负荷基准值。将浅色曲线乘以1.2作为无功负荷上限,乘以0.8作为无功负荷下限,形成图1中浅色的无功负荷带;同理可以得到图1中深色的有功负荷带。为了保证产生的负荷场景具有典型性,需在不同时段对应的两条负荷带内随机独立选取有功负荷值和无功负荷值。

1.2 调压机制

九区图控制策略按照固定的电压、无功上下限将整个控制区域划分为九宫格的形式。根据中国能源部制定的SD 325-1989《电力系统电压和无功电力技术导则》规定:变电所35~110kV母线在正常运行时电压允许偏差范围为相应额定电压的 $[-3\%, +7\%]$,对于220kV及以下变电所,由电网供给的无功功率与有功功率比值范围为 $[0, 0.33]$ 。因此将九区图的电压上下限分别设为1.07和0.97,将无功功率与有功功率的比值上下限分别设为0.33和0,九区图控制策略下的设备动作规则参见文献[9],此处不再赘述。

在1.1节构造的负荷场景中,如果变压器低压侧母线电压越限或高压侧母线无功功率越限,按照九区图控制规则进行设备调整,反之设备不动作。调压细则如下:对于每个负荷场景的电压无功控制最大调节次数不超过8次。220kV变压器高压侧分接头调节范围为 $[0.9, 1.1]$,每次调节步长为 230×0.0125 。电容器组投切点均设置在变压器低压母线侧,且仅对PQ节点进行无功补偿,138kV节点每次补偿步长为4Mvar。系统中PV节点属于发电机节点,在实际运行中会自发地调整出力,因此需将发电机出力记录下来作为影响节点电压的一类因素。

2 基于 Group-Lasso 的非参数估计原理

所提两种预测模型的输入都是负荷场景、发电机出力、变压器变比以及电容器组投切量,统称特征属性,输出的目标属性均为节点电压标么值。基于自适应神经网络的预测方法已在文献[10]中详细叙述,故不再赘述。

2.1 样本预处理

由于所涉及的数据维度较大,首先应排除与节点电压关联性不强的特征属性,采用非参数独立性筛选方法^[11](nonparametric independence screening, NIS)进行弱关联特征属性的剔除,其基本思路是将各特征属性对目标属性依次进行以B-样条(basis-spline, BS)为基的非参数回归拟合,计算相应的残差平方和(residual sum of squares, RSS)并排序, RSS越大说明特征属性与目标属性关联度越小,最后根据关联度大小,逐一剔除弱关联特征属性。假设存在如下样本集:

$$(X_1, X_2, \dots, X_p, Y_2, \dots, Y_k) \quad (1)$$

其中,式(1)为 $n \times (p+k)$ 阶矩阵,表示该样本集包含 n 条独立样本、 p 个特征属性以及 k 个目标属性。对每个特征属性 X_j 进行BS展开,取 X_j 中第 i 条样本 x_{ij} 为例,其B-样条展开形式为

$$f_{Bij}(x_{ij}) = x_{ij1}a_{ji1} + x_{ij2}^2a_{ji2} + x_{ij3}^3a_{ji3} + \begin{cases} (x_{ij} - b_{j4})a_{ji4} & b_{j4} \leq x_{ij} < b_{j5} \\ (x_{ij} - b_{j5})a_{ji5} & b_{j5} \leq x_{ij} < b_{j6} \\ \vdots & \vdots \\ (x_{ij} - b_{jn})a_{jinn} & x_{ij} \geq b_{jn} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_{ji1}, a_{ji2}, \dots, a_{jinn}$ 为 x_{ij} 经过BS展开后各项前的回归系数,由最小二乘法求得; $b_{j4}, b_{j5}, \dots, b_{jn}$ 为插值节点,一般情况下在 X_j 的值域空间中按固定比例取值; n 为自由度,它决定着 $f_{Bij}(x_{ij})$ 所含项数, n 最小为3。

自由度的选取影响着回归模型的拟合精度,为寻找最优拟合效果对应的自由度,采用交叉验证(cross validation, CV)获取最优自由度,求取属性 X_j 回归函数的最优自由度步骤如下:

1) 设定自由度取值区间 $[3, n]$,初始化自由度 $d=3$ 。

- 2) 将全部样本按顺序均分为 m 组,初始化 $i = 1$ 。
- 3) 取自由度为 d ,以第 i 组以外的 $m - 1$ 组样本为训练集进行非参数回归。
- 4) 以第 i 组样本为测试集,计算该回归模型的 RSS。
- 5) 若 $i = m$,求得自由度为 d 时的 m 个 RSS 的均值,作为自由度 d 的 RSS;若 $i \neq m$,则 i 自增 1,返回 3)。
- 6) 若 $d = n$,计算结束,提取每个自由度对应的 RSS;若 $d \neq n$,则 d 自增 1,返回 2)。
- 7) 对 RSS 进行排序,对应 RSS 最小者为该属性回归函数的最优自由度。

将各个特征属性按各自的最优自由度进行 BS 展开,展开的简化形式如下:

$$f_{Bij}(x_{ij}) = \phi_{Bij1}(x_{ij1}) + \phi_{Bij2}(x_{ij2}) + \phi_{Bij3}(x_{ij3}) + \phi_{Bijn}(x_{ijn}) \tag{3}$$

用所有特征属性对各目标属性做回归拟合,计算其对应 RSS 值并由高到低进行排序,其中以 RSS 值有明显下降的拐点为分界线,分界线以前的特征属性表示与所考察目标属性关联性很弱,需剔除,保留分界线以后的特征属性作为后续步骤的输入样本。

对于 NIS 筛选后的特征属性,根据实际经验,某些特征属性变化幅度大,如负荷场景、发电机出力等;某些特征属性变化幅度小,如变压器变比。为了避免扭曲特征属性的实际影响力,需要对所有特征属性做统一的无量纲化处理,这里采用中心化处理方式:

$$\phi_{ijg}(x_{ijg}) = \frac{\phi_{Bijg}(x_{ijg}) - \phi_{Bijgmean}}{sd(\phi_{Bijg})} \tag{4}$$

式中: $\phi_{Bijgmean}$ 为 $\phi_{Bijg}(x_{ijg})$ 的均值; $sd(\phi_{Bijg})$ 为 $\phi_{Bijg}(x_{ijg})$ 的标准差,这样得到的 $\phi_{ijg}(x_{ijg})$ 就是中心化后的特征属性展开项。于是式(3)可改写为

$$f_{ij}(x_{ij}) = \sum_{g=1}^{d_f} \phi_{ijg}(x_{ijg}) \tag{5}$$

式中, d_f 为最优自由度,至此样本预处理完毕。

2.2 基于 Group - Lasso 的非参数估计

Group - Lasso 回归模型通过将各特征属性的非线性函数相叠加来解决非线性问题^[12]。其可加模型如式(8)所示:

$$y_{is} = \alpha + \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij})\beta_{js} + \varepsilon_i \tag{8}$$

那么 Group - Lasso 回归模型可表示为

$$\beta^* = \arg \min \{ \sum_{i=1}^n [y_{is} - \alpha - \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij})\beta_{js}]^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_{js}| \} \tag{9}$$

式中, λ 为惩罚参数。在矩阵稀疏化的过程中,当某些特征属性的惩罚参数 λ 压缩至 0 的时候,这些特征属性模长的权值就变为 0,说明这些属性被回归模型自动剔除了。将式(5)所示的预处理样本带入 Group - Lasso 回归模型式(9),可得

$$\beta^* = \arg \min \{ \sum_{i=1}^n [y_{is} - \alpha - \sum_{j=1}^{d_f} \sum_{g=1}^p \phi_{ijg}(x_{ijg})\beta_{js}]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{d_f} |\beta_{js}| \} \tag{10}$$

式(10)称为 Group - Lasso 回归模型的具体应用模式,最后该模型需要同时满足如下可识别条件:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p f_{ij}(x_{ij})\beta_{js} = 0 \tag{11}$$

基于 Group - Lasso 的非参数估计的总体流程图如图 2 所示。

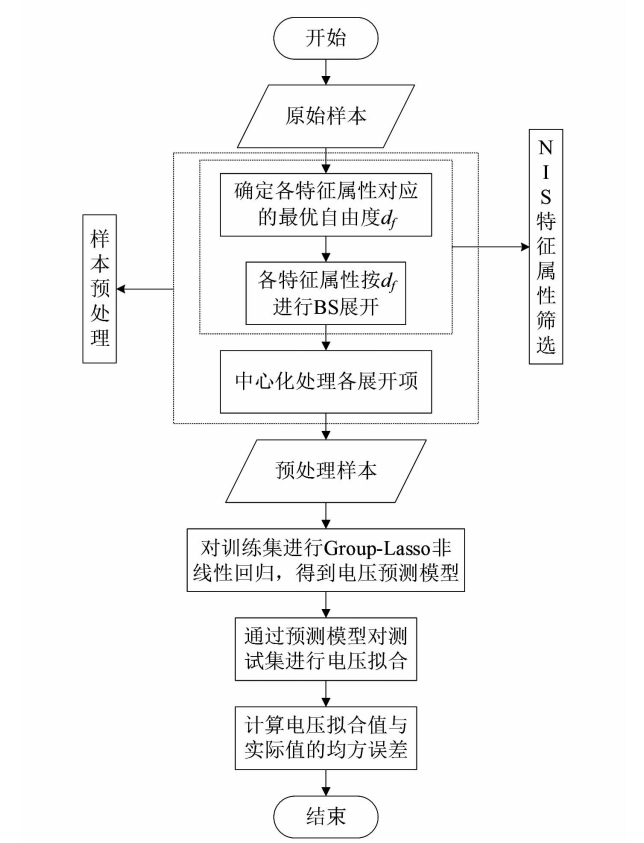


图 2 基于 Group - Lasso 的非参数估计流程

3 算例分析

以 IEEE 24 节点标准系统为例,采用所提两种方法与传统 BP 神经网络分别进行电压估计,分析

三者优劣。IEEE 24 节点系统的参数由文献 [13] 给出,其系统结构如图 3 所示。

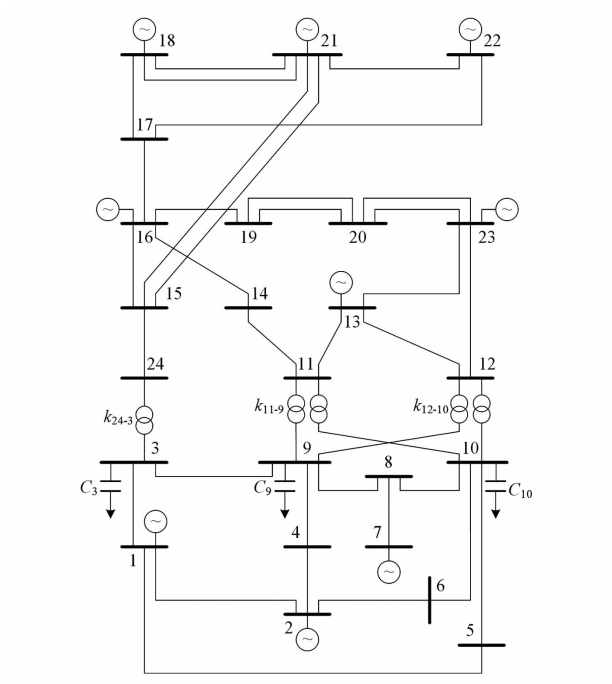


图 3 IEEE 24 节点系统结构

样本生成是基于 Java 调用 BPA 潮流计算程序实现的,总共产生 10 000 条样本,经人为剔除不变化的属性后,每条样本包含 43 个特征属性和 15 个目标属性,具体属性如表 1、表 2 所示。

表 1 样本特征属性

编号	发电机出力	编号	负荷场景	编号	VQC
1/2	bus1 - PQ	16/17	bus3 - PQ	38	C_3
3	bus2 - Q	18/19	bus4 - PQ	39	C_9
4/5	bus7 - PQ	20/21	bus5 - PQ	40	C_{10}
6/7	bus13 - PQ	22/23	bus6 - PQ	41	k_{24-3}
8/9	bus16 - PQ	24/25	bus8 - PQ	42	k_{11-9}
10/11	bus18 - PQ	26/27	bus9 - PQ	43	k_{12-10}
12	bus21 - Q	28/29	bus10 - PQ		
13	bus22 - Q	30/31	bus14 - PQ		
14/15	bus23 - PQ	32/33	bus15 - PQ		
		34/35	bus19 - PQ		
		36/37	bus20 - PQ		

注:发电机出力中的 PQ 分别代表有功出力和无功出力,负荷场景中的 PQ 分别代表有功负荷和无功负荷,VQC 中的 C 表示电容补偿,k 表示变比,下标表示节点编号。

表 2 样本目标属性

编号	节点电压	编号	节点电压	编号	节点电压
1	bus1	6	bus8	11	bus14
2	bus3	7	bus9	12	bus15
3	bus4	8	bus10	13	bus19
4	bus5	9	bus11	14	bus20
5	bus6	10	bus12	15	bus24

表 3 3 种方法的预测精度比较

节点电压	MSE of GA - BPNN		MSE of BPNN		MSE of Group - Lasso	
	训练集	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集
bus1	2.02e-8	1.58e-8	2.62e-7	2.68e-7	4.22e-8	4.34e-8
bus3	8.55e-8	9.04e-8	1.75e-7	1.85e-7	1.06e-6	1.16e-6
bus4	8.91e-8	9.14e-8	3.06e-7	3.33e-7	1.36e-6	1.54e-6
bus5	8.60e-8	9.03e-8	2.52e-7	3.07e-7	2.38e-7	3.99e-7
bus6	8.56e-8	8.93e-8	1.53e-7	1.57e-7	1.93e-7	6.68e-7
bus8	8.95e-8	9.04e-8	2.34e-7	2.41e-7	1.36e-7	3.23e-7
bus9	8.44e-8	8.82e-8	3.02e-7	2.81e-7	3.89e-6	3.98e-6
bus10	8.73e-8	8.88e-8	1.90e-7	1.86e-7	2.20e-7	7.64e-7
bus11	8.56e-8	8.51e-8	3.44e-7	3.69e-7	1.37e-7	2.38e-7
bus12	8.21e-8	8.60e-8	2.28e-7	2.51e-7	1.09e-7	2.13e-7
bus14	8.44e-8	8.73e-8	2.56e-7	2.73e-7	9.12e-8	1.27e-7
bus15	1.00e-7	1.20e-7	3.18e-7	3.61e-7	8.20e-8	2.49e-7
bus19	7.66e-8	8.84e-8	3.44e-7	3.37e-7	8.37e-8	9.05e-8
bus20	1.28e-8	1.43e-8	4.09e-7	4.24e-7	8.22e-8	8.33e-8
bus24	8.67e-8	1.12e-7	1.81e-7	2.04e-7	3.65e-7	4.14e-7

(下转第 54 页)

基于能量灵敏度矩阵和多阈值搜索的电压控制分区

郑 武¹, 康 勇², 李华强³

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
2. 国网四川省电力公司物资分公司, 四川 成都 610052; 3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:目前,能量函数的方法用于电压稳定评估、电网可靠性分析已获得较为深入的研究。由于节点的能量信息能综合反映节点的无功注入以及电压水平,提出一种基于静态能量函数法和多阈值搜索进行电压控制分区的新方法。从节点的能量信息出发,提出节点能量相关度指标用于量化节点间无功联系的紧密程度,并基于此构建系统的能量灵敏度矩阵,最后利用多阈值分解方法对该矩阵进行电压控制区域划分。IEEE 30 节点系统、118 节点系统的仿真结果以及和传统分区方法的比较验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词:静态能量函数;能量信息;节点能量相关度指标;能量灵敏度矩阵;多阈值分解

Abstract:Since the energy information can synthetically reflect the reactive injection and the voltage of node bus, a new voltage control partitioning method is proposed based on static energy function and multi - threshold search. With the energy information of node, the node energy correlation degree index (NECDI) is proposed to evaluate the reactive relevance between two nodes. Based on the NECDI, the energy sensitivity matrix (ESM) is established. In the end, the ESM is decomposed to get the voltage control area (VCR) by multi - thresholds search method. Simulation results in IEEE 30 and IEEE 118 bus systems and the comparison with the traditional partitioning method verifies the validity and practicability of the proposed method.

Key words:static energy function; energy information; node energy correlation degree index; energy sensitivity matrix; multi - threshold search

中图分类号:TM714 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)05 - 0005 - 05

0 引 言

无功电压控制是电网安全控制的重要组成部分,对确保系统安全、稳定和经济运行具有重要意义^[1-2]。

由于无功传输的本地特性,系统内电压分布呈现明显的区域特点^[3-4],为保证各区域内电压运行在合理范围,充分发挥无功电源的控制作用,提高系统运行的安全性和经济性,将系统划分为多个相互解耦的无功电压控制区域已成为一个重要问题。

迄今为止,国内外学者对电压控制分区做了一定的研究,已经取得的研究成果主要包括:基于启发式方法的 Tabu 搜索法^[5-6],以分区中的节点数以及线路作为目标函数,以分区中的变压器、电容器数量作为约束条件进行优化,但该方法未考虑网络的物理特征且在系统较大时其计算量比较大。为减少大系统的优化分区计算量,文献[7]提出基于遗传算

法的两层搜索方法用于无功分区控制并取得了较好的效果。文献[8-10]利用图论的基本理论,提出阈值和多阈值分解法研究电压分区,该类方法可直接依据灵敏度矩阵来分析,简单直接,且具有实际意义^[11]。文献[12-13]提出利用聚类算法研究电压控制分区,该方法将负荷节点映射到发电机节点组成的空间中,并基于此类空间数据对象的坐标定义电气距离,但映射后节点坐标的物理意义并不清晰。

以上方法为进一步研究电力系统的电压控制分区提供了极其重要的借鉴作用。由于节点能量状态能反映节点的无功注入及电压水平^[13],基于静态能量函数法,这里提出节点能量相关度指标(node energy correlation degree)量化节点间无功联系的紧密程度,并定义一个能够反映系统节点间无功、电压联系疏密程度的能量灵敏度矩阵(energy sensitivity matrix),最后利用多阈值分解方法对该能量灵敏度矩阵进行电压控制区域(voltage control area, VCA)划分。所提方法和思路的有效性和可行性在 IEEE

30、IEEE 118 母线系统的仿真结果中得到了验证。

1 静态能量函数法和能量灵敏度矩阵

1.1 静态能量函数的数学模型

根据线路功率输送关系,多母线中各节点功率平衡等式^[11]为

$$f_i(\delta, U) = P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (1)$$

$$g_i(\delta, U) = (U_i)^{-1} [Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (2)$$

式中: P_{Li} 为节点 i 的注入有功; Q_{Li} 为节点 i 的注入无功; G_{ij} 为节点 i, j 之间的电导; B_{ij} 为节点 i, j 之间的电纳; δ_i, δ_j 分别是节点 i, j 的电压相角。

静态能量函数表达式为^[13]

$$E = \int_{(\delta^s, U^s)}^{(\delta, U)} [f(\delta, U), g(\delta, U)] \begin{bmatrix} d\delta \\ dU \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于具体的某个节点 i , 基于功率平衡的静态能量函数表达式为

$$E_i = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i(\delta_i, U_i), g_i(\delta_i, U_i)] \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $f_i(\delta_i, U_i)$ 、 $g_i(\delta_i, U_i)$ 分别为节点 i 的有功功率及无功功率平衡表达式。

将式(1)、式(2)代入式(4), 可得多母线系统中第 i 节点的静态能量函数 E_i 的表达式为

$$\begin{aligned} E_i &= \int [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \\ &= P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} - \\ &U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \cdot \\ &U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} + Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \cdot U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: (U_i, δ_i) 为当前运行情况下各个负荷节点电压值; (U_i^s, δ_i^s) 为系统处于稳定运行点的电压值。若代入临界参数值, 则 E_i 表示节点临界能量。

如果考虑并联电容器补偿, 式(5)修改为

$$\begin{aligned} E_{ci} &= \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \\ &= P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \\ &Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (6)$$

1.2 能量灵敏度指标构建

依据式(5)、式(6), 无功注入集合 Q 、电压 U 与能量 E 之间存在如图1的联系^[13]。

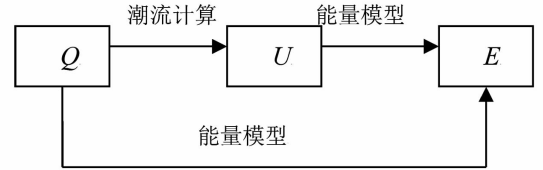


图1 无功注入集合、电压与能量之间的联系

利用静态能量函数法, 式(5)可得到各负荷节点在稳定运行点时的能量值 E_i 及临界条件下的能量值 E_{ci} 。随着负荷的持续增长, 电压呈不断下降的趋势, 稳态能量值亦逼近其极限能量值 E_{ci} ^[14]。由图1, 节点电压通过能量模型影响节点的能量值, 同时节点的无功注入作为变量直接影响该节点的能量值。节点能量与电压以及无功注入之间的相互关系表征了该节点电压随能量变化的趋势。由能量函数模型确定的节点能量状态与节点的无功、电压水平密切相关, 节点能量值能综合体现该节点的无功及电压状态。

文献[14]提出节点能量灵敏度指标表示节点电压随能量的变化趋势, 并由该节点的能量/电压趋势指标判定系统的电压弱节点, 该能量灵敏度指标重在表征节点电压 U_i 变化对节点 i 能量值 E_i 的影响。

为进一步研究邻近节点电压 U_j 波动对节点 i 能量值的影响, 提出节点能量相关度指标 τ_{ij} 来表示邻近节点间电压变化对本节点能量的影响:

$$\tau_{ij} = \frac{\partial E_i}{\partial U_j} (j=1, 2, \dots, n, j \neq i) \quad (7)$$

由于能量值 E_i 综合反映了该节点的电压和无功注入水平, τ_{ij} 的大小表征了不同节点电压的变化对本节点能量值的影响, 因此 τ_{ij} 的大小能够指示相邻节点与本节点无功相关的紧密程度, 亦即无功电压耦合程度。

1.3 能量灵敏度矩阵

由于节点的能量状态综合反映了该节点的无功以及电压水平, 基于这一思想, 构建一个与无功/电压水平紧密相关的能量灵敏度矩阵, 并基于此灵敏度矩阵进行 VCA 划分。

利用文献[14]构建的能量灵敏度指标及式(7)构建能量灵敏度矩阵D:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial U_1} & \frac{\partial E_1}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial E_1}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_1}{\partial U_n} \\ \frac{\partial E_2}{\partial U_1} & \frac{\partial E_2}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial E_2}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_2}{\partial U_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial E_n}{\partial U_1} & \frac{\partial E_n}{\partial U_2} & \cdots & \frac{\partial E_n}{\partial U_{n-1}} & \frac{\partial E_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

D是一个 $n \times n$ 矩阵(n 为系统节点数),其本质是以能量对电压灵敏度的形式反映了系统电压和无功的动态特性,该矩阵能分辨各相邻负荷点电压扰动对系统其他节点无功影响的差异。基于这一差异的大小,可将系统划分为若干解耦的区域。

D内各元素 τ_{ij} 反映的是节点*i*的电压波动对节点*j*能量值的影响,其大小表征了节点*i*、*j*的无功电压耦合程度。一般情况下 $\tau_{ij} \neq \tau_{ji}$,考虑到两节点的电气耦合对称性,基于能量信息的无功电压耦合函数为

$$S_{ij} = S_{ji} = \sqrt{\tau_{ij}^2 + \tau_{ji}^2} \quad (9)$$

式中, S_{ij} 为节点*i*、*j*间的电气距离,其值反映了节点*i*、*j*间的电气距离大小。 S_{ij} 越大,对应节点间的电气距离越小;反之节点间的电气距离越大。

2 多阈值的分区方法

阈值搜索分区方法是利用图论的基本理论并结合电力系统的结构特点来研究大系统的结构建模问题。其基本思想是^[8]:将系统的变量用图的节点表示,各变量间的相互关系用连接相应节点的边表示,各变量间的耦合强度用赋予每一条边的权重系数表示,从而可将一给定系统用图的形式表示;然后给定一个门槛值 α ,消去图中那些权重小于 α 的边,并对完成消去操作后图的节点进行重新安排,将其中不相连的各个子图区分出来,则这些子图实际上就表示相互间的耦合强度小于或等于门槛值 α 的子系统。这样,就可将一个系统分成若干个子系统。

为避免孤立节点的形成并真实地反应电网的实际情况,文献[10]及文献[11]提出一种更加符合电网实际运行状况的多阈值分解法用于电压控制分区,在理论和实践应用中取得了较好的效果。为终止搜索过程,根据聚类思想,取分区数量的限制条件为 $N_{\min} \sim N_{\max}$ 为 $2 \sim 2\ln n$ ^[10]。

下面利用文献[11]相关思路分解能量灵敏度

矩阵D。其具体算法是对一个 $n \times n$ 阶矩阵*S*进行多阈值分解,由于*S*是对称矩阵,只考虑上三角阵:

1)将*S*中的所有非零元素按其绝对值从大到小排列,得到 $m_1 > m_2 > \cdots > m_k$;

2) $k = 1, \alpha_1 = m_1 - \varepsilon, \varepsilon$ 为任意小的正数,利用基本的阈值分解法得到阈值 α_1 下的一种划分。确定分区个数 N_k ,若 $N_k < N_{\min}$ 或 $N_k > N_{\max}$ 就继续;

3) $k = k + 1$,重复步骤2)至步骤3),从节点集合中除去已被划分的节点,由新的阈值划分剩余的节点子集合,直到分区个数满足要求为止。

另外,由于电压灵敏度矩阵的各元素本身体现了电压对能量的灵敏度信息,在选取区域内主导节点时,可依据区域内各节点在电压灵敏度矩阵中值的大小确定,即将区域内电压对能量的变化最敏感者确定为该区域的主导节点。

3 算例仿真

以IEEE 30、IEEE 118母线系统进行算例分析,以验证上述分区算法的有效性。

3.1 30节点系统的分区结果

在IEEE 30节点系统的能量灵敏度矩阵中, $m_1 = \max(S_{ij}) = 0.534\ 1, \varepsilon = 0.002$ 。表1给出了在能量电压灵敏度矩阵下的多阈值分区结果。

表1 ESM下的多阈值分区计算结果

<i>k</i>	α_k	分解结果
1	0.532 1	(1,2)
2	0.242 5	(1,2,3,4),(5,7)
3	0.196 9	(1,2,3,4),(5,6,7,9)
4	0.180 5	(1,2,3,4),(5,6,7,9,10)
5	0.079 2	(1,2,3,4,12),(5,6,7,9,10),(22,24)
6	0.073 5	(1,2,3,4,12,13),(5,6,7,9,10),(14,15),(22,24)
7	0.059 7	(1,2,3,4,12,13,14,15),(5,6,7,9,10),(19,20),(22,23,24)
8	0.051 6	(1,2,3,4,12,13,14,15),(5,6,7,9,10,11),(19,20),(22,23,24),(28,29)
9	0.038 0	(1,2,3,4,12,13,14,15,16),(5,6,7,9,10,11,19,20),(8,22,23,24),(28,29)
10	0.020 3	(1,2,3,4,12,13,14,15,16),(5,6,7,9,10,11,18,19,20),(8,22,23,24,25,27,28,29,30)

最终获得的分区结果与文献[15]的结果对比如图2所示,图中实线、虚线分别是表示所提方法和

文献[15]中的方法。

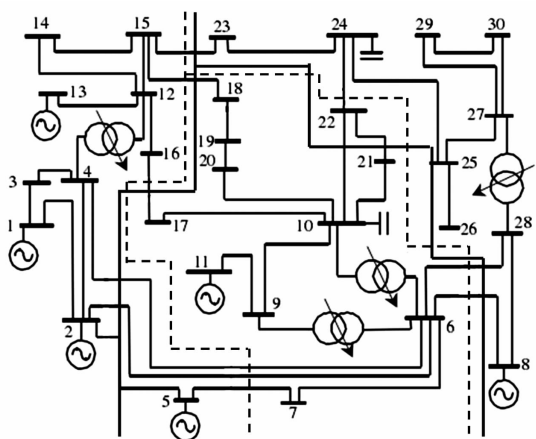


图2 IEEE 30 节点系统分区结果

图2显示了基于ESM的分区结果和文献[15]的结果的差异。由图2可看出,两种分区方法结果基本一致,不同仅存在于对节点5和节点22的划分。这里将节点5和节点22分别归于区域2和区域3,而文献[15]将节点2和节点22分别归于区域1、2。

事实上仿真结果显示,电压能量灵敏度矩阵中 $S_{25}=0.0025$, $S_{57}=0.4614$,表明节点7的电压波动对节点5将产生更大的影响,节点5和节点7之间的电气距离更近,节点2电压波动在节点5处产生的影响较节点7非常有限。因此,区域划分时应将节点5和7节点划归为一个区域。而文献[15]所

划分的区域1集中了6台发电机中的4台,为保证分区后各区域内发电机对本区域内电压的控制能力,所提方法将5号发电机归为区域2有其合理性。此外,文献[7]的分区结果在对节点5的处理上与所提方法一致。从另一侧面亦可验证所提方法结果的正确性。

3.2 118 节点系统的分区结果

IEEE 118 系统有 54 个发电机节点和 64 个负荷节点。利用 ESM 计算得到的最终分区数为 6 个,分区结果如图3虚线所示。

从图3所示的分区结果来看,利用ESM计算的仿真结果与文献[16]的基于复杂网络理论的分区算法及文献[17]利用的基于慢相关技术的分区结果基本一致。进一步分析区域间相联各支路的节点能量相关度指标 τ_{ij} 发现,各相联节点间的 τ_{ij} 已经非常小。以划分的区域1、2间的各边界支路为例,相联的各支路分别为(8,30)、(17,113)、(17,31)、(16,17)、(14,15),其 τ_{ij} 值分别为0.0059、0.0005、0.0308、0.0048、0.0073。迭代终止时的阈值为0.0956。这些边界节点间的 τ_{ij} 在迭代终止前依旧远小于迭代终止时的阈值,说明这些边界支路的电气距离很远,其相邻节点电压扰动对本节点的能量影响较小,因此各支路节点间的无功/电压的相互影响已非常有限。这一结果也说明所提分区方法能保

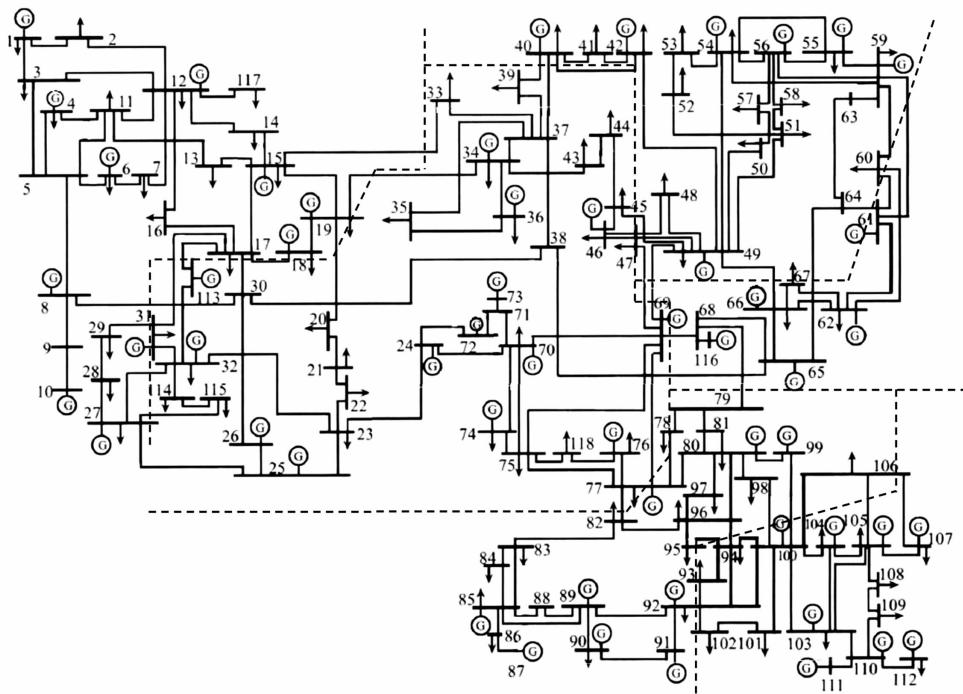


图3 IEEE 118 节点系统分区结果

证划分的区域内部节点联系紧密,区域外部弱耦合。

3.3 分区时间

算法采用 MATLAB 6.1 编程实现,在 CPU 为 1.80 GHz、内存 1 GB 的 PC 机上运行。计算时间如表 2 所示(不包括潮流计算的时间,最终计算时间为多次计算后取均值)。

表 2 计算分区的时间

节点系统	计算时间/s
IEEE 30	0.856 0
IEEE 118	2.523 6

所提方法是基于静态能量函数的数学模型,得到 ESM 后进行 VCR 划分,静态能量函数的数学模型决定了利用所提算法进行分区的速度优越性。

4 结 论

基于静态能量函数的数学模型,提出节点相关度指标用于构建系统的能量灵敏度矩阵,基于此,利用多阈值分解法提出一种电压控制分区的新方法。理论分析和算例仿真结果表明:

1)由静态能量函数构建的能量灵敏度矩阵能准确地反映各节点间电压和无功相关的紧密程度。最终划分的各区域满足“区域间弱耦合,区域内强联系”的分区要求,算例仿真的结果表明了该算法的有效性。

2)静态能量函数的数学模型决定了所提算法在速度上的优越性。特别是在大型网络分区的计算上时间优势更加明显,可望用于分区的在线计算。

3)所提出的基于能量灵敏度矩阵进行 VCR 划分的思想概念清晰,无需修改系统的网络模型,更接近实际运行的系统,较其他算法更易实现。

以上结论为无功电压控制分区方法提供了新的思路,对维护系统的电压稳定性具有现实意义。需要说明的是,由于能量函数的数学模型依赖系统的运行方式,其分区结果也取决于系统的运行方式。

参考文献

[1] 李宏仲,金义雄,程浩忠,等. 基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功规划[J]. 电网技术,2005,29(22):50-55.

[2] 盛戈崑,江秀臣. 基于多 Agent 的二级电压控制系统的实现及性能分析[J]. 电网技术,2005,29(24):42-

48.

[3] 冯光明,陆超,黄志刚,等. 基于雅可比矩阵的电压控制区域划分的改进[J]. 电力系统自动化,2007,31(12):7-11.

[4] Schlueter R A, Hu i, Chang M W, et al. Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power Systems,1991,6(1):285-292.

[5] Chang C S,Lu L R,Wen F S. Power System Network Partitioning Using Tabu Search [J]. Electric Power Systems Research, 1999,49(1):55-61.

[6] 刘大鹏,唐国庆,陈珩. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化,2002,18(3):18-22.

[7] 胡泽春,王锡凡,王秀丽,等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法[J]. 电网技术,2005,29(24):37-41.

[8] 范磊,陈珩. 二次电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化,2000,24(12):20-24.

[9] 方鸽飞,刘君华,吕岩岩. 基于树形分布的电压控制分区[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(1):83-87.

[10] 张忠静,陈刚,关仲,等. 基于阈值搜索和动态分散的电压/无功分区算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2006,29(12):52-55.

[11] 丁晓群,黄伟,章文俊,等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术,2004,28(14):44-48.

[12] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[13] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于能量信息的电压稳定性量化指标研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):8-13.

[14] 郑武,李华强,陈静,等. 基于静态能量函数法确定交直流系统最优无功补偿点的确定[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):45-49.

[15] Mori H, Takeda K. Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition [J]. IEEE Transactions on Power System,1994,9(2):789-795.

[16] 倪向萍,阮前途,梅生伟,等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术,2007,9(31):6-12.

[17] Yusof S B,Rogers G J,Alden R T H. Slow Coherency Based Network Partitioning Including Load Buses[J]. IEEE Trans. on Power Systems,1993,8(3):1375-1382.

作者简介:

郑武(1986),研究方向为电力系统规划;
康勇(1984),研究方向为计算机网络。

(收稿日期:2017-05-03)

1 静态电压稳定分析方法

1.1 静态电压稳定分析的基本原理

目前常用的静态电压稳定分析(以下简称静稳分析)方法均是基于潮流雅克比矩阵的最小奇异值与系统静稳极限之间存在对应关系,采用连续潮流方法求解常规的潮流代数方程,求取 $P-V$ 曲线和(或) $V-Q$ 曲线获得裕度指标^[5]。

连续潮流法指运用连续方法跟踪系统潮流方程稳态运行点随负荷或发电输出变化而变化的解曲线,它通过在常规潮流方程中引入一个变化参数并增加一维校正方程,采用预估-校正策略巧妙地解决当系统运行点接近临界点时潮流不收敛的难题,能顺利地穿过“鼻点”而不会有雅克比矩阵奇异的数值问题。

连续潮流计算方法主要有弧长连续法、局部参数法、延拓法等,主要包括方程参数化、预测环节、校正环节和步长控制4个环节。

通过不断增加区域负荷及联络线的功率,求解每个传输水平上的潮流解,可得到某监测母线上的 $P-V$ 曲线,可直观展示节点电压与负荷功率增长之间的曲线关系,如图2所示。在每个传输水平上均需要对可能的 $N-1$ 、 $N-2$ 故障进行扫描和筛选,确保筛选出最严重 $N-1$ 、 $N-2$ 故障。当潮流不能收敛时(雅克比矩阵奇异),即为稳定极限。 $P-V$ 曲线“鼻点”即为最大功率极限点。通过上述方法,可求出测试区域或联络线的静态稳定极限和系统的稳定裕度^[5]。

所采用的分析方法为基于连续潮流法的 $P-V$ 曲线分析方法,采用电力系统分析综合程序(PSASP)的静态电压稳定分析模块作为计算工具。

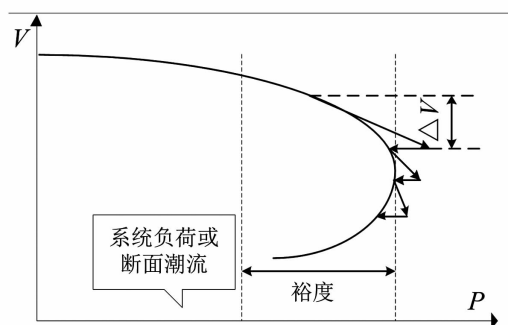


图2 连续潮流法

1.2 静态电压稳定主要指标说明

1) 区域负荷有功功率裕度

$$K_p = \frac{P_{\max} - P}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P 、 $P_{\max}$ 分别为区域正常有功和临界有功。

研究采用以下准则^[6]:在区域最大有功或最大断面潮流下,

①正常或检修方式下,应 $K_p > 8\%$;

② $N-1$ 方式下, $K_p > 5\%$;

③ $N-2$ 方式下, $K_p > 2.5\%$ (WECC标准)。

2) 母线负荷无功功率裕度

$$K_q = \frac{Q_{\max} - Q}{Q} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Q 、 $Q_{\max}$ 分别为初始、临界点的无功功率值。

推荐采用以下准则^[6]:在区域最大有功或最大断面潮流下, $N-1$ 方式下的 K_q 应大于5%,且应小于正常或检修方式下的 K_q 。

3) 节点电压的要求

①500 kV及以上母线以及发电厂和500 kV变电站的220 kV母线正常运行方式时,电压允许偏差为系统额定电压的0%~+10%;事故运行方式时为系统额定电压的-5%~+10%。

②220 kV变电站的220 kV母线以及发电厂和变电站的35~110 kV母线正常运行方式时,电压允许偏差为系统额定电压的-3%~+7%;事故运行方式时为系统额定电压的±10%。

4) 支路过载限制

检查计算区域内220 kV及以上的变压器和线路、变压器线路支路,故障前后均按照1.0倍额定电流考虑。

2 富宁换流站近区电网电压稳定性分析

对富宁换流站近区电网电压稳定性进行仿真分析,基于的运行方式如下:

1) 直流运行工况

永富直流的运行工况考虑了两种:分别为永富直流3 000 MW全送云南或全送广西两种工况。

2) 云南电网运行方式

云南电网计算负荷模拟到110 kV母线,基于2018年云南电网丰水期大负荷的典型运行方式。

2.1 静态电压稳定分析

对永富直流受端电网进行静态电压稳定性分析时,原则如下:

- 1) 负荷增长:永富直流受端所在地文山地区电网负荷增长,最大负荷增长量设置为4 000 MW。
- 2) 发电机出力增长:云南接入500 kV的主要大电源和永富直流受端所在地文山地区电网接入的电源。
- 3) 节点电压越限检测:设定计算区域内500 kV和220 kV母线节点电压满足1.0~1.1 p. u.,另外设置计算区域内全部发电机节点限制为0.95~1.05 p. u.。
- 4) 对该地区N-1、N-2故障进行了筛选,挑选了最为严重的4个故障进行静态电压稳定分析。4个故障分别为:500 kV 砚山变电站—富宁变电站线路N-1、N-2故障,500 kV 红河变电站—砚山变电站线路N-1、N-2故障。

2018年丰大方式下,永富直流受端所在地文山地区电网负荷有功功率裕度见表1,2018年丰大正常方式下P-V曲线如图3所示(其余P-V曲线略)。静态电压稳定分析表明:

- 1) 永富直流3 000 MW送电广西时,文山地区的有功功率裕度为44.89%,极限功率为2 866.5 MW;相对严重的故障为500 kV 红河变电站—砚山变电站线路三相短路故障,该线路N-1、N-2故障时文山地区的有功功率裕度分别为40.61%和

- 26.24%,均满足相关导则要求。
- 2) 永富直流3 000 MW送电云南时,文山地区的有功功率裕度为27.80%,极限功率为6 362.5 MW;相对严重的故障为500 kV 红河变电站—砚山变电站线路三相短路故障,该线路N-1、N-2故障时文山地区的有功功率裕度分别为27.41%和23.91%,均满足相关导则要求。
- 3) 从静态电压稳定计算结果来看,相较于永富直流3 000 MW送电广西,2018年丰大永富直流3 000 MW送电云南时,受端电网文山地区的受电规模增加,相当于馈入了相应容量的电源,文山地区的极限功率有所提高,但该文地区的有功功率裕度呈下降的趋势。

2.2 暂态稳定分析

尽管静态电压稳定分析为大规模电网的电压稳定分析提供了一种快速且可通览全貌的分析方法,但是静态方法给出的结果常常具有一定的保守性,需通过时域仿真工具进行校核^[7]。因此,基于前述静态结果,采用时域仿真工具对2018年丰大方式下富宁换流站近区电网的暂态稳定进行分析,研究采用PSD-BPA暂态稳定程序,计算中考虑的模型如下:

- 1) 发电机模型
- 发电机采用Eq''、Ed'变化模型,考虑自动励磁

表1 文山地区电网静态电压稳定计算结果

方 式	永富直流3 000 MW 送电广西			永富直流3 000 MW 送电云南		
	初始有功/MW	极限有功/MW	$K_p/\%$	初始有功/MW	极限有功/MW	$K_p/\%$
丰大正常方式	1 978.4	2 866.5	44.89	4 978.4	6 362.5	27.80
砚山—富宁 N-1	1 978.4	2 812.1	42.14	4 978.4	6 195.8	24.45
砚山—富宁 N-2	1 978.4	2 777.0	40.37	4 978.4	5 834.1	17.19
红河—砚山 N-1	1 978.4	2 781.8	40.61	4 978.4	6 343.1	27.41
红河—砚山 N-2	1 978.4	2 497.6	26.24	4 978.4	6 168.5	23.91

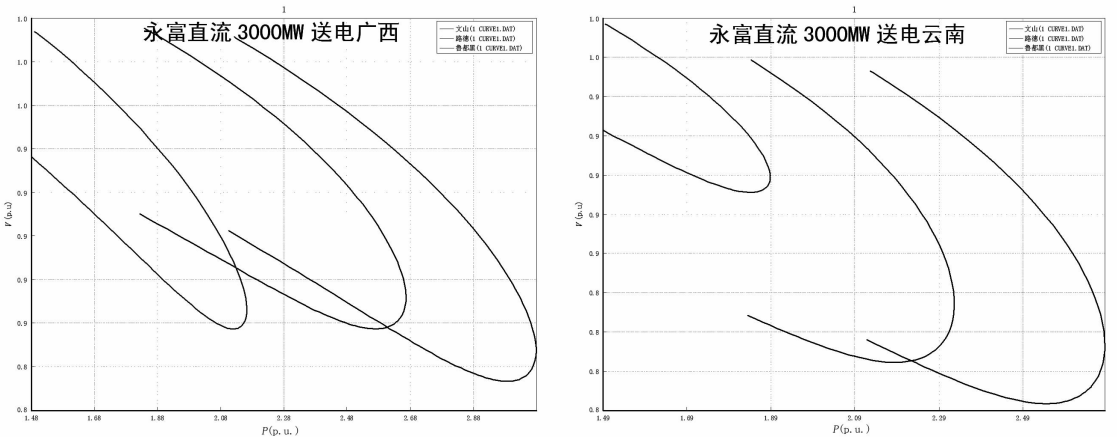


图3 P-V曲线

调节装置、调速器作用,机组容量大于 20 MW 的机组均投入 PSS,机组阻尼系数 D 取 0。

2) 直流模型
云广、溪洛渡、糯扎渡、金中、永富、鲁西背靠背直流系统采用 PSD - BPA 程序中的两端直流详细模型,考虑直流控制系统作用,控制方式为定功率,不考虑调制功能。

3) 负荷模型
负荷采用考虑频率特性的 ZIP 静态模型,由恒定阻抗、恒定电流、恒定功率并计及频率特性因子组成的综合负荷模型,对应于 PSD - BPA 程序中的 LB 型负荷模型,具体为:

云南电网:30% 恒定阻抗,30% 恒定电流,40% 恒定功率;
广西电网:30% 恒定阻抗,40% 恒定电流,30% 恒定功率;

有功负荷的频率因子 LDP 取为 1.2,无功负荷频率因子 LDQ 取为 -2.0。

4) STATCOM
富宁换流站考虑投入 3 组 ± 100 Mvar 容量的 STATCOM 装置。

在上述计算条件下,2018 年丰大方式,永富直流受端所在地文山地区电网的暂态稳定分析计算结果如下:

1) 永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地区的有功功率裕度为 109.9%,极限功率为 4 153.5 MW;永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 13.3%,极限功率为 5 640.0 MW,均满足相关导则要求。

2) 文山地区负荷逐渐增长至极限功率时,500 kV 红河变电站—砚山变电站线路 $N - 1$ 故障后出现电压失稳现象,系统不能够保持稳定。具体电压越限点为文山地区 110 kV 空山站为代表的负荷站点,故障后对应 110 kV 母线电压低于 0.75 p. u. 超过 50 Hz,如图 4 所示。

3) 永富直流 3 000 MW 送电广西时,永富直流发生双极闭锁和 500 kV 红河变电站—砚山变电站—富宁换流站线路发生 $N - 2$ 故障后,系统均能保持稳定;永富直流 3 000 MW 送电云南时,500 kV 红河变电站—砚山变电站—富宁换流站线路发生 $N - 2$ 故障后,系统失稳。

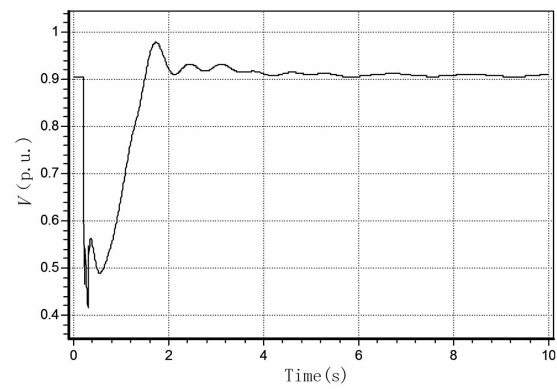


图 4 空山变电站 110 kV 电压曲线

3 富宁换流站 STATCOM 对弱交流系统电压稳定性影响分析

富宁换流站装设 3 组 ± 100 Mvar 的 STATCOM 装置后,提升了文山地区这种典型的受端电网的无功储备,同时 STATCOM 有着较快的响应速度,故障后为电网提供较好的电压支撑,提高了文山地区的安全稳定水平。对 STATCOM 的接入对文山地区电压稳定性的影响进行时域仿真分析,研究主要基于永富直流 3 000 MW 送电云南时的丰大运行方式。

时域仿真的故障为 500 kV 红河变电站—砚山变电站线路发生 $N - 1$ 故障。故障后富宁换流站 500 kV 交流母线电压曲线如图 5 所示,STATCOM 的无功出力曲线如图 6 所示,永富直流熄弧角曲线如图 7 所示。由仿真结果可以看出:

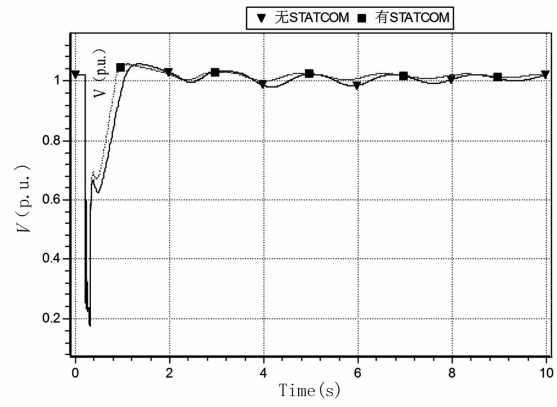


图 5 富宁换流站 500 kV 电压曲线

1) STATCOM 在故障后暂态过程中最大发出了约 +354 Mvar (+ 为容性, - 为感性,下同)的无功功率,向系统提供电压支持;在故障恢复过程中,STATCOM 的无功功率范围在 - 70 ~ + 107 Mvar 之间,最后基本稳定在 20 Mvar。有 STATCOM 时,500 kV 富

宁变电站的电压在由 1.020 p. u. 提升至 1.024 p. u. , 500 kV 砚山变电站的电压由 1.024 p. u. 提升至 1.027 p. u. ,220 kV 文山变电站的电压由 1.012 p. u. 提升至 1.014 p. u. ,220 kV 马关变电站的电压由 1.009 p. u. 提升至 1.011 p. u. ,其余文山地区的各厂站的电压水平均有不同程度提升。

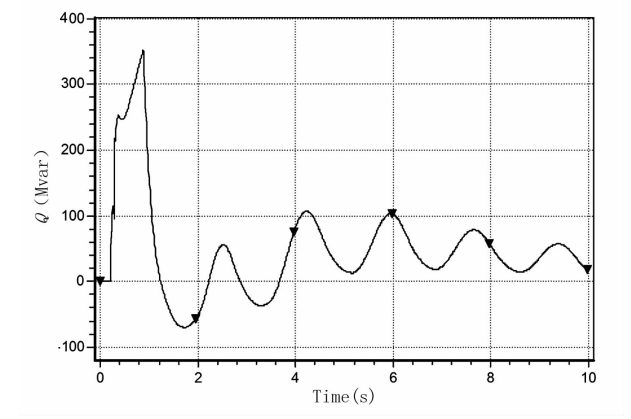


图6 富宁换流站 STATCOM 无功出力曲线

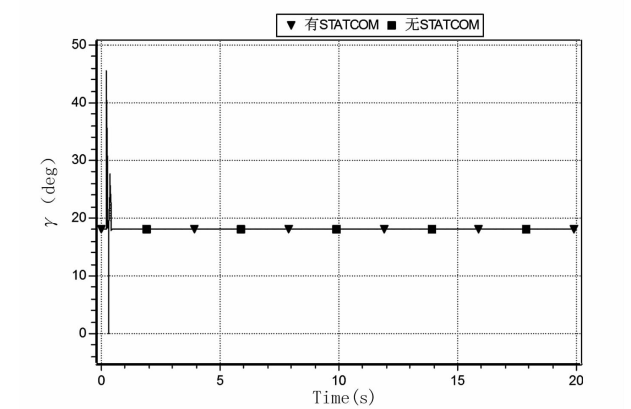


图7 永富直流熄弧角

2)直流母线电压在故障后迅速下跌至 0.9 p. u. 以下,富宁换流站熄弧角跌至 7°以下,直流发生换相失败。故障消失后富宁换流站熄弧角逐渐恢复,直流功率逐渐提升,直流功率在 1.0 s 左右达到额定功率。在故障过程中,STATCOM 在故障发生 20 ms 后迅速响应,为系统提供电压支撑,最大无功出力达到 +322 Mvar;从仿真曲线可以看出,相较于无 STATCOM 时,富宁换流站 500 kV 交流母线电压恢复更快,恢复后的电压稳态值更高,直流功率换相失败后的恢复过程也更快。

4 结 语

1)永富直流受端电网静态电压稳定分析:2018 年丰大方式永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地

区的有功功率裕度为 44.89%;永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 27.80%。上述两种直流运行工况下,发生 $N-1$ 、 $N-2$ 故障后文山地区的有功功率裕度均满足相关导则要求。

2)永富直流受端电网暂态稳定分析:永富直流 3 000 MW 送电广西时,文山地区的有功功率裕度为 109.9%;永富直流 3 000 MW 送电云南时,文山地区的有功功率裕度为 13.3%,均满足相关导则要求。永富直流送电云南时,500 kV 红河变电站—砚山变电站—富宁换流站线路发生 $N-2$ 故障后,系统失稳,稳定水平较永富直流送电广西时下降。

3)富宁换流站 STATCOM 对弱交流系统电压稳定性影响:富宁换流站装设 3 组 ± 100 Mvar 容量的 STATCOM 装置后,提升了文山地区这种典型的受端电网的无功储备;同时 STATCOM 有着较快的响应速度,故障后为电网提供了较好的电压支撑,使得直流在换相失败后的恢复过程中更为迅速,富宁换流站 STATCOM 提高了文山地区电网的安全稳定水平。

参考文献

[1] Kunder P. Power System Stability and Control[M]. 北京:中国电力出版社,2002:351-354.
[2] TAYLOR C W. 王伟胜,译. 电力系统电压稳定[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
[3] Van Thierry C, Costas V. Voltage Stability of Electric Power Systems (1 ed.) [M]. Springer, 2007.
[4] Van T Cutsem. Voltage Instability: Phenomenon, Countermeasures and Analysis Methods [J]. IEEE Proc., 2000(88): 208-227.
[5] 陈刚,李鹏,门锬. 静态电压稳定分析在南方电网应用研究[J]. 南方电网技术,2013,7(2):16-20.
[6] 中国南方电网有限责任公司企业标准. Q/CSG 11004-2009 南方电网安全稳定计算分析导则[S]. 广州:中国南方电网有限责任公司,2009.
[7] 范成围,陈刚,王晓茹. 大规模电力系统静态电压安全评估[J]. 电网技术,2017,41(7):2263-2271.

作者简介:

曾雪松(1984),工程师,主要从事电力系统规划与设计;
徐 志(1984),高级工程师,主要研究方向为继电保护与电能质量;
范文飞(1989),助理工程师,主要从事电力系统规划与设计;
伍文城(1977),高级工程师,主要研究方向为电力系统规划、电力系统仿真技术及电力市场。

(收稿日期:2017-08-14)

数据挖掘在智能电网中的应用研究

袁丽娟,袁方

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:电力大数据已成为电网公司进行决策的基础,但单纯数据的积累并不能给电网公司带来益处。因此充分利用这些基于电网实际的数据,对其进行深入分析,发现隐含的信息并加以利用,对指导电力企业做出正确的决策具有重大意义。提出了数据挖掘在智能电网中的应用场景,把数据挖掘技术应用于电力负荷预测,研究了在智能电网中应用数据挖掘技术的方法。

关键词:数据挖掘;智能电网;负荷预测

Abstract: In the age of large power data, large data has become the basis for power companies to make decisions. But the simple accumulation of data can't bring benefits to the grid companies, so making full use of these actual data based on the grid, carrying on the thorough analysis, finding the implied information and using them to guide the power companies to make the right decision - making is of great significance. The application scenario of data mining in smart grid is put forward, and the data mining technology is applied to power load forecasting to study the method of applying the data mining technology to smart grid.

Key words: data mining; smart grid; load forecasting

中图分类号:TM769 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0015-03

0 引言

随着中国智能电网的加快建设和发展,电网系统中积累了大量的电网基础数据,为智能电网建设带来了新的机遇与挑战,同时成为电力生产和运行模式发生变革的重要驱动力。从海量数据中提取出蕴藏的关系和规则等信息,并且根据已有的历史数据,预测未来的发展趋势,为电力企业业务管理向着更精细、更敏捷、更有效发展提供决策支持,成为现今亟待解决的问题。针对这一状况,数据挖掘技术应运而生。

下面将介绍数据挖掘技术及其在智能电网中的应用,侧重研究数据挖掘在细分用户电力负荷预测中的应用。

1 数据挖掘技术

数据挖掘,又称为知识发现(knowledge discovery),数据挖掘技术通过对海量数据进行建模,并运用数理模型对企业的海量数据进行整理与分析^[1]。

通过对这些数据进行微观、中观乃至宏观的统计、分析、综合和推理,发现数据间的关联性、未来趋势以及一般性的概括知识等,这些知识性的信息可用来指导高级决策活动。

1.1 数据挖掘系统的分层

常用的数据挖掘系统,一般分成三层结构^[2],如图1所示。

底层是数据源,包括数据库、数据仓库等。数据挖掘并不完全要建立在数据仓库的基础上,但数据挖掘若能与数据仓库协同工作,则将大大提高数据挖掘的效率。

中间层是数据挖掘工具,利用数据挖掘方法分析数据库中的数据,包括关联分析、聚类分析、神经网络方法、粗糙集方法、遗传算法、模糊数学方法等。

上层是用户层,将获取的信息形象地展示给用户,便于用户理解和观察,可以使用可视化工具。

1.2 数据挖掘过程

为形成数据挖掘产业的统一规范,1999年欧盟等机构联合起草了数据挖掘工业界的标准过程CRISP-DM^[3-4](cross-industry standard process for data mining),即“跨行业数据挖掘标准流程”,它为

数据挖掘项目的生命周期提供了一个综合的描绘,它包括 6 个阶段:商业理解、数据理解、数据准备、建模、评估和部署,如图 2 所示。这些阶段之间并不存在绝对的顺序关系,各个阶段一定会有反复的过程。究竟下一步要执行哪个阶段或哪个特定的任务,取决于每个阶段的结果。

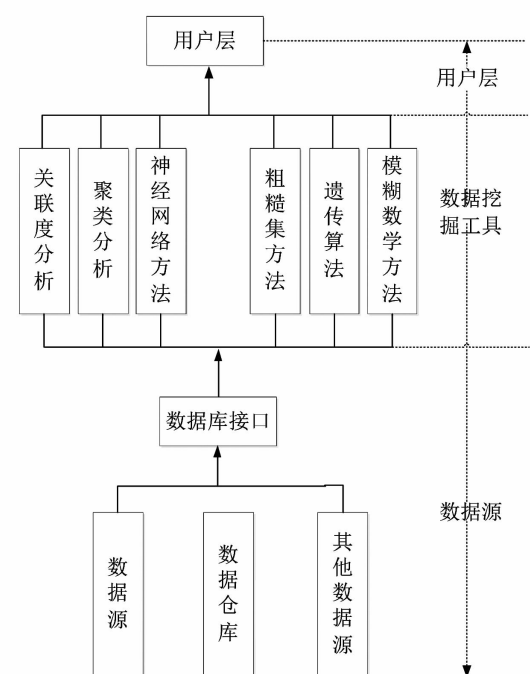


图 1 数据挖掘分层结构

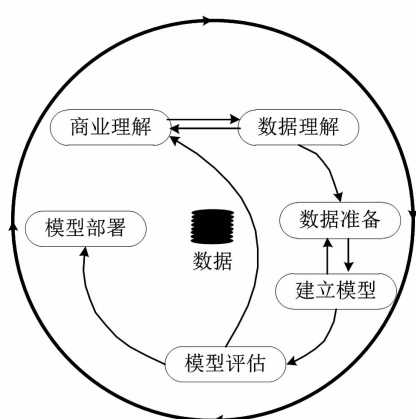


图 2 CRISP-DM 数据挖掘过程模型

- 1) 商业理解:这是数据挖掘的初始阶段,确定数据挖掘的目的,明确需要解决的问题,并将这些目的与数据挖掘的定义以及结果结合起来。
- 2) 数据理解:在业务分析目标的指导下,采集与业务对象有关的原始数据,并对可用的数据进行评估,并从中选择出用于数据挖掘应用的专门分析型数据库,以便提高数据挖掘的效率和结果的正确性。建立数据库可分为以下几个部分:数据收集、数

据描述、数据选择、数据质量评估、数据清理、数据合并与整合、构建元数据、加载数据挖掘数据库、维护数据挖掘库。

- 3) 数据准备:对可用的原始数据进行一系列的组织和清洗,以便达到建模的需求。此步骤可以划分为 4 个部分:选择变量、选择记录、创建新变量、转换变量。
 - 4) 建模:为实现数据分析目的,对预处理后的数据执行数据挖掘算法的过程。在实际应用中,通常在同一数据集上,应用多种数据挖掘算法,并通过对多个模型进行比较和选择,最终确定在当前数据集上使用效果最好的模型。
 - 5) 评估:对数据挖掘过程中的每个处理环节、步骤进行验证;对数据挖掘结果的质量、合理性、有效性等进行评价,重点考虑得出的结果是否符合第一步的商业目的。
 - 6) 部署:将发现的结果以及过程组织成为可读文本形式。
- 在模型部署和应用之后,还要不断监控模型的效果,随着使用时间的增加,可能需不断地对模型重新测试,甚至需重新建立模型。

2 数据挖掘在智能电网中的应用

2.1 智能电网数据特征分析

电网业务数据大致分为三类^[5-6]:1) 电力企业生产数据,如电压质量指标、发电量、电网检测等方面的数据;2) 电力企业运营数据,如交易电价、售电量等方面的数据;3) 电力企业管理数据,如一体化平台、协同办公等方面的数据。智能电网相比传统电网具有更高的智能化水平,需要采集的电网数据从 TB 级逐渐上升至 PB 级^[7]。

2.2 数据挖掘在细分用户电力负荷预测中的应用

随着中国售电市场^[8-9]的开放,今后用户可自由选择售电公司。电力企业“以人为本”的行业意识就需要提高,为了更好地了解电力用户用电的需求,电力负荷预测成为一项重要的工作。下面重点研究数据挖掘在细分用户电力负荷预测中的应用。

根据电力系统相关标准,按照数据挖掘工业界的标准过程 CRISP-DM,电力负荷预测数据挖掘系统的总体结构如图 3 所示。由图 3 可以看出该系统主要包括原始数据层、数据获取层、数据存储层和前

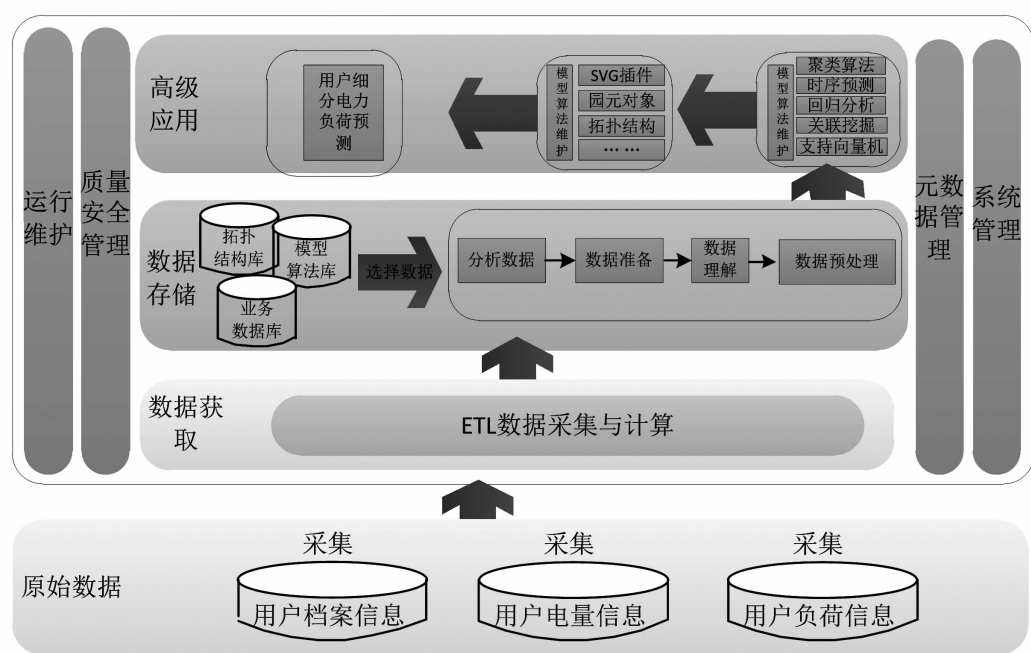


图 3 电力负荷海量数据挖掘系统

端应用层。

这里提出基于细分用户负荷预测方法。该方法分为用户细分与负荷预测两个主要步骤：

1) 用户细分

用户细分中涉及的主要指标包括行业分类、用电规模分类、用电类别分类、客户信用分类、用户地理位置分类等,因此大量的用户细分工作还需要通过聚类分析来自动地进行聚合。

数据预处理:基于需求侧用户个性化的客户价值、客户的用电可靠性要求和客户行为的特征,先用聚类算法对行业用户进行了分组,将具有类似用电特征的用户聚集在同一组内,以便充分了解群组的用电特征^[10]。

常用的聚类算法包括:①K - Means 算法,通过各个属性间的距离度量值对输入的数据对象进行划分;②基于统计的 COBWEB 聚类,是一种增量式概念聚类方法,输入对象是采用符号量(属性 - 值)对来加以描述的,采用分类树的形式来创建一个层次聚类;③EM 算法,使用统计方法来确定各个分类中存在该用户的概率,由此可以对用户依照概率大小进行区分。

2) 负荷预测模型

针对分组后的用户组分别利用不同的时序预测算法进行负荷建模与预测,再将不同预测方法得到的预测结果进行加权平均。使用的预测方法主要有:RBF 神经网络、BP 神经网络、回声状态网络、支持向量机等。

首先将各个用户群组的时间序列历史数据进行汇总分析,对每个群组内的计量点进行实时负荷叠加,分别得到叠加后的各点实时负荷序列数据。建立每个群组的实时负荷序列数据后,计算出该群组内每个日最大负荷值。不同日最大负荷构成该群组的日最大负荷序列,这样就得到每个群组的最大日负荷历史序列数据。在构建出每个群组的实时负荷历史序列数据后,计算出该群组内每个月最大负荷值,不同月最大负荷构成该群组的月最大负荷序列,得到每个群组的最大月负荷历史序列数据。这样,就分别得出了各用户群组的实时负荷、日最大负荷及月最大负荷历史数据,由此得到完整的负荷预测模型。

该方法在可接受的时间成本下,能尽可能多地了解不同行业、不同类别用户的用电需求,对发电调度、有序用电、精益化市场营销具有重要的指导价值。

3) 负荷预测模型分析

在进行负荷预测时,遵循“先细分、再预测”的原则,即先对用户属性进行选择,并利用聚类算法将用户负载细分为不同特性分类;再分别利用不同时序预测算法进行负荷预测,最后将各种预测算法下的负载预测结果进行加权求和,形成最终预测结果。另外还将预测结果与实际数据进行比较,对预测结果进行评价,并反馈至预测模型,通过调整建模参

(下转第 46 页)

边远地区局域电网供电问题研究

何志强¹, 郑 勇¹, 张立锋², 益西措姆², 晏小彬¹, 范 宇¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
2. 国网西藏电力有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:边远地区局域电网供电问题可供选择的解决方案有建设当地电源和与其他电网联网两类, 需要结合当地能源资源及电网建设条件进行多方面综合比较后采纳最优方案。以西藏阿里电网为例, 根据其能源资源和电网现状及发展规划, 对其供电问题解决方案进行了分析比较, 最后提出推荐方案并对相关问题进行了总结。

关键词:边远局域电网; 供电问题; 联网; 本地电源

Abstract: Building local power station and integrating with the other power grid are the alternative solutions for power supply problems of the independent power grid in the remote areas. The best option should be adopted after a number of comprehensive comparisons combined with local energy resources and power grid construction conditions. Taking Ali Power Grid of Tibet for example, the solutions for power supply problems are analyzed and compared according to the energy resources, power grid status and development planning of the power grid. The recommended schemes are put forward and the related problems are summarized finally.

Key words: remote independent power grid; power supply problems; interconnection; local power station

中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0018-04

0 引 言

目前, 中国绝大部分区域已经被大电网覆盖, 但是在一些边远海岛、边防地区和西部边远山区仍然存在独立供电的局域电网, 主要采用柴油机、小水电或者风光储系统进行供电。随着局域电网用电负荷的增加及其对供电可靠性要求的提高, 加之大电网向这些区域周边地区的进一步延伸, 选择自身建设电源继续保持孤网运行还是与大电网实现联网是值得研究的问题。

边远地区局域电网本质上属于微电网。目前关于微电网规划的研究已有很多, 其研究主要集中在可再生能源代替传统能源发电组成孤立系统, 如许多文献对独立运行的风力发电、光伏发电、风光互补发电的小型孤立系统做了研究, 重点探讨了小型孤立系统的可靠性计算和能源优化配置问题^[1-2]。现有研究成果表明, 将微电网接入大电网运行, 也是发挥微电网效能的重要手段之一。最终需要结合当地用电需求、能源资源及电网建设条件进行多方面综合比较后采纳最优方案。下面将以西藏阿里电网为

例, 根据其能源资源和电网现状及发展规划, 对其供电问题解决方案进行了分析比较, 最后提出推荐方案并对相关问题进行了总结。

1 阿里地区电力系统概况

1.1 能源资源和主要电源现状

阿里地区的能源资源种类较多, 其中水能、太阳能、风能和地热能^[2]较为丰富, 煤炭、天然气等化石能源则较为贫乏。

阿里地区已建电源主要包括狮泉河水电站、阿里光伏电站和柴油机组。其中狮泉河水电站装机容量为 6.4 MW, 年均发电量约 13.4 GWh。阿里光伏电站总装机容量 10 MW, 电站多年平均年发电量 18.37 GWh。阿里地区柴油机组包括阿里过渡电源、阿里应急电源和阿里渡冬电源, 合计装机容量 28.2 MW。

1.2 电网现状

目前, 西藏自治区形成了覆盖拉萨、山南、日喀则、那曲、林芝 5 个地市的西藏中部电网和昌都、阿里共“一大二小”3 个地市级独立电网以及由农村小

水电、太阳能光伏电站供电的众多独立小电网和分散户用系统,构成了大电网供电和分散独立电源供电相结合,多能互补的供电格局。

阿里地区位于中国西藏自治区的西部,面积超过 $30\times10^4\text{ km}^2$,平均海拔4 500 m,共辖噶尔、普兰等7 个县,人口仅80 000 人,是世界上人口密度最小的地区。目前,阿里电网最高电压等级为110 kV,仅覆盖阿里地区行署所在地噶尔县狮泉河镇及周边部分地区。

截止到2016 年年底,阿里电网电源装机容量为44.6 MW。2016 年,阿里电网最大用电需求约为10.1 MW,电量需求约为4.7 GWh。

“十三五”期间阿里电网覆盖范围将扩大到全部7 个县。由于负荷快速增长,阿里电网电力供需矛盾将十分突出。

1.3 电网规划简述^[3]

1) 负荷预测

2020 年阿里电网需电量为70 GWh,最大负荷为19.7 MW;2025 年阿里电网需电量为90 GWh,最大负荷为25.1 MW;2030 年阿里电网需电量为110 GWh,最大负荷为31.3 MW。

2) 电源规划

阿里电网2017 年规划投产阿里热电联产项目(12 MW);2020 年左右将投产阿青电站($4\times8.25\text{ MW}$),新增装机33 MW。

“十三五”以后阿里电网暂无明确的规划电源投产。

3) 电力供需平衡

根据阿里电网负荷预测和电源规划,其电力电量平衡结果见表1 和表2。为便于联网方案与其他建设电源方案进行比较,同时考虑到规划电源的不

表 1 阿里电网电力平衡

项目	2020 年		2025 年		2030 年	
	丰期	枯期	丰期	枯期	丰期	枯期
系统需要容量/MW	15.8	22.6	20.2	28.9	25.2	36
电源可调出力/MW	6.4	4.8	6.4	4.8	6.4	4.8
电力盈亏	-9.4	-17.8	-13.8	-24.1	-18.8	-31.2
缺电比例	59.5%	78.8%	68.3%	83.4%	74.6%	86.7%

表 2 阿里电网电量平衡

项目	2020 年	2025 年	2030 年
系统需要电量/GWh	66	86	109
电源可发电量/GWh	31	31	31
电量盈亏	-0.35	-0.55	-0.78
缺电比例	53.0%	64.0%	71.6%
最大缺额小时数/h	1 948	2 273	2 493

确定性,平衡只纳入现状电源。从电力平衡结果来看,如果只考虑现状电源,阿里电网缺电问题将十分严重。

1.4 可选电源概况

根据阿里地区能源资源状况,除阿青水电站外,暂无其他规划水电电源;再建设柴油机组存在可能性;建设地热电站和光热电站作为主力电源理论上是可行的,但由于目前前期工作开展程度较低,其开发存在一定的不确定性。

2 阿里电网供电问题解决方案研究

2.1 概述

根据前述阿里电网电力空间分析计算结果,如果只考虑现状电源,“十三五”期及以后阿里电网将一直存在电力缺额。

除本地建设电源外,解决阿里电网供电问题可供选择的方案还包括与其他电网联网^[5-8]。与阿里电网毗邻的新疆电网和西藏中部电网规模均为阿里电网的数十倍以上,具备补充其电力缺额的条件。

2.2 电源建设方案选择

1) 建设热电联产机组

阿里热电联产项目初期建设规模为 $2\times6\text{ MW}$,最大可用出力为9.5 MW。为满足直到2030 年阿里电网负荷发展需要,需至少分批投产6 台6 MW 机组。

建设阿里热电联产项目存在的问题是需要解决煤炭运输和电厂运行过程中的环保问题。

2) 建设地热电站机组

可以根据阿里电网电力空间分批分步建设地热机组。阿里地区建设地热电站存在的问题是地热资源未探明,具体开发方案无法确定。

3) 建设太阳能热机组

阿里地区建设光热电站的问题在于阿里电网所需容量相对较小,而一般太阳能热发电需要大规模建设才能降低单位造价,此外阿里地区建设光热电

站采用何种技术还需要进一步研究。

4) 建设水电机组

除阿青水电站外,阿里地区暂无其他较大规模的规划水电电源。

建设阿青水电站存在如下问题:

①建设周期较长,不能及时满足阿里电网负荷发展需要;

②由于阿里电网规模相对阿青水电站容量较小,阿青水电站投产后较长时间内存在大量弃水的问题;

③由于长期弃水,阿青水电站实际单位成本电价将大大提高。按照运行期内年均弃水电量 60% 考虑,其单位成本电价将增加到 6.9 元/kWh 左右。

5) 燃油机组开机方案

根据阿里电网电力市场空间分析结果,阿里地区柴油机组全部修复后,可满足阿里电网直到 2020 年的电力负荷发展需求。

根据目前运行资料,按年运行小时数 1 000 ~ 3 000 h 考虑,其单位成本电价约为 4.0 ~ 5.0 元/kW。

阿里地区燃油机组开机存在如下问题:

①运行成本较高,长期需要对其进行燃油补贴。

②阿里地区海拔高、气压低、空气稀薄,燃油机组燃烧状况恶化和燃烧不充分,这会加速柴油机组零部件的磨损,缩短了其空滤器等部件的使用寿命,因此阿里地区柴油机组故障率极高,运维检修难度极大。

③燃油机组的运行会产生碳烟排放,将会带来环保问题。

2.3 联网方案选择

1) 联网方向分析

根据周边电网现状及规划,阿里电网与其他电网联网,有 3 个可能的方向。

①通过日喀则电网与西藏中部电网相连。

其一是经门士乡通过仲巴县与西藏中部电网相连(噶尔县门士乡到日喀则仲巴县帕羊区公路距离 370 km)。

其二是经革吉县、改则县、措勤县通过萨嘎县与西藏中部电网相连(革吉县到改则县公路距离约 360 km)。

②通过南疆三地州电网与新疆电网相连。

相比之下与新疆电网联网方案线路距离远长于其他两个方案,可行性明显较低。

与西藏中部电网联网两个方案中,通过仲巴县与西藏中部电网联网实际联网距离短,并且建设条件相对较好。相比之下,通过萨嘎县与西藏中部电网联网方案中联网线路有明显较大迂回,线路建设条件也相对恶劣。综合考虑后,推荐经门士乡通过仲巴县与西藏中部电网联网为阿里电网与外区电网联网方向。

2) 联网方式分析

从联网距离来看,推荐方案中阿里电网与外区联网的距离在 370 km 左右。从送电容量来看,到 2030 年阿里电网最大电力负荷也不到 40 MW。

从联网距离和送电容量的角度分析,阿里电网实现与外区联网有直流联网和交流联网两个可能的方式。

对于直流联网方式,存在常规直流和轻型直流两类方案。常规直流对客观存在端电网的系统强度有一定要求,有最低输送有功功率限制,且其稳定运行易受交流系统影响。阿里电网自身规模较小,系统强度低,采用常见直流方案受电基本不可行。轻型直流具有高度的可控性,对受端系统强度无要求,无最低输送有功功率限制。初步设想阿里电网与西藏中部电网联网轻型直流联网方案可采用 ± 100 kV 电压等级,投资大约为 29 亿元。

根据目前交流电网发展现状及西藏中部电网“十三五”发展规划,结合阿里电网可能的联网距离和送电容量,交流联网方案中联网电压等级采用 220 kV 可以满足阿里电网负荷发展需要,联网工程投资大约为 7 亿元。

相比之下交流联网方案总投资远远低于轻型直流联网方案,送电能力可以满足阿里电网负荷发展需要,因此推荐为阿里电网与外区电网联网方式。

2.4 供电方案技术经济比较

1) 方案经济性

根据方案成本电价比较结果(详见表 3),建设热电联产项目和联网方案成本电价同其他方案相比有明显优势。在联网工程交换容量较大时(如按 2030 年缺电容量送电),联网方案的优势将更加明显。

2) 建设周期

燃油机组开机方案初期只需修复阿里过渡电源故障机组。建设热电联产机组、建设地热机组、建设光热电站和联网方案建设周期基本均在 24 个月以内,其差别不大。由于地处边远,建阿青水电站方案

的建设周期最长(至少48个月)。

表3 供电方案成本电价比较表

方 案	成本电价	备 注
1. 建设热电联产机组	1.6~3.7 元/kWh	利用小时 1 000~3 000 h
2. 建设地 热机组	4.1 元/kWh	利用小时 2 500 h
3. 建设光 热电站	3.7 元/kWh	利用小时 2 500 h
4. 建设 水电站	6.9 元/kWh	年均弃水 电量 50%
5. 联网方案	1.2~2.5 元/kWh	购电成本 0.2 元
6. 柴油机组 开机方案	4.0~5.0 元/kWh	利用小时 1 000~3 000 h

3) 环保问题

建设地热机组、建设太阳能热发电机组、建设水电机组利用的是清洁能源,只要采用合理的技术方案,不会带来环保问题。与藏中电网联网是从外区引入电力,也不会对阿里地区环境造成影响。

建设热电联产机组和燃油机组开机方案使用的是化石能源,其运行和运输过程中有可能会对环境造成污染。

4) 建设方案灵活性

可根据阿里电网电力空间分批分步建设地热机组和热电联产机组,建设方案较为灵活。

一般太阳能热发电需要大规模建设才能降低单位造价。阿里电网初期建设1台10~15 MW 的太阳能热机组,后期适时建设第2台机组,可满足到2030年电力负荷发展的需要。

分期分批投产水电机组对降低工程造价没有明显意义,其建设灵活性相对较差。

由于本身送电容量不大,联网方案分期建设其总投资也不会有显著下降,因此其建设灵活性也相对较差。

2.5 推荐供电问题解决方案

根据各方案技术经济比较结果,作为阿里地区供暖项目的配套,阿里热电联产机组具有经济性较优、建设周期短、建设方案灵活性高和技术方案及可行性较为明确的优势,因此推荐作为阿里电网近期电源建设方案。

联网方案由于经济性相对较好,建设周期较短,可大大提高阿里电网供电可靠性,能应对电源建设进度的不确定性,建成后可以从根本上解决阿里电网用电问题,因此推荐为阿里地区“十三五”期及以

后供电解决方案。

3 结 语

边远地区局域电网供电问题最终解决方案需要在充分考虑用电需求和当地能源资源及电网建设条件的前提下,从投资成本、运行维护成本及难度、建设周期及建设灵活性、环境因素和方案实施可行性全方面综合比较后进行选择。自身建设电源和与大电网实现联网均是可供选择的方案。

考虑与大电网联网后,仍应充分考虑自身电源与大电网来电的互补;同时还要考虑联网转为孤网的可能,要保证短时孤网运行的稳定性及重要供电负荷的可靠性。建议可通过设立一些评价指标,如经济指标、可靠性指标、技术指标和环境指标等,对供电解决方案进行合理的评价^[9-10]。

参考文献

[1] 陈一诚,王志新. 适用于海岛的独立供电电源规划设计[J]. 电网与清洁能源,2013,29(4):78-84.

[2] 吴涛涛,赵宏伟,李伟. 基于分布式电源的孤立系统规划初探[J]. 继电器,2007,35(8):31-36.

[3] 国网西藏电力有限公司,西南电力设计院. 西藏电网“十三五”发展规划[R]. 2015.

[4] 廖忠礼,廖光宇,潘桂棠,等. 西藏阿里地热资源的分布特点及开发利用[J]. 中国矿业,2005,14(8):43-46.

[5] 李骈文,陈冠南. 西北电网与周边电网的联网规划[J]. 中国电力,2000,33(7):52-54.

[6] 黄明良,张卫东. 西北与华中电网多点联网有关问题探讨[J]. 中国电力,2007,40(11):46-50.

[7] 张育英. 全国联网战略方案的探讨[J]. 电网技术,1998,22(4):56-59.

[8] 何志强,扎西,郑勇,等. 西藏昌都电网联网方案探讨[J]. 四川电力技术,2011,34(4):77-79.

[9] 曹智平,周力行,张艳萍,等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):10-15.

[10] 符杨,黄旭峰,李振坤. 微电网电源的规划体系[J]. 上海电力学院学报,2011,27(5):477-481.

作者简介:

何志强(1979),高级工程师、硕士,主要从事西藏电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2017-06-27)

福州特高压变电站短路电流分流系数计算与分析

杨凌霜, 邹家勇, 余 波

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:变电站内发生短路故障时真正引起危害的是入地故障电流,而不是短路故障电流。分流系数表征了接地网或架空地线对故障电流的分流能力,可用于分析短路电流的分布情况。研究了变电站站内故障时短路电流的分流机制,提出了适用于工程实际的分流系数定义,重点介绍了分流系数的数值计算方法。在此基础上计算了福州特高压变电站的分流系数与短路入地电流,并分析了分流系数的各种影响因素。分析结果表明:地线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大,随着杆塔接地电阻的增大而减小;500 kV 侧和 1 000 kV 侧短路时地线分流系数差别较小;随着变电站接地电阻的增大,最大入地电流减小,接地电压增大。

关键词:变电站站内短路;分流系数;接地电阻;短路电流;接地电压

Abstract: When a short - circuit fault occurs in a substation, it is the current diffusing into ground that actually causes the safety trouble instead of the fault current. Shunt coefficient characterizes the shunt ability of grounding grid or overhead ground wires to fault current, so it can be used to analyze the distribution of short - circuit current. The shunt mechanism of short - circuit current is studied when a fault occurs in substation, a definition of shunt coefficient that is more suitable for engineering practice is proposed, and the numerical computation method of shunt coefficient is introduced. On this basis, the shunt coefficient and current diffusing into ground of Fuzhou 1 000 kV substation are calculated, and various factors affecting the shunt coefficient are analyzed. The results show that shunt coefficient of ground wire increases with the increase of substation grounding resistance and decreases with the increase of tower grounding resistance, the differences of shunt coefficient of ground wires is tiny when short - circuit fault occurs in 500 kV side and 1 000 kV side. With the increase of substation grounding resistance, the current diffusing into ground decreases and the ground potential rise increases.

Key words: short - circuit fault in substation; shunt coefficient; grounding resistance; short - circuit current; grounding voltage

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)05 - 0022 - 05

0 引言

变电站良好的接地是电力系统安全运行的根本保证。电力系统短路故障一般分为变电站站内短路和站外短路两种类型。与站外短路相比,站内短路对变电站安全运行危害更大,更容易引起事故。因此这里主要研究变电站站内短路故障^[1]。

变电站内部短路故障电流可分为地线分流、变压器中性点回流和入地电流三部分,真正产生严重危害、危及人身和设备安全的是入地故障电流。根据 GB/T 50065 - 2011《交流电气装置的接地设计规范》的规定^[2],变电站接地系统设计时不仅需要校核短路电流的大小,还需要分析系统短路分流情况,从而准确计算短路入地电流,为接地网设计提供依据^[3]。

变电站接地系统的分流系数是指入地故障电流与短路故障电流的比值。分流系数的合理选择是变电站接地系统设计的基础,直接关系到变电站的安全运行^[4]。变电站分流系数与短路故障的类型和位置、系统的结构与参数、变电站和杆塔接地电阻、相线和架空地线参数等多种因素有关,精确计算分流系数非常困难。目前获得分流系数的方法主要有经验公式法和数值算法,经验公式法模型简单但计算精度较低^[5],数值算法考虑模型相对复杂,计算结果较为准确^[6]。因此下面重点介绍分流系数的数值计算方法。

1 计算条件

所研究的变电站为福州特高压 GIS 变电站,1 000 kV 侧有两回进线,都为单回线路,分别为浙南

1 线和浙南 2 线;500 kV 侧有四回进线,都为同塔双回线路,分别为笠里 1 线、笠里 2 线、宁德 1 线和宁德 2 线。变电站内运行主变压器有两台,都是三相自耦变压器。变电站及线路参数如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 主变压器参数		
变压器数量	容量/MVA	短路电压百分比/%
2	1 000	18

表 2 导线参数			
线路名称	浙南 1 线 浙南 2 线	笠里 1 线 笠里 2 线	宁德 1 线 宁德 2 线
电压等级/kV	1 000	500	500
导线型号	8 × JL/G 1A - 500/45	4 × JL/LB 20A - 720/50	4 × JL/LB 20A - 720/50
分裂间距/mm	400	400	400
直流电阻 (Ω · km ⁻¹)	0.057 8	0.035 5	0.035 5
导线外径/mm	32.2	36.2	36.2
档距/m	400	475	483
线路长度/km	26.47	25.76	194.35

表 3 地线参数			
线路名称	浙南 1 线 浙南 2 线	笠里 1 线 笠里 2 线	宁德 1 线 宁德 2 线
地线型号	JLB20A - 240	JLB40 - 150	OPGW - 150
直流电阻 (Ω · km ⁻¹)	0.144 4	0.293 5	0.330 0
地线外径/mm	24.8	15.8	16.6

2 分流系数的计算方法

2.1 变电站站内短路电流分析

由于输电线路的架空地线和变电站接地网连为一体,短路故障电流从接地网入地时,一部分电流会通过变电站的地线从杆塔的接地装置和远端变电站入地。入地电流与总故障电流的比值(分流系数)受变电站接地电阻、线路地线电阻、杆塔接地电阻等的影响比较大。此外,架空地线与相导线之间的互感也会起很大作用。实际变电站发生短路故障时,故障电流由线路的相导线提供,即相导线作为电流引线,如图 1 所示。

由于相导线与地线保持长距离平行且二者之间的距离非常近,这会产生很大的线路互感。相导线提供的故障电流会通过互感的作用在地线中感应出

很大的反向电流,这部分电流是分走故障电流的主要部分之一。对于多回输电线路,由于互感的作用,提供故障电流多的线路地线分走的电流多,其他线路地线分走的电流少;同时,地线电阻和杆塔接地电阻也会分流起到一定作用。

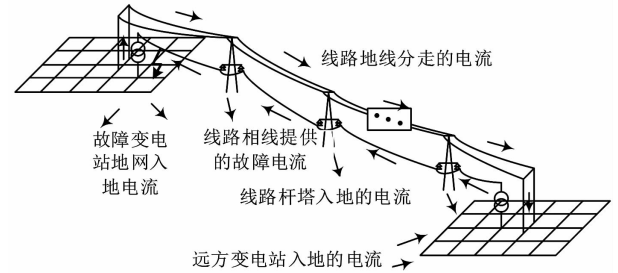


图 1 变电站站内故障电流路径

图 2 为变电站站内故障的等值电路^[7],图中: Z_{Gi} 为架空地线的零序自阻抗; Z_{Li} 为导线的零序自阻抗; Z_{Mi} 为导线和架空地线间的零序互阻抗; R_i 为输电线路杆塔的接地电阻; R 为变电站接地电阻; R_T 为终端电站的接地电阻; V 为发生短路故障前的电压源。为简便起见,图中给出的每档线路参数采用相同的标识,分析时可以根据实际情况将各接地电阻及阻抗采用不同的值。

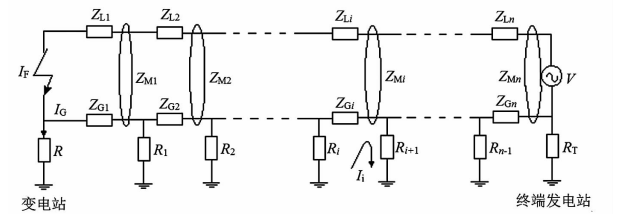


图 2 变电站内短路故障时的等效电路

变电站站内短路时,电流分布如图 3 所示^[8]。短路故障电流为 I_0 (工程设计中经常会提供该电流),该电流是由变压器两侧的无穷远端的电源提供的(无穷远端的电源未出现在图 3 中),而不仅仅来自于短路侧的电源。根据基尔霍夫定律,这些短路电流终将流回两侧的电源。由于是站内短路,因此部分电流 I_g 会直接通过接地系统由大地流向无穷远端的电源。由于变压器中性点和线路地线都连接在接地网上,因此也有部分电流通过变压器中性点(有时也包含发电机的中性点)和高压侧线路地线流出接地网,即 I_N 、 I_{w1} 和 I_{w2} 。对于通过地线流回电源的电流 I_{w1} 和 I_{w2} ,在逐级经过杆塔时又会有部分电流通过杆塔接地系统流向大地,即 I_{w12} 和 I_{w22} ,剩余电流 I_{w11} 和 I_{w21} 则继续通过地线流回电源。

2.2 站内故障的分流系数

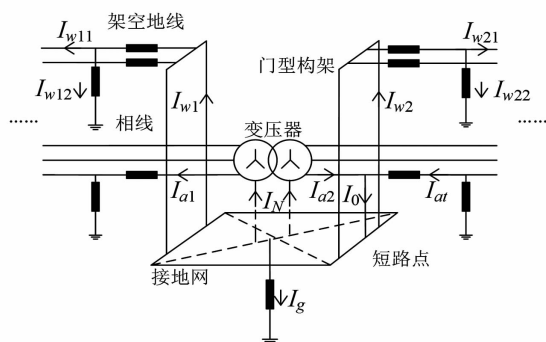


图3 变电站站内短路情况下的电流分布

由2.1节变电站站内短路电流的分流情况可以引出分流系数的定义。分流系数可以分为接地网的分流系数和地线的分流系数两个方面,分别表征变电站发生站内短路故障时,接地网和架空地线对短路故障电流的分流能力。

IEEE标准^[5]和国家标准^[2]中通常给出的是地线的分流系数 K_{sl} ,可表示为

$$K_{sl} = \frac{I_w}{I_0 - I_N} \quad (1)$$

式中, I_w 为所有流经地线的短路电流的总和。相应地,接地网的分流系数 K_{sg} 可表示为

$$K_{sg} = 1 - K_{sl} = \frac{I_g}{I_0 - I_N} \quad (2)$$

在实际工程中,真正引起危害、带来安全问题的是入地故障电流 I_g 。接地系统接地电阻的安全阈值由入地故障电流 I_g 决定;接地电压、网孔电压、接触电压、跨步电压等也与入地故障电流成正比^[9];因此主要关注入地故障电流 I_g 及其对应的分流系数 K_{sg} 。

由于工程设计中经常提供短路故障电流 I_0 ,一般不提供通过变压器中性点电流 I_N ,并且 I_N 的计算比较复杂。因此为了方便设计人员使用,研究中的入地电流分流系数与前述标准规定不同,直接定义 I_g/I_0 为接地网的分流系数。

2.3 分流系数计算原理

数值计算是分流系数最准确的计算方法,即建立接地系统、输电线路、架空地线等电气元件的等值电路,然后利用电磁暂态分析程序进行求解。文献[10]考虑了耦合因素和线路的互阻抗,采用集中参数等值电路计算分流系数。文献[11]提出了串级矩阵法,即将每个线路档距的阻抗矩阵串联起来,该方法能考虑所有的自阻抗、互阻抗和故障类型及位置。文献[12]提出了一种用简单方程组求解接地

网及杆塔电流的方法。文献[13]采用图解法求得了分流系数与接地电阻等参数的一系列关系曲线,可以根据这些曲线方便地得到分流系数。

电力系统短路电流计算可分为序分量法和相分量法^[14-15]。考虑线路换位、架空地线接地、各导线间互感等实际情况,故障条件下各相电量之间的关系是不对称的。因此,正序、负序、零序分量存在相互耦合,此时不能采用传统的序分量法进行求解。相分量法对各相导线、架空地线和电缆外皮等线路参数没有对称条件的约束,因此运用相参数较为直观,也更为精确。求解相参数电路可以归结为基本的电路求解问题。

电力系统所有元件都可以用广义导纳矩阵进行模拟^[16],因此可以将每个元件表示为

$$I_k = Y_k V_k - b_k \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中: I_k 为元件终端电流向量; V_k 为元件终端的电压向量; Y_k 为元件的广义导纳矩阵; b_k 为独立电流源向量。式(3)的节点方程形式为

$$YV = b \quad (4)$$

式中: Y 为由各元件的导纳矩阵组成的整个系统的导纳矩阵; V 为各节点的电压向量矩阵; b 为由各电流源构成的独立电流源,对于输电线路模型 $b=0$ 。

对式(4)进行修改即可模拟故障时的情况。如果在节点 i 和节点 j 之间发生故障,则应在故障 Y 的 $Y_{i,i}$ 和 $Y_{j,j}$ 元素中加上故障导纳 Y_f ,在 $Y_{i,j}$ 和 $Y_{j,i}$ 元素中减去故障导纳 Y_f 。求解式(4)的方程即可得到各节点的电压,代入式(3)可得到电流分布。

将导纳矩阵进行分块则能快速求解所需的电流,得到分流系数。包括故障电流在内的节点方程为

$$Y_N V = b_N + I \quad (5)$$

式中: Y_N 为整个系统的无故障元件的导纳矩阵; b_N 为整个系统无故障元件的独立电流源向量; I 为系统与故障元件接口处的电流向量。

系统中的元件可分为故障连接元件和其他元件两部分,因此可以将式(5)分解为

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:下标1表示与故障元件相连接的元件;下标2表示系统其余元件; I_1 为与故障元件相连接的系统终端处的电流向量。式(6)可以转换为

$$Y_e V_1 = b_e + I_1 \quad (7)$$

式中: Y_e 为除了故障元件外的整个系统的等效导纳

矩阵, b_e 为等效独立电流源, 即

$$Y_e = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

(8)

$$b_e = b_1 - Y_{12}Y_{22}^{-1}b_2$$

(9)

通过这种转换可以将多元件系统等效为一个元件。在此基础上可以求出接地系统的接地电压和从变电站接地网流入大地的电流, 进而计算分流系数。

3 福州站分流系数与短路入地电流计算

变电站内部发生短路时, 其分流系数是由系统中的电流分布决定的, 因而其中影响分流系数的相关参数如下: 变电站接地网的接地电阻、杆塔接地装置的接地电阻、地线自阻抗、相线自阻抗、相线和地线间的互阻抗以及从母线看入系统的等值阻抗。变电站和杆塔的接地电阻是影响分流系数的重要因素, 研究中作为主要变化参数进行分析。

3.1 福州站分流系数计算

由于线路杆塔接地电阻可能有变化, 将线路杆塔接地电阻分别取 10 Ω、15 Ω、25 Ω 和 35 Ω, 计算不同变电站接地电阻下, 不同短路侧的短路电流分布和分流系数, 结果如表 4 至表 7 所示。

表 4 杆塔接地电阻为 10 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.550	0.547
1	0.584	0.581
1.5	0.616	0.614
2	0.645	0.642
3	0.697	0.695
4	0.738	0.736

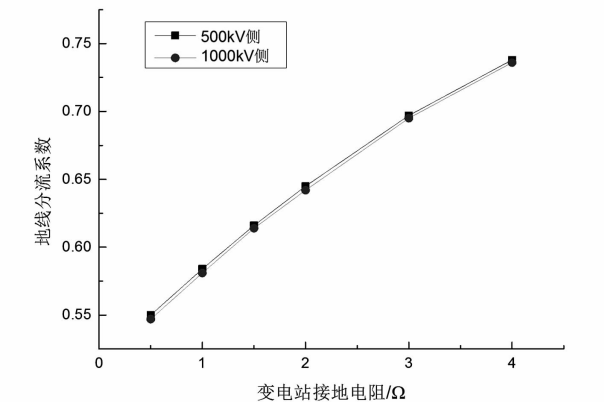


图 4 杆塔接地电阻为 10 Ω 时地线分流系数

由图 4 可见, 随着变电站接地电阻的增大, 500 kV 侧和 1 000 kV 侧的地线分流系数基本呈线性增长, 且 1 000 kV 侧的分流系数略大于 500 kV 侧。

表 5 杆塔接地电阻为 15 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.548	0.545
1	0.582	0.579
1.5	0.614	0.611
2	0.643	0.640
3	0.694	0.692
4	0.735	0.733

表 6 杆塔接地电阻为 25 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.546	0.543
1	0.579	0.576
1.5	0.611	0.608
2	0.640	0.637
3	0.691	0.688
4	0.732	0.729

表 7 杆塔接地电阻为 35 Ω 时地线分流系数

接地电阻/Ω	500 kV 侧短路时 地线分流系数	1 000 kV 侧短路时 地线分流系数
0.5	0.543	0.540
1	0.576	0.573
1.5	0.608	0.605
2	0.637	0.634
3	0.687	0.685
4	0.728	0.726

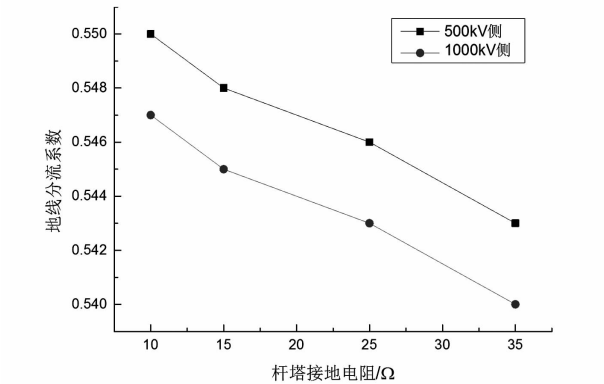


图 5 变电站接地电阻为 0.5 Ω 时地线分流系数

由计算结果可以看出, 随着变电站接地电阻的增加, 地线分流系数逐渐增大 (0.55 ~ 0.75); 而从图 5 可以看出, 随着杆塔接地电阻的增加, 地线分流系数逐渐减小, 但变化不大 (0.550 ~ 0.544, 500 kV 侧; 0.547 ~ 0.540, 1 000 kV 侧)。500 kV 侧短路和 1 000 kV 侧短路时的地线分流系数差别较小。

3.2 福州站短路入地电流计算

考虑最普遍的单相短路情况进行计算,1 000 kV 侧单相短路电流为 24.1 kA,500 kV 侧单相短路电流为 57.19 kA。由于 500 kV 侧短路和 1 000 kV 侧短路时的地线分流系数差别不大,则考虑最危险情况,应使用 500 kV 侧单相短路电流 57.19 kA 分析实际最大入地电流,且地线分流系数为杆塔接地电阻 10 Ω 时的结果,短路入地电流计算结果如表 8 所示。

表 8 变电站短路入地电流随接地电阻的变化

接地电阻/Ω	最大入地电流/kA	接地电压/kV
0.5	25.74	12.87
1	23.79	23.79
1.5	21.96	32.94
2	20.30	40.60
3	17.33	51.99
4	14.98	59.94

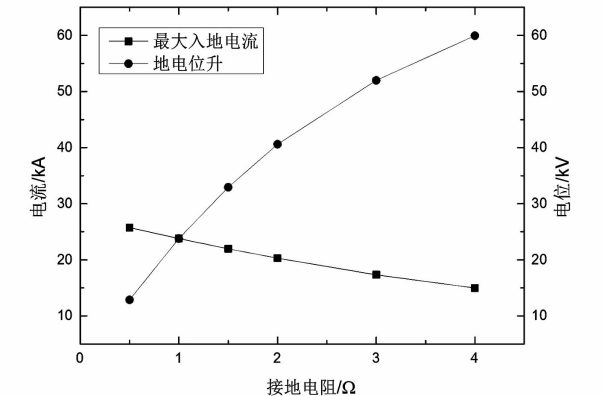


图 6 变电站短路入地电流随接地电阻的变化

由图 6 可见,随着变电站接地电阻的增大,短路最大入地电流逐渐减小,而接地电压则逐渐增大,且这两种变化趋势逐渐趋于平缓。因此,在实际工程变电站接地系统设计中,不能只关注分流系数(最大入地电流),必须同时考虑接地电阻对接地电压的影响,对变电站进行合理的降阻设计,有效降低接地电压,从而提高变电站安全性。

4 结 论

前面系统地研究了变电站站内故障时短路电流的分布和分流系数的计算,并给出了适用于工程实际的变电站分流系数的定义。在此基础上介绍了分流系数数值计算方法中经典的矩阵法。基于以上理论分析,以福州特高压 GIS 变电站为例,计算了福州站发生站内短路故障时的分流系数、短路入地电流和接地电压,分析了变电站分流系数的多种影响因

素。结果表明:

1)变电站分流系数由系统中的电流分布决定。影响分流系数的因素有变电站接地网的接地电阻、杆塔接地装置的接地电阻、地线自阻抗、相线自阻抗以及架空地线的电气参数等。

2)变电站和杆塔的接地电阻是分流系数的重要影响因素,地线分流系数随着变电站接地电阻的增大而增大,随着杆塔接地电阻的增大而减小。500 kV 侧和 1 000 kV 侧短路时地线分流系数差别较小。

3)随着变电站接地电阻的增加,最大入地电流明显减小,接地电压却逐渐增大,且这两种相反的变化趋势逐渐趋于饱和。因此有必要对变电站进行合理的降阻设计。

参考文献

[1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[2] 中国电力企业联合会. GB 50065 - 2011,交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2011.

[3] 曹伟,王永生,张文青,等. 电力系统短路电流直流分量及其对短路器开断能力的影响[J]. 电网技术, 2012,36(3):283 - 288.

[4] 李谦,蒋愉宽,肖磊石,等. 变电站内短路电流分流系数实测和分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7):2060 - 2065.

[5] Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Safety of AC Substation Groundings [S]. New York, USA:IEEE,2000.

[6] 何金良,张波,曾嵘,等. 1 000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):7 - 12.

[7] 文习山,胡建平,唐炬. 复杂电力网络短路电流分布及地网分流系数[J]. 高电压技术, 2011, 37(9):2233 - 2240.

[8] 吴锦鹏,张波,蒋愉宽,等. 基于相分量模型的变电站短路电流分流系数计算[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(1):122 - 130.

[9] 陆家榆,庞廷智,薛辰东,等. 城区变电站地电位模拟测试研究[J]. 电网技术, 2004, 28(14):57 - 61.

[10] Endrenyi J. Analysis of Transmission Tower Potentials during Ground Faults [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(5):1274 - 1283.

(下转第 72 页)

± 500 kV 极间间隔棒的研制与应用

鄢 艺¹,徐望圣²,陈 飞²,梁 明¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021;
2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局,贵州 贵阳 550001)

摘 要: ±500 kV 高肇直流线路局部区段导线舞动严重,舞动产生的导线交变应力造成导线损伤和金具磨损,为减少导线舞动的损害,研制了 ±500 kV 极间间隔棒并应用在该线路上提高线路抗风偏、舞动能力。通过对电气、机械性能要求的综合研究和分析,提出了极间间隔棒的制作要求和技术参数,属国内首次研制成的 ±500 kV 极间间隔棒。研制的间隔棒已按技术要求通过所需的所有机电综合试验,并已运用于高肇直流线路,为工程问题的解决提供了具体方案;同时也为超、特高压导线舞动、风偏的限制提供了技术条件。

关键词: 输电线路;舞动;极间间隔棒

Abstract: The galloping of transmission lines in some sections of ±500 kV GaoZhao HVDC transmission line is very serious, which causes the damage of the conductor and fitting because of the periodic stresses produced by galloping. In order to decrease the damage produced by the galloping of transmission lines, ±500 kV phase-to-phase composite spacer has been developed and applied in ±500 kV GaoZhao HVDC project, which increases the anti-swing and anti-galloping ability of lines. It is the new phase-to-phase composite spacer developed in China for the first time, which is tested by some electrical and mechanical research and analysis. This kind of composite spacer has passed all the technical tests covered mechanical and electrical requirements and has been used in ±500 kV GaoZhao HVDC project. It not only provides the solution for the galloping of transmission lines in ±500 kV GaoZhao HVDC project, but also provides the technical support to solve the galloping and swing of conductors in EHV and UHV transmission lines.

Key words: transmission lines; galloping; pole-to-pole spacer

中图分类号:TM726 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0027-03

0 引 言

目前国内外尚无极间间隔棒尺寸与特性的统一标准。安装在两极之间的绝缘间隔棒承受导线所受的风力^[1-3]和电磁力^[4]作用而产生拉压力和振动冲击力^[5-7],间隔棒本身的重量为导线集中荷载,因此要求间隔棒不仅要具有足够的电气绝缘能力^[8]和机械强度^[9-10],还要求其质量轻并具有一定的韧性以缓解振动冲击力的疲劳作用^[11]。这里提出了采用优良机械电气性能、优异憎水性和抗氧化性的硅橡胶作为伞套材料,以及高强度的耐酸芯棒,并使用当前最先进的整体注射成型工艺进行生产,采用压接方式连接金具以及采用高温外护套对端部进行密封的方法。

下面根据极间合成间隔棒的技术条件和合成绝

缘子的有关标准^[12-13],进行工频干闪络试验、突然试验卸载、热机试验、水煮试验、陡坡冲击电压试验和工频电压试验等,并对合成间隔棒端部连接区及界面进行了电气和机械测试。

1 极间间隔棒整体型式及技术参数

1.1 结构形式

为增大间隔棒的泄漏距离,使其具有较强的防腐及耐污水平,经技术和经济比选,合成绝缘子伞型采用大小伞结构形式^[14]。该伞型与其他结构相比,在污秽和雨水环境下放电时不易桥接,在严重覆冰覆雪情况下能阻滞电弧串接^[4-5]。

1.2 技术参数的确定

根据高肇直流的导线布置情况,在除去金具结构的长度后,采用的直流棒性悬式复合绝缘子棒的

结构高度为 12.5 m,绝缘长度为 11.356 m,远远高于电压绝缘水平的要求,绝缘裕度非常大。间隔棒芯棒采用 30 mm 直径高强度耐酸芯棒,其直径是按照间隔棒受拉、压状态的后屈曲大挠度试验而得,伞套材料采用具有优良机械电气性能、有优异憎水性和抗氧化性的甲基乙烯硅橡胶。

极间间隔棒采用整支复合绝缘子,其长度为 12 500 mm,公称爬电距离为 48 000 mm,爬电比距为 48 mm/kV,大于 C 级污区的绝缘水平。

根据合成绝缘子棒的电气和机械性能,制定了高肇直流极间间隔棒技术条件如表 1 所示。

表 1 极间间隔棒技术条件

项 目	整体参数
结构高度/mm	12 500
芯棒直径/mm	30
与金具连接方式	环环
最小公称爬电距离/mm	≥48 000
拉伸破坏负荷/kN	≥100
反复屈曲试验(最大挠度≤1 250 mm)/次	3×10 ⁵
大挠度屈曲试验(最大挠度≤4 800 mm)/次	5
额定电压/kV	±1 000
最高运行电压/kV	±1 100
雷电冲击耐受电压/kV	+4 900
操作冲击湿耐受电压/kV	+2 600
直流 1 min 湿耐受电压/kV	+1 200
无线电干扰水平(+578 kV)/μV	1 000
可见电晕(+578 kV)	无可见电晕
外径	400
均压环/mm 管径	50
屏蔽深度	45

2 电气性能试验

2.1 人工直流污秽试验

以 0.15 mg/cm² 盐密、1.0 mg/cm² 灰度的污液将复合绝缘子上下表面均匀污染,阴干后开始试验。受试验基地电源电压限制,试验耐受电压取 240 kV,将试品长度按比例折减,采用裸铜导线短接的方法使试品长度(干弧距离)为 240 mm。将试品安装于雾室至污层电导率达到最大后施以 -240 kV

电压,试验 40 min 内未发生击穿,即认为能耐受住 -240 kV 直流试验电压。

2.2 工频电压试验

2.2.1 干雷电冲击耐受电压试验

试验大气条件为:气压 $b=101.5$ kPa,干球温度 $t_d=20^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=18.0^{\circ}\text{C}$,绝缘长度 $L=11.356$ m,大气校正系数 $K_t=1.029$ 。

取试品一只,施加 15 次雷电冲击电压未发生闪络,试验结果详见表 2。

表 2 正极性干雷电冲击耐受电压试验结果

试品 编号	规定值 /kV	校正值 /kV	试验值 /kV	闪络/耐受 (次)	本项 结果
No. 7	+4 900	+5 042	+5 045 ~ +5 061	0/15	合格

2.2.2 直流 1 min 湿耐受电压试验

试验大气条件为:气压 $b=101.5$ kPa,干球温度 $t_d=20^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=18.0^{\circ}\text{C}$,绝缘长度 $L=11.356$ m,大气校正系数 $K_t=1.003$ 。

试验淋雨条件为:人工雨电阻率 $\rho_{20}=101.0$ Ω·m,人工雨淋雨率水平分量为 1.4 mm/min、垂直分量为 1.5 mm/min。

取试品一只,进行湿工频耐受电压试验,未发生闪络击穿,结果详见表 3。

表 3 直流 1 min 湿耐受电压试验

试品 编号	规定值 /kV	校正值 /kV	试验值 /kV	耐受时间 /min	试验 结果	本项 结果
No. 7	+1 200	+1 204	+1 204	1	耐受	合格

2.2.3 操作冲击湿耐受电压试验

试验大气条件为:气压 $b=101.5$ kPa,干球温度 $t_d=20^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=18.0^{\circ}\text{C}$,绝缘长度 $L=11.356$ m,大气校正系数 $K_t=1.005$ 。

试验淋雨条件为:人工雨电阻率 $\rho_{20}=101.0$ Ω·m,人工雨淋雨率水平分量为 1.4 mm/min、垂直分量为 1.5 mm/min。

取试品一只,进行正极性湿操作冲击耐受电压试验未发生闪络,结果详见表 4。

表 4 正极性湿操作冲击耐受电压试验

试品 编号	规定值 /kV	校正值 /kV	试验值 /kV	闪络/耐受 (次)	本项 结果
No. 7	+2 500	+2 613	+2 617 ~ +2 633	0/15	合格

2.3 陡波前冲击耐受电压试验

将试品置于 0.1% 的 NaCl 去离子水中,保持沸

表 5 陡波前冲击耐受试验结果

试品编号	试品分段 /段	正 极 性			负 极 性			本项 结果
		冲击电压陡度 /(kV·μs ⁻¹)	每段冲击次数 /次	闪络或 击穿	冲击电压陡度 /(kV·μs ⁻¹)	每段冲击次数 /次	闪络或 击穿	
No. 1	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 2	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 3	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格
No. 4	32	1 042 ~ 1 401	25	闪络	1 123 ~ 1 379	25	闪络	合格

腾 42 h。沸腾结束后将试品保留在容器中至水温冷却到大约 50 ℃。在容器中维持此温度,检查外观无开裂和脱落。

将检查后的 4 支复合绝缘子,编号为 No. 1 ~ No. 4,每支分为 32 段,用厚 0.5 mm、宽 20 mm 的窄铜条缠绕在伞裙间的护套上作为电极,进行陡波前冲击耐受电压试验。每段连续施加陡度为 1 000 ~ 1 500 kV/μs 的正、负冲击电压各 25 次。每次冲击都应使电极间的空气间隙闪络,而绝缘子不应产生击穿。

试验结果如表 5 所示。试验中试品均未被击穿,说明试品的机械疲劳对电气性能无影响。

3 机械性能试验

3.1 大扰度曲屈试验



图 1 大扰度曲屈试验

由于所用的极间间隔棒整支长度为 12.5 m,参照相关导则^[15],φ30 直径芯体长度超过 8 m 的可不对整支进行大扰度曲屈试验,本试验仅截取 6 m 复合绝缘子进行试验,如图 1 所示。

大挠度曲屈试验中,施压后纵向剩余压缩距离

和侧向弯曲情况见表 6。

表 6 大挠度屈曲试验情况

试验 次序	施加负荷 /N	纵向剩余 压缩距离/mm	侧向弯曲量 /mm
1	875	4 600	1 730
2	870	4 600	1 730
3	870	4 600	1 720

3.2 30 万次微风振动试验

30 万次微风振动试验中试品采用水平布置,如图 2 所示。

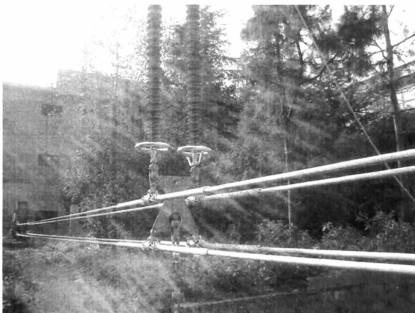


图 2 微风震动试验布置

试验中以扫频得到的系统振动频率为振动台频率,输出振幅满足式(1)要求。

$$A_{req} \geq 1\,000/f^{18} \tag{1}$$

式中: A_{req} 为振动幅值,mm; f 为振动频率,Hz。

经 30 万次振动后,绝缘子试品完好,金属附件无松动。

4 结 论

所研制的 ± 500 kV 线路极间间隔棒的试验结果表明:该间隔棒的机械性能和电气性能都满足现场应用需求,属首次成功研制的 ± 500 kV 线路极间间隔棒;其后屈曲性能及 30 万次曲屈疲劳试验为当前先进水平,具有很高的韧性、弹性,是研制极间间隔棒的关键,为工程的实施解决了技术难题。

(下转第 68 页)

柴拉直流输电线路防鸟害措施研究

唐 巍¹, 刘 琦¹, 周 军², 梁 明¹, 胡 全¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘 要:柴拉直流输电线路自投运以来, 多次发生鸟害引起的绝缘闪络故障, 已严重影响线路的安全稳定运行。通过对柴拉直流鸟害故障数据的综合分析, 以及现有防鸟害措施在柴拉直流线路上的实施效果; 并结合鸟粪闪络特性模拟试验研究成果, 对柴拉直流输电线路绝缘间隙进行优化研究。同时提出了柴拉直流防治鸟害措施的建议。

关键词:直流线路; 鸟害; 鸟粪; 间隙击穿

Abstract: There are many insulation flashovers caused by bird hazard since DC transmission line from Qaidam to Lhas being put into operation, which has seriously affected the safe and stable operation of the line. Through a comprehensive analysis of the fault data caused by bird hazard and the implementation results of the existing anti-bird measures in DC line from Qaidam to Lhas, and combined with the simulation experiment analysis of flashovers initiated by bird excretion, increasing the conductors in live line end and the plane minimum distance under fittings and the cross arm can effectively reduce the flashover probability initiated by bird excretion. The optimization for insulating clearance of DC transmission line from Qaidam to Lhas is carried out, and the reasonable suggestions for bird hazard control measures are proposed.

Key words: DC transmission lines; bird hazard; bird excretion; air gap breakdown

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0030-04

0 引 言

柴拉直流输电线路自 2011 年 11 月 11 日投运以来, 多次发生因鸟害引起的绝缘闪络故障, 占总闪络故障的 90% 以上, 鸟害已严重影响柴拉直流输电线路的安全稳定运行。对柴拉直流输电线路发生的鸟害事故及防鸟害整治措施效果进行综合分析, 并结合目前输电线路防治鸟害领域取得的最新科研成果, 对柴拉直流输电线路防治鸟害措施进行研究是非常有必要的。

1 鸟害的分类

鸟害的分类一般分为鸟粪类、鸟巢类、鸟体短接类及鸟啄类等 4 大类^[1]。鸟粪类又可以分为 2 种: 一种是鸟粪附着在绝缘子表面引起绝缘子的污闪^[2]; 一种是鸟粪在绝缘子附近坠落, 鸟粪坠落通道与绝缘子串带电端金具的间隙电场瞬时严重畸变, 使得空气间隙被击穿^[3]。鸟巢类是筑巢用的树

枝、杂草、铁丝等物体下落或被吹落, 造成横担和导线之间间隙不足引起的闪络^[4]。鸟体短接类是指大型鸟类在飞行或扇动翅膀时造成线路相间或单相接地故障。鸟啄类主要形式为鸟啄食复合绝缘子, 主要发生在停电检修或等待投运期间。根据柴拉直流线路运行及故障分析数据, 绝大部分鸟害故障均为鸟粪坠落引起带电端金具空气电场畸变所引发间隙击穿造成的闪络事故。

2 已采用的防鸟害措施及实施效果

2.1 防鸟刺

防鸟刺作为一种基本的防鸟措施, 可防止鸟类在塔头长期、大范围停留。柴拉直流线路在基建及运行阶段针对鸟害故障情况安装了防鸟刺。通过运行经验表明防鸟刺是一种有效的、简单的防鸟害措施, 可一定程度降低鸟害闪络故障, 但效果不是非常明显。究其原因, 防鸟刺的安装工艺尚需改进, 虽然目前线路上的防鸟刺或防鸟针板基本上覆盖了 3.6 m 的范围, 但部分防鸟刺安装稀疏不够紧密, 散开不

够;另外由于防鸟刺过长,在长期大风作用下,部分防鸟刺出现了倾斜,导致相邻防鸟刺的间隙过大;同时鸟类具有很强的飞翔控制能力,仍然能够停留在鸟刺间隙,带来安全隐患。

2.2 防鸟针板

防鸟针板利用其防鸟针的锋利以及覆盖面积,迫使鸟类在杆塔危险位置无法停留达到驱鸟的目的。柴拉直流线路在运行阶段针对鸟害故障情况安装了防鸟针板,由于防鸟针板安装尺寸与横担上下平面塔材一致,避免了防鸟设施安装过程中重要防鸟部位漏装及缺失,有效降低了鸟类活动导致线路故障的风险,运行效果较好。

2.3 驱鸟器

驱鸟器主要分为智能超声波驱鸟器和感应引爆空气驱鸟器两种,柴拉直流线路在基建及运行阶段针对鸟害故障情况安装了这两种驱鸟装置。从实际运行情况分析,由于鸟类对各种超声波驱鸟器具有阶段适应性,加之同一地区鸟类较多,差异化适应性比较明显,因此,此类驱鸟器防鸟效果在安装运行之初效果较好,但经过一段时间后驱鸟效果不明显^[5]。

2.4 绝缘护套

绝缘护套作为一种阻断空气间隙放电的重要手段,但由于其造价较高,其功能定位于在鸟害集中多发区,采取其他防鸟害措施无法取得明显成效时,才考虑使用。柴拉直流线路在塔身或上横担上加装绝缘护套,存在加装面积大、结构复杂难以实现全覆盖等缺点,因此仅考虑将导线挂点处的导线和金具实现全覆盖,安装后的效果如下图1所示。



图1 ±400 kV 柴拉直流线路直线塔
安装绝缘护套后效果图

从运行情况分析,加装绝缘护套可在一定程度

上降低线路鸟害故障的风险,但不能完全根除;同时由于其成本较高,不适宜大面积推广应用。

2.5 人工鸟巢

根据“驱引结合,绿色防鸟”的理念^[6],选择鸟类活动频繁,特别是先前发生过鸟害故障区域的塔位,在地线支架上方安装适合鸟类站立、蹲卧、避风的平台,吸引鸟类尤其是大型鸟类在该平台上栖息、避风、筑巢,从而降低鸟类在杆塔带电区域活动的机率,达到疏导鸟类的作用。柴拉直流线路大部分位于高寒草原荒漠地区,无高大树木供鸟类栖息,在运行阶段根据鸟害故障情况安装人工鸟巢,做为驱鸟措施的辅助,对防治鸟害起到了一定作用。

3 鸟粪闪络特性研究

3.1 鸟粪闪络机理

鸟粪由于有一定的粘度和导电性,坠落时会拉长形成一段连续的近似一段导体的鸟粪通道^[7]。当鸟粪通道下端靠近带电导体或金具距离足够小时,它们之间的空间间隙被击穿,此时鸟粪通道被抬升为高电位;当鸟粪通道上端与杆塔横担的距离不足时,它们之间的空气间隙亦被击穿,从而造成输电线路的闪络跳闸故障^[8]。

3.2 鸟粪闪络特性模拟试验研究成果

中国电力科学研究院在西藏羊八井高海拔试验基地建立的柴拉直流直线塔1/2尺寸模型上,对鸟粪闪络特性进行了模拟试验研究。

试验表明当鸟粪下落位置距离导线和均压环距离越近,闪络概率越大。试验中鸟粪装置喷口距离导线中心不同距离时的闪络概率如图2所示。

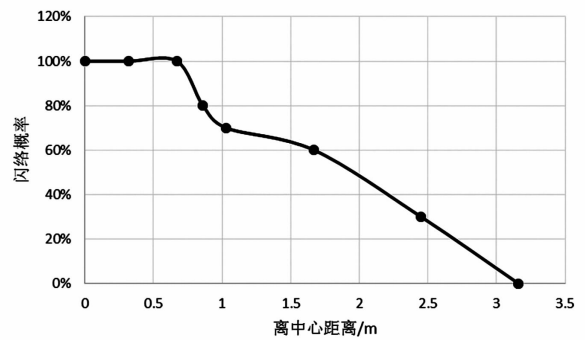


图2 鸟粪闪络概率与喷口离导线
中心距离的关系

由图2可以看出,当喷口离中心距离在0.67 m的范围以内,闪络概率为100%;随着喷口离中心点

的距离越远,其闪络概率逐步下降;当喷口离中心点的距离为 3.16 m 时,闪络概率为 0%。根据试验结果,考虑现场风速的影响,建议柴拉直流线路鸟刺防护范围可取为 3.6 m。

试验还结合柴拉直流线路运行情况在 ±280 kV、±400 kV 电压等级下,对直线塔 V 型悬垂串带电端金具距横担下平面不同间隙距离下的鸟粪闪络概率进行了试验研究,鸟粪闪络概率与电压及间隙距离的关系见图 3。

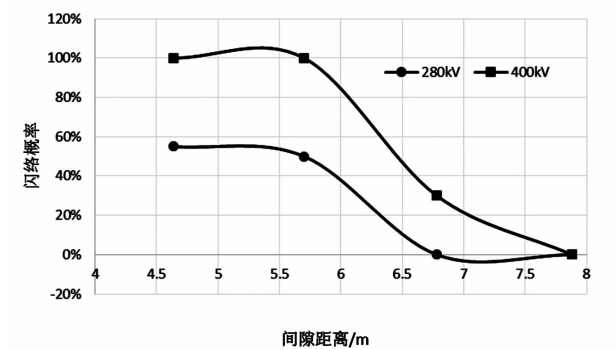


图 3 不同电压和间隙距离下的闪络概率

由图 3 可以看出,在同一间隙距离下,电压从 400 kV 降低到 280 kV 后,鸟粪闪络概率明显降低。在同一电压水平下,只有当间隙距离超过某一临界值后,鸟粪的闪络概率才随间隙距离的增大而降低。对于 ±400 kV 情况,当间隙距离超过 5.8 m 时,鸟粪的闪络概率开始明显下降,在 6.78 m 时的闪络概率降低为 30%,在 7.88 m 时的闪络概率降低为 0%。

4 绝缘间隙优化研究

4.1 柴拉直流线路绝缘配置情况

柴拉直流线路全线划分为轻、中、重污区,直线塔悬垂串及跳线串均采用 V 串型式,绝缘子采用 8 m 复合绝缘子。悬垂串夹角为 90°~110°,跳线串夹角为 90°。空气间隙取值见表 1。

表 1 空气间隙取值表

海 拔 /m	空气间隙/m		
	工作电压	操作电压	带电作业
4 500	1.6	3.9	4.7
5 000	1.7	4.2	5.0
5 300	1.8	4.4	5.2

注:表中带电作业间隙已考虑人体活动范围 0.5 m。

按上述绝缘配置原则规划的柴拉直流线路铁

塔,直线塔 V 型串对横担下平面最小距离约 5.25 m,耐张塔跳线串对横担下平面最小距离约 5.05 m,如图 4 所示。

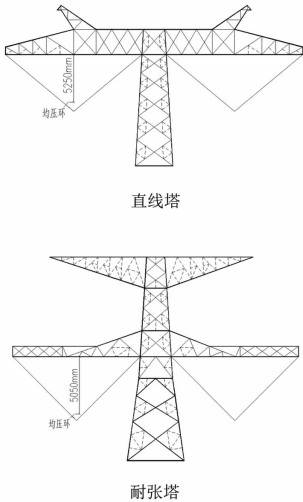


图 4 均压环对横担下平面最小距离示意图

4.2 绝缘间隙优化技术方案

根据鸟粪闪络特性试验研究结论,增加带电侧均压环至横担下平面的距离可有效降低鸟粪闪络概率。在已建柴拉直流线路上要增加此距离可采用在低压端只增加金具零件和增加盘型绝缘子及配套连接金具两个方案。考虑到鸟粪也会污染绝缘子使绝缘子污闪电压降低,因此推荐采用在原绝缘子串低压端增加绝缘子及配套连接金具(U 型挂环、碗头挂板、球头挂环)的方案,通过保证原挂点位置,改变 V 串夹角角度数,增大带电部分对横担下平面距离。“V”串加长改造示意图如图 5 所示。

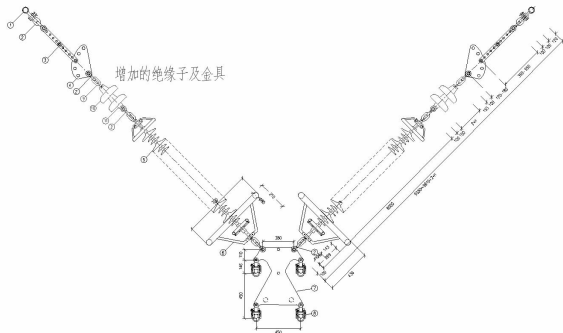


图 5 “V”串加长改造方案示意图

柴拉直流直线塔采用 160 kN、210 kN、300 kN 单联及 160 kN 双联 V 型串。以 210 kN 单联 V 型串为例,按上述方案增加绝缘子片数及配套金具。增加绝缘子片数对均压环与横担下平面及塔身的距离的影响以及 V 型串等效串长增加值(竖直方向上)见表 2。

表 2 增加绝缘子片数悬垂串均压环
对塔材距离表

绝缘子 增加 数量 /片	金具部 分增加 长度 /m	绝缘子 部分增 加长度 /m	悬垂串 单侧肢 长增加 /m	均压环 对横担 下平面 距离/m	均压环 对塔身 最近距 离/m	等效 串长 增加值 /m
0	0	0	0	5.31	5.99	0
1	0.355	0.17	0.525	6.09	5.96	0.788
2	0.355	0.34	0.695	6.31	5.95	1.010
3	0.355	0.51	0.865	6.57	5.94	1.270
4	0.355	0.68	1.035	6.80	5.93	1.510

耐张塔 2×160 kN 的 V 型跳线串按上述方案增加绝缘子及配套金具后,增加绝缘子片数对均压环与横担下平面及塔身的距离的影响以及跳线 V 型串等效串长增加值(竖直方向上)见表 3。

表 3 增加绝缘子片数跳线串均压环
对塔材距离表

绝缘子 增加 数量 /片	金具部 分增加 长度 /m	绝缘子 部分增 加长度 /m	跳线串 单侧肢 长增加 /m	均压环 对横担 下平面 距离/m	均压环 对塔身 最近距 离/m	等效 串长 增加值 /m
0	0	0	0	5.050	5.762	0
1	0.34	0.17	0.51	5.773	5.638	0.768
2	0.34	0.34	0.68	6.017	5.600	1.019
3	0.34	0.51	0.85	6.293	5.600	1.264
4	0.34	0.68	1.02	6.537	5.568	1.509

考虑跳线增加绝缘子片数后,均压环对塔身距离小于 5.7 m(跳线间隙较悬垂串间隙增大 1.1 倍),为保证增加均压环对横担下平面的距离且均压环对塔身距离不小于 5.7 m,对 V 型跳线串两侧肢增加不同片数,示意图如图 6 所示。增加绝缘子片数对均压环与横担下平面及塔身的距离的影响以及跳线 V 型串等效串长增加值(竖直方向上)见表 4。

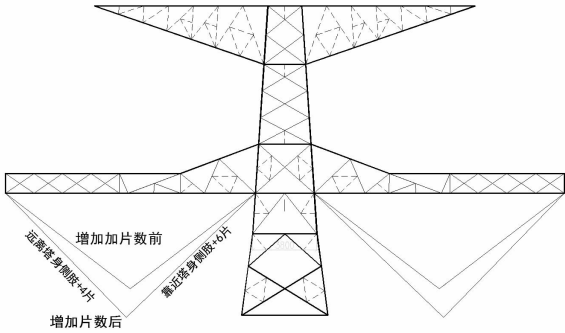


图 6 跳线串两侧肢增加不同片数示意图

表 4 两侧肢增加不同绝缘子片数的跳线串均压
环对塔材距离表

绝缘子增加数量/片 靠近 塔身侧肢	远离 塔身侧肢	均压环对 横担下平 面距离/m	均压环对 塔身最近 距离/m	等效串长 增加值 /m
0	0	5.050	5.762	0
5	4	6.651	5.677	1.623
5	3	6.531	5.812	1.509
6	4	6.859	5.85	1.737

4.3 绝缘间隙优化结论

一方面增加盘型绝缘子可以增加均压环对横担下平面的距离,进而降低鸟粪闪络概率;另一方面对于已建柴拉直流线路增加盘型绝缘子会引起 V 串夹角减小,等效串长增加,需注意复核大风工况下 V 型串迎风侧肢受压角度、V 型串两侧肢均压环间距、线路对地距离及交叉跨越距离等是否满足要求。对全线进行梳理,依据柴拉直流输电工程设计原则,在满足 ±400 kV 直流线路非居民区导线最小对地距离 12 m、人烟稀少地区导线最小对地距离 11 m 的前提下,直线塔悬垂串可在原设计基础上增加 1~4 片盘型绝缘子,V 型串单侧肢长增加 0.51~1.18 m,均压环对横担下平面距离为 6~7.1 m;耐张塔跳线串在原设计基础上靠近塔身侧肢增加 6 片绝缘子,远离塔身侧肢增加 4 片绝缘子,均压环对横担下平面距离为 6.86 m,对塔身距离为 5.85 m。

5 结 论

经过对柴拉直流线路发生的鸟害事故及防鸟害整治措施效果进行综合分析,并结合鸟粪闪络特性模拟试验结果,建议柴拉直流线路防治鸟害治理采取以下措施:

- 1)在导线正上方 3.6 m 范围安装防鸟针板;其余非导线正上方各 3.6 m 范围外区域的防鸟刺、防鸟针板均拆除,留下鸟类活动的区域。耐张串联接金具安装异型防鸟针板。
- 2)根据疏治结合原则,在全线鸟害易发区域,每隔约 10 km 安装一处栖鸟架。
- 3)在原绝缘子串低压端增加绝缘子及配套连接金具,增加带电端均压环与横担下平面的距离,从而降低鸟粪闪络率。推荐直线塔悬垂串可在原设计

(下转第 62 页)

钢芯中强度铝合金绞线在特高压直流输电线路 30 mm 冰区中的应用

易海蓉,王婷婷,李育兵,梁 明
(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:以重冰区特高压直流输电线路工程为例,将钢芯中强度铝合金绞线与钢芯高强度铝合金导线的电气性能、机械特性和全寿命周期经济性进行比较分析。研究表明,钢芯中强度铝合金绞线在节约电能、减少损耗和降低年费用等方面具有显著优势,在重冰区特高压直流输电线路中具有广泛的应用前景。

关键词:特高压直流;输电线路;中强度铝合金芯铝绞线;应用

Abstract:Taking UHVDC transmission line project in heavy icing area for example, the differences in electrical performance, mechanical characteristic and total life cycle economy between aluminum – alloy conductor medium – strength steel reinforced and aluminum – alloy conductor high – strength steel reinforced are analyzed. It shows that, aluminum – alloy conductor medium – strength steel reinforced has significant advantages in saving electric energy, reducing power loss and annual cost etc, which is suggested to be extended in UHVDC transmission lines in heavy icing area.

Key words:ultra high voltage (UHV) DC; transmission lines; aluminum – alloy conductor medium – strength steel reinforced; application

中图分类号:TM721.1 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)05 – 0034 – 05

0 引 言

中国幅员辽阔,特高压直流输电符合电力工业发展规律和电网技术的发展方向,在中国有广阔的应用前景^[1-3]。

远距离大容量的特高压直流输电,线路途经重覆冰区段概率增多,覆冰已成为影响线路安全运行和工程造价的主要因素之一。重冰线路易发生覆冰过载和不均匀覆冰引发的断线、断股事故,危及线路的安全运行,因此导地线要具有优良的机械特性。为提高安全性,以往工程在特重冰区段均采用钢芯高强度铝合金绞线,但存在导线线损相对较高的问题。下面以±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区导线选择为例,在电气性能、机械性能、本体投资、年费用等方面对 3 种截面相同、型式不同的导线进行了详细对比分析,首次提出了 30 mm 重冰区线路采用新型钢芯中强度铝合金绞线的导线技术方案。

1 铝合金特性

铝合金是输电线路常用的材料,在国内外已经

有几十年的应用历史,合金单线主要材料成分由铝、镁、硅等材料合成。它添加的元素主要是镁(Mg)和硅(Si),该合金的主要组成物为 Mg₂Si。在热处理状态下,Mg₂Si 固溶于铝中,并通过人工时效进行硬化,将 Mg₂Si 均匀地析出在合金单线的表面,使其在导电率、强度、延伸率上得到明显提高。

重冰区线路运行经验表明,导线在覆冰过载和不均匀覆冰情况下易发生导线断股、断线事故。因此在重冰线路导线选择中应选取强度较大、铝股受力好的导线,并且适当提高导线安全系数,以提高导线覆冰过载能力。

2 钢芯铝合金绞线特性

钢芯铝合金绞线是一种钢芯和铝合金组合的导线,外层采用 52.5% IACS 或 53% IACS 高强度铝合金替代普通钢芯铝绞线中的铝线,内层采用常规的钢芯单丝绞合。中国导线标准 GB/T 1179 – 2008《圆线同心绞架空导线》已有 JLHA1/G1A、JHA2/G1A 等规格的钢芯铝合金绞线,由于铝合金线强度较高,伸长率较大,所以其机械过载能力也较大,特

表 1 铝(铝合金)单丝主要性能比较

系列	抗拉强度/MPa	导电率/(% IACS)	弹性模量/GPa	线性膨胀系数 /($1 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
硬铝单丝	> 165	61	55	23
中强铝合金单丝	240 ~ 255	57 ~ 58.5	55	23
高强铝合金单丝	295 ~ 315	52.5 ~ 53	55	23

表 2 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的技术参数

技术参数	JLHA2/G1A - 630/45	JLHA4/G1A - 630/45	JLHA1/G2A - 720/50	JLHA4/G2A - 720/50	JLHA2/G2A - 800/55	JLHA4/G2A - 800/55
钢芯强度	高强度	中强度	高强度	中强度	高强度	中强度
结构	铝合金丝直径 (mm)/股数	4. 22/45	4. 22/45	4. 53/45	4. 53/45	4. 8/45
	钢丝直径 (mm)/股数	2. 81/7	2. 81/7	3. 02/7	3. 02/7	3. 2/7
截面 /mm ²	铝合金丝	630	630	725. 27	725. 27	814. 3
	钢芯	43. 6	43. 6	50. 14	50. 14	56. 3
	总计	674	674	775. 41	775. 41	870. 6
	导线直径/mm	33. 8	33. 8	36. 23	36. 23	38. 4
	单位重量/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$)	2 079. 2	2 078. 4	2 397. 7	2 397. 7	2 687. 5
	计算拉断力/N	231 330	216 060	290 640	247 120	326 310
	弹性模量/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	63 000	63 000	63 000	63 000	63 000
	线性膨胀系数 /($1 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	20. 8	20. 8	20. 8	20. 8	20. 8
	20 $^\circ\text{C}$ 时直流电阻 /($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0. 053 34	0. 049 13	0. 046 3	0. 042 63	0. 041 23

表 3 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的机械特性

机械特性指标		JLHA2/ G1A - 630/45	JLHA4/ G1A - 630/45	JLHA1/ G2A - 720/50	JLHA4/ G2A - 720/50	JLHA2/ G2A - 800/55	JLHA4/ G2A - 800/55
过载冰厚/mm	$L_p = 400$	47. 83	45. 84	56. 16	48. 27	60. 06	51. 42
	$L_p = 500$	46. 74	44. 94	54. 53	47. 20	58. 23	50. 18
	$L_p = 600$	46. 13	44. 44	53. 60	46. 60	57. 18	49. 49
最大弧垂 /($40^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)	$L_p = 400$	18. 02	18. 66	18. 11	18. 17	18. 29	18. 20
	$L_p = 500$	28. 63	29. 59	28. 64	28. 73	28. 83	28. 69
	$L_p = 600$	41. 60	42. 94	41. 52	41. 64	41. 72	41. 51
相导线垂直荷重/ ($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$) ($L_o = 600$)	均温	73. 40	73. 38	84. 65	84. 65	94. 88	94. 97
	覆冰	287. 11	287. 08	305. 33	305. 33	321. 83	321. 91
相导线风荷重/ ($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$) ($L_h = 500$)	大风	62. 81	62. 81	67. 33	67. 33	71. 36	71. 36
	覆冰	93. 14	93. 14	95. 55	95. 55	97. 70	97. 70
覆冰纵向最大张力 /($\text{kN} \cdot \text{相}^{-1}$)		507	493	543	542	572	575

别适合在重冰区使用。

外层采用 52. 5% IACS 或 53% IACS 高强度铝合金线,其电阻损耗仍较大,若要进一步降低导线损耗,可采用 57% ~ 58. 5% IACS 导电率的中强度铝合金线,虽然导线强度有所降低(详见表 1),但导线直

流电阻进一步减小,在输电线路中节能降耗效果将更为突出。虽然目前钢芯中强度铝合金绞线只有少部分厂家的产品通过鉴定,但鉴于铝合金绞线的制造技术成熟,已在线路工程中广泛应用且运行维护经验丰富,因此钢芯中强度铝合金绞线制造、运

表 4 钢芯中强度、高强度铝合金绞线的电气特性

导线型号	总铝 截面 /mm ²	电 流 密 度 /(A · mm ⁻²)	70 ℃ 时 允许电流 /A	运行线温时 直流电阻值 /(Ω · km ⁻¹)	运行线温下 的电压降 /kV	运行线温下两极导 线电阻损耗功率 /(kW · km ⁻¹)	两极电晕 损失 /(kW · km ⁻¹)
JLHA2/G1A - 630/45	3 780	0. 83	4 350	0. 055 31	28. 81	180. 05	11. 91
JLHA4/G1A - 630/45	3 780	0. 83	4 536	0. 051 05	26. 59	166. 18	11. 91
JLHA1/G2A - 720/50	4 320	0. 72	4 734	0. 0481 3	25. 07	156. 67	10. 74
JLHA4/G2A - 720/50	4 320	0. 72	4 932	0. 044 84	23. 35	145. 96	10. 74
JLHA2/G2A - 800/55	4 800	0. 65	5 070	0. 043 38	22. 59	141. 21	9. 91
JLHA4/G2A - 800/55	4 800	0. 65	5 280	0. 040 19	20. 93	130. 83	9. 91

注:数据以标称电压 ± 800 kV、输送功率 5 000 MW、输送距离 1 000 km 的线路计算所得;运行线温均以 60℃ 考虑。

维难度不大。钢芯中强度铝合金绞线示意见图 1, 暂定型号为 JLHA4/G2A。

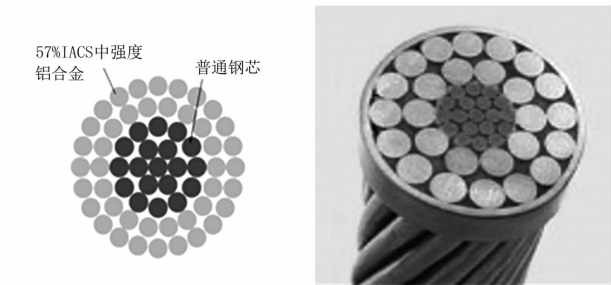


图 1 钢芯中强度铝合金绞线结构及绞线

选定标称截面为 630 mm²、720 mm² 和 800 mm² 的钢芯中强度铝合金绞线和钢芯高强度铝合金绞线进行分析比较,其参数如表 2 所示。

由表 2 可知,相同铝合金截面的钢芯中强度铝合金绞线的计算拉断力比钢芯高强度铝合金小 7% ~ 15%,电阻低 8%,而其他参数都基本一致。

为进一步对比两类导线,以 6 分裂为例,通过计算得出各导线的机械特性、电气特性分别如表 3、表 4 所示。

由表 3 可知,相同铝合金截面的钢芯中强度铝合金绞线的机械特性与高强度相比基本相当,仅过载冰厚小约 2 ~ 9 mm。

由表 4 可知,相同截面的中强度铝合金芯铝绞线与高强度相比,电阻损耗功率减小约 7% 左右,节能降耗效果更为突出。

3 导线参数

根据酒泉—湖南特高压直流工程(以下简称酒湖线)初步设计总报告,其输电规模为 8 000 MW,输

电电压为 ± 800 kV,30 mm 特重冰区的长度合计约为 43.7 km,最大风速为 30 m/s(10 m 高时),地形以高山大岭为主。

年最大负荷利用小时数在 5 000 h 以上,按照规程规定,导线经济电流密度应为 0.9 A/mm² 以下。

30 mm 及以上重冰区线路的运行经验表明,导线上主要发生的是悬垂线夹处的导线断股事故。因此在重冰区导线选择中应选取强度较大、铝股受力好的导线,并且应当提高导线安全系数,尽量降低铝股应力,提高线夹握力均匀性。

根据重冰线路设计、运行的经验,在 30 mm 冰区及以上重冰线路,导线均采用钢芯铝合金绞线。根据工程导线结构型式比选,30 mm 重冰区导线采用与 5 ~ 20 mm 冰区一致的 6 × 1 250 mm² 结构形式导线。因此选用了 3 种不同类型但截面均为 6 × 1 250 mm² 的导线进行比较分析,各导线参数如表 5 所示。

4 电气性能比较

4.1 导线载流量比较

根据系统条件,计算出各种导线型式的最大允许电流和过负荷温度,如表 6 所示。

计算中,环境气温采用最高气温月的最高平均气温,在此取环境温度为 40℃,风速采用 0.5 m/s,太阳辐射功率密度采用 1 000 W/m²。

从表 6 可以看出,3 种导线均满足过负荷温度不超过 70 ℃ 的要求。

4.2 电磁环境比较

由于参与比选的 3 种导线的外径相同,铝层结构相同,表面光洁度也相同,所以在同样电压作用下

表 5 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线的技术参数

导 线 型 号		JLHA1/G2A – 1250/100	JLHA2/G2A – 1250/100	JLHA4/G2A – 1250/100
		钢芯高强度铝合金绞线		钢芯中强度铝合金绞线
截面/mm ²	铝	1 248	1 248	1 248
	钢	101	101	101
	总	1 350	1 350	1 350
直 径/mm		47. 85	47. 85	47. 85
线 重/(kg · km ⁻¹)		4 252. 3	4 252. 3	4 252. 3
20 ℃ 直流电阻/km		0. 026 9	0. 026 7	0. 024 8
计算拉断力/kN		523. 36	498. 39	448. 46
弹性模量/GPa		65. 17	65. 17	65. 17
热膨胀系数/×10 ⁻⁶ (℃)		20. 5	20. 5	20. 5

表 6 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线过负荷温度计算结果

导 线	70℃ 时允许电流/A	80℃ 时允许电流/A	过负荷温度/℃
JLHA1/G2A – 1250/100	6 522	8 520	66
JLHA2/G2A – 1250/100	6 552	8 562	66
JLHA4/G2A – 1250/100	6 792	8 874	65. 3

表 7 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线不同代表档距下高温弧垂单位:m

代表档距	JLHA1/G2A – 1250/100	JLHA2/G2A – 1250/100	JLHA4/G2A – 1250/100
$L_0 = 300$	10. 50	10. 49	10. 46
$L_0 = 500$	29. 02	28. 99	28. 91

表 8 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线不同代表档距过载冰厚单位:mm

代表档距	JLHA1/G2A – 1250/100	JLHA2/G2A – 1250/100	JLHA4/G2A – 1250/100
$L_0 = 300$	83. 36	79. 55	71. 72
$L_0 = 500$	75. 27	72. 13	65. 64

表 9 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线相导线荷载单位:kN/相

导线型号	JLHA1/G2A – 1250/100	JLHA2/G2A – 1250/100	JLHA4/G2A – 1250/100
相导线垂直荷重 ($L_0 = 600$)	150. 12	150. 12	150. 12
相导线风荷重 ($L_h = 500$)	90. 82	90. 82	90. 82
覆冰纵向最大张力	728	728	728. 5

导线表面电场强度相当,无线电干扰、可听噪声等几乎没有差别。经计算,导线的电磁环境指标基本一致,满足《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790 – 2013)的要求。

5 机械特性比较

输电线路导线的机械特性,主要包括弧垂特性、荷载特性和覆冰过荷载特性。机械特性的好坏直接影响到线路的安全运行情况,所以输电线路导线必须满足机械强度的要求。

5.1 弧垂特性

由表 7 可以看出,参与比选的 3 种导线中,钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A – 1250/100 弧垂特性最好,但与其它导线弧垂相差不大。

5.2 导线过载能力

由表 8 可以看出,不同代表档距下,3 种导线方案过载冰厚度均达到 65 mm 以上,满足本冰区过载的要求。

5.3 导线的荷载特性

由于参与比选的 3 种导线外径、单重相当,故各导线垂直荷重、线条风荷重、纵向张力基本相同。

30 mm 冰区导线每相荷载见表 9。

6 年费用比较

年费用比较法是将参加比较的诸多方案在计算期内的全部支出费用折算成等额年费用比较。为了进一步分析各种导线的经济性,采用最小年费用法对各种导线的年费用进行了计算^[6]。

6.1 电能损失

对于超高压送电线路来说,电能损失主要由两

表 10 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线电阻损耗及电晕损失 单位: kW/km

导线型号	JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
运行线温下两极导线电阻损耗功率	234. 25	236. 5	221. 82
两极电晕损失	8. 66	8. 66	8. 66

注:运行线温按 60℃考虑;两极电晕损失均为海拔 500 m、好天气条件下的电晕损失计算值。

表 11 ±800 kV 酒湖线 30 mm 冰区比选导线经济特性比较 单位:万元/km

项 目		JLHA1/G2A - 1250/100	JLHA2/G2A - 1250/100	JLHA4/G2A - 1250/100
		钢芯高强度铝合金绞线		钢芯中强度铝合金绞线
年损耗 4 000 h	年损耗费用	48. 15	47. 73	44. 60
	导线年费用	161. 66	161. 24	158. 80
年损耗 5 000 h	年损耗费用	59. 39	58. 87	54. 96
	导线年费用	172. 91	172. 39	169. 17
年损耗 6 000 h	年损耗费用	70. 64	70. 02	65. 33
	导线年费用	184. 16	183. 53	179. 53

注:电价为 0. 501 4 元/kW · h,回收率为 8% 。

部分组成,即电阻损耗与电晕损耗。但电晕损耗在线路损耗中所占比重远小于电阻损耗,线路的电能损失主要取决于电阻损耗^[4-5]。

根据系统条件,导线按输送容量 8 000 MW,电阻损耗计算结果见表 10 所示。

由表 10 可以看出,钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A - 1250/100 电阻损耗最小,由于各导线外径基本相同,导线电晕损失基本相同,故钢芯中强度铝合金绞线 JLHA4/G2A - 1250/100 电能损失最小。

6.2 年费用计算结果

经初步询价,钢芯高强度铝合金绞线单价定为 2 万元/t,钢芯中强度铝合金绞线单价定为 2. 1 万元/t。

将参与比选的 3 种钢芯铝合金绞线的全寿命周期经济比较,年费用计算结果如表 11 所示。

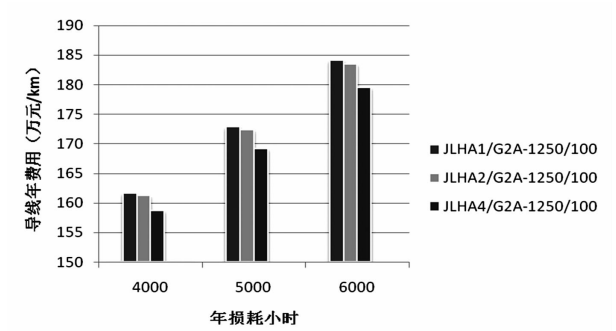


图 2 年费用比较

(电价为 0. 501 4 元/kW · h,回收率为 8%)

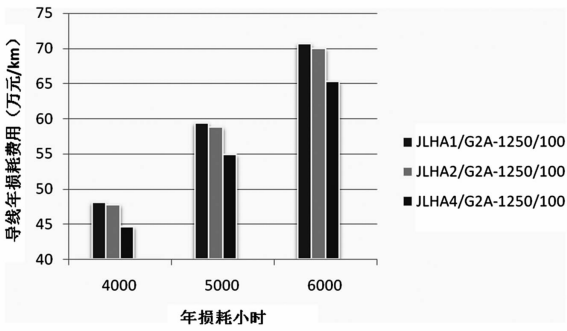


图 3 年损耗费用比较

(电价为 0. 501 4 元/kW · h,回收率为 8%)

上述全寿命周期经济性比较结果表明:同种导线年损耗费用和年费用随年损耗小时的上升而增大;相同损耗小时数下,钢芯中强度铝合金绞线年损耗费用和年费用低于钢芯高强度铝合金绞线,普遍低 3 ~4 万元,而上述 3 种导线在运行、损耗、维护保养直至回收等费用基本相当的,因此在投资回收率、电价水平、损耗小时数情况下,JLHA4/G2A - 1250/100 钢芯中强度铝合金绞线年损耗费用最低,年费用也最低,经济优势较为显著。

7 结 语

JLHA4/G2A - 1250/100 钢芯中强度铝合金绞线弧垂特性和电磁环境,满足规程规范要求;过载冰厚度均达到 65 mm 以上,满足本冰区过载的要求;年损耗费用较低,经济优势较为显著:因此推荐 30 mm 冰

(下转第 83 页)

高海拔交流特高压线路基于电晕条件下的导线选型研究

梁 明,朱长青,谢 静,戴严航

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:导线选型研究是特高压交流输电工程的关键技术之一。尤其在海拔地区,由于空气相对密度大大降低,导线选型研究对线路的可靠运行、环境保护和控制工程投资至关重要。根据1 000 kV特高压交流输电线路电磁环境的限值,采用经过实际工程验证且广泛使用的计算分析方法,研究了1 000 kV特高压交流输电线路采用多种分裂组合导线时其电场强度比值、可听噪声的海拔限值,同时结合导线年费用计算推荐相应海拔区段内的导线选型。经研究,在海拔1 500~2 000 m时,推荐采用8×JL/G2A-720/50导线;在海拔2 000~3 000 m时,推荐采用10×JL/G1A-630/45导线。

关键词:特高压;高海拔;电晕条件;导线选型

Abstract:The research of conductor selection is one of the key technologies in UHV AC transmission project. Especially in high altitude area, because the relative density of air is greatly reduced, the research of conductor selection is vital to the reliable operation of transmission line, the environmental protection and project investment. According to the limit value of electromagnetic environment in 1 000 kV UHV AC transmission line, the altitude limit of the electric field intensity ratio and audible noise is studied when multiple split composite conductors are applied to 1 000 kV UHV AC transmission line. At the same time, combined with the annual cost of conductors, the conductor selection related to the corresponding elevation is recommended. After the research, at the altitude of 1 500~2 000 m, it is recommended to use 8×JL/G2A-720/50 conductor, and at the altitude of 2 000~3 000 m, it is recommended to use 10×JL/G1A-630/45 conductor.

Key words: ultra-high voltage; high altitude; corona performance; conductor selection

中图分类号:TM721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0039-05

0 引 言

特高压输电线路工程中导线的选择对整个工程的造价影响极大,直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的运行可靠性和运行成本。目前已建和在建的1 000 kV交流特高压输电线路均在海拔2 000 m以下,研究表明,随着海拔的增加,电晕产生的可听噪声和电晕损失已成为1 000 kV交流特高压输电线路选择导线截面的控制因素。

随着特高压电网向西部的延伸,交流特高压线路将不可避免地通过2 000 m以上高海拔地区,而高海拔地区导线电晕更加严重,电磁环境恶化,导线选型困难,需要开展高海拔1 000 kV特高压输电线路导线选型研究,提出满足电晕校核条件、电磁环境指标要求同时经济性较优的导线型式。

下面从电磁环境限值出发,对高海拔地区采用不同结构导线时的电场强度、可听噪声、无线电干扰及电阻、电晕损耗进行分析,并结合年费用计算进行经济性比较,提出了高海拔1 000 kV交流特高压输电线路导线截面积及分裂方式。探讨出的计算方法和计算结论可为特高压交流输电线路高海拔导线选型设计提供参考。

1 导线及分裂方式的初选

1.1 总截面的选取

特高压交流线路所采用的导线,应符合有效的产品技术标准。这里根据现行导线标准《圆线同心绞架空导线》^[1],按照现有导线生产的情况,选择表1所示钢芯铝绞线导线进行比较,各导线分裂数组合见表2。

表 1 导线参数

导线型号	铝、钢股数	截面/mm ²	直 径/mm	线重/(kg · m ⁻¹)	电阻/(Ω · km ⁻¹)
JL/G1A - 1000/85	84 × 3. 89/19 × 2. 34	1 080. 00	42. 79	3. 411 0	0. 028 76
JL/G1A - 900/75	84 × 3. 69/7 × 3. 69	975. 00	40. 60	3. 074 2	0. 032 20
JL/G1A - 800/55	45 × 4. 80/ 7 × 3. 20	870. 60	38. 40	2. 687 5	0. 035 80
JL/G2A - 720/50	45 × 4. 53/ 7 × 3. 02	775. 41	36. 23	2. 397 7	0. 039 84
JL/G1A - 630/45	45 × 4. 22/ 7 × 2. 81	674. 00	33. 60	2. 079 2	0. 045 90
JL/G1A - 500/45	48 × 3. 60/ 7 × 2. 80	531. 68	30. 00	1. 685 5	0. 059 10

表 2 导线分裂数组合

分裂数		匹配导线型号			
6 分裂	JL/G1A - 900/75	JL/G1A - 1000/85	/	/	/
8 分裂	JL/G1A - 500/45	JL/G1A - 630/45	JL/G2A - 720/50	JL/G1A - 800/55	JL/G2A - 900/75
10 分裂	JL/G1A - 500/45	1JL/G1A - 630/45	/	/	/

表 3 导线分裂间距及 S/d 值

分裂根数	分裂间距/mm	分裂导线圆直径/mm	S/d
6	450(900/75 导线)	900. 00	11. 08
	500(1 000/80 导线)	1 000. 00	11. 68
8	450	1 175. 91	11. 08 ~ 15. 00
10	450	1 456. 23	13. 39 ~ 15. 00

1. 2 分裂间距

导线分裂间距 S 的选取与子导线直径 d 有关, 并需考虑分裂导线的次档距振荡和电气特性两个方面。各分裂导线组合分裂间距设置见表 3。

2 电磁环境计算

目前, 主要的 1 000 kV 特高压交流输电线路导线均采用水平排列, 绝缘子串为 IVI 串布置, 单回路铁塔布置如图 1 所示。

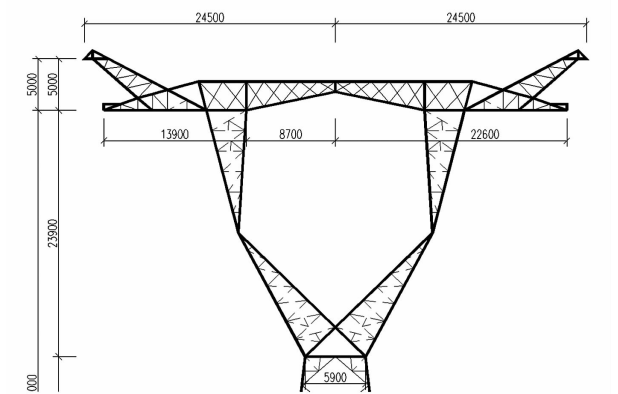


图 1 1 000 kV 单回路 IVI 塔头布置图

2. 1 工作场强与临界场强的比值 (E_m/E_0)

根据 GB 50665 - 2011《1 000 kV 架空输电线路设计规范》规定, 并结合国标中建议导线表面电场强度 (E_m) 不宜大于全面电晕电场强度 (E_0) 的 80% ~ 85% 的要求。

中国特高压交流线路采用的计算公式^[4]为

$$E_{m0} = 30. 3m\delta^{2/3}(1 + 0. 3/\sqrt{r_0}) \tag{1}$$

式中: E_{m0} 为临界电场强度, m 为导线表面系数, 对绞线一般可取 0. 82; δ 为相对空气密度; r_0 为导线半径, cm。

导线表面最大工作场强 E_m 取决于最高运行电压、子导线直径、相导线分裂形式及相间距离等, 目前常用的方法为逐次镜像法^[4]。

由上述计算方法分析, 对于不同的导线组合方案, 在不同海拔高度下, 各导线的 E_m/E_0 值均不同, 为满足 E_m/E_0 值在 80% ~ 85% 范围内的限值, 各导线组合方案均存在不同的适用海拔范围。

在满足工作场强与临界场强的比值 ($E_m/E_0 = 0. 85$) 时, 各导线组合方案适用海拔如图 2 所示。

根据图 2 可看出, 6 分裂 900 mm² 导线和 8 分裂 500 mm² 导线均不能满足海拔 3 000 m 时 (E_m/E_0) 的限值要求。

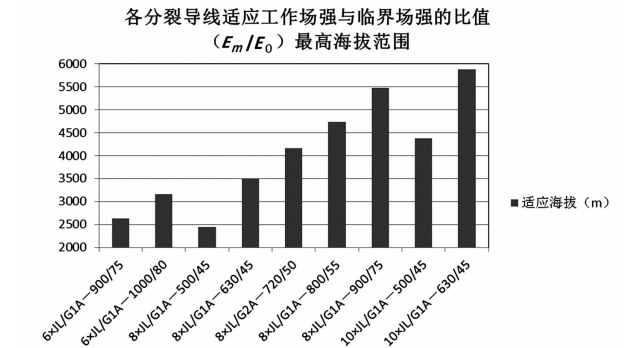


图 2 各分裂导线组合适应工作场强与临界场强比值海拔范围图 ($m = 0.85$)

2.2 无线电干扰和可听噪声

2.2.1 无线电干扰计算方法

无线电干扰计算采用 GB 15707-95《高压交流架空送电线路无线电干扰限值》建议的公式。

$$N_D = 3.5E + 12r - 30 + 33\lg \frac{20}{D} \quad (2)$$

式中: N_D 为距离线路边线 D 处 ($D < 100\text{ m}$) 0.5 MHz 的 RI 电平, dB; E 为线路边导线表面最大电场强度有效值, kV/m; r 为单根导线半径, cm; D 为被干扰点到边导线的距离, m。

80% 时间及 80% 置信度的无线电干扰场强 $E_{80\%, 80\%}$ 由 $E_{50\%, 50\%}$ 值的基础上增加 6 ~ 12 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) 得到, 这里取值为增加 8 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)^[4]。

需要说明的是, 近年来, 中、短波频段的无线电广播收听已不再成为公众获取信息的主要渠道, 输电线路无线电干扰指标的好坏也基本不影响公众的生活质量。在多年的环境监测过程中已发现, 即使偶尔出现线路附近无线电干扰超过限值的情况, 也没有对百姓的无线电广播收听造成实际影响。目前, 在输变电工程的环境影响评价中已不再纳入无线电干扰因子。

2.2.2 可听噪声计算方法

这里采用 BPA 计算公式来进行本工程的可听噪声预测^[3]。

$$\text{SLA} = 10 \times \lg \sum_{i=1}^Z \lg^{-1} \left(\frac{\text{PWL}(i) - 11.4 \times \lg(R_i) - 5.8}{10} \right) \quad (3)$$

式中: SLA 为 A 计权声级; $\text{PWL}(i)$ 为 i 相导线的声功率级; R_i 为测点至被测 i 相导线的距离, m; Z 为相数。

式(3)的 PWL 按式(4)计算:

$$\text{PWL} = -164.4 + 120 \times \lg E + 55 \times \lg d_{eq} \quad (4)$$

式中: E 为导线的表面梯度, kV/cm; d_{eq} 为等效直径, 按式(5)计算:

$$d_{eq} = 0.58 \times n^{0.48} \times d (n > 4) \quad (5)$$

式中: n 为分裂根数; d 为次导线直径, mm。

2010 年国家电网公司开展了“特高压输电线路设计深化研究”课题研究, 根据中国特高压交流试验示范工程和特高压交流试验基地试验线段的可听噪声实测结果与理论计算结果的比较, 按现行的 BPA 公式得到的特高压交流线路可听噪声计算值较实测值偏大约 2 dB(A), 因此可对现有的可听噪声计算方法在原公式计算结果基础上减去 2 dB(A) 进行修正。

中国已针对不同海拔高度(海拔高度 400 ~ 3 330 m)的 330 kV、750 kV 线路做了大量的测试工作, 并提出了适用于工程上的可听噪声海拔修正量, 即海拔以 1 000 m 为基准, 海拔每增加 1 000 m 线路可听噪声增加约 1.5 ~ 2.0 dB。由于目前特高压输电线路尚未开展相关海拔修正测试工作, 这里根据 750 kV 线路测试结论进行递推, 建议 1 000 kV 输电线路的可听噪声海拔修正量为: 海拔每增加 1 000 m 线路可听噪声增加值暂取 2.2 dB(A)。

2.2.3 计算结果比较

按 GB 50665-2011《1 000 kV 架空输电线路设计规范》的要求: 湿导线可听噪声不大于 55 dB(A) (海拔 500 m 推算)^[2] 限值; 无线电干扰测量值不大于 58 dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) (海拔 500 m 推算) 限值。

按上述规范的要求, 各分裂导线方案按不同海拔修正值进行计算, 所得结果如图 3 所示。

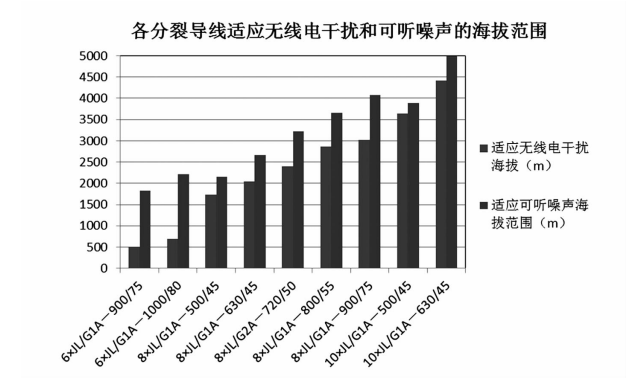


图 3 各分裂导线适应无线电干扰和可听噪声海拔范围

由图 3 可以看出, 8 分裂 900 mm² 导线及 10 分裂 500 mm² 和 630 mm² 导线均满足海拔 3 000 m 的无线电干扰以及可听噪声要求值, 而 6 分裂导线受无线电干扰限制, 不适用于高海拔地区。

2.3 电能损耗

2.3.1 电阻电能损耗

电阻损耗是输电线路运行期间所导致的发热损耗,通常与输送功率、最大负荷损失小时数等相关。其计算公式为:

$$Q = (P/U \times \varphi)^2 \times R \times t \tag{6}$$

式中: Q 为电阻损耗; P 为输送功率; U 为额定电压; φ 为功率因数; R 为交流电阻; t 为最大负荷损失小时数。

各分裂导线组合输送功率为 5 000 MW,按照最大负荷损失 3 000 h、4 000 h、5 000 h 进行电阻损耗计算,结果见图 4。

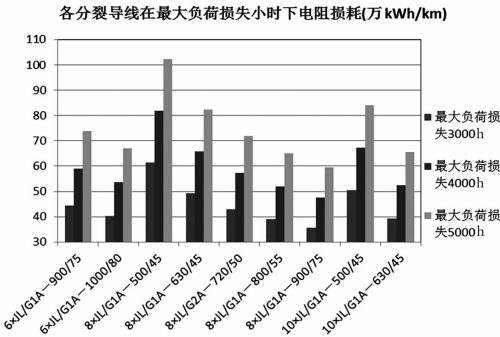


图 4 各分裂导线电阻损耗对应图

2.3.2 电晕损耗计算

当输电线路导线周围电场强度超过空气击穿强度时,邻近导线附近的空气产生电离形成电晕放电,将电能转化为热、光、可听噪声和无线电干扰等形式释放,这种能量损失就是电晕损失。

在确定高海拔特高压线路导线选型及分裂方式时,不仅要考虑导线的电阻损耗,还应考虑不同导线结构下的电晕损失。在高海拔地区,电晕造成的电能损失占总电能损失比例较高,已成为决定导线经济性优劣的控制因素。

年平均电晕功率损失为导线在各种天气条件下(好天、雪天、雨天、雾淞天)产生的电晕功率损失的总和,参考有关工程典型气候情况^[3],这里 1 000 kV 交流输电线路电晕损失计算采用气候情况见表 4。

由于电晕损失计算需依据(E_m/E_0)值^[4]查询计算曲线取得,但目前尚无特高压交流线路电晕损失的计算曲线,故这里采用《电力工程高压送电线路设计手册》(第二版)中年平均电晕损失计算曲线^[4]进行估算,见表 5。

由表 5 可看出:

1)随着导线分裂数的减少,电晕损耗随之增大,在总铝截面积大致相当的情况下,6 分裂导线电晕损耗约为 8 分裂导线电晕损耗的 1.8~2.7 倍。8 分裂导线电晕损耗约为 10 分裂导线电晕损耗的 1.25~1.8 倍。

2)海拔每增加 1 000 m,电晕损失增加 2~5 倍。

同时根据计算曲线^[4],针对好天气、雪天、雨天情况下,导线的(E_m/E_0)值在 0.9、0.7、0.6 时,对应的电晕损失值出现突变,但该曲线对于所研究的特高压高海拔条件下的适应性需验证。另外,针对 1 000 kV 的电晕损失计算目前尚无成熟的计算经

表 4 电晕损失计算天气数

天气条件	好天气	雪 天	雨 天	雾 淞 天
小时数/h	7 372	182	1 042	164

表 5 各分裂导线组合计算电晕损耗

导线型号	分裂数	电晕损耗/(kW·km ⁻¹)			
		1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m
JL/G1A-900/75	6	106.9	262.7	1 202.9	2 727.60
JL/G1A-1000/85	6	83.4	188.7	852.8	2 318.66
JL/G1A-500/45	8	105.7	283.5	1311.1	2 722.93
JL/G1A-630/45	8	68.7	149.5	602.2	1 822.55
JL/G2A-720/50	8	56.0	114.8	376.9	1 279.12
JL/G1A-800/55	8	46.8	92.5	255.6	860.50
JL/G1A-900/75	8	40.1	77.8	187.9	587.70
JL/G1A-500/45	10	54.3	108.9	339.0	1 152.25
JL/G1A-630/45	10	37.2	71.2	165.9	481.80

验,因此特高压电晕损失计算曲线尚需进一步进行研究、验证。

3 年费用比较

年费用法为财务评价方法之一,能反映工程投资的合理性和经济性。

年费用最小法计算为^[4]:

$$F_N = Z \left[\frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \right] + u \tag{6}$$

式中: F_N 为年费用(平均分布在 n 年内); u 为折算年运行费用; r_0 为电力工程投资的回收率,按 8%、10% 计; n 为经济使用年数,这里取值为 30 年; Z 为折算到第 m 年的总投资,按式(7)进行计算。

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t (1 + r_0)^{m+1-t} \tag{7}$$

式中: m 为施工年数,参考工程建设周期,这里取为 2 年; t 为从开工这一年起计算年的年数,参考工程建设周期,取值为 1 年。

在高海拔输电线路电能损耗计算中包含电阻损耗与电晕损耗两部分,在相同的输送功率下电阻损耗仅与导线材料、运行时间相关,相同运行条件下,各导线方案电阻损耗为固定值。而如前面所述,电晕损耗则与输电线路所处位置的天气、海拔、运行时间等相关,在全年相同的天气条件和运行时间下,各导线方案电晕损耗随海拔高度增加而增大。这里年最小费用比较法中同时考虑了输电线路电阻损耗与电晕损耗所造成的费用变化情况。

为了进一步分析各种导线的经济性,采用最小年费用法对所选 9 种导线组合方案在海拔 1 000 ~ 3 000 m 时不同年损耗小时下的年费用进行了计算比较,如图 5 至图 10 所示。

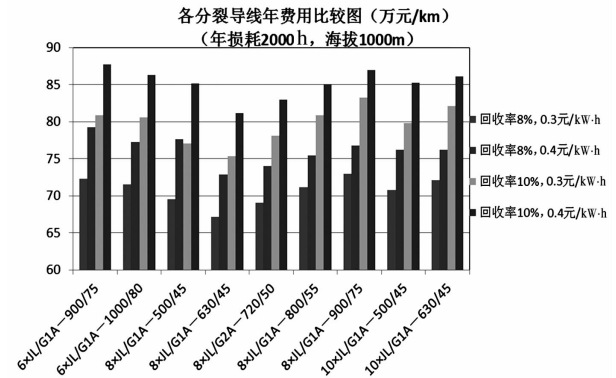


图5 年损耗2 000 h,海拔1 000 m 年费用比较

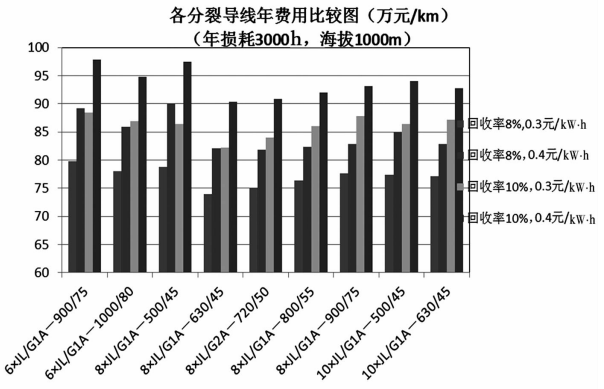


图6 年损耗3 000 h,海拔1 000 m 年费用比较

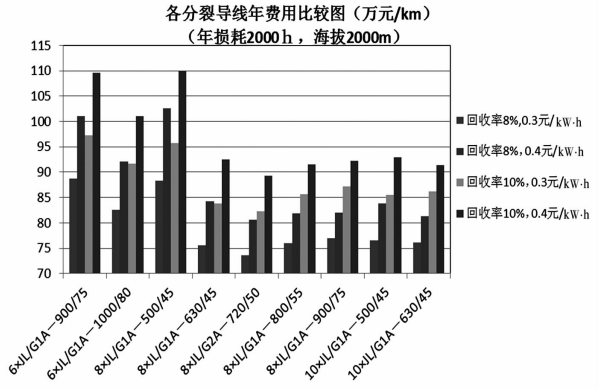


图7 年损耗2 000 h,海拔2 000 m 年费用比较

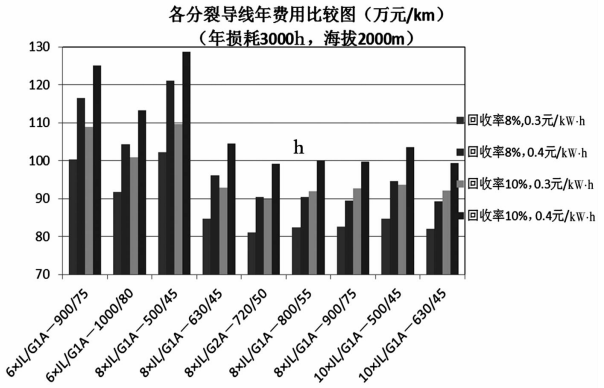


图8 年损耗3 000 h,海拔2 000 m 年费用比较

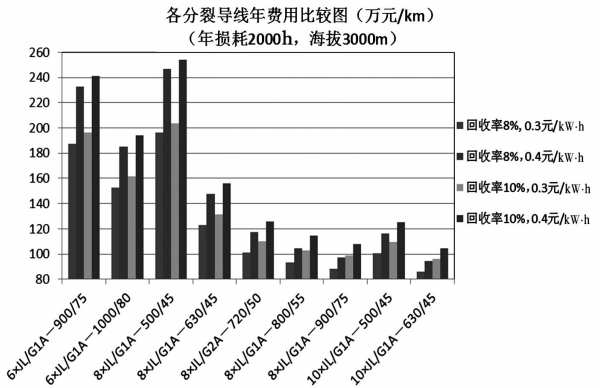


图9 年损耗2 000 h,海拔3 000 m 年费用比较

(下转第86页)

楚雄换流站接地极线路加强绝缘研究

胡 全, 鄢 艺

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:在接地极线路设计中,其绝缘配合水平选择的合理性关系到整个直流输电系统的安全可靠运行。以楚雄换流站接地极线路为例,简述了按照两端换流站及直流输电线路本体故障后在接地极线路上引起的操作过电压提高接地极线路绝缘配置的方法。

关键词:接地极线路;操作过电压;绝缘配置

Abstract:In the design of electrode lines, the selection of insulation coordination level relates to the safe and reliable operation of DC transmission system. Taking the electrode line of Chuxiong converter station for example, the method for enhancing the insulation level of electrode lines according to the condition of switching overvoltage caused by ontology fault of converter stations and DC transmission line is briefly described.

Key words:electrode line; switching overvoltage; insulation configuration

中图分类号:TM721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0044-03

0 引言

接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,不但可以限制中性点电位,还可以为直流电流提供通路,在接地极线路设计中,其绝缘配合水平选择的合理性关系到整个直流输电系统的安全可靠运行。DL/T 5224-2014《高压直流输大地返回运行系统设计技术规定》对接地极线路的绝缘配置进行了规定:1)接地极线路的绝缘子片数不得少于 2 片;2)工作电压、雷电过电压情况下的空气间隙分别不得小于 0.1 m、0.4 m;3)招弧角间隙应小于 0.85 倍绝缘子有效长度。

楚雄换流站接地极线路起于楚雄换流站,止于马街接地极中心塔,线路长 106.4 km,原设计按照 DL/T 5224-2005 的相关要求,同时参考已建接地极线路设计经验,绝缘配置如下:

- 1) 全线悬垂绝缘子串和跳线串采用 3 片 XZP-160(高度为 170 mm)直流绝缘子,耐张串采用 4 片 XZP-210(高度为 170 mm)直流绝缘子;
- 2) 工作电压、雷电过电压情况下的空气间隙分别取值 0.12 m、0.5 m;
- 3) 悬垂和耐张绝缘子串的招弧角间隙统一取 0.4 m。

按此计算,该工程接地极线路绝缘耐压情况见表 1。

表 1 接地极线路绝缘耐压一览表

试验项目	绝缘子串	塔头间隙	招弧角间隙	最小值
直流耐压/kV	165(420)	58.4	200	58.4
操作冲击耐压/kV	363	146	200	146
雷电冲击耐压/kV	450	250	200	200

注:①绝缘子干湿 1 min 耐受电压分别取值 140 kV/片和 55 kV/片;②直流线路导线-塔头取 487 kV/m,棒-棒取 500 kV/m 考虑^[1];③操作冲击耐压参照直流耐压值×2.2 考虑。

1 楚雄接地极线路故障试验及仿真

2012 年 12 月,±800 kV 楚雄换流站在孤岛调试试验过程中,测得楚雄接地极线路极 I 中性母线电压达 160.72 kV,极 II 中性母线电压达 174 kV,致使接地极线路 008 号塔左侧导线绝缘子串闪络,招弧角烧伤明显。这表明在直流输电线路特定的运行工况下,原±800 kV 换流站中性母线和接地极线路之间绝缘操作冲击电压耐受水平不匹配^[2],楚雄接地极线路绝缘配置将不满足过电压要求,需要提高接地极线路绝缘水平,以适应换流站中性母线避雷器操作过电压保护水平要求。

1.1 楚雄站内接地故障在接地线路上产生的操作过电压计算

采用 EMTDC 模型^[3],将接地极线路按照 E0 - E10 进行 10 等分后,考虑了除滤波器避雷器外的所有避雷器,同时在不考虑接地极线路闪络的情况下,对各种可能引起中性母线过电压的典型工况进行了计算,楚雄接地极线路 10 等分点处引起的操作过电压水平及操作耐受水平要求见图 1。

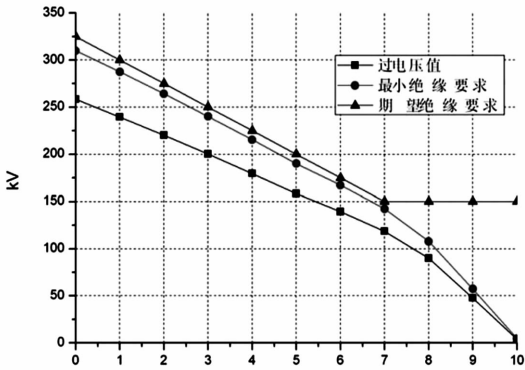


图 1 10 等分点处操作过电压及耐受水平要求曲线

1.2 楚雄—穗东 ±800 kV 线路接地故障在接地线路上产生的操作过电压计算

采用 EMTDC 模型,将接地极线路按照 E0 - E10 进行 10 等分后,模拟了不同故障情况下,楚雄接地极线路 10 等分点处引起的操作过电压水平及操作耐受水平见图 2、图 3。

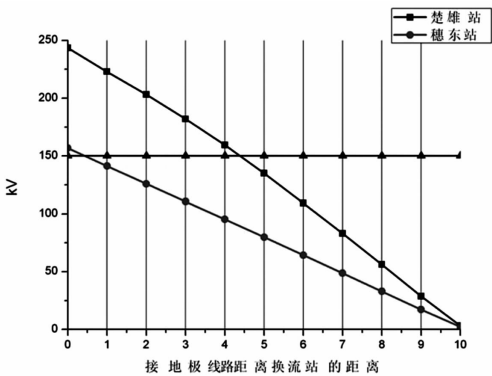


图 2 楚雄站出口故障后,楚雄接地极线路沿线个点的最大电压分布(黑线)

1.3 仿真小结

根据以上仿真结果可见,当楚雄站或楚雄站出口处发生接地故障时,楚雄接地极线路沿线各点操作过电压水平都比较高,沿线过电压水平与距接地极的距离基本成正比,按原绝缘配置能满足的 146 kV 的操作过电压进行校核,仅有约 30% 远离楚雄站的接地极线路满足要求。

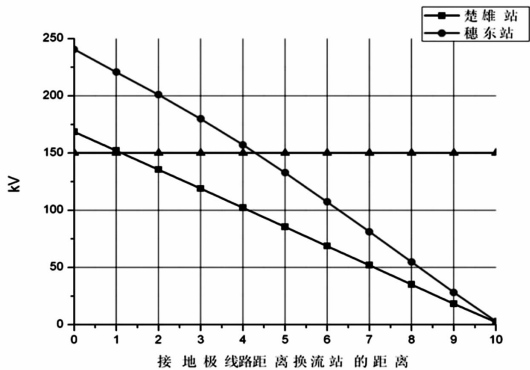


图 3 穗东站出口故障后,楚雄接地极线路沿线个点的最大电压分布(黑线)

2 楚雄接地极线路加强绝缘配置方案

按照以上仿真计算结果,考虑操作过电压的分布特性,楚雄接地极线路主要在招弧角间隙、绝缘子片数配置两个方面进行加强配置以满足操作过电压要求。

2.1 招弧角间隙

参照相关试验成果,棒 - 棒间隙直流操作过电压耐压水平暂按 500 kV/m 考虑,故接地极线路换流站端招弧角间隙需加大到 $325/500 = 0.65$ m。略留裕度后,接地极线路换流站端招弧角间隙按 0.7 m 考虑(即与交流 110 kV 线路的操作过电压间隙相同),经海拔修正后,取值为 0.91 m。

随着与换流站间距的增大,接地极线路上的操作过电压随之降低。在考虑 20% 安全裕度后,距换流站 40% 线路长度时,操作过电压要求值约为 225 kV;距换流站 70% 线路长度时,操作过电压要求值约为 150 kV(该值与接地极线路现有间隙的耐压水平相当)。相对应地,海拔修正后的招弧角间隙取值分别为 0.63 m 和 0.4 m。考虑到产品供货和施工的统一性,全线招弧角间隙取值为 0.91 m。

2.2 绝缘子片数配置

由于塔头间隙受操作过电压限制,根据绝缘配合要求,绝缘子串有效长度需大于塔头间隙,即接地极线路换流站端的绝缘子片数按由 3 片增加到 7 片 ($0.7 \times 500/55 \approx 7$) 考虑,随着距换流站间距的增大,绝缘子片数应随操作过电压的降低而减少。距换流站 40% 和 70% 线路长度时,对应的绝缘子片数为 5 片和 3 片。考虑到施工和运维方便,距换流站 0 ~ 40% 范围内,悬垂串、耐张串和跳线串均按 7 片

考虑;距换流站40%~70%范围内,悬垂串和跳线串按5片、耐张串6片考虑;其余段悬垂串和跳线串按3片、耐张串4片考虑。

2.3 绝缘间隙

1)塔头间隙:按绝缘配合要求,塔头的间隙不应小于招弧角间隙值,即在相应风偏情况下塔头间隙暂按招弧角间隙的相同值考虑。

2)直流耐压间隙:由于接地极线路的最高工作电压(即直流运行电压)未变,故直流耐压间隙仍按原设计值0.12 m考虑。

3)雷电过电压间隙:由于接地极线路的雷电过电压耐受水平低,雷电间隙仍按原设计值0.5 m考虑。

3 结 语

通过对楚雄站内、楚雄—穗东±800 kV线路各种故障工况下,在楚雄接地极线路上引起的操作过电压进行仿真计算,提出了楚雄接地极线路提高绝缘应满足的要求,同时考虑操作过电压的分布特性,

(上接第17页)

数,提高预测模型的精度。

3 结 语

智能电网中的大数据产生于电力系统的各个环节,通过有效地利用数据挖掘技术,从电力企业积累的数据中获得有助于管理决策的知识,帮助企业解决面临的现实问题,提高企业基于数据的业务管控能力和运营效率。

数据挖掘在智能电网的很多方面都有应用,并且效果明显。以数据挖掘在细分用户电力负荷预测中的应用为切入点,分析在售电侧改革的背景下,利用数据挖掘技术提高电网企业的经济效益、实现管理创新。

从中国目前的应用来看,数据挖掘技术在智能电网中还没有大规模和普遍使用,并且数据挖掘在实际的实现过程中仍然存在着一些亟待解决的问题。因此,仍需要进一步开展数据挖掘技术理论与应用方面的研究。

参考文献

[1] 温满华. 刍议大数据时代数据挖掘技术在电力企业中的应用[J]. 现代国企研究, 2015(24): 26.

对原线路的招弧角间隙、绝缘子片数、塔头间隙进行了加强改造,进一步加强了楚雄接地极线路的绝缘配置水平,保证了楚雄—穗东±800 kV线路的安全运行。

参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[2] 周沛洪, 修木洪, 谷定燮, 等. ±800 kV 直流系统过电压保护和绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 125-383.
[3] 王彩芝, 姜映辉, 王俊江, 等. 基于PSCAD-EMTDC的HVDC接地极线路故障仿真[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 69-72.

作者简介:

胡全(1980), 硕士研究生、高级工程师, 从事输电线路设计工作;

鄢艺(1987), 硕士研究生、工程师, 从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-09-15)

[2] 于之虹, 郭志忠. 数据挖掘与电力系统[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 58-62.
[3] 陈星莺, 张晓花, 瞿峰, 等. 数据挖掘在电力系统中的应用综述[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(3): 51-56.
[4] 罗辑, 杨劲锋, 肖勇, 等. 用电数据挖掘技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
[5] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.
[6] 邓炜瑛. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 中外企业家, 2015(6): 126.
[7] 中国电机工程学会信息化专业委员会. 中国电力大数据发展白皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
[8] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 104-109.
[9] 张晓萱, 薛松, 杨素, 等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 1-8.
[10] 张晓春, 倪红芳, 李娜. 基于数据挖掘的供电企业客户细分方法及模型研究[J]. 科技与管理, 2013, 15(6): 104-109.

作者简介:

袁丽娟(1981), 大学本科, 从事电力通信工作;

袁方(1990), 硕士研究生, 从事信号与信息处理。

(收稿日期: 2017-06-27)

架空输电线路设计冰区划分方法综述

郭新春

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:冰区划分是架空输电线路设计的关键问题之一,对线路工程建设经济合理性及运行的安全可靠具有重要影响。针对目前国内输电线路设计冰区划分方法及应用进行了介绍,对其存在的问题和发展趋势分别进行了探讨和展望。

关键词:输电线路;冰区划分;应用

Abstract: Zoning of icing area is one of the key issues for the design of overhead transmission lines, and has important impact on economic rationalization and operation reliability of power grid engineering. The zoning methods of icing area and its application are introduced aiming at the current transmission lines in China. The problems in engineering applications are discussed, and the development trend of icing survey is introduced.

Key words: transmission line; zoning of icing area; application

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)05-0047-04

0 前言

导线覆冰指在一定的气象条件下,雨淞、雾淞、雨雾淞混合冻结物和湿雪凝附在导线上的现象。导线覆冰会导致导线和杆塔的荷载增加、迎风面积扩大,极易产生不稳定的弛振,常造成线路跳闸、闪络、扭转、断线、倒塔等事件,从而导致停电等事故。中国的电网建设从局部小区域发展到局部大区域,越来越多的输电线路开始穿越一些高山大岭的重冰区,电网冰灾开始大量出现,导线覆冰问题引起了国内学术界和工程设计人员的高度关注。随着全国电网的联网建设与西南水电建设的快速发展,高海拔山区输电线路覆冰问题将愈发突出,因此,架空输电线路设计冰区划分成为了线路抗冰安全设计的关键技术之一,对电网工程建设经济合理性及运行的安全可靠具有重要意义。

1 方法及应用

目前,国内电网工程规划设计中主要采用数理统计、历史覆冰调查等方法来确定线路设计冰厚,再结合其他参考资料确定冰区划分;尝试将数值模拟和数字冰区划分技术引入工程实践。

1.1 数理统计方法

数理统计方法是基于工程区域长系列实测覆冰数据,运用统计学的方法对覆冰量级进行分析,研究导出其概念规律性。在工程区域或邻近区域具有实测覆冰系列资料时,需搜集覆冰过程极值进行统计分析。首先按 DL/T 5509-2015《架空输电线路覆冰勘测规程》给出的公式计算标准冰厚,即将不同形状、不同密度的覆冰换算为标准状态下(覆冰横截面为圆形,密度为 0.9 g/cm^3)的冰体厚度。然后,根据标准冰厚数据系列进行频率计算,得到设计重现期下的标准冰厚成果。最后,按线路工程设计标准和布设条件进行设计冰厚计算,通过进行高度、线径、地形、走向等订正得到路径区段的设计冰厚成果。

在覆冰计算过程中,涉及到的覆冰密度、形状系数、高度换算、线径换算和地形换算等参数应由当地实测覆冰资料计算分析确定。无资料地区可按 DL/T 5509-2015《架空输电线路覆冰勘测规程》相关规定选用。

当工程区域内观冰站或高山气象站有 10 年以上的年最大覆冰观测资料时,观测站设计冰厚应采用频率计算方法确定。频率计算中概率分布模型应根据冰厚时间序列的分布特性选用,并应选择其中与观测数据拟合最佳的模型计算值作为测站设计冰厚采用值。覆冰概率分布模型应选用 P-Ⅲ型、极

表 1 峨眉山站标准冰厚超门限值出现次数泊松分布的 χ^2 检验

门限值/mm	统计年数	出现次数	年交叉率(λ)	统计量(U)	自由度(γ)	$\chi^2_{0.05}$	是否通过检验
9	39	168	4.307 7	14.409 3	8	16.507 0	否
10	39	122	3.128 2	14.392 4	6	12.592 0	否
11	39	94	2.410 3	7.084 6	3	7.815 0	是
14	39	39	1.000 0	5.471 9	2	5.991 0	是

值 I 型、GPD 型,也可选用威布尔、伽马及第一类贝塔等分布模型。

在观冰站或高山气象站覆冰观测年限仅有 5 ~ 10 年时,测站设计冰厚可采用广义帕雷托概率分布 (generalized pareto distribution, GPD) 模型计算^[1]。GPD 分布模型是一种极值概率分布模型,GPD 分布采用基于超门限值法 (peak - over - threshdd, POT),能充分利用有限样本信息,增加极值样本量。其优越性为短序列覆冰设计冰厚的估计提供了理论基础。在 GPD 分布中,通过超门限覆冰次数的泊松分布拟合检验,结合 Hill 图解,提出了 POT 抽样门限确定的方法。2008 年南方地区电网罕见冰灾后,西南电力设计院有限公司采用 GPD 分布模型对导线覆冰冰厚极值概率分布模拟的适用性进行了专项研究,结果表明,中国导线覆冰冰厚极值的概率分布符合 GPD 模型,其拟合精度高于以往常用的极值 I 型。

下面以峨眉山气象站为例,采用 GPD 模型计算不同重现期的设计冰厚。利用峨眉山气象站积冰资料,选取门限值,得到相应超门限极值次数序列,见表 1。再计算不同门限值下的 Hill 估计量,考察 Hill 估计量随门限值的演变情况,见图 1。

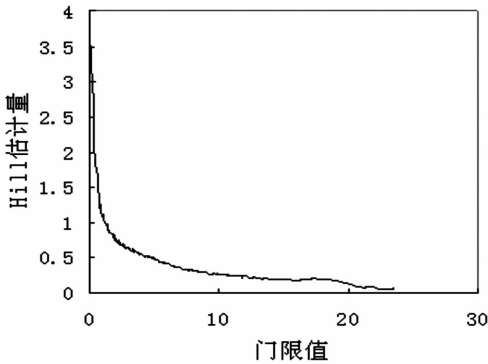


图 1 峨眉山站标准冰厚的 Hill 图

结合图 1 中 Hill 估计量随门限值变化趋于稳定的点,可以确定峨眉山站的最佳门限值约为 11 mm。再利用峨眉山站的超门限极值冰厚系列,进行 GPD 模型重现期极值计算,计算结果见表 2。

利用短期 1 ~ 5 年覆冰观测资料计算设计冰厚

表 2 峨眉山站设计冰厚计算结果

重现期/年	设计冰厚/mm
15	23
30	25
50	27
100	29

的关键问题是确定短期实测最大覆冰的重现期。西南电力设计院有限公司应用覆冰相关气象要素与覆冰持续日数组成覆冰气象指数(覆冰强度指数),进行经验频率分析评估 2008 年罕见覆冰的重现期,取得了较好的效果;江苏省电力设计院基于覆冰强度概念,提出了一种简单的适用于中、轻冰区的重现期分析模型^[2]。

覆冰气象指数频率分析方法中选择历年(冬半年)最大覆冰指数时,基本资料处理及计算步骤如下:

1)在每一个冬半年(一般为 10 月至次年 3 月)中,选择日平均气温低于或等于 0℃的天气过程(时段),一个冬半年中的覆冰天气过程总个数记为 M 。选择的年数为 25 年。

2)评定每一个覆冰天气过程中的主要覆冰气象要素对覆冰的贡献量。某日的覆冰气象指数等于各要素贡献量之和。覆冰主要气象要素对覆冰贡献量标准见表 3。

表 3 覆冰主要气象要素对覆冰贡献量标准

气象要素	数值区间	贡献量
日平均气温 T /℃	$-4.0 \leq T \leq -0.5$	3
	$-6.0 \leq T < -4.0$	2
	$-10.0 \leq T < -6.0$	1
	其他	0
日平均相对湿度 H /%	$90 \leq H \leq 100$	4
	$70 \leq H < 90$	2
	$50 \leq H < 70$	1
	其他	0
日平均风速 V /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$0.3 \leq V < 3.0$	3
	$3.0 \leq V < 6.0$	2
	$6.0 \leq V < 15.0$	1
	其他	0

3) 一个覆冰过程的覆冰气象指数等于覆冰过程逐日覆冰气象指数之和除以覆冰过程总日数。在一个冬半年中可计算出 M 个覆冰气象指数。

4) 从一个冬半年的 M 个覆冰气象指数中选择最大者为该年最大覆冰过程相应的年最大覆冰气象指数。

5) 按照步骤 1) 至步骤 4), 针对 25 个冬半年, 逐一计算并选择年最大覆冰气象指数, 可得到连续 25 年的最大覆冰气象指数统计样本。

6) 应用 25 年年最大覆冰气象指数样本进行频率计算, 分析实测或调查覆冰值的重现期。

1.2 历史覆冰调查方法

历史覆冰调查方法是通过向工程区域有关部门和当地居民调查搜集历史覆冰情况、灾害记录和研究成果等来分析工程设计冰厚。当线路工程区域缺乏覆冰实测资料时, 历史覆冰调查方法是解决输电线路冰区划分问题的重要手段。覆冰调查可以提供当地覆冰的定性情况和定量资料, 并通过沿线地形、气候特征与当地气象资料综合分析, 以及与邻近地区的实测覆冰资料进行地形、气候条件的类比分析, 估算沿线标准冰厚。

覆冰调查资料包括: 覆冰年份, 调查覆冰点位置, 覆冰点地形及海拔, 覆冰附着物名称、直径、离地高度及与覆冰主导风向的夹角, 覆冰后的长径, 覆冰持续时间, 覆冰形状及性质, 覆冰时天气现象(雾天、雨天、雪天、阴天、晴天), 覆冰灾害情况, 资料可靠性评价等。

输电线路覆冰调查一般在沿线附近村镇居民点、厂矿、高山电视台、移动通信基站等进行, 同时还要搜集相关省、市、县的低温、冰凌、降雪等有关资料。调查范围是规划线路的整个覆冰区段。调查点应选择能代表沿线地形特征的地点, 如山间盆地、山脊、山腰、垭口等, 此外, 特别要注意布设不同高程的调查点, 以了解不同高程的覆冰情况。对特殊地形点, 如风口、迎风坡、山岭(山脊)、邻近湖泊等大水体的山地、盆地与山地的交汇地带等除进行覆冰调查外, 还应作实地踏勘, 绘制地形草图, 辨明冬季主导风向, 观察气候、植被情况, 简测高程, 初步估计该地的寒冷程度和降水量, 以及覆冰的大小^[3]。

覆冰调查多为定性资料, 定量资料也大部分为目测数据, 误差较大, 因此对覆冰调查资料要进行可靠性程度评价。可通过区域性的低温、冰凌、降雪天

气资料审查其发生时间是否一致; 通过附近气象站实测资料和史料记载审查出现大覆冰的可能性; 通过冰害情况审查其合理性。

1.3 数字冰区划分方法

数字冰区划分方法是基于覆冰、气象和地形数据, 利用数字化和信息化技术手段获取工程区域覆冰空间区划。目前, 架空输电线路的冰区划分主要是由人工整合相关信息完成。对于资料缺乏且不具备调查条件的偏远地区的重覆冰区域, 通过传统方法解决资料短缺重冰区线路冰区划分问题较为困难。因此, 采用新的技术手段来探索局部区域覆冰空间分布十分必要。

数字冰区划分主要有以下 3 种途经: 1) 整合区域内覆冰实测、调查资料和地形数据, 通过空间插值得到区域覆冰区划; 2) 基于覆冰增长机理和观测实验数据, 建立覆冰数学模型, 模拟得到工程区域覆冰等级; 3) 利用区域内大量覆冰和气象实测资料以及数字高程数据, 建立覆冰量与气象或地形因子的数学关系, 与地理信息平台相结合计算生产区域覆冰空间分布。

2008 年南方地区电网罕见冰灾后, 国内科研和设计单位加强了导线覆冰观测与实验研究, 提出了一些覆冰数学模型和数字化冰区成果。例如, 西南电力设计院有限公司与高校合作, 建立了二郎山区域覆冰数学模型以及基于地理信息系统(GIS)的数字冰区划分系统^[4], 并在西南山区的重覆冰输电线路的勘测设计中进行了尝试性的应用, 应用效果见图 2。

此外, 气象部门基于大区域电线积冰和气象观测数据, 建立覆冰与气象因子或地形因子的大、中尺度统计模型; 电网企业与科研、设计单位合作, 提出了所辖地区的大范围数字化冰区分布成果。

随着中国电网工程建设的快速发展, 输电线路覆冰区划研究水平不断提高, 但由于覆冰基础资料的缺乏, 受尺度、精度和适用条件等限制, 因此目前已建覆冰模型均存在一定局限性, 难以大范围推广应用。

2 问题与展望

2.1 存在问题

尽管中国电网工程设计和建设历经高速发展, 输电线路覆冰研究也取得了长足进步, 但在导线覆

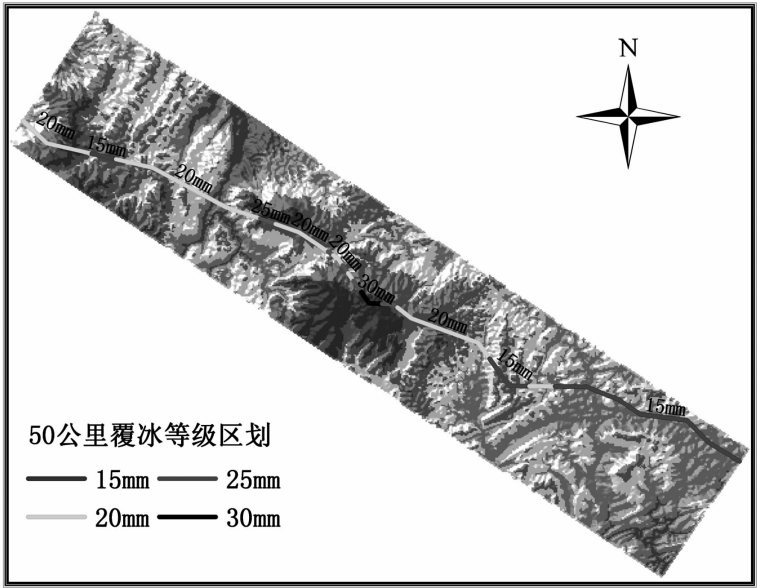


图2 西南山区某输电线路局部区段50年一遇冰区图

冰分布与区划研究中仍面临着一些问题,亟待解决:

1)覆冰基础资料缺乏。目前中国具有电线积冰观测的气象台站相对较少,电力企业在电网易覆冰区域设立的观冰站点仍旧稀疏,而易覆冰地区输电线路一般位于山地,这些区域基本都是覆冰资料空白区,导致线路工程设计冰区划分缺少实测数据支撑。

2)调查成果存在不确定性。对于无实测资料易覆冰区,输电线路设计冰区划分的传统方法是依据当地调查资料进行一系列换算得出。调查资料能准确地定性反映区域之间覆冰的严重程度,但要准确地定量反映区域覆冰分布、特别是地形复杂的山地覆冰分布,存在较大的不确定性。

3)数字冰区划分技术存在局限性。目前覆冰数学模型与数字化冰区成果,受尺度、精度和适用条件等限制,难以直接应用于工程实践或进行大范围推广。

2.2 发展展望

覆冰对输电线路的经济可靠设计和安全稳定运行有着重要影响,随着西部大开发和“西电东送”的不断推进,高海拔山区输电线路覆冰问题将愈发突出,因此,输电线路设计冰区划分成为了电网设计的关键问题。归纳起来,输电线路覆冰分布与区划研究的发展趋势包括以下几个方面:1)开展大范围覆冰观测与基础研究;2)建立重点区域覆冰气象数据综合利用数据库;3)加强新方法与新技术的研发与应用;4)提高覆冰模型适用性与数字化冰区成果精

度。

3 结 语

随着中国西南水电开发以及长距离、大规模输电通道建设的持续推进,输电线路将不可避免地穿越西南山区的严重覆冰地带,线路覆冰问题将愈发突出,对设计冰区划分的准确性与可靠性寄予了更高要求。面对覆冰基础资料缺乏以及分析方法不确定性和局限性问题,亟须加大覆冰观测与基础研究的投入,推进新技术与新方法在输电线路冰区划分中的应用,为电网工程的经济合理建设与安全可靠运行提供强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 江志红,刘冬,刘渝,等. 导线覆冰极值的概率分布模拟及其应用试验[J]. 大气科学学报,2010,33(4): 385-394.

[2] 潘晓春. 中、轻冰区输电线路设计冰厚分析计算[J]. 电力建设,2008,29(12): 31-33.

[3] 金西平. 微地形微气候对电力线路覆冰的影响[J]. 供用电,2008,25(4): 17-20.

[4] 熊海星,江志红,陈权亮,等. 输电线路覆冰研究及应用技术开发[R]. 成都:西南电力设计院,2011.

作者简介:

郭新春(1983),高级工程师、博士,从事电力水文气象勘察和研究。

(收稿日期:2017-06-27)

信息化岩土勘察在架空输电线路工程中的应用研究

谭光杰

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:对架空输电线路工程而言,传统岩土勘察存在勘察质量高度依赖于外业工程师的业务水平、协同工作困难和外业工程师无法感知环境等 3 个几乎无法解决的难题。信息化岩土勘察通过数据集成、信息实时交流和塔位选择辅助判断等技术手段可以较好地解决传统岩土勘察存在的 3 个难题。

关键词:信息化岩土勘察;架空输电线路;数据集成;实时双向通信

Abstract:Traditional geotechnical investigation for overhead transmission line project has three problems: the geotechnical investigation quality is decided by the field engineers, the cooperative work is very difficult and the field engineers are unable to know the environment of the towel. In some ways, the information – based geotechnical investigation can solve these three problems by data integration, real – time information exchange and assistant decision.

Key words:information – based geotechnical investigation; overhead transmission line; data integration; real – time information exchange

中图分类号:TM726 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)05 – 0051 – 04

0 前 言

线路工程岩土勘察就是选出“杆塔”场地,查明“杆塔”场地工程地质条件,评价岩土工程问题。选出“杆塔”场地的前提是选出路径方案,这是在工程可行性和初步设计阶段完成;选出“杆塔”场地在施工图阶段完成。

传统架空输电线路工程施工图勘察设计由电气、结构、测量、岩土等多专业组成的综合工程队在杆塔处“一次性”地完成勘察设计的外业部分。所谓的“一次性”是指在正常情况下,同一杆塔场地只做一次外业勘察设计。在勘察设计过程中,各专业主管组成的中间检查小组对勘察设计质量进行检查;由于同一线路工程有成百上千的塔位,中间检查只能采用外业工程师汇报所有塔位勘察设计情况和选择其中有代表性的杆塔场地实地检查相结合的方式。因此,传统的岩土勘察存在以下问题:

- 1)外业勘察设计质量很大程度上依赖于外业工程师的个人业务能力。
- 2)如果出现外业工程师自己无法解决或者需要技术主管协助的杆塔场地岩土勘察问题,只能通过电话与技术主管协同工作。但通过电话交流,外

业工程师无法准确告知技术主管自己所在的位置,也无法传递相对完整的杆塔场地等第一手勘察资料。没有准确位置和第一手勘察资料,技术主管就无法应用已有的区域地质图、公共地理信息等数据为外业工程师做出辅助判断,两者之间难以形成有效的协同工作。

3)输电线路工程长达数百上千公里,穿越了多个地貌单元、构造区和地层岩性建造区,涉及了基本工程地质条件、地质灾害、矿产资源分布等海量数据,外业工程师不可能将海量数据“随身携带”。没有数据,外业工程师也就无法准确了解杆塔场地外部较大范围内的地层岩性、地质灾害分布等环境数据,会陷入所谓的“不识庐山真面目,只缘身在此山中”的局中人困境。

采用信息化岩土勘察,通过数据集成、信息实时交流和塔位选择辅助判断等可以有效解决传统勘察存在的问题,下面主要讨论信息化岩土勘察在施工图阶段的应用。

1 信息化岩土勘察系统构成与实现

1.1 系统构成

信息化岩土勘察是指以广义工程地质条件和勘

察成果为基本数据,建立以地理信息系统为核心的数据中心,实现远程通信终端与数据中心的双向实时数据共享,数据中心依托基本数据和地质分析理论为远程通信终端做出辅助决策,为前期勘察和后期持续利用勘察成果提供数据服务的勘察系统。广义工程地质条件是指地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水等工程地质条件要素,以及可能改变工程地质条件要素的人类活动等因素。信息化岩土勘察系统的构成如图 1 所示。

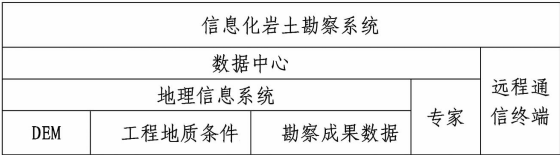


图 1 信息化岩土勘察系统构成图

1.2 典型应用场景

信息化岩土勘察的典型应用场景是:外业工程师在工地(杆塔场地)用移动设备采集工程地质条件数据→结合建(构)物设计条件,分析工程地质条件数据,做出岩土工程评价→外业工程师如果觉得自已评价有困难,则将工程地质条件数据通过文字、图像等形式回传给数据中心→数据中心依据掌握的工程区已有数据和专家经验做出辅助判断→辅助判断实时回传给外业工程师→外业工程师做出勘察评价→如果外业工程师仍然不能做出勘察评价,则启动现场协作勘察过程。

1.3 实现过程

1) 数据采集标准建立

根据长期获取的架空输电线路工程岩土勘察经验,建立了如图 2 所示的数据库采集模板。数据库采集模板的建立与优化是实现信息化岩土勘察的基础。

2) 数据中心建立

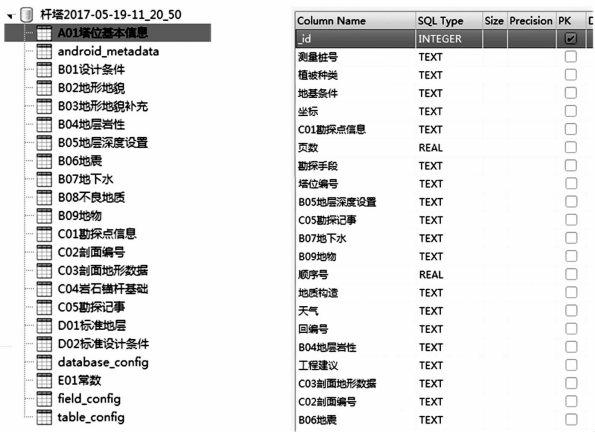


图 2 杆塔岩土勘察数据采集数据库构成示意图

集成主要工作区域的区域地质图、地质灾害分布图、水文气象、工程勘察成果等多种数据或图片建构了数据中心。数据中心可以提供工程区矢量化工程地质条件等数据。技术主管和有经验的工程师作为数据中心专家。数据中心的建立可以扩大在特定区域的勘察优势;数据即优势,是信息时代的一大特征。

3) 勘察大纲编制

基于数据中心数据、工程前期数据和设计条件编制勘察大纲。依据公共地理信息系统、工程区影像图和各种地质基础数据,可以编写出针对性极强的勘察大纲。勘察大纲不仅可以写出工程主要存在什么样的岩土工程问题,而且知道这些问题会出现在什么地方。基于较准确位置编写勘察大纲属于广义的基于位置服务。图 3 为编写某工程勘察大纲时所用影像示意图。

4) 勘察过程现场控制

与信息化岩土勘察有关的勘察过程现场控制主要有两项工作:全过程外业工程师与技术主管的协同工作;外业工程师移动端数据采集。协同工作可以采用各种即时通讯软件完成。移动端数据采集界面如图 4 所示。移动端数据库采用的是sqlite3 数据

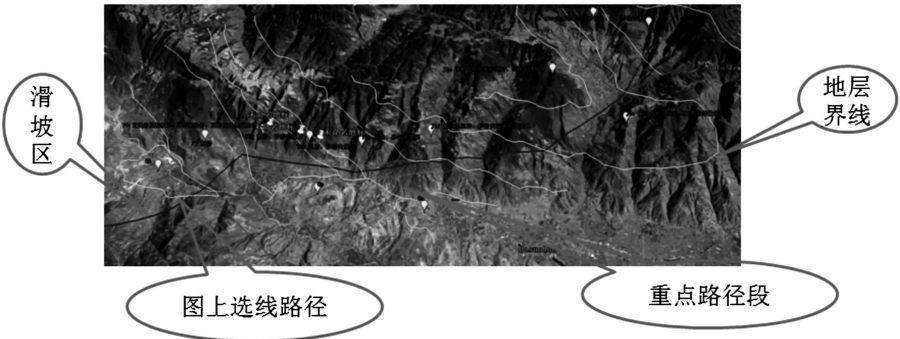


图 3 工程区影像示意图



图4 移动端数据采集 APP 界面

库,数据结构采用主从表结构,图4左为主表,右为从表。主从表可以嵌套,嵌套层数没有限制。出于信息安全考虑,移动端 APP 是单机版,可以脱离互联网使用。

5)勘察成果校审

勘察成果实现了数据集成、数据库化管理与自动成图。外业工程师采用图4所示界面采集的数据可以直接导入PC端生成最终勘察成果。勘察成果校审基于数据集成完成,数据集成校审应用如图5所示。

2 克服传统岩土勘察难题

勘察质量高度依赖于外业工程师的业务水平、协同工作困难和外业工程师无法感知环境等是传统线路工程岩土勘察存在的3个问题,可以通过信息化岩土勘察得到较好的解决。

1)采用标准化的数据采集可以使信息高效、准确和全面的传递成为可能;外业工程师采用移动

APP 采集信息化勘察数据,并将数据实时传递给技术主管,两者可实现双向实时沟通和有效协同工作;勘察质量不再取决于外业工程师,而是取决于协同工作质量。

2)基于信息化的勘测大纲编制与勘察成果校审能更好地实现勘察的全过程协同工作。

3)数据中心集成了地层岩性、地质灾害等海量数据并提供给外业工程师;外业工程师通过查阅集成了工程区矢量化工程地质条件等数据的移动终端;因此可以准确地了解杆塔场地环境条件,有效地克服了传统岩土勘察中外业工程师无法感知环境的困难。

3 信息化岩土勘察面临的问题

任何基于互联网和数据集成的技术都存在信息安全问题,信息化岩土勘察也同样面临信息安全问题。解决信息安全可以从以下两方面着手。

1)物理隔绝:处理涉密信息的设备与互联网物理隔绝。移动端完全采用单机版,不与互联网相连;数据中心的计算机也与互联网隔绝。

2)信息分流:将信息分解成涉密信息和非涉密信息。涉密信息严格按保密规定处理与传送,非涉密信息可通过互联网实时传送。

信息安全是信息化岩土勘察必须面临与解决问题,除了上述两种手段之外,还可以考虑和专业安全生产商的合作。

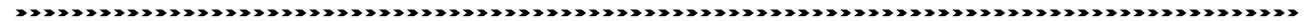
4 结 语

通过采用标准化的工程地质条件数据采集模板



图5 某工程勘察成果校审用示意图

现场采集数据、外业工程师与技术主管之间的双向实时互动等信息化岩土勘察手段,一定程度上可以解决勘察质量高度依赖于外业工程师的业务水平、协同工作困难和外业工程师无法感知环境等传统岩土勘察几乎无法解决的 3 个问题。信息化岩土勘察的实现面临着如何应对信息安全的严峻挑战,信息



(上接第 4 页)

将上述 10 000 条样本按 75% 和 25% 的比例分为训练集和测试集,将训练集分别提供给传统 BP 网络(BPNN)、自适应 BP 神经网络和 Group - Lasso 模型进行训练,即可得到关于节点电压的估计模型,再运用测试集测试模型的外推能力。这里采用均方误差(mean squared error, MSE)作为适应度函数,其表达式如下:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y'_i - y_i)^2 \tag{12}$$

式中: N 表示样本总数; y'_i 为实际输出值; y_i 为期望输出值。3 种方法对于系统各节点电压的拟合效果如表 3 所示。

从表 3 中不难看出,以该样本量为前提,对电压估计精度最高的是 GA - BPNN 算法,BPNN 与 Group - Lasso 的估计精度较为接近。另从表 3 中也能明确看到基于自适应遗传算法优化的 BP 神经网络无论是对训练集的拟合精度还是对测试集的估计精度都优于传统 BP 网络,提高了一个数量级的精度,说明将遗传算法和神经网络相结合确实得到了取长补短的效果。

4 结 语

从数字建模方式出发,绕过电力元件模型的建立,借助统计学思想,提出采用 Group - Lasso 算法对节点电压进行在线预测,并将预测精度与传统 BP 神经网络和自适应 BP 神经网络相比较,通过 IEEE 24 标准算例验证表明,GA - BPNN 的电压预测精度最高,Group - Lasso 与 BPNN 的预测精度相当,说明 Group - Lasso 算法具有较好的电压拟合能力和外推能力,可为传统的电压预测提供辅助手段。

参考文献

[1] 鞠平,沈赋,陈谦. 新背景下电力系统的建模思路[J].

安全如何实现是信息化岩土勘察能否真正实现的决定性因素。

作者简介:

谭光杰(1974), 硕士、高级工程师、国家注册土木工程师(岩土),从事电力工程勘察设计工作。

(收稿日期:2017 - 06 - 27)

南方电网技术,2016,10(3):32 - 34.

[2] 王晨,童晓阳,王睿晗. 有限相量测量单元下最小二乘估计的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化, 2015,39(20):124 - 129.

[3] 邵黎,谢开贵,王进,等. 基于潮流估计和分块负荷削减的配电网可靠性评估算法[J]. 电网技术,2008,32(24):34 - 37.

[4] 李卫东,宋家骅,武小梅. 基于人工神经网络和灵敏度分析的快速电压估计[J]. 东北电力学院学报,1994,14(1):1 - 8.

[5] 张继红,贺智勇,邢军. 利用公共耦合点电压估计的微电网逆变器下垂控制策略[J]. 大电机技术,2015(1):57 - 61.

[6] 陈伟根,滕黎,刘军,等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. 电工技术学报, 2014,29(1):44 - 51.

[7] 马晋弢,杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报,1995,15(5):347 - 352.

[8] 史坤鹏,范国英,赵伟,等. 基于 BP 神经网络的电网安全性预警系统开发[J]. 南方电网技术,2013,7(6): 141 - 144.

[9] 厉吉文,潘贞存,李红梅,等. 变电所电压和无功自动调节判据的研究[J]. 中国电力,1995(7):12 - 15.

[10] 尤金,刘俊勇,邱高,等. 基于自适应神经网络的电压快速估计[J]. 电力勘测设计,2017(1):44 - 49.

[11] Fan Jianqing, Feng Yang, Song Rui. Nonparametric Independence Screening in Sparse Ultra - high - dimensional Additive Models[J]. Journal of the American Statistical Association, 2011, 106(494): 544 - 557.

[12] Huang Jian, Horowitz J L, Wei Fengrong. Variable Selection in Nonparametric Additive Models[J]. Annals of Statistics, 2010, 38(4): 2282 - 2313.

[13] Feng C L, Yuan Y H. IEEE Reliability Test System [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS - 98(6): 2047 - 2054.

作者简介:

尤 金(1990), 硕士,研究方向为电力系统数据挖掘。

(收稿日期:2017 - 08 - 11)

基于综合效益评价的电动汽车充电设施布局方法

李小雨,李嘉逸,胡 浩,李 彬

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:化石能源短缺、依赖进口已经给中国的能源安全带来了挑战,同时,中国环境保护形势依然严峻。在这种背景下,国家大力倡导电动汽车发展,电动汽车充电设施也将迎来发展热潮。这时,传统电网规划方法已不太适用于电动汽车充电站规划,需要有一种能够真正统筹兼顾多方面效益的方法来规划充电设施。这里提出了一种基于综合效益评价的电动汽车充电设施规划方法,对方法进行了具体的描述和分析,并做了案例演示。

关键词:电动汽车;充电设施;综合效益;布局优化

Abstract:The shortage of fossil fuel energy that always depends on imports have brought challenges to energy security in China, meanwhile, China also suffers the pressure from environment protection. Under these circumstances, Chinese government promotes the usage of electric vehicles (EV), which will generate a development of EV charging facilities. At this time, the planning methods of traditional power grid would not be flexible for the planning of EV charging facilities. A method with consideration of comprehensive benefit is needed. A planning method based on comprehensive benefit evaluation is proposed for EV charging facility layout, and the detailed introduction is given as well as an example demonstration.

Key words:electric vehicles; charging facility; comprehensive benefit; optimal layout

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0055-04

0 引 言

能源与环境问题是全球问题,而中国随着经济发展,化石能源短缺、依赖海外进口成为日益严重的问题;同时,传统化石能源带来的环境问题日益突出,减少城市机动车排放符合可持续发展的要求。另一方面,“十三五”期间,中国电力供应将由总体平衡、局部偏紧的状态逐步转向相对宽松、局部过剩;国家也大力倡导电能替代,电动汽车的发展将迎来加速^[1-4]。

结合国家以及部分省市发布的电动汽车发展规划,尽快科学地建设一批电动汽车充电站,才能满足电动汽车技术的发展及社会的要求。2015 年国务院办公厅发布《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》,将电动汽车发展战略提上国家层面,并提出了到 2020 年全国新增 1.2 万座集中式充换电站、480 万个分散式充电桩,满足 500 万辆电动汽车的充电需求的目标^[5]。

基于这样的背景,全国将迎来电动汽车充电设施建设的热潮;但由于负荷特性不同、技术标准不统

一等问题,传统电网规划方法就显得不太适用于电动汽车充电站规划。同时,电动汽车充电站由于将在城市中大量涌现,需要有一种能够真正统筹兼顾多方面效益的新方法来规划充电站。下面提出了一种基于综合效益评价的电动汽车充电站规划方法,对方法进行了具体的描述和分析,并做了案例演示。

1 电动汽车充电设施规划特点概述

目前,电动汽车充电设施规划还没有成熟、统一的标准和方法。除了市场的原因,电动汽车运营自身的技术特点也决定了电动汽车充电设施规划方法具有灵活性和受地理位置影响大等特点。

从负荷预测上看,电动汽车负荷具有流动性的特点。由于是交通工具,受出行需求、用户使用习惯^[6],甚至受路况条件、节假日等影响,这些因素大大影响了电动汽车的负荷预测精确度。目前较为广泛使用的是基于蒙特卡洛算法的电动汽车负荷预测方法^[7]。

从充电设施布局方法上看,目前已有的研究大都通过建立相关数学模型,然后采用一定的优化算法来确定充电设施的数量和空间位置。在这种情况下,

下,影响布局方法精确度的主要问题在于数学模型目标函数的确定。

而现有许多规划布局方法在确定求解目标函数时,都一定程度忽略了电动汽车充电设施与传统供电设施的不同^[8-9]。

1)传统变电站设施用地为公用设施用地,且由于建设成本较高及电力供应的特殊性,建成后一般不轻易变动。而电动汽车充电设施则较灵活,不仅可以依托变电站等电源点修建,在市场化以后,居住用地、公共管理与公共服务设施用地、商业服务业设施用地等都可以作为电动汽车充电设施用地;且由于建造周期短、成本相对较低,建成后可以随城市建设发展灵活变动。

2)相较于传统的供电设施如变电站等,电动汽车充电设施可以附带更多经济效益。如电动汽车充电设施建成运营后还可带来就业、商业零售、推广示范等社会效益。特别是在“十八大”以后,党中央提出要坚持社会效益和经济效益相统一的背景下,做布局规划时有必要考虑这些效益。

下面将对一种基于综合效益评价的电动汽车充电设施布局方法进行探索。

2 基本思路及假设

2.1 符号说明及名词约定

x_i 为 i 区内分散式电站的个数, y_i 为 i 区内集中式充换电站的个数, $i = A, B, C, D$; a 为分散式电站的标准容量; b 为集中式充换电站的标准容量。 n_i 为 i 区充换电日均利润, c_i 为 i 区电站日平均购物消费利润额, c' 为分散式电站的造价, c'' 为集中式充换电站的造价; N_i 为 i 区一天的加油车数, c_i 为车主排队充换电时间成本。

充换电站标准容量:充换电站在一天内能宽松接待的顾客总车次。

满意度指数效益:充换电站充电及排队时,车主能够在小卖部进行消费,产生效益,正比于车主时间成本。

就业效益:为缓解社会就业压力产生的社会效益。

时间成本:车主在充换电及排队时消耗的时间成本,反比于充换电站标准容量。

2.2 基本思路

1)电动汽车负荷主要集中在两类地方:一是城

市建成区,有较多车辆行驶;二是市区以外的主要道路,如国道、高速公路等。对于第二种负荷集中区,方法较为单一,基本是沿道路分布、依托高速公路加油站、休息区等设施建设电动汽车充电设施,这里不作讨论。

- 2)确定城市建成区内负荷集中区域。
- 3)建立以 x_i, y_i 为规划变量的目标模型进行求解。
- 4)进行参数扫描,寻找规律。
- 5)分散式充电站可以和停车场寻求合作,增加布局灵活性。

2.3 基本假设

1)将电动汽车充电站分为集中式充换电站和分散式充电站。集中式充换电站为具备充换电能力的大型站,分散式充电站只具备快速充电能力,假设集中式充换电站服务能力两倍于分散式充电站。

2)充电桩由于建设灵活且需要建设数目巨大,这里不作讨论。

3)各个充换电站消费水平相同,且造价相同。

4)车主充换电消费总体与服务时间成正比,附带购物消费与充换电时间成正比。车主一般到最近的充换电站进行能量补给。

5)充换电站容量需求主要是满足充换电车次,充电站连接电网,其电功率容量视为无穷大。

6)充换电站充换电车次数量较为稳定,日差异不大。

7)负荷区域都简化为标准矩形,方便计算及初期研究,带来的误差暂时不考虑。

3 数学表达式构建

3.1 基本数学表达式

1)充换电要求

$$N_i \leq x_i \cdot a + y_i \cdot b \leq t N_i$$
$$i = A, B, C, D \tag{1}$$

i 区内所有充电站的标准容量不小于 1 天消费的车次,并留有一定备用标准容量应对高峰时期等情况; t 为备用容量系数, t 过大容易造成浪费和过度投资, t 可以取值 1.5 ~ 2,此处先取值为 2。

2)各区内日均直接经济效益

$$\text{Max} : P_i = s + n_i + c_i - x_i \cdot c' - y_i \cdot c''$$
$$i = A, B, C, D \tag{2}$$

其中:

$$c_i=k\cdot c_i\tag{3}$$

各区直接经济效益 P_i 等于政府补贴 s , 日均充换电效益 n_i 及消费效益 c_i 之和减去集中和分散式充电站折旧费用。 $c'*$ 为分散式充电站日均折旧费用, $c''*$ 为集中式充换电站日均折旧费用。

3) 满意度指数

$$P_P=100\cdot e^{\frac{-c_i}{c_i+n_i}\cdot r}\tag{4}$$

式中, r 为修正系数。

满意度指数, 用于评估电动汽车充换电站运营时的车主顾客满意度, 将直接影响车主对充电站带来的长远收益, 如指导服务改善、硬件升级、电站扩容等行为。满意度指数与车主充电时间成本成反比, 短期内与购物消费、充电站直接充换电利润成正比。当值为 0 时, 说明车主满意度较差; 当值为 1 时, 满意度达到最高。该指数可作为观测值, 作为充电站运营水平评估指标之一。

4) 就业效益

$$E_p=\sum_A^Dq\cdot(x_i\cdot c+y_i\cdot d)\tag{5}$$

电动汽车充电站推广示范期间, 社会效益比较重要, 期间包括带来的就业效益。式中: 就业效益与充电站产生的就业机会成正比; q 为量化了了的就业效益系数, 由通过产生就业机会从而带来的产值、社会保障等效益的提升来确定, 将就业效益量化为经济效益。

3.2 优化目标函数确定

由上面分析可以看出, 限制条件较多。效益由直接经济效益、满意度指数带来效益、就业效益构成。将 3 个效益都作为优化目标函数, 会带来巨大的计算量。为了简化计算, 将作为评估指数的满意度指数效益暂时不量化, 可单独列为对充电站运营效益的监控指数。建立存在加权系数的单目标函数, 权重分别为 k_1 和 k_2 , 如式(6):

$$F_i=k_1\cdot P_i+k_2\cdot E_p\tag{6}$$

这里, 以 A 区作为算例进行计算。即:

$$F_A=k_1\cdot(s+n_A+c_A-x_A\cdot c'*-y_A\cdot c'')+k_2\cdot[q\cdot(x_A\cdot c+y_A\cdot d)]\tag{7}$$

在这里, 由于直接经济效益和就业效益都是量化了了的效益, 用货币来衡量, 单位为人民币元。

4 实例演示

设有如图 1 所示的西部某城市开发区示意图,



图 1 某城市开发区示意图

经实际测量和分析, 此开发区内电动汽车充电负荷主要集中在 A、B、C、D 四个区域及多条横穿行政区的道路上。通过对负荷区域类型的划分, 可以简化计算, 下面选取 A 区进行布局演示。

为了降低计算难度, 故设 $k_1=k_2=1$, 然后根据实际要求及该开发区的实际情况, 对部分参数进行赋值处理。

设分散式充电站标准容量 $a=1\ 000$ 车次, 集中式充换电站标准容量 $b=4\ 000$ 车次。每天 A 区需要消费的车次为 $N_A=50\ 000$ 车次, 则充电站日均盈利为

$$n_A=\eta\times N_A\tag{8}$$

式中: η 为单次充换电盈利, $\eta=10$ (元/车次), 则 n_A 为 500 000 元。若有政府补贴

$$s=0.5\times n_A\tag{9}$$

则, $s=250\ 000$ 元。

每日电站购物消费为

$$c_A=\zeta\times N_A\tag{10}$$

式中: ζ 为人均消费利润率, 为 2 元, 则 $c_A=100\ 000$ 元。

考虑折旧费用, 分散式充电站日均折旧费用为 10 000 元, 集中式充换电站折旧费用为 30 000 元。设 1 个工作人员 1 天量化就业经济效益(工资、低保费用节省)为 200 元, 分散式充电站就业岗位数为 20 人, 集中式充换电站就业人数为 50 人。

这种情况下, 假设盈利与用户时间成本相等时, 满意度指数为 0.5, 故有:

$$P_P=e^{-r}=0.5\tag{11}$$

可得到, $r=0.7$ 。

将赋值带入优化目标函数, 同时加入约束条件式(1), 满足充换电要求。

一般来说, 分散式充电站数目肯定会大于集中式充换电站数, 但是又要保证有一定集中式充换电

站以避免分散式充电站过多冗杂、计算难以约束的情况,故有表达式(12):

$$u \leq \frac{x_A}{y_A} \leq v$$

(12)

此案例中,可暂考虑取 $u=2, v=10$ 。
根据求解结果,求解不等式,得出如下结果:

$$\begin{cases} x_A = 18 \\ y_A = 8 \\ F_A = 582\,000 \end{cases}$$

然后对设计中2个影响电站数量的参数 u, t 进行扫描,观察对目标函数 F_A 的影响,得到如图2、图3所示结果。

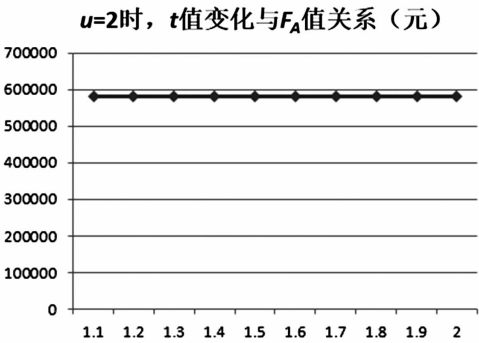


图2 对 t 值进行参数化扫描计算结果

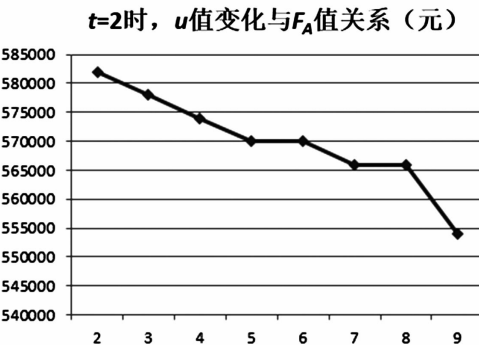


图3 对 u 值进行参数化扫描计算结果

由 u 值变化可以看出,集中式充换电站较多时,效益较好,电站总数也较少;由 t 值变换则可看出,备用容量系数变化并不直接影响效益,效益主要还是由消费决定。
最后,在确定充换电站数量后,对充电站布局进行优化。由于有分散式充电站、集中式充换电站形式高低搭配,采取集中式充换电站为主辐射区域,辅助以分散式充电站的基本布局思路,故可优先确定集中式充换电站的布局,再根据其布局来确定分散式充电站布局。

下面使用优化算法对集中式充换电站布局进行优化。A区简化为长25 km、宽15 km的矩形区域,

集中式充换电站数量为8个,布局限制条件为使充电站之间相互距离之和尽量大,尽量将充电站散开,避免资源冗余浪费。

这里使用遗传算法对空间布局进行优化,结果如图4所示。

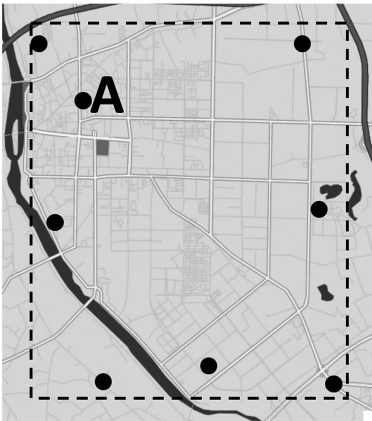


图4 A区域电站优化分布结果

可以看出,优化结果主要将充电站尽可能分散在负荷区域周边,比较符合实际需求。通过将集中式充换电站分布在负荷中心周围,可以对具有充电需求的车辆进行分流;在负荷中心内通过灵活分布分散式充电站,可以满足市区车辆应急充电。

但是上述方法不足之处在于:优化结果可能与实际建设条件冲突,如规划点都位于市区内,但这些地方往往有重要基础设施、军政部门、地标建筑、古迹和景观等。由于优化的结果往往不唯一,解决的办法就是在优化结果基础上微调,寻找临近的点或者重新进行优化运算,寻找新的结果。

5 结 语

通过分析现有电动汽车充电设施布局方法和传统电网供电设施规划方法的差异,梳理了电动汽车充电设施布局中容易忽略的问题;强调了电动汽车充电设施可以带来一些传统电网供电设施所没有的效益,如社会效益、就业效益、示范效益等隐性效益。在这个基础上,提出了一种基于综合效益分析的电动汽车充电设施布局方法,建立了相关数学模型,并做了实例的演示。

下一步可以进一步探索和优化的工作有:寻找可靠数据,预测出可靠负荷数据;完善数学模型;通过计算,寻找出重要参数变化规律及相互之间的影响;结合城市道路特点改进优化办法;增加优化约束

(下转第77页)

碳纤维导线在接地极线路中应用的经济性分析

林 浩,梁 明,魏德军,刘从法

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:根据接地极线路额定电流大、运行电压低、额定电流情况下运行时间短的特点,通过与常规导线对比,分析了碳纤维复合芯导线的机械性能和电气性能。通过技术经济分析,探讨了碳纤维复合芯导线在接地极线路中应用的合理性。

关键词:碳纤维复合芯导线;接地极线路;应用

Abstract: According to the features of grounding electrode lines such as high rated current, low running voltage and short operating duration in the rated current, the mechanical properties and electrical performance of aluminum conductor composite core (ACCC) are analyzed by compared with the normal conductor wire. Through the techno-economic analysis, the reasonable application of ACCC to grounding electrode lines is discussed.

Key words: aluminum conductor composite core (ACCC); grounding electrode lines; application

中图分类号:TM247 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0059-04

0 引言

接地极线路是特高压直流工程不可缺少的重要组成部分。接地极线路有额定电流大、运行电压低、额定电流情况下运行时间短的特点,因此其导线组合宜选择总截面较小、载流量大、分裂根数少、便于布置、可靠性较高的导线型号和组合方式;而碳纤维复合芯导线具有载流量大、强度大、弧垂小、耐覆冰等特点,因此将碳纤维复合芯导线应用于接地极线路中具有显著意义。下面对碳纤维复合芯导线在接地极线路中的应用进行分析研究。

1 输入条件

涉及的工程输入条件:±800 kV 直流线路的输送容量为10 000 MVA、额定电流为6 250 A;其接地极线路额定电流为6 250 A、最大过负荷电流为6 690 A;线路长度为85 km,平均耐张段长度3 km,杆塔单公里基数为2.6基,地形为35%的平地、65%的丘陵,覆冰厚度10 mm,基本风速25 m/s,最高温度40℃,海拔1 000 m以下,原工程所采用的导线为2×2×JNRLH60/G1A-630/45钢芯耐热铝合金绞线。

2 导线选择

结合接地极线路额定电流大、运行电压低、额定电流情况下运行时间短的特点,其导线组合宜选择载流量大、总截面较小、分裂根数少、便于布置、可靠性较高的导线型号和组合方式。

在相同载流量情况下,碳纤维复合芯导线重量最轻,钢芯耐热铝合金绞线次之,而普通钢芯铝绞线最重,故目前设计的接地极线路已不采用普通钢芯铝绞线,本节仅对原工程所采用的钢芯耐热铝合金绞线和拟选用的碳纤维复合芯导线的电气性能、机械性能及经济性等方面进行对比分析。

2.1 导线主要参数

1) 最高温度

根据现有资料,钢芯耐热铝合金绞线和碳纤维复合芯导线控制温度按150℃考虑。

2) 机械强度

根据规程规范,导线设计安全系数不小于2.5,悬挂点的设计安全系数不小于2.25,平均运行应力不大于拉断应力的25%^[1]。

2.2 导线特性

根据工程输入条件,线路输送容量为10 000 MVA,额定电流为6 250 A,最大过负荷电流为6 690

表 1 导线技术参数

导线型号及 导线类型	JNRLH60/G1A - 630/45 钢芯耐热铝合金线	JLRX/F2B - 560/65	JLRX/F2B - 630/70	JLRX/F2B - 800/80
	碳纤维复合芯导线			
铝绞丝	629.4	563.6	631.4	801.3
截面/mm ²	芯	63.61	70.87	78.53
	总计	627.21	702.3	879.8
导线直径/mm	33.75	29.2	30.9	36.6
单位重量/(kg·km ⁻¹)	2 078	1 677.3	1 878.6	2 362.8
计算拉断力/N	150 190	166 040	185 203	211 067
弹性模量/(N·mm ⁻²)	63 700	62 000	60 000	59 000
线胀系数[×10 ⁻⁶]/(1/℃)	20.8	17.6	17.6	17.6
20℃时直流电阻/(Ω·km ⁻¹)	0.047 1	0.049 8	0.044 4	0.035

A,原导线为 2×2×JNRLH60/G1A - 630/45 钢芯耐热铝合金绞线。根据输送容量及每极电流的要求,可以选择 2×2×JLRX/F2B - 560/65、2×2×JLRX/F2B - 630/70 和 2×2×JLRX/F2B - 800/80 碳纤维复合芯导线进行对比分析。参与对比的导线技术参数见表 1,为便于比较,以 JNRLH60/G1A - 630/45 钢芯耐热铝合金绞线作为对比基础。

2.3 导线的电气性能

为初步确定导线型号,首先从导线的载流量^[1,3]进行比较。

按 GB 50545 - 2010《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》的要求,验算导线允许载流量时,环境温度采用最高气温月的最高平均气温,计算风速采用 0.5 m/s,太阳辐射功率密度采用 0.1 W/cm²^[1-2]。

经计算,各导线在最高允许温度下的载流量(最高气温月的最高平均气温 35℃)见表 2。

由表 2 可知,在导线的最高允许温度情况下,所选型号导线均能满足过负荷电流 6 690 A 的要求。

2.4 导线的机械性能

根据导线机械参数,计算机械特性情况如表 3 所示。

由表 3 可知,各导线的覆冰过载能力均超过 25 mm,满足工程要求,碳纤维复合芯导线 JLRX/F2B

- 800/80 覆冰过载能力最强,碳纤维复合芯导线 JLRX/F2B - 630/70 次之,钢芯耐热铝合金绞线相对较小;碳纤维复合芯导线拉重比相对较高,碳纤维复合芯导线弧垂特性较钢芯耐热铝合金绞线好;在荷载特性方面,导线单重决定了线条垂荷,导线直径决定了线条风荷载,导线拉断力决定了线条的张力荷载,从总体趋势上看,导线截面越小的方案,其垂直荷载、风荷载及线条张力越小,有利于降低塔重。

2.5 导线的经济性

1) 本体投资比较

考虑参选导线弧垂和荷载特性情况,进行杆塔设计和本体投资估算,如表 4 所示。

由表 4 可知,,碳纤维复合芯导线价格虽然较高但对应的杆塔价格较低,碳纤维复合芯导线 JLRX/F2B - 560/65 本体投资相对较低,钢芯耐热铝合金绞线 JNRLH60/G1A - 630/45 次之,碳纤维复合芯导线和钢芯耐热铝合金绞线本体投资基本相当。

2) 年费用比较

计算不同条件下各导线方案的年费用比较如表 5 所示。

由表 5 可看出,碳纤维复合芯导线年费用较钢芯耐热铝合金绞线费用低,3 种碳纤维导线年费用基本相当。

表 2 导线载流量一览表

导线类型	导线型号	20℃ 直流电阻/Ω	最高允许温度/℃	载流量/A
钢芯耐热铝合金线	JNRLH60/G1A - 630/45	0.0471	150	7 508
	JLRX/F2B - 560/65	0.049 8	150	6 954
碳纤维复合芯导线	JLRX/F2B - 630/70	0.044 4	150	7 506
	JLRX/F2B - 800/80	0.035	150	8 953

表 3 导线机械特性

项目		JNRLH60/G1A – 630/45 钢芯耐热铝合金线	JLRX/F2B – 560/65	JLRX/F2B – 630/70 碳纤维复合芯导线	JLRX/F2B – 800/80
截面积/mm ²		672. 50	627. 21	702. 30	879. 80
导线直径/mm		33. 75	29. 20	30. 90	36. 60
计算重量/(kg · m ⁻¹)		2. 078	1. 677 3	1. 878 6	2. 362 8
拉断力/kN		150. 19	166. 04	185. 203	211. 067
拉重比		7. 23	9. 90	9. 86	8. 930
过载能力/mm	<i>L</i> ₀ = 300	30. 97	36. 85	41. 17	45. 46
	<i>L</i> ₀ = 450	26. 95	30. 94	34. 83	39. 61
	<i>L</i> ₀ = 600	25. 54	26. 33	28. 05	29. 46
	<i>L</i> ₀ = 300	7. 30	5. 83	6. 40	7. 88
高温弧垂/m	<i>L</i> ₀ = 450	15. 53	12. 70	13. 83	16. 92
	<i>L</i> ₀ = 600	27. 90	21. 08	21. 14	22. 96
垂直荷重	均温	24. 45 100. 00%	19. 74 80. 72%	22. 11 90. 40%	27. 81 113. 71%
	覆冰	39. 42 100. 00%	33. 19 84. 20%	36. 12 91. 62%	43. 72 110. 91%
	大风	14. 06 100. 00%	12. 17 86. 52%	12. 88 91. 56%	15. 25 108. 44%
	覆冰	4. 84 100. 00%	4. 43 91. 53%	4. 58 94. 70%	5. 10 105. 30%

表 4 本体投资比较

项目		JNRLH60/G1A – 630/45 钢芯耐热铝合金线	JLRX/F2B – 560/65	JLRX/F2B – 630/70 碳纤维复合芯导线	JLRX/F2B – 800/80
环境温度/℃		40	40	40	40
运行温度/℃		130	145	130	110
每公里铁塔数量		2. 86	2. 47	2. 58	2. 83
每公里耐张塔数量		0. 33	0. 33	0. 33	0. 33
每公里直线塔数量		2. 52	2. 14	2. 25	2. 50
弧垂/m		12. 29	12. 31	12. 28	12. 27
直线塔高/m		22	22	22	22
耐张塔高/m		20	20	20	20
导线/(元 · km ⁻¹)		178 948. 8	199 756. 8	208 080. 0	224 726. 4
悬垂线夹/(元 · km ⁻¹)		5 249. 52	2 093. 09	2 205. 63	3 499. 34
耐张线夹/(元 · km ⁻¹)		1 306. 67	5 163. 20	5 163. 20	5 608. 00
杆塔/(元 · km ⁻¹)		93 077. 18	72 583. 63	84 652. 59	106 119. 81
本体投资/(万元 · km ⁻¹)		63. 27	63. 16	65. 21	69. 16

表 5 导线年费用比较

项目		JNRLH60/G1A – 630/45 钢芯耐热铝合金线	JLRX/F2B – 560/65	JLRX/F2B – 630/70 碳纤维复合芯导线	JLRX/F2B – 800/80
年损耗小时数/h		100	100	100	100
导线年费用/(万元 · km ⁻¹)		28. 52	23. 80	23. 99	24. 21

注:回收率按 10% 考虑,电费按 0. 4 元/kW · h 考虑。

2.6 小 结

从本算例来看,与原工程所采用的钢芯耐热铝合金导线相比,拟选用的碳纤维复合芯导线 JLRX/F2B-560/65 的电气性能可满足工程需要,机械性能相对较优,同时经济性也相对较优,在本算例中推荐采用。

3 结 语

- 通过比较分析,得出以下结论:
- 1)在导线的最高允许温度情况下,碳纤维复合芯导线能满足过负荷电流的要求;
 - 2)碳纤维复合芯导线弧垂特性、覆冰过载能力较钢芯耐热铝合金绞线优;
 - 3)碳纤维复合芯导线和钢芯耐热铝合金绞线本体投资基本相当,碳纤维复合芯导线价格较高但对应的杆塔价格较低;
 - 4)碳纤维复合芯导线年费用较钢芯耐热铝合金绞线低。

碳纤维复合芯导线在国内外已得到大量应用^[4-5],并取得一定的运行经验,因此碳纤维复合芯导线在接地极线路中具有广阔的应用前景,大规模的应用也将进一步降低工程投资费用。

(上接第 33 页)

基础上增加 1~4 片盘型绝缘子,V 型串单侧肢长增加 0.51~1.18 m,均压环对横担下平面距离为 6~7.1 m;耐张塔跳线串在原设计基础上靠近塔身侧肢增加 6 片绝缘子,远离塔身侧肢增加 4 片绝缘子,均压环对横担下平面距离为 6.86 m,对塔身距离为 5.85 m。

参考文献

[1] 王少华,叶自强. 架空输电线路鸟害故障及其防治技术措施原因分析及预防措施[J]. 高压电器,2011,47(2):61-67.

[2] 王宝成,祝永坤,张悉正,等. 高寒草原地区输电线路鸟害故障[J]. 内蒙古电力技术,2013,31(1):96-98.

[3] 王峰,黄福勇,曾昊,等. 湖南省输电线路鸟害障碍分析及防治[J]. 高压电器,2011,47(10):97-101.

[4] 马兴龙,陈伟东,张育华,等. 架空输电线路绿色防鸟害模式探讨[J]. 广东电力,2011,24(7):37-40.

参考文献

[1] GB 50545-2010,110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[M]. 北京:中国计划出版社,2010:12-55.

[2] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2002:166-167.

[3] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册:输变电、配电设备卷(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社,1997:57-58.

[4] 何州文,陈新,王秋玲,等. 国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J]. 电力建设,2010,31(4):90-93.

[5] 梁栋,邓蜀平,蒋云峰,等. 碳纤维复合芯电缆国内外技术研发现状及工程应用进展[J]. 化工新型材料,2011,39(2):13-17.

作者简介:

林 浩(1982),硕士研究生、工程师,长期从事输电线路设计工作;

梁 明(1973),教授级高级工程师,长期从事输电线路设计工作;

魏德军(1964),高级工程师,长期从事输电线路设计工作;

刘从法(1979),硕士研究生、工程师,长期从事输电线路设计工作。

(收稿日期:2017-08-09)

[5] 杨庆,董岳,司马文霞,等. 鸟粪导致交流输电线路塔窗-导线空气间隙放电的特性研究[J]. 高电压技术,2014,40(1):55-60.

[6] 王德吉,赵强,屈明. 新型超高压输电线路鸟害防范措施研究[J]. 四川电力技术,2015,38(4):33-36.

[7] 李隆基,周文涛,李学刚,等. 架空输电线路防鸟害技术措施[J]. 陕西电力,2016,44(4):95-98.

[8] 黄瑞莹,黄道春,周军,等. ±400 kV 直流输电线路杆塔涉鸟故障风险区域研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(2):68-73.

作者简介:

唐 巍(1979),高级工程师,从事输电线路电气设计;

刘 琦(1984),工程师,从事输电线路电气设计;

周 军(1973),高级工程师,从事高压外绝缘方面的研究;

梁 明(1973),教授级高工,从事输电线路电气设计;

胡 全(1980),高级工程师,从事输电线路电气设计。

(收稿日期:2017-06-21)

输电线路工程运输方式经济性分析

肖 宇,王 劲

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:输电线路工程建设中常见的运输方式有人力运输、汽车运输和索道运输。通过对 3 种运输方式费用的计算比较,汽车运输费用最省,人力运输在平地、丘陵等地形情况下比索道运输费用要省,但在山地、高山、峻岭等地形情况下,要根据具体的运输距离和运输重量来确定较经济的运输方式。此外,运输方式的选择还应结合工程实际情况、对环境的影响程度、施工工期、修路费用以及赔偿费用等来综合选定。

关键词:输电线路;运输方式;造价分析;人力运输;汽车运输;索道运输

Abstract: Manpower transportation, vehicle transportation and aerial ropeway transportation are common transportation modes of transmission line engineering. By calculating and comparing the costs of those three transportation modes, the cost of vehicle transportation is the lowest, the cost of manpower transportation is lower than aerial ropeway transportation under flat terrain and hilly terrain, and it is necessary to determine more economical transportation mode under mountainous terrain according to transportation distance and transportation weight. In addition, the choice of transportation modes should be combined with the actual situation of the project, the damage extent to the environment, the construction period, the cost of building roads and the expenses of compensation etc.

Key words: transmission line; transportation mode; cost analysis; manpower transportation; vehicle transportation; aerial ropeway transportation

中图分类号:F406 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0063-06

0 引 言

目前,在输电线路工程建设中常用的运输方式是汽车运输和人力运输。材料从材料仓库运到公路沿线的卸货点,一般都是采用汽车运输,汽车运输具有运输量大、适应性强、运输速度快等特点。将材料由公路沿线的卸货点运送到各塔位点,一般采用人力或畜力运输,人力或畜力运输是一种较灵活、广泛适用于各种地形的运输方式,但其易受到地形地势的限制。随着国家对环境保护的重视以及人们环保意识的增强,输电线路工程走廊的选择越来越困难,在地形地势复杂的山区和人力畜力难以到达的地区,越来越多地采用索道运输技术。

采用现行的电力建设工程计算规定和定额^[1-2],从造价角度对上述 3 种运输方式的经济性进行分析,为输电线路工程运输费用的估算提供参考,同时为运输方式的选择提出建议。据统计,输电线路工程中,除导地线材料外(张力架线时,导地线

材料不考虑人力运输和索道运输),运输量较大的材料是铁塔材料和混凝土材料,达到了总运输量的 90% 以上。为便于分析,下面选取这两种材料进行计算。

1 运输费用

1.1 人力运输费用

人力运输费用中包含了运输的费用以及人工、材料、机械调整费用等。经过计算,人力运输费用见表 1 至表 3,表中的步距增加是指人力运距每增加或减少 0.2 km 时,运输费用的增加或减少值,其他运距下的费用可利用插值法或步距增加(减少)值计算得到。

铁塔材料(角钢塔,重量 1 t)在不同地形情况下的运输费用见表 1。

从表 1 至表 3 可知:铁塔材料和混凝土材料在各种地形下的人力运输费用比例关系几乎一致;各种地形下的运输费用增加系数并不是定额中的地形

增加系数,比定额的地形增加系数略小。这是由于定额对人力运输的地形调整只是对人工费用进行调整,不包括对机械费用的调整;铁塔材料的人力运输费用是混凝土材料人力运输费用的 1.39 倍左右。

表 1 铁塔材料(1 t)的人力运输费用 单位:元

地形	人力运距			步距增加费用
	0.6 km	0.8 km	1.0 km	
平地	164.78	219.71	274.64	54.93
丘陵	196.18	261.57	326.97	65.39
山地	321.77	429.03	536.28	107.26
高山	400.26	533.69	667.11	133.42
峻岭	478.76	638.34	797.93	159.59
泥沼	227.58	303.44	379.30	75.86
河网	164.78	219.71	274.64	54.93
沙漠	219.73	292.97	366.21	73.24

重量 1 t 的混凝土材料在不同地形情况下的运输费用见表 2。

表 2 混凝土材料(1 t)的人力运输费用 单位:元

地形	人力运距			步距增加费用
	0.6 km	0.8 km	1.0 km	
平地	118.77	158.36	197.94	39.59
丘陵	141.48	188.65	235.81	47.16
山地	232.35	309.80	387.26	77.45
高山	289.15	385.53	481.91	96.38
峻岭	345.94	461.25	576.57	115.31
泥沼	164.20	218.94	273.67	54.73
河网	118.77	158.36	197.94	39.59
沙漠	158.52	211.36	264.20	52.84

取平地地形的人力运输费用为 1,各种地形运输费用的比例关系见表 3。

表 3 各种地形人力运输费用比例关系

地形	平地	丘陵	山地	高山	峻岭	泥沼	河网	沙漠
铁塔材料	1.00	1.19	1.95	2.43	2.91	1.38	1.00	1.33
混凝土材料	1.00	1.19	1.96	2.43	2.91	1.38	1.00	1.33

表 4 铁塔材料(1 t)的汽车装卸及运输费用 单位:元

地形	运输距离			步距增加费用	运输费用 (1 t·km)	装卸费用(1 t)
	15 km	20 km	25 km			
平地	33.48	44.65	55.81	11.16	2.23	66.36
丘陵	33.48	44.65	55.81	11.16	2.23	66.36
山地	40.18	53.58	66.97	13.39	2.68	66.36
高山	60.27	80.36	100.45	20.09	4.02	66.36
峻岭	60.27	80.36	100.45	20.09	4.02	66.36
泥沼	33.48	44.65	55.81	11.16	2.23	66.36
河网	33.48	44.65	55.81	11.16	2.23	66.36
沙漠	46.88	62.51	78.13	15.63	3.13	66.36

表 5 混凝土材料(1 t)的汽车装卸及运输费用 单位:元

地形	运输距离			步距增加费用	运输费用 (1 t·km)	装卸费用(1 t)
	15 km	20 km	25 km			
平地	25.03	33.38	41.72	8.34	1.67	38.82
丘陵	25.03	33.38	41.72	8.34	1.67	38.82
山地	30.04	40.05	50.07	10.01	2.00	38.82
高山	45.06	60.08	75.10	15.02	3.00	38.82
峻岭	45.06	60.08	75.10	15.02	3.00	38.82
泥沼	25.03	33.38	41.72	8.34	1.67	38.82
河网	25.03	33.38	41.72	8.34	1.67	38.82
沙漠	35.05	46.73	58.41	11.68	2.34	38.82

1.2 汽车运输费用

汽车运输包含材料的装卸和运输两部分,费用中包括了装卸和运输的费用以及人工、材料、机械调整费用等。经过计算,汽车运输费用见表4 – 表6。表中的步距增加是指汽车运距每增加费用或减少5 km 时,运输费用的增加或减少值,其他运距下的费用可利用插值法或步距增加(减少)值计算得到。在计算中丘陵不计增加系数,山地按丘陵计算增加系数,高山、峻岭按山地计算增加系数,沙漠地形按没有正式的公路考虑。

铁塔材料(角钢塔,重量1 t)在不同地形情况下的装卸及运输费用见表4。

混凝土材料(重量1 t)在不同地形情况下的装卸及运输费用见表5。

取平地地形的汽车运输费用为1.00,各种地形运输费用的比例关系见表6。

从表4 – 表6 可知:铁塔材料和混凝土材料在各种地形下的汽车运输费用比例关系一致;各种地形情况下的运输费用增加系数与定额中的地形增加系数一致;铁塔材料的汽车运输费用是混凝土材料汽车运输费用的1.34 倍左右,铁塔材料装卸费用是

混凝土材料的1.71 倍左右;铁塔材料和混凝土材料的装卸费用在各种地形下是相等的,实际工程中,当运距越长时,可以摊薄装卸费用,降低单位重量运距单价。

1.3 索道运输费用

通过对实际工程中索道运输方式的分析,目前输电线路工程常用的索道方式是单索循环式和单索往复式,这两类索道的共同特点是最大运输重量不超过2 t。索道运输包含材料的装卸和运输两部分,费用中包括了装卸和运输的费用、人工、材料、机械调整费用等。经过计算,索道运输费用见表7 – 表11。表中的步距增加是指索道运距每增加或减少0.2 km 时,运输费用的增加或减少值,其他运距下的费用可根据插值法或步距增加(减少)值计算得到。表中的索道运距指上料点与下料点之间的水平投影距离。

铁塔材料(重量1 t)在不同地形情况下的装卸及运输费用见表7、表8。

混凝土材料(重量1 t)在不同地形情况下的装卸及运输费用见表9、表10。

表6 各种地形汽车运输费用比例关系

地形	平地	丘陵	山地	高山	峻岭	泥沼	河网	沙漠
铁塔材料	1.00	1.00	1.20	1.80	1.80	1.00	1.00	1.40
混凝土材料	1.00	1.00	1.20	1.80	1.80	1.00	1.00	1.40

表7 往复式索道铁塔(1 t)的装卸及运输费用

单位:元

地形	索道运距			步距增加费用	运输费用 (1 t · km)	装卸费用(1 t)
	0.6 km	0.8 km	1.0 km			
平地	128.52	171.36	214.20	42.84	214.20	203.63
丘陵	128.52	171.36	214.20	42.84	214.20	203.63
山地	149.08	198.78	248.47	49.69	248.47	203.63
高山	168.36	224.48	280.60	56.12	280.60	203.63
峻岭	200.49	267.32	334.15	66.83	334.15	203.63

表8 循环式索道铁塔(1 t)的装卸及运输费用

单位:元

地形	索道运距			步距增加费用	运输费用 (1 t · km)	装卸费用(1 t)
	0.6 km	0.8 km	1.0 km			
平地	101.55	135.41	169.26	33.85	169.26	163.29
丘陵	101.55	135.41	169.26	33.85	169.26	163.29
山地	117.80	157.07	196.34	39.27	196.34	163.29
高山	133.04	177.38	221.73	44.35	221.73	163.29
峻岭	158.43	211.23	264.04	52.81	264.04	163.29

表 9 往复式索道混凝土(1 t)的装卸及运输费用						单位:元
地形	索道运距			步距增加费用	运输费用 (1 t·km)	装卸费用(1 t)
	0.6 km	0.8 km	1.0 km			
平地	173.72	231.62	289.53	57.91	289.53	242.21
丘陵	173.72	231.62	289.53	57.91	289.53	242.21
山地	201.51	268.68	335.85	67.17	335.85	242.21
高山	227.57	303.42	379.28	75.86	379.28	242.21
峻岭	271.00	361.33	451.66	90.33	451.66	242.21

表 10 循环式索道混凝土(1 t)的装卸及运输费用						单位:元
地形	索道运距			步距增加费用	运输费用 (1 t·km)	装卸费用(1 t)
	0.6 km	0.8 km	1.0 km			
平地	144.19	192.26	240.32	48.06	240.32	196.31
丘陵	144.19	192.26	240.32	48.06	240.32	196.31
山地	167.27	223.02	278.78	55.76	278.78	196.31
高山	188.89	251.86	314.82	62.96	314.82	196.31
峻岭	224.94	299.92	374.90	74.98	374.90	196.31

取平地地形的汽车运输费用为 1.00,各种地形运输费用的比例关系见表 11。一般情况下,泥沼和河网地形较平坦,其费用与平地是一样的;沙漠地形要视地形的起伏情况来判断与哪种地形接近,从而确定其费用。

表 11 各种地形索道运输费用比例关系					
地形	平地	丘陵	山地	高山	峻岭
铁塔材料	1.00	1.00	1.16	1.31	1.56
混凝土材料	1.00	1.00	1.16	1.31	1.56

从表 7 – 表 11 可知:铁塔材料和混凝土材料在各种地形下的索道运输费用比例关系一致;各种地形下的运输费用增加系数与定额^[2]中的地形增加系数一致;采用往复式索道运输,铁塔材料的运输费用是混凝土材料的 0.74 倍左右,铁塔材料装卸费用是混凝土材料的 0.84 倍左右;采用循环式索道运输,铁塔材料的运输费用是混凝土材料的 0.70 倍左右,铁塔材料装卸费用是混凝土材料的 0.83 倍左右;铁塔材料和混凝土材料的装卸费用在各种地形下是相等的,实际工程中,当运距越长时,可以摊薄装卸费用,降低单位重量运距单价。

2 运输方式比较选择

很明显,3 种运输方式中,汽车运输的费用是最低的,在有公路可以利用的地方,应采用汽车运输。

实际工程中,线路不可能沿着公路走线,常常会偏离公路,这时,要结合工程的具体情况考虑修整或拓宽公路、新修公路等方案是否经济合理。

人力或畜力运输较为灵活方便,但在实际工程中存在以下缺点:一是易受天气影响,雨季道路湿滑泥泞,冬季道路可能结冰,这都给人力运输带来不便,影响运输的效率;二是工程中若有部分材料超长超重,人力、畜力运输很困难;三是短时间内组织大量的人力、畜力困难较大;四是人力、畜力运输会破坏运输道路沿线的植被或作物,对环境有一定的影响,且会产生赔偿费用;五是施工中常常会遇到没有路况或者路况很差的情况,这时需要修整人力运输施工道路,发生费用。

与人力、畜力运输相比,索道运输方式具有载重量大、运输效率高、适应性强、受气候条件影响小、对环境的影响小等优点。其具有易操控、维修方便等特点,但采用索道运输需要架设索道产生架设费用,且施工全面铺开需要较长的时间,在索道架设和运输过程中会产生植被或作物的赔偿费用等。

实际工程中,人力运输会受到地形、地势和地面障碍物等的影响,运输的路径有弯曲。索道运距是指上、下料点之间的水平投影距离,因此,人力运距应比索道运距要大。按电力建设工程预算定额中的弯曲系数计算人力运距,人力运输费用与索道运输费用的比较见表 12 – 表 14。表中的人力运输费用为对应索道运距下的费用,索道运输费用包含了装卸费用。

表 12 铁塔(1 t)的运输费用比较									单位:元
运输方式 及运距	人力运输 0.6 km	往复式索道 0.6 km	循环式索道 0.6 km	人力运输 0.8 km	往复式索道 0.8 km	循环式索道 0.8 km	人力运输 1.0 km	往复式索道 1.0 km	循环式索道 1.0 km
平地	177.14	332.15	264.85	236.19	374.99	298.70	295.24	417.83	332.55
丘陵	235.71	332.15	264.85	314.27	374.99	298.70	392.85	417.83	332.55
山地	485.18	352.71	281.09	646.92	402.41	320.36	808.64	452.10	359.63
高山	820.13	371.99	296.33	1 093.52	428.11	340.67	13 66.90	484.23	385.02
峻岭	1 218.74	404.12	321.71	1 624.98	470.95	374.52	2 031.23	537.78	427.33

表 13 混凝土(1 t)的运输费用比较									单位:元
运输方式 及运距	人力运输 0.6 km	往复式索道 0.6 km	循环式索道 0.6 km	人力运输 0.8 km	往复式索道 0.8 km	循环式索道 0.8 km	人力运输 1.0 km	往复式索道 1.0 km	循环式索道 1.0 km
平地 0	127.68	415.93	340.50	170.24	473.83	388.57	212.79	531.74	436.63
丘陵	169.99	415.93	340.50	226.66	473.83	388.57	283.32	531.74	436.63
山地	350.35	443.72	363.58	467.13	510.89	419.33	583.92	578.06	475.09
高山	592.46	469.78	385.20	789.94	545.63	448.17	987.42	621.49	511.13
峻岭	880.60	513.21	421.25	1 174.14	603.54	496.23	1 467.68	693.87	571.21

表 14 单位工程量运输费用比较									单位:元
运输方式 及运距	人力运输 0.6 km	往复式索道 0.6 km	循环式索道 0.6 km	人力运输 0.8 km	往复式索道 0.8 km	循环式索道 0.8 km	人力运输 1.0 km	往复式索道 1.0 km	循环式索道 1.0 km
平地	543.87	1 526.83	1 242.88	725.17	1 736.00	1 414.79	906.43	1 945.16	1 586.69
丘陵	723.97	1 526.83	1 242.88	965.32	1 736.00	1 414.79	1 206.65	1 945.16	1 586.69
山地	1 524.87	1 669.48	1 360.04	2 033.16	1 918.51	1 564.77	2 541.47	2 167.54	1 769.49
高山	2 578.29	1 766.09	1 439.44	3 437.73	2 047.32	1 670.64	4 297.15	2 328.55	1 901.84
峻岭	3 832.00	1 927.10	1 571.80	5 109.31	2 261.99	1 847.12	6 386.67	2 596.89	2 122.44

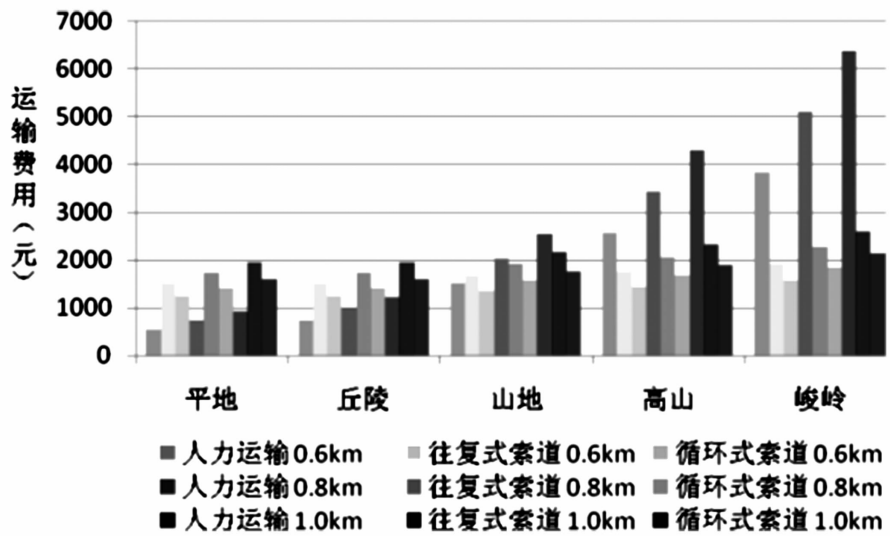


图 1 单位工程量运输费用比较

混凝土工程量(单位:m³)数值一般为铁塔重量(单位:t)数值的 1~2 倍,取两者之比为 1 倍进行计算,实际工程中单位工程量(包含 1 m³ 混凝土和 1 t 铁塔)的人力运输费用与索道运输费用的比较见表 14 和图 1。

从表 14 和图 1 可知,采用人力运输方式在平地、丘陵等地形情况下比索道运输费用节省,但在山地、高山、峻岭等地形下,因索道运输会产生架设费用,因此要根据两种方式的运输距离和运输重量来确定较经济的运输方式。因混凝土采用人力运输方

式在平地、丘陵地形情况下比索道运输费用节省,因此当混凝土工程量与铁塔重量之比大于1时,规律与上述一致。此外,运输方式应结合工程实际情况、运输方式的难易程度、对环境的影响程度、施工工期、修路费用以及赔偿费用等来综合选定。在输电线路工程中,线路往往经过不同的地形区,索道运输与人力运输可以结合应用,发挥各自的优势。

3 结 语

对输电线路工程建设中常见的人力运输、汽车运输和索道运输费用进行了计算分析,结果可供电力工程建设参考。通过对3种运输方式的比较,汽车运输费用最省,人力运输在平地、丘陵等地形下比索道运输费用节省,但在山地、高山、峻岭等地形下,需要根据两种方式的运输距离和运输重量来确定。

=====

(上接第29页)



图3 极间间隔棒在高肇直流的挂网情况

大小伞布置使得绝缘间隔棒极不容易积污,同时该间隔棒耐污性强,原则上不需要清扫维护。

该极间间隔棒目前已用于高肇±500 kV直流线路,见图3。对限制导线舞动与风偏摆动具有很好的效果,运行状况良好。

参考文献

[1] 程志军. 架空输电线路静动力特性及风振研究[D]. 杭州:浙江大学,2000.

[2] 陈晓明. 大跨越输电线路舞动及其控制研究[D]. 上海:同济大学,2002.

[3] 徐中年,赵作利. 气流干扰线抑制导线舞动的机理与实验[J]. 线路通讯,2002(1):57-59.

[4] 王黎明,孙保强,张楚岩,等. 750 kV紧凑型线路相间间隔棒力学分析与计算[J]. 高电压技术,2009,35(10):2551-2556.

参考文献

[1] 国家能源局. 电网工程建设预算编制与计算规定[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[2] 国家能源局. 电力建设工程预算定额[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[3] 缪谦. 我国电网建设工程施工货运索道运输方式的研究[J]. 华北电力技术,2010(12):12-15.

[4] 孙竹森,缪谦,江明. 输电线路工程货运架空索道标准化施工方案[J]. 电力建设,2011,32(3):117-120.

[5] 肖宇. 输电线路工程索道运输方式费用探讨[J]. 电力勘测设计,2015(4):76-80.

作者简介:

肖宇(1980),高级工程师,主要从事输电线路工程设计及技术经济等方面的工作。

(收稿日期:2017-06-27)

[5] 王少华,蒋兴良,孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2005,31(10):11-14.

[6] 丁锡广,陶文秋. 减轻送电线路导线舞动灾害的措施[J]. 高电压技术,2004,30(2):54-55.

[7] 朱宽军,刘彬,刘超群,等. 特高压输电线路防舞动研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):12-20.

[8] 王黎明,薛家麟,范钦珊. 220 kV紧凑型输电线路相间合成绝缘间隔棒的研制[J]. 高电压技术,1995,21(1):3-7.

[9] 薄学微,王黎明,孙保强,等. 500 kV紧凑型线路复合相间间隔棒机电性能研究[J]. 高压电器,2011,47(2):43-48.

[10] Keutgen R, Lilien J L. Benchmark Cases for Galloping with Results Obtained from Wind Tunnel Facilities Validation of A Finite Element Mode I[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):367-374.

[11] Gupta S, Wipf T. Structural Failure Analysis of 345 kV Transmissionline[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9(2):894-903.

[12] DL/T 810-2012, ±500 kV及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件[S].

[13] GB/T 775.2-2003,绝缘子试验方法 第2部分电气试验方法[S].

[14] 及荣军. 330 kV柔性相间复合绝缘间隔棒的研制[J]. 电网技术,2006,30(12):112-115.

[15] DL/T 1058-2016,交流架空线路用复合相间间隔棒技术条件[S].

作者简介:

鄢艺(1987),工程师,主要从事输电线路设计工作。

(收稿日期:2017-05-13)

售电侧改革下电力咨询企业新业务探索

武云霞,余 熙,廖劲波,付 浩,白智丹,黄天意

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:售电侧改革带来了广阔的市场机遇,也对电力咨询行业提出了更高的服务要求。在深入分析售电侧改革的基本特征基础上,重点提出电力咨询企业服务于政策咨询与市场研究、增量配电网规划、需求侧响应服务、购售电业务咨询与功能开发等各项新型业务,为其开拓售电市场提供了有益思路。

关键词:电力咨询企业;增量配电网规划;需求侧响应;购售电业务;综合能源;售电市场

Abstract:Power sales side reform has brought broad market opportunities, but at the same time, greater services from the power consulting industry are demanded. Based on the elaborate analysis of the basic characteristics of power sales side reform, it focuses on several totally new transactions for power consulting enterprises, including policy consulting and market research, incremental distribution network planning, demand side response service, consulting for electricity power purchases and sales and function development etc, which provides useful ideas for power consulting enterprises to develop the power sales side market.

Key words:power consulting enterprise; incremental distribution network planning; demand response; electricity power purchase and sale transactions; integrated energy; power sales side market

中图分类号:TM711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0069-04

0 引言

本轮售电侧改革的主要内容是放开增量配电网业务和引入售电公司。中国各级工业园区和经济开发区分数以万计,区域内有巨大的电力、制热、制冷、工业蒸气等多种能源需求,这些能源需求为发展分布式能源及储能、综合能源和节能减排服务等提供了条件,是一个千亿级的巨大市场,是增量配电网业务争夺的主战场。目前,全国工商注册的售电公司已达近万家,随着未来现货市场的建立,售电市场竞争将逐渐进入白热化状态。面对日趋激烈的竞价形势和日益严苛的偏差电量考核,售电公司为了立于不败之地,必将通过提高管理和专业技术水平来适应市场发展需要。

随着中国新一轮电力改革的不断推进,对售电公司和增量配电网从政策和技术方面都开展了丰富的研究工作。文献[2-5]对售电公司的运营模式和关键业务进行了分析。文献[6-7]对发电企业、电网企业开展售电业务的模式进行讨论。文献[8]对新电力改革形势下电网企业配电网规划的发展对

策进行研究。文献[9]对增量配电网的商业模式进行了探讨。而针对电力咨询企业在售电侧改革中如何发展,如何开展面向售电市场的咨询业务的文献几乎没有。

电力咨询企业作为电力产业链中的重要一环,其传统业务贯穿发电、输电和配电环节,其业务范围主要是工程设计和工程建设总承包。这使得电力咨询企业存在“重设计、轻咨询”,“重建设、轻运营”的现象。根据国外电力咨询行业发展经验,随着电力体制改革的不断深入,对于电力市场运营的高端咨询将成为行业发展不可或缺的重要内容。下面主要探索电力咨询企业服务于售电市场主体可开展的新型咨询业务,对帮助电力咨询企业适应售电侧改革新形势,拓展高端咨询市场,实现战略转型具有一定的参考价值。

1 政策咨询和市场研究

2015年“9号文”出台后,政府先后颁布了一系列售电侧改革的政策和规定,但涉及诸如增量配电网资产管理与运营、新增园区 PPP 方式、售电市场

现货交易模式与规则等具体的政策法规尚有不清晰和亟待完善之处,且各地的售电市场规则也不尽相同。对于售电公司而言,在自身研究能力不足的情况下,需要通过咨询外部机构充分熟悉政策法规和交易规则方可更好地进入市场开展运营。以广东为例,约有六成售电公司由市场策略竞争力不足以及政策解读不到位等原因未获得可成交电量。对于政府而言,作为电力改革的推动者和电力市场的监管者,在市场建设和运营过程中,更需要有资质、能力、经验的第三方中立机构为其制定科学适宜的政策、规则提供技术支持。

因此,电力咨询企业可充分利用其与政府部门、发电公司、电网公司、用户、设备制造厂家等各种社会资源的密切联系,为售电公司、政府等提供电力和能源政策咨询服务和电力市场课题研究,帮助他们准确把握电力行业发展趋势,掌握国家电力体制改革、能源发展等政策动向,熟悉市场规则。具体而言:

1)开展售电侧改革政策咨询。电力改革是一个在前进中不断修正的过程,需要不断出台文件来指导电力改革,也需要根据市场变化及时对电力改革文件进行修订。从售电公司准入与退出管理、售电市场架构、交易规则的制定,到增量配电网的投资管理、价格机制、监管机制、激励机制、信息公布机制的建立,是非常繁杂且工作量巨大的任务,必然需要相关咨询企业为其提供技术支持。此外,未来电力现货交易、金融性电力期货期权等市场建设成本高,一旦建成后如更改交易方案与规则,再建设成本高昂,而且世界各国的电力现货与金融市场模式又各不相同。因此,电力咨询企业可发挥专业特长,协助政府起草、编制售电侧市场和增量配电网改革的配套文件,充分论证电力现货与金融市场建设方案,严谨制定市场交易规则,科学设计市场交易管理系统。

2)开展电力市场研究与分析。中国具有能源资源禀赋和经济发展水平不平衡的基本特征,未来售电公司必然要通过跨区、跨省交易来更好地提升能源使用效率、实现资源的优化配置。今年,国家发改委相继颁布了《华中区域电力中长期交易实施规则(暂行)》和《南方区域跨区跨省月度电力交易规则(试行)》,力争尽快实现全部市场电量价格由发电双方通过自主协商、自主竞价方式确定。售电公司开展跨区跨省交易的前提是要充分了解相关区

省的电源、负荷、跨区联络线等情况,从而精准判断其市场竞争能力。长期从事省内及跨省电网规划和设计的电力咨询企业,掌握电网通道、电源容量与布点、负荷增长趋势等信息,通过对规划设计信息的深入挖掘,可以帮助开展跨区跨省交易的售电公司更加准确地进行市场分析,科学制定公司的发展策略和经营策略。其次,未来售电侧市场必然要开启电力现货和金融交易,前者以次日每1 h或0.5 h、或者以未来5 min的电能为交易标的,后者带有强烈的期货期权性质。因此,和目前开展的中长期电力交易机制相比,现货市场将受到电网安全稳定运行和电源技术特性的约束。电力金融市场受到政策、重大事件、交易者心理等多种因素的影响,运行机制复杂,售电公司应对稍有不慎,就会面临较大亏损,电力咨询企业可跨界与金融机构深入合作,发挥各自优势,对现货和金融市场进行研究和分析,帮助售电公司建设电力现货和金融市场交易辅助决策系统来规避风险、获得利润。

3)协助开展风险管控。在电力市场建设的过程中,不可避免地会出现一些违法违规行为。在开展增量配电业务以及售电公司运营的过程中,也存在着配电网投融资、合同履行、公司管理运营等方面的风险,市场主体之间出现法律纠纷的可能性很高。因此,电力咨询企业除了提供专业技术服务,还可与法律专业机构深度融合,开展风险提示和风险预警工作,帮助售电公司进行风险管控,有利于售电公司合法合规经营,维护自身合法权益,降低法律纠纷产生的概率,减少由此带来的经济损失。

2 增量配电网规划业务

增量配电投资业务放开后,根据国家增量配电网业务试点工作方案的要求,须由地方政府能源管理部门委托专业机构编制增量配电网建设改造规划,并将其纳入当地配电网规划。这对于长期从事电网规划设计的电力咨询企业而言,将是其在售电市场中重要的业务增长点。

目前关于增量配电网的相关政策还不完善,并且在一些关键问题上,政府、电网企业、社会投资主体之间尚存在较大分歧。因此,电力咨询企业在开展增量配电网规划时需重点关注以下几方面内容:

1)综合考虑多种因素,确定供电营业区。增量

配电网规划最重要的内容就是要确定供电营业区范围,这涉及到政府、电网企业、投资主体等多个相关方的切身利益。在进行配电网规划目标函数的经济性选择和约束条件的确定时,需充分考虑各利益相关方的诉求,提高规划的协调性和可操作性。

2) 充分考虑负荷预测对配电网规划的影响。增量配电网内的负荷数量相对于主网较少,但是每个负荷的变化对整个配电网的建设规模和建设时序都可能造成很大影响,而且引起负荷变化的不可控因素很多,使得负荷预测愈显重要和复杂。因此,在进行规划时,需深入了解规划区域内负荷,特别是大负荷的报装情况,包括报装容量、用户性质、投产时序等,尽量提高负荷预测的准确性。另外,还需充分考虑分负荷参与需求侧响应对负荷预测的影响及合理规划。

3) 重视分布式能源对规划的影响。增量配电网内往往配置有光伏、风电、生物质、地热、冷热电三联供等多种类型的分布式电源,以及储能电池、冰蓄冷、电动汽车等各种类型的储能设备,此时的增量配电网将不同于常规配电网,而是典型的智能配电网。因此,在进行增量配电网规划时,除配电网网架规划外,还需根据供电区域的资源情况和供能需求进行分布式电源规划,在两者之间协调配合的同时,满足区域内经济最优。

4) 兼顾一次规划与二次规划的配合。传统配电网规划时调度管理模式已基本明确,而增量配电网的调度管理模式各不相同,可能实行独立调控,也可能委托电网公司代管,这对增量配电网的一次规划会造成直接影响。此外,未来增量配电网将向用户全程参与、潮流双向流动、调度管理自动化的智能化方向发展。因此,在增量配电网调度管理模式明确及规划完成后,有必要对配套的增量配电网自动化、通信网络等二次系统进行规划,以满足增量配电网智能化需求。

5) 加强规划的经济性评价。增量配电网规划的经济性评价将为地方政府能源管理部门确定增量配电网项目业主提供重要参考。经济评价时需要综合考虑固定资产折旧费用、年运行维护费用、项目资本金期望回报、税金、电网基本容量费和购电成本等影响区域内配电电价的因素,努力提高经济评价的精确性,实现降低区域内用户生产成本、激活企业发展活力和动力的目标。

3 需求侧响应服务

《电力发展“十三五”规划》中明确指出要大力提高需求侧响应能力,它是实现新能源消纳和负荷调峰的重要手段。售电侧改革后,售电公司以负荷集成商的身份,综合利用自身的客户资源挖掘负荷需求侧互动响应的能力参与到市场交易中,通过避峰既节约用户生产成本,又降低自身的运营风险,充分发挥需求响应的实施效果,进而开展节能服务,形成用户能源托管和能效托管新的盈利模式。

需求侧响应的实现需要远方通信、智能控制、高级量测等技术作为支撑以及合理的价格机制、交易模式、结算机制作为保障,这对售电公司的信息化水平和用能管理能力均提出了较高的要求。电力咨询企业可开展需求侧响应业务,为售电公司提供精细化、实时化的需求响应技术支持与交易机制设计。具体而言:

1) 需求侧响应发展初期,可针对售电公司已有的工商业用户、中小型用户的供能系统、储能系统、用能系统等资源进行整理和集成,形成可参与需求响应的资源库,帮助售电公司明确内部需求响应项目的技术经济极限。此外,还可对用户的节能需求和节能空间进行诊断分析,帮助售电公司进行细致的成本收益核算,形成不同区域、不同电压等级节能标杆库,以确定是否开展需求响应项目及其具体参与模式。

2) 随着需求响应市场的建立和完善,电力咨询企业通过设计、软硬件系统开发,帮助售电公司深入挖掘用户潜力,根据需求响应价格激励机制,制定与之相匹配的需求响应策略和套餐,参与需求侧的市场交易。此时,售电公司将根据需求侧响应市场的供需状态实时向用户传递市场的价格信号,合理引导用户的需求侧互动响应行为,逐步实现售电公司与电网需求响应市场信息的实时反馈共享。该阶段的重点是将价格信号和供需状况及时有效地反馈给不同类型的需求响应用户,并提供配套的用户计量改造、电力控制改造、分布式发电设施、需求侧储能装置和主动式配电网的设计建设等服务。

4 购售电策略分析

由于电力的透明化同质属性,售电批发市场的

竞价价差将逐渐缩小,未来售电公司购售电业务的核心将是精准的负荷预测与合理的报竞价策略。一方面,大部分售电市场都采用了严格的偏差电量考核机制,售电公司负荷预测准确率将直接影响其营业收入;另一方面,中国将于2018年初步建立现货市场,这对售电公司基于电价预测的报竞价策略的专业技术实力提出了更高的要求。

1)由于售电公司所管辖的负荷数量相对较少,负荷间通常没有大电网负荷的抵消效应,利用历史数据递推法进行负荷预测精度较差,只能通过深入细致地掌握特定负荷的生产、生活模式,从中挖掘出未来的负荷需求。电力咨询企业通过发挥资源整合的优势,在深入分析售电公司所代理的客户用电行为特性的基础上,提供高精度负荷预测服务。

2)售电公司报竞价策略的关键是预测市场出清电价,为此售电公司须尽量获取所有参与集中竞价交易的发电公司与售公司信息,包括发电公司能耗与报价模型、机组出力范围、运行小时数,售电公司成本与报价模型等。电力咨询企业可开发具备电价预测、报竞价策略分析等高级应用功能的软件,充分考虑市场主体的报价利润空间,分析得出发电公司和售电公司的模拟竞价交易数据,从而仿真得到市场出清价以及在此基础上制定合理的售电公司报竞价策略。

5 结 语

电力咨询企业长期从事发电和电网设计,具有较丰富的经验储备、较全面的技术底蕴和较完善的实际操作能力。面对售电侧改革推进,还需顺势而

=====

[11] Sebo S A. Zero - sequence Current Distribution along Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1969,88(3):910-919.

[12] Dawalibi F. Ground Fault Current Distribution between Soil and Neutral Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1980,99(2):452-461.

[13] Garrett D L,Myers J G,Patel S G. Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1987,2(3):725-732.

[14] 姜彤,白雪峰,郭志忠,等. 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):50-53.

变,不断开拓创新。未来密切关注综合能源服务,加强与金融、法律的跨界融合,探索大数据技术、区块链技术、人工智能技术在其间的应用,积极开拓售电市场全方位咨询业务。

参考文献

[1] 刘继春. 电力市场技术支持系统[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[2] 徐毅. 新电力体制改革下的售电公司经营探讨[J]. 轻工科技,2016(3):130-131.

[3] 胡晨,杜松怀,苏娟,等. 新电改背景下我国售电公司的购售电途径与经营模式探讨[J]. 电网技术,2016,40(11):3293-3299.

[4] 包强,王晓雯. 市场竞争环境下售电业务发展方向探索[J]. 电力需求侧管理,2015(4):48-51.

[5] 段银斌. 市场化售电主体运营模式及关键业务研究[J]. 电力需求侧管理,2016(3):41-459.

[6] 曹重. 南方电网开展综合能源服务的实践及成效[J]. 电力需求侧管理,2016(3):1-4.

[7] 王俊,张纯淳,曾鸣. 大型发电企业构建售电平台的初步设想[J]. 企业改革与管理,2017(1):217-218.

[8] 沈红宇,陈晋,归三荣,等. 新一轮电力改革对电网企业配电网规划的影响与对策[J]. 电力建设,2016,37(3):47-51

[9] 罗智,宋炜. PPP模式在增量配电网领域将大有可为[J]. 中国投资,2017(2):82-85.

作者简介:

武云霞(1981),高级工程师,从事调度自动化和电力市场工作;

余 熙(1963),教授级高工,主要从事电网系统二次规划工作;

廖劲波(1964),教授级高工,主要从事调度自动化、电力系统规划工作。

(收稿日期:2017-06-27)

[15] 黄锐峰,李琳. 新的基于相分量的变压器模型及其在统一广义双侧消去法中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):188-193.

[16] Meliopoulos A P, Webb R P, Joy E B, et al. Computation of Maximum Earth Current in Substation Switchyards[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1983,102(9):3131-3139.

作者简介:

杨凌霜(1990),助理工程师、硕士,主要研究方向为变电站接地技术;

邹家勇(1982),高级工程师、硕士,主要研究方向为变电站接地技术、电磁场理论。

(收稿日期:2017-06-27)

四川省能源互联网发展路线研究

夏 雪,李嘉逸,余 熙,张胜飞,孙建伟,陈 卓

(中国电力工程顾问集团公司西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:作为中国能源资源大省,因地制宜建设具有四川特色的能源互联网,具有非常重要的现实意义。在分析能源互联网层次架构的基础上,结合四川各个区域的资源、经济、消费等特点,提出了四川省各个区域能源互联网的发展思路、发展重点和发展路线图,以及在“十三五”期间建设实施的重点,为四川省能源发展提供了实际可行的建议。

关键词:能源互联网;发展路线

Abstract:As the major resource province of China, it is of important practical meanings to develop energy internet with local characteristics for Sichuan province. Based on the analysis of energy internet structure, and combining with the features of resource, economy and consumption of different regions in Sichuan province, the development idea, priorities, route and the key implementations during 13th Five – Year of Sichuan energy internet are proposed, which offers practical suggestions for the energy development of Sichuan province.

Key words:energy internet; development route

中图分类号:F426. 61 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954 (2017) 05 – 0073 – 05

0 引 言

在能源网络创新、能源网络革命的背景下,能源互联网技术应运而生^[1-3]。能源互联网实现了“互联网+”与“智慧能源”的结合,有助于提升清洁能源的消费比例,提高社会用能的综合能效^[4],提振能源市场的消费活力^[5],是符合中国未来能源战略需求的新型能源网络形态。

在经济发展步入新常态的背景下,四川省传统能源产业面临着包括火力发电市场压缩、水电发展与电力需求增长不匹配等诸多挑战^[6]。因地制宜发展具有四川特色的能源互联网,打造国内领先的清洁能源生产基地和清洁能源交易市场,将为四川能源产业及其附属产业的发展注入新的动力,对于推动四川省“互联网+”总体战略实施、优化四川省能源结构、推动绿色四川建设,具有非常重要的现实意义。

1 能源互联网的层次架构

现阶段能源互联网的总体架构可以分为终端能源互联网、区域能源互联网、广域能源互联网 3 个层次,涵盖能源传输、能源互补开发、能源互补消纳、能源转换、能源交易、能源综合调度、信息网络等不同

的技术领域^[5],如图 1 所示。

终端能源互联网可以是一个微网系统,也可以是天然气/沼气/氢气的分布式能源系统或是智能建筑,甚至可以是家庭的终端综合用能系统^[7]。适用于学校、医院、机场、酒店、工厂等建筑或建筑群,是区域能源互联网的重要组成部分。其投资建设主体主要是加入能源市场的企业、团体甚至个人,政府主要起到政策引导和监管的作用。

区域能源互联网,主要适合城市园区、新区、城镇示范区^[8]等,可推广至整个城市或城市群。因存在不同气候环境、不同供用能关系、城市规模与定位的差异,涉及范围较大,需要不同的部门和环节协调。

广域能源互联网则是数个区域能源互联网的广域集合^[5]。其建设主要涉及到机制体制的建设、宏观政策的协调以及区域能源互联网之间信息网络、能源传输管网的建设。

2 四川省能源经济区域划分

四川省能源资源与消费结构具有典型的地域分布特征,能源资源主要分布于西部地区,能源消费主要集中于中、东部地区。为便于开展研究,结合四川

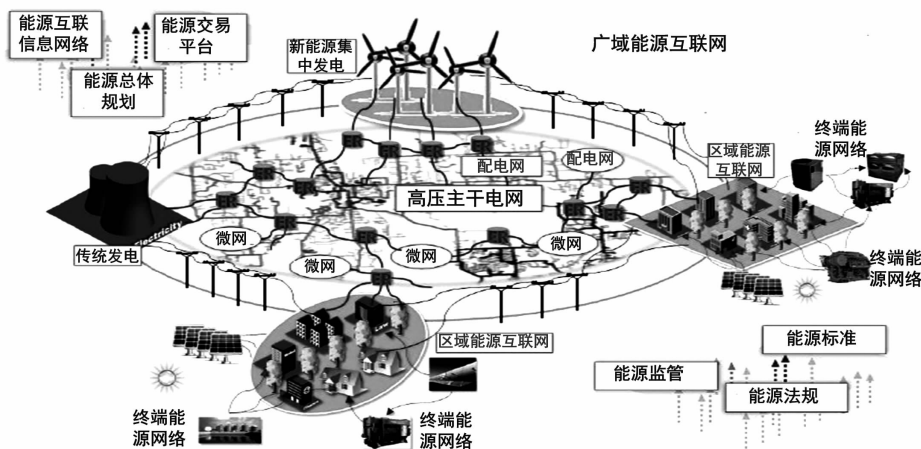


图 1 能源互联网层次架构示意图

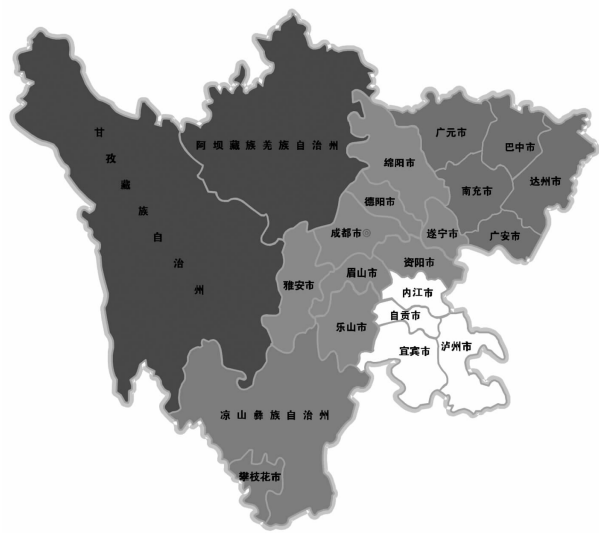


图2 四川省区域划分图

省行政区域划分、能源资源与消费结构的地域分布特征,将四川省划分为成都、川东北、川南、攀西、川西北 5 大经济区^[9],如图 2 所示。

其中,成都经济区包括成都、德阳、绵阳、眉山、乐山、雅安、资阳、遂宁 8 个地级市;川东北经济区包括南充、达州、广安、广元、巴中 5 个地级市;川南经济区包括内江、自贡、宜宾、泸州 4 个地级市;川西北经济区包括甘孜、阿坝 2 个自治州;攀西经济区包括凉山、攀枝花 1 州 1 市。

3 四川省能源互联网发展思路

四川省建设能源互联网的主要目的在于实现对四川清洁能源的充分消纳,提升四川的能源利用效率,激发四川的总体创新活力。因此,研究四川省能源互联网的总体发展思路,应从四川各区域特点出

发,结合终端、区域、广域能源互联网性质上的差异,有针对性地进行分析。

终端能源互联网规模较小,其建设应结合所在地的资源特点和消费特点,通过有效的监管进行合理的引导,更好地契合当地的能源利用思路。

广域能源互联网的建设则主要集中在宏观协调和政策机制层面,建议按照“持续优化能源结构、积极实现信息互联、统筹建设交易平台、同步推进制度建设、协调带动产业发展”的思路来开展工作^[5]。

区域能源互联网的建设应找准区域的发展定位,发挥区域资源优势,因地制宜,实现区域能源生产与消费之间的协调发展。由于能源设施是城市最基础的设施,因此区域能源互联网将是未来智慧城市的真正核心;加之从规模体量、建设需求、建设模式等方面来说,都决定了区域能源互联网是最适宜落地建设的,会具有较好的示范推广效应,将成为能源互联网开展试点落地的主要形式。因此,将重点对区域能源互联网的发展路线展开分析。

4 四川省区域能源互联网发展路线

4.1 成都经济区能源互联网发展路线

成都经济区以成绵德为核心,是四川经济最发达、人口密度最高、能源消费最集中的区域^[9]。现阶段该区域一次能源消费以煤炭、燃油、天然气为主,主要依靠外来输入。

因此,建议将成都经济区定位为绿色四川清洁能源的规模化消纳基地、四川能源技术的创新基地和设备制造基地。成都经济区区域能源互联网建设

的重点应集中在提高区域能源利用效率、提高清洁能源的消纳能力以及对能源新技术的创新示范利用方面,形成以清洁电能消纳为基础、火电为备用、天然气综合利用为补充、生物质能和地热利用作点缀的能源结构。

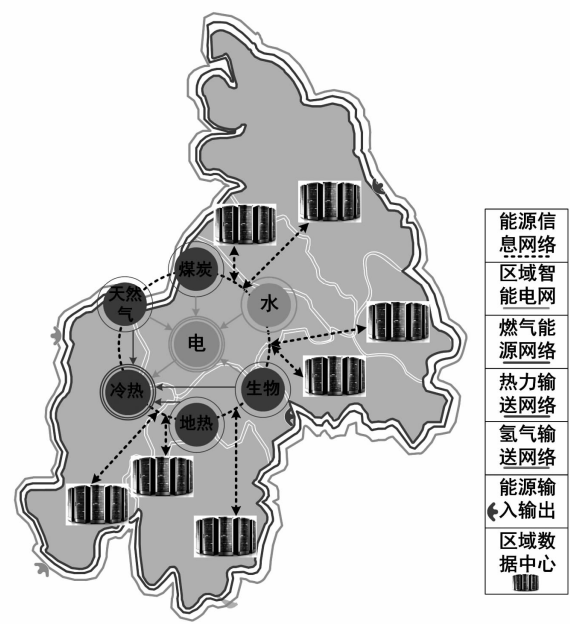


图3 成都经济区未来区域能源互联网典型架构

作为四川省能源的主要消费区——成都经济区,特别是成绵德地区以及天府新区将是“十三五”期间四川省能源互联网和能源市场建设的核心地区。

“十三五”期间,建议在成德绵地区建设主动配电网,试点电气互补需求侧响应^[5],先行发展燃气能源系统和分布式储能,构建以成德绵为核心的电动汽车示范区^[11]和能源信息网络;同时着力打造示范性县域能源互联网,并在天府新区开展城市能源互联网示范工程,为四川能源互联网的发展进行引领示范。

4.2 川东北经济区能源互联网发展路线

川东北经济区将是四川未来一段时间最主要的天然气产地。此外,该区域内还有部分水能资源和风能资源可供开发^[9],而南充市也是四川生物质能应用最成功的地区,并提出在“十三五”期间将进一步加强生物质能的利用^[10]。

结合区域资源特性,川东北区域建议作为四川的天然气综合供应基地。能源互联网的建设应集中在天然气综合利用和多元化利用、天然气储气调峰设施建设、天然气管网建设以及进一步深化生物质

能应用等方面。最终建成完善的天然气配套产业和外送机制,形成以水电等清洁电能消纳为主、天然气发电为补充、火电利用为备用、生物质能示范利用的能源结构。

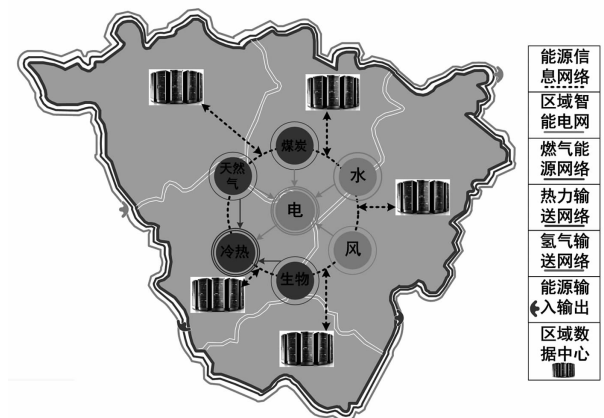


图4 川东北未来区域能源互联网典型架构

“十三五”期间,川东北经济区建议结合现有燃气发电进行热电联产综合改造,推动 CNG(压缩天然气)短途公共交通与 LNG(液化天然气)长途公共交通结合的天然气公共交通体系的建设,同时开展风气互补的前期研究,紧随成德绵地区试点之后开展区域能源信息网络的建设和能源市场化的试点,并推广生物质能应用,示范性开展地级城市、高速路网电动汽车充电网络建设。

4.3 川南经济区能源互联网发展路线

川南经济区是四川火电站较为集中的区域和主要的贵煤、云煤入川通道,因此可以考虑将本地区打造成四川的电源后备和调峰基地。同时,本地区的高硫煤储量较高,还可以考虑配合广域能源网络火电基地的建设,综合发展煤气化多联产等煤化工产业,实现本地资源的高效利用和对煤炭资源的清洁利用。此外,页岩气开发也将成为川南地区能源发展的新思路^[9]。

最终形成以清洁电能消纳为主、火电作为主要备用的电源结构典型,构建起覆盖区域县级以上城市的智能电网、覆盖区域核心城市的燃气管网、结合煤炭运输路网的多网互补的能源输送网络,发展“电煤气冷热”结合的能源供应和消费体系。

在“十三五”期间,建议本地区紧随成都经济区的发展脚步,积极推动区域能源互联网的试点建设,与天府新区、川东北经济区形成四川能源发展的新兴增长极。建设重点方面,建议以四川广域能源互

联网火电备用调峰基地为定位来开展区域火电的规划和建设工作,试点煤基多联产技术,利用本地高硫煤发展清洁煤化工产业;并根据成德绵试点经验,开展区域信息网络和能源市场化建设,以泸州为试点建设电动汽车网络^[11];同时规划和建设四川火电备用燃料基地,推动页岩气勘测和开发。

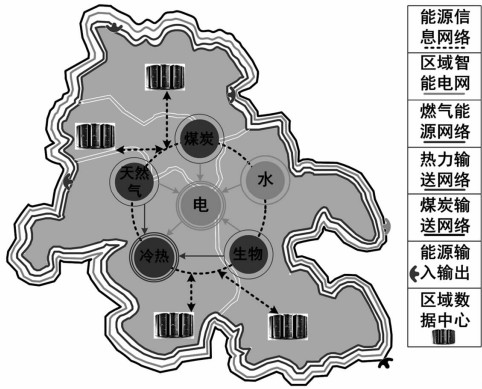


图 5 川南未来区域能源互联网典型架构

4.4 攀西经济区能源互联网发展路线

攀西经济区包含攀枝花市和凉山州,其中攀枝花市是四川的钢铁、钒钛、能源基地和新兴工业城市,能源消耗在全省地级市中位居第二。考虑到该区域丰富的能源资源种类和庞大的用能需求,可以考虑将攀西经济区打造成四川能源综合利用、复合利用的示范基地^[5]。

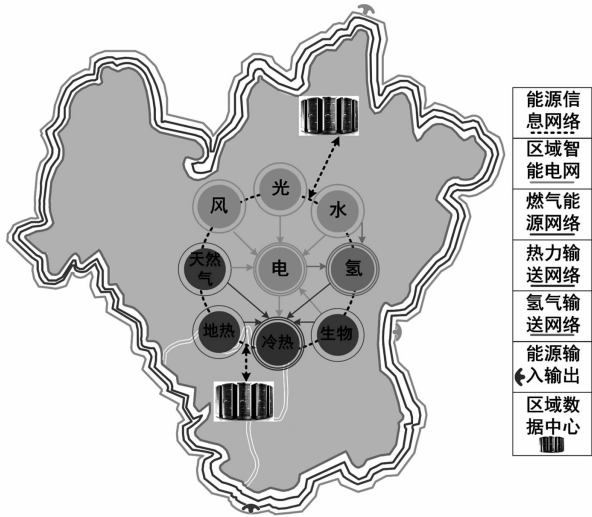


图 6 攀西未来区域能源互联网典型架构

区域能源互联网的建设应集中在实现对能源的综合利用、互补利用和示范利用方面。形成以清洁电能消纳为主、天然气(缅气入川) 和分布式能源综合利用为辅、生物质能和氢能为补充、火电为备用的电源结构典型,发展“电气冷热氢”的多元化能源供

应和消费体系。

“十三五”期间,建议在攀枝花和西昌开展智能配电网或主动配电网的建设,结合 LNG、CNG、电能和氢能来建设综合绿色公共交通体系,试点弃电制氢,加快风光和地热能资源开发,促进民生利用;同时推广风-光-水互补协调开发。此外,为将攀西、川西北地区丰富的风光资源输送至省内的负荷中心,可以考虑开展连接成都经济区与攀西、川西北的多端柔性直流输电工程的可行性论证,视情况开展工程建设。

4.5 川西北经济区能源互联网发展路线

川西北地区属典型的地广人稀区域,特点是清洁能源资源丰富,但能源需求并不旺盛,因此可以考虑打造成四川清洁能源的生产和输出基地^[9]。

该区域能源互联网的建设应集中在实现对清洁能源的集中开发与外送、清洁资源与旅游资源、生态农业协作开发、通过能源建设助力生态经济区建设等方面。形成以风光综合利用为主、地热和氢能综合利用为辅、实现清洁能源集中外送的能源结构;构建起以覆盖区域重点县城的智能电网为主、冷热输送网络为补充、结合少量氢气输送网络的区域能源网络。

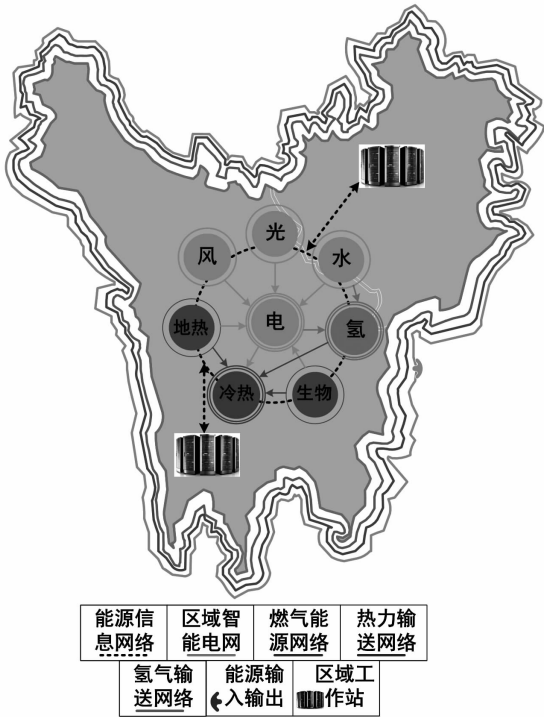


图 7 川西北未来区域能源互联网典型架构

“十三五”期间,建议加强川西北边远地区的电网升级改造,配合风光水资源的协调开发,坚持“以

能扶贫”的理念,结合幸福美丽新村建设,推广储能微网,促进生态旅游发展和能源基层民生开发;同时研究发展多端柔性直流输电的可行性。

5 结 语

结合四川省的行政区域划分、能源资源以及经济发展的地域分布特征,将四川省划分为成都、川东北、川南、攀西、川西北5大经济区和城市群;结合能源互联网的层次架构,分析了四川省能源互联网的多层次发展思路,并结合各地资源和经济特点,提出了具有地域特色的区域能源互联网发展路线。

作为国内能源资源大省,四川省建设能源互联网建议按照“坚持协调互补思路、合理转变能源定位、开放促进服务创新、完善区域协调发展、统筹能源总体规划、建设美丽绿色四川”的思路来开展工作,以充分发挥四川的区域资源优势,实现对四川省丰富的清洁能源的高效开发和利用,实现四川省由清洁资源大省向国内领先的清洁能源生产基地、消费基地、交易基地的跨越式发展。

参考文献

[1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联

(上接第58页)
条件,改进优化算法。

参考文献

[1] 国家发展改革委,国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[Z]. 2016-11-7.
[2] 倪敏东. 低碳时代的电动汽车基础设施规划——以伦敦为例[C]. 中国城市规划学会国外城市规划学术委员会及国际城市规划杂志编委会2010年会. 2010.
[3] 肖湘宁,温剑锋,陶顺,等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014,29(8):1-10.
[4] 郭春林,肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):70-75.
[5] 国务院办公厅. 关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见[Z]. 2015-9-29.
[6] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.

网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15):1-11.

[2] 杰里米·里夫金著. 张体伟,孙毅宁译. 第三次工业革命[M]. 北京:中信出版社,2012.
[3] 曾鸣. 能源互联网与能源革命[J]. 中国电力企业管理, 2016(16):36-39.
[4] 国家发展改革委. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[R]. 发改能源[2016]392号,2016.
[5] 夏雪,张胜飞,孙建伟,等. 四川省能源互联网发展研究[R]. 2016.
[6] 四川省人民政府. 四川省“十三五”能源发展规划[R]. 2017.
[7] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1):16-25.
[8] 蒲天骄,刘克文,陈乃仕,等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3511-3521.
[9] 四川省人民政府办公厅关于印发五大经济区“十三五”发展规划的通知[R]. 川办发[2016]62号,2016.
[10] 南充市人民政府. 南充市环境保护“十三五”规划(2016—2020年)[Z]. 2017.
[11] 电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020年)[Z]. 发改能源[2015]1454号,2015.

作者简介:

夏雪(1980),硕士、高级工程师,研究方向为智能电网相关技术。
(收稿日期:2017-06-27)

[7] 刘青,戚中译. 基于蒙特卡洛法的电动汽车负荷预测建模[J]. 电力科学与工程,2014,30(10):14-19.
[8] 吴春阳,黎灿兵,杜力,等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):36-39.
[9] 熊虎,向铁元,祝勇刚,等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):65-70.
[10] 张荣奇,白人朴,张荣耀. 商圈分析与网点布局[J]. 中国农业大学学报(社会科学版),2001,44(6):40-45.

作者简介:

李小雨(1989),硕士、助理工程师,研究方向为电力系统规划设计;
李嘉逸(1975),硕士、高级工程师,研究方向为智能电网技术、电力系统保护等;
胡浩(1981),硕士、高级工程师,研究方向为电力系统规划设计。

(收稿日期:2017-03-24)

山区输电线路全过程机械化施工设计方案研究

杨 洋,鄢秀庆,刘翔云,李澄宇,李 力,李 陈

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:输电线路全过程机械化施工主要工序包括物料运输、基础施工、组塔施工、架线施工、接地敷设等。受地形及交通影响,山区输电线路推进全过程机械化施工存在一定困难。结合川渝三通道 500 kV 线路工程特点,对山区全过程机械化施工方案进行研究,并对现场实施情况进行总结。针对主要工序、子工序提出了设计优化措施,为同类地区实施全过程机械化施工提供借鉴参考。

关键词:山区;全过程机械化施工;设计方案

Abstract:The whole mechanized construction in transmission line has several main processes, including material transportation, foundation construction, tower installation, installation of overhead conductors and ground wires, grounding work and so on. Because of severe traffic condition in mountainous areas, it is difficult to promote the mechanized construction in whole process. Combined with the characteristics of the third - channel of 500 kV transmission line connected to Sichuan and Chongqing, the construction programs of whole process mechanized construction in mountainous areas are studied, and the implementation experiences in this project are summarized. The optimized measures of design are put forward for the main processes and sub - processes, which provides a reference for the whole process mechanized construction under similar condition.

Key words:mountainous areas; whole process mechanized construction; design program

中图分类号:TM75 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)05 - 0078 - 06

0 引 言

传统架空输电线路施工方案主要以人力为主,效率较低且施工安全风险大。近年来,随着设计方法的创新、装备研发的升级,在部分地形较好、交通便利地区已经具备全过程机械化施工的条件,并逐渐试行推广,成效显著^[1]。但对于山区而言,推广难度仍然较大。下面结合川渝第三通道 500 kV 线路工程(以下简称川渝工程)特点,对该工程山区全过程机械化施工设计方案进行了研究,并首次在四川山区 500 kV 线路工程中试行推广全过程机械化施工;总结了现场应用经验,并提出了可供参考的设计建议。

1 全过程机械化施工工序

根据国家电网《架空输电线路工程施工机械化率评价方法》^[2]规定,全过程机械化施工主要包含 5

大主工序和 11 个子工序,见表 1 所示。

表 1 全过程机械化施工工序划分表

主工序	子工序
物料小运	物料装卸、物料搬运、临时道路平整及修筑
基础施工	开挖或成孔、混凝土搅拌、混凝土浇筑
组塔施工	塔材吊装、紧固件紧固
架线施工	牵引绳展放、导地线展放
接地敷设	接地孔槽掘进

2 川渝工程设计方案研究

2.1 工程概况

川渝工程起于 500 kV 资阳变电站,止于拟建 500 kV 铜梁变电站站外搭接点,线路全长 164 km,按同塔双回路架设,分四川段和重庆段,长度分别为 120.5 km 和 43.5 km。根据施工图现场勘测,四川段丘陵占 70%、山地占 30%,丘陵地区塔位地形较好,交通便利,大多数塔位满足机械化施工条件。这里主要对川渝工程山区塔位进行研究。根据山区塔

表 2 典型山区塔位交通情况列表

塔位号	N3019	N3035
塔位情况		
与主公路距离 /高差(m)	320/70	250/90

位交通条件相对较差、临时道路修筑距离长、重型设备进场较为困难等特点,因地制宜地制定相应的机械化施工方案。工程典型山区塔位交通情况如表 2 所示。

2.2 机械化施工设计方案

根据机械化施工各工序要求,结合工程特点,制定设计方案如下。

2.2.1 物料小运

小运物料包含塔材、导地线、牵张设备、金具及基础材料等,物料特征及机械化方案如表 3 所示。

导地线、塔材、基础钢材、接地钢筋等重量较轻,对于靠近主公路且易于修筑临时道路的塔位,可采取自卸卡车或牵引车等小型机械进行转运。混凝土可采用商品混凝土利用罐车运输。以上运输方案需要临时道路满足相应的通行条件,结合组塔、基坑开

挖工序、设备的使用要求,临时道路的路基宽度要求见表 4。

临时道路宽度为 4 m 时,基本可以满足各类机械的通行要求。同时考虑机械重量对地基承载力要求,需要对路面进行硬化处理使其达到一定的强度要求,如采用石子、石块铺路,其厚度为 200 ~ 300 mm,既能保证后期长期使用,也能有效控制成本。

受地形影响,对于部分临时道路修筑较为困难的塔位,采用索道进行材料的转运。索道系统包括承载系统、牵引系统、循环系统、材料装卸系统。轻型索道(见图 1)运输重量一般控制在 1 t 以内,重型索道(见图 2)运输重量可达 5 ~ 6 t。

基础材料除采用索道运输外,还可以采用泵车进行混凝土转运(见图 3)。泵送混凝土具有输送能力大、效率高、能连续作业、节省人力、节约施工成本和

表 3 物料特征及机械化方案表

项目	特征	单件重量/t	机械化设备
导线	4 × JL/GIA - 630/45,每盘 2.5 m × 2 m	3.2	自卸卡车、牵引车
地线	OPGW - 150,每盘 2.5 m × 2 m	2.4	自卸卡车、牵引车
塔材	最大肢宽 250 mm,长度 ≤ 12 m	≤ 1.5	自卸卡车、牵引车、索道
基础材料	商品混凝土(或砂石、水泥)	/	混凝土罐车、泵车、索道
牵引机	尺寸 4 550 mm × 2 200 mm × 2 500 mm	5.5	板车
张力机	尺寸 4 700 mm × 2 350 mm × 3 000 mm	10.5	板车

表 4 机械设备对于路基的尺寸要求

项目	特征	设备宽度/m	路基宽度/m
组塔	12 t 汽车起重机	2.5	3.0
	90 t 履带式起重机	3.5	4.0
基坑开挖	旋挖钻机扭矩 200 kN · m	2.6 ~ 3.5	4.0
物料运输	自卸式卡车	2.5	3.0

修路成本等优点,目前大功率混凝土泵最大水平运距可达620 m,最大垂直输送高度已达300 m。输送管道一般是用钢管制成,管径通常有100 mm、125 mm、150 mm等几种,标准管长3 m,配套管有1 m、2 m,另配有90°、45°、30°、15°等不同角度的弯管,可满足工程使用要求。

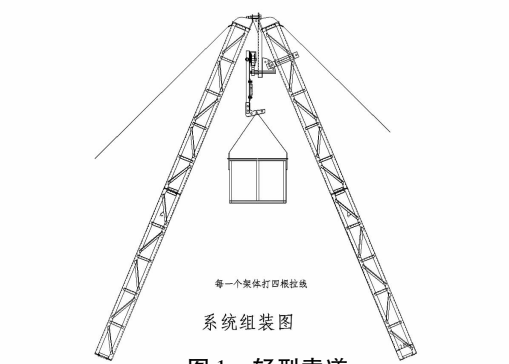


图1 轻型索道

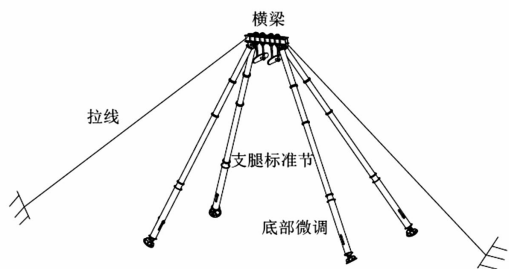


图2 重型索道

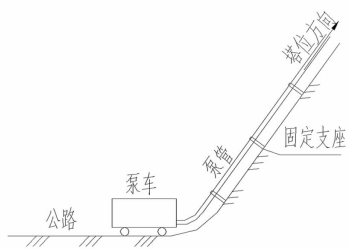


图3 泵送混凝土

2.2.2 基础施工

该工程地基主要以黏土、泥岩、粉砂岩及砂岩为主。根据地形地质情况,基础选型如表5所示。

表5 基础选型成果表^[3]

塔位地质情况	基础型式
粘土及岩石地基	挖孔基础、微型桩基础
岩石地基	岩石锚杆基础
河流阶地有水地基	直柱板式基础、灌注桩基础

1) 粘土及岩石地基

对于粘土及岩石地基,当交通情况较好时,挖孔基础可采用旋挖钻机进行基坑开挖。根据计算,本工程最大基础型号孔径为1.8 m,桩长7~15 m,选

择最大扭矩为200 kN·m左右的旋挖钻机可满足开挖要求。可采用的设备包括三一重工的SR200C,徐工机械的XR220D,国家电网《输电线路全过程机械化施工技术装备分册》^[4]的综合型,设备宽度为2.5~3.5 m。以上旋挖钻机均为履带式,对于部分塔位而言,当桩径不大于1.4 m时,可选择机动性更好的轮胎式旋挖钻机,其输出功率也可达80~100 kN·m,可降低对于临时道路的修筑要求。

对于旋挖钻机难以进场的粘土及岩石地基塔位,推荐采用微型桩基础(见图4)。单个微型桩的直径一般为200~400 mm,由多个单桩组成群桩基础共同承力。相较于大直径桩,单位体积的微型桩表面积大,节约工程费用在5%~10%,且布桩方式非常灵活。由于孔径小,微型桩成孔可以采用工程勘察钻机、锚固钻机等机械,这些施工机械体型较小,拆卸后便于装运,适用于本工程交通不便的塔位。

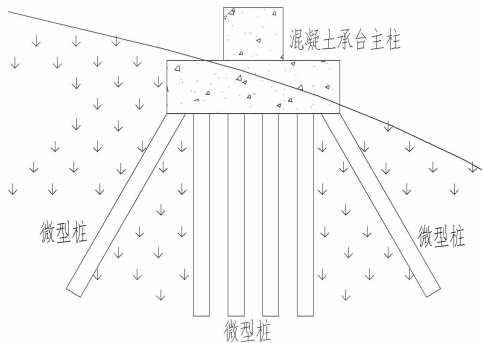


图4 微型桩基础

2) 岩石地基

在岩石地基上还可采用岩石锚杆基础。目前国内使用的岩石锚桩钻机主要有液压锚桩钻机、气动锚桩钻机、履带式锚杆钻机3大类,3类钻机都可以进行气动钻进。线路施工一般采用液压山地钻机,该钻机采用潜孔锤钻进工艺,具有钻进效率高、设备轻便、可拆卸性能强等特点,拆卸后单件重量不超过85 kg,操作简单,比较适合困难地区钻进施工要求。为使锚杆与周围岩体形成整体,注浆方式一般采用高压注浆,注浆压力为5 MPa左右。这样不仅对锚桩桩身的缺陷进行了加固,还对破碎岩层进行了加固,注浆泵重量为75 kg,2~3人即可抬动上山,机动性强。

3) 河流阶地有水地基

对于河流阶地有水地基推荐采用直柱板式基础或灌注桩基础。由于塔位交通情况一般良好且地形平坦,直柱板式基础可采用挖掘机开挖,灌注桩则可

采用回旋钻机进行开挖,机械化程度高。

2.2.3 组塔施工

1) 铁塔组立

本工程多数塔位全高小于 100 m, 铁塔单段或单片的重量都在 12 t 以下, 可采用起重机和悬浮抱杆进行组塔施工。

交通条件较好的塔位, 对于高度 30 m 以下的部分, 采用汽车起重机进行铁塔组装, 如三一重木 STC120C 起重机, 其特点是移动灵活、整机重量轻, 但额定起重量较小, 起重高度不高。高度为 30 ~ 70 m 的铁塔, 采用履带式起重机, 如 SCC900E 起重机, 履带起重机具有轮胎式起重机所无法达到的臂长、起重力矩、作业幅度、带载行驶能力及适应恶劣地面的能力等优势。高度大于 70 m 的铁塔, 若采用更高吨位的履带式起重机或者全地面起重机, 将大大增加运输成本, 对于道路的要求也更高, 因此可采用经济性更好的悬浮抱杆和起重机配合使用方案。

对于临时道路修筑困难的塔位, 可结合索道运输, 采用悬浮抱杆的方式进行组塔。落地式塔机组塔目前仅应用于特高压工程, 在本工程中应用时经济性较差, 因此不建议采用。

2) 紧固件紧固

吊装完成后及时紧固就位处螺栓, 螺栓紧固全部采用定扭矩电动扳手。

2.2.4 牵引绳、导地线展放

在架线工序中, 目前普遍采用张力放线, 其机械化程度较高。首先由无人机或飞艇牵引初级导引绳, 再用小牵引机收卷导引绳, 逐渐将放线区段内的导引绳更替为牵引绳, 最后由主牵引机收卷牵引绳, 逐步将放线区段内的牵引绳更换为导地线。

2.2.5 接地孔槽掘进

根据线路沿线土壤电阻率的不同和现场地形地貌的限制, 分别采用方形框加水平射线型式、方形框加垂直接地型式的接地装置。接地装置一般采用小型链式挖沟机、反铲挖掘机进行开挖, 施工效率高, 且场地要求不高。这些机械为常用农用具, 方便租赁、施工, 可实施性强, 但开挖土方量大, 对现场环境破坏比较严重。

采用水平定向钻机可避免大面积开挖的弊端。该装置主要由动力系统、控向系统、钻机系统组成; 由动力系统向钻机系统提供动力, 在控向系统的引导及泥浆系统的协助下, 钻具选取合适入土角度钻

进地下土层(见图 5), 并沿预先设计的控向轨迹钻进导向孔, 完成钻孔后, 通过将接地装置绑扎在钻具上后回牵(见图 6)并完成敷设(垂直接地型式不需回牵), 以达到最小开挖地表的施工效果。

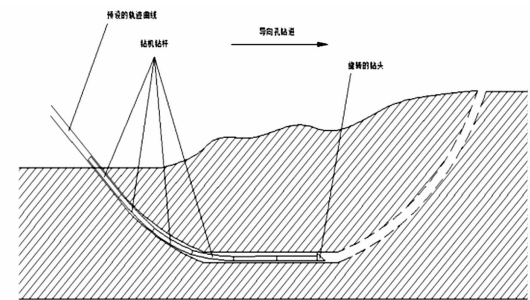


图 5 钻进导向示意图

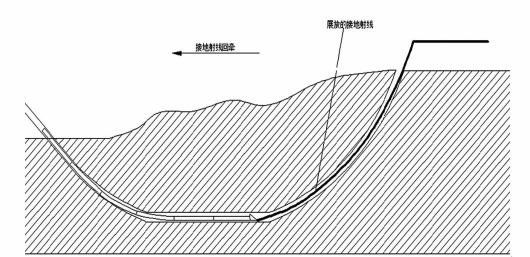


图 6 回牵接地装置示意图

3 设计方案总结

本工程山区全过程机械化施工方案总结见表 6。

机械化施工主要受交通条件影响, 交通情况好时, 机械化程度非常高; 交通情况差时, 可采取措施提高机械化比例, 如运输时采用索道、采用岩石锚杆基础和微型桩基础等。

全过程机械化施工在川渝工程实施以来, 建设效率大大提高, 且有效降低了施工风险, 具有良好的社会效益和经济效益。以基础施工为例, 开挖时间比较见表 7 所示, 综合造价比较见表 8 所示。

基础采用机械化施工后, 开挖时间可节约 90%, 费用节约 4%, 效率大大提高且具有明显的经济效益。机械化施工的区段越连续, 这种经济效益将越加明显。

4 存在问题及优化建议

川渝工程在采用机械化施工后, 建设效率得到了有效提高, 施工质量和安全也得到了保证, 但也存在可改进之处。如基础开挖、接地槽开挖采用机械

表 6 全过程机械化施工总结表

工序	子工序	交通情况	设备选型	机械化程度	备注
物料小运	道路修筑	√	挖掘机、装载机	高	
		×	/	/	
	物料搬运	√	卡车、牵引车、板车	高	
		×	标准索道	高	
		×	人力运输	低	标准索道不适用时
基础施工	开挖	√	旋挖钻机、回旋钻机、挖掘机	高	
		×	锚杆钻机	高	
		×	人力	低	地形地质较差,锚杆基础不适用时
	浇筑	√	罐车到塔位	高	
		×	泵车甬管转运	高	
组塔施工	塔材吊装	×	现场搅拌	高	
		√	起重机	高	
		×	悬浮抱杆	高	
	紧固件紧固	/	电动扳手	高	
		/			
架线施工	牵引绳、 导地线展放	/	无人机、飞艇	高	
接地敷设	接地槽掘进	√	挖沟机、水平定向钻	高	
		×	人工开凿	低	

备注:临时道路易于修筑,设备进场方便用√表示;临时道路修筑困难用×表示。

化后虽然优势明显,但是受交通等因素影响,机械化率仍然较低,不到 50%,而其他工序机械化率都达到了 80% ~ 100%。经分析,其主要影响因素有以下几点:

1)适用于小型设备开挖的基础型式种类较少,目前仅有岩石锚杆基础,且使用条件较为苛刻,使用率不高;

2)依赖旋挖钻机等重型设备开挖的基础类型种类虽然多,但交通条件要求高,一旦塔位远离公路,则实施难度较大;

表 7 基础开挖时间比较

方案	人工开挖	机械开挖
钻进速度米 /(m·h ⁻¹)	土层	0.2
	强风化层	0.1
	中风化层	0.05
开挖时间(天/基)	15	1.4
开挖时间比例	1	0.09

注:①基础直径 1.4 m,长度 10 m,外露 1.0 m,土层 2.0 m,强风化 3.0 m,中风化 4.0 m。

②人工开挖方案为 4 人同时开挖,4 人提土;机械开挖方案为采用 1 台旋挖机,2 人操作,1 人辅助。

表 8 基础综合造价比较^①

方案	人工开挖	机械开挖
基础混凝土/m ³	83.9	66.9
混凝土费用/元	187 856	46 830 ^②
钢筋/t	6.74	6.04
钢筋费用 ^③ /元	667	17 516
设备使用费用 ^④ /元	0	82 267
临时道路费用/元	0	15 000 ^⑤
其他费用 ^⑥ /元	0	20 000
合计费用/元	188 523	181 613
综合造价比例	1	0.96

注:①基础总费用包含混凝土、钢筋、设备使用、临时道路及其他项目共计 5 项费用。

②费用计列时,机械开挖采用商品混凝土,单价为 700 元/m³。

③人工挖孔方案钢筋价格已计入混凝土综合单价,表中费用仅为运输费用。

④旋挖钻机按 40 万每台月计价(连机带 3 人、含进退场费用,焊机使用费、焊条等辅助材料),基础按开挖时间 2 天折算租赁费用;设备使用费还包括:钻齿购置费 21 600 元,油费 19 000 元,发电机台班费 7 500 元,装、卸车时用吊车台班费 7 500 元。

⑤临时道路长度按 150 m 计算,道路维修及拆除按 10 万/km 计费。

⑥其他费用包括占地补偿、建渣处理等费用。

3) 接地槽开挖主要依赖挖沟机或定向钻机,对交通条件要求高。

为提高基础开挖及接地开挖的机械化率,充分发挥全过程机械化施工的优势,针对以上问题,提出了几点优化建议:

1) 创新基础设计,推广小型设备能够实施的基础方案,如岩石锚杆基础、微型桩等,提高基础机械化施工的可行性;

2) 对于新型小型化、专业化、节能环保、功能集成的设备,应积极引用,并制定相应设计方案,减少对大型设备的依赖;

3) 接地设计宜采用垂直敷设的方式,采用手持钻机进行机械化作业;

4) 当基础底部在风化岩层内时,不宜设置扩大头,可以采用加大基础埋深以满足承载力要求,从而提高旋挖钻机的使用效率和减少易损件的损耗;

5) 基础设计时尽量采用小桩径的基础型号,且桩径种类不宜过多,减少施工设备的投入。

5 结 语

全过程机械化施工具有安全可靠、经济合理、实施高效等优点。随着生产装备的不断更新,将逐渐

克服大型机械进场困难的问题,在以后的工程中得到越来越多的推广。工程设计单位应充分发挥龙头引领作用,在确保工程满足安全、适用、耐久功能性要求的前提下,创新设计理念和方法,适应全过程机械化施工要求,进一步提升工程综合效益,实现施工由劳动密集型向装备密集型转变,提升工程施工安全水平。

参考文献

[1] 王圣兵. 浅谈高压输电线路全过程机械化施工技术[J]. 低碳世界, 2016(6): 63-64.

[2] 赵飞等编著, 架空输电线路工程施工机械化率评价方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[3] 丁广鑫, 蔡敬东, 李正, 等编著, 输电线路全过程机械化施工技术设计分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[4] 丁广鑫, 蔡敬东, 李正, 等编著, 输电线路全过程机械化施工技术装备分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

作者简介:

杨 洋(1974), 本科、高级工程师, 长期从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-06-27)

(上接第38页)

区采用经济性较好且具备制造条件的 JLHA4/G2A-1250/100 钢芯中强度铝合金绞线。

将大截面钢芯中强度铝合金铝绞线应用于特高压直流输电线路的重冰区中, 可大量降低单位电能损耗, 提高电能的利用效率, 降低输电“线损”指标, 且年费用低, 经济效益较好, 具有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.

[3] 汪秀丽. 特高压输电技术的发展[J]. 水利电力科技,

2006, 32(2): 6-16.

[4] 丁广鑫, 孙竹森, 张强, 等. 节能导线在输电线路中的应用分析[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 25-30.

[5] 中国电机工程学会城市供电专委会. DL/T 686-1999 电力网电能损耗计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[6] 黄彭, 莫娟, 万建成, 等. 架空输电线路节能导线应用技术经济分析[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 153-157.

作者简介:

易海蓉(1981), 本科, 从事高压输电线路设计工作;
王婷婷(1985), 硕士, 从事高压输电线路设计工作;
李育兵(1980), 硕士, 从事高压输电线路设计工作;
梁 明(1973), 本科, 从事高压输电线路设计工作。

(收稿日期: 2017-08-09)

山区光伏组件间距的通用简化算法

胡振兴, 彭 勇, 罗晓康

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘 要:利用平面阴影投射矩阵对任意方位角、坡度上地面布置的光伏组件间距计算方法进行了分析,无需对各种朝向的坡面分别绘制三维模型进行几何分析,可解决 PVsyst 等软件计算方式与实际施工不一致问题,可供山区光伏布置设计软件编制时参考。

关键词:山区光伏;投影矩阵;组件间距

Abstract:A method of shadow projection matrix for PV module spacing on arbitrary azimuth and slope plane is analyzed. It can solve the inconsistency between PVsyst software and the actual construction without the need of three - dimensional geometric analysis for a variety of slope respectively, and can be a reference for the layout design software of PV module in mountainous areas.

Key words:PV module in mountainous areas; shadow projection matrix; PV module spacing

中图分类号:TM615 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)05 - 0084 - 03

0 引 言

在山区光伏组件间距计算中,采用 PVsyst 等软件计算可能与实际施工情况不一致,而当采用解析几何的方法进行计算,需将山地区分为东西、南北、东南、西南等不同朝向的坡面,绘制三维图形再利用进行公式的推导,推导过程复杂冗长。实际上,利用坐标投影矩阵的变换,无需区分坡面的方位角就能进行计算。下面简述之,公式均为 Mathcad14 软件推导时形式。

1 基本坐标系及转换矩阵

建立坐标系如图 1 所示,定义 ABCD 所包括的矩形为组件,AB 长度为 L_x ,AC 长度为 L_y 。为方便计算,定义组件 A 点坐标为 $(0,0,0)$ 。由于平面旋转时,平面上点坐标和其平面法矢量在同一个坐标系内相对位置一样,故根据平面法矢量旋转矩阵,就可以求出平面上旋转后的点坐标。为方便计算,可将 A 点距地面高度设定为 0。由于山区光伏组件一般是随坡就势、投影正南布置,组件相当于绕 X 轴、Y 轴旋转移动后放置于坡面,只需要计算组件 C 对应的阴影 C'' 、 D'' 点到 AB' 直线的最大距离即是组

件最小间距。

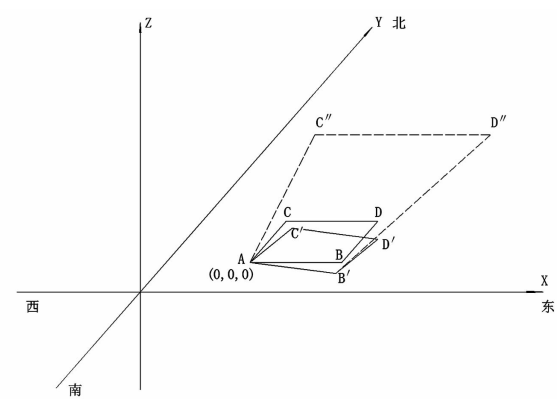


图 1 坐标系示意图

图 1 中 ABCD 为组件在水平面上布置时位置,此时组件最佳倾角为 θ 角, $AB'C'D'$ 为组件在坡面(图 1 为西南坡)上布置时位置, $AB'C''D''$ 为其在坡上阴影。

计算需利用几个坐标变换矩阵,其中方位角、高度角按习惯取值,其他基于图 1 坐标系取值。

1) 阳光方向矢量矩阵,记作 S

$$S = \begin{pmatrix} \cos(H_s) \cos(A_s) \\ -\cos(H_s) \cdot \sin(A_s) \\ \sin(H_s) \end{pmatrix} \tag{1}$$

式中: H_s 为太阳高度角; A_s 为太阳方位角,正南为 0,朝西为正。

2)对于阳光矢量 $S(S_x, S_y, S_z)$, 点坐标 (x, y, z) 在平面方程为 $D_x \cdot X + D_y \cdot Y + D_z \cdot Z + D_w = 0$ 的地面上的投影坐标如下, 转换矩阵记作 YY :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_y \cdot S_y + D_z \cdot S_z & -D_y \cdot S_x & -D_z \cdot S_x & -D_w \cdot S_x \\ -D_x \cdot S_y & D_x \cdot S_x + D_z \cdot S_z & -D_z \cdot S_y & -D_w \cdot S_y \\ -D_x \cdot S_z & -D_y \cdot S_z & D_x \cdot S_x + D_y \cdot S_y & -D_w \cdot S_z \\ 0 & 0 & 0 & D_x \cdot S_x + D_y \cdot S_y + D_z \cdot S_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = YY \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

按前面取过 A 点且平行于地面的平面为投影平面时, D_w 取为 0, 可方便计算。

3)任意方位角、坡度地面法向量
已知坡面的方位角和坡度, 则过原点的坡面法矢量为

$$\begin{pmatrix} \sin(\beta) \cos(\alpha) \\ -\sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\beta) \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中: α 为坡面的方位角, 正南为 0, 朝西为正; β 为坡的倾角, 南坡为正, 阴坡为负。

则该坡面点法式平面方程为

$$\sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot x - \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot y + \cos(\beta) \cdot z = 0 \tag{4}$$

2 组件间距的确定

山区组件随坡就势布置时, 组件摆放将受施工方式的限制。组件上 $AB'C''D''$ 坐标不能简单地通过坐标旋转矩阵求得。例如实际施工时图 2 所示的方式: 沿东西方向撒白灰定下 ab 处直线, 定桩矩形铁框尺寸一定, 下沿对齐 ab 线放置, 就确定了 a 、 b 、 c 、 d 4 个桩基点。 ga 与 hb 柱同高, 最左侧梁与 gf 直线重合, gf 对水平面倾角为组件对水平面的最佳倾角 θ 角。 gf 和 ac 直线在水平影上重合, 仅是相对水平面倾角不同。组件就放置在 gf 和 gh 两直线确定的平面上。 gf' 是平行于 ac 的直线。

将图 1 中定义为原点的 A 点与 g 点重合, B' 坐标可由式(5)代入式(4)计算求解:

$$|\overrightarrow{AB'}| = Lx; y(B') = 0 \tag{5}$$

h 点坐标可由式(6)代入式(4)计算求解:

$$|\overrightarrow{gh}| = Lab; y(h) = 0 \tag{6}$$

C' 点坐标, 可采用如下步骤:

1)先将式(7)代入式(4)求 f' 点坐标为

$$|\overrightarrow{gf'}| = Lac; |\overrightarrow{hf'}| = \sqrt{(Lab)^2 + (Lac^2)} \tag{7}$$

2)再将 f 点移动到 f' 点, 求 f' 点坐标, ghf' 平面平行于 $abcd$ 平面。由于 f 点与 f' 点在水平面上投影重合, 其坐标将变化为 $(x(f'), y(f'))$, $\sqrt{(x(f'))^2 + (y(f'))^2 \cdot \tan(\theta)}$ 。 g 、 h 、 f 3 点确定的平面法矢量即是 $\overrightarrow{gh} \times \overrightarrow{hf}$ 。

3)根据 ghf 平面法矢量可列出点法式平面方程, 即为组件所在平面方程。 C' 点在 fgh 平面上时的坐标可按式(8)代入该平面方程求解:

$$|\overrightarrow{AC'}| = Lx; |\overrightarrow{B'C'}| = \sqrt{(Lx)^2 + (Ly)^2} \tag{8}$$

C' 点坐标确定后, 其在过 A 点平行于坡面的平面上的投影坐标, 将式(1)、式(3)代入式(2)即可计算得出 C'' 坐标。此时 C'' 点到 AB' 线段的距离就是组件间距, 利用叉积的模为三角形两倍面积可简单计算如下:

$$d = \frac{|\overrightarrow{AB'} \times \overrightarrow{BC''}|}{Lx} \tag{9}$$

D' 点距 AB' 的距离求法与此类似。

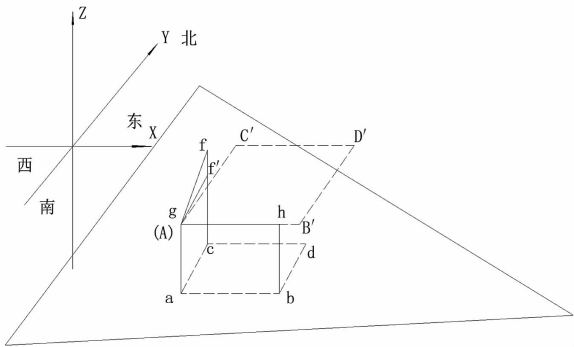


图 2 西南坡组件施工示意图

3 结 语

从所计算推导过程可见, 利用平面阴影投射矩阵可对任意方位角、坡度的山区光伏组件间距进行计算, 无需对东西、南北、东南、西南等各种不同朝向的坡面绘制几何图形并进行复杂的推导计算。也同时适用于南、北半球各种山区坡面的组件间距计算。

PV_{sys} 软件对山区光伏组件间距的计算方式, 与国内施工实际方式有一定的差距。山区地形复杂, 采用 PV_{sys} 软件对每一种坡面进行计算模拟工

作量巨大,宜自行开发软件计算,此时所提出方法可供参考。

参考文献

[1] 孔月萍,张璋,代冰辉,等. 跟踪式光伏设备的阵列排布优化设计[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(6):885-887.

[2] 何银涛,张梅,黄华. 光伏发电跟踪支架阴影数学模型

(上接第 43 页)

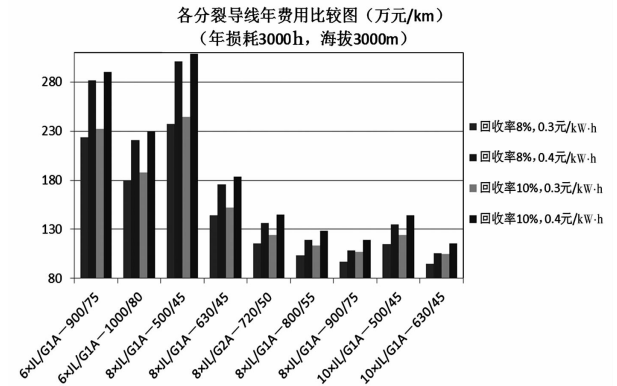


图 10 年损耗 3 000 h,海拔 3 000 m 年费用比较

可以看出,在年费用比较方面,8 分裂、10 分裂导线优势明显,其中:在海拔 1 000 m 以下,8 分裂 630 mm² 导线年费用最低;在海拔 2 000 m 时,8 分裂 720 mm² 导线年费用最低;海拔 3 000 m 时,10 分裂 630 mm² 导线年费用最低。6 分裂导线受电晕损耗影响,其年费用在各海拔中均较高。

同时 8 分裂 500 mm² 导线受电晕损耗影响,在海拔 1 000 m 以上时,其年费用均为参选导线中的最大值。

经比较计算,在不考虑电晕损耗的情况下,8 分裂 630 mm² 导线的年费用在各海拔范围内均为最低值。

4 结 论

上面对 1 000 kV 特高压交流输电线路各分裂导线组合在满足电磁环境条件下的海拔限值进行分析,其结果如下:

1)对于工作场强与临界场强的比值(E_m/E_0),10 分裂导线满足限值海拔均在 4 000 m 以上;8 分裂导线中仅 630 mm² 截面限值海拔约为 3 500 m,其余导线均在 3 500 m 海拔以上;6 分裂导线满足限值

研究[J]. 太阳能,2015(3):32-35.

作者简介:

胡振兴(1980),高级工程师,长期从事火力发电厂、新能源电站电气设计和管理工

彭 勇(1973),高级工程师,长期从事火力发电厂、新能源电站电气设计和管理工

(收稿日期:2017-06-27)

海拔最高为 3 000 m。

2)鉴于环境影响评价中已不纳入无线电干扰因子,建议无线电干扰不作为特高压导线选型控制条件。

3)可听噪声限值条件下,10 分裂导线满足要求的极限海拔均在 3 500 m 以上;8 分裂导线中仅 500 mm²、630 mm² 导线的极限海拔小于 3 000 m,但仍超过海拔 2 000 m,其余导线均超过 3 000 m;6 分裂导线最高极限海拔约为 2 200 m。

4)结合电晕损耗在不同海拔下对各分裂导线组合方案的最小年费用所产生的影响,在海拔 1 000 ~ 3 000 m 范围内,1 000 kV 特高压交流输电线路在海拔 1 500 ~ 2 000 m 时,推荐采用 8 × JL/G2A - 720/50 导线;在海拔 2 000 ~ 3 000 m 时,推荐采用 10 × JL/G1A - 630/45 导线。

参考文献

[1] GB/T 1179-2008,圆线同心绞架空导线[S].

[2] 邬雄,万保权,路遥. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术 2006,32(12):55-58.

[3] 黄春道,阮江军,文武,等. 特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术 2007,31(1):6-11.

[4] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

梁 明(1973),教授级高级工程师,长期从事输电线路设计工

朱长青(1981),高级工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计和研究工作;

谢 静(1983),高级工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计和研究工作;

戴严航(1991),工程师、工学硕士,从事架空输电线路设计工

(收稿日期:2017-08-10)

智慧电厂建设研究

钱澄浩,张 静

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:建设智慧型电厂逐渐成为了新时代的追求目标和发展趋势,但目前仍处于探索研究阶段。基于当前智慧电厂的发展现状,对智慧电厂智能感知、智能控制、智慧管控 3 层架构进行了规划和诠释,并提出了一种电厂二三维联动监控的实现方法。此外,根据国家“互联网+”智慧能源发展战略重点推行的多能流协同供应和梯级利用要求,对首次在工程中运用和实施的多能流管控系统架构进行了研究,分析和总结了工程设计特点,并对其具备的功能进行了展望。

关键词:智慧电厂;管控;联动监控;多能流

Abstract:The construction of smart power plant has gradually become the goal and trend of the new era. Based on the current development of smart power plant, the three layer architecture of smart power plant, that is, ntelligent perception, intelligent control and smart management and control, is programmed and interpreted. A method of two - dimensional and three - dimensional linkage monitoring for smart plant is proposed. Besides that, according to national development strategy of "Internet plus" for wisdom energy, coordinated supply and cascade utilization of multi - energy flow are the key points. The architecture of multi - energy flow management and control system is studied, which is firstly applied and implemented in engineering project. The characteristics of engineering design are analyzed and summarized, and the possessed functions are described.

Key words:smart power plant; management and control; linkage monitoring; multi - energy flow

中图分类号:TM62 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)05 - 0087 - 04

0 引 言

2010 年以后,随着中国“智慧中国”、“智慧城市”、“智慧园区”建设的蓬勃发展,智慧化建设逐渐从社会公共服务、市政建设向基础工业领域拓展。在“互联网+”时代发展的大背景下,云计算、大数据分析、移动互联网等优势技术不断进入人们视线,将先进科学技术与复杂电力能源系统进行有效结合,进而提升生产经营的管控力度,已成为电厂建设所追求的新兴目标,智慧电厂的概念也因此应运而生。但毕竟智慧电厂概念引入时间较短,对智慧电厂建设的构架和模式尚缺乏相应规范和标准,目前有业内人士认为智慧电厂是传统电厂建设的基础上增加一套智能系统^[1],也有的认为智慧电厂的建设应与德国“工业 4.0”理念对接^[2]。基于此,通过分析当前研究热点及各技术流派特点,规划了智慧电厂的整体架构,设想了相关功能,并对功能实施进行了阐释。

分布式能源采用清洁能源或可再生能源为用户供能,分布式能源站通常分布在集中负荷点附近,具有负荷响应迅速、能源供应直接等特点。其中,天然气分布式能源站对外输出通常存在着冷、热、电、蒸汽等多种能流形式,根据用户端对能源的不同需求,实现能源的对口供应,在实现能源效能最大化的同时,将输送环节的损耗降至最低,这符合中国现行负荷使用和调度模式,也是国家“十三五”期间能源规划的发展趋势。同燃煤电厂相比,天然气分布式能源站机组类型更小、工艺流程更简单,使其更具备智慧电厂的建设条件。近年来,针对天然气分布式能源站多能流高度耦合供应的特点,以及如何快速响应负荷需求,有学者提出了综合能源系统多能流的计算方法,并进行了相应的建模研究^[3],已具备了在工程中应用的能力。在成都某分布式能源站工程中首次落地实施多能流管控系统,这里将针对工程实施方案进行总体设计和分析,为实现分布式能源站的智慧运营提供有力的支撑。

1 智慧电厂的架构

智慧电厂的架构应用一方面仍依赖于工艺系统中基础仪控测点提供数据的准确性及控制系统的可靠性;另一方面离不开对全厂进行三维精细化的建模。在此基础上,通过大量智能设备和网络设备的应用对电厂人、机、料、环、法进行全面地管控,并能进入能源互联网实时进行分析和决策。智慧电厂的架构应包括智能感知层、智能控制层、智慧管控层,如图 1 所示。

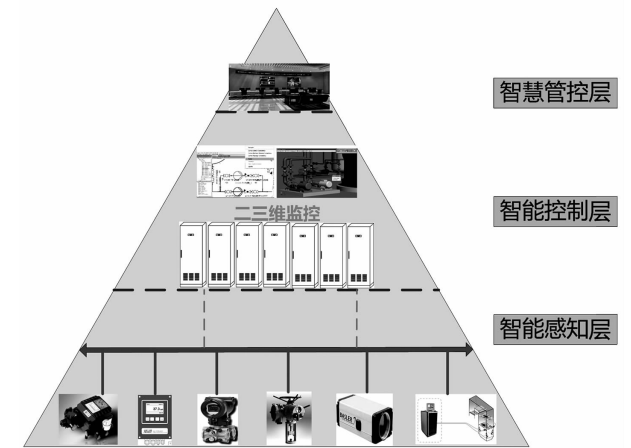


图 1 智慧电厂架构示意图

1.1 智能感知层

智能感知属于物联网范畴,是覆盖面更广、颗粒度更细、更精深的感知。对智慧电厂而言,智能感知的范畴包括生产领域和非生产领域。

对生产领域的感知,现场总线技术在目前热工自动化领域的应用已日趋成熟,除可靠性要求较高的保护系统以及实时性要求较高的控制回路外,现场总线的适用范围可包含大部分的仪控和电气设备。采用现场总线技术除能获得采集的过程信息外,还能为控制系统提供丰富的设备状态、管理和诊断信息。

而借助于数字摄像头、无线定位传感器、RFID 射频芯片等新型传感器技术,智慧电厂将数字化和智能化延伸到了电厂的非生产领域。采集的数据范围包括:实时视频信号、实时环境数据、实时安防数据、人员位置坐标、建构物数据、生产管理信息等。智能感知层的典型功能应用是实现电厂人员的定位及智能巡检,即在三维虚拟电厂中预先设定巡检路线,巡检人员可借助手机 APP 对设备二维码进行

扫码完成巡检记录。当班值长可在三维虚拟电厂中,查看全厂运维人员的行走轨迹并调出视频画面,当人员接近危险源区域会自动提醒该人员远离危险源,并在虚拟电厂中发出报警。

可看出,智能感知的目的是通过遍布全厂的智能仪控设备和传感器构建全厂物联网,可测量和感知、可识别与定位,最终形成信息、物理融合的一体化数据平台^[4]。

1.2 智能控制层

智慧电厂在控制层面,除采用已具备成熟技术的厂级分散控制系统(厂级 DCS)^[5]和机组无断点自启停控制系统(APS)。系统的智能化还体现在智能的运行优化、逼真的在线仿真、二三维联动监控等几个方面。

对建立的大数据平台运用模糊神经元等人工智能分析和自学习技术^[6],从中发掘出有价值的信息,可以使数据平台从被动数据系统变成主动表达的智能数据系统,控制系统能实现对机组运行的优化控制。例如在燃煤电厂中,每层每路燃烧器的风煤配比一直是控制系统调节的重点和难题,但综合负荷需求、燃料状态并结合炉膛内部激光传感器获得实时数据,智能控制系统能运用优化算法对风门开度、风粉浓度和煤粉细度等输出最优控制。

传统电厂仿真功能由于仿真数据与电厂实际工艺系统热力特性差异较大,因此常用于培训使用,但智慧电厂通过在线仿真系统,可接受机组的实时运行数据,能对机组运行过程进行回放,对于已通过仿真验证适用的逻辑组态,可下载至控制系统,指导优化控制。

在操作台上实现操作的二维画面和对应三维模型的联动,达到用透视的眼光,观察设备运行状态,并在需要时调出现场视频画面,已成为智慧电厂运行人员的希望。一种可行的技术解决方案为:电厂三维模型接入全厂一体化数据平台,并与生产监视系统(SIS)、全厂视频监控系统(CCTV)进行数据关联,通过数据接口将 DCS 操作指令实时传输至一体化数据平台。此外,在操作台上的双屏应分别接至 DCS 操作员站和一体化数据平台操作员站。二三维联动监控的实施方案如图 2 所示。

1.3 智慧管控层

智慧电厂管控层的根本目的是实现电厂的智能运营,主要体现在智能运维、智能诊断、智能安防、智

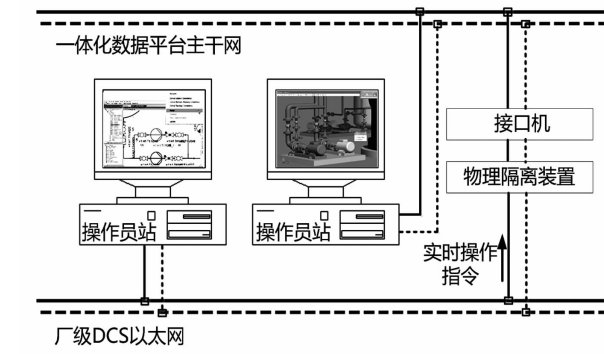


图 2 二三维联动监控示意图

能决策 4 个方面。

- 1) 智能运维: 将基于时间周期或者使用频率的传统设备检修方式, 改进为以大数据为基础, 实现以设备可靠性为中心的维护策略。通过制定基于设备健康状态的检修实施计划, 能最大限度地防止设备过修或欠修, 进而再对电厂备件库存进行优化管理。
- 2) 智能诊断: 结合专家规则推理及建立辨识模型, 辨识电厂中关键设备在稳态、变工况和异常情况下的性能, 给出控制参数调整方案。对异常数据的相关性分析, 形成卡涩、粘滞、堵塞或泄漏故障的辨识模型, 制定故障云策略库, 进而达到能辨识某台设备的某个元件出现了问题, 以及应该采取何种措施去处理。
- 3) 智能安防: 将全厂火灾报警和消防控制系统、门禁一卡通系统、电厂周界防范及电子巡更系统、安保数字视频监视系统进行整合。改变以往各系统之间功能上不关联互助、信息不共享互换的孤岛状态, 各系统之间可根据报警级别预定义多种应急预案, 依据触发条件实现如消防联动、安防联动、应急处置等功能。
- 4) 智能决策: 其一可通过对大数据的分析并结合专家系统诊断结论, 对厂内设备、系统进行状态评估、风险评估, 给出预知保养方案, 并能对设备和系统能耗进行建模分析, 找出具有节能空间的设备进行优化改造; 其二能在大数据平台上开发出机组可用性模型、发电成本模型、负荷需求预测模型等, 辅助电厂制定生产计划及报价决策, 指导电厂的经营驾驶。

2 分布式智慧能源站多能流管控

天然气分布式能源站作为最适合智慧电厂建设

条件的发电站, 其建设方向通常纳入到所在智慧园区规划中, 这使得分布式能源站需智慧感知其终端负荷需求随季节、昼夜和使用时间呈现多周期的变化规律, 因而对能源供应提出了更严格的要求^[7]。多能流管控系统正是面向智慧园区这一对象而提出的, 与电厂本身的控制系统不同, 多能流管控系统控制对象包括电厂、厂外电/热网管线、用户负荷以及储能装置等, 能通过远程在线监测供能侧运行工况及用能侧信息, 实现智能化分配调控^[8]。

2.1 多能流管控系统架构

多能流管控系统需要一套适应调度系统及用户侧需求的数据平台, 并同时满足电、热、冷、天然气、蒸汽等多能流的综合能量管理。系统网络架构可以分为上下两层, 如图 3 所示。可以看出, 整个系统的硬件包括: 应用服务器、数据库服务器、磁盘阵列、核心交换机等。多能流管控系统的上层架构, 能通过公司专网和网络两种方式获取外部数据, 根据上级公司的调度要求以及负荷侧需求, 结合对智慧能源站的综合评估, 实现多能流的能源交易、能源调度和能耗分析。

多能流管控系统与能源站的接口在系统下层网络。能源站计量系统、控制系统、电气监控系统和远动设备通过约定的通讯协议, 将数据以冗余通讯方式进行上行传送; 同时, 多能流管控系统服务器、上位机、工程师站, 能对接收的数据进行监视、存储和管理。需注意的是与能源站控制系统的接口, 上行通讯传输须经过接口机和单向隔离装置, 而下行传输则能通过 RTU 装置将系统分析的结果转为硬接线信号接至厂级 DCS 系统, 下达信号主要包括: 机组发电量、发热量、制冷量等信号, 再由能源站控制系统实现相应的运行工况。

2.2 多能流管控系统设计特点

同传统电厂相比, 分布式智慧能源站在进行多能流管控系统工程设计时, 具备以下两个特点:

- 1) 额外的测点要求
- 多能流的电网和热网系统潮流建模及解耦算法目前已有成熟技术^[8], 但模型功能的实现除获取设计和运行参数外, 还需在工艺系统上设置额外的测点。主要包括冷、热、天然气主管道及支管道首末端设置管内瞬时流量、压力、温度测点; 燃气轮机、发电机、余热锅炉、汽轮机、燃气锅炉、制冷机、蓄热罐设置工作物质进出口流量、温度、压力; 厂内主要断

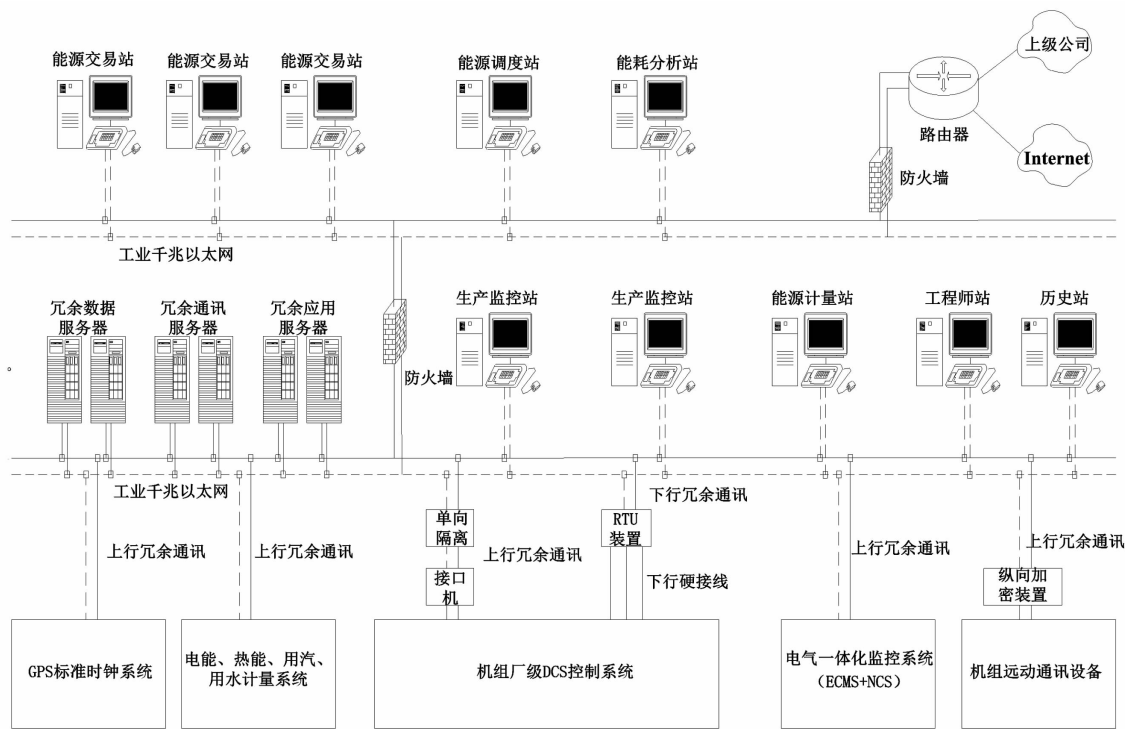


图 3 多能流管控系统网络架构示意图

路器和开关开合状态、两侧瞬时电压、电流测点。

2) 特殊的监控方式

多能流管控系统监控中心位于分布式智慧能源站内,有专用的控制室、工程师室、大屏显示墙、电子设备间及配套公共用房,虽独立于能源站集中控制中心,但相互之间又有密切的联系。成都某分布式能源站工程,在集中控制室操作台和值长台上,分别布置了 2 台多能流管控系统操作员站和值长站,同时集中控制室和多能流控制室大屏进行信号通讯,实现画面的互相调取。

2.3 多能流管控系统功能展望

多能流管控系统能在供能侧实现:

1) 多能流数据采集及监控,包括实时数据采集和处理、事件和告警处理、网络拓扑着色等,主要用于实现完整的、高性能的、稳态实时数据采集和监控功能,是后续所有预警、控制等功能的基础^[9]。

2) 多能流的状态感知是多能流管控系统的核心功能,通过对多能流的状态与量测维护、网络拓扑分析、参数辨识与估计等,能实现机组在多种运行模式下多能分配的效率评估。

3) 多能流的优化调度是智慧园区及能源互联微网的发展需求,通过协同可调控的分布式资源,实现不同能源类型的耦合互补与最优流动,达到能源使用效率的提升^[10]。同时,根据用户负荷预测的结果,利用不同类型的储能设备,能对能源站内部资源进行实时调度,达到削峰填谷的目的。

多能流管控系统为用能侧提供的优势功能在于节点能价,即通过最优潮流算法,推导多能流模型中节点电价、热价,引导园区用户对用电电热进行选择。

3 总 结

智慧电厂的建设以自动化、信息化、数字化、智能化为基础,并辅以先进的智能设备和移动互联网技术,对电厂生产能力进行分析和优化,并与社会多能流负荷需求相结合提升生产经营的智慧管控。

智慧电厂建设目标可以总结为:1)将事后处理前移到事前预警、事中控制,从而有效提高电厂运行管理和经济效益;2)通过借助于人工智能等先进算法,实现电厂的优化控制、优化调度;3)利用能源物联网实现跨行业相关信息和数据的优化利用。可以说,智慧电厂的建设将是“智慧园区、智慧城市”中必不可少的一环,其成功营运将会具有划时代的意义。

参考文献

[1] 李彦斌,陈文姣,杨静. 智慧型电厂[J]. 中国电力企业管理, 2012(5): 47-49.

[2] 田宁. 智慧电厂顶层设计的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.

(下转第 94 页)

循环流化床电厂燃料的三级筛分方案研究

冯颖,姬俊

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:循环流化床锅炉对燃煤粒度级配的要求,完全依靠燃煤筛分破碎系统,要求燃煤通过筛分破碎系统后,能够获得理想的颗粒。研究三级筛分系统可以有效控制入炉煤粒度,提高锅炉运行的稳定性和燃烧效率。

关键词:粒度级配;半开式;高幅振动筛

Abstract:The particle size gradation required by circulating fluidized bed (CFB) boiler completely depends on the coal screening and crushing system. It is necessary for coal to achieve the ideal particles through the screening and crushing system. The research on third grade screening system will control the coal particle size effectively, which will improve the stability of boiler operation and increase the combustion efficiency.

Key words:particle size gradation; semi-open system; high-amplitude vibrating screen

中图分类号:TK229.6 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)05-0091-04

0 引言

循环流化床(circulating fluidized bed)锅炉可燃用大量的劣质煤、煤矸石和煤泥等,对燃料的适应能力强,导致循环流化床电厂的来煤具有多样性、复杂性等特点;同时,循环流化床锅炉对进入炉膛的燃料粒度范围、平均粒度大小、粒度的分布却有着较严格的要求。

循环流化床锅炉需要的燃煤粒度级配,完全依靠燃煤筛分破碎系统,要求燃煤通过筛分破碎系统后能够获得理想的颗粒。受工作原理限制,燃料经目前常用的二级筛煤机和二级碎煤机后仍会存在部分超过粒度要求的物料。煤的颗粒尺寸不当,可能会破坏循环流化床内的颗粒循环,影响锅炉的正常运行。提出运煤系统在二级筛分以后增设三级筛分,将更好地解决经二级筛分破碎后,原煤粒度超标的问题。

1 入炉煤粒度级配对循环流化床锅炉的影响

循环流化床锅炉对进入的燃料颗粒具有宽筛分特性。根据不同炉型、不同煤种,循环流化床锅炉对燃料的粒度级配要求不同,一般有0~6 mm、0~8

mm、0~10 mm、0~13 mm等粒度范围要求。

循环流化床锅炉的燃烧特点是宽筛分的煤粒在适当的气流作用下,在床中一面翻腾运动,一面燃烧。循环流化床锅炉运行时的基本要求就是床料沸腾正常,床温维持稳定。为达到此要求,锅炉中不同尺寸的颗粒燃烧循环时呈一定规律的分布。粗颗粒趋向于聚集在密相区内,而细颗粒作为飞灰被气流曳带离开分离装置,经过尾部受热面离开锅炉,中间尺寸的颗粒则在固体颗粒循环回路中循环。但如果燃料的颗粒尺寸不当,则可能会破坏循环流化床内的颗粒循环,影响锅炉的正常运行,即锅炉达不到出力或影响正常的燃烧。

煤粒度超过设计值,将造成一、二次风的配比发生改变,引起排灰困难,锅炉负荷下降,燃烧效率降低,锅炉床温不稳,床压升高,导致炉内翻床的可能性增加,同时过多的大颗粒也会影响底冷器的运行。

煤粒度超过设计值时,操作人员往往被迫采用较大的运行风量来流化床层,使得床粒完全流化的流化风速提高,流化风带走的热量增加;煤粒度的增大使得气、固间的传热减弱,空气与粒子之间的温差加大,要实现床温达到点火投煤温度的要求,则必然要提高热风温度。而在循环流化床锅炉的设计中,由于采用高浓度循环物料,传热强度高,炉膛高度一般低于煤粉炉,物料浓度高、动量大,运行风量大于设计风量,减少了粒子在炉内的停留时间,不能被分

分离器分离的煤粒含碳量居高不下。一、二次风的配比发生改变。粗颗粒容易出现沉底,使得床料分层严重,易出现床层局部或整体超温结焦现象,造成燃烧效率不高,投煤量较大。这样,在过热器受热面以对流过热器为主的设计条件下,在较高负荷下就可能出现过热蒸汽超温现象。

在床内因给煤粒度过大或布风不均,流化不好而结焦时,如果不能及时处理床温分布不均匀,焦块的增大会使床内风速愈加不均,最终因流化问题导致床温下跌,被迫停炉。为使大颗粒正常流化需要提高风速,从而增加了风机的耗能并使压力波动大,引发风道振动,这也是运行中要尽量避免的工况。

因此,确保燃煤的粒度符合循环流化床锅炉燃烧要求,是保证循环流化床锅炉正常运行的重要因素之一。

2 目前燃煤筛分破碎系统存在的问题

循环流化床锅炉需要的燃煤粒度需将原煤破碎到 6 ~ 13 mm 以下,只能依靠燃煤筛分破碎系统。目前常见的筛分破碎系统常规设置多为开式二级筛分破碎系统。

开式系统是指经二级筛碎后的煤直接经下一级皮带机进入锅炉燃烧。开式系统对通过二级筛分破碎系统后仍大于循环流化床锅炉要求的物料不予处理,碎后物料粒度通过对二级碎煤机的调节进行控制,二级筛碎设施后的全部物料均进入上煤系统并送入锅炉炉膛燃烧。该系统在目前的循环流化床发电厂中最为常见。工艺流程如图 1。

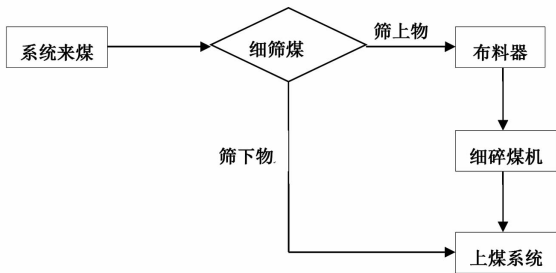


图 1 开式系统工艺流程

开式二级筛碎系统布置简单,节省投资和电耗。但是,系统即使在正常运行的情况下,也会发生二级筛煤机的筛网局部磨损,二级碎煤机的环锤(齿辊)局部磨损(不均匀磨损)的情况,从而导致开式二级筛分破碎系统的入炉煤粒度很难得到有效的保证。

从大量工程运行调研来看,二级破碎机易受来煤不稳定、给料不均匀、锤头不均匀磨损等因素的影响,其出料级配分布有两头大中间小的特点。进入二级破碎机的物料一般不能均匀地分布在整个转子的轴向上,出现中间多、两边少的情况,因而煤对锤头的冲刷也造成磨损中间多两边少。运行时间稍长后,其锤头与破碎器板之间的间隙就相差较大了,很难保证煤的粒度。当来煤不稳定时,不同煤质对锤头也会产生不均匀磨损。锤头的不均匀磨损也可能致使煤破碎后的粒度超过设计值,这是破碎机本身难以解决的。

3 三级筛分系统的方案研究

为了确保二级筛分破碎后进入锅炉的原煤粒度,提出了在运煤系统设计中增加三级筛分系统。增加三级细筛的系统设计可采用闭式循环系统和半开式系统。

1) 闭式循环系统

闭式循环系统在二级筛碎后设置了三级细筛和物料返回系统,通过第三级筛分设备对仍大于循环流化床锅炉要求的物料进行筛选,合格物料进入上煤系统并送入锅炉炉膛燃烧,不符合粒度的煤经带式输送机或斗式提升机返回二级筛(碎)煤机的入口。工艺流程如图 2 所示。

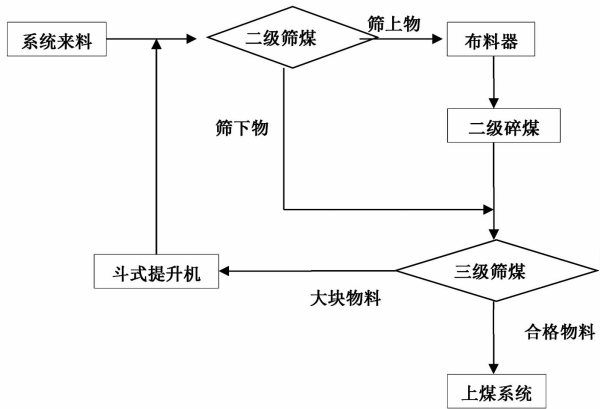


图 2 闭式循环系统工艺流程

闭式循环系统增加了三级细筛和返料循环运行,能从系统上解决煤的粒度级配要求,较好地保证入炉煤粒度。但由于增加了细碎机室的布置难度,系统设置较复杂,投资增加较大;二级筛、二级碎煤机、三级筛要重复进行循环作业,效率较低、设备出力较大,同时各设备出力确定较为困难在实际工程

设计中应用较少。

闭式循环系统曾在 300 MW CFB 白马示范电站的石灰石破碎系统中采用,由于三级细筛设备严重堵料,导致系统运行存在较多问题。

2)半开式系统

半开式系统是在二级细筛和二级破碎机之后设置第三级筛分设备,对经二级筛碎设施后仍大于循环流化床锅炉要求的物料进行筛选,合格物料进入上煤系统并送入锅炉炉膛燃烧;不合格物料排出系统之外,经人工甄别后将大石块、杂物等丢弃,煤块经装载机等设备送至煤场。

该系统能大幅减少进入锅炉的大块物料,有效提高锅炉运行的稳定性和燃烧效率,在近年设计的大型循环流化床发电厂的运用逐渐增多。

对二级筛煤机和二级碎煤机的物料都进行分选的流程如图 3 所示。

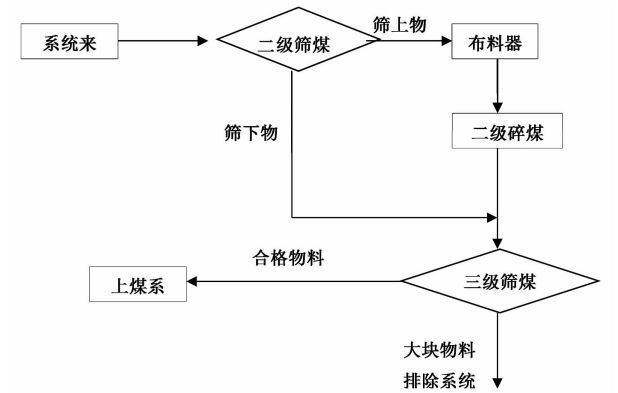


图 3 半开式系统工艺流程

半开式系统设计中,经过三级筛分两级破碎后,符合粒度要求的煤进入上煤系统并进入锅炉炉膛燃烧,仍然不符合粒度要求的煤将排出系统。

半开式系统能较为有效地控制入炉煤粒度,并对入炉煤粒度级配控制起到了积极的作用,同时避免了闭式循环系统复杂的工艺流程,节省了工程投资。

考虑到三级筛分设备故障和检修维护的实际情况,在系统设计时,可在三级筛分设备处设置旁路。

4 三级筛分设备的选型

采用二级筛煤机可以筛分去除细煤,减少进入二级破碎机的细煤量,降低煤的过破碎程度,缓解煤的粒度级配偏小的问题。采用三级筛煤机可以去除

过大粗颗粒煤,避免过大粗颗粒煤进入锅炉。

解决因水份含量高造成的细筛堵煤问题、提高筛分效率低、提高筛网寿命等,是目前细筛选型和设计存在的主要问题。由于高幅振动筛在二级细筛的成功运行,可以选择高幅振动筛作为三级细筛。

高幅振动筛是振动筛的一种,是利用振动的机械原理来实现筛分的。高幅振动筛是在传统振动筛的基础上进行循环流化床专有技术创新产生的。

高幅振动筛的筛网采用分段式,根据物料的不同可以采用多种筛网型式。最常见的为棒条式筛网,每段筛网由特钢棒条和框架组成,棒条呈纵向排列,除了整块筛网在振动以外,每根棒条也存在着活动间隙,并做二次振动和转动以消除湿黏原煤对筛网的粘结问题。

高幅振动筛筛面振动采用 15 ~ 25 mm 大振幅,低振动频率为 12 Hz。大振幅可以避免原煤粘结在筛网上,低频率可以让原煤颗粒有充分的时间透过筛网。振动强度是筛箱运动的加速度与重力加速度的比值,常规国产振动筛的振动强度在 3 ~ 4.2 之间,高幅筛的振动强度为 5 ~ 9,高振动强度有利于原煤的分层,提高筛分效率。同时每段筛面的振幅和振动强度可调,提高了对物料的适应性。

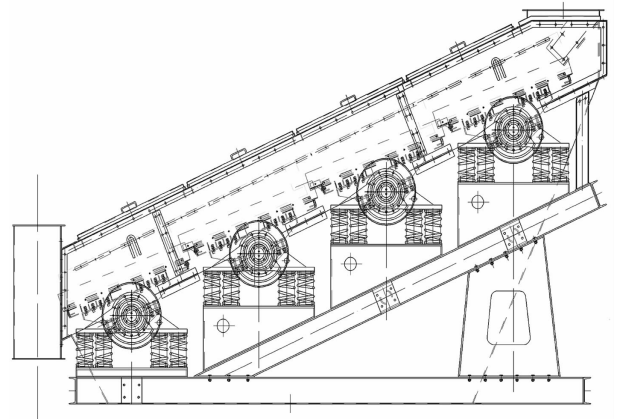


图 4 高幅振动筛

三级筛分设备在选型时,应充分保证其筛分效率、设备的出力应与系统出力一致,筛面面积与二级筛分设备相当,筛孔尺寸以不小于二级筛分设备筛孔尺寸的 2 倍为宜。

5 三级筛分系统的应用

在 600 MW CFB 白马电站采用了半开式三级筛

碎系统。

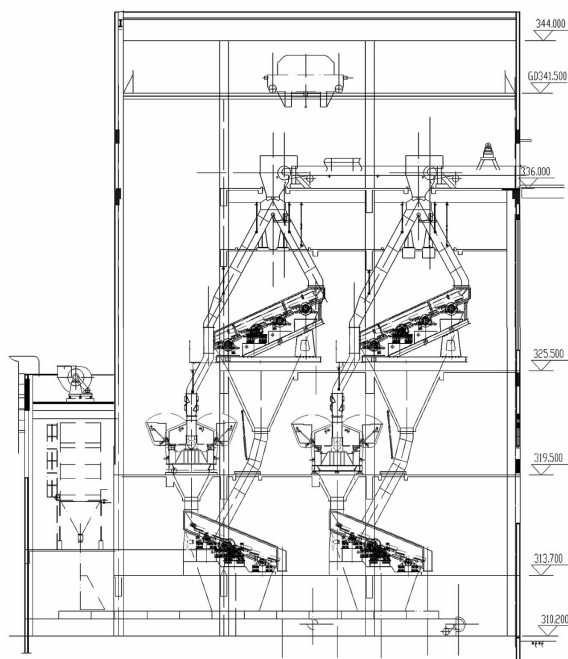


图5 600 MW CFB 白马示范电站二级碎煤机室布置图

该电站采用 GFS-2060 型高幅振动筛作为三级细筛,额定出力为 600 t/h,筛面尺寸为 2 000 mm × 6 000 mm,筛孔尺寸为 16 ~ 20 mm,筛面倾角为 20°、18°、16°,振幅为 15 ~ 25 mm。来煤经过三级筛后,仍然不符合粒度的筛上物将进入集料斗集中处理。

白马电厂 600 MW 示范机组于 2013 年 4 月正式投运,二级筛碎系统运行情况良好,未发生堵煤情况。电厂每周定期清理二级煤筛和三级煤筛表层,清理二级碎煤机室落煤管。运行至今,二级筛碎系统未出现堵煤情况。电厂安装的三级筛筛孔尺寸为 16 ~ 20 mm,三级筛抛弃的物料基本为 20 mm 以上的颗粒。由于抛弃的物料大部分仍为原煤,每天电厂用拖斗车将其拉至煤场再利用。

目前电厂平均日上煤量约 6 000 t/d。在二级碎煤机锤头更换初期,且煤质变化小、二级筛筛条正常的情况下,每天抛弃物料约 10 t,占总上煤量的 0.167%。当二级碎煤机锤头出现磨损、煤质较差、二级筛筛条局部破损等情况下,每日抛弃物料约 20 t,占总上煤量的 0.333%。

电厂锅炉对输煤系统的要求是入炉煤粒度为 8mm 以上的不超过 5%。电厂输煤运行人员每班对入炉煤进行人工取样,分析入炉煤粒度,据此调整碎煤机间隙,更换破损筛条控制入炉煤粒度。

600 MW CFB 白马机组在采用三级筛后,对入炉煤粒度级配控制起到了积极作用,特别是大颗粒部分得到了有效控制,确保了 CFB 锅炉炉内流化,床温分布较为均匀,排渣顺畅,有效减少了炉膛因局部流化不好造成的炉膛结焦。

6 结 论

燃烧低劣质煤是循环流化床锅炉的一个最大的优点。入炉煤颗粒是循环流化床锅炉一个关键问题。在工程设计中,优化的筛碎系统、正确的选择筛碎设备,使锅炉燃烧的煤粒更趋近于锅炉的设计值,从而使锅炉的燃烧达到最佳效果。采用三级筛分系统可有效地控制了入炉煤粒度,并对入炉煤粒度级配控制起到了积极的作用;但三级细筛增加了工艺系统环节,增加了检修维护工作量,具体工程是否设置三级细筛,应根据循环流化床锅炉对燃煤粒度的要求确定。

作者简介:

冯 颖(1972),大学本科、高级工程师,从事火力发电厂运煤设计。

(收稿日期:2017-06-27)

(上接第 90 页)

- [3] 赵日浩,彭克,徐丙垠,等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 253-259.
- [4] 张帆. 智慧电厂一体化大数据平台关键技术及应用分析[J]. 华电技术, 2017, 39(2): 1-3.
- [5] 郑强,张昱,程曦,等. 基于厂级 DCS 网络的火力发电厂主辅控一体化监控系统: 中国, 201320652733. 4 [P]. 2013-10-22.
- [6] 杨英. 一种基于模糊逻辑和神经网络的短期负荷预测的方法[J]. 四川电力技术, 2006, 29(4): 7-10.
- [7] 林世平. 分布式能源系统中能源与环境耦合特性及优

化集成模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

- [8] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 1-5.
- [9] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-4.
- [10] 程林,刘琛,朱守真,等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 132-136.

作者简介:

钱澄浩(1987),硕士、工程师,从事发电热工自动化设计工作。

(收稿日期:2017-06-27)