

基于矩阵特征值分析和 SOA 优化模糊聚类的 的变压器故障诊断

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

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局, 广东 河源 517000;
2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘 要:考虑变压器故障诊断的不确定性,构建了变压器模糊聚类模型,提出了用矩阵特征值分析方法得出样本集最佳分类数,实现了无监督的故障诊断。针对模糊 C 均值算法用于变压器故障诊断存在的问题,提出用人群搜索算法(SOA)得到较优的初始聚类中心。SOA 算法是一种新型的启发式智能算法,克服了粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)等智能优化算法收敛性差、局部寻优的缺陷。仿真结果表明,该算法收敛速度更快,且具有更好的全局搜索能力,比传统的智能算法具有更高的有效性和鲁棒性,为变压器故障诊断聚类分析提供了参考。

关键词:变压器故障诊断;无监督聚类;矩阵特征值分析;人群搜索算法

中图分类号:TM406 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0001-05

Transformer Fault Diagnosis Based on Matrix Eigenvalue Analysis and Optimized Fuzzy Clustering of Seeker Optimization Algorithm

Tao Feida¹, Wu Jiekang², Zeng Zhenda¹, Liang Haohao², Zou Zhiqiang¹,
Zhang Liping¹, Huang Zhipeng¹, Yang Xia¹

(1. Heyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Heyuan 517000, Guangdong, China;
2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract:A fuzzy clustering model is presented considering the uncertainty of transformer fault diagnosis, and a matrix eigenvalue analysis method is proposed to estimate the correct number of clusters which can implement the unsupervised fault diagnosis. Aiming at the problem existed in fuzzy c-means clustering algorithm which is applied to transformer fault diagnosis, seeker optimization algorithm (SOA) is introduced to obtain the optimized initial clustering center. SOA simulates human random search behavior and overcomes the defects of particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA) with local search and poor convergence. Simulation results show that SOA has a higher convergence speed and a better global searching ability. Comparing with the traditional intelligent optimization algorithms, SOA is more effective and robust, which can give a reference for transformer fault diagnosis.

Key words:transformer fault diagnosis; unsupervised clustering; matrix eigenvalue analysis; seeker optimization algorithm

0 引 言

油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)利用在线监测数据对油浸式电力变压器进行故障诊断和状态评估,将定性的评估转变成具体量化的数据,是一种较为成熟的评估体系。目前应用

最为广泛的油色谱分析方法是 IEC 三比值法^[1],但是该方法的故障编码固化,忽略边界效应,使得诊断的准确性受到限制^[2]。近年来,随着机器学习和人工智能算法的发展,人工神经网络^[3]、模糊数学^[4]、粗糙集理论^[5]、云理论^[6]、核函数^[7]以及支持向量机^[8]等计算机方法被应用到变压器状态评估和故障诊断中。文献[3]充分利用 BP 神经网络处理非线性样本的能力,并与 FPN 网络结构相结合,在模糊推理的基础上,得出较好的故障诊断效果。文献

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

[4]考虑故障的随机性和模糊性,利用模糊数学理论,建立了多种指标的隶属函数。文献[6]建立了变压器评估的正态云模型,通过期望、熵和超熵描述状态的不确定性,有效地实现了定性和定量之间地转换。文献[7]通过核函数将故障样本的特征转换为高维度的空间向量,放大了故障的有用特征,使聚类分析的准确性得到提高。

基于油中气体分析的 IEC 三比值法因其自身的特点,目前仍然有很高的实用价值。这里采用模糊聚类算法,将三比值法的编码模糊化,使故障特征值根据其数据特征自行分类,有效地克服了三比值法编码固化等问题。为了防止先验知识对故障分类数造成的误差,利用相关矩阵的定义和圆盘定理进行特征值分析,得到最佳分类数。采用人群搜索算法对初始参数进行优化,有效地避免了早熟现象,并提高了聚类的有效性和鲁棒性。

1 模糊聚类理论

聚类分析是一种无监督学习的多元统计分析方法,目的是客观地划分样本的类别,使得具有类似特征的样本划分到同一类,而具有不同特征的样本划分到不同类^[9]。模糊聚类在聚类分析的基础上引入了隶属度的概念,用来描述样本对类别的模糊性。模糊 c 均值算法(fuzzy c - means, FCM)是一种基于目标函数的聚类算法,分类数需要事先给出,然后通过聚类中心和隶属度的迭代得出样本的最优分类^[10]。由于其算法原理清晰且收敛速度较快,FCM 算法广泛应用于各个领域。

对于 n 个不同的样本 $\mathbf{X} = \{x_i\}$,根据先验知识得出最佳分类数为 c ,FCM 算法通过计算类内加权误差平方和作为目标函数^[11]:

$$\left\{ \begin{aligned} J(\mathbf{U}, \mathbf{V}) &= \min \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m (d_{ij})^2 \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^c u_{ij} &= 1, u_{ij} \in [0, 1] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为隶属度矩阵; u_{ij} 为模糊隶属度; $\mathbf{V}$ 为聚类中心矩阵; m 为模糊控制指数,一般取 1.5 ~ 2.5,数值越小,模糊程度越低; d_{ij} 为聚类中心的欧式距离。

为了求取目标函数的极值,FCM 算法利用拉格朗日乘子法计算得到隶属度和聚类中心的迭代公式分别为

$$u_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{d_{ij}^2}\right)^{\frac{1}{c-m-1}}}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{1}{d_{kj}^2}\right)^{\frac{1}{c-m-1}}} \quad (2)$$

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m X_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad (3)$$

FCM 算法的基本步骤如下^[12]:

1) 设定样本初始参数,包括分类数 c 、模糊控制指数 m 以及迭代终止阈值 ε 和迭代终止最大次数 T ;

2) 确定初始的聚类中心 $\mathbf{V}$,并用公式(2)计算得到初始隶属度 $\mathbf{U}$;

3) 利用式(1)计算目标函数值,如小于给定阈值 ε 则算法结束,否则利用式(3)和式(2)再次迭代,直到达到迭代终止条件。

从 FCM 的实现步骤可以看出,FCM 的聚类结果严重依赖于分类数 c ,其值过大或者过小都将使聚类结果产生很大误差;FCM 的初始聚类中心是随机确定的,最佳聚类中心会随之发生变化,这就给聚类分析带来了不确定性^[13];FCM 采用欧氏距离方法聚类,每个样本都是等趋势划分,样本中的噪声也根据其聚类赋隶属度,这显然是不合理的。下面基于以上分析,对 FCM 算法进行了优化。

2 矩阵特征值分析

在变压器故障诊断中,故障的类别一般是根据专家经验来进行估计。这种方法缺乏客观的理论支撑,难以得出最佳的分类结果。随着大数据时代的来临,通过聚类有效性评估确定最佳分类数成为了研究的热点^[14]。在文献[15]中,证明了可能性划分系数能有效地判定聚类的有效性,当可能性系数取得最大值时,聚类效果为最佳。文献[16]将聚类隶属度与样本的几何分布结合起来,依据类内紧密、类间分离的原则进行聚类有效性分析。文献[17]提出指标不受数据集形状的约束,利用离散距离来评估聚类效果。但是这些指标都必须经过反复迭代,遍历所有可能的分类数,才能确定最佳聚类结果,因此极其耗费时间,导致现有的评价标准无法应用在大多数工程项目中。文献[18]提出了基于矩阵特征值分析的有效性指标,克服了其他有效性指标的

低效性,而且得到最优分类的正确率不会降低。变压器的故障分析属于多维度、分类数不确定的复杂聚类分析,鉴于矩阵特征值分析的独特优势,故采取该方法得出最佳的聚类数。

根据相关矩阵^[18]的定义及其特征值可知,特征根的大小反映了同一类样本的相似程度。根据 Gerchgorin 圆盘定理^[19],如果实际的最佳分类数是 c 个,则其 L 个特征值出现的情况为

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \lambda_c \geq \lambda_{c+1} \approx \cdots \approx \lambda_L \quad (4)$$

式中, λ_1 到 λ_c 是 c 个相对较大的特征根。

最优的分类数由于其特征根的不同,可以得到明显不同的圆盘。按照圆盘定理,可以定义指标的最优分类数如下,即:

$$\text{GDE}(c) = \lambda_c - \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} \lambda_i \quad (5)$$

式中, c 是在闭集合 $[1, L-1]$ 内可能取得的分类数,当第 1 个非负的 $\text{GDE}(c)$ 值出现时所对应的 c ,即为最优的分类数。

3 聚类模型的参数优化

在 FCM 中,聚类的有效性对初始聚类中心有很大的依赖性。为了得到最优结果,可以选定不同的初始聚类中心启动该算法,通过比较不同的聚类结果,得出最优解。文献[20]利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),对数据集进行全局搜索,能够弥补 FCM 对初始聚类中心敏感的缺陷,但是易出现早熟现象,以致于不能全局寻优。文献[21]提出用改进的遗传算法(genetic algorithm, GA)来自动选取保持全局特性的聚类中心点,再利用欧式距离的判别方法进行其他点的判断。文献[22]将粒子群算法和遗传算法结合起来,充分利用 GA 的随机搜索能力和 PSO 的局部细致搜索能力。另外,还有一些智能算法及其混合算法应用在变压器故障诊断中。虽然在一定程度上改善了聚类的结果,但是当面对复杂多维优化问题时,由于其目标函数存在着数目众多的局部极值,导致聚类时很容易发生早熟和收敛速度慢等现象。

所采用的人群搜索算法(seeker optimization algorithm, SOA),是一种新型的智能搜索算法^[23],具有更好的鲁棒性与较快的收敛性,算法的求解过程避免了早熟现象的发生,对于工程领域的复杂优化

问题具有收敛精度高等特点。

3.1 人群搜索算法

SOA 算法根据人的思维过程,在解空间对函数进行寻优^[23]。在优化过程中,其搜寻过程可理解为在可能的解空间里,最优解的位置趋向于较优解的附近。因此,在较优的位置应该进行细致的搜索,而对于较差的位置,应该再扩大搜索范围^[24]。

3.1.1 搜索步长

SOA 算法用模糊系统逼近来表征搜索的不确定性,建立目标函数和步长之间的联系。搜索步长模糊变量表示如式(6)。

$$u_A(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}} \quad (6)$$

式中: x 为输入样本; u_A 为隶属度; δ, μ 为隶属函数参数。

隶属度与函数值排列顺序成正比,如式(7)所示。

$$u_{ij} = \text{rand}(u_i, 1) \quad (j = 1, 2, \cdots D) \quad (7)$$

式中: D 为搜索空间的维度; u_{ij} 为 j 维搜索空间第 i 个特征量的隶属度;函数 rand 表征了搜索的随机性。

搜索步长定义为

$$\alpha_{ij} = \delta_{ij} \sqrt{-\ln(u_{ij})} \quad (8)$$

式中: α_{ij} 为第 j 维的搜索步长; δ_{ij} 为高斯隶属函数参数,其值由式(9)和式(10)确定。

$$\vec{\delta}_{ij} = \omega |\vec{x}_{\min} - \vec{x}_{\max}| \quad (9)$$

$$\omega = \frac{(t_{\max} - t)}{t_{\max}} \quad (10)$$

式中: $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 为最小和最大目标函数的位置; ω 为权值; t 和 $t_{\max}$ 为当前的迭代次数和最大迭代次数。

3.1.2 搜索方向

通过人的行为分析得到第 i 个位置的利己方向、利他方向以及预动方向,如式(11)至式(13)所示。

$$\vec{d}_{i,\text{ego}}(t) = \vec{p}_{i,\text{best}}(t) - \vec{x}_i(t) \quad (11)$$

$$\vec{d}_{i,\text{alt}}(t) = \vec{g}_{i,\text{best}} - \vec{x}_i(t) \quad (12)$$

$$\vec{d}_{i,\text{pro}}(t) = \vec{x}_i(t_1) - \vec{x}_i(t_2) \quad (13)$$

式(11)至式(13)中: $\vec{x}_i(t_1)$ 和 $\vec{x}_i(t_2)$ 分别为 $\vec{x}_i(t-1)$ 和 $\vec{x}_i(t-2)$ 中的最佳位置; $\vec{g}_{i,\text{best}}$ 为历史最佳位置; $\vec{p}_{i,\text{best}}$ 为目前的最佳位置。

通过几何平均来确定最终搜索方向,如式(14)。

$$\vec{d}_{ij}(t) = \text{sign}(\omega \vec{d}_{ij,\text{pro}} + \varphi_1 \vec{d}_{ij,\text{ego}} + \varphi_2 \vec{d}_{ij,\text{alt}}) \quad (14)$$

式中: φ_1 和 φ_2 为 $[0, 1]$ 内的常数; ω 是惯性权重。

3.1.3 人群搜索算法的实现

步骤1:基本参数设置。根据实际问题,设置搜寻速度、进化代数及种群规模。

步骤2:随机设置人群搜索的开始位置。

步骤3:初始化目标函数值,并得出最优值。

步骤4:确定搜寻策略。确定步长和方向。

步骤5:位置更新。更新公式为

$$\Delta x_{ij}(t+1) = \alpha_{ij}(t) d_{ij}(t) \tag{15}$$
$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \Delta x_{ij}(t+1) \tag{16}$$

步骤6:完成一次迭代, $t = t + 1$ 。

步骤7:若达到终止条件,则认定为最佳位置,否则,转至步骤3 继续迭代。

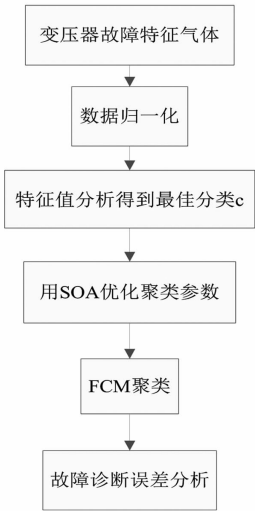


图1 变压器故障诊断模型结构

4 建模过程

表1 变压器故障样本

4.1 变压器特征量的选取

变压器油中溶解气体包含了运行设备的故障信息,并且测量技术比较完善,是一种成熟有效的状态评估指标^[25]。

如果变压器内部发生故障,温度会显著升高,进而加速绝缘材料分解^[26]。当电力变压器发生不同类型的故障时,其产生的特征气体含量会有所不同,但发生相同故障时产生的特征气体会有一种相似性。利用变压器故障特征气体的聚集效应可以生成聚类中心,并通过其分布情况给出隶属度,从而实现故障的分类。

故障类型	训练集	测试集
无故障	15	4
低能放电	15	9
高能放电	15	6
低温过热	15	5
中温过热	15	8
高温过热	15	8
总计	80	40

从收集的数据集可以看出,原始数据具有不同的数量级,为了使较小数量级的数据不被忽略,有必要对数据进行归一化处理。

4.2 建模流程

对电力变压器故障样本进行矩阵特征值分析,求取相关矩阵及其特征值,得出最优分类数。同时为提高故障诊断精度,对 FCM 算法的初始聚类中心用 SOA 进行优化。建模流程如图 1 所示。

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^5 a_{ik}} \tag{17}$$

式中: a_{ij} 为实际的第 i 个样本中的第 j 个特征分量的值; a'_{ij} 为 a_{ij} 归一化后的值。

SOA 优化算法的初始参数设定为:进化代数为 100,种群规模为 20,算法的最大隶属度 $U_{\max} = 0.95$,最小隶属度 $U_{\min} = 0.01$,权重最大值 $\omega_{\max} = 0.9$,权重最小值 $\omega_{\min} = 0.1$,模糊控制系数 $m = 2$ 。将训练样本中的数据利用 SOA 算法计算后得出各故障的最优聚类中心,如表 2 所示。适应度曲线如图 2 所示。

5 算例分析

表2 SOA 最优聚类中心

收集了 230 组故障明确的变压器故障数据,挑选其中 80 组作为训练聚类中心,用文献[27]给出的 40 组作为测试数据。为了得到更好的聚类中心,训练集各故障状态均匀分布,具体个数如表 1 所示。

对所收集的故障样本求取相关矩阵和特征值,进行矩阵特征值分析,第 1 个非负的 GDE(c)值出现的时候, c 的值为 6,故最优的分类数为 6 类,与实际情况相符。

故障类型	气体含量				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
低温过热	0.380 6	0.274 4	0.113 2	0.218 2	0.013 6
中温过热	0.066 2	0.411 2	0.194 7	0.325 3	0.002 6
高温过热	0.148 2	0.211 9	0.104 5	0.521 1	0.014 3
低能放电	0.838 3	0.078 0	0.053 7	0.021 9	0.008 2
高能放电	0.553 0	0.130 6	0.032 9	0.126 3	0.157 1
无故障	0.319 7	0.152 4	0.318 7	0.195 1	0.014 1

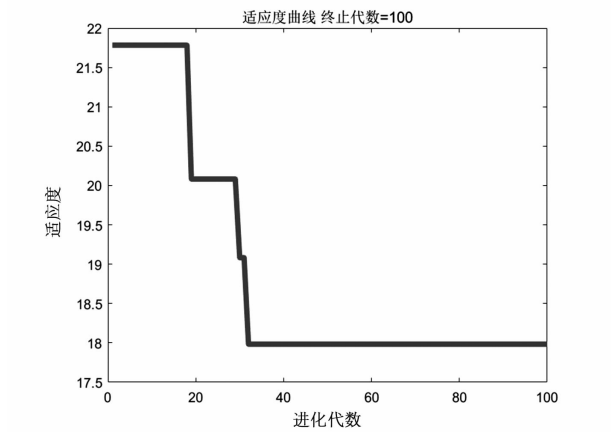


图 2 SOA 适应度曲线

测试集中的数据对应的故障类型如下:1—5 为低温过热,6—13 为中温过热,14—21 为高温过热,22—30 为低能放电,31—36 为高能放电,37—40 为正常。

文献[27]利用 PSO 算法进行优化,得出聚类中心如表 3 所示,测试结果除了 35 无法确定结果,38 得出错误结果外,其他的全部正确,正确率达到 95%。而利用所提出的 SOA 进行优化,得出的结果除了 2 号错误,其他的全部正确,正确率为 97.5%,高于改进的 PSO 算法,这是由于 SOA 算法对于数据的全局搜索能力要强于 PSO 算法,并能够有效地避免陷入局部最优值,从而得出更优的聚类中心。两种方法得出的部分最高隶属度如表 4 所示。

表 3 PSO 最优聚类中心

故障 类型	气体含量				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
低温过热	0.382 9	0.236 0	0.135 6	0.243 5	0.002 0
中温过热	0.124 3	0.264 0	0.212 0	0.393 0	0.000 4
高温过热	0.151 4	0.159 1	0.123 0	0.561 5	0.004 8
低能放电	0.854 6	0.068 1	0.053 4	0.031 0	0.006 5
高能放电	0.361 8	0.135 0	0.053 2	0.114 5	0.335 3
无故障	0.401 8	0.241 8	0.122 8	0.121 9	0.111 8

从两种方法的隶属度矩阵和表 4 所列部分结果可以看出,所用方法在保证正确率的情况下,聚类效果有了显著提高,这是因为 SOA 算法充分考虑了搜索的随机性和模糊性,在全局性和局部性搜索性能上均优于传统的 PSO 算法。

6 结 语

对变压器状态检修过程中状态分类和故障诊断优化进行了研究,得出如下结论:

表 4 两种方法故障诊断结果对比

故障序号	改进 PSO	所提算法
1	0.573 9	0.790 4
6	0.563 2	0.792 4
8	0.555 0	0.716 1
10	0.772 0	0.976 3
12	0.693 4	0.953 7
15	0.589 6	0.771 9
18	0.682 3	0.955 6
20	0.705 1	0.879 5
22	0.797 0	0.977 8
25	0.758 8	0.996 7
26	0.685 7	0.980 0
28	0.563 2	0.847 5
31	0.544 0	0.739 7
33	0.614 2	0.733 8
34	0.524 5	0.855 6

1)提出了用圆盘定理和矩阵特征值分析确定状态的最优分类数,克服了主观因素的影响,极大地提高了故障诊断的稳定性;

2)通过模糊聚类理论,将变压器状态边界模糊化,反映了故障诊断的不确定性;

3)针对模糊聚类对初始值敏感的问题,提出用 SOA 算法进行优化,建立了 SOA - FCM 模型,改善了聚类的效果,提高了故障诊断的准确性。

通过仿真实验,验证了所提方法的有效性。

参考文献

[1] 杨廷方,刘沛,李景禄,等. FCM 结合 IEC 三比值法诊断变压器故障[J]. 高电压技术, 2007, 33(8):66 - 71.

[2] 许惠君,王宗耀,苏浩益. 基于 DGA 的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23):115 - 119.

[3] 公茂法,张言攀,柳岩妮,等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3):113 - 117.

[4] 廖瑞金,王谦,骆思佳,等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3):70 - 75.

[5] 张晶晶,许修乐,丁明,等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3):75 - 81.

[6] 张德议,廖瑞金,杨丽君,等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5):13 - 20.

(下转第 24 页)

基于虚拟阻抗的改进型微电网下垂控制策略

刘树伟¹, 姚秀萍², 王海云¹, 张海宁³, 张宇宁⁴

(1. 新疆大学电气工程学院教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 国网承德供电公司, 河北 承德 067000; 4. 渤海大学, 辽宁 锦州 121001)

摘要:通过对传统下垂控制算法的有功、无功分析,引入虚拟电感的电压电流双环控制策略,虚拟电感使逆变器等效输出阻抗成感性,从而通过调节感抗匹配程度提供功率均衡效果;提出一种多逆变器并联运行的改进型下垂控制算法,通过改进型下垂控制参数设置,减弱了阻抗对环流的影响。实验仿真结果表明,改进型多逆变器并联的微电网下垂控制算法提高了多逆变器的并联运行性能,有效地减小了多逆变器并联运行的环流问题,大大提高了多逆变器并联运行的无功均衡效果。

关键词:微电网;感性虚拟阻抗;改进下垂控制法

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0006-06

Improved Droop Control Strategy of Micro-grid Based on Virtual Impedance

Liu Shuwei¹, Yao Xiuping², Wang Haiyun¹, Zhang Haining³, Zhang Yuning⁴

(1. Renewable Energy Generation and Grid Control Engineering Technology Research Center of Ministry of Education, School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. State Grid Chengde Electric Power Supply Company, Chengde 067000, Hebei, China; 4. Bohai University, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract:For multi-inverter parallel operation in micro-grid, the output impedance of inverters and the line impedance between the inverters and point of common coupling are always different, which can result in big circulating current and lower precision of power sharing among inverters. Through the analysis of active and reactive power of traditional droop control algorithm, the voltage and current double-loop control strategy is introduced. An improved droop control algorithm is proposed for multi-inverter parallel operation, and the influence of impedance on the circulation is weakened by the droop control parameters setting. The simulation results show that the improved droop control algorithm can improve the performance of multi-inverter parallel operation, effectively reduce the circulating current problem of multi-inverter parallel operation, and also greatly improve the reactive power balance effect of multi-inverter parallel operation.

Key words:micro-grid; inductive virtual impedance; improved droop control strategy

0 引言

微电网作为分布式发电单元接入电网的一种有效手段,逐渐引起了广泛关注^[1]。在高渗透率下多

基金项目:自治区重点实验室项目(2016D03021);国家863计划项目(2013AA050604);教育部创新团队项目(IRT1285)

微电网配电网管理系统中,微电网主要包括:分布式发电(distributed generation, DG)类型的微型发电设备(例如微型燃气轮机、燃料电池、风机、光伏阵列)、储能设备(例如飞轮、储能电容和电池)和可控(柔性)负荷设备(例如电动汽车)。这些具有可控能力的设备允许连接到上级高压配电网并网运行,当大电网出现故障或其他外部扰动或自然灾害时可以脱离主网

实现孤岛独立运行,从而提高供电质量^[2-4]。

目前常用的微电网逆变器的控制策略主要有 3 种:恒功率控制(P/Q)策略、电压/频率控制(V/f)策略、下垂控制(Droop)策略。由于下垂控制无需电源间的通信即可实现对微电网的协调控制^[5-7],从而得到广泛运用。在微电网多逆变器并联系统中,逆变器到公共并网点的长短不一致,传统的下垂控制策略都不同程度地降低了母线电压,系统的传输阻抗不平衡以及功率下垂控制特性也影响功率分配的精度。为了解决并联系统逆变器无功分配及环流的问题,文献[8]提出了一种孤岛型微电网中基于虚拟阻抗的电压、频率和无功功率微调的逆变器并联控制策略。文献[9-12]提出了虚拟阻抗的改进下垂控制策略。现有虚拟阻抗法总是加大了母线压降以及系统等效输出阻抗^[13],以上虚拟阻抗控制策略虽不同程度地改善系统无功的均分问题,但未同时有效抑制系统环流问题。

为有效抑制环流及改善系统无功的均分问题,下面对传统下垂控制的功率分配进行了分析,引入感性虚拟阻抗的多逆变器的控制策略,由滤波电阻值决定其输出阻抗,进而决定其功率输出。通过考虑线路阻抗对传统下垂控制算法的影响,得到电阻与下垂系数的关系,提出一种改进型下垂控制算法。并通过实验仿真验证了所提方法的有效性。

1 传统下垂控制方法分析

以 3 台逆变器并联为例,图 1 为使用 3 个电压源逆变器的 3 个分布式电源微电网结构图,其中 L 、 C 分别是对逆变器的输出起滤波作用的滤波电感和滤波电容; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 3 个分布式直流电源的等效逆变器输出电阻和线路电阻之和; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 3 个分布式电源的等效逆变器输出电抗和线路电抗之和; K_1 、 K_2 、 K_3 为逆变器的输出继电器。

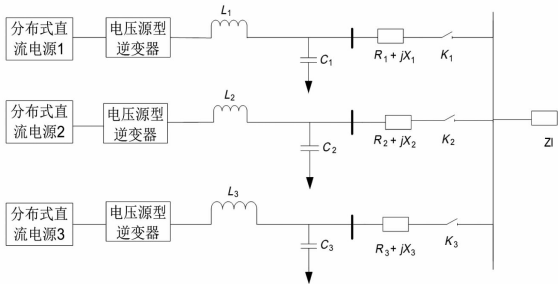


图 1 含有 3 个分布式电源的微电网结构

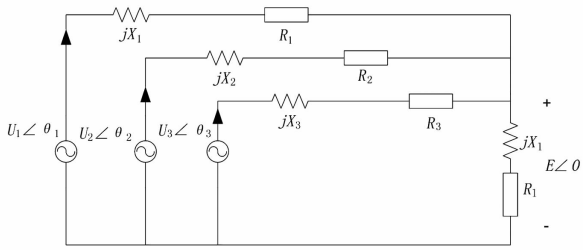


图 2 与图 1 相应的原理

$U_1 \angle \theta_1$ 、 $U_2 \angle \theta_2$ 和 $U_3 \angle \theta_3$ 分别为 3 个分布式电源逆变器的空载输出电压; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为各空载输出电压与母线电压的相角差。由图 2 可得逆变器 i ($i = 1, 2, 3$) 输出的有功功率和无功功率分别为

$$P_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \cos \phi_i + EU_i \sin \theta_i \sin \phi_i] \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \sin \phi_i - EU_i \sin \theta_i \cos \phi_i] \quad (2)$$

式中: $|Z_i|$ 为第 i 个逆变器的阻抗幅值, $|Z_i| = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$; U_i 为第 i 个逆变器的空载输出电压幅值; θ_i 为第 i 个逆变器的空载输出电压与母线的相角差; ϕ_i 为阻抗角。

$$\phi_i = \arctan \frac{R_i}{X_i} \quad (3)$$

在高压系统中,传统下垂控制策略应用于系统等效输出阻抗为感性的系统,即满足 $X_i \gg R_i$,此时可忽略逆变器的输出电阻和线路电阻之和 R_i ,简化得到

$$P_i = \frac{EU_i \sin \theta_i}{X_i} \quad (4)$$

$$Q_i = \frac{U_i (U_i - E \cos \theta_i)}{X_i} \quad (5)$$

实际中相角 θ_i 很小,可近似得到 $\sin \theta_i = \theta_i$, $\cos \theta_i \approx 1$,式(4)和式(5)可分别简化为

$$P_i = \frac{EU_i}{X_i} \theta_i \quad (6)$$

$$Q_i \cong \frac{U_i (U_i - E)}{X_i} \quad (7)$$

由此可知,逆变器输出的有功功率主要受逆变器的空载输出电压与母线的相角差影响,逆变器输出的无功功率主要受逆变器的空载输出电压幅值影响。由于实际工程中逆变器的空载输出电压与母线的相角差很难检测到,因此一般由频率代替相角实现控制,可得 P/f 下垂控制方程表达式^[14]:

$$\begin{cases} f_i = f_{0i} - m_i (P_i - P_{0i}) \\ U_i = U_{0i} - n_i (Q_i - Q_{0i}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: f_i 、 U_i 分别为逆变器输出频率、电压; f_{0i} 、 U_{0i} 分别为逆变器的额定频率、额定电压; m_i 、 n_i 分别为逆变器的有功/频率 (P/f)、无功/电压 (Q/U) 下垂控制系数; P_i 、 Q_i 分别为逆变器的有功功率和无功功率; P_{0i} 、 Q_{0i} 分别为逆变器的额定有功功率、额定无功功率。

而在实际的低压微电网中, 线路阻抗主要呈阻性^[15], 即满足 $R_i \gg X_i$, 此时可忽略逆变器的输出感抗和线路感抗之和 X_i , 简化可得:

$$P_i = \frac{U_i (U_i - E \cos \theta_i)}{R_i} \quad (9)$$

$$Q_i = -\frac{EU_i \sin \theta_i}{R_i} \quad (10)$$

实际中相角 θ_i 很小, 可近似得到 $\sin \theta_i = \theta_i$, $\cos \theta_i \approx 1$, 进一步简化为

$$P_i = \frac{U_i (U_i - E)}{R_i} \quad (11)$$

$$Q_i \approx -\frac{EU_i \theta_i}{R_i} \quad (12)$$

由此可知, 逆变器输出的有功功率主要受逆变器的空载输出电压幅值影响, 逆变器输出的无功功率主要受逆变器的空载输出电压与母线的相角差影响。由于实际工程中逆变器的空载输出电压与母线的相角差很难检测到, 因此一般由频率代替相角实现控制, 可得到 P/V 下垂控制方程表达式:

$$\begin{cases} f_i = f_{0i} - u_i (Q_i - Q_{0i}) \\ U_i = U_{0i} - v_i (P_i - P_{0i}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, u 、 v 为下垂控制系数。

由以上高、低压线路阻抗的特性分析可知, 逆变器输出的有功、无功功率偏离额定有功、无功功率时, 电压与频率值较额定值也有一定的偏移, 因此上述 P/f 与 P/V 下垂控制均为有差调节。

1.1 无功功率分配

这里分析传统下垂控制的功率分配是基于阻性线路。

根据式(13), 当3台逆变器的频率相等 ($f_1 = f_2 = f_3$), 系统达到稳定时, 只需使下垂系数与其额定功率成反比, 即满足

$$f_{01} = f_{02} = f_{03} \quad (14)$$

$$u_1 Q_{01} = u_2 Q_{02} = u_3 Q_{03} \quad (15)$$

则可使逆变器的无功功率按照额定功率平均分配, 即

$$u_1 Q_1 = u_2 Q_2 = u_3 Q_3 \quad (16)$$

当无功功率在实现均分时, 则

$$u_1 \frac{EU_1}{R_1} \theta_1 = u_2 \frac{EU_2}{R_2} \theta_2 = u_3 \frac{EU_3}{R_3} \theta_3 \quad (17)$$

若 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$, $U_1 = U_2 = U_3$, 则有式(18)成立:

$$\frac{u_1}{R_1} = \frac{u_2}{R_2} = \frac{u_3}{R_3} \quad (18)$$

1.2 有功功率分配

由式(13)可知, 要保证有功功率的平均分配, 应满足

$$U_{01} = U_{02} = U_{03} \quad (19)$$

$$v_1 P_{01} = v_2 P_{02} = v_3 P_{03} \quad (20)$$

而使 $v_1 P_1 = v_2 P_2 = v_3 P_3$ 成立的条件是 $U_1 = U_2 = U_3$ 。这时, 逆变器之间的电压差为

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i = v_{i+1} P_{i+1} - v_i P_i \quad (21)$$

将公式(7)代入式(13)得

$$P_i = \frac{EU_{0i} - E^2}{R_i + v_i E} \quad (22)$$

将式(22)代入公式(21)得

$$\Delta U = \frac{U_{0i} - E}{1 + \frac{R_{i+1}}{EV_{i+1}}} - \frac{U_{0i} - E}{1 + \frac{R_i}{EV_i}} \quad (23)$$

由以上公式可知, 当 $\frac{R_1}{v_1} = \frac{R_2}{v_2} = \frac{R_3}{v_3}$, 逆变器的无功功率将按额定容量平均分配。

综上所述, 基于传统下垂控制的逆变器的有功与无功功率均分的条件应满足:

$$\begin{cases} u_1 Q_{01} = u_2 Q_{02} = u_3 Q_{03} \\ v_1 P_{01} = v_2 P_{02} = v_3 P_{03} \\ f_{01} = f_{02} = f_{03} \\ U_{01} = U_{02} = U_{03} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = U_3 \\ \frac{R_1}{v_1} = \frac{R_2}{v_2} = \frac{R_3}{v_3} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \\ \frac{R_1}{u_1} = \frac{R_2}{u_2} = \frac{R_3}{u_3} \end{cases} \quad (25)$$

2 逆变器的控制策略及输出阻抗设计

2.1 虚拟阻抗法

实现逆变器输出功率均分及抑制系统环流, 均是通过虚拟阻抗对分布式发电单元之间的差异调节

• 9 •

然相对较小,但是仍然存在,系统能否并联成功, X_i 、 R_i 这两参数至关重要。 $k_{\text{qf}}、k_{\text{pU}}$ 可提高功率均分精度,减小系统环流。首先应考虑下垂系数 $k_{\text{pf}}、k_{\text{qU}}$ 对功率的影响,再根据有功、无功公式并考虑 R_i 确定 $k_{\text{qf}}、k_{\text{pU}}$,从而对传统下垂控制算法进行改进。

考虑到 $k_{\text{pf}}、k_{\text{qU}}$ 对功率均分的影响,可得:

$$k_{\text{pf}} = \frac{\Delta f}{P_{\text{MAX}}} \tag{36}$$

$$k_{\text{qU}} = \frac{\Delta U}{Q_{\text{MAX}}} \tag{37}$$

式中: Δf 、 ΔU 分别为逆变器输出电压最大频率偏差和幅值偏差; $P_{\text{MAX}}、Q_{\text{MAX}}$ 分别为输出最大有功、无功功率值。

根据上述分析,有功功率表达为

$$P_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \cos \phi_i + EU_i \sin \theta_i \sin \phi_i] \tag{38}$$

对式(38)的 $U_i、\theta_i$ 求导可得:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \cos(\phi_i - \theta_i) \tag{39}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \sin(\phi_i - \theta_i) \tag{40}$$

由式(39)、(40)可得 $k_{\text{pf}}、k_{\text{pU}}$ 的关系:

$$\frac{k_{\text{pf}}}{k_{\text{pU}}} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} / \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{U_i \tan(\phi_i - \theta_i)} \tag{41}$$

式(41)化简得:

$$k_{\text{pU}} = k_{\text{pf}} U_i \tan(\phi_i - \theta_i) \approx k_{\text{pf}} U_i (\sin \phi_i - \sin \theta_i) \tag{42}$$

由于并联逆变器在运行时空载输出电压与母线电压的相角差 θ_i 很小,阻抗角 ϕ_i 远大于相角差 θ_i ,

$\sin \phi_i = \frac{R_i}{|Z_i|}$,式(42)可化简为

$$k_{\text{pU}} = k_{\text{pf}} U_i \frac{R_i}{|Z_i|} \tag{43}$$

无功功率可表达为

$$Q_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \sin \phi_i - EU_i \sin \theta_i \cos \phi_i] \tag{44}$$

对 $U_i、\theta_i$ 求导可得:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \sin(\phi_i - \theta_i) \tag{45}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{|Z_i|} EU_i \cos(\phi_i - \theta_i) \tag{46}$$

由式(45)、式(46)可得 $k_{\text{qf}}、k_{\text{qU}}$ 的关系为

$$\frac{k_{\text{qf}}}{k_{\text{qU}}} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} / \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = - \frac{\tan(\phi_i - \theta_i)}{U_i} \tag{47}$$

式(47)化简得

$$k_{\text{qf}} = -k_{\text{qU}} \frac{\tan(\phi_i - \theta_i)}{U_i} \approx -k_{\text{qU}} \frac{\sin \phi_i - \sin \theta_i}{U_i} \tag{48}$$

由于阻抗角 ϕ_i 远大于相角差 θ_i ,式(48)可化简为

$$k_{\text{qf}} \approx - \frac{k_{\text{qU}}}{U_i} \frac{R_i}{|Z_i|} \tag{49}$$

综上,多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法如下:

$$\begin{cases} f_i = f_{0i} - k_{\text{pf}} P_i + \frac{k_{\text{qU}}}{U_i} \frac{R_i}{|Z_i|} Q_i \\ U_i = U_{0i} - k_{\text{pf}} U_i \frac{R_i}{|Z_i|} P_i - k_{\text{qU}} Q_i \end{cases} \tag{50}$$

当 $R_i = 0$ 时,即为传统下垂控制算法,若引入感性虚拟阻抗,参考电压 u_{ref}^* 则为

$$u_{\text{ref}}^* = \sqrt{2} U_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \tag{51}$$

4 实验仿真验证

为了验证多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了 3 台逆变器并联运行仿真模型。微网电压等级为 380 V,单台逆变器功率等级为 50 kW,负载类型为阻感性负载,3 台逆变器线路阻抗均为 $0.1 + \text{j}0.03 \ \Omega$,仿真参数如表 1 所示。

表 1 3 台逆变器并联运行仿真参数

参 数	数 值
3 台逆变器连线阻抗/ Ω	$0.1 + \text{j}0.03$
3 台逆变器电感/mH	$2.64 \times 0.05 \text{e}^{-4}$
3 台逆变器滤波电容/ μF	1e^{-6}
3 台逆变器负载阻抗/ Ω	$10 + \text{j}0.01$

4.1 基于虚拟阻抗的仿真

未加入感性虚拟阻抗的下垂控制实验仿真波形如图 5 所示。加入感性虚拟阻抗的下垂控制实验仿真波形如图 6 所示。

由图 5 和图 6 对逆变器并联运行的电压、有功、无功仿真分析可知,引入感性虚拟阻抗之后的逆变器的有功波形图没有明显变化,并联运行的台逆变器的输出电流波形更为均匀,并联逆变器的环流与未加入虚拟阻抗的环流有所减小,逆变器的输出无功均衡效果较未加入虚拟阻抗时也有很大的提高。

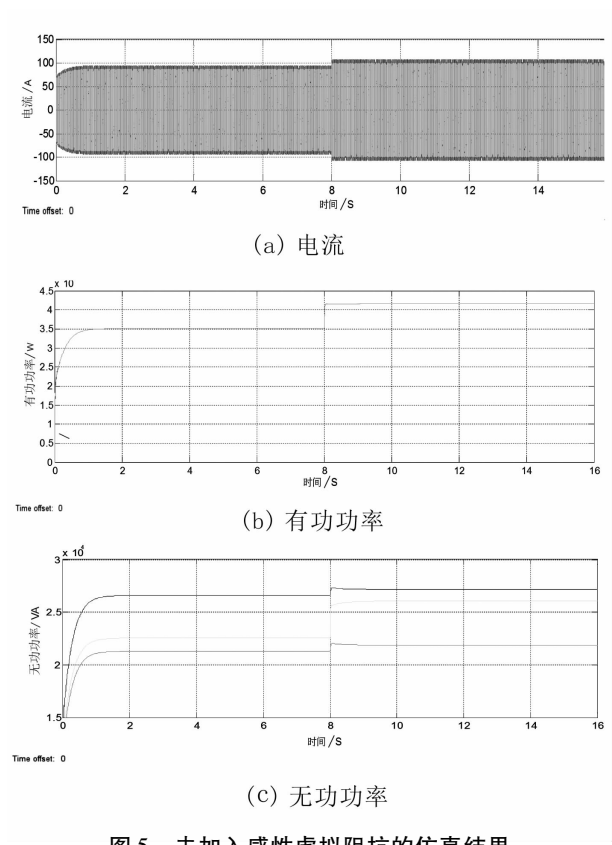


图 5 未加入感性虚拟阻抗的仿真结果

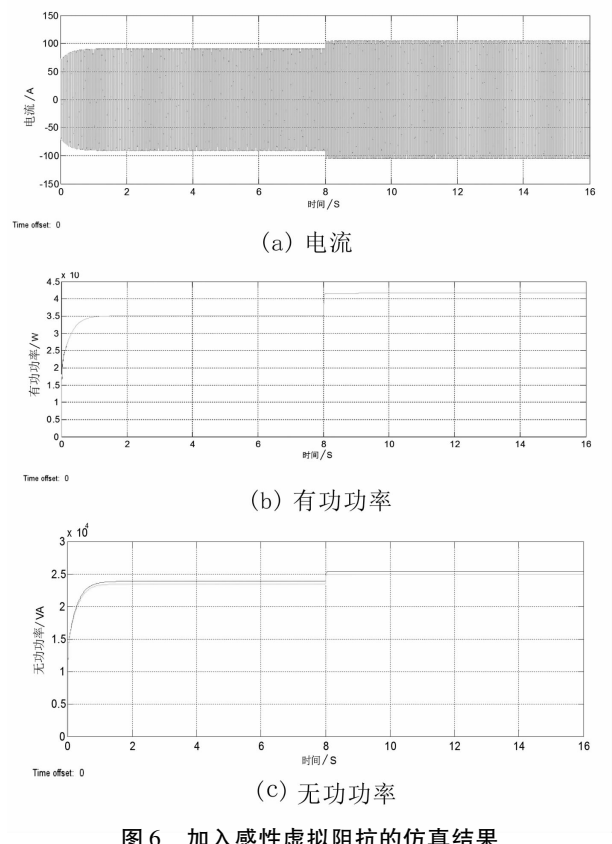


图 6 加入感性虚拟阻抗的仿真结果

4.2 基于改进算法的虚拟阻抗仿真

未加入感性虚拟阻抗的改进算法的下垂控制仿真波形如图 7 所示。

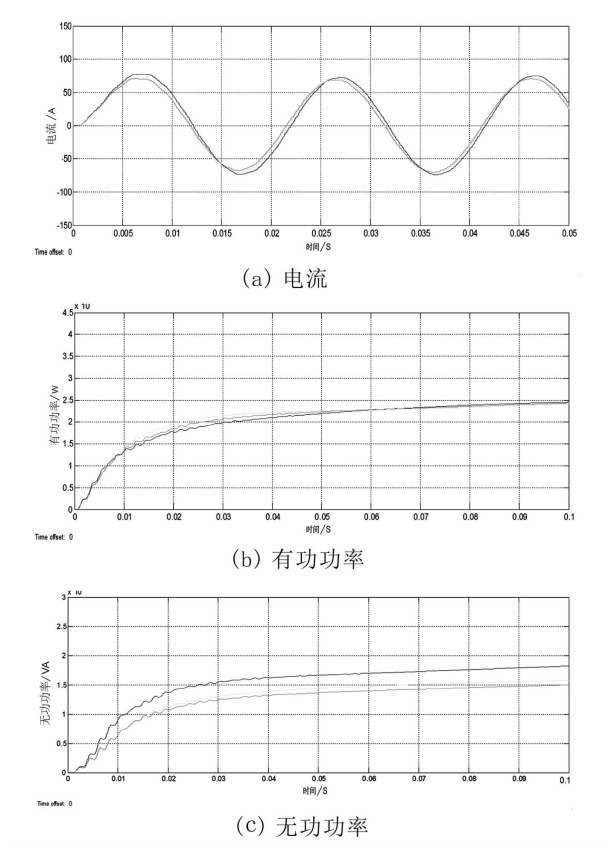


图 7 未加入感性虚拟阻抗的改进算法的仿真结果

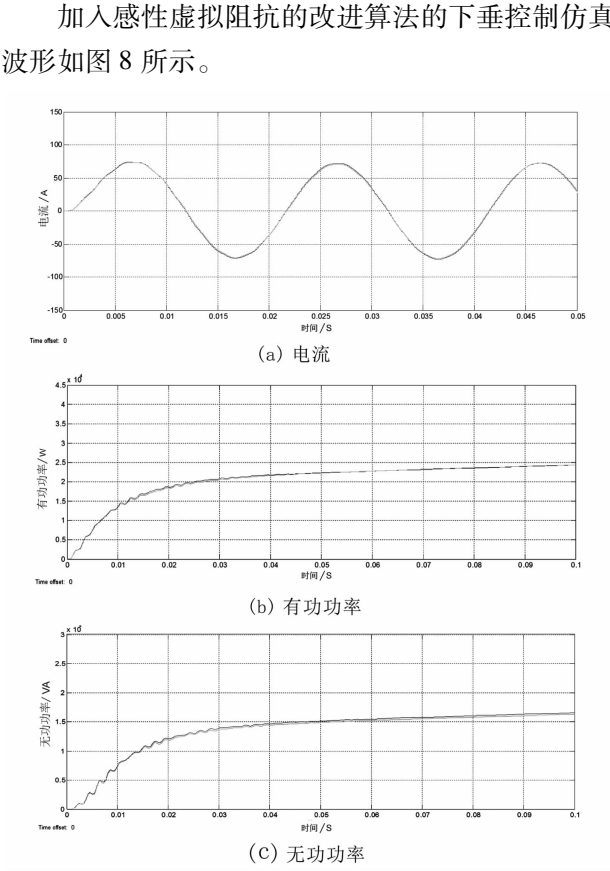


图 8 加入感性虚拟阻抗的改进算法的仿真结果

(下转第 37 页)

基于数字补偿技术改善高压功率源失真度指标的研究

羊 静¹,余 坤²,杨勇波³,郑 宝⁴,陈忠勇⁵

- (1. 国网四川综合能源服务有限公司,四川 成都 610021;
- 2. 国家开发银行西藏自治区分行,西藏 拉萨 850000;
- 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
- 4. 当雄县羊易地热电站有限公司,西藏 当雄 851500 ;
- 5. 中国华电集团有限公司西藏分公司,西藏 拉萨 850000)

摘 要:介绍了采用数字补偿技术,改善高压电能计量装置功率源输出信号波形失真度指标的一种有效解决方案。该方案基于表源一体高压电能计量装置实施,利用现代数字合成及高速数字采样技术,以逐点补偿方式修正功率源输出波形,使高压电能计量装置输出的波形信号失真度指标大幅改善,从而抵消因为升压器、升流器以及高压电能表等非线性负载导致功率源输出回路正弦信号的失真,减少因功率提供的信号失真度大而导致高压电能表检定过程中引入的不确定度误差值。通过采用数字补偿技术使得高压电能计量装置在额定功率输出状态下信号波形失真度优于0.3%。

关键词:高压电能表;检定系统;失真度;高压电能计量装置;数字补偿
中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0012-05

Research on Improving Distortion Index of High – voltage Power Source Based on Digital Compensation Technology

Yang Jing¹, Yu Kun², Yang Yongbo³, Zheng Bao⁴, Chen Zhongyong⁵

- (1. State Grid Sichuan Integrated Energy Service Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
- 2. China Development Bank (Tibet Branch), Lasa 850000, Tibet, China;
- 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
- 4. Yang Yi Geothermal Power Plant Co. Ltd., of Dangxiong County, Dangxiong 851500, Tibet, China;
- 5. China Huadian Corporation Ltd. (Tibet Branch), Lasa 850000, Tibet, China)

Abstract:The use of digital compensation technology is introduced to improve the waveform distortion of power source of high – voltage electric energy metering device, which provides a solution to improve the distortion index. The scheme is carried out based on high – voltage electric energy metering device with the integration of the meter and its power source. Using modern digital synthesis and high – speed digital sampling technology, the power source output waveform is corrected by the point by point compensation method, so that the distortion index of waveform signal output of high – voltage electric energy metering device is greatly improved. The nonlinear load such as booster, large current generator and high – voltage electric energy meter leads to the distortion of sinusoidal signal in the output circuit of power source, which reduces the uncertainty error of high – voltage electric energy meter by reducing the distortion of the signal provided by the power. By using the digital compensation technology, the distortion of high – voltage electric energy metering device in the rated power output state is better than 0.3% .
Key words:high – voltage electric energy meter; calibration system; distortion; high – voltage electric energy metering device; digital compensation

0 引言

近年随着高压电能表的应用范围逐步扩大,检定的工作量不断增加,迫切需要采用一源多表的计量检定方式并以最优性价比方案应对检定需求量的增加。

目前对于高压电能表的检定均采用虚功率法,计量装置功率提供源有两种方式:一是采用市电通过一定滤波后自耦升压的方式为高压电能表提供虚功率;二是采用程控功率源方式。无论采用哪种方式,均不能实现电压大环反馈,从而导致高压电能表获得的电压信号失真度普遍偏大。通过不同高压电能表生产企业实际生产过程的检测数据所知:当计量装置挂 1 台高压电能表检定时功率源输出信号波形失真度约为 0.5%;挂 2 台高压电能表时,功率源输出信号波形失真度约为 0.96%;挂 3 台高压电能表时,功率源输出信号波形失真度约为 1.44%;挂 4 台高压电能表时,功率源输出信号波形失真度约为 1.92%。失真度指标随着负载的增加而呈线性的变差,虽然负载还远未达到计量装置输出功率满载值,但在实际测试中使用 4 块电能表作为电压的负载接入,电压输出信号失真度指标已经接近国家标准规定的失真度最大值。由于现有高压电能表误差判定法是采用标准表来检定高压电能表,电压信号失真度指标好坏会影响标准表和高压电能表电能累量的大小,从而导致引入测量误差。

在一源多表工作方式下如何降低信号失真度的量值一直困扰着计量装置生产厂家。在传统的高压电能表计量装置的信号处理系统,由于存在着高压升压器、高压 PT 等非阻性器件,导致了高压电能表计量装置信号处理系统的截止频率只有 400 ~ 700 Hz,离 50 Hz 工频信号只有 10 倍频程距离,所以采用传统模拟 PID 电路无法把信号处理系统的开环增益提高,无法减少系统的稳态误差,从而也就无法改善电压信号失真度指标。

针对高压电能表计量装置传统的信号处理系统存在的不足,提出了一种基于数字补偿技术改善高压电能计量装置功率源输出信号波形失真度指标的方案。该方案的提出得益于近年电子信息技术的发展与大规模集成电路的广泛应用,特别是高速高精度的采样 AD 以及超强运算能力的 DSP 芯片的出

现,使该方案的实施成为了可能。

1 基本原理

现有计量装置原理框图如图 1 所示,其输出信号特性如图 2 所示。

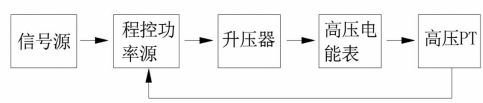


图 1 高压电能表计量检定装置原理

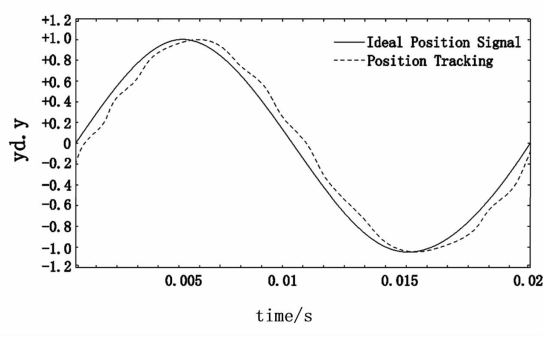


图 2 计量检定装置功率输出信号

图 2 的实际测试输出信号波形图清晰显示现有计量装置输出与输入信号比较存在着较大的差异和失真。

所提的基于数字补偿技术改善高压电能计量装置功率源输出信号波形失真度指标方案,是在充分考虑到高压电能表计量装置信号处理系统的特点,无需考虑升压器、高压 PT、高压电能表等负载特性曲线所带来的不确定影响度情况下,采用高速高精度的逐点采样技术对输出信号进行采集,运用超强运算能力的 DSP 芯片进行 PID 算法补偿运算,然后逐点对信号进行补偿并重新生成功率输出信号波形,以此数字方式补偿回路非线性失真,从而改善高压电能计量装置功率源输出信号波形失真度指标,原理框图如图 3 所示。

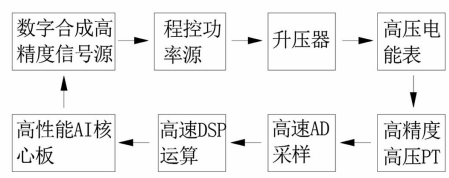


图 3 数字补偿技术方案原理

该方案实施的前提是采用表源一体的程控功率源(由一体化的数字合成高精度信号源、高稳定度的程控功率源组成)。因为系统 DA、AD 只有工作在同一时钟条件并使用同一信号波形函数两个前提

同时满足的情况下,才能和采样波形数据逐点对比以获得误差函数表;否则,没有统一的同步参考时间的数字补偿是无从谈起的。另外,没有足够精度的信号源(信号源需要最少每周波3600点以上),或无法控制信号源波形函数,得到的数字补偿量也无法实施,所以选用表源一体的程控功率源是方案实施的前提。此外,高精度稳定源的低压部分的闭环控制,仍然保持原来较高的增益反馈环,以保证设定的输出比较函数处于收敛状态,以及输出信号具有较小的失真偏差量值。

该方案实施的核心是实现系统管理运算的硬件需采用高性能AI核心板协调管理各部件工作;高速数字采样AD芯片进行高速采样;高速双核DSP算法运算芯片进行高速运算。合适的硬件部件是数字补偿系统实现的关键。

2 方案实现

方案主要由表源一体的程控功率源、数字补偿电路、数字补偿算法3部分组成。

2.1 表源一体的程控功率源

表源一体的程控功率源由数字合成高精度信号源、程控功率源、升压器、高压电能表、高精度高压PT等5部分组成。数字合成高精度信号源用于指定信号函数波形的产生,例如产生50 Hz、每周波3600点组的正弦函数信号;程控功率源用于电路的模拟PID调节以及信号功率放大;升压器把功率放大信号进行二次电压升举,并保留升压器初级的原反馈环,以压缩减小信号误差;高压电能表为检定的对象,系统的负载;高精度高压PT为负载电压信号的精准采样部件。

传统的数字合成信号源每周期DA幅值点数约在360~400点之间,等于每点修正影响量达到0.25%,因而导致数字补偿信号无法精准补偿信号源函数波形,也就无法满足0.05级计量检定装置的实用要求。提出采用数字合成高精度信号源,是把数字合成信号源DA幅值点数每周期信号提升至4000点乃至40000点,等于每点修正影响量达到0.025%~0.0025%,完全满足了0.05级计量检定装置的实用要求,能以逐点方式精准补偿信号源函数波形的失真,如图4所示。

在实验过程中,测试了多个厂家不同的升压器、

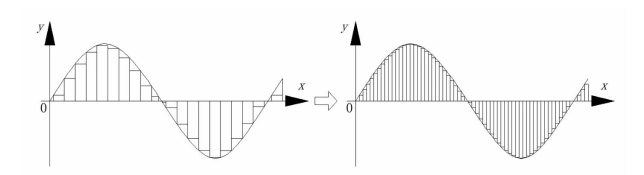


图4 数字合成高精度信号源波形比对

高压采样PT组成的系统,开环截止频率均分布在400~700 Hz,在距50 Hz工频信号约10倍频程距离,串联校正模拟电路开环增益 G_a ($G_a = 20\log 10 = 20$ dB),得出的理论开环增益值距系统开环增益理想值40 dB还差很远的距离。为了确保系统的闭环稳定性,幅频裕度还需要开环增益降低6 dB,所以系统模拟电路开环增益 G_a 只能取14 dB以下。由于模拟电路系统均为有差负反馈系统,因而系统的稳态误差与开环增益成反比关系,开环增益越高稳态误差也就越小,开环增益小了相应地导致稳态误差增大,从而导致电压信号失真度指标变差。

高精度高压PT需达到0.01等级以上要求,PT是数字补偿量的参考基准,该部件的参数准确度直接影响着系统的指标特性,是数字补偿量精准度得以保证的前提,这是因为数字合成波形电路失真由设定输出与采样值的误差所获得的比较函数来进行校正。

2.2 数字补偿电路

数字补偿电路由高性能AI核心、高速采样AD、高速运算DSP芯片组成。高性能AI核心负责数据的收集及算法深度学习运算,最终实施控制信号的输出,需具备主流的神经网络框架,具有AI运算以及人工智能堆栈,具备神经网络计算硬件加速,还要兼顾方案成本。高压PT反馈信号数字采样选用高速采样AD芯片,采样速率需达到10 MHz以上。数字信号采样后需要进行滤波、去噪,然后才能进行高速实时信号运算处理,因而需要具有高速运算能力的DSP芯片,能及时地应对多路并发运算的需求。

2.3 数字补偿算法

要实现数字补偿控制首先要对采集到的数字信号量值离散化处理,采用如位置式数字PID控制算法^[1]处理。其运算公式如下:

$$u(k) = \delta(K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d[e(k) - e(k-1)] + u_0) \quad (1)$$

式中: $e(k)$ 为数字PID运算量输入,为第 k 个时刻的偏差值; $u(k)$ 是第 k 个采样时刻数字PID控制算法输出; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系

数; δ 为升压器、采样电路等综合补偿因子。

显然采用位置式数字补偿算法适合于周期性补偿,因为每次波形信号均为全量值输出,为了保证输出信号波形的完整性,每次每点采样运算后的输出值 $u(k)$ 以数组方式暂存在内存;当完整采样完 4000 点后,在下一周期开始才把运算结果以整周期信号波形方式更新输出。位置式逐点数字补偿原理如图 5 所示。

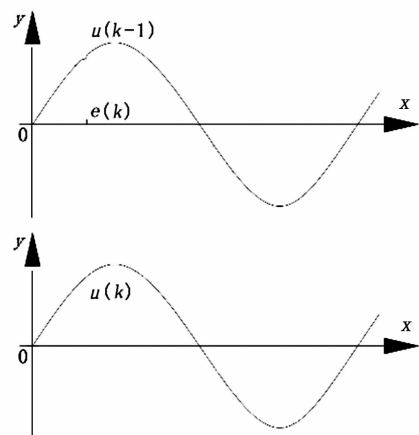


图 5 位置式逐点数字补偿原理

位置式数字补偿算法需要按周期采样点数建立 $e(k)$ 差值、 $u(k)$ 输出值的缓存数组。如果需要多点均值化滤波处理,那么对于内存的容量需求是相对较大的。在内存容量不大而且运算速度裕度大的系统可以采用增量式控制算法^[2],令式(1)中的 $k = k - 1$,得其运算公式如下:

$$u(k-1) = \delta(K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d[e(k-1) - e(k-2)] + u_0) \tag{2}$$

式(1)减去式(2),得增量式 PID 运算式为

$$\Delta u(k) = \delta(u(k) - u(k-1)) = \delta(K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]) \tag{3}$$

从式(3)可以看出,增量型数字补偿算法不需要做累加,仅与最近几次误差采样值有关,大大减少了数字补偿系统对内存的依赖;另一方面增量型数字补偿算法得出的是补偿增量,过补偿量影响小,因而补偿扰动小。

增量式数字补偿算法也有其不足之处,相对位置式数字 PID 控制算法,其对高性能 AI 核心、高速采样 AD、高速运算 DSP 芯片等性能要求相对较高,以 50 Hz 信号频率 4000 点数字量化输出为例:每点输出保持的时间为 5 μ s,每点采样及补偿 10 次,那么采样 AD 的采样频率要求最低需要达到 500 ns 以

上;对于 DSP 运算速度要求为 500 ns 一个采样点,暂按 3 次采样叠加运算,每次运算指令约为 20 条,运算速度最低需要达到 25 ns。纵观现有电子芯片技术水平,以上指标要求已经可以轻松实现。增量型逐点数字补偿原理如图 6 所示。

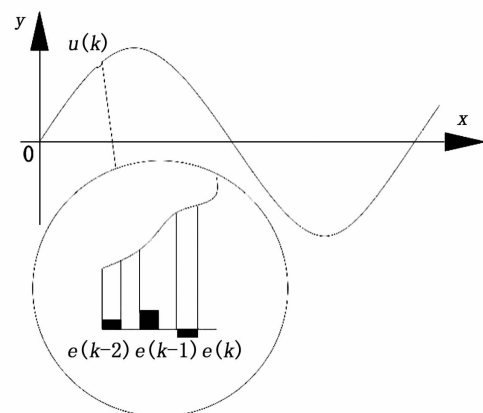


图 6 增量型逐点数字补偿原理

图 6 显示,采用增量式数字补偿算法后,在一个信号波形点的输出过程中,系统实时进行了 3 次 AD 数字采样,计算补偿量,并且实时修正输出值。与位置式数字补偿算法需要按周期采样补偿方式比较,此方式对系统输出补偿的实时性、有效性才是最优的。式(1)、式(2)、式(3)均需剩上“ δ ”综合补偿因子,用于补偿器件参数引入的误差补偿,其取值由系统实测参数决定,但其范围需控制在 0.9 ~ 1.1 之间,否则表示升压器、高压 PT 等器件应用参数偏离了实际需求,要更换器件才能满足系统实际应用特性要示。

3 采用 M 语言仿真

数字补偿技术位置式 PID 控制框图如图 7 所示。

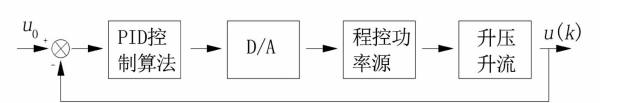


图 7 位置式 PID 控制

根据位置式 PID 控制算法得到其程序框图如图 8 所示。

在仿真过程,对输出值 $u(k)$ 进行限幅: $[-1, +1]$ 。所用方法通过核心处理器及 DSP 数字运算器实现 D/A 控制,符合数字实时控制的真实情况。

由于被控对象为升压器、升流器、容性负载组成的二阶函数对象模型,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCS + 1} \tag{4}$$

式中： L 为感抗，取值约 0.8 H； C 为负载容抗，取值 1.2×10^{-9} ； R 取值 1； s 为频域变量。



图8 位置式PID控制算法程序

采用 Matlab 中求微分方程数值解的函数 ODE45 的方法求解连续对象方程，输入指令信号 $u_0 = \sin(2\pi t)$ ，采用 PID 控制算法，其中： k_p 取值 18； k_i 取值 0.1； k_d 取值 0.5。PID 正弦跟踪结果如图 9 所示。

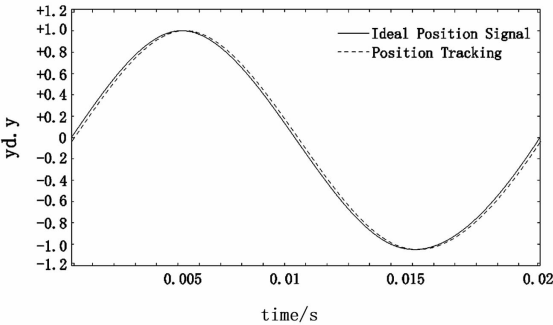


图9 PID 正弦跟踪

4 两种数字补偿比对

通过 Matlab 仿真，结果显示采用位置式数字补偿算法的周期性逐点补偿方式与采用增量型数字补偿算法的实时逐点补偿方式相比较而言，阶跃跟踪特性后者明显优于前者，此现象说明采用增量型数字补偿算法更适合于所提方案的实现，阶跃跟踪图如图 10、图 11 所示。

5 结 语

通过原理分析、试验验证及仿真结果综合比对

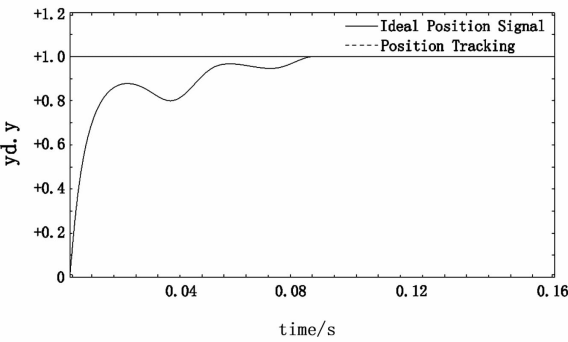


图10 位置式数字补偿算法阶跃跟踪

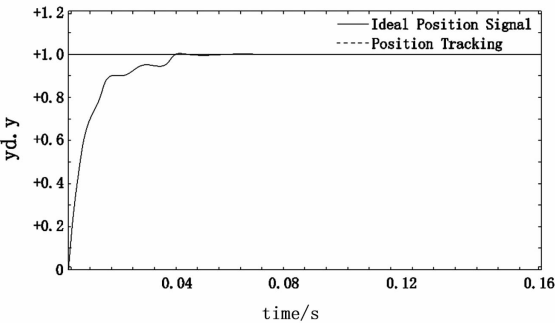


图11 增量式数字补偿算法阶跃跟踪

表明，所提出的利用现代数字合成及高速数字采样技术，以逐点补偿方式修正功率源输出波形的设计方案，使高压电能计量装置输出的波形信号失真度指标大幅改善，因此，该方案是有效可行的。同样的负载情况所提失真度指标对比，采用所提方案之后，两者的误差值改善达到 10 倍以上，原有失真度指标将由 $THD = 2\%$ 提升至 $THD < 0.2\%$ 。失真度指标的改善使得现有高压电能计量装置能为高压电能表提供更准确、更有效的功率源信号，为计量检测单位准确检测高压电能表提供了有效的保证。

同理，所提技术方案也可广泛应用于改善其他检测领域中由于功率源带负载过重引起的功率源波形失真问题。

参考文献

[1] 李友善. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1990.
[2] 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 北京:科学出版社,2001.

作者简介:

羊 静(1987), 学士、工程师, 主要从事电网能效工程及电能计量工作;
余 坤(1987), 硕士、高级工程师, 主要从事电力工程建设审计工作;
杨勇波(1976), 博士、高级工程师, 主要从事电网二次相关工作。
(收稿日期:2018-04-20)

高海拔 500 kV 交流线路空气间隙及海拔修正试验研究

罗 琦¹,王 强¹,李 力¹,丁玉剑²,艾 鹏¹
(1. 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:介绍了在海拔 4300 m 地区对 500 kV 直线塔模拟塔头导线-塔身空气间隙的操作冲击放电、雷电冲击放电和工频放电特性试验研究,实验得到了塔头空气间隙不同电压的放电特性曲线。根据海拔 0 m 和海拔 4300 m 地区的 500 kV 塔头间隙的试验结果,采用插值法,计算得到了不同海拔地区的塔头空气间隙的放电电压,同时得到了海拔 4000~5500 m 地区塔头间隙冲击放电电压的海拔校正系数,推荐了适用的海拔校正方法。最后,给出了海拔 4000 m 以上 500 kV 输电线路所需的最小空气间隙距离值。

关键词:高海拔;500 kV;空气间隙;海拔校正;操作冲击;雷电冲击;工频放电

中图分类号:TM852 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0017-08

Research on Air Gap Selection and Altitude Correction of 500 kV AC Transmission Lines in High Altitude Areas

Luo Qi¹, Wang Qiang¹, Li Li¹, Ding Yujian², Ai Peng¹
(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract:In the region with the altitude of 4300 m, the researches on the characteristic tests of switching impulse discharge, lightning impulse discharge and power frequency discharge of line-tower air gaps are carried out on the simulation tower head of 500 kV tangent tower, and the discharge characteristics curves under different voltages are obtained. Based on the experimental data of tower head air gaps at altitude of 0 m and 4300 m, the discharge voltages of tower head air gap at the different altitudes are obtained, and the altitude correction coefficients for discharge voltages of tower head air gap at altitude of 4000~5000 m are also obtained through interpolation method. Finally, the minimum air gap required by 500 kV transmission lines at altitude of 4000 m and above is given and the applicable altitude correction method is recommended.

Key words:high altitude; 500 kV; air gap; altitude correction; switching impulse; lighting impulse; power frequency discharge

近年来,中国先后建设了乡城-水洛、川藏联网等 500 kV 电压等级的高海拔工程,上述工程中,输电线路塔头空气间隙的取值大都借鉴已有的海拔校正方法,或者在海拔较高的地区开展了少量的试验,所得结果不能完全满足后续西藏等高海拔地区 500 kV 输电工程建设的需求。为了确保 500 kV 输电工程在高海拔地区的可靠性,需要对高海拔地区空气间隙放电特性和海拔校正开展研究,通过试验研究获得海拔 4000~5500 m 地区 500 kV 输变电工程外绝缘特性的关键设计参数,为工程设计提供依据,确

保工程技术可靠性和经济性^[1-5]。

下面重点对高海拔地区 500 kV 输电线路空气间隙放电特性和海拔校正进行了研究,开展了高海拔地区 500 kV 输电线路的典型杆塔边相雷电冲击、操作冲击和工频放电特性试验,通过实验获得了相应的放电特性曲线,研究了海拔 4000~5500 m 地区的 500 kV 输电线路海拔校正系数,以此作为参考,探索了适用于此海拔高度下的海拔校正方法,并对海拔 4000 m 以上 500 kV 输电线路所需的最小空气间隙距离进行研究。

1 500 kV 输电线路绝缘配合和海拔校正方法分析

1.1 输电线路绝缘配合方法

国家标准 GB/T 50064 - 2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定了绝缘子串风偏后,导线对杆塔的空气间隙应当符合的操作过电压、雷电过电压及工频电压要求^[6]。

1.2 常用海拔校正方法分析

常用的海拔校正方法有 GB/T 16927.1 - 2011 中的海拔校正方法^[7]、IEC 60071 - 2:1996 中的海拔校正方法^[8]、DL/T 620 - 1997 中的海拔校正方法^[9]、GB/T 2317.2 - 2008 中的海拔校正方法^[10]。

2 试验设备、试品和试验方法

2.1 试验设备

采用的试验装置包括北京昌平特高压直流试验基地的低海拔 7200 kV/480 kJ 冲击电压发生器及分压器、西藏羊八井高海拔试验基地的 4200 kV/200 kJ 冲击电压发生器及分压器等。

2.2 试品

参照高海拔 500 kV 输电线路塔头初设图,在不同海拔地区加工制作了相应的模拟塔头,保证试验布置完全一致。

试验时采用 I 串布置,复合绝缘子串长 5.7 m;均压环环径为 500 mm,管径为 45 mm,对上横担的间隙距离为 6 m;采用四分裂导线,导线线长 9 m,分裂间距为 400 mm。实际布置如图 1 所示。



图 1 500 kV 试验布置

2.3 试验方法

试验按照 GB/T 16927.1 - 2011《高电压试验技

术第 1 部分:一般试验要求》和 GB/T 16927.2 - 2013《高电压试验技术第 2 部分:测量系统》规定的试验和测量方法进行。

1) 采用正极性 250/2500 μ s 的标准操作冲击波作为操作冲击试验电压波形,采用正极性 1.2/50 μ s 的雷电冲击波作为雷电冲击试验的波形。

2) 通过升降法计算 50% 放电电压 $U_{50\%}$,参考公式如式(1)所示。

$$U_{50\%} = \frac{\sum (n_i \times U_i)}{n} \quad (1)$$

式中: U_i 为施加的电压, kV; n_i 为相同的施加电压 U_i 下试验的次数; n 为有效试验的总次数。

3) 试验的标准偏差 σ 按照式(2)计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n U_i^2 - (\sum_{i=1}^n U_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

4) 低海拔地区的试验电压数据根据试验时的气象条件修正到标准气象条件下。

5) 高海拔地区试验在 2017 年 8 月份进行,试验温度在 15 ~ 20℃ 间。

3 低海拔 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电特性

在北京昌平的特高压直流试验基地按照图 1 的布置开展了导线 - 塔身间隙工频放电特性、边相和中相空气间隙操作冲击放电特性以及雷电冲击放电特性、绝缘子串雷电冲击放电特性等试验研究。

3.1 操作冲击放电特性

为了对高海拔地区 500 kV 输电线路塔头间隙进行海拔校正,需要参考低海拔地区塔头间隙的冲击电压放电特性曲线。

对 500 kV 线路塔头的边相导线施加极性为正的标准操作冲击电压,通过调整导线 - 塔身的空气间隙距离,得到不同间隙距离时边相导线 - 塔身的 50% 操作冲击放电电压。低海拔地区边相空气间隙的 50% 操作冲击放电电压与空气间隙距离的关系曲线如图 2 所示,其放电电压的相对标准偏差不大于 5%。塔身到均压环间隙距离为 2 ~ 4.5 m,其操作冲击放电电压为 900 ~ 1 450 kV。

3.2 雷电冲击放电特性

3.2.1 绝缘子串

对不同长度的 I 型绝缘子串实施了雷电冲击放

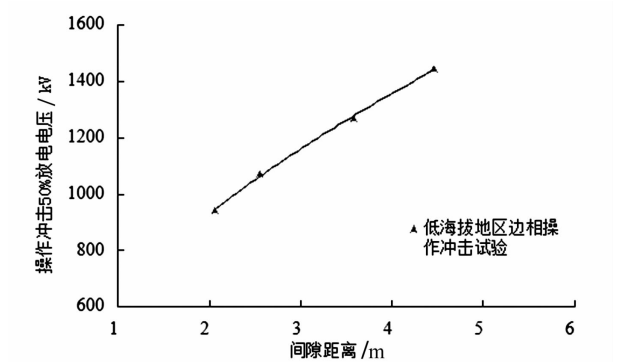


图2 低海拔地区边相与中相导线-塔身操作冲击放电特性曲线

电特性试验。试验的绝缘子串长范围 1.8 ~ 4.80 m, 试验的雷电冲击电压范围为 1300 ~ 2900 kV。得到如图 3 所示低海拔地区 I 型绝缘子串 50% 雷电冲击放电电压与相对应的绝缘子串长的关系曲线。由曲线可以看出, 放电电压与绝缘子串长呈线性关系, 每个绝缘子串长度下放电电压的相对标准偏差不大于 3%。

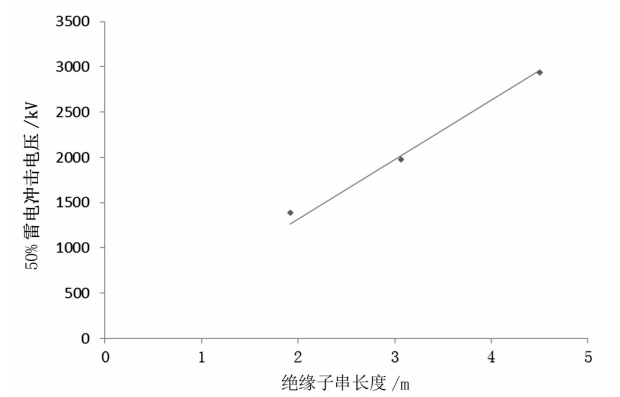


图3 低海拔地区 I 型绝缘子串雷电冲击放电特性曲线

3.2.2 塔头间隙

在低海拔地区对导线-塔身间隙进行雷电冲击放电试验, 试验的间隙距离范围为 2 ~ 3.8 m, 放电电压的范围为 750 ~ 2400 kV, 得到低海拔地区导线-塔身空气间隙的 50% 雷电冲击放电电压和间隙距离的关系曲线, 如图 4 所示。可以看出, 在试验的间隙距离范围内, 导线-塔身间隙的 50% 雷电冲击放电电压和间隙距离值呈线性关系。

3.3 工频放电特性

采用实际尺寸模拟塔头和 3 分裂导线, 进行低海拔地区导线-塔身空气间隙的工频放电特性试验。试验的间隙距离范围为 0.5 ~ 2.0 m, 工频放电电压的范围为 250 ~ 700 kV。得到了如图 5 所示的放电特性曲线。可以看出, 在试验的电压和间隙距离范围内, 塔身工频放电电压和导线-塔身的间隙

距离基本呈线性关系。

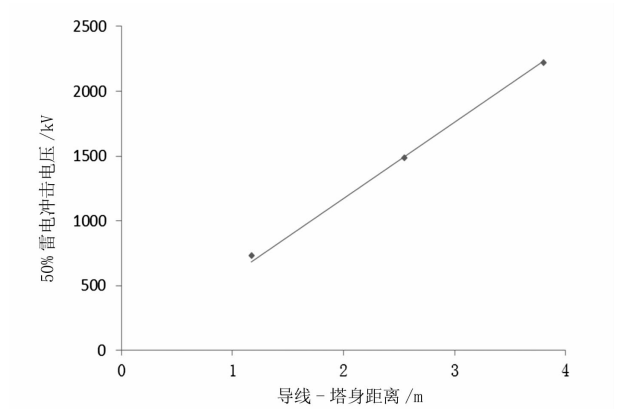


图4 低海拔地区导线-塔身雷电冲击放电特性曲线

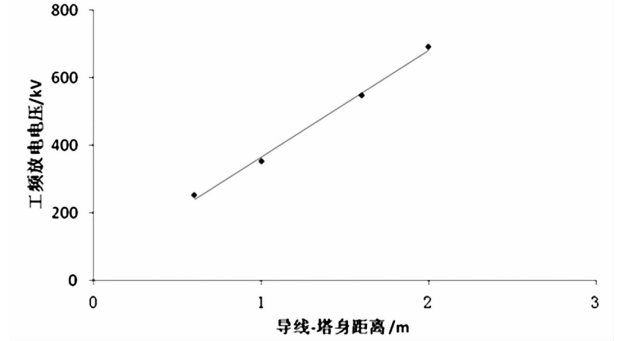


图5 低海拔地区导线-塔身工频放电特性曲线

4 高海拔 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电特性

在西藏高海拔试验基地(羊八井, 海拔 4300 m)选用和低海拔地区尺寸完全一致的模拟塔头, 进行了边相导线-塔身间隙的操作冲击、雷电冲击及工频放电特性实验。

4.1 边相操作冲击放电特性

对边相施加正极性标准操作冲击电压, 得到图 6 所示的塔头空气间隙的 50% 操作冲击放电电压与间隙距离的关系曲线。图 7 为试验时边相操作冲击放电照片。

4.2 雷电冲击放电特性

4.2.1 绝缘子串

试验的绝缘子串长范围为 1.6 ~ 4.1 m, 试验的雷电冲击电压范围为 500 ~ 1400 kV。得到图 8 所示的高海拔地区 I 型绝缘子串 50% 雷电冲击放电电压与绝缘子串长度的关系曲线。可以看出, 在高海拔地区同低海拔地区一样, 放电电压与绝缘子串长度呈线性关系。图 9 为边相绝缘子串雷电冲击放电照片。

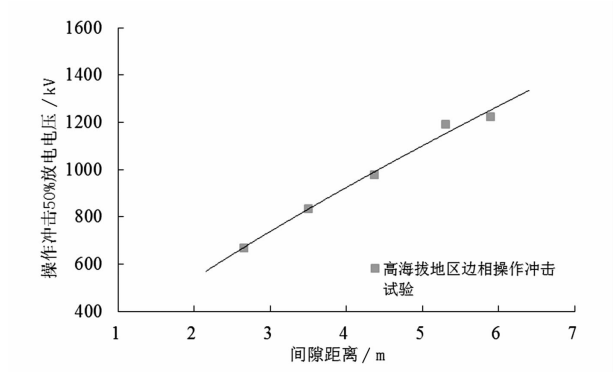


图 6 高海拔地区相导线 - 塔身操作冲击放电特性曲线



图 7 高海拔地区边相导线 - 塔身操作冲击放电

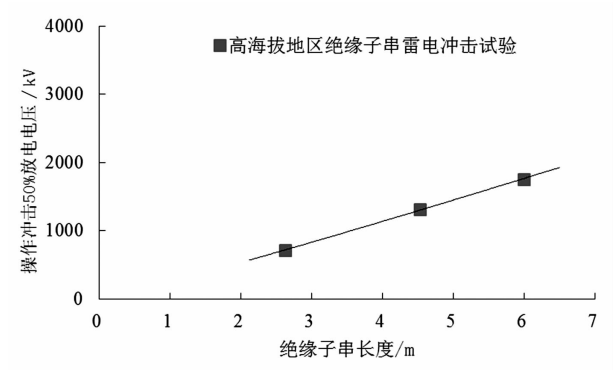


图 8 高海拔地区绝缘子串雷电冲击放电特性曲线



图 9 高海拔地区边相绝缘子串雷电冲击放电

4.2.2 空气间隙

对高海拔地区导线 - 塔身空气间隙进行雷电冲击放电特性试验。试验的导线 - 塔身空气间隙范围为 2.0 ~ 5.0 m, 试验的雷电冲击电压范围为 600 ~ 1800 kV。得到图 10 所示的塔头空气间隙的 50%

雷电冲击放电电压和间隙距离的关系曲线。

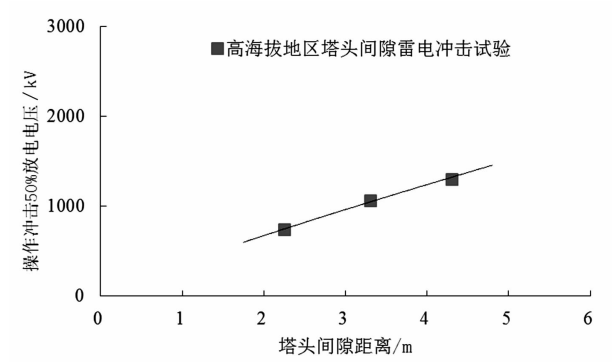


图 10 高海拔地区导线 - 塔身雷电冲击放电特性曲线

4.3 工频放电特性

高海拔地区的导线 - 塔身的工频放电特性试验间隙距离范围为 0.5 ~ 2.0 m, 间隙的工频闪络电压范围为 150 ~ 500 kV, 得到图 11 所示的高海拔地区塔身 - 导线工频放电电压与间隙距离的关系曲线。

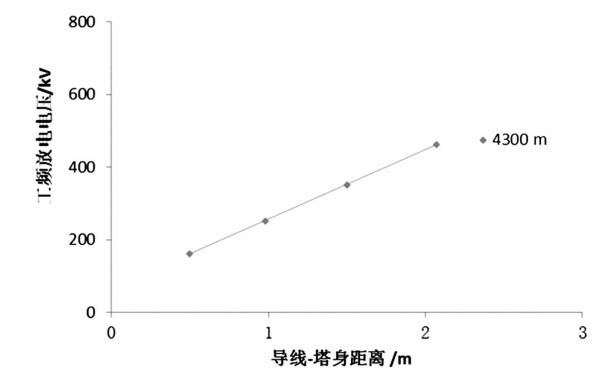


图 11 高海拔地区导线 - 塔身工频间隙放电特性曲线

5 500 kV 输电线路杆塔空气间隙放电电压的海拔校正

为分析在海拔 4300 m 地区现有的海拔校正方法的适用性, 需要将前述 4 种标准推荐的大气校正方法外推用于海拔 4300 m 地区, 并通过计算得到导线 - 塔身空气间隙的工频冲击放电电压、操作冲击放电电压和雷电冲击放电电压的海拔校正系数, 并和试验值进行比较。海拔校正系数试验值为低海拔地区的试验数据校正到标准气象条件后与海拔 4300 m 地区的试验数据的比值。

5.1 塔头间隙操作冲击电压海拔校正系数

采用不同海拔校正方法得到的导线 - 塔身间隙操作冲击放电电压的海拔校正系数如表 1 所示, 图 12 为不同间隙距离时操作冲击放电电压的海拔校正系数的曲线。

表1 不同海拔校正方法的导线-塔身空气间隙
操作冲击放电电压的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1 - 2011	IEC 60071 - 2:1996	DL/T 620 - 1997	GB/T 2317.2 - 2008	试验值
海拔校正系数	1.52 ~ 1.25	1.61 ~ 1.47	1.56 ~ 1.30	1.65	1.73 ~ 1.39

从表1和图12可以看出:在间隙距离小于2.5 m时,试验得到的海拔校正系数大于GB/T 16927.1 - 2011、IEC 60071 - 2:1996、DL/T 620 - 1997和GB/T 2317.2 - 2008的校正系数;随着间隙距离的增大,试验值趋近于IEC 60071 - 2:1996的校正系数。

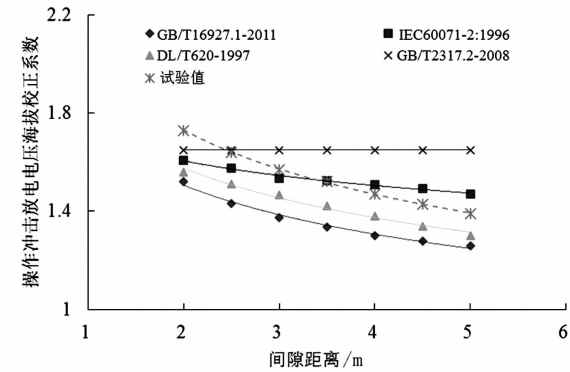


图12 导线-塔身空气间隙操作冲击放电电压
的海拔校正系数

综合来看,对于海拔4300 m地区500 kV导线-塔身空气间隙的操作冲击放电电压的海拔校正,间隙距离在2.0~5.0 m时,可按IEC 60071 - 2:1996的方法来选取,但是间隙距离越大需要保留的裕度也要越大。因此,对于高海拔、长气隙操作冲击放电电压的海拔校正,选用相同试品在不同海拔高度开展实际试验,经过对比分析得到的海拔校正系数较为可靠。

5.2 雷电冲击电压海拔校正系数

采用不同的海拔校正方法得到的绝缘子串和塔头间隙雷电冲击放电电压的海拔校正系数见表2。

表2 导线-塔身空气间隙雷电冲击放电电压
不同海拔校正方法的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1 - 2011	IEC 60071 - 2:1996	DL/T 620 - 1997	GB/T 2317.2 - 2008	试验值
海拔校正系数	1.52 ~ 1.67	1.69	1.66	1.65	1.78 ~ 1.87

从表2可以看出:GB/T 16927.1 - 2011、IEC 60071 - 2:1996、DL/T 620 - 1997和GB/T 2317.2 - 2008得出的海拔校正系数较试验值偏低。因此,对

于高海拔、长气隙雷电冲击放电电压的海拔校正,选用相同试品在不同海拔开展实际试验,经过对比分析得出相应的海拔校正系数较为可靠。

5.3 工频电压海拔校正系数

运用不同海拔校正方法获得的导线-塔身间隙工频放电电压的海拔校正系数见表3。图13为试验得到的不同间隙距离时海拔校正系数的曲线。

由表3和图13看出:在海拔4300 m地区,500 kV输电线路塔头空气间隙工频电压试验值的海拔校正系数随着间隙的增大而呈现增大趋势,且增大的速度逐渐变小。

表3 采用不同海拔校正方法时导线-塔身空气
间隙工频放电电压的校正系数

校正方法	GB/T 16927.1 - 1997	IEC 60071 - 2:1996	DL/T 620 - 1997	GB/T 2317.2 - 2008	试验值
海拔校正系数	1.61 ~ 1.30	1.69	1.78 ~ 1.61	1.65	1.31 ~ 1.50

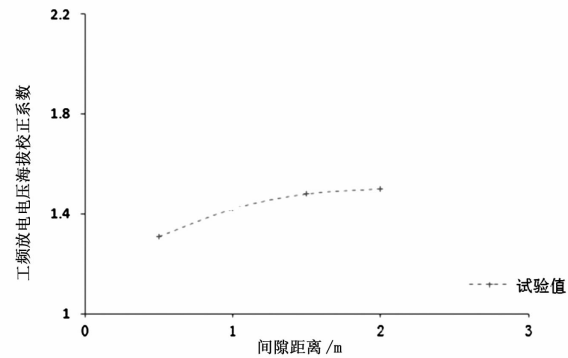


图13 导线-塔身空气间隙工频放电电压的
海拔校正系数

综合来看,对于海拔4300 m地区的500 kV输电线路,间隙距离为0.5~2 m时,上述4种标准推荐方法的校正结果与试验的结果相差较大。因此,对于高海拔、长气隙工频放电电压的海拔校正,选取相同试品在不同海拔开展实际试验,经过对比分析得出相应的海拔校正系数较为可靠。

6 500 kV 输电线路空气间隙距离的选择

6.1 选择原则

6.1.1 不同海拔下500 kV 输电线路操作冲击电压的间隙推荐

风偏后导线对杆塔空气间隙在正极性操作冲击

电压波下的 50% 放电电压 $U_{s.l.s}$ 应满足式 (3) 的限制条件:

$$U_{s.l.s} \geq K_3 U_0 \tag{3}$$

式中: K_3 为空气间隙操作过电压统计配合系数, 在 500 kV 输电线路中取 1.1; U_0 为 500 kV 线路相对地统计操作过电压, 取空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸 3 种情况下的较高值, 一般不大于 2.0 p.u.。

根据式 (3) 可计算出 500 kV 输电系统要求的 1.8 p.u.、2.0 p.u. 下的 50% 操作冲击放电电压。根据海拔 4300 m 地区的试验值, 采用线性插值法可分别求得海拔 1000 m、3000 m、4000 m、5000 m、5500 m 地区的操作冲击放电电压和导线 - 塔身空气间隙关系曲线, 如图 14 所示。由此计算了不同海拔高度下 500 kV 输电线路符合操作冲击放电电压要求的空气间隙, 如表 4 所示。

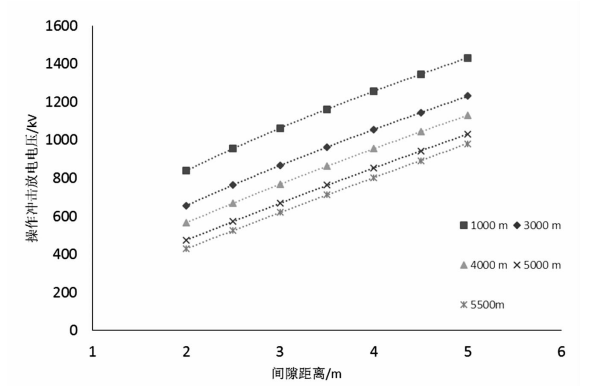


图 14 不同海拔条件下塔头间隙的操作冲击放电电压与间隙距离的关系曲线

表 4 符合操作冲击放电电压要求的
不同海拔间隙距离推荐值

过电压 倍数	推荐间隙 /m				
	1000 m	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
1.8 (889 kV)	2.30	3.30	3.70	4.20	4.40
2.0 (988 kV)	2.73	3.80	4.30	4.70	5.00

在过电压倍数为 2.0 条件下, 海拔 5500 m 地区操作冲击过电压的间隙距离不应小于 5.0 m。

6.1.2 不同海拔下 500 kV 输电线路雷电冲击放电电压下的间隙推荐

根据海拔 0 m 和 4300 m 地区绝缘子串的雷电放电电压与绝缘子串长的关系, 采用线性插值法分别求得了海拔 1000 m、3000 m、4000 m、5000 m、

5500 m 雷电冲击放电电压与绝缘子串长的关系曲线, 如图 15 所示。

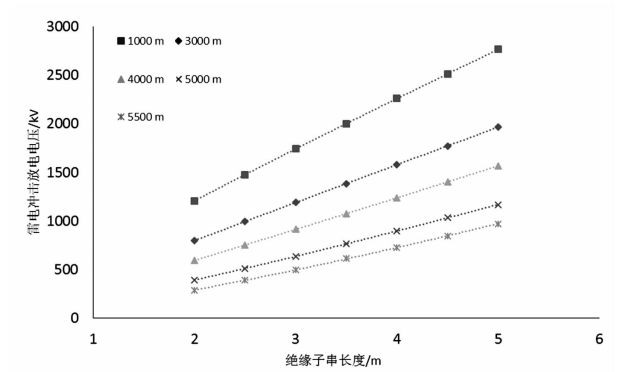


图 15 不同海拔下雷电冲击放电电压与绝缘子串长度的关系曲线

同理, 根据海拔 0 m 和 4300 m 地区雷电放电电压与导线 - 塔身空气间隙的关系, 采用线性插值法分别求得了海拔 1000 m、3000 m、3500 m、4000 m、4500 m、5000 m 雷电冲击放电电压与导线 - 塔身间隙的关系曲线, 如图 16 所示。

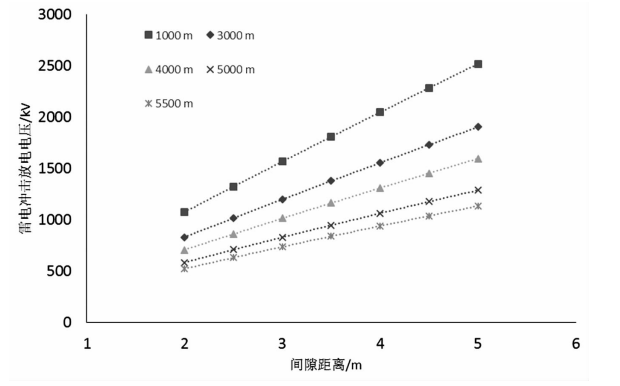


图 16 不同海拔下雷电冲击放电电压与导线 - 塔身间隙距离的关系曲线

其中, 绝缘子串长度需要根据文献 [1] 中推荐的不同海拔下污秽等级分别为 a、b、c 时的绝缘子串片数及长度来进行计算。

经试验分析, 不同海拔下绝缘子片数和串长关系如表 5 所示。

GB/T 50064 - 2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中规定风偏后导线对杆塔空气间隙的极性雷电冲击电压波 50% 放电电压, 可作为相应绝缘子串电压的 0.85 倍 (此处选择 b 级污区的绝缘子串长), 计算得到不同海拔地区的雷电要求的间隙距离取值见表 6。

6.1.3 不同海拔下 500 kV 输电线路工频电压下的间隙推荐

通过计算可得, 500 kV 输电系统要求的工频电

表5 500 kV 绝缘子片数和串长(I 串)

污秽等级	3000 m		4000 m		5000 m		5500 m	
	片数 /片	串长 /m	片数 /片	串长 /m	片数 /片	串长 /m	片数 /片	串长 /m
b 级 (0.05 mg/cm ²)	25	4.25	27	4.59	29	4.93	30	5.10
c 级 (0.1 mg/cm ²)	30	5.10	32	5.44	34	5.78	35	5.95

表6 满足雷电冲击放电电压要求的塔头空气间隙推荐值

污秽等级	空气间隙推荐值 /m			
	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
b 级 (0.05 mg/cm ²)	3.50	3.80	4.10	4.20
c 级 (0.1 mg/cm ²)	4.00	4.40	4.70	4.90

压为445 kV。根据海拔4300 m 和海拔0 m 地区的试验值,采用插值的方法,可求得不同海拔条件下的工频放电电压和导线-塔身空气间隙关系曲线,如图17 所示。由此计算了不同海拔下500 kV 输电线路符合工频放电电压要求的空气间隙,如表7 所示。

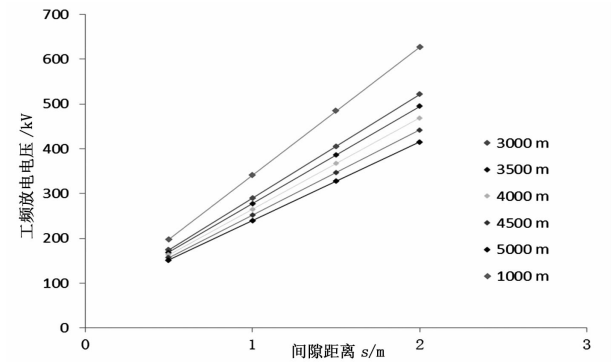


图17 不同海拔下工频放电电压与间隙距离的关系曲线

表7 符合工频电压要求的不同海拔间隙距离推荐值

海拔高度/m	3500	4000	4500	5000
推荐间隙距离/m	1.80	1.90	2.05	2.20

6.2 不同类型电压要求的最小间隙距离取值

海拔3000~5000 m 范围内,以过电压为2.0 p. u. 为例,500 kV 输电线路所需的最小间隙距离值如表8 所示。

7 结 语

1)在海拔4300 m 地区,对500 kV 直线塔边相

表8 海拔3000~5000 m 范围内500 kV 输电线路要求的最小空气间隙距离值

电压类型	推荐间隙/m			
	3000 m	4000 m	5000 m	5500 m
操作冲击	3.80	4.30	4.70	5.00
雷电冲击	4.00	4.40	4.70	4.90
工频电压	1.70	1.90	2.20	2.35

进行了间隙冲击放电特性试验,得到了操作冲击放电电压和雷电冲击放电电压特性曲线。

2)分析了常用海拔校正方法外推到海拔4300 m 地区后的海拔校正系数,计算得到的操作冲击放电电压的海拔校正结果与试验所得结果相差较多,而雷电冲击放电电压的海拔校正系数和试验值较为接近。

3)推荐了海拔3000~5500 m 的500 kV 输电线路塔头在1.8 p. u. 和2.0 p. u. 过电压条件下操作冲击放电电压所需的空气间隙距离值,即海拔5000 m 时间隙为4.7 m,海拔5500 m 时间隙为5.00 m。

4)推荐了海拔3000~5500 m 的500 kV 输电线路塔头雷电冲击放电电压要求的空气间隙距离值,海拔5500 m 时间隙为4.90 m。

5)推荐了海拔3000~5500 m 的500 kV 输电线路塔头工频放电电压所需的空气间隙距离值,海拔5500 m 时间隙为2.35 m。

参考文献

[1] 孙昭英,丁玉剑,廖蔚明,等. 青藏直流联网工程空气间隙的海拔校正[J]. 电网技术,2010,34(5): 8-12.

[2] 赵宇明,黎小林,吕金壮,等. 高海拔地区外绝缘参数海拔修正方法研究[J]. 南方电网技术,2011,5(2): 59-63.

[3] 方启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术, 2012, 38(10):2499-2505.

[4] 谷琛,张文亮,范建斌. 超/特高压输电工程典型间隙操作冲击放电特性试验研究综述[J]. 电网技术, 2011,35(1):11-17.

[5] 张楚岩,张福增,陈昌龙,等. 高海拔地区直流特高压大尺寸复合外绝缘污闪特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 20-28.

[6] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064-2014[S], 2014.

[7] 高电压试验技术 第1 部分:一般定义及试验要求: GB/T 16927.1-2011[S], 2012.

[8] Insulation Coordination, Part 2: Application Guide (3rd

ed.):IEC 60071-2:1996[S],1996.

[9] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620-1997[S],1998.

[10] 电力金具试验方法:GB/T 2317.2-2008[S],2008.

[11] 罗强,罗鸣,黄瑞平,等.高海拔500 kV 输电线路绝缘子污闪特性试验研究[J].四川电力技术,2018,41(3):25-30.

作者简介:
罗琦(1964),高级工程师,从事输电线路技术设计;

=====

(上接第5 页)

[7] 熊浩,孙才新,廖瑞金,等.基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):162-166.

[8] 董明,孟源源,徐长响,等.基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):88-92.

[9] 黄卫春,刘建林,熊李艳.基于样本-特征值加权的可能性模糊核聚类算法[J].计算机工程与科学,2014,36(1):169-176.

[10] 宋志杰,王健.模糊聚类和LM 算法改进BP 神经网络的变压器故障诊断[J].高压电器,2013,49(5):54-59.

[11] 李俭,孙才新,陈伟根,等.灰色聚类与模糊聚类集成诊断变压器内部故障的方法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(2):112-115.

[12] 陈灿.基于粒子群算法的模糊聚类研究[D].桂林:广西师范大学,2005.

[13] 李超顺,周建中,安学利,等.基于加权模糊核聚类的发电机组振动故障诊断[J].中国电机工程学报,2008,28(35):79-83.

[14] 周开乐,杨善林,丁帅,等.聚类有效性研究综述[J].系统工程理论与实践,2014,34(9):2417-2431.

[15] 范九伦,吴成茂.可能性划分系数和模糊变差相结合的聚类有效性函数[J].电子与信息学报,2002,24(8):1017-1021.

[16] Xie X L, Beni G. A Validity Measure for Fuzzy Clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 841-847.

[17] Yue Shihong, Wang J, Wu T, et al. A New Separation Measure for Improving the Effectiveness of Validity Indices[J]. Information Science, 2010, 180(5): 411-423.

[18] 岳士弘,黄婕,王鹏龙.基于矩阵特征值分析的模糊聚类有效性指标[J].天津大学学报,2014,47(8):689-696.

[19] Watking D S. Fundamentals of Matrix Computation [M]. USA: John Wiley & Sons, 2002.

[20] 马叶芝,焦彦军,王东升,等.变压器故障诊断中溶

解气体的 PSO-WFCM 算法研究[J].高压电器,2014,50(1):72-76.

[21] 田质广,张慧芬.基于遗传聚类算法的油中气体溶解气体分析电力变压器故障诊断[J].电力自动化设备,2008,28(2):15-18.

[22] 雷浩轺,刘念,崔东军,等.基于GA 与PSO 混合优化FCM 聚类的变压器故障诊断[J].电力系统保护与控制,2011,39(22):52-56.

[23] 董慧康.基于人群搜索-支持向量机的心脏病多生理参数诊断方法研究[D].天津:河北工业大学,2014.

[24] 魏立兵,赵峰,王思华.基于人群搜索算法优化参数额支持向量机短期电力负荷预测[J].电测与仪表,2016,53(8):45-49.

[25] 周健,黄昕,邹剑,等.变压器油中溶解气体故障诊断的改进模糊算法[J].广东电力,2015,28(3):86-91.

[26] 孙才新,郭俊峰,廖瑞金,等.变压器油中溶解气体分析中的模糊模式多层聚类故障诊断方法的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(2):37-41.

[27] 韩富春,廉建鑫,高文军,等.改进PSO 与模糊聚类相结合的变压器故障诊断[J].电气技术,2011,5(2):1-4.

作者简介:
陶飞达(1986),高级工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

吴杰康(1965),教授、博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等;

曾振达(1984),高级工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

梁浩浩(1993),硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制等;

邹志强(1987),工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

张丽平(1977),工程师,研究方向为配电系统运行与控制等;

黄智鹏(1988),助理工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究;

杨夏(1982),工程师,主要从事配电网管理及新技术的应用研究。

(收稿日期:2018-03-16)

高海拔 500 kV 输电线路绝缘子污闪特性试验研究

罗 强¹,王 强¹,罗 鸣¹,黄瑞平²,张劲骁¹
(1. 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:针对 500 kV 交流输电线路高海拔问题,利用西藏高海拔实验基地人工污秽实验室和北京人工污秽实验室,分别对 500 kV 输电线路工程用典型绝缘子进行了高海拔真实环境和平原地区下的不同污秽条件的人工污秽实验,得到了典型盐密下的绝缘子串的闪络电压,以及闪络电压与海拔高度之间的关系曲线。
关键词:500 kV 输电线路;高海拔;外绝缘;污秽闪络;海拔校正
中图分类号:TM216 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0025-06

Research on Pollution Flashover Performance of Insulators on 500 kV Transmission Lines in High Altitude Area

Luo Qiang¹, Wang Qiang¹, Luo Ming¹, Huang Ruiping², Zhang Jinxiao¹
(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract:In pollution laboratories of high altitude test base in Tibet and UHVDC test base in Beijing, artificial pollution tests of insulators adopted in 500 kV transmission projects are carried out both in plain regions and real high altitude regions, through which flashover voltages at typical ESDD are obtained. Relation curve between altitude and flashover voltage is acquired as well. According to the test results, insulator units and string length are also recommended for 500 kV transmission lines in high altitude area.
Key words:500 kV transmission line; high altitude; external insulation; pollution flashover; altitude correction

0 引 言

随着海拔的增加绝缘子沿面放电电压会随之下降,且下降程度与施加电压类型、绝缘子几何形状和污秽程度有关,这一规律目前已得到广泛的认可,但对不同伞形绝缘子的下降系数仍在研究之中。受试验条件的限制,目前国内外相关研究单位进行实地高海拔条件的污秽试验能力仅限于海拔 2000 m 左右,更高海拔条件下的污秽试验只能在气压罐内实现,其结果与现场实际试验研究结果尚未得到充分的对比。下面从以往研究的不足之处入手,做了以下研究:1)收集国内外绝缘配合资料,主要包括科研单位的最新成果和国外在该领域的最新动态。全面分析项目开展的背景,确定影响污闪特性的各种

因素。2)完成海拔 4000 m 以上、不同盐密(如 0.05 mg/cm²、0.1 mg/cm²)、灰密(1.0mg/cm²)条件下的典型的 500 kV 线路用瓷绝缘子或玻璃绝缘子的污闪特性研究,结合低海拔数据,获得海拔 5500 m 以下各海拔高度的污闪电压值。3)提出海拔 4000 ~ 5500 m 条件下的绝缘子污秽闪络海拔校正方法及修正系数。4)推荐 500 kV 线路所需绝缘子片数和串长,以及海拔修正系数。

1 高海拔污闪放电研究现状

国际上对高海拔地区的外绝缘研究较少,针对高海拔外绝缘的污闪特性研究,日本和加拿大采用平板模型或缩小尺寸的绝缘子进行了试验,前苏联和瑞典则尝试进行了真型绝缘子试验,但试验结果

相差较大,参考价值有限。国内各单位对高海拔条件下绝缘子染污放电研究,主要是在各学校的小尺寸试验装置中完成的,采用的试验条件和方法均存在一定差异,且涉及的悬式绝缘子类型有二十几种,因此各自的研究结果不尽相同。通过分析各单位的试验结果,可得出以下结论:1)各型绝缘子的污闪电压随海拔升高或气压降低而降低,可用 $U = U_0 (P/P_0)^n$ 表征,指数 n 反映了污闪电压随海拔升高的降低程度;2)下降指数 n 与施加电压的种类相关;3)下降指数 n 和绝缘子的几何形状以及污秽程度相关。但总的来说,受试验能力缺乏以及现场海拔条件下的验证结果缺乏等因素的困扰,国际上对污闪电压高海拔修正还没有具有说服力的定论^[1-5]。

2 500 kV 线路绝缘子串污闪特性试验

2.1 试验设备及试验方法

2.1.1 试验设备

绝缘子污闪试验选择在西藏高海拔试验基地和国家电网公司特高压试验基地同步开展。两个试验基地采用相同的试验设备参数。由柱式调压器 T_1 (10 kV/0 ~ 10.5 kV, 1000 kVA)、工频试验变压器 T_2 (10 kV/200 kV, 1000 kVA)、保护电阻 R_1 (5 k Ω)、电容分压器 V. D (200 kV) 和测量系统组成。200 kV 试验变压器可采用 100 kV 和 200 kV 两种接线方式,这次试验采用 200 kV 接线方式^[6-7]。

交流污秽试验电源最高电压为 200 kV,其系统接线及试验装置如图 1 和图 2 所示,图 1 中: $T.O$ 为试品绝缘子串, R_2 为测量泄漏电流的电阻。

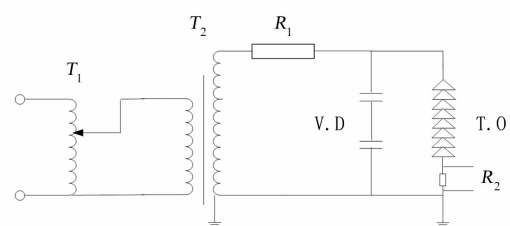


图 1 200 kV 交流污秽试验电源主回路原理

雾室的净空尺寸长、宽、高分别为 9 m、9 m 和 11 m,满足这次人工污秽试验试品要求。试验电压通过雾室南墙的直、交流超高压穿墙套管引入,套管额定电压为交流 330 kV、直流 ± 250 kV^[8-9]。

试验所需的蒸汽由产气量为 0.3 t/h 的电锅炉



图 2 200 kV 交流污秽试验电源

制备,可快速、安全、连续给人工污秽试验室供蒸汽雾。注入电锅炉的水经过水处理设备进行过滤、软化。蒸汽经减压分配装置后从雾室北侧送入,沿雾室四周安装有 $\Phi 65$ mm 的不锈钢蒸汽雾排管,距地面高度为 0.3 m^[11-13]。

GB/T 4585 - 2004 (IEC 60507:1991, IDT)《交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》中“固体层法”要求蒸汽雾的流量为 (0.05 ± 0.01) kg/(h · m³),所用锅炉最大设计可达到 0.33 kg/(h · m³),通过安装于分气缸出口下端的电动调节阀和压力变送器的反馈调节,可以将雾量以合适的恒定压力输入雾室,从而使热雾速率均匀、大小恒定,满足前述标准中关于蒸汽流量的要求。经试验前调试检验,在某设定值条件下,起雾 15 ~ 25 min 后可使瓷绝缘子表面达到饱和受潮,满足 GB/T 4585 - 2004 附录 D 的要求。

2.1.2 试验方法

试验采用固体层法。按照 GB/T 4585 - 2004 中的规定,采用清洁雾对先行施加电压的染污绝缘子进行湿润,直至闪络或耐受结束的方法。

试品采用定量涂刷法进行染污,可溶物采用纯度为 99.5% 的 NaCl,所有惰性成分都采用高岭土。用精密数字天平对污秽物进行精确称量并等分分装。

试验中对每串试品染污并自然干燥,且只使用一次,在下一次试验时对已冲洗干净的试品重新进行涂刷。每次试验持续至试品饱和受潮后 30 min (或起雾后 45 min) 结束,若试验过程中发生闪络则本次试验提前结束。

试验中保证雾室的温度和试品的温差不超过 5 K,进行第 2 次试验前需使雾室与外界空气达到平衡,

每次试验结束后,将雾室中的蒸汽全部排放干净。

试品耐受电压 $U_{50\%}$ 采用升降法得到。在给定污秽度情况下,采用有效试验的数据来求取此污秽度下的 $U_{50\%}$,有效试验需进行 10 次以上。具体计算公式为

$$U_{50\%} = \frac{\sum (n_i \times U_i)}{n}$$

(1)

式中: U_i 为施加的试验电压,kV; n_i 为在同一电压水平 U_i 下的试验次数; n 为有效试验的次数^[14-17]。

2.1.3 试品

交流绝缘子试品采用 210 kN、300 kN、420 kN、550 kN 的悬式盘型绝缘子,其几何参数见表 1。

2.1.4 试验条件

在特高压直流基地,针对每种型号绝缘子,试验在至少 4 种盐密条件下开展,灰密统一采用 1.0 mg/cm²,上下表面污秽比为 1:1。在西藏高海拔试验基地(海拔 4300 m),试验在盐密分别为 0.05 mg/cm² 和 0.1 mg/cm²、灰密为 1.0 mg/cm² 条件下开展,上下表面污秽比为 1:1^[18]。

2.2 试验结果

2.2.1 不同伞形不同海拔的污闪电压比较

分别对 FC-210P 型和 XWP-210 型绝缘子进行交流人工污秽试验,对比不同伞形绝缘子在不同海拔高度下的污闪特性,试验结果见表 2。

以试验盐密为 0.05 mg/cm² 条件下结果为例,将两种绝缘子不同海拔下的污闪电压进行了比较,

如图 3 所示。

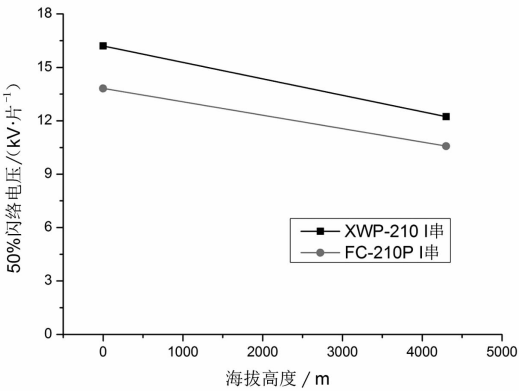


图3 两种绝缘子在不同海拔条件下污闪特性比较

由图 3 可以看出,对试验盐密 0.05 mg/cm² 的 I 型绝缘子串,采用 FC-210P 型绝缘子在 4300 m 和 50 m 两种实际海拔条件下的污闪电压分别为 10.58 kV 和 13.82 kV。通过实验结果拟合对比 XWP-210 型绝缘子的试验结果可知,钟罩型玻璃绝缘子与双伞型瓷绝缘子相比,钟罩型绝缘子的单片污闪放电电压在海拔 4300 m 和 0 m 条件下分别低 13.5% 和 14.7%。根据本次研究试验结果,可看出双伞型绝缘子 XWP-210 污耐压特性要优于钟罩型绝缘子 FC-210P;海拔高度对两种绝缘子的污闪电压造成的下降比例相近。因此对于试验采用的两种绝缘子,推荐使用积污性能和污耐压性能均较优的双伞型绝缘子。

2.2.2 高海拔下污闪电压值确定

按照线性外推的原则,以 FC-210P 绝缘子为

表 1 悬式绝缘子的几何参数

序号	材质	型号	生产厂家	伞型	结构高度/mm	爬电距离/mm	盘径/mm	机械负荷/kN
1	电瓷	XWP-210	大连电瓷	普通	170	450	300	210
2	玻璃	FC-210P	赛迪维尔	普通	170	450	280	210
1	电瓷	CA-590EZ	NGK	普通	195	505	320	300
5	电瓷	CA-596EZ	NGK	普通	205	550	340	400
7	电瓷	CA-597EZ	NGK	普通	240	700	380	530

表 2 4300 m 和 0 m 海拔条件下污闪试验结果

布置 方式	盐密/ (mg·cm ⁻²)	灰密/ (mg·cm ⁻²)	上下表面 积污比	海拔高度 /m	单片绝缘子 50% 闪络电压/kV	
					FC-210P	XWP-210
I 串	0.05	1.0	1:1	4300	10.58	12.23
I 串	0.1	1.0	1:1	4300	9.60	—
I 串	0.05	1.0	1:1	50	13.82	16.2
I 串	0.1	1.0	1:1	50	12.58	—

表 3 FC-210P 玻璃绝缘子 4000 m 和 5500 m 海拔条件下污闪电压值

布置方式	盐密/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	灰密/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	上下表面 积污比	海拔高度 /m	单片绝缘子 50% 闪络电压/kV
I 串	0.05	1.0	1:1	4000	10.62
I 串	0.1	1.0	1:1	4000	9.78
I 串	0.05	1.0	1:1	5500	9.42
I 串	0.1	1.0	1:1	5500	8.73

例,在 4000 m 和 5500 m 条件下,其闪络电压外推曲线如图 4 所示。

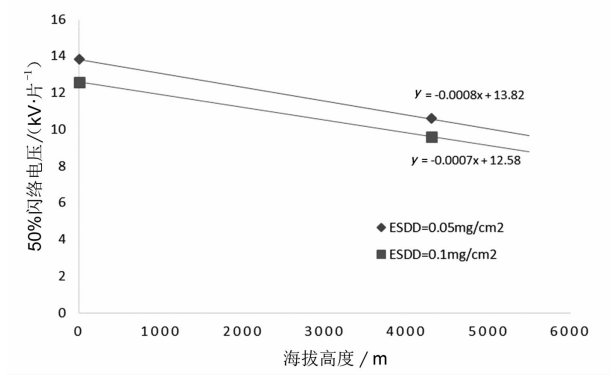


图 4 FC-210P 闪络电压外推曲线

可以看出,FC-210P 绝缘子分别在盐密 0.05 mg/cm^2 和 0.1 mg/cm^2 (灰密 1.0 mg/cm^2) 条件下,其 $U_{50\%}$ 闪络电压和海拔关系分别为

$$\begin{aligned}U_{50\%} &= -0.8H + 13.82 \\U_{50\%} &= -0.7H + 12.58\end{aligned}\tag{2}$$

式中: H 为海拔高度,km。

由此可以得出,FC-210P 绝缘子在 4000 m 和 5500 m 海拔下,对应两种盐密的污闪电压见表 3。

此外,在 4300 m 实际高海拔条件下,对 300 kN、420 kN、550 kN 三种强度的绝缘子,在试验盐密为 0.05 mg/cm^2 和 0.1 mg/cm^2 、灰密为 1.0 mg/cm^2 的条件下,开展了人工污闪试验,获得污闪电压如图 5 所示。

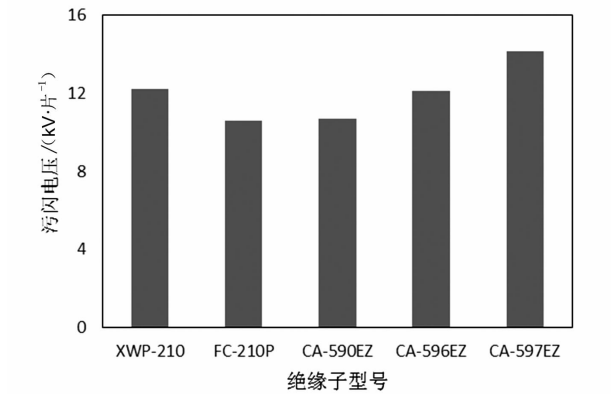


图 5 高海拔污闪电压

3 海拔校正方法和系数

3.1 海拔校正方法

由于染污绝缘放电特性主要受高海拔气压降低的影响。大气压随着海拔升高而逐渐降低,相应的绝缘污闪电压也会降低。污闪电压与大气压之间的非线性关系可用式(3)表示。

$$U = U_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \tag{3}$$

式中: P_0 为海拔 0 m 时的标准大气压,MPa; U_0 为标准大气压 P_0 时的绝缘子污闪电压,kV; n 为反映气压对于污闪电压影响程度的下降指数。

从式(3)可知,由于污闪电压和气压之间是非线性的关系,不便于工程设计中绝缘子串长的选择。

表 4 为气象部门提供的海拔高度和气压的对应数据。

对表 4 中数据,进行曲线拟合,可以得出:

$$P = 0.102\,2\text{e}^{-0.127\,2H} \tag{4}$$

拟合公式的相关系数 $R^2 = 0.999\,6$,于是由式(3)可得:

$$\begin{aligned}\frac{U}{U_0} &= \left(\frac{P}{P_0} \right)^n = \left(\frac{0.102\,2\text{e}^{-0.127\,2H}}{0.101\,3} \right)^n \\&= \left(\frac{0.102\,2}{0.101\,3} \right)^n \times \text{e}^{-0.127\,2nH}\end{aligned}\tag{5}$$

泰勒级数展开,有:

$$\begin{aligned}\text{e}^{-0.127\,2nH} &= 1 - 0.127\,2nH + \frac{0.127\,2^2 \times n^2 \times H^2}{2!} - \\&\quad \frac{0.127\,2^3 \times n^3 \times H^3}{3!} = 1 - 0.127\,2nH + \\&\quad 0.008\,1n^2H^2 - 0.000\,34n^3H^3\end{aligned}\tag{6}$$

令式(5)系数 $\left(\frac{0.102\,2}{0.101\,3} \right)^n = I$,从表 5 可见,式

(5)的系数 I 在 n 从 0 ~ 1 的范围内,与 1 最大相差 0.008 59。因此可以近似认为系数 I 为 1。

表 4 气压和海拔高度的对应关系(青藏高原)

海拔高度 H/km	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
气压 P/MPa	0.101 33	0.098 95	0.096 61	0.094 32	0.092 08	0.089 87	0.087 72
海拔高度 H/km	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
气压 P/MPa	0.085 6	0.083 52	0.081 49	0.079 5	0.077 54	0.075 63	0.073 75
海拔高度 H/km	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
气压 P/MPa	0.071 91	0.070 11	0.068 34	0.066 62	0.064 92	0.063 26	0.061 64
海拔高度 H/km	4.2	4.4	4.6	5.4	5.6	5.8	6.0
气压 P/MPa	0.060 05	0.058 49	0.056 97	0.051 19	0.049 83	0.048 49	0.047 18

表 5 不同 n 值下的式(5)的系数 I

n	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
I	1	1.000 86	1.001 71	1.002 57	1.003 43	1.004 28
n	0.6	0.7	0.8	0.9	1	—
I	1.005 14	1.006 00	1.006 86	1.007 72	1.008 59	—

所以：

$$\frac{U}{U_0} = 1 - 0.127\ 2nH + 0.008\ 1n^2H^2 - 0.000\ 34n^3H^3 \tag{7}$$

忽略二次项和三次项,得到：

$$\frac{U}{U_0} = 1 - 0.127\ 2nH \tag{8}$$

令 $k = 0.127\ 2n$,则海拔高度和闪络电压之间的关系为

$$\frac{U}{U_0} = 1 - kH \tag{9}$$

式(9)也可以换算为

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0 - U}{U_0} = kH \tag{10}$$

式中: $k = 0.127\ 2n$,可称为下降斜率,反映随海拔高度升高污闪电压下降的斜率; U_0 为海拔高度 0 m 时污闪电压,kV; U 为海拔高度 H 时的污闪电压,kV; H 为海拔高度,km。

由式(10)可知,海拔高度每升高 1 km,污闪电压就下降 k 倍。 k 能简单明了地表示出污闪电压随海拔升高的下降程度。而且下降斜率 k 有明确的物理意义,能更明显地表示出海拔高度对污闪电压的影响。相对于采用物理意义无法清晰表述的 n 来反应闪络电压随气压之间的非线性关系, k 更便于工程设计应用^[19-22]。

因此,对于 4000 ~ 5500 m 的海拔条件,可采用上述海拔校正方法。

3.2 海拔校正系数

根据高海拔试验结果,不同机械强度和伞形的

绝缘子其系数如图 6 所示。

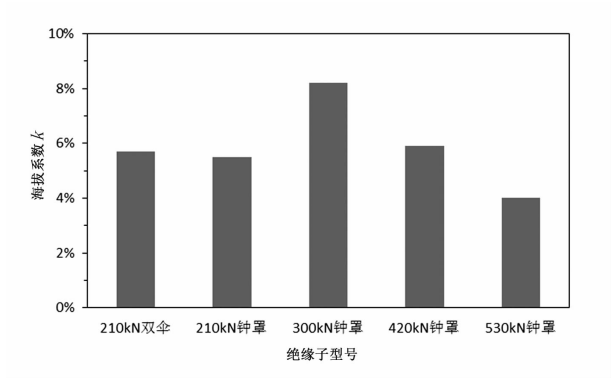


图 6 不同绝缘子海拔系数

530 kN(CA - 597EZ)、420 kN(CA - 596EZ)、300 kN(CA - 590EZ)、210 kN 钟罩绝缘子海拔下降系数 k 平均值为 5.9%,最大值为 7.9%。对于双伞型 210 kN 绝缘子,其 k 为 5.5%。

按照保守考虑,对于工程所用绝缘子,外伞形和钟罩型绝缘子取 7.9%。

3.3 500 kV 交流线路绝缘子片数选择

考虑目前高海拔地区工程以轻中冰区为主,且污区划分以 b 级为主,c 级污区零星分布,暂无 d 级及以上污区,故仅针对 b 级和 c 级污区开展研究。

表 6 10 mm、15 mm 冰区复合绝缘子推荐长度

海拔 H/m	3000	4000	5000	5500
绝缘子长度/m	5.3	5.6	5.8	5.96

注:其中,金具长度按 0.54 m 计算;复合绝缘子按照外伞形考虑,高海拔修正系数为 0.055,即海拔每升高 1000 m,绝缘子闪络电压下降 5.5%。

根据上述原则,按照 c 级污区计算,以 I 串为基

表 7 10 mm、15 mm 冰区绝缘子推荐片数

型 号	结构高度	爬电距离	污秽等级	片 数				
				3000 m	4000 m	4500 m	5000 m	5200 m
210 kN 外伞形	170	450	b 级	25	27	28	29	30
210 kN 钟罩形	170	450	b 级	29	31	32	33	34
210 kN 外伞形	170	450	c 级	30	32	33	34	35
210 kN 钟罩形	170	450	c 级	32	35	36	37	37
300 kN 钟罩形	195	545	c 级	29	31	32	33	34
420 kN 钟罩形	205	550	c 级	28	29	30	32	33
550 kN 钟罩形	240	635	c 级	25	27	28	29	30

注:表中 300 ~ 550 kN 绝缘子为交流标准型推荐片数,外伞形具有更好的积污性能,但是考虑到高原地区积污特性的积累数据较少,因此建议外伞形绝缘子串片数按照标准型绝缘子串片数同等考虑。

础,保守考虑,V 串、耐张串与 I 串积污相同(串长一致),海拔系数取 7.9%。计算得出 500 kV 交流输电线路的片数和串长,复合绝缘子长度推荐见表 6,瓷/玻璃绝缘子片数推荐见表 7。

4 结 语

1)总结了国内外高海拔污闪放电与海拔修正的相关成果,推导了污闪电压随海拔下降的程度与海拔高度成线性关系。

2)在北京特高压直流基地和西藏高海拔试验基地,开展了 0 m 和 4300 m 海拔条件下的交流绝缘子人工污秽试验,在试验盐密为 0.05 mg/cm² 和 0.1 mg/cm² 条件下,对 210 kN、300 kN、420 kN 和 550 kN 的悬式盘型绝缘子进行了污闪试验,获得了污闪特性。按照线性外推的原则,给出了 FC-210P 绝缘子在海拔 4000 m 和 5500 m 时两种盐密下的污闪电压值。

3)结合不同海拔条件的试验结果,给出了 4000 ~ 5500 m 海拔条件下的污闪海拔修正方法,即适用于工程的随海拔高度下降的线性表达式。获得了不同海拔条件下的海拔修正系数。钟罩绝缘子海拔下降系数 *k* 平均值为 5.9%,最大值为 7.9%。对于双伞型 210 kN 绝缘子,其 *k* 为 5.5%。按照保守考虑,对于工程所用绝缘子,外伞形和钟罩型取 7.9%。

4)基于污耐受法,推荐了 500 kV 交流输电线路绝缘子片数及串长。

参考文献

[1] 华普校. 格尔木盐湖地区高海拔输电线路外绝缘问题

研究[D]. 北京:华北电力大学,2002.

[2] 孙昭英,丁玉剑,廖蔚明,等. 青藏直联联网工程空气间隙的海拔校正[J]. 电网技术,2010,34(5):8-12.

[3] 王向朋,周军. 特高压直流用绝缘子污闪特性研究概况[J]. 企业技术开发,2010,29(15):31-33.

[4] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[5] 王向朋,周军,王黎明,等. 高海拔下特高压直流绝缘子的污闪特性[J]. 高电压技术,2008,34(9):1869-1874.

[6] 杨建明. 污秽绝缘子泄露电流监测系统的设计[D]. 北京:北京交通大学,2008.

[7] 任泽生,赵莉华,于昕哲,等. 三伞玻璃型绝缘子泄露电流特性研究[J]. 电气应用,2015(8):72-76.

[8] 宿志一,周军,李武峰,等. 交流特高压 1 000 kV 级绝缘子选型研究[J]. 中国电力,2006,39(10):15-20.

[9] 周建博,奚海波,张乔根. 基于泄露电流的复合绝缘子憎水性能诊断技术[J]. 绝缘材料,2014(2):76-83.

[10] 万小东,黄浩,徐涛,等. 绝缘子长串交流污耐压特性及海拔修正系数[J]. 高电压技术,2015,41(12):4144-4149.

[11] 孙昭英,廖蔚明,宿志一,等. ±800 kV 直流输电工程空气间隙海拔校正系数试验研究[J]. 电网技术,2008,32(22):13-16.

[12] 李武峰,范建斌,李鹏,等. 直流绝缘子串污秽闪络特性研究[J]. 电网技术,2006,30(15):21-24.

[13] 汪洋,王志明,潘灵敏. 影响绝缘子污闪电压的综合因素分析[J]. 电力与能源,2016(1):123-128.

[14] 张志劲. 低气压下绝缘子(长)串污闪特性及直流放电模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.

[15] 汪洋,王志明. 影响绝缘子污闪电压因素的分析[J]. 电力安全技术,2016,18(7):32-36.

计及 LVRT 控制的直驱风电机组三相短路故障特性研究

陈伟伟,吕盼,张增强,宋新甫,刘明红,翟旭京,卫俊辰

(国网新疆电力有限公司经济技术研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:直驱风力发电机由于其优越性成为了主流机型并广泛应用于风电场,而其具备低电压穿越能力后故障特征将发生很大变化,目前对此尚无系统的研究。研究分析了直驱风电机组的数学模型和控制策略,在此基础上结合提出的 LVRT 方法搭建了直驱风电场仿真模型,验证了其低电压穿越能力,并仿真对比分析了计及低穿控制策略下的机组三相短路故障特性,研究了影响其三相短路故障特性的相关因素。指出风电场中以电流大小为动作判据的涉网保护在配置整定时需要考虑上述因素的影响。

关键词:直驱风电机组;低电压穿越;三相短路;故障特性;影响因素

中图分类号:TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0031-07

Research of Three – phase Short – circuit Fault Characteristics for Direct – driven Wind Turbine with Low – voltage Ride – through Capability

Chen Weiwei, Lv Pan, Zhang Zengqiang, Song Xinfu, Liu Minghong, Zhai Xujing, Wei Junchen
(State Grid Economic and Technology Research Institute of Xinjiang
Electric Power Company, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Direct – driven wind turbine generator is widely used in wind farm because of its superiority. Its fault characteristics will be changed greatly because of low – voltage ride – through (LVRT) capability, but there is no systematic analysis and research about it. The PMSG topology structure and control strategy are studied and analyzed. The direct – driven wind farm model is established in PSCAD platform to verify its LVRT capability, and its three – phase short – circuit fault characteristics are simulated and compared considering LVRT strategy. The relevant factors that affect the three – phase short – circuit fault characteristics also are analyzed. It is pointed out that the above – mentioned factors need to be considered in the protection setting.

Key words: direct – driven wind turbine; low – voltage ride – through (LVRT); three – phase short circuit; fault characteristics; influencing factor

0 引言

随着能源与环境问题的日益加剧,在国家政策大力支持风电发展的背景下,风电发展迅猛,风电容量的不断增长给系统的安全稳定运行、风电保护配置带来巨大挑战。近年来中国甘肃、新疆等风电基地发生多次脱网事故,印证了风电对电网的不利影响^[1-4]。为此要求风电并网需具备低电压穿越(low

– voltage ride – throgh, LVRT)能力。直驱风力发电机由于其优越性成为了主流机型并广泛应用于风电场,而其具备 LVRT 能力后其故障特征将发生很大变化,对此尚无系统的分析研究,这将对保护配置和整定影响较大。

目前故障特征研究关注点主要集中在不具备 LVRT 的风电机组,但是对具有 LVRT 能力的风电机组的故障特征缺乏研究,特别是关于直驱风电机组的故障特征仍然没有得到深入充分的研究。

下面研究分析了直驱风电机组的数学模型和控制策略^[5-7],并基于直驱风电机组常采用的 LVRT 策略在 PSCAD 仿真软件中建模,仿真验证机组低电压穿越能力。在此基础上仿真对比分析了直驱风电机组三相短路故障特性,并仿真分析了影响其三相短路故障特性的相关因素,这对风电场以电流大小为动作判据的保护配置及整定值修改提供了一定依据。

直驱风电机组建模

1.1 直驱风电机组数学模型

直驱永磁同步风电机组主要由风力机、永磁同步发电机、全功率变流器(机侧 PWM 变流器和网侧 PWM 变流器)及控制系统 4 部分组成,其拓扑结构如图 1 所示。

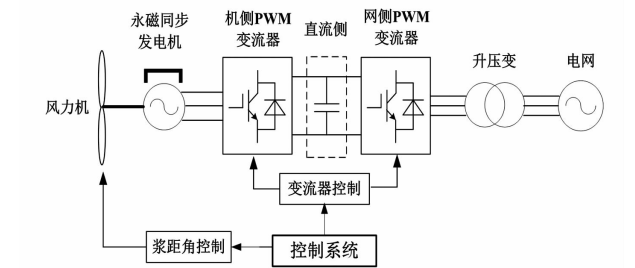


图 1 直驱风力发电机系统结构

永磁同步发电机在 $d、q$ 坐标轴下的模型为

$$\begin{cases} U_d = -R_s i_d - \omega_r \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\ U_q = -R_s i_q - \omega_r \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

在 $d、q$ 坐标系下定子磁场的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_f + L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

联立以上两式得

$$\begin{cases} U_d = -R_s i_d - \omega_r L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ U_q = -R_s i_q - \omega_r L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_d、U_q$ 分别为机端电压的 $d、q$ 轴分量; $L_d、L_q$ 分别为定子电感 $d、q$ 轴分量; $i_d、i_q$ 分别为机端电流的 $d、q$ 轴分量; ω_r 为发电机电磁转速; ψ_f 为磁通; R_s 为定子电阻。

1.2 直驱风电机组变流器控制策略

1.2.1 机侧变流器控制策略

发电机侧整流器采用转子磁场定向矢量控制,

通过调节定子侧 $d、q$ 轴电流对有功、无功进行解耦控制,实现发电机转速的控制。

由式(3)可得其定子稳态电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s L_s i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s \psi \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{sd}、i_{sd}$ 和 $u_{sq}、i_{sq}$ 分别为 d 轴和 q 轴定子电压、电流分量; $R_s、L_s$ 分别为发电机定子的电阻和电感; ω_s 为发电机转速; ψ 为转子永磁体磁链。

风电机组机侧变流器采用三相电压型变流器,其简化数学模型如式(5)。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{S_d}{L} \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L} \\ \frac{S_d}{C} & \frac{S_q}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ i_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

机侧变流器采用外环转速控制,实现对发电机最佳转速的跟踪;采用内环电流控制实现机组单位功率因数运行^[8]。控制策略如图 2 所示。

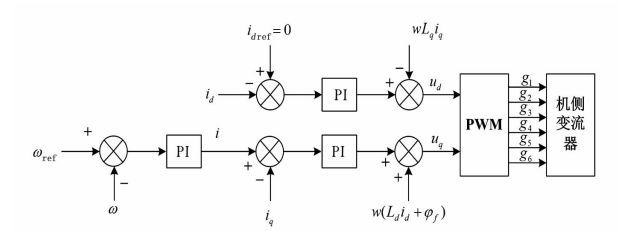


图 2 机侧变流器控制策略

1.2.2 网侧变流器控制策略

网侧变流器在 $d、q$ 坐标系下输出的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_g = u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq} = u_{gd} i_{gd} \\ Q_g = u_{gq} i_{gd} - u_{gd} i_{gq} = -u_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (6)$$

将 d 轴定向在电网电压 E_g 上,则 d 轴电压分量为 E_g , q 轴分量为 0。式(6)可改写为

$$\begin{cases} P_g = E_g i_{gd} \\ Q_g = -E_g i_{gq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i_{gd}、i_{gq}$ 分别为电流有功和无功分量。可以看出,电网侧 PWM 逆变器通过调节网侧的 d 轴和 q 轴电流,可以保持直流侧电压稳定。

风电机组网侧变流器采用三相电压型变流器,其简化数学模型为

• 33 •

了4台单机容量为1.5 MW的直驱风电机组(相关参数见表1),主变压器侧无功补偿容量为1.5 MVA,仿真验证风电机组的低电压穿越能力。仿真算例中, $t=2.0\text{ s}$ 时风电场升压变压器高压侧电压跌落至0.2 p.u.,电压跌落持续时间为0.625 s,仿真结果如图9所示。

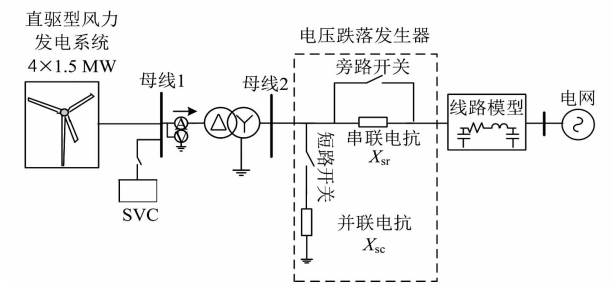


图8 直驱风电系统 LVRT 仿真模型

表1 直驱风电机组参数

额定容量 /MW	额定频率 /Hz	额定风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	定子电阻 /(p.u.)
1.5	50	12	0.005 876
转子电阻 /(p.u.)	定子电抗 /(p.u.)	转子电抗 /(p.u.)	互感电抗 /(p.u.)
0.006 613	0.976	0.163 4	5.136

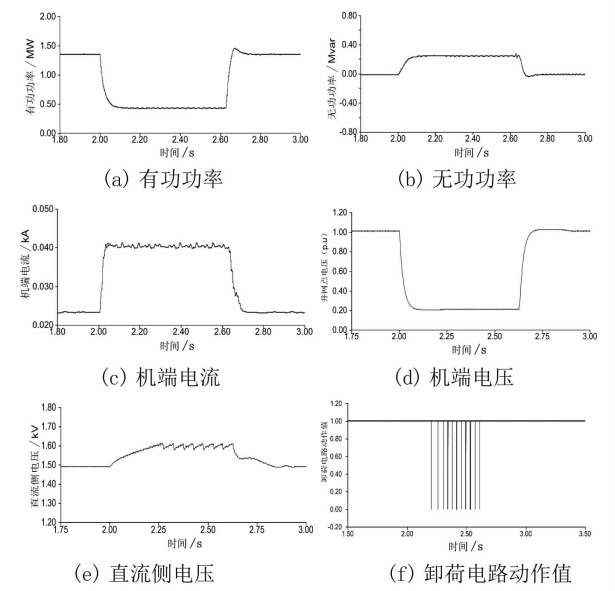


图9 直驱机组低电压穿越特性

仿真结果表明:发生电压跌落时,直流母线电压升高,在卸荷电路作用下,直流母线电压未超限;跌落期间机组发出无功;在电压跌落结束后,从电网吸收部分无功,随后机组有功无功恢复到正常水平。所提策略满足风电并网规程对风电机组低电压穿越要求,验证了直驱风电机组具备低电压穿越能力^[13]。

3 直驱风电机组的三相短路特性

基于上述仿真模型,仿真在 $t=2.0\text{ s}$ 时风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障,故障持续时间为0.1 s,仿真结果如图10所示。

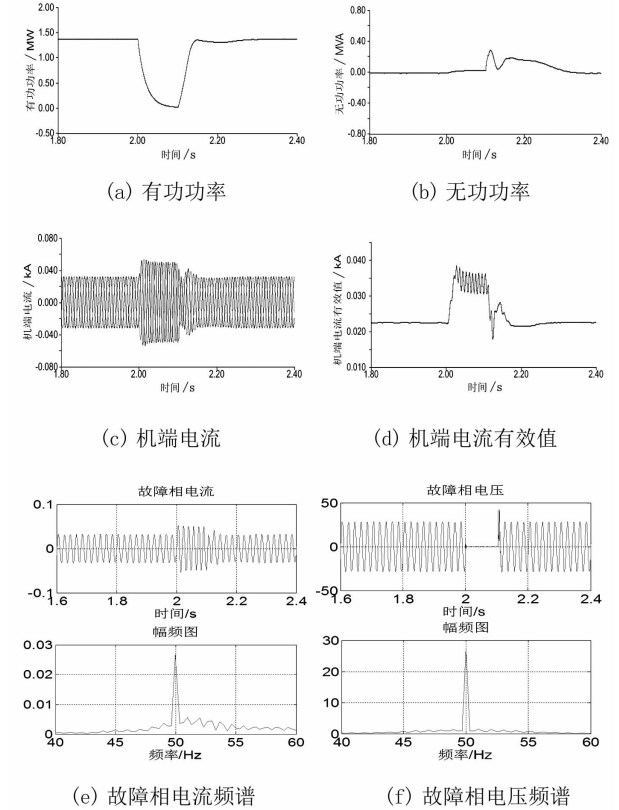


图10 三相短路特性

由仿真结果对比可知:直驱风电机组具备低电压穿越能力后,其故障电压特性和频率特性无明显变化,而其电流特性存在明显变化且故障电流显著增大。具备低电压穿越能力的直驱风电机组机端故障电流值约为额定电流的1.79倍,而不具备低电压穿越能力的直驱风电机组故障电流约为额定电流的1.5倍^[14],故障电流大小相差0.29倍左右,这会影响到以电流大小为动作判据的保护动作特性,下节将对此展开详细分析。

4 影响机组三相短路故障特性的因素

从风电机组运行、控制和并网角度出发,分析风速、运行方式、无功控制策略、无功补偿、低电压穿越策略等因素对机组三相短路故障特性的影响。仿真条件:在 $t=2.0\text{ s}$ 时风电场升压变压器高压侧发生

三相短路故障,故障持续时间为0.1 s。

4.1 风速变化

直驱风电机组分别在风速为9 m/s、11 m/s 和13 m/s 下运行,不同风速下风机出口短路电流及故障电流频率如图 11 所示。

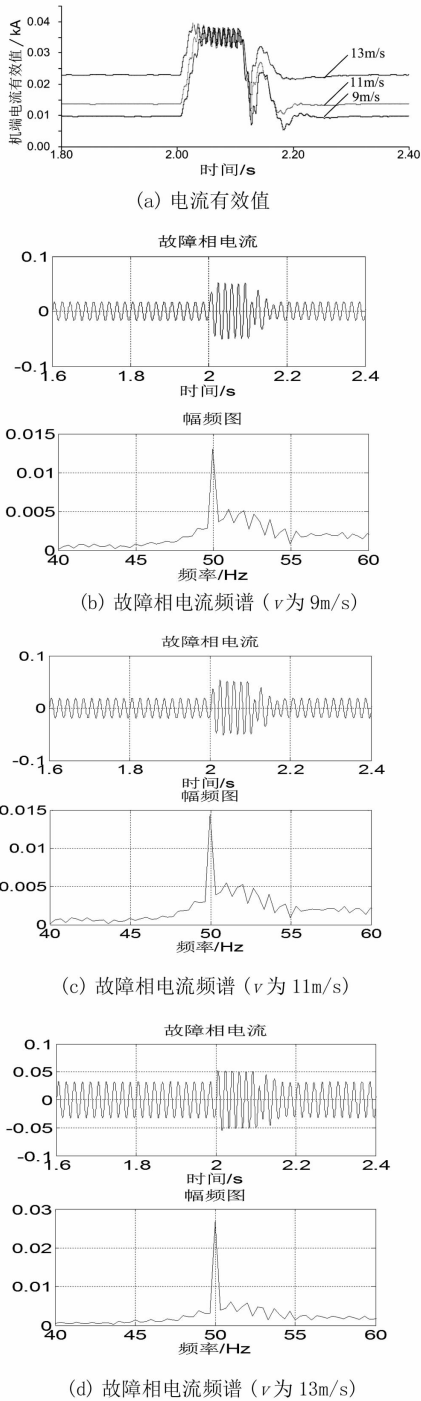


图 11 不同风速下的故障电流

由仿真结果可知,当风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障时,运行在不同风速下的风电机组出口短路电流大小一样,且在故障期间运行在不同风速下的风电机组故障电流频率仍为工频,不受

故障前后风速大小的影响。因此可知风速对风电机组故障电流幅值大小及频率均无影响,只影响故障前机组电流的大小。

4.2 运行方式

考虑到风电出力、风电投切机组数目及检修停运等因素造成风电场运行方式的多变,故在以下 3 个方式下仿真比较分析风电场在不同运行方式下的风电机组三相短路电流特性,找出影响其故障电流特性的主要原因,仿真结果如图 12 所示。

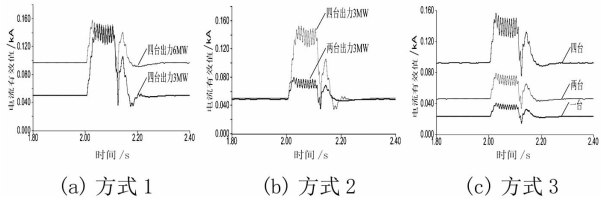


图 12 不同运行方式下的故障电流

方式 1:相同风电机组数目下不同风电出力;方式 2:相同风电出力下不同风电机组数目;方式 3:不同风电机组数目下不同风电出力。

当风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障时,由图 12(a)可知,在相同风电机组数目、不同风电出力的方式下,风电机组出口短路电流大小一样;由图 12(b)可知,在相同风电出力、不同风电机组数目的方式下,短路电流随着风电投运机组数目的增加而增加;由图 12(c)可知,在不同风电机组数目、不同风电出力的方式下,风电机组数目不同短路电流大小也不一样。综上可知,在运行方式的变化中影响短路电流特性的主导因素是风电投运机组数目,这与风电场自身运行及检修方式有关,短路电流大小并不受风电出力大小的变化而变化。

4.3 无功控制策略

直驱风电机组在额定风速下运行,仿真比较故障时风电机组网侧变流器采用不同功率因数时的直驱风电机组出口短路电流,仿真结果如图 13 所示。

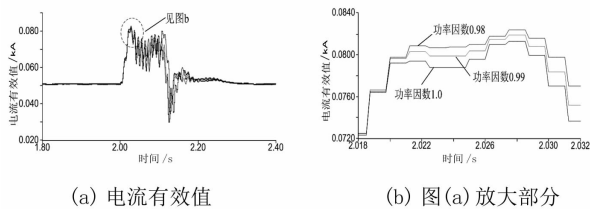


图 13 不同无功控制策略下的故障电流

由仿真结果可知,当风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障时,运行在不同功率因数下的风

电机组出口短路电流大小不一,短路电流大小随着功率因数的降低而逐渐增大,对于风电场整体而言其对故障电流的影响不容忽视。

4.4 无功补偿

直驱风电机组在额定风速下运行,仿真比较风电场无功补偿容量分别为0 MVA、1.5 MVA、3 MVA时直驱风电机组出口短路电流,仿真结果如图14所示。

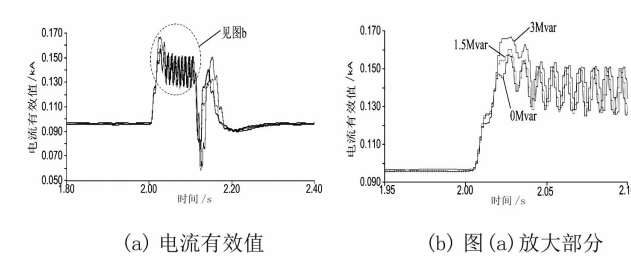


图14 不同无功补偿容量下的故障电流

由仿真结果可知,风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障时,风电场无功补偿容量为0 MVA时,风电机组短路电流最大值为0.156 kA;风电场无功补偿容量为1.5 MVA时,风电机组短路电流最大值为0.16 kA;风电场无功补偿容量为3 MVA时,风电机组短路电流最大值为0.166 kA。由此可知风电机组短路电流随着风电场无功补偿容量的增加而增加。对于风电场整体而言其对故障电流的影响同样不容忽视^[15]。

4.5 低电压穿越策略

直驱风电机组在额定风速下运行,仿真比较采取不同低电压穿越策略下的直驱风电机组出口短路电流,仿真结果如图15所示。

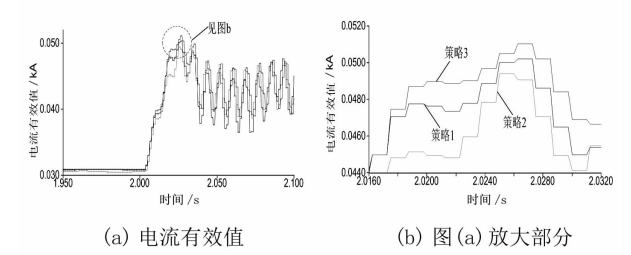


图15 不同低电压穿越策略下的故障电流

策略1:风电机组采用“直流卸荷电路+无功补偿”策略。

策略2:风电机组采用“直流卸荷电路+网侧变流器发无功控制”策略。

策略3:风电机组采用“直流卸荷电路+网侧变流器发无功控制+无功补偿”策略。

由仿真结果可知,风电场升压变压器高压侧发生三相短路故障时,风电机组采用不同的低电压穿

越控制策略,其提供的故障电流大小也不同。由此可知风电机组采取的低电压穿越策略也是影响风电场短路电流特性的因素之一。

5 结 语

结合直驱机组结构特点,提出适合直驱风电机组的LVRT策略——“直流卸荷电路保护+网侧无功控制策略+SVC无功补偿”。系统全面地分析了直驱风电机组的低电压穿越特性及故障特性,研究表明直驱风电机组具备低电压穿越能力前后,其故障电压特性和频率特性无明显变化,而其故障电流特性存在差异且电流幅值明显增大。分别从风电场运行风速、机组无功控制策略、风电场运行方式、机组低电压穿越策略、风电场无功补偿5个方面,研究了影响其三相短路故障特性的因素,并指出其三相短路故障特性主要受运行方式、无功控制策略、LVRT策略以及无功补偿等因素的影响。这对风电场保护及涉网保护的整定产生一定的影响,同样会对保护动作特性产生影响,特别是会影响以电流为动作判据的保护动作特性。在风电场保护整定分析中应考虑上述影响,尤其是大规模接入的风电基地。

参考文献

- [1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
- [2] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
- [3] 刘闯, 晁勤, 袁铁江, 等. 不同风电机组的短路特性及对接入网继电保护的影响[J]. 可再生能源, 2013, 31(2): 24-29.
- [4] 乔新亮. 直驱机组风电场对电网继电保护影响的研[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013.
- [5] 阎智, 林雪峰. 直驱风电机组的风电场建模及联络线故障研究[J]. 电力勘察设计, 2015, 2(2): 73-77.
- [6] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
- [7] 阎智, 林雪峰. 具有低电压穿越能力的双馈风电场故障特性分析[J]. 电力勘察设计, 2015, 5(5): 75-80.
- [8] 尹明, 李庚银, 张建成等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
- [9] 蔺红, 晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制

仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010, 38(21): 189 – 195.

[10] 张谦,李凤婷,蒋俊凤. 一种 PMSG 低电压穿越综合控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(4): 123 – 129.

[11] 李凤婷,张谦,黄蓉等. 机组参与调节的双馈机组低电压穿越综合控制策略[J]. 中国电力,2016,49(3): 141 – 147.

[12] 齐尚敏,李凤婷,何世恩等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2015 ,43(14):55 – 62.

[13] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统低电压

运行特性的分析[J]. 电力系统自动化,2007 ,31(17):73 – 77.

[14] 栗然,高起山,刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J]. 电网技术,2011,35(10): 153 – 158.

[15] 熊小伏,张涵轶,欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011,39(19):89 – 93.

作者简介：
陈伟伟(1989), 硕士,研究方向为可再生能源并网技术与电力系统规划设计。

(收稿日期:2018 – 01 – 15)



(上接第 11 页)

对改进算法的下垂控制波形图与未经过改进的下垂控制图形进行比较可知,改进后 3 台逆变器的电流基本保持一致,并联逆变器间基本无环流,输出的有功和无功基本均衡。

5 结 语

由于实际微电网的逆变器输出阻抗不同,其到公共并网点距离长短不一,在实现阻感性或者纯阻性线路的逆变器有功、无功功率的均分时各逆变器的电压幅值和相位不一致,容量与线路阻抗成反比,采用传统下垂控制策略,很难实现逆变器的功率均分。

前面通过对传统下垂控制算法的有功、无功分析,设计了引入虚拟阻抗的电压电流双环控制策略;提出一种改进型多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法。实验仿真结果表明,改进型多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法提高了多逆变器的并联性能,有效减小了多逆变器并联运行环流问题,大大提高了多逆变器并联运行的无功均衡效果。

参考文献

[1] 黄宜平,马晓轩. 微电网技术综述(英文)[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 320 – 328.

[2] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2 – 17.

[3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57 – 70.

[4] 吴玖蓉,陶顺,肖湘宁. 某海岛微电网的孤岛协调控制策略研究[J]. 电气应用,2015,34(9):22 – 27.

[5] 马伟,王维庆,王海云. 微电网在孤岛模式运行时的下垂控制策略研究[J]. 电气传动,2017,47(1):18 – 22.

[6] 徐晓龙,微电网逆变器运行控制策略的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.

[7] 杨琦,马世英,李胜,等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报,2011,39(S1):1 – 5.

[8] 李红萍,杨洪耕,曾巧燕. 孤岛型微电网中逆变器并联运行控制策略[J]. 电测与仪表,2016,53(6):62 – 68.

[9] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(16):7 – 13.

[10] 支娜,张辉,肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报,2016,31(3): 31 – 39.

[11] 闫俊丽,彭春华,陈臣. 动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(21):1 – 6.

[12] 郭诚,顾军,张武,等. 孤岛微网中基于虚拟负阻抗的改进下垂控制[J]. 电气传动,2016,46(6):49 – 53.

[13] 张平,石健将,李荣贵,等. 低压微电网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014, 34(12):1844 – 1852.

[14] 天兵,雷金勇,许爱东,等. 低压微电网孤岛模式下改进下垂控制策略[J]. 水电能源科学,34(3):204 – 208.

[15] 高春风,杨仁刚,王江波,等. 基于虚拟频率的微电网下垂控制策略设计[J]. 电网技术,2013,37(12): 3331 – 3335.

作者简介：
刘树伟(1988), 硕士研究生,研究方向为新能源并网与发电。

(收稿日期:2018 – 01 – 15)

考虑负荷不确定性的微电网优化调度研究

杜继成¹, 张真源², 张宇馨²

(1. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041; 2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要:近年来,随着能源危机及环境污染问题不断加重,微电网作为一种新型的能源网络化供应与管理结构,为新能源的广泛接入提供了一种有效途径,在降低能耗减少环境污染的同时也提高了系统运行的可靠性和灵活性。为提升微电网运行的经济性与节能环保性,基于含风力、光伏、燃气轮机、燃料电池及蓄电池的微电网模型,在综合考虑能量供需平衡、爬坡速率约束及蓄电池充放电容量条件下,运用混合整数规划优化方法,建立了考虑负荷的不确定性因素下以离网型微电网为主的微电网经济调度模型。

关键词:微电网; 优化调度; 经济性; 负荷的不确定性

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954 (2018) 03 - 0038 - 05

Microgrid Optimal Dispatching Strategy Considering Load Uncertainty

Du Jicheng¹, Zhang Zhenyuan², Zhang Yuxin²

(1. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing of energy crisis and environment pollution in recent years, the microgrid, as a new type of energy network supply and management structure, provides an effective way to increase the integration of renewable energy resources. It can reduce energy consumption and environmental pollution, and at the same time it can also improve the reliability and flexibility of the system. In order to improve the operation performance of microgrid from economic and environmental point of view, a microgrid model with wind turbine, photovoltaic, micro gas turbine, fuel cell and battery is established. With the consideration of load uncertainty, energy balance of supply and demand, ramp rate constraints and battery charge/discharge capacity constraints, the mixed integer programming based islanding microgrid optimal economic dispatch strategy has been developed.

Key words: microgrid; optimal dispatching; economy; load uncertainty

0 引言

近年来随着世界经济的快速发展,世界各国对能源的需求不断增大,一方面,造成全球能源供应的日益紧张;另一方面,也带来了诸如气候恶化、温室效应等严重的环境问题。因此,提升新能源利用比例、改善能源结构、缓解能源利用与环境保护之间的矛盾,已成为当前能源及电力体系的发展共识和必然趋势。

微电网(Microgrid)是一种新型的能源网络化供应与管理结构,由分布式电源、储能装置、控制装置及负荷组成。相对于传统电网发电系统,微电网可

有效实现大规模分布式电源的灵活接入与高效利用,在降低能耗和减少环境污染的同时,也提高了系统的可靠性与灵活性。

随着微电网技术的不断成熟,微电网功能和结构日趋复杂,对微电网运行的经济、环保、可靠性的要求也不断提高^[1]。如何改善提升其运行的经济性与环保性,已成为当前国内外微电网优化运行的研究热点。文献[2]建立了包括建设及折旧费用、维护费用、无功补偿成本及政府新能源补贴的经济性目标,而微电网的环保性通过系统的污染物排放惩罚来衡量;通过基于改进的遗传算法对优化模型进行求解。文献[3]将微电网的环保性用环境成本来计算,将其与经济性目标列入同一个目标函数;其

经济性目标函数考虑了并网时的运行成本、运行维护成本、MT 的燃料成本及制冷制热收益;利用改进的鸡群算法对优化模型进行求解。但上述研究仅将微电网环保性改善作为首要前提,未同时考虑运行方式对于微电网经济性的影响。文献[4]将经济成本及 CO₂ 的排放量作为调度优化的两个目标,采用将模糊矩阵引入传统粒子群算法中的方法,协同优化两目标。文献[5]在以运行成本最小为优化目标的基础上,考虑了风力发电及光伏发电的功率预测存在误差,通过贝塔分布拟合出有误差的可再生能源发电功率曲线,研究其误差大小对微电网稳定经济运行的影响。但上述研究仅针对固定发电单元进行优化,未考虑多种能源接入的协调问题。

为解决上述问题,搭建了含风力、光伏、燃气轮机、燃料电池及蓄电池等多供能主体的微电网模型,在综合考虑能量供需平衡、爬坡速率约束及蓄电池充放电容量限制条件下,运用混合整数规划优化方法,建立了考虑负荷的不确定性因素下以离网型微电网为主的微电网经济调度模型,并针对多种典型负荷场景对建立的模型准确性进行了验证。

1 分布式电源的数学模型

1.1 风机发电模型

风机的发电量由风速决定,已知风速即可求出出力。风机出力与风速的关系可近似表示为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_l, V \geq V_r \\ aV^3 - bP_r & V_l \leq V < V_r \\ P_r & V_r \leq V < V_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_r 为风机额定功率; V 为风力发电机所受的风速; V_o 为额定风速; a 和 b 为风机出力曲线的拟合参数,其计算公式为

$$\begin{cases} a = \frac{P_r}{V_r^3 - V_l^3} \\ b = \frac{V_l^3}{V_r^3 - V_l^3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_l 为切入风速; V_r 为切出风速。

1.2 光伏发电模型

光伏发电的发电量由光照强度及环境温度决定,在标准测试条件下,光伏电池的输出功率为

$$P_{PV} = P_{STC} (G_T / G_{STC}) \cdot [1 - k(T_c - T_r)] \quad (3)$$

式中: P_{STC} 为标准测试条件(即太阳光照强度 1000 Lux,环境温度 25℃ 时)下的最大测试功率; G_T 为运行时的光照强度; G_{STC} 为标准测试条件下的光照强度; k 为功率温度系数,取 $-0.47^{[6]}$; T_r 为参考温度; $T_c = T_e + 30 \cdot (G_T / 1\,000)$, T_e 为运行时的环境温度。

1.3 燃料电池模型

燃料电池是一种将燃料和氧化剂中的化学能不经过燃烧直接转换为电能的装置,因此燃料电池不受卡诺循环的限制。因其能量转换效率高、启动速度快、体积小、污染小等优点,广泛应用于微电网。燃料成本的计算如式(4)。

$$C_{FC} = (C_M / L) \cdot \sum (P_{FC}(t) \cdot \Delta t / \eta_{FC}(t)) \quad (4)$$

式中: C_M 为天然气的市场价格,取 2.5 元/m³[7]; L 为天然气的低热值,取 9.7 kWh/m³, $P_{FC}(t)$ 为 t 时刻的净输出电功率; $\eta_{FC}(t)$ 为燃料电池的效率。

1.4 燃气轮机模型

微型燃气轮机是一种小型的热动装置,功率一般在 30 ~ 250 kW,以天然气、甲烷、汽油等作为燃料,因其可靠性高、体积小、污染小等优点,使其具有广泛的商业发展前景,适用于各种环境的微电网。

燃气轮机的燃料成本计算与燃料电池的相近:

$$C_{FC} = (C_M / L) \cdot \sum (P_{FC}(t) \cdot \Delta t / \eta_{FC}(t)) \quad (6)$$

1.5 蓄电池模型

蓄电池具有电能双向流动、可兼顾容量和功率需求、优异的环保效益等优势,蓄电池等储能装置在微电网中占据着重要作用。特别是在微电网工作于离网模式时,由于失去了与大电网交互能量的途径,蓄电池作为既可充电亦可放电的装置,可暂时替代大电网的部分功能,所以蓄电池在微电网中的应用至关重要。

蓄电池充放电时主要涉及其剩余容量的计算,通过计算其剩余容量,即可知道何时能充电或放电,以及充放电电量。蓄电池 t 时刻的剩余容量,与前一时刻的剩余电量及充放电量相关,计及蓄电池的自放电率与充放电效率,其剩余容量计算公式如下^[8]。

放电时, $P(t) > 0$:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\delta) - \frac{P_{SB}(t)}{\eta_{SB}} \quad (6)$$

充电时, $P(t) < 0$:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\delta) - P_{SB}(t)\eta_{SB} \quad (7)$$

式中: $SOC(t)$ 为蓄电池 t 时刻的容量; δ 为蓄电池的自放电率; P_{SB} 为蓄电池 t 时刻的充放电量; η_{SB} 为蓄电池的充放电效率。

通过建立各分布式电源发电功率的数学求解模型, 即可根据现有的可测量的数据求解分布式电源的发电功率。进而通过建立微电网的优化调度模型, 可优化各分布式电源的出力情况。

2 微电网的优化模型

2.1 目标函数

下面将综合考虑到微电网运行的经济性与环保性, 且微电网处于离网模式下的优化模型, 不考虑微电网与外网交互的成本。目标函数可分为经济性与环保性。

1) 经济性

考虑微电网一天内的发电成本最低, 其中发电成本包括燃料成本、投资折旧成本、运行维护成本。其目标函数表达式为

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) \quad (8)$$

式中, $f_1(t)$ 为燃料成本, 其计算公式为

$$f_1(t) = C_{FC} + C_{MT} \quad (9)$$

式中, C_{FC} 、 C_{MT} 分别为燃料电池及微型燃气轮机的燃料成本。

$f_2(t)$ 为设备投资折旧成本, 其计算公式可表示为^[9]

$$f_2(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{AZ,i}}{8760k_i} \cdot \frac{r(1+r)^q}{(1+r)^q - 1} \cdot P_i(t) \right] \quad (10)$$

式中, $P_i(t)$ 为第 i 个分布式电源的在 t 时刻的出力; $C_{AZ,i}$ 为第 i 个分布式电源的单位容量安装成本; k_i 为第 i 个分布式电源的容量因数; r 为年利率; q 为第 i 个分布式电源投资回收年限。

$f_3(t)$ 为设备运行维护成本, 其计算公式可表示为^[10]

$$f_3(t) = \sum_{i=1}^n K_{WH,i} \cdot P_i(t) \quad (11)$$

式中, $K_{WH,i}$ 为第 i 个分布式电源的单位电量运行维护成本系数。

2) 环保性

通过将分布式电源排放的污染物的量, 转化为其因排放污染物所需付出的环境保护成本来计算。

$$f_4 = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^n C_{HB}(m) \cdot k_{mi} \cdot P_i(t) \quad (12)$$

式中, M 为排放的气体的种类总数; $C_{HB}(m)$ 为每种排放的气体对应的环保治理费用; k_{mi} 为第 i 个设备排放第 m 种气体时的排放因子。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

任意时刻各分布式电源的出力之和需满足微电网的负荷需求。

$$P_L(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (13)$$

2) 各分布式电源的出力约束

任意时刻分布式电源的出力不能超出自身最大、最小功率的限制^[15]。

$$P_i(t)_{\min} \leq P_i(t) \leq P_i(t)_{\max} \quad (14)$$

式中, $P_i(t)_{\min}$ 与 $P_i(t)_{\max}$ 分别为第 i 个分布式电源出力的最大值与最小值。

3) MT 的爬速率约束

增出力时, 有:

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq P_{up,MT} \quad (15)$$

前后两个调度时间的出力之差应小于其爬坡速率。

减出力时, 有:

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq P_{down,MT} \quad (16)$$

式中, $P_{up,MT}$ 、 $P_{down,MT}$ 分别为微型燃气轮机增出力 and 减出力时单位时间内的变化功率限制。

4) 蓄电池的相关约束

蓄电池在充电或者放电时, 每次充放电的电量有所限制; 其充放电后, 蓄电池的容量要保持在限值之内; 在一天的调度周期内, 蓄电池的始末容量需保持相同。

所建立的蓄电池充电模型, 选择了最大输出功率为 100 kW, 单位时间内的输出功率不超过最大输出功率的 20%。其表达式为

$$\begin{cases} P_+ \leq 0.2 \cdot P_{SB,max} \\ P_- \leq 0.2 \cdot P_{SB,max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_+ 为蓄电池放电时的功率; P_- 为蓄电池充电时的功率; $P_{SB,max}$ 为蓄电池的最大输出功率。

蓄电池总的容量还需要控制在一定范围内。在蓄电池充电的时候, 其充电后的最大容量不能超过其自身的最大容量。蓄电池在放电的时候, 如果放电深度过大, 会降低蓄电池的使用寿命, 所以需限制放电后最小剩余容量, 即将其规定为放电后蓄电池的容量不小于最大容量的 20%。其数学表达式为

$$SOC_{SB,max}(t) \cdot 20\% \leq SOC_{SB}(t) \leq SOC_{SB,max}(t) \quad (18)$$

式中： $SOC_{SB,max}(t)$ 为蓄电池充放电时可以充放电容量的最大值； $SOC_{SB}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的容量值。

为满足蓄电池循环调度的前提，蓄电池在一个周期的充放电电量需满足始末平衡。即可表示为蓄电池在一个调度周期内充放电电量相同：

$$\sum SOC_{SBC} = \sum SOC_{SBF}$$

(19)

蓄电池可以工作于充电、放电两种状态下，为求解模型方便，引入状态开关变量 $O_c(t)$ 、 $O_f(t)$ 来表示蓄电池在 t 时刻的充放电状态。在 t 时刻， $O_c(t)$ 值为 1 则表示充电， $O_f(t)$ 值为 1 则表示放电。则式 (17)、式 (18)、式 (19) 可表示为

$$\begin{cases} P_+ \leq 0.2 \cdot P_{SB,max} \cdot O_c(t) \\ P_- \leq 0.2 \cdot P_{SB,max} \cdot O_f(t) \end{cases}$$

(20)

式中，

$$O_c(t) + O_f(t) = 1$$

(21)

在蓄电池参与优化调度时，如频繁地转换蓄电池的充放电状态，也会导致蓄电池的使用寿命变短。为延长蓄电池的使用寿命，还需对蓄电池的充放电次数进行限制，故引入状态变量 $N_{SB}(t)$ ，对其进行如下定义：

$$N_{SB}(t) = |O_c(t) - O_c(t-1)|$$

(22)

式中， $O_c(t-1)$ 为蓄电池上一个调度时间的开关变量状态值。蓄电池在一个调度周期内充放电次数的约束条件可表示为

$$N_{SB} = \sum_{t=1}^n N_{SB}(t) \leq N_{SB,max}$$

(23)

式中， $N_{SB,max}$ 为蓄电池一个调度周期内最大的充放电转换次数。

3 算例及分析

3.1 微电网系统结构

采用 9 节点的辐射状的微电网验证所建模型，在满足系统约束条件下实现微电网能量优化分配。微电网结构如图 1 所示。考虑微电网负载容量，设置风电单元容量、光伏单元容量、微型燃气轮机单元容量、燃料电池单元容量及储能单元容量分别为 20 kW、12 kW、65 kW、40 kW、120 kW。

3.2 模型参数

5 个负荷曲线示意如图 2 所示。
主要各分布式电源单元参数设置见表 1。

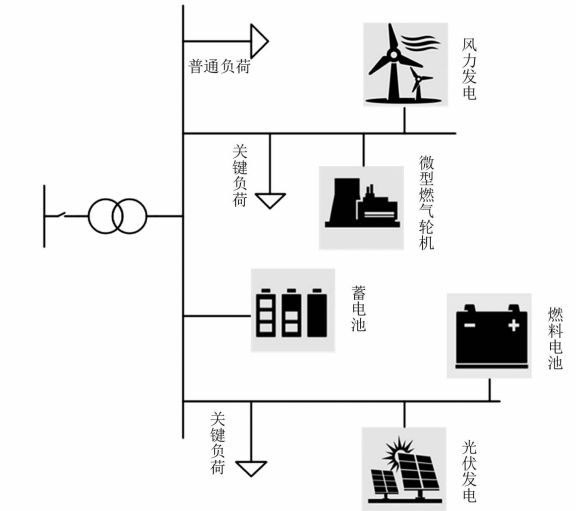


图 1 微电网结构

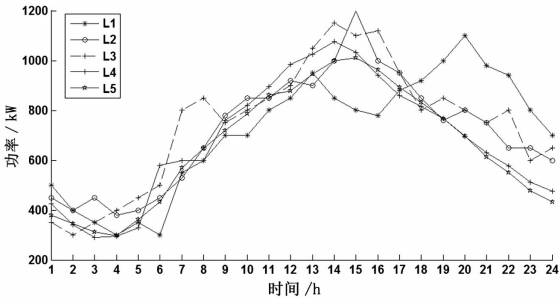


图 2 各种负荷曲线

表 1 各分布式电源参数

设备名称	参数名称	数 值
微型燃气轮机	出力上限/kW	65
	向上爬坡速率/(kW · h ⁻¹)	120
	向下爬坡速率/(kW · h ⁻¹)	100
	安装成本/(万元 · kW ⁻¹)	1.35
	使用年限/年	10
	运行维护成本/(元 · kWh ⁻¹)	0.08
	天然气价格/(元 · m ⁻³)	2.5
	天然气低热值/(kWh · m ⁻³)	9.7
燃料电池	出力上限/kW	40
	安装成本/(万元 · kW ⁻¹)	2.8
	使用年限/年	10
	运行维护成本/(元 · kWh ⁻¹)	0.1
	天然气价格/(元 · m ⁻³)	2.5
	天然气低热值/(kWh · m ⁻³)	9.7
蓄电池	额定功率/kW	20
	额定容量/kWh	100
	安装成本/(万元 · kW ⁻¹)	0.066 7
	使用年限/年	10
	运行维护成本/(元 · kWh ⁻¹)	0.083 2
	最大剩余容量/%	100
	最小剩余容量/%	10
	充电效率	0.9
	放电效率	0.9
	自放电率	0.001

3.3 优化结果

利用 Matlab 求解优化模型,在满足各分布式电源的约束前提下,以提高微电网的经济性与可靠性为前提,得出各分布式电源在各时刻的出力。微电网的负荷往往具有随机性,每日的负荷曲线差异较大,需验证此优化调度模型能否满足各类型的负荷需求。根据图 2 选取负载曲线 L1 至 L3 进行优化验证,各负载情况下的系统运行优化结果见图 3 至图 5。

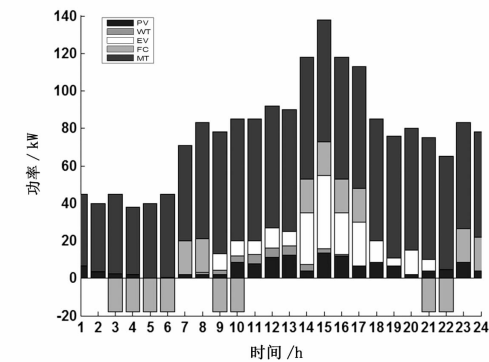


图 3 情况 1 时的优化结果

图 3 为系统在负荷曲线 1 下的运行优化结果。根据图 2 负荷特性可知,在 0:00—06:00 期间为负荷的低谷时期,因此蓄电池切换至充电模型,其电能由风电及微型燃气轮机发电提供;14:00—17:00 为负荷高峰期,且系统的负荷需求高达 140 kW,此时微型燃气轮机已满发,需利用蓄电池放电,满足系统的负荷需求,保障系统的稳定运行。

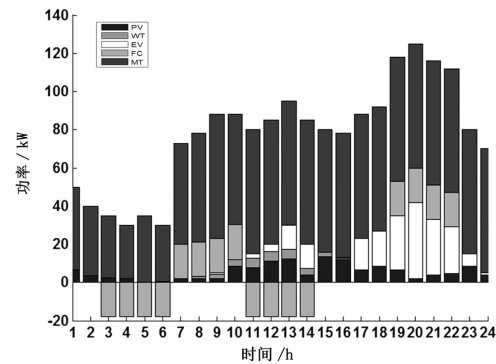


图 4 情况 2 时的优化结果

图 4 为系统在负荷曲线 2 下的运行优化结果。负荷曲线 2 的负荷高峰期为 19:00—22:00。如图 4 所示,此高峰时段微型燃气轮机已满发,需要蓄电池配合放电才可以满足系统负荷需求。由于该负荷条件下负荷高峰期时间出现较晚,此时蓄电池虽然已经过了两次充放电的转换,但依旧是满电量状态,因此在保证系统可靠性的同时保障了运行的经济性。

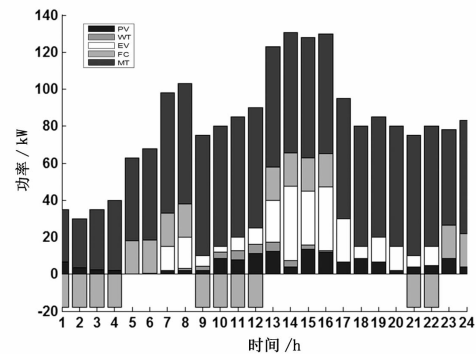


图 5 情况 3 时的优化结果

图 5 为系统在负荷曲线 3 下的运行优化结果。负荷曲线 3 的负荷低谷期为 0:00—04:00,因此蓄电池在较早时开始充电,随后根据负载变化不断切换放电、充电,但依旧保证了在负荷高峰期时达到满电量状态,从而满足负荷高峰期的系统调度需求。

4 结 语

建立了在保障微电网运行可靠性的前提下,以提高微电网的经济性与环保性为目标的优化调度模型,加大了蓄电池在微电网系统中的比重。所建立的模型包含风、光、微型燃气轮机、燃料电池、蓄电池,考虑能量供需平衡、爬坡速率约束及蓄电池充放电容量等约束条件。在 3 个负荷场景下,检验负荷的不确定性对微电网调度优化的影响,实验证明,所建立的微电网模型可有效工作于负荷不确定的模式。

参考文献

[1] 杨毅,雷霞,叶涛,等. 考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19):3080-3088.

[2] 赵磊,曾芬钰,王霜,等. 基于经济性与环保性的微电网多目标优化调度研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 127-132.

[3] 胡汉梅,李静雅,黄景光. 基于改进鸡群算法的微电网优化运行研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 19-25.

[4] 邱晓燕,赵劲帅,史光耀,等. 基于 HSMOPSO 算法的微电网经济与环保协同优化方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1223-1230.

[5] 赵波,薛美东,陈荣柱,等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 1-8.

[6] 牛铭,黄伟,郭佳欢,等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.

(下转第 81 页)

配电网架空绝缘导线暂态载流能力计算与评估

张 禹¹,江少成¹,何 良²,吕世超¹,奚晓航¹,奚海波³

(1. 上海海能信息科技有限公司,上海 201315;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:城市配电网用电负荷快速增长和供电走廊稀缺会造成用电高峰时期部分配电网供电线路出现重载或过载现象,威胁电网运行安全。输电线路暂态载流能力实时计算与评估对于缓解当前城市配电网供电紧张的局面具有重要意义。基于架空绝缘导线等值热路模型、导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组,并考虑日照等外界热源条件和风、雨水等外界有利散热因素,提出了架空绝缘导线暂态载流能力评估方法。根据该计算模型重点分析了导线温升过程,计算了导线暂态载流量和安全运行时间。最后,基于架空绝缘导线的在线监测系统数据,评估了实际运行线路暂态载流能力。研究表明:现行运行规程规定的线路载流量限值过于保守,配电网架空导线具有很大的供电潜力。

关键词:架空绝缘导线;导体温度;安全运行时间;暂态载流量;增容运行

中图分类号:TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0043-05

Calculation and Evaluation for Transient Current Carrying Capacity of Overhead Insulated Conductor in Distribution Network

Zhang Yu¹, Jiang Shaocheng¹, He Liang², Lv Shichao¹, Xi Xiaohang¹, Xi Haibo³

(1. Hinner Technology Company, Shanghai 201315, China;

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

3. Jiangsu Power Design Institute Company of China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract:The load of urban distribution network is increasing rapidly, and the power supply corridor is becoming increasingly rare especially in the central area of city, which causes overload or heavy load of some important overhead transmission lines. So the real-time calculation and evaluation of transient current carrying capacity of transmission lines are significant to relieve the tension in power supply. Based on the equivalent thermal model of overhead insulated conductor, the thermal balance equation and transient temperature rise equation set, the evaluation method of transient current carrying capacity is presented considering the effect of sun, wind and rain. The conductor temperature rise is analyzed according to the proposed model, and the transient current carrying capacity and safe running time of the line are given by the calculation methods. Furthermore, the current carrying capacity of a real overhead insulated transmission line is evaluated based on the online monitoring data. The research results show that the current carrying capacity of transmission line is too conservative in the current standards, and the overhead lines of distribution network has a significant power supply potential.

Key words:overhead insulated conductor; conductor temperature; safe running time; transient current carrying capacity; rating operation

0 引 言

近年来,由于中心城市区域负荷增长迅猛,部分

已建配电网线路供电能力已不能满足当地负荷需求,导致用电高峰时期电网运维部门被迫“拉闸限电”或转移负荷。同时,城区供电走廊紧张,新建线路难以满足负荷增长的需求。通过技术改造更换高

载流量导线,会面临建设周期长、资金投入大和停电经济损失等诸多问题。为了解决上述问题,近年来架空配电线路动态增容运行技术已成为研究热点^[1-5]。增容运行技术有两种实现方式:一是突破现行规程限制,提高导线运行允许温度,但这存在安全隐患;二是加装线路在线监测系统,采集导线现场运行工况数据,包括电流、环境温度、光照、风速等参数,用于计算导线暂态载流量,为调度运维人员提供增容的建议与措施,而其技术难点在于导线暂态温升的实时计算。

配电网供电线路包括架空裸导线(钢芯铝绞线和铝绞线等)、架空绝缘导线和电力电缆。随着配电网的进一步发展,为了提升供电安全性,电网公司一直致力于对架空供电线路进行绝缘化改造。截至2016 年年底,国家电网公司下属的城市配电线路架空导线绝缘化率为89.5%,县域已达34.3%,并且呈逐年上升趋势。目前,关于配电线路增容运行技术的研究重点关注架空裸导线^[2,6-10]和电力电缆^[11],其中:裸导线暂态载流量理论计算方法相对成熟,能够计及环境因素对裸导线暂态载流量的影响;电力电缆载流量已可由标准解析式计算,但不能计及环境因素(如风)对电缆允许载流量的影响;对架空绝缘导线的研究则鲜有报道。

下面基于架空绝缘导线等值热路模型、导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组,并考虑外部热源和外界散热等因素,提出配电网架空绝缘导线暂态载流能力计算方法。以挂网运行的动态增容系统实时数据为基础,对某10 kV 绝缘导线暂态载流能力开展全面评估。在不突破现行技术规程的前提下,为调度运维人员提供导线运行温度、暂态载流量、安全运行时间等基础数据,以达到为架空绝缘导线增容运行的目的。

1 架空绝缘导线暂态载流能力计算方法

1.1 架空绝缘导线等效热路模型

架空绝缘导线与单芯电力电缆结构相似,因此现行运行规程中其载流值是依据 IEC 60287 关于单芯电力电缆载流量解析式的计算结果^[11-12],计算时环境参数风速为0 m/s、光照为1000 W/m²,这显然与实际运行情况不符合。绝缘导线结构主要包括:

导体、绝缘介质、导体和绝缘屏蔽层、外护层等。基于单芯电力电缆等效热路模型^[11]并忽略屏蔽层和外护层厚度及其损耗值,所建立的架空绝缘导线等效热路模型如图1所示。基于此模型可建立导线热平衡方程和暂态温升微分方程组。

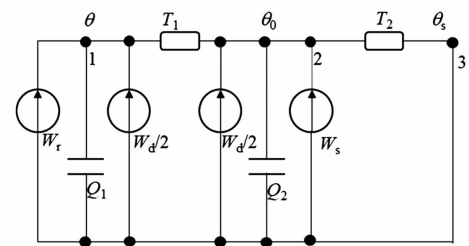


图1 架空绝缘导线等效简化热路模型

图1中: W_r 为单位长度导体流过电流而产生的热损耗, W/m; W_d 为单位长度导线介质损耗, W/m; W_s 为单位长度导线吸收日照产生的热功率, W/m; Q_1 为单位长度导体热容和部分绝缘层热容, J/(K·m); Q_2 为单位长度导线剩余绝缘介质热容, J/(K·m); T_1 为导线导体至绝缘介质的散热热阻, (K·m)/W; T_2 为导线的绝缘介质至空气的散热热阻, (K·m)/W; θ 为导体温度, K; θ_0 为导线表面温度, K; θ_s 为导线周围环境温度, K。架空绝缘导线的发热取决于导线本身损耗与散热条件,导线损耗与运行电流、运行温度已有明确的对应关系,为工程广泛应用;导线散热主要取决于环境参数和导线各部分物理参数。一般认为在运行温度范围内,这些物理参数保持不变^[13]。

1.2 架空绝缘导线热平衡方程

外部环境条件保持不变,当架空绝缘导线通过电流*I*时,导线温度将不断上升,直至导线发热、吸热与散热达到动态平衡。此时,由图1可得:

$$W_r \cdot (T_1 + T_2) + W_d \cdot (0.5T_1 + T_2) + W_s \cdot T_2 = \theta - \theta_s \tag{1}$$

无风情况下,式(1)中各项计算方法可参照文献[11]。当导线处于有风或者下雨环境下时,导线表面散热能力增强,外部等效散热热阻 T_2 减小,由此可定量分析外部散热条件变化对线路允许载流量的影响。当导线处于热平衡状态时,外部等效热阻可由式(2)计算。

$$T_2 = \frac{\theta_0 - \theta_s}{W_r + W_d + W_s} \tag{2}$$

已知导线表面温度和环境温度,根据式(1)、式

(2)可求解当前导线的导体温度。当导线达到热平衡且导体温度达到最大允许长期工作温度(PE/PVC 绝缘为 70℃,XLPE 绝缘为 90℃)时,导线流过的电流 I 就是该环境条件下导线的稳态载流量。

1.3 架空绝缘导线暂态温升微分方程组

当架空绝缘导线运行于环境参数恒定的条件下,其导体温升过程满足:

$$W_r + \frac{W_d}{2} - Q_1 \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_0}{T_1} \tag{3}$$

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_1} + W_s + \frac{W_d}{2} - Q_2 \frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\theta_0 - \theta_s}{T_2} \tag{4}$$

由式(3)、式(4)可见,架空绝缘导线暂态温升过程是关于导体温度 θ 及导线表面温度 θ_0 的一阶线性非齐次微分方程组。

若已知当前环境参数,如光照、环境温度、导线表面温度和导线电流,则可根据式(3)、式(4)计算导体暂态温升过程。假设电流发生阶跃变化,则模型中仅导体热损耗 W_r 会改变,其余参数不变,根据导线暂态温升过程可得到导体达到允许工作温度所需时间(即安全工作时间),此时对应的阶跃电流为导线暂态载流量,据此可绘制导线安全工作时间与暂态载流量工作曲线。

2 计算模型求解

2.1 暂态温升方程组 Runge - Kutta 法求解

如果直接求解方程组(3)、(4)的解析解,计算复杂,不易实现^[14]。采用数值法求解微分方程组,具有求解速度快和误差可控等优点,被广泛应用于各工程领域。Rugne - Kutta 法是一种代表性的数值算法,下面采取经典的 4 阶算法,其计算速度满足工程需求。对于一阶微分方程组,其初值问题数学形

式为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(y,z,x) \\ \frac{dz}{dx} = g(y,z,x) \\ y(x_0) = y_0 \\ z(x_0) = z_0 \end{cases} \tag{5}$$

则 4 阶 Rugne - Kutta 法迭代公式为

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ z_{n+1} = z_n + \frac{h}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \end{cases} \tag{6}$$

式中:

$$\begin{cases} K_1 = f(x_n, y_n, z_n) \\ L_1 = g(x_n, y_n, z_n) \\ K_m = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_{m-1}, z_n + \frac{h}{2}L_{m-1}\right) \\ L_m = g\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_{m-1}, z_n + \frac{h}{2}L_{m-1}\right) \\ m = 2, 3, 4 \\ n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \tag{7}$$

当时间步长 h 取值足够小时,根据初始 x_0 时刻 y_0 和 z_0 的值,由式(6)、式(7)可预测未来 x_n 时刻 y_n 和 z_n 的值。

2.2 仿真数据分析

选择架空绝缘导线型号为 JKLYJ - 10/120,其电气参数见表 1。绝缘导线时间常数较小^[13],当电流发生变化后,导线温度通常能在数分钟内达到稳定,故可认为运行线路在负荷和环境均稳定时,其运行温度也处于稳定状态。计算中初始参数选取某市区供电公司某 10 kV 线路的实测值,具体参数见表 2。

表 1 10 kV 架空绝缘导线电气参数

型 号	载流量 (40℃)/A	导体直径 /mm	绝缘标称 厚度/mm	绝缘线成品 外径/mm	20℃时导体电 阻/(Ω · km)	介质 损耗因数	绝缘介质相 对介电系数
JKLYJ - 10/120	350	13.0	3.4	21.0	0.253	0.004	2.5

表 2 计算初始参数

负荷 /A	辐射 系数	吸热 系数	光照强度 /(W · m ⁻²)	环境温度 /℃	表面温度 /℃	W_r / (W · m ⁻¹)	W_d / (W · m ⁻¹)	W_s / (W · m ⁻¹)	T_1 / (K · m · W ⁻¹)	Q_1 / (J · K ⁻¹ · m ¹)	Q_2 / (J · K ⁻¹ · m ¹)
189	0.4	0.4	499.45	33.1	38.5	11.53	0.012 2	4.22	0.232 9	554.45	298.22

由式(1)、式(2)可得,绝缘导线外皮外部等效热阻 T_2 为 $0.385\ 3\ (\text{K} \cdot \text{m})/\text{W}$,导线导体温度为 $40.8\ ^\circ\text{C}$,与导线表面温差为 $2.3\ ^\circ\text{C}$,导线稳态载流量为 $528\ \text{A}$ 。假设线路负荷电流从 $189\ \text{A}$ 突变至 $400\ \text{A}$,根据 1.3 节导线暂态温升方程组并采用 2.1 节方法求解得到的导线温度变化过程如图 2 所示。线路导体稳态温度为 $65\ ^\circ\text{C}$,与导线表面温差约为 $10\ ^\circ\text{C}$,温升时间常数约 $5.5\ \text{min}$,故可认为线路电流为 $400\ \text{A}$ 时可长期安全运行(即安全运行时间无穷大)。当电流值越大,导线导体与表面稳态温差越大。当前导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线如图 3 所示。当暂态载流量越大,导线温度上升速度越快,更易在短时间内超过允许工作温度。

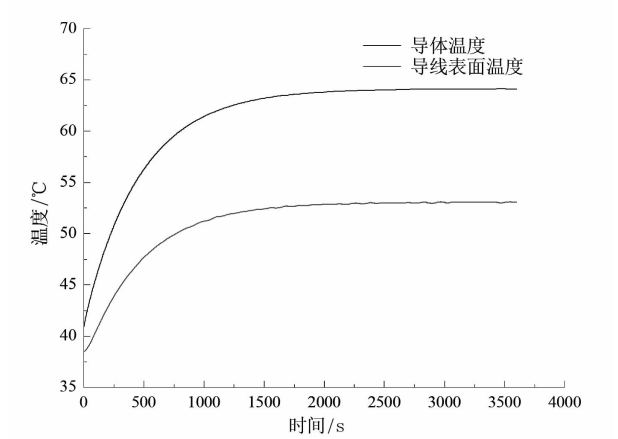


图2 绝缘导线温升变化曲线
(电流从 189 A 跃变至 400 A)

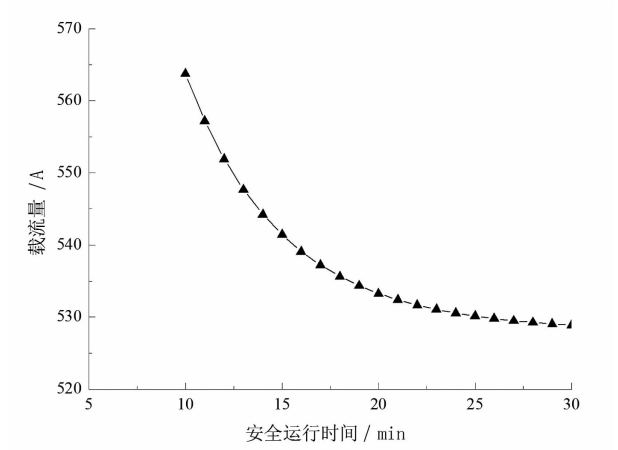


图3 导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线

3 架空绝缘导线暂态载流能力计算与应用

某市区供电公司某 $10\ \text{kV}$ 架空绝缘导线(型号 JKLYJ-10/120)因在用电高峰期时会出现线路满

载的情况,为了全面掌握线路运行状态,于 2017 年 6 月在线路上加装了线路在线监测装置。下面基于装置现场实测数据,对该线路暂态载流能力进行计算与评估。

3.1 模型有效性验证

2017 年 6 月 29 日,对该 $10\ \text{kV}$ 线采取翻负荷方式提高线路负载率,以验证暂态载流能力计算模型。当日 12 时 43 分,线路负荷从 $106\ \text{A}$ 开始上升,3 min 后电流达到稳定负荷 $210\ \text{A}$ 。 $10\ \text{kV}$ 绝缘导线温升时间常数通常小于 $10\ \text{min}$,记录实验开始后 15 min 内的数据。实验初始阶段环境参数变化不明显,导线处于稳定状态,据此并按照式(2)计算得到导线外部热阻作为模型计算初始参数,预测导线表面温升情况,其结果如图 4 所示。易见,模型预测结果与实测结果的变化趋势相符,因此该模型用于计算导线暂态温升过程是有效的。

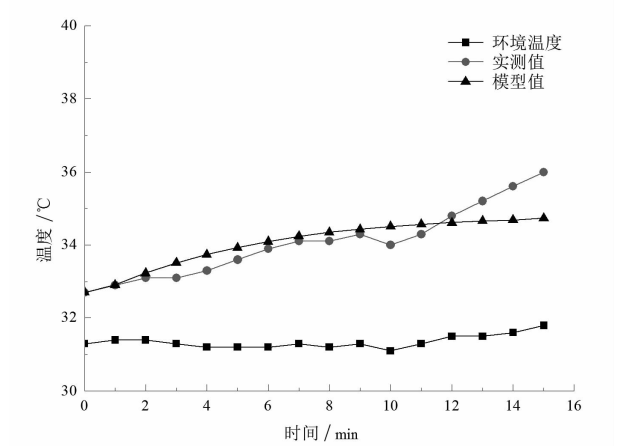


图4 导线表面温升曲线

3.2 暂态载流能力评估

在工程应用中,考虑到线路负荷变化缓慢且导线时间常数较短,因此认为计算时刻导线温度处于稳态,以便于计算导线稳(暂)态载流量。选取线路在线监测装置 6 月 27 日 00:00—24:00 数据进行分析,数据间隔为每 5 min 1 组。负荷电流、环境温度、导线表面温度、光照强度随时间的变化曲线如图 5 所示。

根据每时刻导线运行工况计算导体温度并改变电流计算导线暂态温升,得到暂态载流量与安全运行时间关系曲线,特别是可得 30 min 暂态载流量值,即当导线电流发生阶跃变化至 30 min 暂态载流量时,导线导体温度将在 30 min 后达到允许温度 $90\ ^\circ\text{C}$ 。图 6 为当日导线额定载流量、稳态载流量和 30 min 暂态载流量变化曲线。图中,额定载流量(环境温度 $40\ ^\circ\text{C}$)为 $325\ \text{A}^{[12]}$,稳态载流量为 $355 \sim 422$

A, 30 min 载流量为 358 ~ 499 A。由于导线温升时间常数较小, 当环境条件严酷时, 稳态载流量会接近 30 min 暂态载流量。稳态载流量较额定载流量能够提升 10% ~ 30%, 表明绝缘导线供电能力潜力巨大。

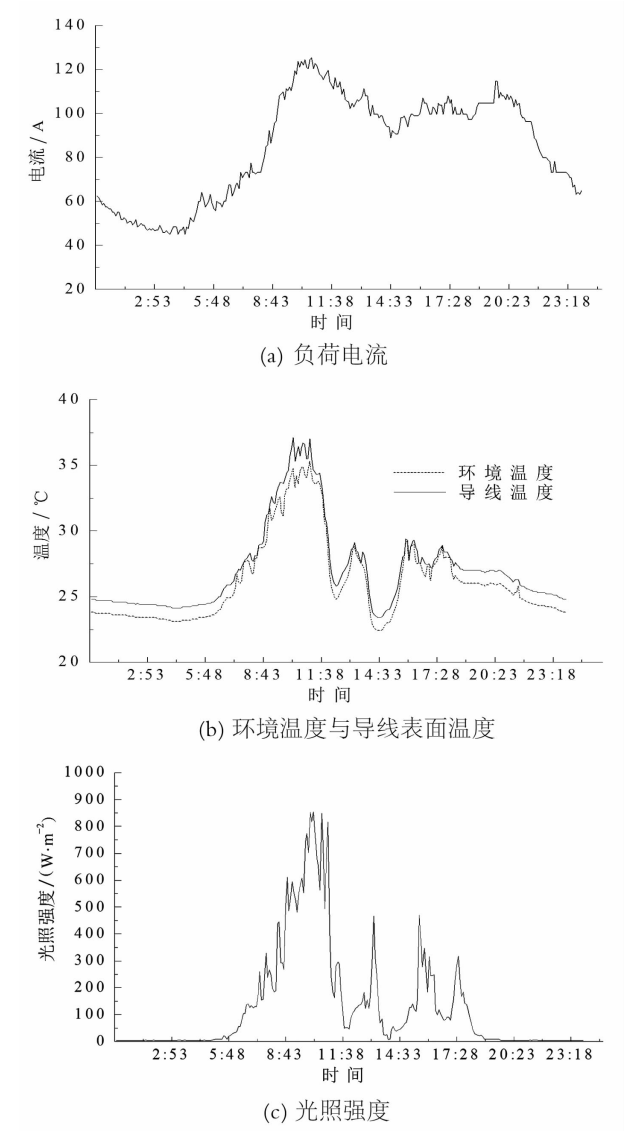


图5 导线监测数据

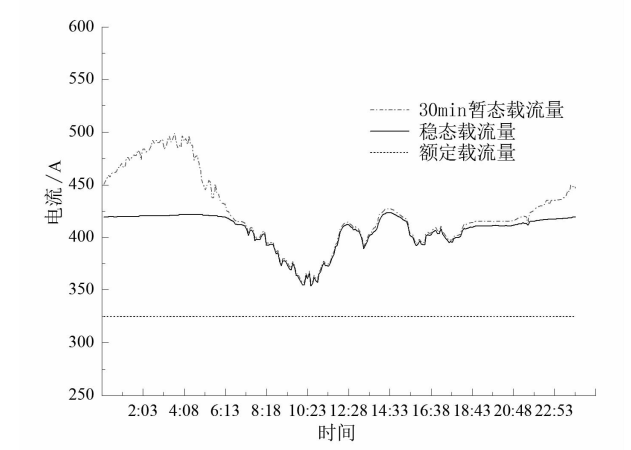


图6 载流量数据曲线

4 结 语

基于架空绝缘导线等值热路模型, 建立了导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组, 并给出了方程组的数值解法, 通过导线暂态温升计算, 得到导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线, 进而评估导线暂态载流能力。通过线路温升实验, 充分验证了架空绝缘导线暂态载流能力计算模型的有效性。并以运行线路的实测数据为基础, 计算并评估了某 10 kV 绝缘导线暂态载流能力, 结合在线监测系统数据使运维调度人员更能直观掌握线路运行状态。得到了如下结论:

- 1) 结合热路解析法与数值法建立计算模型是模拟线路暂态温升过程的有效方法。
- 2) 暂态载流能力与线路安全运行时间呈负指数关系, 并呈快速饱和趋势。运行工况越严酷时, 饱和趋势越快。
- 3) 通常情况下, 线路所处散热环境要好于规程设计依据的环境条件, 实测结果表明线路稳态载流量大于线路额定载流量, 短时暂态载流能力又大于稳态载流能力, 这就为提高线路长期供电能力和应对线路短时过负荷运行提供了基础数据支撑。

参考文献

[1] 毛先胤, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 架空输电线路暂态载流能力的计算和评估[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 70 - 74.

[2] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138 - 1144.

[3] 卢波, 汪静, 赵文彬. 华东电网架空裸导线载流量管理及推荐计算方法[J]. 电线电缆, 2017, 2(2): 6 - 11.

[4] 刘同同. 基于热路模型的电力电缆导体温度计算及试验研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.

[5] 雷成华. 高压单芯电缆动态增容的理论分析与实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[6] 金红卫, 朱权, 杨彪, 等. 多条件下配网线路载流量的分析研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(9): 151 - 154.

[7] IEEE Standard for Calculation the Current - temperature of Bare Overhead Conductor: IEEE Standard 738 - 2006 [S], 2006.

(下转第 67 页)

光伏发电在地铁牵引供电系统中的应用研究

郭晓宇

(库尔勒铁路供电段,新疆 乌鲁木齐 841001)

摘要:地铁作为城市轨道交通的重要组成部分,在乌鲁木齐市未来的城市发展道路上不可或缺,蓬勃发展的地铁建设事业必将增大城市电力供应需求,为城市供电带来巨大挑战。乌鲁木齐市太阳能资源丰富,若能将光伏发电应用于地铁牵引供电系统,可以有效减少城市供电压力,降低地铁运营成本。因此,提出将光伏电站接入地铁牵引供电系统中,由光伏发电提供部分地铁牵引电能。为验证设想的有效性,基于 MATLAB/Simulink 构建了 1 MW 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型,通过观察光伏电站经过逆变器后的输出电能的谐波大小判断光伏电站是否满足并网条件。仿真结果表明,经过逆变器后的光伏发电站输出的电能谐波满足并网要求,验证了光伏电站接入地铁牵引供电系统这一方法的可行性。

关键词:光伏电站;地铁牵引供电系统;MATLAB/Simulink

中图分类号:TM922.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0048-04

Research on Application of Photovoltaic Power Generation to Metro Traction Power Supply System

Guo Xiaoyu

(Railway Power Supply Section of Korla, Korla 841001, Xinjiang, China)

Abstract: As an important part of urban mass transit, the metro in Urumqi is indispensable to the future development the city, and the booming metro construction will be bound to increase the demand of urban power supply. Urumqi has abundant solar energy resources. If photovoltaic power generation can be applied to metro traction power supply system, it can effectively reduce the pressure of urban power supply as well as the operation cost of subway. Therefore, it is proposed to connect the photovoltaic power station to the metro traction power supply system. To verify the validity of this idea, based on MATLAB/Simulink, a 1 MW photovoltaic power station is constructed to be connected to the simulation model of metro traction power supply system, which judges whether photovoltaic power station meets the requirements of grid connection by analyzing the harmonic of the output power through the inverter. The simulation results in MATLAB/Simulink show that it is feasible to connect the photovoltaic power station to the metro traction power supply system.

Key words: photovoltaic power stations; metro traction power supply system; MATLAB/Simulink

0 引言

随着“一带一路”国家战略的提出,乌鲁木齐市紧紧把握难得的历史机遇,正在努力“打造丝绸之路上的综合交通枢纽”。为完成此目标,乌鲁木齐市拟规划修建线路总长为 211.9 km 的 7 条地铁线路,届时地铁必将成为城市的耗能大户,为城市供电系统带来巨大挑战。与此同时,新疆四周远离海洋,且具有“三山夹两盆”的地形特点,气候干燥,云量、

雨量少,大气透明度高且昼夜温差大,光热资源极其丰富。数据显示,其太阳能辐射总量为 1450 ~ 1720 kWh/m²,居全国第 2 位,年日照时数为 2550 ~ 3500 h,日照百分率为 60% ~ 80%^[1-2]。因此,若能充分运用地铁站地面建筑优势,引入光伏电站提供牵引供电系统部分电能,就可以充分利用新疆的丰富资源,为“节约能源,绿色出行”贡献一份具有新疆特色的力量。

目前国内关于光伏电站接入地铁供电系统的研究较少,文献[3]提出了通过逆变和整流技术实现

光伏发电向 3000 V 直流牵引供电系统供电的方案。文献[4]介绍了德国铁路牵引供电系统中将光伏发电直接接入牵引供电系统的两种应用形式,运用单相逆变技术,可实现光伏发电在牵引供电系统沿线的任意位置接入系统。

为进一步研究光伏电站接入地铁供电系统的可行性,基于 MATLAB/Simulink 构建了 1 MW 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型。模型中地铁负荷采用 24 脉波整流器接电阻负载形式模拟,光伏电站 MPPT 控制方法采用扰动观察法,光伏逆变器输出采用电压电流双闭环控制策略。模型通过观察光伏电站经过逆变器后的输出电能的谐波大小,判断光伏电站是否符合并入地铁供电系统要求,为光伏电站接入地铁供电系统的可行性提供仿真参考。仿真结果表明,经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波满足并网要求,说明了光伏电站接入地铁牵引供电系统在理论上的可行性。

1 地铁牵引供电系统

城市轨道交通多修建在中大型城市,用地资源紧张,因此城市轨道交通沿线所建的停车场、车辆段以及高架线路都可以作为光伏电站的架设地点,这为光伏发电系统在城轨中的应用提供了广阔的前景。地铁牵引供电系统拓扑结构如图 1 所示。牵引变电站从 110 kV 电网取电,经过变压器降压和整流,变为 DC 1500 V 供给接触网。

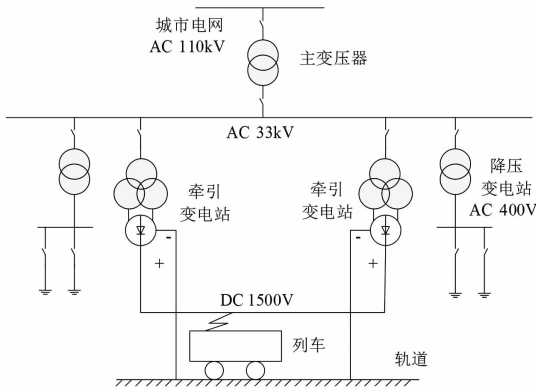


图 1 地铁牵引供电系统结构^[5]

由于牵引供电系统中采用 24 脉波整流技术,故将地铁列车负载部分采用 24 脉波牵引移相整流器接电阻负载进行模拟,基本结构如图 2 所示^[6]。24 脉波整流机组包括两台变压器,均为双低压输出变

压器。每台整流机组单独工作时均可输出 12 脉波的直流电,组成各自独立的 12 脉波整流系统。为了实现 24 脉波整流,在高压侧采用延边三角形移相方法,分别移相 7.5° ,实现并联运行时移相 15° 且输出 24 脉波。

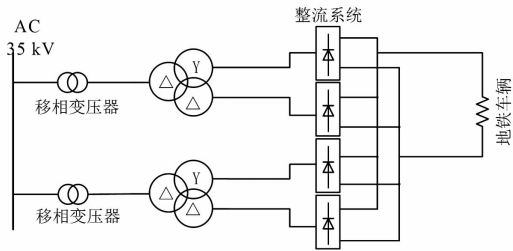


图 2 地铁负载结构

用电阻等效的地铁车辆不会产生无功功率,但由于变压器短路阻抗的存在,使系统出现无功功率。

2 光伏电站

2.1 光伏电站 MPPT 方法

光伏电站采用扰动观察法作为最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方法。扰动观察法的原理是扰动光伏电池的端口输出电压,在原输出电压上增加一个小干扰电压 dU 分量,并比较干扰周期前后光伏电池的输出功率。若输出功率 P 增加,则此扰动能够提高输出功率,下一次往相同方向扰动。反之,若扰动后输出功率 P 减小,则该扰动不利于提高输出功率,下一次往相反方向扰动,扰动观察法流程图 3 所示^[7]。

2.2 光伏电站逆变器控制方法

目前的光伏发电系统逆变器控制中,多采用双闭环控制其单位功率因数输出。三相光伏逆变器采用前馈解耦控制策略,控制策略由电压外环、电流内环组成,且均采用比例-积分(PI)调节器。PI 控制器用于控制稳态误差,即缩小输入值与参考值之间的误差。控制框图如图 4 所示。

直流电压外环的作用是稳定直流母线电压,同时可以为电流内环提供参考值 i_d^* 。无功电流内环主要进行精细调节。无功电流内环是根据需向电网馈入的无功功率参考值而得,当 q 轴电流为 0 时,即仅向电网馈送有功功率。

这种模式下光伏电站直接接入地铁牵引供电系

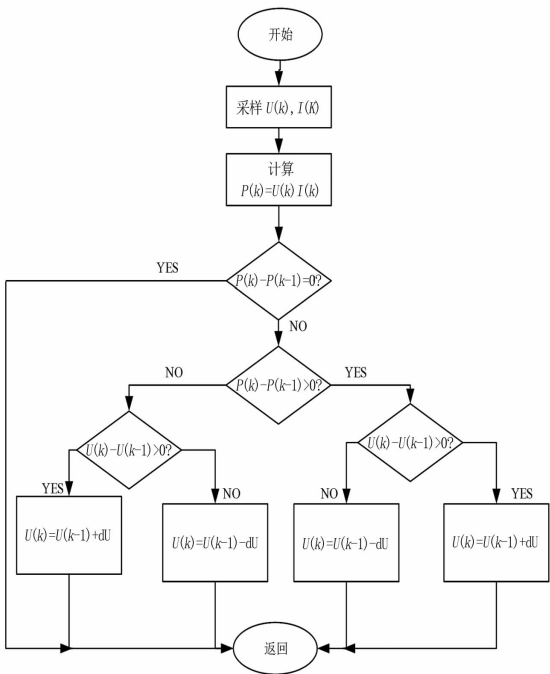


图 3 扰动观察法流程

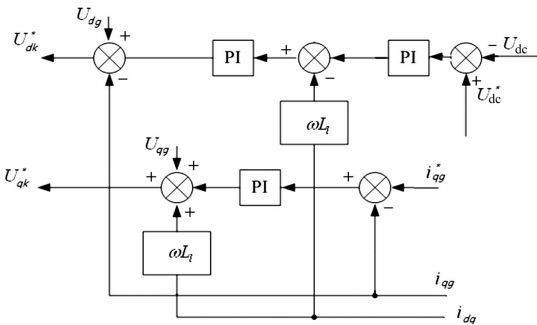


图 4 逆变器控制策略

统时,电网侧功率因数可以表示为

$$\lambda = \frac{P_{\text{load}} - P_{\text{PV}}}{\sqrt{(P_{\text{load}} - P_{\text{PV}})^2 + Q_{\text{load}}^2}} \quad (1)$$

式中: P_{load} 为地铁负荷的有功功率; Q_{load} 为地铁负荷的无功功率; P_{PV} 为光伏电站发出的有功功率。

由式(1)可知,当光伏电站以单位功率因数运行,即仅输出有功功率,会影响电网侧电能质量,降低网侧功率因数。因此需要充分利用光伏逆变器的冗余容量,在保证有功功率输出的情况下尽可能多地进行无功补偿。

3 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型

因为对于采用集中供电式的地铁牵引供电系统,不论接入点如何选择,光伏电站产生的电能均未

直接接入城市电网,光伏电站电能与电网之间互不影响,加之光伏电站产生的电能是直流电,所以理论上通过 DC/DC 变换器升压后,光伏电站所发出的电能可以直接接入地铁直流接触网,直流牵引供电系统中不存在无功、负序等电能质量问题。这种光伏电站直接接入直流牵引供电网的并入方式,具有电能质量高、谐波污染问题不突出、运行中不占用牵引变电站整流装置的容量等优点。

选择 35 kV 交流母线作为光伏的并网点,拓扑图如图 5 所示。一般而言,地铁负荷远大于光伏电站所产生的能量,所以光伏电站起到了节约市电的作用。

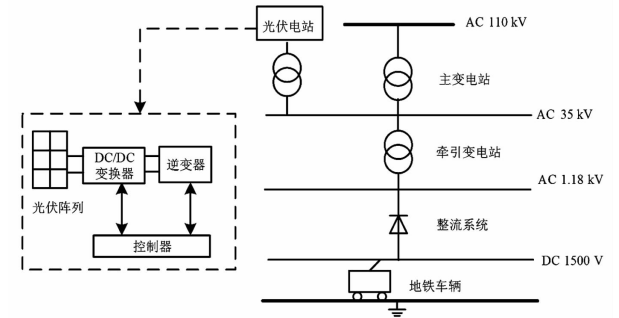


图 5 光伏电站接入地铁牵引供电系统拓扑图

4 仿真分析

为了验证所提方法的有效性,基于图 5 在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型。光伏发电模块采用扰动观察法产生控制信号控制 DC/DC 变换器实现最大功率点跟踪,逆变器采用前面所述带无功补偿功能的双闭环控制策略。仿真所用主要参数见表 1。

表 1 仿真主要参数

参数	数值
直流侧电压/V	1000
光伏电站容量/MW	1
直流侧电容/ μF	5000
滤波电感/mH	0.1
变压器变比	500 V/35 kV
逆变器容量/MVA	1.1
电压环 PI 参数	5200
电流环 PI 参数	10 100

设定地铁车辆在正常运行时需要功率为 3 MW,设置仿真条件如下:1 MW 光伏电站接入上述地铁牵引供电系统,光照强度 1000 W/s^2 ,温度

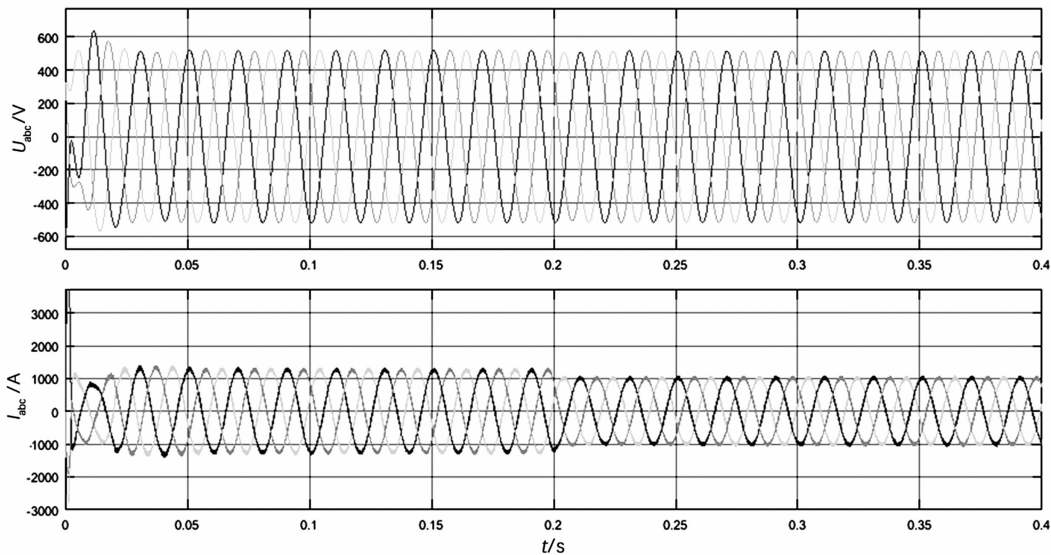


图6 光伏电站输出电压电流

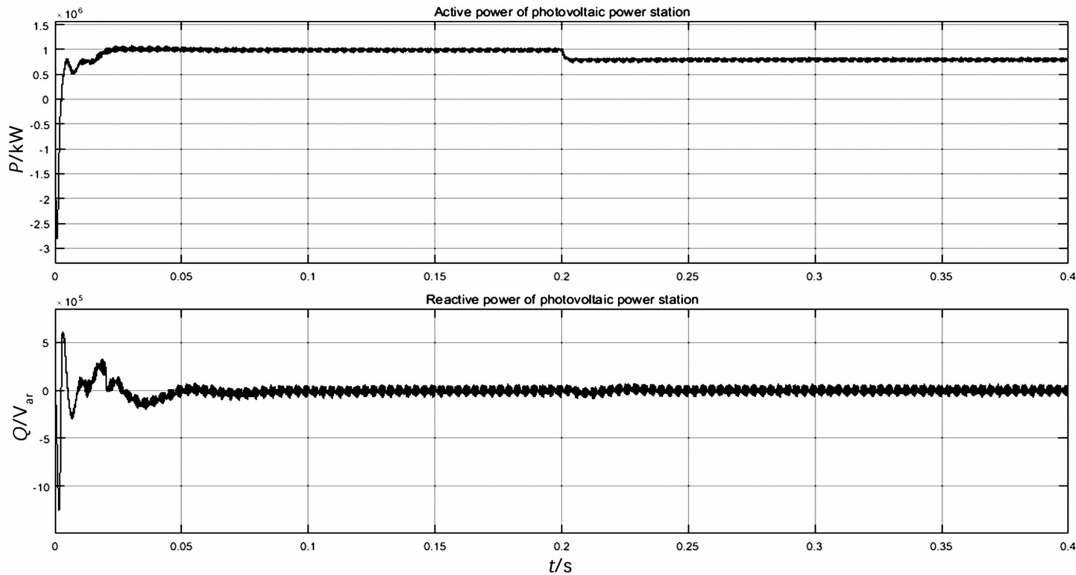


图7 光伏电站输出功率

25℃;0.2 s 时光伏电站受到的光照由 1000 W/s² 突变为 800 W/s²,温度不变,仿真结果见图 6、图 7。

从图 6、图 7 可以看出,在 0~0.2 s 内,光伏电站工作在额定工作状况下,输出有功功率为 1 MW;当 0.2 s 光照发生突变时,光伏电站输出有功功率下降,电流变小,此时经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波较小,符合并网要求。

5 结 语

随着乌鲁木齐市轨道交通行业的迅猛发展,城市的供电系统将会受到一定挑战,为避免可能到来

的能源短缺问题,同时也为了充分利用新疆地区的太阳能资源,对光伏电站接入地铁牵引供电系统的可行性进行了一定研究。基于 MATLAB/Simulink 搭建了光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型,将 1 MW 光伏电站接入 35 kV 地铁牵引供电网络,以实现光伏电能的就近消纳。仿真结果表明,经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波满足并网要求,说明光伏电站接入地铁牵引供电系统在理论上是可行的。

若能将其应用于实际中,将起到节能减排、获得更大经济效益的作用。目前国内外对于光伏发电系
(下转第 67 页)

直流电源系统在国内外的应用状况

陈轲娜, 罗 锦, 宁 鑫, 李 晶, 罗 洋

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:随着电网技术的不断发展,对站用直流电源系统的供电可靠性和安全性提出了更高的要求,这也使得国内外电力行业对该系统的关注度逐渐提高。结合对四川省 10 年间直流电源系统统计数据的分析和 CIGRE 工作的经验,对直流电源系统在国内外的应用情况进行了论述。

关键词:直流电源系统;蓄电池;缺陷;国内外应用现状

中图分类号:TM72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2018)03 - 0052 - 04

Application Status of DC Auxiliary Power System at Home and Abroad

Chen Kena, Luo Jin, Ning Xin, Li Jing, Luo Yang

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The continuous development of power system technology results in a greater need than ever for the reliability and security of DC auxiliary power systems, which draws broader attentions of electric engineers both at home and abroad. By analyzing the statistics of DC auxiliary power system applied in Sichuan province in ten years and combined with the work experiences in CIGRE WG B3.42, the practical application conditions of DC auxiliary power system at home and abroad are discussed.

Key words: DC auxiliary power system; battery; faultiness; current applications at home and abroad

0 引 言

直流电源系统是保障发电、输电和配电安全运行的关键环节。直流电源系统是保障电力系统正常运行不可或缺的重要辅助系统,不仅需要正常在正常情况为辅助设备提供电能,更在电网故障等异常情况下为重要辅助设备提供连续可靠的电能,以确保事故状态下人身和设备的安全,并保障故障的快速恢复。

随着电网技术的不断发展,对站用直流电源系统的供电可靠性和安全性提出了更高的要求,使得国内外电力行业对该系统的关注度逐渐提高。

下面根据四川省近 10 年来直流电源系统设备和运行数据的统计和分析,并结合在 CIGRE WG B3.42 工作过程中对国外直流电源系统应用情况的了解,对该系统在国内外的应用现状进行了介绍。

1 站用直流电源系统得到广泛关注

长期以来直流电源系统因其电压等级低、技术

门槛较低等因素,其受到的关注度有限。不过,随着电力技术与智能化技术的广泛融合,电网的运行、控制和调度的数字化、信息化、智能化等方面得到显著的发展^[1],对站用直流电源系统的供电可靠性和安全性提出了更高的要求。一旦直流电源系统发生故障,非常容易造成主设备丧失控制与保护功能,特别是在电网发生故障时,无法快速切除故障甚至造成事故扩大,延缓电网恢复时间,使电力系统受到的危害和引起的损失也更大。全国近年来发生的事故也不断地印证了这一点。这也使得国内外电力行业对直流电源系统的关注度逐渐提升。

国际大电网会议(CIGRE)组织 B3 技术委员会组建了工作组(WG)B3.42(Reliability Analysis and Design Guidelines for LV AC/DC Auxiliary Systems)对发电厂、变电站以及换流站用的低压交直流配电领域的系统设计和可靠性进行研究。

美国电气与电子工程师协会(IEEE)组织的 Power and Energy Society/Substations(PE/SUB)成立了工作组 WGD9 - Substation Auxiliary System -

Guide for the Design of Low Voltage Auxiliary Systems for Electric Power Substations 来讨论、研究变电站用低压交直流配电领域相关的技术问题,并组建标准编制项目 P1818 – IEEE Draft Guide for the Design of Low Voltage Auxiliary Systems for Electric Power Substations。该标准初稿已完成待正式发布。

2 国内直流电源系统近 10 年来的应用情况

近 10 年来,国内电网规模、电力技术快速发展,四川电网是其中的一个典型缩影。因此,下面以四川省直流电源系统的应用状况为例,在变电站数量不断增多、维护人员数量又少、技术水平短时内提升有限的情况下,来探讨直流电源系统运行状况。

2.1 直流电源系统的快速持续增长

近 10 年来,四川省 110 kV 及以上变电站数量以平均每年增长 63% 的速度从 2007 年不足 500 座增长为 1000 多座,相应的蓄电池组数量也从约 600 组增加一倍多达到近 1400 组,如图 1 所示。

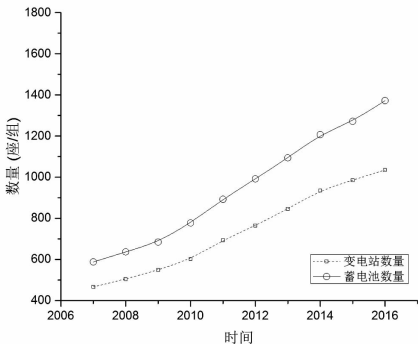


图 1 四川省近 10 年变电站和蓄电池数量增长曲线

随着变电站规模的扩大、数量的增多,如何确保直流电源系统的安全可靠运行就成为一个重要问题。如图 2 所示,变电站低压直流电源系统近 10 年来,由基层运检单位上报的“一般”及以上缺陷数量也相应增加。可观察到,“缺陷”的数量与蓄电池组数量从趋势上呈一定的正相关性。

2009 年、2010 年随着蓄电池数量增加约 50%,直流系统缺陷数量大幅增加,在随后的 2011—2016 年直流配电系统缺陷数量得到较好的控制。从年度缺陷与蓄电池组数量之比,可看出 2011—2016 年直流系统缺陷率保持在较稳定的水平。这与 2010 年以来管理和运维水平的提升密不可分。

2.2 直流电源系统设备缺陷的分布情况

通过对四川省 2007 年至 2016 年的直流电源数

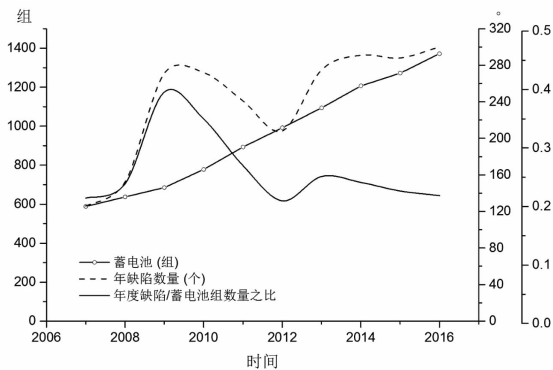


图 2 直流电源系统年缺陷数量与蓄电池组数量的分析
据的分析,10 年内该省低压直流电源系统发生的缺陷中约 38.55% 是充电装置缺陷,其次有 26.63% 是由蓄电池引起,其余缺陷依次为系统发生的直流接地、绝缘监测和巡检等装置、监控装置以及其他,如图 3 所示。

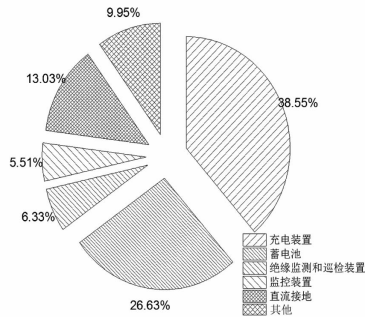


图 3 近 10 年来直流电源系统中各设备的缺陷占比

根据调查,充电装置的缺陷主要有充电模块输出电压异常、无输出电流、通信故障、冷却风机故障、充电装置内的交流继电器故障、显示器以及显示灯故障等。

充电装置缺陷约占缺陷总量的 39%,是直流电源系统中最容易存在缺陷的设备之一。一方面是因为充电装置运行年限较长,设备老化再加上产品质量潜在的薄弱点,在长期运行中最终引发缺陷;另一方面,运维技术人员对充电装置的日常维护手段有限,充电模块组装在直流屏(柜)中,在安装后一般很少再定期检查。现在广泛采用的高频开关电源型充电装置,采用 $N+1$ 或 $N+2$ 模块化设计方案,即按额定容量配置 N 个模块后再备用 1 个或 2 个模块^[2];模块可即插即用,将故障的模块在线插拔而不影响充电装置的运行。通过模块化及冗余设计,充电模块虽然呈现较高的故障率,但其整体的运行可靠性是比较高的。

蓄电池缺陷约占缺陷总量的 26.63%,仅次于充电装置,但却是决定直流电源系统可靠性的那只

木桶“短板”。蓄电池组一般由单体蓄电池串联组成,若某支单体蓄电池性能欠佳会影响到其余的单体电池,严重情况下如开路,将导致整组蓄电池失效^[3]。同时,蓄电池组中各只蓄电池需保持较好的一致性,因此即使发现有问题的单体电池也不能像充电模块一样很方便地“带电插拔”进行更换,需要整组退出进行有针对性的维护,或在保证蓄电池组输出电压的基础上将其剔除,否则整组蓄电池可能需要被更换。因此,如何有效地监测蓄电池的运行状态并进行适当的维护,对保证直流电源系统可靠运行是非常重要的。

2.3 蓄电池实际运行寿命的分析

现在电力系统主要采用的是阀控式铅酸蓄电池,其浮充电预期寿命一般为8~10年,但工程应用中发现,约70%的蓄电池达不到预计使用寿命。对四川省10年来退役蓄电池进行统计,可观察到约51%的退役蓄电池使用寿命不超过6年,绝大部分蓄电池使用寿命不超过8年,如图4和图5所示。

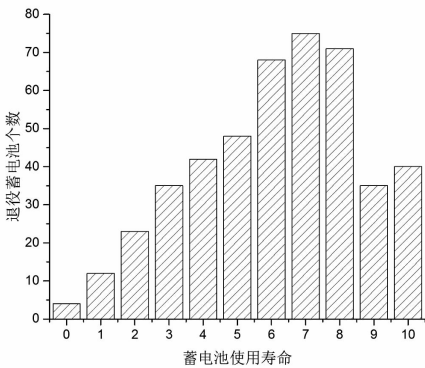


图4 10年退役蓄电池中蓄电池使用寿命的分布

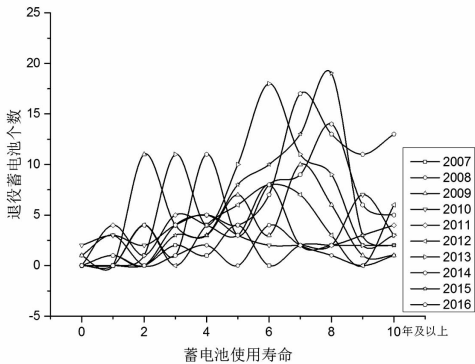


图5 各年退役蓄电池中蓄电池使用寿命的分布

从统计数据分析可知,蓄电池实际使用寿命远达不到预期的浮充电寿命。导致该现象的原因主要是蓄电池质量不过关。铅酸蓄电池是一种复杂而精妙的电化学体系,在该体系中即使是存在一些杂质,也会通过加快水分解反应对蓄电池的电化学反应产

生强烈影响。一个有潜在缺陷的蓄电池,在运行初期或中期就可能会出现干涸、硫化、极柱腐蚀、外壳鼓包以及容量严重降低等现象。

目前,在中国有许可证的蓄电池生产厂家有1000多家,生产厂家数量众多,其质量控制水平、生产工艺以及科技水平等各有高低,市场上的产品质量也差别甚大。对短期内出现异常的蓄电池解体分析,曾发现过个别生产厂家为了降低生产成本缩减工艺流程,采用劣质原材料。而在采购产品时,蓄电池质量好坏不能通过现场试验立即得到判断,通常需要在运行1年或更久后才能体现出来,这也给了“带病”蓄电池流入电力系统的“机会”。

从图5可知,在2009年、2013年和2014年均

有10多组蓄电池在使用了2至4年就因容量不达标而整组报废,这种现象往往是因为采购的蓄电池存在家族性缺陷,导致在短短运行两三年后这批蓄电池就不能满足运行要求。

此外,对蓄电池的运行维护不佳也是促使蓄电池寿命缩短的一个因素。以四川省为例,蓄电池组近10年数量增长为2倍多,且蓄电池单体数量更是巨大,运行维护工作量随之显著增加。在开展外观检查、均衡充电、内阻测试乃至容量核对性放电等维护项目时,运维人员没有按期进行或没有按规定程序严格开展试验项目,造成“带病”蓄电池未能及时筛选、落后蓄电池未能得到有效的活化处理等;缺陷报警后,由于运维人员处理不及时,造成蓄电池长期过充/欠充或长期放电,蓄电池出现干涸、活性物质脱落、极板硫化等现象而失效。

3 国内外直流电源系统应用状况的主要差异

通过对德国、英国、澳大利亚、爱尔兰、西班牙、波兰以及沙特阿拉伯等国家直流电源系统的调研,国外与国内直流电源系统的主要差异表现在直流电源系统的带电监测、检测设备的应用、系统网络结构、蓄电池的应用以及维护等内容。

3.1 带电监测、检测设备的应用

相比于国内的蓄电池电压和内阻巡检仪、绝缘监测仪,国外的在线监测设备的功能更简单,自动化程度更低。

以直流电源系统的绝缘监测为例,母线绝缘监

测和支路绝缘监测在国内已是常规配置,而国外主要只配置母线绝缘监测,支路绝缘监测因价格等因素鲜有应用^[4-5]。因此,在出现母线绝缘故障报警时,仍有一些国家采用比较原始的拉回路法来定位故障点。

国外蓄电池内阻测试主要采用的是离线式测试设备,作为判断蓄电池状态的补充手段。关于蓄电池内阻的测试技术尤其在美国,研究较为深入,建立了内阻测试模型以及计算公式^[6-8],相应的检测影响因素等方面都有较为详尽的介绍。

3.2 系统网络结构

由于变电站的规模、信息化及自动化程度等因素的影响,国外的站用直流电源主要有双充双蓄、单充单蓄这两种类型^[9],而在国内500 kV及以上变电站应用的三充两蓄^[10]在国外鲜有实例。

与国内普遍采用辐射供电网络相比,国外的供电方式更为多样化,可简单分类为辐射供电网络和环网供电方式。英国、西班牙和沙特阿拉伯等国家两种供电方式都存在,其中环网供电方式在各个国家又略有差异。爱尔兰、德国等国家较为普遍地采用辐射供电方式。

3.3 蓄电池、配电屏柜等元器件的应用

目前国内变电站已基本淘汰了镉镍碱性蓄电池和开口式铅酸蓄电池,采用的是阀控式铅酸蓄电池。国外变电站使用的蓄电池种类就比较多,如:西班牙和沙特阿拉伯仍有变电站在使用镉镍碱性蓄电池;英国、德国等国家除了有阀控式铅酸蓄电池外,同时仍在使用开口式铅酸蓄电池。

相应地,这也带来了蓄电池在容量配置、寿命、安装以及运维等方面的差异。即使对于阀控式铅酸蓄电池,容量配置、运维检测项目和周期各国也略有差异。比如,容量核对性充放电试验,其周期有1年、2年或者更长时间;事故放电时间设计有2 h、6 h、8 h或者更长的时间。

配电屏柜在澳大利亚可分为地面安装类型和墙上安装类型,充电机、蓄电池和配电可采用一体柜或者独立柜。

4 结 语

结合四川省直流电源系统近10年来应用状况的分析和国外应用情况的比较,可知中国直流电源

系统的在线监测技术尤其是绝缘监测技术,在国际上处于领先水平。此外,国内的交直流一体化电源以及其他新技术的研究都领先于国外同行。

作为直流电源系统中最为核心的设备——蓄电池,如何确保其安全、可靠地运行到预期寿命,无论国内外都还需要进一步的提升。目前,国内蓄电池的使用寿命一般为6~8年(国外不完全统计为8~10年),虽然电池电压巡检仪、内阻测试仪以及蓄电池活化仪等逐渐得到应用,但容量核对性放电仍然是检测蓄电池实际运行状态的最有效手段。在浮充电状态下,有效、简便地甄别“带病”蓄电池的方法仍然是一项具有挑战而值得研究的课题,其将对直流电源系统可靠性的提高具有重要意义。

在国内电力系统规模快速发展、电力技术与智能化以及信息化不断融合的大背景下,如何经济、有效地进一步提升直流电源系统的安全可靠性使其满足电力系统不断发展的要求,仍然值得更多的关注和研究。

参考文献

[1] 刘振亚,特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[2] 电力工程直流电源系统设计技术规程:DL/T 5044 - 2014[S],2014.

[3] Detchko Pavlov. Lead - acid Batteries: Science and Technology [M]. Elsevier,2014.

[4] IEEE Guide for Selection and Use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Applications:IEEE Std 1491™ - 2012[S],2012.

[5] Secondary Cells and Batteries - Monitoring of Lead Acid Stationary Batteries - User Guide:IEC TR 62060 - 2001 [S],2001.

[6] Glenn Alber. Predicting Battery Performance Using Internal Cell Resistance[R]. Albercorp. ,1995.

[7] Energizer Holding, Inc. Technical Bulletin: Battery Internal Resistance[R]. 2005.

[8] C&D Technologies, Inc. Technical Bulletin: Impedance and Conductance Testing[R]. 2012.

[9] Michael J. Thompson, David Wilson. Auxiliary DC Control Power System Design for Substations[C]. Conference for Protective Relay Engineers,2007:522 - 533.

[10] 白忠敏,刘百震,於崇干. 电力工程直流系统设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

作者简介:
陈轲娜(1986),硕士、工程师,从事直流电源相关工作。
(收稿日期:2018-01-15)

电力负荷预测研究综述及预测分析

杨博宇^{1,2}, 陈仕军²

(1. 国网四川省电力公司党校(管理培训中心), 四川 都江堰 611830;
2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:电力系统负荷预测研究对于用电形势分析、用电规划、合理部署人力、物力资源以及经济有效地管理电力系统都具有重要的意义。分析了电力负荷研究现状,较系统地总结了电力负荷预测的特点、步骤及其常用预测方法,并从多个角度对不同预测方法的特点进行比较分析,进而对四川省用电负荷预测及中国用电形势进行预测分析,为电力负荷预测研究提出富有针对性的建议。

关键词:电力负荷;预测方法;回归分析;电力弹性系数;空间负荷预测法

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0056-05

Overview of Electrical Load Forecasting Researches and Forecasting Analysis

Yang Boyu^{1,2}, Chen Shijun²

(1. Party School (Management Training Center) of State Grid Sichuan Electric Power Company,
Dujiangyan 611830, Sichuan, China;
2. Water Conservancy and Hydropower School, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:The researches on load forecasting of power system are of great significance to the electricity consumption analysis, electricity planning, rational arrangement of manpower and material resources, economical and effective management of power system. Firstly the background and current situation of electrical load research are analyzed, and the characteristics and procedures of electrical load forecasting and its common prediction methods are systematically summarized. And then from different point of view the characteristics of different prediction methods are analyzed and compared, moreover the electrical load forecasting in Sichuan province and the national electricity consumption situation are analyzed. Furthermore, the corresponding opinions and suggestions are put forward for the researches of electrical load forecasting.

Key words:power load forecasting; forecasting method; regression analysis; electricity elasticity coefficient; spatial load forecasting

0 引言

电力负荷预测主要是基于电力历史数据对未来时段的电力负荷、用电形势、用电需求、用电量等进行综合预测及推算。负荷预测的研究对象是不确定事件^[1]。电力负荷预测研究的不确定性推动着负荷预测研究和技术向着精细化、综合化和多元化发展。通过对一个区域的电力负荷预测进行有效分析,可以更合理地规划地区发展方式,为提高人民生活

活质量水平和社会经济发展提出富有针对性的合理化建议。

1 电力负荷预测研究现状

中国电力负荷预测研究开始于20世纪80年代,起步晚于国外近10年^[1]。1980年以来,中国步入大力发展经济的重要阶段,随着改革开放不断深入,电力需求极度旺盛,对于电力负荷预测技术的研究也不断升温。同时由于“一带一路”“全球能源互

联网”的建设步伐不断向前,对于电力负荷预测技术能力提高也不断强化。目前,常用电力负荷预测方法主要分为以回归分析法、趋势外推法、产值单耗法等为主的数学统计类方法和以人工智能类为主的新型预测方法^[2]。中国电力负荷预测技术虽然起步较晚,但近年来发展速度迅猛,正在逐步缩小与国外发达国家的差距。电力负荷预测具有不确定性、波动性、多变性、有条件性、多方案性、时间性和周期性等特点^[2]。其中时间性最为关键,它是电力负荷预测的核心要点。而预测方法及方案选择则是电力负荷预测需要关注的核心问题。

2 电力负荷预测的特点

通过对电力负荷特点的剖析,才能更有针对性地选取适用的预测方法,从而取得符合精度要求的预测结果,更好地为区域电力系统和经济社会发展提供重要支撑。

1) 不确定性

电能属于瞬时能源,难以像化石能源(石油、天然气、可燃冰等)那样长期大量存储,具有不可大量存储和不确定性,因此,电力负荷预测应保证电力的消费和生产在同一瞬时进行。此外,电能对于居民生活、工业生产等尤为重要,且电力供需在国内相当长一段时间内存在矛盾(供应能力跟不上经济发展需求),因此,电力负荷预测工作变得更加重要。

2) 时间性

电力负荷从长期来看是波动变化的,且这种变化呈现出周期性和连续性的特点,而时间是电力负荷预测最显著的影响因素之一。通过时间性可以进而分析电力负荷预测的连续性和周期性特征。

3) 多方案性

电力负荷预测是一项长期性的工作,需要耗费大量时间、数据、软件等进行分析,并从多种预测方案中寻找出最符合实际情况、预测精度更高的预测结果^[3]。常用的电力负荷预测方法有宏观指标法(电力弹性系数)、统计分析法(回归分析、时间序列)、空间负荷预测方法、人工神经网络法、组合预测模型等。随着科技的进步以及电力负荷预测的不断发展,更多新的、行之有效的预测方法将会不断涌现出来。但在实际电力负荷预测中应进行多种方案的比对、筛选,从而得到最适用的预测方案。

除了上述特点,电力负荷预测还受到季节、温度、天气等因素的影响。全国的用电高峰期通常集中出现在极寒、炎热或极度恶劣天气时期,即大多数出现在 4 季度末至 1 季度初和 2 季度末至 3 季度初^[3],用电高峰期的天气温度一般在 0℃ 以下、0 ~ 10℃ 或 30℃ 以上。由于电力负荷预测对天气、温度和季节等具有敏感性,不同的温度、天气、季节等因素都会对用电负荷造成明显影响,甚至轻微的天气和温度变化都会导致电力负荷预测数据的波动。在新形势下的电力负荷预测将会不断产生对于电力负荷的新认识。

3 电力负荷预测的步骤

根据电力负荷预测的发展方向,科学地进行负荷预测对于区域内的用电规划、经济发展、居民生活、工业生产、科技发展、产业发展等都具有重要意义。文献[4]指出电力负荷预测步骤可分为:

- 1) 确定预测目标和内容;
- 2) 选择及建立合适的预测模型;
- 3) 输入相应数据进行过程分析;
- 4) 对预测的数据结果进行综合分析;
- 5) 评价、评估相应预测结果,出具方案可行性报告。

4 负荷预测方法分析

1) 宏观指标法

典型用于电力负荷预测的宏观指标法为电力弹性系数^[5],其反映的是电力消费年平均增长率 A_y 与国民经济年平均增长率 A_x 之比,用公式表示为

$$E = \frac{A_y}{A_x} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_1} \cdot \frac{X_1}{X_2 - X_1} \tag{1}$$

变形可以得出:

$$Y_2 = \frac{E(X_2 - X_1)}{X_1} \cdot Y_1 + Y_1 \tag{2}$$

式中: X_1 、 X_2 分别为某时段初期及末期区域国内生产总值; Y_1 、 Y_2 分别为初期和末期的区域全社会用电量数据。

2) 回归分析法

该预测方法运用统计学原理,对大量的数据进行数学推理,确定用电量或用电负荷与地区国内生

产总值、人口数量、国民经济等经济参数之间的关系^[6]。通过建立具有相关性的数学模型方程,运用外推法对未来某一时间状态下的电力负荷进行预测。根据自变量的多少,可以分为一元回归分析模型和多元回归分析模型;根据函数是否呈线性关系,又可分为线性回归分析和非线性回归分析模型。

3) 人工神经网络法

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 技术,就是模仿人脑的智能化分析原理,对大量数据具有的非精确性、非结构性、非线性规律表现出较强的记忆性和自适应特点,并且能够进行自我学习、数据推理和拟合优化^[7]。神经网络法最突出的特点是智能化,这是其他方法所不具备的。文献[8]指出 ANN 技术发展至今,其 BP 神经网络模型运用最为普遍,该方法是一种按照误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络。

4) 空间负荷预测法

空间负荷预测 (spatial load forecasting, SLF) 最早是由美国 Willis 在 1983 年提出^[9],其定义为在未来电力部门的供电范围内,根据规划的城市电网电压水平不同,将城市用电按照一定的原则划分为相应大小的规则(网格)或不规则(变电站、馈线供电区域)的小区(每个小区又称为一个负荷元胞,简称元胞)^[10]。通过分析、规划、预测城市小区土地利用的特性和发展规律,来进一步预测相应小区中电力用户和负荷分布地理、数量及产生时间。该方法是对未来的规划预测,不仅包括对负荷的大小,更是对于负荷的分布位置预测。SLF 超越了传统的负荷预测方法,它是电力系统管理由粗放型向精细化转变的产物,且适应于现代新型电力系统规划。通过该方法的预测结果可以有效对地区内电力负荷安装位置及容量进行确定,从而显著提高电力系统的经济效益及稳定性能。

5 预测方法分析与比较

上述 4 种电力负荷预测方法都有各自的特点和不足,每种方法都有各自的研究角度和适用条件。

1) 从适用角度比较

回归分析法或趋势分析法更符合于统计规律的研究与描述,适用于大量、多年数据分析,这种方法更倾向于由历史数据分析来建立预测模型,从而进

行历史、现在、未来发展方式的一致性预测。回归分析的难点在于回归线类型的选取、回归变量的选取、回归变量因素与计量经济学之间关系的构建,这些因素都会直接影响预测精度。

宏观指标法(电力弹性系数)更类似于单耗指标法,适用于根据历史统计数据,在分析影响单耗或电力弹性系数的多方因素变化趋势下,寻找其中的规律,确定单耗指标或电力弹性系数,再以此为基础预测电力负荷数据,同时辅以国内生产总值、经济指标、社会发展规划等作为参考。该方法的难点在于对指标或系数预测准确性的把握,因为稍有误差便会大大影响预测精度;此外,该方法对经济指标依赖度较高,需要收集的国民经济数据量较大^[5]。

2) 从预测时间长短分析

人工神经网络(ANN)技术中的 BP 神经网络预测方法更适用于短期负荷预测^[7],其他适用于短期负荷预测的方法还有指数平滑法、灰色模型法等。BP 神经网络方法的缺点是需要设定节点数、隐含层数、训练次数等算法参数,计算过程较为复杂;同时该方法的算法参数设定多为长期尝试结果或长期累积经验,缺少业界公认理论概念进行有效支撑,以弥补过程缺陷。

对于中长期负荷预测,采用回归分析法、宏观指标法(电力弹性系数)、产值单耗法、趋势分析法、空间负荷预测法和改进型的灰色预测模型更合适。其中前 4 种方法比较简单,而后 2 种算法是比较复杂和综合的组合算法,也是当前应用较为广泛的新型预测模型思路。所谓改进型灰色模型是将各种单一模型经灰色关联度筛选和检验后,选择恰当的权重分配方法,进行组合预测^[11]。而空间负荷预测(SLF)的组合预测则是通过建立影响电力负荷因素的多变量(经济、气温、气象、人口、产值等)预测模型^[12],运用地理信息(元胞)和地区用电负荷历史数据、元胞负荷值、元胞负荷密度等信息进行数据整合,综合分析元胞内负荷密度发展规律及程度,最后对元胞内负荷值进行负荷预测,为城市相关建设规划提供参考建议。SLF 适用于短、中、长期的综合全方位城市或地区用电负荷和方位预测。

6 四川电力负荷预测分析

下面选用两种方法对四川省电力负荷数据进行

预测。

6.1 宏观指标法

根据前面所提到的宏观指标法介绍,以下具体运用宏观指标法分支中的电力弹性系数法进行负荷预测。以四川省电力负荷和国内生产总值历史数据为依据,运用电力弹性系数法进行对四川省中长期电力负荷数据和电力弹性系数进行预测。

从表 1 中可以看出,电力弹性系数是反映国民经济发展与电能需求增长的重要指标。准确预测电力弹性系数可以保证以很小的误差有效得到下一年的全省用电负荷需求,为经济建设规划和用电指标分析提供参考建议。由表 1 可知,预测数据与实际电力负荷数据的误差范围均在 ±5% 以内,符合误差允许,同时也证明了方案的可行性。同时通过分析,预测四川省“十二五”的电力弹性系数为 0.48,“十三五”的电力弹性系数为 0.7。这表明四川省工业化刚步入中期,城镇化与全国差距较大,城镇化滞后于工业化,所以在“十二五”“十三五”乃至“十四五”时期,是四川省加速推进城镇化及工业化的重要时期。同时随着电能替代、节能降耗不断发展,使相应电力在终端能源消费中维持较高占比,电力弹

性系数也相应维持在 0.5~1 之间,以适应地区经济社会发展对电力的需求。影响电力弹性系数的因素是多方面的,主要有电力工业发展水平、经济结构、科学技术水平以及人民生活水平等^[5]。

6.2 回归分析法

这里选取一元线性和一元非线性两种回归分析法对四川省历史用电负荷数据进行分析,从而对 2012—2020 年的数据进行相应预测分析和误差比对。一元线性回归分析法的公式表达式为

$$y = ax + b \tag{3}$$

一元非线性三次对数回归分析法的公式为

$$y = \alpha \cdot \ln^3(x) + \beta \cdot \ln^2(x) + \gamma \cdot \ln(x) + \lambda \tag{4}$$

式中: x 为全省对应年份国内生产总值; y 为实际电力负荷数据, a 、 b 和 α 、 β 、 γ 、 λ 分别为预测模型待定参数。

一元线性回归模型取 2010—2017 年历史数据估计待定参数,而一元非线性回归模型取 1990—2017 年历史数据估计待定参数。最后取两种方法的平均值作为 2018—2030 年四川省电力负荷的预测值,同时进行误差分析,并对“十三五”“十四五”四川省用电负荷增速进行预测。如表 2 所示,可以

表 1 电力弹性系数法及 2012—2030 年电力负荷预测值

时间段	四川省国内生产总值/亿元			全社会用电/10 ² GWh			预测电力 弹性系数	实际电量 弹性系统
	当年数据	同比增长率/%	预测数据数值	实际数据	同比/%	误差范围/%		
2012 年	23 873.00	12.60	1 830.70	1 830.70	4.53	—	0.48	0.36
2013 年	26 392.00	10.00	1 918.57	1 948.9	6.46	−1.56	0.48	0.65
2014 年	28 537.00	8.50	2 028.42	2 014.80	3.38	0.68	0.48	0.4
2015 年	30 053.00	7.90	2 091.20	1 992.40	−1.11	4.96	0.48	−0.14
2016 年	32 681.00	7.70	2 099.79	2 101.00	5.45	−0.06	0.7	0.71
2017 年	36 980.20	8.00	2 218.66	2 205.18	4.96	0.61	0.7	0.71
2018 年(预测)	39 753.72	7.50	2 320.95	2 320.95	525		0.7	
2019 年(预测)	42 735.24	7.50	2 442.80	2 442.80	5.25		0.7	
2020 年(预测)	45 940.39	7.50	2 571.05	2 571.05	5.25		0.7	
“十二五” (增速预测)		10.77			5.16		0.48	
“十三五” (增速预测)		7.50			5.30		0.7	
“十四五” (增速预测)		7.20			4.8		0.67	
“十五五” (增速预测)		6.80			4.80		0.65	
2021—2030 年 (增速预测)		7			4.60		0.66	

表 2 回归分析法及 2012—2030 年电力负荷预测值

时间	四川省国内 生产总值/亿元	全社会用电量/10 ² GWh				
		预测数据数值 一次回归	预测数据数值 三次对数	平均值	实际数据	误差范围/%
2012 年	23 873.00	1 821.11	1 820.49	1 820.80	1 830.70	-0.54
2013 年	26 392.00	1 901.79	1 911.31	1 906.55	1 948.90	-2.17
2014 年	28 537.00	1 970.48	1 983.25	1 976.87	2 014.80	-1.88
2015 年	30 053.00	2 019.03	2 031.46	2 025.25	1 992.40	1.65
2016 年	32 681.00	2 103.19	2 110.45	2 106.82	2 101.00	0.28
2017 年	36 980.20	2 240.88	2 228.84	2 234.86	2 205.18	1.35
2018 年(预测)	39 753.72	2 329.70	2 299.15	2 314.43		
2019 年(预测)	42 735.24	2 425.19	2 370.18	2 397.68		
2020 年(预测)	45 940.39	2 527.83	2 441.91	2 484.87		
2013—2017 年(增速)		3.9	3.2	3.55		
“十三五”(增速预测)		4.7	3.6	4.15		
“十四五”(增速预测)		4.6	6.1	5.35		
2021—2030 年(增速预测)		0.966 7	0.996 4	0.98		

发现运用三次对数的预测模型的预测值与实际数据更接近且误差范围更小。

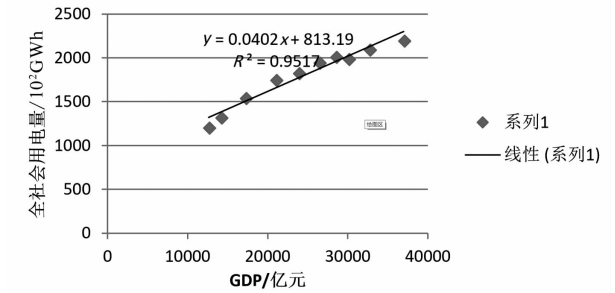


图 1 四川省国内生产总值与用电负荷线性关系

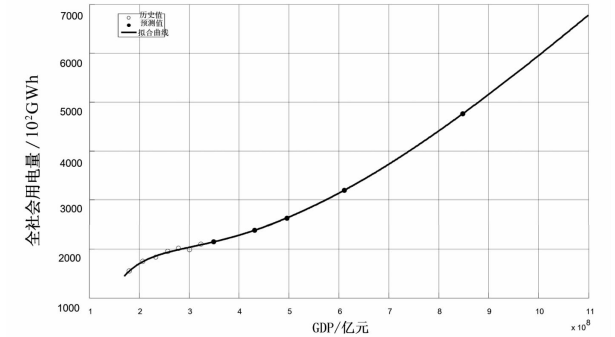


图 2 四川省国内生产总值与用电负荷非线性三次对数关系

由图 1、图 2 可知,四川省国内生产总值与用电负荷更呈现非线性的关系。由 1990 年到 2017 年历史用电数据和生产总值关系可知,用电负荷增速呈现波动性增长。在运用回归分析法预测负荷时,应当先选定回归线类型,以便更好地提高预测精度。

根据国家能源局四川省监管办公室发布的《四川省电力供需监测报告》及电力企业联合发布的《2017 年度全国电力供需形势分析预测报告》,2017 年全国全社会用电量超过了 5×10^6 GWh,同比增长速度达到 6%,增速同比提高约 1 个百分点。由此可见,2018 年全国用电负荷将会继续保持平稳上升,这也是全国各省的发展趋势。2017 年四川省全社会用电量约为 2.2×10^5 GWh,同比增长 5%;外送电量约 1.4×10^5 GWh,同比增长 7.9%。综合分析,第二产业及工业用电所占比例继续下降,而第三产业及城乡居民生活用电所占比例稳步上升。这也是全省积极推进电能替代、节能降耗、清洁能源电量增加、电力体制改革释放红利、产业结构调整等有效措施,保证经济建设与电力系统建设稳步前进的结果。

7 结 语

从国内电力负荷预测形势分析为出发点,以《四川省电力供需监测报告》数据为基础,深入分析影响电力负荷预测的各种因素,从而得到对四川省未来电力负荷预测的有效方法及相关建议。短期电力负荷预测,由于受到天气、气候及突发因素的影响,波动性较大,可以选择以智能化为主的电力负荷

(下转第 91 页)

智能变电站 PMU 装置测试仪研制

何 笠¹,滕予非¹,石 涛²,冯世林¹,刘明忠¹,黄俏音³,陈罗飞³,李东升³

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
- 2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司,四川 成都 610041;
- 3. 北京博电新力电气股份有限公司,北京 100176)

摘 要:目前尚缺乏针对智能变电站有效的 PMU 装置测试手段。根据智能变电站 PMU 装置接线和传输协议等方面介绍智能变电站 PMU 测试仪研制的需求,并开展智能变电站 PMU 测试仪的研制。根据 PMU 装置的安装特点,提出 PMU 装置不同安装方式下的测试流程。通过智能变电站 PMU 装置测试方法和 PMU 测试仪的研制,能快速实现对智能变电站 PMU 装置的精度检测,减少了繁琐的数据处理工作和报告编制工作,提高了智能变电站 PMU 装置测试效率和正确性。

关键词:智能变电站;PMU 装置;PMU 测试仪;测试流程;精度检测

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0061-07

Research on Development of PMU Tester in Smart Substation

He Li¹,Teng Yufei¹,Shi Tao², Feng Shilin¹,Liu Mingzhong¹,
Huang Qiaoyin³,Chen Luoifei³, Li Dongsheng³

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,Chengdu 610041,Sichuan, China;
- 2. Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., (Gaoxin Branch), Chengdu 610041,Sichuan,China;
- 3. Ponovo Power Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract:There lacks the effective testing methods for PMU in smart substation at present. The demands of PMU tester in smart substation are introduced according to the connection of PMU and data transfer protocol in smart substation, and PMU tester is developed based on these requirements. The testing procedure is proposed according to the characteristics of PMU installation. The proposed methods and the development of PMU tester in smart substation can quickly implement the accuracy test of PMU, simplify the complicated data processing and report composing, and improve the testing efficiency and validity of PMU in smart substation.

Key words:smart substation; PMU; PMU tester; testing procedure; accuracy test

0 引 言

PMU 装置能够基于同一时标测量电力系统各种状态下的各个元件的电压、电流、有功以及无功等的幅值和相角^[1-2]。其广泛应用在电力系统的主站 WAMS 动态监测、状态估计、系统保护、区域稳定控制、系统分析和预测等领域^[3-4],是保障电网安全稳定运行的重要设备^[5-6]。

PMU 装置的检测一直是学术界关注的焦点^[7]。

文献[8]提出了 PMU 装置的动态算法,并根据其完成检测系统的研制。文献[9]讲述了 PMU 装置的测试与评估标准。文献[10]详尽阐述了 PMU 装置的研制和运行标准,并将两者进行了比对。文献[11]针对智能变电站,研制了基于 IEC 61850 协议的 PMU 装置测试仪。目前缺少有效的智能变电站 PMU 测试手段,而且测试的诸多项目均是在各种运行条件下的静态和动态响应精度^[12-13],检测项目繁多,测试误差难以控制,需要大量的工作来完成数据处理和试验报告的编写,工作量较大且正确性也难

以保证^[14]。

为了解决智能变电站 PMU 测试的上述问题,根据文献[14],研制了一种智能变电站 PMU 装置测试仪。该测试仪通过 IEC 61850-9-2 协议发送测试数据并通过接收 PMU 集中单元以太网协议信号来实现闭环比对测试;该测试仪针对智能变电站 PMU 装置采集单元和集中单元安装特点,完成 PMU 装置的测试工作;通过测试项目自动勾选,完成 PMU 装置的静态和动态响应精度检验及误差计算,并最终由 PMU 测试仪自动生成测试报告。

1 PMU 测试仪研制

1.1 智能变电站 PMU 装置特点及测试仪功能分析

智能变电站 PMU 装置主要是由采集单元和集中单元构成,两者通过光纤连接,其中采集单元为光纤接口,接收电流电压等 IEC 61850-9-2 光纤信号,集中单元处理这些光纤信号,将其转换为以太网协议信号后通过网口输出。

根据智能变电站 PMU 装置的特点,其测试仪在整个检测过程中,主要起到了 3 个方面的作用:为 PMU 装置采集单元发送数据;接收 PMU 装置集中单元数据;数据比对处理以及检测报告的自动生成。其中:PMU 测试仪需设置数据发送模块,能够模拟合并单元发送 IEC 61850-9-2 报文给 PMU 装置采集单元;PMU 测试仪需设置有数据接收模块,能够通过网线从 PMU 集中单元接收以太网报文;GPS 将正确接收到时钟,同时与 PMU 采集单元和 PMU 集中单元同步;PMU 测试需要将发送数据和接收数据通过软件程序进行解析计算比对,并将最终的结果生成试验报告。

1.2 测试仪研制的硬件架构

PMU 测试仪由 ARM 板和 DSP 板、FPGA 板、定时回路组成,其中定时回路可以接收 GPS 信号。

如图 1 所示,ARM 板和 DSP 板中的 ARM 能够与外部 PC 机通信,通过以太网接收来自 PC 客户端上的测试仪软件的命令、上传给测试仪采样值以及 GOOSE 探测结果。ARM 把接收到的命令下达给 DSP,由 DSP 产生相应的数字化信号,然后 DSP 通过和 FPGA 之间的地址总线、数据总线、控制信号把数据及命令下发给 FPGA,FPGA 中的数据处理及光口、组数配置单元根据接收到的命令确定本次操作。发送的数据按 IEC 61850-9-2 规格打包,标示特

定的时标,光纤以太网口负责测试数据的输出,转换为光纤信号输出到被测 PMU 采集单元中。

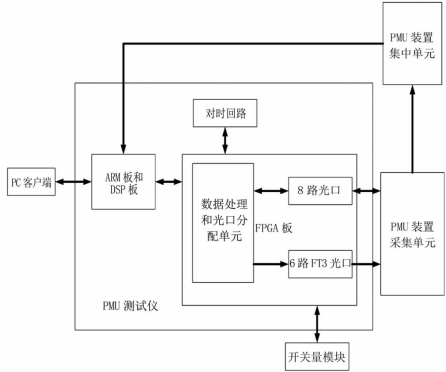


图 1 智能变电站 PMU 测试仪硬件架构

当 PMU 采集单元将数据传输至 PMU 集中单元后,PMU 集中单元将数据汇集并转化成以太网络式,回送至 PMU 测试仪。通过时标解析出发送数据和回送数据值,将两者作对比后通过软件算法计算出精度误差。

1.3 测试仪算法解析

1) 解析算法

当测试仪开始测试时,可初始化 t_1 ,然后经过一个周波 Δt_1 的延时后,发送 IEC 61850-9-2 数据进入 PMU 装置采集单元。若测试不停止,则自动增加 $\Delta t_n (n=1,2,3\cdots)$,继续发送 IEC 61850-9-2 数据至 PMU 装置采集单元,若测试结束或人为停止时,则生成测试数据文件。由于 PMU 测试仪发送的数据为 IEC6 1850-9-2 格式数据,而接收的数据为以太网数据格式^[15],两者格式不同,则需要对两者进行解析,解析过程如图 2 所示,通过解析以太网协议数据的时间和实际数据来进行数据比对。

PMU 测试仪电流电压基波检测计算采用全周滑动数据窗 DFT 算法,其相量递推公式为

$$A_{c_1}(k) + jA_{s_1}(k) = A_{c_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) + j \times \left\{ A_{s_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \right\} \tag{1}$$

相角计算公式为

$$\varphi(k) = \arctan \frac{A_{s_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right)}{A_{c_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right)} \tag{2}$$

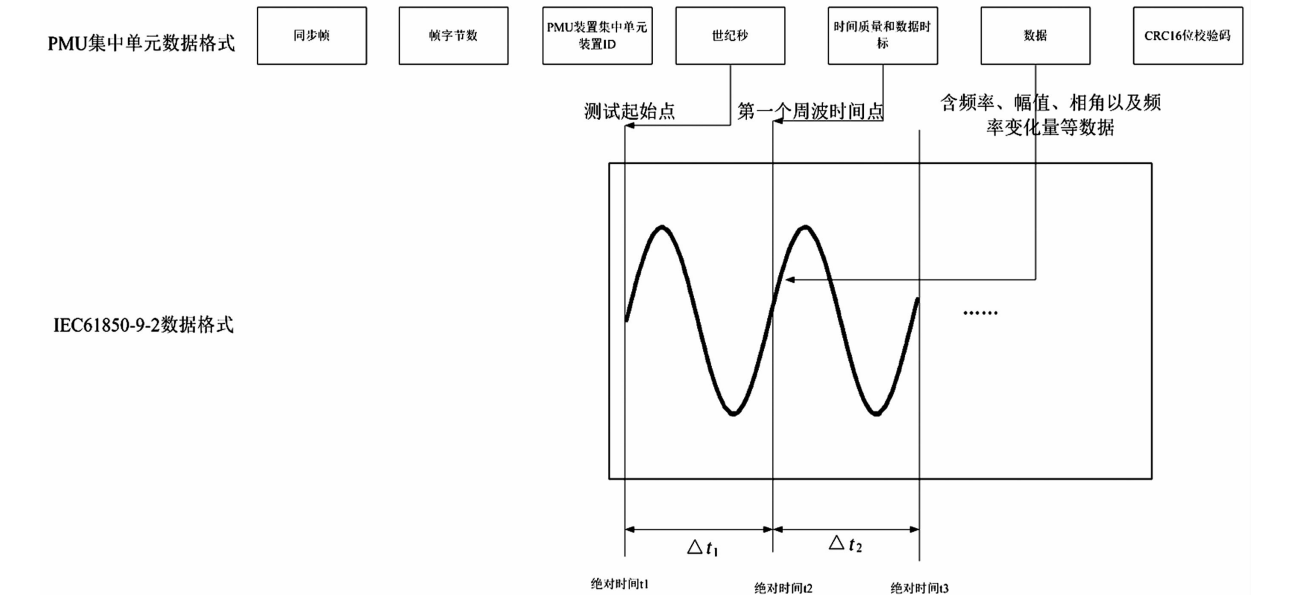


图 2 智能变电站 PMU 装置报文解析

式中: A_{c_1} 为电流电压实部计算值; A_{s_1} 为电流电压虚部计算值; N 为采样点数。

复功率计算式为

$$S = [(U_{ar}I_{ar} + U_{ax}I_{ax}) + (U_{br}I_{br} + U_{bx}I_{bx}) + (U_{cr}I_{cr} + U_{cx}I_{cx})] + j[(U_{ax}I_{ar} - U_{ar}I_{ax}) + (U_{bx}I_{br} - U_{br}I_{bx}) + (U_{cx}I_{cr} - U_{cr}I_{cx})] \tag{3}$$

式中: U_{ar} 、 U_{br} 、 U_{cr} 、 I_{ar} 、 I_{br} 、 I_{cr} 为 a、b、c 三相电压电流实部; U_{ax} 、 U_{bx} 、 U_{cx} 、 I_{ax} 、 I_{bx} 、 I_{cx} 为 a、b、c 三相电压电流虚部。

频率计算公式为

$$f = f_0 + \frac{\Delta\theta}{2\pi t} \tag{4}$$

式中: f_0 为基波频率; $\Delta\theta$ 为 t 时间内的相位变化。

频率变化率公式为

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_t = \frac{f_t - f_{t-100\text{ms}}}{100} \tag{5}$$

式中: f_t 为 t 时刻的频率; $f_{t-100\text{ms}}$ 为 f_t 前 100 ms 时的频率。

2) 指标计算

根据文献[14], 定义电流电压的误差为

$$E_{\text{xm}} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{mi} - X_{si}}{X_d} \right|}{N} \times 100\% \tag{6}$$

式中: E_{xm} 为测量总误差; X_{mi} 为第 i 次测量值; X_{si} 为第 i 次实际值; X_d 为基准值, 相电压幅值基准值取 70 V, 当电流互感器二次侧额定电流是 1 A 时, 电流

幅值基准值取 1.2 A; 当电流互感器二次侧额定电流是 5 A 时, 电流幅值基准值取 6 A, 功率基准值为 3 倍相电压幅值基准值与电流基准值的乘积。

根据文献[14], 定义相角、频率以及频率变化率的误差计算为

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_{mi} - Y_{si}|}{N} \tag{7}$$

式中: E_m 为测量误差; Y_{mi} 为第 i 次测量值; Y_{si} 为第 i 次实际值; N 为测量次数。各测试项误差标准可参考文献[14]。

2 PMU 装置测试接线及工作流程

2.1 测试接线

1) 同 PC 端接线测试

在此情况下, PMU 装置采集单元与集中单元距离较近, 可以采用同一 PC 客户端通过网线实现 PMU 装置数据的发送和接收, 并在 PMU 测试仪中进行发送数据和接收数据的处理, 具体接线如图 3 所示。

可以看出, 此种接线在 PC 客户端和 PMU 测试仪之间接了一个网络交换机, 可以实现仅使用同一台 PC 客户端向 PMU 测试仪的发送数据, 并接收 PMU 装置集中单元数据, 从而实现数据的比对和处理。

2) 非同 PC 端接线测试

在此情况下, PMU 装置采集单元与集中单元距

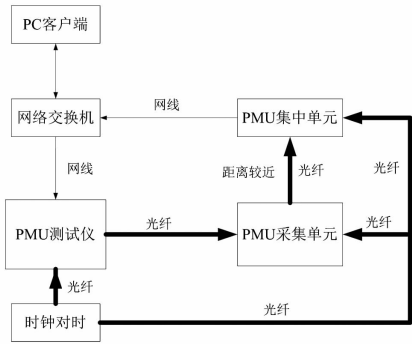


图 3 PMU 集中单元与 PMU 采集单元距离较近时接线原理

离较远,集中单元和采集单元缺乏连接光纤,无法只采用一个 PC 客户端通过一条网线从 PMU 集中单元接收数据。此时采用两个 PC 客户端,分别通过 PC 客户端 1 向 PMU 装置采集单元发送数据,通过 PC 客户端 2 接收 PMU 装置集中单元。由此在 PC 客户端 1 形成带时标的发送数据文件,同时在 PC 客户端 2 形成带时标的接收数据文件,最后将两个文件导入 PMU 测试仪软件中进行处理,自动生成测试报告。具体接线如图 4 所示。

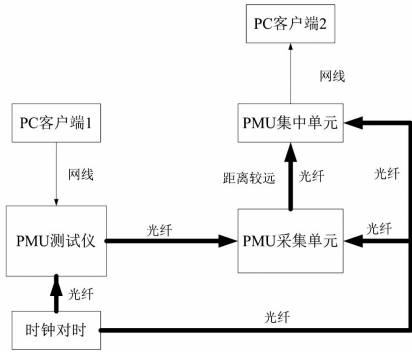


图 4 PMU 集中单元与 PMU 采集单元距离较远时接线原理

可以看出,此种接线通过两个 PC 客户端和 PMU 装置形成闭环接线测试,适用于 PMU 装置集中单元和采集单元距离较远时的情况,其中一个客户端向 PMU 装置采集单元的发送数据,另一个客户端接收 PMU 装置集中单元数据,通过比对相同时刻的数据来计算测试误差。

2.2 工作流程

按照智能变电站 PMU 装置采集单元和 PMU 装置集中单元的安装位置特点,供用户选择不同的测试模式。PMU 测试仪软件设计流程图如图 5 所示。

通过选择不同的测试模式,智能变电站 PMU 测试仪可以持续完成所有的测试项目,计算测试误差,自动生成测试报告。

3 测试案例分析

3.1 测试背景

所研制的 PMU 测试仪已经应用在某新建 500 kV 智能变电站中。该变电站的 500 kV 部分为 3/2 接线,本期投入 4 串;220 kV 部分为双母双分段接线,本期 10 回出线。

变电站 220 kV 采集单元和集中单元在 220 kV 继电保护小室里面,共组一个屏,500 kV 采集单元在 500 kV 继电保护小室里面,单独组屏。220 kV 采集单元距离 PMU 装置集中单元距离较近,500 kV 采集单元距离 PMU 装置集中单元较远。

3.2 智能变电站 220 kV 间隔测试

下面以一条 220 kV 新建线路为例,重点阐述其 PMU 装置的电压电流静态检测和动态检测。由于 220 kV 采集单元与 PMU 装置集中单元在同一屏柜,根据 2.1 节的接线原理,可以用“同 PC 端收发模式”进行测试,即用一个 PC 客户端完成测试数据的发送和接收。按照文献[14]设置相关静态动态测试标准。 U_n 为额定电压, I_n 为额定电流,所有测试值均为 2 次值。测量中仅仅列举典型的电流电压测试(静态测试)和幅值调制(动态测试)的测试结果,见表 1 和表 2。

表 1 智能变电站 220 kV 线路间隔静态电流电压测试结果

测试项	测试名称	标准值	测量值	误差/%
U_a 幅值/V	10% U_n	5.773 5	5.772 3	0.001 7
	10% I_n			
	50% U_n	28.867 5	28.866 7	0.001 1
	50% I_n			
	100% U_n	57.735 0	57.733 4	0.002 3
	100% I_n			
I_a 幅值/A	10% U_n	0.100 0	0.099 9	0.005 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.500 0	0.499 8	0.016 8
	50% I_n			
	100% U_n	1.000 0	0.999 6	0.029 7
	100% I_n			
I_a 相位/(°)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			

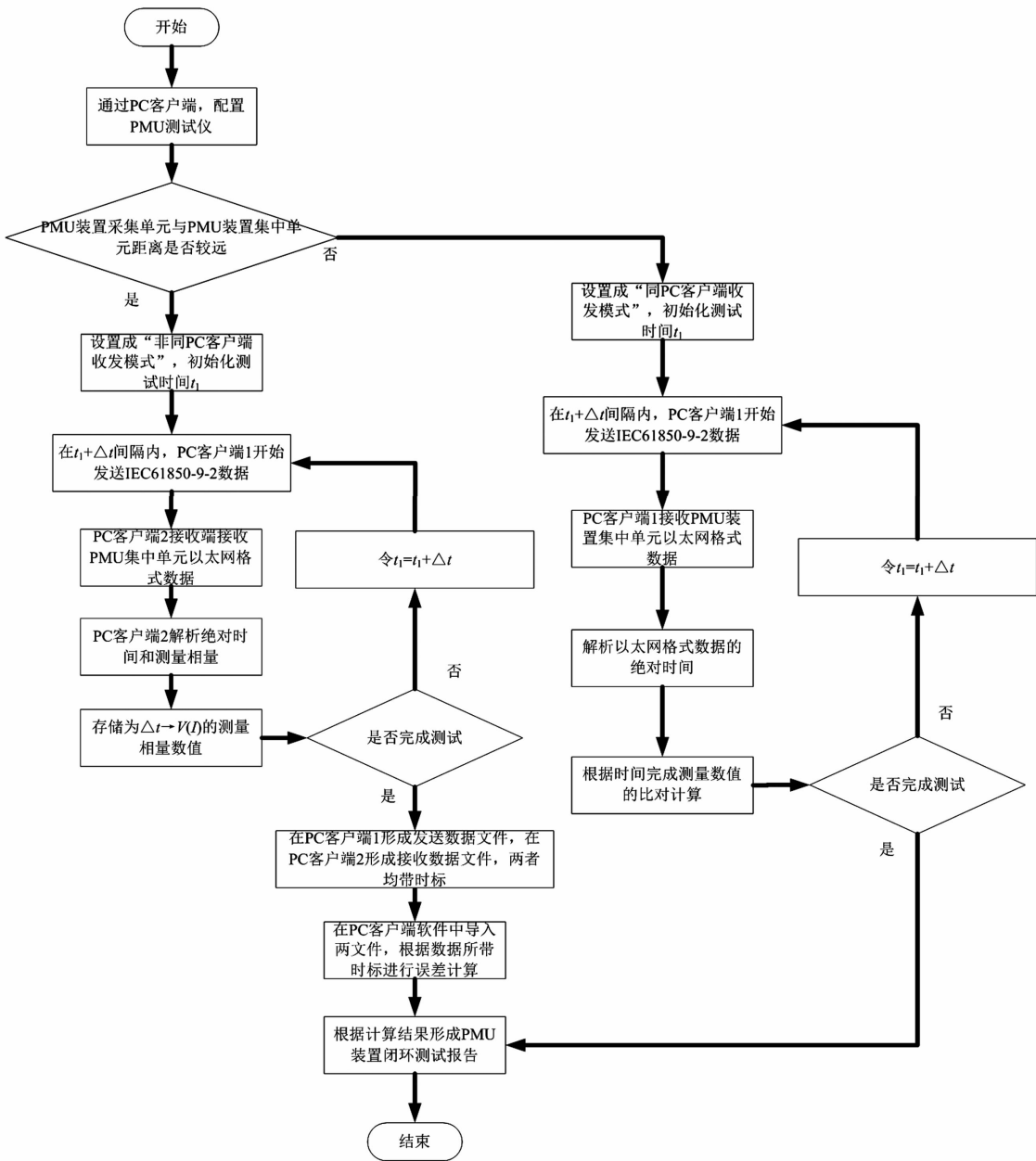


图 5 智能变电站 PMU 测试仪软件流程

通过测试结果可以看出,此条线路的 3 个测试项目均合格。而在实际现场调试中,通过 PMU 装置采集单元屏柜显示核对和调度主站之间的加量核对结果,均可以看出 PMU 装置的静态和动态数据测试均有较为满意的效果。

3.3 智能变电站 500 kV 间隔测试

以 1 条 500 kV 新建线路为例,重点阐述其 PMU 装置的电压电流静态测量和动态测量。由于 500 kV 采集单元与 PMU 装置集中单元在同一屏柜,根据图 4,可以用“非同 PC 端收发模式”进行测试,即用两个 PC 客户端完成测试数据的发送和接收。所有测试条件设置与 3.2 节相同,测试结果见表 3 和表 4。

表 2 智能变电站 220 kV 线路间隔
0.1 Hz 幅值调制测试结果

测试项	标准值	测量值	误差/%
U_a/V	57.740 0	57.730 0	0.014 4
U_b/V	63.053 4	63.062 6	0.013 2
U_c/V	56.586 9	56.576 9	0.014 4
U_a 相角/(°)	0.000 0	-0.166 2	0.166 2
U_b 相角/(°)	-120.000 0	-120.155 0	0.155 0
U_c 相角/(°)	120.000 0	119.845 6	0.154 4
基波频率/Hz	50.000 0	50.000 0	0.000 0
频率变化率/(Hz·s ⁻¹)	0.000 0	-0.001 0	0.001 0

表 3 智能变电站 500 kV 线路间隔静态电流电压测试结果

测试项	测试名称	标准值	测量值	误差/%
U_a 幅值 /V	10% U_n	5.773 5	5.772 3	0.001 7
	10% I_n			
	50% U_n	28.867 5	28.866 7	0.001 1
	50% I_n			
	100% U_n	57.735 0	57.733 4	0.002 3
	100% I_n			
U_a 相位 /(°)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			
I_a 幅值 /A	10% U_n	0.100 0	0.099 9	0.005 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.500 0	0.499 8	0.016 8
	50% I_n			
	100% U_n	1.000 0	0.999 6	0.029 7
	100% I_n			
I_a 相位 /(°)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			

通过测试结果可以看出,此条线路的 4 个测试项目均合格。而在实际现场调试中,从 PMU 装置采集单元屏柜显示核对和调度主站之间的加量核对中,均可以看出 PMU 装置的静态和动态数据测试都有较为满意的效果。

表 4 智能变电站 500 kV 线路间隔 0.1 Hz 幅值调制测试结果

测试项	标准值	测量值	误差/%
U_a /V	52.315 2	52.305 2	0.014 5
U_b /V	63.463 0	63.472 2	0.013 3
U_c /V	52.747 1	52.736 5	0.015 3
U_a 相角/(°)	0.000 0	-0.177 6	0.177 6
U_b 相角/(°)	-120.000 0	-120.172 2	0.172 2
U_c 相角/(°)	120.000 0	119.834 1	0.165 9
基波频率/Hz	50.000 0	50.000 0	0.000 0
频率变化率 /(Hz·s ⁻¹)	0.000 0	-0.001 0	0.001 0

3.4 测试比对

采用“同 PC 端收发模式”并考虑典型的电流电压静态测试和幅值调制动态测试方法,将测试仪分

别用于两个智能变电站 PMU 装置的主流厂家的设备进行测试,测试合格标准和测试条件均不变,测试结果如图 6 所示。

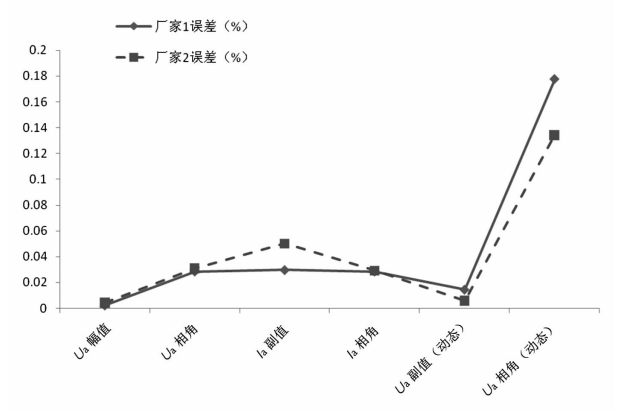


图 6 不同厂家测试结果比对

图 6 中, U_a 幅值(动态)和 U_a 相角(动态)是指基于 50 Hz 的 0.1 Hz 调制频率的幅值调制试验,其余均为 50 Hz 的静态电流电压测试。从数据对比来看,两个厂家的测试均合格;而厂家 1 的静态测试精度更好,厂家 2 的动态测试精度更好。

5 结 语

前面根据智能变电站 PMU 装置现场实际应用情况,研制出智能变电站 PMU 测试仪,并着重介绍该测试仪研制的关键点,介绍了两种方式下的测试流程。通过智能变电站 PMU 装置测试方法和 PMU 测试仪的研制,能快速实现对智能变电站 PMU 装置的静态和动态响应精度检测,减少了繁琐的数据处理工作和报告编制工作,提高了智能变电站 PMU 装置测试效率和正确性。

经某新建 500 kV 智能变电站的 PMU 装置测试证明,该测试仪功能实用性强、操作灵活方便、界面友好,为数字化变电站 PMU 的可靠应用提供了保证。PMU 测试仪的使用,可大大提高中国大电网广域测量系统的建设质量,保证智能电网的可靠运行。

参考文献

[1] 李辉,徐建源,刘飞,等. 高性能同步相量测量装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(7): 81-83.

[2] 段刚,严亚勤,谢晓东,等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):73-80.

[3] 马庆法. 高精度电力系统轻型广域测量装置及系统

[D]. 济南:山东大学,2014.

[4] 张恒旭,靳宗帅,刘玉田. 轻型广域测量系统及其在中国的应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):85-90.

[5] 谢潇磊,刘亚东,孙鹏,等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):15-20.

[6] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, et. al. Design Aspects for Wide-area Monitoring and Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5):980-996.

[7] 许勇,王慧铮,李倩,等. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术,2010,34(11):1-5.

[8] 毕天姝,刘灏,杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):62-67.

[9] 张晓莉,周泽昕,张道农,等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(2):31-36.

[10] 张道龙,刘灏,毕天姝,等. 中外 PMU 静动态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):140-145.

[11] 包伟,裘愉涛,潘武略,等. 一种基于 IEC 61850 的
~~~~~  
(上接第 47 页)

[8] Glenn A D, Thomas E D. Short-time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(3):194-199.

[9] Chen Shelly L, Black William Z. High-temperature Sag Model for Overhead Conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1):183-188.

[10] 徐青松,韩芳,王孟龙. 架空导线载流量的等效风速系数算法[J]. 高电压技术,2008,34(10):2200-2204.

[11] 马国栋. 电线电缆载流量(2版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013:41-111.

[12] 配网运行规程:Q/GDW 519-2010[S],2010.  
~~~~~  
(上接第 51 页)

统接入地铁牵引供电系统的研究较少,上述所建立的模型和光伏并网方法可以起到借鉴作用.

参考文献

[1] 何颖,赵争鸣. 新疆光伏发电现状及发展对策[J]. 能源工程,2004(4):35-37.

[2] 胡仁祥,王晓斌,常喜强. 并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究[J]. 四川电力技术,2012,35(3):27-29.

[3] MB Caracciolo, R Faranda, S Leva. Photovoltaic Applications in Railway Stations[C]. International Conference on Electricity Distribution,2007.

[4] Mayer O, Lynass M, Gómez M, et al. Design Aspects for PMU 测试仪的研制[J]. 电测与仪表,2015,52(17):125-129.

[12] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation: Part 7-4 Basic Communication Structure——Compatible Logical Node Classes and Data Object Classes;IEC 61850-7-4[S],2010.

[13] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems: IEEE Standard C37.118.1:2011[S],2011.

[14] 智能变电站自动化设备检测规范 第6部分:同步相量测量装置:Q/GDW 11202.6-2014[S],2015.

[15] 电力系统实时动态监测系统 第2部分:数据传输协议:GB/T 26865.2-2011[S],2011.

作者简介:

何 笠(1985),工程师、硕士,主要研究方向为智能电网技术、继电保护及自动化、电力系统稳定与控制等;

滕予非(1984),博士,主要研究方向为智能电网技术、电力系统稳定与控制、高压直流输电等.

(收稿日期:2018-01-06)

~~~~~

[13] 张尧,周鑫,牛海清,等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(11):2081-2086.

[14] 苏瑞波,王鹏,康守亚,等. 空气敷设下 10 kV 三芯电缆应急时间计算[J]. 南方电网技术,2015,9(11):78-83.

[15] 阮班义,王金生,汪光煌,等. 基于热路模型的架空导线暂态载流量研究[J]. 绝缘材料,2015,48(8):73-77.

作者简介:

张 禹(1988),硕士、工程师,主要从事电力设备在线监测、负荷管理和绝缘方面的研究工作.

(收稿日期:2018-01-16)

~~~~~

High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply [C]. European PV Solar Energy Conference,2014.

[5] 倪卫标,沈小军,赵时旻,等. 光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(11):78-81.

[6] Li Qiang. Analysis on the Application of Photovoltaic Power Generation Project in a Metro Section [J]. Electric Railway, 2016(4):32-35.

[7] 张国梁,李虹,刘立群,等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 研究[J]. 电源技术,2017(1):111-114.

作者简介:

郭晓宇(1970),本科,高级工程师,主要从事铁道供电相关研究工作.

(收稿日期:2018-01-29)

基于全场景系统的新一代智能变电站 整组传动调试方法

李泳龙^{1,2}, 郑永康², 李小鹏², 沈大千³, 董汉彬²

- (1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司广安供电公司, 四川 广安 638600)

摘要:随着智能变电站的不断发展,电子式互感器已广泛应用于新一代智能变电站。电子式互感器的应用导致常规智能变电站的整组传动调试方法难以适用于新一代智能变电站。提出了一种适用于新一代智能变电站的整组传动调试方法。首先对常规智能变电站的整组传动试验方法以及其局限性进行了概述。其次,介绍了适用于新一代智能变电站的全场景测试系统,并结合某220 kV变电站现场调试实例,详细介绍了全场景系统用于变电站现场调试的关键步骤。最后,在对比两种整组传动调试方法的基础上,总结了利用全场景系统进行整组传动调试的优势。

关键词:新一代智能变电站;整组传动试验;全场景系统

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0068-05

Whole Group Transmission Commissioning Method for New Generation of Smart Substation Based on Whole Scene System

Li Yonglong^{1,2}, Zheng Yongkang², Li Xiaopeng², Shen Daqian³, Dong Hanbin²

- (1. Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Guangan Power Supply Company, Guangan 638600, Sichuan, China)

Abstract:With the development of smart substation, electronic transformer has been widely used in the new generation of smart substation. But the traditional whole group transmission commissioning method is hardly used in the new generation of smart substation because of the application of electronic transformers. A whole group transmission commissioning method for the new generation of smart substations is presented. Firstly, an overview of the test method and its limitations in the conventional smart substation are given. Secondly, the whole scene system suitable for the new generation of smart substation is introduced. Combined with the example of a 220 kV substation commissioning, the key steps of the whole scene system in the field commissioning of substation are introduced in detail. Finally, based on the comparison between the two sets of transmission commissioning methods, the advantages of using the whole scene system for the whole group transmission commissioning are summarized.

Key words:new generation of smart substation; whole group transmission commissioning; whole scene system

0 引言

随着智能变电站各方面经验的积累,国家电网公司提出并推进了基于电子式互感器的新一代智能变电站(以下简称新一代智能变电站)的建设,这也

国家电网公司科技项目:智能变电站二次系统优化关键技术研究
(521999160004)

对变电站现场调试工作提出了新的挑战。智能变电站中各种设备之间的关联越来越紧密,多个设备的实时状态都会对保护装置产生影响^[1]。在变电站调试过程中,整组传动试验是其中一项重要内容,其目的是为了验证各有关保护装置相互动作、重合的情况,检验各有关断路器跳合闸回路和传动开关的正确性,以及各装置间相互配合的可靠性和动作时

间是否满足要求^[2]。

在基于常规互感器的智能变电站(以下简称常规智能变电站)中,整组传动试验通过继电保护测试设备在单间隔端子排上通入电流、电压的模拟量到合并单元,合并单元在内部转换为数字量发送到保护装置上,保护装置根据接收到的数据量做出相应反应,继而可完成整组传动试验。以线路间隔为例,可完成保护跳闸传动试验与母线保护配合性试验、软压板配合性试验、检修机制联动试验、监控及保护信息主机相关联调等。而在新一代智能变电站中,采用了电子式互感器,运用了罗氏线圈。罗氏线圈的引出线采用小信号屏蔽电缆并外套屏蔽管后,连接到底座内的采集单元。一次传感器采集到的模拟信号输出至底座内的采集单元,采集单元将其转化为与其成正比的数字信号,由光缆输出串行数字信号至合并单元^[3]。由于新一代智能变电站信号传输发生了变化,给合并单元通入模拟量的试验方法已不适用新一代智能变电站。另外,从一次侧加量的方法也不适用,该方法仅适用于稳态试验,即验证互感器的变比、极性等,而在整组传动试验中,从一次侧加量无法精确地实时控制试验设备输出故障大电流,也就无法模拟出真实的故障状态。

下面在分析常规智能变电站整组传动调试方法局限性的基础上,介绍了适用于新一代智能变电站的整组传动调试方法。该方法主要利用全场景试验系统完成调试。结合某 220 kV 新一代智能变电站现场调试工作,详细介绍了全场景系统调试的一些关键步骤和优势。

1 常规智能变电站整组传动调试方法

1.1 常规整组传动调试系统组成

常规整组传动调试系统包括计算机、继电保护测试系统软件、模拟量继电保护测试仪。

图 1 是利用常规整组传动调试方法的流程图。

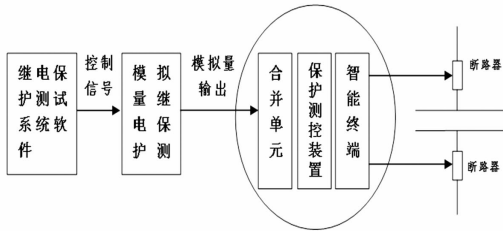


图 1 常规整组传动调试方法的流程

1.2 常规整组传动调试方法的主要步骤

常规整组传动试验是通过给合并单元通入电流、电压模拟量信号,并模拟各种类型的故障,继电保护装置根据所测量的电流、电压信号动作于开关,从而达到检验保护装置动作情况、断路器的分、合闸线圈二次回路、各保护装置间的配合情况以及故障录波、网络交换机、监控后台系统的目的^[4]。

常规整组传动试验的步骤如下:

- 1) 将二次系统视为检验对象。试验前,应保证二次系统处于正确的联通状态。
- 2) 根据电流、电压互感器的变比以及合并单元的配置和试验需求,通入电流、电压模拟量检验各装置的显示情况。
- 3) 根据整组传动试验对二次系统性能的检验需要,计算并设定正常状态、故障状态的模拟量。试验完成后,试验人员需要检查保护装置、测控装置、合并单元、智能终端、监控后台系统等二次系统设备行为的正确性,检查信息传输显示以及开关动作情况的正确性。

1.3 常规试验系统的局限性

常规智能变电站的合并单元接收的是电流、电压互感器的二次模拟量信号。合并单元将接收到的模拟量信号转换为数字信号并传输给相应保护测控装置,所以可以通过传统保护测试仪来设置不同电流电压,模拟各种故障条件,从而验证二次系统各设备动作响应的正确性。而新一代智能变电站采用的是电子式互感器,其原理是采用罗氏线圈的一次电流传感器,将传感器输出的模拟电流电压信号输出至采集单元,采集单元再将模拟信号转换为数字信号后经光缆输出至合并单元。因此,传统测试仪不能对其进行加量。新一代智能变电站可以采用全场景测试系统来完成整组传动的单间隔试验,特别适用于跨间隔试验。

2 全场景测试系统

全场景测试系统由硬件部分和软件部分组成。其中硬件部分包括:无线控制主机、采集器模拟器、通用计算机。软件部分包括:智能变电站仿真平台、建模及试验控制平台。全场景系统信号传输如图 2 所示。

1) 智能变电站仿真平台

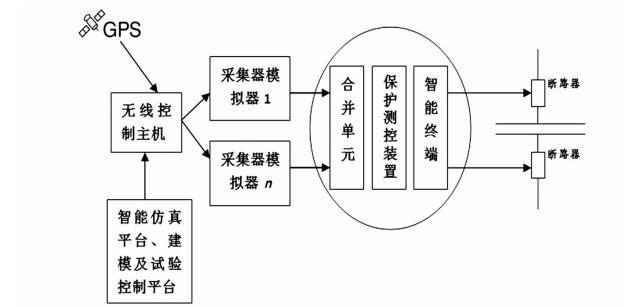


图2 常规全场景系统信号传输

可显示模拟量波形,显示模拟断路器位置状态返回数据以及发生变化的时间,完成智能变电站的时域仿真。

2)建模及试验控制平台
提供了电压源、断路器、隔离开关、线路、互感器、母线、变压器、阻抗元件、负荷等各种类型元件的模型库,分别用于搭建变电站仿真系统,建立起无线控制主机、采集器模拟器的通讯关联,以实现试验控制。

3)无线控制主机
负责接收仿真平台仿真的数据,通过接收GPS的定时,保证无线传输到各采集器模拟器的数据与其保持同步。

4)采集器模拟器
采集器模拟器用于模拟实际电子互感器采集单元的行为。通过将接收到的无线控制主机数据实时传输到合并单元,模拟了实际变电站中电子式互感器向合并单元数据传输的全过程。通过扩展采集器模拟器,配合建模、数据仿真,可完成多间隔的同时试验以及对整个变电站全景式仿真测试。

5)通用计算机
提供功能软件运行的硬件条件^[5]。

3 全场景系统整组传动试验方法

基于全场景系统的新一代智能变电站整组传动试验步骤如下:

- 1)根据试验目的确定试验方案;
- 2)根据变电站实际情况、一次接线图建立变电站仿真模型;
- 3)采集器模拟器参数配置,与无线控制主机进行关联,保证信号同步输出到合并单元;
- 4)检查智能变电站采集器模拟器设置正确性、试验间隔开关状态;

- 5)通过设置元件模型试验参数模拟所需试验条件,设置完成后仿真计算;
 - 6)通过无线控制主机将仿真完成后的数据发送到采集器模拟器,采集器模拟器再将信号下发到合并单元;
 - 7)试验人员检验二次系统的动作情况以及开关机构试验后的位置状态来确定试验正确性;
 - 8)试验结束。
- 试验步骤如图3所示。

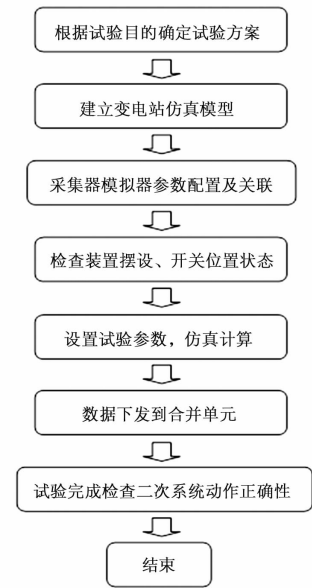


图3 全场景测试系统试验步骤

3.1 试验关键步骤

1)无线对时同步
为了保证系统输出数据的准确性,所有的采集器模拟器必须处于统一的同步对时状态。在对时系统中,无线控制主机作为主时钟,可接收GPS卫星信号保证自身时钟的准确性。各采集器模拟器作为对时系统的从时钟,通过接收主时钟的无线信号进行同步对时。在完成对时后,采集器模拟器自身的恒温晶振可保持守时状态。

2)变电站仿真
变电站仿真系统接线图根据变电站主接线图搭建。该仿真平台涉及多种元件模型,包含电源元件、线路元件、变压器元件、阻抗元件、断路器元件、隔离开关元件、电流电压互感器元件以及故障模型元件等。利用各种元件的实际参数可搭建变电站仿真系统接线图。在接线图以及各元件参数设置完成后,可进行仿真操作^[6]。图4为某220 kV变电站仿真接线图。

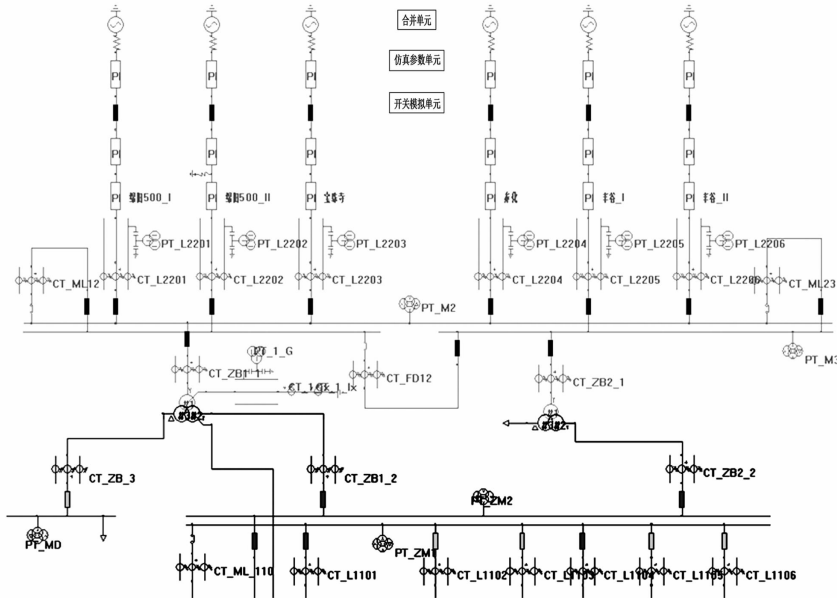


图 4 某 220 kV 变电站仿真接线

3) 与采集器模拟器进行通信

在仿真接线图中,通过“终端模拟器”图框进入设置,可设置相应采集器模拟器的各种实验参数。设置完成后,与无线控制主机进行关联。关联成功后,无线控制主机通过无线传输,将通讯信息下发到各采集器模拟器上,采集器模拟器再将接收完毕的消息返回,即建立了通信。在整个通信建立正确后就可以向合并单元发送数据了。

3.2 测试注意事项

首先需要完成的是系统的仿真,然后根据试验需求以及电子式电流、电压互感器的参数配置,确定“采集器模拟器”的理想数量。当模拟器的数量足够时,可以实现对变电站二次系统多个电压等级、多个间隔的试验。当模拟器的数量不足时,可以按间隔分步完成二次设备的试验,最少可用两台模拟器完成最小试验系统。

在建立仿真对象时,需要对各种元件模型的参数进行设置,如断路器模型与隔离开关模型的位置状态、线路模型的长度与电阻抗、变压器模型的额定容量与绕组接法、故障模型的发生时间、故障电流的大小等等参数属性进行设置。参数设置好后进行仿真计算。待仿真计算完成后,无线控制主机再将仿真结果下发到各个采集器模拟器,采集器模拟器再将信号输出到相应的合并单元,从而完成对二次系统的加量。试验人员再根据所设故障检查二次系统各设备的响应行为是否正确。

4 两种整组传动试验方法对比

在智能变电站中,整组传动试验是二次系统调试中难度最大,需要配合最多的关键性试验,能够检验各一次、二次设备性能与设计、运行要求是否相符^[7]。由于智能变电采用全数字化信息,通过全场景试验系统建模仿真,当发生故障时,可以体现出变电站其他设备的状态,实现了变电站的整体测试^[8]。以下具体对常规智能变电站和新一代智能变电站整组传动试验方法进行了对比,如表 1 所示。

表 1 两种整组传动试验方法对比		
对比项	常规智能变电站	新一代智能变电站
故障设置	瞬时性故障、永久性故障	瞬时性故障、永久性故障
压板及检修一致性检查	保护装置、智能终端、合并单元	保护装置、智能终端、合并单元
信号传输媒介	模拟量	数字量
软件仿真性能	不具备	具备,可直观显示一次模型
系统传输信号能力	单模块加量	多模块加量

两种方法的相同处如下:

- 1) 都有瞬时性故障和永久性故障的条件设置,用以检查断路器的断开、重合动作情况;
- 2) 设置瞬时性故障时都要检查双套保护装置和 A、B、C 三相。在压板及检修一致性试验中也设置了相同的试验步骤。

不同处在于：

1) 常规智能变电站合并单元通过电缆与电流、电压互感器连接,通过测试仪给合并单元输出电流、电压模拟量,传输媒介为电缆。新一代智能变电站中,采集器模拟器给合并单元输入的信号为数字信号,传输媒介为光纤跳线。

2) 常规智能变电站各厂家的继保测试软件界面简单,操作便捷。而全场景测试系统的 ISTS 软件,需具有一定仿真建模能力,各项参数配置较为复杂。ISTS 能够直看到变电站的一次模型,将整个系统的输入信息纳入到了试验的范围中,进行系统级别的仿真,保证了变电站二次系统的完整性。

3) 传统继电保护测试仪只能对单间隔装置进行加量,其电流、电压输出端口也有限。全场景测试系统可根据试验需求,使用相应数量的采集器模拟器,且模拟器数量可扩充。

全场景测试系统的试验方法能发现工程实施中存在的错误。同时还具有以下优势：

1) 可以检验母线电压合并单元输出到间隔合并单元数据的延时正确性,检验各合并单元自身参数的设置；

2) 可以对多个间隔同时进行加量,检查动作行为,提高工作效率；

3) 可以检验智能变电站的监控系统、信息一体化平台对实际故障信息的处理能力。

5 结 语

全场景测试系统适用于新一代智能变电站的整组传动调试,该系统的先进性及可靠性已在某 220

kV 新一代智能变电站现场得到了验证。同时,该系统在现场试验中的效率优势具体体现在:线路间隔较多的情况下,利用多台采集器模拟器同时设置各线路间隔故障,可以同步完成各间隔的传动试验及检修一致性试验。该次试验结果也为今后新一代智能变电站整组传动试验积累了经验,提供了参考。

参考文献

[1] 井实. 智能变电站二次系统测试方法及其关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.

[2] 陈鑫,李冰. 智能变电站二次系统的调试方法研究及其应用[J]. 电子世界,2016(16):115.

[3] 宋璇坤,刘开俊,沈江. 新一代智能变电站研究与设计[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[4] 汪兴旺. 220 kV 绵阳东智能变电站调试研究[J]. 通讯世界,2014(1):77-79.

[5] 王彪,甄威,张华,等. 智能变电站二次系统试验方法综述[J]. 四川电力技术,2012,35(2):4-8.

[6] 李静. 智能变电站全场景试验系统仿真与测试软件平台研制[D]. 成都:电子科技大学,2012.

[7] 姜振超,刘明忠. 智能变电站二次设备系统级调试方法探讨[J]. 四川电力技术,2012,35(2):1-3.

[8] 井实,黄琦,甄威,等. 基于无线同步技术的智能变电站全场景试验系统[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):72-78.

作者简介：
李泳龙(1988),硕士研究生、工程师,从事电力系统继电保护相关研究工作。

(收稿日期:2018-02-01)

(上接第 30 页)

[16] 李亚伟,张星海,陈洪波,等. RTV 涂层表面绿球藻的生长对绝缘支柱电气性能的影响[J]. 电工技术学报,2015,30(12):330-335.

[17] 马仪,李明. 高海拔直流绝缘子污秽特性试验研究[C]. 云南电力装备制造业振兴与创新论坛文集,2008.

[18] 赵宇明,黎小林,吕金壮,等. 高海拔地区外绝缘参数海拔修正方法研究[J]. 南方电网技术,2011,5(2):59-63.

[19] 高电压试验技术 第 1 部分:一般试验要求:GB/T 16927.1-2011[S],1998.

[20] 高电压试验技术 第 2 部分:测量系统:GB/T 16927.2-2011[S],1998.

[21] 谷琛,张文亮,范建斌. 超/特高压输电工程典型间隙

操作冲击放电特性试验研究综述[J]. 电网技术,2011,35(1):11-17.

[22] Insulation Coordination, Part 2: Application Guide (3rd ed.). IEC 60071-2:1996[S],1996.

作者简介：
罗 强(1965),高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作；
王 强(1965),硕士、教授级高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作；
罗 鸣(1983),硕士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作；
黄瑞平(1984),硕士、高级工程师,从事超高压输电研究工作；
张劲骁(1991),硕士、助理工程师,从事输电线路技术设计工作。

(收稿日期:2018-01-29)

基于逻辑回归的高压并联电抗器 过流误报警判别方法

朱丽嫚¹, 罗荣森², 冯世林², 滕予非²

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

摘要:在分析互感器测量误差对高压并联电抗器过流报警精度影响的基础上,提出了基于逻辑回归分析的高压并联电抗器过流误报警判别方法。该方法对高压并联电抗器的电压和报警信号数据进行逻辑回归分析。针对仪表测量精度低的问题,根据回归系数定义了两种误报警准则。以某实际 500 kV 输电线路高压并联电抗器为例,采用实测数据和仿真数据进行验证。实例研究结果表明,该方法能快速识别高压并联电抗器的过流报警精度,并且不需要停电试验或额外增加测量设备,具有很高的工业应用价值。

关键词:高压;并联电抗器;逻辑回归;过流误报警

中图分类号:TM723 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0073-04

Discrimination Method Based on Logistic Regression for False Overcurrent Alarm of High-voltage Shunt Reactor

Zhu Liman¹, Luo Rongsen², Feng Shilin², Teng Yufei²

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

Abstract:The influence of transformer measuring error on overcurrent alarm accuracy of high-voltage shunt reactor is analyzed. And then, a discrimination method of false overcurrent alarm for high-voltage shunt reactor is proposed based on logistic regression. The method is used to analyze the relationship between the measuring voltage and alarm signal of high-voltage shunt reactor with logistic regression model. Considering the low precision of instrument measurement, two false alarm criteria are defined with regression coefficient. Taking a practical high-voltage shunt reactor of 500 kV transmission line for example, it is verified by both the actual measured data and simulation data. The results show that the proposed method can rapidly identify the overcurrent alarm accuracy of high-voltage shunt reactor. And also the method does not need outage test or additional measuring equipment, so it has a high industrial application value.

Key words:high voltage; shunt reactor; logistic regression; false overcurrent alarm

0 引言

并联电抗器,一般接在高压输电线的末端和地之间^[1],用于对输电线路进行无功补偿,对线路的分布电压进行有效控制,抑制工频过压^[2-5]。然而,在电力系统实际运行中,高压并联电抗器过电流报警频繁发生,影响电力系统安全可靠运行。

工程经验表明,高压并联电抗器过流报警存在

两方面的原因。一是由于受到电力系统运行方式的影响,高压并联电抗器连接点的电压超过了电抗器额定电压,导致流过电抗器的电流超过额定值,进而引发报警。这一类报警是真实报警。二是由于高压并联电抗器中电流测量装置出现了问题,导致误差增加,甚至出现错误的测量结果而引发报警。这一类报警其实是在电流并未超过有效值的情况下而出现的误报警。

为了区分高压并联电抗器是否存在过流误报

警,现场往往需对电抗器和输电线路停电试验,判断器件测量误差是否合理。由于需停电操作,这种方法对电力系统的稳定运行和经济运行有很大影响。为此许多学者提出了基于数据的电气系统二次设备故障诊断方法。文献[6]提出一种基于站间协同信息的电子式互感器故障诊断方法,对两端互感器测量值比较分析进行故障定位。文献[7]通过分析互感器故障模式和一次系统电气量变化特点进行故障诊断。文献[8]通过建立电流观测器模型进行二次量异常故障在线识别。文献[9]通过分析牵引变电所多个互感器测量值之间的相关关系对二次量故障进行在线识别。然而,上述分析方法需要在二次侧获得测量值。对于高压并联电抗器过流报警,由于只可以得到报警信号而无法获取其有效电流值,所以以上方法都不适用。

为此,提出了一种基于逻辑(logistic)回归^[10]的高压并联电抗器过流误报警判别方法。该方法通过电抗器过流报警发生概率与测量电压之间的关系来判断报警的真实性。该方法简单可行,计算量小,便于工程应用。

1 高压并联电抗器过流报警

以某线路一次接线图为例,如图 1 所示,L 是并联在输电线路上的三相电抗器;PT 是电压互感器,用于测量线路电压,将测量值上传并保存到数据采集与监控(SCADA)系统中;CT 是电流互感器,用于测量流经 L 的电流值,该测量值通常不会被系统采集,只用于报警显示,当大于 L 的额定电流时,系统发出电流报警信号。

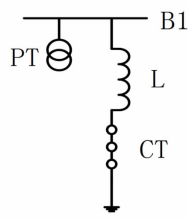


图 1 某线路并联电抗接线

忽略设备精度及运行环境等因素的影响, U_L 和 I_L 关系如式(1)所示:

$$I_L = \frac{U_L}{\sqrt{3}\omega L} \tag{1}$$

式中: ω 是相位差; L 是电抗器的电感值。

可以看出, I_L 可由 U_L 线性表示,当 $I_L = I_N$ 时, $U_L = U_N$ 。根据系统报警的原理,当测量电压 U_L 大于额定电压 U_N 时,系统发出过流报警信号,其关系描述如式(2):

$$OC = \begin{cases} 0 & U_L \leq U_N \\ 1 & U_L > U_N \end{cases} \tag{2}$$

其中,OC 表示系统发出过流报警的逻辑值,当 $OC = 1$ 时系统发出过流报警。设过流报警发生的概率为 p ,则 p 和测量电压 U_L 之间的关系如图 2 所示。

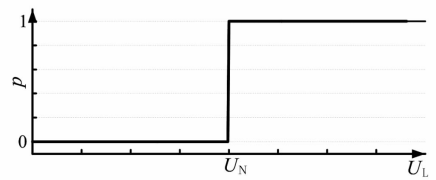


图 2 无测量误差,过流报警发生概率与测量电压关系

考虑实测数据的测量误差,过流报警发生概率与测量电压之间的关系如图 3 所示。

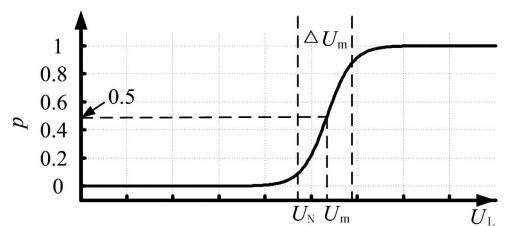


图 3 有测量误差,过流报警发生概率与测量电压关系

对比图 2 和图 3 可以看出:

1)当测量误差为 0 时, $p - U_L$ 关系曲线的中心点(即 $p = 0.5$ 对应的点)对应的电压为 U_N ,曲线的不确定度 $\Delta U_m = 0$;

2)当测量误差不为 0 时, $p - U_L$ 关系曲线中线点对应电压 U_m ,且 $U_m \neq U_N$,此时,曲线的不确定度 $\Delta U_m > 0$ 。

在图 3 中,由于测量误差的存在,使得 $p - U_L$ 关系曲线中心点和不确定度发生改变,考虑对工业设备测量精度要求,电压互感器测量误差应不超过一定范围,通常要求其不大于 0.5%,所以,互感器合理的测量值应满足式(3)关系:

$$\begin{cases} \frac{|U_m - U_N|}{U_N} \leq 0.5\% \\ \frac{\Delta U_m}{U_N} \leq 2\% \end{cases} \tag{3}$$

式中, ΔU_m 为测量电压对应置信概率为 90% 的不确定度。

2 逻辑回归模型

逻辑回归模型常用于非线性统计分析,适用于二分类问题^[11]。系统发生过流报警的概率为 p , 不发生的概率为 $1 - p$, 对 $p/(1 - p)$ 作 logit 变换, 以电压测量值为因变量, 建立逻辑回归模型:

$$\ln \frac{p}{1 - p} = \beta_0 + \beta_1 x \tag{4}$$

即:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}} \tag{5}$$

式中: x 为并联电抗器两端的测量电压; β_0 和 β_1 为回归参数。通过式(1)和式(2), 可得到系统过流误报警判据如式(6):

$$\left| \frac{-\beta_0}{\beta_1} - U_N \right| > 0.5\% \tag{6}$$
$$\frac{\left(\ln \frac{p_{con}}{1 - p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1} - \frac{\left(-\ln \frac{p_{con}}{1 - p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1} > 2\%$$

式中, p_{con} 为置信概率, 取 $p_{con} = 0.9$ 。当两个判据任一个成立时, 可认为电流报警为误报警。

3 过流误报警判别方法

建立高压并联电抗器过流报警发生概率与测量电压之间的逻辑回归模型, 通过参数估计, 利用上面定义的判据对过流报警进行判别, 具体判别方法如下:

1) 数据获取: 从 SCADA 系统获取电抗器连接点的电压测量数据和对应时刻的过流报警信息, 以分钟为时间间隔, 取不同时间点的多组数据。

2) 数据预处理: 以 1 kV 为区间宽度, 将获取的所有电压值划分在不同区间, 例如 [523.5, 524.5) kV 为其中一个电压区间, 该区间内的电压值满足 $523.5 \leq U < 524.5$, 在进行参数估时, 区间电压值取区间左值 523.5 kV。利用直方图统计各区间发生电流报警的概率 $p(V_i)$:

$$p(V_i) = \frac{n_{oc}(V_i)}{n_v(V_i)} \tag{7}$$

式中: $n_v(V_i)$ 为所取测量点映射到对应电压区间的

数量; $n_{oc}(V_i)$ 为电压测量值位于对应区间时, 过电流报警发生的次数。

3) 模型建立: 建立过流报警发生概率 p 与测量电压 V_i 之间的逻辑回归模型。

4) 参数估计及报警真实性判别: 对回归系数 β_0 和 β_1 进行回归求解, 并将结果代入式(6)进行判别。

4 算例分析

4.1 算例 1 实测数据

以西南电网某 500 kV 输电线路中的某并联电抗器为例, 利用一组实测数据对其过流报警真伪进行判别。该并联电抗的额定电压为 525 kV, 额定容量为 120 MVA。在 2017 年 7 月, 该设备发生过流报警 17 973 次。通过数据对比发现, 其中有 7100 次报警发生时, 测量电压小于额定电压。另外, 当测量电压高于额定电压时, 有 6900 次未出现报警。为此, 怀疑相关测量环节出现问题。利用所提出的识别方法对此进行分析。从 SCADA 系统中获取该段时间的数据, 并通过上面介绍的方法进行预处理后的统计情况见表 1。

表 1 算例一数据统计表

电压/kV	概率	电压/kV	概率
517.5	0	526.5	0.640 666
518.5	0	527.5	0.759 191
519.5	0	528.5	0.896 996
520.5	0.016 129	529.5	0.957 447
521.5	0.051 754	530.5	1
522.5	0.137 015	531.5	1
523.5	0.261 375	532.5	1
524.5	0.402 515	533.5	1
525.5	0.523 728	534.5	1

对表 1 的数据利用逻辑回归建模进行参数估计, 获取参数 β_0 和 β_1 的值, 得到式(8)。

$$\ln \frac{p(V_L)}{1 - p(V_L)} = -384.94 + 0.730 8 V_L \tag{8}$$

将所得参数值代入两个判据:

$$\left| \frac{-\beta_0}{\beta_1} - U_N \right| = 0.033 1\% \leq 0.5\% \tag{9}$$

$$\frac{\left(\ln \frac{p_{con}}{1 - p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1} - \frac{\left(-\ln \frac{p_{con}}{1 - p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1} = 1.15\% \leq 2\% \tag{10}$$

由此可见,两个判据均不满足,可以认定该线路的并联电抗器7月报警情况属于正常报警。后续对该电抗器的电流测量等环节进行试验也表明设备正常,进一步验证了所提出的判别方法的有效性。

4.2 算例2 仿真数据

在仿真环境下,将上面的并联电抗器精度允许偏差设为1%,获取了44 640个电压数据及报警信息。按照上面的方法进行预处理后得到表2数据。

表2 算例2 数据统计表

电压/kV	概率	电压/kV	概率
517.5	0	526.5	0.565 129
518.5	0.070 423	527.5	0.633 962
519.5	0.103 359	528.5	0.693 376
520.5	0.158 829	529.5	0.760 252
521.5	0.197 996	530.5	0.850 746
522.5	0.314 086	531.5	0.857 143
523.5	0.390 269	532.5	1
524.5	0.455 621	533.5	1
525.5	0.493 255	534.5	1

同样,通过对逻辑回归模型进行参数估计,得到:

$$\ln \frac{p(V)}{1-p(V)} = -182.601\ 7 + 0.347\ 5V \quad (11)$$

代入判据得:

$$\frac{\left| \frac{-\beta_0}{\beta_1} - U_N \right|}{U_N} = 0.009\% \leq 0.5\% \quad (12)$$

$$\frac{\left(\ln \frac{p_{con}}{1-p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1} - \frac{\left(-\ln \frac{p_{con}}{1-p_{con}} - \beta_0 \right)}{\beta_1}{U_N} = 2.41\% > 2\% \quad (13)$$

可见,第2个判据成立,由此认定在仿真环境下,该高抗设备的过流报警存在误报警情况。

5 结 语

针对高压并联电抗器误报警情况,通过对报警概率和测量电压建立逻辑回归模型,并定义了误报警的判定准则。

1)基于逻辑回归的高压并联电抗器过流误报警方法是数据驱动的,避免了常规设备检测需要的停电试验,提高了设备缺陷识别的效率。

2)该方法只需要使用线路上的电压互感器有效测量值和并联电抗器的过流监测信号,不需要额外增加测量设备。结合工程实例,通过实例计算和仿真试验,取得了良好的效果。因此,该方法具有很好的实用性。

参考文献

[1] 顾生杰,田铭兴. 基于串联电容补偿的超/特高压输电线路可控并联电抗器补偿度分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1858-1863.

[2] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. 可控高抗在1000 kV交流紧凑型输电线路中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8):1832-1842.

[3] 陈水明,王威,杨鹏程. 限流电抗器对输电线路工频过电压的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(3):193-196.

[4] 孟恒信,梁建伟,薛磊,等. 山西500 kV长久三回线路电流不平衡原因分析及改造研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3):641-646.

[5] 郑涛,赵彦杰. 超/特高压磁控式并联电抗器合闸过程分析及其影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1790-1798.

[6] 熊小伏,杨雪东,刘年. 基于站间信息的电子式互感器故障协同诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21):80-83.

[7] 熊小伏,何宁,于军,等. 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法[J]. 电网技术, 2010(7):181-185.

[8] 王洪斌,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器源变性故障诊断方法形容[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24):53-58.

[9] 李朝阳,杨健维,王玘,等. 基于主元分析的牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8):103-109.

[10] Xiong Y, Zuo R. GIS-based Rare Events Logistic Regression for Mineral Prospectivity Mapping[J]. Computers & Geosciences, 2018, 111(2):18-25.

[10] 许冲,戴福初,徐素宁,等. 基于逻辑回归模型的汶川地震滑坡危险性评价与检验[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3):98-104.

作者简介:
朱丽媛(1968),工程师,研究方向为电力系统自动化。
(收稿日期:2018-03-16)

BESS 参与风电辅助服务市场效益敏感性分析

张 伟¹,马美婷²,秦艳辉³,皮 霞⁴,袁铁江⁵,刘沛汉²

(1. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司,新疆 昌吉 831100;

3. 国网新疆电力公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830000;

4. 国网甘肃电力公司经济技术研究院,甘肃 兰州 730050;5. 大连理工大学,辽宁 大连 116023)

摘 要:储能电池作为一种较优的储能方式,在解决弃风、弃光问题方面逐渐得到重视。然而电池储能电站(battery energy storage station,BESS)的经济性现状还不明朗,难以进行大规模应用。提出了一种 BESS 与常规机组竞价上网的辅助服务提供模式;建立了 BESS 的市场效益分析模型;根据模型计算,利用 Microsoft Office Excel 2007 进行 BESS 投资收益的敏感性分析,为电池储能电站方案规划提供工程经济参考。

关键词:电池储能电站;辅助服务;经济性;敏感性分析

中图分类号:TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0077-05

Sensitivity Analysis on Market Efficiency in Auxiliary Service of Wind Power with BESS

Zhang Wei¹,Ma Meiting²,Qin Yanhui³,Pi Xia⁴,Yuan Tiejia⁵,Liu Peihan²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co.,Ltd.,Urumqi 830000,Xinjiang,China;

2. State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100,Xinjiang,China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute,Urumqi 830000,Xinjiang,China;

4. State Grid Gansu Economic Research Institute,Lanzhou 730050,Gansu,China;

5. Dalian University of Technology,Dalian 116023,Liaoning,China)

Abstract:As a better energy storage method, energy storage battery gets more and more attention in solving the problem of wind and photovoltaic energy curtailment. However, the economic status of battery energy storage station (BESS) is not clear, and it is difficult to carry out the large-scale applications. An auxiliary service delivery model is proposed, in which BESS and conventional units bid against each other. Market efficiency analysis model of BESS is established, and according to the calculation of the model, the sensitivity of BESS investment returns is analyzed in Microsoft Office Excel 2007, which can provide an engineering economic reference for the planning project of BESS.

Key words:battery energy storage station; auxiliary service; economic status; sensitivity analysis

0 引 言

全球化石能源的日益匮乏和自然环境的每况愈下,无形地促进了含风、光电在内的可再生能源产业的发展。然而,可再生能源出力十分不稳定,波动幅度大,无益于电网的安全稳定运行,为火、水电等传

统机组的调峰、调频工作造成很大负担。当前,在没有清晰的辅助服务补偿制度前提下,传统机组正在无偿为风电提供调峰、调频辅助服务,对火电等传统机组的利益提出了考验,在一定程度上打消了常规机组提供电力辅助服务的积极性,影响了风电的大规模并网消纳^[1]。而储能技术在电网中呈现出的包括削峰填谷、电能的时空转移等多种应用方式,可以有效提升风电渗透率,解决电网高峰、低谷负荷的

问题;同时,能够通过合理的电价设计,促进电力市场自由化。

文献[2-3]在储能电池应用于跟踪风电场计划出力方面做了探索。文献[4]通过分析处理储能示范电场的实际数据,得到储能电池是一种高效且适用的平抑风电波动方法的结论。文献[5]研究了储能电池在应用于平抑风电功率波动时的新的控制方法。文献[6-8]均在风电场出力短期预测技术基础上,进行了 BESS 在平抑风电出力波动方面的控制策略研究。文献[9]提出一个虚拟电厂的概念,将风电场及储能系统联合起来调度管理,分析了储能的工作方式,得出了储能系统的收入和成本计算公式。

综上,目前对电池储能系统应用于电网建设的探索,还集中在风储联合系统中储能的控制策略和容量配置研究上,而在制约电池储能电站大规模发展的经济性因素方面研究尚少,从行业发展来看,研究规模化电池储能技术的经济性是十分紧迫的需求。

为保证电力系统具有可靠的风电辅助服务提供能力,实现风电安全、经济、高效的并网,亟需一种新的辅助服务电力市场模式,提高各机组提供辅助服务的积极性。下面在分析 BESS 参与风电辅助服务场景的过程中,提出了新的辅助服务市场模式。首先依据 BESS 的参与方式及参与量,建立其参与风电辅助服务的经济效益模型。然后,在 Excel 中建立 BESS 收益敏感性分析模型,由此分析影响 BESS 经济效益的敏感因素,得到对 BESS 收益影响最大、最敏感的参数,得出减少不利因素影响、改善和提高项目的投资效果的结论。

1 BESS 参与风电辅助服务场景分析

目前,随着风电的大规模入网,弃风限电现象也越来越不容小觑,风电的安全可靠并网问题也得到了越来越多的关注。众所周知,风电出力十分不稳定,出力曲线大幅度波动情况多见,且结合负荷曲线分析时,频繁发生反调峰威胁着电网的稳定运行。因此,需要系统提供辅助服务来协同风电友好并网^[10],这里将此种辅助服务称为风电辅助服务。

而现阶段,中国并没有成熟的辅助服务交易模

式,尚且不能将辅助服务和电能服务分开来看^[11]。同时也还无配合中国新能源规模化应用的补偿机制,这还处于示范试点研究阶段。目前,中国已计划实施一些电力辅助服务补偿机制试点工程,分布在弃风现象较为严峻的东北、华北和西北等地区,相应地,也会对参与辅助服务的储能系统提供商给予资金补偿,补偿方式方法没有制度化^[1]。

因此,下面效仿现有电能服务市场,提出一种新的辅助服务市场模式,如图 1 所示。在此种模式下,提供辅助服务的传统机组和储能系统都可以在保证自身盈利的情况下,根据其辅助服务提供能力给出报价。把电池储能电站看做独立个体,和提供辅助服务的传统机组竞价上网。由上级调度安排上网计划,以购电成本最小为目标,以电网安全稳定为约束,选择最佳的辅助服务提供方案。这种模式的一大优点就是无需电力系统或辅助服务需求方提供辅助服务补偿。

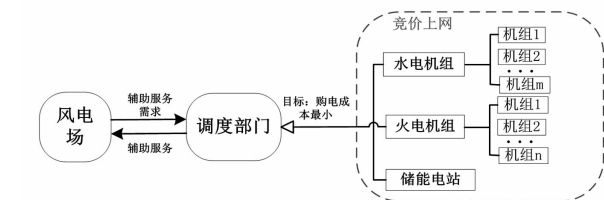


图 1 风电辅助服务提供机组参与方式

2 BESS 市场效益建模

2.1 BESS 的成本与收入构成

从分析 BESS 的成本、收入构成入手,研究 BESS 的市场效益。

首先,BESS 的成本由初始投资成本和运行维护成本组成。采用相应的电池寿命值和折现率,将 BESS 全寿命周期内的成本进行分摊,与同一时间尺度下的运行维护成本相加,得到 BESS 的年均成本和日成本。

其次,BESS 的收入包括容量收入、电量收入、环境效益和储能电池回收收入等 4 部分,其中:容量收入与电池储能电站容量有关,容量电价考虑采用两部制电价中的容量电价计算方法,按补偿储能系统固定成本和准许收益的原则确定;电量收入由 BESS 参与风电辅助服务的参与量和其充、放电电价决定,BESS 通过与常规机组竞价的方式参与风电辅助服务,其辅助服务提供量根据调度机构的安全经济分

配得出;环境效益是指在采用 BESS 后减少污染物排放的效益,即其代替传统机组承担辅助服务所减少的污染物、温室气体排放产生的效益;储能电池回收收入是在储能电站经过长期使用,达到其寿命极限时,对其金属进行回收再利用的效益。

2.2 BESS 市场效益建模

根据以上分析,建立 BESS 的市场效益模型如式(1)所示。

$$F_d = I_{total} - C_{total} = \sum_{i=1}^n (m_{UEC_i} Q_i) E_{s.out} + \frac{1}{365} P_e m_f + \sum_{i=1}^{96} I'_2 + \frac{1}{365} \sum_{i=1}^n (R_{metali} \rho_{metali} E_e / \delta_{energy-i}) \lambda - \frac{1}{365} [(C_p P_e + C_E E_e) \lambda + C_{yw} P_e]$$

(1)

式中: m_{UEC_i} 为第*i*种污染物环境负荷量单位成本^[12]; Q_i 为常规燃煤发电第*i*种污染物排放量; $E_{s.out}$ 为储能电站参与风电辅助服务放电电量; P_e 是 BESS 额定功率; m_f 为储能电站容量电价; R_{metali} 为金属*i*的单价,下标代表金属属性; ρ_{metali} 为单位电池中金属*i*的含量; E_e 是 BESS 额定容量; C_p 是 BESS 单位功率成本; C_E 是 BESS 单位容量成本; C_{yw} 是 BESS 单位年运行维护费用; $\lambda = \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1}$ 。

3 BESS 市场效益敏感性分析

3.1 多因素综合变动对 BESS 日收益的影响分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 进行 BESS 投资收益的敏感性分析,建立 BESS 收益敏感性分析模型如图 2 所示。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	BESS收益敏感性分析模型								
2	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前BESS日收益(元)	变动后BESS日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4	4						
4	额定功率(MW)	1	3						
5	额定容量(MWh)	1	4						

图 2 BESS 收益敏感性分析模型

通过滚动条控制影响因素的变动百分比,进而控制因素变动后的值(百分比增加或减少 1,代表影响因素增加或减少初始值的一倍)。根据日收益模型,以储能放电电价、BESS 额定容量、BESS 额定功率三者为变量,建立 BESS 日收益与 3 个变量间的关系式,作为变动前 BESS 日收益及变动后 BESS 日收益的计算公式。

设定放电电价初始值为 0.4 元/(kW · h),额定

功率初始值为 1 MW,额定容量初始值为 1 MW · h。各影响因素经过一定变动,日收益也随即变动。模型计算结果如图 3 所示。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	BESS收益敏感性分析模型								
2	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前BESS日收益(元)	变动后BESS日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4	3		1.6	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523
4	额定功率(MW)	1	2		3	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.80973794
5	额定容量(MWh)	1	3		4	1676.19361	4390.748409	1.61947569	0.53982523

图 3 BESS 收益敏感性分析计算 1

当前,BESS 放电电价为 1.6 元/(kW · h),额定功率为 3 MW,额定容量为 3 MW · h,BESS 日收益为 4 390.748 41 元。要分析多因素综合变动对 BESS 日收益的影响,可将各因素增加其初始值的 1 倍,计算结果如图 4 所示。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	BESS收益敏感性分析模型								
2	影响因素	初始值	因素变动百分比	滚动条控制	因素变动后的值	变动前BESS日收益(元)	变动后BESS日收益(元)	日收益变动百分比	敏感系数
3	放电电价(元/kWh)	0.4	4		2	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.666824
4	额定功率(MW)	1	3		4	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.889099
5	额定容量(MWh)	1	4		5	1676.19361	6147.10001	2.667297	0.666824

图 4 BESS 收益敏感性分析计算 2

由计算结果可见,日收益变为 6 147.1 元。则各因素变动其初始值的 1 倍时,BESS 日收益变动了 40%。继续使各因素变动为其初始值的 1 ~ *n* 倍时,得到 BESS 日收益变动曲线及敏感系数曲线如图 5 所示。

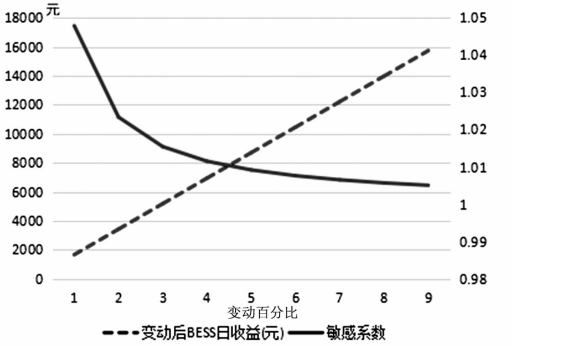


图 5 BESS 收益敏感性分析计算 3

由图 5 可知,各因素综合变动对 BESS 日收益影响的敏感系数由大变小,但始终大于 1。

3.2 各因素变动对 BESS 日收益的影响分析

3.2.1 放电电价对 BESS 日收益的影响

采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算:保持 BESS 额定功率为 3 MW,额定容量为 4 MW · h,建立放电电价变动对日收益变动影响的模拟运算表,根据其模拟运算表,建立单因素影响分析动态图如图 6、图 7 所示。

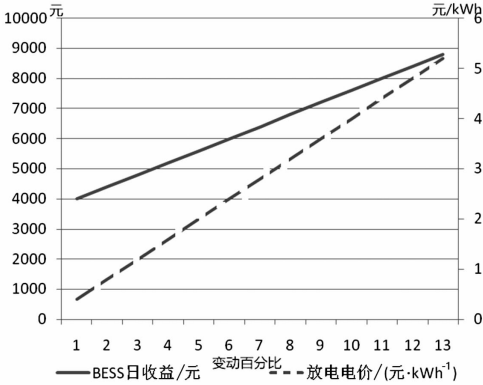


图 6 放电电价对 BESS 日收益的影响动态

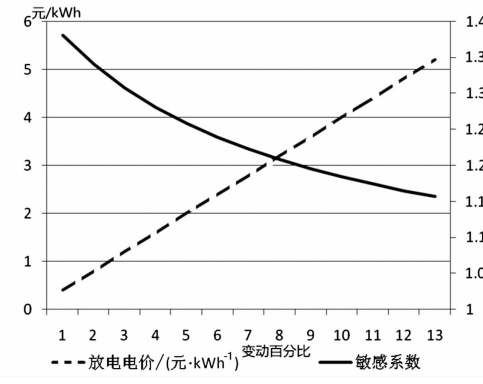


图 7 放电电价变动曲线与其敏感系数曲线

放电电价由初始值0.4元/(kW·h)以0.4元/(kW·h)为变动量不断增加时,由图6可得结论: BESS的日收益随着BESS放电上网电价的增加而增加。因素变动对日收益变动影响的敏感系数如图7中实线所示。可见,当电价不断增加的过程中,敏感系数不断下降,但仍大于1,即表明日收益受电价变动的影 响虽是逐渐减弱,却依旧很大。

3.2.2 额定容量对 BESS 收益的影响

在调度机构进行辅助服务经济分配时,存在储能电池的容量约束。因此,电池容量对 BESS 参与风电辅助服务的提供量、日收益都有影响。若保持储能电池额定功率为3MW,单价为1.6元/(kW·h)不变,采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算,建立额定容量变动对日收益变动影响的模拟运算表,并形成单因素影响分析动态如图8、图9所示。

图8展现了BESS额定容量对日收益的影响趋势。BESS日收益受额定容量不断增大的影响,其值不断减小,在额定容量等于约7.6MW·h时,BESS收益存在过零点,BESS由盈利转为亏损。图9表现了额定容量由初始值1MW·h并以1MW·h为变动量不断增加时,BESS额定容量变动对日收益的敏感系数的变化趋势。敏感系数小于0,说明BESS日

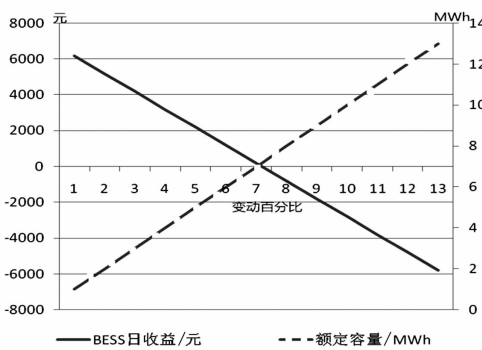


图 8 额定容量对储能电站日收益的影响趋势

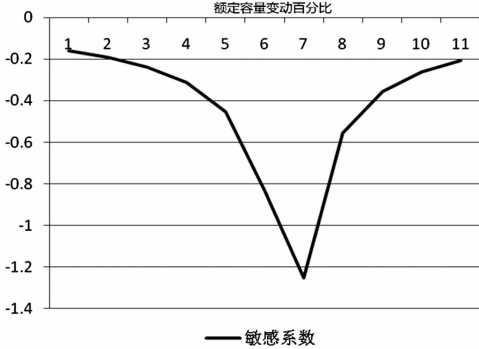


图 9 敏感系数曲线

收益随着额定容量变动向反方向变化;而额定容量在0~7.6MW·h之间变动时,BESS收益,BESS日收益对于额定容量的变动越来越敏感;在额定容量大于7.6MWh之后,BESS亏损,BESS亏损量对于额定容量的变动敏感性减弱,趋向于0。

3.2.3 额定功率对 BESS 日收益的影响

根据所建 BESS 收益数学模型,BESS 的额定功率对其参与风电辅助服务的提供量有影响;同时,对其容量收入、初始投资成本影响也很大。

通过计算,在控制 BESS 额定容量为4MW·h,单价为1.6元/(kW·h)不变时,采用所建立的 BESS 投资收益的敏感性分析模型计算,建立额定功率变动对日收益变动影响的模拟运算表。根据额定容量与日收益变动模拟运算表,建立单因素影响分析动态图如图10、图11所示。由图10可知,BESS额定功率与其日收益呈正比关系,额定功率越大,收益越大。由图11可见,BESS额定功率变动对日收益的影响敏感系数随着BESS额定功率的增大,呈对数形式增长,趋近于1,敏感度亦不大。

4 结 论

1)为顺应风电的大规模发展,需要建立合理、

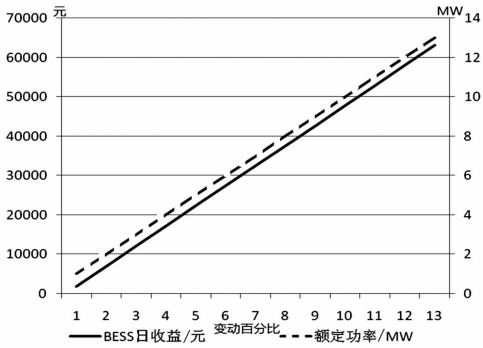


图 10 额定功率对 BESS 日收益的影响动态

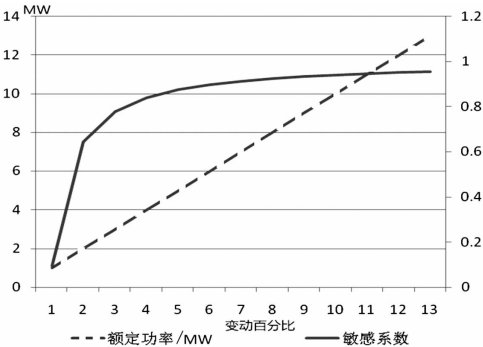


图 11 额定功率变动曲线与敏感系数曲线

有效的辅助服务市场机制,提出了一种新的辅助服务模式,其中 BESS 与常规机组同时上报其提供能力和报价,参与风电辅助服务的竞价。在引导传统机组提供电力辅助服务的同时,促进可再生能源和储能产业的发展,保障电网的可靠运行。

2) 针对所建 BESS 综合经济效益模型的敏感性分析可知,对 BESS 参与风电辅助服务的综合经济效益影响较大的 3 个因素分别为:放电电价、额定容量和额定功率,其中放电电价无疑是最为敏感的影响因素,符合利润分析常理。

参考文献

[1] 马美婷. BESS 参与风电辅助服务综合经济效益研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.
[2] 靳文涛,李蓓,谢志佳. 电池储能系统在跟踪风电计

(上接第 42 页)

[7] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-9.
[8] Gouveia C, Moreira J, Moreira C L, et al. Coordinating Storage and Demand Response for Microgrid Emergency Operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1898-1908.
[9] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.

划出力中的需求分析[J]. 储能科学与技术,2013,2(3):294-299.
[3] 杨水丽,李建林,惠东,等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. 电网技术,2014,38(6):1485-1491.
[4] Yoshimoto K, Nanahara T, Koshimizu G. Analysis of Data Obtained in Demonstration Test About Battery Energy Storage System to Mitigate Output Fluctuation of Wind Farm[C]// Integration of Wide-scale Renewable Resources into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium,2009:1-1.
[5] Jiang Q, Wang H. Two-time-scale Coordination Control for a Battery Energy Storage System to Mitigate Wind Power Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2013,28(1):52-61.
[6] Jiang Q, Gong Y, Wang H. A Battery Energy Storage System Dual-layer Control Strategy for Mitigating Wind Farm Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3263-3273.
[7] 娄素华,吴耀武,崔艳昭,等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):17-22.
[8] 李蓓,郭剑波. 平抑风电功率的电池储能系统控制策略[J]. 电网技术,2012,36(8):38-43.
[9] 闫涛,渠展展,惠东,等. 含规模化电池储能系统的商业型虚拟电厂经济性分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):98-104.
[10] 马美婷,袁铁江,陈广宇,等. 储能参与风电辅助服务综合经济效益分析[J]. 电网技术,2016,40(11):3362-3367.
[11] 单茂华,李陈龙,梁廷婷,等. 用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略[J]. 电网技术,2014,38(2):469-477.
[12] 赵艳妮. 基于 VC++ 的电动汽车实验数据分析系统设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

作者简介:

张伟(1966),硕士,专业方向为电力系统继电保护及自动化、新能源发电与并网技术。

(收稿日期:2018-01-28)

[10] 刘娇娇,王致杰,袁建华,等. 基于 PSO 算法的风光储微电网优化调度研究[J]. 华东电力,2014,42(8):1534-1539.

作者简介:

杜继成(1986),硕士研究生、工程师,主要研究方向为电力系统调度运行;
张真源(1986),博士、副教授,主要研究方向为电力系统运行与分析、智能电网及电力市场;
张宇馨(1993),硕士在读,硕士期间主要研究方向为微网调度、微网电力市场。

(收稿日期:2018-01-05)

基于 STATCOM 的配电网三相不平衡治理

刘小江¹,赵莉华²,何宇航¹,赵茂林²,李 铭³

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

摘 要:为了降低农村配电台区的三相不平衡度,提高供电质量,研制了基于 IGBT 的 STATCOM 三相不平衡调节装置。该装置采用 $d-q$ 法检测无功电流,减少了计算时间,提高了计算效率;控制模式为双闭环控制,外环为电压控制,内环为电流控制,引入反馈控制环对补偿电流进行反馈控制,有效地提高了控制系统的精度。并采用 MATLAB 软件建立仿真系统,对 STATCOM 进行了仿真测试,测试结果表明 STATCOM 对三相不平衡具有调节作用。挂网测试结果也表明 STATCOM 装置对配电网三相不平衡有很好的抑制作用。

关键词:STATCOM;三相不平衡; $d-q$ 法;双闭环控制

中图分类号:TM727.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0082-06

Three – phase Unbalance Regulation of Distribution Network Based on STATCOM

Liu Xiaojiang¹,Zhao Lihua²,He Yuhang¹,Zhao Maolin²,Li Ming³

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

Abstract:In order to reduce the three – phase unbalance factor of rural distribution area and improve the quality of power supply, a STATCOM three – phase unbalanced regulator based on IGBT is developed. The device uses the $d-q$ method to detect the reactive current, which reduces the calculation time and improves the calculation efficiency. The control mode adopts double closed – loop control, that is, the outer loop is voltage control and the inner loop is current control, and the feedback control loop is introduced to feedback the control of compensation current, which improves the accuracy of the control system effectively. The simulation system is established with MATLAB software, and the simulation test of STATCOM shows that STATCOM has a regulating effect on three – phase unbalance. The application results also show that the STATCOM device has a good suppressing effect on three – phase unbalance of distribution network.

Key words:STATCOM; three – phase unbalance; $d-q$ method; double closed – loop control

0 引 言

中国农村地区地域宽广,电力系统存在大量的时空不对称单相负荷,造成了很多配电台区有着不同程度的三相不平衡问题^[1]。三相不平衡使得配电变压器效率降低,增加了变压器和线路的损耗,导致供电质量严重下降,电路中的零序电流增加,会使得配电变压器的涡流损耗增加,进而使其运行温度

升高,危及变压器的安全与寿命^[1-3]。因此,有效地降低配电台区的三相不平衡度,提高台区经济运行水平和供电质量是亟待解决的问题。

目前国内外治理三相不平衡的主要措施有跨接相间电容调整、用户负荷的再分配换相和无功补偿等^[4]。换相器由于整体投入较高、线路改建困难,所以目前应用较少。跨接相间电容调整的优点是设备整体投资费用较低,可滤除一定频率范围内的杂波,缺点为易于给电网造成大量谐波,系统特性容易

漂移。无功补偿装置的优势是极大地提高了线路的功率因数,降低了线损,减少了设计容量,增加了电网有功传输比例,降低了农网低电压出现概率;缺点是冲击电流过大,易产生大量谐波^[5-6]。

常用的无功补偿装置有静止无功补偿装置 (static var compensator, SVC) 和静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM)。SVC 因其响应速度快,价格适中,在电力系统中得到了广泛的应用^[7],但是由于它在应用时会向电网注入大量的谐波,需要外加滤波器,且在多台工作时易发生谐振等^[8-10]。而 STATCOM 在控制中利用 PWM 技术,能够使其注入电网的电流谐波含量很小,接近正弦波,并且 STATCOM 具有能够快速平滑地输出感性和容性无功功率、调节系统电压、降低线路损耗、校正功率因数等功能^[11-13]。

这里将 STATCOM 稳态模型引入三相不平衡分析中,研制了基于 IGBT 的 STATCOM 无功补偿装置。运用不平衡补偿方法对 STATCOM 抑制三相不平衡原理进行了分析,并利用 $d-q$ 法对无功电流进行检测,降低了运算量,减少了运算时间;控制策略采用的是双闭环控制法,提高了控制系统的精度。研究了配电网中应用 STATCOM 进行三相不平衡抑制的效果,并通过挂网试验与 MATLAB 仿真测试进行了验证。

1 STATCOM 工作原理分析

STATCOM 静止同步无功补偿器,是利用全控型大功率电力电子器件 (IGBT 或 GTO) 组成自换相桥式电路^[14],通过控制 IGBT 开关管的开断,使 STATCOM 产生相应的补偿电流,从而实现对系统所需的无功的补偿。

1.1 工作原理

图 1 为 STATCOM 系统原理图,该系统主要由 4 个部分组成,即指令电流运算电路、电流跟踪控制电路、驱动电流和主电路,图中 u_s 表示电网侧电压, i_s 表示电网侧输出电流。从图 1 可以知道,STATCOM 首先测量负载侧的电流值 i_L ,然后将测得的数据传输给补偿电流运算单元,由该单元来计算补偿电流,并将计算的结果,即相关指令传输给脉冲信号发生单元;之后由脉冲信号发生单元对传输来的数据信号进行相关处理,并得到相应的控制信号;再将控制

信号经过驱动电路的放大,传输给主电路。

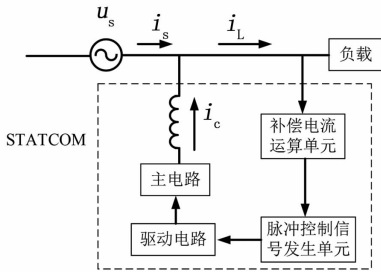


图 1 STATCOM 系统原理

主电路采用电压型桥式电路,由 IGBT、电容器和电抗器组成,直流侧采用的是电容器,可以有效地提高运行效率。放大后的控制信号用来控制 IGBT 开关管的导通和关断,这样就能在桥式电路上产生相应的补偿电流 i_c 。所以负载侧的电流值 i_L 为系统电流 i_s 与 STATCOM 补偿电流 i_c 之和,负载电流中含有谐波、零序、负序和无功电流,相应地调整 STATCOM 的补偿电流值,就能够使系统侧只提供正序基波分量,使得系统电流保持稳定,达到电网综合补偿的目的。

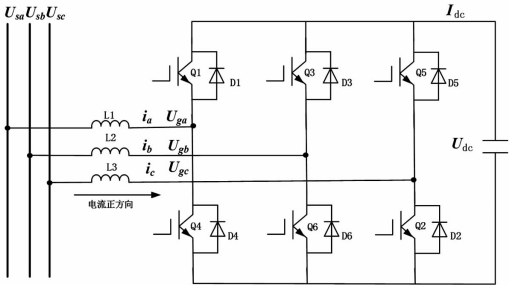


图 2 STATCOM 主电路

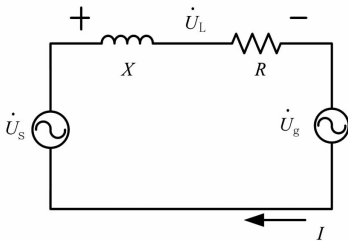


图 3 STATCOM 等效电路

图 2 为 STATCOM 的主电路,图 3 为其等效电路图,从图 3 中可以得到:

$$\dot{U}_s = \dot{I}(R + jX) + \dot{U}_g \tag{1}$$

由式(1),在忽略系统的损耗等效电阻值 R 时,可以得到 STATCOM 对电网注入的复功率为

$$\dot{S} = \dot{U}_s \cdot \dot{I}_c^* = U_s \left[\frac{U_g \sin \delta}{X} + j \frac{U_s - U_g \cos \delta}{X} \right] = P + jQ \tag{2}$$

当 $\delta < 5^\circ$ 时,系统有功功率及无功功率可以简化为

$$P \approx \frac{U_s U_g \delta}{X} \tag{3}$$

$$Q \approx \frac{U_s (U_s - U_g)}{X} \tag{4}$$

式中: U_g 为逆变桥输出电压; I_c 为 STATCOM 补偿器输出的无功电流; R 为系统等效电阻; X 为所接电抗器阻抗; U_s 为电网相电压; δ 为系统电压与补偿器电压之间的相角差。

由式(3)、式(4)可以得到:

- 1) 当 $\delta > 0$ 时, $P > 0$, STATCOM 是从电网中吸收功率;
- 2) 当 $\delta < 0$ 时, $P < 0$, STATCOM 是向电网中释放功率;
- 3) 当 $U_g < U_s$ 时, $Q > 0$, STATCOM 是发出容性无功;
- 4) 当 $U_g > U_s$ 时, $Q < 0$, STATCOM 是吸收感性无功。

1.2 无功电流检测方法分析

现在广泛使用的补偿电流检测方法主要有 $p-q$ 法、 i_p-i_q 法和 $d-q$ 法,它们各有自己的优缺点和使用范围。 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法都可以使用在对称系统中,能够很准确地检测出补偿电流值。但在三相四线制系统中,因为 $p-q$ 检测法和 i_p-i_q 检测法中的 $\alpha\beta$ 变换要求三相电流之和为 0,三相四线制系统中三相电流的和并不为 0。而 $d-q$ 检测法是对 $dq0$ 坐标系下的检测法进行简化,并采用电压、电流双矢量投影的方法,所以能够适应于三相电压畸变和三相电压不对称的系统中。

采用优化的 $d-q$ 法对无功电流进行检查,首先对输入的三相电压 u 和三相电流 i 进行 $d-q$ 变换得到 u_d, u_q, i_d, i_q ,然后经过低通滤波器 LPF 得到直流分量 $\bar{u}_d, \bar{u}_q, \bar{i}_d, \bar{i}_q$ 以及基波电压与基波电流之间的相位关系,用于将基波正序电流的无功分量分离出来;再经过 $d-q$ 反变换得到三相电压和三相电流的基波正序分量,从原来的负载电流中减去基波正序电流,就能够得到所需的补偿电流。 $d-q$ 检测法对电流检测的等效程序如图 4 所示。

1.3 STATCOM 控制策略

STATCOM 接入配电网的方式可以通过变压器或者电抗器^[16]实现,因此,对交流侧输出电压和相

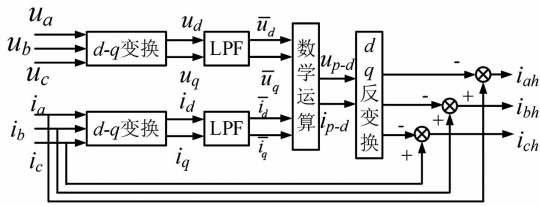


图 4 $d-q$ 算法等效图

角或电流进行控制,能实现对 STATCOM 向电网发出或吸收无功电流的控制。根据产生方式的不同,无功电流的控制方式有两种:直接电流控制和间接电流控制。

直接电流控制方式是将 STATCOM 当作受控电流源,采用跟踪 PWM 控制技术对 STATCOM 的交流侧产生的无功电流进行控制。间接法是将 STATCOM 作为交流电压源来对待,通过对 IGBT 开关管的导通和关断来进行控制,即控制所产生的电压相位和幅值,间接控制 STATCOM 的交流侧电流^[17]。

为了保证设计出的补偿器具有良好的性能,准确快速地对系统无功进行补偿,维持系统电压稳定,所以所设计的控制器采用电流间接控制方式。

STATCOM 从系统中吸收的有功电流和无功电流的有效值的计算公式为^[18]

$$I_p = \frac{U_L \cos(90^\circ - \delta)}{\sqrt{X^2 + R^2}} = \frac{U_s}{2R} (1 - \cos 2\delta) \tag{5}$$

$$I_q = \frac{U_L \sin(90^\circ - \delta)}{\sqrt{X^2 + R^2}} = \frac{U_s}{2R} \sin 2\delta \tag{6}$$

稳态时,当 δ 角的绝对值不是太大时, δ 和 I_q 近似为线性的正比关系。

因此能够通过改变 $\dot{U}_g$ 相对 $\dot{U}_s$ 的超前角 δ 来控制 STATCOM 吸收的无功电流的大小和性质。当改变 δ 时, U_g 就会相应地随之改变,这样就能够得到如图 5 所示的最基本的控制方法。在这种控制中,以无功电流参考值 I_{qref} 乘以一个比例系数后即作为 δ 的指令,从而控制 STATCOM 变流器,使其实际吸收 I_q 的无功电流按照式(6)关系变化。

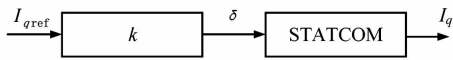


图 5 电流间接控制

为了获得较为稳定的输出电压,在控制系统中引入了一个电压负反馈环,用补偿器的输出电压值减去系统中给定的电压值,根据该差值对补偿器做出有效控制。所设计的 STATCOM 采用的控制方式

为双闭环控制模式,即外环采用电压控制,内环采用电流控制。并引入反馈控制环对补偿电流进行反馈控制,从而有效地提高控制系统的精度,整个控制系统的结构原理图如图6所示。

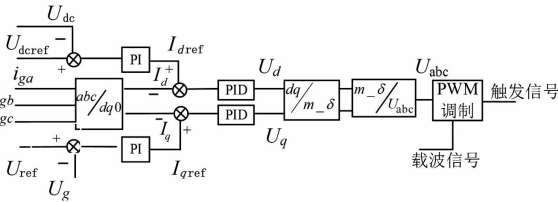


图6 双变量间接控制原理

双闭环控制模式的具体实施步骤如下：

- 1)将通过检测得到的补偿器直流侧直流电压 U_{dc} 与系统中所给定的电压参考值 U_{dref} 作出比较,得到了它们的差值电压,之后使用PI调节器进行相应的调节,输出有功电流的参考值 I_{dref} ;
- 2)补偿器输出端的电压 U_g 与电压参考值 U_{ref} 的电压差值也经过PI调节器的调节,就可以得到系统无功电流所需的参考值 I_{qref} ;
- 3)将检测获得的补偿器的输出电流作 $d-q$ 坐标系下的坐标变换,获得 d 轴和 q 轴下的电流 I_d 和 I_q ,分别将 I_d 与 I_{dref} 、 I_q 与 I_{qref} 作比较,所得差值再经过PID调节器的调节即可获得 d 轴和 q 轴下的电压。
- 4)获得 d 轴和 q 轴下的电压后就能得到系统的控制变量 m 与 δ ,从而获得系统的调制信号参数 U_{abc} 作为PWM调制器的调制信号。并以载波信号为基准进行调制,获得逆变桥开关的触发信号。

2 MATLAB 仿真分析

仿真原理如图7所示,仿真系统是一个电压等级为25 kV的配电网;三相可编程的电压源作为系统电源,为系统提供能量;母线B1和B2之间是一段输电线路,线路长20 km,用 π 型等值电路来进行代替;母线B2上带有3.5 MW、0.25 MVA的负载;母线B2和B3之间有一段输电线路,线路长2.5 km,用电感电路来进行代替;B3母线后接入一个降压变压器,用于降低电压为负载供电;变压器二次侧测接有一个1 MW的固定负载及一个可变负载;STATCOM装置接在B3母线上,其容量为 ± 3.5 MVA。

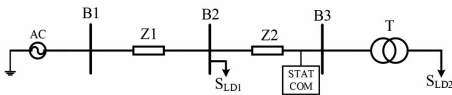


图7 仿真原理

仿真故障设置为:负载对称时,A、B、C三相各带5 kW的负荷;负载不对称时,A、C两相带5 kW负荷,B相带8 kW负荷。仿真结果见图8至图13。

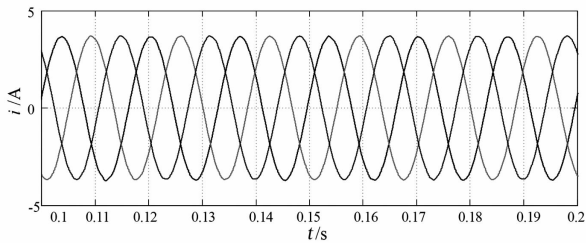


图8 三相电流波形

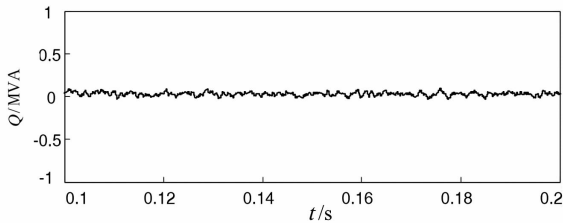


图9 STATCOM 无功输出

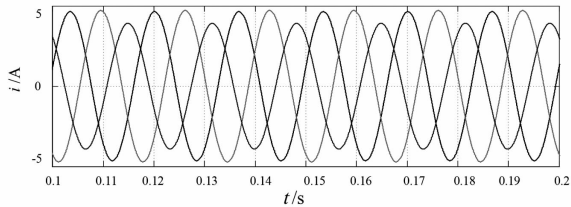


图10 STATCOM 未接入电网时三相电流波形

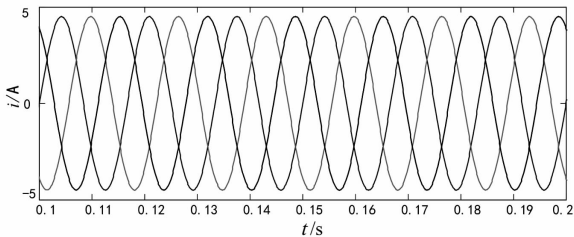


图11 STATCOM 接入电网时三相电流波形

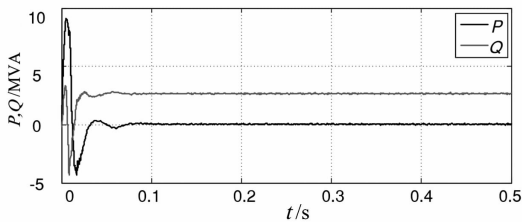


图12 STATCOM 有功与无功输出

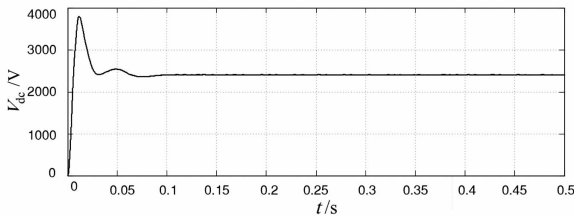


图13 直流侧电压

当 A、B、C 三相负荷对称时,电流波形如图 8 所示,STATCOM 是不动作的,此时的输出无功为 0,如图 9 所示。当 A、B、C 三相所带负荷不对称时,A、B、C 三相电流波形也发生了变化,电流波形如图 10 所示,A、B、C 三相电流不再对称,此时 STATCOM 还未接入电网;图 11 为将 STATCOM 接入电网后的电流波形,可以发现这时 A、B、C 三相电流是对称的;STATCOM 输出无功和直流侧电压分别如图 12 和图 13 所示。仿真结果表明:STATCOM 对三相不平衡具有调节作用。

3 实验及挂网运行测试

3.1 实验测试

对 STATCOM 装置进行实验测试,测试接线图如图 14 所示,将 STATCOM 装置并联接在负载和电网之间。

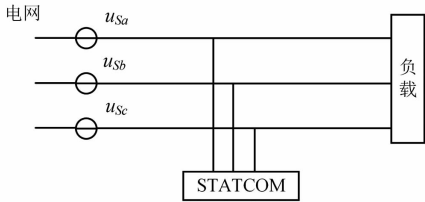


图 14 测试接线

STATCOM 装置接入电网前后,系统各种参数如表 1、表 2 所示。

从表 1 和表 2 可以看出,补偿后系统的电流和电压不平衡度的下降比较明显,说明该装置对三相不平衡有很好的调节作用。

表 1 补偿前系统各参数

U_s/V	I_s/A	I_c/A	PF/%	THD _i /%	UF/%
235	44	0	99	9	106
237	11	0	99	11	-44
238	8	0	98	11	-62

表 2 补偿后系统各参数表

U_s/V	I_s/A	I_c/A	PF/%	THD _i /%	UF/%
237	26	18	98	0	19
238	16	4	99	0	-26
236	23	16	97	0	6

4.2 挂网运行测试

此次挂网运行的 STATCOM 无功补偿装置挂网运行点为三相不平衡台区变压器出口处,挂网测试监测了变压器出口处的三相电流和中性线电流。

图 15 为该台区在安装 STATCOM 无功补偿装置前的变压器出口三相电流波形图,从图 15 中可以看出三相电流值差距比较大,图 16 为 STATCOM 未接入电网时的三相电流不平衡度,可以看出其电流不平衡度在 40% 左右,其中最大三相电流不平衡度高达 53.6%。

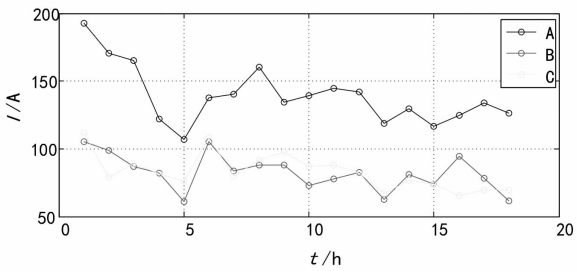


图 15 STATCOM 未接入电网时的三相电流波形

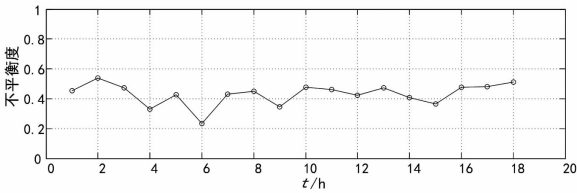


图 16 STATCOM 未接入电网时的三相电流不平衡度

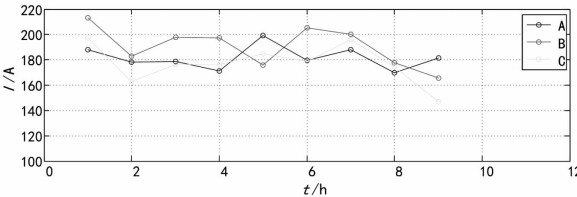


图 17 接入 STATCOM 后三相电流波形

图 17 为该挂网测试台区安装 STATCOM 无功补偿装置后,变压器出口三相电流波形图。图 18 为 STATCOM 接入电网后三相电流不平衡度,从图中可以看出三相电流不平衡度均小于 20%,平均为 10% 左右,其中最小三相电流不平衡度为 4.5%。

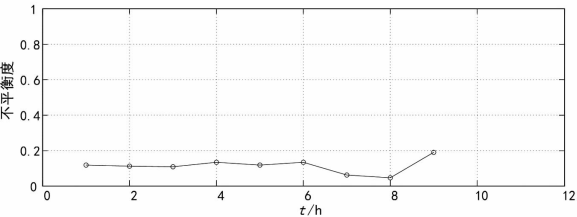


图 18 STATCOM 接入电网后的三相电流不平衡度

从 STATCOM 无功补偿装置安装前后的数据对比,可以发现安装补偿装置后该台区的不平衡度下降很明显,说明 STATCOM 无功补偿装置对三相不平衡有很好的抑制作用。

4 结 语

首先运用不平衡补偿方法对 STATCOM 原理进行了分析,结果表明适当的绕组和变压器的接线,可以使得线路中无零序电流,所以在进行不平衡补偿时,仅需对正序和负序电流进行补偿,以达到抑制三相不平衡的目的。

1)所设计的 STATCOM 装置采用无功电流检测方法为 $d-q$ 检测法,其能够对谐波电流与无功电流进行较为精确的检测;当对谐波电流进行检测时,只需进行坐标变换,该检测方法提高了计算速度,减少了计算量。

2)所采用的控制方式为双闭环控制模式,即外环采用电压控制模式,内环采用电流控制模式,这种控制方式提高了对 STATCOM 装置的控制精度。

3)使用 MATLAB 软件的 Simulink 部分搭建了仿真系统,对 STATCOM 进行仿真分析,仿真结果表明 STATCOM 装置对三相负载不对称有很好的调节作用。

4)最后基于前面的理论,研制了基于 IGBT 的 STATCOM 三相不平衡调节装置,并且进行了实验测试与挂网测试,通过对比测试结果发现 STATCOM 装置能够有效地降低系统的三相不平衡度,对抑制负载三相不平衡有明显作用。

参考文献

[1] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(9):2185-2193.

[2] 谭树龙,杨耕,耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):44-49.

[3] 徐榕,于泳,杨荣峰,等. 基于无源性理论的 H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015,35(1):50-57.

[4] Zhang Jiao, Niu Xingyan, Du Mingjun, et al. Research on Control Strategy of Cascade STATCOM under Unbalanced System Voltage[C]. China International Conference on Electricity Distribution, 2012, 8562(5):1-4.

[5] 梅红明,刘建政. 角接链式 STATCOM 的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36):6398-6406.

[6] 徐榕,于泳,于雁南,等. 基于离散状态观测器的 H 桥

级联 STATCOM 无差拍控制[J]. 电力系统自动化, 2014(21):58-65.

[7] 朱劲松,李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24):113-117.

[8] 李圣清,徐文祥,栗伟周,等. 三相电压不平衡下级联 STATCOM 的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18):105-109.

[9] Yinghong Hu, Jiajia Ren, Jianze Wang, et al. Control Strategy of Transformerless Connected Cascade STATCOM under Unbalance and Asymmetrical Condition[C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2012.

[10] Zhang Guangming, Wang Maojun, Gao Qiang, et al. A Research on Control Strategy of STATCOM Based on Particle Swarm Optimization Algorithm[C]. 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015.

[11] 易桂平,胡仁杰,蒋玮,等. 电网电压不平衡对 STATCOM 的影响及抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6):238-247.

[12] 毛彦辉,夏明超,李晓亮,等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013(24):132-139.

[13] 饶宏,陈俊,许树楷,等. 输电系统用 STATCOM 多电平主回路方案选择[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23):83-87.

[14] 黄伟雄,胡广振,王永源,等. 南方电网 35 kV $\pm$ 200 Mvar 链式 STATCOM 现场试运行[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(19):122-131.

[15] 黄伟雄,刘锦宁,王永源,等. 35 kV $\pm$ 200M var STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10):136-142.

[16] 郭春义,张岩坡,赵成勇,等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):99-106.

[17] 孙毅超,赵剑锋,季振东,等. 基于 $d-q$ 坐标系的单相链式 STATCOM 直流电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9):2500-2506.

[18] 陈新超. D-STATCOM 直流侧电压优化控制研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015.

作者简介:

刘小江(1986),工程师、硕士,主要研究方向为配电网运行分析、过电压及接地技术。

(收稿日期:2018-01-06)

面向四川电力业务运行的信息安全保障体系构建研究

杨嘉澍, 杨帆

(国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着国网四川省电力公司信息化建设工作的深入,以及大量新技术在电力信息行业的广泛应用,信息安全,特别是设备、网络和数据安全面临着越发严峻的挑战。如何通过行之有效的手段保障公司信息运行安全,是电力信息行业面临的关键问题。从日常运维工作实际出发,以安全保障需求为基础,结合业界单点式安全防御手段的应用,率先将管理和技术两方面视为一个有机整体,通过对每一方面的关键要素进行分析,构建了面向电力行业信息安全的保障体系。事实证明,该体系对消除信息安全保障死角、提升信息安全水平、提升IT保障能力和数据安全能力有重要的指导意义。

关键词:防御体系;网络攻击;业务审计;数据脱敏;安全责任

中图分类号:TM761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)03-0088-04

Research on Construction of Information Security System for Sichuan Electric Power Service

Yang Jiashi, Yang Fan

(State Grid Sichuan Information & Telecommunication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the construction of information system and the application of a large number of new technologies, the information safety, especially the equipment, network and data security face severe challenges. In this case, how to ensure the security of system operation by some kinds of effective methods needs to be considered. Starting from the daily practical operation and based on security requirements, the technology and management are considered as an organic whole. Then the key elements in each aspect are analyzed, and the information security system for electric power industry is constructed. It has been proved that the system can effectively improves the ability of information and data security.

Key words: defense system; network attack; operational auditing; data masking; safety responsibility

0 引言

随着国网四川省电力公司(以下简称四川公司)信息通信系统与电网安全生产、日常经营活动深度融合,信息专业已成为大电网运行控制和四川公司生产经营管理的重要基础。与之对应的是,该专业具有数据量大、分布面广、利用价值高、技术复杂度高、运行渠道多样化等特点^[1],给工作带来便利的同时,各类外部攻击和数据泄漏风险大幅提升。国网四川省电力公司信息通信公司(以下简称信通公司)作为四川公司信息化支撑单位,运行维护着全省绝大多数信息系统和通信信息骨干网络,肩负着重要的政治责任、经济责任和社会责任。全新的

形势带来了全新的要求,信通公司平台安全防护面临着严峻挑战。

1 问题分析

当前,四川公司面临的信息安全形势空前严峻。电网生产运行高度依赖网络和信息化,一旦外部攻击突破安全防护体系,将直接威胁电力系统安全^[2]。信通公司支撑着四川公司各业务部门生产、营销、财务、人资、ERP、电力交易等逾百套信息系统的运维工作,管理着超过数百T的核心数据,服务着超过10万内部用户和数千万外部电力用户,存在大量可能具有安全隐患的环节,信息安全如履薄冰。

1)网络攻击威胁日益增加。网络攻击技术与

手段的迅速发展,网络安全攻击的针对性、持续性、隐蔽性显著增强,大大增加了网络安全防护难度,甚至造成严重的损失。2017 年迄今为止,信通公司监测并拦截互联网出口高风险攻击数量 295.96 万余次,比去年同比增加 11.58%;外网网站遭受攻击数量 2 543.2 万余次,比去年同比增加 12.48%。

2)信息安全运行压力大。随着信息通信系统规模和应用范围的大幅持续增长,信息通信系统大面积停运的风险不断增加,尤其是因信息通信故障导致大面积停电的风险依然存在。

3)信息安全边界持续扩大。四川公司信息化应用由内网为主、向内外网协同转变,接入方式由有线向无线演变,全业务统一数据中心、移动作业终端、光伏电厂、风电厂、充电桩、计量采集终端、智能电表等新业务的安全管理存在隐患,安全防控难度陡增^[3]。

4)服务对象范围不断膨胀。四川公司的公众服务业务作为面向用户的服务窗口和展示形象,存储了大量公众客户的敏感信息,智能电表和掌上电力等营销类自动缴费业务应用的推广,在带来业务创新的同时,也引入了工控安全风险,随之而来的还有权限、内容、数据、操作等各类安全风险不断扩大^[4]。

由此,怎样坚决贯彻落实国家电网公司战略部署,做好信息安全工作,保障信息通信专业的稳定、可靠运行和服务,构建符合电力行业特点的信息安全保障体系,是信通公司一项重大课题,也是推动公司面向电力市场竞争新形势发展的必然要求。

2 信息安全保障体系构建

2.1 总体架构

信息系统现阶段自动化和智能化程度有限,其稳定运行的核心因素依然是各级从业人员及其在运维过程中的操作,构建适应四川公司实际工作特点的信息安全保障体系至关重要。显然,仅依靠技术手段规范人的行为,很多时候会失之于僵化;而仅依靠管理手段则常常失之于松软。因此,“人防”与“技防”双管齐下,从两个方面同步规范运维人员日常工作,才能达到期望的效果。信息安全保障体系的基础架构如图 1 所示。

信息安全保障体系设计的初衷,是从技术和管



图 1 信息安全保障体系基础架构

理两个层面保障四川公司信息系统、网络及数据的运维安全,达到底层支撑服务保密、完整、可用等安全目标。其中,技术体系重点关注系统的安全防护、检测、响应和恢复,而管理体系则着重强调日常工作的合规性和人员管理的严密性,通过完善的管理流程和制度标准对运维过程进行规范,在统一的安全策略指引下,共同保障信息安全保障体系的有效性。

2.2 管理要素

管理体系是信息安全保障体系的总体原则,也是保障体系落地的制度保障。因此,管理体系应当从四川公司的整体出发,全面考虑各方面安全管理问题,健全四川公司信息安全管理组织和管理机制,结合完善的安全管理制度,覆盖公司信息安全的全流程,其要素如表 1 所示。

表 1 管理体系基本要素

基本要求	项目描述
安全管理制度	信息安全制度完善
人员安全管理	人员安全能力建设
系统建设管理	第三方运维管理
安全责任	逐级落实运行安全责任
风险评估	风险评估能力建设
日常维护	配置管理规范建设 网络安全流程规范完善

1)落实安全责任

全面开展《网络安全法》^[5]宣贯培训,做到深入理解、逐条落实,将网络安全法要求制度化,牢固树立风险意识,充分认识责任义务,层层签订安全责任书,将相关责任压紧压实,直至贯穿公司全业务、全环节、全过程。

2)完善安全制度

以标准化为目标,通用制度为准绳,构建四川公司标准化制度体系。利用信息专业独特优势,构建管理统一、职责明确、界面清晰的四川公司信息安全管理体系、监督体系和保障体系,发挥信通公司在信

息化建设与业务部门支撑中承上启下的作用,强化内控机制^[6],坚持内控与外防并重、人防与技防并重,对各类违规、违章和网络信息安全事件,严肃问责、坚决处理。借鉴营销、财务等专业的标准化服务体系,明确各专业信息安全管理体​​系关键节点和要素,打造标准化制度体系,力争实现信息通信运维服务从“面向设备”到“面向业务”,从“支撑业务”到“推动业务”,最终到“面向服务”的转变。

3)提升履职能力

人才是发展的第一资源。严格贯彻落实四川公司安全工作要求,加强与各业务部门的沟通,结合表1 梳理的信息安全管理体系关键节点所必需的元素,常态化开展相关培训,做到梳理一项,培训一项,落实一项,创新人才培养体制机制,提升信息安全履职能力。

4)系统建设管控

建立第三方安全管理的规范和制度,并要求其严格遵守。严格控制第三方对信息系统的访问,对第三方访问的风险、人员及运维管理进行风险评估,并在合同中规定其安全责任和安全控制要求,以维护第三方访问的安全性。

2.3 技术要素

信息安全技术是信息安全保障体系构建的底层保障,也是管理层面的具体落脚点,对保障体系构建尤为重要。信息安全的技术实现应当遵循先进性、实用性、可靠性及可扩展性原则,既能够应对信息系统运维现状,又能以足够的能力满足四川公司未来业务发展的需求,其架构如表2 所示。

表2 技术体系基本要素

基本要求	项目描述
网络安全管理	网络安全域划分及改造
业务安全管理	业务安全审计及态势感知
漏洞管理	漏洞扫描
数据库安全管理	数据库防护
文档安全管理	电子文档安全审计
终端安全管理	对网络终端的主动管理分发
数据安全​​管理	数据脱敏

1)网络安全域划分及改造

通过安全域划分及改造,能够从网络基础层面实现对外部攻击进行层次化、立体化防御,从而进一步落实安全管理政策、制定合理安全管理制度的基础。

2)业务安全审计及安全态势感知

业务安全审计通过网络对各服务器系统、数据

的访问行为进行审计和控制,使运维操作符合企业合规性的需求,并做到操作的可审计、可追溯,能够建立有效的IT 内控机制,提升业务操作的可靠性,减少核心数据资产的破坏和泄漏。同时,安全态势感知则通过对流量和安全事件的采集和分析,有助于更加直观地掌握业务系统运行的安全状况。

3)漏洞扫描

漏洞扫描能够在对网络设备、操作系统、应用系统的扫描过程中有效发现系统弱点,为实施安全防护方案和制定安全管理策略提供依据和参考。

4)数据库防护

数据库防护通常通过数据库防火墙实现,具备屏蔽直接访问数据库的通道、对应用程序访问数据库进行二次认证、对数据库进行攻击保护、连接监控、安全审计等能力,能够有效提升数据库安全防护水平。

5)电子文档安全审计

电子文档安全审计能力通过具备电子文档安全保障能力的系统实现。其能在服务器上备份所有的文件审查日志,根据用户角色不同,将用户权限精准划分和分配,能够让用户在无感知的前提下极大提升数据的完整性和可靠性。

6)终端安全管理

终端安全管理能够实现对网络终端进行主动的管理和控制、补丁分发、强制安全策略、远程帮助等主要功能,并形成整体的安全准入控制体系,其提供网络准入控制、应用准入控制、客户端准入控制等多层准入控制手段,实现对终端安全接入内网管理。通过准入控制机制,可以实现对终端的身份进行认证,并能够自动检测和修复终端安全状态,强制保证终端及时进行安全补丁更新、安装并及时更新防病毒软件及病毒定义码、不随意运行可能存在风险的软件,确保只有合法的和安全的终端电脑才能接入企业内网。同时,利用生物特征识别技术,强化操作人员个人身份的确认和权限的认定,克服传统账号及密码登录方式的繁琐和隐患,提升终端安全管理水平。

7)数据脱敏

数据脱敏能够根据不同需求隐去涉密内容,保留数据业务含义的基础上隔绝系统开发或未经授权的用户接触核心真实数据的路径^[7],同时通过在线或离线脱敏规则,在保障业务研发进度的基础上,降

低数据运维工作量及难度,最大程度地规避数据安全风险。

3 结 语

随着信息化建设的持续深入,大数据、云计算、区块链等新技术的逐步应用,以及业务需求的持续增长,安全一直是信息运维永恒的话题。从信息安全保障的实际需求出发,构建了信息安全保障体系,并分别从管理和技术两个层面阐述了其架构和包含的关键要素。安全管理持续推进的事实证明,该体系能够有效地消除信息安全管理死角,夯实信息安全基础,提升信息系统安全保障水平,切实承担起智能电网和“五大”体系高效运转的支撑职责,为四川公司筑起一道安全的“防火墙”。

参考文献

[1] 李文娟,胡珺珺,赵瑞玉. 通信与信息专业概论[M].



(上接第 60 页)

预测模型,如 BP 神经网络方法、专家系统法和支持向量机(support vector machine,SVM)法^[4],这些方法可以有效地计及影响电力负荷的诸多外在因素,从而训练出精度较高的预测模型。在中长期电力负荷预测时,可以运用回归分析法、趋势分析、电力弹性系数、产值单耗等方法,通过大量历史数据或经济指标数据支持,对平稳且大量的数据有不错的预测效果。四川省未来电力负荷预测应采用以智能化和传统方法相结合的新型预测方法,如空间负荷预测(SLF)元胞分析模型、改进型灰色模型等组合算法,这将更适应不断暴露出来的负荷曲线波动问题。新型负荷预测问题的不断出现也将带动电力负荷预测技术向更深层次发展,而电力负荷预测也将为中国建成“一带一路”经济强国、全球电力市场互联互通提供坚强护盾与有力支撑。

参考文献

[1] 张彦宇,肖茜. 国内外关于电力系统负荷预测的研究现状分析[J]. 山东工业技术,2016(11):215-216.
[2] 刘建军. 电力系统负荷预测综述[J]. 中国科技信息,2016(16):52-53.
[3] 于杳. 电力负荷预测方法分析[D]. 南京:南京理工大学,2016.

北京:人民邮电出版社,2014.

[2] 曾鸣,李娜,董军,等. 基于大安全观的电网运行管理关键技术——关于印度大停电的思考[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):9-13.
[3] 贺惠民,王刚,陈乐然,等. 智能电网信息安全问题与优化研究[C]. 中国电机工程学会年会,2013.
[4] 周文琼. 大数据环境下的电力客户服务数据分析系统[J]. 计算机系统应用,2015,24(4):51-57.
[5] 孙昌军,郑远民,易志斌. 网络安全法[M]. 长沙:湖南大学出版社,2002.
[6] 王凡林,陈辉,王寿荣. IT 治理机制下的企业内部控制问题与建议[J]. 会计之友,2011(3):70-71.
[7] 姜日敏. 电信运营商数据脱敏系统建设方案探讨[J]. 中国科技信息,2014(8):132-133.

作者简介:

杨嘉澍(1963),硕士研究生、高级工程师,从事电力系统自动化及电力通信信息专业工作。

(收稿日期:2018-05-04)

[4] 宋晓茹,李莉,张来青. 中长期电力负荷预测研究[J]. 计算机仿真,2014,31(9):132-135.
[5] 罗国东. 基于改进电力弹性系数法的负荷预测[J]. 陕西电力,2013,41(6):46-48.
[6] 李钜,李敏,刘涤尘. 基于改进回归法的电力负荷预测[J]. 电网技术,2006,30(1):99-104.
[7] 杜莉,张建军. 神经网络在电力负荷预测中的应用研究[J]. 计算机仿真,2011,28(10):297-300.
[8] 朱建平. 神经网络在电力负荷预测中的应用研究[J]. 科技资讯,2015(23):32-34.
[9] Willis H L. Spatial Electric Load Forecasting[M]. New Work:Marcel Dekker,2002.
[10] 肖白,杨欣桐,田莉,等. 计及元胞发展程度的空间负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):61-67.
[11] 俞明生,冯桂宏,杨祥. 组合优化灰色模型在中长期电力负荷预测中的应用[J]. 沈阳工业大学学报,2007,29(2):153-156.
[12] 肖白,周潮,穆钢. 空间电力负荷预测方法综述与展望[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):78-88.

作者简介:

杨博宇(1990),博士研究生,研究方向为水电运行管理及电力市场;

陈仕军(1989),博士、助理研究员,研究方向为水电运行管理与电力市场、能源战略与经济管理。

(收稿日期:2018-03-06)

工业铂电阻测量结果的不确定度评定

江正涛, 彭剑英

(国网四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045)

摘要:工业铂电阻测量结果的不确定度评定过程比较复杂,致使很多单位在测试工业热电阻时都未能科学合理地对其测量结果进行评定。而随着现代检测技术的进步,对测量结果的科学性合理性要求越来越高,依据 JJG 1059.1 - 2012《测量不确定度评定与表示》、JJG 229 - 2010《工业铂、铜热电阻》检定规程对工业铂电阻测量结果的不确定度进行评定,以期各基层单位在开展工业热电阻检测过程中对测量结果的不确定度评定方法提供一个范例。

关键词:工业铂电阻;不确定度评定

中图分类号:TM93 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2018)02 - 0092 - 03

Uncertainty Assessment of Industry Platinum Resistance Thermometer Measurement Results

Jiang Zhentao, Peng Jianying

(State Grid Sichuan Electric Power Corporation Metering Center, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract:The uncertainty assessment process of the measurement results for industry platinum resistance thermometer is complicated, which makes many units cannot evaluate the measurement results scientifically and reasonably during testing industry platinum resistance. With the development of modern detection technology, the demands for the scientificalness and rationality of measurement results are getting higher and higher, the uncertainty assessment of measurement results for industry platinum resistance thermometer should be carried out in accordance with "Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement" (JJG 1059.1 - 2012) and "Industry Platinum and Copper Resistance Thermometers" (JJG 229 - 2010), in order to provide an example for uncertainty assessment method of industry platinum resistance thermometer measurement for basic units.

Key words:industrial platinum resistance thermometer; calibration; uncertainty assessment

0 引 言

以温度(20±5)℃、相对湿度 15%~80% 的环境条件下工业铂热电阻测量结果的不确定度评定为例,介绍工业铂热电阻测量结果的不确定度评定方法。

校准过程使用的主要仪器如下:

- 1)标准器:二等标准铂电阻温度计。
- 2)电测仪器:电桥或可测量电阻的数字多用表^[1]。

A 级及以上被测电阻用 0.005 级及以上等级仪器;B 级及以下被测电阻用 0.02 级及以上仪器。如测 Pt100 的仪器分辨率不低于 0.1 mΩ^[1]。

- 3)冰点器:U≤0.04℃,k=2。
- 4)恒温槽:温度范围为-50~300℃。

5)水平温场为 0.01℃,垂直温场为 0.02℃,波动度为 0.04℃/10 min。

6)水三相点瓶及保温装置。

校准方法采用比较法,即把被检热电阻(Pt100, A 级)和标准铂热电阻(R_{tp}=25Ω)放在同一温场中,待稳定后按检定规程要求的顺序读取被检电阻和标准热电阻的电阻值,按照相关公式算出被检铂热电阻的实际电阻值。

1 数学模型

1.1 检定点 0℃,测量误差的数学模型^[1]

$$\Delta t_0 = \frac{R_i - R_0}{(dR/dt)_{t=0}} - \frac{R_i^S - R_0^S}{(dR_i^S/dt)_{t=0}}$$

(1)

1.2 检定点 100℃,测量误差的数学模型^[1]

$$\Delta t_{100} = \frac{R_i - R_{100}}{(dR/dt)_{t=100}} - \frac{R_i^S - R_{100}^S}{(dR_i^S/dt)_{t=100}} \tag{2}$$

式中： R_i 为在检定点温度时被测铂电阻的实际电阻值； R_i^S 为在检定点温度时标准铂电阻的实际电阻值。其余符号含义与 JJG 229-2010 规程一致。

可见主要输入量有 R_i 、 R_i^S ，其余的 R_0 、 R_{100} 、 R_0^S 、 R_{100}^S 、 $(dR/dt)_{t=0}$ 、 $(dR_i^S/dt)_{t=0}$ 、 $(dR/dt)_{t=100}$ 、 $(dR_i^S/dt)_{t=100}$ 的不确定度很小，可忽略不计^[1]。

$$u^2(\Delta t_0) = \frac{u^2(R_i)}{(dR/dt)_{t=0}^2} + \frac{u^2(R_i^S)}{(dR_i^S/dt)_{t=0}^2} \tag{3}$$

$$u^2(\Delta t_{100}) = \frac{u^2(R_i)}{(dR/dt)_{t=100}^2} + \frac{u^2(R_i^S)}{(dR_i^S/dt)_{t=100}^2} \tag{4}$$

2 输入量的标准不确定度的评定

被测铂电阻 R_i 的标准不确定度来源主要有：测量重复性引入的标准不确定度 u_A 、电测设备引入的标准不确定度 u_{B1} 、温场不均匀引入的标准不确定度 u_{B2} 、温场波动度引入的标准不确定度 u_{B3} 。标准铂电阻 R_i^S 的标准不确定度来源主要有：二等标准铂电阻温度计引入的标准不确定度 u_{S1} 、电测设备引入的标准不确定度 u_{S2} 。其中 u_A 采用 A 类评定方法， u_{B1} 、 u_{B2} 、 u_{B3} 、 u_{S1} 、 u_{S2} 采用 B 类评定方法。

2.1 测量的重复性引入的标准不确定度 u_A 的评定

标准不确定度 u_A 的来源主要是测量重复性引入的，可以通过重复测量得到测量列，用 A 类方法评定。即用本温度综合标准装置对一常规的被测对象（1 支 Pt100 热电阻，测量范围 0~300℃，准确度等级：A 级）在 0℃ 和 100℃ 两检定点，按检定规程要求进行 10 次独立重复测量，得到测量重复性试验数据见表 1。

表 1 热电阻重复性测试数据

测量次数	$R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$	$R(100\text{ }^{\circ}\text{C})$
1	99.990 9	138.455 8
2	99.990 7	138.459 9
3	99.988 8	138.425 4
4	99.994 5	138.413 3
5	99.996 2	138.390 3
6	99.990 5	138.420 4
7	99.999 7	138.426 5
8	99.973 1	138.430 2
9	99.992 8	138.450 8
10	99.992 9	138.391 5

由表 1 数据得到实验在 0℃ 检定点的标准偏差

为

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 7.05\text{ m}\Omega \tag{5}$$

同理，在 100℃ 检定点的标准偏差为

$$S_{100} = 24.32\text{ m}\Omega \tag{6}$$

由规程可知，测量铂电阻时，交替重复不少于 4 次（包括电流换向），因此

0℃ 检定点标准不确定度为

$$u_A = \frac{S_0}{\sqrt{4}} = 3.52\text{ m}\Omega \tag{7}$$

同理，100℃ 检定点的标准不确定度为

$$u_A = 12.16\text{ m}\Omega \tag{8}$$

2.2 电测设备引入的标准不确定度 u_{B1} 的评定

标准不确定度 u_{B1} 的来源主要是电测设备引入的，采用 B 类方法评定。其值可由电测设备的最大相对误差确定^[2]。由电测设备说明书得知，在 0℃ 时，相对误差半宽区间为 $(52 \times 100 + 9 \times 100) \times 10^{-6}\text{ m}\Omega = 6.1\text{ m}\Omega$ ，在区间内服从均匀分布^[3]，取 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{B1} = \frac{6.1\text{ m}\Omega}{\sqrt{3}} = 3.52\text{ m}\Omega \tag{9}$$

同理，100℃ 时，相对误差半宽区间为 $(50 \times 138.51 + 2 \times 100) \times 10^{-6} = 8.92\text{ m}\Omega$ ，在区间内服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_{B1} = \frac{8.92\text{ m}\Omega}{\sqrt{3}} = 5.15\text{ m}\Omega \tag{10}$$

2.3 温场不均匀引入的标准不确定度 u_{B2} 的评定

标准不确定度 u_{B2} 的来源主要是温场不均匀引入的，采用 B 类方法评定，其值可由温场均匀性确定。按检定规程要求，插入位置间温场均匀性不大于 0.01℃，在区间内服从均匀分布^[3]，取 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u'_{B2} = \frac{0.01\text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.006\text{ }^{\circ}\text{C} = 6\text{ mK}$$

，换算成电阻则

$$\text{检定点 } 0\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时：} \tag{11}$$

$$u_{B2} = (6 \times 0.390\text{ }83)\text{ m}\Omega = 2.34\text{ m}\Omega$$

$$\text{检定点 } 100\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时：} \tag{12}$$

$$u_{B2} = (6 \times 0.379\text{ }28)\text{ m}\Omega = 2.28\text{ m}\Omega$$

2.4 温场波动度引入的标准不确定度 u_{B3} 的评定

标准不确定度 u_{B3} 的来源主要是读数时温场波动度引入的，采用 B 类方法评定。其值可由其温场波动度要求确定。按检定规程要求，插入位置间温场波动度不大于 0.04℃/10 min，以半区间计算，在

区间内服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}^{[2]}$, 则 $u'_{B3} = \frac{0.04\text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}}$
 $= 0.023\text{ }^{\circ}\text{C} = 23\text{ mK}$, 换算成电阻则

检定点 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时:

$u_{B3} = (23 \times 0.390\ 83)\text{ m}\Omega = 8.99\text{ m}\Omega$ (13)

检定点 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时:

$u_{B3} = (6 \times 0.379\ 28)\text{ m}\Omega = 8.72\text{ m}\Omega$ (14)

2.5 二等标准铂电阻温度计引入的标准不确定度 u_{S1} 的评定

标准不确定度 u_{S1} 的来源主要是二等标准铂电阻温度计引入的, 采用 B 类方法评定, 其值可由水三相点的电阻值 R_{tp} 的检定周期不稳定性确定^[3]。

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 根据检定规程规定 R_{tp} 的检定周期不稳定性最大为 5 mK , 在区间内服从正态分布, 取 $k = 3^{[2]}$, 则 $u'_{S1} = 5/3 = 1.67\text{ mK}$, 换算成电阻则

$u_{S1} = 1.67 \times 0.003\ 988\ 5 \times 25\text{ m}\Omega = 0.17\text{ m}\Omega$ (15)

同理, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 依据规程规定检定周期不稳定性最大为 12 mK , 在区间内服从正态分布, 取 $k = 3^{[4]}$, 则 $u'_{S1} = 12\text{ mK}/3 = 4\text{ mK}$, 换算成电阻则

$u_{S1} = (4 \times 0.003\ 868\ 2 \times 25)\text{ m}\Omega = 0.39\text{ m}\Omega$ (16)

2.6 标准铂电阻测量时电测设备引入的标准不确定度 u_{S2} 的评定

标准不确定度 u_{S2} 的来源主要是电测设备引入的, 采用 B 类方法评定。其值可由其电测设备的最大相对误差确定^[3]。

在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 区间半宽为 $(52 \times 25 + 9 \times 100) \times 10^{-6} = 2.2\text{ m}\Omega$, 在区间内服从均匀分布^[3], 取 $k = \sqrt{3}$, 则

$u_{S2} = \frac{2.2\text{ m}\Omega}{\sqrt{3}} = 1.27\text{ m}\Omega$ (17)

同理, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 区间半宽为 $(52 \times 35 + 9 \times 100) \times 10^{-6} = 2.72\text{ m}\Omega$, 在区间内服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则

$u_{S2} = \frac{2.72\text{ m}\Omega}{\sqrt{3}} = 1.57\text{ m}\Omega$ (18)

3 测量不确定度的计算与表示

对于直接测量的不确定度分量 u_A 、 u_{B1} 、 u_{B2} 、 u_{B3} 、

u_{S1} 、 u_{S2} 彼此独立不相关, 所以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 合成标准不确定度为

$u^2(R_i) = u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2$
 $= 35.36\text{ m}\Omega^2$ (19)

$u^2(R_i^S) = u_{s1}^2 + u_{s2}^2 = 1.64\text{ m}\Omega^2$ (20)

$u(\Delta t_0)$
 $= \sqrt{\frac{1}{(dR/dt)_{t=0}^2} u^2(R_i) + \frac{1}{(dR_t^S/dt)_{t=0}^2} u^2(R_i^S)}$
 $= \sqrt{\frac{35.36}{0.390\ 83^2} + \frac{1.64}{(0.003\ 988\ 5 \times 25)^2}}\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $= 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (21)

同理, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 合成标准不确定度为

$u^2(R_i) = 184.97\text{ m}\Omega^2$
 $u^2(R_i^S) = 2.62\text{ m}\Omega^2$
 $u(\Delta t_{100}) = 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ (22)

因此, 取置信概率 $p = 95\%$, $k = 2$, 工业铂热电阻(A 级)测量结果的扩展不确定度为^[3]

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $U_{0^{\circ}\text{C}} = 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}, k = 2$

$100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $U_{100^{\circ}\text{C}} = 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}, k = 2$

5 结 语

通过对工业铂电阻各项测量不确定度因素进行分析可知, 影响不确定度的主要因素是被测铂电阻引入的。因此, 在检定时, 电测设备应严格按照程序操作, 测量某温度点时应等待足够长时间使温场尽量稳定后再读数, 以减少误差, 提高测量结果的准确性。

参考文献

[1] 工业铂、铜热电阻检定规程: JJG 229-2010[S], 2010.
[2] 刘绚. 工业铂电阻测量结果的不确定度评定[J]. 工业计量, 2012, 22(2): 46-47.
[3] 林景星, 陈丹英. 计量基础知识[M]. 北京: 中国质检出版社, 2015.

作者简介:

江正涛(1987), 研究生、工程师, 研究方向为电力计量、自动化技术等;
彭剑英(1965), 高级工程师, 研究方向为自动化技术、工业控制等。

(收稿日期: 2018-01-13)