

基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法

刘德涛

(国网山东省电力公司聊城供电公司, 山东 聊城 252000)

摘要: 由于多电源配电网储能功率控制获取的功率偏差和网络损耗结果不准确, 导致功率控制结果不理想。提出基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法, 并设计储能架构。储能架构由储能控制器、光伏控制器、风力控制器等设备构成。分析多电源配电网储能的运行特性, 以运行费用和资源折旧费用总和最小作为目标, 构建多电源配电网储能功率合理控制模型, 通过蚁群算法优化求解模型, 实现储能功率的合理控制。实验表明: 所提方法未发生过电压和欠电压的情况, 其网络损耗值仅为 85.5 kW·h, 三相不平衡度为 0.18%, 功率偏差为 29.4 W, 因此, 所提方法有效提高了功率控制效果。

关键词: 蚁群算法; 多电源配电网; 储能功率; 合理控制

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24205

Rational Control Method of Energy Storage Power in Multi-power Distribution Network Based on Ant Colony Algorithm

LIU Detao

(State Grid Shandong Electric Power Company Liaocheng Power Supply Company, Liaocheng 252000, Shandong, China)

Abstract: Due to the inaccurate power deviation and network loss results obtained by the energy storage power control of the multi-source distribution network, the power control results are not ideal. A rational control method of energy storage power in multi-source distribution network based on ant colony algorithm was proposed, and the energy storage architecture was designed, which is composed of energy storage controller, photovoltaic controller, wind controller and other equipments. The operation characteristics of energy storage in multi-source distribution network were analyzed. According to the characteristics, with the goal of minimizing the sum of operating costs and resource depreciation costs, a rational control model of energy storage power in multi-power distribution networks was constructed, and the model was optimized and solved by ant colony algorithm to achieve rational control of energy storage power. Experiments show that the proposed method does not experience overvoltage and undervoltage, the network loss value is only 85.5 kW·h, the three-phase unbalance is 0.18%, and the power deviation is 29.4 W. Therefore, the proposed method effectively improves the power control effect.

Key words: ant colony algorithm; multi-power distribution network; energy storage power; rational control

为了适应全新的挑战和发展需求, 多电源配电网应运而生^[1-2]。该配电网和交流系统类似, 如果直接采用会形成功率偏差或者网络损耗等。为了有效消除该影响, 合理控制多电源配电网储能功率具有十分重要的意义。

国内相关专家针对上述内容开展了大量研究。文献[3]提出了一种含新能源接入的配电网中分布式储能系统控制策略, 基于双层控制提高

配电网电压稳定性, 双层控制分上、下层执行: 上层稳定电压, 确定各节点电压满足安全运行条件和电压偏差最小时储能电站群总有功/无功功率; 下层优化分配上层运行结果, 并将其传输至控制模块, 根据实时状态, 分配各储能电站的功率。该方法存在获取的功率偏差大的问题。文献[4]提出了高渗透率光伏配电网中电池储能系统综合运行控制策略, 该方法包括电压控制和套利运

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52094017003D)

作者简介: 刘德涛(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网与电力大数据, Email: pldt2022@163.com

作两部分。电压控制部分建立包括电池剩余寿命(TOU)、荷电状态(SOC)、电压灵敏度特性等在内的评价矩阵,选择综合评价指标最大者进行控制;套利运作部分结合用电峰谷电价,尽量减少电池动作对节点电压的影响,选择电压灵敏度因数及动作费用最小、电池状态最优者进行控制,实现了储能系统的控制。该方法的约束条件不足,导致方法存在三相不平衡度高的情况。文献[5]提出了计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制,在优化调度层中,以各区域与主网交换功率的可调度性为目标建立动态数学模型,通过区域间协同优化实现大规模分布式电源友好并网,得到区域的整点功率交换指令。在区域内控制层中,考虑到不同分布式电源调节能力的差异性,结合储能系统基于模糊策略响应并修正上一级的整点指令,给出各区域5 min超短期调度指令。在设备级控制中,基于PWM变流器对各储能系统进行实时控制以响应上一级的指令,但是该方法的网络损耗较高。

在上述三种控制方法的基础上,提出一种基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法,分析配电网的储能运行特征,包括风机特征、光伏发电特征、负荷特征以及储能特征,构建多源配电网储能功率合理控制模型,结合蚁群算法求解模型,以此实现储能功率合理控制。经实验测试结果表明,所提方法可以获取满意的控制效果。

1 多电源配电网储能功率合理控制方法

1.1 多电源配电网储能硬件设计

本文设计了多电源配电网储能硬件架构,如图1所示。

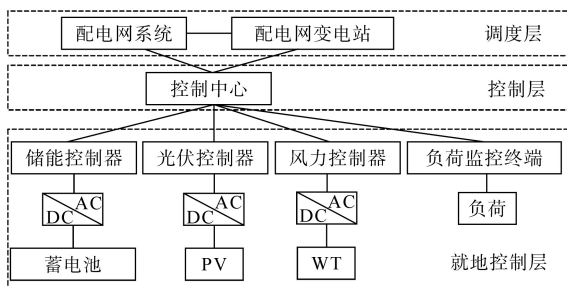


图1 多电源配电网储能架构

Fig.1 Multi-power distribution network energy storage architecture

由图1可知,本文设计的硬件架构分为三层,分别为调度层、控制层和就地控制层,主要由储

能控制器、光伏控制器、负荷控制终端、蓄电池和控制中心等设备构成。传统的控制方法往往仅考虑了储能控制和光伏,未考虑风能控制,本文将三者合并控制,统一调配,提高多电源配电网储能功率的控制合理性,进而提高储能功率的利用率。调度层主要负责多源配电网的储能调度,将调度信息传输至控制中心,经过控制中心分配储能功率,并且将控制指令传输至就地控制层,通过就地控制层实现储能功率合理控制。

1.2 多电源配电网储能软件设计

1.2.1 多电源配电网储能运行特征

电网储能控制的目的是为了提高电力系统的供电可靠性和稳定性,储能配置的容量越大,发电功率越高,供电可靠性越好,配置容量越小,放电功率越高,供电可靠性越低。由于多电源接入到配电网中,对配电网的运行产生明显影响,因此需要优先分析多电源配电网储能运行特性,为后续的储能功率合理控制提供可靠的数据依据^[6-7]。根据储能架构分析多电源配电网储能运行特征如下:

1) 风机特性。风机可以通过风能产生电能,风电出力和风速大小之间存在密切的关联性,在描述风速随机性分布参数中,对应的概率密度函数可以表示为

$$g(v, b, c) = \frac{c}{b} \left(\frac{v}{b}\right)^{c-1} e^{-(v/b)^c} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} b = \frac{\alpha}{\Gamma(1 + \frac{1}{b})} \\ c = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{1.086} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为风速; b 为尺度参数; c 为形状参数; α 为风速的标准差取值; β 为风速均值; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

风速的大小影响风机输出功率,因此,需要确定风速和输出功率的关系,函数关系可以表示为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ \alpha(v) + \beta & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ 0 & v_{c0} \leq v \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_w 为风机的输出功率; v_{c0} 为风机的额定风速; v_{ci} 为风机的切出风速; v_r 为风机的风速上限; $\alpha(v)$ 为在风速 v 下的标准差。

2) 光伏发电。光伏发电是光能转换为电能^[8-9],该发电方式具备安全可靠、无噪声、无污染排放、绝对干净(无公害)、不受资源分布地域的限制以

及可利用建筑屋面的优点。

由于太阳光照强度近似服从Beta分布,因此得到概率密度函数 $g_{(s)}$ 为

$$g_{(s)} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{s}{s_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: s, s_{\max} 为光伏发电系统的光照强度总和以及最大光照强度。

3) 负荷特性。由于配电网负荷服从正态分布,因此,负荷对应的有功功率模型 $P_{(p)}$ 可以表示为

$$P_{(p)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(p-b+c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: σ 为负荷有功平均值。

4) 储能特性。储能是将不需要的能量存储备用,在需要的时候,释放能量。通常情况下,储能大小主要通过额定容量和额定功率展开描述,其中充放电倍率和额定电量两者之间的比值可以表示为

$$l = \frac{C_{\text{bess}}^n}{P'} \quad (6)$$

式中: C_{bess}^n 为额定容量; P' 为储能的额定功率; l 为储能系统充放电倍率。

1.2.2 构建多电源配电网储能功率合理控制模型

分析多电源配电网储能运行特性,以此作为储能功率合理控制的可靠数据依据,构建多电源配电网储能功率合理控制模型。多电源配电网储能在随机时刻的荷电状态可以表示为

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) + \frac{P_v + P_b + P_c}{P'} & l > \varepsilon \\ SOC(t-1) - \frac{P_v + P_b}{P' \times (P_c)} & l \leq \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中: SOC 为在设定时间段内储能的荷电状态; P_v, P_b, P_c 分别为不同类型储能系统的充电功率; ε 为比值阈值。

获取多源配电网中的功率偏差、网络损耗需要对系统进行潮流计算。选取可变速电容器(variable speed capacitor, VSC)作为交流区域和直流区域的中介,设定直流网络中节点数为 x 个,在注入电流后的潮流表达式为

$$H_{(i)} = \begin{cases} \frac{P''_{(i)}}{V_{(i)}} & V_{(i)} < V_0 \\ G_{(i1)}V_{(1)} + G_{(i2)}V_{(2)} + \dots + G_{(ix)}V_{(x)} & V_{(i)} = V_0 \\ \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^x G_{(ij)}V_{(i)} & V_{(i)} > V_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P''_{(i)}$ 为节点 i 的注入功率; $V_{(i)}$ 为节点 i 的电压取值; $G_{(i,j)}$ 为支路的电导; $H_{(i)}$ 为注入电流后的配电网潮流; V_0 为给定的节点电压; i, j 为直流网络中节点。

多电源主要以分布的形式接入配电网,如果直接接入,会对配电网的网络损耗以及功率偏差产生影响,以下展开详细的分析。

设年电能损耗为最大负荷下的电能损耗和最大负荷小时数两者的乘积,具体的计算式如下:

$$W = W_{L_{\max}} \times T_{L_{\min}} \quad (9)$$

式中: W 为年电能损耗; $W_{L_{\max}}$ 为最大负荷下的电能损耗; $T_{L_{\min}}$ 为最大负荷小时数。

功率偏差 ΔP 的计算式为

$$\Delta P = \frac{P_v \times P_b \times P_c}{C'} \quad (10)$$

式中: C' 为电源的总容量。

在模型建立过程中,考虑了贴现率和电容器的使用年限,将运行费用、资源折旧费用总和最小作为目标,得到如下计算式:

$$\min(c) = \sum_{i=1}^x (L_{(p)} \lambda_{\max} T_{i,j}) + \sum_{j=1}^x (M - i + 1) C'_{ij} H_{(i)} \quad (11)$$

式中: M 为规划年限; $L_{(p)}$ 为电力系统的电价变化规律; λ_{\max} 为电力系统的最大负荷损耗; C'_{ij} 为多电源配电网的年维护费用; x 为直流网络中节点个数; $T_{i,j}$ 为电价变化时间。

为了满足系统的负荷需求,设定潮流约束条件,如下式:

$$\begin{cases} \Delta P_{(i)} = P_c - P_{(i)}(P_v, P_b, P_c) = 0 \\ \Delta Q_{(i)} = Q_c - Q_{(i)}(P_v, P_b, P_c) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_{(i)}, \Delta Q_{(i)}$ 分别为有功和无功输出; P_c, Q_c 分别为有功和无功负荷; $P_{(i)}, Q_{(i)}$ 分别为有功和无功潮流方程。

规划多负荷状态下的无功电源^[10-11],确保经济收益达到最佳状态,因此,需要针对不同负荷状态下的容量实施无功补偿,同时根据以上优化目标和约束条件,组建多电源配电网储能功率合理控制模型 $\min(L)$,具体的计算式如下:

$$\min(L) = \sum_{i=1}^x \min(c) + \sum_{j=1}^x Q_{(i)}(P_v, P_b, P_c) + C'_{ij} \quad (13)$$

1.2.3 蚁群算法的合理控制模型优化求解

蚂蚁是一种十分古老的昆虫,蚂蚁通过群体不仅可以完成比较复杂的任务,并且其具备很强的适应力。因此,很多学者研究了蚁群的特征,并且取得了成果,如蚁群算法^[12-13],该方法常用于

优化路径,其本质是进化算法中的一种启发式全局优化算法。该方法将优化问题转变为蚂蚁路径问题,路径短的蚂蚁释放的信息素量多,信息素浓度在短路径中逐渐提高,最终,整个蚁群在正反馈的作用下,集中到最佳的路径,该路径便是最优解。因此,在组建的多电源配电网储能功率合理控制模型的基础上,利用蚁群算法优化求解控制模型,提高模型的控制效果。采用蚁群算法^[14-15]对多电源配电网储能功率合理控制模型求解,详细的求解流程如图2所示,具体的操作流程如下:

1) 参数初始化处理。对蚁群算法中全部参数、蚂蚁数量以及迭代次数等实施初始化处理,同时将蚁群随机分布到不同的城市。

2) 蚁群搜索阶段,其过程如下:

①为蚂蚁随机分配一个城市 ϖ ,将城市 ϖ 添加到禁忌表中,完成禁忌表修改。

②计算全部蚂蚁的状态转移概率,确定各个城市被选中的概率,实时更新禁忌表。

③判断现阶段的禁忌表是否含有全部城市,假设有,则返回步骤2)。

3) 更新信息素。在得到全部蚂蚁的可行解之后,更新全部路径信息素,将禁忌表清空。

4) 输出最优解。假设满足约束条件,则输出最优多电源配电网储能功率合理控制方案;反之,则重新搜索。

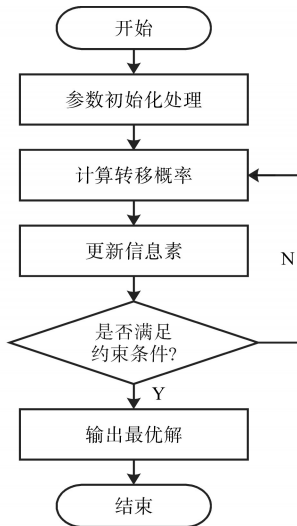


图2 基于蚁群算法的控制模型求解流程图
Fig.2 Flow chart of solving the control model based on ant colony algorithm

设 $b_{\varpi}(t)$ 为在 t 时间段位移城市 ϖ 的蚂蚁数量,则蚂蚁数量 n 为

$$n = \sum_{\varpi=1}^m b_{\varpi}(t) \quad (14)$$

式中: $b_{\varpi}(t)$ 为在 t 时间段位移城市 ϖ 的蚂蚁数量; m 为城市数量。

蚂蚁 k 在 t 时间段由城市 ϖ 转移到城市 s 的概率 $p_{\varpi s}^k(t)$ 可以表示为

$$p_{\varpi s}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{\varpi s}^{\alpha}(t)\eta_{\varpi s}^{\beta}(t)}{\sum_{\varpi=1}^y \tau_{\varpi s}^{\alpha}(t)\eta_{\varpi s}^{\beta}(t)} & s \neq \varpi \\ 0 & s = \varpi \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\tau_{\varpi s}^{\alpha}(t)$ 为在 α 风速标准差取值环境下的先验知识; $\eta_{\varpi s}^{\beta}(t)$ 为路径可见度。

当时间开始发生变化,每条路径下蚂蚁遗留下的信息素慢慢消失,在全部蚂蚁完成一次循环后,需要调整不同路径上的信息素,具体计算式如下:

$$\tau_{\varpi s}(t+1) = \begin{cases} \rho \times \tau_{\varpi s}(t) + \Delta\tau_{\varpi s}(t) & \rho \in (0, 1) \\ \Delta\tau_{\varpi s} = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{\varpi s}^k & \rho \notin (0, 1) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\tau_{\varpi s}(t+1)$ 为经过调整后的信息素取值; ρ 为衰减程度; $\tau_{\varpi s}^k(t)$ 为第 k 只蚂蚁的先验知识; $\tau_{\varpi s}(t)$ 为先验知识。

通过信息素更新策略的差异,对以下几种模型分析和描述。

①蚁周模型可以表示为

$$A_1 = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{假设第}k\text{只蚂蚁经过城市}\varpi\text{和}s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: Q 为一个常量; L_k 为蚂蚁每经历一次循环行走的路径长度。

②蚁量模型可以表示为

$$A_2 = \begin{cases} \frac{Q}{d_{\varpi s}} & \text{假设第}k\text{只蚂蚁经过城市}\varpi\text{和}s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $d_{\varpi s}$ 为城市 ϖ 和城市 s 之间的距离。

③蚁密模型可以表示为

$$A_3 = \begin{cases} Q & \text{假设第}k\text{只蚂蚁经过城市}\varpi\text{和}s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

通过以上定义可知,模型②和模型①主要使用局部更新策略,而模型③采用全局更新策略。因此,本文应用模型①优化求解合理控制模型,即输出最优解为最合理的控制功率。

2 仿真实验

为了验证所提基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法的有效性和可行性,选

取多电源配电网作为研究对象展开实验测试分析。

对典型日的功率变化情况展开分析,具体结果如图3所示。

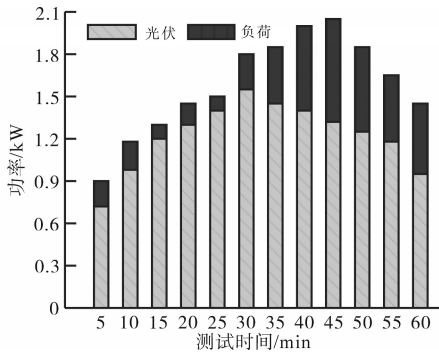


图3 典型日的功率变化结果分析

Fig.3 Analysis of power variation results on a typical day

由于在多电源配电网情况下,电力的输出距离以及温度相关条件存在的差异并不明显,在测试初始阶段负荷处于稳定状态,随着时间的推移呈现先上升后下降的趋势;而光伏在初始阶段处于上升趋势,在后期则处于直线下下降趋势。

对三种不同方法的多电源配电网储能功率合理控制性能展开实验测试,设置5个时段,每个时段为6h,分析不同时段下,电压幅值变化情况,详细的实验测试结果如图4所示。

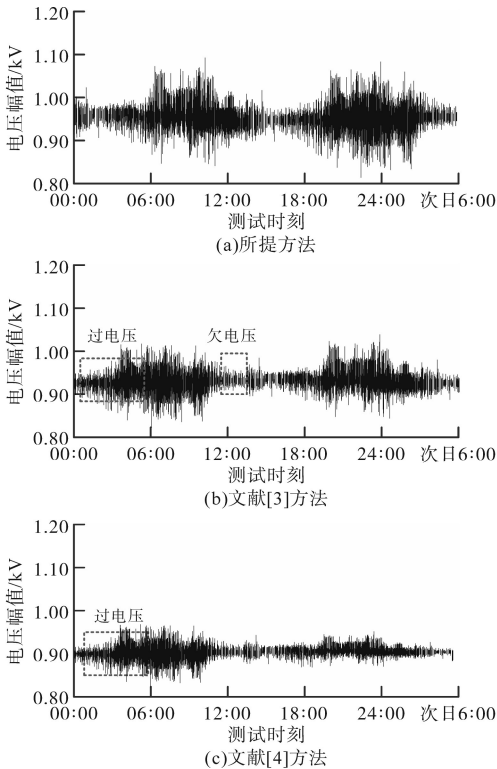


图4 不同方法的多电源配电网储能功率合理控制性能测试结果对比

Fig.4 Comparison of test results of reasonable control performance of energy storage power in multi-source distribution network with different methods

分析图4中的实验数据可知,经过所提方法对多电源配电网储能功率合理控制后,不会出现过电压或者欠电压的情况;文献[3]方法在多电源配电网储能功率合理控制性能测试结果中在00:00—06:00时段出现了一次过电压现象,并且在12:00—18:00时段出现一次欠电压现象;文献[4]方法在多电源配电网储能功率合理控制性能测试结果中出现了一次过电压现象,其发生时段也是00:00—06:00。后两种控制方法在测试中均出现了不同程度的电压幅值较大波动的情况。三种实验方法相比较而言,由于所提方法通过计算得到了结果比较准确的网络偏差和网络损耗,因此,可以有效提升多电源配电网储能功率合理控制性能。

进一步对比三种不同方法下的网络损耗、三相不平衡度以及功率偏差,详细的实验测试结果如图5所示。

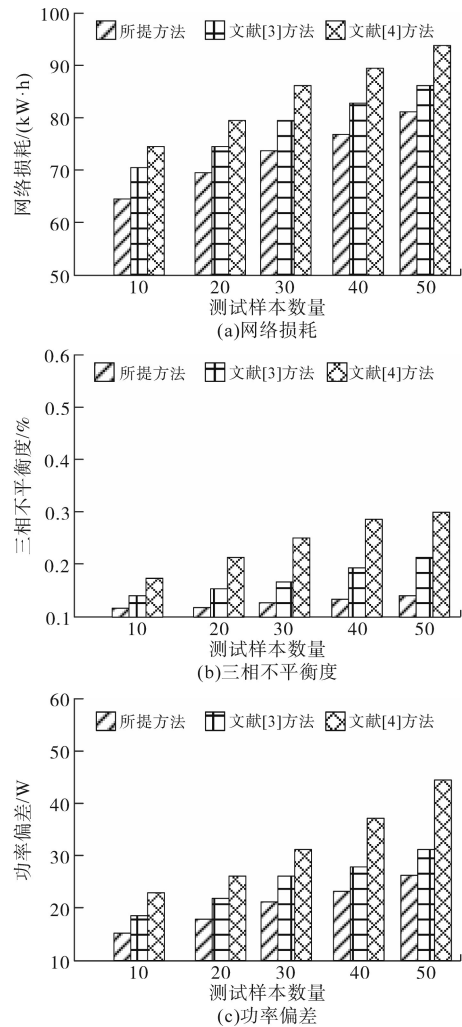


图5 不同控制方法下的控制结果对比

Fig.5 Comparison of control results under different control methods

分析图5中的实验数据可知,所提方法的网络损耗、三相不平衡度以及功率偏差均低于另外两种方法。

在网络损耗方面,网络损耗随着测试样本数量的增加而增加,但是在三种方法中,所提方法的网络损耗的增加量最少,即使在50个样本时,其网络损耗值仅为85.5 kW·h,而文献[3]方法的网络损耗达到了91.7 kW·h,文献[4]方法的网络损耗值达到了97.3 kW·h,分别高出所提方法6.2 kW·h和11.8 kW·h。因此,所提方法的网络损耗得到了有效的降低和控制,具备可行性。

在三相不平衡度方面,三相不平衡度随着测试样本数量的增加而增加,但是所提方法的增加较少,其在测试样本数量为50个时,三相不平衡度仅为0.18%,而文献[3]方法的三相不平衡度达到了0.28%,文献[4]方法的三相不平衡度达到了0.34%,与所提方法相比,三相不平衡度分别高出0.1%和0.16%,文献方法均高出所提方法较多。因此,所提方法有效地降低了三相不平衡度,提高了运行性能。

由功率偏差的验证可知,三种方法的功率偏差均随着样本数量的增加呈现不同程度的增加,但是所提方法的功率偏差即使增加,也远远低于另外两种文献方法。在测试样本数量为50个时,三种方法达到了最大值,所提方法的功率偏差仅为29.4 W,而文献[3]方法的功率偏差达到了35.1 W,文献[4]方法的功率偏差达到了48.9 W,两种文献方法分别高出所提方法5.7 W和19.5 W。因此,所提方法的功率偏差最低,有效降低了功率偏差,其控制方法在几种方法中是最合理的,具备有效性。

3 结论

本文针对多电源配电网储能的不足之处,设计并提出了基于蚁群算法的多电源配电网储能功率合理控制方法。该方法主要设计了由储能控制器、光伏控制器、负荷监控终端等设备组成的硬件架构,通过分析多电源配电网的运行特征,构建合理控制模型,结合蚁群算法优化控制模型,完成控制算法的设计。经过实验分析,所提方法在网络损耗、三相不平衡度以及功率偏差等方面均取得了优化效果,在三方面分别降低了6.0 kW·h,0.1%和5.5 W以上,因此,本文方法有效且合理地控制了多电源配电网储能功率,具备

可行性和有效性。

未来阶段,在研究过程中加入分组电容器等多种设备实施综合控制,全面解决配电网中电压波动以及电能质量问题,达到更好的多电源配电网储能功率控制效果。

参考文献

- [1] 唐俊熙,王梓耀,张俊潇,等.基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):99-107.
TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on cultural ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 99-107.
- [2] 董海鹰,王荣.含光伏电源的配电网动态孤岛划分策略[J].太阳能学报,2019,40(7):1950-1958.
DONG Haiying, WANG Rong. Dynamic island partition strategy for distribution networks with photovoltaic power[J]. Journal of Solar Energy, 2019, 40(7): 1950-1958.
- [3] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.
ZENG Jie, ZHANG Chi, YUAN Zhichang, et al. Research on control strategy of dc distribution grid with balanced load ratio between connected AC zones[J]. Electric Drive, 2019, 49(9): 46-51.
- [4] 李佳琪,陈健,张文,等.高渗透率光伏配电网中电池储能系统综合运行控制策略[J].电工技术学报,2019,34(2):437-446.
LI Jiaqi, CHEN Jian, ZHANG Wen, et al. Integrated control strategy for battery energy storage system in distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 437-446.
- [5] 张颖,寇凌峰,季宇,等.计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J].中国电力,2021,54(2):104-112.
ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 104-112.
- [6] 胡卫丰,侍红兵,李官军,等.基于初始工作点选取的级联多电平混合储能系统功率分配控制[J].电网技术,2020,44(5):1639-1651.
HU Weifeng, SHI Hongbing, LI Guanjun, et al. Power distribution control for cascaded multilevel inverter with hybrid energy sources based on initial operation point selection[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1639-1651.
- [7] 肖海伟,孙久严,李章溢,等.基于综合储能设备的工业园区联络线功率实时MPC控制方法[J].电力建设,2019,40(8):34-42.
XIAO Haiwei, SUN Jiuyan, LI Zhangyi, et al. Real-time MPC control method for tie-line power in industrial park considering integrated energy storage devices[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 34-42.