

基于功角稳定性的区域电网储能选址定容方法

程浩,秦文萍,韩肖清,景祥,朱志龙,逯瑞鹏

(太原理工大学 电力系统运行与控制山西省重点实验室,山西 太原 030024)

摘要:为了缓解跨传输断面的调峰压力,同时提升电网的功角稳定性,建立了兼顾经济性与功角稳定性的储能选址定容双层优化模型,并给出了模型的求解方法。上层模型考虑区域电网的运行经济性,以储能电站收益最大为优化目标,确定储能配置总容量。下层模型考虑区域电网的功角稳定性,以储能调度期间总网损最小和储能调节区域电网功角稳定性能力最大为优化目标,进行储能选址与总容量的分配。双层模型的上层采用遗传算法进行求解,下层采用改进多目标人工蜂群算法进行求解。以某实际电网为算例进行仿真验证,结果表明,根据所提双层优化模型进行储能配置可以在保证经济性的同时,提升区域电网的功角稳定性。

关键词:储能;双层规划;选址定容;功角稳定性;改进多目标人工蜂群算法

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202312025

0 引言

随着可再生能源发展的不断探索和新型电力系统的建设,我国正逐步形成西部大规模清洁能源并网的送端电网与东部负荷密集的受端电网,经由远距离特高压通道跨区互联的电力系统网架结构总体格局。随着新能源并网规模的增大,新能源消纳能力、电网运行安全能力、跨传输断面的调峰互济能力受到常规电源特性和电网结构的限制,而利用电池储能缓解调峰压力同时提升区域电网的调节能力具有较好的应用前景。一方面,电池储能系统的快速控制特性使其可以在区域电网遭遇故障时提供足够快速的能量支撑响应能力,可改善新能源互联区域电网的抗扰动能力,提升区域电网的功角稳定性^[1]。另一方面,储能装置的能量时空迁移特性可等效地将电能供给和需求进行一定时间尺度上的平移,可以有效地提升新能源消纳水平,减小区域电网负荷峰谷差,缓解跨传输断面调峰互济的压力^[2]。

已有学者针对储能规划和运行问题进行了相关的研究。文献[3]针对储能改善配电网电压质量和经济优化配置进行了研究,但没有考虑储能布局对系统的影响;文献[4]将系统的规划问题和包含光伏、储能的电力系统运行问题作为整体进行建模,考虑了整个系统运行对储能规划的影响;文献[5]考虑负荷裕度研究了区域综合能源系统的储能优化配

置;文献[6]针对新能源高渗透系统,分析了面向调峰调频的储能容量需求。但上述研究均未考虑储能对区域电网功角稳定性的改善作用。

配置储能能够在电力系统发生故障期间及时提供频率和功率支持,有助于提高系统的稳定性和抗扰动能力。文献[7]分析了储能电站提高系统暂态稳定性的机理以及储能电站接入位置对系统暂态稳定性的影响;文献[8]从扩展等面积法角度分析了储能提高系统暂态稳定性的机理,但未考虑储能选址对系统稳定性的影响;文献[9]研究了储能并网容量对系统小干扰稳定性的影响,证明了储能接入系统后并不会产生新的振荡模式,但随着储能并网容量大小的改变,系统原有振荡模式的阻尼比会发生相应的变化;文献[10]基于广义短路比指标验证了储能电站对系统小干扰稳定性的提升作用,并提出了提升系统稳定裕度的储能选址定容方法。由上述分析可知,在储能选址定容研究中,保障输电能力和经济性的同时,利用储能兼顾区域电网的功角稳定性具有现实意义。

在求解储能选址定容优化问题方面,部分学者建立了多层、多目标及多阶段模型,采用遗传算法进行求解^[11]。文献[11]针对储能的双层决策模型提出了基于遗传算法的改进数值解法,外层采用遗传算法进行求解,内层采用数值优化算法进行求解。但遗传算法的搜索效率较低,当问题规模较大时,其运行时间过长。多目标人工蜂群(multi-objective artificial bee colony, MOABC)算法具有较强的搜索能力和较快的收敛速度,擅于解决规模大且优化变量较多的问题^[12],已有许多学者将 MOABC 算法应用于储能选址定容模型的求解^[13-14]。但 MOABC 算法存在种群分布性差、易陷入局部最优解、求解目标函数强耦合问题收敛性不足等问题。

为此,本文首先基于线性化等面积定则分析储

收稿日期:2023-08-14;修回日期:2023-11-07

在线出版日期:2023-12-27

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1910216);区域创新发展联合基金资助项目(U21A600003)
Project supported by the Key Program of Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China(U1910216) and the Regional Joint Fund for Innovation and Development Project(U21A600003)

能电站对区域电网功角稳定性的影响机理。在此基础上,提出兼顾经济性与区域电网功角稳定性的储能选址定容双层优化模型,上层提出储能电站建设运行成本和储能电站运行收益指标,考虑经济性建立储能电站配置总容量优化模型,并采用遗传算法进行求解;下层提出一种量化储能调节区域电网功角稳定性能力的评价指标,结合区域电网的有功网损指标,建立考虑区域电网功角稳定性的储能电站选址与总容量分配模型,并针对MOABC算法求解过程中存在的问题进行改进,提出一种改进多目标人工蜂群(improved multi-objective artificial bee colony, IMOABC)算法进行求解。最后,搭建某实际电网模型进行仿真分析,验证本文提出的双层优化模型的有效性以及所提出IMOABC算法的适用性。

1 储能电站对区域电网功角稳定性的影响

1.1 储能电站影响区域电网功角稳定性的机理

为了简洁有效地说明储能电站与区域电网的动态交互作用机理,本节通过双机等值将电网受扰严重机群等值为S机群,将其余机群等值为A机群,建立双机等值模型,2组机群内部的转子角无相对摆动^[15]。同时,在分析储能电站与电网之间动态交互时,功率振荡的动态过程(秒级)与并网逆变器的动态过程(毫秒级)之间时间尺度相差很大,因此将储能电站简化为受控电流源^[16]。储能电站接入双机等值机群的简化等效模型及电压相量图见附录A图A1。

储能电站及其控制策略模型可参考文献[17],设定有功功率采用频率控制,无功功率采用定功率因数控制。本文聚焦于储能输出有功功率对区域电网功角稳定性的影响,因此,设定功率因数为1,使储能电站输出电流 I_d 始终与储能电站并网点电压 U_1 同相位,储能电站仅输出有功功率。S机群的发电机电动势用 $E\angle\delta$ 表示,A机群的电动势用 $U\angle-\theta$ 表示。假定 E 与 U 相等且恒定,配置储能后发电机输出电磁功率的变化量 ΔP_e 由发电机功角和储能输出电流共同决定,如式(1)所示。

$$\Delta P_e = K_g \Delta \delta - K_e \Delta I_d \quad (1)$$

式中: $\Delta \delta$ 为发电机的功角变化量; ΔI_d 为储能输出电流的变化量;系数 K_g 、 K_e 的详细推导过程可参考文献[16]。

为了对电网中的扰动具有较好的响应能力,储能电站的有功功率控制环节采用频率控制,以系统频率偏差 Δf 为被控量,控制储能电站吸收/发出的有功功率,其可近似为一个超前/滞后环节,如式(2)所示。

$$\Delta P_f = -\Delta f \frac{K_1(1+sT_1)}{1+sT_2} \quad (2)$$

式中: K_1 为储能有功增益系数; ΔP_f 为储能电站反馈系统频率所吸收/发出的有功功率; T_1 、 T_2 分别为超前、滞后环节的时间常数。

ΔP_f 经过换流器转化为并网电流,换流器有功控制采用双环控制,有功外环控制可近似看作经过一个比例-积分(proportional-integral, PI)调节器,有功内环控制过程可等效为一个1阶惯性环节,内、外环控制的时间尺度相差很大。因此,当将储能电站简化为受控电流源进行分析时,储能电站的并网电流可以近似看作经过一阶惯性环节的换流器外环输出电流。换流器的有功控制策略见附录A图A2。

有功控制策略的输出电流 Δi_d 为:

$$\Delta i_d = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{1+sT} \Delta P_f \quad (3)$$

式中: K_p 、 K_i 分别为PI调节器的比例、积分系数; T 为惯性环节的时间常数。将式(2)代入式(3)并考虑 $\Delta f = 2\pi\Delta\omega$ ($\Delta\omega$ 为发电机转速的变化量, $\Delta\omega = s\Delta\delta$), 可得:

$$\Delta i_d = -\frac{K_p K_1 (1+sT_1)}{(1+sT_2)(1+sT)} \times 2\pi\Delta\omega - \frac{K_i K_1 (1+sT_1)}{(1+sT_2)(1+sT)} \times 2\pi\Delta\delta \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),可得:

$$\begin{cases} \Delta P_e = \Delta P_g + \Delta P_{\text{con}} \\ \Delta P_g = K_g \Delta \delta \\ \Delta P_{\text{con}} = K_{\text{con}\delta} \Delta \delta + K_{\text{con}\omega} \Delta \omega \end{cases} \quad (5)$$

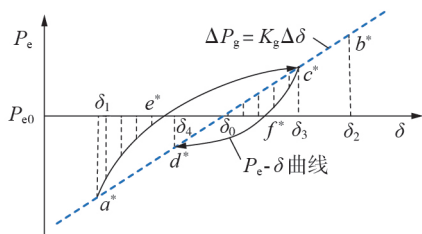
$$\begin{cases} K_{\text{con}\delta} = 2\pi \frac{K_e K_i K_1 (1+sT_1)}{(1+sT_2)(1+sT)} \\ K_{\text{con}\omega} = 2\pi \frac{K_e K_p K_1 (1+sT_1)}{(1+sT_2)(1+sT)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ΔP_{con} 为储能装置附加控制引起的功率变化量; ΔP_g 为其他因素引起的功率变化量; $K_g + K_{\text{con}\delta}$ 表征电网的同步特性, $K_{\text{con}\delta}$ 为储能装置附加控制对电网同步特性的影响系数, $K_{\text{con}\omega}$ 为表征电网的阻尼特性的系数。

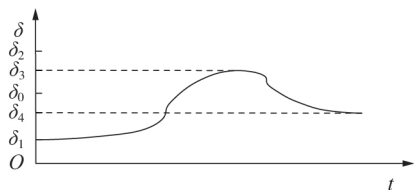
式(5)和式(6)表明:储能电站的控制参数 K_i 、 K_p 可以分别等效地改变电网的同步特性和阻尼特性,且 $K_{\text{con}\delta}$ 、 $K_{\text{con}\omega}$ 均与 K_1 、 K_e 成正比,增益系数 K_1 表征电池的充放电功率,在电网调度指令的站级控制层面表征储能电站的配置容量^[7],储能电站的配置容量越大,储能电站的接入对电网同步特性、阻尼特性的改善能力越强。控制系数 K_e 受储能电站接入电网位置的影响^[16],由函数性质可知, K_e 随着储能电站接入位置与A机群之间距离 X_2 的增大而增大,因此,储能电站的接入位置距离失稳发电机越近,则对电

网同步特性与转矩特性的改善能力越大,越有利于发电机稳定。

基于等面积法则分析 ΔP_{con} 对受扰动后发电机加速 / 减速面积的影响,如图 1 所示。



(a) 储能暂态响应对发电机功角特性的影响



(b) 系统功角

图 1 储能电站对系统功角稳定性的影响分析

Fig.1 Analysis of influence of energy storage station on system power angle stability

假设电网稳定运行点为 P_e - δ 曲线上的一点 (δ_0, P_{e0}) ,由于电网受到扰动,运行点移动到点 a^* ,此处为振荡的起点。如式(5)所示, ΔP_g 正比于 $\Delta\delta$,其运动轨迹是斜率为 K_g 的直线。当运行点由点 a^* 开始向上移动时,发电机转子加速,发电机转速 ω 大于额定转速 ω_0 ,即 $\omega > \omega_0$ 、 $\Delta\omega > 0$ 、 $\Delta\delta > 0$, ΔP_g 增大了 ΔP_{con} ,这使得运行点要在 ΔP_g 曲线上方运动,如图 1 所示,运动轨迹经过曲线 $a^*e^*c^*$ 到达点 c^* ,回到曲线 $\Delta P_g = K_g \Delta\delta$ 上。因为在点 c^* 处 $\Delta\omega = 0$ 、 $\Delta\delta = 0$ 、 $\Delta P_{con} = K_{con\delta} \Delta\delta + K_{con\omega} \Delta\omega = 0$,同理,从点 c^* 开始,电磁转矩的制动作用大于机械转矩,发电机转子做减速运动, $\Delta\omega < 0$ 、 $\Delta\delta < 0$ 、 $\Delta P_{con} < 0$,运动轨迹经过曲线 $c^*f^*d^*$ 到达点 d^* ,回到曲线 $\Delta P_g = K_g \Delta\delta$ 上。

在点 a^* 移动到点 c^* 的过程中,若没有 ΔP_{con} ,则加速面积 $S_{\Delta a^* \delta_1 \delta_0}$ 应等于减速面积 $S_{\Delta b^* \delta_2 \delta_0}$,电网运行点应沿着 ΔP_g 曲线运动至点 b^* ,点 b^* 处的功角应满足 $|\delta_2 - \delta_0| = |\delta_1 - \delta_0|$ 。而考虑储能附加控制引起的发电机电磁功率变化量 ΔP_{con} ,使得加速面积由 $S_{\Delta a^* \delta_1 \delta_0}$ 减小至 $S_{\Delta a^* \delta_1 e^*}$,因此 $S_{\Delta e^* c^* \delta_3} = S_{\Delta a^* \delta_1 e^*} < S_{\Delta b^* \delta_2 \delta_0}$, $|\delta_3 - \delta_0| < |\delta_1 - \delta_0| = |\delta_2 - \delta_0|$,功角的摆动幅度减小。

双机系统受扰动后系统功角的波动情况如图 2 所示。由图可知,相较于原系统,储能反馈频率进行附加控制后机组相对功角曲线的振荡头摆幅值减小,系统的功角稳定性得到了提升。

1.2 机理仿真验证

基于 PSD-BPA 软件搭建含光伏电站并网的两

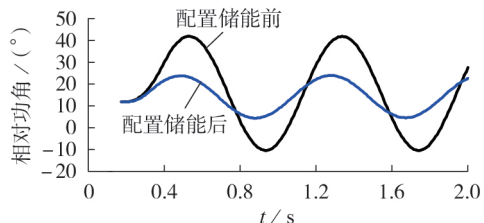


图 2 双机系统受扰动后系统功角波动曲线

Fig.2 System power angle fluctuation curve of two-machine system after disturbance

区域电网模型进行仿真分析,其结构示意图见附录 A 图 A3。发电机 G_1 — G_3 的参数见附录 A 表 A1, G_3 为平衡机,光伏电站在母线 5 处并网。 G_1 、 G_2 的出力均为 100 MW,光伏在区域 1 的渗透率为 50% (100 MW),系统基准容量 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。考虑故障为 0.1 s 时母线 7 与母线 8 之间的线路发生三相短路,0.2 s 时两侧三相断路器同时断开。

1) 储能配置容量对区域电网功角稳定性的影响。

将储能电站接在母线 3 处,以 5% 为间隔逐步增大储能的渗透率,则不同储能渗透率下区域电网受扰动最严重机组的功角曲线如图 3 所示。由图可知,随着储能渗透率的增大,电网发生故障后受扰动最严重机组的功角曲线头摆幅值呈现减小的趋势,即当系统发生故障时,储能电站能够迅速响应,改善电网的功角稳定性,且储能渗透率越大,对电网功角稳定性的改善作用越强。

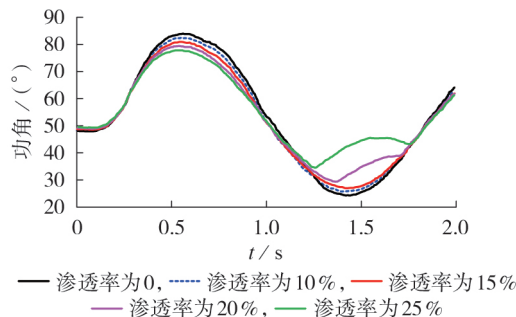


图 3 不同储能渗透率下受扰动最严重机组的功角曲线

Fig.3 Power angle curves of most disturbed unit under different energy storage permeability

2) 储能电站接入位置对区域电网功角稳定性的影响。

以储能渗透率为 25%,储能电站并入电网 35 kV 电压等级母线为例,分别将储能电站接入母线 3、5、12 处,电网受扰动最严重机组的功角曲线如图 4 所示。图 4 的仿真结果与理论分析结果一致,储能电站接入电网的位置距离发电机越近,则对区域电网功角稳定性的提升效果越好。

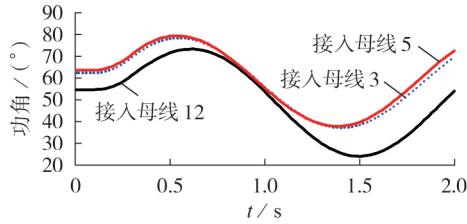


图4 不同储能电站接入位置下受扰动最严重机组的功角曲线

Fig.4 Power angle curves of most disturbed unit under different access locations of energy storage station

2 储能电站选址定容双层优化模型

为了缓解跨传输断面调峰互济的压力,同时提升区域电网的功角稳定性,基于储能建设运行综合经济性指标和功角稳定性相关指标建立储能电站选址定容双层优化模型。该双层模型的架构图见附录B图B1,具体描述如下。

1)上层以储能电站建设运行综合收益最大为优化目标,以储能电站配置总容量为决策变量,建立定容优化模型,并将上层的优化结果作为约束条件传递到下层,其中初始上层计算网损为未建设储能电站时的区域电网总有功网损。

2)下层以储能电站参与系统调度运行期间系统总网损最小、储能电站提升区域电网功角稳定性能力最大为优化目标,以储能电站的配置地点与各调度时段储能电站功率的送/受端分配量为决策变量,建立多目标选址和总容量分配优化模型。在建立下层模型时,根据上层的优化结果确定储能电站各调度时段系统的网络拓扑,将上层确定的储能电站配置总容量作为约束条件之一。下层模型优化结束后,将下层的优化结果传递给上层,更新上层模型的目标函数和适应度。

2.1 上层优化模型

2.1.1 上层目标函数

上层优化模型综合考虑储能电站的运行收益和建设运行成本,以规划运行期间储能电站综合收益 f_1 最大为优化目标,如式(7)所示。

$$\max f_1 = C_{\text{ear}} - C_{\text{ess}} \quad (7)$$

式中: C_{ear} 为储能电站的年净收益; C_{ess} 为储能电站的建设运行成本。

1)储能电站的建设运行成本 C_{ess} 的计算公式为^[18]:

$$C_{\text{ess}} = (1 + R_{\text{om}}) \sum_{k=1}^{N_{\text{ess}}} C_{\text{ess},k} \quad (8)$$

$$C_{\text{ess},k} = \frac{\eta(1+\eta)h_{\text{ess}}}{(1+\eta)h_{\text{ess}} - 1} (c_p P_{\text{ess},k}^{\text{rated}} + c_e S_{\text{ess},k}^{\text{rated}}) \quad (9)$$

式中: R_{om} 为运行成本系数; N_{ess} 为储能电站的总数量; $C_{\text{ess},k}$ 为储能电站 k 的建设成本; η 为利率; h_{ess} 为

储能电站的寿命周期; c_p 、 c_e 分别为储能电站的功率成本、容量成本; $P_{\text{ess},k}^{\text{rated}}$ 、 $S_{\text{ess},k}^{\text{rated}}$ 分别为储能电站 k 的额定功率、额定容量。

2)关于储能电站的年净收益 C_{ear} ,本文主要考虑储能电站的年调峰辅助服务收益 C_{ps} ^[19]、年网损收益 C_{loss} ^[20],如式(10)所示。

$$C_{\text{ear}} = C_{\text{ps}} + C_{\text{loss}} \quad (10)$$

$$C_{\text{ps}} = \sum_{d=1}^{365} P_{\text{ps},d} E_{\text{ps},d} \quad (11)$$

$$C_{\text{loss}} = C_{\text{ploss1}} - C_{\text{ploss2}} \quad (12)$$

$$C_{\text{ploss1}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{T_d} c_{h,d}(t) \left(\sum_{b=1}^B P_{\text{loss},b}(t) \Delta t \right) \quad (13)$$

$$C_{\text{ploss2}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{T_d} c_{h,d}(t) \left(\sum_{b=1}^B P_{\text{loss},b}^{\text{ess}}(t) \Delta t \right) \quad (14)$$

式中: $P_{\text{ps},d}$ 为第 d 天储能电站的调峰电价,单位为元/(MW·h); $E_{\text{ps},d}$ 为第 d 天储能电站的调峰电量; C_{ploss1} 、 C_{ploss2} 分别为建设储能电站前、后线路的网损费用; $c_{h,d}(t)$ 为第 d 天时段 t 的电价; Δt 为单位时段间隔; T_d 为储能参与调度的总时段数; B 为电网支路数; $P_{\text{loss},b}(t)$ 、 $P_{\text{loss},b}^{\text{ess}}(t)$ 分别为建设储能电站前、后时段 t 第 b 条支路的有功损耗。

2.1.2 上层约束条件

上层优化模型的约束约束包括功率平衡约束、节点电压约束、储能电站荷电状态约束、储能电站能量平衡约束、储能电站容量/功率约束等,具体表达式见附录B式(B1)—(B5)。

2.2 下层优化模型

合理的储能电站配置能够减小系统网损,还可以提升区域电网的功角稳定性。本文在下层储能电站总容量分配与选址优化中,提出储能电站调节区域电网功角稳定性能力评价指标,并结合储能电站调度时间内的系统总网损,建立下层多目标优化模型,在最小化系统网损的基础上,最大限度地提升区域电网的功角稳定性。

2.2.1 网损指标

网损指标 P'_{loss} 可表示为:

$$P'_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{T_d} P_{\text{loss},t} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{loss},t}$ 为时段 t 系统的有功网损。

2.2.2 储能电站调节区域电网功角稳定性能力评价指标

由第1章的分析可知,储能电站可以通过快速的有功功率调节调整同步发电机的电磁功率,进而抑制区域电网受扰动后机组的功角振荡头摆幅,提升区域电网的功角稳定性。基于此,本文通过对比原电网与配置储能电站后扰动过程中功角的摆动幅度,提出一种储能电站调节区域电网功角稳定性

能力评价指标 γ_δ ,如式(16)所示,其可以量化调度日内储能电站对区域电网功角稳定性的综合调节能力。

$$\gamma_\delta = \sum_{t=1}^{T_d} \frac{\gamma_{\delta t} - \gamma_{\delta t_{\text{ess}}}}{\gamma_{\delta t}} \times 100\% \quad (16)$$

$$\gamma_{\delta t} = \delta_{ij\text{max}} - \delta_{ij\text{min}} \quad (17)$$

$$\gamma_{\delta t_{\text{ess}}} = \delta_{t_{\text{ess}}j\text{max}} - \delta_{t_{\text{ess}}j\text{min}} \quad (18)$$

式中: $\gamma_{\delta t}$ 为未配置储能电站时时段 t 系统的最大功角差; $\gamma_{\delta t_{\text{ess}}}$ 为配置储能电站时时段 t 系统的最大功角差; $\delta_{ij\text{max}}$ 、 $\delta_{ij\text{min}}$ 分别为未配置储能电站时时段 t 系统遭遇故障后受扰动最严重机组 i 与机组 j 之间相对功角曲线的峰、谷值; $\delta_{t_{\text{ess}}j\text{max}}$ 、 $\delta_{t_{\text{ess}}j\text{min}}$ 分别为配置储能电站时时段 t 系统遭遇故障后受扰动最严重机组 i 与机组 j 之间相对功角曲线的峰、谷值。 γ_δ 值越大,储能电站调节区域电网功角稳定性的能力越强。

2.2.3 下层目标函数

本文定义的储能电站调节功角稳定性能力评价指标为最大化问题,在多目标问题优化中,应将其转化为最小化问题,如式(19)所示。

$$\gamma_{\delta c} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1 + \gamma_\delta} & \gamma_\delta \geq 0 \\ \gamma_\delta & \gamma_\delta < 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\gamma_{\delta c}$ 为 γ_δ 经过最小化处理后的值。 $\gamma_{\delta c}$ 值越小,储能电站调节区域电网功角稳定性的能力越强。

综合考虑系统网损、储能电站调节区域电网功角稳定性能力,下层的多目标优化函数 f_2 为:

$$f_2 = \min \{ P'_{\text{loss}}, \gamma_{\delta c} \} \quad (20)$$

2.2.4 下层约束条件

在约束条件式(B1)~(B5)的基础上,还应将上层优化所得储能电站配置总容量作为下层优化模型的约束条件,即:

$$\sum_{m=1}^M S_{\text{ess},m} = \sum_{k=1}^{N_{\text{ess}}} S_{\text{ess},k}^{\text{rated}} \quad (21)$$

式中: $S_{\text{ess},m}$ 为储能电站 m 的配置容量; M 为下层模型中储能电站的安装数量; $\sum_{k=1}^{N_{\text{ess}}} S_{\text{ess},k}^{\text{rated}}$ 为上层优化所得储能电站配置总容量。

2.3 模型的求解方法

关于储能电站选址定容双层优化模型的求解,上层模型采用遗传算法进行求解,记录迭代过程中最优个体对应的最优储能电站配置总容量与储能参与调度各时段的网络拓扑和相应的储能配置总功率,并将其传递至下层。初始上层计算区域电网总有功网损为未配备储能电站时的区域电网总有功网损。下层模型采用IMOABC算法进行求解,以上层传递的网络拓扑为基础,以最优决策变量为约束条件之一,基于PSD-BPA软件仿真得到各调度时段下

层种群个体对应的区域电网有功网损指标与区域电网功角稳定性量化指标,以此为多目标进行下层模型的寻优,计算得到储能电站的最优选址与总容量分配方案,并将下层的最优区域电网总有功网损指标反馈至上层目标函数中,更新上层模型的目标函数和适应度值。

储能电站选址定容双层优化模型的求解流程图见附录B图B2。

3 求解算法

上层模型采用遗传算法进行求解,以快速得到储能电站的配置总容量。针对下层模型的多目标问题,由于问题规模较大且目标函数高度相关,采用具有较强搜索能力与较快收敛速度的IMOABC算法进行求解。

3.1 IMOABC算法

MOABC算法在求解过程中存在以下问题:①多目标问题因为存在多个目标函数,观察蜂基于单一准则进行优质解的判断,会使解集分布性能与收敛性能较差;②种群多样性损失较快,易陷入局部最优解。为了提高算法性能,结合储能选址与总容量分配问题,在MOABC算法的基础上进行了如下改进。

1)结合储能选址与总容量分配问题的大规模特性,在种群个体选择更新维度的策略中引入维度参数自适应调整方法,使算法前期种群个体选择更新储能接入位置维度的概率增大,后期选择更新储能总容量分配维度的概率增大。该改进能够加快算法的搜索速度,扩大算法的搜索空间,增强算法优化所得最优解集分布的广泛性。

2)针对种群分布性差、收敛性不足的问题,在MOABC算法对优质解进一步开发的过程中,加入基于支配关系和拥挤距离的概率选择进行改进,将非支配解被选择的概率限制在(50%, 100%]内,支配解被选择的概率限制在[0, 50%]内,且距优质解越近,则被选择的概率越高,这样既合理考虑了非支配解的优异性,又提高了优质解的搜索概率。该改进能够加快算法的搜索速度,提高算法的搜索精度,同时提升算法优化所得最优解集分布的广泛性和均匀性。

3)针对MOABC算法易陷入局部最优解的问题,在更新优质解时,利用Logistic混沌映射优化局部搜索空间。该改进使算法能够跳出局部最优解,同时提高了算法的搜索精度,扩大了算法的搜索范围。

3.2 基于信息熵的TOPSIS法的多属性决策

为了避免决策者自身对最终决策的影响,本文采用基于信息熵的逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solu-

tion, TOPSIS)^[21]选取 Pareto 非支配解集中的最优解。

3.3 IMOABC 算法的求解流程

本文通过 PSD-BPA 软件进行仿真, 获得系统发生故障时的参数, 基于 MATLAB 平台编写 IMOABC 算法程序。基于 IMOABC 算法求解储能电站选址和总容量分配模型的具体过程见附录 C。

4 算例分析

4.1 算例系统说明

以某区域电网为实际算例进行仿真分析, 基于 PSD-BPA 潮流分析程序搭建仿真系统的网络拓扑, 光伏电站、火电机组、储能电站模型以及系统故障基于 PSD-BPA 暂态稳定程序实现。基于 PSD-BPA 软件仿真获得储能电站不同选址定容方案下的区域电网有功网损与功角稳定性量化结果。基于 MATLAB 平台编写双层优化模型的求解算法, 并在 MATLAB 平台中设计调用 PSD-BPA 程序仿真结果和修改 PSD-BPA 程序相关参数的程序, 实现本文所提基于功角稳定性的储能选址定容双层优模型的求解。

区域电网的拓扑见附录 D 图 D1。光伏电站、常规火电机组分布情况以及储能电站的相关参数见附录 D 表 D1 和表 D2。光伏电站的日特性曲线与日负荷特性曲线分别见附录 D 图 D2 和图 D3。峰谷电价^[22]见附录 D 表 D3。

根据系统的日负荷特性曲线及光伏数据, 在仿真中设定储能电站的调度策略为: 储能电池在 12:00—15:00 时段充电, 在 19:00—22:00 时段放电, 在其余时段不与系统发生能量交换。故障设置为: 0.1 s 时传输断面节点 10 与节点 11 之间发生三相短路故障, 0.2 s 时两侧三相断路器同时断开。储能电站对区域电网功角稳定性调节能力指标的计算周期为 1.5 s。

4.2 仿真场景设计

为了验证本文所建模型的优越性, 设定以下 2 种场景进行对比分析: ①场景 1, 只考虑经济性, 下层选址与总容量分配模型以区域电网有功总网损最小为单目标进行优化; ②场景 2, 同时考虑经济性与区域电网功角稳定性, 下层选址与总容量分配模型以储能电站调节区域电网功角稳定性能力最大和区域电网有功总网损最小为多目标进行优化。2 种场景下储能电站的优化配置结果如表 1 所示。

4.3 仿真结果分析

4.3.1 调峰能力分析

以场景 2 为例分析配置储能电站后系统的调峰能力。定义配置储能电站前系统净负荷为原始负荷与光伏出力之差, 配置储能电站后系统净负荷为原始负荷与光伏和储能总出力之差。配置储能电站前、后系统的净负荷曲线如图 5 所示。由图可知, 配

表 1 2 种场景下储能电站的优化配置结果

Table 1 Optimal configuration results of energy storage stations under two scenarios

场景	储能电站接入节点	储能配置容量 / (MW·h)	储能配置功率 / MW	总有功网损 / MW	f_1 / 万元	γ_8 / %
1	1	91.88	57	140.88	1478.7	9.582
	11	46.06	17			
2	7	108	66	141.23	1446.4	20.548
	17	29	20			

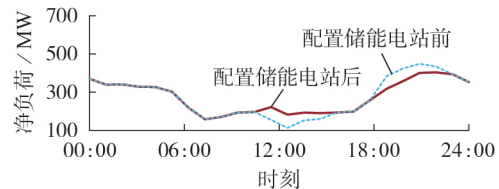


图 5 配置储能电站前、后系统的净负荷曲线

Fig.5 Net load curves of system before and after configuration of energy storage station

置储能电站后, 系统净负荷的最大峰谷差由 335 MW 减小为 221 MW, 且区域电网的净负荷曲线更加平滑, 这更有利于机组调峰。

4.3.2 储能电站配置对区域电网功角稳定性的影响分析

由第 1 章的分析可知, 区域电网的功角稳定性可表征为区域电网受扰动最严重机组相对功角振荡曲线头摆幅值。不同的场景下区域电网受扰动最严重机组的相对功角振荡曲线头摆幅值如图 6 所示。结合表 1 和图 6 可知: 在场景 1 下, 储能在 19:00、20:00 时刻放电, 会降低区域电网的功角稳定性, 其余时刻的区域电网功角稳定性均得到提升, 日内总体将区域电网功角稳定性提升了 9.582%, 虽然场景 1 的目标函数中未考虑功角稳定性指标, 但根据经济性指标配置储能电站也能间接地提高区域电网功角稳定性; 场景 2 同时考虑经济性指标与储能电站调节区

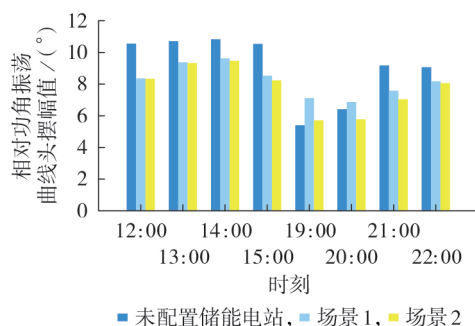


图 6 区域电网受扰动最严重机组的相对功角振荡曲线头摆幅值

Fig.6 Head swing amplitude of relative power angle oscillation curve for most disturbed unit in regional power grid

域电网功角稳定性能力进行储能电站的选址与容量分配,储能在 19:00 时刻放电,会降低区域电网的功角稳定性,其余时刻是区域电网功角稳定性均得到提升,日内总体将区域电网功角稳定性提升了 20.548%,且相较于场景 1,场景 2 下储能电站的综合收益仅降低了 2.18%,总有功网损增大了 0.4%,但总体区域电网功角稳定性提升了 10.966%,提升效果显著。

上述结果表明,在进行储能电站选址定容优化配置时,引入储能调节区域电网功角稳定性能力评价指标,能够在几乎不损失经济性的情况下,大幅度提升区域电网的功角稳定性。

4.3.3 布局分析

通过仿真可知,在储能参与调度期间,当区域电网传输断面节点 10 与节点 11 之间发生三相短路故障时,系统受扰动最严重机组的接入节点为节点 9—16,场景 2 中送端电网储能电站配置于节点 7 处,场景 1 中送端电网储能电站配置于节点 1 处,场景 2 中送端电网储能电站的接入位置距离受扰动最严重机组更近,故场景 2 中机组功角恢复稳定的速度更快。

场景 2 中受端电网储能电站配置于节点 17 处,场景 1 中受端电网储能电站配置于节点 11 处。节点 11 较负荷中心的距离更近,此处配置储能电站更有利于降低区域电网的网损,提升储能电站的运行经济性;节点 17 距离受扰动最严重机组更近,此处配置储能电站更有利于抑制机组功角振荡,提升区域电网功角稳定性。

不同场景下传输断面的传输功率如图 7 所示。由图可知,相较于场景 1,场景 2 下传输断面的最大传输功率较小,输电通道裕度更大。上述结果验证了本文所提储能选址定容双层优模型具有更好的合理性。

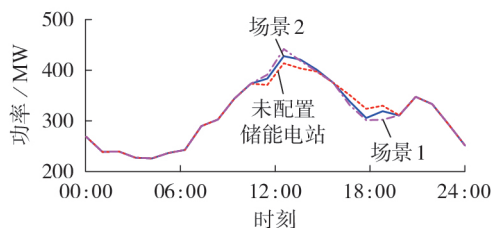


图 7 不同场景下传输断面的传输功率
Fig.7 Transmission power of transmission section under different scenarios

4.4 算法性能分析

本节采用外部解分析法与 S 指标评价 MOABC 算法和 IMOABC 算法的性能^[23]。

1) 外部解为 Pareto 前沿中某一目标分量最优的解,通过比较迭代过程中某一目标分量的变化过程及

最终代的值,可以看出算法的收敛性与鲁棒性。

2) S 指标用来衡量解集中点的分布情况,S 指标越小,表示解集分布越均匀,其定义式见式(22)。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \sum_{i=1}^{N_p} (\bar{d}_n - d_{ni})^2} \quad (22)$$

$$d_{ni} = \min \left\{ \sum_{m=1}^{M'} \frac{|f_m(i) - f_m(j)|}{f_{m\max} - f_{m\min}} \right\} \quad i, j = 1, 2, \dots, N_p \quad (23)$$

式中: N_p 为种群规模; d_{ni} 为种群 i 的邻居向量距离; \bar{d}_n 为所有 d_{ni} 的平均数; M' 为目标分量数量; $f_m(i)$ 、 $f_m(j)$ 分别为种群 i 、 j 的第 m 个目标分量值; $f_{m\max}$ 、 $f_{m\min}$ 分别为第 m 个目标分量的最大值、最小值。

为了比较 MOABC 算法与 IMOABC 算法的性能,验证 IMOABC 算法的改进效果,以网损指标 P'_{loss} 与储能电站调节区域电网功角稳定性能力评价指标 γ_δ 为对象进行分析,2 种算法的最终代外部解、S 指标如表 2 所示,收敛曲线如图 8 所示。

表 2 2 种算法的性能比较

Table 2 Performance comparison between two algorithms

算法	$P'_{\text{loss}} / \text{MW}$	$\gamma_\delta / \%$	S 指标
MOABC	141.725	17.480	0.1678
IMOABC	141.230	20.548	0.0872

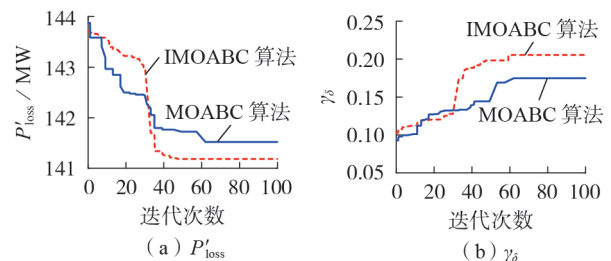


图 8 外部解的收敛曲线

Fig.8 Convergence curves of external solutions

结合表 2 和图 8 可以看出:IMOABC 算法的外部解 P'_{loss} 和 γ_δ 的收敛精度更优、收敛速度更快,这表明自适应维度的选择与基于支配关系和拥挤距离的概率选择使得 IMOABC 算法具有更好的收敛性能;IMOABC 算法的 S 指标小于 MOABC 算法的 S 指标,这表明 IMOABC 算法得到的最优 Pareto 解集具有更好的分布性。

5 结论

为了在兼顾经济性与区域电网输电能力的前提下,充分利用储能电站对区域电网功角稳定性的调节能力,本文建立了考虑功角稳定性的储能选址定容双层优化模型,并给出了模型的求解方法,上层采用遗传算法进行求解,下层采用 IMOABC 算法进行求解。以某实际电网为仿真算例验证所提双层模型

的有效性以及所提IMOABC算法的适用性。所得主要结论如下。

1)从经济性角度来看,接入储能电站能够有效缓解跨传输断面调峰互济的压力,且合理配置储能容量能够降低系统网损,提高系统运行经济性。

2)从系统稳定性角度来看,利用储能的快速有功调节能力,能够抑制功率振荡,提升系统的阻尼特性以及区域电网的功角稳定性。

3)不同场景的仿真结果表明:仅以经济性指标为目标进行储能选址定容优化时,日内总体将区域电网功角稳定性提升了9.582%,虽然目标函数中未考虑功角稳定性指标,但根据经济性目标配置的储能电站也能间接起到提高系统暂态稳定性的作用;而引入储能电站调节区域电网功角稳定性能力评价指标后,在经济性仅降低2.18%的情况下,日内总体将区域电网功角稳定性提升了20.548%,相较于仅以经济性指标为目标进行储能选址定容优化,同时考虑经济性指标和功角稳定性指标可将区域电网功角稳定性能力提升10.966%,提升效果显著。

4)本文所提IMOABC算法用于求解储能电站选址与总容量分配优化问题时具有很好的适用性。本文针对MOABC算法的改进使其具有更好的收敛性与鲁棒性,同时,IMOABC算法的搜索精度、所得最优Pareto解集的多样性与分布性也更好。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [2] 李红霞,李建林,米阳. 新能源侧储能优化配置技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(10):3257-3267.
LI Hongxia, LI Jianlin, MI Yang. Summary of research on new energy side energy storage optimization configuration technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3257-3267.
- [3] 陈厚合,刘丽娜,姜涛,等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. 电网技术,2018,42(7):2127-2135.
CHEN Houhe, LIU Lina, JIANG Tao, et al. Optimal economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2127-2135.
- [4] 王一飞,董新伟,杨飞,等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电,2020,49(8):126-133.
WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126-133.
- [5] 刘书琪,顾洁,赖柏希,等. 考虑负荷裕度的区域综合能源系统储能双层优化配置[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):150-158.
LIU Shuqi, GU Jie, LAI Boxi, et al. Bi-level optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering load margin[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 150-158.
- [6] 王森,李凤婷,张高航,等. 面向新能源高渗透系统调峰和调频的系统级储能容量需求分析[J/OL]. 电力自动化设备. (2023-05-29)[2023-09-18]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202304005>.
- [7] 孙培栋,李培强,曹鹏程,等. 基于扩展等面积定则的储能电站提高电网暂态稳定最优工作时间的研究[J]. 电工技术学报,2020,35(19):3996-4008.
SUN Peidong, LI Peiqiang, CAO Pengcheng, et al. The optimal working time of battery storage power station improving power grid transient stability based on extended equal area criteria rule[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 3996-4008.
- [8] 李培强,孙培栋,李欣然,等. 基于临界割集识别的储能系统提高电网暂态稳定裕度的研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):6916-6927.
LI Peiqiang, SUN Peidong, LI Xinran, et al. Study on improving transient stability margin of power grid by energy storage system based on critical-cutset identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6916-6927.
- [9] 程维杰,张仕鹏,任学哲. 大容量储能对电力系统小干扰稳定的影响[J]. 电力科学与工程,2021,37(9):35-43.
CHENG Weijie, ZHANG Shipeng, REN Xuezhe. Research on the impact of large capacity BESS on small signal stability of power system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(9): 35-43.
- [10] 吴琛,刘晨曦,黄伟,等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(12):130-136.
WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 130-136.
- [11] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2533-2543.
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [12] 汪颖,周原,张姝,等. 面向配电网电压暂降治理的线路改造优化模型[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):9-23.
WANG Ying, ZHOU Yuan, ZHANG Shu, et al. Optimization model of line reconstruction for voltage sag governance of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 9-23.
- [13] 蒋伟,陈照光. 基于改进的人工蜂群算法的微电网储能系统容量优化配置[J]. 上海电力大学学报,2021,37(5):415-421,427.
JIANG Wei, CHEN Zhaoguang. Optimization of microgrid energy storage system capacity based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(5): 415-421, 427.
- [14] 王子琪. 含风光区域电网的储能选址定容及能量管理研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
WANG Ziqi. Research on the location and capacity of energy storage and energy management of regional power grid with wind and solar energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:185-191.
- [16] 熊连松,修连成,王慧敏,等. 储能系统抑制电网功率振荡的机

- 理研究[J]. 电工技术学报,2019,34(20):4373-4380.
XIONG Liansong, XIU Liancheng, WANG Huimin, et al. Mechanism of energy storage system to suppress grid power oscillations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019, 34(20):4373-4380.
- [17] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等. 提高互联电网暂态稳定性的大规模电池储能系统并网控制策略及应用[J]. 电网技术,2013,37(2):327-333.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Grid-integration control strategy of large-scale battery energy storage system and its application to improve transient stability of interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2):327-333.
- [18] 方朝雄,吴晓升,江岳文. 考虑暂态稳定性的网储多目标双层优化[J]. 电力建设,2020,41(7):58-66.
FANG Chaoxiong, WU Xiaosheng, JIANG Yuewen. Research on multi-objective Bi-level optimization of network-storage considering transient stability [J]. Electric Power Construction, 2020,41(7):58-66.
- [19] 中关村储能产业技术联盟. 电力储能项目经济评价导则: T/CNESA 1101—2022[S]. [S.l.]:中关村储能产业技术联盟, 2022.
- [20] 王丽娜. 基于改进粒子群算法的储能系统优化配置研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.
WANG Lina. Research on optimal configuration of energy storage system based on improved PSO [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2021.
- [21] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术,2014,38(12):3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer [J]. Power System Technology, 2014, 38(12):3405-3411.
- [22] 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省发展和改革委员会关于进一步完善我省分时电价机制的通知[EB/OL]. (2021-12-16) [2023-09-18]. https://zwfw.gansu.gov.cn/lanzhouxinqu/tsfw/xwqyhgtgsh/zct/sjzc/art/2022/art_04f8a26d30674a77a1707e3719b6d06b.html.
- [23] 王丽萍,任宇,邱启仓,等. 多目标进化算法性能评价指标研究综述[J]. 计算机学报,2021,44(8):1590-1619.
WANG Liping, REN Yu, QIU Qicang, et al. Survey on performance indicators for multi-objective evolutionary algorithms [J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(8):1590-1619.

作者简介:

程浩(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定运行分析与控制、新能源电力系统规划与运行等(**E-mail**:ch15735103071@163.com);

秦文萍(1972—),女,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统可靠性/稳定性分析、新能源电力系统稳定运行与控制、电力电子化电力系统分析等(**E-mail**:qinwenping@tyut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Site selection and capacity determination method of energy storage in regional power grid based on power angle stability

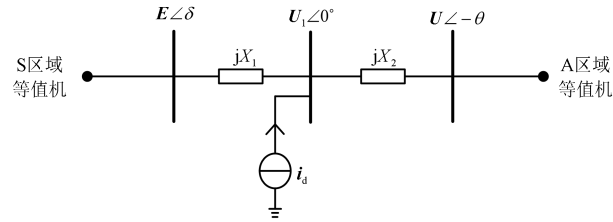
CHENG Hao, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, JING Xiang, ZHU Zhilong, LU Ruipeng

(Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

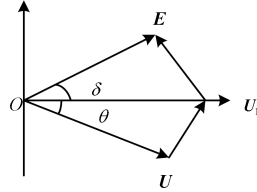
Abstract: In order to alleviate the peak shaving pressure across the transmission sections and improve the power angle stability of the power grid, a two-layer site selection and capacity determination optimization model of energy storage considering both economy and power angle stability is established, and the solution method of the model is given. The upper model considers the operation economy of the regional power grid and takes the maximum benefit of the energy storage station as the optimization objective to determine the total configuration capacity of the energy storage. The lower model considers the power angle stability of the regional power grid and takes the minimum total network loss during the energy storage dispatch period and the maximum power angle stability ability of the energy storage regulation regional power grid as the optimization objectives to carry out the site selection and total capacity allocation of energy storage. The upper layer of the two-layer model is solved by using genetic algorithm and the lower layer is solved by using improved multi-objective artificial bee colony algorithm. An actual power grid is taken as an example for simulation verification. The results show that energy storage configuration based on the proposed two-layer optimization model can improve the power angle stability of regional power grid while ensuring economy.

Key words: energy storage; bi-level programming; site selection and capacity determination; power angle stability; improved multi-objective artificial bee colony algorithm

附录 A



(a) 储能接入双机等值机群简化模型



(b) 电压相量图

图 A1 储能接入双机等值机群的简化模型及电压相量图

Fig.A1 Simplified model and voltage vector diagram of energy storage access to dual-machine equivalent cluster

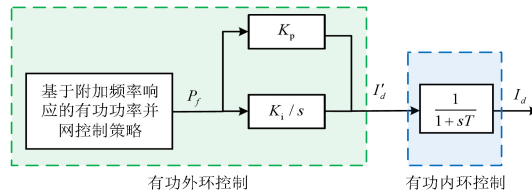


图 A2 换流器的有功控制策略

Fig.A2 Active power control strategy of converter

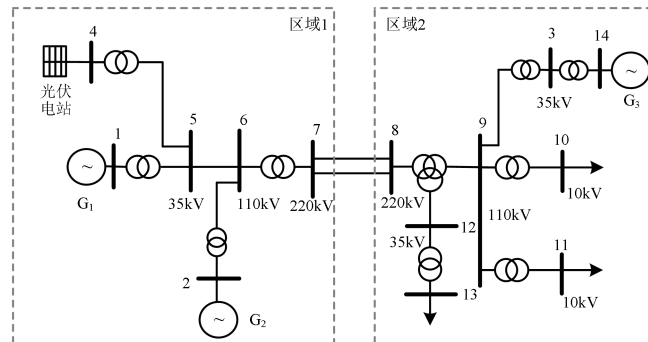


图 A3 含光伏电站并网的四机两区域电网

Fig.A3 Four-machine two-region power grid with grid-connected photovoltaic power station

表 A1 发电机参数

Table A1 Parameters of generators

参数	取值		
	G ₁	G ₂	G ₃
直轴同步电抗 X_d (pu)	2.16	1.633	0.904
直轴暂态电抗 X_d' (pu)	0.265	0.197	0.358
直轴次暂态电抗 X_d'' (pu)	0.205	0.148	0.252
交轴同步电抗 X_q (pu)	2.16	1.633	0.640
交轴次暂态电抗 X_q' (pu)	0.205	0.148	0.252
惯性时间常数 T_j /s	8.02	2.62	7.692
额定容量 S_n /(MV·A)	443	652	6520
额定功率 P_n /MW	300	600	6000

附录 B

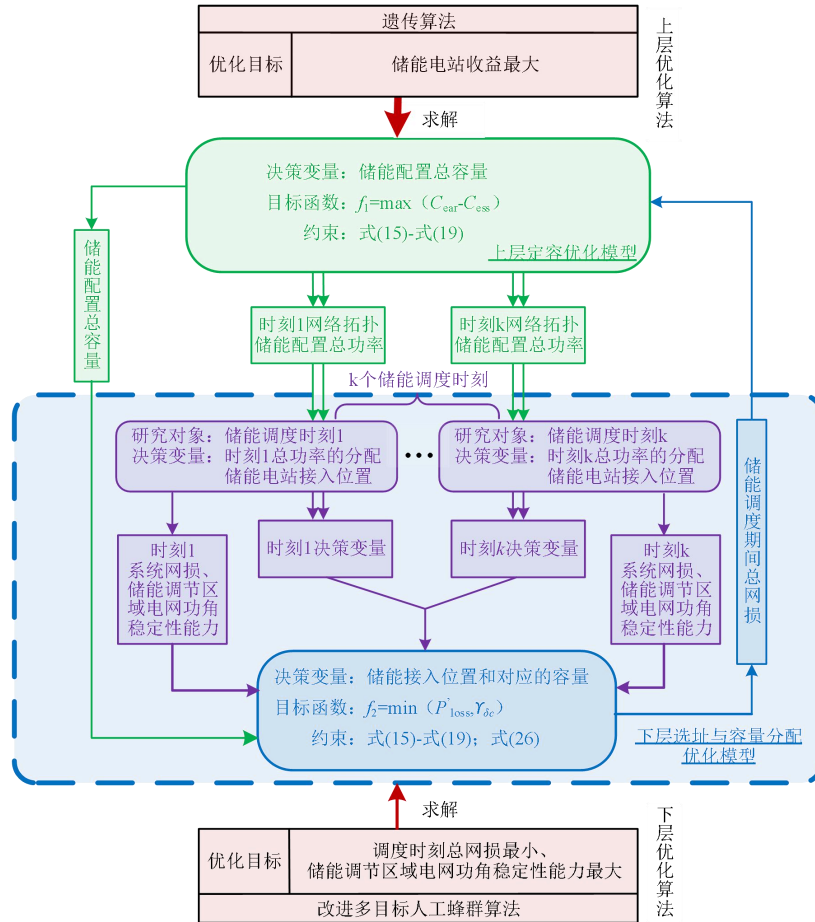


图 B1 储能电站选址定容双层优化模型架构

Fig.B1 Two-layer optimization model architecture for energy storage location selection and capacity determination

上层优化模型约束条件。

1) 功率平衡约束。

负荷、储能和光伏电站协同参与区域电网运行，需要满足任意时刻的功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} P_{\text{load},i} - \sum_{j=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG},j} - \sum_{k=1}^{N_{\text{ess}}} P_{\text{ess},k} - \sum_{l=1}^{N_{\text{G}}} P_{\text{G},l} = 0 \quad (\text{B1})$$

式中： $P_{\text{load},i}$ 为某一时刻 i 节点的负荷功率； $P_{\text{DG},j}$ 为某一时刻光伏电站 j 的出力； $P_{\text{ess},k}$ 为某一时刻储能 k 的出力； $P_{\text{G},l}$ 为某一时刻火电机组 l 的出力。

2) 节点电压约束。

$$V_{\min} \leq V_{ij} \leq V_{\max} \quad (\text{B2})$$

式中： V_{\min} 、 V_{\max} 分别为系统节点电压下限和上限。

3) 储能运行荷电状态约束。

$$S_{\text{OCmin}} \leq S_{\text{OC}}(t) \leq S_{\text{OCmax}} \quad (\text{B3})$$

式中： S_{OCmin} 、 S_{OCmax} 分别为储能电池所允许的最大和最小荷电状态。

4) 储能任意时刻满足能量平衡约束。

储能不管是处于充电还是放电状态，其本身的总容量需要保持平衡^[B1]。

$$S_{\text{ess}} = S_{\text{ess}}(t-1) - \frac{P_{\text{ess},d}(t)\Delta t}{\eta_d} + P_{\text{ess},c}(t)\Delta t \eta_c \quad (\text{B4})$$

式中： $S_{\text{ess}}(t)$ 为储能在 t 时刻的剩余容量； η_c 为储能的充电效率； η_d 为储能的放电效率； $P_{\text{ess},c}(t)$ 、 $P_{\text{ess},d}(t)$

分别为 t 时段内储能的充电功率和放电功率。

5) 储能容量/功率约束。

$$\begin{aligned} J_{ess,k} &\in \gamma_{sce} \\ S_{ess,k}^{\min} &\leq S_{ess,k}^{rated} \leq S_{ess,k}^{\max} \\ P_{ess,k}^{\min} &\leq P_{ess,k}^{rated} \leq P_{ess,k}^{\max} \end{aligned} \quad (B5)$$

式中： $J_{ess,k}$ 为储能 k 的接入节点， γ_{sce} 为储能待选接入节点集； $S_{ess,k}^{\max}$ 、 $S_{ess,k}^{\min}$ 分别为储能允许安装容量的上下限； $P_{ess,k}^{\max}$ 、 $P_{ess,k}^{\min}$ 分别为储能允许安装功率的上下限。

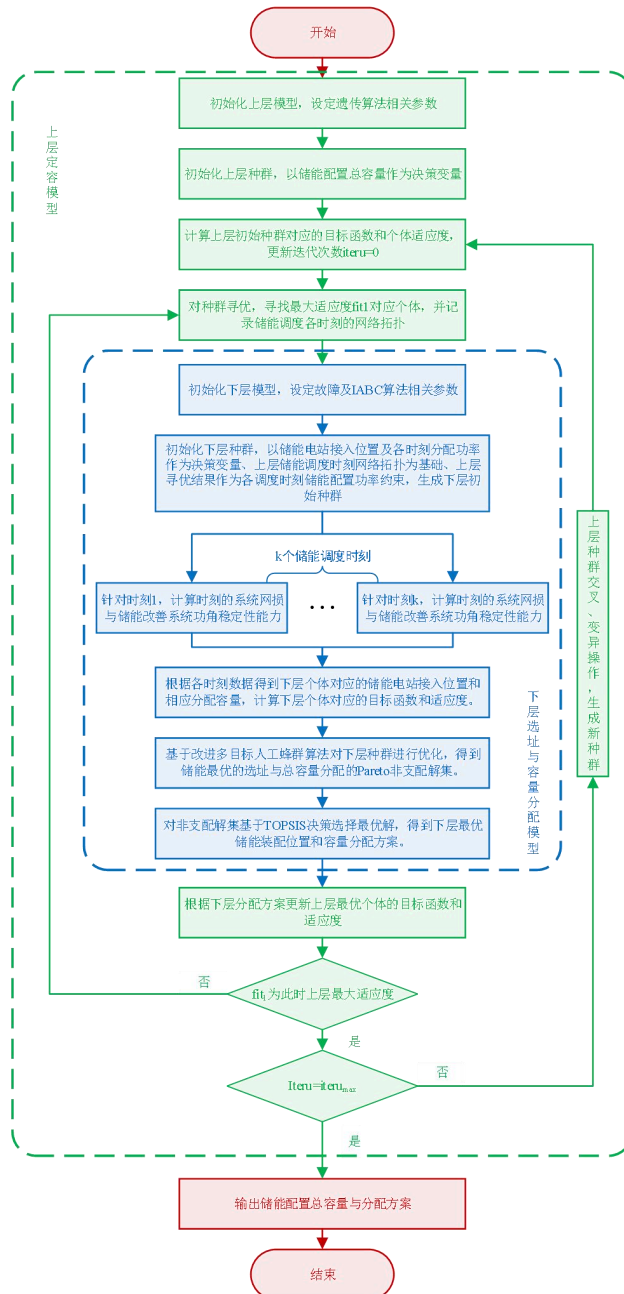


图 B2 储能选址定容优化配置求解流程图

Fig.B2 Flowchart of optimal configuration solution for energy storage site selection and constant capacity

参考文献：

[B1] 沈艳霞,陈杰,吴定会. 一种基于进化知识融合的多目标人工蜂群算法[J]. 控制与决策,2017,32(12):2176-2182.
 SHEN Yanxia,CHEN Jie,WU Dinghui. A multi-objective artificial bee colony based on evolutionary knowledge integrated[J]. Control and Decision,2017,32(12):2176-2182.

附录 C

MOABC 算法是一种通过群体合作完成目标优化的智能算法。算法模拟蜂群搜寻花蜜量最大的蜜源的过程，将蜂群进行了采蜜蜂、观察蜂和侦察蜂的分工，在整个搜寻过程中，3 个蜂种各司其职，且可以相互转化，不断循环直到找到最优解^[C1]。

常规的 MOABC 算法在求解过程中存在以下问题：①多目标问题因为存在多个目标函数，观察蜂基于单一准则进行优质解的判断，使得解集分布性能与收敛性能较差；②种群多样性损失较快，易陷入局部最优解。为了提高算法性能，结合储能选址与总容量分配问题，在 MOABC 算法基础上进行了如下改进。

1) 自适应维度选择。

在储能选址定容问题中，储能容量选择的维度空间远大于储能选址维度空间，随机选择维度的个体更新策略将减缓搜索速度，且易造成种群的多样性变少，故希望在算法前期增大选择储能选址维度的概率，在算法后期增大选择储能容量维度的概率，从而增加搜索的速度与种群的多样性。

在采蜜蜂更新个体的维度选择上，引入维度参数自适应调整的方法，算法选择储能容量维度概率计算如式(C1)所示，容量维度参数自适应权重曲线见图 C1。

$$P_{di} = 1 - a \frac{1}{1 + \lg i} \quad (C1)$$

式中： P_{di} 为第 i 次迭代时选择容量维度的概率； a 为概率修正因子，利用对数函数的特性，实现随着迭代次数的增加选择容量维度的概率逐渐增大。

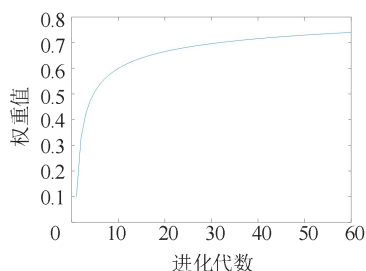


图 C1 容量维度参数自适应权重曲线
Fig.C1 Capacity dimension parameter adaptive weight curve

2) 基于支配关系和拥挤距离的概率选择。

结合支配关系和解的拥挤距离进行观察蜂跟随概率选择，改进后的概率计算公式为：

$$p_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + (1 - s_i) e^{\eta_1 d_i}} & S_i = 0 \\ \frac{1}{1 + s_i e^{-\eta_2 d_i}} & S_i = 1 \end{cases} \quad (C2)$$

式中： $S_i=1$ 时，表示第 i 个个体为非支配解， $S_i=0$ 时，表示第 i 个个体为支配解； η_1 、 η_2 为支配惩罚系数； d_i 为解的拥挤距离，其计算公式为：

$$d_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m [(f_i^k - f_i^{k-1})^2 + (f_i^k - f_i^{k+1})^2] \quad 1 < i < s \quad (C3)$$

式中： f_i^k 为第 i 个个体的第 k 个目标值， m 为目标数， s 为最优解集个数。

多目标优化中，拥挤距离用于描述解的均匀性。在 MOABC 算法中，采蜜蜂最优解集个体之间的拥挤距离越近，表征相关蜜源附近拥有优质蜜源的概率也越高。考虑非支配解的先天优势，式(C2)将支配解的选择概率限制在区间[0,0.5]，非支配解的选择概率限制在区间[0.5,1]，且解之间的拥挤距离越近，被选择的概率越高，个体进一步进化的概率越大。这样既合理考虑了非支配解的优越性，又能提高优质解的搜索概率，有利于同时提高解集的分布性能与收敛性能。

3) 混沌映射优化局部搜索空间。

MOABC 算法在搜索过程中易陷入局部最优解，采用 Logistic 混沌映射对最优解的局部空间进行优化。

当有观察蜂转化为采蜜蜂时，将其所对应的优质蜜源进行 Logistic 混沌映射，具体步骤参考文献[25]，从而产生此局部最优解的新增领域点，并将搜索到的蜜源与原蜜源依据 pareto 支配准则判断优劣，选择优质蜜源。此改进增加了算法的局部搜索能力，避免了 MOABC 算法陷入局部最优解的问题，同时增加了算法的搜索速度。

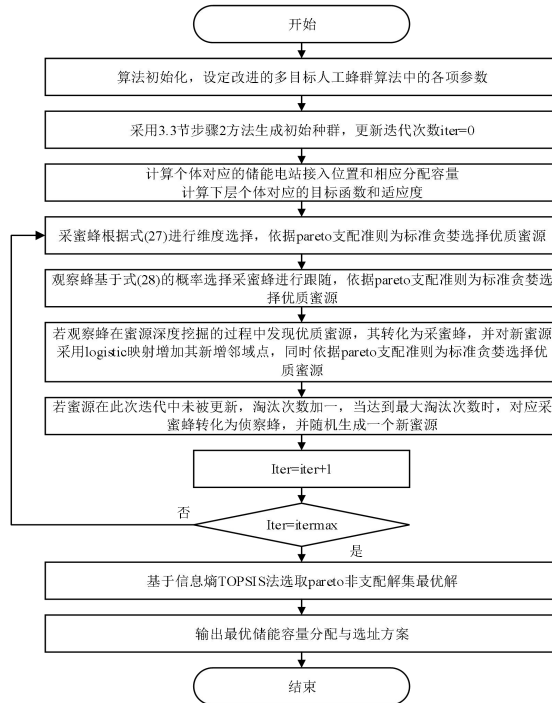


图 C2 IMOABC 算法流程图
Fig.C2 Flowchart of IMOABC algorithm

参考文献:

[C1] 盛四清,关皓闻,雷业涛,等. 基于混沌海鸥优化算法的含光伏发电系统负荷模型参数辨识[J]. 太阳能学报,2022,43(7):64-72.
SHENG Siqing,GUAN Haowen,LEI Yetao,et al. Parameter identification of load model of photovoltaic power generation system based on chaotic seagull optimization algorithm[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2022,43(7):64-72.

附录 D

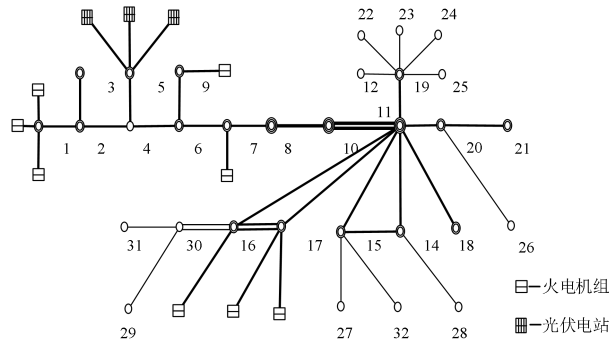


图 D1 某实际电网拓扑图

Fig.D1 Topology of an actual power grid

表 D1 区域电网光伏电站及常规火电机组具体分布情况

Table D1 Specific distribution of regional power grid photovoltaic power stations and conventional thermal power units

类型	光伏电站	常规火电机组
总安装数量	3	8
接入节点	5	1、7、9、16、17 (9 节点为平衡节点)
总装机总量	400MW	1137MW (9 节点装机容量为 337MW)

表 D2 储能电站相关参数

Table D2 Parameters of energy storage station

参数	数值
储能电站允许接入节点	节点 1—8、10—32
储能电站允许接入总个数	2
充电效率	0.9
放电效率	0.9
SOCmin	0.2
SOCmax	0.8
功率成本/(元·MW ⁻¹)	821100
容量成本/[元·(MW·h) ⁻¹]	1563800
运行成本系数	0.02
额定充放电时间/h	4
贴现率/%	7
寿命周期/a	10

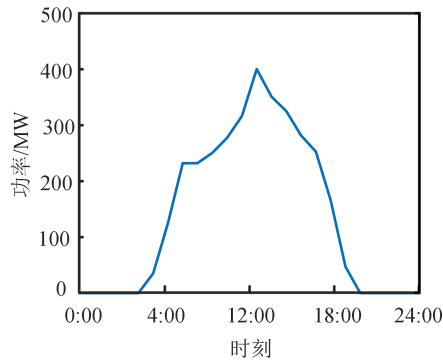


图 D2 典型日光伏出力曲线

Fig.D2 Photovoltaic output curve in typical day

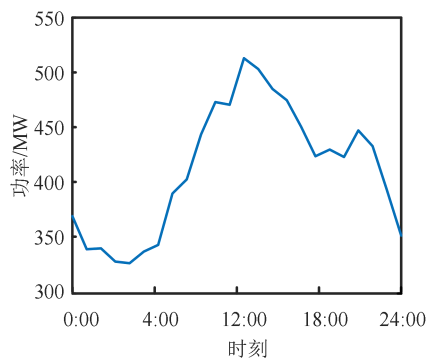


图 D3 典型日负荷特性曲线
Fig.D3 Typical daily load characteristic curve

表 D3 峰谷电价
Table D3 Peak-valley electricity price

	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰段	07:00—09:00、18:00—24:00	0.759
平段	00:00—02:00、04:00—07:00、 09:00—11:00、17:00—18:00	0.51
谷段	02:00—04:00、11:00—17:00	0.26