

面向储能电站调度的光储发电系统运行优化策略研究

张国玉¹, 洪超², 陈杜琳¹, 叶季蕾³

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 景德镇陶瓷大学, 江西 景德镇 333000;
3. 中国电力科学研究院南京分院, 江苏 南京 210003)

摘要:光储联合发电系统的优化调度策略是实现光储联合发电系统经济及安全运行的重要保障,然而传统的经济优化调度模型并未考虑电池储能电站内部电池的有效管理。本文提出了一种经济优化调度策略,依据储能系统各电池组性能参数和运行状态,以储能系统运行一天总成本最低为优化目标,以系统平衡、荷电状态、功率限值和调度循环为约束条件,建立了经济优化调度数学模型,并应用改进粒子群算法进行求解。最后,算例仿真结果验证了改进粒子群算法的优越性和优化调度策略在光储联合发电系统中应用的可行性。

关键词: 电池储能电站; 光储联合发电系统; 经济; 优化; 调度策略; 粒子群算法

中图分类号: TM731

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)03-0050-07

0 引言

光伏发电输出功率因受天气和地理条件的影响具有很大的波动性和随机性,给电网的稳定性和电能质量造成了很大影响。随着光伏发电在电网中容量比例的大幅增加,这种影响变得更加显著。将储能技术引入光伏系统,形成光储联合发电系统,可有效解决光伏发电并网问题,不仅可以平抑功率波动,满足光伏发电并网要求,而且可以提高光伏发电的电能质量,增强光伏发电并网运行的可靠性^[1-4]。目前,大容量储能技术主要有抽水蓄能、压缩空气储能、电池储能,相比抽水蓄能和压缩空气储能建设地理条件的局限性,电池储能电站不仅没有严苛的建设地理条件限制,而且循环寿命长,响应时间快,对生态环境影响较小,功率可双向流动,应用前景十分广阔。

目前,国内外学者主要致力于研究光储联合发电系统的运行控制策略和如何根据负荷需求进行有效优化调度。文献[5]将风光储微电网运行成本最少作为目标函数,计及功率平衡约束、荷电状态约束、发电容量约束,并考虑了微电网与大电网的交互功率;文献[6]基于机会约束规划建立了微网动态经济调度模型,综合成本函数中除发电成本、环境成本,交互成本外,还纳入了制热收益;文献[7]研究了储能系统平抑可再生能源输出功率波动的效果;文献[8-10]综合考虑了经济效益、系统可靠性、平抑功率波动、环境保护、符合发电计划曲线等多方面指标,并通过模糊理论进行目标函数隶属度转换,将多目标函数转为单目标

函数。但上述文献都是把电池储能电站作为一个整体进行调度,并未考虑电池储能电站内部电池的出力分配。

考虑到制约光储联合发电系统在电网中大规模应用的重要因素是电池储能电站昂贵的运行成本,本文依据储能电站各电池组性能参数和运行状态,以储能电站运行一天总成本最低为优化目标,以系统平衡、荷电状态、功率限值和调度循环为约束条件,充分考虑对电池的充放电保护,提出了一种光储联合发电系统经济优化调度策略。本文仅考虑储能电站有功功率调度,以光储联合发电系统独立运行为算例进行研究,仿真结果验证了改进算法的优越性及优化调度策略的可行性。

1 光储联合发电系统拓扑结构

光储联合发电系统主要由光伏发电、电池储能电站和负荷组成,该系统的结构如图1所示,光伏发电输出功率为 P_{pv} ,电池储能电站输出功率为 P_b ,两者的合成功率 P_{out} 。电池储能电站由储能电池、电池管理系统(battery management system, BMS)、能量转换系统(power conversion system, PCS)及储能监控系统组成,其中, BMS负责监视储能电池的运行状态,采集电池的电压、电流、温度等信息,实现实时均衡和保护功能; PCS实现交流与直流的双向转换,接收储能监控系统的控制命令,按指定的工作模式进行充放电,并与 BMS进行信息交互,确保储能电站在安全稳定的状态下进行工作。

电池储能电站中一个电池堆(battery pack, BP)和一台 PCS/BMS构成一条储能支路,若干个调度过程中保持同步的储能支路构成一个独立可调电

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-02-25

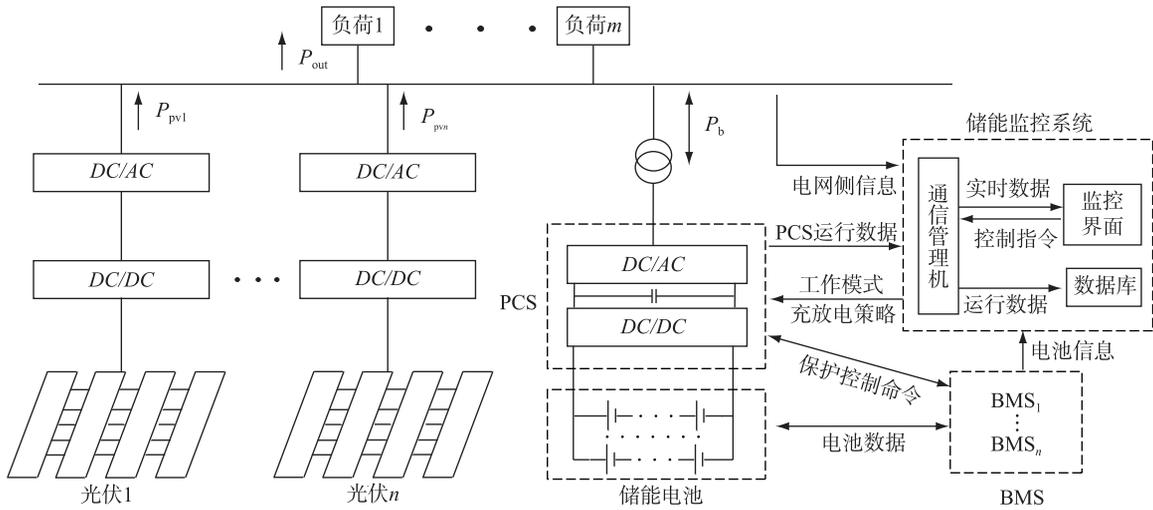


图1 光储联合发电系统拓扑结构

Fig.1 Topology of photovoltaic-energy storage hybrid generation system

池组 $A_i (i=1, 2, \dots, N)$, 假设同一电池组中的电池参数相同, 电池工作状态相同, 且参数同步改变。功率调度过程中, 各储能支路 PCS/BMS 先经通信网络向调度中心上传运行参数, 之后储能监控系统根据调度中心下达的调度指令, 经调度算法计算出各独立可调电池组 A_i 的功率分配 P_i , 最后根据各储能支路的容量平均分配给 PCS, 由各 PCS 在该储能支路中的电池堆中实行平均分配^[11]。电池储能电站功率调度分配如图2所示。

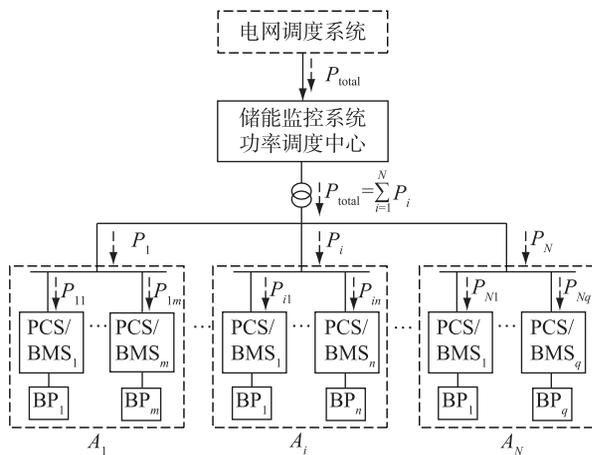


图2 电池储能电站功率调度分配

Fig.2 Power dispatching of battery storage power station

2 优化调度数学模型

本文把光储联合发电系统运行一天作为一个周期来研究, 将一天分为24个时段, 每个时段为1h, 通过优化各个时段的电池组充放电功率, 使电池储能电站运行一天总成本最低。其中控制变量是每个时段各电池组的调度功率 $P_i(t) (i=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, H)$ 。

2.1 目标函数

光储联合发电系统优化调度的本质是基于储能电池运行允许的条件下对各电池组进行统筹协调, 实现电池储能电站运行一天总成本最低^[12]。总运行成本主要包括储能电站在充放电过程中的功率损耗、电站建成后定期或不定期的检修与维护^[13]以及固定建设成本消耗^[14], 目标函数可表示为^[15]:

$$\min C = \sum_{t=1}^H [C_1(t) + C_m(t) + C_f(t)] \quad (1)$$

$$C_1(t) = \begin{cases} \tau \sum_{i=1}^N k_{li} (1 - \eta_{ci}) |P_i(t)| & \mu_i(t) = 1 \\ \tau \sum_{i=1}^N k_{di} \left(\frac{1}{\eta_{di}} - 1 \right) |P_i(t)| & \mu_i(t) = -1 \end{cases} \quad (2)$$

$$C_m(t) = \tau \sum_{i=1}^N [k_{mi} |P_i(t)| (1 + \theta_i)^{r_i(t)/R_i}] \quad (3)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i(t) C_{fi}}{R_i} \quad (4)$$

式中: $C_1(t)$ 为 t 时段电池储能电站的损耗成本; $C_m(t)$ 为 t 时段电池储能电站的维护成本; $C_f(t)$ 为 t 时段电池储能电站的固定建设成本消耗; H 为时段数; τ 为 t 时段和 $t+1$ 时段的时间间隔; N 为电池组组数; k_{li} 为第 i 组电池组电能损耗系数; η_{ci} 为第 i 组电池组充电效率; η_{di} 为第 i 组电池组放电效率; $P_i(t)$ 为 t 时段第 i 组电池组的调度功率, 该值为正表示充电, 为负表示放电; $\mu_i(t)$ 为 t 时段第 i 组电池组充放电标志, 取值 0, 1 及 -1, 分别代表浮充、充电及放电状态; k_{mi} 为第 i 组电池组运行维护系数; θ_i 为第 i 组电池组老化系数; R_i 为第 i 组电池组可允许的总循环次数; C_{fi} 为第 i 组电池组固定建设成本; $r_i(t)$ 为 t 时段第 i 组电池组已充放电次数; $\rho_i(t)$ 为 t 时段第 i

组电池组是否成为一次独立充放电行为的标志位,假设 t 时段第 i 电池组处于浮充状态或者充放电模式与前一非浮充状态充放电模式一致,则 $\rho_i(t)$ 为 0, 否则为 1。若判定 t 时段第 i 组电池组为一次独立充放电行为,则该电池组已充放电次数加 1。即:

$$r_i(t) = \begin{cases} r_i(t-1) & \rho_i(t) = 0 \\ r_i(t-1) + 1 & \rho_i(t) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。要确保供电和用电的平衡,且各时刻电池组调度功率之和应满足储能电站调度指令,即存在功率等式:

$$P_{pv}(t) - P_{bat}(t) = P_{load}(t) \quad (6)$$

$$P_{bat}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (7)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为 t 时段光伏发电输出功率; $P_{bat}(t)$ 为 t 时段储能电站总调度功率; $P_{load}(t)$ 为 t 时段负荷需求功率。

(2) 电池组荷电量约束。为了保护电池组,延长电池组使用寿命,避免电池组的过充过放,电池组荷电状态需满足^[16]:

$$S_{oci}^{\min} \leq S_{oci}(t) \leq S_{oci}^{\max} \quad (8)$$

式中: S_{oci}^{\min} 和 S_{oci}^{\max} 分别为第 i 组电池组允许的最小和最大荷电量。 S_{oc} 满足如下关系:

$$S_{oci}(t) = (1 - \sigma_i)S_{oci}(t-1) + \frac{\Delta E_i(t)}{E_{Ni}} \quad (9)$$

$$\Delta E_i(t) = \begin{cases} \eta_{ci}P_i(t)\tau & \mu_i(t) = 1 \\ \frac{P_i(t)\tau}{\eta_{di}} & \mu_i(t) = -1 \\ 0 & \mu_i(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $S_{oci}(t-1)$ 和 $S_{oci}(t)$ 分别为 $t-1$ 时段和 t 时段第 i 组电池组的荷电状态; σ_i 为第 i 组电池组在单个时段内的自放电率; $\Delta E_i(t)$ 为 t 时段第 i 组电池组荷电量增加量, E_{Ni} 为第 i 组电池组额定容量。

(3) 电池组功率约束。电池组每时段充放电功率应该满足一定的上下限约束,其约束表达式为:

$$\begin{cases} P_{ci}^{\min} \leq P_i(t) \leq P_{ci}^{\max} & \mu_i(t) = 1 \\ P_{di}^{\min} \leq -P_i(t) \leq P_{di}^{\max} & \mu_i(t) = -1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{ci}^{\min} 和 P_{ci}^{\max} 分别为第 i 组电池组允许的最小和最大充电功率; P_{di}^{\min} 和 P_{di}^{\max} 分别为第 i 组电池组允许的最小和最大放电功率。

(4) 储能电站调度循环约束。考虑到电池储能电站调度的继承性,保证下一调度周期电池储能电站的可调度性,电池储能电站始末荷电状态应一致,即满足:

$$S_{oc}(0) = S_{oc}(H) \quad (12)$$

且:

$$\begin{cases} S_{oc}(0) = \frac{\sum_{i=1}^N S_{oci}(0)E_{Ni}}{\sum_{i=1}^N E_{Ni}} \\ S_{oc}(H) = \frac{\sum_{i=1}^N S_{oci}(H)E_{Ni}}{\sum_{i=1}^N E_{Ni}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $S_{oc}(0)$ 和 $S_{oc}(H)$ 分别为电池储能电站参与调度周期初始时刻和最终时刻的荷电状态; $S_{oci}(0)$ 和 $S_{oci}(H)$ 分别为电池储能电站第 i 组电池组参与调度周期初始时刻和最终时刻的荷电状态。

2.3 约束条件处理

约束条件(1—3)为硬性约束条件,必需满足;而式(12)所示约束条件要求调度周期最终荷电状态与初始状态完全一致,这种设定过于严苛,可以考虑将此约束条件处理为惩罚项加入目标函数。引入惩罚因子 λ , λ 取较大的正数,约束条件处理完成后调度数学模型为^[17]:

$$\min C = \sum_{t=1}^H [C_1(t) + C_m(t) + C_f(t)] + \lambda |S_{oc}(H) - S_{oc}(0)| \quad (14)$$

电池储能电站各电池组满足下列约束:

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = P_{load}(t) - P_{pv}(t) \quad (15)$$

$$S_{oci}^{\min} \leq S_{oci}(t) \leq S_{oci}^{\max} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{ci}^{\min} \leq P_i(t) \leq P_{ci}^{\max} & \mu_i(t) = 1 \\ P_{di}^{\min} \leq -P_i(t) \leq P_{di}^{\max} & \mu_i(t) = -1 \end{cases} \quad (17)$$

2.4 优化策略

本文电池储能电站总调度功率 $P_{bat}(t)$ 为光伏发电输出功率减去实际负荷需求,不考虑储能电站某时刻储能容量不够的情况。

光储联合发电系统中,如果对电池储能电站调度不合理,其使用寿命会大幅度缩短,重置电池储能电站的造价成本较高。由优化调度数学模型式(4)和(14)可知,电站总运行成本包括固定建设成本消耗,如果储能电站充放电状态频繁切换,降低电池组使用寿命的同时,储能电站总运行成本也在增加。因此,要满足总运行成本最低,优化调度策略应同时考虑对电池储能电站的充放电保护,减少电池组充放电状态切换次数。

当调度指令下达时,优先考虑当前状态与调度指令相同的电池组,以减少电池组充放电状态切换次数,延长电站使用寿命的同时,减少固定建设成

本消耗,从而使总成本最低。具体为:当调度指令为充电指令时,优先考虑当前状态为充电的电池组,保持电池组一直充电直至 S_{oc} 的上限;当调度指令为放电指令时,优先考虑当前状态为放电的电池组,保持电池组一直放电直至 S_{oc} 的下限。

3 光储联合发电系统优化调度求解流程

第一步:读入相关数据。首先是光伏发电输出功率和负荷需求功率预测值;其次是电池储能电站运行参数,包括充放电效率、最大最小荷电量约束、最大最小允许充放电功率、初始电池组工作状态等;再次是储能电站基本参数,包括电池组组数、运行维护系数、电能损耗系数、固定建设成本等;最后是粒子群算法的参数,包括种群大小、粒子维数、最大迭代次数、惯性因子、学习因子、粒子最大更新速度等。

第二步:初始化种群。根据前一时段各电池组充放电状态,以及各时段调度需求功率,随机产生满足功率约束条件的种群个数为 20 的 N 个电池组 24 h 调度功率的值,每个时段可调度功率范围受前面时段调度功率值影响。另外,为减小电池组充放电状态切换,延长电站使用寿命,当某时段调度需求功率为正,即需要充电时,优先考虑前一时段为充电状态的电池组;当某时段调度需求功率为负,即需要放电时,优先考虑前一时段为放电状态的电池组。通过式(10)计算得到 N 个电池组 24 h S_{oc} 的值,如果 S_{oc} 值越限,则取满足荷电状态临界值的调度功率值。调度功率满足全部约束条件后,计算电池组充放电状态、已充放电次数等参数,之后根据式(1—4)计算适应度值(电站运行一天总成本),记录粒子的个体最优值和全局最优值,并将飞行次数置 0。

第三步:更新粒子的速度和位置,更新时仍保证当某时段调度需求功率为正,即需要充电时,优先考虑前一时段为充电状态的电池组,此时调度功率全为正值;当某时段调度需求功率为负,即需要放电时,优先考虑前一时段为放电状态的电池组,此时调度功率全为负值。如果调度功率不满足充放电状态切换保护,或粒子越界,对其进行处理,得到新一代粒子种群。

第四步:计算新一代种群每个粒子的适应度,与当前最优解比较,判断是否更新粒子的个体最优解和全局最优解。

第五步:判断是否达到最大迭代次数,若没有,飞行次数加 1,并返回至第三步,若满足,则转入第六步。

第六步:根据式(10)计算全局最优解时电池组荷电状态,输出全局最优解和电池组荷电状态值,算法结束。

4 算例分析

以某小区光伏电站为例,系统由光伏逆变器、电池储能电站及负荷三部分组成。电池储能电站由 4 组电池组组成,各电池组性能参数如表 1 所示。

表 1 电池组固定参数

固定参数	电池组号			
	A_1	A_2	A_3	A_4
额定功率/kW	300	280	250	260
额定容量/(kW·h)	1200	1800	1200	1500
充电效率 $\eta_{ci}/\%$	0.85	0.82	0.82	0.88
放电效率 $\eta_{di}/\%$	0.8	0.8	0.9	0.9
总循环次数 R_i	1800	2000	2000	1800
建设成本 $C_{fi}/$ 万元	4	6	4	4.5
老化系数 θ_i	1	1	1	1
运行维护系数 $k_{mi}/$ [元·(kW·h) ⁻¹]	0.1	0.15	0.12	0.1
电能损耗系数 $k_{li}/$ [元·(kW·h) ⁻¹]	0.5	0.4	0.3	0.5

算例以 24 h 为一个完整调度周期,调度时间间隔为 1 h。每时段电池储能电站优化调度需要前期的光伏发电输出和负荷需求的功率预测数据,如图 3 所示。电池储能电站调度功率 $P_{bat}(t)$ 为光伏发电功率减去实际负荷需求(正值为充电),本文不考虑储能电站某时刻储能容量不够的情况。通过图 3 可以看出,电池储能电站在光伏发电输出功率满足负荷需求时,存储电能;在光伏发电输出功率不满足负荷需求时,释放电能,起到了削峰填谷的作用。调度第 0 时段,电池储能电站各电池组运行状态如表 2 所示。

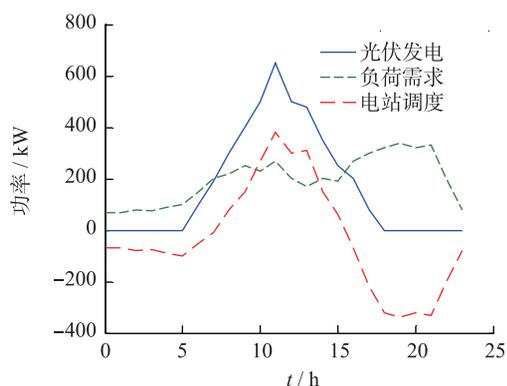


图 3 光伏发电、负荷需求及电站调度功率
Fig.3 Power of PV, load demand and station dispatching

表2 各独立可调电池组的运行状态参数

Table 2 The operating status parameters of each independent adjustable battery pack

运行 状态参数	电池组号			
	A_1	A_2	A_3	A_4
荷电量 S_{oc} 初始值	0.7	0.6	0.5	0.4
已循环次数	600	500	100	700
前一时刻充放电状态	-1	-1	-1	1

为了获得较好的算法稳定性以及较快的收敛速度,根据经验设置算法参数:粒子规模为20;进化迭代次数为300;学习因子 c_1 为2.3, c_2 为1.8;惯性权重因子 ω 变化范围为 $[0.4, 0.9]$; S_{oc} 变化范围为 $[0.2, 0.9]$;速度 v 变化范围为 $[-5, 5]$;功率调度绝对值上限为电池组额定功率,下限为0。根据上文算法步骤用Matlab软件进行算例仿真,各独立可调电池组的最优出力结果如图4所示。为了清晰反映电池组的充放电状态,同时仿真输出了最优调度结果各可调电池组的荷电状态,如图5所示。各电池组各时刻荷电状态始终处于20%到90%的有效区间内,满足荷电状态约束,避免了电池组的过充过放,进一步表明优化调度策略的合理性及可用性。

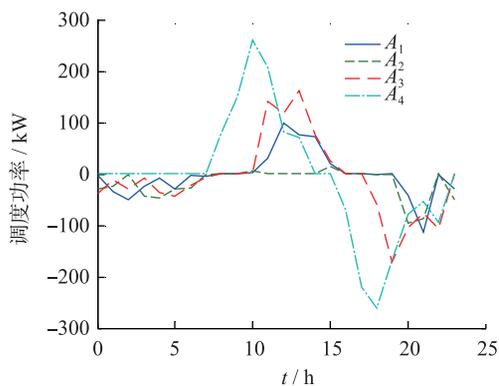


图4 优化调度功率曲线

Fig.4 The power curve of optimal scheduling

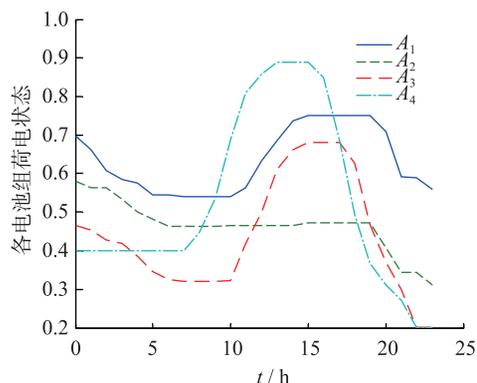


图5 各电池组SOC变化曲线

Fig.5 The SOC change curve of each battery pack

为验证本文提出的改进粒子群算法的优越性,分别采用改进粒子群算法和基本粒子群算法对光

储联合发电系统优化调度问题进行求解,并进行比较分析,如图6所示。改进粒子群算法计算得到的电池储能电站运行24h最低成本为3348.86元,较采用基本粒子群算法调度时最低运行成本3385.08元,直接经济效益提升了1.1%。而且改进后算法收敛精度优,寻优效率高,具有更强的全局搜索能力。

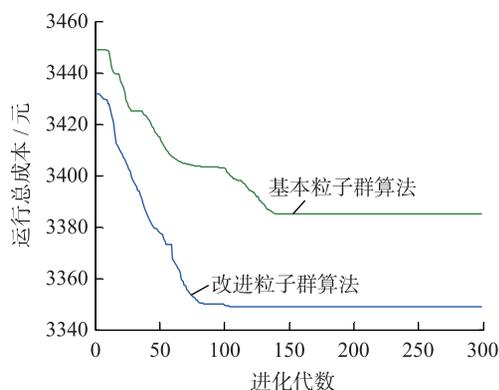


图6 两种算法收敛特性对比

Fig.6 Convergence characteristics comparison

下面以3个时段电池储能电站功率调度分配为例进行分析,调节分配结果如表3所示。

表3 调度分配结果

Table 3 Allocation results of dispatching

t 时段 调度需求/kW	调度结果	电池组号			
		A_1	A_2	A_3	A_4
80 ($t=8$)	$S_{oci}(t-1)$	0.540	0.462	0.320	0.4
	$\mu_i(t-1)$	-1	-1	-1	1
	分配结果/kW	0	0	0	80
270 ($t=10$)	$S_{oci}(t)$	0.540	0.462	0.320	0.447
	$S_{oci}(t-1)$	0.540	0.462	0.320	0.535
	$\mu_i(t-1)$	-1	-1	-1	1
300 ($t=12$)	分配结果/kW	1.786	5.306	2.907	260
	$S_{oci}(t)$	0.562	0.465	0.419	0.810
	$S_{oci}(t-1)$	0.562	0.465	0.419	0.810
	$\mu_i(t-1)$	1	1	1	1
	结果分配/kW	98.888	0.785	118.06	82.268
	$S_{oci}(t)$	0.633	0.465	0.500	0.858

调度功率为充(放)电指令,若当前处于充(放)电状态的电池组可充(放)容量满足充(放)电需求,当前处于充(放)电状态的电池组唯一,则只调度该电池组,如 $t=8$ 时段;当前处于充(放)电状态的电池组不唯一,则实行平均分配,如 $t=12$ 时段。若当前处于充(放)电状态电池组的可充(放)容量不满足充(放)电需求,则先调度当前处于充(放)电状态电池组最大可调功率,调度差值由其余电池组分配,如 $t=10$ 时段。且电池组荷电状态达90%,不可继续充电,电池组荷电状态达20%,不可继续放电。

5 结语

本文重点研究了光储联合发电系统日经济优化调度数学模型及其求解方法,实现了光储联合发电系统的经济、安全运行,以及电池储能电站内部电池的有效管理。本文提出的改进粒子群算法引入了自适应惯性权重和收缩因子,改进了粒子速度更新表达式,求解过程简单,通过参数控制就可以较好地平衡全局搜索和局部搜索。本文中的调度策略基于经济最优为目标,且是在储能容量足够大的前提下进行,后期将继续研究多优化目标及考虑与大电网交互的储能电站优化调度策略。

参考文献:

- [1] 甘思琦,孔令国,蔡国伟,等. 光储联合发电系统建模及并网控制[J]. 中国电力,2015,48(3):116-121.
GAN Siqi, KONG Linguo, CAI Guowei, et al. Modeling and grid-connected control of photovoltaic-energy storage hybrid system [J]. Electric Power, 2015, 48(3): 116-121.
- [2] BEDIR A, OZPINECI B, CHRISTIAN J E. The impact of plugin hybrid electric vehicle interaction with energy storage and solar panels on the grid for a zero energy house [C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, New Orleans, LA, USA, 2010: 1-6.
- [3] LIU Chunhua, CHAU K T, ZHANG Xiaodong. An efficient wind-photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 831-839.
- [4] 张景明,李岩松,杜儒剑,等. 光储联合并网系统建模与低压耐受能力的研究[J]. 电力建设,2015,36(4):27-31.
ZHANG Jingming, LI Yansong, DU Rujian, et al. Modeling and low voltage tolerance ability study of solar-battery hybrid generation system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 27-31.
- [5] 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.
LIU Jiaojiao, WANG Zhijie, YUAN Jianhua, et al. Optimized dispatch of wind/PV/battery microgrid based on PSO algorithm [J]. East China Electric Power, 2014, 42(8): 1534-1539.
- [6] 肖青,陈洁,杨秀,等. 含多种分布式电源的微网动态经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(4):22-28.
XIAO Qing, CHEN Jie, YANG Xiu, et al. Dynamic economic dispatch of microgrid with different types of distributed generations [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 22-28.
- [7] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 66-72.
- [8] 周晓燕,刘天琪,沈浩东,等. 含多种分布式电源的微电网经济调度研究[J]. 电工电能新技术,2013,32(1):5-8.
ZHOU Xiaoyan, LIU Tianqi, SHEN Haodong, et al. Study on economic scheduling of microgrid with different types of distributed generations [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(1): 5-8.
- [9] 苗雨阳,卢锦玲,朱国栋. 基于改进多目标粒子群算法的微电网并网优化调度[J]. 电工科学与工程,2012,28(7):15-20.
MIAO Yuyang, LU Jinling, ZHU Guodong. Grid-connected optimal dispatching of micro-grid with multi-objective particle swarm algorithm [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(7): 15-20.
- [10] 钟宇峰,黄民翔,叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):114-121.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, YE Chengjin. Multi-objective operation optimization of micro-grid based on dynamic scheduling of battery energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 114-121.
- [11] 叶季蕾,薛金花,吴福保,等. 一种电池储能电站的经济优化调度策略[J]. 电源技术,2016,40(2):365-369.
YE Jilei, XUE Jinhua, WU Fubao, et al. Economic optimization dispatching strategic of battery energy storage station [J]. Power Technology, 2016, 40(2): 365-369.
- [12] 张文婷,范立新,顾文. 考虑风电预测误差的电力系统有功实时调度[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):11-15.
ZHANG Wenting, FAN Lixin, GU Wen. Real-time active power dispatch of wind integrated system considering wind power Forecast Errors [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 11-15.
- [13] 张勇军,徐涛,许亮,等. 计及输电灵活性期望代价的多目标电网协调最优规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):31-35.
ZHANG Yongjun, XU Tao, XU Liang, et al. Multi-objective optimal coordinated transmission expansion planning considering flexibility expected expense [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 31-35.
- [14] 黄映. 基于改进混合差分进化算法的输电网规划研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(4):36-39.
HUANG Ying. Transmission network planning based on improved hybrid differential evolution algorithm [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(4): 36-39.
- [15] 刘浩明,陆丹,杨波,等. 可平抑高渗透分布式光伏发电功率波动的储能电站调度策略[J]. 高电压技术,2015,41(10):3213-3223.
LIU Haoming, LU Dan, YANG Bo, et al. Dispatch strategy of energy storage station to smooth power fluctuations of high penetration

- eration photovoltaic generation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3213-3223.
- [16] TAKABAYASHI H, SANO S, HIROSE Y, et al. The application of valve-regulated lead acid batteries to wind power generation system [C] // Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). The 31st IEEE International Telecommunications Energy Conference, Incheon, Korea, 2009.
- [17] 王 辉. 计及孤岛约束的微网经济优化[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 57-62.
- WANG Hui. Economic optimization for micro-grid considering island constraints [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 57-62.

作者简介:



张国玉

张国玉(1991—),女,江苏盐城人,硕士,研究方向为新能源发电并网、微网系统优化调度;

洪 超(1982—),男,江西景德镇人,讲师,研究方向为电力电子和电力市场;

陈杜琳(1984—),女,湖北十堰人,硕士,研究方向为新能源发电并网、微网系统运行控制策略;

叶季蕾(1983—),女,安徽桐城人,高级工程师,从事电池材料和特性、电池储能成组应用技术研究和工作。

Operation Optimization of Photovoltaic-energy Storage Hybrid System Based on Scheduling of Battery Energy Storage System

ZHANG Guoyu¹, HONG Chao², CHEN Dulin¹, YE Jilei³

(1.Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, China; 2. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333000, China; 3.China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: The optimal scheduling strategy of photovoltaic-energy storage hybrid system is an important guarantee for the economic and safe operation of photovoltaic-energy storage hybrid system, but the traditional economic dispatch models do not consider the effective management of the battery energy storage station (BESS)'s internal battery. An economic optimal scheduling strategy of photovoltaic-energy storage hybrid system is put forward, and a mathematics model of economic optimal scheduling is established by taken the lowest total cost a day as optimization objectives and using the power balancing, state of charge, power limit and scheduling cycle as constraint conditions, according to performance parameters and operating conditions of each battery pack. Improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm is applied to solve the mathematics model. Finally, the simulation result proved that the improved particle swarm optimization algorithm is superior and the scheduling strategy is proper in the application of photovoltaic-energy storage hybrid system.

Key words: battery energy station; photovoltaic-energy storage hybrid system; economic; optimization; dispatching strategy; particle swarm optimization algorithm

(编辑 刘晓燕)

(上接第 43 页)

Monitoring Solutions for a ± 500 kV Multi-terminal VSC-HVDC Transmission System

ZHUANG Weijin, WANG Yan, SUN Mingyang, HUANG Longda, YU Fang, ZHANG Yonggang

(China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: VSC-HVDC (voltage sourced converter based HVDC) transmission system has technical advantages in the AC and DC system interconnection, large-scale clean energy grid integration. With the application and promotion of the the high-voltage high-capacity multi-terminal VSC-HVDC transmission system, the master station monitoring function is hard to meet their development need. This paper analyzes the topology structure and key equipment features of ± 500 kV/3000 MW four-terminal flexible DC power network. In the objective of unmanned converter stations, a monitoring functional framework based on existing monitoring functions of smart grid dispatching and control system (SGDCS) is proposed. Based on the most promising VSC-HVDC grid configuration of half bridge sub-module based modular multilevel converter (HB-MMC) + DC breaker, this paper presents the function schemes for 4 important monitoring modules, grid modeling, data acquisition, topology analysis and intelligent alarming. The proposed monitoring functions would be helpful for the project implementation in the future.

Key words: VSC-HVDC; grid modeling; topology analysis; intelligent alarming

(编辑 徐林菊)