

# 基于禁忌搜索的混合储能辅助电网 AGC 策略研究

王炜<sup>1</sup>, 李政<sup>2</sup>, 刘宏伟<sup>2</sup>, 纪项钟<sup>2</sup>, 郑楠<sup>1</sup>, 于广亮<sup>1</sup>, 康健<sup>3</sup>

(1. 国网陕西省电力公司 经济技术研究院, 陕西 西安 710001;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102200;

3. 华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 由于储能系统具有响应快、控制精确和双向出力的特点, 目前已有越来越多的研究将储能系统作为调频资源加入到自动发电控制系统中来辅助调频。因此将超级电容器和蓄电池共同构成混合储能系统, 与常规调频机组结合实现实时自动发电控制。控制策略基于禁忌搜索算法, 以系统区域控制偏差为输入量, 通过动态调整自动发电控制指令在不同调频资源之间分配的比例, 使系统的综合调节效果达到最优。仿真验证结果表明, 该策略能够有效降低电网的频率波动, 维持蓄电池的荷电状态在理想区间附近, 面对电网未来一段时间功率扰动未知的情况也能通过调整策略来应对。

**关键词:** 自动发电控制; 电网调频; 混合储能; 禁忌搜索算法

中图分类号: TM732 文献标识码: B DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd21984

## Research on AGC Strategy of Hybrid Energy Storage Auxiliary Power Grid Based on Tabu Search

WANG Wei<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, LIU Hongwei<sup>2</sup>, JI Xiangzhong<sup>2</sup>, ZHENG Nan<sup>1</sup>, YU Guangliang<sup>1</sup>, KANG Jian<sup>3</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710001, Shaanxi, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102200, China; 3. School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China)

**Abstract:** Due to the characteristics of fast response, accurate control and bidirectional output of energy storage systems, more and more energy storage systems have been added as frequency modulation resources to automatic power generation control system to assist frequency modulation. Therefore, a hybrid energy storage system was formed by the super-capacitor and battery, and it was combined with a conventional frequency modulation unit to realize real-time automatic power generation control. In the control strategy, which based on tabu search algorithm, the system area control deviation was taken as the input, and the proportion of automatic power generation control commands, which were allocated between different frequency modulation resources, were dynamically adjusted to optimize the system's comprehensive adjustment effect. Simulation verification results show that the strategy can effectively reduce the frequency fluctuation of the power grid, maintain the state of charge of the battery near the ideal interval, and it can adjust the strategy when faced with the unknown power disturbance of the grid.

**Key words:** automatic generation control; grid frequency modulation; hybrid energy storage; tabu search algorithm

电网的频率调节的任务主要由自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统承担。AGC系统通过获取电网的运行参数(如负荷扰动, 频率偏差等)并进行分析处理, 求解出区域控

制偏差(area control error, ACE), 并将ACE根据分配因子分别下发至各调频资源以调整其出力, 完成电网频率的控制<sup>[1]</sup>。由于储能系统具有响应快、控制精确和双向出力的特点, 可以瞬间跟踪

基金项目: 国网陕西省电力公司2019年科技项目(5226JY18000G)

作者简介: 王炜(1983—), 男, 工学博士, 高级工程师, Email: 240216@163.com

通讯作者: 刘宏伟(1975—), 女, 工学博士, 副教授, Email: hwliu@ncepu.edu.cn

功率指令,已有越来越多的研究证实了将储能系统作为调频资源加入到电网的AGC系统中来辅助调频的可行性和优越性<sup>[2-4]</sup>。

将储能系统作为调频资源有单一储能和混合储能两种形式,目前的研究普遍采用蓄电池单一储能的形式<sup>[5-10]</sup>,并已取得了一些成果。文献[5-7]没有考虑蓄电池储能(battery energy storage system, BESS)荷电状态(state of charge, SOC),虽然简化了分析过程,但是不符合实际运行情况。文献[8-10]将SOC管理纳入优化目标,调节效果较好,但其在应对高频小幅度频率波动时选择采用BESS频繁充放电来进行调节,没有考虑BESS充放电切换带来的电量损失和蓄电池寿命损耗问题。随着BESS参与自动发电控制的研究不断深入,其难以兼顾荷电状态管理和充放电成本的问题日益突出。相对于单一的储能,将多种储能组合起来能够优势互补。目前有文献将超导磁储能与蓄电池结合起来构成混合储能系统来参与AGC控制<sup>[11]</sup>。但超导磁储能装置成本很高,部分关键设备没有实现国产化,失超保护等部分关键技术没有深入研究和解决<sup>[12]</sup>。超级电容器是近年来受到国内外研究人员广泛关注的一种新型储能元件,其技术发展较成熟,具有功率密度高,能量密度低的特点<sup>[13]</sup>,可以快速响应高频小幅度的频率波动,与蓄电池刚好相反。文献[14]将超级电容器与蓄电池结合起来构成混合储能系统,并以ACE所处区间决定其分配原则,大幅度提高了储能系统的功率、能量控制能力,但该策略没有考虑混合储能系统的容量限制,仅验证其对于频率调整的效果,实用性不强。本文采用基于超级电容和蓄电池构成的混合储能系统作为辅助调频系统,同时兼顾考虑SOC和充放电成本,使其更具有实用价值。

为了将混合储能应用于自动发电控制系统中,尚需确定如何实现储能系统和常规机组之间二次调频功率的合理分配,即前文提到的区域控制偏差ACE的分配方式。目前普遍采用动态比例<sup>[9-11]</sup>的方式,即根据电网和各调频资源运行情况,动态调整ACE在各调频资源间的分配,以取得最优的调节效果。因此本文也采用动态比例的方法对ACE进行优化分配。

综上所述,本文提出了一种由超级电容器和蓄电池构成的混合储能系统参与AGC的控制策略。为了兼顾考虑SOC和充放电成本,以ACE作

为输入量,采用频率调节效果好、储能SOC处于最优区间、充放电切换次数少的多优化目标,对ACE在各调频资源间的分配系数进行动态调整。同时采用局部搜索精度较高的自适应连续禁忌搜索(tabu search, TS)算法,保证了该策略的控制效果和可行性。通过仿真对比验证了该控制策略的可行性和有效性。

## 1 含混合储能系统的电网频率控制模型

本文以单区域电力系统为例进行研究,区域内含有一台具备一次、二次调频能力的火电机组以及集中负荷,同时加入了负荷扰动和风电扰动作为功率扰动输入。图1描述了含超级电容器和蓄电池混合储能系统的自动发电控制系统模型<sup>[11]</sup>。

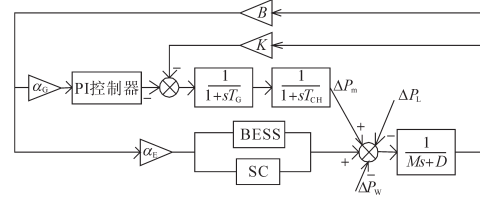


图1 含混合储能系统的自发电控制系统模型

Fig.1 AGC system model with hybrid energy storage system

图1中,αc和αe分别为区域中火电机组和混合储能系统的ACE分配系数;K为火电机组单位调节功率系数;B为频率偏差因子;Tc为调速器时间常数;Tch为发电机时间常数;M为集中负荷的时间惯性常数;D为集中负荷的阻尼常数;ΔPL为负荷扰动;ΔPw为风电功率扰动;ΔPm为常规发电机机输出功率改变值。BESS和SC分别代表蓄电池和超级电容器储能系统。控制系统通过计算分析得出ACE,再利用自适应连续禁忌搜索算法对分配系数进行动态优化,各调频资源根据自动发电系统控制指令调整自身的出力,最终实现火电机组和混合储能系统的协同调频。

图2为图1中的BESS传递函数模型<sup>[15]</sup>。该模型分为如下环节:功率转换系统(power conversion system, PCS)、响应延时-时间转换、输出判断以及电池储能设备模型。

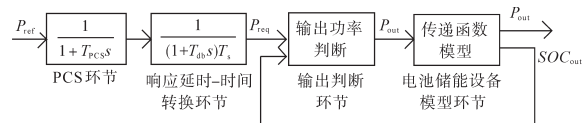


图2 蓄电池传递函数模型

Fig.2 Transfer function model of BESS

图2中,Pref为功率参考出力值,正值表示

BESS 向电网充电,负值表示 BESS 向电网放电; $P_{\text{req}}$  为经过 PCS 和响应延时环节后的功率需求; $T_{\text{pcs}}$  和  $T_{\text{db}}$  为分别为 PCS 环节和响应延时-时间转换环节的时间常数; $T_s$  为表示仿真时间与实际时间关系的转换系数; $P_{\text{out}}$  为 BESS 的实际输出功率; $SOC_{\text{out}}$  为储能系统荷电状态量。

图3为图1中超级电容器的传递函数模型<sup>[14]</sup>。

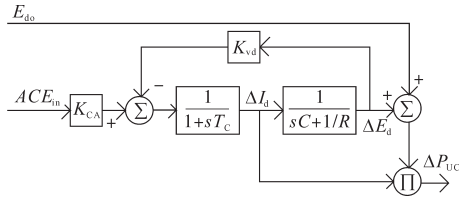


图3 超级电容器传递函数模型

Fig.3 Transfer function model of super capacitor

图3中, $\Delta I_d$  为超级电容器电流变化量; $E_{\text{do}}$  为超级电容器电压变化量; $\Delta P_{\text{UC}}$  为超级电容输出功率的变化量; $T_C$  为时间常数; $K_{\text{CA}}$  为以  $ACE_{\text{in}}$  为输入时的控制增益; $K_{\text{vd}}$  为电压控制增益; $R$  为等效电阻; $C$  为等效电容。

为了减少蓄电池的充放电损耗,延长蓄电池寿命,并且最大化利用超级电容器的快速充放电特性,本文设计混合储能系统内部采用由超级电容器优先进行充放电,蓄电池对超级电容器承担不了的爬坡功率进行补充的控制策略<sup>[16]</sup>。

## 2 混合储能系统参与自动发电控制的多目标优化模型

混合储能系统参与 AGC 控制的关键步骤是确定 ACE 在混合储能系统中的分配系数  $\alpha_e$ ,需要同时兼顾调频效果,蓄电池 SOC 状态和充放电次数多个优化目标,属于多目标优化问题。控制总目标为使得解向量的标准化满意度  $h$  最大,优化模型如下6式。

$$\max(h) = \max\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i\right) \max(h) = \max\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i\right) \quad (1)$$

式中: $h_i$  为第  $i$  个解向量的标准化满意度; $N$  为目标函数的数量。

可用式(1)求解空间中所有解向量的标准化满意度。

$$h_i = f(x) = \begin{cases} 1 & C_i \leq C_i^{\min} \\ (C_i^{\max} - C_i) / (C_i^{\max} - C_i^{\min}) & C_i^{\min} < C_i < C_i^{\max} \\ 0 & C_i \geq C_i^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_i$  为各目标函数值; $C_i^{\max}$  和  $C_i^{\min}$  分别为第  $i$  个

目标函数的最大值和最小值。

式(2)表示解集中每个解向量的各目标函数所对应的满意度的模糊隶属度函数<sup>[17]</sup>。

$$CPS_1 = [2 - \text{AVG}\left(\frac{ACE_{1\text{min}} \times \Delta f_{1\text{min}}}{B_{\text{cps}} \times \varepsilon_1^2}\right)] \times 100\% \quad (3)$$

式中: $CPS_1$  为美国电力可靠性协会(NERC)提出的 CPS 标准中的 CPS1 指标变量; $ACE_{1\text{min}}$  为区域控制偏差的 1 min 平均值,单位为 MW; $\Delta f_{1\text{min}}$  为系统频率偏差的 1 min 平均值,单位为 Hz; $B_{\text{cps}}$  为系统的频率响应系数,单位为 MW/Hz; $\varepsilon_1$  为电网 1 min 平均频率偏差的控制目标值,本文取 0.022 Hz<sup>[18]</sup>。

$$C_1 = 1/CPS_1 \quad (4)$$

式(4)为频率偏差目标函数,本文采用  $CPS_1$  考核自动发电控制系统的调频效果。因此, $C_1$  越小,表明系统的 CPS1 指标  $CPS_1$  数值越大,电网的频率控制性能越好。

$$C_2 = |SOC_{\text{avg}} - 0.5| \quad (5)$$

式中: $SOC_{\text{avg}}$  为一个采样周期内 SOC 的平均值。式(5)为 SOC 状态目标函数,在混合储能系统参与调频的过程中,需要保持 BESS 的 SOC 在 40%~60% 的理想区间中,以延长储能设备的工作寿命,并保证足够的调频容量储备。由式(5)可知, $C_2$  的值越小,BESS 的 SOC 越接近理想区间, SOC 状态就越好。

$$C_3 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{u_{\text{ch},t} + u_{\text{dis},t}}{2}\right) \quad (6)$$

式中: $T$  为总考核时间段数; $t$  为采样时间段; $u_{\text{ch},t}$  为 1 表示 BESS 在  $t$  时段内由放电状态转换为充电状态, $u_{\text{dis},t}$  为 1 表示 BESS 在  $t$  时段内由充电状态转换为放电状态,当 BESS 的充放电状态没有切换时两者均为 0。

式(6)为充放电成本目标函数<sup>[19]</sup>,因此, $C_3$  的物理含义为在考核时间段内 BESS 的充放电状态切换次数。 $C_3$  的值越小,BESS 在考核时间段内的充放电次数就越少。

## 3 算法设计

### 3.1 自适应禁忌搜索算法简介

禁忌搜索是一种现代启发式算法,是局部邻域搜索的一种扩展。将其应用到连续优化问题的求解中,即为连续禁忌搜索算法。算法每次迭代时在初始解的邻域中随机生成若干个候选解,初始解与候选解共同构成该次迭代的解集。在迭代寻优的过程中,禁忌搜索算法可以标记已搜



索的局部最优解,并在进一步的迭代中避开这些对象,从而保证对不同的有效搜索途径的探索,被标记的局部最优解的集合即为禁忌表。

禁忌搜索算法有两个关键属性,即集中性和多样性。集中性强调的是在对当前搜索到的优良解的邻域作进一步的纵向搜索,以期达到足够的搜索深度以实现局部的最优。而多样性则强调跳出目前的搜索区域,扩大搜索方向,避免陷入局部最优。为此本文采用自适应禁忌搜索算法<sup>[20]</sup>,通过对候选集的动态调整较好地解决集中性和多样性的矛盾,即将候选集分为两个部分,前半部分代表集中性元素,后半部分代表多样性元素。设候选解集合的长度为 $CL$ ,候选集中集中性元素的个数记为 $DL$ 。在迭代搜索过程中, $DL$ 按以下规则动态变化:若本次迭代搜索到的当前局部最优解优于前一步迭代的局部最优解,则 $DL$ 自动加1,否则 $DL$ 自动减1。 $DL$ 的取值范围为 $[1, CL-1]$ ,即候选集在迭代过程中始终同时包含集中性元素和多样性元素。

### 3.2 基于自适应禁忌搜索算法的ACE配置优化

定义ACE分配给混合储能部分的分配系数 $\alpha_e$ 为待优化量 $x_1$ ,基于自适应连续禁忌搜索算法的ACE配置优化的关键参数设置为:

1)确定 $x_1$ 的取值范围和初始值。假如ACE为正,系统中出现功率缺额的时候,综合考虑前述三个控制目标,如果此时储能系统为了调整SOC和减少充放电次数而吸收功率,同时能够兼顾频率控制,这种情况下 $x_1$ 即可为负值;因为混合储能系统所接收到的ACE数值占ACE总值的比例从0到100%,因此 $x_1$ 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $x_1$ 的初始值为在可行区间 $[-1, 1]$ 内随机产生的一个数值。

2)确定邻域的选取范围。采用 $[a-\delta, a+\delta]$ 边界移动法 $[a-\delta, a+\delta]$ 确定初始解的邻域<sup>[21]</sup>, $a$ 为该次迭代的初始解, $\delta$ 为一个很小的常数,其值根据经验选取,在后续仿真验证中 $\delta$ 取0.03,效果较好。

3)确定候选集长度 $CL$ 、集中性元素个数 $DL$ 初始值。 $CL$ 的值根据经验选取,在后续仿真验证中 $CL$ 取10,效果较好, $DL=CL/2=5$ ,即集中性元素和多样性元素各占一半。

禁忌表长度定义禁忌表的长度根据经验选取,本文中取10, $\delta$ 为0.03。若某个解与禁忌表中解的差值的绝对值小于 $\delta$ ,则视该解为禁忌状态,将其加入到禁忌表中。

基于自适应连续禁忌搜索算法的ACE配置优化的具体优化步骤为:

1)初始解及其邻域,在其邻域内产生若干候选解,构成解集 $U_0$ ,候选解通过随机的方法产生。

2)将ACE值和 $U_0$ 中的解依次代入运行。通过式(3)~式(6)计算出各目标函数值。

3)检验是否满足特赦准则:对 $U_0$ 中各个解的目标函数值进行排序,求出其中的最优解,若该解集最优解为该次迭代的候选解,则将其作为下次迭代的初始解。若解集最优解为初始解 $x_1$ ,则分两种情况讨论,若 $x_1$ 优于全局最优解,则更新全局最优解,并将其作为下次迭代的初始解。否则将其加入到禁忌表中,任期设置为10,对 $DL$ 参数进行更新,并对下次迭代的初始解进行随机选取。

4)进行下一步迭代,在新的初始解的邻域中随机生成候选解构成该次迭代的解集,判断各个解的禁忌属性:若某个解与禁忌表中的解的差值的绝对值小于 $\delta$ ,则将该解加入到禁忌表中,同时将禁忌表中其余解的任期依次减1,任期为0的解移出禁忌表。将处于非禁忌状态的解依次代入模型中进行仿真运行,同时将全局最优解代入,求取所有解的目标函数并进行比较。

5)若全局最优解经过30次迭代依然没有改变,则停止迭代,将此时的全局最优解作为该控制区间的 $\alpha_e$ 的最优值,否则返回重新迭代。

算法具体流程如图4所示。

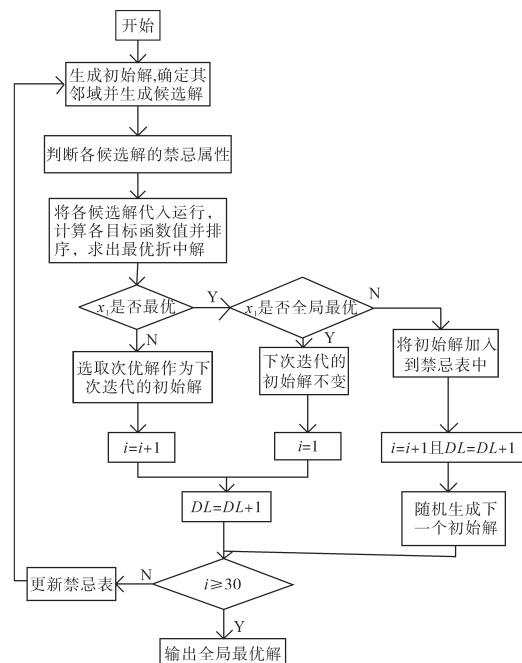


图4 优化控制策略算法流程

Fig.4 The flow chart of optimal control strategy algorithm

## 4 仿真验证

### 4.1 自适应禁忌搜索算法仿真

为了实现对电网调频的持续优化,引入滚动优化的方式,即对未来 1 min 的 ACE 分配系数进行优化计算,并将优化结果作为初始值,继续进行下一控制区间的优化,将滚动优化与上述禁忌搜索算法相结合实现分配系数的动态优化。在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的含混合储能的自动发电控制系统模型。功率基准值选取为 1 000 MW,频率基准值为 50 Hz。其中火电机组装机容量为 400 MW,参数为: $K=20, T_c=0.2 \text{ s}, T_{CH}=0.3 \text{ s}, M=10.0 \text{ s}, B=40$ ,PI 控制器参数选取为: $K_p=0.06, K_i=0.03$ ,系统内的 BESS 的参数为:配置容量为  $3 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ,初始 SOC 为 50%,最大充放电功率为 20 MW,  $T_{PCS}=0.01 \text{ s}, T_{db}=0 \text{ s}, T_s=1 \text{ s}$ <sup>[19]</sup>。超级电容器的配置容量为  $0.5 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ,参数为: $E_{do}=2 \text{ V}, K_{CA}=1, T_c=0.05 \text{ s}, K_{vd}=0.1, C=1 \text{ F}, R=0.01 \Omega$ <sup>[15]</sup>。

为了验证上述禁忌搜索算法的 ACE 优化配置效果,设置由负荷扰动和风电功率扰动构成的总扰动量,总扰动为阶跃变化的方波,每个控制区间长度设置为 60 s。总功率扰动的波形如图 5 所示。

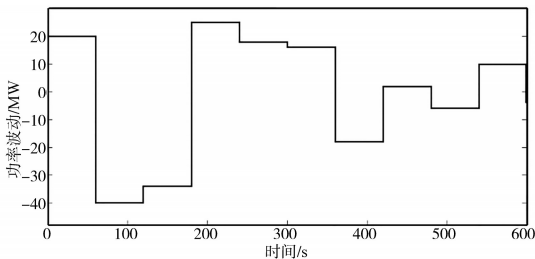


图5 系统所受功率扰动曲线

Fig.5 Power disturbance curve of the system

为了验证本文所采用的禁忌搜索算法(后文中简称为 TS 算法)的优越性,将其与电力系统调度优化常用的遗传算法进行对比分析。基于相同的仿真模型、控制策略、迭代次数和优化目标函数,分别采用禁忌搜索算法和遗传算法,针对图 5 给出的功率扰动的情况进行仿真计算。采用两种算法分别得到的 ACE 优化分配系数如表 1 所示。

观察表 1 可以发现 TS 算法求得的结果在第 3, 5, 9 和第 10 个控制区间,其分配系数  $\alpha_E$  为负数,说明在这些控制区间内,混合储能系统的出力方向与 ACE 方向相反。

表 1 2 种算法各控制时段储能系统分配系数

Tab.1 Distribution coefficient of energy storage system in each control period under the two algorithms

控制时段	TS 算法	遗传算法
1	0.160	0.200
2	0.113	0.142
3	-0.447	-0.325
4	0.130	0.183
5	-0.117	-0.474
6	0.014 7	0.232
7	0.255	0.035
8	0.876	-0.551
9	-0.445	-0.222
10	-0.221	-0.208

仿真结果的对比如图 6~图 8 所示,分别给出了频率波动曲线、SOC 曲线和 BESS 输出功率曲线。为了方便区分,将 TS 算法对应的结果用实线表示,遗传算法对应的结果用虚线表示,两种算法对应的结果都是连续变化的。

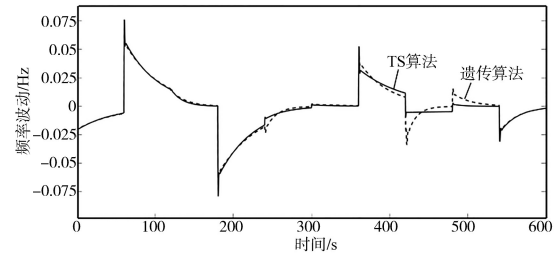


图 6 不同算法下频率波动曲线对比

Fig.6 Comparison of frequency fluctuation curves under different algorithms

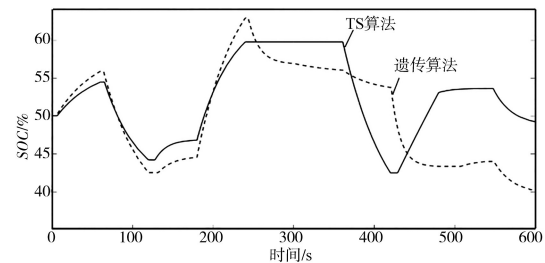


图 7 不同算法下 BESS 的 SOC 曲线对比

Fig.7 Comparison of SOC curves of BESS under different algorithms

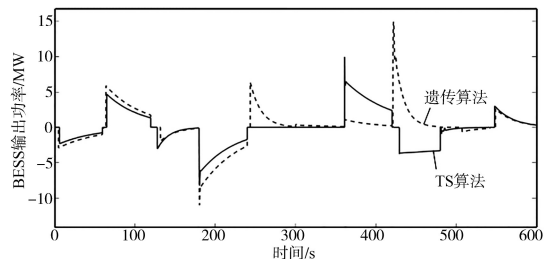


图 8 不同算法下 BESS 输出功率曲线对比

Fig.8 Comparison of output power curves of BESS under different algorithms

首先分析不同算法对频率波动和SOC的影响。在0~180 s以及300~420 s这两个控制区间内,由图6和图7可知,两种算法下频率波动近似,SOC均在40%~60%的理想区间。在180~240 s这个控制区间内,由图6可知两种算法下频率波动近似,由表1可知,TS算法求得的分配系数0.130比遗传算法的系数0.183小,相当于减少了BESS的充电量,因此由图7可知TS算法将BESS的SOC值保持在了40%~60%的理想区间内,而遗传算法对应的SOC值超出了理想区间。在240~300 s,540~600 s这两个控制区间内,两种算法对频率波动和SOC的影响结果与180~240 s这个控制区间相同。在420~480 s这个控制区间内,两种算法均使得SOC保持在了理想区间内,但是观察图6可以看出TS算法明显降低了频率波动的峰值。在480~540 s这个控制区间内,两种算法对频率波动和SOC的影响结果与420~480 s这个控制区间相同。

然后分析不同算法对BESS的充放电切换次数的影响。图8给出了BESS输出功率的波形,结合表1可知,在240~300 s这个控制区间内,TS算法求得的分配系数-0.117比遗传算法的系数-0.474绝对值小,使得混合储能系统所分配的ACE值可由超级电容器单独承担,BESS输出功率为0,免于进行充放电切换。在420~480 s这个控制区间内,由图8可知TS算法情况下有一次充放电切换,即输出功率由正到负,而遗传算法情况下无充放电切换,与图6交叉对比可知,TS算法使得此控制区间内频率波动的峰值明显降低。在480~540 s这个控制区间内,TS算法求得的分配系数与前一个控制区间符号相反,由于ACE在这两个控制区间符号也是相反的,最终使得BESS没有进行充放电切换,同时并未影响系统的调频效果和BESS的SOC健康。从整体结果来看,不同算法下BESS的充放电切换次数近似相等。

在电力系统的实际运行中,可能会出现未来一段时间的风电功率波动和负荷波动难以预测或无法预测的情况,此时本文所设计的实时优化控制策略因为缺乏输入量而无法运行。为了应对这种情况,本文设计在某一段时间功率波动无法预测时,优化策略停止运行,采用按固定比例的方式对ACE进行分配,分配比例为调频机组与混合储能系统的装机容量之比。当功率波动预测恢复时再启动优化策略控制ACE的分配。为了验证这种

控制方式的可行性,采用两种运行工况进行对比分析,工况1是正常工况,全部采用TS算法进行优化,工况2是120~240 s功率波动无法预测的特殊工况,在此期间ACE采用固定比例分配,其余时段采用TS算法优化。为了更好地观察短时按比例分配控制对后续控制效果的影响,将仿真时长设置为1200 s。仿真结果如图9~图11所示。

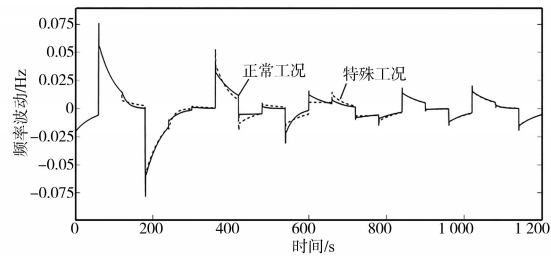


图9 两种工况下频率波动曲线对比

Fig.9 Comparison of frequency fluctuation curves under two working conditions

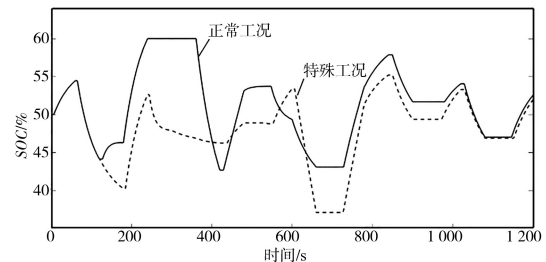


图10 两种工况下BESS的SOC曲线对比

Fig.10 Comparison of SOC curves of BESS in emergency under two working conditions

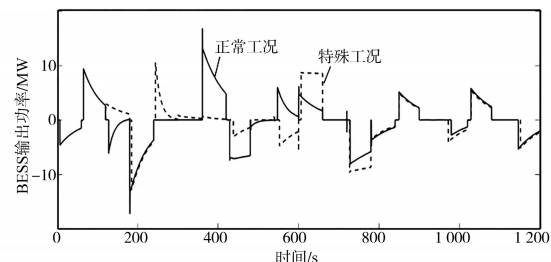


图11 两种工况下BESS输出功率曲线对比

Fig.11 Comparison of output power curves of BESS in emergency under two working conditions

从图9~图11中可以看出,在特殊工况中功率扰动无法预测的时间段之后,经过一定的暂态过程,所提出的优化控制策略可以将系统的频率波动,BESS的荷电状态和BESS的出力逐渐恢复到与正常工况相似的水平。

#### 4.2 自适应禁忌搜索算法耗时

为了保证本优化策略中1 min级优化的可行性,需要考虑自适应禁忌搜索算法每个控制区间优化的耗时。本文采用了如下的仿真环境:CPU为Intel®Core™ i7-9750H@2.60 GHz,内存为16



GB,操作系统为Windows,仿真平台为Matlab。经过大量的仿真实验,得出对应仿真环境下平均计算时间为35.7 s。可以看出,在常用的个人计算机配置下,自适应禁忌搜索算法对1 min级控制区间的最优解计算时间小于1 min,能够满足实际应用需求。

## 5 结论

为了实现混合储能系统与常规机组协调参与AGC控制,本文提出了一种基于自适应连续禁忌搜索算法的优化控制策略,对ACE的分配系数进行实时动态优化,并将其与电网优化常用的遗传算法进行对比,仿真结果表明:1)该策略能够有效提高系统频率的稳定性,显著降低其暂态频率波动峰值。2)该策略能够使SOC值保持在理想区间内,为BESS参与调频提供较多的容量裕度。3)在功率波动难以预测或无法预测的时段,采用短时按固定比例分配系数的控制策略具有可行性,从而增强了控制策略的适应性。

### 参考文献

- [1] 张宇泽.大规模风电接入电力系统的AGC控制参数修正[J].电气自动化,2019,41(1):28-31.  
Zhang Yuze. Correction of AGC parameters with large-scale wind power integration systems[J]. Electrical Automation, 2019, 41(1):28-31.
- [2] Greenwood D M, Lim K Y, Patsios C, *et al.* Frequency response services designed for energy storage[J]. Applied Energy, 2017, 203:115-127.
- [3] Soon-Jeong Lee, Jun-Hyeok Kim, Chul-Hwan Kim. Coordinated control algorithm for distributed battery energy storage systems for mitigating voltage and frequency deviations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2016, 7(3):1713-1722.
- [4] Zhang Shengqi, Yateendra Misshra, Mohammad Shahidehpour. Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(2):1595-1603.
- [5] 胡泽春,谢旭,张放,等.含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5080-5087.  
Hu Zechun, Xie Xu, ZHANG Fang, *et al.* Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5080-5087.
- [6] Makarov Y V, Du P, Kintner-Meyer M C W, *et al.* Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1):34-40.
- [7] 王琦,李林高,白建云,等.基于多变量模糊控制的储能系统辅助火电机组调频[J].电气自动化,2020,42(1):26-28,36.  
Wang Qi, Li Lingao, Bai Jianyun, *et al.* Frequency modulation of auxiliary thermal power plant for the energy storage system based on multivariable fuzzy control[J]. Electrical Automation, 2020, 42(1):26-28,36.
- [8] 于昌海,吴继平,杨海晶,等.规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J].电力工程技术,2019,38(4):68-73,105.  
YU Changhai, WU Jiping, YANG Haijing, *et al.* Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4):68-73,105.
- [9] Vaclav Knap, Sanjay K Chaudhary, Daniel-Ioan, *et al.* System for primary frequency regulation: a battery lifetime perspective[J]. IEEE Transactions on Power System, 2017, 53(1):430-438.
- [10] 孙冰莹,刘宗歧,杨水丽,等.补偿度实时优化的储能-火电联合AGC策略[J].电网技术,2018,42(2):426-436.  
Sun Bingying, Liu Zongqi, Yang Shuili, *et al.* Energy storage-thermal power combined AGC strategy based on real-time optimization of compensation degree[J]. Power System Technology, 2018, 42(2):426-436.
- [11] 褚鑫,高桂革.基于混合储能的风电并网调频控制策略[J].磁性材料及器件,2019,50(6):52-56.  
Zhu Xin, Gao Guige. Control strategy for frequency adjustment of wind power grid-connected system based on participation of hybrid energy storage system[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2019, 50(6):52-56.
- [12] 王松岑,来小康,程时杰.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):3-8,30.  
Wang Songcen, Lai Xiaokang, Cheng Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):3-8,30.
- [13] Stalin Munoz Vaca, Charalampos Patsios, Phil Taylor, *et al.* Enhancing frequency response of wind farms using hybrid energy storage system[C]//Renewable Energy Research and Applications, 2016:325-329.
- [14] 郝智学.含风储电力系统负荷频率控制策略研究[D].上海:上海电力学院,2018.  
Hao Xuezhi. The research of power system with wind power and energy storage system load frequency control[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2018.
- [15] 黄际元,李欣然,曹一家,等.面向电网调频应用的电池储能电源仿真模型[J].电力系统自动化,2015,39(18):20-24,74.  
Huang Jiyuan, Li Xinran, Cao Yijia, *et al.* Battery energy storage power supply simulation model for power grid frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18):20-24,74.
- [16] 王振浩,张延奇,李国庆,等.基于超级电容器的直流系统混合储能研究[J].电网技术,2010,34(4):158-162.  
Wang Zhenhao, Zhang Yanqi, Li Guoqing, *et al.* Research on hybrid energy storage for DC system of substations and power plants based on super capacitors[J]. Power System Technology, 2010, 34(4):158-162.

2010, 34(4):158-162.

[17] 彭春华,孙惠娟.基于非劣排序微分进化的多目标优化发电调度[J].中国电机工程学报,2009,29(34):71-76.  
Peng Chunhua, Sun Huijuan. Multi-objective optimization power dispatch based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34):71-76.

[18] 赵霞,张荣荣,赵瑞锋,等.CPS标准下AGC机组动态优化调度的改进模型[J].电工技术学报,2016,31(5):99-106.  
Zhao Xia, Zhang Rongrong, Zhao Ruifeng, et al. An extended dynamic optimization model for AGC generators dispatch under CPS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5):99-106.

[19] 路小俊,伊建伟,李炎.基于多目标网格自适应搜索算法的储能系统参与AGC优化控制策略[J].电网技术,2019,43(6):2116-2124.

Lu Xiaojun, Yin Jianwei, Li Yan. Energy storage system participation AGC optimization control strategy based on multi-objective grid adaptive search algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2116-2124.

[20] 刘光远,贺一,温万惠.禁忌搜索算法及应用[M].北京:科学出版社,2014.  
Liu Guangyuan, He Yi, Wen Wanhui. Taboo search algorithm and application[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[21] 姚静,方彦军,陈广.遗传和禁忌搜索混合算法在机组负荷分配中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(26):95-100.  
Yao Jing, Fang Yanjun, Chen Guang. Genetic-tabu search hybrid algorithm for unit economic load dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(26):95-100.

收稿日期:2020-05-30

修改稿日期:2020-10-13

(上接第33页)

SVPWM控制,改进基本电压矢量作用顺序及各矢量作用时间分配方案,根据基本电压矢量坐标与逆变器开关状态的对应关系确定初始电压作用矢量,结合参考电压所在区域信息(正三角形或倒三角形)为三个基本电压矢量分配作用时间,实现了五电平逆变器SVPWM调制算法的简化和优化。另外,对ANPC-5L逆变器中点电位及三相悬浮电容电压波动问题进行了分析,并提出了相应的解决策略。通过仿真及试验分析验证了算法的可行性以及拓扑结构的优越性,通过效率测试验证了ANPC-5L逆变系统的高效性。

参 考 文 献

[1] Zhu Junjie, Sun Xingfa, Nie Ziling, et al. Synchronous control strategy of dual five-level converters based on the improved SVPWM[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(14):2311-2318.

[2] 戴鹏,周凯,高爱杰,等.NPC/H桥五电平逆变器直流侧电容电压平衡控制[J].电机与控制学报,2019,23(3):42-50.  
Dai Peng, Zhou Kai, Gao Aijie, et al. DC-link capacitor voltage balance of NPC/H bridge five-level inverter[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3):42-50.

[3] 高跃,李永东.二极管钳位型五电平逆变器电容电压平衡域研究[J].电工技术学报,2008,23(1):77-83.  
Gao Yue, Li Yongdong. Voltage balance boundary of five-level diode clamped inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1):77-83.

[4] Tan Guojun, Deng Qingwei, Liu Zhan. An optimized SVP-

WM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1):386-395.

[5] 陈亚爱,石永帅,周京华,等.电力电子牵引变压器拓扑结构综述[J].电气传动,2018,48(10):89-96.  
Chen Yaai, Shi Yongshuai, Zhou Jinghua, et al. Overview of topological structure for power electronic traction transformer [J]. Electric Drive, 2018, 48(10):89-96.

[6] 李永东,肖曦,高跃.大容量多电平变换器[M].北京:科学出版社,2005.  
Li Yongdong, Xiao Xi, Gao Yue. Large capacity multilevel converter [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[7] 宋亮,熊博.60°坐标系下新型模块化多电平变流器空间矢量脉宽调制的简化通用算法[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(4):566-570,596.  
Song Liang, Xiong Bo. A simple generalized algorithm of space-vector PWM for a new type of modular multilevel converter based on 60° coordinate system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(4):566-570,596.

[8] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 57(7):2219-2230.

[9] 王琛琛,司夏河,杨超.五电平有源中点钳位型变换器电容电压平衡控制策略[J].北京交通大学学报,2016,40(3):25-31.  
Wang Chenchen, Si Xiahe, Yang Chao. Capacitor voltage balancing control strategy of a five-level ANPC converter[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(3):25-31.

收稿日期:2020-06-22

修改稿日期:2020-10-13