

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230697

考虑一次调频死区的风储协同调频机理分析及死区参数优化

李东东¹, 陈治廷¹, 徐波¹, 李沛泓¹, 陈浩²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

摘要: 目前, 调频死区对于风储联合调频的影响机理尚不明确, 且风储最优调频死区参数难以获得。为此, 对考虑一次调频死区的风储联合调频进行机理分析并提出最优的死区参数设置方案。首先, 依据风电机组与电池储能的不同调频特性确定对应的死区模型, 建立考虑风储一次调频死区的频率响应模型。其次, 分析调频死区内不同特征以及风储不同投入阶段对动态频率的影响, 进而分段解析求解最大频率偏差时域表达式。然后, 为兼顾调频效果与调频经济性, 提出基于改进多目标粒子群(improved multi-objective particle swarm optimization, IMOPSO)算法的调频死区参数寻优方法。最后, 仿真验证了将风储一次调频死区参数分别设置为 0.0579 Hz 和 0.0386 Hz 时所提方法的有效性。

关键词: 调频死区; 风储; 联合调频; 参数优化

Mechanism analysis and optimal dead zone parameter of wind-storage combined frequency regulation considering primary frequency regulation dead zone

LI Dongdong¹, CHEN Zhiting¹, XU Bo¹, LI Peihong¹, CHEN Hao²

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. East China Branch, State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: At present, the influence mechanism of the frequency regulation dead zone on wind-storage joint frequency regulation is not clear. Also it is difficult to obtain the optimal frequency regulation dead zone parameters of the wind storage. Thus this paper analyzes the mechanism of wind-storage combined frequency regulation considering the dead zone of primary frequency regulation, and proposes an optimal dead zone parameter setting scheme. First, from the different frequency regulation characteristics of wind turbines and battery energy storage, a corresponding dead zone model is established, and a frequency response model considering the dead zone of primary frequency regulation of wind storage is established. Second, the influence of different characteristics inside and outside the frequency regulation dead zone and different input stages of wind storage on the dynamic frequency are analyzed, and then the time-domain expression of the maximum frequency deviation is determined segmentally. Then, to take into account both the effect and economy of frequency regulation, an optimization method of frequency regulation dead zone parameters based on the improved multi-objective particle swarm optimization (IMOPSO) algorithm is proposed. Finally, a simulation verifies the effectiveness of the proposed method when the dead zone parameters of primary frequency regulation of wind storage are set to 0.0579 Hz and 0.0386 Hz respectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377111).

Key words: frequency regulation dead zone; wind-storage; combined frequency regulation; parameter optimization

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出, 我国电力系统新能源电源装机比例正日益增加^[1]。但随着具有高度不确定性的风能等可再生能源并网, 系统

惯性大幅下降, 传统机组的调频能力已无法满足高比例新能源电力系统下的调频需求^[2-5]。而电池储能具有响应速度快、参数可调节等特点, 可在短时间内向低惯量电力系统中提供大量有功功率以提供频率支撑^[6-9]。因此, 协调风电机组与电池储能联合参与系统一次调频是目前研究的热点之一^[10-13]。

在一次调频过程中, 电力系统的调频能力主要

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377111)

取决于调速器的调差系数、各类固有时间常数和死区与限幅等可调参数^[14-16]。在并网电源一次调频技术规定及试验导则中对各类电源一次调频参数设置及动态性能指标提出了明确的要求^[17]。然而,对于高比例新能源下的新型电力系统,死区参数设置问题仍然是个开放的问题,以往的文献很少研究一次调频死区取值问题^[18-20]。在进行相关仿真实验时均按照经验取值或将死区范围设置为相同,未考虑不同的死区设置对电力系统频率稳定的影响。考虑到死区的非线性,其对一次调频效果的影响认知并不清晰。目前我国对于风电机组与储能的死区范围设置的要求分别为 0.03~0.10 Hz 和 0.03~0.05 Hz,有学者指出不同调频死区参数的设置对调频效果产生不同的影响^[21-23],但也只是通过简单定性分析或大量仿真进行验证,未从机理上分析死区非线性带来的影响。因此,考虑设置合理的一次调频死区参数对于电力系统频率稳定具有重要意义。

对于死区参数设置问题,文献[24]研究了电池储能的延时时间和爬坡时间对于频率最低点和频率变化率的影响,对于电池储能参数设置的后续研究具有参考意义。通过对调速器死区建模,文献[25]研究死区对美国东部互联电网频率响应的影响。文献[26]提出一种分段函数与电池储能充电状态自适应因子相结合的一次调频死区整定方法,提高了电池储能对电网频率偏差的灵敏度。文献[27]对比分析了增强型死区及普通型死区的区别与特征,研究了不同死区建模对于系统频率稳定的影响。文献[28]应用描述函数法线性化带死区的调速器,提出了基于一阶模型的最小频率估计算法,验证不同死区范围对频率最低值的影响。但以上均是对单一调频资源的调频死区参数设置问题进行研究,对于死区协调问题研究较少。而且,由于风电机组与电池储能双重死区的存在,两者投入一次调频的时间及次序导致频率动态响应过程更为复杂。

因此,考虑一次调频死区,本文分析风储联合调频过程并优化其参数。首先,依据风电机组与电池储能的不同调频特性建立对应的死区模型,建立含风储一次调频死区的频率响应模型。其次,分析调频死区内不同特征以及风储不同投入阶段对动态频率的影响,进而分段解析求解最大频率偏差时域表达式。然后,为兼顾调频效果与调频经济性,提出基于改进多目标粒子群算法的调频死区参数寻优方法。最后,通过仿真验证死区参数设置的合理性。

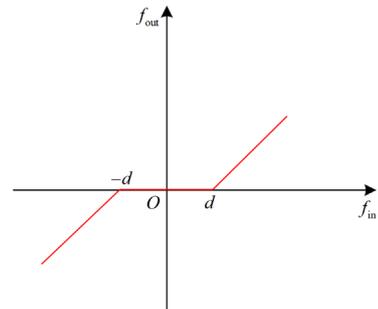
1 死区设置方式及动态调频三阶段分析

风电机组与电池储能联合参与电网一次调频

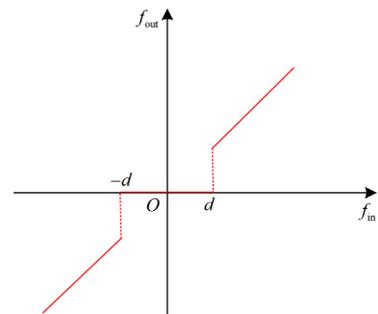
时,两者的死区范围的设置都不宜过小或过大,若死区范围设置过小,则会导致风电机组与电池储能在较小扰动时都会连续频繁动作,增加成本,调频经济性大大降低;若死区范围设置较大,则调频反应较慢,不利于频率的快速恢复,甚至可能触发低频减载,从而导致严重的频率安全问题。

目前,广泛使用的两种调频死区模型为普通型死区和阶跃型死区,分别如图 1(a)和图 1(b)^[29]所示。图中: d 表示死区阈值; f_{in} 和 f_{out} 分别表示死区输入信号与死区输出信号; Δf 表示频率偏差。两种死区设置模式下输出的差异,如图 1(c)所示。普通型死区(蓝色虚线)与阶跃型死区(红色实线)的主要区别在于频率偏差到达死区前后输出量是否保持连续。当输入信号越过死区时图中普通型死区输出量可以保持连续,但实际频率与输出频率有频率偏差(其值为 d)。而阶跃型死区虽能够对频率偏差量有较为精准的反馈,及时响应参与一次调频,但不连续变化会对系统及其机组运行稳定产生不利影响^[30]。

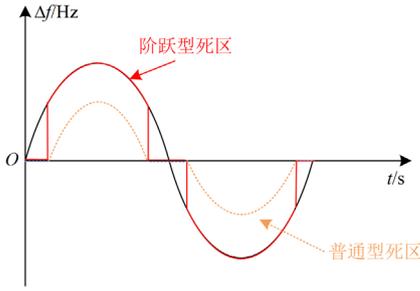
为充分发挥电池储能响应速度快、爬坡能力强的优势,将电池储能与风电机组按批次投入,在扰动初期为系统提供强有力的频率支撑。基于此,本文按照风储死区阈值进行划分,将动态调频过程分为三个阶段,如图 2 所示。图中, t_0 和 t_1 分别表示电池储能与风电机组投入调频的时刻。当 $t=0$ 时系统发生功率缺额。第一阶段($0\sim t_0$),风储调频都不动作;第二阶段($t_0\sim t_1$)仅电池储能动作;第三阶段(t_1 以后)风电机组与电池储能都应动作。



(a) 普通型频率死区



(b) 阶跃型频率死区



(c) 两种不同死区模式下的动作示意图
图 1 两种不同的频率死区类型

Fig. 1 Two different frequency dead zone types

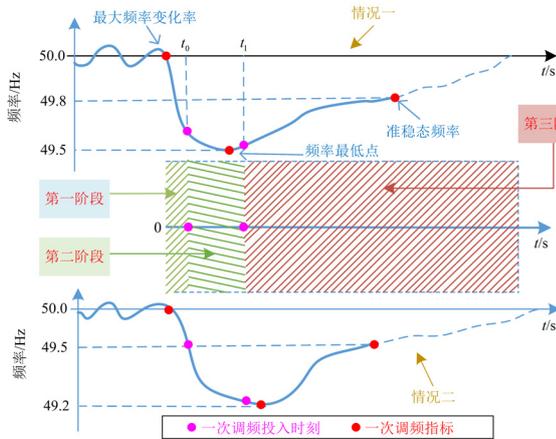


图 2 大功率缺失下系统动态调频三阶段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the three-stage dynamic frequency regulation of the system in the absence of high power

在动态频率响应过程中，需要分析频率最低点出现的时刻：频率最低点不会出现在第一阶段，因为该阶段没有调频资源投入。如图 2 所示，频率最低点有可能出现在第二阶段或第三阶段，由于调频资源投入时刻的不同，导致最大频率偏差时域表达式有所区别，因此需要分两种情况讨论，以满足不同运行状态下的系统功率缺失。

由于在扰动初期对调频速度有更高的要求，而阶跃型死区有较高的精度要求，适用于能精准控制输出功率的电池储能装置，因此采用该死区设置方案。考虑到风速不确定性对风机调频的影响，为了有效减少风机磨损以提高调频经济性，往往采用普通型死区^[20]。由此依据图 1(a)和图 1(b)可得，电池储能与风电机组调频死区输入 $\Delta f(t)$ 与其输出 $x_b(t)$ 及 $x_w(t)$ 的表达式分别如式(1)与式(2)所示。

$$x_b(t) = \begin{cases} \Delta f(t) & |\Delta f(t)| > d_1 \\ 0 & |\Delta f(t)| \leq d_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x_w(t) = \begin{cases} \Delta f(t) - d_2 & \Delta f(t) > d_2 \\ 0 & |\Delta f(t)| \leq d_2 \\ \Delta f(t) + d_2 & \Delta f(t) < -d_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， d_1 和 d_2 分别表示电池储能与风电机组的死区阈值。

2 考虑一次调频死区的风储频率响应模型

建立考虑一次调频死区环节的风储频率响应模型，如图 3 所示。

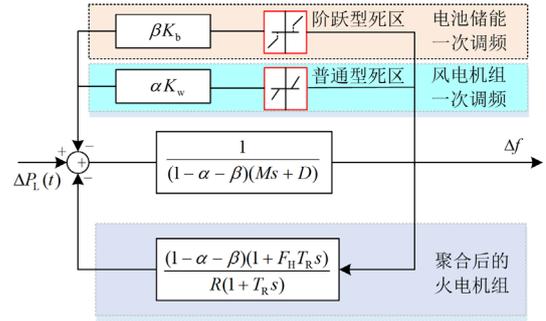


图 3 含一次调频死区的风储频率响应模型

Fig. 3 Frequency response model of wind-storage with primary frequency regulation dead zone

图中： M 为惯性时间常数； D 为阻尼系数； R 为火电机组静调差系数； T_R 为火电机组中间再热蒸汽容积时间常数； F_H 为高压缸输出功率占汽轮机总输出的百分比； α 和 β 分别表示风电机组与电池储能的容量占比； $\Delta P_L(t)$ 为系统阶跃功率扰动； K_w 和 K_b 分别表示风电机组与电池储能调频时设置的一次调频系数。风电机组一次调频输出功率 $\Delta P_w(t)$ 可折算为

$$\Delta P_w(t) = -\alpha K_w x_w(t) \quad (3)$$

同理，电池储能一次调频输出功率 $\Delta P_b(t)$ 可折算为

$$\Delta P_b(t) = -\beta K_b x_b(t) \quad (4)$$

由此可将对应的火电机组一次调频输出 $\Delta P_G(t)$ 折算为 $-\Delta f(t)[(1-\alpha-\beta)(1+F_H T_R s)] / R(1+T_R s)$ 。

虽然死区是非线性环节，但分段线性可导^[31]。由于动态调频过程不同阶段的存在，可能会出现连续不可导的分界点，但由于死区分段线性可导，从而分界点间的频率响应模型是线性的。分析可知，非线性频率响应模型可以根据不同阶段转变为若干个线性模型，通过保证分界点前后的连续性解析求解。基于此，建立计及风储死区的频率动态时域微分方程，考虑死区内外各自特性以及风储不同投入

阶段分段解析求解。

根据图 3, 建立同时含状态变量 $x_w(t)$ 、 $x_b(t)$ 和 $\Delta f(t)$ 的时域微分方程, 整理后如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{f}(t) + \frac{MR + DRT_R + F_H T_R}{MT_R R} \Delta \dot{f}(t) + \frac{1 + DR}{MT_R R} \Delta f(t) + \\ \frac{\beta K_b T_R}{MT_R (1 - \alpha - \beta)} \dot{x}_b(t) + \frac{\beta K_b}{MT_R (1 - \alpha - \beta)} x_b(t) + \\ \frac{\alpha K_w T_R}{MT_R (1 - \alpha - \beta)} \dot{x}_w(t) + \frac{\alpha K_w}{MT_R (1 - \alpha - \beta)} x_w(t) = \\ \frac{\Delta P_L(t) + T_R \Delta \dot{P}_L(t)}{MT_R (1 - \alpha - \beta)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta \ddot{f}(t)$ 和 $\Delta \dot{f}(t)$ 分别表示 $\Delta f(t)$ 的二阶导数和一阶导数; $\Delta \dot{P}_L(t)$ 为冲激函数。

式(5)中, 系统状态不连续、风储动作时间不同、输出量不相同, 因此需要分析不同阶段风储调频对频率动态的影响。

3 求解最大频率偏差

3.1 频率偏差时域解

根据图 2, 经分段解析、按次序投入及冲激函数平衡法原理等一系列推导, 得到风储参与一次调频频率偏差表达式, 具体推导以及参数、变量含义详见附录 A。

当风储分别采用“普通型-阶跃型”死区设置时, 按照调频死区划分调频阶段, 利用死区边界条件进行分段线性化求解, 最终得到频率偏差时域解 $\Delta f_1(t)$ 为

$$\Delta f_1(t) = \begin{cases} C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{R \Delta P_L}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta)} & 0 < t \leq t_0 \\ C_3 e^{\lambda_3(t-t_0)} + C_4 e^{\lambda_4(t-t_0)} + \frac{R \Delta P_L}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta) + \beta K_b R} & t_0 < t \leq t_1 \\ C_5 e^{\lambda_5(t-t_1)} + C_6 e^{\lambda_6(t-t_1)} + \frac{R(\Delta P_L - \alpha K_w d_2)}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta) + \beta K_b R + \alpha K_w R} & t > t_1 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 最大频率偏差时域表达式

由于风储并非同时投入, 需要根据式(6)分类求解系统最大频率偏差, 即对应于图 2 中的情况一与情况二。

情况一: 当 $t_0 < t \leq t_1$ 时, 此时频率最低点出现在风机投入一次调频前。令 $\Delta \dot{f}(t) = 0$, 可求得频率最低点所对应时刻 $t_{1,\max}$ 的表达式为

$$t_{1,\max} = \frac{\ln(-C_4 \lambda_4) - \ln(-C_3 \lambda_3)}{\lambda_3 - \lambda_4} + t_0 \quad (7)$$

由此得到情况一下的最大频率偏差表达式为

$$\Delta f_{1,\max} = C_3 e^{\lambda_3 t_{1,\max}} + C_4 e^{\lambda_4 t_{1,\max}} + \frac{R \Delta P_L}{(1 - \alpha - \beta)(DR + 1) + \beta K_b R} \quad (8)$$

情况二: 当 $t > t_1$ 时, 频率最低点出现在风储共同参与一次调频后。令 $\Delta \dot{f}(t) = 0$, 可求得频率最低点所对应时刻 $t_{2,\max}$ 的表达式为

$$t_{2,\max} = \frac{\ln(-C_6 \lambda_6) - \ln(-C_5 \lambda_5)}{\lambda_5 - \lambda_6} + t_1 \quad (9)$$

由此得到情况二下的最大频率偏差表达式为

$$\Delta f_{2,\max} = C_5 e^{\lambda_5 t_{2,\max}} + C_6 e^{\lambda_6 t_{2,\max}} + \frac{R(\Delta P_L - \alpha K_w d)}{(1 - \alpha - \beta)(DR + 1) + \alpha K_w R + \beta K_b R} \quad (10)$$

综合考虑上述两种情况, 可以得到风储按顺序依次投入一次调频时的最大频率偏差 Δf_{\max} 表达式为

$$\Delta f_{\max} = \max \{ \Delta f_{1,\max}, \Delta f_{2,\max} \} \quad (11)$$

4 风储一次调频死区参数优化数学模型

4.1 目标函数

在设置风储联合一次调频死区参数时, 不仅要使电力系统受到扰动时最大频率偏差尽可能小, 也要尽可能地提高调频经济性。因此, 本文以调频效果与调频经济性为目标函数进行研究, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min \Delta f_{\max}(d_1, d_2) = \Delta f_{\max} \\ \min J(d_1, d_2) = J_1 + J_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, J_1 和 J_2 分别为风电机组一次调频成本和电池储能一次调频成本。需要指出的是, 由于目标函数中各指标的量纲和量级不同, 为保证指标公正性, 需要进行无量纲转化。

1) 风电机组一次调频成本

风电机组通过改变桨距角的大小参与一次调频, 而桨距角的调节会造成不同程度的机械磨损, 故以风电机组输出功率偏差的二次函数来设计调频成本^[32], 如式(13)所示。

$$J_1 = a_1 \sum_{i=1}^{n_w} \Delta P_{w,i}^2(t) \quad (13)$$

式中: a_1 为风电机组功率偏移的成本调节系数; n_w 为风电机组台数; $\Delta P_{w,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 台风电机组的有功功率变化量。

2) 电池储能一次调频成本

影响电池储能一次调频成本的因素有循环使用寿命衰减、电池老化等^[33-34]。而循环使用寿命衰

减往往由电池储能大功率运行与较大的荷电状态 (state of charge, SoC) 偏移导致。其 SoC 变化可由式 (14) 表示。

$$\lambda_{\text{SoC}}(t) = \lambda_{\text{SoC},0} + \frac{\int_0^t \Delta P_b(t) dt}{E_{\text{rated}}} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{\text{SoC},0}$ 为电池储能初始 SoC 状态; E_{rated} 为电池储能的额定容量, 如式 (15) 所示。

$$E_{\text{rated}} = \max \left\{ \frac{\max \left[\int_0^t \Delta P_b(t) dt \right]}{\lambda_{\text{SoC},\max} - \lambda_{\text{SoC},0}}, \frac{-\min \left[\int_0^t \Delta P_b(t) dt \right]}{\lambda_{\text{SoC},0} - \lambda_{\text{SoC},\min}} \right\} \quad (15)$$

式中, $\lambda_{\text{SoC},\min}$ 和 $\lambda_{\text{SoC},\max}$ 分别为电池储能 SoC 的最小值和最大值。

与风电机组类似, 电池储能调频成本由功率偏差及 SoC 偏差程度的二次函数两部分组成, 如式 (16) 所示。

$$J_2 = a_2 \sum_{j=1}^{n_b} \Delta P_{b,j}^2(t) + a_3 \sum_{j=1}^{n_b} (\lambda_{\text{SoC},j} - \lambda_{\text{SoC},0})^2 \quad (16)$$

式中: a_2 和 a_3 分别为考虑电池储能充放电及 SoC 偏差的成本调节系数; n_b 为电池储能个数; $\Delta P_{b,j}$ 为 t 时刻第 j 台电池储能的有功出力变化量; $\lambda_{\text{SoC},j}$ 为第 j 台电池储能的 SoC 值。

4.2 约束条件

风储联合一次调频受到功率平衡约束、发电机组约束、电池储能约束、风电机组约束、死区约束及一次调频效果约束的限制, 分别如式 (17)~式 (22) 所示。其中, 风储死区上下限 d_1 、 d_2 可参照《并网电源一次调频技术规定及试验导则》来确定。

$$P_G(t) + \sum_{i=1}^{n_w} P_{w,i}(t) + \sum_{j=1}^{n_b} P_{b,j}(t) - P_L(t) = 0 \quad (17)$$

$$P_G^{\min} \leq P_G(t) \leq P_G^{\max} \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{b,j}^{\min} \leq P_{b,j}(t) \leq P_{b,j}^{\max} \\ \lambda_{\text{SoC},\min} \leq \lambda_{\text{SoC}}(t) \leq \lambda_{\text{SoC},\max} \end{cases} \quad (19)$$

$$P_{w,i}^{\min} \leq P_{w,i}(t) \leq P_{w,i}^{\max} \quad (20)$$

$$\begin{cases} 0.03 \leq d_1 \leq 0.05 \\ 0.03 \leq d_2 \leq 0.1 \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta f_1^{\min} \leq \Delta f \leq \Delta f_1^{\max} \quad (22)$$

式中: $P_G(t)$ 为发电机组出力; P_G^{\max} 和 P_G^{\min} 分别为发电机组出力上限和下限; $P_{b,j}$ 为第 j 台电池储能有功出力; $P_{b,j}^{\max}$ 和 $P_{b,j}^{\min}$ 分别为第 j 台电池储能有功出力上限和下限; $P_{w,i}$ 为第 i 台风电机组有功出力;

$P_{w,i}^{\max}$ 和 $P_{w,i}^{\min}$ 分别为第 i 台风电机组有功出力上限和下限; $P_L(t)$ 为扰动负荷大小; Δf_1^{\max} 和 Δf_1^{\min} 分别为一次调频允许的频率上限和下限。

5 基于改进多目标粒子群算法的死区参数寻优

5.1 传统粒子群算法

传统的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法的速度与位置更新公式如式 (23) [35] 所示。

$$\begin{cases} v_i^r = wv_i^{r-1} + c_1r_1(p_{\text{best},i}^r - x_i^r) + c_2r_2(g_{\text{best}}^r - x_i^r) \\ x_i^{r+1} = x_i^r + v_i^r \end{cases} \quad (23)$$

式中: v_i^r 和 x_i^r 分别表示第 r 次迭代时, 第 i 个粒子的速度和位置; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 分别为个体学习因子与社会学习因子; $p_{\text{best},i}^r$ 表示第 i 个粒子截止到第 r 次迭代的最优位置; g_{best}^r 表示截止到第 r 次迭代所有粒子的最佳位置; r_1 和 r_2 为随机数。

5.2 改进后的多目标粒子群算法

将多目标粒子群算法作为搜索机制, 采用多目标优化方法, 可以有效解决传统粒子群算法会陷入局部最优的问题 [36]。在粒子群算法中, w 、 c_1 和 c_2 是核心调节参数, 都可以起到平衡局部搜索与全局搜索的能力。改进后的多目标粒子群 (improved multi-objective particle swarm optimization, IMOPSO) 算法通过改变惯性权重及学习因子实现良好的搜索能力。

根据粒子与种群适应度值动态调整 w , 如式 (24) 所示。

$$w = \begin{cases} w_{\min} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times (L_i - L_{\min})}{L_{\text{avg}} - L_{\min}} & L_i \leq L_{\text{avg}} \\ w_{\max} & L_i > L_{\text{avg}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: w_{\min} 和 w_{\max} 分别为权重系数的最小值与最大值; L_i 、 L_{avg} 和 L_{\min} 分别为对应粒子 i 的适应度值、所有粒子适应度函数平均值与最小值。

为了更加注重粒子种群的位置信息, 通过调整学习因子以保持收敛速度和搜索结果, 两者配合调整种群适应度, 如式 (25) 所示。

$$\begin{cases} c_1 = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min}) \frac{r}{r_{\max}} \\ c_2 = c_{\min} - (c_{\max} - c_{\min}) \frac{r}{r_{\max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: c_{\min} 和 c_{\max} 分别为学习因子的下限和上限; r_{\max} 为最大迭代次数。

5.3 算法流程

IMOPSO 算法的求解流程如图 4 所示。

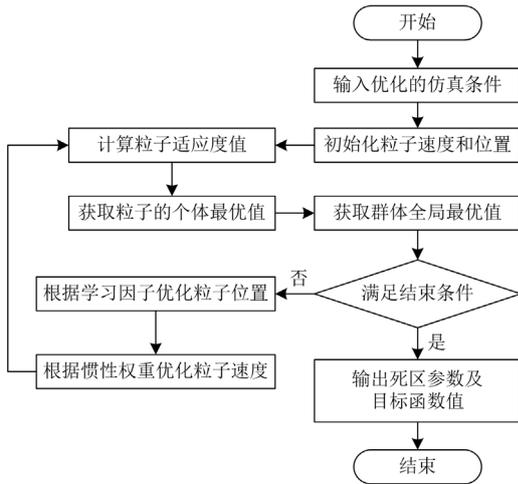


图4 基于 IMOPSO 算法的死区参数寻优流程图

Fig. 4 Flow chart of dead zone parameter optimization for IMOPSO algorithm

6 仿真分析

搭建如图 5 所示的四机两区系统。其中, G1、G2 和 G3 的额定容量分别为 150 MW、200 MW 和 100 MW; 风电场由 100 台额定容量为 1.5 MW 的 DFIG 机组组成; 电池储能的额定容量为 12 MW/3 MWh。负荷 1 和负荷 2 分别为相应区域的稳态负荷, 均为 175 MW。

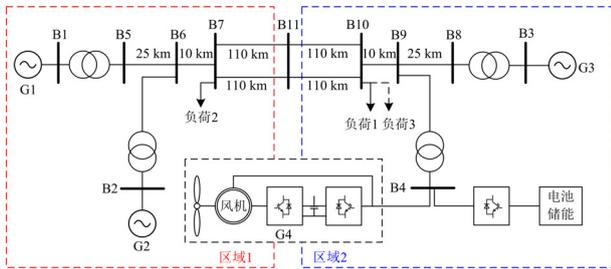


图5 IEEE 四机两区系统算例

Fig. 5 IEEE four-machine two-area system

仿真场景: 当 $t = 2$ s 时, 区域 2 突增 60 MW 的扰动负荷(即负荷 3)。

算法参数: 粒子数为 50, $c_{\max} = 2$, $c_{\min} = 0.2$, $w_{\min} = 0.4$, $w_{\max} = 0.9$, 迭代次数为 100。其他参数如附录 B^[37]所示。

用 IMOPSO 算法求解第 4 节中的多目标函数, 其 Pareto 前沿如图 6 所示。由图 6 可知, IMOPSO 算法所求得的 Pareto 前沿分布均匀, 能够协调调频经济性与调频效果间的矛盾, 为电站根据现场实际情况选择合适的一次调频死区范围提供了参考依据。

理论上, 所有的 Pareto 非支配解都能够作为最后的控制参数, 但在电站实际运行时, 无法描述自

身对各因素的偏向程度。因此, 本文采用基于理想均衡点的 IMOPSO 算法^[38], 具体如图 6 所示。图中, 方案 A 为仅考虑风储一次调频效果的单目标优化; 方案 B 为综合考虑风储一次调频效果和调频经济性的多目标优化; 方案 C 为仅考虑风储一次调频经济性的单目标优化。

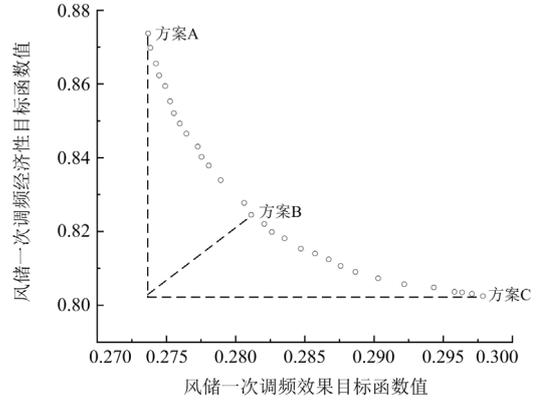


图6 采用 IMOPSO 算法所得 Pareto 前沿

Fig. 6 Pareto front by IMOPSO algorithm

对应于不同情况下死区参数寻优及目标函数参考值如表 1 所示。由图 6 和表 1 可知, 方案 A 中风储一次调频死区设置接近于国标中给定的下限值, 此时具有最好的调频效果, 最大频率偏差为 0.2739 Hz, 但调频经济性最差。相较于方案 B 和方案 C, 调频成本分别提高了 5.85% 和 8.87%。

表 1 死区参数寻优及目标函数参考值结果

Table 1 Dead zone parameter optimization and objective

方案编号	function reference value			
	d_1	d_2	$\Delta f_{\max} / \text{Hz}$	J
A	0.0302	0.0303	0.2739	0.8737
B	0.0386	0.0579	0.2816	0.8254
C	0.0497	0.9983	0.2979	0.8025

方案 C 中的风储一次调频死区设置接近于国标中给定的上限值, 此时具有最好的调频经济性, 但调频效果最差, 最大频率偏差达到 0.2979 Hz。

方案 B 同时考虑了调频效果和调频经济性, 当 d_1 和 d_2 分别设置为 0.0386 和 0.0579 时, 此时最大频率偏差为 0.2816 Hz, 相较于方案 A 调频成本降低 5.53%, 相较于方案 C 调频效果提高 5.47%。

在此基础上, 分别将 3 种方案的结果应用于图 5 所示的 IEEE 四机两区系统进行验证。图 7 和图 8 分别表示方案 A、B 和 C 3 种情况在阶跃扰动下系统频率随时间的变化情况和电池储能 SoC 随时间的变化情况。

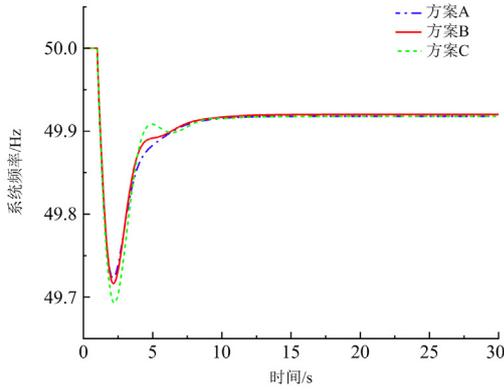


图7 不同方案下频率变化曲线

Fig. 7 Frequency variation curve under different schemes

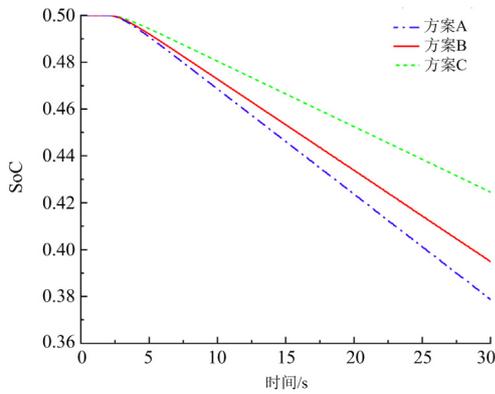


图8 不同方案下 SoC 变化曲线

Fig. 8 SoC variation curve under different schemes

由图7和图8可得,方案A的最大频率偏差最小,仿真结果与IMOPSO算法结果一致,但此时电池储能的SoC下降速度最快,30s内从0.5下降至0.378;方案C的最大频率偏差最大,但电池储能的SoC下降速度最缓,30s内从0.5下降至0.425;方案B最大频率偏差大小和SoC偏移大小都处在方案A和方案C之间,其中SoC在30s内从0.5下降至0.395,相较于方案A提高了3.4%,相较于方案C降低了6%。

综上所述,本文提出的方案B能够在风储一次调频协调问题上兼顾调频经济性与调频效果的影响,既可以有效抑制系统频率的进一步恶化,又可以保证调频的经济性,为后续场站的风储死区参数设置提供参考。

7 结论

针对风储一次调频非线性死区环节,本文对考虑一次调频死区的风储联合调频进行机理分析并提

出最优的死区参数设置,结论如下:

1) 本文提出了一种采用改进后的多目标粒子群算法对死区参数寻优的方法。结果表明,当风储死区分别设置为0.0579 Hz和0.0386 Hz时,能够兼顾调频经济性与调频效果,较方案A的调频成本降低5.53%,较方案C的调频效果提高了5.47%。

2) 本文所提方法能够为风储一次调频死区参数设置提供参考。在不同运行工况下,设置不同的风储死区方案以获得最佳调频效果与调频经济性。

附录A

如图2所示,当处于第一阶段时,风储都未参加系统频率响应, $x_b(t) = x_w(t) = \dot{x}_b(t) = \dot{x}_w(t) = 0$, 代入式(5)中求解,可得到 $\Delta f(t)$ 的通解为

$$\begin{cases} \Delta f(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \Delta f_\delta \\ \Delta f_\delta = \frac{R\Delta P_L}{(1+DR)(1-\alpha-\beta)} \end{cases} \quad (A1)$$

式中: C_1 、 C_2 为常数; λ_1 、 λ_2 为微分方程(5)对应特征方程的特征根; Δf_δ 为式(5)此时的特解。

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2} \\ \lambda_2 = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2} \\ a_1 = \frac{MR + DRT_R + F_H T_R}{MT_R R} \\ a_2 = \frac{1+DR}{MT_R R} \end{cases} \quad (A2)$$

为了求解 C_1 、 C_2 的值,需要利用在0时刻之后瞬间 ($t=0_+$) 的两个初始条件并结合微分方程进行求解,否则无法获得时域解析。由于在0时刻方程存在冲激函数项 $\Delta \dot{P}_L(t)$, 根据冲激函数平衡法原理,构建 $\Delta \dot{f}(t)$ 的表达式,如式(A3)所示。

$$\Delta \dot{f}(t) = \sigma_1 \delta(t) + \zeta_1 u(t) + g(t) \quad (A3)$$

式中: σ_1 、 ζ_1 为待定系数; $\delta(t)$ 为冲激函数; $u(t)$ 为单位阶跃函数; $g(t)$ 为在0时刻连续的函数。由于在功率扰动前,频率满足 $\Delta f(0_-) = \Delta \dot{f}(0_-) = 0$, 则系统初始条件为

$$\begin{cases} \Delta f(0_+) = \Delta f(0_-) = 0 \\ \Delta \dot{f}(0_+) = \Delta \dot{f}(0_-) + \sigma_1 = \frac{\Delta P_L}{M(1-\alpha-\beta)} \end{cases} \quad (A4)$$

由此可得到 C_1 、 C_2 的值为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\Delta P_L (MR\lambda_2 + DR + 1)}{M(1 - \alpha - \beta)(\lambda_1 - \lambda_2)(1 + DR)} \\ C_2 = \frac{\Delta P_L (MR\lambda_1 + DR + 1)}{M(1 - \alpha - \beta)(\lambda_2 - \lambda_1)(1 + DR)} \end{cases} \quad (A5)$$

由式(A1)可得到第一阶段的频率动态偏差时域解为

$$\Delta f(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{R\Delta P_L}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta)} \quad (A6)$$

类似地, 当调频过程进行到第二阶段时, 频率偏差越过电池储能调频死区阈值而未达到风机死区阈值, 考虑到到达死区阈值时式(5)可能存在不连续的情况, 因此根据死区后瞬间 t_{0+} 的边界条件进行求解, 最终得到第二阶段的频率动态偏差时域解为

$$\Delta f(t) = C_3 e^{\lambda_3(t-t_0)} + C_4 e^{\lambda_4(t-t_0)} + \frac{R\Delta P_L}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta) + \beta K_b R} \quad (A7)$$

式中: C_3 、 C_4 为常数; λ_3 、 λ_4 为调频第二阶段对应特征方程的特征根。

同理, 当调频过程进行到第三阶段时, 频率偏差越过风电机组调频死区阈值, 风储共同参与一次调频, 由于风电机组采用的是普通型死区, 因此 $x_w(t)$ 在 t_1 前后是连续的, 不会发生突变, 此时 $\dot{x}_w(t)$ 在 t_1 时刻发生阶跃变化, 最终得到第三阶段的频率动态偏差时域解为

$$\Delta f(t) = C_5 e^{\lambda_5(t-t_1)} + C_6 e^{\lambda_6(t-t_1)} + \frac{R(\Delta P_L - \alpha K_w d_2)}{(1 + DR)(1 - \alpha - \beta) + \beta K_b R + \alpha K_w R} \quad (A8)$$

式中: C_5 、 C_6 为常数; λ_5 、 λ_6 为调频第三阶段对应特征方程的特征根。

附录 B

表 B1 本文仿真参数取值

Table B1 Simulation parameters of this paper

参数	数值	参数	数值
M/s	5	a_1	1.0
$D/p.u.$	1	a_2	1.5
$R/p.u.$	0.05	a_3	1.5
T_R/s	10	$\lambda_{SoC,0}$	0.5
$F_H/p.u.$	0.3	$\lambda_{SoC,min}$	0.1
K_w/s	20	$\lambda_{SoC,max}$	0.9
K_b/s	50	$\Delta f_h^{max}/Hz$	50.5
$\Delta f_l^{min}/Hz$	49.5	—	—

参考文献

[1] WANG Han, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. A

comprehensive review for wind, solar, and electrical load forecasting methods[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 9-30.

[2] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.

ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.

[3] EL-BAHAY M H, LOTFY M E, EL-HAMEED M A. Effective participation of wind turbines in frequency control of a two-area power system using coot optimization[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 230-244.

[4] 郭良杰, 王德林, 谢棚, 等. 高风电渗透下电网调峰运行时的频率稳定控制策略研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 103-113.

GUO Liangjie, WANG Delin, XIE Peng, et al. Research on frequency stability control strategy of power grid peak shaving operation under high wind power penetration[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 103-113.

[5] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.

LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.

[6] 杨永辉, 谢丽蓉, 李佳明, 等. 基于模糊控制的储能参与一次调频综合控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 38-45.

YANG Yonghui, XIE Lirong, LI Jiaming, et al. Integrated control strategy of energy storage participating in primary frequency regulation based on fuzzy control[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 38-45.

[7] 谢学渊, 廖长风, 詹世军, 等. 考虑 N-K 故障下系统频率稳定性的储能电站优化规划[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 8-13.

XIE Xueyuan, LIAO Changfeng, ZHAN Shijun, et al. Optimal planning of energy storage power station considering system frequency stability under N-K fault[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 8-13.

[8] 索克兰, 程林, 许鹤麟, 等. 提升电池储能系统经济性研究方法综述[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 163-178.

SUO Kelan, CHENG Lin, XU Helin, et al. A review of research methods for improving the economy of battery energy storage system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 163-178.

- [9] 乔志杰, 马临超. 适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 75-84, 91.
QIAO Zhijie, MA Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 75-84, 91.
- [10] 徐波, 俞向栋, 杨逸欣, 等. 基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 13-24.
XU Bo, YU Xiangdong, YANG Yixin, et al. Distributed wind-storage coordinate frequency control strategy based on a multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 13-24.
- [11] SHIM J W, VERBIĆ G, ZHANG N, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6193-6205.
- [12] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [13] GUAN M. Scheduled power control and autonomous energy control of grid-connected energy storage system (ESS) with virtual synchronous generator and primary frequency regulation capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(2): 942-954.
- [14] 王凡, 李海峰, 胥国毅, 等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 1-8.
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.
- [15] VOROBEV P, GREENWOOD D M, BELL J H, et al. Deadbands, droop, and inertia impact on power system frequency distribution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3098-3108.
- [16] 崔幼石, 严干贵, 刘耀芮, 等. 一种基于双馈风机锁相环动态响应的风-火协同调频策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 38-45, 77.
CUI Youshi, YAN Gangui, LIU Zhaorui, et al. Wind-thermal power coordinated frequency regulation strategy based on dynamic response of phase-locked loop for double-fed wind turbine[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 38-45, 77.
- [17] 中国电力企业联合会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [18] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 85-93.
NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [19] 李军徽, 高卓, 李翠萍, 等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 52-59.
LI Junhui, GAO Zhuo, LI Cuiping, et al. Control strategy for dynamic task coefficient based primary frequency regulation of wind power assisted by energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 52-59.
- [20] ZHU D, ZHANG Y J A. Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 555-565.
- [21] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [22] 张健, 李文锋, 王晖, 等. 多电源梯级调频方案及风电场级调频时序优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 93-100.
ZHANG Jian, LI Wenfeng, WANG Hui, et al. Multi-source cascaded frequency modulation scheme and time-sequence optimization strategy of frequency modulation at level of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 93-100.
- [23] 孙晓强, 刘鑫, 程林, 等. 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1760-1765.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Lin, et al. Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in northwest power grid based on coordinated control of multi-frequency regulation resources[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1760-1765.
- [24] BROGAN P V, BEST R J, MORROW D J, et al. Effect of BESS response on frequency and RoCoF during

- underfrequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 575-583.
- [25] KOU G, MARKHAM P, HADLEY S, et al. Impact of governor deadband on frequency response of the US eastern interconnection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(3): 1368-1377.
- [26] LI S, XU Q, XIA Y, et al. Comprehensive setting and optimization of Dead-Band for BESS participate in power grid primary frequency regulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108195.
- [27] 高琴, 刘清晨, 陈亦平, 等. 不同调速器死区特性对系统频率稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3575-3581.
- GAO Qin, LIU Qingchen, CHEN Yiping, et al. Influence of different deadbands on the frequency stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3575-3581.
- [28] FAN C W, WANG X R, TENG Y F, et al. Minimum frequency estimation of power system considering governor deadbands[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(15): 3814-3822.
- [29] 谢棚, 王德林, 郭良杰, 等. 调速器死区对水电高占比电力系统频率稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 89-96.
- XIE Peng, WANG Delin, GUO Liangjie, et al. Analysis of influence of governor deadband on frequency stability of power system with high proportion of hydropower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 89-96.
- [30] 张峰, 游欢欢, 丁磊. 新能源一次调频死区影响机理建模及系数修正策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 158-167.
- ZHANG Feng, YOU Huanhuan, DING Lei. Influential mechanism modelling of dead band in primary frequency regulation of renewable energy and its coefficient correction strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 158-167.
- [31] 薛安成, 刘晓博, 王嘉伟, 等. 含增强型死区的单机系统频率振荡的轨线滑动及其分岔特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7475-7485.
- XUE Ancheng, LIU Xiaobo, WANG Jiawei, et al. Sliding and bifurcation characteristics for the trajectory of frequency oscillations in a single hydro-machine power system with enhanced dead zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7475-7485.
- [32] 董天翔, 翟保豫, 李星, 等. 风储联合系统参与频率响应的优化控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3980-3989.
- DONG Tianxiang, ZHAI Baoyu, LI Xing, et al. Optimal control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3980-3989.
- [33] BARRÉ A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 680-689.
- [34] 李盈, 赵伟, 赵立宁, 等. 基于电池储能 SOC 的调峰、调频混合控制策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 48-55, 74.
- LI Ying, ZHAO Wei, ZHAO Lining, et al. Mixed control strategy of peak regulation and frequency modulation based on SOC of battery energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 48-55, 74.
- [35] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
- YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [36] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 116-124.
- LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 116-124.
- [37] TAN Z, LI X, HE L, et al. Primary frequency control with BESS considering adaptive SoC recovery[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105588.
- [38] JIANG R H, YIN H B, PENG K W, et al. Multi-objective optimization, design and performance analysis of an advanced trigenerative micro compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 323-333.

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-08-14

作者简介:

李东东(1976—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源并网与智能用电。E-mail: psldd@163.com

(编辑 周金梅)