

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230400

提升火电机组一次调频性能的火电-储能一体化系统研究

高嵩¹, 李军¹, 宋辉², 丁磊², 张陈辉²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250000; 2. 山东大学, 山东 济南 250061)

摘要: 提出了一种火电-储能一体化系统的构造方法, 并设计了协同调频控制策略以改善火电机组一次调频性能。在严重有功扰动场景下, 利用储能装置快速响应能力提升了火电机组的一次调频响应速率, 改善系统频率跌落深度。在负荷日常波动场景下, 利用储能装置响应一次调频指令的高频分量, 抑制了火电机组一次调频功能的频繁动作。此外, 提出了储能能量恢复控制策略, 采用火电充裕的能量恢复储能荷电状态, 避免储能的过度充放。算例分析表明, 所提方法可有效提升火电机组的一次调频性能, 并能够有效维持运行过程中储能的荷电状态。

关键词: 火电机组; 储能; 一体化系统; 一次调频; 协同控制策略

An integrated thermal power-energy storage system for improving primary frequency regulation performance of thermal power units

GAO Song¹, LI Jun¹, SONG Hui², DING Lei², ZHANG Chenhui²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China;

2. Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A construction method for an integrated thermal power-energy storage system is proposed. Also a coordinated frequency control strategy is designed to improve the primary frequency control performance of the thermal power unit. In severe active power disturbance scenarios, the rapid response capability of energy storage devices is leveraged to enhance the response rate of the thermal power unit during primary frequency regulation, and improve system frequency drop depth. In normal load fluctuation scenarios, the energy storage device responds to the high-frequency component to suppress frequent actions of primary frequency regulation of the thermal power unit. This paper proposes an energy recovery control strategy for energy storage in which sufficient energy from thermal power is released to recover the state of charge of energy storage to prevent its excessive charging/discharging. Case studies demonstrate that the proposed method can effectively enhance the primary frequency control performance of thermal power units while maintaining the state of charge of energy storage during operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20101).

Key words: thermal power unit; energy storage; integrated system; primary frequency regulation; coordinated control strategy

0 引言

在“双碳”目标的驱动下, 我国“以煤为主”的能源供给结构正逐渐转变为“以可再生能源为主”的能源供给结构, 在各地电网中, 光伏、风电等新能源的渗透率不断提高, 火电机组的比例正逐渐减小^[1]。但由于新能源缺乏同步机具备的旋转惯量,

在系统频率变化时不能提供惯量支撑^[2]; 此外为了保证对新能源的消纳水平, 新能源往往运行在最大功率跟踪模式, 缺乏调频备用, 从而导致系统的频率支撑能力下降^[3-4]。因此, 在系统发生发电机组跳闸、直流闭锁等严重有功扰动事件情况下, 由于系统惯量的降低, 频率的变化速率加快, 而火电机组一次调频需要一定的响应时间, 难以在频率出现明显变化之前提供支撑, 这导致新型电力系统中频率越限的风险增加; 在稳定运行工况下, 新能源输出功率的随机波动会导致系统频率波动更加剧烈, 频

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U22B20101); 国网山东省电力公司科技项目资助 (52062622000H)

繁超出一次调频死区的概率增大,导致火电机组一次调频频繁触发,造成机械器件的磨损,减少机组的使用寿命^[5]。

为了应对上述问题,需要提升当前并网火电机组的一次调频能力,而近年来储能的迅速发展为这种方式提供了可能^[6]。储能具有响应速度快、精度高、控制灵活等优势^[7],令储能辅助火电机组参与一次调频,能够提升火电机组的响应速度^[8],进而有效地提升火电机组的频率支撑能力,改善系统频率特性^[9]。

目前储能辅助火电机组参与一次调频的基本控制方式以模拟同步机惯量响应的虚拟惯量控制和模拟同步机一次调频响应特性的下垂控制为主^[10]。文献[11-12]分别基于储能采用下垂和虚拟惯性的控制方式参与一次调频,通过对比有无储能参与调频时的频率波动,证明了两种控制方式对于系统频率稳定性都有明显的改善。文献[13-15]分析了两种控制方式的优势,并将两种控制方式相结合,根据频率偏差或频率偏差变化率大小作为临界值来进行切换,实现两者的优势互补,但其调频效果过于依赖临界值和动作时机的选取,且在控制模式切换时容易使储能出现较大的功率跃变,给电网频率变化造成冲击。文献[16-18]提出了一种不涉及频率临界值进行模式切换的控制策略,根据频率偏差和频差变化率的变化来改变两种控制模式在储能调频输出功率中的比例系数来调整控制方式,从而实现两者的优势互补和协调运行。同时,若只考虑调频效果的改善而忽略储能容量的限制,容易导致储能系统使用寿命的降低^[19],为了更好地维持储能自身荷电状态,避免过充过放现象,目前大部分研究都是基于储能荷电状态(state of charge, SOC)采用自适应方法动态调整充放电控制系数,例如根据实时 SOC 值采用双曲正切函数^[20]、线性分段函数^[21-22]、线性插值法^[23]等确定相应时刻的控制系数,从而改变储能输出功率,维持 SOC 在一定范围内。

上述研究均集中于通过优化储能自身的控制方式来提升系统总体的一次调频能力,在参与一次调频时储能与火电机组根据各自的控制策略并行承担相应的一次调频任务,优点是不需要建立两者之间的信息交换,缺点是控制策略不够灵活,储能与火电机组之间没有协调配合,不能很好地将两者的优势相结合。同时,为维持 SOC 水平,储能的一次调频输出功率始终受到自身 SOC 变化的影响,无法保证其调频性能。

针对此,本文不局限于单独优化储能自身的控

制性能,而是以提升火电机组与储能的总体调频性能为目的,提出通过构建火电-储能一体化系统(以下简称“火储系统”)来等效提升火电机组一次调频能力的方案。具体而言,本文首先在两个典型频率变化场景下分析了火电机组的一次调频性能,明确了改善火电机组一次调频性能的目标,并设计了同时适用于以上两个场景的火储系统频率控制方案,实现了以下效果:1)在严重的有功事件扰动场景中,储能在扰动初期率先承担主要的一次调频任务;2)在负荷持续波动的场景中,调用储能应对波动中的高频分量,避免高频的频率波动造成火电机组一次调频的频繁动作;3)令火电机组监测储能运行状态,实现储能 SOC 的周期性恢复。本文通过搭建 Simulink 仿真模型,在不同扰动场景下验证了本文所提方案的有效性。

1 传统火电机组一次调频面临的问题

1.1 事件扰动场景下火电机组一次调频性能分析

火电机组的一次调频模型可以简化为调频死区、调频增益以及响应延迟 3 个环节,如图 1 所示。

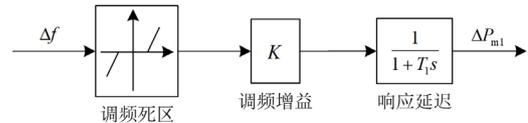


图 1 火电机组一次调频简化模型

Fig. 1 Simplified model of primary frequency modulation for thermal power units

图中: Δf 为频率偏差,调频死区是调速器的频率动作死区,一般设为 $[-0.033, 0.033]$ Hz,当系统频率处于死区范围内时,火电机组的一次调频不动作; K 为机组一次调频的下垂系数; T_1 为简化的火电一次调频响应时间常数; ΔP_{m1} 为火电机组一次调频响应的机械功率。

事件扰动是指当系统出现发电机组跳闸、直流闭锁等事件时,引起系统输出功率或负荷功率突发性变化,其变化的特点是:变化的幅值大;变化速率大,整个变化过程在瞬间即可完成;单方向变化,不会自行改变方向,所以事件扰动可以看作功率阶跃扰动。在这种场景下,频率偏差一定会超出调频死区,因此可以忽略死区对调频性能的影响,此时火电机组简化的一次调频特性方程为

$$T_1 \frac{d\Delta P_{m1}}{dt} = -\Delta P_{m1} - K\Delta f \quad (1)$$

在事件扰动场景下,可以用一次调频积分电量贡献指数作为系统一次调频的评价指标,其表达式为

$$Q_{\%} = \frac{\Delta Q_S}{\Delta Q_E} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $Q_{\%}$ 表示机组一次调频电量贡献指数； ΔQ_S 表示机组一次调频实际贡献电量； ΔQ_E 表示机组一次调频理论贡献电量。

假设电网中有 n 台机组，其下垂系数相等，一次调频响应时间常数不同时，经推导可以得到其中一台机组 G_i 的一次调频电量贡献指数为

$$Q_{\%(i)} = \frac{(nt_s + T_{\Sigma} - nT_i)K - DT_i - M}{(nt_s + T_{\Sigma})K - M} \quad (3)$$

式中： t_s 为系统的一次调频持续时间，根据“两个细则”^[24-25]标准， t_s 取 60 s； T_{Σ} 为电网中所有机组的一次调频等效响应时间常数之和； M 为系统的惯性时间常数； T_i 为机组 G_i 的一次调频等效响应时间常数； D 为负荷频率调节系数。

通过式(3)可以看出，机组 G_i 的一次调频响应时间常数 T_i 越小，其一次调频电量贡献指数就越大，一次调频性能就越好。

由此可见，火电机组一次调频过程的响应时间常数 T_i 影响频率动态过程，从而影响了系统的调频性能，一般来说火电机组一次调频的响应时间常数为 6~10 s，通过等效减小机组一次调频的响应时间常数能够有效地提高机组的一次调频性能。

1.2 负荷波动场景下频率特性分析

负荷波动是指正常运行状态下电网净负荷与发电计划曲线之间的功率偏差。相比于事件扰动来说，负荷波动的特点是波动频率高、幅度小。在传统电力系统中，由负荷波动引发的频率波动大部分都处于一次调频死区内，由同步机的惯量响应来应对。但在新型电力系统中，新能源输出功率的波动性使得电网净负荷波动的幅值变大，导致其引起的频率波动变大，同时电力系统旋转惯量的降低使得频率波动进一步变大。

负荷波动曲线具有随机性，可以将其视为均值 μ 为 0，方差为 σ^2 的高斯白噪声 ΔP_u ^[26]，其功率谱密度函数为

$$P_{\Delta P_u}(\omega) = \frac{N_0}{2} \quad (4)$$

式中： ω 为传递函数的振荡频率； N_0 为常数。

假设负荷波动的最大幅值是负荷峰值的 $a\%$ ，由正态分布曲线下横轴区间内的最大面积占比“ 3σ 原则”的对应关系得到

$$\begin{cases} \mu - 3\sigma = -a\% \\ \mu + 3\sigma = a\% \end{cases} \quad (5)$$

式中， σ 为频率偏差信号的标准差。

可以得到负荷波动的均值为 0，方差为 $(a^2/9) \times 10^{-4}$ 。由于秒级以下的负荷变化基本不会影响系统频率的变化，因此认为负荷波动数据的采样间隔 $t_d = 1$ s，带宽 $B = 1/t_d = 1$ Hz，则负荷波动 ΔP_L 的功率谱密度为

$$P_{\Delta P_L}(\omega) = \frac{N_0}{2}, \quad |\omega| \leq \Delta\omega \quad (6)$$

式中， $\Delta\omega = 2\pi B$ 。根据高斯白噪声平均功率 P_0 与方差的关系，可得

$$\sigma^2 = P_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} P_{\Delta P_L}(\omega) d\omega = N_0 B \quad (7)$$

可以得到负荷波动的功率谱密度的大小为 $\sigma^2/2$ ，假设系统频率特性全部由惯量响应特性决定，其频率响应的传递函数为

$$G'(j\omega) = \frac{\Delta f}{\Delta P_L} = \frac{1}{j\omega M + D} \quad (8)$$

可以得到频率偏差信号的功率谱密度函数为

$$P_{\Delta f}(\omega) = |G'(j\omega)|^2 P_{\Delta P_L}(\omega) \quad (9)$$

当具有高斯分布的信号经过一个线性系统时，得到的输出信号也是符合高斯分布的，且由于负荷波动信号的均值为零，系统频率偏差信号的均值也为零，方差为

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\Delta f}(\omega) d\omega \quad (10)$$

对于不同大小的负荷波动，频率偏差信号的概率密度分布曲线如图 2 所示，通过计算得到 σ 以及位于调频死区内的概率 P ，具体数值见表 1。可以看出负荷波动的幅值越大，频率偏差信号的方差越大，处于一次调频死区内的概率就越小，火电机组的一次调频功能处于响应状态的时间越长。并且系统频率波动的高频分量会导致一次调频频繁动作，

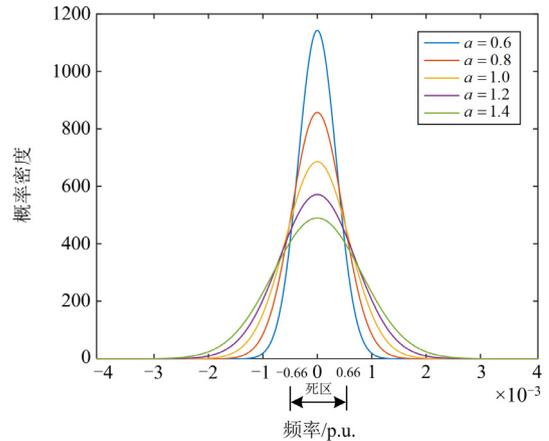


图 2 不同负荷波动幅值的频率偏差信号概率密度分布曲线
Fig. 2 Frequency difference signal probability density distribution curve of different load fluctuation amplitudes

表 1 系统频率偏差信号的标准差和位于死区内的概率

a	σ	$P/\%$
0.6	3.49×10^{-4}	94.13
0.8	4.65×10^{-4}	84.38
1.0	5.82×10^{-4}	74.34
1.2	6.98×10^{-4}	65.55
1.4	8.14×10^{-4}	58.23

这也会对机组运行产生不利影响。因此在负荷波动场景下, 需要通过减少火电机组对频率波动高频分量的响应来减小一次调频信号的方差。

2 火储系统设计

2.1 火储系统结构

由第 1 节的火电机组一次调频性能分析可知, 不同场景下影响一次调频性能的因素不同。为提高火电机组的一次调频性能, 本文设计了一种能够提升各种场景下一次调频性能的火储系统, 其结构框图如图 3 所示。在一次调频过程中, 储能装置同时监测系统频率偏差 Δf 以及火电机组一次调频功率的输出情况, 辅助火电机组参与一次调频, 可提升火储系统整体一次调频外特性; 火电机组功率控制器对频率偏差进行信号处理, 以降低负荷波动场景下火电机组一次调频的频繁启停; 火电实时监测储能 SOC, 并根据储能 SOC 偏差情况生成附加功率指令, 可实现向储能提供能量支撑以维持 SOC, 该控制能够令火储系统兼具响应速度快、控制灵活、可长时间参与调频的优点。

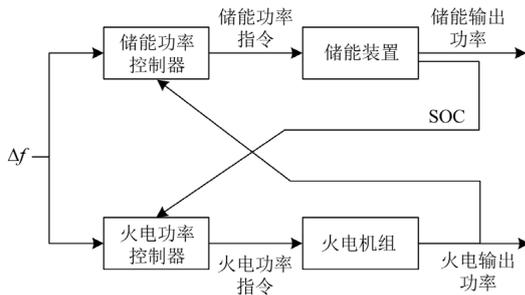


图 3 火储系统结构框图

Fig. 3 Structure of thermal power-energy storage system

值得说明的是, 在该控制结构中, 储能能在响应频率变化过程中首先将自身能量以高频、高速、高精度的特点释放出去, 再从火电机组中吸收/补充能量, 使整个系统性能优于单独的火电机组。从能量来源上讲, 系统参与一次调频的能量实质上都来源

于火电机组, 而储能只作为火电机组的能量缓冲, 储能能量在释放过后通过火电机组进行能量的恢复。接下来将分别针对事件扰动、负荷波动、SOC 恢复控制场景介绍火储系统的控制策略设计。

2.2 事件扰动场景下的火储系统一次调频控制策略

在事件扰动场景下, 火储系统的控制目标为:

1) 利用储能装置动作的快速性, 使其在事件扰动的初期主要承担一次调频任务, 等效地将响应时间常数 T_1 减小, 加快功率响应速度以提升一次调频外特性; 2) 储能的加入不改变一次调频的稳态输出功率, 即保持火储系统下垂系数 K 值不变。因此, 在事件扰动场景的控制目标下, 仅需要设计储能控制策略, 无须改变火电机组自身的控制方式。综合考虑以上需求, 事件扰动场景下火储系统一次调频外特性方程为

$$T_2 \frac{d\Delta P_m}{dt} = -\Delta P_m - K\Delta f \quad (11)$$

式中: T_2 为火储系统的一次调频等效时间常数; ΔP_m 为一次调频过程火储系统整体输出功率增量, $\Delta P_m = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2}$, ΔP_{m2} 为储能的输出功率增量。

在事件扰动下火电机组自身的调频特性不变, 式(1)火电机组一次调频特性方程可写为

$$T_2 \frac{d\Delta P_{m1}}{dt} = -\frac{T_2}{T_1} \Delta P_{m1} - \frac{T_2}{T_1} K\Delta f \quad (12)$$

由式(11)减去式(12)可以得到储能的一次调频控制方程为

$$T_2 \frac{d\Delta P_{m2}}{dt} = -\Delta P_{m2} - K_1(K\Delta f + \Delta P_{m1}) \quad (13)$$

式中, K_1 为储能一次调频控制系数, $K_1 = (T_1 - T_2)/T_1$ 。储能响应的是火电机组与一次调频功率指令 $K\Delta f$ 之间的偏差量, 偏差量在扰动初期随着系统频率的变化逐渐达到最大值, 并随着火电机组一次调频的响应而逐渐减小, 将该偏差作为储能的功率指令, 可实现储能在扰动初期快速提供功率支撑, 并自行退出一次调频。在该控制方式下火储系统的响应速率控制框图如图 4 所示。

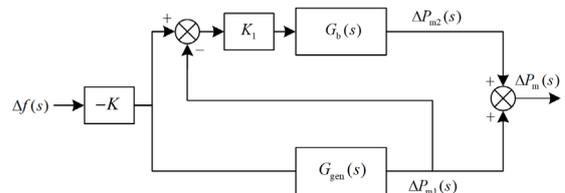


图 4 火储系统响应速率控制框图

Fig. 4 Control block diagram of response speed of thermal power-energy storage system

图中 $G_{gen}(s)$ 为火机组的传递函数, 其表达式为

$$G_{gen}(s) = -\frac{1 + F_h T_r s}{(1 + T_g s)(1 + T_{ch} s)(1 + T_r s)} \quad (14)$$

式中: T_g 为调速器时间常数; T_{ch} 为汽轮机时间常数; T_r 为再热器时间常数; F_h 为汽轮机高压缸功率比例。火机组的响应延迟时间常数 T_l 可以通过将高阶系统拟合为一阶惯性系统得到。

$G_b(s)$ 为储能的传递函数, 如式(15)所示。

$$G_b(s) = \frac{1}{1 + T_2 s} \quad (15)$$

2.3 负荷波动场景下的火储系统一次调频控制策略

在负荷波动场景下, 火储系统的控制目标是避免高频的负荷波动使频率偏差信号频繁超出一次调频死区, 导致火电机组一次调频频繁动作。为此, 需要改变火电的功率控制策略, 减少火电一次调频功率指令的高频分量。负荷波动场景下火储系统的控制框图如图 5 所示, 利用低通滤波器对火电机组监测到的系统频率偏差进行滤波处理, 令火电机组响应系统频率偏差的低频分量, 有效减少火电一次调频的频繁动作; 将一次调频指令 $K\Delta f$ 与火电输出功率的差值作为储能功率指令, 可令储能响应频率偏差的高频分量, 确保火储系统整体的一次调频性能。

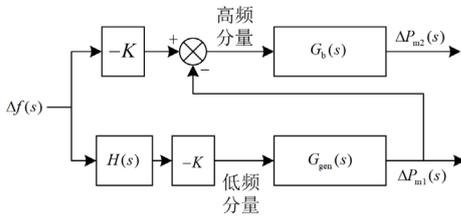


图 5 负荷波动下火储系统控制框图

Fig. 5 Control block diagram of thermal power-energy storage system under load fluctuation

图中滤波器选用一阶低通滤波器, 传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{T_c s + 1} \quad (16)$$

式中, T_c 为滤波时间常数。

当频率偏差信号经过滤波器后可以得到滤除高频分量的频率偏差信号 Δf_l , 由式(9)、式(10)可以求出其功率谱密度函数和方差, 如式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{\Delta f_l}(f) = |H(j\omega)|^2 P_{\Delta f}(\omega) \\ \sigma_{\Delta f_l}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\Delta f_l}(\omega) d\omega \end{cases} \quad (17)$$

根据电网中负荷波动的特性, 假设负荷波动的

最大幅值小于负荷峰值的 1%, 即 $a=1$ 。对于不同的滤波器时间常数 T_c , 频率偏差信号的功率谱密度和概率密度分布情况分别如图 6 和图 7 所示, 系统频率偏差信号 Δf 的标准差 σ 以及位于死区内的概率 P 见表 2。可以看出, 在加入了低通滤波器后, 频率偏差信号中的高频部分减少, 处于一次调频死区内的信号比例增加, 且滤波器时间常数 T_c 越大, 信号中的高频部分越少, 死区内信号占比越多, 火电机组一次调频功能动作的次数就越少。相对地, 由于需要响应的总调频需求不变, 所以当火电机组响应的信号变少时, 储能需要响应的频率信号变多, 对储能能量的需求增大, 因此需要确定一个合理的滤波时间常数来平衡好两者之间的关系。

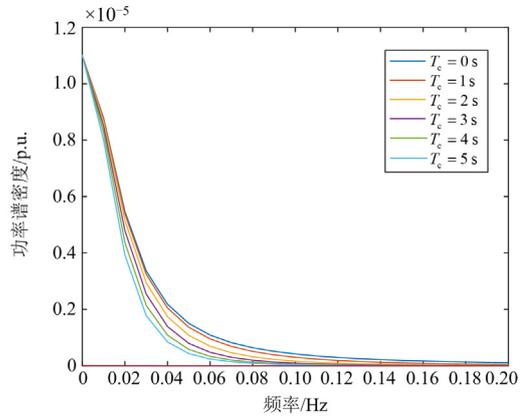


图 6 不同 T_c 值的频率偏差信号功率谱密度曲线

Fig. 6 Power spectral density curves of frequency difference signals with different T_c values

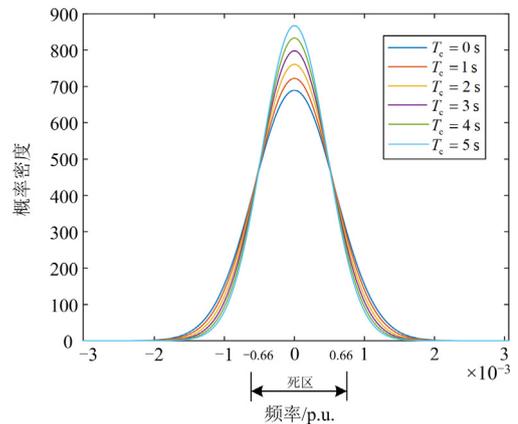


图 7 不同 T_c 值的频率偏差信号概率密度分布曲线

Fig. 7 Probability density distribution curves of frequency difference signals with different T_c values

上述分析中的频率偏差信号均是基于所有的负荷波动由惯量响应而得到的, 但在电网实际运行中, 会受到像调频死区等非线性因素的综合影响, 超出

死区部分的频率偏差信号又会由系统的一次调频响应, 因此电网频率的概率分布不再是正态分布, 而是出现中间低两头高的双峰分布^[27], 因此频率偏差信号的方差会比分析中的小, 即位于死区内的概率会变大。

表 2 系统频率偏差信号的标准差和位于死区内的概率

T_c/s	σ	$P/\%$
0	5.82×10^{-4}	74.34
1	5.53×10^{-4}	76.75
2	5.24×10^{-4}	79.18
3	5.00×10^{-4}	81.32
4	4.79×10^{-4}	83.20
5	4.60×10^{-4}	84.87

2.4 储能的 SOC 恢复策略

火储系统对一次调频需求响应的控制可以看作火电机组与储能之间功率需求的分配, 而从能量角度看, 储能是火电机组的能量缓冲, 而火电机组是储能的能量后备。由于储能装置存储的能量总量有限, 为了时刻保证储能在火储系统中的调频作用, 发挥能量缓冲的作用, 可利用火电机组帮助储能恢复能量, 使储能 SOC 水平维持在安全范围内。当储能 SOC 出现较大偏差时, 调用火电机组的能量为储能充电, 储能 SOC 恢复策略的控制框图如图 8 所示。

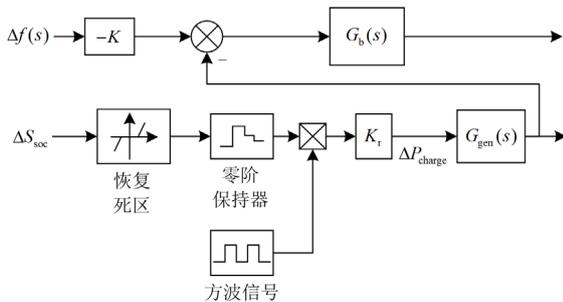


图 8 储能 SOC 恢复策略的控制框图

Fig. 8 Control block diagram of SOC recovery of energy storage

图 8 中: ΔS_{soc} 为系统监测的储能 SOC 偏差信号; ΔP_{charge} 为火电机组恢复储能 SOC 时的输出功率指令; K_r 为储能 SOC 恢复的控制系数。当储能 SOC 出现明显变化超出恢复死区时, 控制器根据 ΔS_{soc} 改变火电机组输出功率。在恢复过程中, 储能始终监测火电的输出功率变化情况, 当火电增发功率时, 储能进行充电; 反之, 储能进行放电。该控制实现火储系统在功率不变的情况下完成储能 SOC 的恢

复。为了避免在负荷波动场景下, 储能 SOC 的小幅度波动频繁触发 SOC 恢复控制, 在控制回路中设置方波信号以及 SOC 恢复死区, 仅在方波信号触发且储能 SOC 越过恢复死区时触发 SOC 的恢复控制。

2.5 多场景下火储系统设计

在上述提出的火储系统控制策略中, 储能始终作为火电机组的辅助角色, 主要响应功率指令与火电机组输出功率的偏差, 以提升火储系统整体功率指令的跟踪能力, 在事件扰动场景下能够提升火储系统响应性能。在此基础上, 可通过改变火电功率指令的方式协调火电机组与储能, 在不影响火储系统整体功率外特性的前提下, 实现抑制火电机组一次调频频繁动作、恢复储能 SOC 的作用。基于以上分析, 适用于多场景的火储系统整体的协调控制框图如图 9 所示。

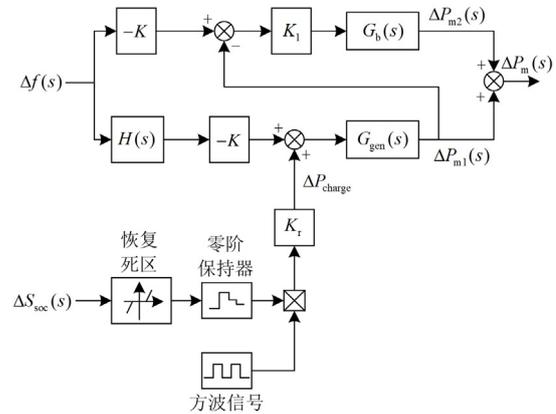


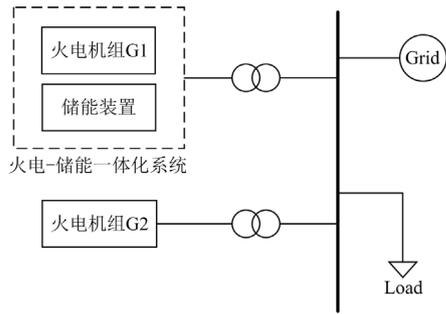
图 9 适用于多场景的火储系统控制框图

Fig. 9 Control block diagram of thermal power-energy storage system applicable to multiple scenarios

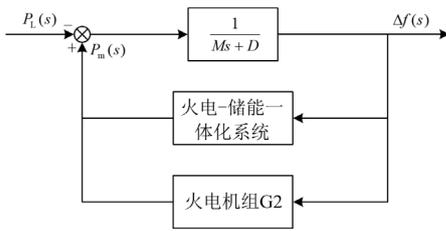
3 算例分析

3.1 仿真模型

为验证所提出的火储系统控制策略的效果, 以图 10 所示的区域电网为例, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建相应的频率响应模型。针对本文提出的控制策略, 电网中的火电机组可以分为两类, 第一类是与储能配合形成火储系统的火电机组 G1, 第二类是传统的火电机组 G2。为了便于比较火储系统对火电机组调频能力的效果, 可设定两类火电机组的参数一致, 相关参数如表 3 所示, 电网中负荷大小为 150 MW。根据第 2 节分析, 经拟合得到火电机组的响应时间常数 T_1 为 7.95 s, 储能一次调频控制系数 K_1 为 0.87。储能作为能量缓冲装置, 需要提供足够的功率, 而不需要储存过大的能量, 因此其额定功率和额定容量分别为 10 MW 和 1 MWh。



(a) 区域电网模型



(b) 区域电网频率响应模型

图 10 区域电网一次调频模型

Fig. 10 Primary frequency modulation model of regional power grid

表 3 仿真相关参数

Table 3 Parameters of simulation

变量	参数名称	数值
T_r	再热器时间常数/s	10
T_g	调速器时间常数/s	0.08
T_{ch}	汽轮机时间常数/s	0.3
F_h	汽轮机高压缸功率比例	0.3
K	机组的下垂系数	20
S_g	火电机组额定容量/MVA	100
T_c	滤波时间常数/s	1
T_2	火储系统等效时间常数/s	1
T	储能 SOC 控制周期/s	40
M	系统的惯性时间常数/s	8
D	负荷频率调节系数	1

3.2 事件扰动场景下的仿真分析

在系统中加入 0.1 p.u. 的阶跃负荷扰动, 仿真验证火储系统自身的一次调频响应特性以及对电网的响应特性的提升效果。同一电网下, 火储系统中火电机组 G1 和储能各自输出功率、火储系统的总输出功率和火电机组 G2 的输出功率变化曲线如图 11 所示。可以看出, 在扰动发生的初期, 火储系统中的储能由于响应速度快, 率先承担主要的调频任务, 输出功率迅速增加, 而当火电机组的输出功率响应到位后, 储能输出功率开始缓慢下降, 逐渐退出调频。与火电机组 G2 输出功率曲线相比, 火储

系统在调频初期, 即在系统频率到达最低点前, 输出的功率速度快、幅度大, 能够提供更好的功率支撑。

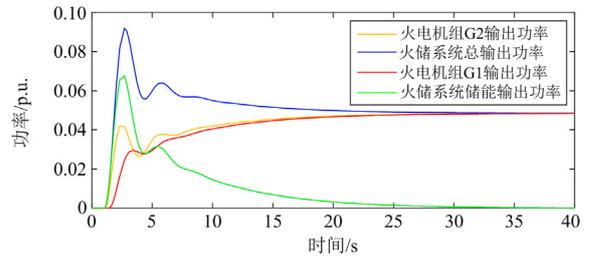


图 11 事件扰动下不同系统输出功率变化曲线

Fig. 11 Variation curves of output power of different systems under event disturbance

火储系统中储能 SOC 控制效果如图 12 和图 13 所示, 其中图 12 为在不同时刻恢复储能 SOC 时火电机组与储能输出功率的变化情况, 图 13 为相对应的储能 SOC 变化情况, 可以看出无论是在一次调频的任何阶段, 本文所提策略都能够使得火电机组平滑地补充储能释放的能量, 恢复储能 SOC, 同时不影响正常的一次调频过程。根据 2.2 节分析可知, 火储系统和火电机组 G2 的一次调频电量贡献指数分别为 98.41%和 87.36%, 在仿真中可以得到对应的一次调频电量贡献指数分别为 98.31%和 88.45%, 与理论计算值基本一致, 证明控制策略与理论分析一致, 火储系统的调频性能明显优于火电机组 G2。

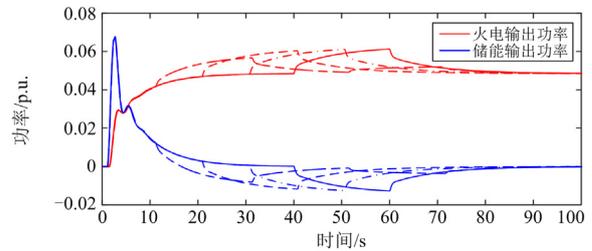


图 12 不同时刻恢复储能 SOC 时系统输出功率变化曲线

Fig. 12 Variation curve of output power when energy storage SOC is added at different times

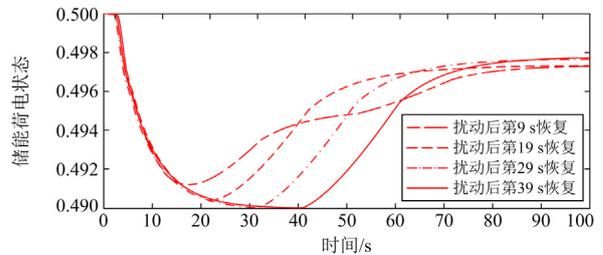


图 13 不同时刻恢复储能 SOC 时储能 SOC 变化曲线

Fig. 13 Variation curve of energy storage SOC when energy storage SOC is added at different times

将不含火储系统, 只有火电机组的传统电网设为电网 1, 含有火储系统的电网设为电网 2, 其火储系统中火电机组 G1 的容量与火电机组 G2 的容量相同, 总容量与电网 1 的容量相同。在两个电网中分别加入 0.1 p.u. 的阶跃负荷扰动, 其频率偏差曲线与调频输出功率曲线分别如图 14 和图 15 所示。由图 14 和图 15 可知, 电网 2 中系统的一次调频输出功率第一次到达稳态值的速度比电网 1 提升了 37%, 系统频率最低点提高了 31.5%, 即利用储能将电网中的火电机组改造成火储系统可以有效地提升响应速度, 在发生大幅阶跃扰动时能够及时地提供功率支撑, 从而提高频率响应的最低点, 减少频率跌落幅度。

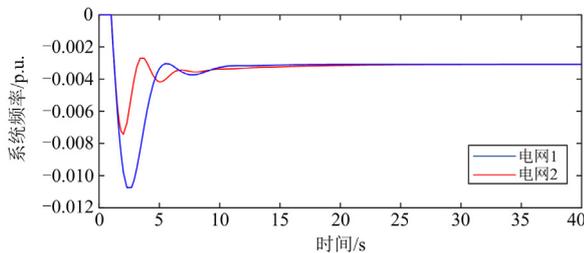


图 14 事件扰动下不同电网频率偏差曲线

Fig. 14 Frequency deviation curves of different power grids under event disturbance

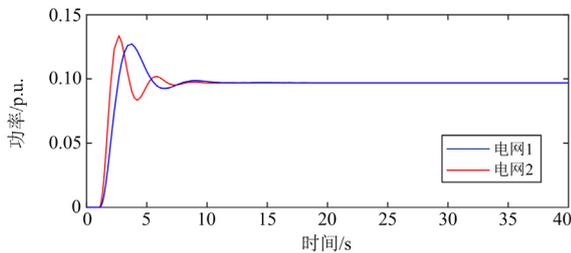


图 15 事件扰动下不同电网调频输出功率变化曲线

Fig. 15 Variation curves of frequency modulation output of different power networks under event disturbance

3.3 负荷波动场景下的仿真分析

加入如图 16 所示的负荷波动, 火储系统中火电机组 G1 和储能各自输出功率、火储系统的总输出功率和火电机组 G2 的输出功率变化曲线如图 17 所示, 可以看出与火电机组 G2 相比, 火储系统对负荷波动响应的能力更好, 且对于高频率的负荷波动主要由储能应对, 火电机组几乎不响应。火电机组 G1 与火电机组 G2 的调频信号变化曲线如图 18 所示, 表 4 是不同时间长度内火电机组动作次数和动作时间占比, 可以看出与火电机组 G1 相比, 火电机组 G2 收到的调频信号明显变少, 从而使得其一次调频功能的启动次数以及动作时间占比减小

了 40%左右, 有效地避免了调速器的频繁动作。

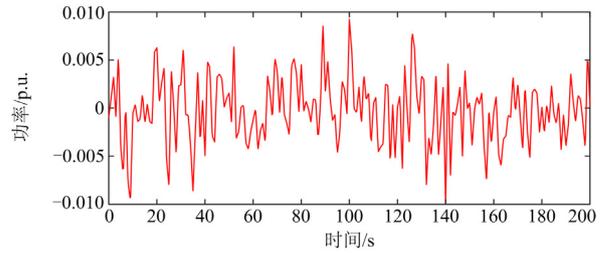


图 16 负荷波动曲线

Fig. 16 Load fluctuation curve

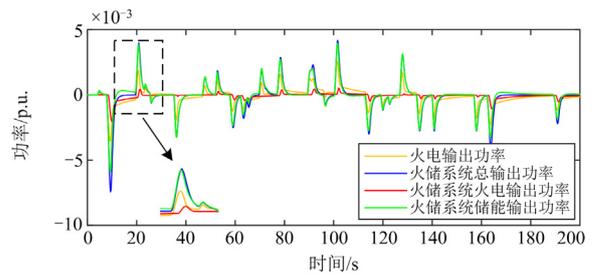


图 17 负荷波动下不同系统输出功率变化曲线

Fig. 17 Variation curve of output power of different systems under load fluctuation

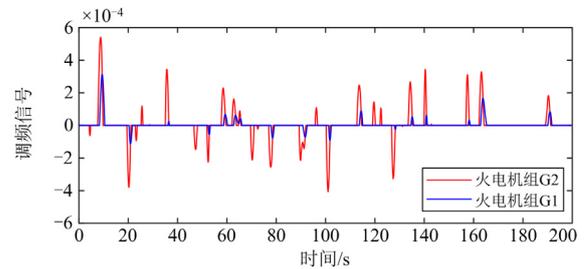


图 18 负荷波动下火电机组调频信号

Fig. 18 Variation modulation signal of output power thermal power unit under load fluctuation

表 4 不同时间长度内火电机组动作次数和动作时间比例

Table 4 Action times and time ratio of thermal power units in different time lengths

时间长度/s	纯火电机组		火储系统中的火电机组	
	火电动作次数	动作时间占比/%	火电动作次数	动作时间占比/%
200	29	30.04	17	18.15
600	84	29.21	49	17.04
1200	176	30.08	98	18.79
2000	265	28.26	144	17.41

结合 2.3 节的分析可知, 当滤波时间常数取 1 s 时, 系统频率偏差信号超出死区的概率为 23.25%, 即由理论分析得到的负荷波动下火电机组动作时间

占比为 23.25%，略大于仿真结果中的火电机组一次调频动作时间占比，因此本文提出的理论分析可以作为指导滤波器参数选择的依据，以减小火电机组一次调频功能动作次数。

4 结论

本文在不同场景下分析了目前高渗透率电网下火电机组一次调频性能不足的问题，分析认为，在事件扰动场景下，火电机组一次调频性能不足的原因是响应速度慢，而在负荷波动场景下，高频扰动容易造成火电机组一次调频功能频繁动作。基于上述结论，本文提出一种通过设计火储系统来提高火电机组一次调频性能的方案，其中储能作为一体化系统的能量缓冲，在应对事件扰动时起到快速承担一次调频需求的作用，而在应对负荷波动时起到分担高频扰动的作用。火电机组作为一体化系统的能量储备，是系统参与一次调频时的能量来源，也起到为储能提供能量补充的作用。

通过仿真分析可以得出，本文提出的火储系统能够有效地加快火电机组的一次调频响应速度，从而提升一次调频性能，同时能够改善高频负荷波动引起的火电机组一次调频功能频繁动作问题，从而有效降低火电机组的运行与维护成本。

参考文献

[1] 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.

[2] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.

[3] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulations: survey and new perspectives[J]. Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.

[4] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key

technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[5] YAN Gangui, LIU Dongyuan, LI Junhui, et al. A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51.

[6] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.

[7] PANDZIC H, BOBANAC V. An accurate charging model of battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1416-1426.

[8] 黎淑娟. 储能电池参与电网快速调频的综合选型与优化配置[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
LI Shujuan. Comprehensive selection and optimal configuration of energy storage batteries for participating in fast frequency regulation of power grids[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[9] ONO T, ARAI J. Frequency control with dead band characteristic of battery energy storage system for power system including large amount of wind power generation[J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 185(3): 1-10.

[10] 崔曦文. 电池储能电源辅助电网一次调频的控制模型与策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
CUI Xiwen. Research on the control model and strategy of battery storage power supply-assisted grid primary frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[11] 马骏超, 周洁洁, 江全元, 等. 储能参与一次调频的优化控制策略研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(9): 3-9.
MA Junchao, ZHOU Jiejie, JIANG Quanyuan, et al. Study on optimal control strategy of primary frequency regulation of energy storage power station[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9): 3-9.

[12] 李吉晨, 陈堂龙, 葛维春, 等. 基于多 Agent 的储能参与电网一次调频控制[J]. 电子设计工程, 2022, 30(2): 78-81, 86.
LI Jichen, CHEN Tanglong, GE Weichun, et al. One-time FM control of multi-agent-based energy storage participates in the power grid[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(2): 78-81, 86.

[13] 黄际元. 储能电池参与电网调频的优化配置及控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
HUANG Jiyuan. Study on the optimal configuration and

- control strategy of energy storage battery participation in grid frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.
LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118.
- [17] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with storage system based on weight factors and state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [18] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 174-181.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181.
- [19] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [20] 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.
- [21] 颜湘武, 崔森, 常文斐. 考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1027-1039.
YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Primary frequency regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027-1039.
- [22] 陈景文, 刘嘉欣, 张文倩. 基于一致性算法的直流微网多储能 SoC 均衡策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 30-38.
CHEN Jingwen, LIU Jiixin, ZHANG Wenqian. State of charge equalization strategy of multi-energy storage in dc microgrid based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 30-38.
- [23] 吴林林, 刘辉, 高文忠, 等. 大容量电池储能参与电网一次调频的优化控制策略研究[J]. 华北电力技术, 2017(3): 32-38.
WU Linlin, LIU Hui, GAO Wenzhong, et al. Research on the optimal control strategy of large capacity battery energy storage for primary frequency modulation[J]. North China Electric Power, 2017(3): 32-38.
- [24] 华北电监局. 华北区域发电厂并网运行管理实施细则(修订版)[S]. 北京: 华北电监局, 2012.
- [25] 华北电监局. 华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(修订版)[S]. 北京: 华北电监局, 2012.
- [26] 刘巨, 赵红生, 李梦颖, 等. 基于功率谱密度分析的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 178-188.
LIU Ju, ZHAO Hongsheng, LI Mengying, et al. An equivalent inertia evaluation method of power system based on power spectral density analysis[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 178-188.
- [27] 郭钰锋, 于达仁, 赵婷, 等. 电网频率的非正态概率分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 26-31.
GUO Yufeng, YU Daren, ZHAO Ting, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 26-31.

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-07-12

作者简介:

高嵩(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统网源协调技术; E-mail: 13573158636@163.com

李军(1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统网源协调技术; E-mail: lijun_sdu@hotmail.com

宋辉(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 1015767099@qq.com

(编辑 周金梅)