



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115102239 B

(45) 授权公告日 2024.07.23

(21) 申请号 202210611502.2

(22) 申请日 2022.05.31

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115102239 A

(43) 申请公布日 2022.09.23

(73) 专利权人 湖南迪泰尔综合能源规划设计有限公司

地址 410129 湖南省长沙市中国(湖南)自由贸易试验区长沙片区龙华路东段55号4栋防灾研究与监测中心101第五层

(72) 发明人 谢学渊 陈宏 俞乾 詹世军
陈杰 曲旺 阳文闯 贺悝
谭庄熙

(74) 专利代理机构 湖南兆弘专利事务所(普通合伙) 43008

专利代理师 谭武艺

(51) Int.Cl.

H02J 3/48 (2006.01)

H02J 3/32 (2006.01)

H02J 3/24 (2006.01)

H02J 7/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110380438 A, 2019.10.25

CN 112671008 A, 2021.04.16

审查员 籍海燕

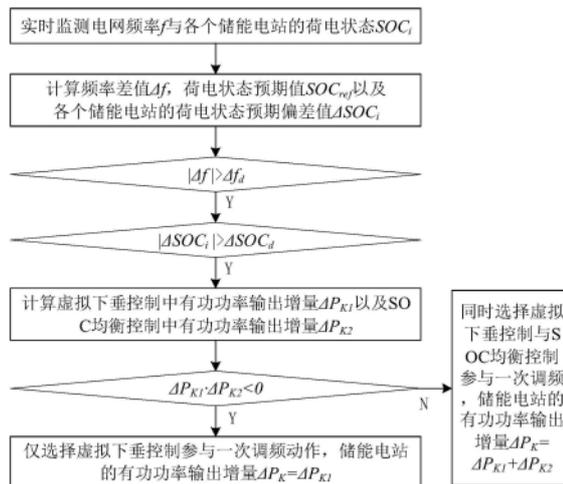
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法及系统,本发明包括实时监测并计算电网频率的频率差值,各储能电站的荷电状态预期偏差值;针对任意的储能电站:通过判断频率差值确定电网处于调频死区内或者正常调频区间,判断荷电状态预期偏差值是否达到预期值,在调频死区内,SOC均衡需求与调频净功率调整需求契合时,储能电站将利用系统盈余/缺额功率进行充/放电实现SOC均衡,其余情况不动作以免频率反向扰动;在正常调频区间内储能电站的均衡控制叠加调频功率输出以响应电网正常调频需求。本发明针对电网调频需求实现了SOC均衡控制与虚拟下垂控制参与系统一次调频的协同控制,能够解决单个储能电站过度使用的问题。



1. 一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法,其特征在于,包括:

S1, 实时监测电网频率 f 与各个储能电站的荷电状态 SOC_i ;

S2, 计算电网频率 f 与参考电网频率 f_{ref} 之间的频率差值 Δf , 荷电状态预期值 SOC_{ref} 以及各个储能电站的荷电状态 SOC_i 与荷电状态预期值 SOC_{ref} 之间的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i ;

S3, 针对任意的储能电站 i : 在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值 Δf_d 成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 成立时, 分别计算虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 以及SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} , 若满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$, 则仅选择虚拟下垂控制参与一次调频动作, 储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1}$; 若不满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$, 则同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制参与一次调频, 且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1} + \Delta P_{K2}$, 并且 ΔP_K 不超过储能电站的额定功率;

步骤S2中荷电状态预期值 SOC_{ref} 的计算函数表达式为:

$$SOC_{ref} = (\sum C_i * SOC_i) / \sum C_i$$

上式中, C_i 为第 i 个储能电站的容量;

步骤S2中荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的计算函数表达式为:

$$\Delta SOC_i = SOC_i - SOC_{ref}$$

上式中, SOC_i 表示第 i 个储能电站的荷电状态, SOC_{ref} 为荷电状态预期值;

步骤S3中虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 的计算函数表达式为:

$$\Delta P_{K1} = -K \cdot \Delta f$$

上式中, K 为自适应下垂出力系数;

步骤S3中SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} 的计算函数表达式为:

$$\Delta P_{K2} = -\gamma \cdot K \cdot (SOC - SOC_{REF})$$

上式中, γ 为储能电站的充放电约束系数, K 为自适应下垂出力系数, SOC 为储能电站的荷电状态, SOC_{REF} 为储能电站集群的SOC均衡期望值;

所述储能电站的充放电约束系数包括充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d , 储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 大于设定值 ΔSOC_d 成立时基于放电约束系数 γ_d 进行放电以实现SOC均衡, 储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 小于设定值 ΔSOC_d 的负数 $-\Delta SOC_d$ 成立时基于充电约束系数 γ_c 进行充电以实现SOC均衡, 令 f_{ref} 为频率差值 Δf 的预期值, 当满足当 $\Delta f < -\Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$\begin{cases} \gamma_d = \mu \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

当满足当 $-\Delta f_d < \Delta f < f_{ref}$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$\begin{cases} \gamma_d = \frac{\mu \cdot K_{max} \cdot \exp(-n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{max} \cdot [\exp(-n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

当满足当 $f_{ref} < \Delta f < \Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$\begin{cases} \gamma_c = \frac{\mu \cdot K_{\max} \cdot \exp(n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{\max} [\exp(n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_d = 0 \end{cases}$$

当满足当 $\Delta f > \Delta f_d$ 时,充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$\begin{cases} \gamma_d = 0 \\ \gamma_c = \mu \end{cases}$$

其中, μ 为最大约束系数, K_{\max} 为自适应下垂出力系数 K 的最大值, n 为调节参数。

2. 根据权利要求1所述的考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法,其特征在于,步骤S3中还包括,针对任意的储能电站 i :在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 成立时,仅选择SOC均衡控制参与一次调频,且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K2}$ 。

3. 根据权利要求1所述的考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法,其特征在于,步骤S3中还包括,针对任意的储能电站 i :在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 不成立时,同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制都不参与一次调频。

4. 一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制系统,包括相互连接的微处理器和存储器,其特征在于,该微处理器被编程或配置以执行权利要求1~3中任意一项所述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

5. 一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质中存储有计算机程序,其特征在于,该计算机程序用于被微处理器编程或配置以执行权利要求1~3中任意一项所述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于电网调频技术,具体涉及一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法及系统。

背景技术

[0002] 随着电力系统低碳化进程的推进,可再生能源发电占比不断提升,为实现其高效运行需求,实现最大功率跟踪点运行,可再生能源多经过电力电子变换装置并网运行,降低了电网的惯量水平。此外,其存在的出力预测困难、波动性较大等特性,进一步加剧了低惯量电网的频率波动,不利于电网的稳定运行。电池储能具有响应速度快,出力控制精确的特点,在参与快速调频的电网需求中具备极大的应用潜力。规模化储能电池多以储能电站的形式接入电网中,参与调峰调频等有功需求响应的场景,在各省电网及示范工程目前已取得初步的经济效益和运行效果。储能电站参与调峰通过跟踪日前调度指令实现;参与二次调频时则通过跟踪AGC指令生成功率跟踪信号,实现频率的误差调节,重点在于获得二次调频功率指令后的功率分配;一次调频需要各储能电站预设一次调频系数,基于下垂控制原理实现主动自发的参与频率调节。在我国,储能技术参与电网调频的研究与示范工程尚在起步与借鉴阶段。中国电科院在张北风光储基地投建的电池储能电站完成了跟踪调频指令的测试,南方电网深圳宝清电池储能电站与上海漕溪能源转换综合展示基地也具备系统调频的功能。虽然目前还未开展更深入的研究与示范应用工作,但储能技术参与电力调频将是未来智能电网必须关注的重要科学问题。

发明内容

[0003] 本发明要解决的技术问题:针对现有技术的上述问题,提供一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法及系统,本发明针对电网调频需求实现了SOC均衡控制与虚拟下垂控制参与系统一次调频的协同控制,能够解决单个储能电站过度使用的问题。

[0004] 为了解决上述技术问题,本发明采用的技术方案为:

[0005] 一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法,包括:

[0006] S1,实时监测电网频率 f 与各个储能电站的荷电状态 SOC_i ;

[0007] S2,计算电网频率 f 与参考电网频率 f_{ref} 之间的频率差值 Δf ,荷电状态预期值 SOC_{ref} 以及各个储能电站的荷电状态 SOC_i 与荷电状态预期值 SOC_{ref} 之间的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i ;

[0008] S3,针对任意的储能电站 i :在频率差值 Δf 的标幺值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标幺值 Δf_d 成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标幺值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 成立时,分别计算虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 以及SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} ,若满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$,则仅选择虚拟下垂控制参与一次调频动作,储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1}$;若不满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$,则同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制参与一次调频,且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1} +$

ΔP_{K2} , 并且 ΔP_K 不超过储能电站的额定功率。

[0009] 可选地, 步骤S2中荷电状态预期值 SOC_{ref} 的计算函数表达式为:

$$[0010] \quad SOC_{ref} = (\sum C_i * SOC_i) / \sum C_i$$

[0011] 上式中, C_i 为第 i 个储能电站的容量。

[0012] 可选地, 步骤S2中荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的计算函数表达式为:

$$[0013] \quad \Delta SOC_i = SOC_i - SOC_{ref}$$

[0014] 上式中, SOC_i 表示第 i 个储能电站的荷电状态, SOC_{ref} 为荷电状态预期值。

[0015] 可选地, 步骤S3中虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 的计算函数表达式为:

$$[0016] \quad \Delta P_{K1} = -K \cdot \Delta f$$

[0017] 上式中, K 为自适应下垂出力系数。

[0018] 可选地, 步骤S3中SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} 的计算函数表达式为:

$$[0019] \quad \Delta P_{K2} = -\gamma \cdot K \cdot (SOC - SOC_{REF})$$

[0020] 上式中, γ 为储能电站的充放电约束系数, K 为自适应下垂出力系数, SOC 为储能电站的荷电状态, SOC_{REF} 为储能电站集群的SOC均衡期望值。

[0021] 可选地, 所述储能电站的充放电约束系数包括充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d , 储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 大于设定值 ΔSOC_d 成立时基于放电约束系数 γ_d 进行放电以实现SOC均衡, 储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 小于设定值 ΔSOC_d 的负数 $-\Delta SOC_d$ 成立时基于充电约束系数 γ_c 进行充电以实现SOC均衡, 令 f_{ref} 为频率差值 Δf 的预期值, 当满足当 $\Delta f < -\Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0022] \quad \begin{cases} \gamma_d = \mu \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

[0023] 当满足当 $-\Delta f_d < \Delta f < f_{ref}$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0024] \quad \begin{cases} \gamma_d = \frac{\mu \cdot K_{max} \cdot \exp(-n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{max} \cdot [\exp(-n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

[0025] 当满足当 $f_{ref} < \Delta f < \Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0026] \quad \begin{cases} \gamma_c = \frac{\mu \cdot K_{max} \cdot \exp(n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{max} \cdot [\exp(n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_d = 0 \end{cases}$$

[0027] 当满足当 $\Delta f > \Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0028] \quad \begin{cases} \gamma_d = 0 \\ \gamma_c = \mu \end{cases}$$

[0029] 其中, μ 为最大约束系数, K_{max} 为自适应下垂出力系数 K 的最大值, n 为调节参数。

[0030] 可选地, 步骤S3中还包括, 针对任意的储能电站 i : 在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta SOC_i|$

ΔSOC_i | 大于设定值 ΔSOC_d 成立时, 仅选择SOC均衡控制参与一次调频, 且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K2}$ 。

[0031] 可选地, 步骤S3中还包括, 针对任意的储能电站 i : 在频率差值 Δf 的标幺值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标幺值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标幺值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 不成立时, 同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制都不参与一次调频。

[0032] 此外, 本发明还提供一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制系统, 包括相互连接的微处理器和存储器, 该微处理器被编程或配置以执行所述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

[0033] 此外, 本发明还提供一种计算机可读存储介质, 所述计算机可读存储介质中存储有计算机程序, 该计算机程序用于被微处理器编程或配置以执行所述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

[0034] 和现有技术相比, 本发明主要具有下述优点: 本发明提供了一种考虑荷电状态 (State of Charge, SOC) 均衡的储能电站一次调频控制方法及系统, 其结合了SOC均衡控制与虚拟下垂控制参与系统一次调频的协同控制策略, 通过实时监测电网的频率与储能电站荷电状态, 通过判断差值确定电网处于调频死区内或者正常调频区间, 同时判断荷电状态是否达到预期值; 在调频死区内, 当储能电站的SOC均衡需求与调频净功率调整需求契合时, 储能电站将利用系统盈余 (缺额) 功率进行充电 (放电), 从而实现SOC的均衡调整, 其余情况下不动作, 以避免造成频率的反向扰动; 在正常调频区间内, 储能电站的均衡控制类似, 但同时会叠加调频功率输出, 以响应电网正常调频需求。简而言之, 本发明方法先通过监测电网实时运行状态与储能电站荷电状态, 得到当前频率与额定频率的偏差及储能电站荷电状态与预期值的偏差; 经过与电网调频需求功率进行比较, 选择合适的场景进行SOC均衡动作。针对SOC均衡动作与调频动作方向相反的情况, 选择虚拟下垂控制参与一次调频; 针对SOC均衡动作与调频动作方向相同的情况, 选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制同时参与一次调频; 此策略可大大削减影响单个储能电站过度使用的负面因素, 有利于储能电站的合理利用。综上所述, 本实施例方法能够在电网受到扰动时, 有效缩小频率波动幅值, 恢复电网频率, 并且结果正确、可靠性强。本发明实现了电网频率的调节效果提升和储能电站SOC运行健康度, 为保证电网安全稳定运行提供了科学的支撑。

附图说明

[0035] 图1为本发明实施例中多个储能电池的区域电网调频动态模型。

[0036] 图2为本发明实施例方法的基本流程示意图。

[0037] 图3为本发明实施例中协同控制策略的思路图。

[0038] 图4为本发明实施例中协同控制策略中均衡约束系数与 Δf 的关系示意图。

[0039] 图5为本实例实施例中扰动下某典型区域电网的频率偏差示意图。

[0040] 图6为本实例实施例中扰动下本文方法储能电站SOC状态曲线示意图。

[0041] 图7为本实例实施例中扰动下对比方法储能电站SOC状态曲线示意图。

[0042] 图8为本实例实施例中扰动下某典型区域电网的频率偏差示意图。

[0043] 图9为本实例实施例中扰动下本文方法储能电站SOC状态曲线示意图。

[0044] 图10为本实例实施例中小扰动下对比方法储能电站SOC状态曲线示意图。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明,以使本发明的优点和特征能更易于被本领域技术人员理解,从而对本发明的保护范围做出更为清楚明确的界定。

[0046] 本实施例考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法提出一种考虑荷电状态均衡需求的储能电站协同调频控制策略,为研究多个储能电站接入下的电力系统一次调频问题,需要构建典型的电力系统有功频率响应模型。在一次调频的正常运行工况下,电力系统一次调频的频率波动小于0.05%,基于区域等效的方法,建立了含储能电池的区域电网一次调频动态模型,含多个储能电池的区域电网调频动态模型如图1所示。参见图1中, K_g 为传统电源的单位调节功率, $\Delta P_c(s)$ 为二次调频给定值,电网频率偏差 $\Delta f(s)$ 乘以传统电源的单位调节功率 K_g 后,与二次调频给定值 $\Delta P_c(s)$ 求和后作为传统机组的控制输入,传统机组中 $G_{gov}(s)$ 表示火电机组调速器传递函数, $G_{en}(s)$ 表示传统再热汽轮机传递函数,最终传统机组得到的出力功率改变量为 $\Delta P_G(s)$ 。多个储能电池则构成分布式储能电站集合,其中多储能电站间协同调频控制器为分布式储能电站集合的控制主体,用于根据电网频率偏差 $\Delta f(s)$ 给n个储能电站下达出力功率指令分别为 $\Delta P_{b1}(s) \sim \Delta P_{bn}(s)$;储能电站中的, $K_{b1} \sim K_{bn}$ 为各个储能电池的单位调节功率, $G_b(s)$ 表示储能电站的一阶惯性模型。然后,负荷功率波动量 $\Delta P_L(s)$ 、传统机组得到的输出为 $\Delta P_G(s)$ 以及各个储能电站的输出一起并网,并通过电网等效模型环节 $1/(Ms+D)$ 获得新的电网频率偏差 $\Delta f(s)$,其中M和D分别为电网惯性时间常数和负荷阻尼系数。本实施例考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法则涉及对图1中多储能电站间协同调频控制器的相关控制方法的改进。

[0047] 如图2所示,本实施例考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法包括:

[0048] S1,实时监测电网频率 f 与各个储能电站的荷电状态SOC_i;

[0049] S2,计算电网频率 f 与参考电网频率 f_{ref} 之间的频率差值 Δf ,荷电状态预期值SOC_{ref}以及各个储能电站的荷电状态SOC_i与荷电状态预期值SOC_{ref}之间的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i ;

[0050] S3,针对任意的储能电站i:在频率差值 Δf 的标幺值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标幺值 Δf_d 成立、且储能电站i的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标幺值 $|\Delta SOC_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 成立时,分别计算虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 以及SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} ,若满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$,则仅选择虚拟下垂控制参与一次调频动作,储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1}$;若不满足 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$,则同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制参与一次调频,且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1} + \Delta P_{K2}$,并且 ΔP_K 不超过储能电站的额定功率。

[0051] 本实施例中针对任意的储能电站通过判断频率差值确定电网处于调频死区内或者正常调频区间,判断荷电状态预期偏差值是否达到预期值,在调频死区内,SOC均衡需求与调频净功率调整需求契合时,储能电站将利用系统盈余(缺额)功率进行充电(放电),从而实现SOC均衡,其余情况下不动作,以避免造成频率反向扰动;在正常调频区间内,储能电站的均衡控制类似,但同时会叠加调频功率输出,以响应电网正常调频需求。

[0052] 本实施例中,步骤S2中荷电状态预期值 SOC_{ref} 的计算函数表达式为:

$$[0053] \quad SOC_{ref} = (\sum C_i * SOC_i) / \sum C_i$$

[0054] 上式中, C_i 为第*i*个储能电站的容量。

[0055] 本实施例中,步骤S2中荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的计算函数表达式为:

$$[0056] \quad \Delta SOC_i = SOC_i - SOC_{ref}$$

[0057] 上式中, SOC_i 表示第*i*个储能电站的荷电状态, SOC_{ref} 为荷电状态预期值。

[0058] 本实施例中,步骤S3中虚拟下垂控制中有功功率输出增量 ΔP_{K1} 的计算函数表达式为:

$$[0059] \quad \Delta P_{K1} = -K \cdot \Delta f$$

[0060] 上式中, K 为自适应下垂出力系数。

[0061] 需要说明的是,虚拟下垂控制为现有控制方法,例如可参见论文文献:颜湘武,宋子君,崔森,孙颖,李铁成.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(03):530-541.本实施例中仅仅涉及对虚拟下垂控制算法的应用,不涉及对虚拟下垂控制算法的改进,故其实现细节在此不再赘述。

[0062] 本实施例中,步骤S3中SOC均衡控制中有功功率输出增量 ΔP_{K2} 的计算函数表达式为:

$$[0063] \quad \Delta P_{K2} = -\gamma \cdot K \cdot (SOC - SOC_{REF})$$

[0064] 上式中, γ 为储能电站的充放电约束系数, K 为自适应下垂出力系数, SOC 为储能电站的荷电状态, SOC_{REF} 为储能电站集群的SOC均衡期望值。

[0065] 本实施例中,所述储能电站的充放电约束系数包括充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d ,储能电站*i*的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 大于设定值 ΔSOC_d 成立时基于放电约束系数 γ_d 进行放电以实现SOC均衡,储能电站*i*的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 小于设定值 ΔSOC_d 的负数 $-\Delta SOC_d$ 成立时基于充电约束系数 γ_c 进行充电以实现SOC均衡,令 f_{ref} 为频率差值 Δf 的预期值,当满足当 $\Delta f < -\Delta f_d$ 时,充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0066] \quad \begin{cases} \gamma_d = \mu \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

[0067] 当满足当 $-\Delta f_d < \Delta f < f_{ref}$ 时,充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0068] \quad \begin{cases} \gamma_d = \frac{\mu \cdot K_{max} \cdot \exp(-n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{max} \cdot [\exp(-n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_c = 0 \end{cases}$$

[0069] 当满足当 $f_{ref} < \Delta f < \Delta f_d$ 时,充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0070] \quad \begin{cases} \gamma_c = \frac{\mu \cdot K_{max} \cdot \exp(n \cdot \Delta f)}{\mu + K_{max} \cdot [\exp(n \cdot \Delta f) - 1]} \\ \gamma_d = 0 \end{cases}$$

[0071] 当满足当 $\Delta f > \Delta f_d$ 时, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 的计算函数表达式:

$$[0072] \quad \begin{cases} \gamma_d = 0 \\ \gamma_c = \mu \end{cases}$$

[0073] 其中, μ 为最大约束系数, K_{\max} 为自适应下垂出力系数 K 的最大值, n 为调节参数。根据函数可知, 充电约束系数 γ_c 和放电约束系数 γ_d 与频率差值 Δf 之间的关系曲线如图4所示。

[0074] 参见上述步骤可知, 本实施例的SOC均衡控制中, 当 $\Delta f < -\Delta f_d$ 时, 以最大约束系数 μ 进行放电均衡, 且避免充电均衡动作对电网频率造成冲击; 当 $-\Delta f_d < \Delta f < f_{\text{ref}}$ 时, 以相应关于最大约束系数 μ 和 Δf 的函数进行恰当充电进行均衡; 当 $f_{\text{ref}} < \Delta f < \Delta f_d$ 时, 以相应关于最大约束系数 μ 和 Δf 的函数进行恰当放电进行均衡; 当 $\Delta f_d < \Delta f$ 时, 以最大约束系数 μ 进行充电均衡, 且避免放电均衡动作对电网频率造成冲击, 从而实现了储能电站之间的SOC均衡。

[0075] 进一步地, 本实施例中步骤S3中还包括, 针对任意的储能电站 i : 在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta \text{SOC}_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 成立时, 仅选择SOC均衡控制参与一次调频, 且储能电站的有功功率输出增量 ΔP_K 为 $\Delta P_K = \Delta P_{K2}$ 。进一步地, 本实施例中步骤S3中还包括, 针对任意的储能电站 i : 在频率差值 Δf 的标么值 $|\Delta f|$ 大于预设的死区边界标么值不成立、且储能电站 i 的荷电状态预期偏差值 ΔSOC_i 的标么值 $|\Delta \text{SOC}_i|$ 大于设定值 ΔSOC_d 不成立时, 同时选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制都不参与一次调频。

[0076] 本实施例方法中协控的基本原理如下: 电网频率偏差超过调频死区且储能电站荷电状态达到 SOC_{ref} , 则一次调频不动作, SOC均衡不动作。若电网频率偏差处于调频死区且储能电站荷电状态未达到 SOC_{ref} , 根据储能电站的SOC均衡需求与系统死区内盈余(缺额)功率契合时, 储能电站将利用系统盈余(缺额)功率进行充电(放电), 从而实现SOC的均衡调整, 即一次调频不动作, SOC均衡动作; 若电网频率偏差超过调频死区, 根据电网频率调节需求功率与荷电状态均衡需求功率是否契合, 若电网频率调节需求功率与储能电站SOC均衡功率出力方向不相同, 例如需要储能电站放电参与频率调节和储能电站需要充电进行SOC均衡, 则储能电站仅考虑电网调频需求采用虚拟下垂控制策略出力。若电网频率偏差超过调频死区, 且电网频率调节需求功率与储能电站SOC均衡功率出力方向相同, 例如需要储能电站放电参与频率调节和储能电站需要放电进行SOC均衡, 则储能电站在满足出力不超过额定值的前提下进行调频和SOC均衡叠加出力。其中, 预设的死区边界标么值 Δf_d 、设定值 ΔSOC_d 是用于工况条件判断的关键依据。预设的死区边界标么值 Δf_d 、设定值 ΔSOC_d 可根据实际情况进行设定, 例如本实施例中预设的死区边界标么值 Δf_d 为 0.033, 设定值 ΔSOC_d 取值为 0.05。如图3所示, 依据上述关键依据的具体取值, 本实施例包含下述四种工况:

[0077] 工况1: 具体地, 当电网频率偏差标么值的绝对值小于死区边界标么值 0.033, 且当储能电站SOC与预期值偏差 ΔSOC_i 小于 0.05, 则该储能电站的荷电状态也属于正常波动范围, 储能电站不参与一次调频, 且SOC均衡控制不动作。

[0078] 工况2: 当频率偏差标么值小于死区边界标么值 0.033, 储能电站不参与一次调频; 当储能电站SOC与预期值偏差 ΔSOC_i 超过 0.05, 则该储能电站需要进行SOC均衡, 否则属于正常波动范围, SOC均衡控制不动作。

[0079] 工况3: 当频率偏差标么值大于死区边界标么值 0.033, 所述虚拟下垂控制中有功

功率输出增量为 $\Delta P_{K1} = -K \cdot \Delta f$, 式中 Δf 为电网频率偏差, K 为自适应下垂出力系数; 当 SOC 偏差大于 0.05 时, 所述均衡控制中有功功率输出增量为 $\Delta P_{K2} = -\gamma \cdot K \cdot (SOC - SOC_{REF})$, 式中 γ 为储能电站的充放电约束系数, SOC_{REF} 为储能电站集群的 SOC 均衡期望值; 此时若 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} < 0$, 则储能电站的有功功率输出增量为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1}$ 。

[0080] 工况4: 当频率偏差标幺值大于死区边界标幺值 0.033, 且当储能电站 SOC 与预期值偏差超过 0.05, 若 $\Delta P_{K1} \cdot \Delta P_{K2} > 0$, 则储能电站的有功功率输出增量为 $\Delta P_K = \Delta P_{K1} + \Delta P_{K2}$, 且 ΔP_K 不超过储能电站的额定功率。

[0081] 下面通过实例仿真对本方案做进一步说明。本实例是基于 MATLAB 仿真平台搭建某区域网络模型展开仿真验证。为了验证本文所提方法在多个储能电站参与一次调频场景中的可行性, 选取某区域电网作为研究对象, 相应的调频仿真模型如图 1, 其中系统额定容量为 1000MW, 三组储能电池容量分别为 3MW · 1h、3MW · 1h、2MW · 1h, 初始 SOC 分别设置为 0.7、0.4、0.3。需要指出的是, 由于储能电站的引入, 其一次调频效果显然会优于无储能的调频效果, 故不再给出无储能情况下调频效果对比。

[0082] 1) 小扰动工况

[0083] 在仿真模型运行 1h 常规小扰动综合负荷波动, 得到频率偏差结果如图 5 所示, 储能电池 SOC 曲线如图 6 和图 7 所示, 调频指标如表 1 所示。从结果图中可以看出, 相比传统策略本实施例方法 (图中表示为本文策略或本文方法) 不仅使系统频率偏差的波动幅值大大减小, 且在 SOC 均衡的过程中无频率突变发生, 在避免单个储能电站长期不健康运行方面较有优势。

[0084] 表 1: 小扰动工况下对应调频指标

方法	本实施例方法	传统方法
f_{rms}	0.0180	0.0729
SOC_{rms1}	1.928	2.235
SOC_{rms2}	0.625	0.694
SOC_{rms3}	1.511	1.725

[0086] 从表 1 中可以看出在常规小扰动工况下, 本实施例方法相对传统方法在频率调节效果指标方面提升了 75.3%, 三个储能电站在 SOC 均衡指标方面分别提升了 13.7%、9.9%、12.4%。

[0087] 2) 大扰动工况

[0088] 在仿真模型运行 1h 常规小扰动综合负荷波动, 得到频率偏差结果如图 8 所示, 储能电池 SOC 曲线如图 9 和图 10 所示。从结果图中可以看出, 在极端大扰动工况下, 本文方法相对传统方法在频率调节效果指标方面提升了 25.7%, 三个储能电站在 SOC 均衡性指标方面分别提升了 24.9%、19.6%、27.2%, 具体指标参数如表 2 所示。

[0089] 表 2: 大扰动工况下对应调频指标。

方法	本文方法	传统方法
[0090] f_{rms}	0.0205	0.0276
SOC_{rms1}	0.127	0.169
SOC_{rms2}	0.041	0.051
SOC_{rms3}	0.099	0.136

[0091] 由图8~图10,以及表2可见,本实施例方法能够挖掘不同荷电状态的储能电站的调频潜力,同时可以有效避免储能电站SOC越限,有助于各储能电站SOC的状态一致性。

[0092] 综上所述,本实施例方法先通过监测电网实时运行状态与储能电站荷电状态,得到当前频率与额定频率的偏差及储能电站荷电状态与预期值的偏差;经过与电网调频需求功率进行比较,选择合适的场景进行SOC均衡动作。针对SOC均衡动作与调频动作方向相反的情况,选择虚拟下垂控制参与一次调频;针对SOC均衡动作与调频动作方向相同的情况,选择虚拟下垂控制与SOC均衡控制同时参与一次调频;此策略可大大削减影响单个储能电站过度使用的负面因素,有利于储能电站的合理利用。本实施例方法能够在电网受到扰动时,有效缩小频率波动幅值,恢复电网频率,并且结果正确、可靠性强。

[0093] 此外,本实施例还提供一种考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制系统,包括相互连接的微处理器和存储器,该微处理器被编程或配置以执行前述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

[0094] 此外,本实施例还提供一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质中存储有计算机程序,该计算机程序用于被微处理器编程或配置以执行前述考虑SOC均衡的储能电站一次调频控制方法的步骤。

[0095] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可读存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0096] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,本发明的保护范围并不局限于上述实施例,凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出,对于本技术领域

的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理前提下的若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

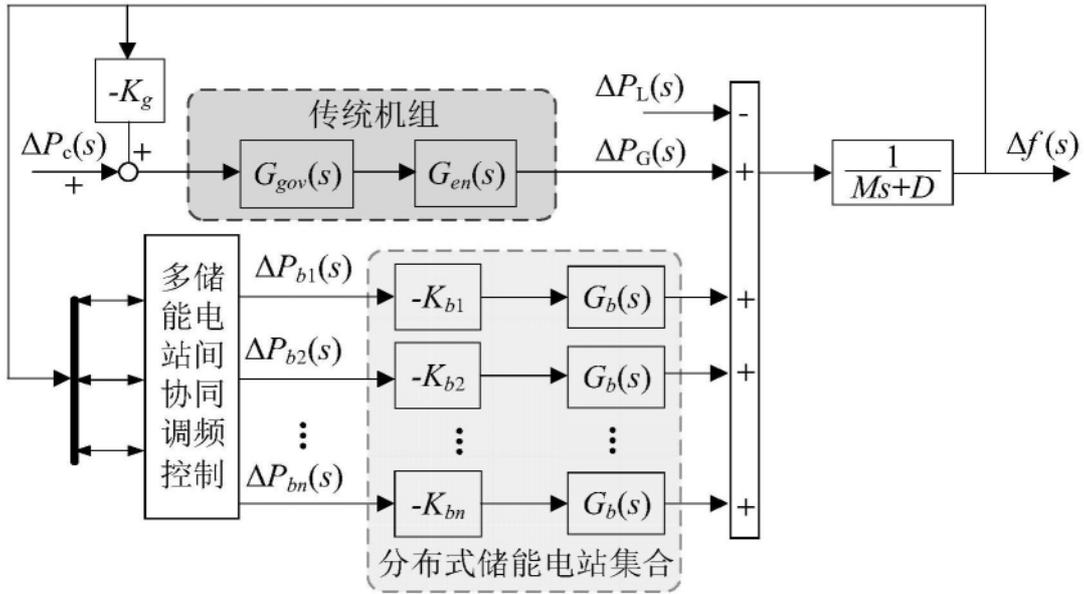


图1

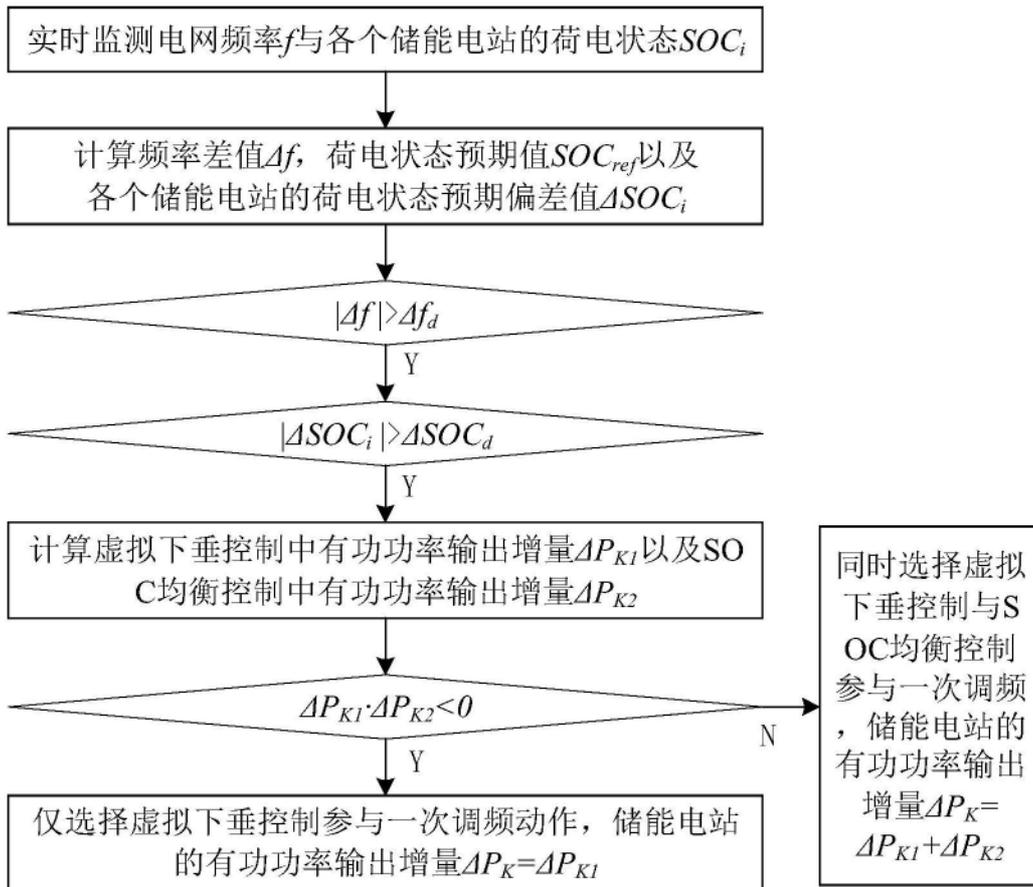


图2

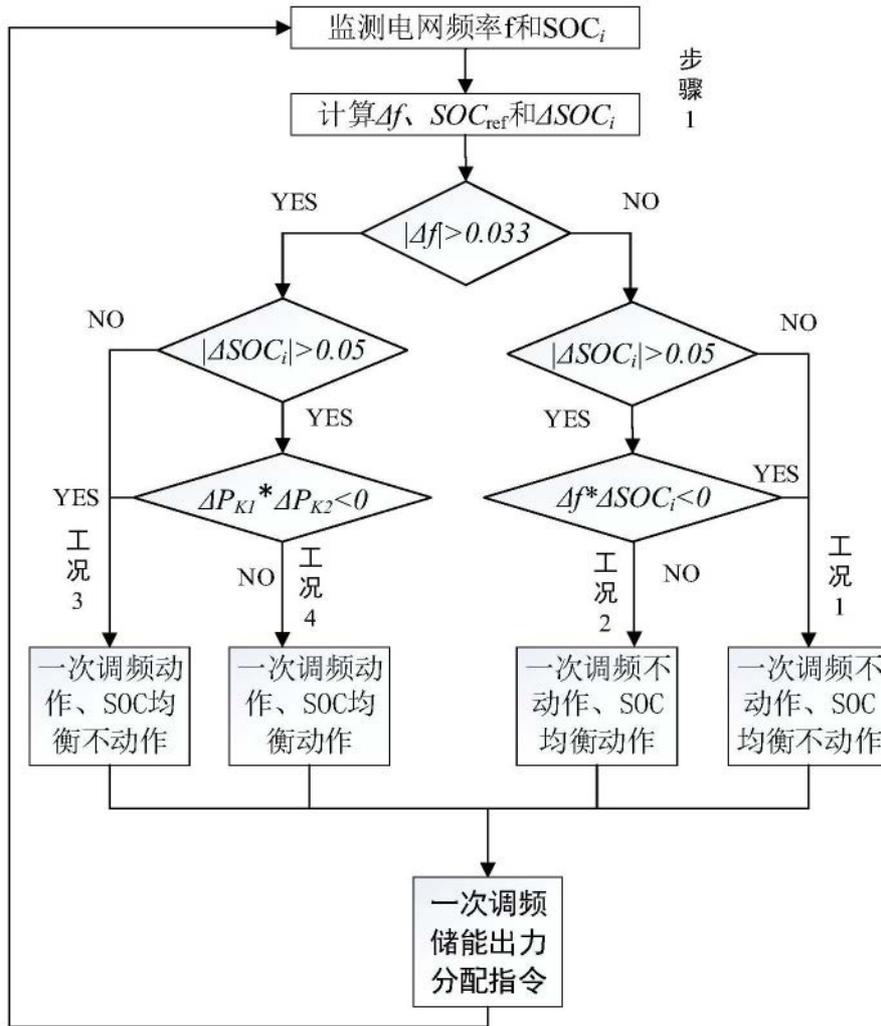


图3

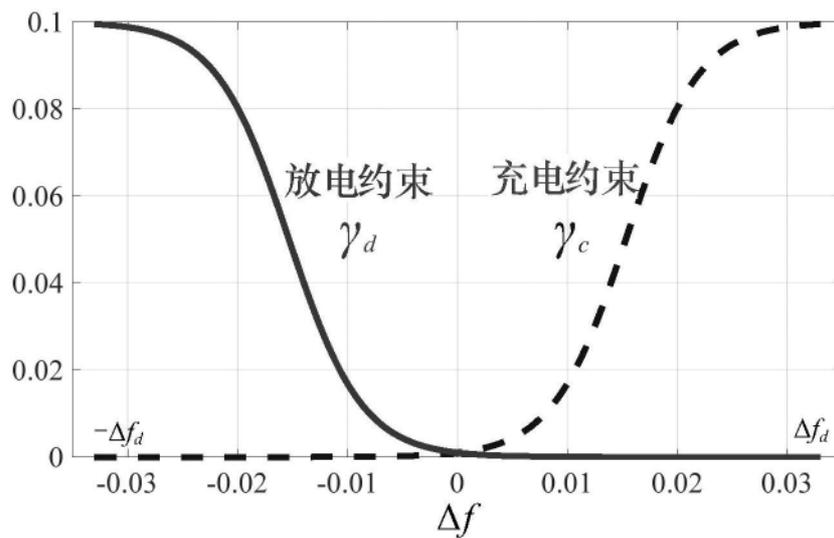


图4

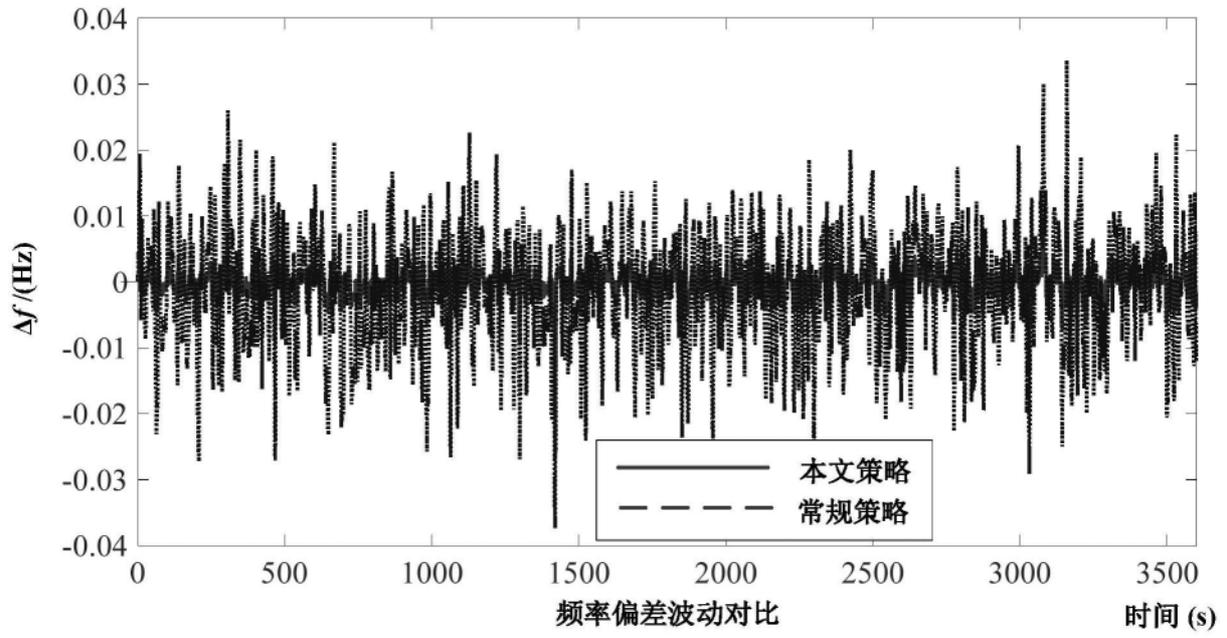


图5

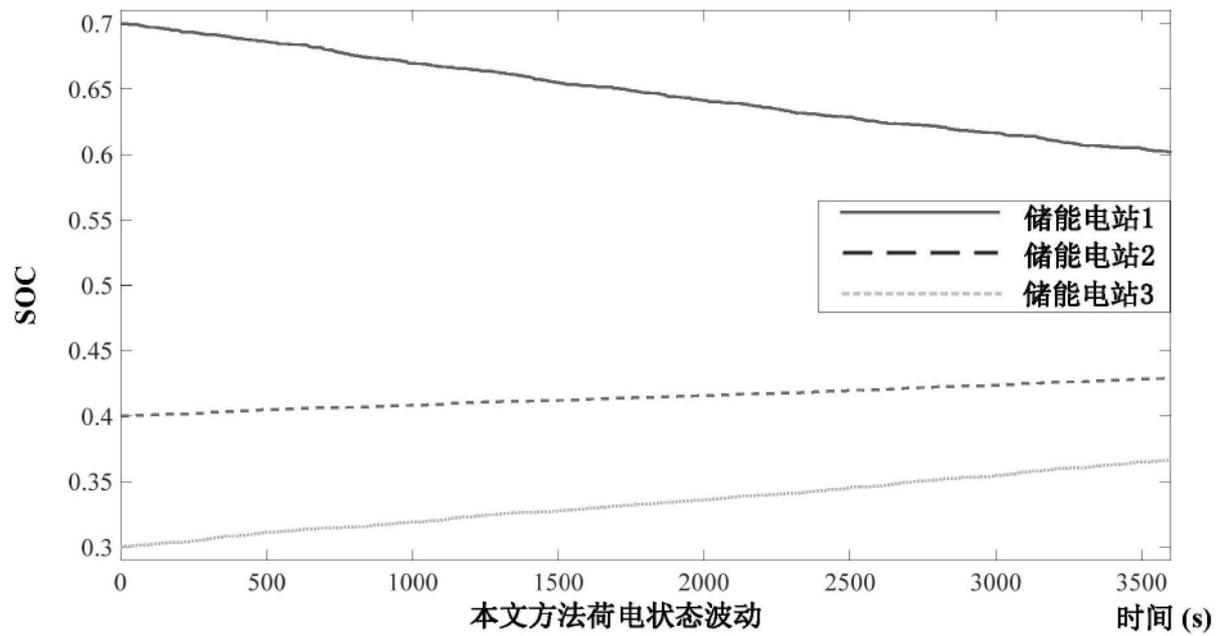


图6

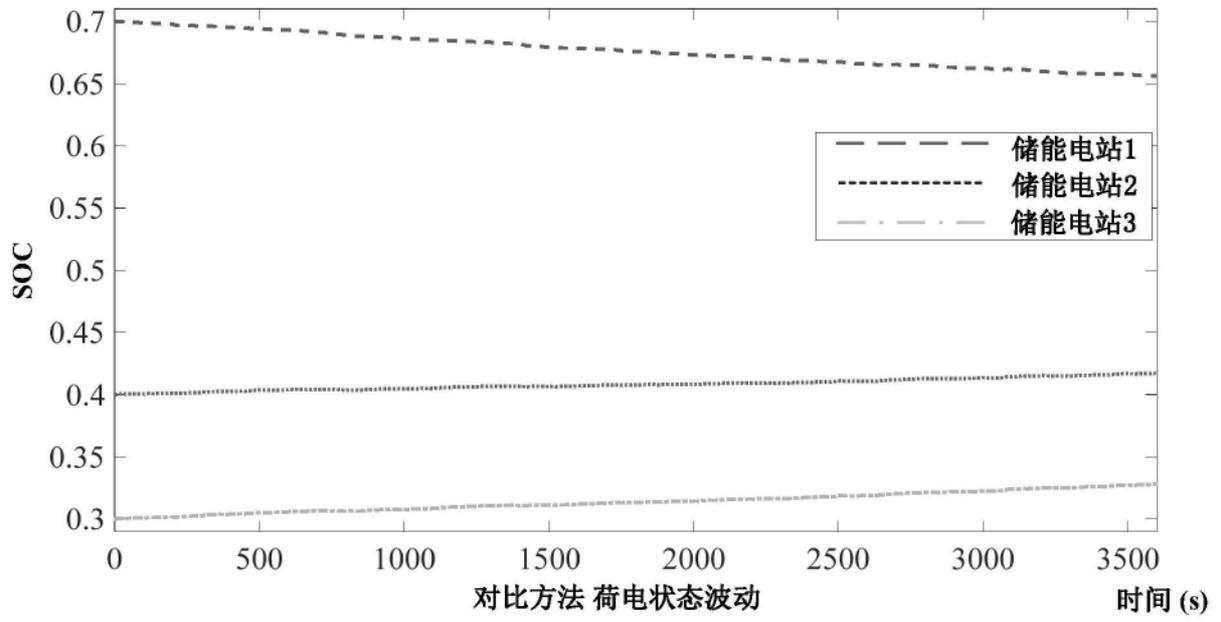


图7

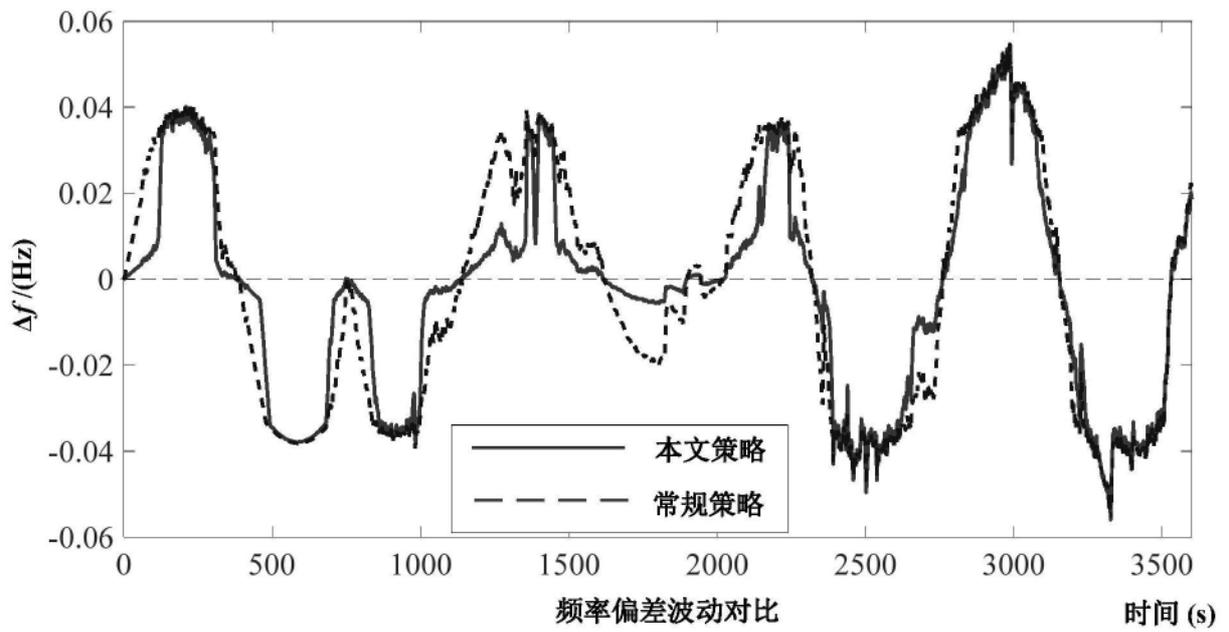


图8

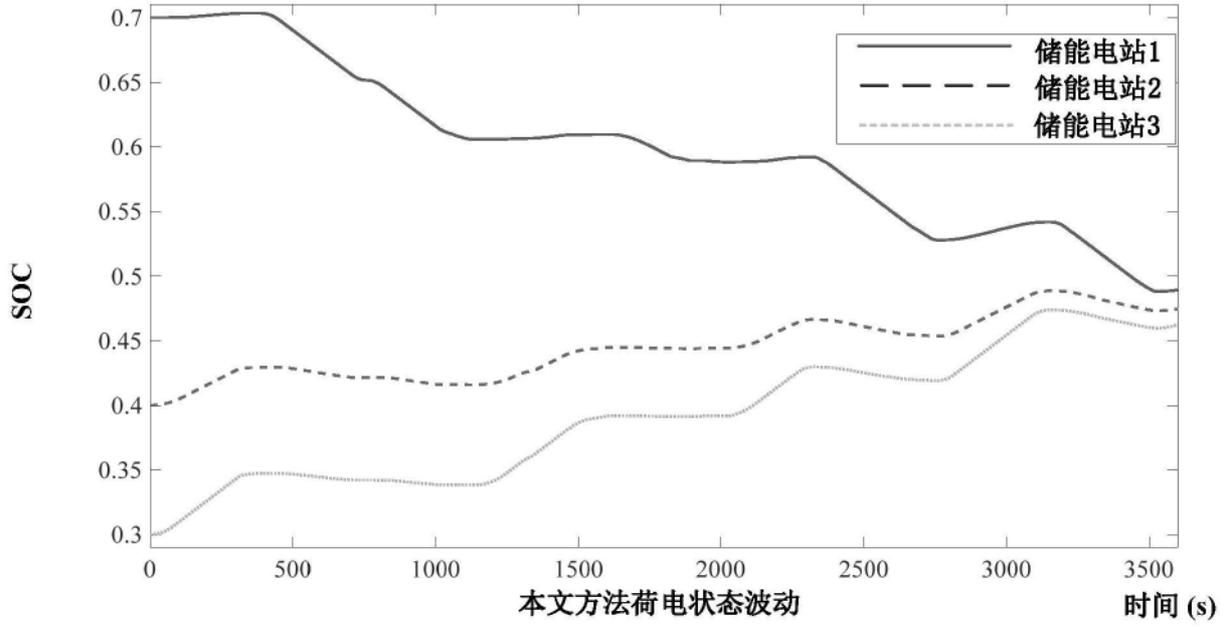


图9

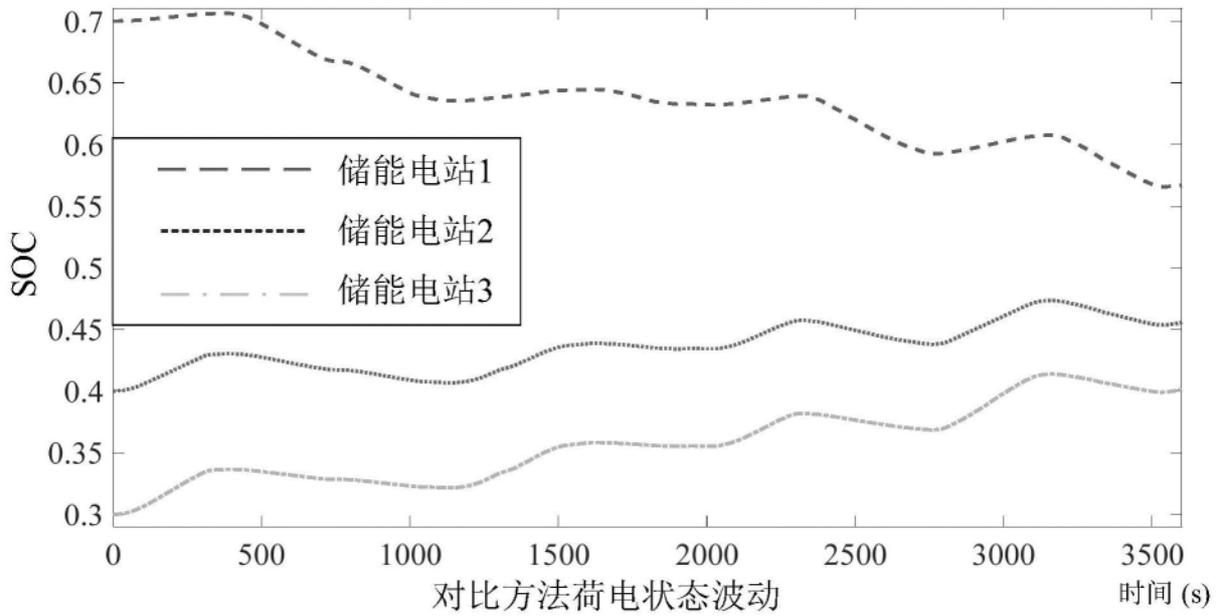


图10