

引用格式: 严小珊, 唐惠玲, 吴杰康, 等. 基于 MPC 的光-储协同调频优化策略 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 125-138. YAN Xiaoshan, TANG Huiling, WU Jiekang, et al. Optimization strategy for collaborative frequency modulation of pvs-ess based on MPC [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 125-138. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.12.

基于 MPC 的光-储协同调频优化策略

严小珊¹, 唐惠玲^{1,✉}, 吴杰康², 周治廷¹, 龙泳丞¹, 冯国华³

(1. 广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006;

3. 广东交通职业技术学院 海事学院, 广东 广州 510650)

摘要: [目的] 为了降低光伏发电给电网带来的频率扰动, 并进一步提升调频效果, 提出了一种基于 MPC (Model Predictive Control) 的光-储协同调频优化策略, 分析了该策略的基本原理、控制流程、约束条件、目标函数并优化了权重系数。[方法] 构建了一个基于 MPC 的光-储并网系统模型, 并根据该模型推导出了非线性状态空间方程。为了验证该策略的调频效果, 设置了 4 种不同的仿真环境: 无储能、带电池储能、带混合储能以及文章提出的策略。[结果] 仿真结果表明: 与其他场景相比, 所提出的策略在调频效果上是最优的, 无储能的条件下调频效果是最差的, 此外, 采用混合储能的调频方法优于使用电池储能的方法。[结论] 在 MATLAB/Simulink 平台上验证了所提策略的有效性。在光伏发电系统中, 对储能和光伏最大功率点跟踪进行优化控制, 能使电网频率更加稳定, 从而提高整个系统的稳定性。该研究成果可为光伏发电并网提供参考依据。

关键词: 协同调频; 光-储; MPC; 混合储能; 电力系统

中图分类号: TM615; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0125-14

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.12

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Optimization Strategy for Collaborative Frequency Modulation of PVs-ESs Based on MPC

YAN Xiaoshan¹, TANG Huiling^{1,✉}, WU Jiekang², ZHOU Zhiting¹, LONG Yongcheng¹, FENG Guohua³

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of
Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

3. School of Maritime Academy, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to reduce frequency disturbance caused by photovoltaic (PV) generation to power grid and further improve the frequency modulation effect, an optimization strategy for collaborative frequency modulation of PVs-ESs based on MPC (Model Predictive Control) is proposed. The basic principles, control flow, constraints, target function and weight coefficient of the strategy are analyzed. [Method] A model of optical-storage network based on MPC was constructed and the nonlinear state space equation was derived. In order to verify the frequency modulation effect of this strategy, four different simulation environments were set up: no energy storage, battery storage, mixed energy storage and the strategy proposed in this paper. [Result] Simulation results show that compared with other scenarios, the proposed strategy is optimal in terms of frequency modulation and the worst in the absence of energy storage. In addition, the hybrid energy storage method is superior to the battery energy storage method. [Conclusion] The effectiveness of the proposed strategy is validated on the MATLAB/Simulink platform. In photovoltaic power generation system, optimal control of energy storage and PV maximum power point tracking can make the grid frequency more stable and improve the

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目-粤港澳研究团队项目“大湾区轨道交通关键车载机电设备的安全测评与运维管理”(2020B1515130001)

stability of the whole system. The results of this study can be used as a reference for PV connection.

Key words: collaborative frequency modulation; PVs-ESSs; MPC; hybrid energy storage; electrical power systems

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在“双碳”背景下,我国新型电力系统正在加速向绿色低碳转型,电力系统发电结构中新能源所占比重逐年攀升,其中,光伏和风电装机容量已跃居世界首位^[1]。电力脱碳以高渗透型新能源并网为主,但是,这种不可控能源内在间歇性与随机性会影响电网电能质量、降低电网系统惯量水平并造成电网调频能力降低^[2-4]。一般来说,光伏电站在 1 min 之内的功率下降可以达到装机容量的 60%,光伏发电主要是由电力电子变流装置组成,不具备惯量及一次调频能力,不会主动响应系统频率变化,从而造成电网产生严重的频率偏差^[5-7]。

电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)以其高控制精度、快速响应速度和高度的灵活性而被认为是辅助风光并网调频的优选方案。国内外众多学者已经证实了 BESS 参与电网调频的有效性^[8-12]。文献[13]探讨了在不同光伏并网场景中,电池储能系统(BESS)如何影响大型光伏并网电网系统的频率稳定性。文献[14]构建了一种光储(Photovoltaic-Energy Storage, PV-ES)系统的模型,该模型能够让逆变器的空闲容量参与到系统的调频和调峰过程中。文献[15]介绍了一种结合荷电状态(State Of Charge, SOC)和频率偏差的储能参与电网一次调频的控制方法。文献[16]针对电池储能系统提出了一种自适应充电状态(SOC)恢复策略的下垂型控制策略。文献[17]利用均值法,提出了一种适合高渗透可再生能源电网系统快速调频的储能容量分配方法。文献[18]构建了储能系统参与一次调频的区域电网等效模型。

但是,仅仅依赖电池储能来提供电网调频服务会导致较高的成本^[19-20]。此外,可再生能源发电的瞬时变化或负载功率的波动可能会使电池频繁充电/放电,这会缩短 BESS 的使用寿命^[21-22],从而降低系统的可靠性和经济性。学者们试图将电池与高功率密度的存储设备,譬如:超级电容器、超导磁储能、飞

轮储能等^[23-24],进行结合。与传统的电池储能方法相比,后者具有更高的功率密度和更快的动态响应,它不仅可以完成高频服务的调节信号,从而降低电池储能的压力,还能在最大程度上减少电池的尺寸和应力水平。因此,它们有能力在更短的时间内释放或吸收更多的能量,从而实现高频补偿。另外,超级电容频繁的充电和放电行为并不会对其使用寿命产生负面影响,实际上,它们的生命周期比电池储能高得多^[25]。文献[26]采用混合储能技术参与电网辅助服务,并证实其不仅具有更优的经济效益,还具备更稳定的调频性能。文献[27]介绍了一种基于电池-超级电容混合储能系统参与光伏并网的自适应学习控制策略。文献[28]提出了一种飞轮和锂电池联合的混合储能参与光伏并网的一次调频控制模型,从而增强了光伏系统的一次调频性能。

上述现有的研究主要聚焦于储能参与高渗透率新能源的并网调频适应性的研究,尽管储能拥有柔性的调节能力,并能有效地辅助新能源的并网调频,但调频的最优化问题却被忽略了。新能源的并网出力具有随机性和波动性,预测误差会随着预测时间的提前而增大,从而增加配电系统优化控制的难度。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一种在特定约束条件下能够实现最优控制的技术^[29],它能较好地解决上述问题,因此,在电力系统的优化控制中,它受到了高度的重视。

在“新能源+储能”的联合并网系统运行中存在储能的荷电状态(State Of Charge, SOC)和功率备用上限等约束条件,传统的处理这些约束条件的方法效果较差,而 MPC 能够克服系统的不确定性,是解决这个难题的有效方法。文献[30]基于模型预测控制理论提出了一种含分布式光伏配电网的有功功率-无功功率协调控制方法,将控制过程划分成多种独立模型预测控制的多时间尺度的优化模型。文献[31]提出了一种基于 MPC 的风储联合参与电网一次调频的优化控制策略,提高了系统的调频性能。在文献[32]中,考虑到风电场和储能的各种约束条

件, 基于 MPC, 提出了风储联合调频策略。文献 [33] 以最小系统频率偏差和频率变化率的总和为目标, 同时考虑到光储电站的总发电量和有功功率等约束条件, 提出了一种基于 MPC 的光储联合调频控制方案。此外, 将储能与 MPC 同时应用于新能源发电系统调频还可以实现经济更优化。文献 [34] 以自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 和电池储能电站 (Battery Energy Storage Station, BESS) 运行成本最小为目标, 提出了一种基于模型预测控制 (MPC) 的储能控制策略。在文献 [35] 中, 引入了基于 MPC 的策略, 降低了微电网的运营成本。文献 [36] 介绍了一种结合电池和超级电容的 MPC 控制系统, 并优化了电池储能管理系统的充放电模型。从现有的光伏并网系统模型预测控制研究中可以看出, 大部分研究都集中在优化储能管理系统和系统的经济性效益, 缺乏对电网频率优化的关注, 稳定的电网频率是影响电力系统安全平稳运行的关键要素之一。

因此, 针对上述问题, 文章提出了一个基于 MPC 的光-储协同调频的优化策略。首先, 构建了基于 MPC 光储逆变并网发电仿真系统, 其次, 在 MPC 预测控制策略中, 考虑了光储电站的运行条件、电池电荷状态 SOC 等约束条件, 并以光伏电压偏差、电网电压偏差和系统频率偏差最小为目标, 通过滚动优化, 快速精准协同控制混合储能系统, 从而稳定系统的频率。

1 光-储并网系统模型

1.1 光-储并网系统拓扑结构

文章所研究的光-储并网系统的拓扑结构, 如图 1 所示, 该模型包含光伏阵列、升压变压器、电池储能装置、超级电容储能装置、两电平逆变器、DC-DC 变换器和 MPC 控制器。其中升压变压器是基于 DC/DC Boost 电路设计的, 而两个电平逆变器则是通过电流的内环与电压的外环进行控制的。

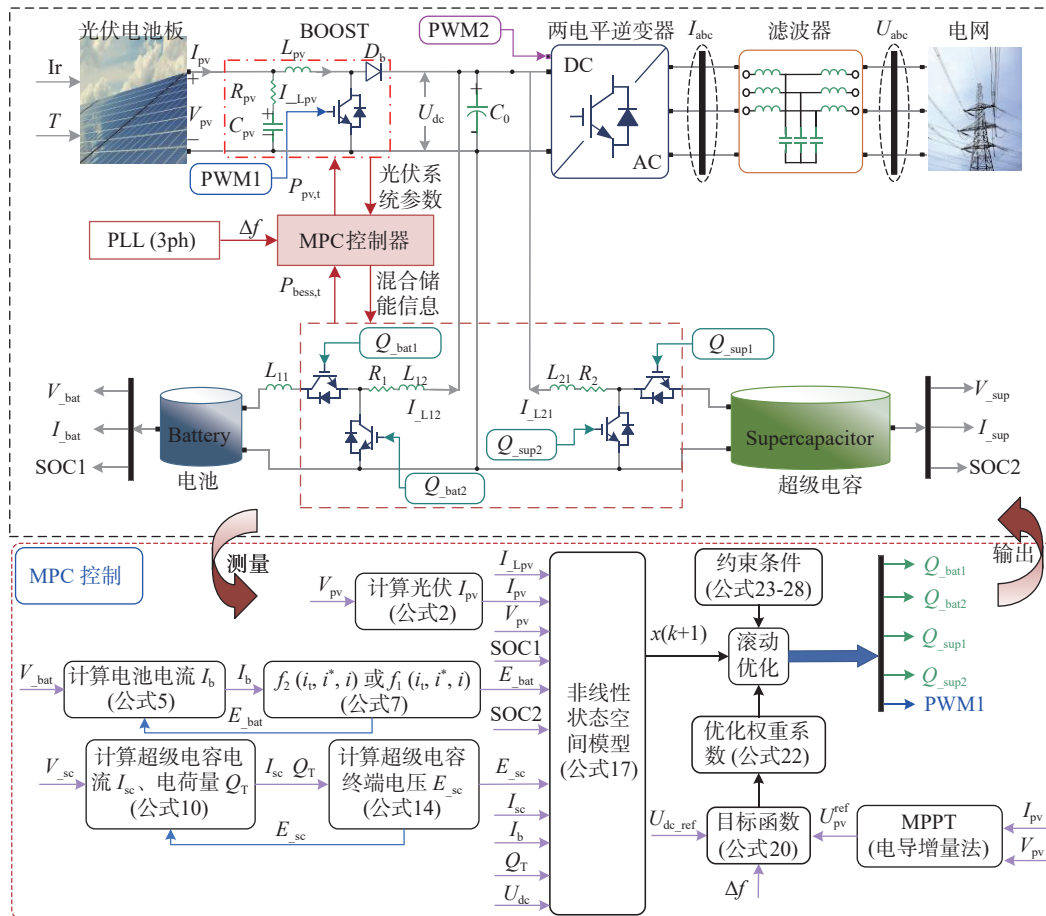


图 1 光-储并网系统拓扑结构
Fig. 1 Topology of optical storage joint grid-connected system

光伏发电的有功出力主要受到光照和温度变化的影响,表现出非线性的特性,为实现能源最大利用,使光伏发电效率高,有必要采用最大功率点跟踪技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[37],因此,文章采用常见的电导增量法(Incremental Conductance, INC)^[38]来实现光伏的最大功率点跟踪。如图 1 所示, C_0 是逆变器侧直流电容, V_{pv} 、 I_{pv} 分别是光伏侧输出电压、电流, U_{dc} 是逆变器侧直流母线电压实际值; V_{abc} 、 I_{abc} 分别是并网电压、电流。 C_{pv} 、 R_{pv} 为 BOOST 内置电容、电阻, L_{pv} 、 I_{Lpv} 分别为 BOOST 内置电感和电感电流, L_{11} 、 L_{12} 、 R_1 为电池侧 DC-DC 变换器内置电感、电阻, L_{21} 、 R_2 为超级电容侧 DC-DC 变换器内置电感、电阻。

混合储能装置 DC-DC 变换器的信号处理如下:

$$\begin{cases} Q_{bat1} = (1 - Q_{bat2}) \in (0, 1) \\ Q_{sup1} = (1 - Q_{sup2}) \in (0, 1) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 光伏子系统电压-电流特性^[39-40]

在实际应用中,光伏阵列是通过串联或并联光伏电池来实现更高的电压和电流输出。光伏电池由一个二极管和电阻串联或并联组合而成,因此光伏阵列的非线性电压和电流关系如下所示:

$$\begin{cases} I_{pv} = N_{pa}I_{pv'} - N_{pa}I_{fill}W - \frac{V_{pv} + I_{pv}DR_{sc}}{DR_{pa}} \\ W = \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}DR_{sc}}{\varepsilon N_{se}V_t}\right) - 1, D = \frac{N_{se}}{N_{pa}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

- I_{pv} —— 光伏输出电流(A);
- $I_{pv'}$ —— 光伏电流(A);
- I_{fill} —— 饱和电流(A);
- V_{pv} —— 光伏电压(V);
- V_t —— 热电压(V);
- ε —— 二极管理想因子;
- R_{se} 、 R_{pa} —— 光伏串联和并联电阻值(Ω);
- N_{pa} 、 N_{se} —— 光伏阵列电池串联和并联数量。

$I_{pv'}$ 、 I_{fill} 、 V_t 受温度 T 和光照强度 I_r 的影响,它们之间的关系式如下:

$$\begin{cases} V_t = \frac{N_{se}kT}{q} \\ I' = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{ocv}}{\varepsilon V_t N_{se}}\right) - 1} \\ I_{fill} = I' \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left\{\frac{qE_{bge}}{k\varepsilon} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right\} \\ I_{ph} = \frac{I_r}{1000} (I_{sc} + \vartheta_i(T - T_n)) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- I_{sc} —— 短路电流(A);
- V_{ocv} —— 光伏 PV 的开路电压(V);
- T_n —— 额定温度(K);
- E_{bge} —— 半导体的带隙能量(J);
- ϑ_i —— 温度系数(ppm/K);
- k —— 玻尔兹曼常数, 1.380649×10^{-23} J/K;
- q —— 电子电荷(C)。

光-储并网系统中光伏升压变压器采用 BOOST 拓补结构,如图 1 所示,根据 KVL 和 KCL 可得:

$$\begin{cases} V_{pv} = L_{pv} \frac{dI_{Lpv}}{dt} + (1 - D_{PWM1})U_{dc} \\ I_{pv} = C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} + I_{Lpv} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

- V_{pv} —— 光伏输出电压(V);
- L_{pv} —— BOOST 电路升压电感(H);
- I_{Lpv} —— 流过升压电感的电流(A);
- C_{pv} —— 光伏侧电容(F);
- U_{dc} —— 直流侧电压(V);

D_{PWM1} —— DC/DC Boost 电路中 IGBT/Diode 控制输入信号,即占空比, $D_{PWM1}(t) \in (0, 1)$ 。

1.3 混合储能电压-电流特性^[41]

1.3.1 电池储能电压-电流特性

文章构建的光-储并网系统中使用了电池-超级电容混合储能,其中,电池选用最常见的锂离子电池,其等效电路模型是基于 simulink 的 Battery 模块,如图 2 所示,这是锂离子电池的等效电路模型,锂离子电池由受控电压 E_{bat} 和内部电阻 R_{bat} 串联而成。

图 2 中参数的设定如表 1 所示。

电池终端电压 V_{bat} 和电池电荷状态 SOC1 由电池内部电流 I_b 决定,它们之间的关系式如下:

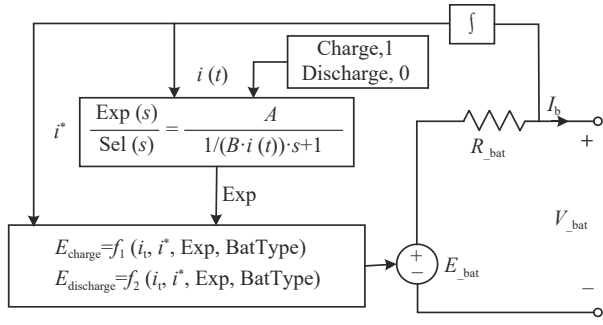


图 2 锂离子电池等效电路

Fig. 2 Lithium-ion battery equivalent circuit

表 1 光-储并网系统参数设置

Tab. 1 Parameter setting of optical storage joint grid-connected system

参数名	参数设定	参数名	参数设定
C_{pv}/F	1×10^{-3}	C_0/F	5494.374×10^{-4}
R_{pv}/Ω	1×10^{-6}	L_{21}/H	0.3×10^{-3}
L_{pv}/H	4.3244×10^{-2}	R_2/Ω	0.05
L_{11}/H	1.5×10^{-3}	R_1/Ω	0.05
L_{12}/H	0.355×10^{-3}	—	—

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{bat} I_b, i_t(t) = \int_0^t I_b(t) dt \quad (5)$$

$$SOC1 = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right)$$

式中:

Q ——最大电池容量(Ah)。

电池电荷状态 SOC1 的关系式可以转换为:

$$\frac{dSOC1}{dt} = 100 - \frac{100 (E_{bat} - R_{all} I_b - U_{dc})}{QR_{all}} \quad (6)$$

式中, $R_{all} = R_{bat} + R_1$, 它受控电压 E_{bat} 受电池的充电和放电模式影响, 其表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Charge}(i^* < 0): \\ f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{KQ i^*}{i_t + 0.1Q} - \frac{KQ i_t}{Q - i_t} + A \exp(-Bi_t) \\ \text{Discharge}(i^* > 0): \\ f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{KQ i^*}{Q - i_t} - \frac{KQ i_t}{Q - i_t} + A \exp(-Bi_t) \end{array} \right. \quad (7)$$

式中:

E_0 ——开路电压(V);

K ——极化常数(V/Ah);

i ——电池电流(A);

i^* ——低频电流(A);

i_t ——提取的容量(Ah);

A ——指数电压(V);

B ——指数容量(Ah)。

根据 KVL 和 KCL, 电池变换器的电路方程式可以写成:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{bat} = R_{bat} I_b + R_1 Q_{bat1} I_{L12} - L_{pv} \frac{dI_{Lpv}}{dt} + R_{pv} C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ R_{pv} C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} = L_{pv} \frac{dI_{Lpv}}{dt} + R_1 I_{L12} + L_{12} \frac{dI_{L12}}{dt} + Q_{bat2} U_{dc} \\ C_0 \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{L12} + I_{Lpv} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{bat} = R_{bat} I_b + R_1 Q_{bat1} I_{L12} + R_1 I_{L12} \\ + L_{12} \frac{dI_{L12}}{dt} + Q_{bat2} U_{dc} \\ C_0 \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{L12} + I_{Lpv} \end{array} \right. \quad (9)$$

1.3.2 超级电容储能电压-电流特性

文章采用的超级电容储能等效电路模型是基于 simulink 的 Supercapacitor 模块, 如图 3 所示, 这是超级电容的等效电路模型。

超级电容器输出电压使用 Stern 方程, 表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sc} = \frac{N_s Q_T d}{N_p N_c \delta \delta_0 A_i} + \vartheta' - R_{sc} i_{sc} \\ \vartheta' = \frac{2N_e N_s \vartheta T'}{F} \operatorname{arsinh}^{-1} \left(\frac{Q_T}{N_p N_c^2 A_i \sqrt{8\vartheta T' \delta \delta_0 c}} \right) \\ Q_T = \int i_{sc} dt \end{array} \right. \quad (10)$$

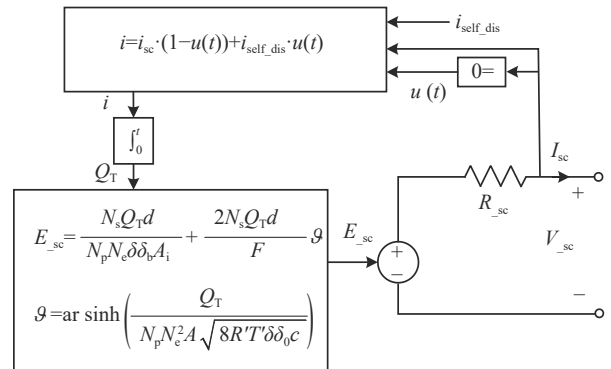


图 3 超级电容储能等效电路

Fig. 3 Supercapacitor energy storage equivalent circuit

式中:

- E_{sc} ——超级电容终端电压(V);
 R_{sc} ——总电阻(Ω);
 i_{sc} ——超级电容器电流(A);
 Q_T ——电荷量(C);
 d ——分子半径(m);
 δ ——材料的介电常数(F/m);
 δ_0 ——真空介电常数, $8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m;
 A_i ——电极和电解质之间的界面面积(m^2);
 N_e ——电极层数;
 N_s ——并联超级电容器的数量;
 N_p ——并联超级电容器的数量;
 θ ——理想气体常数, 8.314 J/(mol·K);
 T' ——工作温度(K);
 F ——法拉第常数, 96485.3383 ± 0.0083 C/mol;
 c ——摩尔浓度(mol/L)。

当超级电容处于自放电状态时, $i_{sc}=0$, Q_T 的表达式如下所示:

$$Q_T = \int i_{self_dis} dt, \quad (i_{sc} = 0) \quad (11)$$

式中:

i_{self_dis} ——自放电电流(A), 它在不同时间段, 有不同的输出值, 其表达式如下:

$$i_{self_dis} = \begin{cases} \frac{C_T \alpha_1}{1 + s R_{sc} C_T} & (\text{if } t - t_{oc} \leq t_3) \\ \frac{C_T \alpha_2}{1 + s R_{sc} C_T} & (\text{if } t_3 < t - t_{oc} \leq t_4) \\ \frac{C_T \alpha_3}{1 + s R_{sc} C_T} & (\text{if } t - t_{oc} > t_4) \end{cases} \quad (12)$$

式中:

C_T ——超级电容器电压(V);

常数 α_1 、 α_2 和 α_3 ——超级电容电压在时间间隔 (t_{oc}, t_3) 、 (t_3, t_4) 和 (t_4, t_5) 期间的变化率, 如图 4 所示。

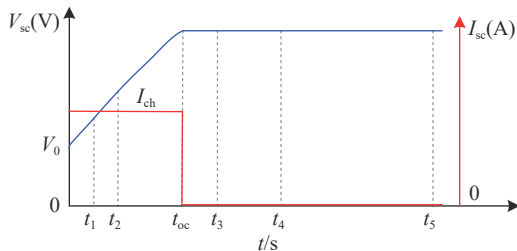


图 4 超级电容器电压充放电特性

Fig. 4 Supercapacitor voltage charge and discharge characteristics

充满电的超级电容器的电荷状态 SOC2 为 100%,

而空的超级电容机的 SOC 为 0%。SOC2 表达式如下:

$$SOC2 = \frac{Q_{init} - \int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_T} \times 100 \quad (13)$$

式中:

Q_{init} ——初始电荷量(C)。

超级电容电荷状态 SOC2 的表达式可以转换为:

$$\frac{dSOC2}{dt} = \frac{100Q_{init}}{Q_T} - \frac{100(E_{sc} - R_2 I_{sc} - U_{dc})}{Q_T \cdot (R_{sc} + R_2)} \quad (14)$$

根据 KVL 和 KCL, 超级电容变换器的电路方程

式可以写成:

$$\begin{cases} E_{sc} = R_{sc} I_{sc} + R_2 Q_{sup1} I_{L21} - L_{pv} \frac{dI_{Lpv}}{dt} + R_{pv} C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} \\ R_{pv} C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} = L_{pv} \frac{dI_{Lpv}}{dt} + R_2 I_{L21} + L_{21} \frac{dI_{L21}}{dt} + Q_{sup2} U_{dc} \\ C_0 \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{L21} - I_{Lpv} \end{cases} \quad (15)$$

化简上式子可得:

$$\begin{cases} E_{sc} = R_{sc} I_{sc} + R_2 Q_{sup1} I_{L21} + R_2 I_{L21} \\ + L_{21} \frac{dI_{L21}}{dt} + Q_{sup2} U_{dc} \\ C_0 \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{L21} - I_{Lpv} \end{cases} \quad (16)$$

混合储能参数的设置如表 2 所示。

表 2 混合储能参数设置

Tab. 2 Hybrid energy storage parameter setting

电池参数	参数值	超级电容参数	参数值
极化常数 K	0.28×10^{-3} V/Ah	额定电容 C_{sc}	99.5 F
指数电压 A	1.28 V	等效电阻 R_{sc}	8.9×10^{-3} Ohms
指数容量 B	1.3 Ah	摩尔浓度 c	$1/(8NAr^3)$

1.4 系统状态空间方程

根据公式(4)、公式(6)、公式(9)、公式(14)、公式(16)构建文章的系统状态空间方程:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \frac{x_2}{L_{pv}} - \frac{(1-D_{pwm1})U_{dc}}{L_{pv}} \\
\dot{x}_2 &= \frac{I_{pv}}{C_{pv}} - \frac{x_1}{C_{pv}} \\
\dot{x}_3 &= \frac{E_{bat} - R_{bat}I_b - Q_{bat1}U_{dc} - (Q_{bat2} + 1)R_1x_3}{L_{12}} \\
\dot{x}_4 &= \frac{E_{sc} - R_{sc}I_{sc} - Q_{sup1}U_{dc} - (Q_{sup2} + 1)R_2x_4}{L_{21}} \\
\dot{x}_5 &= 100 - \frac{100[E_{bat} - (R_{bat} + R_1)I_b - U_{dc}]}{Q(R_{bat} + R_1)} \\
\dot{x}_6 &= \frac{100Q_{init}}{Q_T} - \frac{100(E_{sc} - R_2I_{sc} - U_{dc})}{Q_T(R_{sc} + R_2)} \\
2x_1 &= x_3 + x_4
\end{aligned} \quad (17)$$

式中, $x=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T=[I_{LPV}, V_{pv}, I_{L12}, I_{L21}, SOC1, SOC2]^T$ 。

2 光-储协同调频的 MPC 策略

2.1 MPC 控制基本原理

文章研究提出了一种基于 MPC 的混合储能参与光伏并网调频控制策略, 混合储能采用电池储能和超级电容储能, 其中, 超级电容储能主要负责补偿高频的功率变化, 电池储能主要负责补偿低频的功率变化。

MPC 控制的核心思想是: 在控制时域 t 时刻, 模型预测会通过初始状态来求解系统的动态模型从而预测未来 $[t, t+k]$ 的状态, 其中 k 是采样步长。基于这些预测的状态和反馈数据, 在给定的范围内, 通过目标函数和约束条件滚动优化生成控制序列。此时控制序列将被列为下一个控制对象, 在 $t+1$ 时刻, 循环上述操作, 直至结束。对于光伏并网系统而言, 温度和太阳辐照是不可控的环境因素, 模型预测控制器需要对这些非确定性参数值进行预测, 以便求解动态模型, MPC 方程可以描述为:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), \omega(k)], x(0) = x_0 \quad (18)$$

式中:

x_0 —— 初始状态;

$x(k), u(k), \omega(k)$ —— 状态变量、控制输入和环境参数。

2.2 基于 MPC 的光-储协同调频优化策略

2.2.1 基于 MPC 的光-储协同调频控制流程

如图 5 所示, 为基于 MPC 的光-储协同调频控制流程。

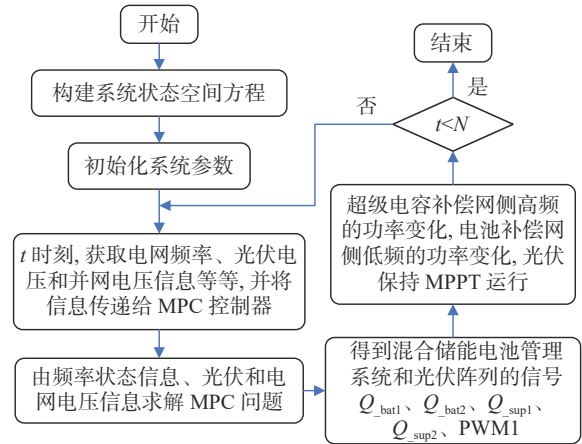


图 5 基于 MPC 的光-储并网调频控制流程

Fig. 5 Optical-storage network FM control flow based on MPC

1) 首先建立系统状态空间方程, 并对系统参数进行初始化。

2) 其次获取该时刻电网频率、光伏电压和并网电压等相关信息, 并将这些数据传送至 MPC 控制器。

3) 接着依据目标函数和优化权重系数方程, MPC 控制器将获取的状态信息进行求解。

4) 继而得到混合储能电池管理系统以及光伏阵列的控制序列。

5) 然后 MPC 控制器会发送信号, 使得超级电容能够补偿网侧高频的功率变化, 而电池则可以补偿网侧低频的功率变化, 同时确保光伏系统维持 MPPT 的运行状态。

6) 最后判断是否完成整个控制时域。若否, 那么继续更新系统 $t=t+1$ 时刻的状态信息, 并返回步骤 2), 若是, 则结束控制流程。

2.2.2 目标函数

文章研究的 MPC 控制器的目标是当环境参数 (光照强度、环境温度) 发生变化时候, 通过控制混合储能管理系统中变换器的占空比信号, 使混合储能管理系统能够及时补偿系统高、低频变化功率分量, 从而降低系统频率的波动, 提高系统稳定性。目标函数的表达式为:

$$J_{\min} = \sum_{k=0}^{N-1} F[x(k), u(k)] \quad (19)$$

式中:

J_{\min} —— 成本函数。

函数 $F(\cdot)$ 表达式如下:

$$F[x(k), u(k)] = \xi \|U_{pv}(k) - U_{pv}^{ref}\| + \rho \|\Delta f(k) - \Delta f_{thres}\| + \tau \|U_{dc}(k) - U_{dc}^{ref}\| \quad (20)$$

式中:

$$\Delta f(k+1) = f(k) - f_0 \quad \forall k \in [0, 1, \dots, N-1];$$

U_{pv}^{ref} —— 光伏电压参考值(V);

U_{dc}^{ref} —— 并网电压参考值(V);

Δf_{thres} —— 设定的频率偏差阈值, 文章取 0.02;

ξ 、 ρ 、 τ —— 对应每个函数项的加权因子, 当

$\|\Delta f(k) - \Delta f_{thres}\| \leq 0$ 时, $\rho=0$ 。

控制器在控制输入的变化量最小的情况下, 控制器每个时间步长 k 中解决预测范围中的优化问题。优化问题的第一个目标是保证光伏电压 U_{pv} 能够跟踪由电导增量法获得的电压参考值 U_{pv}^{ref} ; 第二个目标是将频率偏差 Δf 控制在设定的频率阈值范围; 第三个目标是维持系统运行条件下直流母线电压稳定。

2.2.3 优化权重系数

温度和光照强度作为光伏系统扰动量输入, 首先影响的是光伏输出功率 P_{pv} , 当光伏输出功率处于稳定状态时, 频率的表现较为稳定; 当输出功率处于不稳定状态时, 频率的表现不稳定, 它们之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dP_{pv}}{dt} = 0 & (\text{频率较稳定}) \\ \left| \frac{dP_{pv}}{dt} \right| \neq 0 & (\text{频率不稳定}) \end{cases} \quad (21)$$

加权系数的构建可以采用一次函数、二次函数、指数函数甚至复杂函数。其中, 在光伏输出功率偏差较大时, 指数函数对加权系数的调整具有更快的速度, 当系统受扰动时, 能够快速响应调频, 进一步促进频率的稳定性。当光伏输出功率偏差相对较小的时候, 指数函数会相应地减小, 然而这种程度的减小的速度会稍微慢于一次函数和二次函数。因此, 文章采用指数函数对频率偏差权重系数 ρ 进行重构。具体设计方程如下:

$$\rho_o = \rho + k_e (e^{|P_{pv}^{(k)}|} - 1) \quad (22)$$

式中:

ρ —— 加权系数初始值;

k_e —— 加权调整系数。

2.2.4 约束条件

在优化问题中的约束条件中, 考虑了储能装置

的运行条件限制、电池的电荷状态 SOC 以及光伏的运行条件限制。

1) 储能装置运行约束^[30]

$$L_{SOC,n,t} + P_{cha,n,t} \eta_{cha} \Delta T - \frac{P_{dis,n,t}}{\eta_{dis}} \Delta T = L_{SOC,n,t+\Delta T} \quad (23)$$

$$\begin{cases} 0.2L_{SOC,n}^{max} \leq L_{SOC,n,t} \leq 0.8L_{SOC,n}^{max} \\ 0 \leq P_{cha,n,t} \leq P_{cha,n,t}^{max} N_{cha,n,t} \\ 0 \leq P_{dis,n,t} \leq P_{dis,n,t}^{max} N_{dis,n,t} \\ N_{cha,n,t} + N_{dis,n,t} \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中:

$P_{cha,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 和 $P_{cha,t}^{max}$ 、 $P_{dis,t}^{max}$ —— t 时刻储能设备的充、放电功率和最大充、放电功率(W);

η_{cha} 、 η_{dis} —— 储能设备充、放电效率;

$N_{cha,t}$ 、 $N_{dis,t}$ —— 防止储能设备同时发生充、放动作的 0、1 控制变量;

L_{SOC}^{max} —— 储能设备的充电限值。

2) 储能装置参考功率与 SOC 约束

文章采用锁相环(Phase Lock Loop, PLL)技术对电网的频率 f 进行实时跟踪, 依据 f 的不同取值对逆变器的有功输出进行调控, f_0 为基准频率, 取值 50 Hz。

电池储能随着电网频率的偏移进行充放电, 储能电池在调频状态下的参考功率与 SOC 的约束条件如下^[14]:

$$P_{ess1} = \begin{cases} -P_{bat_e} & \{\Delta f > 0.04, SOC \in (SOC_{min}, SOC_{max})\} \\ P_{bat_e} & \{\Delta f < -0.04, SOC \in (SOC_{min}, SOC_{max})\} \end{cases} \quad (25)$$

式中:

P_{bat_e} —— 储能电池的额定功率(W), 规定放电为正;

SOC_{max} 、 SOC_{min} —— 90% 和 20%。

超级电容储能可以防止小幅高频扰动造成频率波动, 超级电容储能能在调频状态下的参考功率与 SOC 的约束条件如下:

$$P_{ess2} = \begin{cases} -P_{sup_e} & \{\Delta f > 0.06, SOC \in (SOC_{min}, SOC_{max})\} \\ P_{sup_e} & \{\Delta f < -0.06, SOC \in (SOC_{min}, SOC_{max})\} \end{cases} \quad (26)$$

式中:

P_{sup_e} —— 储能电池的额定功率(W), 规定放电为正。

3) 光伏运行约束条件

$$\begin{cases} P_{DG,n,t} = P_{DG,n,t}^{pre} \\ Q_{DG,n,t}^{min} \leq Q_{DG,n,t} \leq Q_{DG,n,t}^{max} \\ Q_{DG,n,t}^{max} = -Q_{DG,n,t}^{min} = \sqrt{F_{DG,n}^2 - (P_{DG,n,t}^{pre})^2} \end{cases} \quad (27)$$

式中:

$P_{DG,n,t}^{pre}$ —— t 时刻 n 节点处的光伏有功功率预测值(W);

$Q_{DG,n,t}^{max}$ 、 $Q_{DG,n,t}^{min}$ —— t 时刻 n 节点处光伏无功功率的上、下限制(Var);

$F_{DG,n}$ —— n 节点处的光伏容量(W)。

4)电压水平和电流约束条件

$$\begin{cases} I_{j,t} \leq I_j^{max} \\ U_n^{min} \leq U_{n,t} \leq U_n^{max} \end{cases} \quad (28)$$

式中:

I_j^{max} ——支路 j 的电流上限幅值(A);

U_n^{max} 、 U_n^{min} —— n 节点处电压上、下限幅值(V)。

3 算例分析

3.1 仿真系统

为验证文章所提出的基于 MPC 的光-储协同调频优化策略的可行性和有效性,在 MATLAB/Simulink 中建立了相应的仿真模型,并进行了实验验证。该系统光伏容量为 50 MW,采用 200 串 250 并的连接方式,电池储能配置 5 MW,由 5 套 1 MW 的蓄电池组成,采用 5 串 10 并的连接方式,超级电容配置 10 MW,由 10 套 1 MW 的超级电容组成,采用 1 串 10 并的连接方式。光伏阵列输入光照强度和温度信号,如图 6 所示^[14]。光照强度初始状态为 1500 W/m²,直到 0.5 s 时刻,下降为 500 W/m²,继续维持到 0.5 s 后,上升到 2000 W/m²,直到 1.5 s 时刻,又下降到 800 W/m²。温度初始值为 25 °C,受光照和环境影响到 0.5 s 时缓慢上升至 25.5 °C,0.5 s 之后温度持续缓慢下降到 24 °C,1 s 之后温度上升到 1.5 s 的 26.5 °C,最后又开始下降到 2 s 时刻的 25.5 °C。文章设置仿真时间为 2 s。

3.2 仿真结果

3.2.1 系统出力特性

系统的出力特性情况如图 7 所示, P_{PV} 、 P_{DC} 、 P_{Bat} 、 P_{SC} 依次表示为光伏出力、并网系统出力、电池储能出力、超级电容储能出力。

受光伏光照强度和温度变化影响,光伏出力在

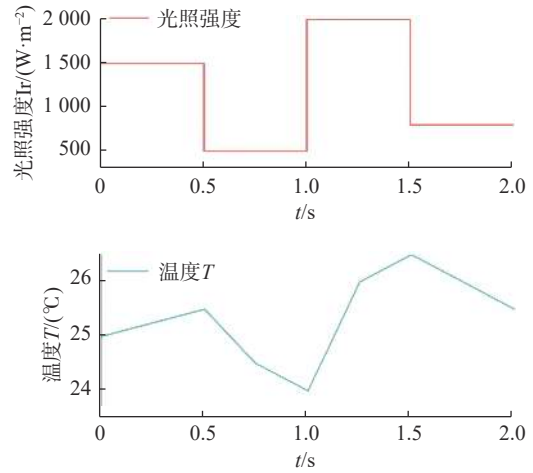


图 6 光伏输入光照强度和温度信号变化情况

Fig. 6 PV input light intensity and temperature signal changes

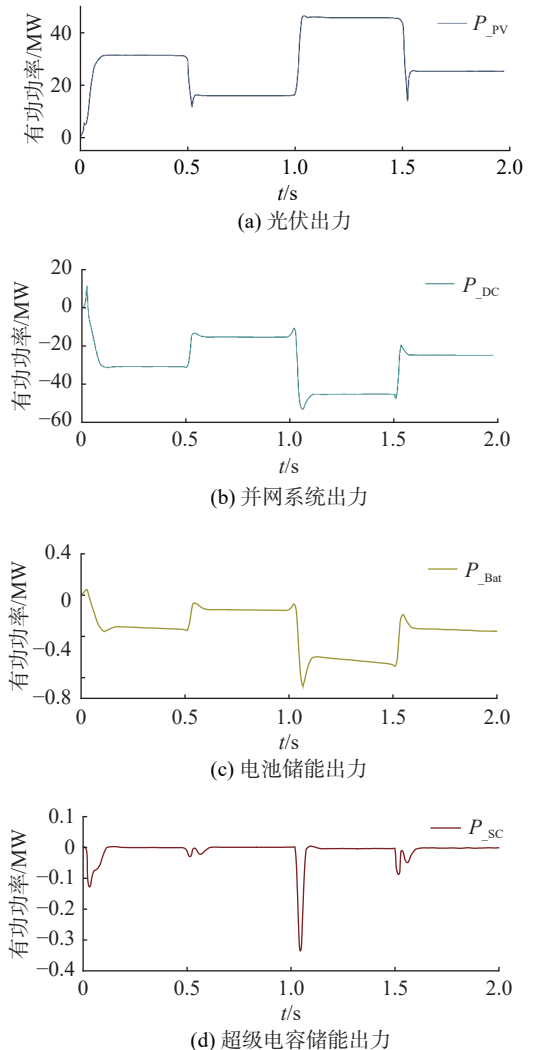


图 7 系统出力特性

Fig. 7 System output characteristics

0.5 s、1 s、1.5 s 附近发生较大的波动。可见, 电池储能出力较为平滑, 当光伏出力增加时, 电池储能充电, 当光伏出力下降时, 电池会进行放电。同理, 超级电容能在 0.5 s、1 s、1.5 s 时刻快速进行的高频补偿, 使系统功率能够快速恢复到平稳状态。

3.2.2 光伏输出电压和网侧输出电压分析

图 8 为光伏输出电压波形, 通过图 8, 我们可以观察到, 当光伏系统受信号干扰时, 使用文章提出的方法得到的光伏输出电压波形相比于无储能、电池储能和混合储能的光伏输出电压波形表现的更为稳定, 波动幅度更小且在允许的控制范围内。其中, 带混合储能的光伏输出电压波动比带电池储能的光伏输出电压波动小, 无储能条件下的光伏输出电压表现出最明显的波动。

图 9 为网侧输出电压波形, 可以看出, 使用文章方法得到的网侧电压波形的波动幅度是最小且最稳定的, 最为稳定且在允许的控制范围内。与带电池储能相比, 带混合储能的网侧输出电压波形的波动范围更小, 在无储能条件下, 其网侧输出电压波形的波动是最大的。

3.2.3 频率特性对比分析

为验证文章采用的方法对光伏并网系统调频优化效果, 在无储能、带电池储能、带混合储能以及文

章所提方法这 4 种不同控制策略下, 进行了光伏并网的仿真分析。在这里, 依次将无储能、电池储能、混合储能、文章所提方法设置为策略 1、策略 2、策略 3、策略 4, 并对他们的频率偏差进行了仿真比较分析, 如图 10 所示。显然, 在不同策略下, 光伏并网系统频率在 0.5 s、1 s、1.5 s 附近产生较明显的频率偏差。在波动的时间范围内, 依次将其定义为波动区间 1、波动区间 2 和波动区间 3。在不同策略中, 频率偏差的波动情况不同。如表 3 所示, 策略 1 的频率偏差和偏差差值是最大的, 即该系统频率波动范围最大, 策略 2 的频率波动情况较策略 1 有所改善, 策略 3 的频率波动情况又比策略 2 有进一步的改善。

在 3 个不同的波动范围中, 文章所采用的基于 MPC 的光-储并网系统的频率波动幅度是最小的。在波动区间 1 内, 与策略 1、策略 2 和策略 3 相比较, 文章所提出的策略在最大频率偏差上分别降低了 65.22%、50% 和 33.33%; 在波动区间 2 内, 与策略 1、策略 2 和策略 3 相比较, 文章所提出的策略在最大频率偏差上分别降低了 78.14%、64.15% 和 56.82%; 在波动区间 3 内, 与策略 1、策略 2 和策略 3 相比较, 文章所提出的策略在最大频率偏差上分别降低了 73%、63.63% 和 51.21%。综上可得, 文章所提出的

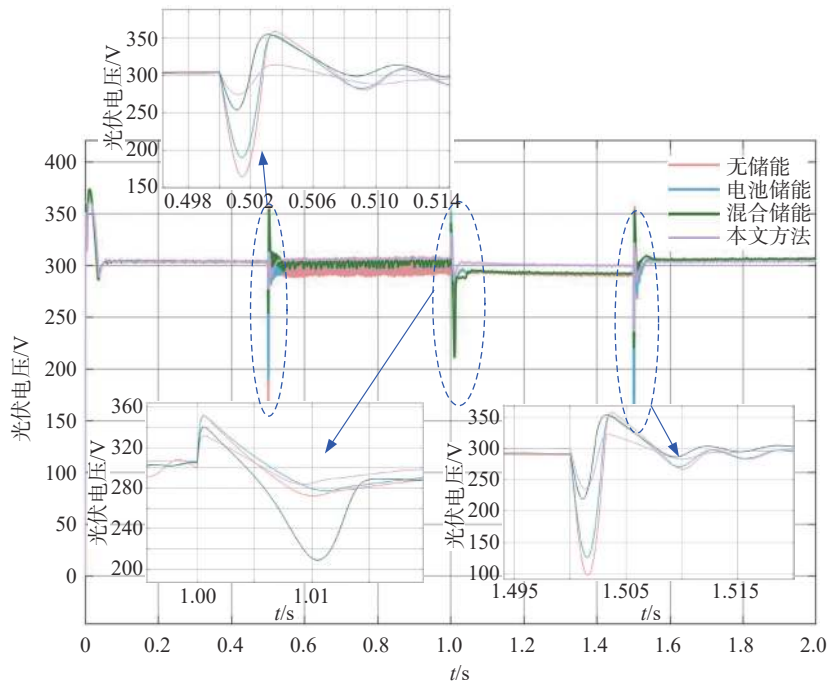


图 8 光伏输出电压波形

Fig. 8 Photovoltaic output voltage waveform

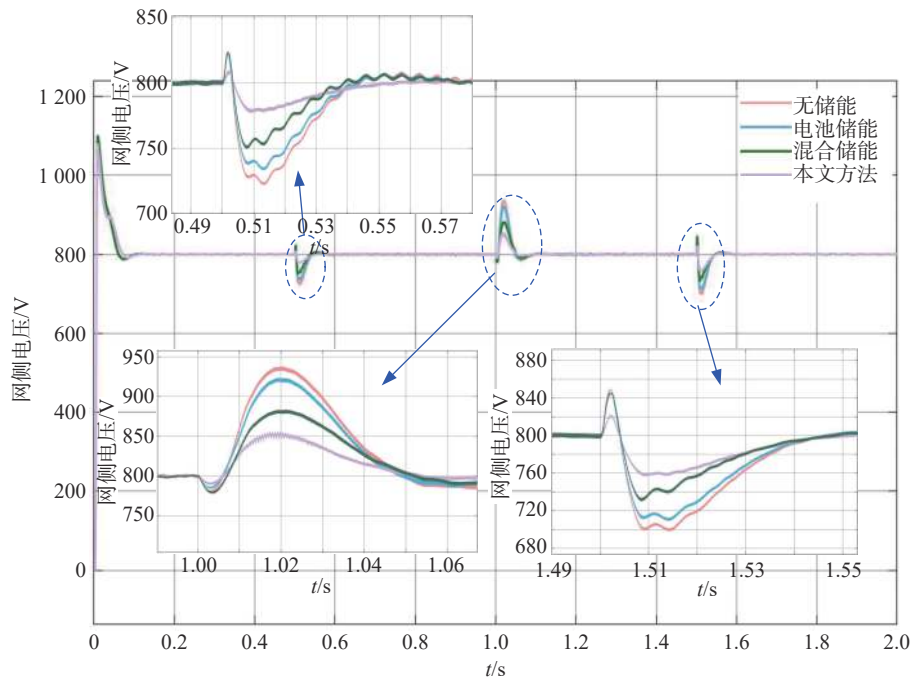


图 9 网侧输出电压波形

Fig. 9 Network side output voltage waveform

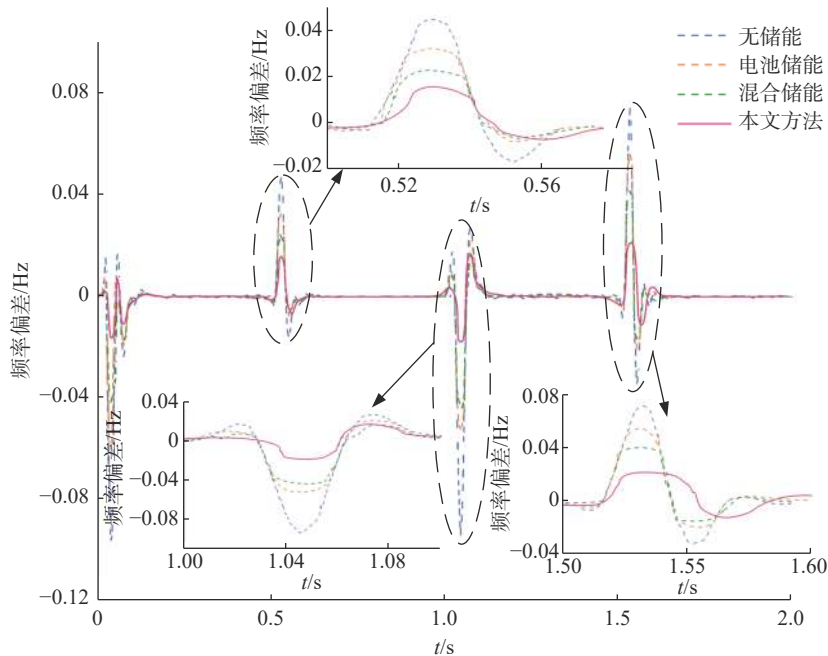


图 10 系统频率偏差变化情况

Fig. 10 Changes in system frequency deviation

策略进一步提升了光伏并网系统的频率稳定性。

4 结论

针对大规模高渗透率的新能源并网导致电网频

率波动的问题, 文章研究了基于 MPC 的光-储协同调频优化策略, 并在 MATLAB/Simulink 平台上进行了仿真实验, 实验结果证明, 与其他策略相比, 文章策略在光伏并网调频方面具有更优性。基于此, 可

表 3 不同控制策略下的系统调频评价指标

Tab. 3 System frequency modulation evaluation index under different control strategies

控制策略	扰动	最大频率偏差/Hz	最大频率偏差差值
策略1	扰动1	0.046	0.063
	扰动2	-0.094	0.121
	扰动3	0.074	0.108
策略2	扰动1	0.032	0.040
	扰动2	-0.053	0.074
	扰动3	0.055	0.076
策略3	扰动1	0.024	0.031
	扰动2	-0.044	0.061
	扰动3	0.041	0.058
策略4	扰动1	0.016	0.024
	扰动2	-0.019	0.037
	扰动3	0.020	0.035

以得出如下结论:

1) 文章采用的混合储能出力较为平滑。在光伏出力波动的时段内, 电池储能能够快速进行低频补偿。同理, 超级电容能够在 0.5 s、1 s、1.5 s 时刻快速进行的高频补偿, 从而使系统功率能够快速恢复到平稳状态, 提高系统频率稳定性。

2) 文章所提出的基于 MPC 预测控制策略考虑了光储电站有功出力和总发电量等约束条件, 以光伏功率偏差、电网电压偏差和系统频率偏差最小为目标, 通过滚动优化, 进一步优化了光伏并网系统频率的稳定性。

参考文献:

- [1] HUANG Q L. Insights for global energy interconnection from China renewable energy development [J]. *Global energy interconnection*, 2020, 3(1): 1-11. DOI: 10.1016/j.gloi.2020.03.006.
- [2] 王中, 黎丽丽, 李振华, 等. 考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 65-73. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201654.
WANG Z, LI L L, LI Z H, et al. The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(20): 65-73. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201654.
- [3] YE H R, AO B, BAI S, et al. Design of a fast frequency modulation control system based on photovoltaic power station [C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Xi'an, China, October 15-17, 2021. Xi'an: IEEE, 2021: 148-152. DOI: 10.1109/ITNEC52019.2021.9587286.
- [4] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 179-186. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181042.
ZHANG J P, WANG N B, HUANG R, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic [J]. *Power system protection and control*, 2019, 47(15): 179-186. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181042.
- [5] JOHNSON J, SCHENKMAN B, ELLIS A, et al. Initial operating experience of the 1.2-MW La Ola photovoltaic system [C]//IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Austin, TX, USA, June 3-8, 2012. Austin: IEEE, 2012: 1-6. DOI: 10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656701.
- [6] 严干贵, 张善峰, 贾祺, 等. 光伏发电主动参与电网频率调节的机理分析 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 191-199. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0739.
YAN G G, ZHANG S F, JIA Q, et al. Mechanism analysis of PV generation actively participating in power grid frequency regulation [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(8): 191-199. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0739.
- [7] 左冲, 贾彦, 孟克其劳, 等. 基于 HOMER 仿真的风光储互补发电系统容量优化配置研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(1): 21-25. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0004.
ZUO C, JIA Y, MENG K Q L, et al. Research on optimized capacity allocation of wind-solar-storage complementary power generation system based on HOMER simulation [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(1): 21-25. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0004.
- [8] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究 [J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3829-3836. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1214.
WU Q F, SONG X L, ZHANG J R, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid [J]. *Power system technology*, 2020, 44(10): 3829-3836. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1214.
- [9] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(18): 3897-3908. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181061.
LI X R, CUI X W, HUANG J Y, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2019, 34(18): 3897-3908. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181061.
- [10] 张舒鹏, 董树锋, 徐成司, 等. 大规模储能参与电网调频的双层控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19): 55-62. DOI: 10.7500/AEPS20200312007.
ZHANG S P, DONG S F, XU C S, et al. Bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(19): 55-62. DOI: 10.7500/AEPS20200312007.
- [11] 李秀慧, 崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置

- [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(11): 3594-3602. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0331](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0331).
- LI X H, CUI Y. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(11): 3594-3602. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0331](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0331).
- [12] MADALA S, DOCKHORN J, HYDE M, et al. Analysis of battery energy storage with distribution electric grid connected solar projects [C]//2022 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC), Savannah, GA, USA, April 5-8, 2022. Savannah: IEEE, 2022: 43-53. DOI: [10.1109/REPEC55671.2022.00016](https://doi.org/10.1109/REPEC55671.2022.00016).
- [13] JAWAD A, NAIM S A, SAHA C, et al. Frequency stability enhancement of a large-scale PV integrated grid [C]//2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, Bangladesh, December 17-19, 2020. Dhaka: IEEE, 2020: 290-293. DOI: [10.1109/ICECE51571.2020.9393073](https://doi.org/10.1109/ICECE51571.2020.9393073).
- [14] 丁明, 施建雄, 韩平平, 等. 光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略 [J]. *中国电力*, 2021, 54(1): 116-123,174. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201907198](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201907198).
- DING M, SHI J X, HAN P P, et al. An integrated control strategy for photovoltaic-energy storage system participating in frequency regulation and peak shaving of power grid [J]. *Electric power*, 2021, 54(1): 116-123,174. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201907198](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201907198).
- [15] 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. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.211530](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211530).
- LIU Y P, TIAN S J, LIANG H P, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(13): 107-118. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.211530](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211530).
- [16] DATTA U, KALAM A, SHI J. Battery energy storage system control for mitigating PV penetration impact on primary frequency control and state-of-charge recovery [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2020, 11(2): 746-757. DOI: [10.1109/TSTE.2019.2904722](https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2904722).
- [17] XU X C, CHEN J, CAI K L, et al. Energy storage allocation and control strategy for fast frequency regulation of regional grid with high-penetration renewable energy [C]//2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Chengdu, China, July 18-21, 2021. Chengdu: IEEE, 2021: 1365-1369. DOI: [10.1109/ICPSAsia52756.2021.9621412](https://doi.org/10.1109/ICPSAsia52756.2021.9621412).
- [18] WANG X Z, LIN C Q, SHEN C L, et al. Control strategy for fast frequency modulation of regional power grid with energy storage system [C]//2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Kristiansand, Norway, November 9-13, 2020. Kristiansand: IEEE, 2020: 1226-1230. DOI: [10.1109/ICIEA48937.2020.9248109](https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248109).
- [19] KAZME H Z, BASUMATARY K. Frequency control support in low inertia power grid by energy storage systems: a techno-economic analysis [C]//2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, December 14-17, 2022. Jaipur: IEEE, 2022: 1-6. DOI: [10.1109/PEDES56012.2022.10080035](https://doi.org/10.1109/PEDES56012.2022.10080035).
- [20] KÁDÁR P. Role of the battery storage in the operation of the power system [C]//2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), Budapest, Hungary, November 20-21, 2019. Budapest: IEEE, 2019: 115-120. DOI: [10.1109/CANDO-EPE47959.2019.9110951](https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE47959.2019.9110951).
- [21] ŞAHİN M E, BLAABJERG F. A hybrid PV-battery/supercapacitor system and a basic active power control proposal in MATLAB/Simulink [J]. *Electronics*, 2020, 9(1): 129. DOI: [10.3390/electronics9010129](https://doi.org/10.3390/electronics9010129).
- [22] HAJIAGHASI S, SALEMNIA A, HAMZEH M. Hybrid energy storage system for microgrids applications: a review [J]. *Journal of energy storage*, 2019, 21: 543-570. DOI: [10.1016/j.est.2018.12.017](https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.017).
- [23] XU Q W, VAFAMAND N, CHEN L L, et al. Review on advanced control technologies for bidirectional DC/DC converters in DC microgrids [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2021, 9(2): 1205-1221. DOI: [10.1109/JESTPE.2020.2978064](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2978064).
- [24] TUMMURU N R, MANANDHAR U, UKIL A, et al. Control strategy for AC-DC microgrid with hybrid energy storage under different operating modes [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2019, 104: 807-816. DOI: [10.1016/j.ijepes.2018.07.063](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.063).
- [25] AKRAM U, KHALID M, SHAFIQ S. An innovative hybrid wind-solar and battery-supercapacitor microgrid system—development and optimization [J]. *IEEE access*, 2017, 5: 25897-25912. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2767618](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767618).
- [26] BAHLOUL M, KHADEM S K. An analytical approach for techno-economic evaluation of hybrid energy storage system for grid services [J]. *Journal of energy storage*, 2020, 31: 101662. DOI: [10.1016/j.est.2020.101662](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101662).
- [27] CHONG L W, WONG Y W, RAJKUMAR R K, et al. An adaptive learning control strategy for standalone PV system with battery-supercapacitor hybrid energy storage system [J]. *Journal of power sources*, 2018, 394: 35-49. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2018.05.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.041).
- [28] 郭强, 陈崇德, 胡阳, 等. 飞轮和锂电池储能联合光伏发电一次调频控制 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(11): 1-9. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.001208](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001208).
- GUO Q, CHEN C D, HU Y, et al. Flywheel and lithium battery energy storage combined with photovoltaic power generation participate in primary frequency regulation control [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(11): 1-9. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.001208](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001208).
- [29] WANG H X, YANG J Y, CHEN Z, et al. Model predictive control of PMSG-based wind turbines for frequency regulation in an isolated grid [J]. *IEEE transactions on industry applications*,

- 2018, 54(4): 3077-3089. DOI: [10.1109/TIA.2018.2817619](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2817619).
- [30] 张颖, 季宇, 唐云峰. 基于 MPC 含分布式光伏配电网有功功率-无功功率协调控制 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 140-146. DOI: [10.7500/AEPS20161226001](https://doi.org/10.7500/AEPS20161226001).
ZHANG Y, JI Y, TANG Y F. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control [J]. *Automation of electric power systems*, 2017, 41(21): 140-146. DOI: [10.7500/AEPS20161226001](https://doi.org/10.7500/AEPS20161226001).
- [31] 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. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1520](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1520).
DONG T X, ZHAI B Y, LI X, et al. Optimal control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3980-3989. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1520](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1520).
- [32] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 36-43. DOI: [10.7500/AEPS20180923001](https://doi.org/10.7500/AEPS20180923001).
YU L B, KOU P, FENG Y T, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(12): 36-43. DOI: [10.7500/AEPS20180923001](https://doi.org/10.7500/AEPS20180923001).
- [33] 赵晶晶, 张宇, 杜明, 等. 基于模型预测控制的新型电力系统光储电站调频控制策略 [J]. *电力建设*, 2022, 43(11): 99-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.11.010](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2022.11.010).
ZHAO J J, ZHANG Y, DU M, et al. Frequency regulation control strategy based on model predictive control for combined PV and energy storage power station in new power system [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(11): 99-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.11.010](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2022.11.010).
- [34] ZHANG F, FU A H, DING L, et al. MPC based control strategy for battery energy storage station in a grid with high photovoltaic power penetration [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, 115: 105448. DOI: [10.1016/j.ijepes.2019.105448](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105448).
- [35] PARISIO A, RIKOS E, GLIELMO L. A model predictive control approach to microgrid operation optimization [J]. *IEEE transactions on control systems technology*, 2014, 22(5): 1813-1827. DOI: [10.1109/TCST.2013.2295737](https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2295737).
- [36] HREDZAK B, AGELIDIS V G, JANG M. A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2014, 29(3): 1469-1479. DOI: [10.1109/TPEL.2013.2262003](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2262003).
- [37] IKAOUASSEN H, MOUTAKI K, RADDAOUI A, et al. Modified predictive model control based MPPT for standalone PV in distribution system [C]//2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, December 5-8, 2018. Rabat: IEEE, 2018: 1-6. DOI: [10.1109/IRSEC.2018.8702988](https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702988).
- [38] 靳肖林, 文尚胜, 倪浩智, 等. 光伏发电系统最大功率点跟踪技术综述 [J]. *电源技术*, 2019, 43(3): 532-535. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.03.052](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.03.052).
JIN X L, WEN S S, NI H Z, et al. Review of maximum power point tracking of photovoltaic system [J]. *Chinese journal of power sources*, 2019, 43(3): 532-535. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.03.052](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.03.052).
- [39] BATIYAH S, ZOHRABI N, ABDELWAHED S, et al. An MPC-based power management of a PV/battery system in an islanded DC microgrid [C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Long Beach, CA, USA, June 13-15, 2018. Long Beach: IEEE, 2018: 231-236. DOI: [10.1109/ITEC.2018.8450155](https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450155).
- [40] BATIYAH S, SHARMA R, ABDELWAHED S, et al. Predictive control of PV/battery system under load and environmental uncertainty [J]. *Energies*, 2022, 15(11): 4100. DOI: [10.3390/en15114100](https://doi.org/10.3390/en15114100).
- [41] WANG Y J, TIAN J Q, SUN Z D, et al. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2020, 131: 110015. DOI: [10.1016/j.rser.2020.110015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015).

作者简介:



严小珊

严小珊 (第一作者)

1997-, 女, 电子信息专业硕士, 主要从事电力系统规划与运行工作(e-mail)samanthssa@163.com。

唐惠玲

唐惠玲 (通信作者)

1975-, 女, 副教授, 博士, 主要从事电力系统运行与控制工作(e-mail)2641814312@qq.com。

吴杰康

1965-, 男, 教授, 主要从事电力系统规划、运行与控制工作(e-mail)wujiekang@163.com。

周治廷

1998-, 男, 电子信息专业硕士, 主要从事电力系统规划与运行工作(e-mail)591814027@qq.com

龙泳丞

1999-, 男, 电子信息专业硕士, 主要从事综合能源系统优化运行、机器学习算法等工作(e-mail)2758364729@qq.com。

冯国华

2000-, 男, 大专在读, 轮机工程技术专业, 主要从事主推进动力装置维护工作(e-mail)1753308422@qq.com。

(编辑 叶筠英)