DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.97 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

计及不对称负荷的新能源场站黑启动三相电压均衡控制策略

张雅君[1]，杨心刚[1]，侯川川[2](中国电源学会学生会员)，
朱 森[2](中国电源学会高级会员)，熊雪君[1]
(1.国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240)

摘要：在新能源场站的黑启动过程中，传统构网型变流器通常输出对称的三相电流，此时站内的不对称负荷将导致三相电压不平衡，从而引发逆变器与电网之间的功率波动，增加黑启动的失败风险。为了实现黑启动过程中的电压均衡，基于构网型储能变流器分析新能源场站黑启动的3个阶段，并结合不对称负荷的接入方式，研究计及三相三线拓扑约束的黑启动阶段电压不平衡机理。针对储能变流器的构网型特性，提出基于模型预测控制的黑启动电压均衡策略。该方法无需进行正负序分离控制，能有效抑制不对称负荷产生的负序电压，降低电压不平衡度。硬件在环实验验证了所提策略的有效性，可为新能源场站黑启动提供新的技术参考。

关键词：黑启动；不对称负荷；电压均衡；模型预测控制；构网型

Three-phase Voltage Balance Control for Black Start of Renewable Energy Stations with Asymmetrical Loads

Zhang Yajun[1], Yang Xingang[1], Hou Chuanchuan[2], *Student Member*, *CPSS*,
Zhu Miao[2], *Senior Member, CPSS*, Xiong Xuejun[1]
(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: During the black start process of a renewable energy station, traditional grid-forming converters usually output symmetrical three-phase currents. At this time, the asymmetrical loads within the station will lead to unbalanced three-phase voltages, thereby triggering power fluctuations between the inverter and the grid, increasing the risk of black start failure. In order to achieve voltage balance during the black start process, the three stages of the black start of a renewable energy station based on the grid-forming energy storage converter are analyzed. By combining the connection mode of the asymmetrical load, it studies the mechanism of voltage unbalance during the zero-to-rise voltage stage considering the constraints of the three-phase three-wire topology. Aiming at the grid-forming characteristics of the energy storage converter, a black start voltage balance strategy based on model predictive control is proposed. This method does not require positive- and negative-sequence separation control, and can effectively suppress the negative sequence voltage generated by the asymmetrical load, and reduce the voltage unbalance factor. The hardware-in-the-loop experiment verifies the effectiveness of the strategy proposed, which can provide a new technical reference for the black start of renewable energy stations.

收稿日期：2025-04-08；**修回日期**：2025-05-26，2025-06-15；**录用日期**：2025-06-24；**网络首发日期**：2025-07-01
基金项目：国家电网上海市电力公司科技资助项目(52094023001W)
This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company under the grant 52094023001W

Keywords: Black start; asymmetrical loads; voltage balance; model predictive control; grid-forming

随着“双碳”目标的推进，风电、光伏等可再生能源分布式发电系统DG (distributed generation)的渗透率大幅提高，其出力的强波动性与故障弱承

载能力将增加电网停电的事故风险[1]。对于含高比例可再生能源发电系统的新能源场站，由于孤岛运行时的系统惯性缺少大电网的支撑，故突发扰动更容易导致系统电压失稳停电，而停电时间越长造成的损失越大[2]。因此，降低黑启动恢复过程中的电压波动[3]，缩短新能源场站的停电恢复时间，对于新能源并网稳定运行具有重要意义。

新能源场站作为电源呈现出“双高”特征，其输出特性明显区别于传统以同步发电机为代表的电源输出特性[4]。与大电网的黑启动过程不同，新能源场站通常将构网型 GFM (grid-forming)变流器作为电源支撑，建立网架的初始电压，逐步实现整个场站电网的黑启动[5-6]。由于可再生能源存在随机性和波动性，故其无法全天候作为可靠的黑启动能源支撑。储能系统 ESS (energy storage system)通过能量管理可实现随时充放电功能，因此，能够作为新能源场站黑启动的可靠能量来源，且包含光储联合或风储联合的场站具备较强的黑启动潜力[7-8]。国内已有基于此类方式的黑启动应用，2024 年 6 月，湖北荆门新港储能电站成功实现百兆瓦时构网型储能电站黑启动试验，验证了储能型装置黑启动的可行性[9]。

依托于构网型的储能变流器属于典型的电力电子逆变器电源 IBR (inverter-based resource)，在黑启动过程中需要考虑多类型挂网负荷特性和启动升压阶段的冲击影响。对于黑启动过程的负荷冲击问题，文献[10]考虑了变压器饱和电流的限制条件，提出了具备冲击电流抑制能力的零起升压策略，完成了带感应电机负荷的 IBR 驱动黑启动过程。为了缓解 GFM 储能黑启动电压建立过程中的电压冲击，文献[11]提出了一种面向电压软起动的改进型的 V/f 控制。

黑启动过程中，输出电压的对称度是衡量三相黑启动电源性能的重要指标之一，而造成启动电压不平衡的主要原因是负荷不对称。常见的单序双闭环控制方法无法对负序电压进行控制，会导致输出电压不平衡[12]。文献[13]在补偿阻抗装置的基础上，通过将不同平衡控制目标的正序环路输出与负序补偿环路输出相叠加生成电压参考值，实现对不同目标的平衡控制。文献[14]通过建立公共连接点 PCC(point of common coupling)电压与输出电流的基波负序及谐波分量的统一下垂关系，提出统一电压-电流下垂的构网型变流器不平衡与谐波控制策略。在新型控制策略方面，也有研究利用电网电压不平衡下逆变器的网侧数学模型，提出基于矢量比例积分 VPI (vector proportional integral)控制器的 PI-VPI (proportional integral-vector proportional integral)控制策略[15]。

然而，这些控制策略均借助序分量法进行正负序独立控制，且 PI 控制单元数目较多，需要进行具有针对性的参数设计，增加了控制器的运算复杂度。因此，有必要结合黑启动和不对称负荷特征，研究无需正负序分解的电压均衡控制策略。模型预测控制 MPC(model predictive control)由于其良好的动态性能和较强的多目标控制能力[16-17]，可应用到变流器的多工况控制中。通过在变流器控制架构中设置有限控制集，MPC 可结合特定目标设置价值函数，无需正负序分解即可借助变流器离散模型预测其未来的状态，具备电压均衡控制潜力。

为此，本文针对黑启动过程存在的三相不对称负荷及电压不平衡问题，提出一种基于 MPC 的黑启动电压均衡策略。首先，分析新能源场站的黑启动过程；其次，针对系统不对称负荷的接入方式，阐述在黑启动阶段产生电压不平衡问题的机制；然后，为减小三相电压不平衡度，利用 MPC 的控制特性提出适用于新能源场站黑启动的电压均衡控制策略；最后，通过搭建硬件在环实验平台，验证了所提控制策略的有效性，提升了不对称负荷接入下的黑启动三相电压均衡效果。

1 基于储能机组的新能源场站黑启动过程

传统的光伏、风力发电系统属于跟网型控制，在黑启动过程中无法直接建立网侧电压，因而需借助新能源场站中的 ESS 辅助完成黑启动过程。包含光伏、风电、储能、负荷的新能源场站系统架构如图 1 所示，其中光伏/风电/储能的网侧变流器 GSC

(grid side converter)通过升压变压器和开关S_1~S_3连接至 PCC，公共电网与 PCC 通过孤岛/并网切换开关 S_4 连接，实现新能源场站的孤岛与并网运行模式的切换。

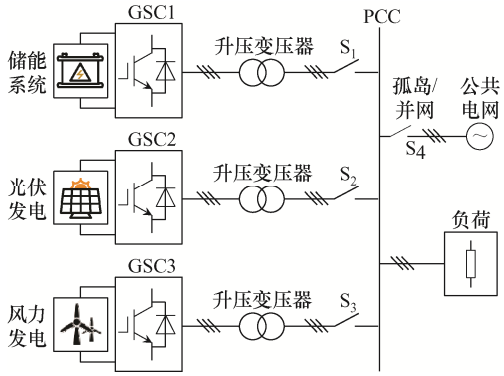


图 1　计及风光储的新能源场站系统架构

Fig. 1 Structure of renewable energy system including wind power, solar power, and energy storage

在新能源场站黑启动过程中，ESS 作为主力电源完成自启动并建立 PCC 处的电压与频率。同时，考虑到负荷的复杂性与不确定性(如电机型冲击性负荷、长时间断电后负荷需求量激增的冷负荷等)，需要避免出现不确定性负荷引起的功率冲击过载情况，进而避免黑启动失败或 ESS 故障。因此，基于储能的新能源场站黑启动过程可分为以下 3 个阶段。

阶段一：黑启动可调资源及可行性评估。新能源场站全黑时，在执行黑启动电源自启动之前，需评估新能源场站停运的原因。若存在新能源场站内部故障，则需要在黑启动电源自启动前完成故障定位及切除，划定执行黑启动的无故障区域并选定对应的启动方案；若存在不可切除的故障，则可能需要延迟执行黑启动过程。在新能源场站全黑时需要评估可支配黑启动资源的自启动能力，如 ESS 的荷电状态 SOC(state of charge)及 GSC1 的运行状态等。

阶段二：黑启动电源的自启动。根据图 1 所示架构，闭合 S_1，将 ESS 作为黑启动的自启动电源。为避免电压及频率建立后突加负荷引起的系统冲击，ESS 执行带载自启动。自启动过程中，GSC1 采用给定电压及频率的改进 *V*/*f* 控制[11]，其中电压幅值线性上升，实现零起升压的缓启动过程，避免升压变压器一次侧绕组的励磁涌流及负荷冲击。在黑启动电源完成自启动并建立 PCC 处电压与频率为额定值后，光伏、风电系统的辅机用电得到保障，同时跟网型变流器可获取 PCC 电压的相位参考值。

阶段三：可再生能源发电系统的启动、同步及并网运行。当光伏、风电的辅机实现供电后，其系统即可进入自主发电状态，建立 GSC2、GSC3 输出侧电压。接着，可再生能源系统执行同步控制策略调节网侧输出电压幅值、相位及频率，当其与 ESS 建立的电压在同步运行的误差允许范围时，则闭合 S_2、S_3，并将可再生能源发电系统接入新能源场站带负荷运行。在此后，ESS 可持续接入新能源场站实现平抑风光出力的功率波动，补偿负荷功率缺额或消纳功率盈余。此时，新能源场站的黑启动完成。

在黑启动过程中，ESS 主要在阶段二向新能源场站系统注入能量，同时需要保留在阶段三中用于补偿负荷功率缺额的能量。其中，ESS 在第二阶段的支撑能力可以量化为

$$E_{\mathrm{ESS2}}=\min\{[E_{\mathrm{ESS}}(S_{\mathrm{SOC}_0})-E_{\mathrm{ESS,min}}],\ P_{\mathrm{ESS,max}}t_{\mathrm{start}}\} \tag{1}$$

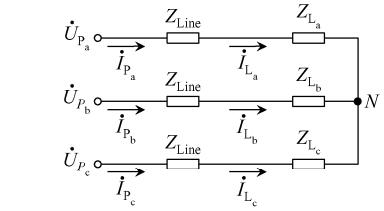
式中：$E_{\mathrm{ESS}}(S_{\mathrm{SOC}_0})$为阶段一 ESS 在初始荷电状态 S_{SOC_0}时对应的能量；$E_{\mathrm{ESS,min}}$为 ESS 的最小能量；$P_{\mathrm{ESS,max}}$为 ESS 的最大瞬时释放功率；t_{start}为阶段二持续时间，即零起升压时间。

2　不对称负荷接入下的三相电压不平衡机理

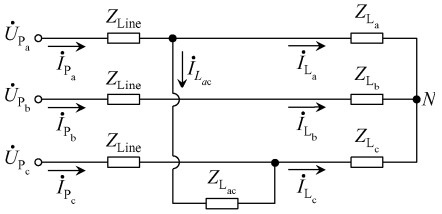
新能源场站的负荷具备复杂性及不确定性，当单相负荷无序接入时，系统负荷将呈现三相不平衡状态。在黑启动阶段二的带载零起升压过程中，不平衡负荷将导致 PCC 产生不平衡电压。传统的控制仅适用于三相对称系统，负荷的不对称将引发三相电压均衡问题，同时产生两倍频的功率波动，不利于黑启动过程中变流器的稳定运行。因此，有必要结合并网系统的拓扑约束，分析不对称负荷与电压均衡问题的产生原因，规避由不对称负荷引起的

黑启动过程失败风险。

本文主要考虑三相三线制 GSC 在以下 2 类不平衡负荷下的输出电压不平衡特性。第一类为不对称单相负荷，如图 2(a)所示。图中：$\dot{U}_{P_a}$、$\dot{U}_{P_b}$、$\dot{U}_{P_c}$分别为三相电源侧 A 相、B 相、C 相的电压相量，$\dot{I}_{P_a}$、$\dot{I}_{P_b}$、$\dot{I}_{P_c}$分别三相电源侧 A 相、B 相、C 相的电流相量；Z_{Line}为等效线路阻抗；$\dot{I}_{L_a}$、$\dot{I}_{L_b}$、$\dot{I}_{L_c}$分别为负载侧 A 相、B 相、C 相的电流相量；Z_{L_a}、Z_{L_b}、Z_{L_c}分别为负载侧 A 相、B 相和 C 相的负载阻抗；N为中性点。其中Z_{L_a}、Z_{L_b}、Z_{L_c}不平衡。第二类为对称单相负荷及不对称相间负荷，如图 2(b)所示。图中，$\dot{I}_{L_{ac}}$为负载侧 A 相与 C 相之间的相间负载电流。其中Z_{L_a}、Z_{L_b}、Z_{L_c}平衡，而 A、C 相间存在负荷$Z_{L_{ac}}$。



(a) 仅含不对称单相负载



(b) 含对称单相负载及不对称相间负载

图 2　2 类新能源场站不平衡负荷的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuits for two types of unbalanced loads in renewable energy systems

对于图 2(a)中的不平衡负荷，其 PCC 电压可表示为

$$\boldsymbol{U}_{\text{P}}=[U_{P_a}\quad U_{P_b}\quad U_{P_c}]^{\text{T}} \tag{2}$$

此时，从 PCC 流向新能源场站负荷的电流及新能源场站单相负荷电流分别为

$$\boldsymbol{I}_{\text{P}}=[I_{P_a}\quad I_{P_b}\quad I_{P_c}]^{\text{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{I}_{\text{L}}=[I_{L_a}\quad I_{L_b}\quad I_{L_c}]^{\text{T}} \tag{4}$$

其等效线路阻抗为Z_{Line}，单相负荷为

$$\boldsymbol{Z}_{\text{L}}=[Z_{L_a}\quad Z_{L_b}\quad Z_{L_c}] \tag{5}$$

由此，可求解 PCC 处电压为

$$\boldsymbol{U}_{\text{P}}=\boldsymbol{I}_{\text{P}}Z_{\text{Line}}+\boldsymbol{I}_{\text{L}}\boldsymbol{Z}_{\text{L}} \tag{6}$$

当新能源场站仅存在单相负荷时，系统不存在相间通路，因而$\boldsymbol{I}_{\text{P}}$与$\boldsymbol{I}_{\text{L}}$一致。基于对称分量法可将 PCC 电压分解为

$$\boldsymbol{U}_{\text{P}}=\boldsymbol{U}_{\text{P(1)}}+\boldsymbol{U}_{\text{P(2)}}+\boldsymbol{U}_{\text{P(0)}} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{\text{P(1)}}$、$\boldsymbol{U}_{\text{P(2)}}$、$\boldsymbol{U}_{\text{P(0)}}$分别为正序、负序及零序分量。其中，零序电压分量可表示为

$$\boldsymbol{U}_{\text{P(0)}}=[U_{P_a(0)}\quad U_{P_b(0)}\quad U_{P_c(0)}]^{\text{T}} \tag{8}$$

结合式(3)、式(4)、式(6)、式(8)可得零序电压分量为

$$\begin{aligned}U_{P_a(0)}&=U_{P_b(0)}=U_{P_c(0)}=\\&\frac{1}{3}(U_{P_a}+U_{P_b}+U_{P_c})=\\&\frac{1}{3}[I_{L_a}(Z_{\text{Line}}+Z_{L_a})+\\&I_{L_b}(Z_{\text{Line}}+Z_{L_b})+I_{L_c}(Z_{\text{Line}}+Z_{L_c})]\end{aligned} \tag{9}$$

假设三相三线制 GSC 在不平衡负荷下可以实现 PCC 的三相相电压平衡，则不存在零序电压，即式(9)为 0。由于Z_{L_a}、Z_{L_b}、Z_{L_c}不平衡，故有

$$I_{L_a}+I_{L_b}+I_{L_c}=3I_{\text{L(0)}}\neq 0 \tag{10}$$

式(10)表明在此假设下，存在零序电流。然而，对于三相三线制逆变器，不存在零序电流路径，即逆变器无零序电流，故初始假设不成立。换言之，在新能源场站不平衡负荷下，基于三相三线制 GSC 建立的 PCC 相电压不可能消除零序电压实现三相相电压平衡。值得注意的是，尽管三相相电压不可能实现平衡，但是对于三相线电压，在获取相电压时已消除零序电压分量。因此，若实现负序电压u_{n}的消除，则仍可实现不平衡负荷下的三相线电压平衡。

对于图 2(b)中的不平衡负荷，其电流关系可表示为

$$\begin{cases}I_{L_a}+I_{L_b}+I_{L_c}=3I_{\text{L(0)}}=0\\I_{P_a}-I_{L_{ac}}=I_{L_a}\\I_{P_b}=I_{L_b}\\I_{P_c}+I_{L_{ac}}=I_{L_c}\end{cases} \tag{11}$$

结合式(6)、式(9)、式(11)可得零序电压为

$$U_{\mathrm{P_a}(0)}=U_{\mathrm{P_b}(0)}=U_{\mathrm{P_c}(0)}=\frac{1}{3}(I_{\mathrm{L_a}}+I_{\mathrm{L_b}}+I_{\mathrm{L_c}})\cdot(Z_{\mathrm{Line}}+Z_{\mathrm{L_a}})=0 \tag{12}$$

式(12)表明，不同于第一类负荷，在第二类不平衡负荷下，三相三线制 GSC 建立的 PCC 相电压不包含零序分量，消除其负序分量即可使其平衡。综上，对于三相三线制 GSC 建立的 PCC 电压，在第一类不平衡负荷下，若消除电压负序分量，则可缓解相电压不平衡并实现线电压平衡；而在第二类不平衡负荷下，若消除电压负序分量，则可同时实现相电压与线电压平衡。因此，针对不平衡负荷造成的 PCC 电压问题，消除负序电压是维持系统稳定运行的关键环节。

3　三相不对称负荷接入下的黑启动策略

受到 GSC 三相三线拓扑的约束，若不增加额外零序电流通路，则零序电压始终无法抑制[18]。因此，本文基于装置现有拓扑，对第 2 节中第二类不对称负荷接入下的黑启动电压均衡控制进行研究。

3.1　现有储能系统的黑启动策略

黑启动过程中，三相三线储能并网系统如图 3 所示。图中：U_{dc} 为直流母线电压；C_{dc} 为直流侧电容；i_{L_a}、i_{L_b}、i_{L_c} 分别为逆变器侧 A 相、B 相和 C 相电感电流；L_{f}、C_{f} 分别为滤波电感、电容；$i_{\mathrm{P_a}}$、$i_{\mathrm{P_b}}$、$i_{\mathrm{P_c}}$ 分别为 PCC 并网点 A 相、B 相和 C 相电流；$u_{\mathrm{P_a}}$、$u_{\mathrm{P_b}}$、$u_{\mathrm{P_c}}$ 分别为 PCC 并网点 A 相、B 相和 C 相电压；u_{ref}、θ_{ref}、$u_{\mathrm{ref}\,dq}$ 分别为零起升压 *V*/*f* 控制输出的电压幅值指令、相位角指令、零起升压电压指令；$i_{\mathrm{P_{abc}}}$、$i_{L_{\mathrm{abc}}}$ 分别为并网三相电流、逆变器侧电感三相电流；$i_{L_{dq}}$、$i_{\mathrm{P}_{dq}}$ 分别为逆变器滤波电感电流、PCC 并网点电流在 *dq* 坐标系下的分量；$u_{\mathrm{P_{abc}}}$、$u_{\mathrm{P}_{dq}}$、$u_{\mathrm{m}_{dq}}$ 分别为 *dq* 坐标系下的 PCC 并网点电压、三相静止坐标系下的 PCC 并网点电压、控制环路输出的调制电压。其中，$u_{\mathrm{m}_{dq}}$ 后续通过 Clarke 变换及反 Park 变换，用于正弦脉冲调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation)调制生成 GSC 的开关驱动信号。

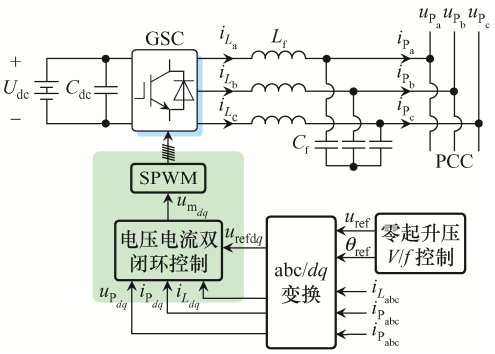


图 3　储能并网系统结构图

Fig. 3 Topology of energy storage grid-connected system

储能变流器的控制系统采用电压电流双闭环结构，其中电压外环的参考值借助零起升压 *V*/*f* 控制进行给定，电压、电流双环控制架构如图 4 所示。图中：$u_{\mathrm{ref}d}$、$u_{\mathrm{ref}q}$、u_{P_d}、u_{P_q} 分别为 *d*、*q* 轴的电压参考值、并网点电压反馈值；$u_{\mathrm{err}d}$、$u_{\mathrm{err}q}$ 分别为 *d*、*q* 轴的电压误差；i_{P_d}、i_{P_q}、$i_{\mathrm{ref}d}$、$i_{\mathrm{ref}q}$、i_{L_d}、i_{L_q} 分别为 *d*、*q* 轴的并网电流前馈值、电流内环参考值、电感电流反馈值；u_{m_d}、u_{m_q} 分别为 *d*、*q* 轴的调制电压。其中，电压环与电流环分别通过 $\omega_{\mathrm{N}}C_{\mathrm{f}}$ 项及 $\omega_{\mathrm{N}}L_{\mathrm{f}}$ 项的运算，实现 LC 滤波器型逆变器中 *d*、*q* 轴的解耦控制。当不对称负荷接入系统时，受三相三线 GSC 的拓扑约束，分析负序电压的存在及其消除方法，可知 PCC 处电压在经过 Clarke 及 Park 变换后，得到的 u_{P_d}、u_{P_q} 将存在二倍频 $2\omega_{\mathrm{N}}$ 电压波动分量[19]。因此，可通过消除 PCC 处电压在 *dq* 轴下的二倍工频振荡分量来实现三相电压均衡。

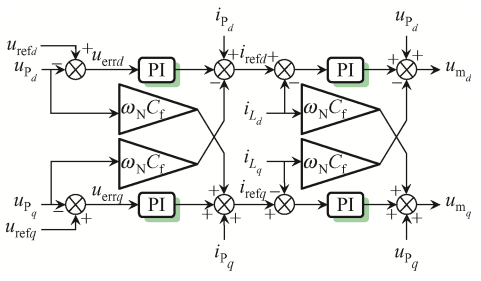


图 4　电压电流双闭环控制策略

Fig. 4 Voltage-current double closed-loop control strategy

3.2　MPC 电压外环控制

在现有的广泛研究中，典型的 MPC 主要由 3

部分组成：预测模型、滚动优化和反馈校正。为了抑制非线性和干扰等模型的不确定性，MPC 使用反馈来消除预测误差。将输出测量值与模型预测值进行比较，并使用其差异来调整未来的预测。MPC 的基本逻辑原理如图 5 所示。

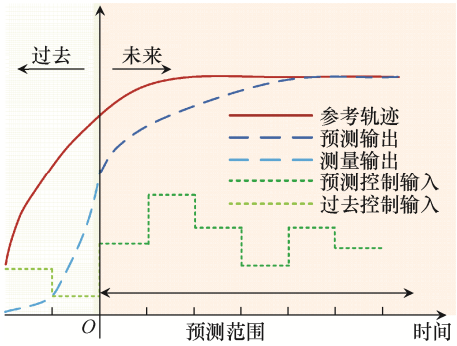


图 5 MPC 基本逻辑图

Fig. 5 Basic logic diagram of MPC

根据图 5，MPC 控制的基本逻辑可表示为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{u}(k) \tag{13}$$

式中：k 为某一时刻的暂存时期；$\boldsymbol{x}(k+1)$为下一阶段的预测输出；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 均为系数矩阵；$\boldsymbol{x}(k)$为系统状态变量；$\boldsymbol{u}(k)$为 k 时刻的逆变器输出变量。其连续时间下的模型可表示为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\begin{bmatrix}0 & -\dfrac{1}{L_\mathrm{f}}\\ \dfrac{1}{C_\mathrm{f}} & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{x}+\begin{bmatrix}\dfrac{1}{L_\mathrm{f}}\\ 0\end{bmatrix}\boldsymbol{u}+\begin{bmatrix}0\\ -\dfrac{1}{C_\mathrm{f}}\end{bmatrix}\boldsymbol{i}_\mathrm{P}\\ \boldsymbol{x}=[\boldsymbol{i}\ \ \boldsymbol{u}_c]^\mathrm{T}\\ \boldsymbol{u}=u_\alpha+\mathrm{j}u_\beta\\ \boldsymbol{i}_\mathrm{P}=i_\alpha+\mathrm{j}i_\beta\end{cases} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为逆变器输出电压；$\boldsymbol{i}_\mathrm{P}$ 为网侧电流；$\boldsymbol{i}$ 为电感电流，其表达式为 $\boldsymbol{i}=i_\alpha+\mathrm{j}i_\beta$；$\boldsymbol{u}_c$ 为电容电压，其表达式为 $\boldsymbol{u}_c=u_{c\alpha}+\mathrm{j}u_{c\beta}$，$u_{c\alpha}$、$u_{c\beta}$ 分别为电容电压的 α、β 轴分量；u_α、u_β 分别为逆变器输出电压的 α、β 轴分量；i_α、i_β 分别为电感电流的 α、β 轴分量。

根据零阶保持器原理，式(14)可被写为预测等式

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_\mathrm{d}\cdot\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_\mathrm{d}\cdot\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{B}_\mathrm{Pd}\cdot\boldsymbol{i}_\mathrm{P}(k) \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{A}_\mathrm{d}$、$\boldsymbol{B}_\mathrm{d}$、$\boldsymbol{B}_\mathrm{Pd}$ 分别为离散状态矩阵、离散输入矩阵、离散扰动矩阵；$\boldsymbol{i}_\mathrm{P}(k)$ 为 k 时刻的网侧电流。

按照上述方法，外环 MPC 环路的目标是实现电压参考跟踪并生成电流内环控制的参考电流，将前向差分离化方式应用于式(14)，则离散模型为

$$\boldsymbol{i}(k)=\frac{C_\mathrm{f}}{T_\mathrm{s}}[\boldsymbol{u}_c(k+1)-\boldsymbol{u}_c(k)]+\boldsymbol{i}_\mathrm{P}(k) \tag{16}$$

式中：T_s 为采样频率；$\boldsymbol{u}_c(k)$ 为电容电压的实时观测值。为了实现电压参考值追踪，$\boldsymbol{u}_c(k+1)$ 可由 $\boldsymbol{u}_\mathrm{cref}=u_{\mathrm{cref}\alpha}+\mathrm{j}u_{\mathrm{cref}\beta}$ 代替，其中，$\boldsymbol{u}_\mathrm{cref}$ 为参考电容电压，$u_{\mathrm{cref}\alpha}$、$u_{\mathrm{cref}\beta}$ 分别为其 α、β 轴分量。$\boldsymbol{i}(k)$可作为内环电流参考值输入到内环电流控制中，计算电流参考值的最终方程可表示为

$$\boldsymbol{i}_\mathrm{ref}=\frac{C_\mathrm{f}}{T_\mathrm{s}}[\boldsymbol{u}_\mathrm{cref}-\boldsymbol{u}_c(k)]+\boldsymbol{i}_\mathrm{P}(k) \tag{17}$$

3.3 MPC 电流内环控制

根据式(14)可得电流预测的离散表达式为

$$\boldsymbol{i}(k+1)=\frac{1}{L_\mathrm{f}}[\boldsymbol{u}(k)-\boldsymbol{u}_c(k)]+\left(1-\frac{1}{L_\mathrm{f}}T_\mathrm{s}\right)\boldsymbol{i}(k) \tag{18}$$

为了让预测电流 $\boldsymbol{i}(k+1)$能够跟踪到 MPC 电压外环所预测的参考电流 $\boldsymbol{i}_\mathrm{ref}$，代价函数可表示为

$$g=[i_{\alpha\mathrm{ref}}-i_\alpha(k+1)]^2+[i_{\beta\mathrm{ref}}-i_\beta(k+1)]^2 \tag{19}$$

式中：$i_{\alpha\mathrm{ref}}$、$i_{\beta\mathrm{ref}}$ 分别为参考电流的 α、β 轴分量；$i_\alpha(k+1)$ 和 $i_\beta(k+1)$ 分别为下一时刻预测电流的 α、β 轴分量。

MPC 的 8 种开关状态用于最小化成本函数，以确定每个采样周期下的最优开关状态。开关状态和相对应的电压矢量见表 1。

根据式(13)~式(19)，MPC 的电压电流双闭环控制简化框图如图 6 所示。图中，s_1~s_6 为逆变器功率开关管的驱动信号。

在 MPC 控制策略中，输入量为电压电流的实时信号、输出量为开关信号。以 k 时刻的电容电压 $\boldsymbol{u}_c(k)$和 PCC 端的电流 $\boldsymbol{i}_\mathrm{P}(k)$作为输入，通过 MPC 电压外环控制得到逆变器侧参考电流 $\boldsymbol{i}_\mathrm{ref}$。将该参考电流、$\boldsymbol{u}_c(k)$和 $\boldsymbol{i}(k)$分别输入到 MPC 电流内环控制，得到最优电压矢量 $\boldsymbol{u}(k+1)$，进而控制器件通断。图 7 为 MPC 电压电流双闭环控制的流程图。图中，g_opt、x_opt 分别为最优代价函数值、最优开关状态序号。

表 1　开关状态和电压矢量

Tab. 1 Switching states and voltage vectors

序数	开关状态	电压矢量
1	000	0
2	100	$2U_{dc}/3$
3	110	$U_{dc}/3+\mathrm{j}\sqrt{3}U_{dc}/3$
4	010	$-U_{dc}/3+\mathrm{j}\sqrt{3}U_{dc}/3$
5	011	$-2U_{dc}/3$
6	001	$-U_{dc}/3-\mathrm{j}\sqrt{3}U_{dc}/3$
7	101	$U_{dc}/3-\mathrm{j}\sqrt{3}U_{dc}/3$
8	111	0

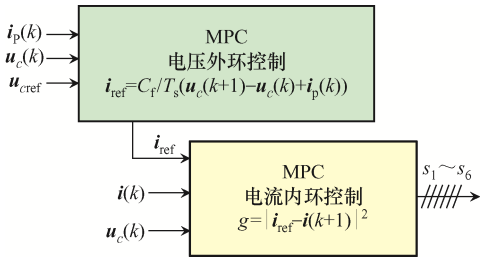


图 6　电压电流双环控制框图

Fig. 6 Voltage and current double-loop control block diagram

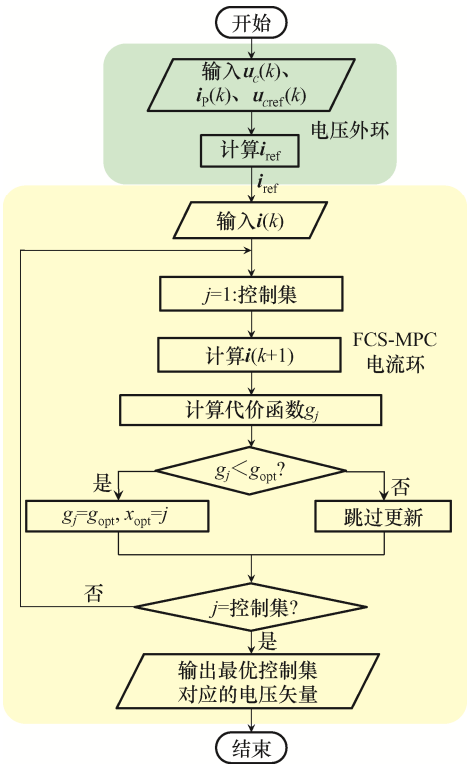


图 7　电压电流双环控制流程图

Fig. 7 Voltage and current double-loop control flow diagram

因此，通过 MPC 的优化策略，不进行正负序分解即可抑制 PCC 处电压的负序分量，进而实现黑启动过程中的三相电压均衡。

4　仿真及实验验证

为了验证本文电压均衡控制策略的有效性，搭建硬件在环 HIL (hardware-in-loop)实验平台，构建含储能、不对称负荷的新能源场站系统，如图 8 所示。在 HIL 平台中，MT8020 为逆变器并网系统功率电路模拟器、StarSim MT1070 为控制器，二者通过串口连接联合运行。

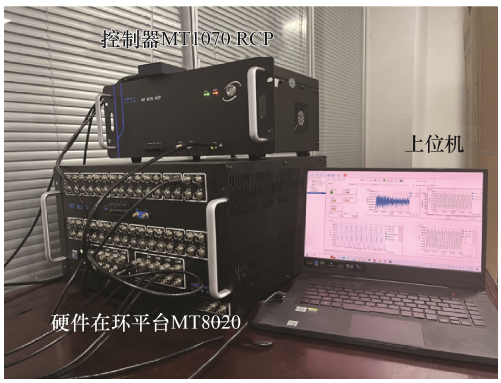


图 8　实验平台结构图

Fig. 8 Structure of experimental platform

实验中，不平衡负荷采用图 2(b)所示的平衡单相负荷结合相间负荷的第二类不平衡负荷，实验参数见表 2。

表 2　实验参数

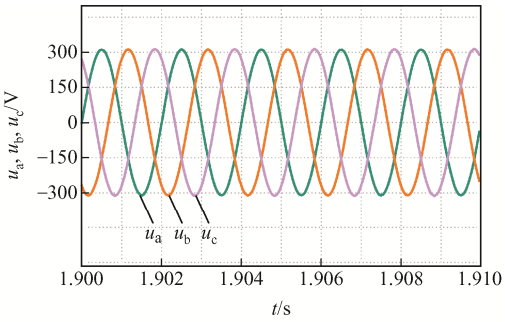
Tab. 2 Experimental parameters

参数	数值
直流母线电压 U_{dc}/V	800
PCC 处额定电压幅值 U_{N_m}/V	311
额定新能源场站频率 f_N/Hz	50
储能系统额定容量 S_N/kVA	100
GSC1 开关频率 f_s/kHz	2
滤波电感 L_f/mH	2
滤波电容 C_f/μF	20
零起升压时间 t_{start}/s	1.56
单相负荷 Z_L/Ω	100
相间负荷 $Z_{L_{ac}}$/Ω	20、10、2.5

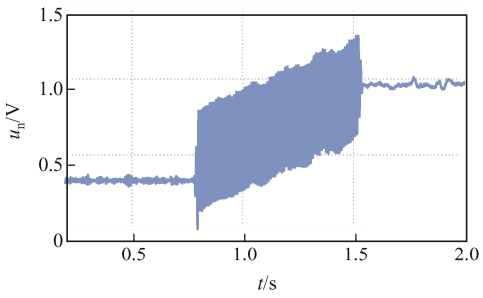
在黑启动初期电压很低(小于 0.5p.u.)，部分负荷无法正常运行。因此，为了模拟实际的负荷

运行场景，当黑启动的系统电压抬升至 0.5p.u.时，不对称负荷开始投入运行。为了对比黑启动阶段的电压均衡效果，本文采用 IEEE PES 的电压不平衡度 K_u 进行衡量[20]。电压不平衡度定义为：考虑电压有效值，与三相电压平均值最大电压差占三相平均值的百分比。

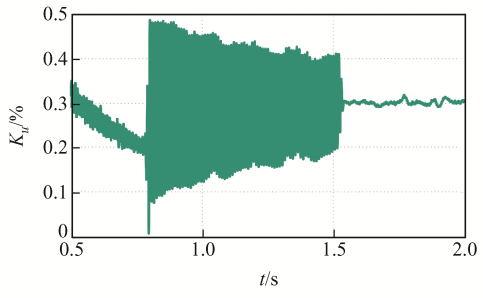
为进一步验证 MPC 控制策略针对不同等级不平衡负载产生不平衡电压的均衡效果，基于 3 组不同大小的相间负载 $Z_{L_{ac}}$ (20、10、2.5 Ω)进行实验验证。3 组不平衡负载下基于 PI 和 MPC 控制的储能系统黑启动实验波形如图 9~图 14 所示。



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压

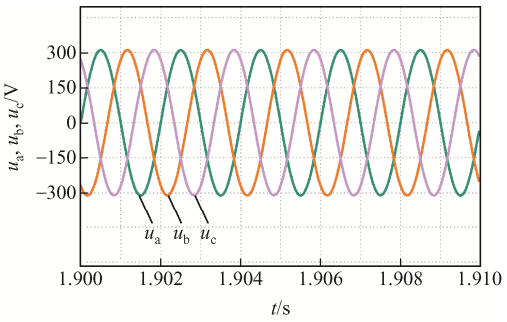


(c) 不平衡度

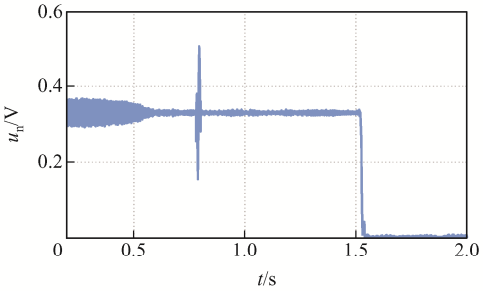
图 9 传统 PI 控制下储能系统黑启动阶段实验波形

($Z_{L_{ac}}$ =20 Ω)

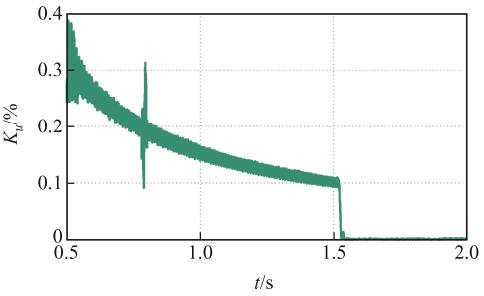
Fig. 9 Experimental waveforms of black starting stage of energy storage system under traditional PI control($Z_{L_{ac}}$ =20 Ω)



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压



(c) 不平衡度

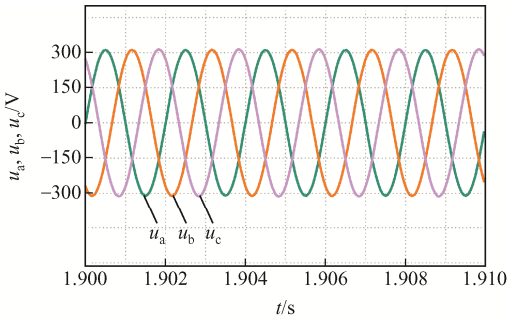
图 10 MPC 控制下储能系统黑启动阶段实验波形($Z_{L_{ac}}$ =20 Ω)

Fig. 10 Experimental waveforms of zero voltage starting phase of energy storage system with MPC($Z_{L_{ac}}$ =20 Ω)

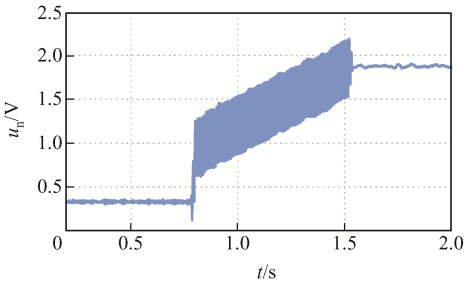
$Z_{L_{ac}}$ =20 Ω 时，传统 PI 控制下的储能系统黑启动实验波形如图 9 所示。从图 9 中可看出，黑启动电压进入稳态区间后，虽然电压幅值接近 311 V，但是此时的三相系统存在电压不均衡。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值逐渐增加，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0.1, 0.5)。系统进入稳态时，负序电压约为 1 V、不平衡度 K_u=0.3%。

$Z_{L_{ac}}$ =20 Ω 时，基于 MPC 控制的储能系统黑启动实验波形 10 所示。从图 10 中可看出，黑启动电压进入稳态区间后，电压幅值接近 311 V。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值几乎不变，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0, 0.4)。系统进入稳态时，负序电压约为 0 V、不平衡度 K_u≈0。

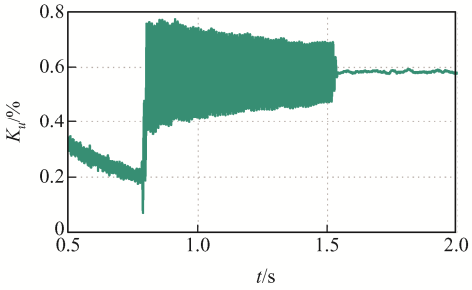
$Z_{L_{ac}}$=10 Ω 时，传统 PI 控制下的储能系统黑启动实验结果如 11 所示。从图 11 中可看出，黑启动电压进入稳态区间后，虽然电压幅值接近 311 V，但是此时的三相系统存在电压不均衡。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值逐渐增加，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0.4, 0.8)。系统进入稳态时，负序电压约为 1.9 V、不平衡度 K_u≈0.6%。



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压



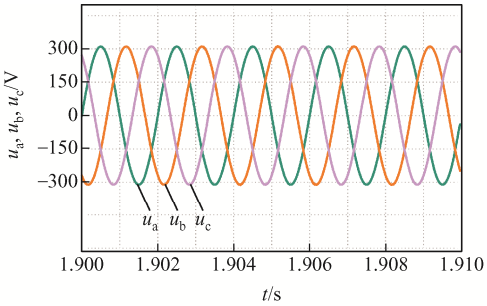
(c) 不平衡度

图 11　传统 PI 控制下储能系统黑启动阶段实验波形

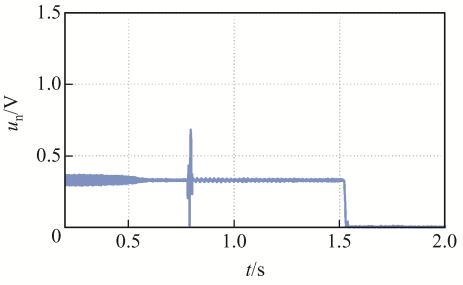
($Z_{L_{ac}}$=10 Ω)

Fig. 11 Experimental waveforms of black starting stage of energy storage system under traditional PI control($Z_{L_{ac}}$=10 Ω)

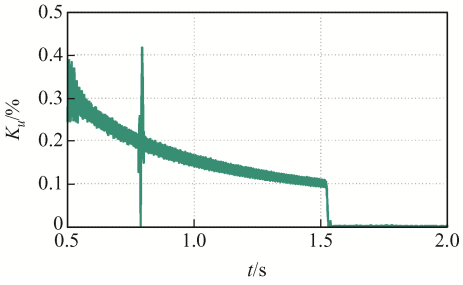
$Z_{L_{ac}}$=10 Ω 时，基于 MPC 控制的储能系统黑启动实验波形如图 12 所示。从图 12 中可看出，黑启动电压进入稳态区间后，电压幅值接近 311 V。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值几乎不变，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0, 0.5)。系统进入稳态时，负序电压约为 0 V、不平衡度 K_u≈0。



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压



(c) 不平衡度

图 12　MPC 控制下储能系统黑启动阶段实验波形

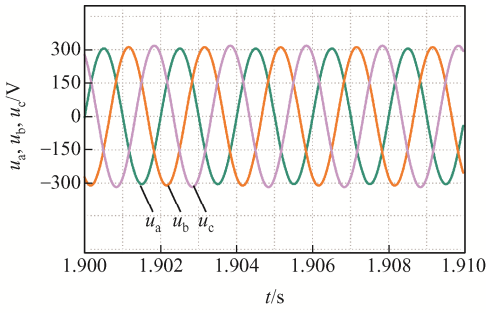
($Z_{L_{ac}}$=10 Ω)

Fig. 12 Experimental waveforms of zero voltage starting phase of energy storage system with MPC($Z_{L_{ac}}$=10 Ω)

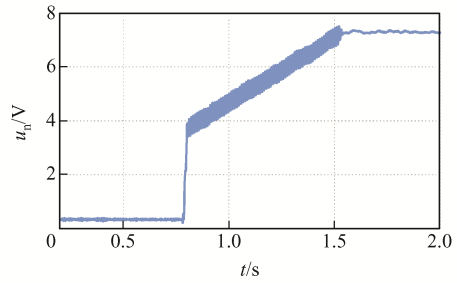
$Z_{L_{ac}}$=2.5 Ω 时，传统 PI 控制下的储能系统黑启动实验波形如 13 所示。从图 13 中可看出，黑启动电压进入稳态区间后，虽然电压幅值接近 311 V，但是此时的三相系统存在电压不均衡。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值逐渐增加，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0.2, 2.3)。系统进入稳态时，负序电压约为 7.5 V、不平衡度 K_u≈2.1%。

$Z_{L_{ac}}$=2.5 Ω 时，基于 MPC 控制的储能系统黑启动实验波形如图 14 所示。从图 14 中可看出，黑

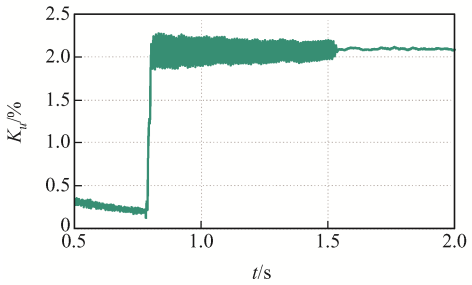
启动电压进入稳态区间后，电压幅值接近 311 V。在黑启动的零起升压阶段，负序电压幅值几乎不变，电压不平衡度 K_u 的波动区间为(0, 1.5)。系统进入稳态时，负序电压约为 0 V、不平衡度 K_u≈0。



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压



(c) 不平衡度

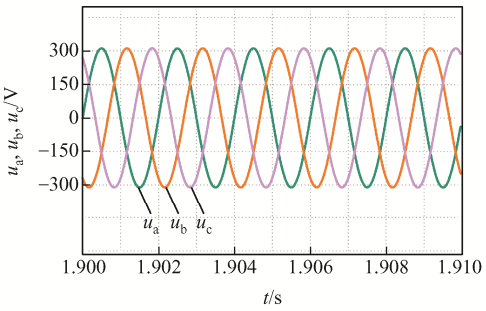
图 13 传统 PI 控制下储能系统黑启动阶段实验波形

($Z_{L_{ac}}$ =2.5 Ω)

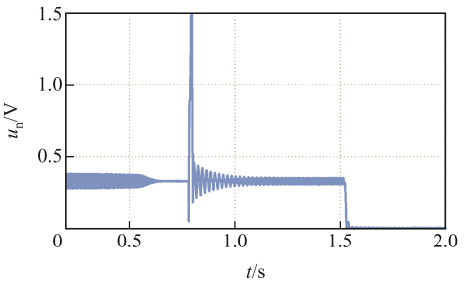
Fig. 13 Experimental waveforms of black starting stage of energy storage system under traditional PI control($Z_{L_{ac}}$ =2.5 Ω)

对比图 9~图 14 实验波形，并结合上述 3 组实验结果，可见与传统 PI 相比，MPC 控制下的系统的电压不平衡度波动区间缩小；且系统进入稳态时，负序电压和电压不平衡度 K_u 显著降低。

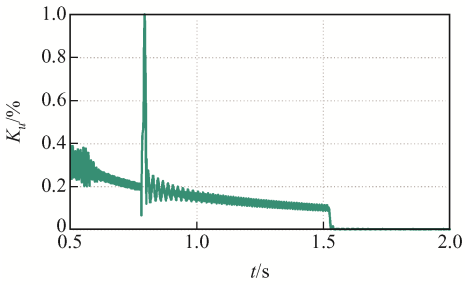
综上，在基于储能系统的黑启动阶段，本文提出的 MPC 控制策略，不仅能够有效解决负荷不对称引起的电压均衡问题，而且能够避免电压不平衡带来的有功、无功功率振荡等问题，增强新能源场站黑启动过程的稳定性，提升新能源的并网发电效率。



(a) 三相电压(黑启动电压达到稳态)



(b) 负序电压



(c) 不平衡度

图 14 MPC 控制下储能系统黑启动阶段实验波形

($Z_{L_{ac}}$ =2.5 Ω)

Fig. 14 Experimental waveforms of zero voltage starting phase of energy storage system with MPC($Z_{L_{ac}}$ =2.5 Ω)

5 结论

针对不平衡负荷接入新能源场站黑启动过程中的电压不均衡问题，本文根据黑启动的 3 个阶段，提出基于 MPC 的电压电流双闭环控制，通过所构建的黑启动策略实现新能源场站的三相电压均衡，本文结论如下。

(1)在单相负荷及不对称相间负荷条件下，三相

三线变流器存在负序电压，抑制负序电压即可实现黑启动过程中的电压均衡控制。

(2)在不对称负荷接入下，传统变流器的电压电流控制回路中将包含二倍频电压波动分量，基于 PI 的控制策略难以抑制二倍频分量，进而无法解决不对称负荷引发的三相电压均衡问题。

(3)基于 MPC 的电压电流双闭环控制无需进行正负序分解，只需通过嵌入现有控制架构，即可有效抑制不对称负荷引发的负序电压，降低电压不平衡度。

参考文献：

[1] 顾雪平, 魏佳俊, 白岩松, 等. 基于分层模型预测控制的含风电电力系统恢复在线决策方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1471-1486.
Gu Xueping, Wei Jiajun, Bai Yansong, et al. Online decision-making method for wind power integrated power system restoration based on hierarchical model predictive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1471-1486. (in Chinese)

[2] 张熙, 程小华, 曾君, 等. 基于动态规划与最优流模式的微网孤岛重构[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4608-4616.
Zhang Xi, Cheng Xiaohua, Zeng Jun, et al. Microgrid island reconfiguration based on dynamic programming method and optimal flow pattern [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4608-4616. (in Chinese)

[3] 蔡胜, 徐振钦, 谢云云, 等. 计及冷负荷启动时变特性的弹性配电网供电恢复[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 139-151.
Cai Sheng, Xu Zhenqin, Xie Yunyun, et al. A service restoration method for resilient distribution systems considering time-varying characteristic of cold load pickup [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 139-151. (in Chinese)

[4] 王巧, 袁小明. 正负序时变幅频旋转矢量及其在三相静止坐标系上投影瞬时值间关系的特征及仿真分析[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 100-111.
Wang Qiao, Yuan Xiaoming. Characteristics and simulation analysis of positive-and negative-sequence time-varying amplitude/frequency rotating vector and relationship between instantaneous values formed by projection in three-phase stationary coordinate reference frame [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 100-111. (in Chinese)

[5] 梁贵莉. 大电网内外电源协同黑启动研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
Liang Guili. Research on cooperative black-start of internal and external power sources in large power grids [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)

[6] 孟强, 牟龙华, 许旭锋, 等. 孤立微电网的黑启动策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59-64.
Meng Qiang, Mu Longhua, Xu Xufeng, et al. Black-start strategy of isolated microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 59-64. (in Chinese)

[7] 韩讴竹, 陈志铭, 丁涛, 等. 计及风电不确定性的电力系统黑启动恢复模型[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3289-3301.
Han Ouzhu, Chen Zhiming, Ding Tao, et al. Power system black-start restoration model considering wind power uncertainties [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3289-3301. (in Chinese)

[8] 周霞, 陈文剑, 戴剑丰, 等. 考虑分布式储能荷电状态均衡的光储微网黑启动协调控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(7): 938-951.
Zhou Xia, Chen Wenjian, Dai Jianfeng, et al. Black-start coordinated control strategy of optical storage microgrid considering state of charge balance of distributed energy storage [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(7): 938-951. (in Chinese)

[9] 卢奇秀. 储能黑启动前景几何?[N]. 中国能源报, 2024-07-01(3).
Lu Xiuqi. Prospects of black start for energy storage? [N]. China Energy News, 2024-07-01(3). (in Chinese)

[10] Jain H, Seo G S, Lockhart E, et al. Blackstart of power grids with inverter-based resources [C]// 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, QC, Canada, 2020: 1-5.

[11] 赵靖英, 高天傲, 张文煜. 基于改进 *V/f* 控制和虚拟振荡器的光储微网黑启动控制策略[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 7-15.

Zhao Jingying, Gao Tian'ao, Zhang Wenyu. Black start control strategy of solar-storage microgrid based on improved *V*/*f* control and virtual oscillator [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 7-15. (in Chinese)

[12] 张松, 陈燕东, 伍文华, 等. 不对称负载下离网逆变器的双序控制方法[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 15-23.
Zhang Song, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. Dual-sequence control method for off-grid inverter under asymmetric load [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2): 15-23. (in Chinese)

[13] 屈艾文, 韦道洲, 薛建华. 不平衡电网下并网逆变系统平衡控制策略研究[J/OL]. 电源学报, 1-10. (2024-09-07) [2025-05-08]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240909.1800.002.
Qu Aiwen, Wei Daozhou, Xue Jianhua. Research on balance control strategy of grid-connected inverter system under unbalanced grid [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-10. (2024-09-07)[2025-05-08]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm. 20240909.1800.002. (in Chinese)

[14] 熊亮雳, 游力, 韩刚, 等. 基于统一不平衡/谐波电压-电流下垂的构网型变流器电能质量控制[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 186-199.
Xiong Liangli, You Li, Han Gang, et al. Power quality control for grid-forming converters based on unified unbalanced/harmonic voltage-current droop [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 186-199. (in Chinese)

[15] 王素娥, 王子婷, 郝鹏飞. 电网不平衡下并网逆变器的矢量比例积分控制[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 99-106.
Wang Sue, Wang Ziting, Hao Pengfei. Vector proportional integral control of grid-connected inverter under unbalanced grid [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 99-106. (in Chinese)

[16] Li Yu, Gao Jianbo, Zhang Zhenbin, et al. Model-based and model-free predictive active damping for LCL-type active-front-end rectifiers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 11754-11765.

[17] Yang Haitao, Li Min, Zhang Yongchang, et al. FCS-MPC for three-level NPC inverter-fed SPMSM drives without information of motor parameters and DC capacitor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3504-3513.

[18] 孙驰, 马伟明, 鲁军勇. 三相逆变器输出电压不平衡的产生机理分析及其矫正[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 57-64.
Sun Chi, Ma Weiming, Lu Junyong. Analysis of the unsymmetrical output voltages distortion mechanism of three-phase inverter and its corrections [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 57-64. (in Chinese)

[19] 魏亚龙, 唐启迪, 王林, 等. 具备带不平衡负载功能的虚拟同步机控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(1): 33-39.
Wei Yalong, Tang Qidi, Wang Lin, et al. Virtual synchronous generator control strategy with unbalanced load [J]. Electric Drive, 2022, 52(1): 33-39. (in Chinese)

[20] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators: IEEE Std 112-2017[S]. New York: IEEE, 2018.



张雅君

作者简介：

张雅君(1995—)，女，博士，中级工程师。研究方向：电力系统分析，海上风电，新能源并网技术。E-mail：zhangyajun1169@163.com。

杨心刚(1984—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电能质量控制与治理。E-mail：xingangyang@163.com。

侯川川(1991—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：新能源并网技术。E-mail：chuanchuanhou@sjtu.edu.cn。

朱淼(1979—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：交直流混合系统，新能源并网控制。E-mail：miaozhu@sjtu.edu.cn。

熊雪君(1991—)，女，硕士，工程师。研究方向：电力系统稳定性，新型电力系统建模与仿真。E-mail：1061526290@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)