

考虑低电压条件下电压质量敏感设备损失的 配电网预防性经济运行优化

刘赞静^{1,2}, 卢利中², 杨政¹, 李再峰², 郭铁滨², 刘大巍², 姜伟²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 吉林 132000)

摘要: 随着先进制造业领域电压质量敏感型设备的大规模接入, 当前规程允许的配电网短时带故障运行机制与敏感负荷电压耐受特性之间的矛盾日益凸显。为此, 研究敏感设备在配电系统带故障运行的低电压工况预防性经济优化具有重要意义。首先, 基于对称分量法量化了变频调速器(adjustable speed driver, ASD)的停运判据。其次, 构建了一个考虑 ASD 与可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)等敏感设备损失的配电网运行成本优化模型。最后, 在 Simulink 中搭建了 ASD 并网系统, 以验证 ASD 停运条件的正确性。在改进的 IEEE13 节点系统中, 综合考虑工业园区的负荷需求响应行为、ASD 和 PLC 等敏感设备是否配置储能装置以及是否配备不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)系统 3 类典型场景, 验证了预防优化模型的正确性与有效性。

关键词: 电能质量; 电压暂降; 电压敏感设备; 经济运行优化

Preventive economic operation optimization of distribution networks considering the losses of power quality-sensitive equipment under low voltage conditions

LIU Yunjing^{1,2}, LU Lizhong², YANG Zheng¹, LI Zaifeng², GUO Tiebin², LIU Dawei², JIANG Wei²

(1. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Jilin Electric Power Supply Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: With the large-scale integration of power quality-sensitive equipment in advanced manufacturing sectors, the conflict between the currently permitted short-term fault-tolerant operation of distribution networks and the voltage tolerance characteristics of sensitive loads has become increasingly prominent. Therefore, studying preventive economic optimization of sensitive equipment under low-voltage conditions during faulted operation of distribution systems, while accounting for losses of sensitive equipment, is of great significance. First, based on the symmetrical components method, the tripping criteria for adjustable speed drivers (ASDs) are quantified. Second, an operation cost optimization model for distribution networks is established, which incorporates the loss of sensitive equipment such as ASDs and programmable logic controllers (PLCs). Finally, a grid-connected ASD system is built in Simulink to verify the correctness of the ASD tripping conditions. Using a modified IEEE13-node system, three typical scenarios are comprehensively considered, namely, demand response behavior of industrial park loads, whether sensitive equipment such as ASDs and PLCs are equipped with energy storage devices, and whether uninterruptible power supply (UPS) systems are installed. These scenarios validate the accuracy and effectiveness of the proposed preventive optimization model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377080).

Key words: power quality; voltage dip; voltage-sensitive equipment; economic operation optimization

0 引言

在以“双碳”为指引的能源改革背景下, 配电网

网源荷电力电子化程度逐步提高, 成为新型配电系统的重要发展方向。高度依赖电力电子化设备的先进制造业领域对配电网电能质量提出了更高的要求^[1-2], 而电压偏差因其不可避免性被看作是严重的电能质量问题^[3]。低电压是电压偏差的一种, 主要由电网故障引起。电网短路故障会导致低电压工况,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377080); 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司科技项目资助(2023JBGS-02)

其中单相接地故障在各类短路故障中发生概率最高, 约占 80%, 且规程允许配电系统带不严重故障运行 1~2 h^[4], 此种工况下将引发某相电压长时间低水平运行, 对电压质量敏感型设备造成严重影响。

低电压会中断电压敏感型设备的生产过程, 给用户和电网带来直接经济损失, 进而可能引发社会舆情^[5]。因此, 研究低电压下计及敏感设备损失的配电系统预防性经济优化运行具有重要意义。

考虑到目前配电系统负荷设备的多元化, 本文将配电系统负荷设备划分为 3 类: 1) 电压质量敏感型负荷, 如半导体设备制造厂以及数据中心安装的可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、变频调速器(adjustable speed driver, ASD)等设备; 2) 常规居民及商业负荷; 3) 工业园区聚合负荷。其中, 对于工业园区内各可调度设备, 现有研究根据电价调节园区内设备的运行状态, 进而调整其与配电系统联络线上的交互功率, 从而提高工业园区的配电系统总体运行经济性。针对含工业园区的配电网经济运行已有部分研究。文献[5]提出了一种考虑低电压影响的分布式电源(distributed generation, DG)和大型敏感用户的联合优化规划方法, 减少低电压给电力系统和用户带来的损失, 但其对敏感用户的建模较为简单。文献[6]构建了考虑源荷不确定性的工业园区电-气互联综合能源系统模糊优化调度模型, 有效提高了系统优化调度方案的可靠性和经济性, 但在模糊优化时参数确定难度大。文献[7]将共享储能与园区微网结合, 提出了一种能量协同优化模型, 有效降低了运营成本并提高了 DG 的利用率。文献[8]提出了一个考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度模型, 该模型能够有效降低运行成本并提高设备出力稳定性。然而, 模型的复杂性和参数的准确性对结果存在一定的影响。上述文献均提高了工业园区的运行经济性, 但其缺乏对敏感设备损失方面的考虑。

对于敏感设备的研究, 多以单机无穷大系统进行建模分析。文献[9]利用改进的仿真工具, 研究了波形点(point-on-wave, POW)以及相位跳变对交流接触器(AC coil contactors, ACC)的影响。文献[10]提出了敏感设备自动测试系统, 通过采集 PLC 的电压、电流信号, 结合改进二分法快速确定其电压耐受曲线。文献[11]考虑了低电压幅值、持续时间以及低电压类型, 同时也考虑了低电压起始点对交流接触器以及开关电源的影响, 并给出了电压耐受曲线。文献[12]讨论了不同故障类型引起的低电压对 ASD 的影响, 强调了波形起始点和相位跳变对 ASD 的敏感度没有影响, 且敏感度曲线呈现矩形。文献

[13]基于 MATLAB 平台建立了 ASD 的简化模型, 研究了不同跌落类型、负荷类型及相位跳变的影响, 但该研究仅分析了电压跌落对 ASD 转矩、转速及直流侧电压的影响。然而, 上述文献仅针对单个敏感设备进行低电压或电压耐受能力分析, 未将其置于系统网络环境中评估其可能造成的经济损失。此外, 现有敏感型负荷配置的动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)、无蓄电池型不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)主要针对电压暂降的预防, 难以应对持续低电压场景^[14]。

为此, 本文构建了 ASD 的恒功率源线性化模型, 且基于对称分量法得到了 ASD 直流电容电压的解析表达式(ASD 停机条件), 进一步得到其停机经济损失约束。基于此, 提出了考虑低电压条件下 ASD 与 PLC 敏感设备损失的预防性配电系统经济运行优化模型。最后, 通过 Simulink 仿真验证了 ASD 直流电容电压近似解析解的正确性; 在改进的 IEEE13 节点系统中, 通过分析是否考虑工业园区的需求响应、ASD 与 PLC 敏感设备是否装配储能以及是否考虑不间断电源(uninterruptible power supply, UPS), 验证了所提方法在抑制低电压、降低经济损失方面的有效性。

1 ASD 停运条件与成本损失约束

ASD 属于配电网内常见的三相负荷, 图 1 为 ASD 并网系统结构, 主要由整流电路、直流链路、逆变电路和控制模块构成。其中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为并网点 a、b、c 三相电压; R_{asd} 、 L_{asd} 分别为线路电阻与电感; L_{dc} 、 C_{dc} 分别为直流电感与直流电容。

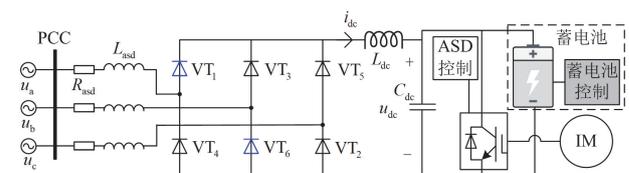


图 1 ASD 联合储能拓扑结构

Fig. 1 ASD combined energy storage topology

1.1 ASD 恒功率源的线性化模型

当电网侧低电压且 ASD 没有被切除时, ASD 保持功率不变, ASD 可采用近似线性化的恒功率源 P_w 表示, 即由一个负电阻 R_{CPL} 和一个恒流源 I_{CPL} 并联构成^[15], 这两个参数可由图 2 的数据计算得到。由图 2 可知, 当 $V-I$ 曲线斜率急剧变化时(图中的 P_3 与 P_4 点)计算恒功率源的线性化模型会存在一定误差。

图 2 中, 分别采用 $|u_{a(1)}|$ 、 $|u_{a(2)}|$ 估计直流电容电

压 $V_{dc(1)}^*$ 与 $V_{dc(2)}^*$, 本文下标“(1)”、“(2)”分别代表正序、负序参数, 它可以用 Fortescue 变换得到。 $V_{dc(1),pro}$ 、 $V_{dc(2),pro}$ 分别表示 ASD 设备正、负序电压的保护阈值。ASD 直流欠压保护定值 $V_{dc,pro}$ 可由 ASD 低电压耐受曲线设计^[16]。由于 $V_{dc(2),pro}$ 低于正常运行直流电压 V_{dc} 的 10%, 其对 V_{dc} 的影响可忽略不计, 同时并网点到 ASD 端口电气距离很小, 因此可依据式(1)进行参数设计。

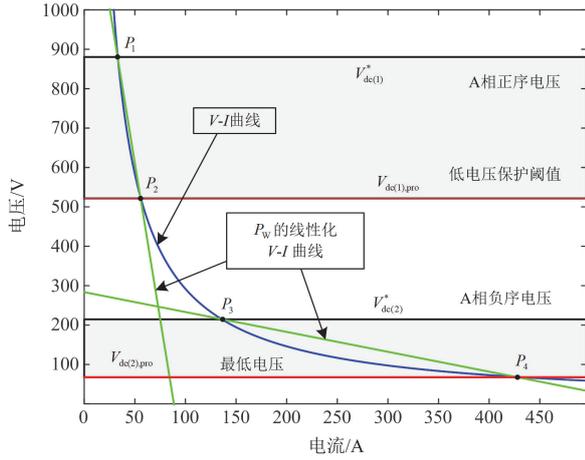


图 2 恒功率负荷的线性化模型

Fig. 2 A linearized model of constant power load

$$\begin{cases} V_{dc(1)}^* = \sqrt{3}|u_{a(1)}| & V_{dc(2)}^* = \sqrt{3}|u_{a(2)}| \\ V_{dc(1),pro} = 0.9V_{dc(1)}^* & V_{dc(2),pro} = \mu V_{dc(2)}^* \end{cases} \quad (1)$$

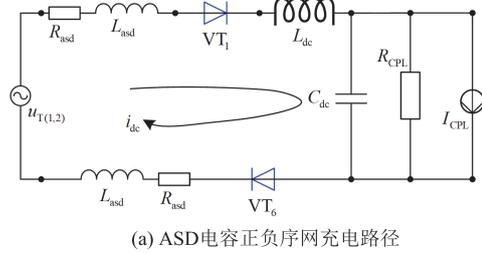
式中: μ 为截止系数, 与电压不平衡度系数^[17] λ 有关。定义电压不平衡度系数 $\lambda = |u_{a(2)}|/|u_{a(1)}|$ 。依据式(2)可计算截止系数 μ 。

$$\begin{cases} \mu = 0.1, \lambda \leq \mu_1 \\ \mu = 0.1(\lambda - \mu_1)/\mu_2 - \mu_1 + 0.1, \mu_1 < \lambda < \mu_2 \\ \mu = 0.05(\lambda - \mu_2)/0.8 - \mu_2 + 0.2, \lambda \geq \mu_2 \end{cases} \quad (2)$$

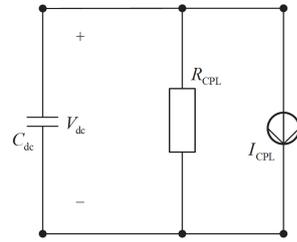
式中: μ_1 、 μ_2 为经验分段系数, $\mu_1 \in [0.25, 0.35]$, $\mu_2 \in [0.45, 0.55]$ 。利用电压不平衡度系数 λ 计算截止系数 μ , 仅为减小当 V - I 曲线斜率急剧变化时(利用图 2 中的 P_3 与 P_4 点计算)恒功率源的线性化模型所引起的误差。若 V - I 曲线斜率变化很小, 可以直接给定截止系数 $\mu \in [0.1, 0.3]$, 当 $|u_{a(2)}|$ 较大时取大值, 当 $|u_{a(2)}|$ 较小时取小值。

当 ASD 端口电压对称, 且整流器正常工作时, 直流链路电压将依据 U_{ab} 、 U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{ba} 、 U_{ca} 、 U_{cb} 依次轮换。因此, 对于 ASD 的直流链路, 其电

压激励为 6 脉波, 将其记为 U_T , 在正、负序网中分别记为 U_{T1} 与 U_{T2} 。依据式(1)和式(2)及图 2 中 P_1 — P_4 各点, 可将恒功率源 P_w 在正负序网中用线性化模型表示。画出图 1 对应的正负序网络, 如图 3(a)所示。由于在零序网中三相电压幅值大小相同, 无法构成回路, 因此不予考虑。



(a) ASD 电容正负序网充电路径



(b) ASD 电容放电路径

图 3 ASD 直流电容充放电路径图

Fig. 3 ASD DC charge-discharge path

1.2 电源对电容充电的动态模型

在电容电压 V_{dc} 较低时, 电源 U_T 向电容充电, 在序分量网络中则为正序电源 $U_{T(1)}$ 与负序电源 $U_{T(2)}$ 向电容 C_{dc} 充电。对图 3(a)列写 KVL 与 KCL 方程, 设 $u = i_{dc}$, $v = V_{dc}$, 可得式(3)。ASD 处于恒功率工作状态时, 负电阻 R_{CPL} 和恒流源 I_{CPL} 参数保持不变。因此, 式(3)具有形式不变性。

$$\begin{cases} U_T = (2 - \tau)R_{asd} \cdot u + [(2 - \tau)L_{asd} + L_{dc}] \dot{u} + v \\ u = C_{dc} \dot{v} + I_{CPL} + \frac{v}{R_{CPL}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ 为线路故障位置。

1.3 电容对恒功率负荷放电模型

由于电感 L_{dc} 的影响, ASD 存在电容电压 V_{dc} 高于端口电压而导致电容放电的过程。此时 V_{dc} 向恒功率负荷放电, 以完成 ASD 的正常逆变功能。此时拓扑如图 3(b)所示, 由此可得 ASD 放电动态模型如式(4)所示。

$$C_{dc} \dot{v} + \frac{v}{R_{CPL}} + I_{CPL} = 0 \quad (4)$$

1.4 ASD 电容电压近似解析

由于电压激励 U_T 是以 2π 为周期的 6 脉波, 因

此可对 U_T 进行傅里叶级数展开, 如式(5)所示。

$$U_T(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \quad (5)$$

在系统对称运行时, U_T 波形特征具有一般性, 均为 6 脉波。对 U_T 波形进行傅里叶分解可知, 其频谱中以直流分量和 $6n$ 次谐波(如 6 次、12 次等)为主。取 $n=0$ 与 $n=1$, 设 $U_a = U \angle 30^\circ$, U 为电压幅值。因此可得 U_T 的近似解析如式(6)所示。

$$U_T(x) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U - \frac{6\sqrt{3}}{35\pi} U \cos(6x) \quad (6)$$

将式(6)代入式(3), 令 $\tau_2 = 2 - \tau$, $\tau_{2L} = \tau_2 L_g$, $\tau_{2R} = \tau_2 R_g$, 消去 u 可得式(7)。

$$\begin{aligned} & \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U - \frac{6\sqrt{3}}{35\pi} U \cos(6x) - \tau_{2R} I_{CPL} = \\ & \underbrace{C_{dc}(\tau_{2L} + L_{dc})}_{v_a} \ddot{v} + \underbrace{\left(\tau_{2R} C_{dc} + \frac{\tau_{2L} + L_{dc}}{R_{CPL}} \right)}_{v_b} \dot{v} + \underbrace{\left(\frac{\tau_{2R}}{R_{CPL}} + 1 \right)}_{v_c} v \end{aligned} \quad (7)$$

设 v 通解为 v_1 , 采用傅里叶展开法求得式(7)的特解 v_p , 其解如式(8)。

$$\begin{aligned} v'(x) = v_1(x) + v_p(x) = v_1(x) + & \left(\frac{3\sqrt{3}U}{\pi} - \tau_{2R} I_{CPL} \right) / v_c + \\ & \frac{6\sqrt{3}(36v_a - v_c)U \cos(6x) - 36\sqrt{3}v_b U \sin(6x)}{35\pi[(-36v_a + v_c)^2 + 36v_b^2]} \end{aligned} \quad (8)$$

分析式(7)可知, 其特征方程的通解 v_1 会将 e 指数引入式(8)。因此, 要使式(8)电容电压 V_{dc} 收敛于特解, 则式(7)的特征方程的解 $r_{1,2}$ 需满足以下任一条件:

1) 如果 $v_b^2 - 4v_a v_c > 0$, 那么 $r_1 r_2 = v_c / v_a > 0$ 并且 $r_1 + r_2 = -v_b / v_a < 0$;

2) 如果 $v_b^2 - 4v_a v_c < 0$, 那么 $r_1 + r_2 = -v_b / v_a < 0$ 。

(1) 正序网: 当参数满足条件 1 或条件 2 时, 式(8)将收敛于特解, 此工况 ASD 可正常整流, 因此式(8)可将通解 v_1 忽略, 即 $v' \approx v_p$ 。

(2) 负序网: 由于负序电压 $u_{T(2)}$ 幅值较小, 使得 $|R_{CPL}|$ 较小, 存在 $v_b < 0$ 的可能, 导致 $-v_b / v_a > 0$, 此时通解 v_1 会依据 e 指数函数发散。

由于正负序网在 ASD 整流的每个周期内不一定完成全周期整流, 周期内剩余时间为 ASD 电容向恒功率负荷放电过程, 按前文所述方法求解式(4)可得式(9)。

$$v''(x) = F_u e^{\frac{1}{R_{CPL} C_{dc}} x} - I_{CPL} R_{CPL} \quad (9)$$

式中: F_u 为 e 指数系数, 由于 R_{CPL} 为负, 式(9)自由分量依据 e 指数衰减至 0, F_u 可不用求解。因此 $v'' \approx -I_{CPL} R_{CPL}$ 。在一般情况下正负序网中电容包含充电与放电两个过程, 对 v 采用差值处理, 即 $v = |v'' - v'|$ 。由式(6)可知, U_T 的周期为 $\pi/3$, 在 $\pi/6$ 时 v 可取得极值。因此, 本文采用 $v(\pi/6)$ 来近似低电压期间 ASD 直流电容电压 V_{dc} 。综上可求解网侧发生低电压后, ASD 直流电容电压 V_{dc} 。

$$V_{dc} = v(\pi/6) = v_{(1)}(\pi/6) + v_{(2)}(\pi/6) \quad (10)$$

依据端口电压与式(10)可求得敏感设备 ASD 的直流电容电压 V_{dc} 的近似值。由于 ASD 带有直流欠压保护, 且用户为保证良品率一般将 $V_{dc,pro}$ 设置较高, 即在 V_{dc} 等于或小于 $V_{dc,pro}$ 时, ASD 逆变器仍然可以继续运行一段时间, 运行时长取决于其电压耐受曲线^[16], 因此, 无论 V_{dc} 是否小于 $V_{dc,pro}$, 都可以将 ASD 近似为恒功率设备。但当 $V_{dc} < V_{dc,pro}$ 时, ASD 会被强制切除, 从而造成园区内工业用户的经济损失。因此, 可以得到敏感设备 ASD 的损失成本约束如式(11)所示。

$$\begin{cases} C_{asd} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} C_{s,t} n_{s,t} \cdot H(V_{s,dc,t}) \\ H(V_{s,dc,t}) = H(V_{s,dc,pro} - V_{s,dc,t}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_{asd} 为所有被切除的 ASD 引起的成本损失; 下标“ t ”是 t 时刻的相应变量; N_t 为总时间; N_s 是配电系统中敏感设备 ASD 设备的数量; $C_{s,t}$ 为在 t 时刻第 s 台 ASD 生产每件产品的成本; $n_{s,t}$ 是第 s 台 ASD 在 t 时刻由于低电压而生产的残次品数量; $V_{s,dc,pro}$ 为第 s 台 ASD 直流欠电压保护阈值; $V_{s,dc,t}$ 为 t 时刻第 s 台 ASD 的直流电容电压; $H(\cdot)$ 为单位阶跃信号^[18]。

综上, 本文建立了端口相电压幅值 U 与直流电容 V_{dc} 的关系, 并据此得到了 ASD 停机造成的成本损失约束。

2 考虑低电压的电力系统运行优化

实际配电网存在负荷三相接入不均匀、低电压等现象。式(11)可量化实际电网不对称运行对敏感设备造成的成本损失, 但需要已知敏感设备端口的三相电压, 因此本文对配电系统进行 abc 三相整体建模。此外, 文献[4]指出在配电网中发生单相短路故障时, 故障电流较小, 不影响对负荷的连续供电, 规定可带故障继续运行^[19] 1~2 h, 此时配电系统不对称程度严重、电压偏低。由于配电系统中单相故障

概率最大^[20], 因此本文基于历史统计数据, 模拟线路发生单相接地故障而引起的低电压场景, 进一步对其进行预防性经济运行优化。

2.1 基于统计数据的线路低电压模拟

现行的 DL/T 837-2012《输变电设施可靠性评价规程》对线路的故障率作出了明确的规定, 其中单条线路强迫故障率 β 如式(12)所示。

$$\beta = \frac{\text{故障次数}}{\text{统计}100\text{km} \cdot \text{年数}} \text{次}/(100 \text{ km} \cdot \text{年}) \quad (12)$$

假设某电压等级线路共有 k 条, 使用式(12)统计方法可计算配电线路的故障率, 但考虑到配电线路长度一般都在几百米至几千米, 文献[21]提出可以按历史同期的月份进行故障率计算, 如式(13)所示。

$$\beta(x) = \frac{1}{T_x} \frac{\sum_{i=1}^k N_{xi}}{\sum_{i=1}^k L_i} \quad x=1,2,\dots,12 \quad (13)$$

式中: $\beta(x)$ 为历史同期第 x 个月的故障率, 次/(km·月); T_x 为历史同期第 x 个月的时间; N_{xi} 为 n 年内第 i 条线路在第 x 个月中的故障次数; L_i 为第 i 条线路的长度。由于本文进行单相线路故障分析, 依据式(13)可预测同期第 x 个月单相接地故障率, 如式(14)所示。

$$\beta_g(x) = \eta_g \beta(x) \quad (14)$$

式中: $\beta_g(x)$ 为依据历史同期第 x 个月预测的单相故障率, 次/(km·月); η_g 为单相接地故障占总故障的概率。文献[20]指出, 单相接地故障占总故障概率超过 80%, 本文设置系数 $\eta_g = 0.8$ 。

利用实际的线路数据, 结合式(12)一式(14)可计算出不同月份的不同电压等级线路因故障引起的低电压次数, 将其随机分配到 k 条线路上。

线路低电压模拟不仅需要考虑到低电压发生的位置、频次, 还需要考虑到低电压幅值, 而接地电阻则是影响电压降低幅度的重要因素, 对于接地电阻的计算已有较多研究^[22-23], 本文不再赘述。

2.2 低电压条件下敏感设备损失的预防优化模型

2.2.1 目标函数

工业园区与配电系统的供用能关系如图 4 所示。其中, 由空调系统和冰蓄冷系统对园区所需冷能进行供给; 由微燃机和电锅炉对园区所需热能进行供给; 由微燃机、光伏电源和配电系统对园区所需电能进行供给。此外, 配电系统的敏感设备还包含储能系统以及 UPS 装置, 其配置位置如图 1 所示。利用这些装置进行电能存储, 以减少因配电网低电压工况运行引起 ASD 与 PLC 等敏感设备停机而造成

的经济损失。

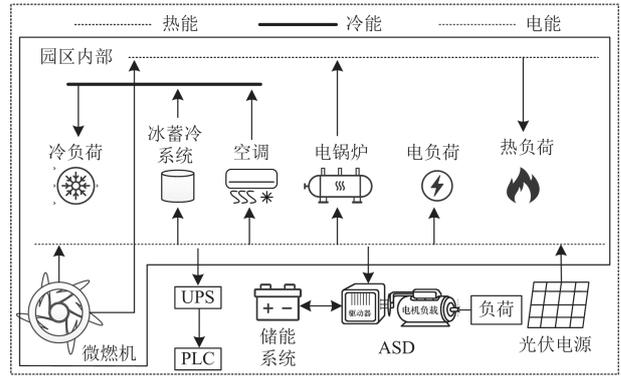


图 4 配电系统与工业园区供用能关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy relationship between power distribution system and industrial park

以最小化计及敏感设备损失的带工业园区的配电系统运行成本为目标函数, 如式(15)所示。包含配电系统从上级输电网的购电成本、配电系统分布式电源发电成本、各工业园区从配电系统的购电成本、敏感设备 ASD 停机损失成本、敏感设备 PLC 停机损失成本、储能设备充放电成本以及低电压造成的损失成本。

$$\min \left[\sum_{g=1}^{N_g} \left(\sum_{t=1}^{N_t} C_{MT,g,t} P_{MT,t} \right) + \sum_{t=1}^{N_t} C_t P_t + C_{asd} + C_{PLC} - \sum_{\substack{t=1 \\ m \in \{1,2,3\}}}^{N_t} C_{m,t} P_{m,t} + C_{SOC} + \sum_{\substack{f=1 \\ t_f \in F}}^{N_F} C_{FT} t_{Ff} \right] \quad (15)$$

式中: N_g 为分布式微燃机数量; $C_{MT,g,t}$ 和 $P_{MT,t}$ 分别为分布式微燃机 g 的单位发电成本和发电功率; C_t 和 P_t 分别为配电系统从上级电网的购电价格和购电功率; $C_{m,t}$ 为工业园区 m 从配电系统的购电价格; $P_{m,t}$ 为工业园区 m 从配电系统的购电功率; C_{PLC} 为所有被切除的 PLC 引起的成本损失; C_{SOC} 为储能设备的运行成本; F 为低电压时间段的集合; t_{Ff} 为第 f 次低电压的持续时间; N_F 为低电压次数; C_{FT} 为每次低电压在每个时间段内造成的损失^[19]。

2.2.2 配电系统约束条件

1) 功率平衡约束

配电系统的潮流平衡约束受到各节点负荷、微燃机出力、配电系统从上级电网购电功率以及各工业园区负荷的影响。本文进行三相配电网潮流建模, 以分析不对称运行时对敏感设备运行成本造成的影响, 其模型如下。

$$\begin{cases} \sum_{i \in \psi_1(j)} (P_{ij,t}^\varphi - I_{ij,t}^\varphi r_{ij}^\varphi) = \sum_{h \in \psi_2(j)} \left(P_{jh,t}^\varphi - P_{PV,j,t}^\varphi - P_{j,t}^\varphi + \right. \\ \left. (P_{j,t}^{p,\varphi} + P_{D,j,t}^\varphi + P_{m,j,t}^\varphi + P_{j,t}^{s,\varphi}) \right) \\ \sum_{i \in \psi_1(j)} (Q_{ij,t}^\varphi - I_{ij,t}^\varphi x_{ij}^\varphi) = \sum_{h \in \psi_2(j)} (Q_{jh,t}^\varphi - Q_{j,t}^\varphi + (Q_{D,j,t}^\varphi + Q_{m,j,t}^\varphi)) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\varphi \in \Phi$, Φ 为配电网 abc 三相集合; $\psi_1(j)$ 为所有功率流向节点 j 的线路始端节点集合; $\psi_2(j)$ 为所有功率流出节点 j 的线路终端节点集合; $P_{ij,t}^\varphi$ 和 $Q_{ij,t}^\varphi$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功功率和无功功率; $P_{jh,t}^\varphi$ 、 $Q_{jh,t}^\varphi$ 分别为流出节点 j 的有功、无功功率和; $P_{PV,j,t}^\varphi$ 为与节点 j 所接的光伏有功出力; $P_{j,t}^\varphi$ 和 $Q_{j,t}^\varphi$ 分别为与节点 j 所接的上级电网有功出力和无功出力; $P_{m,j,t}^\varphi$ 和 $Q_{m,j,t}^\varphi$ 分别为与节点 j 所接的工业园区 m 从配电系统获得的有功功率与无功功率; $P_{D,j,t}^\varphi$ 和 $Q_{D,j,t}^\varphi$ 分别为节点 j 除工业园区负荷、敏感设备 ASD 负荷外的其他负荷; $P_{j,t}^{s,\varphi}$ 为与节点 j 所接的带储能的 ASD 敏感设备所吸收电网的功率; $P_{j,t}^{p,\varphi}$ 为与节点 j 所接的带 UPS 的 PLC 敏感设备所吸收电网的功率; $I_{ij,t}^\varphi$ 为流经线路 ij 电流的平方项; r_{ij}^φ 、 x_{ij}^φ 分别为节点 i 与 j 之间的电阻以及电抗。

本文进行三相分析, 因此对于节点 j 所连各类设备的约束如式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{M,j,t}^\varphi < P_{M,j,t}, \sum_{\varphi \in \Phi} P_{M,j,t}^\varphi = P_{M,j,t} \\ Q_{M,j,t}^\varphi < Q_{M,j,t}, \sum_{\varphi \in \Phi} Q_{M,j,t}^\varphi = Q_{M,j,t} \end{cases} \quad (17)$$

式中: M 为节点 j 所连的各类设备, $M \in \Psi$, Ψ 是配电网内各种负荷的集合; $P_{M,j,t}$ 、 $Q_{M,j,t}$ 分别为各个负荷的三相总有功功率与三相总无功功率。对于电网中的 PQ 节点, 三相功率是已知量。以下若无特别说明, 则所提约束均代表配电网中的每一相约束。

2) 二阶锥松弛后的线路潮流约束

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ I_{ij,t} - V_{i,t}^2 \end{array} \right\|_2 \leq I_{ij,t} + V_{i,t}^2 \quad (18)$$

式中: $V_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压。

3) 电压降方程

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 = 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij,t} \quad (19)$$

4) 配电系统节点电压上下限约束

$$\begin{cases} V_{i,\min} \leq V_{i,t_2} \leq V_{i,\max} \\ t_2 \notin F \\ 0 \leq V_{i,t_1} \leq V_{i,\max} \\ t_1 \in F \end{cases} \quad (20)$$

式中: $V_{i,\max}$ 和 $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压幅值的最大、最小值; F 为低电压时间段的集合, t_1 为集合 F 中的时刻, 而 t_2 为调度时刻中不属于 F 的时刻。系统在低电压期间, 节点电压(尤其故障点的电压)均不能达到正常运行状态下的 $V_{i,\min}$ 和 $V_{i,\max}$ 之间。因此, 在低电压期间, 即本文对 t_2 时刻的节点电压下限 $V_{i,\min}$ 不做约束, 认为 $V_{i,\min} = 0$ 。

5) 线路传输容量约束

$$\begin{cases} -P_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij}^{\max} \\ -Q_{ij}^{\max} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_{ij}^{\max} 和 Q_{ij}^{\max} 分别为线路 ij 的最大有功、无功功率传输容量。

6) 微燃机出力上下限约束

$$\begin{cases} P_{MT,\min} \leq P_{MT,t} \leq P_{MT,\max} \\ Q_{MT,\min} \leq Q_{MT,t} \leq Q_{MT,\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{MT,t}$ 和 $Q_{MT,t}$ 分别为微燃机在 t 时刻的有功出力和无功出力; $P_{MT,\max}$ 和 $P_{MT,\min}$ 分别为微燃机有功出力的最大值和最小值; $Q_{MT,\max}$ 和 $Q_{MT,\min}$ 分别为微燃机无功出力的最大值和最小值。

7) 微燃机爬坡约束

$$\begin{cases} P_{MT,t+\Delta t}^g - P_{MT,t}^g \leq \min\{P_{MT,\max}^g - P_{MT,t}^g, R_{up} \cdot \Delta t\} \\ P_{MT,t}^g - P_{MT,t+\Delta t}^g \leq \min\{P_{MT,t}^g - P_{MT,\min}^g, -R_{down} \cdot \Delta t\} \end{cases} \quad (23)$$

式中: R_{up} 、 R_{down} 分别为微燃机向上、向下爬坡速率; Δt 为调度时间间隔。

8) 敏感设备 ASD 与储能约束

在 ASD 的直流侧加入储能(如图 1 所示), 当配电网发生低电压时, 储能可给予电容相应的功率支撑, 缓解 ASD 直流电容低电压, 降低因 ASD 停运造成的损失成本, 如式(24)所示。由于储能能在直流侧, 所以约束式(24)并非配电网的三相约束。

$$\begin{cases} E_{SOC,t} = E_{SOC,t-1} + P_{SOC,t}^c \Delta t - P_{SOC,t}^d \Delta t \\ E_{SOC,\min} \leq E_{SOC,t} \leq E_{SOC,\max} \\ E_{SOC,0} = E_{SOC,\text{end}} \\ P_{SOC,\min}^c \leq P_{SOC,t}^c \leq P_{SOC,\max}^c \\ P_{SOC,\min}^d \leq P_{SOC,t}^d \leq P_{SOC,\max}^d \\ P_t^{SOC} = P_{SOC,t}^c - P_{SOC,t}^d \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{SOC,t}^c$ 、 $P_{SOC,t}^d$ 分别为储能充电功率和放电功率; $P_{SOC,\max}^c$ 和 $P_{SOC,\min}^c$ 分别为储能充电功率最大值和最小值; $P_{SOC,\max}^d$ 和 $P_{SOC,\min}^d$ 分别为储能放电功率最大值和最小值; P_t^{SOC} 为与 ASD 相连储能的运行功率;

$E_{\text{SOC},t}$ 为 t 时刻蓄电池荷电状态; $E_{\text{SOC},\max}$ 和 $E_{\text{SOC},\min}$ 分别为蓄电池荷电状态的最大值和最小值; $E_{\text{SOC},0}$ 和 $E_{\text{SOC},\text{end}}$ 分别为蓄电池荷电状态的初始值与最终值。

考虑如图 1 所示的敏感设备 ASD 联合储能的系统拓扑结构, 该拓扑结构将储能通过控制器与直流母线相连, 控制器能够控制储能能量的双向流动, 起到维持敏感设备 ASD 直流电压稳定的作用。其等式约束为

$$\sum_{\varphi \in \Phi} P_t^{\text{S},\varphi} = P_{s,w,t} H(V_{s,\text{dc},t} - V_{s,\text{dc},\text{pro}}) + P_{s,t}^{\text{SOC}} \quad (25)$$

式中: $P_{s,w,t}$ 为第 s 个 ASD 敏感设备在 t 时刻的有功负荷; $P_{s,t}^{\text{SOC}}$ 为与第 s 个 ASD 相连储能的运行功率。

虽然储能充放电过程非常稳定, 但其在频繁放电场合使用时寿命较短^[24], 因此需要量化储能的折旧费用与维护费用的成本约束 C_{SOC} 。

$$C_{\text{SOC}} = \sum_{o=1}^{N_o} \sum_{t=1}^{N_t} C_{o,t}^{\text{SOC}} |P_{o,t}^{\text{SOC}}| \quad (26)$$

式中: $P_{o,t}^{\text{SOC}}$ 为第 o 个储能的运行功率, 配电系统中共计有 N_o 个储能; $C_{o,t}^{\text{SOC}}$ 为第 o 个储能的折旧费用与维护费用。

9) 光伏电源出力约束

$$P_t^{\text{PV}} = \eta_{\text{PV}} (1 - r_{\text{PV}}) S_{\text{n}} \quad (27)$$

式中: P_t^{PV} 为光伏电源出力; η_{PV} 为光伏电源的光热转换效率; r_{PV} 为反射系数; S_{n} 为太阳辐射强度。

10) 敏感设备 PLC 与 UPS 约束

PLC 为单相非开关类设备^[10], 其结构如图 5 所示。设 t 时刻第 p 台 PLC 的交流单相电压有效值为 $U_{p,t,\text{in}}$, PLC 直流电压可依据 $0.9U_{p,t,\text{in}}$ 计算。维持电压控制器正常工作的最小直流电压为 V_{min} , 则 PLC 的低电压损失成本约束为

$$\begin{cases} C_{\text{PLC}} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{p=1}^{N_p} C_{p,t} n_{p,t} \cdot H(U_{p,t,\text{in}}) \\ H(U_{p,t,\text{in}}) = H(V_{\text{min}} - 0.9U_{p,t,\text{in}}) \end{cases} \quad (28)$$

式中: N_p 为配电系统中敏感设备 PLC 的数量; $C_{p,t}$ 为 t 时刻第 p 台 PLC 控制生产产品的成本; $n_{p,t}$ 为第 p 台 PLC 在 t 时刻由于 PLC 控制异常导致生产出残次品的数量。

为提升 PLC 设备运行稳定性, 考虑安装 UPS 设备。UPS 可为 PLC 提供更为优质的电压质量, 其约束条件为

$$U_{p,t,\text{in}} = \xi_{p,\text{UPS}} U_{p,n,\text{in}} \quad (29)$$

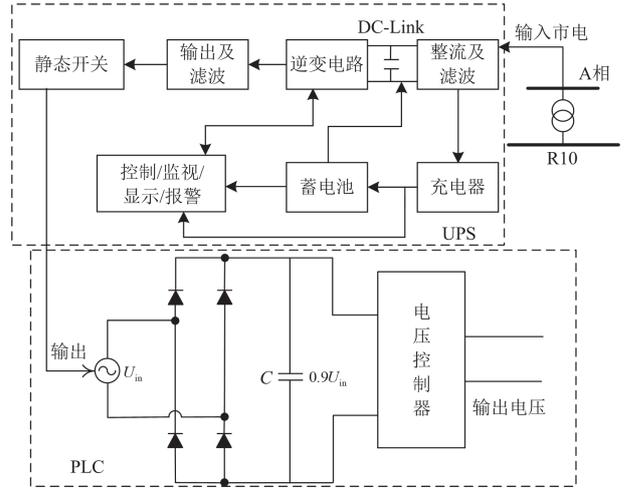


图 5 PLC 联合 UPS 的设备结构

Fig. 5 Structure of devices for PLC combined UPS

式中: $U_{p,n,\text{in}}$ 为第 p 台 PLC 所连 UPS 的端口电压; $\xi_{p,\text{UPS}}$ 为第 p 台 PLC 所连 UPS 的电压转换系数。

蓄电池作为 UPS 的核心组成部分, 其性能的优劣对 UPS 而言至关重要, 影响着整个系统的诸如容量、响应速度、持续时间等性能指标^[14], 本文考虑带有蓄电池的 UPS 模型如式(30)所示。

$$\begin{cases} E_{\text{UPS},t} = E_{\text{UPS},t-1} + P_{\text{UPS},t}^{\text{c}} \Delta t - P_{\text{UPS},t}^{\text{d}} \Delta t \\ E_{\text{UPS},\min} \leq E_{\text{UPS},t} \leq E_{\text{UPS},\max} \\ E_{\text{UPS},0} = E_{\text{UPS},\text{end}} \\ P_{\text{UPS},\min}^{\text{c}} \leq P_{\text{UPS},t}^{\text{c}} \leq P_{\text{UPS},\max}^{\text{c}} \\ P_{\text{UPS},\min}^{\text{d}} \leq P_{\text{UPS},t}^{\text{d}} \leq P_{\text{UPS},\max}^{\text{d}} \\ P_t^{\text{UPS}} = P_{\text{UPS},t}^{\text{c}} - P_{\text{UPS},t}^{\text{d}} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $P_{\text{UPS},t}^{\text{c}}$ 、 $P_{\text{UPS},t}^{\text{d}}$ 分别为 UPS 充电功率和放电功率; $P_{\text{UPS},\max}^{\text{c}}$ 和 $P_{\text{UPS},\min}^{\text{c}}$ 分别为 UPS 充电功率的最大值和最小值; $P_{\text{UPS},\max}^{\text{d}}$ 和 $P_{\text{UPS},\min}^{\text{d}}$ 分别为 UPS 放电功率的最大值和最小值; P_t^{UPS} 是与 PLC 相连 UPS 中储能的运行功率; $E_{\text{UPS},t}$ 为 t 时刻 UPS 中蓄电池荷电状态; $E_{\text{UPS},\max}$ 和 $E_{\text{UPS},\min}$ 分别为 UPS 中蓄电池荷电状态的最大值和最小值; $E_{\text{UPS},0}$ 和 $E_{\text{UPS},\text{end}}$ 分别为 UPS 中蓄电池荷电状态的初始值与最终值。式(30)约束了 UPS 中储能不能同时充放电。

考虑如图 5 所示的敏感设备 PLC 联合 UPS 的系统拓扑结构, 该拓扑结构将 UPS 通过控制器与直流母线相连, 控制器能够控制 UPS 能量的双向流动, 起到维持敏感设备 PLC 直流电压稳定的作用。其等式约束为

$$\sum_{\varphi \in \Phi} P_t^{\text{P},\varphi} = P_t^{\text{PLC}} H(0.9U_{p,t,\text{in}} - V_{\text{min}}) + P_t^{\text{UPS}} \quad (31)$$

式中: P_t^{PLC} 为敏感设备 PLC 的有功负荷。

2.2.3 工业园区约束条件

1) 空调约束

$$\begin{cases} P_{\text{ac}}^{\min} \leq P_t^{\text{ac}} \leq P_{\text{ac}}^{\max} \\ C_t^{\text{ac}} = \eta_{\text{ac}} P_t^{\text{ac}} \end{cases} \quad (32)$$

式中: P_{ac}^{\max} 和 P_{ac}^{\min} 分别为空调运行功率的最大值和最小值; C_t^{ac} 为空调的制冷功率; P_t^{ac} 为空调的运行功率; η_{ac} 为空调将电能转化为冷能的效率。空调属于园区内的三相负荷。

2) 冰蓄冷系统约束

冰蓄冷系统含有储冷罐、制冰机和融冰机。其约束包含储冷量等式约束、储冷量上下限约束、融冰功率上下限约束和制冰功率上下限约束,如式(33)所示。

$$\begin{cases} C_t^{\text{ac}} = C_{t-1}^{\text{ac}} + \eta_p P_t^{\text{ac}} - \eta_m M_t^{\text{ac}} \\ C_{t,\min}^{\text{ac}} \leq C_t^{\text{ac}} \leq C_{t,\max}^{\text{ac}} \\ M_{t,\min}^{\text{ac}} \leq M_t^{\text{ac}} \leq M_{t,\max}^{\text{ac}} \\ P_{t,\min}^{\text{ac}} \leq P_t^{\text{ac}} \leq P_{t,\max}^{\text{ac}} \end{cases} \quad (33)$$

式中: C_t^{ac} 、 $C_{t,\min}^{\text{ac}}$ 和 $C_{t,\max}^{\text{ac}}$ 分别为 t 时刻储冷罐的存储量及其最小值和最大值; P_t^{ac} 、 $P_{t,\min}^{\text{ac}}$ 和 $P_{t,\max}^{\text{ac}}$ 分别为 t 时刻制冰机的运行功率及其最小值和最大值; M_t^{ac} 、 $M_{t,\min}^{\text{ac}}$ 和 $M_{t,\max}^{\text{ac}}$ 分别为 t 时刻融冰机的运行功率及其最小值和最大值; η_p 和 η_m 分别为制冰效率和融冰效率。冰蓄冷系统属于园区内的三相负荷。

3) 电锅炉约束

$$\begin{cases} P_{\text{eb}}^{\min} \leq P_t^{\text{eb}} \leq P_{\text{eb}}^{\max} \\ H_t^{\text{eb}} = P_t^{\text{eb}} \cdot \eta_{\text{eb}} \end{cases} \quad (34)$$

式中: P_t^{eb} 为电锅炉的运行功率; P_{eb}^{\min} 和 P_{eb}^{\max} 分别为电锅炉运行功率的最小值和最大值; H_t^{eb} 为电锅炉的制热功率; η_{eb} 为电锅炉将电能转化为热能的效率。电锅炉属于园区内的单相负荷。

4) 微燃机约束

$$H_t^{\text{MT}} = P_{\text{MT},t} R_{\text{MT}} \quad (35)$$

式中: H_t^{MT} 为 t 时刻微燃机的热出力; R_{MT} 为微燃机的热电比。微燃机属于园区内的三相发电机。

5) 能量平衡约束

能量平衡约束包含冷能、热能以及电能平衡方程,如式(36)所示。

$$\begin{cases} \eta_{\text{ac}} \cdot M_t^{\text{ac}} + C_t^{\text{ac}} = C_t^{\text{load}} \\ H_t^{\text{MT}} + H_t^{\text{eb}} = H_t^{\text{load}} \\ P_{\text{MT},t} + P_{m,t} = P_t^{\text{ac}} + P_t^{\text{ac}} + P_t^{\text{eb}} + P_t^{\text{load}} \end{cases} \quad (36)$$

式中: C_t^{load} 为工业园区冷负荷; H_t^{load} 为工业园区热负荷; P_t^{load} 为工业园区其他固定电负荷。它们均为三相负荷。

综上,本文得到了包含工业园区的低电压条件下计及敏感设备损失的配电系统预防性经济优化运行调度模型,由目标函数和等式约束、不等式约束组成。

目标函数: 式(15)

约束条件: 式(11), 式(16), 式(18)一式(36)

含工业园区的低电压条件下计及敏感设备损失的配电系统预防性经济优化运行流程如下:

1) 设置调度区间 T 、起始优化调度时刻 t_0 、控制域步长 Δt 。

2) 基于区域线路的历史统计数据生成线路发生单相接地故障的故障集。结合式(12)一式(14)计算出不同月份不同电压等级线路的低电压次数,并将其随机分配到各条线路上,得到每次低电压时间段的集合 F 、第 f 次低电压的持续时间 t_{Ff} 、低电压次数 N_f ;基于低电压数据对网络进行潮流计算得到各节点相角估计值,将此值代入式(10)估计敏感设备造成的损失。

3) 根据步骤2)中的低电压数据对包含工业园区的低电压条件下计及敏感设备损失的配电系统预防性经济优化运行调度模型进行求解,得到预防性优化结果。

4) 执行控制域内的优化调度结果,对工业园区内部的设备运行工况进行修正。

5) 判断当前调度时间是否到达调度区间 T 的最大值。若是,则输出整个调度区间的优化调度结果;若否,转步骤5)。

6) 时间窗口后移至 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 。之后将 $[t_0 - \Delta t, t_0]$ 内修正信息的数值作为已知值代入优化调度模型,转步骤3)。

3 算例分析

3.1 ASD 电容电压计算精度验证

为验证本文所提求解电网低电压期间 ASD 电容电压 V_{dc} 算法的正确性和有效性,采用 Simulink 搭建如图1所示的线电压有效值为 690 V 的带有理想不可控整流器的 ASD 并网系统(不带储能)。设参数为: $R_g = 0.04 \Omega$, $L_g = 0.004 \text{ H}$, $L_{\text{dc}} = 0.0002 \text{ H}$, $C_{\text{dc}} = 0.02 \text{ F}$, $P_w(x) = 29.5 \text{ kW}$ 。

在 2 s 时,设置网侧发生单相接地短路故障,故障位置 $\tau = 0.5$,接地电阻 $R_f = 0.51 \Omega$,ASD 保持

输出功率 $P_w(x)$ 不变, 记为 Case 1。其电容电压 V_{dc} 的时域仿真波形如图 6 所示。

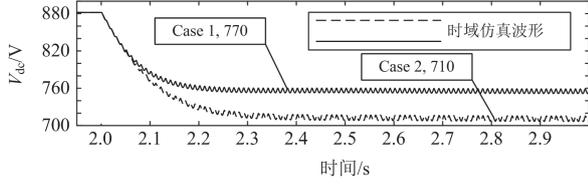


图 6 低电压期间 ASD 电容电压 V_{dc} 波形

Fig. 6 ASD capacitance voltage V_{dc} waveform during voltage dip

利用数据求解得到故障点处 a 相正负序相电压幅值 $|u_{fa(1)}|$ 与 $|u_{fa(2)}|$, 将其代入式(1)可得 ASD 作为恒功率源在正负序网中的线性化模型参数, 即 $R_{CPL(1)}$ 、 $I_{CPL(1)}$ 和 $R_{CPL(2)}$ 、 $I_{CPL(2)}$ 。在正负序网中, 求解式(8)和式(9), 然后求解式(10)可得 $v(x)$, 求解的关键参

数结果如表 1 所示。此外, 可以通过改变故障位置 $\tau=0.8$, 接地电阻 $R_f=0.011\Omega$, 记为 Case 2, 以验证本文所提方法在不同参数下的正确性, 求解的关键参数结果如表 1 所示。由表 1 可知, 故障位置 τ 越大(离 ASD 端口越近), 接地电阻 R_f 越小, 电压不平衡度系数 λ 越大, 直流电容 V_{dc} 的跌落幅度越大。

表 1 中 Case 2 的相对误差达到 9.6%, 这是由于负序网中 ASD 的线性化模型不准确导致的, 由 $R_{CPL(2)}$ 、 $I_{CPL(2)}$ 引起。由图 2 可知, P_1 与 P_2 在 $V-I$ 曲线斜率变化较小处, 所以正序网的 ASD 线性化模型误差较小, 而 P_3 与 P_4 所处区域 $V-I$ 曲线的斜率变化很大, 且式(1)对于负序网电压设置范围较大, 这两个因素导致了负序网中 ASD 的线性化模型误差增大。为降低此误差, 可适当提高 P_4 点的电压以计算更精准的 $R_{CPL(2)}$ 、 $I_{CPL(2)}$ 来降低线性化模型的误差。

表 1 电网低电压期间关键参数计算结果

Table 1 Calculation results of key parameters during power grid voltage dip

参数	Case 1	Case 2
i_a/A	644.64 - j232.75	300.42 - j472.48
$u_{fa(1)}, u_{fa(2)}/V$	432.715 + j149, -55.19 - j132.69	325.28 + j187.8, -62.62 - j93.9
$R_{CPL(1)}, R_{CPL(2)}/\Omega$	-19.14, -0.548	-12.88, -0.7165
$I_{CPL(1)}, I_{CPL(2)}/A$	78.62, 572.458	95.85, 544.63
$v_{(1)}(x)/V$	$ 1504.79 - (-0.152\sin(6x) - 43.46\cos(6x) + 755.31) $	$ 1234.548 - (-0.0385\sin(6x) - 35.59\cos(6x) + 620.44) $
$v_{(2)}(x)/V$	$ 313.7 - (1.232\sin(6x) - 0.104\cos(6x) + 231.72) $	$ 390.23 - (0.246\sin(6x) - 18.18\cos(6x) + 308.76) $
$v(\pi/6)/V$	788	641.8
V_{dc}/V	770	710
$E\%$	2.32%	9.6%
λ	0.314	0.5

在 Case 2 中, 可依据式(2)估算 $V_{dc(2),pro} = 0.2V_{dc,pro}$ 。重新计算 ASD 在负序网中的线性化模型 $R_{CPL(2)} = -1.433\Omega$ 、 $I_{CPL(2)} = 317.675A$, 进一步根据式(8)和式(9)可计算 $v_{(2)}(x) = |455.23 - (0.102\sin(6x) - 17.97\cos(6x) + 308.9)|V$ 。因此可得电网低电压期间 ASD 电容电压 $v(\pi/6) = 705V$ 。此时, 误差 $E\%$ 降低至 0.7%。综上可验证本文所提计算 ASD 电容电压近似值方法的有效性。

3.2 调度结果分析

为验证本文所提预防性配电系统低电压期间经济运行优化模型的有效性, 采用改进的 IEEE13 节点配电系统进行分析验证, 电压等级为 10 kV, 如图 7 所示。配电系统包含 1 个工业园区耦合的系统、2 个 ASD 联合储能系统、光伏系统、微燃机, 其变压

器已被等效为线路 UG3, 具体负荷参数见文献[25], ASD 联合储能系统参数见表 2。对于储能的配置, 由文献[4]所提规程, 本文设置储能可为敏感设备提供 2 h 的低电压支撑, 且依据额定功率 P_w 的 30% 与保护电压 $V_{dc,pro}$ 进行计算。

设置预防性调度周期为 24 h, 间隔时间 Δt 为 15 min, 共计 96 个调度点, 求解器为 Gurobi 9.0.3。图 7 所述系统的低电压运行数据, 基于吉林省某地区 10 kV 线路的近 3 年历史数据并依据式(12)一式(14)计算得出, 单相接地故障(箭头)被随机分配到 10 kV 线路上。 F_1 在第 24 个调度点发生, 低电压持续时间为 45 min, a 相接地电阻为 0.015 Ω ; F_2 在第 33 个调度点发生, 低电压持续时间为 15 min, a 相接地电阻为 0.02 Ω ; F_3 在第 80 个调度点发生, 低电压持续时间为 105 min, a 相接地电阻为 0.025 Ω 。

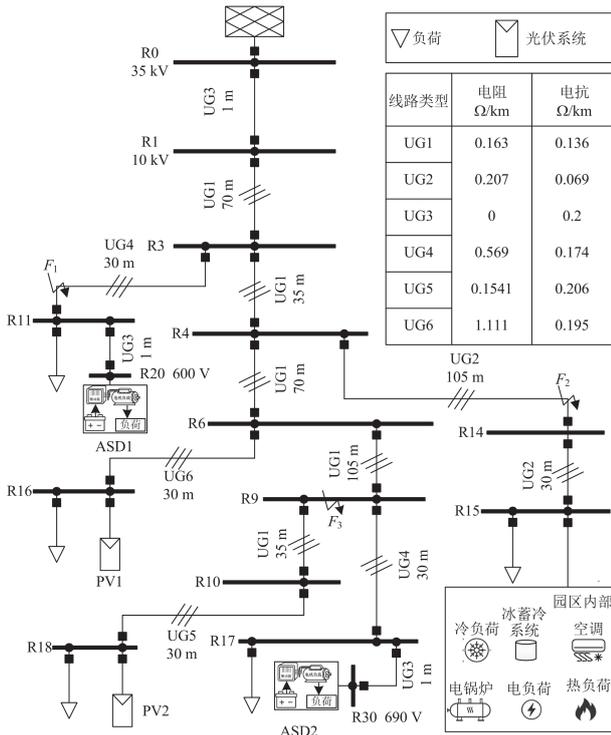


图 7 IEEE13 节点网络与线路长度

Fig. 7 IEEE13-node network and line length

表 2 ASD 带储能系统配置

Table 2 Configuration of ASD with energy storage system

参数	ASD1	ASD2
P_w/kW	21.6	32.4
$V_{dc,pro}/V$	532	600
R_{asd}/Ω	0.015	0.015
L_{asd}/H	0.001 12	0.001 12
L_{dc}/H	0.001	0.001
C_{dc}/F	0.0012	0.0015
储能容量/Ah	24.36	32.4
停机成本/美元	1000	1200

配电系统内部如空调、冰蓄冷系统、电锅炉、微燃机、储能、光伏系统等设备的具体参数详见文献[26-27]。本文为综合考虑含敏感设备损失、工业园区需求响应、敏感设备的运行情况以及购电成本，设置以下 5 个场景。

场景 1：不考虑工业园区内部设备需求响应，ASD 敏感设备不带储能。

场景 2：不考虑工业园区内部设备需求响应，ASD 敏感设备带储能。

场景 3：考虑工业园区内部设备需求响应，ASD 敏感设备不带储能。

场景 4：考虑工业园区内部设备需求响应，ASD

敏感设备带储能。

场景 5：考虑工业园区内部设备需求响应，ASD 敏感设备带储能，且考虑 UPS 与 PLC 设备接入影响。

3.2.1 场景 1 运行结果分析

图 8(a)为配电网中各 ASD 的运行情况，此时敏感设备不带储能且不考虑工业园区内部设备需求响应。可以看出，在场景 1 下，各 ASD 在低电压期间，直流电压低于 $V_{dc,pro}$ 时会停止运行进而造成成本损失。由于 ASD1 离 F_1 最近，因此在第 24 个调度点持续 45 min 的低电压期间发生的电压跌落幅度最大；由于 ASD2 离 F_3 最近，因此在第 24 个调度点持续 105 min 的低电压期间发生的电压跌落幅度最大。由于 ASD1 与 ASD2 离 F_2 较远，且所属馈线不同，因此在第 33 个调度点持续 15 min 的低电压期间按本文所提方法调度则不会造成停机影响。表 3 展示了该场景因 ASD 停机造成的经济损失。

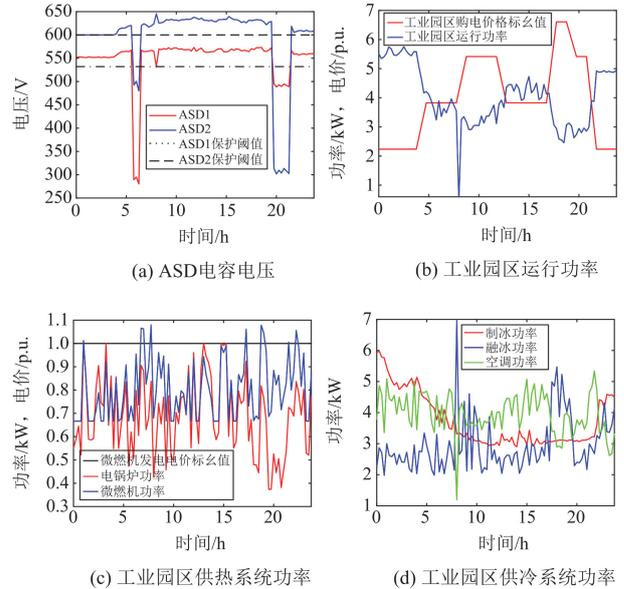


图 8 场景 1 优化结果

Fig. 8 Optimization results in Scenario 1

表 3 ASD 停机损失与园区购电成本

Table 3 ASD shutdown loss and park electricity purchase cost

场景	ASD 停机 总损失/美元	园区购电 成本/美元	平均电价/ (美元/MWh)
1	22 000	286 430	798.3008
2	15 000	267 800	798.3008
3	15 000	276 600	698.3008
4	15 000	240 730	598.3008

3.2.2 场景 2 优化结果分析

图 9(a)为配电网中各 ASD 的运行情况，此时敏感设备带储能但不考虑工业园区内部设备需求响

应。可以看出, 在场景 2 下, ASD2 在低电压期间直流电压低于 $V_{dc,pro}$ 时会停止运行进而造成成本损失; 而 F_3 发生后 ASD1 不会造成经济损失, 这是由于 ASD1 离 F_3 较远, 在储能作用下可避免 ASD1 停机。表 3 展示了该场景因 ASD 停机造成的经济损失。

由图 9(b)可知, 工业园区在价格低时购电较多, 而在价格高时购电较少。由于场景 2 未设置工业园区内部设备需求响应, 由图 9(b)与图 9(c)可知, 无论在电价高峰还是低谷, 工业园区均会采用微燃机进行发电和供热, 同时也会通过电锅炉和外部电网来补充供给园区所需的热能与电能。由于场景 2 采取储能供电, 因此场景 2 降低了 ASD 停机损失, 但不会降低工业园区的用能成本。表 3 展示了该场景购电成本。

图 9(d)为工业园区内部供冷系统的运行功率曲线。可以看出其结论与场景 1 保持一致。

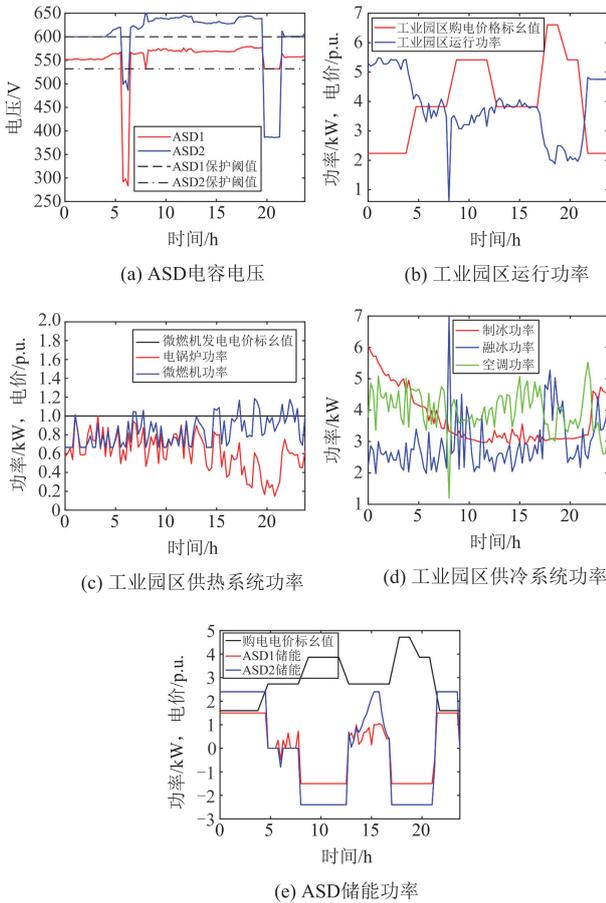


图 9 场景 2 优化结果

Fig. 9 Optimization results in Scenario 2

由图 9(e)可知, 由于 ASD 配置了储能, 在电价高峰时会放电补充功率缺额, 在电价低谷时会充电补充电荷。此外, 储能还将弥补在低电压期间 ASD

的功率缺额, 进一步降低配电网的运行经济成本。

3.2.3 场景 3 优化结果分析

图 10(a)为配电网中各 ASD 的运行情况, 此时敏感设备不带储能但考虑工业园区内部设备需求响应。可以看出, 在场景 3 下, ASD2 在低电压期间直流电压低于 $V_{dc,pro}$ 时会停止运行进而造成成本损失, 但需要注意的是: F_1 在第 24 个调度点发生时, 其电容电压与 $V_{dc,pro}$ 相近, 此时可依据敏感负荷的电压耐受曲线对照查看是否会引起切机, 但这超出了本文的讨论范畴。而 F_3 发生后, 由于工业园区内部发电设备作用, ASD1 不会造成经济损失。表 3 展示了该场景因 ASD 停机造成的经济损失。

由图 10(b)可知, 工业园区在价格低时购电较多, 而在价格高时购电较少。由于场景 3 设置了工业园区内部设备需求响应, 由图 10(b)与图 10(c)可知, 在电价高峰时, 工业园区会采用微燃机进行发电和供热, 且会降低电锅炉和外部电网对工业园区内部的热能和电能的供给; 由于场景 3 考虑了工业园区内部设备需求响应, 因此场景 3 降低了 ASD 停机损失, 且会降低工业园区的用能成本。表 3 展示了该场景购电成本。

图 10(d)为工业园区内部供冷系统的运行功率曲线。可以看出其结论与场景 1 保持一致。

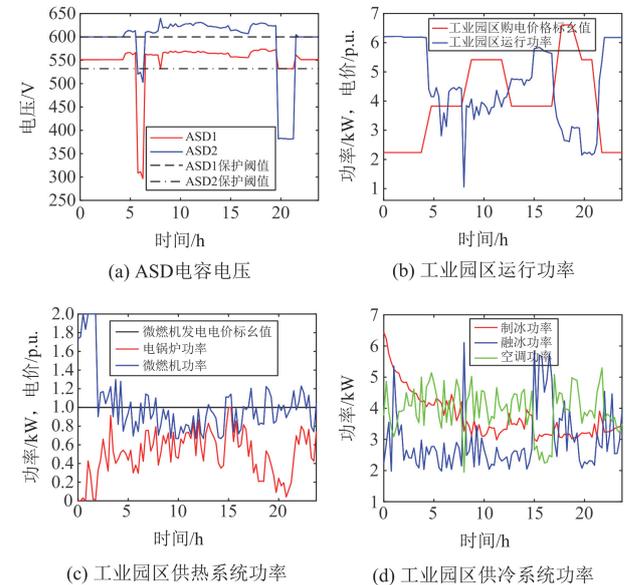


图 10 场景 3 优化结果

Fig. 10 Optimization results in Scenario 3

3.2.4 场景 4 优化结果分析

图 11(a)为配电网中各 ASD 的运行情况, 此时敏感设备带储能且考虑工业园区内部设备需求响应。可以看出, 在场景 4 下, ASD 切机损失与场景

3 保持一致。表 3 展示了该场景因 ASD 停机造成的经济损失。

由图 11(b)可知, 工业园区在价格低时购电较多, 而在价格高时购电较少。由于场景 4 设置了工业园区内部设备需求响应且配置了储能, 由图 11(b)与图 11(c)可知, 在电价高峰时, 工业园区会采用微燃机与储能进行发电和供热, 且会降低电锅炉和外部电网对工业园区内部热能和电能的供给; 由于场景 4 考虑了工业园区内部设备需求响应且配置了储能, 因此场景 4 降低了 ASD 停机损失, 且会进一步降低工业园区的用能成本。表 3 展示了该场景购电成本。

图 11(d)为工业园区内部供冷系统的运行功率曲线。可以看出其结论与场景 1 保持一致。

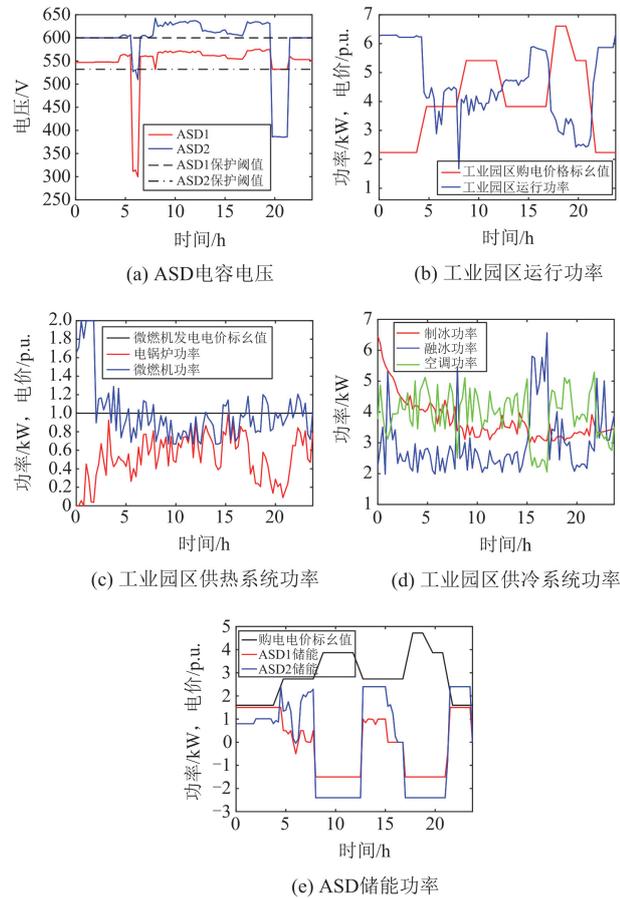


图 11 场景 4 优化结果

Fig. 11 Optimization results in Scenario 4

由图 11(e)可知, 由于 ASD 配置了储能, 在电价高峰时会放电补充功率缺额, 在电价低谷时会充电补充电荷。此外, 储能还将弥补在低电压期间 ASD 的功率缺额, 进一步降低配电网的运行经济成本。

3.2.5 场景 5 优化结果分析

在图 7 的 R10 节点(仅 a 相接入)接入带 UPS 装置的 PLC, 其结构如图 5 所示, 参数如表 4 所示, 其余参数与场景 4 保持一致。其中, UPS 的蓄电池依据 PLC 额定功率 P^{PLC} 的 30%与保护电压 V_{min} 计算, 且可为 PLC 提供 15 min 短时供电。

表 4 PLC 带 UPS 系统参数

Table 4 Parameters of PLC with UPS system			
参数	数值	参数	数值
P^{PLC}/kW	5.3	PLC 停机成本/美元	2000
V_{min}/V	208	PLC 停机总损失/美元	30 000
$\xi_{p,in}$	1	ASD 停机总损失/美元	11 400
储能容量/Ah	1.9875	园区购电成本/美元	286 410

图 12(a)展示了配电网中各 ASD 的运行情况, 在场景 5 下, 敏感设备配备了储能, 并考虑了工业园区内部设备的需求响应, 同时还接入了小容量 UPS。结果表明, 在该场景下, ASD 因故障停机造成的损失较场景 4 降低了 24%。表 4 进一步列出了场景 5 中 ASD 停机所带来的经济损失。

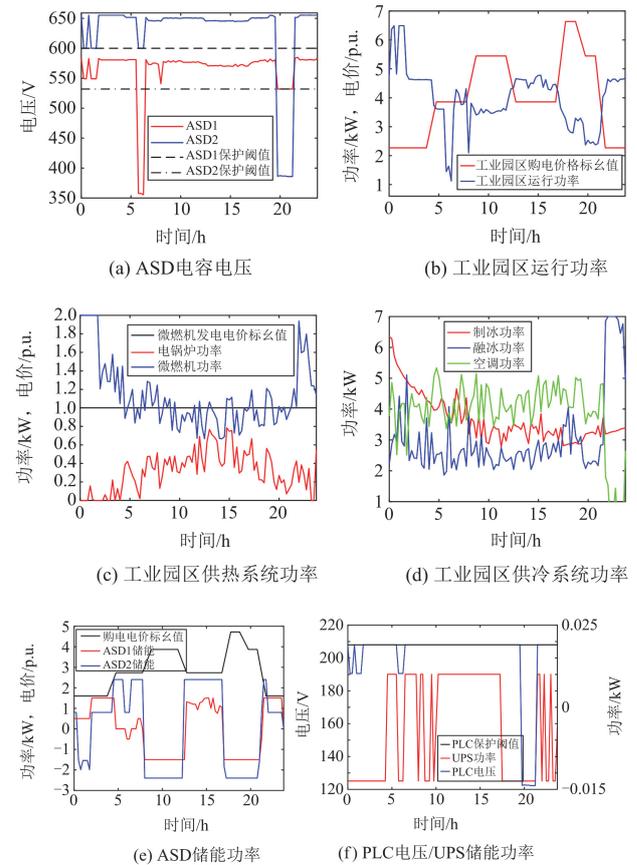


图 12 场景 5 优化结果

Fig. 12 Optimization results in Scenario 5

由图 12(b)和图 12(c)可知, 其结论与场景 4 保持一致。图 12(d)显示了工业园区内部供冷系统的运行功率曲线, 其运行特性与场景 1 一致。图 12(e)展示了 ASD 所配备的储能系统运行功率曲线, 其结论也与场景 4 相符合。

由于场景 5 考虑了 PLC 等敏感设备, 并接入了小容量 UPS, 因此在低电压运行工况下, 由于 UPS 蓄电池容量有限, 无法完全支撑 PLC 的正常运行, 导致 PLC 停机并造成一定的经济损失(见表 4)。从图 12(f)可以看出, 在前 5 个调度点, PLC 已经处于低电压运行状态。这主要是由于 PLC 位于线路末端, 导致电压不足。虽然 UPS 在低电压时刻仍在放电为 PLC 供电, 但其输出功率仍不足以支撑 PLC 正常运行。因此, 在故障引起的低电压工况下, 尽管 UPS 持续供电, PLC 仍然发生停机, 进而导致工业园区的购电成本较场景 4 增加了 18.98%。

综上所述, UPS 的接入在一定程度上缓解了 PLC 等敏感设备因电压暂降导致的停运问题, 但对于持续时间较长的低电压运行工况, 仅靠小容量 UPS 难以完全避免设备停机。因此, 建议敏感设备配置更大容量的 UPS 或合适的储能系统, 以有效降低停运风险。

4 结论

本文基于对称分量法推导出 ASD 直流电容电压的近似解析解, 并提出 ASD 敏感设备的停机损失约束。在此基础上, 构建了包含工业园区的低电压工况下, 计及敏感设备损失的配电网预防性经济优化运行调度模型。所提方法能够有效减少短时低电压对敏感设备运行的影响, 降低因停机造成的损失, 从而优化配电网运行成本。本文得到以下结论:

1) 在较低电压条件下, $V-I$ 曲线斜率变化较大, 采用恒功率源求解 ASD 电容电压的方法存在一定误差, 需要改变截止系数以提高计算精度, 本文所设算例最低相对误差 $E\%$ 可降低至 0.7%。

2) 场景 4 在考虑工业园区需求响应的基础上, 引入了储能装置, 有效降低了持续性低电压对 ASD 敏感设备的停机影响。相比未采取任何措施的场景 1, 该方案使敏感设备停机损失减少 31.82%, 园区购电成本降低 15.96%。在场景 5 中, 进一步接入了附带 UPS 的 PLC 设备, 使 ASD 敏感设备的停机损失较场景 4 降低了 24%, 但园区购电成本却上升了 18.98%。此外, 在低电压期间, 小容量 UPS 无法完全满足 PLC 的电能需求, 进一步增加了配电网的运行成本。

3) 本文构建的预防性经济优化运行模型, 在低电压条件下综合考虑了工业园区的需求响应、敏感设

备停机损失, 以及 UPS 和储能的配置情况。结果表明, 储能装置和带蓄电池的 UPS 可有效缓解短时低电压对敏感设备的影响, 从而降低配电网运行成本。因此, 建议配电网根据敏感设备的特性, 合理选择 UPS 容量, 以最大程度上降低因电压暂降导致的停机损失。

参考文献

- [1] 位俊明, 吕世轩, 王伟, 等. 基于改进自适应 S 变换的电能质量扰动实时检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 40-48.
WEI Junming, LÜ Shixuan, WANG Wei, et al. Real time detection method for power quality disturbances based on improved adaptive S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 40-48.
- [2] 郑博妍, 袁至, 李骥. 基于神经盲反卷积时频域去噪的电能质量扰动联合识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(21): 50-61.
ZHENG Boyan, YUAN Zhi, LI Ji. Joint identification method for power quality disturbances based on neural blind deconvolution time-frequency domain denoising[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 50-61.
- [3] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 172-187.
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 172-187.
- [4] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2001, 29(4): 16-20.
XIAO Bai, SHU Hongchun, GAO Feng. Survey of the methods of fault line selection for single-phase-to-earth fault in networks with ungrounded neutral[J]. Power System Protection and Control, 2001, 29(4): 16-20.
- [5] WANG Y, LUO H, XIAO X. Joint optimal planning of distributed generations and sensitive users considering voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 93-104.
- [6] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 93-103.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.
- [7] 周步祥, 邹家惠, 董申, 等. 基于共享储能的微网园区系统能量协同优化[J]. 电气传动, 2021, 51(18): 70-75.
ZHOU Buxiang, ZOU Jiahui, DONG Shen, et al. Energy cooperative optimization of micro-grid campus system based on shared energy storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(18): 70-75.
- [8] 邱草非, 何超, 骆钊, 等. 考虑源、荷不确定性的工业园区电-气互联综合能源系统模糊优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 8-14.
QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Fuzzy optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system in industrial park considering source-load uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 8-14.

- [9] ISMAIL N A, KASIM L M, MOKHTAR N F, et al. Digital analysis and development of ride-through capability of AC contactor with respect to voltage sag characteristics[C] // 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), February 26-28, 2010, Singapore, Singapore: 177-181.
- [10] 汪颖, 陈春林, 肖先勇, 等. 电压暂降敏感设备耐受能力自动测试方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 127-135.
WANG Ying, CHEN Chunlin, XIAO Xianyong, et al. Automatic test method for tolerance capability of voltage sag sensitive equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 127-135.
- [11] AKOLKAR S M, KUSHARE B E. Effect of point on wave angle on sensitivity of AC coil contactor and SMPS to voltage sags[C] // 2010 Conference Proceedings IPEC, October 27-29, 2010, Singapore, Singapore: 957-961.
- [12] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIĆ J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [13] BOLLEN M H J, GRAAFF R A A. Behavior of AC and DC drives during voltage sags with phase-angle jump and three-phase un-balance[C] // IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233), January 31-February 4, 1999, New York, NY, USA: 1225-1230.
- [14] 张聪. UPS 不间断电源概述[J]. 电工技术, 2017(7): 110-111.
ZHANG Cong. Overview of UPS uninterruptible power supply[J]. Electrical Engineering Technology, 2017(7): 110-111.
- [15] GU Y, LI W, HE X. Analysis and control of bipolar LVDC grid with DC symmetrical component method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 685-694.
- [16] 莫文雄, 许中, 马智远, 等. 变频调速系统的低电压免疫度计算及关键参数设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 157-161.
MO Wenxiong, XU Zhong, MA Zhiyuan, et al. Voltage sag immunity calculation and key parameter design of adjustable speed drive[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 157-161.
- [17] 苏向敬, 彭赫, 米阳, 等. 基于线性规划的中低压不平衡配电网电压无功实时优化[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4719-4731.
SU Xiangjing, PENG He, MI Yang, et al. Linear programming-based real-time volt-var optimization of unbalanced MV-LV distribution networks[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4719-4731.
- [18] 于巧娜, 高联学. 实例在“自动控制原理”教学中的应用[J]. 南方农机, 2022, 53(2): 193-195.
YU Qiaona, GAO Lianxue. Application of example in the teaching of “automatic control principle”[J]. Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 193-195.
- [19] SIIRTO O K, SAFDARIAN A, LEHTONEN M, et al. Optimal distribution network automation considering earth fault events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1010-1018.
- [20] SHEWALE A M, DATE T N, KUSHARE B E. Effect of voltage sag on ageing of front end rectifier diodes of ASD[C] // 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), February 6-8, 2013, Dindigul, India.
- [21] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 143-153.
WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 143-153.
- [22] DJURIC M B, RADOJEVIC Z M, TERZIJA V V. Time domain solution of fault distance estimation and arcing faults detection on overhead lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 60-67.
- [23] WAIKAR D L, ELANGOVA S, LIEW A C. Fault impedance estimation algorithm for digital distance relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1375-1383.
- [24] 张平, 吴春秋. 一种能源系统的能量管理策略[J]. 机电设备, 2019, 36(1): 1-4, 8.
ZHANG Ping, WU Chunqiu. Energy management strategies for a type of energy system[J]. Electromechanical Equipment, 2019, 36(1): 1-4, 8.
- [25] COPPO M, RACITI A, CALDON R, et al. Exploiting inverter-interfaced DG for voltage unbalance mitigation and ancillary services in distribution systems[C] // 2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow (RTSI), September 16-18, 2015, Turin, Italy.
- [26] 葛延峰, 邱雨, 张云旭, 等. 计及多种灵活性资源的园区智能配电网灾时弹性提升策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 139-149.
GE Yanfeng, QIU Yu, ZHANG Yunxu, et al. Disaster resilience enhancement strategy of an intelligent distribution network in parks considering a variety of flexibility resources[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 139-149.
- [27] 马昕, 裴玮, 肖浩, 等. 考虑复杂生产约束的电池生产工业园区能源网络与生产管理综合优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3566-3575.
MA Xin, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Integrated energy network and production management optimization operation of battery production industrial estate considering complex production constraints[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3566-3575.

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-06-09

作者简介:

刘赞静(1986—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为配电网电能质量优化与提升; E-mail: 18094845@qq.com

杨政(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统数字孪生、配电网电能质量优化与提升。E-mail: 1202300056@neepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)