

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.027

多类型源储协调互动的配电网分布鲁棒优化调度

尉耀稳¹, 李跃龙², 陈思超³, 杨波², 周国华³

(1. 浙江中新电力工程建设有限公司, 浙江 杭州 311201; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210009; 3. 国网浙江杭州市萧山区供电有限公司, 浙江 杭州 311202)

摘要: 分布式光伏、风电等可再生能源出力具有较强的随机性和不确定性, 其大量并网给配电网的运行带来了极大的挑战。文中提出了一种多类型源储协调互动的配电网分布鲁棒优化调度方法, 基于分布鲁棒优化理论, 对配电网中传统离散设备、可再生能源以及储能决策进行协调优化, 提高配电网运行的经济性和安全性, 实现配电网运行决策保守性与鲁棒性的有效平衡。首先, 考虑多类型源储资源的协调互动, 建立配电网优化调度模型, 并将其转化为混合整数二阶锥规划的形式; 其次, 利用可再生能源出力场景集进行不确定性刻画, 建立分布鲁棒优化模型, 并通过列和约束生成算法进行求解; 最后, 在 PG&E 69 节点系统上进行算例分析, 验证了所提方法的可行性与准确性。

关键词: 配电网; 储能系统; 源储协调互动; 不确定性; 优化调度; 分布鲁棒优化

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)05-0192-08

0 引言

能源枯竭和环境污染是全人类共同面临的难题, 光伏发电 (photovoltaic, PV)、风力发电 (wind turbine, WT) 等可再生能源发电可以提供清洁的电能供应, 在配电网中的渗透率不断提高^[1-2]。同时, 分布式储能系统 (energy storage system, ESS) 作为可再生能源消纳和利用的有效途径, 近年来发展迅速^[3]。可再生能源出力具有典型的随机性与不确定性, 传统的确定性优化方法难以满足配电网安全运行需求, 因此不确定性环境下配电网的优化调度成为当前研究热点^[4-5]。

PV、WT 以及 ESS 等源储资源具有不同的运行特性, 对配电网中传统设备和多类型源储设备进行协调优化, 可以有效提高配电网运行的安全性和经济性^[6-8]。此外, 考虑不确定性的配电网优化调度方法, 主要以随机规划 (stochastic programming, SP)^[9-10] 和鲁棒优化 (robust optimization, RO)^[11-14] 为典型代表。文献[15]对 SP 理论及其应用进行了综述分析, 文献[16]基于场景削减的 SP 构建了配电网多时间尺度优化模型。鉴于不确定变量的真实概率分布是复杂难获的, SP 理论具有鲁棒性低的缺点。虽然已有研究通过调节风险度来提高 SP 的鲁棒性^[17], 但由于通过假设或多个场景的不确定变量分布描述与实际情况具有较大差别, 调节风险度的方法难以真正解决鲁棒性低的问题。

RO 可以保证不确定变量在给定不确定集内任意变化时, 始终满足系统安全约束。文献[18]利用两阶段 RO 方法进行储能系统和可控负荷的协调优化。文献[19]和[20]考虑 PV 不确定性, 分别提出配电网鲁棒无功电压控制和无功补偿装置配置策略。然而 RO 具有较为明显的保守性缺点, 文献[21]通过引入仿射运算来降低传统 RO 的保守度, 但决策的保守度降低程度有限。为解决该问题, 有学者提出了分布鲁棒优化 (distributionally robust optimization, DRO)^[22] 方法, 且已应用在大电网机组组合^[23]、配电网无功优化^[24-25] 等相关研究中, 有效降低了传统 RO 的保守度。

基于上述研究背景, 文中充分考虑配电网的不确定性特征, 挖掘 PV、WT 以及 ESS 等源储资源的协调互动潜力以及对配电网运行的有效支撑作用, 提出配电网 DRO 调度方法, 通过多类型源储资源的协调互动, 提高了配电网中可再生能源的消纳与利用效率, 实现了优化决策鲁棒性与保守度的平衡。

1 配电网确定性优化调度模型

1.1 辐射状配电网模型

配电网一般以辐射状或弱环状的方式运行, 典型的配电网结构如图 1 所示。其中有载调压变压器 (on load tap changer, OLTC) 是配电网中的传统离散设备。在图 1 结构下, 配电网支路潮流模型为:

$$V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) \quad (1)$$

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 = I_{ij,t}^2 V_{i,t}^2 \quad (2)$$

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB0905000)

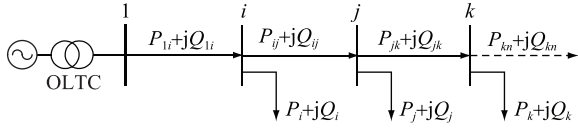


图1 辐射状配电网结构

Fig.1 Structure of radial distribution network

$$\sum_{jk \in E} P_{jk,t} - \sum_{ij \in E} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^2) = P_{j,t} \quad (3)$$

$$\sum_{jk \in E} Q_{jk,t} - \sum_{ij \in E} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^2) = Q_{j,t} \quad (4)$$

式中: $V_{i,t}$ 为节点 i ($i \in N$) 在 t 时刻的电压幅值, N 为配电网中所有节点的集合; $P_{j,t}, Q_{j,t}$ 分别为节点 j ($j \in N_1$) 在 t 时刻的注入有功和无功功率, N_1 为平衡节点外所有节点的集合; ij 为节点 i 与节点 j 之间的支路, 且存在 $ij \in E, E$ 为所有支路的集合; r_{ij}, x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗值; $I_{ij,t}$ 为在 t 时刻从节点 i 流向节点 j 的电流幅值; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 分别为在 t 时刻从节点 i 流向节点 j 的有功功率和无功功率。

1.2 调控设备模型

1.2.1 OLTC 模型

OLTC 通过调节档位进行变电站变压的控制, 其运行模型为:

$$V_{1,t} = V_0(k_0 + \alpha_t \Delta k) \quad (5)$$

$$|\alpha_t| \leq T_{\text{OLTC}}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中: $V_0, V_{1,t}$ 分别为变压器一次侧和二次侧电压幅值; $k_0, \Delta k$ 分别为 OLTC 的标准变比和调节步长; α_t 为 t 时刻变压器档位; $T_{\text{OLTC}}^{\text{max}}$ 为变压器可调节最大档位。

1.2.2 并联电容器模型

并联电容器 (capacitor bank, CB) 是配电网的离散无功补偿设备, 通过电容器的投切对配电网进行无功支撑, CB 的运行模型为:

$$Q_{i,t}^{\text{CB}} = q_i^{\text{tap}} \sum_m \omega_{i,m,t}^{\text{CB}} \quad (7)$$

$$\omega_{i,m-1,t}^{\text{CB}} \geq \omega_{i,m,t}^{\text{CB}} \quad \forall m = 2, \dots, T_{i,\text{CB}}^{\text{max}} \quad (8)$$

$$\sum_m \omega_{i,m,t}^{\text{CB}} \leq T_{i,\text{CB}}^{\text{max}} \quad (9)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为节点 i 接入的 CB 在 t 时刻发出的无功功率; q_i^{tap} 为 CB 的单档位无功功率; $\omega_{i,m,t}^{\text{CB}}$ 为引入的 0-1 变量用以表示档位的变化; $T_{i,\text{CB}}^{\text{max}}$ 为 CB 的最大档位。

此外, OLTC 和 CB 还具有调度周期内最大动作次数限制, 文中采用了文献 [13] 中相同的约束模型。

1.2.3 PV 模型

PV 是一种将太阳能转化为电能的新型发电系统, 通过逆变器向配电网提供有功和无功支撑, 其

数学模型为:

$$(P_{i,t}^{\text{PV}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{PV}})^2 \leq (S_{i,t}^{\text{PV}})^2 \quad i \in N_{\text{PV}} \quad (10)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{PV}}, Q_{i,t}^{\text{PV}}, S_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别为节点 i 接入的光伏在 t 时刻提供的有功功率、无功功率以及其自身容量; N_{PV} 为 PV 并网点集合。

1.2.4 WT 模型

WT 利用风能进行发电, 文中为分析不同类型可再生能源在不同运行模式下对配电网的支撑作用, 分别对 PV 的无功功率和 WT 的有功功率进行调控。因此, WT 的调控模型如下:

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{WT}} \leq P_{i,t}^{\text{WT,max}} \quad i \in N_{\text{WT}} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{WT}}, P_{i,t}^{\text{WT,max}}$ 分别为节点 i 接入的风机在 t 时刻提供的有功功率和有功功率的最大限值, 一般该限值为其预测值; N_{WT} 为 WT 并网点集合。

1.2.5 ESS 模型

ESS 既可以储存配电网中过剩的电能, 又可以向配电网提供有功支撑, 其数学模型如下所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{charge}} \leq P_{i,t}^{\text{charge,max}} D_{i,t}^{\text{charge}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{discharge}} \leq P_{i,t}^{\text{discharge,max}} D_{i,t}^{\text{discharge}} \\ D_{i,t}^{\text{charge}} + D_{i,t}^{\text{discharge}} \leq 1 \end{cases} \quad i \in N_{\text{ESS}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} E_{i,t+1}^{\text{ESS}} = E_{i,t}^{\text{ESS}} + P_{i,t}^{\text{charge}} h_i^{\text{charge}} \Delta t - \frac{P_{i,t}^{\text{discharge}}}{h_i^{\text{discharge}}} \Delta t \\ t = 1, 2, \dots, T-1 \\ E_{i,1}^{\text{ESS}} = E_{i,T}^{\text{ESS}} + P_{i,T}^{\text{charge}} h_i^{\text{charge}} \Delta t - \frac{P_{i,T}^{\text{discharge}}}{h_i^{\text{discharge}}} \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{charge}}, P_{i,t}^{\text{discharge}}$ 分别为节点 i 安装 ESS 在 t 时刻的充电和放电功率; $P_{i,T}^{\text{charge}}, P_{i,T}^{\text{discharge}}$ 分别为在 T 时刻 ESS 的充电和放电功率; $P_{i,t}^{\text{charge,max}}, P_{i,t}^{\text{discharge,max}}$ 分别为 ESS 的最大充电和放电功率; $D_{i,t}^{\text{charge}}, D_{i,t}^{\text{discharge}}$ 分别为 ESS 在 t 时刻的充电指示和放电指示; $E_{i,t}^{\text{ESS}}$ 为 ESS 在 t 时刻的荷电状态 (state of charge, SOC); $E_{i,1}^{\text{ESS}}, E_{i,T}^{\text{ESS}}$ 分别为 ESS 在一个调度周期初始时段 1 和最后时段 T 的初始荷电状态; $h_i^{\text{charge}}, h_i^{\text{discharge}}$ 分别为 ESS 的充电和放电效率, 且该充电和放电效率均小于 1; N_{ESS} 为 ESS 并网点集合。式 (12) 表示 ESS 的充电/放电状态约束, 且不允许 ESS 同时充电和放电。式 (13) 表示 ESS 的 SOC 约束, 实现调度周期内的充放电平衡。

1.3 多类型源储协调互动优化调度模型

文中所建多类型源储协调互动优化调度模型通过调用可控资源, 提高配电网运行的经济性和安全性, 其目标函数为系统有功网损和 WT 有功削减

最低,具体如下:

$$\min \left[\sum_{t=1}^T \sum_{ij \in E} c^{\text{Loss}} r_{ij}^2 I_{ij,t}^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in N_{\text{WT}}} c^{\text{WT}} (P_{i,t}^{\text{WT,max}} - P_{i,t}^{\text{WT}}) \right] \quad (14)$$

式中: c^{Loss} , c^{WT} 分别为系统网损和 WT 有功削减损失系数。式(14)即表示了配电网有功网损和 WT 有功削减的综合目标函数。

配电网运行应始终满足电压和电流安全约束,该约束如下所示:

$$V_{i,t}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq I_{ij,t} \leq I_{ij,t}^{\max} \quad (16)$$

式中: $V_{i,t}^{\min}$, $V_{i,t}^{\max}$ 分别为电压幅值的下限和上限; $I_{ij,t}^{\max}$ 为电流幅值的上限。

由于 CB、PV、WT 以及 ESS 等设备的接入,配电网的有功和无功注入功率均发生变化,配电网节点有功和无功注入功率为:

$$P_{i,t} = P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{charge}} - P_{i,t}^{\text{discharge}} - P_{i,t}^{\text{D}} \quad (17)$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^{\text{PV}} + Q_{i,t}^{\text{CB}} - Q_{i,t}^{\text{D}} \quad (18)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{D}}$, $Q_{i,t}^{\text{D}}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功和无功负荷。

鉴于式(2)中存在二次变量,上述模型为典型的非凸模型,为实现模型高效求解,引入二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)^[19]理论,将原始的二次约束,即式(2)转化为凸的二阶锥约束,具体如下:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - v_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij,t} + v_{i,t} \quad (19)$$

式中: $l_{ij,t}$, $v_{i,t}$ 分别为支路电流、节点电压幅值的平方。此外,由于引入了节点电压幅值平方这一变量,OLTC 约束即式(5)也转化为包含二次项的形式,其为非凸模型。文中采用文献[13]中的线性化方法,将上述模型转化为精确的线性化形式。

2 配电网 DRO 调度模型及求解

2.1 配电网 DRO 调度模型

可再生能源以及负荷均具有明显的不确定性,不确定变量的真实概率分布难以获取,基于概率密度进行不确定性刻画的 SP 鲁棒性不足。RO 具有高鲁棒性的优点,但保守性较高,基于 RO 制定的优化运行决策往往经济性较差。因此,文中采用具有 SP 和 RO 优点的 DRO 方法,可在不确定性环境下确保决策较高的鲁棒性,同时有效降低传统 RO 决策的保守度。

DRO 不需要不确定变量的真实概率分布,其基于历史数据,利用数理统计的方法对不确定变量的分布范围进行限制。假设基于历史数据获得 K 个实际运行场景,对该 K 个场景进行聚类分析可以获得 L 个离散场景,进而基于该离散场景获取不确定变量初始概率分布 f_0 。考虑到 f_0 并不是不确定变量的实际概率分布,因此引入基于 1 范数和无穷范数的置信度进行不确定变量的实际概率分布范围限制。假设不确定变量的实际概率分布为 f ,则该置信度可以表示为:

$$\Pr\{\|f - f_0\|_1 \leq \theta_1\} \geq 1 - 2Le^{-2K\theta_1/L} \quad (20)$$

$$\Pr\{\|f - f_0\|_\infty \leq \theta_\infty\} \geq 1 - 2Le^{-2K\theta_\infty} \quad (21)$$

$$\theta_1 = \frac{L}{2K} \ln \frac{2L}{1 - \alpha_1} \quad (22)$$

$$\theta_\infty = \frac{1}{2K} \ln \frac{2L}{1 - \alpha_\infty} \quad (23)$$

式中: f, f_0 分别为不确定变量真实概率分布和初始概率分布; K, L 分别为实际场景和聚类后的典型离散场景个数; α_1, α_∞ 分别为 1 范数和无穷范数的置信度系数,其限制了置信度的大小。置信度系数值越大,鲁棒性越强,相应的保守度也越高;反之,若该置信度系数越小,则优化结果的鲁棒性越差,相应的保守度也较低。基于该置信度系数,可以获取不确定变量的分布集合,具体如下:

$$\Psi = \left\{ \{f_s\} \in R_+^L \left| \begin{array}{l} \sum_{s=1}^L f_s = 1 \\ \sum_{s=1}^L |f_s - f_{s,0}| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq s \leq L} |f_s - f_{s,0}| \leq \theta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (24)$$

式中: Ψ 为不确定变量分布集合; f_s 为第 s 个离散场景的概率; R_+^L 为正实数; $f_{s,0}$ 为第 s 个离散场景的初始概率。

基于上述不确定变量概率描述,结合所建配电网确定性优化调度模型,建立多类型源储协调互动的配电网 DRO 调度模型。为方便表述,将其写成矩阵的形式,即:

$$\min_x \max_{\{f_s\} \in \Psi} \min_{y_s \in Y_s} \sum_{s=1}^L f_s a^T y_s \quad (25)$$

约束为:

$$Ax \leq b \quad (26)$$

$$By_s \leq f \quad (27)$$

$$Cx + Dy_s = g \quad (28)$$

$$\|Ey_s + H\|_2 \leq C^T y_s + d \quad (29)$$

$$Hy_s = u_s \quad (30)$$

式中: \mathbf{x} 为第一阶段变量; \mathbf{y}_s 为第二阶段决策变量; \mathbf{u}_s 为不确定变量的预测值; Y_s 为第二阶段变量可行域; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{E}, \mathbf{H}$ 均为系数矩阵; $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}, \mathbf{e}, \mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{h}$ 均为系数向量。式(25)表示所建配电网 DRO 调度模型的目标函数, 其对应于式(14); 式(26)表示第一阶段决策变量不等式约束, 对应于 OLTC、CB 以及 ESS 的动作及动作次数限制; 式(27)表示第二阶段变量不等式约束, 对应于 PV、WT 动作以及配电网安全约束; 式(28)为等式约束, 对应于潮流以及设备动作特性约束; 式(29)为二阶锥约束; 式(30)为不确定变量的离散化约束。

2.2 DRO 模型求解

文中所建配电网 DRO 调度模型本质为包含不确定变量的 min-max-min 双层优化模型, 文中引入了列和约束生成 (column and constraint generation, C&CG)^[24] 算法, 进行该模型快速求解。首先, 原始的 min-max-min 问题被分解为一个 min 主问题和一个 max-min 子问题。其次, 在 max-min 子问题中, max 寻求不确定变量的最恶劣概率分布, 而 min 寻求该最恶劣场景下第二阶段变量的最优解。再次, 基于该最恶劣场景和第二阶段的最优解, 通过求解 min 主问题获取全局最优解。在 C&CG 求解过程中, min 主问题提供了一个原问题的下界解, 而 max-min 子问题则提供一个上界解。随着迭代的进行, 上界解和下界解之间的间隙不断减小, 当该间隙小于收敛标准时, 则算法收敛。

min 主问题的本质为求取不确定变量最恶劣概率分布下的最优解, 该主问题的模型为:

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}_s \in Y_s} \gamma \quad (31)$$

$$\gamma \geq \sum_{s=1}^L f_{s,k}^* \mathbf{a}^T \mathbf{y}_{s,k} \quad (32)$$

式中: γ 为引入辅助变量; $f_{s,k}^*$ 为第 k 次迭代时场景 s 出现的概率; $\mathbf{y}_{s,k}$ 为第 k 次迭代时第二阶段决策变量。

如前文所述, max-min 子问题给出的是一个上界解, 该子问题目标函数为:

$$\max_{\{f_s\} \in \Psi} \min_{\mathbf{y}_s \in Y_s, s=1}^L \sum_{s=1}^L f_s \mathbf{a}^T \mathbf{y}_s \quad (33)$$

式(33)所示的目标函数为一个 max-min 双层优化问题, 难以直接求解。鉴于不确定变量集合 Ψ 与第二阶段决策值集合 Y 之间不存在直接的耦合关系, 因此可以通过分解算法进行求解。同时, 文中引入了 0-1 辅助变量 z_s^+, z_s^- 进行 1 范数约束的凸化, 将其转化为凸约束的形式:

$$\begin{cases} 0 \leq f_s^+ \leq z_s^+ \theta_1 \\ 0 \leq f_s^- \leq z_s^- \theta_1 \\ f_s = f_{s,0} + f_s^+ - f_s^- \\ z_s^+ + z_s^- \leq 1 \end{cases} \quad (34)$$

式中: $f_s^+, f_s^-, f_{s,0}, z_s^+, z_s^-$ 均为引入的辅助变量。基于上述辅助变量引入, 式(24)中 1 范数和无穷范数分别转化为如下的形式:

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^L f_s^+ + f_s^- \leq \theta_1 \\ f_s^+ + f_s^- \leq \theta_\infty \end{cases} \quad (35)$$

通过上述变换, 该 max-min 问题可以被直接分解为一个 max 问题和一个 min 问题。首先对内存的 min 问题进行求解, 然后将获取的解传递给外层的 max 问题, 进而直接求解 max 问题。

综上, 利用 C&CG 算法进行配电网 DRO 模型求解的流程如下所示:

(1) 初始化。设置初始迭代次数 $k=1$, 初始下界值 $B^l = 0$, 初始上界值 $B^u = +\infty$, 设定收敛标准 ε , 给定不确定变量初始概率分布 \mathbf{f}_0 。

(2) 主问题求解。求解主问题, 获取最优解 \mathbf{x}_k 以及主问题目标函数值 B_k^l , 并更新下界值 $B^l = \max\{B^l, B_k^l\}$ 。

(3) 子问题求解。给定第一阶段变量的解 \mathbf{x}_k 进而求解子问题获取最恶劣概率分布场景 \mathbf{f}_k^* 以及该场景下的子问题目标函数值 $B_{u,k}$, 并更新该上界值 $B^u = \min\{B^u, B_{u,k}\}$ 。

(4) 收敛性测试。若 $(B^u - B^l) \leq \varepsilon$, 则迭代终止, 并给出最优解。否则, 更新所获取的最恶劣概率场景 $f_{s,k+1} = f_s^*$, 并产生新的变量 \mathbf{y}_s^{k+1} 和新的约束 Y_s^{k+1} 。

(5) 返回迭代。设置 $k=k+1$, 并返回(2), 求解更新后的主问题。

3 算例分析

3.1 算例介绍

为了验证所提优化模型和算法的有效性与准确性, 文中采用 PG&E 69 节点系统^[13] 进行仿真计算。该测试系统共有 69 个节点, 其中包含 68 条支路。系统电压等级为 12.66 kV, 系统的有功负荷共计 3 802.19 kW, 系统无功负荷共计 2 694.60 kvar。在该系统中, 电压安全调节范围为 [0.95, 1.05], 同时安装了 OLTC、CB、PV、WT 以及 ESS 等设备, 设备参数如表 1 和表 2 所示。

考虑到有功负荷、无功负荷、PV 以及 WT 出力

表1 OLTC、CB、PV、WT 配置参数

Table 1 The parameters of OLTC, CB, PV and WT

| 设备 | 安装节点 | 档位上限 | 调节范围 | 容量/功率 |
|------|--------------------|------|--------------|------------|
| OLTC | 1 | 20 | [0.95, 1.05] | |
| CB | 44, 57 | 6 | | 600 kvar |
| PV | 18, 39, 43, 59, 65 | | | 600 kW·A |
| WT | 11, 50 | | | 1 200 kW·A |

表2 储能配置参数

Table 2 The parameters of ESS

| 安装节点 | 充/放电功率限值/kW | 充/放电系数 | 容量/(kW·h) |
|------|-------------|-----------|-----------|
| 55 | 240 | 0.95/1.05 | 1 200 |
| 62 | 160 | 0.95/1.05 | 800 |

的波动性和不确定性,其基础预测值如图 2 所示。基于该基础预测值,利用均值为 0,方差为 0.2 倍预测值的标准正态分布生成 10 000 个历史运行场景。基于该 10 000 个历史场景,通过聚类获得 10 个典型场景,由于聚类过程不属于论文的研究重点,故其详细过程不进行赘述。算法中 1 范数的置信度参数 α_1 设置为 0.9,无穷范数置信度系数 α_∞ 设置为 0.85。

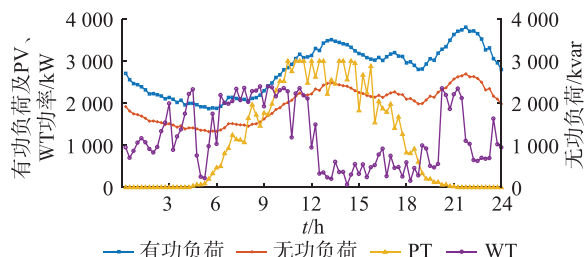


图2 24 h 负荷、PV 和 WT 基础出力预测

Fig.2 The forecasted load, PV and WT power generation in 24 hours

3.2 结果分析

在文中所提配电网优化调度中,对 OLTC、CB 以及 ESS 的调度决策进行每小时的控制以提高系统运行的经济性,减少弃风现象,同时保证系统的运行安全。通过 DRO 模型求解,获取可控设备的控制决策,其中 OLTC 和 CB 的决策值如图 3 所示,ESS 的决策值如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知,在 WT 大量发出有功功率,同时负荷需求较低的时段(如 07:00—10:00),OLTC 档位决策较低,表明变电站通过低档位来降低平衡节点电压幅值,从而实现对全网电压水平的调节以保障运行安全。相应地,在该时段 ESS55 处于充电的状态,从配电网中吸收过剩电能进行存储。在 00:00—04:00,WT 和 PV 提供的有功功率

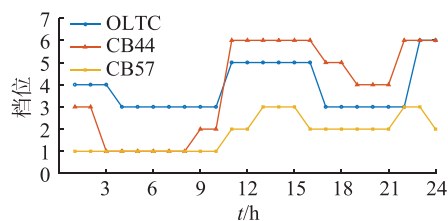


图3 OLTC 和 CB 档位决策

Fig.3 Dispatch decision of OLTC and CBs

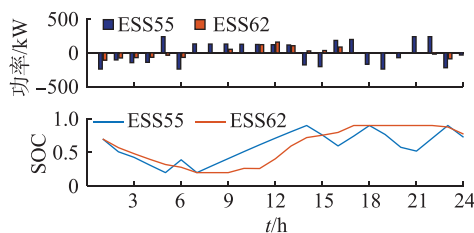


图4 储能控制决策和电量变化

Fig.4 Control decisions and electric quantity of ESS

较低,各 ESS 均处于放电状态,为配电网提供有功功率支撑,通过减少总的潮流流动来降低系统网损。

分析图 4 可知,2 个 ESS 系统的充放电状态并不完全同步,这是由其地理位置决定的,说明 ESS 可以实现本地可再生能源发电的有效消纳。在分布鲁棒的第二阶段,对 WT 有功出力和 PV 无功出力进行每 15 min 的调控,决策如图 5 和图 6 所示。

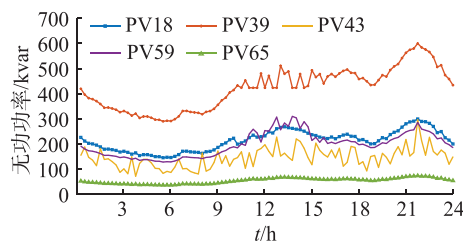


图5 PV 无功功率决策

Fig.5 Reactive power output of PVs

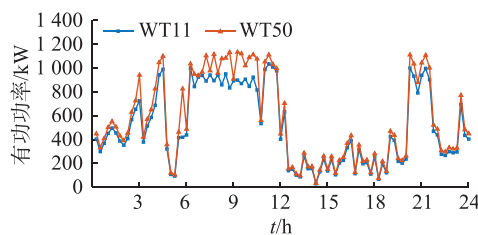


图6 WT 有功功率调度决策

Fig.6 Dispatch decisions of WT active power

分析图 5 和图 6 可知,在 09:00—11:00,由于 PV 和 WT 均能够向配电网提供功率支撑,WT 在调度周期内的削减幅度最高,同时 ESS 处于充电状态,从配电网中吸收电能进行存储。在负荷高需求的时段(20:00—23:00),PV 向配电网注入大量的

无功功率进行电压调节,同时 WT 的有功功率削减也处于调度周期中的最低状态。分析图 6 可知,由于 ESS 的有效充放电,WT 的削减幅度较低,表明了 ESS 在促进可再生能源消纳方面的积极作用。为验证所提方法在降低系统网损方面的有效性,将优化前后系统的网损进行了对比,如图 7 所示。

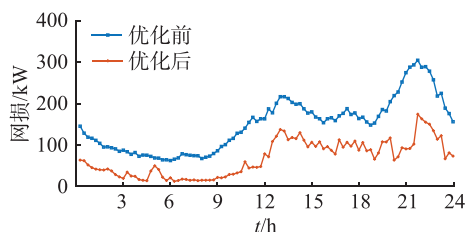


图 7 优化前后系统网损对比

Fig.7 The comparison of power losses between optimized and without optimized

分析图 7 可知,优化后系统的网损明显降低,优化前系统的平均网损是 151.26 kW,优化后系统网损为 69.96 kW,降损率达 53.75%。通过多类型源储协调互动可以有效降低配电网运行网损以及 WT 有功削减,从而提高配电网运行的经济性,促进可再生能源消纳。同时,由于 DRO 策略考虑了 WT、PV 以及负荷需求的不确定性,因此其可以有效提高配电网运行的安全性。

4 结语

文中针对 PV、WT 以及 ESS 广泛接入的配电网,提出多类型源储协调互动的优化调度方法,通过协调优化 OLTC、CB、PV、WT 以及 ESS,降低系统运行有功网损和 WT 有功削减,同时提高配电网运行安全性。考虑不同调节设备的动作特性,建立基于 SOCP 的两阶段优化调度模型,保证模型的凸特性以进行快速求解。在此基础上,计及 PV、WT 以及负荷需求的不确定性,引入了一种兼具高鲁棒性和低保守度的 DRO 理论,建立 DRO 调度模型,并通过 C&CG 算法进行求解。

算例分析表明所提方法可以有效提高配电网运行经济性,同时保障不确定性环境下的系统运行安全。此外,ESS 通过合理的充放电可以有效降低 WT 的功率削减,提高可再生能源消纳和利用效率。文中所提 DRO 方法对不确定性优化问题,如微电网的能量管理有较强的借鉴意义。

参考文献:

[1] 国家发改委能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 2015.
National Development and Reform Commission Energy Research Institute. China 2050 high renewable energy penetration scena-

rio and roadmap study[R]. 2015.

- [2] 张哲暘,巨星,潘信宇,等. 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用[J]. 发电技术,2020,41(3):220-230.
ZHANG Zheyang, JU Xing, PAN Xinyu, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3):220-230.
- [3] 金力,房鑫炎,蔡振华,等. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术,2020,44(10):3641-3650.
JIN Li, FANG Xinyan, CAI Zhenhua, et al. Multiple time-scales source-storage-load coordination scheduling strategy of grid connected to energy storage power station considering characteristic distribution [J]. Power System Technology, 2020, 44(10):3641-3650.
- [4] 马锐,李相俊,李文启,等. 可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略[J]. 发电技术,2021,42(1):31-39.
MA Rui, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Cooperative scheduling strategy of energy storage systems for regional grid supplied by renewable energy [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):31-39.
- [5] 戴璐平,吴薇,黄蓓雯. 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(3):48-55.
DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwenn. Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):48-55.
- [6] 刘公博,颜文涛,张文斌,等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(15):49-54.
LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15):49-54.
- [7] 寇凌峰,吴鸣,李洋,等. 主动配电网分布式有功无功优化调控方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1856-1865.
KOU Lingfeng, WU Ming, LI Yang, et al. Optimization and control method of distributed active and reactive power in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6):1856-1865.
- [8] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2575-2583.
- [9] 宁阳天,罗翠云,赵梓淇,等. 计及核电调峰的新能源电力系统两阶段随机优化调度[J]. 电力工程技术,2020,39(2):66-74,126.
NING Yangtian, LUO Cuiyun, ZHAO Ziqi, et al. A two-stage

- stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 66-74, 126.
- [10] 王玲玲,王昕,郑益慧,等. 计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3463-3469.
WANG Lingling, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3463-3469.
- [11] 黄海. 基于概率盒的考虑配电网源荷双侧不确定性多场景鲁棒优化调度方法[J]. 供用电, 2020, 37(11): 48-55.
HUANG Hai. A multi-scenario robust optimal scheduling method of distribution network considering source-side and load-side uncertainty based on the probability-box[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 48-55.
- [12] DING T, LIU S Y, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [13] GAO H J, LIU J Y, WANG L F. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4436-4447.
- [14] 施云辉,郭创新,丁筱. 基于仿射可调鲁棒优化的园区综合能源系统经济调度[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 118-125.
SHI Yunhui, GUO Chuangxin, DING Xiao. Integrated energy system economic dispatch based on affine adjustable robust optimization[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 118-125.
- [15] MOHSENI-BONAB S M, RABIEEA. Optimal reactive power dispatch: a review, and a new stochastic voltage stability constrained multi-objective model at the presence of uncertain wind power generation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(4): 815-829.
- [16] XU Y, DONG Z Y, ZHANG R, et al. Multi-timescale coordinated voltage/var control of high renewable-penetrated distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4398-4408.
- [17] WANG Y, ZHAO SQ, ZHOU Z, et al. Risk adjustable day-ahead unit commitment with wind power based on chance constrained goal programming[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 530-541.
- [18] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust operation of microgrids via two-stage coordinated energy storage and direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2858-2868.
- [19] LI P S, ZHANG C, WU Z J, et al. Distributed adaptive robust voltage/var control with network partition in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2245-2256.
- [20] 张海鹏,林舜江,刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3880-3888.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3880-3888.
- [21] LI P S, WU Z J, WANG Y, et al. Adaptive robust optimal reactive power dispatch in unbalanced distribution networks with high penetration of distributed generation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1382-1389.
- [22] 周任军,闵雄帮,童小娇,等. 电力环保经济调度矩不确定分布鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3248-3256.
ZHOU Renjun, MIN Xiongbang, TONG Xiaojiao, et al. Distributional robust optimization under moment uncertainty of environmental and economic dispatch for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3248-3256.
- [23] ZHU R J, WEI H, BAI X Q. Wasserstein metric based distributionally robust approximate framework for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2991-3001.
- [24] 阮贺彬,高红均,刘俊勇,等. 考虑 DG 无功支撑和开关重构成主动配电网分布鲁棒无功优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 685-695, 948.
RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering reactive power support of DG and switch reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 685-695, 948.
- [25] 陆彬,高山,李德胜. 基于发电机运行实际的电力系统日前动态无功优化研究[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 122-130.
LU Bin, GAO Shan, LI Desheng. Research on day ahead dynamic reactive power optimization based on generator operation [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 122-130.

作者简介:



尉耀稳

尉耀稳(1974),男,学士,工程师,从事配电网运行与控制研究工作(E-mail: 102465220@qq.com);

李跃龙(1991),男,学士,工程师,从事新能源与储能系统集成研究工作;

陈思超(1985),男,学士,工程师,从事电力主网系统设备运行安全分析工作。

Distributionally robust optimal dispatch of distribution network considering multiple source-storage coordinated interaction

YU Yaowen¹, LI Yuelong², CHEN Sichao³, YANG Bo², ZHOU Guohua³

(1. Zhejiang Zhongxin Power Engineering Construction Co., Ltd., Hangzhou 311201, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210009, China;

3. State Grid Zhejiang Hangzhou Xiaoshan Power Supply Co., Ltd., Hangzhou 311202, China)

Abstract: Renewable energy sources (RES) such as distributed photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) provide uncertain and stochastic active power supply. Then the large amount of RES brings great challenges to the operation of distribution network. A distributionally robust optimal dispatch method considering multiple source-storage coordinated interaction for distribution network is proposed in this paper. Based on the distributionally robust optimization theory, the dispatch decisions of traditional discrete devices, RES and energy storage are optimized coordinately to improve the economy and safety of distribution network operation, and thus realizing the effective balance of conservativeness and robustness for distribution network dispatch decision. Firstly, with consideration of multiple source-storage coordinated interaction, the optimal distribution network dispatch model is constructed and reformulated as the mixed integer second-order cone programming form. Secondly, the RES output scenarios are utilized to describe the uncertainty while the distributionally robust optimal dispatch model of distribution network considering multiple source-storage coordinated interaction is constructed, after which the column and constraint generation algorithm are employed for model solution. Finally, it is carried out based on the PG&E 69 node system to verify the feasibility and accuracy of the proposed method.

Keywords: distribution network; energy storage system; source-storage coordinated interaction; uncertainty; optimal dispatch; distributionally robust optimization

(编辑 陆海霞)

(上接第 170 页)

Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system

CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, FANG Taixun, LU Yu, XIE Yeyuan

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: As the key equipment of flexible DC power grid, DC circuit breaker is used for fault fast isolation and recovery, which greatly improves the security and reliability of DC power grid. Based on the hybrid high voltage DC circuit breaker, the control, protection architecture and control protection strategy are studied in detail. First of all, the 'redundancy dual' control system architecture and the 'two out of three' protection system architecture are designed, which have the characteristics of clear architecture level and clear function allocation. Then, the opening and closing control strategies of the hybrid DC circuit breaker are given, and the overcurrent protection strategy, the main equipment protection strategy and the auxiliary equipment protection strategy are designed in detail. Finally, a set of control and protection system of 500 kV/25 kA hybrid high voltage DC circuit breaker is developed and simulated by real-time digital simulation system (RTDS). The results show that the control and protection system and its strategy are correct and effective.

Keywords: DC circuit breaker; hybrid; control and protection; overcurrent protection; redundancy protection; accessory system protection

(编辑 陆海霞)