



考虑分布式电源集群无功调节能力的配电网无功优化

赵晶晶 许宏源 李梓博 朱炯达 张宇

Reactive Power Optimization of Distribution Network Considering the Reactive Power Regulation Ability of Distributed Power Generation Cluster

ZHAO Jingjing, XU Hongyuan, LI Zibo, ZHU Jiongda, ZHANG Yu

引用本文:

赵晶晶, 许宏源, 李梓博, 等. 考虑分布式电源集群无功调节能力的配电网无功优化[J]. 现代电力, 2023, 40(3): 419–426. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0374

ZHAO Jingjing, XU Hongyuan, LI Zibo, et al. Reactive Power Optimization of Distribution Network Considering the Reactive Power Regulation Ability of Distributed Power Generation Cluster[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 419–426. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0374

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0374>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含可再生分布式电源参与调控的配电网动态分区实时无功优化方法

Dynamic Partitioning Real-Time Reactive Power Optimization Method for Distribution Network with Renewable Distributed Generators Participating in Regulation

现代电力. 2020, 37(1): 42–50 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0072>

MMC柔直换流站稳态无功能力研究

Research on Steady-state Reactive Power Capacity of Flexible MMC-HVDC Converter Station

现代电力. 2021, 38(2): 164–170 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0282>

基于分布式光伏集群协同优化的配电网电压控制策略

A Voltage Control Strategy of the Distribution Network Based on Cooperative Optimization of Distributed Photovoltaic Clusters

现代电力. 2023, 40(2): 143–152 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0296>

分布式控制模式下的分散式风电无功电压控制策略

Reactive Voltage Control Strategy for Decentralized Wind Power Generation in Distributed Control Mode

现代电力. 2021, 38(1): 101–109 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0100>

计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源电站无功优化

Reactive Power Optimization of Clustered New Energy Power Stations Considering Active and Reactive Coupling Characteristics of Generating Units

现代电力. 2022, 39(4): 422–430 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0159>

考虑时序特性的配电网分布式电源优化配置

Optimal Allocation of Distributed Generators in Distribution Network Based on Time-sequence Characteristics

现代电力. 2019, 36(2): 8–16 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I2/8>

考虑分布式电源集群无功调节能力的配电网无功优化

赵晶晶, 许宏源, 李梓博, 朱炯达, 张宇

(上海电力大学电气工程学院, 上海市杨浦区 200090)

Reactive Power Optimization of Distribution Network Considering the Reactive Power Regulation Ability of Distributed Power Generation Cluster

ZHAO Jingjing, XU Hongyuan, LI Zibo, ZHU Jiongda, ZHANG Yu

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要:近年来, 光伏、风电等分布式电源大规模集群并网, 增加了无功优化的难度。而现有研究并未考虑分布式电源集群 (distributed generation cluster, DGC) 并网后出现较大无功缺额时的电压越限问题。因此, 研究了 DGC 容量特性曲线, 当系统出现无功不足时, 通过减载集群有功出力, 提高集群无功出力范围, 以满足系统无功需求。建立了含 DGC 的配电网无功优化模型, 从配电网安全运行方面考虑, 将电压偏差、网络损耗以及购电费用作为优化目标, 通过 ε 约束法刻画多目标问题, 并调用算法包进行求解。最后在 IEEE33 节点算例上验证了模型的有效性。

关键词: 分布式电源集群; 容量曲线; 无功调节能力; 多目标问题; 无功优化

Abstract: In recent years, due to large-scale grid-connection of such distributed generation as wind power and photovoltaic (abbr. PV) power the difficulty of reactive power optimization is increased, however, in existing researches the voltage out-of-limit caused by higher reactive power vacancy appeared after the grid-connection of distributed generation cluster (abbr. DGC) is seldom considered. For this reason, the capacity characteristic curve of DGC was researched, when reactive power deficiency appeared in power grid, by means of decreasing active output of DGC and increasing reactive output range of DGC the reactive power demand of power grid could be satisfied. A reactive power optimization model of distribution network containing DGC was established, and considering the secure operation of distribution network, the voltage deviation, network loss and the power purchase cost were taken as optimization objectives, the multi-objective problem was characterized by ε constraint method and solved by using algorithm package. Finally, through IEEE 39-bus system the effectiveness of the established model was verified.

Keywords: distributed generation cluster; capacity curve; reactive power regulation capability; multi-objective problem; reactive power optimization

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0374

0 引言

近年来, 以光伏、风电为代表的分布式电源 (distributed generation, DG) 得到了迅速发展, 呈现连片开发、集群并网的特点, 提高了电源的利用率以及供电的经济性。在分布式电源集群 (distributed generation cluster, DGC) 高渗透率并网情况下, 导致配电网电压与功率越限, 增加无功优化的难度^[1]。

由于逆变器具有无功支撑能力, 若逆变器的剩余无功容量可以得到利用, 可以解决配电网的电压越限问题。文献 [2] 分析了双馈风机的无功调节能力, 将双馈风机作为连续无功源参与配电网无功优化; 文献 [3] 考虑将多个风电机组接入配网进行无功优化, 但并未考虑机组间的出力相关性; 文献 [4] 基于换流器容量确立了风电机组无功输出范围, 结合无功补偿装置, 将风电机组作为连续可调无功源参与到无功优化过程; 文献 [5] 考虑了 DG、有载调压变压器 (on load tap changer, OLTC) 和电容器组 (capacitor bank, CB) 在无功优化中的调节能力, 提出三者协调优化的方法, 利用最优分割法进行联合优化。然而, 文献 [4-5] 中, DG 有功无功出力仅考虑了简单的功率上下限约束, 实际上 DG 有功无功出力间存在复杂的非线性关系。文献 [6] 采用平衡优化器进行无功优化求解, 获得了电网中 DG、OLTC、及 CB 的最优组合方案。上述研究对于含有风、光、储的 DGC 如何参与电网的无功优化, 尚未做出更深入的研究。

此外对风、光不确定性的研究,文献[7]考虑了因光伏出力预测误差而导致的电压越限;文献[8]基于风电的历史数据训练得到风电预测出力曲线,利用综合场景概率法生成光伏出力曲线,用斯皮尔曼相关系数将风光出力相关性进行量化;文献[9]采用不确定集描述不确定性变量,将含不确定性变量的鲁棒优化模型转化为确定性优化模型,并利用双层优化方法交替求解;文献[10]基于历史数据得到DG出力的概率密度函数,通过蒙特卡洛产生大量场景模拟DG的不确定性;文献[11]基于多离散场景利用分布鲁棒优化的方法处理风电及光伏的概率分布不确定性。

针对上述问题,本文采用基于K-L散度的方法处理风、光概率分布的不确定性,生成风、光出力的场景集。提出将DGC作为无功源,分析了DGC的容量曲线,建立了考虑DGC无功调节能力的配电网无功优化模型。该模型将系统电压偏差最小、网络损耗最低以及购电费用最少作为优化目标,并基于 ε 约束法将多目标归一化处理,进而利用二阶锥松弛技术将混合整数非线性非凸模型转换为混合整数二阶锥模型,并调用算法包进行求解。最后在IEEE33节点系统上验证了考虑DGC无功调节能力对减少电网电压偏差和降低网损的有效性。

1 分布式电源集群容量分析

1.1 基于K-L散度的风光不确定性分析

由于风、光出力是不确定性的随机变量,为满足不确定性变量的精度要求,构建满足统计特征的场景集,引入K-L散度指标对风光概率分布离散化。

K-L散度被定义为2个概率分布间的距离量度,如式(1)所示

$$D_{K-L}(P||P_0) = \int P(\xi) \ln \frac{P(\xi)}{P_0(\xi)} d\xi \quad (1)$$

式中: P 和 P_0 为量度空间上随机变量 ξ 的概率分布函数; $D_{K-L}(P||P_0)$ 表示 P 到 P_0 的K-L散度。

基于K-L散度的概率分布不确定集合为

$$D_0 = \{P(\xi) | D_{K-L}(P||P_0) \leq \eta_a\} \quad (2)$$

式中: η_a 为 a 在置信水平下的散度容差。

假定风速服从威布尔分布,其概率密度函数可表示为

$$f(v) = \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \quad (3)$$

式中: c 和 k 分别为威布尔分布的形状、尺度参数。

光照强度服从贝塔分布,其概率密度函数可表示为

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1-\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: α 和 β 分别为贝塔分布的参数; r_{\max} 为最大光照强度。

利用文献[12]中的方法,采用式(1)将风电和光伏的概率分布离散化处理,考虑时序性生成风电和光伏基础场景集。

1.2 DGC容量曲线

DG具备良好的无功调节能力,风电、光伏、储能的输出功率受最大视在功率的限制,其关系如式(5)

$$P^2 + Q^2 \leq S_{\max}^2 \quad (5)$$

本文提出将含有风、光、储的DGC作为无功源,分析集群的有功无功出力约束条件,如式(6):

$$\begin{aligned} & \min/\max Q \\ & \text{s. t. } P_w + P_s + P_b = P_d \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_w 、 P_s 、 P_b 、 P_d 分别为风电、光伏、储能、负载功率。

考虑各个DG容量曲线约束,集群可调节无功功率约束如式(7)所示

$$Q_C^2 \leq S^2 - (P - P_C)^2 \quad (7)$$

式中: Q_C 为集群可调节无功功率; P_C 为集群可减载有功功率。

定义阈值向量 $\mathbf{x}_h = [P_C, Q_C]^T$ 、实值向量 $\mathbf{d}_h = [-2P, 0]^T$ 。则式(7)可以用二次形式表示为

$$\mathbf{x}_h^T \mathbf{x}_h + \mathbf{d}_h^T \mathbf{x}_h - (S^2 - P^2) \leq 0 \quad (8)$$

引入对偶变量,利用拉格朗日的可分解性[13],式(8)变为

$$\mathbf{x}_h = \arg \min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_h \mathbf{x} + \mathbf{c}_h^T \mathbf{x} + \lambda \|\mathbf{x}\|_2 \quad (9)$$

因此,集群无功功率限值由阈值向量得出。

由此可以得到如图1所示DGC的容量曲线,图中A点为集群可调节的最大有功功率,而集群运行在B点可同时向系统提供有功和无功。若B点提供的无功不能满足系统无功需求,集群工作点可由B点向M点移动。若M点提供的无功仍不能满

足系统无功需求，可适当减载集群的有功输出来提高集群的无功调节能力，如图中 M 点调整到 N 点。

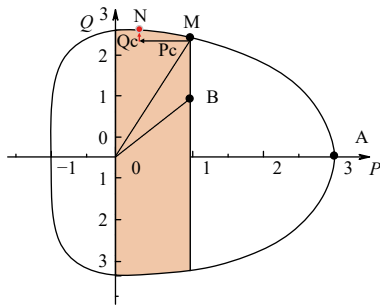


图 1 DGC 容量曲线

Fig. 1 Capacity curve of distributed power cluster

2 含有分布式电源集群的配电网无功优化模型

2.1 目标函数

DGC 接入配电网会引起电压越限，从配电网安全运行方面考虑，将电压偏差、网络损耗以及购电费用作为目标函数，建立含有 DGC 的配电网无功优化模型。

$$\min F = (f_1, f_2, f_3) \quad (10)$$

1) 电压偏差最小。

$$\min f_1 = \min \Delta U = \sum_{i=1}^n \left| \frac{U_i - U_i^*}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right| \quad (11)$$

式中： n 为节点总数； U_i 为节点 i 的电压幅值； U_i^* 为节点 i 的基准电压，一般取 1.0； $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 的最大允许电压和最小允许电压。

2) 网络损耗最小。

$$\begin{aligned} \min f_2 &= \min P_{\text{loss}} \\ &= \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in n} \mathbf{G}_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

式中： U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值； \mathbf{G}_{ij} 为节点 ij 间阻抗矩阵； θ_{ij} 为其相位差。

3) 购电费用最小。

$$\min f_3 = \min C_{\text{Grid}} = c_{\text{Grid}} \cdot \sum_{t=1}^{24} P_{\text{Grid}} \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中： P_{Grid} 为时刻 t 下大电网向配电网提供的有功功率； c_{Grid} 为时刻 t 下单位电量购电费用。

2.2 约束条件

1) 等式约束，即功率平衡约束。

对于节点 i, j ：

$$\begin{cases} P_i - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (\mathbf{G}_{ij} \cos \theta_{ij} + \mathbf{B}_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i + Q_{Ci} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (\mathbf{G}_{ij} \sin \theta_{ij} - \mathbf{B}_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

对于支路 ij ：

$$\begin{cases} U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \\ I_{ij}^2 U_i^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中： \mathbf{B}_{ij} 为支路 ij 导纳矩阵； θ_{ij} 为其相位差； P_i 和 Q_i 为节点 i 注入的有功功率和无功功率； P_{Li} 和 Q_{Li} 为节点 i 负荷的有功功率和无功功率； Q_{Ci} 为节点 i 投入的无功功率； P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路 ij 首端的有功功率和无功功率； I_{ij} 为支路 ij 的电流； r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗。

2) 不等式约束，包括状态变量和控制变量的约束。

①电压约束。

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

②风电功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WT}} \leq P_{\text{WTmax}} \\ Q_{\text{WTmin}} \leq Q_{\text{WT}} \leq Q_{\text{WTmax}} \end{cases} \quad (17)$$

式中： P_{WTmax} 是风机有功出力上限； Q_{WTmax} 、 Q_{WTmin} 是风电无功出力上、下限。

③光伏功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV}} \leq P_{\text{PVmax}} \\ Q_{\text{PVmin}} \leq Q_{\text{PV}} \leq Q_{\text{PVmax}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： P_{PVmax} 是光伏有功出力上限； Q_{PVmax} 、 Q_{PVmin} 是光伏无功出力上、下限。

④储能功率约束。

储能能在 t 时刻的充放电调度和荷电状态 (state of charge, SOC) 如下：

$$\begin{cases} P_{\text{ch,min}} \leq P_{\text{ch}} \leq P_{\text{ch,max}} \\ P_{\text{dis,min}} \leq P_{\text{dis}} \leq P_{\text{dis,max}} \\ S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

$$S(t+1) = \begin{cases} S(t) + P_{\text{ch}}(t), P_w(t) + P_s(t) - P_l(t) \geq 0 \\ S(t) - P_{\text{dis}}(t), P_w(t) + P_s(t) - P_l(t) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中： $P_{\text{ch,max}}$ 、 $P_{\text{ch,min}}$ 分别为储能充电功率上、下限； $P_{\text{dis,max}}$ 、 $P_{\text{dis,min}}$ 分别为储能放电功率上、下限； S_{\max} 、 S_{\min} 分别为储能荷电状态的最大值、最小值。当总出力大于负荷时，储能在充电模式

下运行,此时SOC增大;相反,当负荷大于总出力时,储能在放电模式下运行,此时SOC减小。

由于储能的寿命有限,必须限制其充放电次数^[14],满足下式

$$\begin{cases} \lambda(t+1) - \lambda(t) = \alpha(t) - \beta(t) \\ \alpha(t) + \beta(t) \leq 1 \\ \sum_{t=1}^{23} \alpha(t) + \beta(t) \leq N_b \\ \lambda, \alpha, \beta \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (21)$$

式中: λ 、 α 、 β 为二进制变量; N_b 为储能的充放电次数。储能状态分别由-1、0、1表示,-1表示由充电状态变为放电状态,0表示状态不变,1表示由放电状态变为充电状态。

⑤DGC功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_C \leq P \\ Q_C^2 \leq S^2 - (P - P_C)^2 \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_C 为集群可减载有功功率; Q_C 为集群可调节无功功率。

⑥有载调压变压器约束。

$$\begin{cases} \frac{U_j}{T_{ij}^2} = U_j \left(\frac{1}{T_{ij,1}^2} \sigma_{ij,1} + \frac{1}{T_{ij,2}^2} \sigma_{ij,2} + \dots + \frac{1}{T_{ij,n}^2} \sigma_{ij,n} \right) \\ \sum_k^n \sigma_{ij,k} = 1, \sigma \in \{0, 1\} \\ \sum_{t=1}^{23} (|\sigma_{ij,1}(t+1) - \sigma_{ij,1}(t)| + \dots + |\sigma_{ij,n}(t+1) - \sigma_{ij,n}(t)|) \leq 2N_T \end{cases} \quad (23)$$

式中: T_{ij} 为变压器变比; σ 为二进制变量; N_T 为每日最大操作次数。若对OLTC频繁操作,不但会降低使用寿命,也会增加故障的几率,通过引入二进制变量,限制每日操作次数。

⑦电容器组无功补偿容量约束。

$$\begin{cases} Q_j^{C,t} = B_j^t Q_j^{C,\text{step}}, B_j^t \leq B_j^{t,\text{max}} \\ \sum_{t=1}^{23} \varepsilon(t) \leq N_C, \varepsilon \in \{0, 1\} \\ \varepsilon(t) \times 1 \times Q_j^{C,\text{step}} \leq |Q_j^{C,t+1} - Q_j^{C,t}| \leq \varepsilon(t) \cdot B_j^{t,\text{max}} \cdot Q_j^{C,\text{step}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $Q_j^{C,\text{step}}$ 为每组电容器投切功率; B_j^t 为投切组数; ε 为二进制变量; N_C 为每日最大动作次数。

3 模型求解

ε 约束法是一种用于处理多目标优化问题的方法^[15]。基于 ε 约束法,建立如下模型

$$\begin{cases} \min f_1(X), \text{ s.t. } f_2(X) \leq e_2, f_3(X) \leq e_3 \\ e_2 = f_{2\min} + \left(\frac{f_{2\max} - f_{2\min}}{q_2} \right) \cdot n_2, n_2 = 1, 2, \dots, q \\ e_3 = f_{3\min} + \left(\frac{f_{3\max} - f_{3\min}}{q_3} \right) \cdot n_3, n_3 = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad \text{式(10)-(24)} \quad (25)$$

式中: q 是生成帕累托解集所需的迭代次数; X 指决策变量;而 $f_{i\min}$ 和 $f_{i\max}$ 取自式(26)

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(X_1^*) & f_2^*(X_1^*) & f_3^*(X_1^*) \\ f_1^*(X_2^*) & f_2^*(X_2^*) & f_3^*(X_2^*) \\ f_1^*(X_3^*) & f_2^*(X_3^*) & f_3^*(X_3^*) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$P = \begin{bmatrix} f_{11} & f_2 & \dots & f_3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{q1} & f_{q2} & \dots & f_{q3} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{cases} f_1'(i) = P(i, 1), i = 1, 2, \dots, q \\ f_2'(i) = P(i, 2) \times \left(\frac{d_1}{d_2} \right), i = 1, 2, \dots, q \\ \vdots \\ f_j'(i) = P(i, j) \times \left(\frac{d_1}{d_j} \right), i = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} g(s) = \mu_1 f_1'(s) + \mu_2 f_2'(s) + \dots + \mu_j f_j'(s) \\ \sum_k \mu_k = 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $f_i^*(X_i^*)$ 是目标函数 f_i 的最优值; $f_j^*(X_i^*)$ 在 X_i^* 处的值代表 f_i 的最优解,因此,每行的最小值和最大值被视为 $f_{i\min}$ 和 $f_{i\max}$ 。详细计算过程见文献^[16]。 d_i 是 $f_{i\max}$ 和 $f_{i\min}$ 的差值, s 是最佳迭代次数。

根据决策者的偏好对优先级系数进行加权,如式(29)中所示。在本文中, μ_1 、 μ_2 和 μ_3 分别对应于电压偏差、网络损耗和购电费用函数。

由于模型中包含了风电、光伏出力等连续控制变量,以及OLTC、CB等离散控制变量,使得潮流方程呈非凸性,属于混合整数非线性非凸模型,可以利用二阶锥松弛技术将其转换为混合整数二阶锥模型^[17],进而可直接进行求解。详细转换过程如下。

1) 令 $\tilde{I}_{ij} = I_{ij}^2$, $\tilde{U}_i = U_i^2$,将潮流方程式(15)做一步松弛得到

$$\tilde{I}_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\tilde{U}_i} \quad (30)$$

再进一步等价变形,将上式化为如下标准二阶锥形式

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{U}_i \end{cases} \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{U}_i \quad (31)$$

2) 对式 (23) 进行线性化处理

$$\begin{cases} \frac{U_j}{T_{ij}^2} = \sum_{k=1}^n \frac{h_k}{T_k^2} \\ -M(1 - \sigma_{ij,1}) + U_j \leq h_k \leq U_j + M(1 - \sigma_{ij,1}) \\ -M\sigma_{ij,1} \leq h_k \leq M\sigma_{ij,1} \\ M = 1000 \end{cases} \quad (32)$$

同理，对式 (24) 也进行上述线性化处理。

综上所述，求解建立的考虑 DGC 无功调节能力的配电网无功优化模型的基本流程如下。

步骤 1：输入基本参数，主要包括风电、光伏出力，负荷数据、 c_{grid} 等。

步骤 2：生成 K 个基础场景，然后进行场景缩减，最后聚类为 N_s 个典型场景。

步骤 3：基于 ε 约束法将优化目标归一化，利用二阶锥松弛技术将混合整数非线性非凸模型转换为混合整数二阶锥模型后，再调用算法包求解建立的模型，并得到优化结果。

4 算例分析

4.1 算例系统构成

本文算例采用标准 IEEE33 节点系统，其拓扑结构如图 2 所示，系统参数见文献 [18]。

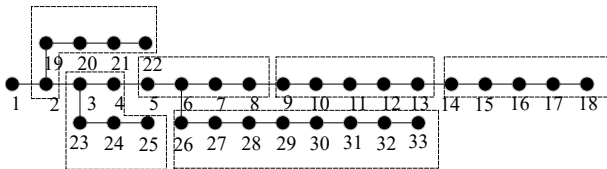


图 2 标准 IEEE33 节点系统
Fig. 2 Standard IEEE 33-bus system

OLTC 位于节点 1-2 之间，CB 位于节点 5、17，具体参数见附录表 A1。DG 接入位置见附录表 A2，具体参数见文献 [19]。

为了验证本文方法的有效性，在混合整数优化工具 YALMIP 平台搭建上述无功优化模型，调用 Gurobi9.0.3 版本求解器进行求解。

4.2 风速、光照强度场景集

利用本文提出的方法，生成 1000 个 (K) 基础场景，聚类生成 $4(N_s)$ 个典型场景，得到图 3 及图 4 所示的风速、光照强度场景集。场景 1、2、3、4 的概率分别为 0.1841、0.2912、0.3181、0.2066。

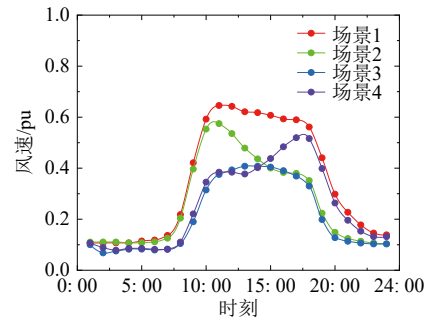


图 3 风速场景集

Fig. 3 Wind speed scene set

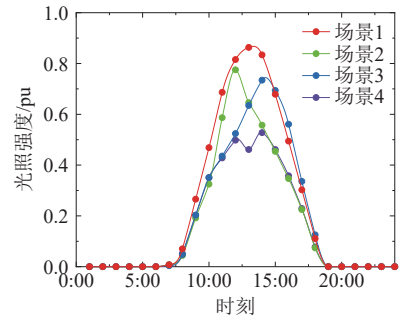


图 4 光照强度场景集

Fig. 4 Light intensity scene set

从风速以及光照强度的概率分布来看，场景集基本涵盖了夏季、冬季以及过渡季节特征，有利于优化结果满足各种场景。

4.3 考虑 DGC 无功调节能力的无功优化结果

图 5 为 OLTC 动作图，图 6 及图 7 为 CB 动作图，在不考虑 DGC 无功调节能力时，OLTC 共操作 5 次，C1 共动作 7 次，C2 共动作 8 次，不满足每日最大操作次数。考虑 DGC 的无功调节能力后，OLTC 共操作 4 次，C1 共动作 4 次，C2 共动作 5 次，均满足每日最大操作次数，且

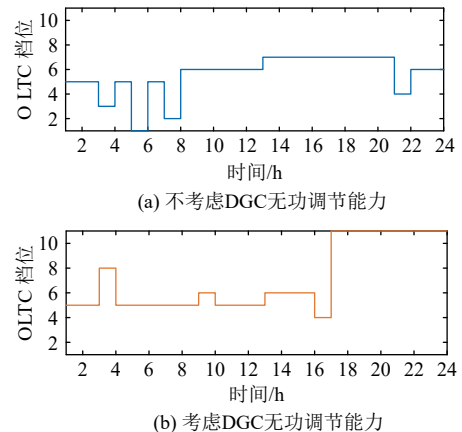
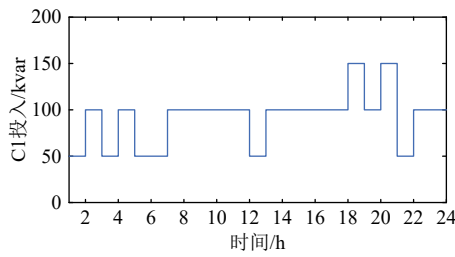
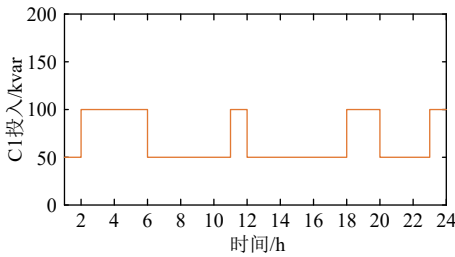


图 5 OLTC 动作图

Fig. 5 Transformer tap action diagram



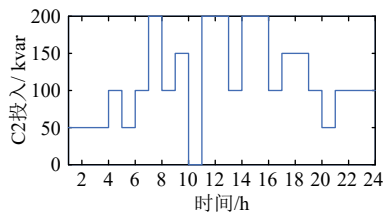
(a) 不考虑DGC无功调节能力



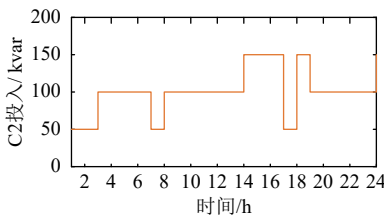
(b) 考虑DGC无功调节能力

图6 C1动作图

Fig. 6 C1 action diagram



(a) 不考虑DGC无功调节能力



(b) 考虑DGC无功调节能力

图7 C2动作图

Fig. 7 C2 action diagram

CB 补偿容量有所下降，集群承担更多的无功补偿。

图8及图9所示是考虑DGC无功调节能力前后的电压和网损的分布曲线。

可以看出，不考虑DGC无功调节能力，电压越限严重、网损较大。考虑DGC无功调节能力后，系统各节点电压偏差明显减少，网损有所降低，但是部分节点仍存在电压越限的问题。

4.4 考虑DGC有功减载的无功优化结果

为进一步解决问题，对DGC有功进行减载。表1为对集群1、2、6有功减载前后的集群有功出力情况，有功减载量为0.1 MW。表2为对集群1、2、6有功减载前后的集群无功出力优化结果。

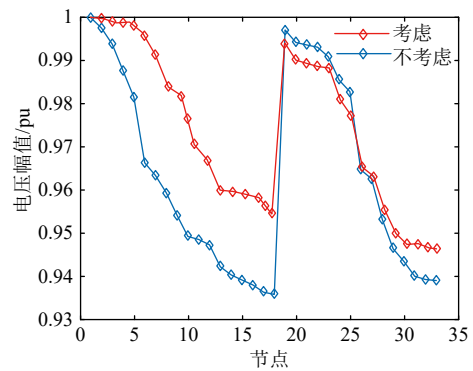


图8 考虑DGC无功调节能力前后节点电压分布曲线
Fig. 8 Nodal voltage distribution curve before and after considering reactive power regulation capability of DGC

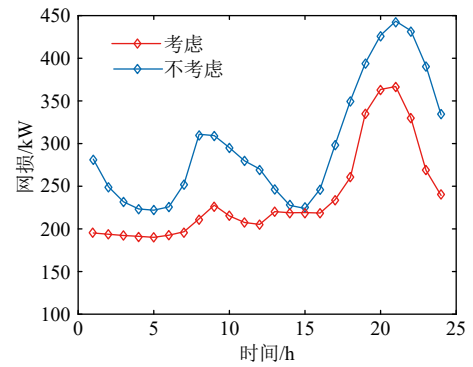


图9 考虑DGC无功调节能力前后网络损耗分布曲线
Fig. 9 Network loss distribution curve before and after considering the reactive power regulation capability of DGC

表1 有功减载前后集群的有功出力

Table 1 Active power output of the cluster before and after active load reduction

集群编号	减载前有功/MW	减载后有功/MW
1	1.58	1.48
2	1.61	1.51
3	1.15	1.15
4	1.37	1.37
5	1.43	1.43
6	1.94	1.84

表3为DGC有功减载出力前后的购电费用优化结果。

图10及图11所示是考虑DGC有功减载、无功优化后得到的电压和网损的分布曲线。由图可见，通过集群有功减载后，集群的无功调节范围增大，无功优化后系统各节点电压无越限，网损明显降低。

表 2 有功减载前后集群的无功出力

Table 2 Reactive power output of the cluster before and after active load reduction

集群编号	减载前无功/Mvar	减载后无功/Mvar
1	1.24	1.41
2	1.13	1.36
3	1.63	1.59
4	1.48	1.45
5	1.37	1.34
6	0.86	1.06

表 3 购电费用

Table 3 Power purchase cost

	减载前	减载后
减载前购电费用/万元	2.5713	2.1390

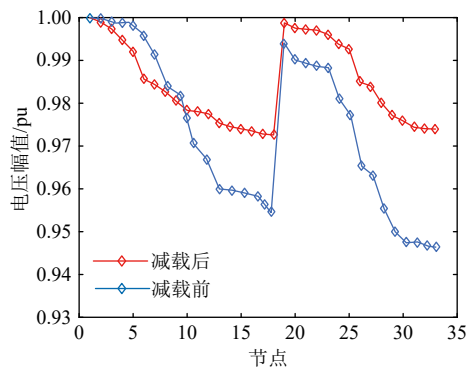


图 10 考虑 DGC 有功减载前后节点电压分布曲线

Fig. 10 Nodal voltage distribution curve before and after considering active load shedding of DGC

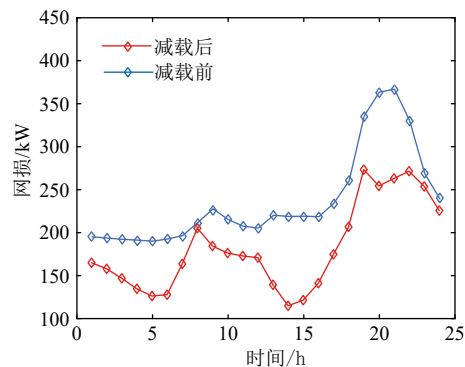


图 11 考虑 DGC 有功减载前后网络损耗分布曲线

Fig. 11 Network loss distribution curve before and after considering active load shedding of DGC

5 结论

1) 充分考虑风、光出力的不确定性, 从而得到更为准确的场景集, 使得优化满足各种情况, 并配合储能缓解风、光的不确定性带来的不利影响。

2) 相较于传统优化模型, 本文充分利用了 DGC 容量曲线特性, 模型在满足配电网电压质量的基础上, 也保证了经济性的要求。

3) 考虑了 DGC 无功调节能力后, 在满足 OLTC 和 CB 每日最大操作次数的前提下, 系统各节点电压偏差及网损均有所降低。减载集群有功输出后, 系统无功容量增大, 各节点电压无越限, 网损明显降低, 对配电网无功优化有明显的改善。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

参考文献

- [1] ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, *et al.* A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021–1033.
- [2] 赵晶晶, 符杨, 李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 33–38.
ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 33–38 (in Chinese).
- [3] 汪文达, 崔雪, 马兴, 等. 考虑多个风电机组接入配电网的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1860–1865.
WANG Wenda, CUI Xue, MA Xing, *et al.* Multi-objective optimal reactive power flow of distribution network with multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1860–1865 (in Chinese).
- [4] 陈继明, 祁丽志, 孙名好, 等. 多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 129–134.
CHEN Jiming, QI Lizhi, SUN Mingyu, *et al.* Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 129–134 (in Chinese).
- [5] 季玉琦, 耿光飞, 温渤婴, 等. 基于最优分割法的含 DG 配电网动态无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2585–2592.
JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying, *et al.* Dynamic reactive power optimization in distribution network with DG based on optimal partition[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2585–2592 (in Chinese).
- [6] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 基于平衡优化器的含高比例风光新能源电网无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 32–39.
YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, *et al.* Reactive power optimization of power grid with high-penetration

- wind and solar renewable energies based on equilibrium optimizer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 32–39(in Chinese).
- [7] 黄伟, 刘斯亮, 王武, 等. 长时间尺度下计及光伏不确定性的配电网无功优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 154–162.
HUANG Wei, LIU Siliang, WANG Wu, *et al.* Optimal reactive power dispatch with long-time scale in distribution network considering scale in distribution network considering[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 154–162(in Chinese).
- [8] 刘梦依, 邱晓燕, 张志荣, 等. 计及风光出力相关性的配电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1892–1899.
LIU Mengyi, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, *et al.* Multi-objective reactive power optimization of distribution network considering output correlation between wind turbines and photovoltaic units[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1892–1899(in Chinese).
- [9] 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): 3880–3887.
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): 3880–3887(in Chinese).
- [10] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M A. A planning approach for the network configuration of AC-DC hybrid distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2203–2213.
- [11] 阮贺彬, 高红均, 刘俊勇, 等. 考虑DG无功支撑和开关重构的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.
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(in Chinese).
- [12] CHEN Y W, GUO Q L, SUN H B, *et al.* A distributionally robust optimization model for unit commitment based on Kullback-Leibler divergence[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2190–2204.
- [13] Dall' ANESE, DHOPLES V, GIANNAKIS G B. Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(2): 487–497.
- [14] GABASH A, LI Pu. Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2026–2035.
- [15] 郑能, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含高比例光伏的配电网有功-无功功率多目标协调优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 33–39,91.
ZHENG Neng, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, *et al.* Multi-objective coordinated optimization of active and reactive power for distribution network integrated with high proportion of photovoltaic generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 33–39,91(in Chinese).
- [16] HASHEMIPOUR N, AGHAEI J, LOTFI M, *et al.* Multi-objective optimization method for coordinating battery storage systems, photovoltaic inverters and tap changers[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(3): 475–483.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2): 1401–1407.
- [19] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 基于场景法的配电网有功-无功协调优化[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1640–1651.
ZHENG Neng, DING Xiaoqun, GUAN Zhicheng, *et al.* Coordinated optimization of active and reactive power in distribution network based on scene method[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1640–1651(in Chinese).

收稿日期: 2021-12-29

作者简介:

赵晶晶(1980), 女, 博士, 副教授, 研究方向为配电网无功优化、风电并网电压稳定与控制、微电网优化与控制, E-mail: jjzhao_sh@163.com;

许宏源(1996), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为配电网无功优化、分布式电源优化与控制, E-mail: 253832236@qq.com;

李梓博(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障优化、分布式电源优化与控制, E-mail: 446191937@qq.com;

朱炯达(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源分布式电源发电技术与运行优化, E-mail: izjd139@outlook.com;

张宇(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源分布式电源发电控制与优化运行, E-mail: 3537677126@qq.com.

附录 A

附表 A1 IEEE33 节点系统控制变量参数

Table A1 Parameters of control variables in IEEE 33-bus system

变量	OLTC	CB ₁ /Mvar	CB ₂ /Mvar
调节范围	0.95~1.05	0~200	0~200
调节步长	0.01	50	50
可调档位	11	4	4

附表 A2 DG 接入位置

Table A2 Location of DG connected to grid

名称	风机	光伏	储能
节点编号	4、6、9、14、19、29、30	7、10、11、15、16、20、23、31、32	8、12、17、21、24、33