

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.015

计及新能源电力系统多运行场景和多优化目标的 无功补偿装置选址定容研究

郭金鹏, 邹 苹, 潘学萍, 张海燕, 孙晓荣

(河海大学电气与动力工程学院)

摘要: 针对新能源电力系统无功补偿配置多基于单一运行场景,且常基于单目标优化算法进行求解的问题,提出同时考虑多运行场景和多优化目标的无功补偿配置方法。该方法考虑风电出力的随机性,采用蒙特卡罗采样法和 K -means 聚类法生成典型风电出力场景,以系统电压偏差、有功网损和无功补偿设备配置成本为优化目标,以无功补偿设备安装位置和补偿容量为优化变量,以功率潮流、节点电压、电源出力为约束,建立多个典型风电出力场景下无功补偿设备的优化配置模型,同时利用多目标粒子群算法求解优化配置模型,得到无功补偿设备最优安装位置及补偿容量。含风电 IEEE39 节点系统的仿真分析结果表明:在系统多运行场景下,本文无功补偿配置方法可以有效降低系统电压偏差和有功网损,且配置方案更具多样性。

关键词: 无功补偿装置;多运行场景;多目标优化;有功网损;配置成本

Research on siting and sizing of reactive power compensation devices considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives in new energy power systems

Guo Jinpeng, Zou Luo, Pan Xueping, Zhang Haiyan, Sun Xiaorong
(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the problem that the reactive power compensation configuration of new energy power systems is mostly based on a single operating scenario and is often solved by single-objective optimization algorithms, a reactive power compensation configuration scheme considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives simultaneously was proposed. Considering the randomness of wind power output, typical wind power output scenarios were generated by the Monte Carlo sampling method and K -means clustering method. An optimal configuration model of reactive power compensation devices under multiple typical wind power output scenarios was established by taking system voltage deviation, active power loss, and configuration cost of reactive power compensation devices as optimization objectives, taking installation locations and compensation capacities of reactive power compensation devices as optimization variables, and setting power flow, node voltages, and power source outputs as constraints. At the same time, a multi-objective particle swarm optimization algorithm was used to solve the optimal configuration model to obtain the optimal installation locations and compensation capacities of reactive power compensation devices. The simulation analysis on the IEEE 39-node system with wind power shows that under multiple operating scenarios of the system, the proposed reactive power compensation configuration method can effectively reduce system voltage deviation and active power loss, and the configuration schemes are more diverse.

Key words: reactive power compensation devices; multiple operating scenarios; multi-objective optimization; active power loss; configuration cost

随着绿色能源的快速发展,新型电力系统呈现“多源互补、源网协同”的特点^[1-4]。大规模风机并网与直流输电规模持续扩张,使得电网无功需求显著攀升,系统电压稳定运行也面临严峻挑战。目前电力系统中常用的无功补偿装置有并联电容器、调相机、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步发生器(static synchronous compensator, STATCOM)等电力电子设备。相比于 SVC, STATCOM 能够在系统电压宽幅波动区间内维持恒定无功出力,无功功率可在感性至容性区间实现连续平滑调节,同时具备响应速度快、设

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477089);国家自然科学基金青年科学基金项目(52407094)
作者简介: 郭金鹏(1992—),男,副教授,博士,主要从事新型电力系统稳定分析和控制研究。E-mail:jinpeng.guo@hhu.edu.cn
通信作者: 潘学萍(1972—),女,教授,博士,主要从事新能源电力系统建模与分析研究。E-mail:xueping_pan@163.com

备占地少等突出优势^[5];与调相机相比,STATCOM 无励磁低励限制约束,动态无功支撑性能更优,对稳态过电压的抑制效果更佳^[6],因此针对含新能源出力的电力系统,开展 STATCOM 优化配置研究十分必要。

针对无功补偿装置的选址定容问题,现有研究大多通过构建数学优化模型进行求解。赵天骐等^[7]采用权重法将电压偏差和系统有功网损转化为单一目标,用鱼群算法对系统稳态无功进行优化;陈春萌等^[8]用加权法将系统无功损耗和电压稳定度两个目标转化为单一目标进行优化,利用改进的粒子群算法求解优化模型以确定无功补偿容量;于佰建等^[9]以系统有功网损最小为基本优化目标,同时引入饱和函数将 PQ 节点的电压偏差和 PV 型火电机组的无功偏差作为优化子目标,用权重法将两者相加形成单个目标函数,最后用萤火虫算法对地区电网无功电压进行优化;Hadavi 等^[10]以晶闸管控制串联电容器的补偿费用为优化目标,将母线的电压约束及线路的传输极限转化为惩罚函数,利用权重法将两者结合建立单一目标优化模型,然后采用遗传算法对晶闸管控制串联电容器的配置问题进行了优化。上述文献虽然都考虑了多个优化目标,但在求解过程中均通过加权或简单相加的方式将多目标优化转化为单一目标优化问题,存在权重赋值主观性强、单个目标及其关系信息易丢失等问题。此外,在现有的无功补偿装置优化配置研究中考虑新能源出力不确定性的研究也较少。

针对新能源出力不确定性的研究,多采用场景采样方法和场景缩减技术对新能源出力进行建模^[11]。常用的场景采样方法有蒙特卡罗采样法^[12]、拉丁超立方采样方法^[13]等,常用的场景缩减技术有快速前向选择法、后向削减法和聚类法等。其中蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法具有适用性广泛、计算效率高等优点^[14]。Sannigrahi 等^[15]采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法对系统负荷和新能源出力的不确定性进行场景分析,并以此为基础建立主动配电系统的规划模型;孙汝羿等^[16]采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法生成分布式电源日出力场景,并在多场景下对有源配电网的参数进行优化;陈建华等^[17]用蒙特卡罗采样法生成分布式电源出力场景和负荷需求场景,并运用到配电网的孤岛划分中。但在无功补偿装置优化配置方面,基于蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法考虑多运行场景的研究还有所欠缺。

本文采用场景分析法对含风电电力系统 STATCOM 的选址定容问题进行研究,首先采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法生成典型风电出力场景;然后以系统电压偏差、有功网损和无功补偿设备配置成本为优化目标,以无功补偿设备安装位置和补偿容量为优化变量,以功率潮流、节点电压、电源出力为约束,建立多个典型风电出力场景下无功补偿设备的优化配置模型。采用多目标粒子群算法对优化配置模型进行求解,并通过风电场接入的 IEEE39 节点系统算例分析验证所提配置方法的有效性和合理性。

1 风电机组不同场景下的出力分析

风电机的出力取决于风速,对于双馈风电机而言,其有功功率输出与风速的关系为:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ 0.5C_p\rho\pi R^2v^3 & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$C_p(\lambda, \theta) = c_1(c_2/\beta - c_3\theta - c_4)e^{-c_5/\beta} + c_6\lambda$$
$$\lambda = R\omega_r/v \quad 1/\beta = 1/(\lambda + 0.08\theta) - 0.035/(\theta^3 + 1)$$

式中: P 、 P_N 分别为风电机的有功功率输出和额定功率; C_p 为风电机的功率系数,为桨距角 θ 和叶尖速比 λ 的非线性函数; ρ 为空气密度; v 、 v_{in} 、 v_{out} 、 v_N 分别为实际风速、切入风速、切出风速和额定风速; R 为风电机叶片半径; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 为系数; β 为计算 λ 的中间变量; ω_r 为风轮的角速度。

双馈风电机正常运行在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下,将 $\lambda = R\omega_r/v$ 代入式(1)得到运行在 MPPT 模式下风电机的有功功率输出:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ 0.5\rho\pi R^5C_{pmax}\omega_r^3/\lambda^3 & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

风速的波动和随机性较大,研究表明风速的分布呈正偏态,可以用威布尔分布函数(Weibull distribution)描述特定地区风速的概率特性:

$$f(v) = (K/C)(v/C)^{K-1}e^{-(v/C)^K} \tag{3}$$

式中: C 、 K 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数,可通过风速的实际数据统计近似计算得出。

Weibull 分布的累积分布函数为:

$$F(v) = 1 - e^{-(v/C)^K} \tag{4}$$

结合式(2)~(4)可以得到风电机组有功功率输出的概率分布函数。为了准确反映风电机组有功功率输出的概率分布,采用蒙特卡罗采样法生成 N 个符合 Weibull 分布的随机数;为了提高计算效率且最大限度保持样本的拟合精度,利用 K -means 聚类法对 N 个风速进行聚类生成 N_c 个典型风速,从而得到 S 个风电机组出力的典型场景。

2 STATCOM 的多目标优化配置方案

2.1 目标函数

为使配置方案在改善系统运行特性的同时考虑配置成本的合理性,本文以系统电压偏差最小、总有功网损最小、STATCOM 配置成本最小为目标函数,建立多目标优化模型。

系统电压偏差 f_v 为:

$$f_v = \sum_{c=1}^S w_c \left(\sum_{i=1}^N w_i |U_i - 1| \right) \tag{5}$$

式中: S 为场景总数; w_c 为场景 c 的权重; N 为节点总数; w_i 为系统节点 i 的权重; U_i 为节点 i 的电压幅值。

系统总有功网损 f_{loss} 为:

$$f_{\text{loss}} = \sum_{c=1}^S w_c \sum_{i,j \in N_L} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \tag{6}$$

式中: N_L 为系统支路总数; G_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导和节点电压相角差。

STATCOM 的配置费 C_0 由一次性投资费用和运行维护费用两部分组成^[18],公式为:

$$C_0 = C_T + C_Y = \sum_{c=1}^S w_c \left[\sum_{s=1}^M Q_s C_{\text{ST}} / (1 + \tau)^k + H C_T \right] \tag{7}$$

式中: C_T 为 STATCOM 一次性投资费用; C_Y 为运行维护费用; M 为安装 STATCOM 的总台数; Q_s 为第 s 台 STATCOM 的无功补偿容量; C_{ST} 为 STATCOM 每 kvar 单位容量的价格; τ 为折现率; k 为使用年限; H 为运行费用占投资费用的比例系数。

2.2 约束条件

2.2.1 等式约束条件

各场景下,每个节点需满足有功和无功平衡约束:

$$P_{G,ic} - P_{L,ic} = U_{ic} \sum_{j=1}^N U_{jc} (G_{ij} \cos \theta_{ijc} + B_{ij} \sin \theta_{ijc}) \tag{8}$$

$$Q_{G,ic} + Q_{C,ic} - Q_{L,ic} = U_{ic} \sum_{j=1}^N U_{jc} (G_{ij} \sin \theta_{ijc} - B_{ij} \cos \theta_{ijc}) \tag{9}$$

式中: $P_{G,ic}$ 、 $P_{L,ic}$ 分别为场景 c 下节点 i 的发电机功率输出、有功负荷; $Q_{G,ic}$ 、 $Q_{L,ic}$ 、 $Q_{C,ic}$ 分别为场景 c 下节点 i 的发电机无功出力、无功负荷和 STATCOM 的无功补偿容量; B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电纳; U_{ic} 为场景 c 下节点 i 的电压幅值。

2.2.2 不等式约束条件

各场景下,各节点电压、发电机视在功率、风电机组有功功率输出、STATCOM 的补偿地点、STATCOM 的补偿容量应满足不等式约束条件:

$$\begin{cases} U_{ic,\min} \leq U_{ic} \leq U_{ic,\max} \\ S_{G,ic,\min} \leq S_{G,ic} \leq S_{G,ic,\max} \\ P_{W,ic,\min} \leq P_{W,ic} \leq P_{W,ic,\max} \\ 1 \leq D_{sc} \leq D_{sc,\max} \\ Q_{S,sc,\min} \leq Q_{S,sc} \leq Q_{S,sc,\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N; s = 1, 2, \dots, M_s) \tag{10}$$

式中: $U_{ic,min}$ 、 $U_{ic,max}$ 分别为场景 c 下节点 i 电压下限值、上限值; $S_{G,ic,min}$ 、 $S_{G,ic,max}$ 、 $S_{G,ic}$ 分别为节点 i 的发电机在场景 c 下视在功率下限值、上限值和该发电机的视在功率; $P_{W,ic,min}$ 、 $P_{W,ic,max}$ 、 $P_{W,ic}$ 分别为节点 i 的风电机在场景 c 下有功功率输出下限值、上限值和该风电出力; D_{sc} 、 $D_{sc,max}$ 为第 s 台 STATCOM 在场景 c 下的补偿节点编号和补偿节点编号的上限值; $Q_{S,sc,min}$ 、 $Q_{S,sc,max}$ 、 $Q_{S,sc}$ 分别表示第 s 台 STATCOM 在场景 c 下无功补偿下限值、上限值和 STATCOM 的无功补偿。

2.3 优化配置流程

式(5)~(10)构成了计及新能源多出力场景的 STATCOM 的优化配置模型,其本质是一个多元非线性优化问题,待优化的变量为 STATCOM 补偿位置和容量,本文采用多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)对模型进行求解。多目标粒子群算法是一种基于群体智能的优化算法^[19-20],它通过模拟鸟群觅食行为,使粒子在解空间中不断迭代更新,同时考虑多个目标函数,以寻找多个目标之间的 Pareto 前沿解集。优化配置流程如图 1 所示。

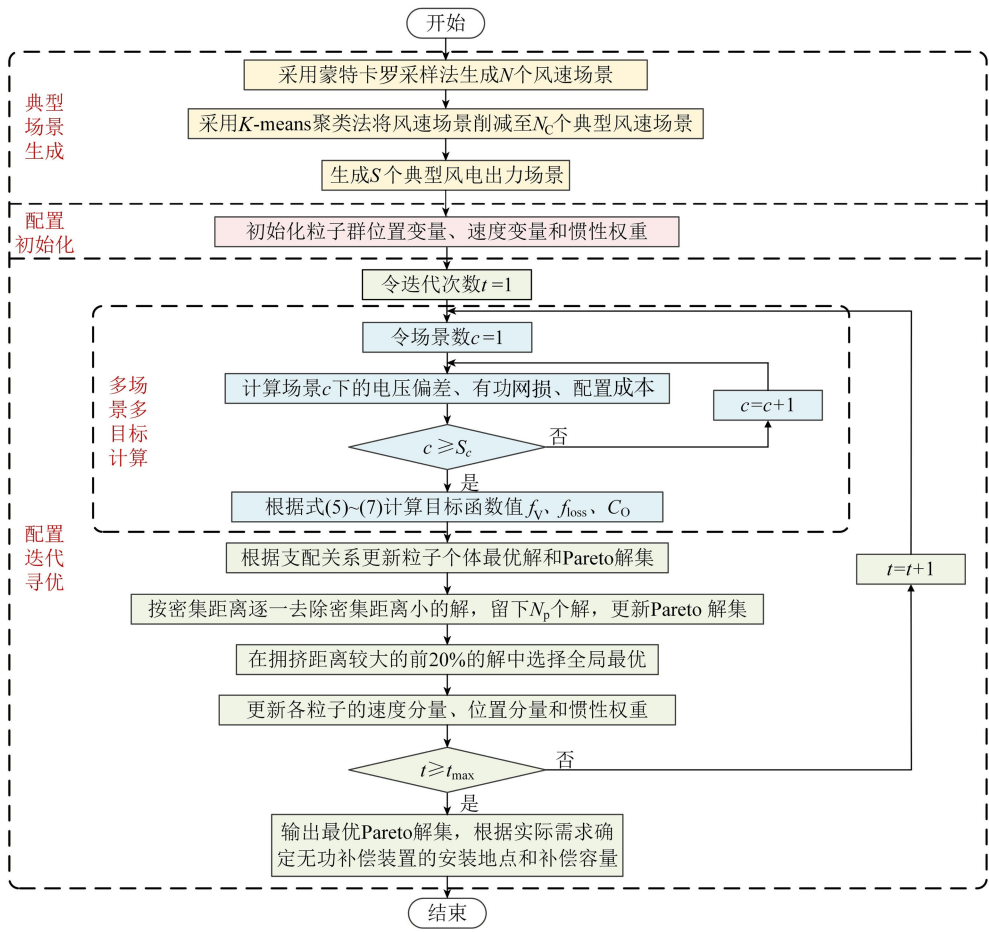


图 1 优化配置流程

Fig. 1 Optimal configuration flowchart

3 算例验证

3.1 系统介绍

本文采用 IEEE39 节点系统对所提 STATCOM 优化配置方法进行验证,图 2 为系统整体接线图。其中 30、31、32 节点用风电场代替,风电场经 35 kV/220 kV 的升压变压器接入电网中,每个风电场中包含 8 台风电机。风电机均采用双馈式感应异步风力发电机模型(doubly fed induction generator, DFIG),额定有功功率为 1.5 MW,额定视在功率为 1.5/0.9 MV·A,初始风电机有功功率输出为 15 MW,不发无功。切入风速为 3 m/s,额定风速为 11.8 m/s,切出风速为 25 m/s,叶片半径为 35.2 m,空气密度为 1.39 kg/m³。STATCOM 的补偿位置为 PQ 节点和与风电场相连的公共连接点(point of common coupling, PCC),配置的单台 STATCOM

参数如下:补偿容量范围为-200~200 Mvar,单位补偿价格为 20 万元/Mvar,规划使用年限为 20 年,折现率为 2%,运行费用占投资费用的 5%。

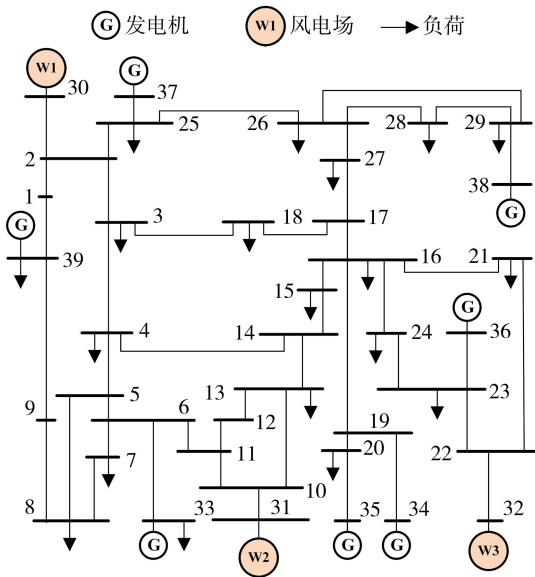


图 2 IEEE39 节点系统结构

Fig. 2 Structure of IEEE 39-node system

3.2 风电出力典型场景的生成

取 Weibull 形状参数 $K=2$, 尺度参数 $C=8.5^{[21]}$, 通过蒙特卡罗洛采样法, 获得 2000 个风速场景, 对场景进行 K -means 聚类得到 S 个典型风电出力场景。不同典型风电出力场景数对应的风速累积概率曲线如图 3 所示。

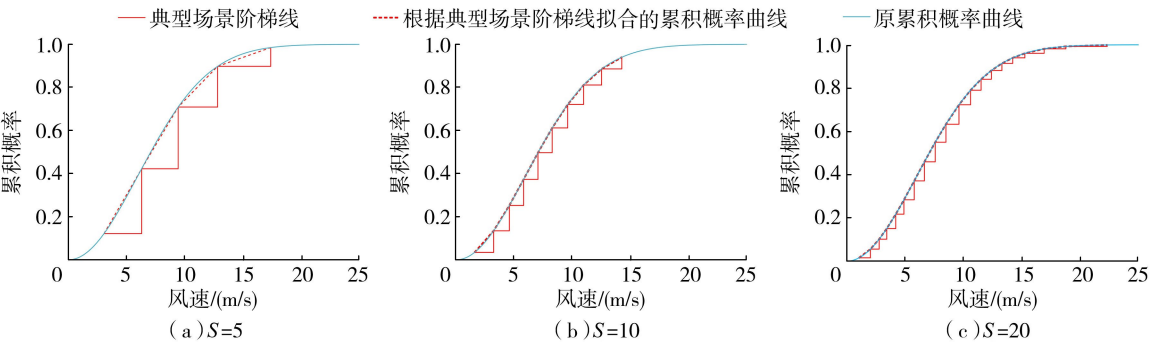


图 3 典型风电出力场景风速累积概率曲线对比

Fig. 3 Comparison of cumulative probability curves of wind speed under typical wind power output scenarios

由图 3 可知, 当 $S=5$ 时, 拟合所得累积概率曲线与原累积概率曲线误差较大, 当 $S=20$ 时, 拟合所得累积概率曲线与原概率累积曲线更贴合。典型风速场景数越多, 概率累积曲线拟合精度越高, 但随着典型风电出力场景数的增加, 计算时间会有所增加, 计算效率变低。因此在提高拟合精度的同时, 为保证计算效率, 本文仿真计算均基于 10 个典型场景验证。10 个典型场景的风速、风电机出力、概率见表 1。

表 1 典型风电机出力场景

Table 1 Typical wind turbine output scenarios

场景	风速/(m/s)	风电机出力/p. u.	概率	场景	风速/(m/s)	风电机出力/p. u.	概率
1	1.593 300	0	0.037 202	6	8.272 100	0.104 915	0.137 673
2	3.234 120	0.005 266	0.112 241	7	9.604 656	0.155 021	0.105 613
3	4.581 708	0.017 780	0.149 784	8	10.973 520	0.180 000	0.072 416
4	5.811 464	0.036 623	0.161 609	9	12.523 047	0.180 000	0.043 854
5	7.049 178	0.065 313	0.152 550	10	14.261 721	0.180 000	0.023 167

3.3 多目标粒子群算法最大迭代次数选择

在多目标粒子群算法中,合理设置最大迭代次数可以确保算法在合理的运行时间内收敛且得到较好的寻优结果。为此,本文通过比较不同迭代次数下算法所得 Pareto 解集的外部解以及空间指标 (spacing metric, SP),量化评估迭代次数对求解性能的影响。多目标粒子群算法的粒子群和 Pareto 解集规模分别设置为 500 个和 100 个,各场景的权重 w_i 取该场景对应的概率值,与风电场相连的 3 个 PCC 点权重为 10,其余节点权重均为 1。在求解所得的 Pareto 解集中,具有最小电压偏差或最小有功网损或最小配置成本的解可称为外部解。对于每个目标,每次迭代都可得到一个外部解,统计每次迭代后的外部解,并绘制图 4 所示的收敛曲线。由图 4 可知,电压偏差和有功网损的外部解在迭代 10 次左右曲线逐渐开始收敛,收敛较快。配置成本的外部解在迭代 130 次左右达到收敛阈值。为了保证所有目标充分、稳定收敛,应以最慢收敛目标为基准并适当增加迭代次数。

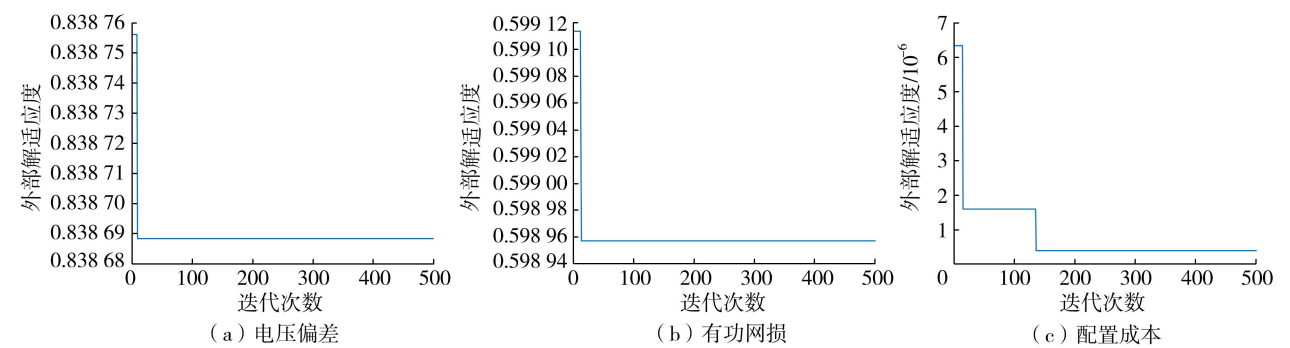


图 4 外部解收敛曲线
Fig. 4 Convergence curves of external solutions

SP 用于衡量 Pareto 解集在目标空间内的分布均匀程度。SP 越小,各非支配解之间的间隔分布越均衡,解集均匀性越优;反之则说明解集存在局部聚集或分布稀疏等不均匀问题。迭代次数为 50、100、150、200、250 对应的 SP 分别为 0.0035、0.0036、0.0030、0.0028、0.0032。随着迭代次数的增加,解集的 SP 先减小后增大。当迭代次数为 200 时 SP 最小,解集中解之间的间距最均匀,分布性最好。因此,在综合考虑各目标外部解的收敛曲线和不同迭代次数下的 SP 后,本文将多目标粒子群算法中的最大迭代次数设置为 200 次。

3.4 STATCOM 优化配置结果

为了说明考虑风电机组多出力场景的必要性,应用多目标粒子群算法求解得到考虑所有场景与只考虑最大概率场景 4 的 Pareto 解集(图 5)。由图 5 可知,考虑场景因素后的 Pareto 解集多样性更好,解的分布也更均匀,所以考虑场景因素后得到的配置方案集可以为调度运行工作人员提供更多选择。

智能优化算法存在固有随机性,为此本文分别对引入场景因素、未引入场景因素两类程序各独立运行 30 次;针对各项评价指标,对两类工况下每次运行所得 Pareto 解集的指标计算结果分别汇总统计,并进行对比分析,结果如图 6 所示。考虑多场景后的电压偏差和、有功网损和、配置成本等的分布都较为集中,说明考虑场景因素后的系统电压水平、有功网损、配置成本不会随着配置方案的不同而产生大幅波动,而不考虑场景因素时,系统的指标可能随着配置方案的不同产生较大的波动。此外多场景下的电压偏差和、有功网损和的均值都小于单场景,配置成本则大于单场景下,说明考虑场景因素后虽然优化效果更佳,但是成本也会随之增加。

基于上述分析,考虑风电多出力场景下 STATCOM 的配置数量对优化效果的影响,取配置数量分别为 0~3 得到 4 个配置方案,分别将各配置方案在多场景下的指标和进行比较,结果见表 2。图 7 为配置不同台数的 STATCOM 后系统各节点的电压偏差和、系统支路累加有功网损和的变化。

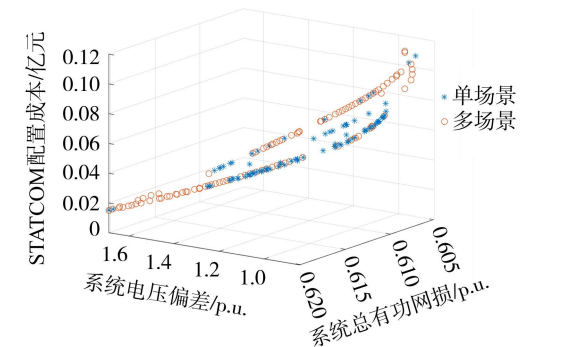


图 5 考虑场景因素前后 Pareto 解集的分布情况
Fig. 5 Distribution of Pareto solution sets before and after considering scenario factors

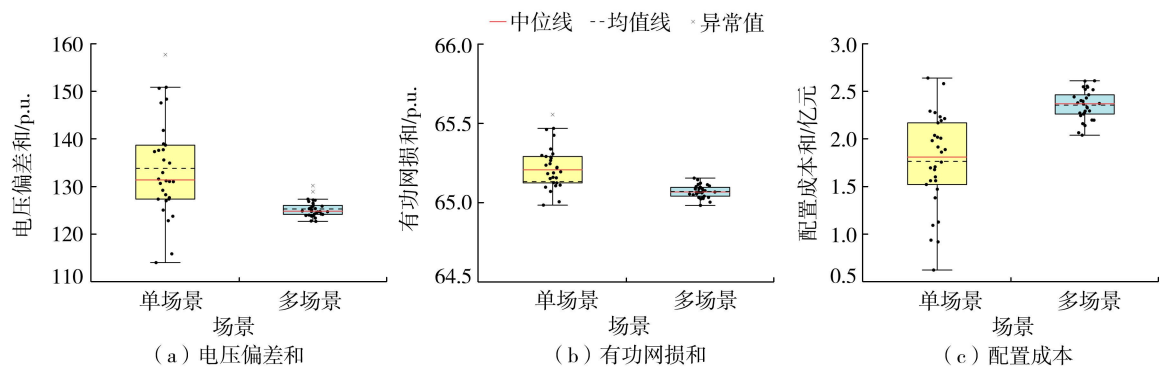


图6 考虑场景因素前后系统性能指标对比

Fig. 6 Comparison of system performance indicators before and after considering different scenario factors

表2 STATCOM 配置台数的指标结果

Table 2 Indicator results of different numbers of configured STATCOMs			
配置数量/台	电压偏差和/p. u.	有功网损和/p. u.	配置成本/亿元
0	166.0312	61.4477	0
1	140.5435	61.1329	1.0985
2	92.2267	60.3207	4.1235
3	94.3476	59.8454	6.6167

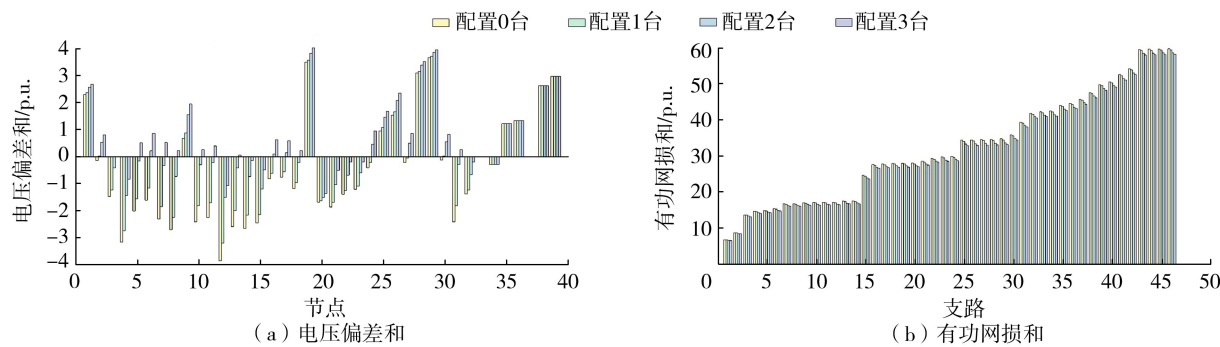


图7 考虑场景因素后不同配置系统性能分析

Fig. 7 System performance analysis before and after configuration considering scenario factors

由表2和图7可知,随着配置数量的增加,系统的电压情况和损耗情况均得到不同程度的改善,但配置成本逐渐增大。与不配置STATCOM相比,配置1台STATCOM后,电压偏差和下降率为15.35%,有功网损和下降率为0.51%;与配置1台STATCOM相比,配置2台STATCOM后,电压偏差和下降率为34.38%,有功网损和下降率为1.33%。与配置2台STATCOM相比,配置3台STATCOM后,部分电压节点范围由0.9~1.0p.u.上升至1.0~1.1p.u.,电压偏差和增长率为2.3%,有功网损和下降率仅为0.79%,优化效果微弱。且此时配置成本和较配置2台时大幅上升,升高了2.4932亿元。综上,配置2台STATCOM是较优的选择。

Pareto解集中每一个点的数值都代表了无功补偿设备对应的安装位置和补偿容量,且解集中不同的解反映了多个目标间的不同关系。若需要从解集中选取一个特定解,可以采用熵权法或加权法将此多目标优化问题转换为单目标优化问题。熵权法通过判断Pareto解集中各目标值的内部差异性确定各自的权重,目标值内部差异越大,目标提供的信息越多,该目标权重越大。熵权法能避免决策者自身主观性对最终决策的影响。加权法通过调整权重的大小,根据实际需求灵活地控制各个目标在优化过程中的重要性。以配置2台STATCOM为例,用熵权法和加权法从Pareto解集中选取一个特定解,系统电压偏差的权重分别为0.5和0.05,系统有功网损的权重分别为0.4和0.05,配置成本的权重分别为0.1和0.9。用熵权法得到的配置方案1,在节点22和节点13配置STATCOM,补偿容量分别为30.42Mvar和117.63Mvar。用加权法得到的配置方案2,在节点22和节点10配置STATCOM,补偿容量为71.84Mvar和29.92Mvar。两种方案下,系统的各项性能指标对比如图8所示,配置方案1在系统电压偏差和有功网损上均优于配置方案2,但配置成本较高。这也验证了Pareto解集中的解都是互相非支配的,且没有一个解在所有目标上都优于其他解,需

要根据具体需求来选择特定解。

4 结 语

针对风电机出力的随机性和波动性,生成了风电机出力的典型场景,提出了多运行场景和多优化目标下 STATCOM 的选址定容配置方案。与只考虑单一场景相比,考虑多运行场景后所得的配置方案多样性更好,且优化后各指标分布较为集中,优化效果相对稳定。含风电的 IEEE39 节点的算例结果表明,所提优化配置方案能在保证一次性投资费用和运行维护费用合理性的同时有效降低系统的电压偏差和有功网损。

参考文献:

[1] 李建林,郭兆东,马速良,等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术,2022,48(11):4330-4341. (Li Jianlin, Guo Zhaodong, Ma Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering,2022,48(11):4330-4341. (in Chinese))

[2] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):1-10. (in Chinese))

[3] 黄显峰,周引航,张启凡,等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):44-51. (Huang Xianfeng, Zhou Yinhang, Zhang Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):44-51. (in Chinese))

[4] 黄显峰,黄晗,鲜于虎成,等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(2):38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(2):38-45. (in Chinese))

[5] 金一丁,于钊,李明节,等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102. (Jin Yiding, Yu Zhao, Li Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology,2018,42(7):2095-2102. (in Chinese))

[6] 姚骏,周特,陈知前. 电网对称故障下定速异步风电场 STATCOM 容量配置研究[J]. 电工技术学报,2016,31(1):45-54. (Yao Jun, Zhou Te, Chen Zhiqian. Studies on STATCOM capacity configuration for FSIG-based wind farm under symmetrical grid fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(1):45-54. (in Chinese))

[7] 赵天骐,郭金鹏,张海燕,等. 考虑调相机的风电场稳态-暂态无功协同优化控制[J]. 电力系统自动化,2024,48(24):54-65. (Zhao Tianqi, Guo Jinpeng, Zhang Haiyan, et al. Steady state-transient state reactive power cooperative optimization control of wind farm considering synchronous condensers[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(24):54-65. (in Chinese))

[8] 陈春萌,梁英,张舒捷. 基于多策略自适应粒子群算法的电网无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):102-108. (Chen Chunmeng, Liang Ying, Zhang Shujie. Reactive power optimization of power grid based on multi-strategy adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(4):102-108. (in Chinese))

[9] 于伯建,陈卓尔,宋长城,等. 基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):93-100. (Yu Baijian, Chen Zhuoer, Song Changcheng, et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):93-100. (in Chinese))

[10] Hadavi S, Mansour M Z, Bahrani B. Optimal allocation and sizing of synchronous condensers in weak grids with increased penetration of wind and solar farms[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2021,11(1):199-209.

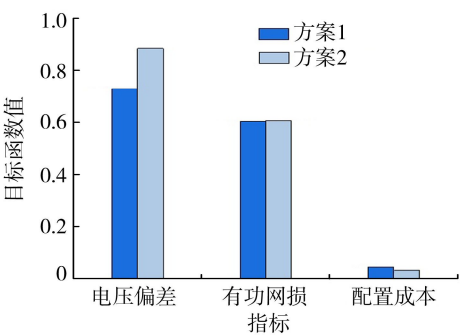


图 8 不同配置方案的指标比较

Fig.8 Comparison of indicators for different configuration schemes

[11] 戴宇欣,张俊,乔骥,等. 基于改进去噪扩散概率模型和模型迁移的新能源场站超短期出力场景生成[J]. 电网技术,2025,49(2):511-521. (Dai Yuxin,Zhang Jun,Qiao Ji,et al. Ultra-short-term output scenario generation for renewable energy plants based on improved denoising diffusion probabilistic models and model-based transfer learning[J]. Power System Technology, 2025,49(2):511-521. (in Chinese))

[12] Sun Yingyun,Zhong Jianliang,Li Zuyi,et al. Stochastic scheduling of battery-based energy storage transportation system with the penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(1):135-144.

[13] 胡喜梅. 通信基站群风光储供电系统容量优化配置模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2024.

[14] 董晓翀,张姝,李烨,等. 电力系统中时序场景生成和约简方法研究综述[J]. 电网技术,2023,47(2):709-721. (Dong Xiaochong,Zhang Shu,Li Ye,et al. Review of power system temporal scenario generation and reduction methods[J]. Power System Technology,2023,47(2):709-721. (in Chinese))

[15] Sannigrahi S,Ghatak S R,Acharjee P. Multi-scenario based bi-level coordinated planning of active distribution system under uncertain environment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(1):850-863.

[16] 孙汝羿,袁至,王维庆,等. 含固态变压器新型配电网动态无功多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(16):104-114. (Sun Ruyi,Yuan Zhi,Wang Weiqing,et al. Multi-objective optimization of dynamic reactive power in a new distribution network with a solid state transformer[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16):104-114. (in Chinese))

[17] 陈建华,周冬冬,陈魏. 基于马尔科夫-蒙特卡罗法的配电网分段孤岛划分[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(1):113-118. (Chen Jianhua,Zhou Dongdong,Chen Wei. Segmentation island partition of distribution network based on markov? monte Carlo method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2023,44(1):113-118. (in Chinese))

[18] 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. (in Chinese))

[19] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya,Chen Shizhuang,Zhang Guike,et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[20] 高攀,秦川,武思远,等. 机理-数据混合驱动的气象敏感负荷需求响应潜力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):85-92. (Gao Pan,Qin Chuan,Wu Siyuan,et al. Mechanism-data hybrid driven assessment method for demand response potential of meteorologically sensitive load[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 85-92. (in Chinese))

[21] Liu Yang,Xiao Xianyong,Zhang Xiaoping,et al. Multi-objective optimal STATCOM allocation for voltage Sag mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1410-1422.

(收稿日期:2025-01-20 编辑:刘晓艳)