

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240236

综合提升新能源高占比受端电网小干扰和暂态电压稳定性的 SVG 优化配置方法

徐衍会¹, 任晋¹, 田鑫², 张玉跃²

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250001)

摘要: 由于新能源发电设备的弱支撑性, 新能源高占比的受端电网的电压支撑强度难以满足系统安全稳定运行的要求。为了解决现有静止无功发生器(static var generator, SVG)配置方法未能充分提升系统小干扰电压稳定性和暂态电压稳定性的问题, 提出了一种综合考虑系统小干扰电压稳定和暂态电压稳定的 SVG 优化配置方法。首先, 在第一阶段考虑 SVG 投资运行总成本和系统小干扰电压稳定裕度, 在第二阶段引入 SVG 接入对系统故障后暂态电压稳定裕度的影响。然后, 利用基于组合赋权法和相对熵距离的改进理想解法得到最优配置方案。最后, 应用 PSD-BPA 对新能源高占比受端电网算例进行分析, 验证了所提配置方法能充分发挥 SVG 对系统电压稳定的提升作用。
关键词: 受端电网; 小干扰电压稳定性; 暂态电压稳定性; 静止无功发生器

An SVG optimal configuration method for enhancing small disturbance and transient voltage stability in a receiving-end power grid with a high proportion of renewable energy

XU Yanhui¹, REN Jin¹, TIAN Xin², ZHANG Yuyue²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: Because of the weak supportive nature of new energy generation equipment, it is difficult for the voltage support capability of the receiving-end power grid with high penetration of new energy to meet the requirements for system safety and stability. Addressing the inadequacy of existing SVG configuration methods to fully enhance both small disturbance and transient voltage stability, a comprehensive optimization method for SVG configuration considering both aspects is proposed. In the first stage, the total investment and operational costs of SVG and the voltage stability margin during small disturbances of the system are considered. In the second stage, the impact of SVG access on transient voltage stability margin of the system after faults is introduced. Then, the optimal configuration scheme is obtained using an improved ideal solution method based on combination weighting and relative entropy distance. Finally, the PSD-BPA is applied to analyze a case study of a high-penetration new energy receiving-end power grid, validating that the proposed configuration method can effectively enhance the voltage stability of the system through SVG.

This work is supported by the Management Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202499006A-1-1-ZN).

Key words: receiving-end power grid; small disturbance stability; transient voltage stability; SVG

0 引言

为加快实现“碳达峰、碳中和”目标, 构建以新能源为主体的新型电力系统已成为必然趋势^[1-3]。

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5100-202499006A-1-1-ZN)

构建新型电力系统、维持系统安全稳定运行是根本前提, 随着新能源渗透率增加, 传统同步发电机装机占比下降, 电力系统的电压支撑能力下降, 尤其是同步发电机占比进一步降低的大型受端电网, 其电压稳定问题面临着更加严峻的挑战^[4-5]。一方面, 大规模新能源接入导致受端电网的新能源场站短路比水平下降, 新能源设备动态特性与电网动态特性

耦合程度增加,系统易发生振荡失稳等小干扰稳定问题^[6-7]。另一方面,在受端电网故障后的暂态过程中,由于缺少同步发电机的动态无功支撑,进一步恶化了受端电网的暂态电压稳定性^[8]。工程实际中,常用静止无功发生器(static var generator, SVG)等无功补偿装置增强系统电压支撑能力^[9]。但 SVG 投资运行成本昂贵,因此需要对其接入位置和容量进行合理规划,最大程度地发挥其对系统电压稳定的提升作用。

围绕基于短路比的系统稳定裕度及无功补偿对短路比的影响,相关文献进行了研究。短路比最初在分析直流输电并网时被提出,后经过推广至新能源并网系统。文献[10]分析了 SVG 对交直流系统强度的影响,指出 SVG 能够增加交流系统的短路容量,从而提升系统强度,但并未提出 SVG 具体的配置方法。对于多新能源馈入系统,文献[11]采用短路比来量化新能源并网系统的电压支撑强度,并用来分析风电接入弱系统后的稳定性问题。文献[12]定义了多新能源馈入系统的广义短路比(generalized short circuit ratio, gSCR),实现了对多新能源馈入系统小干扰稳定裕度的量化,但并未讨论动态无功补偿设备对系统小干扰稳定裕度的影响。文献[13]基于广义短路比量化了 SVG 对新能源多馈入系统广义短路比的影响,但未给出 SVG 具体选址定容方法。文献[14]基于传统改进短路比指标,提出了一种可以提升系统强度的动态无功补偿设备的规划方法,但未能考虑动态无功补偿设备对系统暂态电压稳定裕度的影响。文献[15]提出了一种计及短路比提升和暂态过电压抑制的调相机优化配置方法,可在提升新能源场站短路比水平的同时抑制新能源机端暂态过电压,但其应用场景是送端电网,对于受端电网的适用性尚待探究。

针对无功补偿设备对系统暂态电压稳定性的影响,相关学者进行了研究。文献[16]提出了一种基于多二元表判据的暂态电压稳定裕度量化指标,解决了基于单二元表判据量化指标不能考虑电压跌落程度等问题,适用于工程中快速判断系统暂态电压稳定性,可作为无功优化配置的评价指标,但并未给出具体的规划方法。文献[17]提出考虑综合暂态电压稳定指标的分布式调相机优化配置方法,考虑多场景和多故障下的暂态电压稳定性约束,但并未考虑无功补偿设备对系统小干扰稳定的影响。

综上所述,针对多新能源馈入的受端电网无功优化配置问题,现有研究均未同时考虑系统小干扰电压稳定和暂态电压稳定问题,导致无法充分发挥 SVG 在同时提升系统小干扰电压稳定性和暂态电

压稳定性方面的效果。

针对现有研究的不足,本文提出了一种综合考虑系统小干扰电压稳定裕度和暂态电压稳定裕度提升的两阶段 SVG 优化配置方法。首先,分别从系统小干扰电压稳定和暂态电压稳定两个角度分析了 SVG 对系统电压稳定性的影响;然后,构建了综合考虑系统小干扰电压稳定和暂态电压稳定的 SVG 规划模型;最后,在新能源高占比受端电网算例中验证了所提方法的有效性。

1 SVG 对系统电压稳定性影响分析

1.1 SVG 对系统小干扰电压稳定性影响分析

新能源高占比的受端电网如图 1 所示,节点 1— N 为新能源换流器节点,其中有 n_1 个风电场和 n_2 个光伏电场;图 1 中阴影部分有 M 个中间节点;剩余节点为无穷大节点。

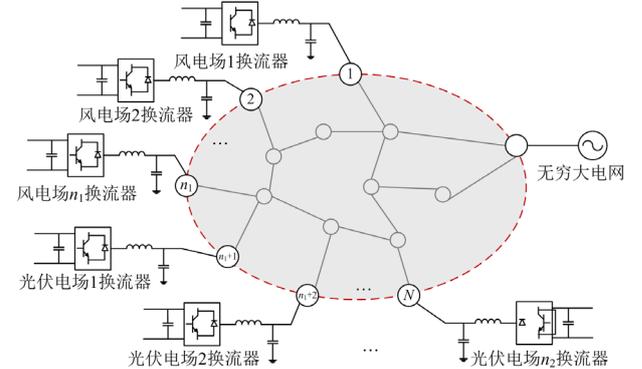


图 1 新能源高占比的受端电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of receiving-end power grid with high proportion of new energy

由于风电场换流器与光伏电场换流器的动态特性具有差异性,图 1 所示的多样化新能源馈入系统又被称为异构系统。文献[12]基于特征值摄动理论,证明了可以构造一个等效的同构多馈入系统来逼近异构系统的稳定性,将广义短路比推广到异构系统并且给出了广义短路比的计算方法。

$$\lambda_{\text{GSCR}} = \min f_{\text{eig}}(\mathbf{J}_{\text{eq}}) \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_{\text{eq}} = \mathbf{S}_{\text{B}}^{-1}(\mathbf{B}_{11} - \mathbf{B}_{12}\mathbf{B}_{22}^{-1}\mathbf{B}_{21}) \quad (2)$$

式中: λ_{GSCR} 为系统的广义短路比; $f_{\text{eig}}(\cdot)$ 为求系统矩阵特征值的函数; \mathbf{J}_{eq} 为系统拓展导纳阵; \mathbf{S}_{B} 为新能源机组额定容量构成的对角阵; \mathbf{B}_{11} 、 \mathbf{B}_{12} 、 \mathbf{B}_{21} 、 \mathbf{B}_{22} 均为系统节点导纳阵 \mathbf{B} 的分块矩阵且 $\mathbf{B}_{11} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 、 $\mathbf{B}_{12} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ 、 $\mathbf{B}_{21} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 、 $\mathbf{B}_{22} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 。

定义等效同构系统 Σ_0 , 记为

$$\Sigma_0: \mathbf{Y}_{\text{sys}}(s) = \mathbf{I}_N \otimes \bar{\mathbf{A}}(s) + \mathbf{J}_{\text{eq}} \otimes \mathbf{I}_2 \quad (3)$$

其中

$$\bar{\mathbf{A}}(s) = \bar{\mathbf{G}}(s)\boldsymbol{\gamma}^{-1}(s) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\gamma}(s) = \begin{bmatrix} \frac{s\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} & \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \\ \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} & \frac{s\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Y}_{\text{sys}}(s)$ 为系统的导纳传递函数矩阵; \mathbf{I}_N 、 \mathbf{I}_2 为单位阵; “ \otimes ” 为 Kronecker 积; $\bar{\mathbf{G}}(s)$ 为设备侧等效 x - y 坐标系导纳传函矩阵; $\boldsymbol{\gamma}(s)$ 为网络侧导纳传函矩阵; ω_0 为同步角频率。当设备侧同时考虑风光电场换流器和 SVG 动态特性时, 设备侧导纳传函矩阵可表示为

$$\bar{\mathbf{G}}(s) = \sum_{i=1}^{n_1} p_{li} \mathbf{G}_{wi}(s) + \sum_{i=n_1+1}^N p_{li} \mathbf{G}_{pi}(s) + \sum_{j=N+1}^{N+M} p_{2j} \mathbf{G}_{sj}(s) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{G}_{wi}(s)$ 、 $\mathbf{G}_{pi}(s)$ 、 $\mathbf{G}_{sj}(s)$ 分别为风机换流器、光伏换流器、SVG 在全局 x - y 坐标系下的导纳传函矩阵, 其推导过程可参考文献[18]; p_{li} 为节点 i 的新能源设备权重系数; p_{2j} 为节点 j 的 SVG 权重系数。 p_{li} 、 p_{2j} 计算表达式分别为

$$p_{li} = v_{li} u_{li} \quad (7)$$

$$p_{2j} = S_{\text{Bsj}} \bar{\mathbf{u}}_1^T \begin{bmatrix} \mathbf{S}_B^{-1} \\ \mathbf{I}_M \end{bmatrix} \mathbf{E}_{sj} \bar{\mathbf{v}}_1 \quad (8)$$

其中

$$\bar{\mathbf{u}}_1^T = [\mathbf{u}_1^T \quad -\mathbf{u}_1^T \mathbf{S}_B^{-1} \mathbf{B}_{12} \mathbf{B}_{22}^{-1}] \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ -\mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{B}_{21} \mathbf{v}_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{u}_1^T 和 \mathbf{v}_1 分别为拓展导纳阵 \mathbf{J}_{eq} 的最小特征值对应的归一化后的左右特征向量; v_{li} 和 u_{li} 分别为 \mathbf{v}_1 和 \mathbf{u}_1^T 第 i 列元素; S_{Bsj} 为接入节点 j 的 SVG 容量, 当节点 j 未接入 SVG 时 S_{Bsj} 为 0; \mathbf{E}_{sj} 为仅第 j 个对角元素为 1 其余元素为 0 的方阵; \mathbf{I}_M 为单位阵。等效同构系统的特征方程可表示为

$$\det(\mathbf{Y}_{\text{sys}}(s)) = 0 \quad (11)$$

式中, $\det(\cdot)$ 表示求行列式。原异构多馈入系统的稳定性可用上述等效同构系统的稳定性等效, 同构多馈入系统又可解耦为多个不同短路比的单馈入系统^[19], 因此同构多馈入系统的稳定性由最弱单馈入系统决定, 其特征方程如式(12)所示。

$$\det(\bar{\mathbf{A}}(s) + \lambda_{\text{GSCR}} \cdot \mathbf{I}_2) = 0 \quad (12)$$

系统的临界短路比为系统主导特征根实部为

零时的广义短路比, 在系统设备控制参数已知时, 其计算方法如式(13)所示。

$$\lambda_{\text{CGSCR}} = \arg\{\bar{\mathbf{A}}(j\omega) + \lambda_{\text{GSCR}} \cdot \mathbf{I}_2 = 0\} \quad (13)$$

式中: λ_{CGSCR} 为系统临界短路比; $\arg\{\cdot\}$ 表示求方程的根; ω 为系统临界稳定对应的振荡频率。系统小干扰电压稳定裕度 β 为

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{GSCR}} - \lambda_{\text{CGSCR}}}{\lambda_{\text{CGSCR}}} \times 100\% \quad (14)$$

由上述分析可知, SVG 接入电网后改变了系统设备侧动态特性, 从而通过直接改变 $\bar{\mathbf{A}}(s)$ 来改变系统临界短路比, 进而改变系统小干扰电压稳定裕度。由式(6)可知, 当接入电网的 SVG 动态特性近似不变时, SVG 接入对系统小干扰电压稳定的影响由 p_{2j} 决定。由式(8)可知, 当电网结构确定时, 权重系数 p_{2j} 的大小由 SVG 接入电网的位置与容量大小决定, 其中 S_{Bsj} 包含 SVG 接入容量信息, \mathbf{E}_{sj} 包含了 SVG 接入位置信息。

综上所述, 在 SVG 控制参数合理的情况下, 系统可通过接入 SVG 减小 λ_{CGSCR} 来提高系统小干扰电压稳定裕度。

1.2 SVG 对系统暂态电压稳定性影响分析

电力系统暂态电压稳定性是由负荷的功率需求及系统向负荷提供功率的能力决定的, 利用如图 2 所示的戴维南等值系统可以简单地对此进行说明。

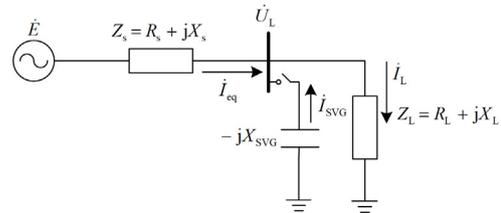


图 2 戴维南等值系统

Fig. 2 Thevenin equivalent system

图 2 中: \dot{E} 、 Z_s 分别为系统侧等值电势和阻抗; \dot{U}_L 为负荷节点电压, U_L 为其幅值; Z_L 、 i_L 分别为负荷阻抗及负荷电流; i_{SVG} 为 SVG 补偿电流; i_{eq} 为 SVG 接入后等效负荷电流。当 SVG 未接入系统时, 联立线路有功、无功功率表达式, 可求出负荷节点电压的表达式为

$$U_L = \left[\frac{\frac{E^2}{2} - P_L R_s - Q_L X_s \pm \sqrt{(P_L R_s + Q_L X_s - \frac{E^2}{2})^2 - Z_s^2 (P_L^2 + Q_L^2)}}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

稳态下负荷阻抗的模 $|Z_L|$ 大于系统等值阻抗的模 $|Z_s|$ 。暂态过程中, 负荷通过减少自身等效阻抗从而获得更多功率, 负荷阻抗模值由大变小(假设这个过程中负荷功率因数不变), 最终当 $|Z_L|=|Z_s|$, 系统存在电压唯一解, 系统运行于 PV 曲线上半支与下半支的交界处, 该负荷节点电压处于临界稳定状态, 若 $|Z_L|$ 继续下降, 则该点电压失稳^[20]。

系统并入 SVG 后, 根据电路等效原理, 可以将直流侧利用电容进行电压支撑的 SVG 等效为一个可调电容器 C_{SVG} ^[21]。从负荷节点向右看去, SVG 与负荷阻抗可等效为一个阻抗 Z_{eq} , 流过 Z_{eq} 的电流 \dot{I}_{eq} 与 SVG 补偿电流 \dot{I}_{SVG} 、负荷电流 \dot{I}_L 关系为

$$\dot{I}_{\text{eq}} = \dot{I}_L - \dot{I}_{\text{SVG}} \quad (16)$$

由电流关系可求得并入 SVG 后负荷节点等效阻抗 Z_{eq} 表达式为

$$Z_{\text{eq}} = \frac{X_L X_{\text{SVG}} - jR_L X_{\text{SVG}}}{R_L + j(X_L - X_{\text{SVG}})} \quad (17)$$

式中, X_{SVG} 为 SVG 等效电抗。对 $|Z_{\text{eq}}|^2$ 求 X_{SVG} 的偏导得

$$\frac{\partial |Z_{\text{eq}}|^2}{\partial X_{\text{SVG}}} = \frac{2X_{\text{SVG}}(R_L^2 + X_L^2)[R_L^2 + X_L^2 - X_L X_{\text{SVG}}]}{[R_L^2 + (X_L - X_{\text{SVG}})^2]^2} \quad (18)$$

因为高压输电系统中有 $R_L \ll X_L$, 可认为 $R_L \approx 0$, 则式(18)可简化为

$$\frac{\partial |Z_{\text{eq}}|^2}{\partial X_{\text{SVG}}} = \frac{2X_{\text{SVG}}(X_L^2)[X_L^2 - X_L X_{\text{SVG}}]}{(X_L - X_{\text{SVG}})^4} \quad (19)$$

在系统暂态过程中, SVG 等效电容 C_{SVG} 增大, 则对应的 X_{SVG} 减小。又由式(16)可知 $I_L > I_{\text{SVG}}$, 因此根据函数的单调性可知, 补偿后等效负荷阻抗的模值 $|Z_{\text{eq}}|$ 随 X_{SVG} 的减小而增大, 提升了系统的暂态电压稳定性。等效后重新求解系统电压可得到 SVG 补偿前后系统 PV 曲线, 如图 3 所示。SVG 接入系统后, PV 曲线上翘, 提高了系统电压水平, 并且系统向负荷提供功率的能力变大, 系统暂态电压稳定性得到改善。

为量化暂态电压改善情况, 定义系统暂态过程中电压如果满足 q 个二元表判据 $[(X_{\text{cr},1}, T_{\text{cr},1}), \dots, (X_{\text{cr},q}, T_{\text{cr},q})]$ 时认为系统暂态电压稳定, 此时节点 i 的暂态电压稳定裕度 η_i ^[16]为

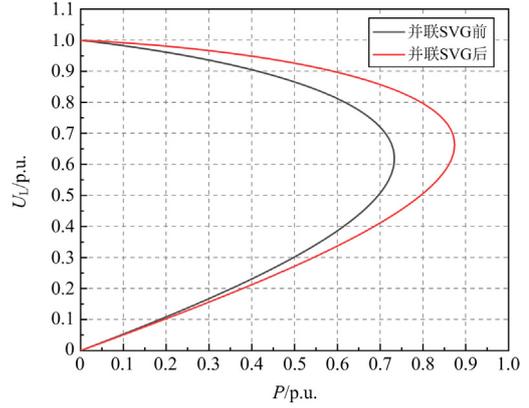


图 3 系统 PV 曲线图

Fig. 3 PV curve of the system

$$\eta_i = 1 - \sum_{j=1}^{q-1} K_j \int_{t_j}^{t_{j+1}} [V_N - V_i(t)] dt - K_q \int_{t_q}^{t'_q} [V_N - V_i(t)] dt - \sum_{j=1}^{q-1} K_j \int_{t'_{j+1}}^{t'_j} [V_N - V_i(t)] dt \quad (20)$$

式中: V_N 为额定电压; t_1, t_2, \dots, t_q 为节点 i 电压 $V_i(t)$ 分别低于 $V_{\text{cr},1}, V_{\text{cr},2}, \dots, V_{\text{cr},q}$ 的时刻; t'_1, t'_2, \dots, t'_q 为电压 $V_i(t)$ 恢复到 $V_{\text{cr},1}, V_{\text{cr},2}, \dots, V_{\text{cr},q}$ 的时刻; K_1, K_2, \dots, K_q 分别为区间 $(t_1, t_2) \cup (t'_2, t'_1), (t_2, t_3) \cup (t'_3, t'_2), \dots, (t_{q-1}, t_q) \cup (t'_q, t'_{q-1}), (t_q, t'_q)$ 对应的权重系数。SVG 接入后对系统暂态稳定的提升程度 $\Delta\eta_i$ 可定义为

$$\Delta\eta_i = \eta'_i - \eta_i \quad (21)$$

式中, η'_i 表示 SVG 接入后节点 i 的暂态电压稳定裕度。

2 考虑受端电网小干扰电压稳定和暂态电压稳定的 SVG 规划模型

规划模型可分为两个阶段, 如图 4 所示, 第一个阶段考虑 SVG 接入对系统小干扰电压稳定裕度的影响以及 SVG 接入系统的经济性, 优化配置 SVG 接入节点的容量与位置, 形成 Pareto 最优解集; 第二个阶段 SVG 接入对系统故障后暂态电压稳定裕度的影响作为考核指标, 与 Pareto 解集共同构成原始评估矩阵, 利用主客观组合赋权法对考核指标赋权, 利用基于相对熵的多属性决策排序方法对待选方案排序, 得到最优配置方案。

2.1 第一阶段规划模型

2.1.1 备选母线筛选

为提高计算效率, 应筛选出系统中薄弱节点。本文采用基于 p_{2j} 构造的不同节点对系统小干扰电

压稳定的贡献程度指标 \bar{p}_{2j} 为

$$\bar{p}_{2j} = \frac{p'_{2j}}{\sum_{j=1}^{N+M} p'_{2j}} \quad (22)$$

式中, p'_{2j} 为系统所有节点接入 SVG 容量为同一常数时的 SVG 权重系数。由式(8)可知, 当系统各节点接入单位容量的 SVG 时, 计算出的 p_{2j} 可反映不同节点接入单位容量 SVG 后对系统小干扰电压稳定的贡献程度, 可据此筛选 SVG 的备选节点。

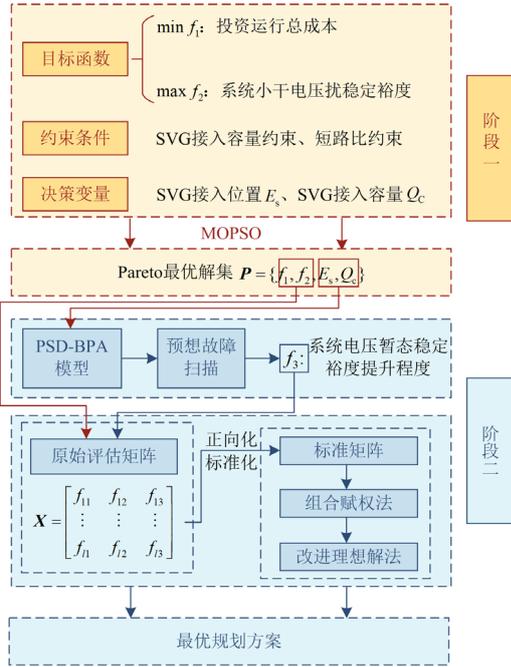


图4 两阶段 SVG 最优配置结构图

Fig. 4 Structure of two-stage SVG optimization configuration

2.1.2 SVG 规划模型构建

目标函数 1 为 SVG 投资运行总费用, 包含一次性投资费用以及运行费用, 其中一次性投资费用采用等年值法计算, 运行费用按照一次性投资费用的百分比计算^[22]。

目标函数 1 为

$$\min f_1 = C_T + C_Y = \sum_{i=1}^{N_c} Q_{Ci} \times C_p \times \frac{1}{(1+\tau)^y} + H \times C_T \quad (23)$$

式中: C_T 为一次性投资费用; C_Y 为运行维护费用; N_c 为 SVG 安装数量; Q_{Ci} 为节点 i 处安装 SVG 的容量; C_p 为 SVG 的单位容量价格, 单位为元/kvar; τ 为折现率; y 为设备使用年限; H 为运行维护费用占总投资费用的比例系数。考虑到一次性安装 SVG 的容量越大对应 SVG 单位容量价格越低, C_p 计算如式(24)^[23]所示。

$$C_p = e \times (0.0003s^2 - 0.3015s + 127.38) \quad (24)$$

式中: e 为人民币对美元的汇率; s 为 SVG 一次性安装容量, 单位 Mvar。

目标函数 2 为

$$\max f_2 = \frac{\lambda_{GSCR} - \lambda_{CGSCR}}{\lambda_{CGSCR}} \times 100\% \quad (25)$$

约束条件为

$$\begin{cases} x_c \in N_{ch} \\ 0 \leq Q_{ci} \leq Q_{cmax} \\ \lambda_{GSCR} \geq 0 \\ \lambda_{CGSCR} \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: x_c 为 SVG 接入节点位置; Q_{ci} 为节点 i 接入 SVG 容量; N_{ch} 为所有备选节点构成的集合; Q_{cmax} 为单个节点投入 SVG 的容量上限。

利用改进多目标粒子群算法对第一阶段规划模型进行求解, 其基本步骤如图 5 所示。

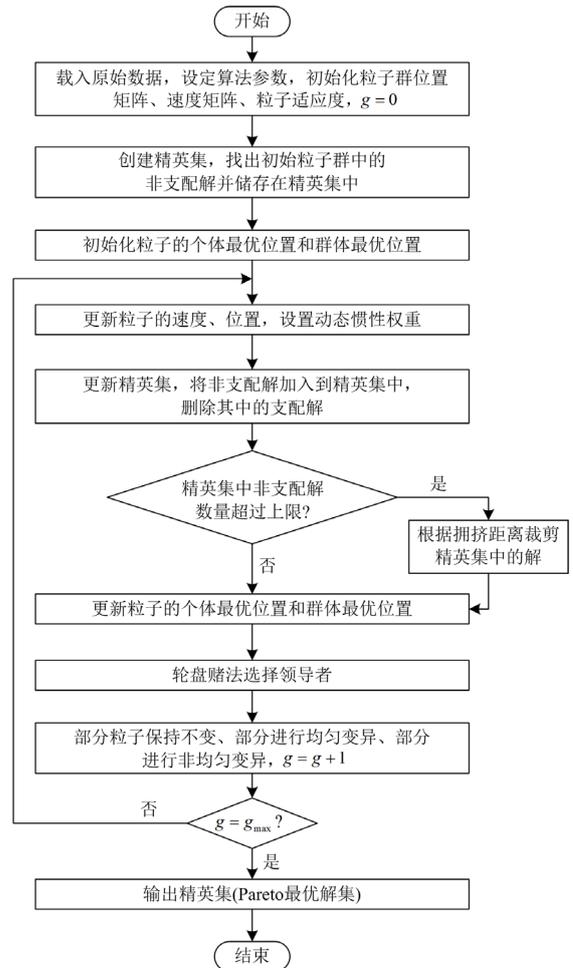


图5 第一阶段规划模型求解流程

Fig. 5 Diagram of the first-stage planning model solution process

2.2 第二阶段最优方案评估模型

2.2.1 SVG 接入方案对系统故障后暂稳提升程度量化指标计算

考虑备选方案在预想故障集所有故障下对系统暂态电压稳定裕度的提升程度, 引入备选方案第 3 个评价指标 f_3 来反映备选方案对系统整体的暂态电压稳定裕度的提升程度, 如式(27)所示。

$$\max f_3 = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_i} (\eta'_{ki} - \eta_{ki}) \quad (27)$$

式中: k 为故障编号; N_k 、 N_i 分别为预想故障集故障总数和受端电网节点总数; η_{ki} 为系统未配置 SVG 前节点 i 在故障 k 下的暂稳裕度值; η'_{ki} 表示系统按照某一个备选方案配置 SVG 后节点 i 在故障 k 下的暂稳裕度值。

l 个备选方案与 m 个考核指标, 可构建原始评估矩阵 \mathbf{X} , 如式(28)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{l1} & x_{l2} & \cdots & x_{lm} \end{bmatrix} \quad (28)$$

2.2.2 组合赋权

使用主观赋权法和客观赋权法相结合的组合赋权法给 3 个考核指标赋权, 使主观因素和客观因素均得到充分利用, 使赋权过程更合理。

1) 基于改进 AHP 法的主观权重计算

将多个指标按照重要程度由大到小排序, 根据专家意见确定考核指标两两之间的相对重要程度, 可构造判断矩阵 \mathbf{R} , 其构造过程可参考文献[24]。由判断矩阵 \mathbf{R} 可计算第 i 个指标的主观权重值 α_i 。

$$\alpha_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m r_{ij}} / \sum_{i=1}^m \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m r_{ij}} \quad (29)$$

式中, r_{ij} 为判断矩阵 \mathbf{R} 中的元素。

2) 基于 CRITIC 法的客观权重计算

(1) 正向化处理

采用功效系数法对原始评估矩阵 \mathbf{X} 中的指标进行正向化, 对于正项指标有

$$x'_{ij} = c + \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq l} x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq l} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq l} x_{ij}} \times d \quad (30)$$

对于逆向指标有

$$x'_{ij} = c + \frac{\max_{1 \leq i \leq l} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq l} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq l} x_{ij}} \times d \quad (31)$$

式中: x'_{ij} 为正向化矩阵 \mathbf{X}' 中元素; x_{ij} 为矩阵 \mathbf{X} 中元素; c 为平移量; d 为缩放系数。通常取 $c = 60$ 、

$d = 40$, 功效系数法具有区间稳定且指标值不受正负限制的特点。

(2) 无量纲化处理

由于正向化后矩阵 \mathbf{X}' 中各指标单位不统一, 需要进行无量纲化处理得到标准矩阵 \mathbf{X}'' , 如式(32)所示。

$$x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (x'_{ij})^2}} \quad (32)$$

式中, x''_{ij} 为标准矩阵 \mathbf{X}'' 中元素。

(3) 计算指标的客观权重

CRITIC 法通过指标间标准差和相关系数反应指标数据中蕴含的信息量, 根据信息量大小进行赋权。由标准矩阵 \mathbf{X}'' 可求出指标之间的相关系数 ρ_{ij} 和每个指标的标准差 σ_i 。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (x''_{ij} - \bar{x}_i'')^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (33)$$

$$\rho_{ij} = \text{cov}(\mathbf{X}''_i, \mathbf{X}''_j) / (\sigma_i \sigma_j) \quad (34)$$

式中: \bar{x}_i'' 表示第 i 个指标的均值; $\text{cov}(\mathbf{X}''_i, \mathbf{X}''_j)$ 表示标准矩阵 \mathbf{X}'' 第 i 列与第 j 列的协方差; ρ_{ij} 表示第 i 个指标与第 j 个指标之间的相关系数。每个指标中包含的信息量 G_i 可表示为

$$G_i = \sigma_i \sum_{j=1}^m (1 - \rho_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (35)$$

第 i 个指标中包含的信息量越大, 则对应 G_i 越大, 意味着该指标越重要, 最终第 i 个指标的客观权重 β_i 的计算如式(36)所示。

$$\beta_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^m G_j} \quad (36)$$

3) 综合权重计算

改进 AHP 算法计算得到的 α_i 和 CRITIC 法得到的 β_i 分别构成主观权重向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 和客观权重向量 $\boldsymbol{\beta}$, 为更好结合主客观权重, 使综合权重尽可能不偏向于其中任何一方, 本文采用最小鉴别信息原理来计算第 i 个指标的综合权重 ω_i , 其目标函数及约束条件如式(37)所示。

$$\begin{cases} \min J(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^m (\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i}) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (37)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 表示所有自变量 ω_i 构成的矩阵, 求解得到综合权重 ω_i 如式(38)所示。

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{\alpha_i \beta_j}} \quad (38)$$

2.2.3 基于相对熵距离的改进理想解法

理想解法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)常被用于解决多指标决策问题, 其基本思路是计算每个方案到正负理想解的欧氏距离, 利用相对贴进度来衡量方案接近正理想解和远离负理想解的程度, 最终选出最优方案。但传统理想解法存在逆序问题, 特别是当指标之间具有线性相关性时, m 个指标构建的空间不再是 m 维欧氏空间, 此时欧式距离公式不再能科学合理地表示方案到正负理想解的距离^[25]。

本文采用基于相对熵距离的改进理想解法, 利用相对熵衡量备选方案与理想方案之间的相似程度。由于相对熵是衡量两个概率分布间距离的非对称性度量并且满足三角不等式, 因此能够解决上述问题^[26]。具体过程如下所述。

1) 计算加权评估矩阵

根据权重向量 ω , 计算加权评估矩阵 Z 。

$$Z = X^T \omega \quad (39)$$

2) 确定正负理想解

定义正理想解为评估矩阵中各指标对应最大值的集合, 负理想解为各指标对应最小值的集合。

$$\begin{cases} Z^+ = \{z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+\} \\ z_j^+ = \max\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}\} \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} Z^- = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-\} \\ z_j^- = \min\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}\} \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (41)$$

式中: Z^+ 、 Z^- 分别表示正、负理想解; z_j^+ 、 z_j^- 分别表示 Z 中第 j 列元素的最大、最小值。

3) 计算相对熵距离

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^m \left\{ z_j^+ \log \frac{z_j^+}{z_{ij}^+} + (1 - z_j^+) \log \frac{1 - z_j^+}{1 - z_{ij}^+} \right\} \quad (42)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^m \left\{ z_j^- \log \frac{z_j^-}{z_{ij}^-} + (1 - z_j^-) \log \frac{1 - z_j^-}{1 - z_{ij}^-} \right\} \quad (43)$$

式中: z_{ij} 表示矩阵 Z 中元素; S_i^+ 表示第 i 个方案与正理想解的相对熵距离; S_i^- 表示第 i 个方案与负理想解的相对熵距离。

4) 计算相对贴进度

备选方案与理想方案的相对贴进度 C_i^* 计算如式(44)所示。

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-) \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (44)$$

相对贴进度反映了备选方案接近正理想方案和远离负理想方案的程度, 因此以 C_i^* 为备选方案的排序标准, 选出最优方案。

3 算例分析

本文采用中国电力科学研究院有限公司的新能源高占比受端电网工程算例为对象进行仿真分析。算例共 100 节点(主网架 48 个节点), 其中新能源机组出力 180 万 kW(风电 120 万 kW; 光伏 60 万 kW); 常规机组出力 386 万 kW, 直流馈入 80 万 kW, 其系统接线图如图 6 所示。

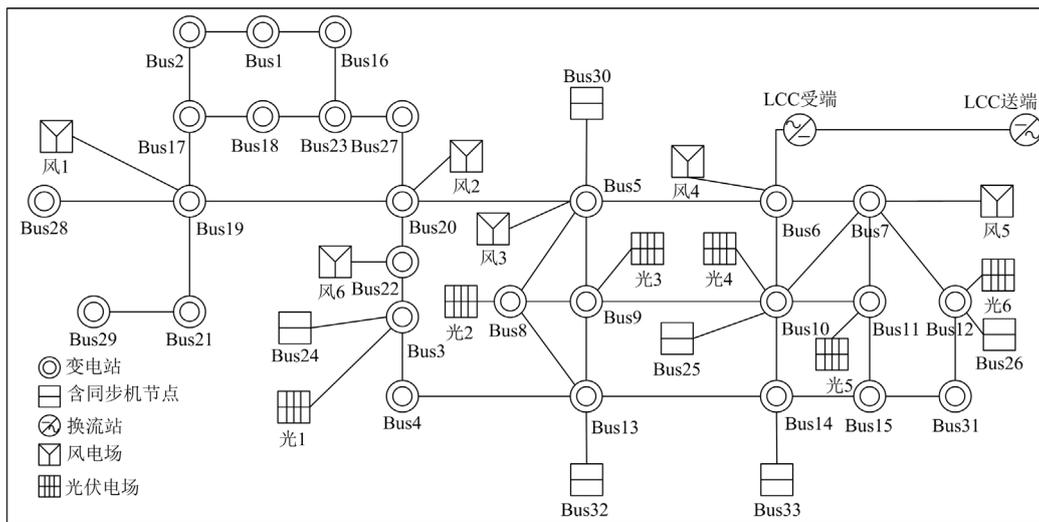


图 6 新能源高占比受端电网工程算例接线图

Fig. 6 Engineering example of the receiving-end power grid with high proportion of new energy

风机、光伏换流器和 SVG 的控制参数如表 1 所示。当 SVG 未接入系统时, 计算得到系统 λ_{GSCR} 为 3.5164, λ_{CGSCR} 为 1.2306, 系统的小干扰电压稳定裕度为 185.75%。

表 1 新能源换流器及 SVG 控制参数

Table 1 Control parameters of renewable energy converter and SVG

新能源换流器控制参数	风机	光伏	SVG 控制参数
直流电容/p.u.	0.038	0.038	0.038
滤波电感/p.u.	0.05	0.05	0.1
滤波电容/p.u.	0.05	0.05	—
直流电压外环比例积分参数	2.0,1	2.0,1	1.5
交流电压外环比例积分参数	—	—	50,1.08
电流内环比例积分参数	0.5,10	0.2,10	1.3,15
锁相环比例积分参数	15,3500	2.5,3200	24,3080
电压前馈滤波时间常数	500	500	1
直流电压参考值/p.u.	1	1	1
无功电流指令/p.u.	0	0	—
直流母线输入功率/p.u.	1	1	0

在第一阶段规划模型中, 折现率 τ 取 10%, 使用年限 y 取 20 年; 运行维护费用占总投资费用的比例系数 H 取 5%。计算 \bar{p}_{2j} 的值并接从大到小排序, 筛选前 4 个节点为待选节点, 如表 2 所示。

表 2 SVG 接入电网的待选节点

Table 2 Candidate bus of SVG connected with the grid

节点	权重系数
Bus22	0.040 96
Bus20	0.038 34
Bus4	0.036 44
Bus17	0.035 33

改进多目标粒子群算法的参数设置为: 种群大小取 200; 精英集大小取 120; 最大迭代次数取 100; 单个节点投入 SVG 的容量上限 $Q_{c,max}$ 取 300 Mvar。求解得到 Pareto 前沿如图 7 所示。

本文分别采用多目标改进粒子群算法(multiple objective particle swarm optimization, MOPSO)、多目标灰狼算法(multi-objective grey wolf optimizer, MOGWO)、第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA II)、第三代非支配排序遗传算法 NSGA III 求解一阶段规划模型, 4 种算法每代个体数为 100, 最大迭代次数为 50, 最终 Pareto 前沿保留 80 个解, 得到的 Pareto 解集如图 8 所示。

采用几个多目标优化算法的评价指标衡量 4 种算法对一阶段规划问题的求解性能, 计算结果如表 3 所示。

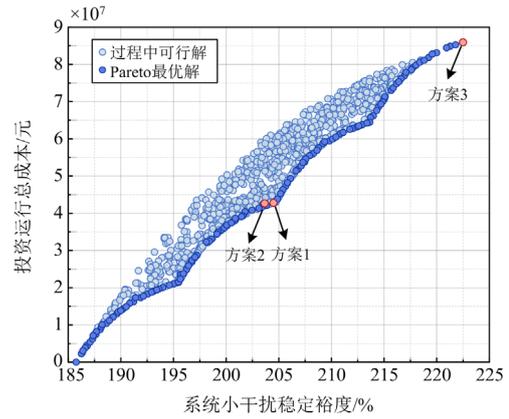


图 7 一阶段规划模型输出 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto frontier diagram of output of first-stage planning model

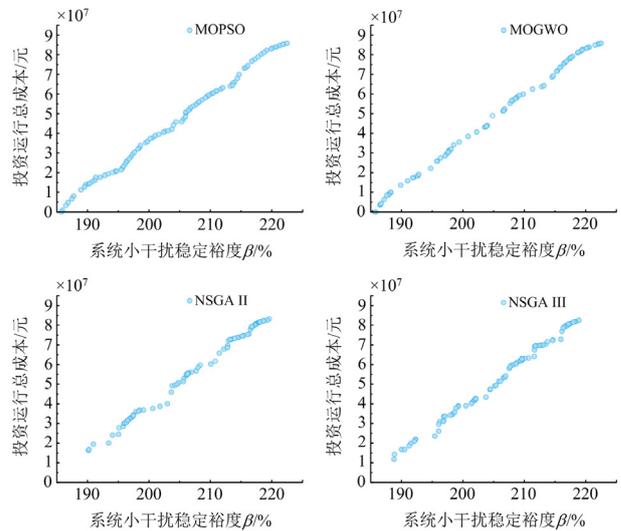


图 8 4 种算法的 Pareto 解集

Fig. 8 Pareto optimal set obtained by four algorithms

表 3 多目标优化算法性能对比

Table 3 Performance comparison of multi-objective optimization algorithms

指标	MOPSO	MOGWO	NSGA II	NSGA III
GD ^[27]	1.5097×10 ⁴	2.1294×10 ⁴	1.8251×10 ⁴	1.7212×10 ⁴
HV ^[28]	0.5597	0.5510	0.5432	0.5600
IGD ^[29]	2.8982×10 ⁵	5.1190×10 ⁵	1.6322×10 ⁶	1.0099×10 ⁶
Spacing ^[30]	4.1624×10 ⁵	6.2596×10 ⁵	5.1194×10 ⁵	5.6254×10 ⁵
Time/s	9.5278	296.8833	268.2228	272.35416

迭代距离(generational distance, GD)表征了算法的收敛性, GD 值越小, 算法收敛性越好; 超体积指标(hypervolume, HV)和反转世代距离(inverted generational distance, IGD)都同时评价算法的收敛性和多样性, HV 的值越大说明算法综合性能越好,

IGD 值越小说明算法综合性能越好; Spacing 计算每个解到其他解的最小距离的标准差, Spacing 值越小表明得到的解集越均匀; Time 为算法运行时间。由表 3 可知, 本文采用的 MOPSO 算法具有更好的综合性能, 在算法收敛性、解集多样性和解集均匀性上都更加优秀。因 MOPSO 便于并行计算个体适应度, 所以 MOPSO 算法还大幅提升了求解速度。

在 PSD-BPA 中生成系统的预想故障集。其中故障 1—60 为 $N-1$ 故障, 包含以下故障类型: (1) 火电机组出口三相短路后退出运行; (2) 新能源机组出口三相短路后脱网; (3) 输电线路发生三相短路后跳闸断开; (4) 直流单极闭锁; 故障 61—70 为 $N-2$ 故障, 故障类型为两条输电线路同时发生三相短路后跳闸断开。故障 0.1 s 后作用于系统, 故障持续 5 个周波后跳开。根据暂态电压稳定的实用判据和电网实际运行经验, 二元表判据选择(0.8, 10)^[31]、(0.75, 1)^[32]、(0.95, 60)。利用式(27)计算各备选方案对系统暂态电压稳定裕度的提升程度, 与一阶段生成 Pareto 解共同构成原始评估矩阵。

基于专家意见将 3 个指标重要程度由大到小排序如下: 暂态电压稳定提升程度 $f_3 >$ 系统小干扰电压稳定裕度 $f_2 >$ SVG 投资运行总成本 f_1 , 相对重要程度的标度值为 $r_{12} = 1.4$, $r_{23} = 1.6$, 计算得到各指标权重值如表 4 所示。

表 4 各指标权重值

Table 4 Weight value of each indicator

指标	主观	客观	综合
	权重值	权重值	权重值
SVG 投资运行总成本	0.2066	0.6046	0.4079
系统小干扰电压稳定裕度	0.3306	0.0319	0.1186
系统暂稳裕度提升程度	0.4628	0.3635	0.4735

确定正负理想解, 计算各方案到理想解的相对熵距离, 取相对贴程度最大的方案为最终方案, 该方案下 SVG 接入容量与产生效益如表 5 中的方案 2 所示。表 5 中方案 1 为仅考虑第一阶段得到的最终方案, 方案 2 为本文提出方法得到的最终方案, 方案 3 为传统 TOPSIS 法筛选得到的最终方案。

仅考虑一阶段规划模型时, 算法更倾向于选择权重系数 \bar{p}_{2j} 更高的节点, 将 SVG 对系统小干扰电压稳定裕度的提升最大化, 因此方案 1 中选择了权重系数更高的节点 22 和 20。方案 2 综合考虑 SVG 对系统小干扰稳定和暂态电压稳定的影响, 放弃了权重系数更高的节点 20, 选择了暂态过程中表现更好的节点 17 作为 SVG 接入节点。与方案 1 相比, 方案 2 在总成本与小干扰电压稳定裕度基本接近的

同时, 大幅提升了系统暂态电压稳定裕度, 更加充分地发挥了 SVG 对系统小干扰电压稳定裕度和暂态电压稳定裕度的提升程度。

表 5 SVG 配置方案

Table 5 Schemes for SVG configuration

SVG 接入位置	SVG 接入容量/Mvar		
	方案 1	方案 2(最优)	方案 3
Bus17	0	289.25	300
Bus20	300	0	300
Bus22	293.75	299.85	300
Bus4	0	0	300
生产效益	方案 1	方案 2	方案 3
SVG 投资运行总成本/万元	4278.30	4264.55	8593.00
系统小干扰电压稳定裕度/%	204.45	203.66	222.49
系统广义短路比	3.5164	3.5164	3.5164
系统临界短路比	1.1550	1.1580	1.0904
系统暂稳裕度提升程度	503.1385	510.4890	727.8706

图 9 展示了方案 2 对系统暂稳裕度提升优于方案 1 的程度, 可见系统在预想故障扫描过程中, 除故障 48、59、68、69 四个故障外, 在其余所有故障下方案 2 的表现都更好, 表明在方案 2 下系统拥有更好的暂态电压稳定性。

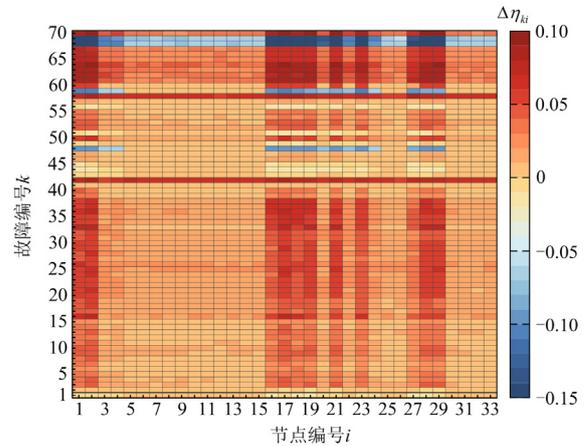


图 9 方案 2 对系统暂稳裕度提升优于方案 1 的程度

Fig. 9 Diagram of the extent to which scheme 2 improves the system transient stability margin better than scheme 1

方案 3 为使用传统 TOPSIS 法筛选出来的最优解, 观察表 5 中方案 3 的 SVG 容量可以发现所有待选节点接入 SVG 容量都取到了上限, 备选方案排序失败, 这是因为系统的小干扰电压稳定裕度与暂态电压稳定裕度存在线性相关性, 导致很多备选方案都分布在正负理想解连线的垂直平分面上, 传统欧

氏距离不再能科学合理地表示方案到正负理想解的距离，所以这些备选方案无法正确有效排序。

最终方案的效果为：在成本方面，方案的投资运行总成本为 4264.55 万元。在系统小干扰稳定方面，系统在接入 SVG 后，系统广义短路比为 3.5164 不变，而临界短路比从原来的 1.2306 下降到了 1.1580，系统小干扰电压稳定裕度从原来的 185.75% 提升到了 203.66%。在系统暂态电压稳定方面，方案 2 对系统的暂稳裕度的提升程度是 510.4890，对应到故障集中每个故障的提升程度如图 10 所示。

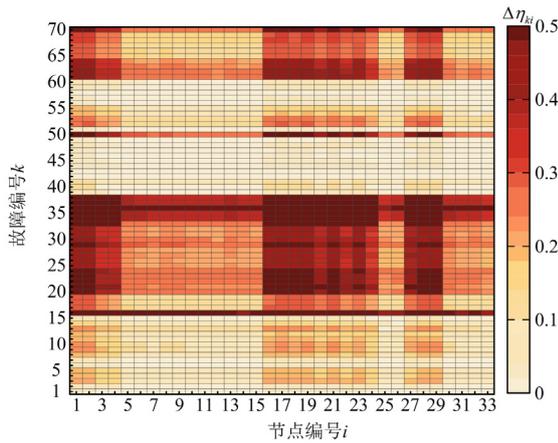


图 10 最优方案对系统暂态电压稳定裕度提升程度
Fig. 10 Diagram of the degree to which the optimal scheme improves the transient stability margin of the system

图 11 则更直观地展示了在发生故障 16 时，系统配置 SVG 前后电压恢复曲线。

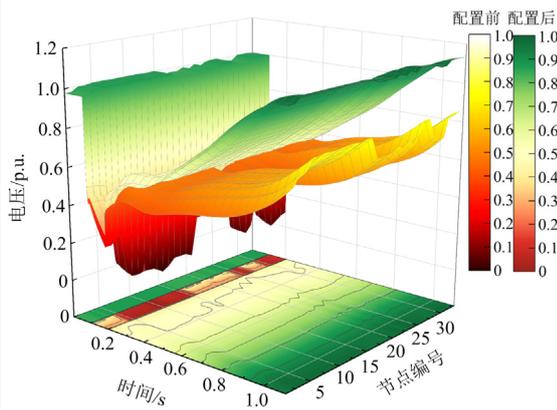


图 11 最终方案在故障 16 下的效果图
Fig. 11 Effect diagram of the final scheme under fault 16

综上所述，本文提出的 SVG 优化配置方法兼顾了规划方案的经济性、系统小干扰电压稳定裕度和系统暂态电压稳定裕度，合理配置 SVG 接入系统的位置和容量，充分发挥了 SVG 对系统电压稳定的

提升作用。

4 结论

本文在量化分析 SVG 对系统小干扰和暂态电压稳定裕度影响的基础上，同时考虑 SVG 投资运行总成本，提出了考虑系统小干扰电压稳定和暂态电压稳定的受端电网两阶段 SVG 优化配置方法，所得主要结论如下所述。

1) 本文提出的受端电网两阶段 SVG 优化配置模型同时考虑了配置方案的经济性、SVG 对系统小干扰稳定和暂态电压稳定的影响，充分发挥 SVG 对系统小干扰和暂态电压稳定裕度的提升作用，提高受端电网对新能源的综合电压支撑能力，为新能源高占比受端电网 SVG 优化配置提供了新思路。

2) 所提基于组合赋权法和相对熵距离的改进理想解法充分利用主观赋权法和客观赋权法的互补性，使各项指标权重更加合理，并用相对熵距离代替传统理想解法采用的欧式距离，解决了传统理想解法两端中垂线上的点无法有效排序的问题，提高了备选方案排序的准确性。

参考文献

[1] 郭庆来, 兰健, 周艳真, 等. 基于混合智能的新型电力系统运行方式分析决策架构及其关键技术[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 1-13.
GUO Qinglai, LAN Jian, ZHOU Yanzhen, et al. Architecture and key technologies of hybrid-intelligence-based decision-making of operation modes for new type power systems[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 1-13.

[2] 印欣, 张锋, 阿地利·巴拉提, 等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 115-124.
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI · Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.

[3] 郁海彬, 董帅, 陆增洁, 等. 新型电力系统下储能参与电力调峰调频辅助市场的竞标策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 48-60.
YU Haibin, DONG Shuai, LU Zengjie, et al. Bidding strategy of energy storage participating in the auxiliary market of peak and frequency modulation in new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 48-60.

[4] 张红丽, 刘福锁, 李威. 考虑新能源短时波动的大电网在线暂态安全稳定控制方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 166-173.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei. Online control method

- for transient safety and stability of large-scale power grid considering short-term fluctuations of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(20): 166-173.
- [5] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于 MPC-VSG 的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [6] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(12): 1-13.
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(12): 1-13.
- [7] VERMA N, KUMAR N, GUPTA S, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-26.
- [8] 李轻言, 林涛, 杜蕙, 等. 面向直流受端新型电力系统暂态电压稳定的紧急控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 195-202.
LI Qingyan, LIN Tao, DU Hui, et al. Emergency control for transient voltage stability of HVDC receiving-end new power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 195-202.
- [9] 唐英杰, 查晓明, 田震, 等. 弱电网条件下虚拟同步机与 SVG 并联系统的暂态稳定性分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 4020-4034.
TANG Yingjie, CHA Xiaoming, TIAN Zhen, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous generator and SVG parallel system under weak grid conditions[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 4020-4034.
- [10] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. *电网技术*, 2003, 27(11): 18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11): 18-21.
- [11] STRACHAN N P W, JOVICIC D. Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak AC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2779-2788.
- [12] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [13] 袁辉, 辛焕海, 王冠中, 等. 含 SVG 的新能源多馈入系统振荡分析和广义短路比计算[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(14): 38-46.
YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Guanzhong, et al. Analysis on oscillation of multi-infeed system with renewable energy and static var generator and calculation of its generalized short-circuit ratio[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(14): 38-46.
- [14] 罗天. 交直流混联电网动态无功补偿规划与优化方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
LUO Tian. Planning and optimization method for dynamic var compensation in hybrid AC-DC power grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [15] 杨浩, 刘虎, 丁肇豪, 等. 计及短路比提升与暂态过电压抑制的含高比例风电送端电网两阶段式调相机优化配置[J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 540-552.
YANG Hao, LIU Hu, DING Zhaohao, et al. Two-stage optimal configuration of condenser for high-proportion wind power sending-end power grid considering short circuit ratio increase and transient overvoltage suppression[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 540-552.
- [16] 薛安成, 周健, 刘瑞煌, 等. 采用多二元表判据的实用暂态电压稳定裕度指标研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4117-4125, 4317.
XUE Ancheng, ZHOU Jian, LIU Ruihuang, et al. A new practical transient voltage stability margin index based on multiple-two-element notation criterion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4117-4125, 4317.
- [17] 索之闻, 李晖, 张锋, 等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(23): 133-141.
SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 133-141.
- [18] 董炜. 弱同步电网中新能源并网系统的复电路建模与小干扰稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
DONG Wei. Modelling and small signal stability analysis based on complex circuit for renewable energy integrated systems in weakly synchronized grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [19] DONG Wei, XIN Huanhai, WU Di, et al. Small signal

- stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1393-1403.
- [20] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑 SVG 补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2636-2644.
ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2636-2644.
- [22] 张涛, 徐雪琴, 史苏怡, 等. 基于改进多种群量子粒子群算法的 STATCOM 选址及容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 75-81.
ZHANG Tao, XU Xueqin, SHI Suyi, et al. Optimal location and parameter setting of STATCOM based on improved multiple population quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 75-81.
- [23] 上官海洋, 向铁元, 张巍, 等. 基于智能优化算法的 FACTS 设备多目标优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2193-2199.
SHANGGUAN Haiyang, XIANG Tiejuan, ZHANG Wei, et al. Intelligent optimization algorithm based multi-objective optimal configuration for FACTS equipments[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2193-2199.
- [24] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 164-172.
WANG Min, ZOU Jie, WANG Huilin, et al. Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 164-172.
- [25] 王先甲, 汪磊. 基于马氏距离的改进型 TOPSIS 在供应商选择中的应用[J]. 控制与决策, 2012, 27(10): 1566-1570.
WANG Xianjia, WANG Lei. Applications of TOPSIS improved based on Mahalanobis distance in supplier selection[J]. Control and Decision, 2012, 27(10): 1566-1570.
- [26] 赵萌, 邱菀华, 刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1098-1100, 1104.
ZHAO Meng, QIU Wanhua, LIU Beishang. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1098-1100, 1104.
- [27] SCHUTZE O, ESQUIVEL X, LARA A, et al. Using the averaged Hausdorff distance as a performance measure in evolutionary multi-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2012, 16(4): 504-522.
- [28] ZITZLER E, THIELE L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [29] BOSMAN P A N, THIERENS D. The balance between proximity and diversity in multi-objective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 174-188.
- [30] BANDYOPADHYAY S, PAL S K, ARUNA B. Multi-objective GAs, quantitative indices, and pattern classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2004, 34(5): 2088-2099.
- [31] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定计算技术规范: DL/T1234—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [32] 中国南方电网电力调度通信中心. 南方电网安全稳定计算分析导则: Q/CSG11004—2009[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2009.

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-06-14

作者简介:

徐衍会(1978—), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为动态电力系统分析与负荷建模; E-mail: xuyanhui23@sohu.com

任晋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定性分析; E-mail: renjin@ncepu.edu.cn

田鑫(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新型电力系统规划. E-mail: aatianxin@163.com

(编辑 张颖)