

基于多目标粒子群算法的新能源汇集网架规划

刘超男¹, 黄勇^{1,2}, 赵成勇¹

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国家电网有限公司特高压事业部, 北京 100031)

摘要: 沙漠、戈壁、荒漠大规模新能源基地交流汇集网架面临无常规电源支撑、无交流主网联络的问题, 基于构网控制的换流站集中送出可为交流汇集网架提供电压支撑, 通过构网换流站的优化选址可最大化提高交流网架电压强度。对此, 提出了一种构网柔直提供电压支撑的新能源汇集网架电压强度评估方法, 并提出采用多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)实现上述场景中构网换流站优化选址, 提升新能源汇集网架整体电压强度。首先, 根据设备之间的电气距离与设备并网后引起的电压波动, 推导出由构网型换流站提供电压支撑的新能源辐射型交流汇集网架的电压强度的评估方法。然后, 将所提网架强度评估方法用于多目标粒子群算法, 构建构网型换流站的优化选址算法模型, 进行新能源交流汇集网架规划。最后, 通过算例验证了所提网架电压强度评估方法的准确性, 以及构网换流站优化选址对网架整体电压强度提升的合理性。

关键词: 沙漠、戈壁、荒漠; 交流电网强度; 新能源汇集; 电网规划; 多目标粒子群

Renewable Energy Collection Grid Planning Based on Multi-Objective Particle Swarm Algorithm

LIU Chaonan¹, HUANG Yong^{1,2}, ZHAO Chengyong¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. UHV Transmission Business Unit, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Large-scale renewable energy bases in deserts, Gobi areas, and wastelands face challenges in their AC collection grid frameworks, such as lacking conventional power source support and AC main grid connections. Grid-forming converter stations configured for centralized power delivery can provide voltage support to the AC collection grid. Optimizing the placement of these grid-forming converter stations can maximize the voltage strength of the AC grid. To address this, this paper proposes a voltage strength evaluation method for renewable energy collection grids supported by grid-forming voltage-sourced converters (VSCs). Furthermore, it introduces a multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm to optimize the placement of grid-forming converter stations in such scenarios, thereby enhancing the overall voltage strength of the renewable energy collection grid. Firstly, based on the electrical distance between devices and the voltage fluctuations caused by their grid integration, a voltage strength evaluation method is derived for radial AC collection grids supported by grid-forming converter stations. Secondly, the proposed grid strength evaluation method is integrated into the MOPSO algorithm to construct an optimization model for the placement of grid-forming converter stations, facilitating the planning of renewable energy AC collection grids. Finally, case studies verify the accuracy of the proposed grid voltage strength evaluation method and demonstrate the rationality of optimizing converter station placement for improving overall grid voltage strength.

Key words: deserts, Gobi areas, and wastelands; AC grid strength; renewable energy collection; power grid planning; MOPSO

0 引言

我国西部地区能源丰富,其中沙戈荒地区预计2030年新能源总装机规模达455 GW,但此类地区面临无常规电源支撑,新能源交流汇集网架电压稳定面临风险^[1-2]。构网型(grid-forming, GFM)控制的换流站并网被广泛认为是解决电网强度不足的有效手段^[3-6],对于由构网柔直提供电压支撑的交流网架,通过合理规划网架可以最大化增强网架强度。

新能源交流汇集网架规划属于多约束、非线性、多目标的组合优化问题,其核心规划目标聚焦于可靠性与经济性。综合考量不同类型新能源的出力特性,借助送端构网型换流站的优化选址,达成网架强度的最大化,同时最大程度降低输电距离与线路损耗,以保障系统的可靠性与经济性。

首先是对网架强度的评估,短路比(short circuit ratio, SCR)作为量化电网强度的核心指标,其定义为系统短路容量与接入设备额定容量的比值。通过将实际短路比与系统临界短路比(critical short circuit ratio, CSCR)进行对比分析,可有效评估电网强度是否满足新能源设备稳定运行的阈值要求。

针对多场站汇集系统,国际大电网组织(Conference International Des Grands Reseaux Electriques, CIGRE)在考量各换流站之间的相互作用后,提出了多馈入短路比指标(multi-infeed short circuit ratio, MISCR),该指标用于评估多馈入并网系统受端不同节点的电压支撑能力^[7]。文献[8]依据系统网架结构构建导纳矩阵,通过求解最小特征值作为广义短路比(generalized short circuit ratio, GSCR)以确定网架的最薄弱点。然而,由于该方法涉及高阶雅可比矩阵特征值的计算,其计算复杂度和动态场景适应性仍有待进一步优化。文献[9]在此基础上,结合短路电流的幅值与相位特性提出了多馈入暂态短路比指标(multi-infeed transient short circuit ratio, MITSCR)。文献[10-11]基于叠加定理剖析新能源场站接入对并网点电压的影响构建了SCR-S和SCR-U两种新能源并网短路比指标。但上述方法均是在考量新能源多馈入系统并入有电源或主网架支撑的交流电网时节点电压的稳定性,且仅将新能源换流站并网点视作PQ节点进行处理,未能反映换流站控制策略对电网稳定性的影响。

其次是对交流网架的规划,网架规划模型因涉及大量0-1决策变量,属于典型的混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)问题。针对此类复杂优化问题,现多采用启发式算法,包含遗传算法^[12-13]、粒子群算法^[14-15]等。文献[16]通过遗传算法与广义简约梯度法的混合优化策略实现方案寻优,但在处理大规模问题时存在计算效率低、易陷入局部最优等局限性。相较之下,二阶锥规划法^[17-18]采用二阶锥松弛技术将原始非凸非线性潮流约束转化为凸规划问题,借助高效求解器实现快速求解,但该方法在送端新能源交流汇集网架的规划中可能存在适应性不足的问题。

基于此,本文提出了一种针对构网柔直提供电压支撑的大规模新能源交流汇集网架的电压强度评估方法,同时提出了一种运用多目标粒子群算法的交流网架规划方法。首先,以交流网架的戴维南等效模型为基础,从电气距离维度推导出多场站系统并网前后的电压波动关联。接着,结合传统短路比计算公式,推导出网架电压波动与网架强度之间的关系。然后,基于多目标粒子群算法构建构网换流站优化选址模型。最后,结合既有网架强度评估方法,对比验证所提方法的准确性,并借助多目标粒子群优化算法(MOPSO)实现了新能源交流网架的规划。

1 新能源并网系统等效分析模型

基于沙戈荒地区大规模新能源基地的空间分布特性以及交流电网架构特征,构建如图1所示的典型应用场景。鉴于当前风光新能源基地普遍运用基于电压源型换流器^[19](voltage source converter, VSC)的跟网型(grid-following, GFL)控制策略,故本研究中新能源基地采用跟网型VSC换流输送至交流侧,经汇集站并网后,再通过交流线路输送至送端柔性直流换流器。

在新能源交流汇集网架范畴内,当前工程大多采用新能源场站经由多电压等级交流辐射式集电网拓扑的方式,基于此,本文将针对该类网架开展规划研究。当系统电压出现跌落情况时,受电流限幅环节的作用,构网柔直换流器会呈现出电流源特性,进而丧失对交流系统的电压支撑能力^[20]。受电力电子器件过流能力的限制,在工程设计过程中换流阀通常仅具备1.1~1.5倍额定电流短时过载能

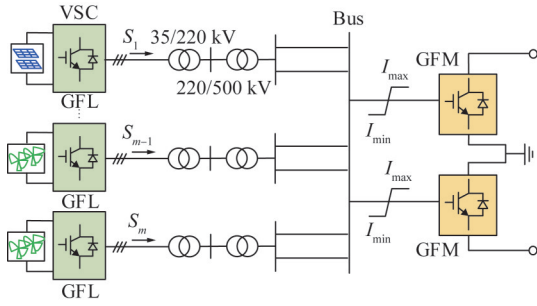


图 1 送端新能源基地交流组网示意图

Fig. 1 Sketch diagram of renewable energy base AC network

力^[21], 这导致在运用传统短路容量计算方法时, 系统短路比评估可能会出现偏差。

在新能源场站并网过程中, 并网点由空载状态转变为功率输入模式, 此过程会引发对应节点电压的变化。通过剖析系统针对节点电压变化的响应状况能够对网架电网强度展开评估。依据戴维南等效原理, 从并网点视角观察, 系统可等效为电压源与内阻抗相串联的电路, 如图 2 所示, 在等效前后节点电压特性维持不变。

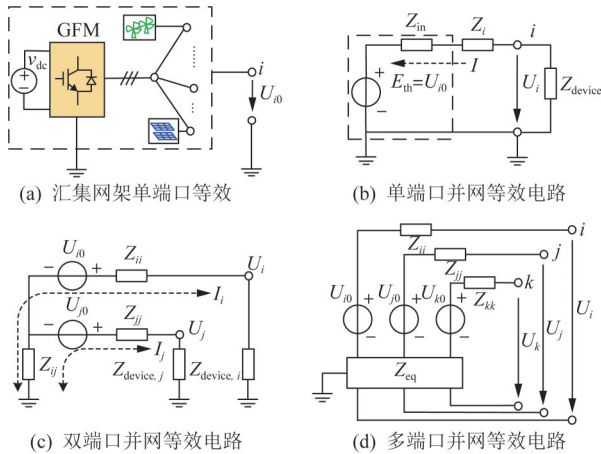


图 2 汇集网架戴维南等效模型

Fig. 2 Thevenin equivalent model of aggregated grid

图 2(b)中, 电压源电压为并网点空载电压, Z_{device} 为并网设备阻抗, Z_{in} 为电网等效内阻抗, Z_i 为并网线路阻抗, 节点 i 分压为:

$$\begin{cases} U_{i0} = (Z_i + Z_{th})I_i = Z_{ii}I_i \\ \frac{U_i}{E_{i0}} = \left| \frac{Z_{device}}{Z_{device} + Z_{ii}} \right| \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{ii} 为系统对并网点 i 的等值阻抗; U_{i0} 、 U_i 分别为并网点 i 的空载电压和设备并网后电压; E_{i0} 为系统等效电动势; Z_{th} 为系统等效内阻抗。

将多个新能源并网点等效时系统为多场站系统, 如图 2(c)、(d)所示, 图中 Z_{ij} 为并网点 i 和 j 之间的转移阻抗, 代表并网点 i 和 j 之间电压和电流关系, 并非端口等效电压源对地阻抗^[22]。基于戴维南等效与叠加定理可知, 图 2(c)对应多端口网络并网点 i 等效电动势 $\dot{E}_{i0}^m$ 为:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{i0}^m &= (Z_{ii} - Z_{ij})I_i + Z_{ij}(I_i + I_j) \\ &= \dot{U}_{i0} + \frac{Z_{ij}\dot{U}_{j0}}{Z_{ij} + Z_{jj} + Z_{device,j}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_{i0}$ 、 $\dot{U}_{j0}$ 分别为节点 i , j 空载电压相量; $Z_{device,j}$ 为节点 j 并网阻抗。

同理, 图 2(d)对应并网点 i 等效电动势 $\dot{E}_{i0}^m$ 为:

$$\dot{E}_{i0}^m = \dot{U}_{i0} + \sum_{j \neq i} \frac{Z_{ij}\dot{U}_{j0}}{Z_{ij} + Z_{jj} + Z_{device,j}} \quad (3)$$

则多场站系统并网点前后电压的关系:

$$\frac{U_i}{\dot{E}_{i0}^m} = \left| \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_{i0} + \sum_{j \neq i} Z_{ij}\dot{U}_{j0}/(Z_{ij} + Z_{jj} + Z_{device,j})} \right| \quad (4)$$

式中: U_i 为新能源并网点 i 稳态电压; $\dot{U}_i$ 为并网点 i 稳态电压相量。

2 新能源并网系统电网强度评估

2.1 基于等效并网阻抗的电网强度评估

图 2(a)中, 将除并网点 i 外所有节点等效到系统, 此时为传统单馈入系统, 节点 i 短路比的值 R_{SCR} 为:

$$R_{SCR} = \frac{S_{ac}}{S_{device}} = \frac{U_N^2/Z_{in}}{U_N^2/Z_{device}} = \frac{Z_{device}}{Z_{in}} \quad (5)$$

式中: Z_{in} 为系统戴维南等值阻抗; Z_{device} 为基于设备容量与控制特性所得等值并网阻抗; S_{ac} 为系统短路容量; S_{device} 为设备额定并网容量; U_N 为系统额定电压。

并网点空载电压 E_{i0} 与新能源并网后的电压 U_i 的关系为:

$$\frac{U_i}{E_{i0}} = \left| \frac{Z_{device}}{Z_{device} + Z_{in}} \right| = \left| \frac{R_{SCR}}{1 + R_{SCR}} \right| \quad (6)$$

对于多场站系统, 由式(4)和式(6)可得, 网架电压波动与网架强度的关系满足:

$$R_z^{SCR} = \left| \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_{i0} - \dot{U}_i + \sum_{j \neq i} Z_{ij}\dot{U}_{j0}/(Z_{ij} + Z_{jj} + Z_{device,j})} \right| \quad (7)$$

综上, 通过式(7)即可根据网架阻抗和换流站

等效阻抗得到多场站系统并网点电压波动与并网设备与系统电气距离的关系, 这与传统的短路比采用短路容量衡量网架电网强度不同, 并不能称其为改进的短路比计算, 但为了与常规电网强度衡量表述一致, 这里采用 R_z^{SCR} 表示, 称其为基于等效并网阻抗的电网强度评估。

由式(7)可得, 新能源交流网架节点电网强度不仅与并网节点本身的电压波动有关, 还受到其余并网节点的影响, 且影响程度与并网节点之间的电气距离有关, 通过计算并网设备等效阻抗以及网架结构即可评估网架强度。其中对于新能源系统而言, 其等效阻抗取决于控制策略和工况, 进而可以得出考虑新能源换流站工作特性的网架强度评估方法。根据式(7)可得 R_z^{SCR} 与并网点电压变化的关系如图 3 所示, 系统网架强度越高, 新能源场站并网所引起的电压波动越小, 对应并网点 R_z^{SCR} 越大。

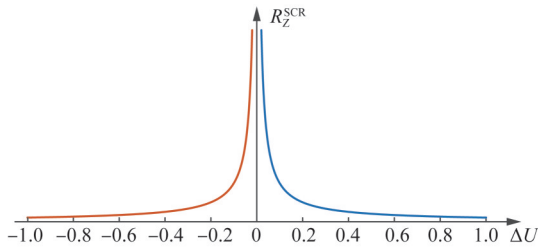


图 3 R_z^{SCR} 与节点电压波动的关系

Fig. 3 Relation between R_z^{SCR} and voltage change

2.2 含无功功率补偿的临界电网强度评估标准

系统的临界稳定性可基于传输功率与静态电压稳定性的关联推导得出。在本文所提出的新能源基地辐射状交流汇集网架中, 各基地的功率外送可看作是从新能源基地并网点至构网型直流换流站汇集母线的直接连接。故而, 每条传输线路的潮流分布可视为并网点与汇集母线之间的独立潮流分布, 如图 4 所示。

图 4 中 P_s 、 Q_s 为新能源基地并网点新能源基地发出有功、无功功率, 对应功率因数角为 φ , P 、 Q

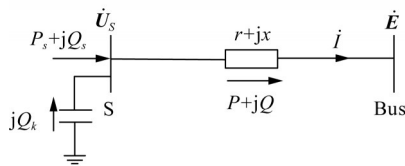


图 4 功率传输等效模型

Fig. 4 Power transmission equivalent model

分别为线路传输有功、无功功率, Q_k 为无功功率补偿设备发出无功功率, $\dot{U}_s$ 、 $\dot{E} = E\angle 0^\circ$ 分别为新能源并网点和构网换流站母线电压, $\dot{I}$ 为线路电流, r 、 x 分别为线路电阻和电抗。

由图 4 可得功率传输满足:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = (r + jx)\dot{I} + \dot{E} \\ P + jQ = P_s + j(Q_s + Q_k) = \dot{U}_s \dot{I} \\ Q_s = P_s \tan \varphi \end{cases} \quad (8)$$

忽略线路电阻, 可得并网点电压为:

$$U_s = \sqrt{\frac{E^2}{2} + xQ} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - x^2 P^2 + xQE^2} \quad (9)$$

式(9)即为考虑无功功率补偿的输电线路 P-V 曲线表达式。

令 $\partial P / \partial U_s = 0$ 可得:

$$U'_s = \sqrt{\frac{xQ_k + \frac{1}{2}E^2(\tan^2 \varphi + 1) + \frac{1}{2}E \tan \varphi \sqrt{E^2(\tan^2 \varphi + 1) + 4xQ_k}}{2}} \quad (10)$$

式中 U'_s 为 P-V 曲线对应电压拐点。

式(10)为 P-V 曲线电压拐点, 即电压静稳极限。临界短路比建立了短路比与系统静态电压稳定性之间的关系。建立等效分析模型的 P-V 曲线, 如图 5 所示, 其中模型对应功率基准值 $S_b = 1\,000$ MVA, 基准电压 $U_b = 500$ kV, 传输阻抗 $x = 0.205$ p.u., 功率因数 $\cos \varphi = 0.98$ 。

无功功率补偿使电压静稳极限由 A 点提升至 B 点, 相同传输功率下, 电压波动减小了 ΔU , 无功功率补偿使得节点电压波动幅度降低, 对应式(7) $\dot{U}_0 - \dot{U}_i$ 减小, 节点 R_z^{SCR} 增大, 网架更加稳定。

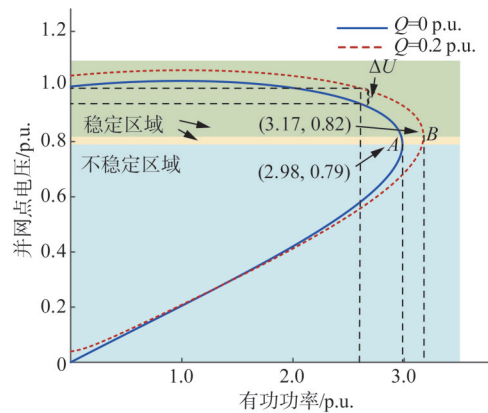


图 5 等效模型 P-V 曲线

Fig. 5 Equivalent model P-V curve

新能源基地未接入时,并网点空载,传输线路无功功率保持在一定的值时,结合电压静稳极限,可求得该并网点含无功功率补偿的临界电网强度 $C_{z,i}^{\text{SCR}}$ 评估标准为:

$$C_{z,i}^{\text{SCR}} = \frac{\dot{E}}{\dot{E} - \dot{U}_{i,\min} + \sum_{j \neq i} Z_{ij} \dot{U}_{j0} / (Z_{ij} + Z_{jj} + Z_{\text{device},j})} \quad (11)$$

式中: $\dot{U}_{i,\min}$ 为传输最大功率对应的并网点 i 电压量,即 P-V 曲线拐点电压; j 为并网点; $Z_{\text{device},j}$ 为并网点 j 并网阻抗。

对于新能源并网系统,当并网点短路比大于 2 时,系统强度较高^[10],因此本文建议将其引入到临界电网强度评估标准中,对于 R_z^{SCR} 大于 2 的系统视为强系统;对于 R_z^{SCR} 小于 2 的系统, R_z^{SCR} 小于 2.0、大于 C_z^{SCR} ,系统较弱,但工作在稳定区域; R_z^{SCR} 小于 C_z^{SCR} ,系统不稳定;本文通过 R_z^{SCR} 与 C_z^{SCR} 差值确定较弱系统的稳定裕度。

$$\eta = \frac{R_z^{\text{SCR}} - C_z^{\text{SCR}}}{C_z^{\text{SCR}}} \times 100\% \quad (12)$$

目前换流站等效阻抗已有研究^[23],构网型换流器等效电抗包括构网型换流器的等值内电抗和换流变阻抗,典型控制参数对应构网换流器等值内电抗约为 0.05~0.10 p.u.,若控制效果较为理想时等值内电抗较小甚至可以忽略^[24],结合换流站阻抗等效方法可评估本文所提场景下并网点电压强度。

3 构网柔直换流站优化选址

3.1 多目标粒子群算法建模

多目标粒子群优化通常不存在单个最优解,而是一组最优解,为此引入“支配”概念,设 p 和 q 时进化群体中的任意两个不同的个体,同时满足下列两个条件时,称为 p 支配 q 。

1) 对所有的子目标, p 不比 q 差,即 $\forall k \in \{1, 2, \dots, r\}, f_k(p) \leq f_k(q)$ 。

2) 至少存在一个子目标,使 p 比 q 优,即 $\exists k \in \{1, 2, \dots, r\}, f_k(p) < f_k(q)$ 。

如图 6(a) 所示,解 x_1 、 x_2 互不支配,如果在整个可行的变量空间中不能再找到能够支配两者的新解,那么 x_1 、 x_2 称为 Pareto 最优解,所有的 Pareto 最优解组成 Pareto 最优解集。

多目标粒子群优化算法粒子 i 的速度 $v_{\text{el}}[i]$ 和位置 $p_{\text{op}}[i]$ 的更新公式分别为:

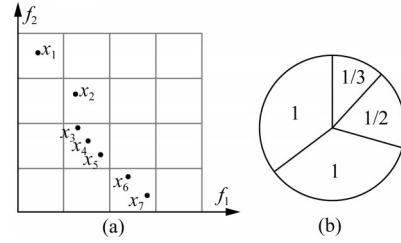


图 6 储存库数值提取

Fig. 6 Numerical extraction of storage repository

$$\begin{cases} v_{\text{el}}[i] = w \times v_{\text{el}}[i] + R_1 \times (P_{\text{best}}[i] - p_{\text{op}}[i]) + \\ R_2 \times (S_{\text{REP}}[h] - p_{\text{op}}[i]) \\ p_{\text{op}}[i] = p_{\text{op}}[i] + v_{\text{el}}[i] \end{cases} \quad (13)$$

式中: w 为惯性权重系数; R_1 、 R_2 为学习因子; P_{best} 为新粒子支配原粒子时新粒子的位置,若新粒子与原粒子互不支配,则随机选择; S_{REP} 为储存库,用于储存进化过程中非支配粒子的信息。

将储存库进行网格划分,如图 6(a) 所示,含解网格中解的数量为 [1, 1, 3, 2]。将解的数量求倒数构造轮盘,如图 6(b) 所示,以轮盘面积为概率随机选择网格,再在所选网格中随机选择一个解,该解对应的位置即为储存库对应 h 。因此网格中解的数量越少被选择的概率越大,同时在计算过程中保证网格中解的数量不超过给定值,以规避出现局部最优的问题。

综上, MOPSO 相关算法逻辑如图 7 所示。

3.2 优化选址目标函数

针对构网柔直提供电压支撑无常规电源支撑、无交流主网联络大规模新能源交流组网问题^[25],为保证网架稳定性,需提高网架电压强度;为提高网架经济性,需降低网架损耗。

目标函数 f_1 为网架电压强度评估,由于网架整体电压强度取决于最弱并网点的电压强度,并且构网柔直容量有限,需通过对柔直的合理选址以使网架电压强度最大化,以减少后期对无功补偿设备的投入。考虑到新能源基地需根据资源分布情况进行选址,本文视为给定值。构网柔直换流站位于拟定位置 (x, y) 时,选择新能源基地并网点稳定裕度最小值并取倒数作为网架最终强度的评估值。

$$\min f_1 = 1 / \min_{(x,y)} \left[\frac{S_{z,i}^{\text{SCR}} - C_{z,i}^{\text{SCR}}}{C_{z,i}^{\text{SCR}}} \right] \quad (14)$$

目标函数 f_2 为网架整体损耗,通过衡量新能源发出功率与构网柔直换流站接收功率的差值计算网

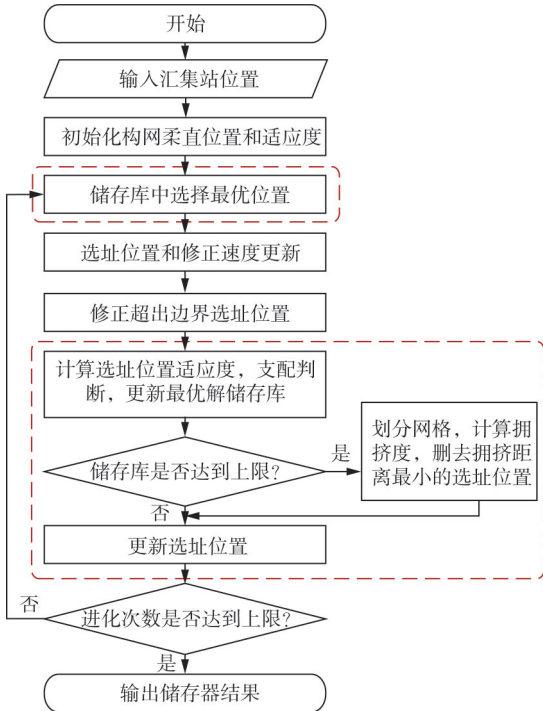


图7 MOPSO 计算逻辑图

Fig. 7 MOPSO calculation logic diagram

架整体损耗。

$$\min f_2 = \frac{\sum_{i=1}^m P_i - \sum_{i=1}^m (P_{T,i} + P_{L,i})}{\sum_{i=1}^m P_i} \times 100\% \quad (15)$$

式中: P_i 为新能源基地 i 发出功率; $P_{T,i}$ 、 $P_{L,i}$ 分别为对应功率传输中的变压器损耗和线路损耗; m 为新能源基地数量。

3.3 优化选址约束条件

针对沙漠荒地区, 风力发电的年利用小时数通常高于光伏发电。就功率外送引发的电压波动问题而言, 构网型换流站应尽量靠近风力发电机组; 对于新能源出力波动导致的电压波动问题, 构网型换流站应尽量靠近光伏发电/风力发电较为集中的区域。因此, 约束条件如下。

1) 结合实际地理环境和前述原则, 限制构网换流站选址区域;

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{\min} < x < x_{\max} \\ y_{\min} < y < y_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: x 、 y 为选址区域位置坐标; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为 x 的最大值和最小值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 分别为 y 的最大值和最小值。

2) 结合多目标粒子群最优解的支配原则, 限制

区域内选址位置的数量 $\text{num}(\text{REP})$ 不超过 N_r 。

$$\text{s.t. } \text{num}(\text{REP}) \leq N_r \quad (17)$$

式中 N_r 为选址位置的数量限值。

4 仿真验证

本节将基于 MATLAB 计算软件与所提网架强度评估方法和多目标粒子群优化算法进行新能源基地交流汇集网架构建, 并结合所构建网架在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台验证所提网架规划与网架强度衡量方法的准确性。

4.1 新能源基地交流网架规划算例

本节通过 MATLAB 计算软件与所提优化算法, 针对图 1 所示新能源辐射型汇集网架结构进行主电压等级为 500 kV 的 5 座新能源基地的交流汇集, 数据来源于蒙西阿拉善大规模新能源送出方案^[23], 场站参数如表 2 所示, 配置总量为 1 000 MW·2 h 储能提高新能源利用率, 对应弃风弃光率约为 10%, 符合《国发[2024]12 号》文件对资源条件较好地区新能源利用率可降低至 90% 的规定^[26]。本文网架规划中储能换流器不参与构网, 后续构网柔直优化选址时不考虑储能的影响, 交流网架参数与 MOPSO 参数如附表 A1、A2 所示。

表2 汇集站相关参数

Tab. 2 Parameters of substation

新能源基地	类型	容量/MW	年利用小时数/h	相对坐标/km
汇集站 1	光伏	2 000	1 760	(195.22, 31.39)
汇集站 2	光伏	2 000	1 760	(191.73, 16.53)
汇集站 3	光伏	2 000	1 760	(165.63, 33.30)
汇集站 4	风电	2 000	2 700	(70.39, 53.63)
汇集站 5	风电	2 000	2 700	(63.76, 7.35)
柔直换流站		5 000		

优化选址计算得构网柔直换流站选址坐标与对应网架强度和网架损耗, 如表 3 所示。以方案 1 为例, 对比 SCR 值、SCR-S 值分析网架电压强度, 如表 4 所示, 可得随着电气距离减小, 由式(5)可知, 短路容量计算值偏大的可能性越大, 对应表 4 中汇集站 3 的 SCRZ 值相较于 SCR-S 值的变化幅度最大。

4.2 网架电压强度仿真验证

以方案 1 为例, 对应网架结构如图 8 所示, 建立 PACAD 仿真模型进行网架强度仿真验证, 其中

表 3 构网柔直选址对交流网架的影响

Tab. 3 Influence of site selection of grid-forming converter station on AC grid

方案	构网柔直坐标	R_z^{SCR} 最小值	线损率 $\delta/\%$	稳定裕度 $\eta_{\min}/\%$
1	(127.40, 38.12)	1.437	0.117 5	52.37
2	(125.17, 36.00)	1.433	0.117 0	52.10
3	(124.83, 32.83)	1.433	0.116 5	52.06
4	(138.07, 30.24)	1.409	0.116 5	50.53

表 4 方案 1 电网强度评估

Tab. 4 Power grid strength assessment of scheme 1

汇集站	距离/km	SCR 值	SCR-S 值	R_z^{SCR} 值	变化幅度 $\delta/\%$	稳定裕度 $\eta_{\min}/\%$
1	68.54	2.817	1.580	1.437	9.95	52.37
2	68.20	2.820	1.581	1.438	9.04	52.42
3	38.91	3.101	1.669	1.496	10.37	56.72
4	58.73	2.906	1.609	1.453	9.70	53.43
5	64.93	2.849	1.591	1.440	9.49	52.41

构网换流站为虚拟同步机控制，电流限幅值为 1.5 倍额定电流，额定有功功率为 4 000 MW，控制参数如附表 A3 所示；新能源场站为跟网型控制，每座新能源场站采用单机倍乘的方式实现机组扩容。

首先，分析系统工作在额定工况时网架各项数据，对应仿真波形如图 9 所示。设置 0.8 s 新能源启动，2.1 s 启动完毕，对应图 9(a)、(b) 所示各汇集站发出有功功率和构网柔直有功功率。图 9(c)、(d) 为新能源功率稳定后系统母线电压与频率，此时系统稳定裕度为 52.37%，构网柔直具有额外支撑能力，系统电压波动 $\Delta U \leq 5\%$ 、频率波动 $\Delta f \leq 0.02 \text{ Hz}$ ，符合国标要求，对应系统电压强度较高。

其次，分析系统工作在临界工况时网架各项数

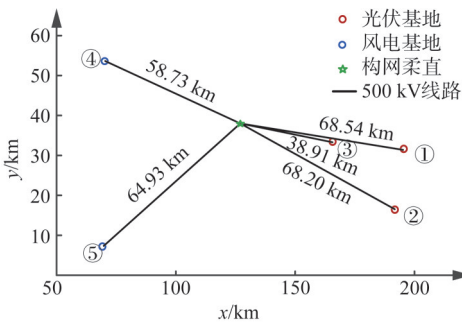


图 8 方案 1 交流网架结构

Fig. 8 AC grid structure of scheme 1

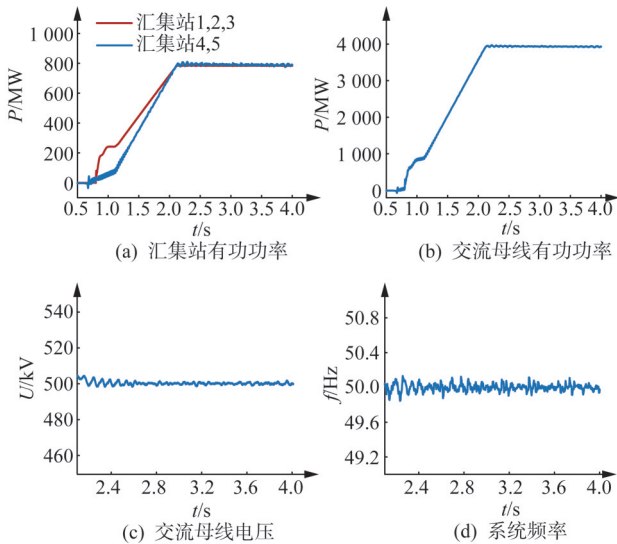


图 9 方案 1 额定工况系统仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of rated working condition system of scheme 1

据。表 4 所示方案 1 网架最弱节点为汇集站 1 并网点，对应稳定裕度 $\eta_1=52.37\%$ ，临界值 $C_{\text{d}}^{\text{SCR}}=0.943$ ，结合式(7)、式(11)可得，当汇集站 1 并网有功功率 $P_1=1\,517.4 \text{ MW}$ 时，对应 $R_z^{\text{SCR}}=C_{\text{z}}^{\text{SCR}}$ ，系统处于临界稳定状态。在图 9 所示额定工况下，设置 4.0 s 时抬升汇集站 1 并网功率，5.0 s 时抬升至 1 517.4 MW，各汇集站有功功率如图 10(a) 所示。

图 10(b)、(c) 展示了汇集站 1 并网点无功功率变化情况，以及汇集站 1 和 2 的线路电压对比，可得随着并网功率逐渐增大，图 10(d) 所示系统总无功功率需求也不断增大，系统对并网点电压支撑能力趋于临界值，5.0—5.8 s 期间，系统在允许范围内出现小幅度波动，但由于新能源采用呈电流源特性的跟网型控制，系统电压波动导致新能源并网功率波动，由于系统处于临界稳定状态，无法抑制电压波动，最终系统失稳，对应图 10(e) 所示系统频率逐渐发散。

值得注意的是，图 10(f) 为整个过程中构网柔直有功、无功电流标幺值，以及对应电流幅值，可知构网柔直并未达到 1.5 倍电流限幅值时系统已经失稳，对应式(7)和式(11)所示，并网点电压强度还受其余节点影响，且影响程度与节点间运算阻抗大小呈反比。

最后，分析系统临界稳定时，所提电压强度评估方法对无功功率补偿设备提高网架电压强度的适

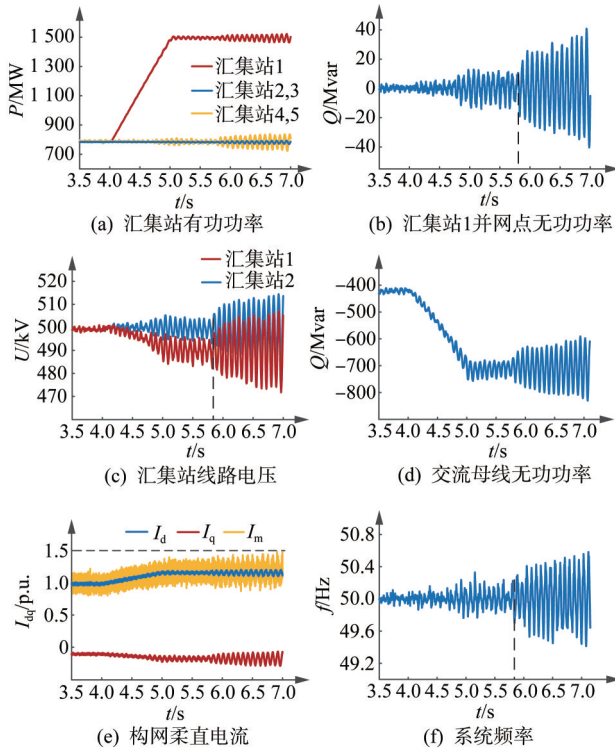


图 10 方案 1 系统临界稳定仿真波形

Fig. 10 System critical stability simulation waveform of scheme 1

用性。在图 10 所示额定工况下, 汇集站 1 传输线路并入容量为 200 Mvar 的 SVG 无功功率补偿设备, 由式(9)可知, 传输 1 517.4 MW 有功功率时, 并入 200 Mvar 无功功率补偿可减少系统电压降落 $\Delta U=18.10$ kV, 系统仿真波形如图 11 所示。

图 11(a)为各换流站发出有功功率, 由于无功补偿设备提前接入, 汇集站 1 并网电压略有升高, 如图 11(c)所示, 为避免前期新能源送出功率超过系统额定工况, 4.0 s 前略微降低汇集站 1 有功功率, 5.0 s 时将其抬升至 1 517.4 MW, 与图 10 工况保持一致。

施加无功功率补偿设备前, 图 10(c)所示电压于 490 kV 左右振荡发散。施加无功功率补偿设备后, 图 11(c)所示电压稳定于 510 kV, 对应前述对电压降落分析, 对比可知此时构网柔直维持网架电压强度裕度提高, 网架强度提升, 对应图 11(b)汇集站 1 并网点无功功率不再发散, 图 11(f)所示系统频率波动 $\Delta f \leq 0.02$ Hz, 系统处于稳定状态。

4.3 优化选址算法仿真验证

表 3 所示构网柔直选址方案中, 方案 1 与方案 4 网架稳定裕度差距较大, 为验证所提基于电压强度

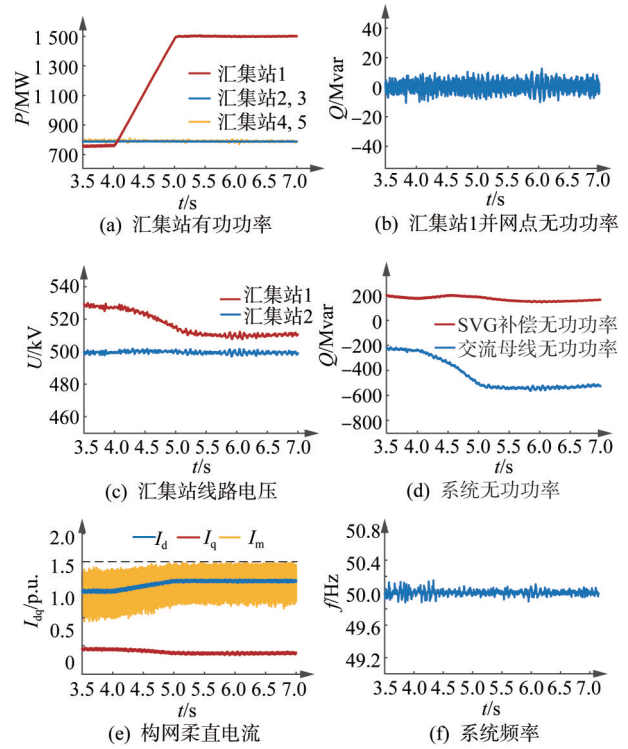


图 11 方案 1 系统提升电压强度后仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms after the system increases the voltage intensity of scheme 1

与系统损耗为目标的多目标粒子群算法的准确性, 本节将对分析上述两种方案的网架强度, 方案 1、方案 4 的电网强度评估如表 5 所示。

表 5 方案 1、4 电网强度评估对比

Tab. 5 Power grid strength evaluation comparison in scheme 1 and 4

汇集站	方案 1			方案 4		
	距离/km	R_z^{SCR}	稳定裕度 $\eta_{\min}/\%$	距离/km	R_z^{SCR}	稳定裕度 $\eta_{\min}/\%$
1	68.54	1.437	52.37	57.16	1.443	53.42
2	68.20	1.438	52.42	55.38	1.447	53.69
3	38.91	1.496	56.72	27.73	1.502	57.66
4	58.73	1.453	53.43	71.61	1.410	50.62
5	64.93	1.440	52.41	72.04	1.409	50.53

方案 4 对应稳定裕度 $\eta=50.53\%$, 临界值 $C_z^{\text{SCR}}=0.936$, 结合式(7)、式(11)可得, 当汇集站 5 并网有功功率 $P=1\,332.3$ MW 时, 并网点 $R_z^{\text{SCR}}=C_z^{\text{SCR}}$, 系统处于临界稳定状态。建立两种方案网架对应 PSCAD 仿真模型, 新能源场站与构网柔直换流站参数同 4.2 节, 不接入无功功率补偿设备的前提下, 将两者薄弱点功率由额定工况抬升至 1 332.3

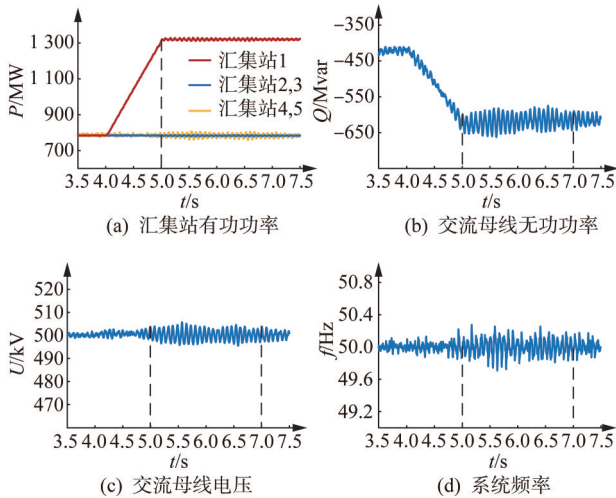


图 12 方案 1 网架薄弱节点功率抬升仿真波形

Fig. 12 Power lifting simulation waveforms of weak nodes of grid structure of scheme 1

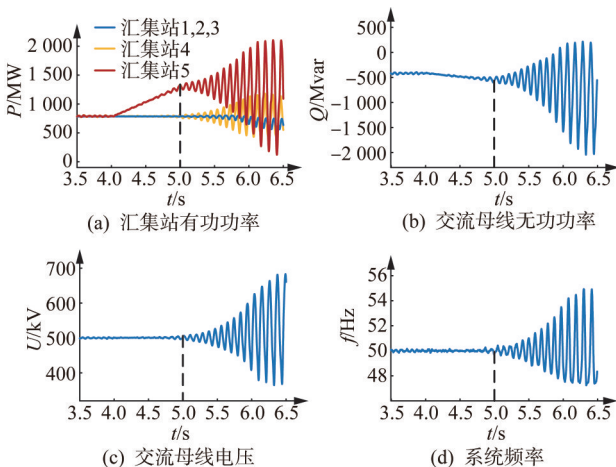


图 13 方案 4 网架薄弱节点功率抬升仿真波形

Fig. 13 Power lifting simulation waveform of weak node of grid structure in scheme 4

MW, 方案 1、方案 4 网架对应仿真波形如图 12、图 13 所示。

由图 12 可知, 5.0s 方案 1 薄弱节点功率抬升至 1 332.3 MW 时, 并网点 $R_z^{\text{SCR}}=1.184$, 稳定裕度 $\eta=25.56\%$, 系统支撑能力尚未达到上限, 对应图 12 (c)、(d) 所示 7.0s 后系统电压和频率波动幅度减小, 系统趋于稳定。由图 13 可知, 5.0s 方案 4 薄弱节点功率抬升至 1 332.3 MW 时, 并网点 $R_z^{\text{SCR}}=C_z^{\text{SCR}}$, 稳定裕度 $\eta=0$, 系统支撑能力达到上限, 对应图 13 (c)、(d) 所示系统电压和频率开始发散振荡, 系统失稳。可得方案 4 网架电压强度弱于方案 1, 与理论分析结果一致。

5 结论

本研究聚焦于沙戈荒大规模新能源基地外送交流网架在缺乏常规电源支撑且无交流网架联络的特定情景, 提出了一种适用于构网柔直提供电压支撑的大规模新能源基地外送交流网架电压强度评估方法, 并构建了结合多目标粒子群算法的交流网架规划模型。具体研究结论如下。

1) 所提出的短路比修正指标以并网点电压波动为基础, 同时考量其余并网点的影响, 从电气距离维度实现了网架电压强度评估, 该指标可应用于考虑电流限幅环节、由构网柔直提供电压支撑的新能源交流汇集网架电压强度评估。

2) 所提出的综合短路比修正指标计算方法兼顾了功率传输极限与并网点电压波动, 通过结合短路比修正指标计算系统稳定裕度, 能够识别系统薄弱环节以及对应并网点的最大传输功率, 可为无功补偿设备的选址与定容提供参考依据。

3) 所提出的基于多目标粒子群算法的构网柔直优化选址算法, 能够有效提升网架整体电压强度, 可用于指导在不同风光配比、不同汇集站选址情况下, 由构网柔直提供电压支撑的新能源交流汇集网架规划。

参考文献

- [1] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2608–2627.
DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin. Research review on optimal scheduling considering wind power uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2608–2627.
- [2] 徐业琰, 姚良忠, 廖思阳, 等. 基于多智能体 Actor-Double-Critic 深度强化学习的源-网-荷-储实时优化调度方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 513–527.
XU Yeyan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Studies on real-time optimal dispatch method of source-grid-load-storage based on multi-agent actor-double-critic deep reinforcement learning [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 513–527.
- [3] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339–2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339–2359.
- [4] 王盼宝, 王鹏, 李坤光, 等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略 [J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3829–3837.
WANG Panbao, WANG Peng, LI Shengguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under

- grid faults [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (10): 3829 – 3837.
- [5] 冯小萍, 陈启迪, 赵青春, 等. 构网型储能变流器控制策略下输电线路保护适应性分析[J]. 中国电力, 2025, 58(8): 176 – 184.
- FENG Xiaoping, CHEN Qidi, ZHAO Qingchun, et al. Adaptability analysis of transmission line protection under the control strategy of grid-forming energy storage converter [J]. Electric Power, 2025, 58(8): 176 – 184.
- [6] 段玉, 朱子民, 王小云, 等. 基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J]. 广东电力, 2024, 37(2): 10 – 17.
- DUAN Yu, ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2): 10 – 17.
- [7] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. France: CIGRE, 1997.
- [8] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633 – 647.
- XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (3): 633 – 647.
- [9] 黄启元, 曹善康, 吴宇奇, 等. 计及新能源幅相特性的新型多馈入短路比指标[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5960 – 5973.
- HUANG Qiyuan, CAO Shankang, WU Yuqi, et al. A new multi-infeed short circuit ratio index taking into account the amplitude and phase characteristics of new energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5960 – 5973.
- [10] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 919 – 929.
- YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919 – 929.
- [11] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497 – 506.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497 – 506.
- [12] 李桂鑫, 葛磊蛟, 陶永晋, 等. 考虑分布式能源综合利用的交直流混合配电网规划研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(1): 98 – 103.
- LI Guixin, GE Leijiao, TAO Yongjin, et al. Research on the planning of AC/DC hybrid distribution network considering the comprehensive utilization of distributed energy [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(1): 98 – 103.
- [13] 韦涛, 苏剑, 崔艳妍, 等. 交直流混合配电网 VSC 与分布式电源三层协调规划方法研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(9): 1263 – 1270.
- WEI Tao, SU Jian, CUI Yanyan, et al. Research on the three-level coordination planning method of hybrid AC/DC distribution network based on VSC and distributed generator [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(9): 1263 – 1270.
- [14] 汪慧敏, 杨苹, 余雁琳. 基于双层粒子群算法的主动配电网分布式电源规划[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(9): 1930 – 1935.
- WANG Huimin, YANG Ping, YU Yanlin. Optimal distributed generation planning in active distribution network based on Bi-level particle swarm optimization algorithm [J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(9): 1930 – 1935.
- [15] 黄志强, 陈业伟, 毛志鹏, 等. 柔性多状态开关与分布式储能系统联合接入规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 29 – 37.
- HUANG Zhiqiang, CHEN Yewei, MAO Zhipeng, et al. Joint access planning of soft open point and distributed energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 29 – 37.
- [16] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M 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.
- [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.
- [18] 马鑫, 郭瑞鹏, 王蕾, 等. 基于二阶锥规划的交流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 144 – 150.
- MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144 – 150.
- [19] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1 – 14.
- DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1 – 14.
- [20] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805 – 3819.
- XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805 – 3819.
- [21] 刘振宇, 周明, 张适宜, 等. 考虑送端短路比约束的高比例新能源直流送出系统优化运行研究[J]. 电网技术, 2023, 47 (11): 4511 – 4522.
- LIU Zhenyu, ZHOU Ming, ZHANG Shiyi, et al. Optimal dispatching power systems for HVDC transferring with highly-proportional renewables considering sending-end constraints of short circuit ratio [J]. Power System Technology, 2023, 47 (11): 4511 – 4522.
- [22] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [23] LI Y, GU Y, ZHU Y, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 (3): 3377 – 3395.
- [24] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报,

2024, 44(14): 5463 – 5473.
XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (14) : 5463 – 5473.

[25] 赵成勇, 张思劼. 新能源送出系统强度提升的电压等级选取和拓扑改进方法[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3302 – 3313.
ZHAO Chengyong, ZHANG Sijie. Voltage level selection and topology improvement method for strength enhancement of new energy delivery system [J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3302 – 3313.

[26] 国务院. 国务院关于印发《2024—2025 年节能降碳行动方案》的通知 (国发〔2024〕12 号) (2024 – 05– 29) [2025– 03 – 20] [https:// www.gov.cn/zhengce/content/202405/content_6954322.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/202405/content_6954322.htm).

收稿日期: 2025-03-27;网络首发日期:2025-08-27

作者简介:
刘超男(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电, 15837064348@163.com;
黄勇(1978), 男, 高级工程师(教授级), 博士研究生, 研究方向为高压直流输电、先进控制技术;
赵成勇(1964), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为直流输电, chengyongzhao2@163.com。

附录 A

表 A1 交流组网相关参数
Tab. A1 Parameters of system

设备	参数	数值	设备	参数	数值
线路参数	线路规格	JL/G1A-400/35-48/7	换流站变压器	台数	6
	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.073 9		容量 S_T/MVA	960
	外径/mm	26. 8		漏抗 $x/\%$	18
输电参数	相间距/m	11	35/220 kV 变压器	容量 S_T/MVA	180×13
	输电回数	2		漏抗 $x/\%$	13
	分裂数量	4	220/500 kV 变压器	容量 S_T/MVA	1 200×2
	分裂间距/mm	450		漏抗 $x/\%$	12

表 A2 多目标粒子群算法参数
Tab. A2 MOPSO algorithm parameters

参数	数值	参数	数值
惯性权重系数	1. 0	种群规模	200
个体学习因子	1. 5	储存库规模 N_r	10
群体学习因子	1. 5	单目标网格数	5
最大进化次数	50		

表 A3 构网型直流换流站参数
Tab. A3 Parameters of grid-forming DC converter station

参数	数值	参数	数值
转动惯量 J	2. 5	电流限幅值 K	1. 5
阻尼系数 D	20	电压外环比例参数 k_{pv}	3. 6
单桥臂子模块数量 N	200	电压外环积分参数 k_{iv}	0. 01
子模块电容 C_0/mF	30	电流内环比例参数 k_{pi}	0. 8
桥臂电抗 L/H	0. 06	电流内环积分参数 k_{ii}	0. 1