

多光伏电站接入风光火耦合系统选址优化

张强¹, 李胜辉¹, 王晓东², 赵清松^{1,2}

(1.国网辽宁省电力有限公司 电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 2.沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 可再生能源机组出力的波动性及并网位置的不合理, 导致耦合系统电压波动、功率偏差及投资成本的增加。针对风光火耦合系统选址优化调节需求, 文章提出一种基于离散粒子群的多光伏电站接入选址优化方法。分析了光伏电源的无功补偿特性及其接入位置对系统电压偏差及网损的影响, 建立了可再生能源与火电耦合的发电系统模型, 并将光伏电源作为耦合系统的无功调节装置。以电压偏差和线路损耗综合最优为目标函数, 采用离散粒子群算法对光伏电站接入点进行求解, 算例分析结果表明, 多光伏电站接入点优化方法保障了各节点电压偏差, 减少了线路损耗, 进而提高了风光火耦合系统的安全稳定性。

关键词: 可再生能源; 无功补偿; 电压偏差; 线路损耗

中图分类号: TK81; TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)06-0804-08

0 引言

随着风电、光伏装机容量在电力系统中占比的增高^[1,2], 高比例可再生能源机组对耦合系统电压稳定性带来直接的影响。因此, 将可再生能源与火力发电耦合系统进行统一的优化控制, 对高比例新能源电力系统具有重要意义。

可再生能源的不确定性增加了耦合系统的调节难度, 而可再生能源机组的不同接入位置对耦合系统的影响更是加大了无功调节的难度^[3]。文献[2]提出将大规模的风光并网后, 加入无功补偿装置与新能源机组自身无功控制对系统母线电压波动问题进行优化, 但由于加入大量的无功补偿装置, 增加了系统成本。文献[4]研究了新能源机组并网对电网电压质量有较大影响, 其粒子群优化算法中的惯性权重仅与迭代次数大小相关联, 未能结合粒子适应度函数值的变化而自行调整, 这会导致算法无法在迭代后期考虑全局最优解问题。文献[5]提出一种改进的免疫算法, 更充分地考虑了分布式电源并网产生的影响, 但没有考虑采用集群化的方法进行无功优化。文献[6]采用改进的自适应多目标粒子群算法对电网进行无功优化, 对优化结果反映不够准确。以上的方法都有自身的优劣性, 但较少有研究考虑可再生能源在耦合系统中的接入点优化问题。

本文以可再生能源与火力发电耦合系统为应用场景, 考虑到光伏电源受到光照强度影响出力不稳定性, 将光伏电源作为无功补偿装置用于改善耦合系统的运行稳定性。建立多光伏电站接入点的耦合系统模型, 以电压偏差和网损最小为目标, 通过离散粒子群算法求解光伏电源的最优接入点。充分利用光伏场站对耦合系统进行无功调节, 可以减小传统的无功补偿装置投资成本, 改善系统节点电压偏差, 提升耦合系统运行经济性和稳定性。

1 含光伏电源的耦合系统及其无功调节

多能源互补、融合已逐渐成为电力系统发展趋势^[7]。考虑可再生能源发电场站与火电机组电气的紧密联系, 将可再生能源与火力发电结合成耦合发电系统。多源耦合系统是将可再生能源与火电进行集成耦合所形成的电能生产主体^[8]。简单结构如图1所示。

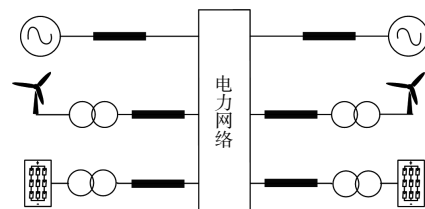


图1 耦合系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of coupling system

收稿日期: 2023-07-25。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1505400)。

通信作者: 王晓东(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事新能源应用技术、大规模储能系统及其应用技术研究。E-mail: wxd@sut.edu.cn

通过耦合系统的统一控制可以实现火电机组与可再生能源的协调控制。①利用火电机组的灵活调节能力抑制风电和光伏输出的波动,可以使耦合系统的整体输出更加稳定可控,有利于电力系统的安全稳定运行^[1]。同时利用可再生能源的无功支撑能力,可以有效提高耦合系统的电压控制能力和频率控制能力^[8]。②耦合系统需要根据可再生能源机组功率预测结果制定计划。由于新能源机组出力的不确定性,当耦合系统内部新能源机组共同工作时,预测产生的偏差存在相互弥补的情况,从而降低耦合系统的整体出力预测误差^[8]。③无功方面,新能源机组的电力电子设备在空闲时可向耦合系统提供一定的无功支持,提高耦合系统整体的经济性^[9]。例如,光伏电站无光照及风电机组低于启动风速时。

传统的无功补偿方式一般是加入静止无功补偿装置和静止无功发生器^[10]。传统的无功补偿装置可以发挥吸收或发出无功的作用,能够抑制电网电压波动并减小网损,可连续调节,动作速度快。但传统无功补偿装置存在结构复杂、控制困难、造价较高等问题。因此,本文考虑利用光伏电源的无功可用容量改善火电机组的运行压力,并且基于光伏电源的无功调节能力对耦合系统提供无功补偿,在不增加成本的前提下,保证了风光火耦合系统的运行稳定性。

1.1 光伏电源无功补偿特性分析

光伏发电系统一般是在耦合系统中作为一个电源以输出有功为主,同时光伏发电系统的变流器可以调节自身的输出功率因数,从而作为无功补偿装置改善耦合系统的电压波形、减少系统的负荷和网损^[11]。充分利用光伏的无功调节能力对耦合系统提供无功补偿,可省去添加额外无功补偿装置,降低耦合系统运行的经济成本。

光伏发电系统对耦合系统提供无功功率是由逆变器实现的,其无功功率调节范围取决于光伏逆变器的容量和当前功率。光伏发电对系统产生有功功率和无功功率会使线路电压发生变化,当光伏发电系统向电网输入过多的有功功率时,可能导致线路过电压^[12]。同理,在夜间光伏无输出功率,但存在高负载需求时,可能会引起馈线上电压降低^[13]。因此,光伏出力的表达式取决于光照强度

的大小以及辐射位置。光照强度属于不确定因素,光照强度在一段时间内近似服从 Beta 分布,其概率密度函数为^[14]

$$f(I) = \frac{\Gamma(\alpha_1 + \beta_1)}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\beta_1)} \left(\frac{I}{I_{\max}}\right)^{\alpha_1 - 1} \left(1 - \frac{I}{I_{\max}}\right)^{\beta_1 - 1} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \mu_1 \left[\frac{\mu_1(1-\mu_1)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \\ \beta_1 = (1-\mu_1) \left[\frac{\mu_1(1-\mu_1)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: Γ 为 Gamma 函数; I_{\max} 为一定时间内光照强度的最大值; α_1, β_1 分别为 Beta 函数的状态参数^[14]; σ_1 和 μ_1 分别为光照强度的标准差和均值。

在本文中,假设光伏电源总面积为 L ,转化效率为 η ,光照强度为 I ,则光伏电源的输出功率 P_{PV} 为

$$P_{PV} = I \cdot L \cdot \eta \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得概率密度函数为^[12]

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha_1 + \beta_1)}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\beta_1)} \left(\frac{P_{PV}}{P_{PV\max}}\right)^{\alpha_1 - 1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_{PV\max}}\right)^{\beta_1 - 1} \quad (4)$$

式中: $P_{PV\max}$ 为光伏电源出力最大值。

同时,光伏出力也同样服从 Beta 分布。

逆变器可以利用自身剩余容量进行无功控制^[13]。设定光伏逆变器最大可用容量为 S ,允许功率因数为 $(-\cos\phi, \cos\phi)$, ϕ 为光伏功角,则光伏逆变器的最大无功功率为^[14]

$$Q_{\max} = \max\left(\sqrt{S^2 - P_{PV}^2}, P_{PV}\tan\phi\right) \quad (5)$$

1.2 光伏电源接入对耦合系统电压偏差的影响

利用光伏电源的无功调节能力可作为耦合系统中的无功补偿装置,由于光伏电源在不同的接入点会导致耦合系统的整体出力产生波动并影响负载供电情况,若接入点不合理会导致系统网损的增大以及节点电压质量的降低。为了方便分析,简化后系统线路结构如图 2 所示。

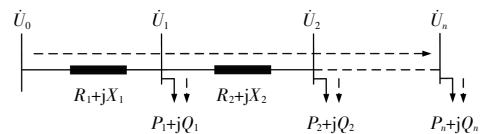


图 2 线路结构简图

Fig.2 Schematic diagram of line structure

图中虚线为设定电流功率流向,线路电压总

损耗为^[15]

$$\sum_K \Delta U_i = \sum_K \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_N} \quad (6)$$

式中： U_N 为系统各节点额定电压； K 为系统总节点数。

当无光伏电源接入时，节点 2 的电压为^[13]

$$U_2 = U_0 - \Delta U = U_0 - \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{U_N} - \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (7)$$

假设在节点 1 接入光伏电源，则相邻节点 2 的电压为

$$U_2' = U_0 - \Delta U = U_0 - \frac{(P_1 - P_{PV})R_1 + (Q_1 - Q_{PV})X_1}{U_N} - \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (8)$$

对比式(7),(8)可知：光伏电源的接入可能导致系统节点电压升高，电压值会随着接入容量变化；同时接入位置的不同对电压影响不同，节点电压会随着接入位置不同产生变化。

1.3 光伏电源接入对耦合系统网损的影响

光伏电源接入耦合系统影响电压偏差的同时，也会直接影响到系统功率损耗，如图 3 所示。

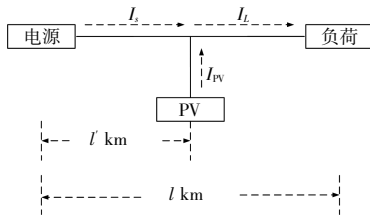


图 3 光伏电源接入系统线路结构简图

Fig.3 Schematic diagram of circuit structure of photovoltaic power supply access system

系统负荷和负荷的单相电流分别为

$$S_l = P_l + jQ_l \quad (9)$$

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{3U} \quad (10)$$

式中： P_l 和 Q_l 分别为耦合系统负荷消耗的有功和无功功率； U 为耦合系统相电压。

系统未接入光伏电源时，系统网损为^[16]

$$P_{lossL_0} = \frac{rl(P_l^2 + Q_l^2)}{3U^2} \quad (11)$$

式中： r 为线路电阻率； l 为耦合系统电源与负荷之间的距离。

接入光伏电源之后，光伏电源与负荷之间流入电流没有变化，仅影响接入点至电源之间电流变化，因此，光伏电源与负荷和电源之间的网损

分别为^[17]

$$P_{lossL_{PVI}} = 3r(l-l')I_l^2 = \frac{r(l-l')(P_l^2 + Q_l^2)}{3U^2} \quad (12)$$

$$P_{lossL_{sg}} = 3rI_s^2 = \frac{rl'(P_l^2 + Q_l^2 + P_{PV}^2 + Q_{PV}^2 - 2P_l P_{PV} - 2Q_l Q_{PV})}{3U^2} \quad (13)$$

式中： I_s 为耦合系统内电源输出电流； l' 为光伏电源与耦合系统其他电源之间的距离； P_{PV} 和 Q_{PV} 分别为光伏电源的有功和无功功率。

光伏电源接入耦合系统后，联立式 (11)~(13)，网络损耗变化量为

$$\Delta P_{loss} = P_{lossL_0} - P_{lossL_{PVI}} - P_{lossL_{PV}} = \frac{rl'}{3U^2 l} (2P_l P_{PV} + 2Q_l Q_{PV} - P_{PV}^2 - Q_{PV}^2) \quad (14)$$

由式(14)可知，光伏电源接入耦合系统，会直接影响到系统功率损耗。影响程度由光伏接入位置和耦合系统网络的拓扑结构决定。

2 基于离散粒子群算法的光伏接入点优化

2.1 目标函数

电压偏差是衡量电力系统稳定性的重要指标，电压偏差的大小对供电质量及供电可靠性影响显著。电压偏差过大可能会造成设备使用寿命减小，降低供电质量可靠性，还会导致系统网损的增大。本文以光伏电站为无功调节资源，引入无功优化占比权重，将最小节点电压偏差与最小网损的多目标问题改为二者之和的单目标问题，建立光伏电源接入点的优化模型。

最小节点电压偏差为

$$f_1 = \min \Delta U = \sum_{i=1}^{N_n} \left(\frac{U_i - U_N}{U_D} \right) \quad (15)$$

最小网络损耗为

$$f_2 = \min P_{loss} = \sum_{i,j=1}^N G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (16)$$

式中： i, j 为节点编号； P_{loss} 为系统网络损失； G_{ij} 为节点 i, j 之间的电导； θ_{ij} 为节点 i, j 之间的相位差； N 为网络支路总数； N_n 为节点数； U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压； U_D 为节点最大电压与最小电压的差值。

占比权重可以将多目标优化问题转为单目标优化问题，实现节点电压偏差最低和网络损耗最小优化，通过分析节点电压偏差和网络损耗两个

子目标在总目标函数中的影响度,确定权重的大小。目标函数为

$$f_3 = \omega_1 f_1 + (1 - \omega_1) f_2 \quad (17)$$

式中: ω_1 为占比权重。

权重是根据电压偏差和网络损耗在整体中的价值确定的。为了避免单独一个目标函数 (f_1 或 f_2) 的最优导致的整体非最优,均衡电压偏差和最小网络损耗的目标,本文设置 $\omega_1 = 0.5$ 。

2.2 约束条件

通过优化系统无功可以改善电压偏差大的现象,降低系统网损。

①等式约束

选择光伏机组在耦合系统中的最优接入点也是对耦合系统进行无功优化,使耦合系统运行更加稳定。为满足无功优化要求,首先要满足基本的潮流计算要求。

耦合系统各节点有功、无功功率约束条件:

$$\begin{cases} P_G - P_D - U_i \sum_{j \in N_n} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_G + Q_C - Q_D - U_i \sum_{j \in N_n} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_G, Q_G 分别为机组节点输出有功与无功功率; P_D, Q_C 分别为负载在节点吸收的有功与无功功率; Q_D 为节点补偿的无功功率; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导和电纳。

②不等式约束

为了保证节点电压不越限,耦合系统机组出力应在规定范围内以及光伏机组作为无功补偿单元时的无功出力在合理范围,因而设定以下不等式约束条件。

节点电压约束:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (19)$$

式中: U_{\max}, U_{\min} 分别为耦合系统节点电压的上、下限。

耦合系统各机组无功约束:

$$Q_{DG\min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG\max} \quad (20)$$

式中: $Q_{DG\max}, Q_{DG\min}$ 分别为耦合系统各机组无功出力上、下限。

不确定变量约束:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \quad (21)$$

式中: $S_{\max} = S_{st} + \Delta S$ 为光照辐射最大值; $S_{\min} = S_{st} - \Delta S$

为光照辐射最小值; S_{st} 为光照辐射标准值; ΔS 为光照辐射扰动值。

2.3 基于离散粒子群算法的光伏机组接入点优化求解

粒子群算法采用速度-位置的更新策略,所需参数较少,收敛速度快,有很好的全局搜索能力^[14]。离散粒子群算法二进制粒子位置更新公式为^[17]

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{rand}() < \frac{1}{1 + \exp(-v_i)} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可以看出,离散粒子群算法通过限制函数 $1/[1 + \exp(-v_i)]$ 将位置更新限制在 $[0, 1]$, v_i 的值决定了粒子位置变换为 0 或 1 的概率。本文中光伏机组在耦合系统中的接入点是离散量,采用离散粒子群算法对光伏机组的接入点进行优化。优化过程如图 4 所示。

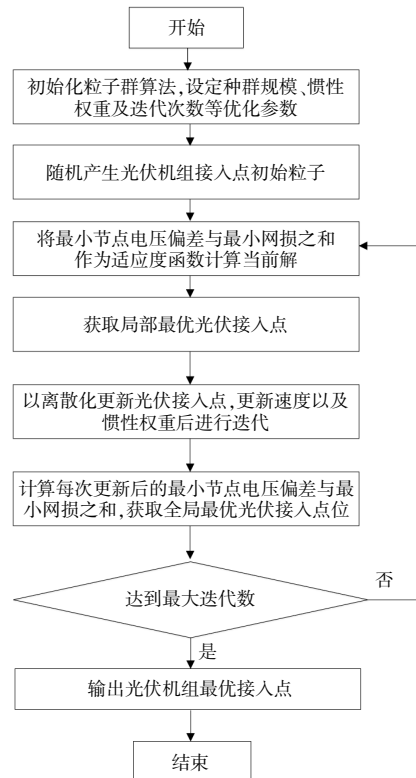


图 4 光伏机组接入点优化算法流程

Fig.4 Photovoltaic unit access point optimization algorithm flow

优化过程如下:

①初始化粒子群算法参数,本文中共考虑 12 个接入节点,因此设置种群规模 N 为 12×12 ,迭代

次数为 100 次;

②随机产生光伏机组接入点的初始粒子 200 组;

③根据当前光伏接入点计算系统节点电压偏差以及网损;

④以式(17)作为适应度函数计算当前解,获取局部历史最优光伏接入点;

⑤通过离散化的方式更新接入点位置,更新粒子的速度以及惯性权重;

⑥计算每次更新光伏接入点后的最小电压偏

差与最小网络损耗之和,获取全局历史最优光伏接入点;

⑦判断是否达到设置的终止条件,若满足条件,则输出光伏最优接入点,否则返回步骤④。

3 算例分析

3.1 仿真条件

为了验证所提光伏电源接入点优化方法的有效性,在 Matlab/Siumlink 中搭建可再生能源与火电耦合 12 节点系统线路仿真模型,可再生能源与火电耦合系统结构如图 5 所示。

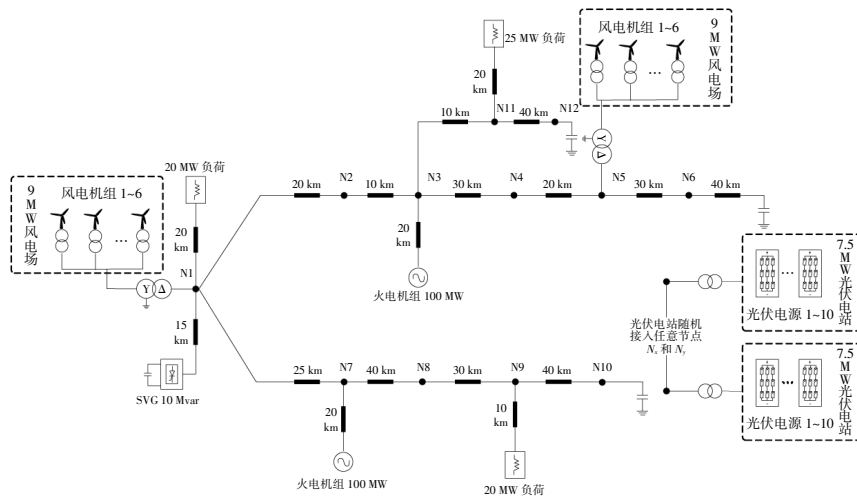


图 5 可再生能源与火电耦合系统结构

Fig.5 Structure diagram of renewable energy and thermal power coupling system

考虑到本文模型以可再生能源高比例系统为前提,可再生能源机组容量较低,为满足系统整体协调性,现将火电机组容量缩小后接入耦合系统。本文对两个光伏电站统一采取恒功率因数控制策略,通过维持功率因数不变来控制光伏电站无功容量。系统参数如表 1 所示。在耦合系统的节点 1 与 5 并入风电机组,在节点 3 与 7 并入火电机组,两个光伏电站随机接入两个节点。

表 1 耦合系统参数

Table 1 Parameters of coupling system

| 参数 | 数值 |
|------------------|--------------------|
| 系统电压/kV | 35 |
| 系统线路阻抗/ Ω | $1.2327 + j3.7487$ |
| 火电总容量/MW | 200 |
| 风电总容量/MW | 18 |
| 光伏总容量/MW | 15 |
| 节点电压偏差/p.u. | 0.95~1.05 |
| 无功补偿容量/Mvar | 10 |

为了验证本文方法在不同工况下的有效性和

优越性,设置了 4 种对比情况对光伏电站接入点进行优化:方案 1 为耦合系统中未加入光伏电站的情况;方案 2 为随机设置两个光伏电站接入点;方案 3 为基于离散粒子群算法优化得到一个光伏电站的最优接入点;方案 4 为基于离散粒子群算法优化得到两个光伏电站的最优接入点。

3.2 光伏机组接入点节点电压偏差优化结果分析
采用离散粒子群算法优化耦合系统接入点位置,得到方案 3 最优接入点为节点 2,方案 4 的最优接入点分别为节点 2,节点 8。同时,选取光伏电站加入非最优节点 3,5 作为对比方案 2,并对 4 种方案进行仿真分析。

图 6,7 分别为不同对比方案下各节点的有功功率与无功功率分布情况。

由图 6,7 可以得出:对比方案 1 和方案 3,与未加入光伏电站时相比,单个光伏电站加入最优接入点后,一些节点的有功功率发生了激增,如节点 8;对比方案 1、方案 2 和方案 4,当两个光伏电

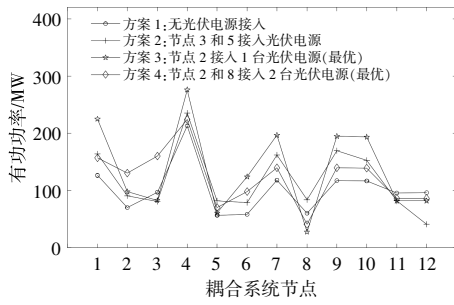


图 6 4种方案下各节点有功功率对比

Fig.6 Active power and reactive power of each node at different access points

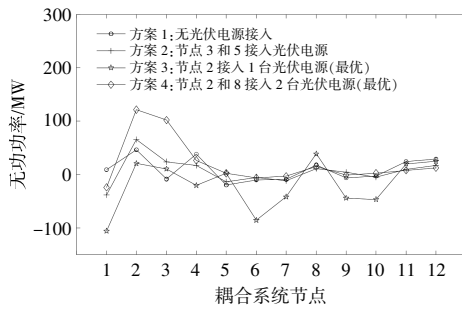


图 7 4种方案下各节点无功功率对比

Fig.7 Active power and reactive power of each node with different number of units

站加入最优接入点时改善了有功功率激增的情况。同时利用光伏电站的无功调节能力对各节点的无功功率进行调节,从而改善耦合系统运行情况。

图 8 为不同对比方案下各节点电压偏差对比结果。

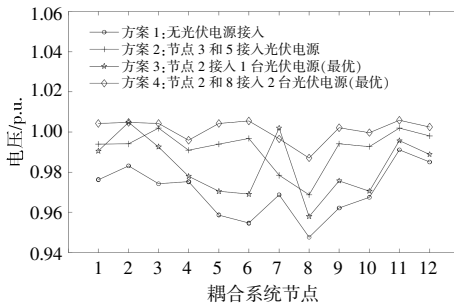


图 8 4种方案下各节点电压偏差结果

Fig.8 Comparison of voltage deviation results of optimized access points

由图 8 可知:对比方案 1、方案 2 和方案 3,当耦合系统未加入光伏电站时,系统节点电压偏移量为 0.320 2 p.u.;单个光伏电站加入节点 2 时,系统节点偏移量为 0.151 9 p.u.,偏移量下降 0.168 3 p.u.;当两个光伏电站分别加入节点 3 与节点 5 时,系统节点电压偏移量为 0.128 5 p.u.,偏移量下降了

0.191 7 p.u.。证明了光伏电源作为无功补偿装置可以改善耦合系统的电压偏差。对比方案 2 和方案 4,将光伏电站加入节点 2 与节点 8 时系统节点电压偏移量为 0.073 4 p.u.,偏移量下降了 0.246 8 p.u.。通过计算结果验证了方法的可行性,根据光伏电站无功调节的能力,将光伏机组作为无功补偿装置并入耦合系统中,可用于改善部分节点电压越限的情况,选择最优接入点可以进一步改善电压偏差,提升电压质量。

3.3 光伏机组接入点网络损耗优化结果分析

通过对比 4 种方案下耦合系统网络损耗情况,展示了本文所提方法的优越性。图 9 为不同对比方案下各节点网络损耗对比结果。

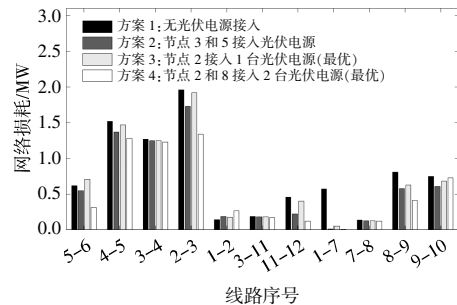


图 9 不同机组数的线路损耗结果对比

Fig.9 Comparison of line loss results with different number of units

表 2 为 4 种不同对比方案下的总网损结果。

表 2 4种情况的网络损耗结果对比

Table 2 Comparison of network loss results in four comparison cases

| 光伏电站加入情况 | 网络总损耗/MW | 降损率/% |
|------------------------------|----------|-------|
| 方案 1:无光伏电源接入 | 8.416 | |
| 方案 2:节点 3 和 5 接入光伏电源 | 7.597 | 9.7 |
| 方案 3:节点 2 接入 1 台光伏电源(最优) | 6.812 | 19.1 |
| 方案 4:节点 2 和 8 接入 2 台光伏电源(最优) | 6.185 | 26.5 |

由图 9 可以看出,光伏电站并入耦合系统后各线路损失降低,两个光伏电站加入最优接入点的网损值降低最大。由表 2 可以看出:对比方案 1 和方案 3,当耦合系统未加入光伏电站时,系统网损值为 8.416 MW。节点 2 加入 1 个光伏电站时,系统网损值为 7.597 MW,降损率为 9.7%;对比方案 1 和方案 2,将光伏电站分别加入节点 3 与节点 5 时,系统网损值为 6.812 MW,降损率为

19.1%;对比方案 1 和方案 4,光伏电站加入节点 2 与节点 8 时,系统网损值为 6.185 MW,降损率为 26.5%。

图 9 与表 2 验证了本文方法的可行性,选择最优接入点可以降低网络损耗,提升耦合系统运行质量。

4 结论

本文针对可再生能源与火电耦合系统中光伏电源作为无功补偿的最优接入点问题,考虑光伏出力不确定性且具有无功调节能力等因素建立了可再生能源与火电耦合的发电系统模型,提出一种基于离散粒子群算法的光伏电源接入点优化方法。以兼顾节点电压偏差及网络损耗为目标函数,构建光伏电源接入点的优化模型,并在可再生能源与火电耦合的仿真系统中进行了算例分析,得到以下结论:①利用光伏电源的无功调节能力作为可再生能源与火力发电耦合系统的无功补偿方式,可大幅度减少传统无功补偿装置,降低系统成本;②基于离散粒子群算法可成功找到光伏电源最优接入点,减小系统整体节点电压偏差,改善部分节点电压偏差较大的情况,降低系统整体网络损耗。

参考文献:

[1] 程光,徐飞,胡博,等.可再生能源与火电集成耦合的协同性能及组合设计研究[J].电网技术,2021,45(6):2178-2191.

[2] 赵会莹,丁剑,杨明玉,等.千万千瓦级风光并网系统电压无功研究[J].可再生能源,2018,36(3):411-421.

[3] 安军,周永超,周毅博,等.考虑风荷不确定性的电源无功电压调差系数整定方法研究[J].东北电力大学学报,2023,43(4):30-38.

[4] 雷敏,杨万里,彭晓波,等.基于改进简化粒子群算法的含 DG 的配电网无功优化[J].华北电力大学学报(自然科学版),2015,42(1):39-44.

[5] 郜建良,谭贝斯,贾琳,等.特高压电网无功电压控制

策略迭代求解方法研究[J].电测与仪表,2022,59(11):126-132.

[6] 程杉,陈民铀,黄慧宸.含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(10):45-50.

[7] 俞永增.风光火联合系统中光热电站储热容量优化配置方法[D].北京:华北电力大学,2019.

[8] 吴雨薇.区域多风场接入电网的相关问题研究 [D].南京:东南大学,2015.

[9] 孙骁强,刘鑫,程林,等.基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案[J].电网技术,2019,43(5):1760-1765.

[10] 范宏,朱佩琳,柳璐,等.考虑风电和光伏出力不确定性的日调度优化方法 [J]. 可再生能源,2019,37(6):886-892.

[11] 曾令全,袁博,于长亮,等.光伏发电系统的发电机有功和无功功率补偿器 [J]. 电源技术,2012,36(11):1681-1684,1721.

[12] Ding M, Wang B, Zhao B, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV -Wind - Diesel -Battery hybrid microgrid [J].Power System Technology,2013,37(3):575-581.

[13] 史朝晖,李忠,钟志刚,等.光储微电网运行模式无缝切换方法研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(2):31-36.

[14] 丁涛,崔翰韬,顾伟,等.基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J].电力系统自动化,2012,36(13):51-55.

[15] Hill C A, Such M C, D Chen, et al. Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation [J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(2):850-857.

[16] Sexauer J M, Mohagheghi S. Voltage quality assessment in a distribution system with distributed feneration—A probabilistic load flow approach [J].IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(3):1652-1662.

[17] 宋雨妍,王渝红,刘天宇,等.基于多目标离散粒子群算法的电容隔直装置优化配置[J].电网技术,2019,43(1):266-274.

Multi-photovoltaic power plants connected to the landscape and fire coupling system site selection optimization

Zhang Qiang¹, Li Shenghui¹, Wang Xiaodong², Zhao Qingsong^{1,2}

(1.Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co.,LTD., Shenyang 110006, China;
2.School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The fluctuation of renewable energy unit output and the unreasonable grid connection position lead to voltage fluctuations, power deviation, and increased investment costs in the coupled system. A discrete particle swarm optimization method for multi photovoltaic power supply access site selection is proposed to meet the optimization and regulation requirements of wind solar thermal coupling system. Analyzed the reactive power compensation characteristics of photovoltaic power sources and the impact of their connection positions on system voltage deviation and grid losses, established a power generation system model that couples renewable energy and thermal power, and used photovoltaic power sources as reactive power regulation devices for the coupled system. Taking the comprehensive optimization of voltage deviation and line loss as the objective function, the discrete particle swarm optimization algorithm is used to solve the photovoltaic power supply access point. The analysis results of the example show that the multi photovoltaic power station access point optimization method ensures the voltage deviation of each node, reduces line loss, and improves the safety and stability of the wind solar thermal coupling system.

Keywords: renewable energy; reactive power; voltage stability; line loss