

基于混沌 PSO 的构网型光储接入配电台区的优化控制

郑爽¹, 巩彦江¹, 古天松¹, 冯鑫振²

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 2. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 南京 201203)

摘要: 针对传统光储跟网变流器接入有源配电台区导致的电压波动、可再生能源利用率低及线路损耗问题, 提出了一种基于改进混沌粒子群优化的构网型光储接入优化控制策略。首先构建了以负荷电压偏差最小化、光伏发电功率最大化及线路损耗最小化为目标的多目标优化模型。根据系统需求, 设定负荷电压偏差的优化优先级最高, 线路损耗最低。通过优先级排序将多目标问题转化为 3 个单目标优化问题。为提高求解效率, 改进了混沌粒子群算法初始参数选取策略。仿真结果表明, 所提方法具有更快的收敛速度和更高的求解精度, 验证了控制策略的有效性。

关键词: 构网; 有源配电台区; 电压质量; 优化控制; 光储

Optimization Control for Grid-Forming Photovoltaic Energy Storage Access to Distribution Station Based on Chaotic PSO

ZHENG Shuang¹, GONG Yanjiang¹, GU Tiansong¹, FENG Xinzheng²

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan Power Supply Company, Tangshan, Hebei 063000, China; 2. State Grid Shanghai Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Nanjing 201203, China)

Abstract: A grid-forming photovoltaic energy storage access optimization control strategy based on improved chaotic particle swarm optimization is proposed to address the issues of voltage fluctuations, low utilization of renewable energy, and line losses caused by the integration of traditional photovoltaic energy storage grid-forming inverters into active distribution stations. Firstly, a multi-objective optimization model is constructed with the objectives of minimizing load voltage deviation, maximizing photovoltaic power generation, and minimizing line losses. According to system requirements, the optimization priority for load voltage deviation is set to be the highest and the line loss is the lowest. Multi-objective problems are transformed into three single objective optimization problems through priority sorting. To improve the efficiency of solving, the initial parameter selection strategy of the chaotic particle swarm algorithm is improved. The simulation results show that the proposed method has faster convergence speed and higher solution accuracy, which verify the effectiveness of the control strategy.

Key words: grid-forming; active distribution station; voltage quality; optimal control; photovoltaic energy storage

0 引言

积极稳妥地推进以新能源为主体的新型电力系统建设是实现“碳达峰、碳中和”这一伟大战略目标的重要途径^[1-2]。然而, 大规模间歇性、波动性可

再生能源的并网以及大量基于电力电子装置的电力设备接入给用电负荷、低压配电台区乃至整个电力系统带来了新的挑战^[3-4]。例如: 大量光伏面板通过传统跟网型变流器并网后会导致公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压抬升, 严重时甚至引发弃光现象^[5]; 大量电力电子感性负荷的接入则会导致网侧功率因数偏低, 进而影响系统运行效率^[6]。由于构网型变流器具备电压及频率支撑的能力, 其在主网、配网及微电网中的应用也日益增多^[7-9]。因此, 积极推进构网型变流器接入有源

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52467006); 冀北综合计划项目(520103240003)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52467006); Jibei Comprehensive Planning Project(520103240003).

低压配电台区有助于解决配电网电能质量不佳及可再生能源利用率低的问题。

目前,有关构网型变流器的研究主要集中于构网控制策略的研究。其中下垂控制、虚拟同步发电机控制应用最为广泛,这两类控制策略都是通过模拟同步发电机的运行原理来提供惯量、阻尼及调频电压特性^[10-11]。此外,近年来也有学者提出了一系列基于非线性控制的构网策略,主要包括匹配控制与虚拟振荡器控制等^[12-13]。然而,这一类构网控制大多聚焦于主网的频率及电压支撑能力的研究,却并未充分考虑其在网架结构比较薄弱的有源低压配电台区中的电压波动、无功功率补偿等电能质量问题的综合治理。此外,与传统跟网型变流器相比,构网型光储变流器不仅能提供稳定的频率支撑,还在高阻抗比(0.8~1.2)的有源配电台区中表现出更强的稳定性。跟网型变流器虽可调节电压,但在高阻抗比台区易引发失稳,而构网型变流器以电压源模式运行,因而具有更高的稳定裕度^[7-9]。

构网型变流器在电能质量问题治理方面的研究目前主要集中于单一的无功功率补偿、谐波抑制等领域。针对工业园区的电压暂降问题,文献[14]提出了一种基于构网型储能逆变器的电压暂降分级治理策略,有效实现了对工业园区电压暂降的治理。对于不平衡及谐波治理问题,有学者提出了一种基于统一电压-电流下垂的构网型变流器不平衡与谐波控制策略,显著降低了公共耦合点的电压不平衡及谐波^[15]。此外,为解决多构网型变流器间的无功功率分配问题,文献[16]深入分析了并联变流器的功率分配机理,并提出了一种将无功功率分配误差与输出电压相结合的自适应虚拟阻抗设计方法,不仅实现了无功功率的高精度分配,还同时抑制了变流器间的环流。文献[17]则提出了考虑构网型储能电站辅助治理的无功功率协调优化控制策略,以满足无功功率协调优化及实时电压支撑的需求,有效提升了新能源基地的安全稳定水平。然而,上述研究均未同时涵盖电压波动、无功功率补偿及新能源消纳等多个方面的综合考量。

多种电能质量问题的同时优化实际上属于多目标优化范畴。文献[18]提出了一种基于精英策略的非支配排序遗传算法,该算法不仅实现了并网逆变器电能质量综合指标的最优化,还使得逆变器投入的补偿容量最小化。文献[19]则提出了基于多要素

改进的第二代非支配排序遗传算法的有源配电网多目标优化策略,有效降低了电压偏差成本和有功网损成本。进一步地,针对分布式电源接入电网所引发的电压闪变及运行成本增加问题,文献[20]提出了适用于高渗透率分布式电源接入光伏电网的双层调度方法,该方法不仅确保了电网经济效益的最大化,还实现了电能质量的优化。

然而,上述优化策略大多集中于跟网型变流器,尚未充分考虑构网变流器自身的电压支撑特性。此外,这些多种电能质量问题同时优化的方法仍依赖于多目标优化算法进行求解,求解过程耗时耗力,难以适用于实时控制系统。

为此,针对光储经传统变流器接入有源配电台区所引发的电压波动、可再生能源利用率低以及线路损耗高等问题,本文提出了基于混沌粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[21-22]的构网型储能接入有源配电台区的自适应优化控制策略。该策略综合考虑了光伏消纳率、负荷电压质量及线路损耗。本文的主要贡献如下。

1)提出了一种构网型光储接入的有源配电台区的电能质量控制策略,可同时提高可再生能源利用率、供电电压质量及线路损耗。

2)提出了一种基于优化目标优先权的多目标优化算法。基于优化目标的优先权,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,便于实时求解。

3)提出了一种混沌PSO算法来求解单目标优化问题,优化了PSO算法初始值的选取,提升了算法求解的速度。

1 构网型光储接入配电台区简介及建模

1.1 构网型储能接入低压配电台区系统简介

图1所示为光伏与储能经构网变流器接入配电台区结构示意图。公共电网经过输电线路与变压器为配电台区供电。台区中光伏与储能连接至直流母线,并通过构网变流器与交流电网连接,光伏发电功率为 P_{pv} ,储能电池的输出功率为 P_{ba} 。同时逆变器也可输出无功 Q_{sl} 来补偿负荷无功功率需求,以维持电网的高功率因数运行。交流负荷连接至交流母线,负荷电压及电流为 v_L 和 i_L 。

依据光伏与储能出力的大小可将系统的运行情况划分为以下几类。

1)光储均断开连接, $P_{pv}=P_{ba}=0$ kW。此时,电网

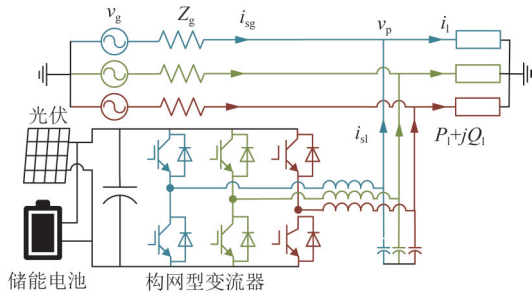


图 1 构网型光储接入有源配电台区结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid-forming photovoltaic energy storage access to active distribution station

为负荷供电, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

2) 储能断开连接, $P_{ba}=0$ kW。公共电网与光伏为负荷供电, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

3) 储能断开连接, $P_{ba}=0$ kW。光伏向电网及负荷传输能量, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

4) 光伏、储能及公共电网共同为负荷供电, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

5) 光伏向公共电网及负荷供电, 储能处于充电模式, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

6) 公共电网断开连接, 光伏与储能共同向负荷供电, 光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿。

这 6 类工况主要是根据图 1 中的系统电路结构进行划分: 工况 1 主要考虑光储未接入电路或光伏面板不工作的情况; 工况 2 和工况 3 则考虑储能未接入电路的情形; 工况 4 和工况 5 考虑所有光储及电网均接入电路的情况; 工况 6 则考虑公共电网未接入的工况。由于储能的接入光伏发出的多余功率不仅可以传输至电网, 还可以通过储能电池进行能量存储, 待需要时释放从而实现削峰填谷、提升新能源消纳的效果; 同时还能配合构网变流器提升电压质量、进行无功功率补偿。

1.2 构网型光储接入有源配电台区数学模型建立

负荷电压可以描述为:

$$\begin{bmatrix} v_{pd} \\ v_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sgd} \\ i_{sgq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v_{pd} 、 v_{pq} 分别为公共耦合点电压的 d 、 q 轴分量; R_g 与 L_g 分别为等效电阻与电抗; i_{sgd} 、 i_{sgq} 分别为电网电流的 d 、 q 轴分量; v_{gd} 、 v_{gq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量; ω 为电网角频率。

构网变流器输出电流可写为:

$$\begin{bmatrix} i_{sld} \\ i_{slq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{sgd} \\ i_{sgq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i_{sld} 、 i_{slq} 分别为构网变流器输出电流的 d 、 q 轴分量; i_{ld} 、 i_{lq} 分别为负荷电流的 d 、 q 轴分量。

负荷端复功率相量 S_l 为:

$$S_l = 1.5v_p \cdot \hat{i}_l = P_l + jQ_l \quad (3)$$

式中: $v_p = v_{pd} + jv_{pq}$ 为负荷电压相量; $\hat{i}_l$ 为负荷电流相量 i_l 的共轭值, $i_l = i_{ld} + ji_{lq}$; P_l 与 Q_l 分别为负荷有功功率与无功功率, 其可进一步写为:

$$\begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} v_{pd} & v_{pq} \\ v_{pq} & -v_{pd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

依据式(1)~(3)可以进一步得到构网变流器的输出复功率 S_{sl} 为:

$$S_{sl} = 1.5v_p \cdot \hat{i}_{sl} = P_{pv} + P_{ba} + jQ_{sl} \quad (5)$$

式中: $i_{sl} = i_{sld} + ji_{slq}$, 为构网变流器输出电流相量; $\hat{i}_{sl}$ 为构网变流器输出电流 i_{sl} 的共轭值。

因此, 构网光储变流器的视在功率可写为:

$$|S_{sl}| = \sqrt{(P_{pv} + P_{ba})^2 + Q_{sl}^2} \quad (6)$$

电网发出的复功率 S_g 可描述为:

$$S_g = 1.5v_g \cdot \hat{i}_{sg} = P_g + jQ_g \quad (7)$$

式中: $v_g = v_{gd} + jv_{gq}$, 为电网电压相量; $\hat{i}_{sg}$ 为电网电流相量 i_{sg} 的共轭值, $i_{sg} = i_{sgd} + ji_{sgq}$; P_g 与 Q_g 分别为电网发出的有功功率与无功功率, 其可进一步写为:

$$\begin{bmatrix} P_g \\ Q_g \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} v_{gd} & v_{gq} \\ v_{gq} & -v_{gd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sgd} \\ i_{sgq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

依据功率守恒定律, 电网侧复功率 S_g 可写为:

$$S_g = S_l - S_{sl} + 1.5I_{sg}^2(R_g + j\omega L_g) \quad (9)$$

式中 I_{sg} 为电网电流幅值。

假定电网电压幅值为 $V_g = \lambda V_g^*$, λ 为电网电压实际幅值与额定幅值的比值, V_g^* 为电网电压额定幅值。根据式(1)~(9), 电网电流表达式可写为:

$$\begin{cases} i_{sgd} = (\mathcal{R} + 1.5R_g \Im) / (1.5\lambda V_g^*) \\ i_{sgq} = (\mathcal{N} + 1.5\omega L_g \Im) / 1.5\lambda V_g^* \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\mathcal{R}$ 、 $\mathcal{N}$ 为中间变量, 且有:

$$\mathcal{R} = P_l - P_{pv} - P_{ba} \quad (11)$$

$$\mathcal{N} = \frac{[1.5(\lambda V_g^*)^2 - 2(\mathcal{R}R_g + \Im\omega L_g)]}{3[R_g^2 + (\omega L_g)^2]} - \frac{\sqrt{[1.5(\lambda V_g^*)^2 - 2(\mathcal{R}R_g + \Im\omega L_g)]^2 - 4(\mathcal{R}^2 + \Im^2)[R_g^2 + (\omega L_g)^2]}}{3[R_g^2 + (\omega L_g)^2]} \quad (12)$$

可以求得 PCC 电压幅值 V_p 为:

$$V_p = \sqrt{(\lambda V_g^*)^2 + [R_g^2 + (\omega L_g)^2] N - \frac{4}{3} [R_g(+1.5R_g N) - \omega L_g(\Im + 1.5\omega L_g N)]} \quad (13)$$

式中 $\Im = Q_1 - Q_{sl}$, 为中间变量。

同样地, 可以求得系统线路损耗 P_{Loss} 的表达式为:

$$P_{Loss} = 1.5I_{sl}^2 R_l = 1.5R_g N \quad (14)$$

式中: I_{sl} 为系统线路电流; R_l 为线路电阻。

相较于其他电压等级的光储接入系统, 本文研究对象为含分布式电源的末端供电单元。尽管所提模型确实具有跨电压等级的普适性理论基础, 但研究聚焦有源配电台区的几个独特场景: 1) 特定阻抗特性: 台区线路 R_l/L_l (L_l 为线路电感) 比值显著高于输电网, 这将导致传统跟网变流器并网易失稳, 而本文所提出的构网型变流器因具备电压及频率支撑功能, 其在此场景下的稳定裕度显著高于传统跟网型变流器; 2) 特殊控制需求: 有源配电台区需同时应对上级电网电压波动与本地光伏反送功率冲击。

1.3 优化问题与约束

为提升台区的供电质量及运行效率, 主要考虑以下 3 个优化目标。

- 1) 最小化负荷节点电压偏差;
- 2) 最大化新能源发电系统发电功率;
- 3) 最小化线路损耗。

光伏逆变器为负荷提供无功功率补偿主要用于改善负荷节点电压、提升网侧功率因数及降低网损。而提升网侧功率因数主要目的也是为了降低网损, 所以本文主要考虑线路损耗最小化这一优化目标。

因此, 所述系统优化目标如式(15)所示, 优化问题中变流器的运行约束如式(16)所示。

$$\text{Min} \begin{cases} f_1 = (V_p - V_g^*)^2 \\ f_2 = (P_{pv} - P_{pv, \max})^2 \\ f_3 = P_{Loss}^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} |S_{sl}| \leq |S_{sl}^*| \\ 0 \leq P_{pv} \leq P_{pv, \max} \\ 0.93V_g^* \leq V_p \leq 1.07V_g^* \\ 0 \leq I_{sl} \leq I_{sl, \max} \\ P_{ba, \max}^- \leq P_{ba} \leq P_{ba, \max}^+ \\ S_{\min}^{\text{soc}} \leq S^{\text{soc}}(t) \leq S_{\max}^{\text{soc}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 分别为负荷节点电压偏差、光伏发电功率偏差、及线路损耗函数; V_p 为 PCC 电压幅值; $|S_{sl}^*|$ 为变流器额定容量; 下标“max、min”分别代表变量的最大、最小值; $I_{sl, \max}$ 为变流器最大输出电流; $S^{\text{soc}}(t)$ 为 t 时刻电池的荷电状态; $P_{ba, \max}^+$ 与 $P_{ba, \max}^-$ 分别为储能电池的最大充、放电功率。

2 基于分层优化的多目标优化问题简化

式(16)——(17)是一类多目标优化问题, 不易实时求解。为了便于实时控制的实施, 本文提出一种基于分层优化的多目标优化思想, 基于优化目标的优先权将多目标优化问题转化为单目标优化问题。对于普通用户而言, 安全可靠的供电电压是保障用户用电安全的重要保障之一, 因此将供电电压幅值偏差最小化这一目标设定为最高优先权; 在获得安全可靠供电电压的前提下用户还应尽可能多地获取由光伏产生的经济收益, 因此将光伏发电功率最大化这一目标设定为第二优先权; 最后, 系统网损直接与电网运营成本相关, 为降低电网运营成本, 故将系统损耗最小化这一目标定义为第三优先权。依据优化目标的实现情况, 可将系统的运行状态分为以下 3 类不同运行工况。

2.1 运行工况 A

该工况下, 假定供电电压偏差能控制在允许范围且光伏以最大发电功率运行, 那么前两个优化目标可改写成为优化问题的约束, 此时 3 个优化目标仅需优化第 3 个优化目标, 也即线路损耗最小化。因此式(15)——(16)优化问题可进一步写为:

$$\text{Min} f_3 = P_{Loss}^2 \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} |S_{sl}| \leq |S_{sl}^*| \\ 0 \leq I_{sl} \leq I_{sl, \max} \\ 0.93V_g^* \leq V_p \leq 1.07V_g^* \\ P_{pv} = P_{pv, \max} \\ P_{ba, \max}^- \leq P_{ba} \leq P_{ba, \max}^+ \\ S_{\min}^{\text{soc}} \leq S^{\text{soc}}(t) \leq S_{\max}^{\text{soc}} \end{cases} \quad (18)$$

2.2 运行工况 B

此工况下, 假定供电电压偏差能控制在允许范围, 此时还有光伏发电功率最大化及线路损耗最小化两个优化目标, 由于光伏发电功率最大化这一优化目标优先权更高, 此工况下仅考虑发电功率最大化这一优化目标。因此优化问题式(15)——(16)可进

一步写为:

$$\text{Min} f_2 = (P_{pv} - P_{pv, \max})^2 \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} |S_{sl}| \leq |S_{sl}^*| \\ 0 \leq P_{pv} \leq P_{pv, \max} \\ 0 \leq I_{sl} \leq I_{sl, \max} \\ 0.93V_g^* \leq V_p \leq 1.07V_g^* \\ P_{ba, \max}^- \leq P_{ba} \leq P_{ba, \max}^+ \\ S_{\min}^{\text{soc}} \leq S^{\text{soc}}(t) \leq S_{\max}^{\text{soc}} \end{cases} \quad (20)$$

2.3 运行工况 C

该工况下, 假定供电电压偏差无法控制在允许范围, 且光伏无法以最大发电功率运行。由于 3 个优化目标均无法精准实现, 且供电电压偏差最小化这一优化目标的优先权最高, 因此该工况只考虑供电电压偏差最小化这一优化目标。优化问题可写为:

$$\text{Min} f_1 = (V_p - V_g^*)^2 \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} |S_{sl}| \leq |S_{sl}^*| \\ 0 \leq P_{pv} \leq P_{pv, \max} \\ 0.9V_g^* \leq V_p \leq 1.1V_g^* \\ 0 \leq I_{sl} \leq I_{sl, \max} \\ P_{ba, \max}^- \leq P_{ba} \leq P_{ba, \max}^+ \\ S_{\min}^{\text{soc}} \leq S^{\text{soc}}(t) \leq S_{\max}^{\text{soc}} \end{cases} \quad (22)$$

因此, 基于优化目标的优先权顺序可将系统的运行工况分为 3 类。当系统运行在工况 1 光伏未接入或不工作时, 其发电功率为 0 kW, 此时仅考虑优化目标 1 和 3(最小化负荷电压偏差和最小化线路损耗), 即系统可运行在工况 A 和 C; 当系统运行在工况 2 和 3 时储能的输出功率为 0 kW, 3 个优化目标均要考虑, 即系统可运行在工况 A、B 和 C; 当系统运行在工况 4 和 5, 则 3 个优化目标也均要考虑, 即系统可运行在工况 A、B 和 C; 然而当系统运行在工况 6 时, 此时仅考虑优化目标 1 和 2(最小化负荷电压偏差和最大化光伏发电功率), 系统可运行在工况 B 和 C。

因此, 基于该分层优化思想多目标优化问题可简化为 3 个单目标优化问题, 而 3 个单目标优化的实现也即多目标优化问题的实现。譬如: 工况 A 中虽然仅优化了线路损耗这一优化目标, 但实际上供电电压偏差最小化及光伏发电功率最大化这两个优化目标已充分实现, 故此工况 3 个优化目标均实现

了优化。为进一步提升单目标优化问题的求解速度与精度, 下一节将介绍所采用的改进算法。

3 基于改进 PSO 的单目标优化问题求解

3.1 传统 PSO 算法简介

PSO 算法是一种简单可靠的基于随机群体的算法, 它以随机方式生成初始种群, 该群体的粒子运动在每次迭代时都会更新^[21-22], 更新方式可写为:

$$\begin{cases} V_i(n+1) = \eta V_i(n) + c_1 r_1 [p_{\text{best}, i}^n - X_i(n)] + \\ \quad c_2 r_2 [g_{\text{best}}^n - X_i(n)] \\ X_i(n+1) = X_i(n) + V_i(n+1) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $X_i(n)$ 和 $V_i(n)$ 分别为第 n 次迭代中的第 i ($i \in \{1, 2, \dots, |N_{\text{POP}}|\}$; $|N_{\text{POP}}|$ 为种群规模) 个粒子的位置和速度; $n = 1, 2, \dots, T_{\max}$, $T_{\max}$ 为最大迭代数量; c_1 和 c_2 为加速系数; η ($\eta \in [0.4, 0.9]$) 为惯性系数; r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的随机数; $p_{\text{best}, i}^n$ 为第 i 个粒子在第 n 次迭代中的最佳位置; g_{best}^n 为当前全局最佳位置, 即最优解。

3.2 改进 PSO 算法

依据式 (26), PSO 粒子速度的更新与随机数 r_1 和 r_2 密切相关, 由于搜索过程的随机性, 导致传统 PSO 算法收敛速度低和无法摆脱局部最优等问题。因此, 本文提出了一种改进 PSO 算法来求解第 2 节单目标优化问题。在所提算法中, 所有随机数都被混沌序列所取代。混沌系统是一种动态确定性系统, 其对参数和初始条件十分敏感。这意味着初始值的微小变化, 都将导致系统行为的巨大变化。因此, 混沌序列可维持种群多样性并改善随机优化方法的收敛特性。

在所提的改进 PSO 中, 混沌序列被用来代替描述初始解中粒子生成的方程和用于更新粒子速度的方程 (23) 中涉及的随机数。为此, 采用洛伦兹吸引子来生成这些混沌序列。洛伦兹吸引子可描述为:

$$\begin{cases} dx/dt = F_1(x, y, z) = \delta(y - x) \\ dy/dt = F_2(x, y, z) = x(\rho - z) - y \\ dz/dt = F_3(x, y, z) = xy - \beta z \end{cases} \quad (24)$$

式中: x 、 y 和 z 为洛伦兹系统状态; $F_1(x, y, z)$ 、 $F_2(x, y, z)$ 、 $F_3(x, y, z)$ 分别为相应的洛伦兹吸引子; δ 、 ρ 和 β 为系统参数; t 为时间。如果系统的参数 δ 、 ρ 和 β 分别为 10、28 和 8/3, 则洛伦兹系统

表现出混沌行为。式(24)可采用四阶龙格-库塔法进行数值求解。此方法首先分别固定序列 $\{x_k\}$ 、 $\{y_k\}$ 和 $\{z_k\}$ 的初始条件 x_0 、 y_0 、 z_0 。然后, x_k 、 y_k 、 z_k 在时间 t_k 的数值可计算为:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + (m_{11} + 2m_{12} + 2m_{13} + m_{14})/6 \\ y_k = y_{k-1} + (m_{21} + 2m_{22} + 2m_{23} + m_{24})/6 \\ z_k = z_{k-1} + (m_{31} + 2m_{32} + 2m_{33} + m_{34})/6 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, K$, K 为RK4法的最大迭代数量; m_{ij} ($i=1, 2, 3, 4$; $j=1, 2, 3, 4$)为相应洛伦兹系统参数。

$$\begin{cases} m_{i1} = F_i(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})\Delta t \\ m_{i2} = F_i(x_{k-1} + m_{i1}/2, y_{k-1} + m_{i2}/2, z_{k-1} + m_{i3}/2)\Delta t \\ m_{i3} = F_i(x_{k-1} + m_{i2}/2, y_{k-1} + m_{i2}/2, z_{k-1} + m_{i3}/2)\Delta t \\ m_{i4} = F_i(x_{k-1} + m_{i3}/2, y_{k-1} + m_{i3}/2, z_{k-1} + m_{i3}/2)\Delta t \end{cases} \quad (26)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4$; $F_i(\cdot)$ 为第 i 个洛伦兹吸引子; Δt 为时间步长。

为将序列 $\{x_k\}$ 、 $\{y_k\}$ 和 $\{z_k\}$ 取值保持在区间 $[0, 1]$ 内, 必须将这些序列规范化为如下形式。

$$\tilde{h}_k = \frac{h_k - h_{k,\min}}{h_{k,\max} - h_{k,\min}} \quad (27)$$

式中: $h \in \{x, y, z\}$, 为相应混沌序列; $h_{k,\max}$ 和 $h_{k,\min}$ 分别为 h_k 的最大值和最小值; 上标“~”为变量的归一化形式。

与状态变量 x 对应的混沌序列 $\{x_k\}$ 用于生成初始种群。对于 D 维问题, 混沌序列的大小必须至少等于 $D|N_{\text{POP}}|$ 。与序列 $\{x_k\}$ 对应的矩阵 $\mathbf{X}_C$ 可定义为:

$$\mathbf{X}_C = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{D(|N_{\text{POP}}|-1)} & \cdots & x_{D|N_{\text{POP}}|} \end{bmatrix} \quad (28)$$

因此, 初始种群可以按式(29)方式生成。

$$X_{ij} = X_{j,\min} + (X_{j,\max} - X_{j,\min})X_{Cij} \quad (29)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, D$; X_{ij} 为第 i 个粒子的第 j 个决策变量值; X_{Cij} 为矩阵 $\mathbf{X}_C$ 第 i 行第 j 列的元素; $X_{j,\min}$ 和 $X_{j,\max}$ 分别为决策变量的搜索下限和搜索上限。

为了更新(23)中描述的速度, 采用与状态变量 y 和 z 对应的混沌序列 $\{y_k\}$ 和 $\{z_k\}$ 来代替随机数 r_1 和 r_2 。对应于序列 $\{y_k\}$ 和 $\{z_k\}$ 的矩阵(大小均为 $T_{\max} \times$

$|N_{\text{POP}}|$)如式(30)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{CY} = \begin{bmatrix} y_1 & \cdots & y_{|N_{\text{POP}}|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{|N_{\text{POP}}|(T_{\max}-1)} & \cdots & y_{T_{\max}|N_{\text{POP}}|} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_{CZ} = \begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_{|N_{\text{POP}}|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{|N_{\text{POP}}|(T_{\max}-1)} & \cdots & z_{T_{\max}|N_{\text{POP}}|} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (30)$$

式中 $\mathbf{M}_{CY}$ 和 $\mathbf{M}_{CZ}$ 分别为序列 $\{y_k\}$ 和 $\{z_k\}$ 的矩阵。

然后, 在每次迭代 k 时对于每个粒子 i 从矩阵 $\mathbf{M}_{CY}$ 和 $\mathbf{M}_{CZ}$ 中提取数字 r_1 和 r_2 的值, 如式(31)所示。

$$\begin{cases} r_1 = CY_{ki} \\ r_2 = CZ_{ki} \end{cases} \quad (31)$$

式中: Y_{ki} 和 Z_{ki} 分别为在迭代 k 时粒子 i 在矩阵 $\mathbf{M}_{CY}$ 和 $\mathbf{M}_{CZ}$ 中对应值。

因此, 新的迭代方程可修改为:

$$\begin{cases} V_i(n+1) = \eta V_i(n) + c_1 CY_{ni} [p_{\text{best},i}^n - X_i(n)] + \\ c_2 CZ_{ni} [g_{\text{best}}^n - X_i(n)] \\ X_i(n+1) = X_i(n) + V_i(n+1) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $V_i(n+1)$ 和 $X_i(n+1)$ 分别为第 $n+1$ 次迭代中的第 i 个粒子的位置和速度; Y_{ni} 为在迭代 n 时粒子 i 在矩阵 $\mathbf{M}_{CY}$ 中对应值。

3.3 基于改进PSO算法的配电台区优化问题求解

图2为基于改进PSO的构网型光储接入低压配电台区优化运行流程图。由图2可知, 首先获取系统参数, 主要包括光伏最大发电功率、电池最大充放电功率、电池最大及最小荷电状态、变流器的额定输出电流及容量、电网电压状态、线路阻抗、负荷有功及无功功率。进一步形成多目标优化问题式(15)~(16); 依据参数判断是否满足优化运行工况A的约束式(18), 若满足约束, 则开始应用改进算法求解优化问题式(17)~(18); 若不满足约束式(18), 则进而判断是否满足优化运行工况B的约束式(20), 若满足约束, 则开始应用改进算法求解优化问题式(19)~(20)。

在改PSO算法中, 应用洛伦兹吸引子公式(即式(23)~(26))产生混沌序列, 并基于式(27)归一化混沌序列; 基于式(29)生成初始种群、评价每个粒子的适应度函数; 然后计算局部和全局最优解; 进一步基于式(32)更新粒子方向, 基于式(23)更新粒子位置, 并评价每个字的适应度函数, 若收敛,

则输出最优解; 反之, 则重新计算局部、全局最优解, 重新更新利息方向和位置, 直到满足收敛条件。

若不满足约束(20), 则进而判断是否满足优化运行工况的约束条件式(22), 若满足约束, 则开始应用改进 PSO 算法求解优化问题(式(21)–(22))。最后, 多目标优化问题的解(P_{pv} 、 P_{ba} 、 Q_{sl})作为构网变流器的输入参考, 以实现有源配电台区的优化运行。

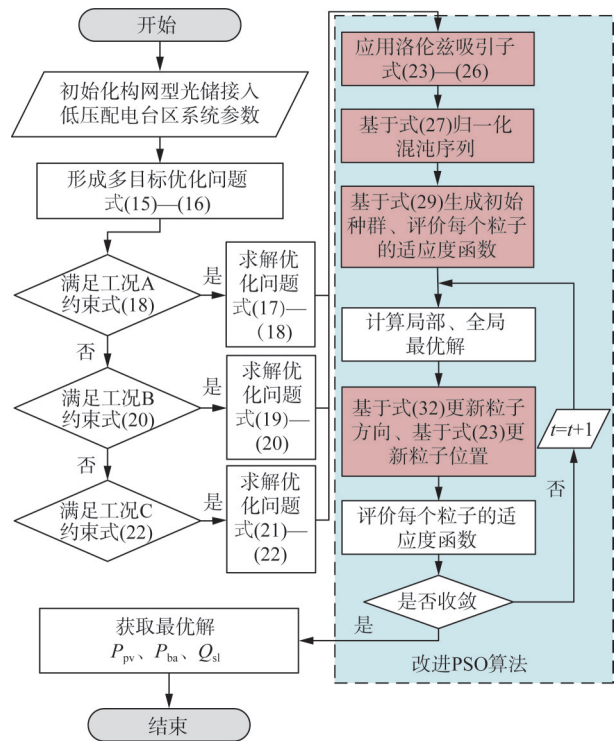


图2 基于混沌 PSO 算法的系统优化流程图

Fig. 2 System optimization flowchart based on chaotic PSO algorithm

4 算例分析及仿真

本节主要验证所提优化策略及改进 PSO 算法在构网型储能接入有源配电台区运行优化过程中的有效性及合理性。本文所采用低压配电网系统电压等级为 380/220 V, 表中 V_g 为相电压幅值, 其数值为 $220\sqrt{2}\approx 311$ V。系统参数如表 1 所示。表 2 为 4 种不同算法的比较结果。图 3 为电网电压正常、不同算法下系统损耗。

4.1 改进 PSO 算法性能分析

本小节主要通过对比分析传统 PSO 算法、遗传

表 1 构网型光储系统参数

Tab. 1 Parameters of grid-forming photovoltaic and energy storage system

参数	数值
V_g/V	311
$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314.15
$R_g+j\omega L_g/\Omega$	$2+j2$
S_l/kVA	$10+j10$
$ S_{sl}^* /\text{kVA}$	8
$I_{sl,\max}/\text{A}$	50
$P_{pv,\max}/\text{kW}$	6
$P_{ba,\max}^+/\text{kW}$	4
$P_{ba,\max}^-/\text{kW}$	-4

表 2 4 种不同算法的比较结果

Tab. 2 Comparison results of four different algorithms

算法类型	最优值	平均值	标准偏差
FEP	1.190 8	1.160 6	1.89×10^{-2}
GA	1.190 6	1.190 5	3.03×10^{-3}
PSO	1.190 5	1.190 6	1.68×10^{-4}
改进 PSO	1.190 0	1.190 0	8.56×10^{-8}

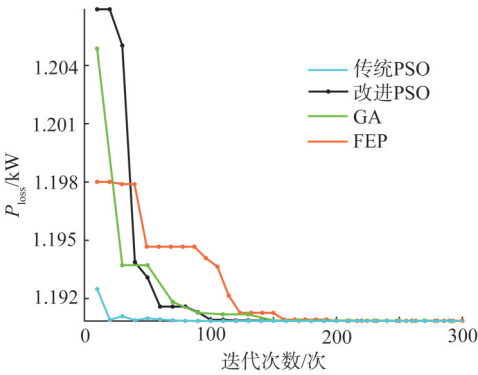


图3 电网电压正常、 $P_{pv,\max} = 4$ kW 不同算法下系统损耗

Fig. 3 Power losses with different optimization algorithms when the grid voltage is normal and $P_{pv,\max} = 4$ kW

算法 (genetic algorithm, GA)、自由能微扰算法 (free energy perturbation, FEP), 来证实所提改进 PSO 算法来验证求解结果的正确性。本案例中假定该时刻光伏最大发电功率为 4 kW, 电网电压为额定电压, 其他参数可见表 1。

表 2 所示为 $P_{pv,\max} = 4$ kW、电网电压正常时系统优化结果。系统此时处于运行工况 A, 也即最终系统的电压幅值在允许范围内, 光伏发电功率为 4 kW。此时不同优化算法下求得系统损耗约为 1.19 kW。由图 3 和表 2 可知, 所提的改进 PSO 算法收敛

速度最快、求解精度最高。

4.2 案例分析

本小节进一步在 MATLAB/Simulink 平台搭建仿真模型,以验证所提自适应优化策略在改善低压配电台区优化控制策略方面的正确性。构网型储能交流侧采用传统下垂控制,直流侧光伏及储能均采用传统 PI 控制。表 3 所示为不同运行工况下构网型储能接入低压配电台区的优化结果。案例 1 中 $P_{pv,max}=0$ W, $P_{ba,max}=\pm 4$ W; 案例 2 中 $P_{pv,max}=4$ kW, $P_{ba,max}=\pm 4$ W; 案例 3 中 $P_{pv,max}=6$ kW, $P_{ba,max}=\pm 4$ kW。

表 3 不同工况下构网型储能接入低压配电台区的优化结果

Tab. 3 Optimal operation results of grid-forming energy storage access to active distribution station under different working conditions		λ			
序号	参数	0.9	1.0	1.1	1.2
1	V_p /V	280.63	315.41	332.77	
	P_{ba} /kW	4	4	0.42	
	Q_{sl} /kvar	6.93	6.93	7.99	
	P_{loss} /kW	1.52	1.21	2.28	
2	V_p /V	262.68	290.61	323.70	331.40
	P_{pv} /kW	4	4	4	4
	P_{ba} /kW	3.75	1.96	1.85	-3.58
	Q_{sl} /kvar	1.97	5.34	5.46	7.99
	P_{loss} /kW	2.63	1.19	0.96	2.42
3	V_p /V	262.72	290.76	322.91	332.78
	P_{pv} /kW	6.0	6	6	6
	P_{ba} /kW	1.73	0.04	-0.34	-4
	Q_{sl} /kvar	2.07	5.25	5.65	-3.27
	P_{loss} /kW	2.57	1.21	0.96	5.62

4.2.1 $P_{pv,max}=0$ kW 运行工况

此工况下,光伏面板与变流器断开,直流侧仅有储能电池工作。

图 4—5 所示为系统在 $P_{pv,max}=0$ kW 工况下的仿真运行结果。仿真将结果主要包括电网电压波形、公共耦合点电压波形、电网电流波形、及系统有功和无功功率波形。由图 4—5 及表 3 可知,在 $[0.1, 0.3]$ s 内,电网电压幅值标幺值为 1 p. u., 优化后,公共耦合点电压为 280.63 V, 此时储能以最大功率 4 kW 向外放电,变流器输出无功为 6.93 kvar。此时,系统处于运行工况 C,也即线路损耗、公共耦合点电压偏差两个优化目标均无法充分实现。在 $[0.3, 0.4]$ s 内,电网电压幅值标幺值为

1.1 p. u., 优化后,公共耦合点电压为 315.41 V, 此时储能以最大功率 4 kW 向外放电,变流器输出无功也为 6.93 kvar。此时,系统处于运行工况 A,也即公共耦合点电压偏差在允许范围内,且线路损耗最小为 1.21 kW。在 $[0.4, 0.5]$ s 内,电网电压幅值标幺值为 1.2 p. u., 采用优化策略后,公共耦合点电压为 332.77 V (小于 $1.07 \times 220\sqrt{2}$), 此时储能放电功率为 0.42 kW, 变流器输出无功为 7.99 kvar。此时,系统处于工况 A,也即公共耦合点电压偏差在允许范围内,且线路损耗最小为 2.88 kW。

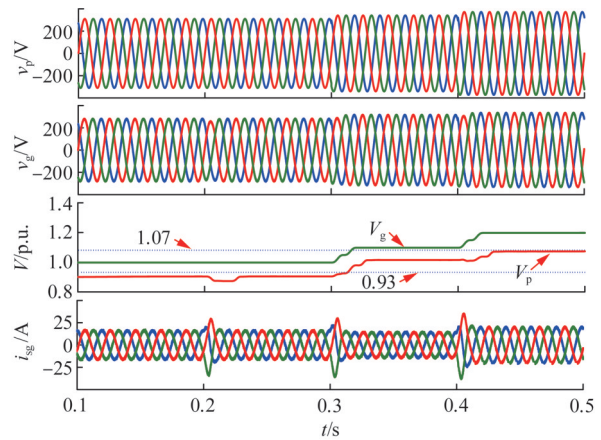


图 4 $P_{pv,max}=0$ kW 时系统电压、电流波形

Fig. 4 Voltage and current waveforms of proposed system when $P_{pv,max}=0$ kW

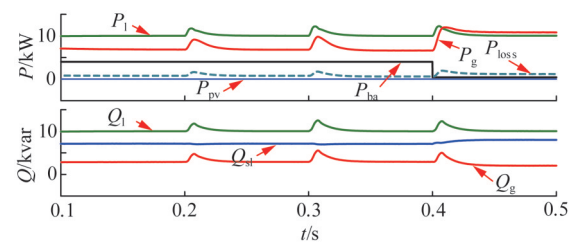


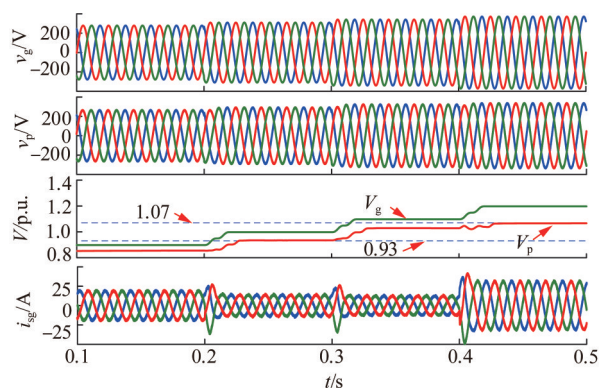
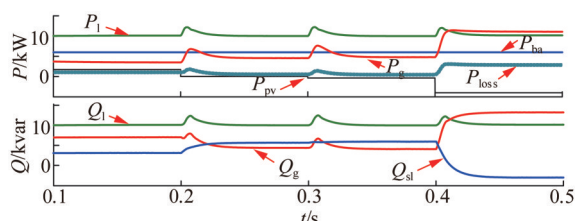
图 5 $P_{pv,max}=0$ kW 时系统功率波形

Fig. 5 Power flow waveforms of proposed system when $P_{pv,max}=0$ kW

4.2.2 $P_{pv,max}=6$ kW 运行工况

该工况下,光伏面板与变流器连接,直流侧的储能电池与光伏面板均可正常工作。系统在工况下的仿真运行结果可见图 6—7。

由图 5—6 及表 3 可知,在 $[0.1, 0.2]$ s 内,电网电压幅值标幺值为 0.9 p. u., 采用优化策略后公共耦合点电压为 262.72 V, 此时光伏面板以最大发

图 6 $P_{pv,max}=6\text{ kW}$ 时系统电压、电流波形Fig. 6 Voltage and current waveforms of proposed system when $P_{pv,max}=6\text{ kW}$ 图 7 $P_{pv,max}=6\text{ kW}$ 时系统功率波形Fig. 7 Power flow waveforms of proposed system when $P_{pv,max}=6\text{ kW}$

电功率运行, 储能电池放电功率为 1.73 kW, 变流器输出无功为 2.07 kvar。此时, 系统处于运行工况 C, 也即线路损耗、公共耦合点电压偏差两个优化目标均无法充分实现。在 $[0.2, 0.3]\text{s}$ 内电网电压幅值标幺值为 1.0 p.u., 优化后公共耦合点电压为 290.76 V, 此时光伏面板以最大发电功率工作, 储能电池放电功率为 0.04 kW, 变流器输出无功也为 5.25 kvar, 系统处于运行工况 A, 也即公共耦合点电压偏差在允许范围内, 且线路损耗最小为 1.21 kW。在 $[0.2, 0.3]\text{s}$ 与 $[0.4, 0.5]\text{s}$ 内, 当电网电压幅值标幺值为 1.1 p.u. 和 1.2 p.u. 时, 经优化后公共耦合点电压均可维持在允许范围内 (大于 $0.93 \times 220\sqrt{2}\text{ V}$, 小于 $1.07 \times 220\sqrt{2}\text{ V}$)。此时系统处于运行工况 A, 也即公共耦合点电压偏差在允许范围内, 且光伏面板始终以最大发电功率运行, 而储能电池处于充电状态。

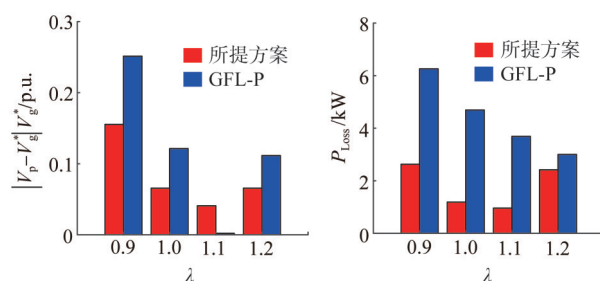
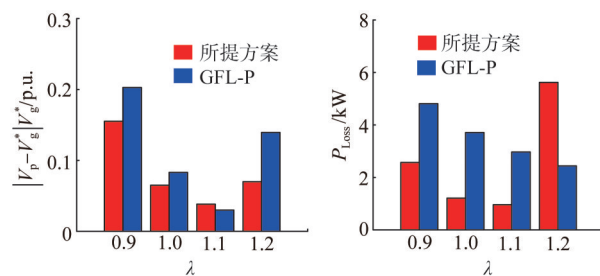
两个案例仿真下结果均与表 3 优化结果吻合, 进一步证实了所提优化方案的有效性。

4.3 所提优化方案与其他方案对比分析

由于当前农村及多数分布式光伏项目中, 受成

本制约, 光伏系统普遍以“并网不上网”或“自发自用余电上网”模式运行, 且大多未配置储能模块。基于此, 为进一步验证所提最优方案的合理性, 将所提方案的运行结果与仅有光伏阵列工作且变流器也不注入无功功率这一策略 (简称 GFL-P) 进行对比。

图 8—9 给出了系统在两种不同运行方案下的运行结果。由图可知, 在两种不同运行方案下所提方案在降低公共耦合点电压偏差、降低线路损耗方面性能更好。此外, 两种方案下光伏的消纳率都可以达到 100%。因此, 所提控制方案在改善电能质量和降低线路损耗方面具有较好的性能。

图 8 $P_{pv,max}=4\text{ kW}$ 时不同方案下的运行结果Fig. 8 Operation results under different schemes with $P_{pv,max}=4\text{ kW}$ 图 9 $P_{pv,max}=6\text{ kW}$ 时不同方案下的运行结果Fig. 9 Operation results under different schemes with $P_{pv,max}=6\text{ kW}$

5 结论

本文提出了一种基于混沌 PSO 算法的构网型光储接入有源配电台区的优化控制方法, 可解决光储经传统跟网型变流器接入有源配台区涌现的电压波动、可再生能源利用率低及线路损耗高等问题。首先分析并建立了构网型储能接入有源配电台区的数学模型, 提出了考虑有源配台区电压幅值偏差、新能源发电功率及线路损耗 3 个优化目标的多目标优化问题。为了便于快速求解多目标优化问

题, 本文基于优化目标的优先权将多目标优化问题简化为若干单目标优化问题, 并采用混沌 PSO 算法求解单目标优化问题。

最后, 通过案例证实了所提方案可提高求解速度及精度, 仿真结果表明: 1) 所提优化策略可大幅降低负荷电压偏差, 最严重情况下($\lambda=0.9$), 该策略可将传统策略下电压标幺值偏移 0.25 p. u. 降低至 0.15 p. u.; 2) 大多数工况下所提优化策略可大幅降低线路损耗, 最严重情况下($\lambda=0.9$)该策略可将传统策略下线路损耗 6.26 kW 降低至 2.63 kW。

参考文献

- [1] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327–8341.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Some basic issues in the construction of a new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327–8341.
- [2] 郑外生, 饶宏. 新型电力系统柔性构网技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 1–10.
ZHENG Waisheng, RAO Hong. Flexible network construction technology of new power system and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(12): 1–10.
- [3] 何晋伟, 孟维奇, 蒋玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2983–2994.
HE Jinwei, MENG Weiqi, JIANG Wei, et al. Analysis of typical problems of power quality in new energy distribution network and countermeasures [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2983–2994.
- [4] 张勇军, 秦绍基, 孙健, 等. 低压台区透明化技术研究综述[J]. 南方电网技术, 2025, 19(8): 118–130, 149.
ZHANG Yongjun, QIN Shaoji, SUN Jian, et al. Research review on transparent technology of low-voltage substation area [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 118–130, 149.
- [5] DEVASSY S, SINGH B. Performance analysis of solar PV array and battery integrated unified power quality conditioner for microgrid systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4027–4035.
- [6] 张明慧, 张逸, 刘必杰, 等. 考虑供用电双方无功功率补偿潜力的省级技术降损互动管控平台[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 160–169.
ZHANG Minghui, ZHANG Yi, LIU Bijie, et al. A provincial-level interactive management and control platform for technical loss reduction considering the potential of reactive power compensation for both power supply and consumption [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 160–169.
- [7] 王伟, 周少泽, 黄萌, 等. 构网型技术: 演进历程、功能定位及应用展望[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 1–13.
WANG Wei, ZHOU Shaoze, HUANG Meng, et al. Networking technology: evolution, functional positioning, and application prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 1–13.
- [8] 李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773–4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. A review and prospect of grid-connected converters for grid-connected converters with high permeability new energy power generation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773–4788.
- [9] 李军, 包那琴, 陈建华, 等. 孤岛混合微电网电源故障后电压/频率无差控制[J]. 南方电网技术, 2025, 19(1): 150–159.
LI Jun, BAO Naqin, CHEN Jianhua, et al. Error-free control of voltage/frequency after power source failure in isolated hybrid microgrids [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(1): 150–159.
- [10] 秦晓辉, 范宸琰, 齐磊, 等. 构网型下垂控制本质及虚拟阻抗对其源端特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 5930–5942.
QING Xiaohui, FAN Chenhui, QI Lei, et al. Analysis of the influence of the essence of the droop control and the virtual impedance on the characteristics of the source of the network structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5930–5942.
- [11] TOZAK M, TASKIN S, SENGOR I, et al. Modeling and control of grid forming converters: a systematic review [J]. IEEE Access, 2024(12): 107818–107843.
- [12] 翟冬阳, 姚良忠, 程帆, 等. 提升系统频率支撑能力的“车-氢”柔性可控负荷协同构网控制[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3230–3243.
ZHAI Dongyang, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. "Vehicle-hydrogen" flexible controllable load collaborative network control to improve the frequency support capacity of the system [J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3230–3243.
- [13] GHOSH R, TUMMURU N R, RAJPUROHIT B S. Modified VOC using three symmetrical components for grid-supporting operation during unbalanced grid voltages and grid-forming operation in hybrid single-phase/three-phase microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(11): 11276–11286.
- [14] 刘曼佳, 凌在汛, 熊亮雳, 等. 面向工业园区电压暂降治理的构网型储能逆变器控制策略研究[J]. 供用电, 2023, 40(8): 34–42.
LIU Manjia, LING Zaixun, XIONG Liangli, et al. Research on the control strategy of grid-based energy storage inverter for voltage sag control in industrial parks [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 34–42.
- [15] 熊亮雳, 游力, 韩刚, 等. 基于统一电压-电流下垂的构网型变流器不平衡与谐波控制[J/OL]. 电源学报, 1–16[2025–03–21]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1421.009>.
XIONG Liangli, YOU Li, HAN Gang, et al. Unbalance and harmonic control of grid-based converter based on unified voltage-current sagging [J/OL]. Journal of Power Supply: 1–16[2025–03–21]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1421.009>.
- [16] 刘沁怡, 黄伟煌, 郭铸, 等. 基于自适应虚拟阻抗的多并联构网型变流器无功功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(15): 122–130.
LIU Qinyi, HUANG Weihuang, GUO Zhu, et al. Reactive power distribution strategy of multi-parallel network converter

- based on adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(15): 122 – 130.
- [17] 林俐, 马笑寒, 丁文敏. 计及构网型储能电站的新能源基地无功功率协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 59 – 68.
- LIN Li, MA Xiaohan, DING Wenmin. Considering the coordinated and optimal control of reactive power in the new energy base of the grid-based energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 59 – 68.
- [18] 李志军, 李格格, 张家安. 电能质量变权综合评估及多功能并网逆变器多目标优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 515 – 521.
- LI Zhijun, LI Gege, ZHANG Jia'an. Comprehensive evaluation of power quality weighting and multi-objective optimization of multi-functional grid-connected inverter [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(11): 515 – 521.
- [19] 史晨豪, 唐忠, 戴尉阳, 等. 基于多要素改进 NSGA II 算法的有源配电网多目标优化策略[J]. 供用电, 2021, 38(6): 50 – 55.
- SHI Chenhao, TANG Zhong, DAI Weiyang, et al. Multi-objective optimization strategy for active distribution network based on multi-factor improved NSGAII. algorithm [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 50 – 55.
- [20] 吴豫, 刘阳, 苗福丰, 等. 高渗透率分布式电源接入光伏电站多元化电能双层调度研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(S1): 226 – 230.
- WU Yu, LIU Yang, MIAO Fufeng, et al. Research on the double-layer dispatch of diversified electric energy connected to photovoltaic power grid with high permeability distributed power generation [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(S1): 226 – 230.
- [21] HASEEB M, KAZMI S A A, MALIK M M, et al. Multi objective based framework for energy management of smart micro-grid[J]. IEEE Access, 2020(8): 220302 – 220319.
- [22] 李龙潭. 基于粒子群优化算法和 FCM 聚类分析的电能质量评估方法[J]. 电力设备管理, 2024(16): 5 – 7.
- LI Longtan. Power quality evaluation method based on particle swarm optimization algorithm and FCM cluster analysis [J]. Electric Power Equipment Management, 2024(16): 5 – 7.

收稿日期: 2025-03-19; 网络首发日期: 2025-09-01

作者简介:

郑爽(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 从事输配电线路运维、安全生产管理及新型电力系统研究, 459340746@qq.com;
 巩彦江(1988), 男, 高级工程师, 硕士, 从事配网运维、规划及电能质量管理工作, 444108562@qq.com;
 古天松(1986), 男, 高级工程师, 硕士, 从事配网运维、安全及物资管理工作, 386060278@qq.com.

(上接第 26 页 Continued from Page 26)

- [19] HUANG W, ZHENG W, HILL J D. Distributionally robust optimal power flow in multi-microgrids with decomposition and guaranteed convergence[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 43 – 55.
- [20] 徐岩, 张建造. 考虑需求响应和联络线交互的含微电网的主动配电网多目标协同调度优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 1 – 14.
- XU Yan, ZHANG Jianhao. Multi-objective cooperative dispatching optimization of active distribution network with microgrid considering demand response and tie line interaction [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(1): 1 – 14.
- [21] 李雪, 季寒松, 张儒峰, 等. 计及多类型微网响应特性的城市配电系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 74 – 82.
- LI Xue, JI Hansong, ZHANG Rufeng, et al. Distributed optimal scheduling of urban distribution system considering response characteristics of multi-type microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 74 – 82.
- [22] LIU H, LI J, GE S, et al. Distributed day-ahead peer-to-peer trading for multi-microgrid systems in active distribution networks[J]. IEEE Access, 2020(8): 66961 – 66976.
- [23] 金淦, 陈丽娟, 陆慧君, 等. 支撑多种资源接入配电网的分级自治协同策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 134 – 144.
- JIN Gan, CHEN Lijuan, LU Huijun, et al. Hierarchical autonomous collaboration strategy to support multiple types of resource access to distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 134 – 144.
- [24] 王振, 丁孝华, 余昆, 等. 计及自治运行优化的配电网台区调节潜力区间建模[J]. 中国电力, 2025, 58(10): 97 – 109.
- WANG Zhen, DING Xiaohua, YU Kun, et al. Regulation potential range modeling for distribution transformer zones considering autonomous operation optimization [J]. Electric Power, 2025, 58(10): 97 – 109.
- [25] 刘辉, 杨坤, 王泉泉, 等. 基于 ADMM 算法的中低压配电网多目标分布式协调优化运行策略[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 100 – 112.
- LIU Hui, YANG Kun, WANG Xiaoxiao, et al. Multi-objective distributed optimal scheduling of distribution network with high-permeability distributed photovoltaic resource access [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 100 – 112.

收稿日期: 2025-05-11; 网络首发日期: 2025-07-11

作者简介:

马瑞(1971), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统分析与控制、综合能源系统规划和运行, marui818@126.com;
 李佳乐(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;
 宋晨辉(1993), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 研究方向为综合能源系统和配电网的安全分析与规划运行、新能源接入下的电网适应性、电动汽车与储能。