

新型电力系统下配电网施工智能化改造 路径探索

陈慧萍

(信宜市信能输变电有限公司, 广东 茂名 525300)

摘要: 在新型电力系统高比例新能源接入的背景下, 配电网施工需通过智能化改造以适配新能源发展需求。构建包含技术适配性、经济合理性及新能源协同性的多维度潜力评估指标体系, 结合灵敏度分析筛选关键改造节点, 并建立双层优化模型(上层优化智能化设备配置, 下层优化施工流程参数)。基于改进的 IEEE 33 节点配电网的验证结果表明, 该改造路径可有效提升施工效率与新能源接入适配性, 降低全周期成本, 为配电网施工智能化转型提供了兼具实用性与经济性的可行方案。

关键词: 新型电力系统; 配电网施工; 智能化改造

Intelligent transformation path for distribution network construction in new power systems

CHEN Huiping

(Xinyi Xinneng Transmission and Transformation Co., Ltd., Maoming 525300, China)

Abstract: With the high integration of renewable energy in new power systems, distribution network construction requires intelligent transformation. This paper develops an evaluation index system considering technical adaptability, economic feasibility, and renewable energy compatibility, and uses sensitivity analysis to identify key transformation points. A bi-level optimization model is proposed for equipment configuration and construction process parameters. Simulation on an improved IEEE 33-node distribution network shows that this approach improves efficiency, compatibility with renewable energy, and reduces lifecycle costs, offering a practical and cost-effective solution for intelligent network construction.

Keywords: new power system; distribution network construction; intelligent transformation

0 引言

新型电力系统的高比例新能源渗透与复杂网络拓扑, 对配电网施工的精准化、协同化提出了刚性需求^[1]。配电网施工作为连接能源生产与消费的关键环节, 其智能化水平直接影响电网对新能源的消纳能力和供电可靠性。当前, 传统配电网施工模式存在智能化技术应用不足、流程管控

粗放等问题。一方面, 施工方案依赖人工经验制定, 智能设备配置缺乏量化依据, 导致与分布式光伏等新能源接入需求的适配性较差, 设备利用率不足60%^[2-3]; 另一方面, 施工资源调度效率低下, 全周期成本较理论最优值偏高20%左右, 工期延误率超过15%^[4-5]。

近年来, 相关研究为配电网施工智能化提供了技术参考。文献[6]构建了智能化安全监控

下的配电网储能优化系统，为施工过程的动态监测提供了思路；文献[7]通过灵敏度分析与双层优化模型，实现了配电网储能的精准配置，其量化筛选方法对施工节点优选具有借鉴意义；文献[8]采用模拟退火粒子群算法优化分布式储能布局，验证了智能算法在配电网资源调度中的有效性；文献[9]聚焦配电网工程数字化技术，推动了施工信息的集成化管理；文献[10]围绕智能配电网优化调度技术，为施工流程的协同管控提供了支撑。但现有研究多集中于单一技术环节，尚未形成覆盖“节点筛选-设备配置-流程优化”的全链条改造路径，尤其缺乏对新型电力系统下新能源接入与施工智能化协同性的系统分析。

基于此，本文提出一种新型电力系统下配电网施工智能化改造的多维度协同路径。首先，构建施工智能化改造潜力量化指标体系，通过灵敏度分析法筛选关键改造节点；在此基础上，建立双层优化模型；最后，在改进的IEEE 33节点配电网施工场景中进行验证，旨在为配电网施工智能化转型提供可量化的技术方案。

1 配电网施工智能化改造潜力指数与关键节点筛选

在新型电力系统高比例新能源接入的背景下，配电网施工智能化改造需精准识别关键点，以实现资源高效配置与改造效果最大化。通过构建多维度潜力评估指标体系，量化表征各节点实施智能化改造的必要性与可行性，为后续改造路径的制定提供科学依据。

1.1 改造潜力量化指标体系构建

结合新型电力系统对配电网施工的核心需求，从技术适配性、经济合理性及新能源协同性三个维度构建指标体系。

1) 技术适配性指标。反映节点施工场景对智能化技术的兼容能力，包括智能设备接口覆盖率 C_{int} 和数字孪生建模可行性 F_{mod} 。其中，智能设备接口覆盖率体现节点现有设施与智能巡检机器人、物联网监控终端等设备的兼容程度，计算公式为

$$C_{int} = \frac{\text{具备智能设备接口的设备数量}}{\text{节点总设备数量}} \quad (1)$$

式中，分子为节点内可直接接入智能化监控或控制设备的设施总数；分母为该节点包含的杆塔、变压器、开关柜等设施的总数量。

2) 经济合理性指标。衡量改造投入与收益的平衡关系，用改造投资回报率 R_{roi} 表征，公式为

$$R_{roi} = \frac{\text{年节约成本}}{\text{初始改造投资}} \times 100\% \quad (2)$$

式中，年节约成本包括人工替代、返工减少及能耗降低带来的费用节约；初始改造投资为智能设备购置、系统集成等一次性投入。

3) 新能源协同性指标。聚焦节点与新能源接入的协同能力，用新能源接入响应时效 T_{res} 表示，即节点施工改造后对分布式光伏、风电接入需求的响应速度，计算公式为

$$T_{res} = \frac{\text{新能源接入申请至施工完成的标准时长}}{\text{智能化改造后实际时长}} \quad (3)$$

式中，标准时长为传统施工模式下满足新能源接入需求的平均工期；实际时长为采用智能化改造后同等场景的施工周期。

该指标体系既体现了新型电力系统对配电网施工的智能化要求，又兼顾了改造的经济性与对新能源接入的适配性，避免了单一维度评估导致的决策偏差。

1.2 基于灵敏度分析的关键节点筛选

为从配电网众多节点中精准定位需优先改造的关键节点，采用灵敏度分析法对各节点的综合潜力进行量化评估。灵敏度分析可有效识别对整体改造效果影响显著的节点，其核心思路是通过计算各节点指标变动对全局改造效益的影响程度，确定优先级排序。

综合灵敏度 S_{total} 的计算结合层次分析法确定权重系数，公式为

$$S_{total} = \omega_1 S_{int} + \omega_2 S_{eco} + \omega_3 S_{new} \quad (4)$$

式中， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为技术适配性、经济合理性和新能源协同性的权重，根据新型电力系统对配电网施工改造的需求，取值分别为0.4、0.3和

0.3; S_{int} 、 S_{eco} 、 S_{new} 分别为各维度指标的标准化灵敏度值,取值范围为[0,1]。

通过对各节点综合灵敏度的排序,选取灵敏度值前30%的节点作为关键改造节点。其节点通常具有以下特征:一是处于新能源接入密集区(如分布式光伏集群接入的馈线末端),亟需通过智能化改造提升响应速度;二是施工流程复杂,传统模式下效率低下的枢纽节点在改造后可显著降低全周期成本。筛选结果为后续智能化设备配置与流程优化提供了精准的实施对象,确保配电网施工智能化改造与新型电力系统的发展需求高效匹配。

2 配电网施工智能化改造双层优化模型

2.1 上层模型:智能化设备配置优化

上层模型聚焦关键节点的智能化设备配置,以上述筛选出的灵敏度前20%节点(如新能源接入密集区节点)为主要应用场景,结合潜力指数体系中的技术适配性与经济合理性指标,实现设备配置的量化决策。

(1) 目标函数构建

以改造全周期成本最小为目标,综合考虑设备投资、运行维护成本及智能化带来的收益,目标函数为

$$\min F_1 = C_{\text{inv}} + C_{\text{op}} + C_{\text{mai}} - C_{\text{save}} \quad (5)$$

式中, C_{inv} 为智能化设备初始投资成本,与关键节点技术适配性指标(如智能设备接口覆盖率)正相关; C_{op} 为设备运行成本,含数据传输及能源消耗费用; C_{mai} 为维护成本,与节点设施规模匹配; C_{save} 为节约成本,包括人工替代收益及新能源接入调试效率提升带来的间接收益。

(2) 约束条件

约束条件基于关键节点特征及潜力指数体系设定,确保设备配置与改造需求匹配。

设备-节点适配约束为

$$N_k \leq N_{k, \text{node}} \quad (6)$$

式中, $N_{k, \text{node}}$ 为第 k 类智能设备在关键节点的最大可容纳数量,由节点设施数量及技术适配性指标

(如数字孪生建模可行性)决定。

经济合理性约束为

$$R_{\text{roi}} \geq 0.15 \quad (7)$$

即改造投资回报率不低于15%,与上述经济合理性指标相呼应,确保改造方案的可持续性。

新能源协同约束为

$$d_{k, m} \leq 300 \text{ m} \quad (8)$$

式中, $d_{k, m}$ 为第 k 类设备与关键节点内新能源接入点的距离,满足新能源协同性指标中响应时效的要求,保障设备对新能源接入需求的快速响应。

2.2 下层模型:施工流程参数优化

下层模型以关键节点的施工流程为优化对象,结合潜力指数体系中新能源协同性与技术适配性指标,通过参数优化提升施工效率与新能源接入适配性。

(1) 目标函数构建

以施工效率最大化为目标,综合考虑关键节点的工作量完成度及与新能源接入的协同效果,目标函数为

$$\max F_2 = \frac{\text{实际完成工作量}}{\text{计划工作量}} \times \left(1 + 0.2 \frac{N_{\text{comp}}}{N_{\text{total}}} V_{\text{res}} \right) \quad (9)$$

式中,实际完成工作量/计划工作量为关键节点的施工进度完成率; $N_{\text{comp}}/N_{\text{total}}$ 为与新能源设备兼容的施工设备占比,体现技术适配性; V_{res} 为上述定义的施工方案对新能源波动的响应速度;根据指标重要性设定权重系数0.2和0.1,确保改造结果符合新型电力系统对新能源协同性的需求。

(2) 求解算法与约束

采用改进遗传算法求解上述施工流程参数优化问题,其流程如图1所示。通过引入基于关键节点特征的自适应交叉概率,提升算法在新型电力系统复杂施工场景下的收敛速度与寻优准确度。自适应交叉概率公式为

$$P_c = 0.9 - 0.3 \frac{t}{G_{\text{max}}} \frac{N_{\text{key}}}{N_{\text{total}}} \quad (10)$$

式中, t 为当前迭代次数; G_{max} 为算法设定的最大

迭代次数； N_{key} 为关键节点数量； N_{total} 为配电网总节点数。

同时，增加关键节点工序衔接约束为

$$t_{i,j} \leq t_{std}(1-0.3S_{total}) \tag{11}$$

式中， $t_{i,j}$ 为关键节点内工序间隔时间； t_{std} 为标准间隔时间； S_{total} 越高（改造潜力越大），允许的间隔时间越短，以此加速配电网施工关键节点的改造进程。

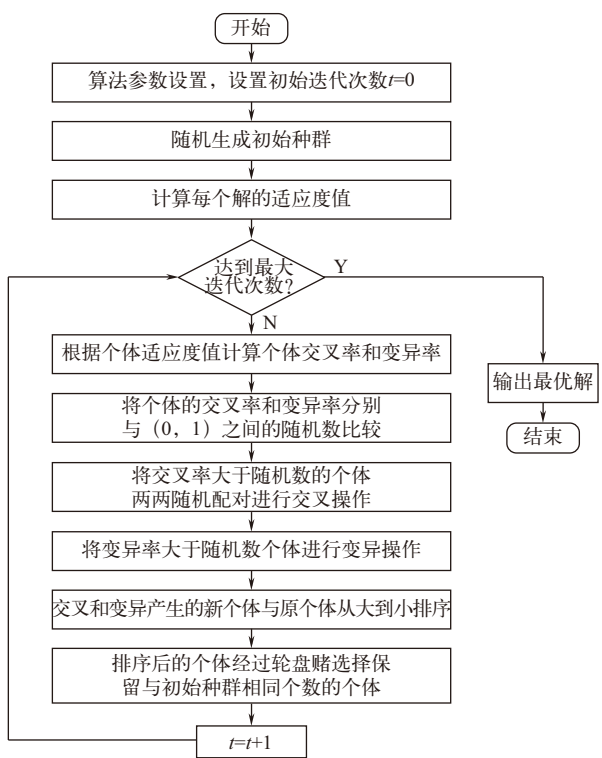


图 1 基于改进遗传算法的施工流程参数优化调度图

Fig. 1 Optimization scheduling of construction process parameters using improved genetic algorithm

3 案例验证与分析

为验证新型电力系统下配电网施工智能化改造路径的可行性与有效性，本文以改进的IEEE 33节点配电网为研究对象。该配电网包含33个节点，额定电压为10 kV，总负荷为3.72 MW+2.3 Mvar，拓扑结构如图2所示。结合新型电力系统高比例新能源接入特点，在节点12、18、23、28、33接入分布式光伏（总容量

2.5 MW），并基于前述改造潜力指数体系及灵敏度分析，选取节点7、14、20、25、30、33作为关键改造节点，其中节点7、14为配电网枢纽（ $S_{int}=0.75$ ），节点20、25邻近新能源接入点（ $S_{new}>0.8$ ），节点30、33为末端节点（ $S_{eco}=0.7$ ），各 S_{total} 分别为0.78、0.75、0.73、0.71、0.70和0.72，均高于0.65阈值，具备显著改造价值。

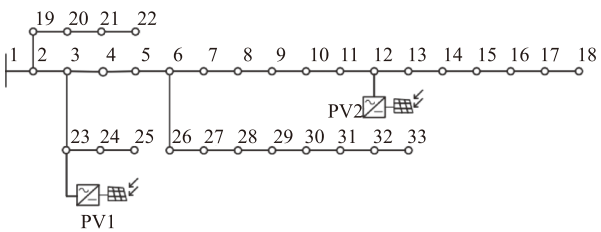


图 2 改进的 IEEE 33 节点配电网拓扑结构示意图

Fig. 2 Schematic of improved IEEE 33-node distribution network topology

本次改造核心智能化设备参数见表1。设备选型满足重点匹配6个关键节点的三维指标要求。改造依双层优化模型配置：上层以 $\min F_1$ 为目标，在6个节点部署智能巡检机器人3台（节点7、14、25各1台）、物联网监控终端18个（节点20、25各5个，节点7、14、30、33各2个），全网络部署数字孪生平台1套。

表 1 主要智能化设备参数

Tab. 1 Main intelligent equipment parameters

设备类型	单位成本 / 万元	单台覆盖范围 / km	新能源兼容性指数	预期使用寿命 / 年
智能巡检机器人	12.5	2	0.92	8
数字孪生平台	58.3	全域	0.98	10
物联网监控终端	0.45	0.5	0.85	5

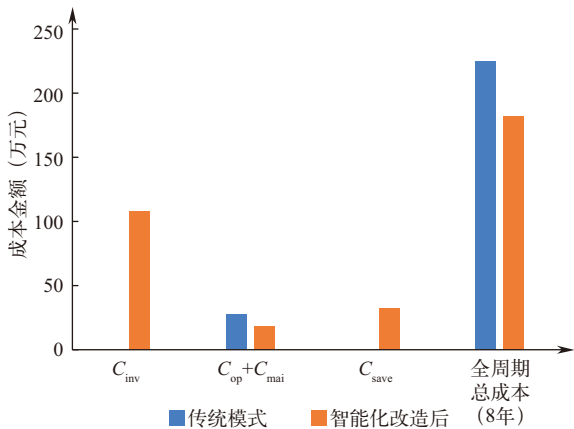
技术适配性方面，6个节点的 C_{int} 达90%以上， $F_{mod}=0.98$ 。施工效率指标见表2，平均资源利用率从55%提升至89%，枢纽节点7、14达90%以上，工序间隔时间缩短30%~40%，验证了技术适配性改造效果，初始投资带来的技术适配优势显著。

表 2 6 个关键节点施工效率指标对比
Tab. 2 Comparison of construction efficiency indicators for 6 key nodes

节点编号	传统模式 总工期 / 天	改造后总 工期 / 天	传统模式资源 利用率 (%)	改造后资源利 用率 (%)	传统模式调试 时间 / h	改造后调试 时间 / h
7	45	31	50	90	72	45
14	46	33	52	91	70	43
20	44	30	58	88	75	40
25	43	29	60	92	76	39
30	47	34	54	87	68	46
33	45	32	56	89	71	42
平均值	45	32	55	89	72	42

注：总工期体现综合施工效率提升；资源利用率反映技术适配性下设备协同效率；光伏调试时间关联新能源协同性。

经济合理性方面，全周期成本构成如图3所示。改造后 C_{inv} 为109.4万元； $C_{op}+C_{mai}$ 为18.2万元，占比为34.2%； C_{save} 为32.6万元，占比为45.3%。经测算，改造投资回报率 $R_{roi} \approx 29.8\%$ ，显著高于15%的阈值。全周期成本较传统模式降低19.6%，投资回收期为3.8年。其中末端节点30、33的 R_{iot} 达31.2%， $C_{op}+C_{mai}$ 降幅超40%，体现了改造的经济性价值。



注：传统模式未采用智能化设备，无须额外投入 C_{inv} ，同时因缺乏智能监控、流程优化等功能，无法实现人工替代，工期缩短等带来的 C_{save} 仅包含基础运维成本。

图 3 6 个关键节点全周期成本构成对比图
Fig. 3 Comparison of full-cycle cost composition for 6 key nodes

新能源协同性方面，适配性测试如图4所示。由图4可知，光伏容量从2.5 MW增至

3.0 MW时，6个节点 T_{res} 平均值从1.71降至1.52，成本增幅均为3.2%，优于传统模式8.7%。节点20、25的 T_{res} 降幅最小，光伏调试时间从72 h压缩至40 h，施工效率提升显著，贡献51%成本节约。

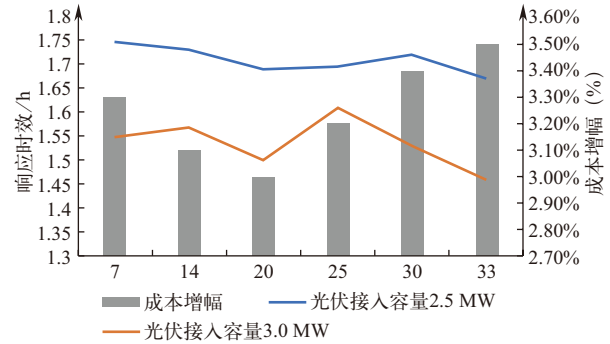


图 4 6 个关键节点在不同光伏接入比例下的 T_{res} 对比
Fig. 4 Comparison of for 6 key nodes at different pv penetration levels

综上所述，所提新型电力系统下配电网施工智能化改造路径可有效提升施工效率，降低全周期成本，并增强对高比例新能源接入的适配性，为配电网施工智能化转型提供了可推广的技术方案。

4 结束语

本文围绕新型电力系统下配电网施工智能化改造展开探索，通过构建多维度潜力评估指标体系精准识别关键节点，再借助双层优化模型实现设备配置与施工流程的协同优化，形成了一套完整的改造路径。这一路径既关注技术层面与智能化设备的适配性，也注重经济层面投入与收益的平衡，更强化了对高比例新能源接入的协同响应能力，符合新型电力系统发展对配电网施工的实际需求，具备向实际工程推广的条件。

参考文献

- [1] 于建斌. 智能化安全监控下的配网储能优化系统[J]. 电气技术与经济, 2025(6): 171-173.
- [2] 杜佳源. 含分布式光伏的配电网储能优化配置方法[J]. 电气应用, 2025, 44(3): 106-110.

[3] 王帆. 基于智能化的电力配网工程数字化技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(2): 27-29.

[4] 卜振兴. 基于人工智能技术的电力配网工程施工安全管理技术研究[J]. 电工技术, 2024(S2): 189-191.

[5] 宋启航, 张卓昕. 新时期配网自动化技术在配网运维中的运用[J]. 电工技术, 2024(S2): 595-597.

[6] 刘畅, 杨仪. 一种配网不停电作业智能库房设计与实现[J]. 电工技术, 2024(23): 148-151, 154.

[7] 陈泳晔. 智能配电网优化调度技术分析[J]. 电力设备管理, 2024(21): 13-15.

[8] 缪翼军, 康慨, 张云龙, 等. 基于模拟退火粒子群算法的配电网分布式储能布局规划研究[J]. 电

气应用, 2024, 43(8): 100-105.

[9] 耿英会, 李云威, 王耀堃, 等. 基于直觉模糊决策的配电网综合检测方法研究[J]. 电气应用, 2024, 43(7): 86-91.

[10] 陈童, 梁泽宇, 刘影, 等. 面向能源互联的交直流配电网综合能源规划研究综述[J]. 电气应用, 2025, 44(5): 12-19.

作者简介

陈慧萍（1993—），女，工程师，研究方向为电力工程电气。

（收稿日期：2025-05-04）