

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.023

考虑需求侧负荷的配电网双层优化调度策略

黄代雄, 汪志军, 周伟, 许光, 刘楷文

(国网湖北送变电工程有限公司, 武汉 430063)

摘要: 传统的配电网优化调度往往将需求侧负荷作为刚性负荷,但随着用户用电需求不断攀升,大量分布式再生能源发电并入电网,若只对发电侧单元进行优化调度,难以保证电网安全可靠运行。文中提出了考虑需求侧负荷的配电网双层优化调度策略,上层模型选取可控负荷出力对象,以配电网的总体运行成本最低为目标,下层以配电网综合负荷波动最小为目标,体现配电网的供电可靠性。针对模型特点,采用基于遗传算法的自适应粒子群优化算法用于模型求解。以IEEE 33节点配电系统为算例进行仿真验证。结果表明,所提出的双层优化方法可以减少配电网运行成本,有效平抑负荷峰谷差,提高配电网整体稳定性。

关键词: 配电网; 双层优化; 负荷波动; 粒子群算法; 负荷峰谷

Two-level Optimal Dispatching Strategy of Distribution Network Considering Demand Side Load

HUANG Daixiong, WANG Zhijun, ZHOU Wei, XU Guang, LIU Kaiwen

(State Grid Hubei Transmission & Transformation Engineering Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: In traditional optimal dispatching of distribution networks, demand-side loads are often treated as rigid loads. However, with the continuous increase in electricity demand of users and the integration of a large amount of distributed renewable energy generation into the grid, optimal dispatching of only the generation-side unit makes it difficult to ensure the safe and reliable operation of the power grid. In this paper, a two-level optimal distribution network dispatching strategy considering demand side load is proposed. The controllable load output object is selected for the upper level model, and the lowest overall operation cost of the distribution network is taken as the goal. The lowest comprehensive load fluctuation of the distribution network of the lower level is taken as the goal so to reflect the power supply reliability of the distribution network. Based on the characteristics of the model, the adaptive particle swarm optimization algorithm based on genetic algorithm is adopted to solve the model. The IEEE 33 node distribution system is taken as an example for simulation verification. The results show that the proposed two-level optimal method can not only reduce the operating cost of distribution network, but also effectively stabilize the peak valley difference of load as well as improve the overall stability of distribution network.

Key words: distribution network; two-level optimization; load fluctuation; particle swarm optimization; load peak-valley

0 引言

配电网是电力系统中非常重要的部分,直接连接着终端用户,但随着可再生能源分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网的比例逐年

增加,配电网的经济性、安全性和稳定性就显得尤为重要^[1-4]。传统配电网主要作用是电力传输,将发电侧的电能稳定、安全的送达用户终端,考虑的是发电侧的能源效率及供应可靠性,但无法参与电网运行,属于被动状态。随着DG的大规模接入,传统

配电网集中式管理模式不再适用,需要针对需求侧负荷做出新的负荷调度方法^[5-9]。如何分配需求侧负荷以及充分调用需求侧资源实现配电网高效、安全、稳定的运行是目前研究的重点。

随着风电,光伏、微型燃气轮机分布式发电设备接入配电网,通过对需求侧负荷管理与调节,实现负载曲线“削峰”和“填谷”^[10-11]。目前国内外学者对配电网优化调度展开了广泛研究。文[12]以风电总体运行成本和网损最小为目标,建立风电场模型,来研究配电网优化调度问题;文[13]从DG出力的间歇性和时序性,建立了多类别DG规划模型,来探究配电网的经济性和稳定性;文[14]针对配电网电压偏移和网络损耗以及发电综合运行成本等问题,建立基于DG双层优化模型;文[15]提出一种考虑配电公司、DG运营商和用户利益的配电网三层规划模型,来优化配电网调度问题;文[16]针对配电网成本问题,以降低总体运用成本为目标,同时在适当位置配备安装电容器组,并采用控制和调度策略来减少网损;文[17]以提高DG的消纳能力、减小负荷波动为目标,建立区域优化模型,来提高配电网的稳定性。

上述文献关于配电网优化策略中,有的从单一DG模型出发探究分布式电源出力对配电网的影响,具有一定的片面性;有的考虑到了DG出力的特点,但未考虑配电网运行成本;

还有的偏重于需求侧响应,导致忽略配电网本身的经济性和稳定性。为此文中提出了考虑需求侧负荷的配电网双层优化调度策略。上层以可控DG为对象,并以配电网整体运行成本最低为目标,着重考虑配电网的经济性。下层通过对DG的需求管理,通过对DG的优化配置,并以配电网综合负荷的波动幅度和波动率最小为目标,着重考虑配电网的稳定性^[18-20]。采用基于遗传算法的自适应粒子群优化算法用于模型求解。算例分析表明,该方法可以减少配电网运行成本,有效降低系统网损和平抑负荷峰谷差,提高了配电网整体经济效益和稳定性。

1 双层优化模型框架

配电网中需求侧负荷调控时是多目标性问题,涉及多个变量,多个约束等优化问题^[21-22]。文中着重考虑了配电网运行成本及配电网运行的稳定性,建立了双层优化模型。上层以配网整体运行成本最低为目标,下层以负荷波动最小为目标,上下层目标通过相互配合达到优化的效果。文中考虑风

电、光伏、微型燃气轮机、储能、EV集群以及广义柔性负荷参与的优化调度,需求侧负荷以电动汽车(EV)为模型,综合负荷需求由负荷管理模块表示,双层优化的模型见图1。

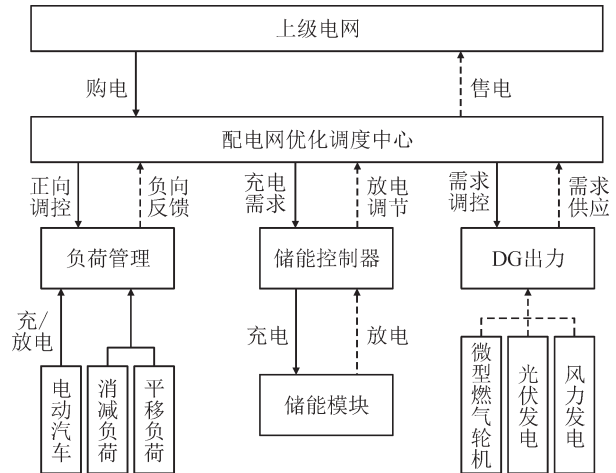


图1 配电网双层优化调度框架

Fig. 1 Two-layer optimal scheduling model of distribution network

2 双层调度模型建立

2.1 上层优化模型

1)上层目标函数。上层目标模型目标是配电网最低运行成本最低,其中包括上级购电成本、DG发电成本、储能运行维护成本。配电网的经济优化调度目标函数可以通过归一化加和的方式转化为单目标函数处理,表达式为

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T (\alpha_1 F_G + \alpha_2 F_{DG} + \alpha_3 F_{OD}) \quad (1)$$

式(1)中: F_G 为向上级电网购电成本; F_{DG} 为可控DG的发电成本; F_{OD} 为储能运行成本; α_1 、 α_2 、 α_3 为权重系数,且和为1。

购电成本为

$$F_G = P(t) \cdot C(t) \quad (2)$$

式(2)中: $P(t)$ 为 t 时段配电网与上级电网的交互功率; $C(t)$ 为 t 时段内从上级电网购电的单价。

可控DG的发电成本:

$$F_{DG} = F_{MT}(t) + F_{HD}(t) \quad (3)$$

$$F_{MT}(t) = \sum_{i \in \nu_{MT}} \left[c_f \frac{P_{mi,i}(t)}{\eta_i} + c_{op} P_{mi,i}(t) \right] \quad (4)$$

$$F_{HD}(t) = \sum_{i=1}^{\nu_{hd}} c_{hd} \cdot P_{hd,i}(t) \quad (5)$$

式(3)-(5)中: $F_{MT}(t)$ 、 $F_{HD}(t)$ 分别为微型燃气轮机及小水电的运行成本函数; c_f 、 c_{op} 分别为单位燃料成本、运维成本; $P_{mi,i}(t)$ 为第 i 个微型燃气轮机的发

电功率; η_i 为第 i 个微型燃气轮机的转换效率; c_{hd} 为小水电的运行成本; $P_{hd,i}(t)$ 为 t 时段第 i 个小水电输出功率。

储能运行成本为

$$F_{OD}(t) = \sum_{i=1}^n [c_{op} \cdot P_{op,i}(t)] \quad (6)$$

式(6)中: c_{op} 为运维成本; $P_{op,i}(t)$ 为第 i 个储能设

$$\begin{cases} P_{pci}(t) + P_{DGi}(t) - P_{Li}(t) = U_i(t) \sum_{k \in i} U_k(t) [G_{ij} \cos \theta_{ik}(t) + B_{ik} \sin \theta_{ik}(t)] \\ Q_{pci}(t) + Q_{DGi}(t) - Q_{Li}(t) = U_i(t) \sum_{k \in i} U_k(t) [G_{ij} \sin \theta_{ik}(t) - B_{ik} \cos \theta_{ik}(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $P_{pci}(t)$ 、 $Q_{pci}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 注入的有功功率、无功功率; $P_{DGi}(t)$ 、 $Q_{DGi}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 处的 DG 或储能注入的有功功率、无功功率; $P_{Li}(t)$ 、 $Q_{Li}(t)$ 分别为 t 时刻节点 i 负荷有功无功需求; $U_i(t)$ 、 $U_k(t)$ 分别为节点 i 、 k 在 t 时刻下的电压; G_{ij} 、 B_{ik} 为支路电导和电纳; θ_{ik} 为节点 i 、 j 的电压相角差。

②节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i(t) \leq U_{i,\max} \quad (8)$$

式(8)中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 上的上、下限值。

③支路电流约束

$$I_j \leq I_{j,\max} \quad (9)$$

式(9)中, $I_{j,\max}$ 为 j 支路上的最大电流。

④可控 DG 出力功率约束

$$P_{DG,\min} \leq P_{DG}(t) \leq P_{DG,\max} \quad (10)$$

式(10)中, $P_{DG,\min}$ 、 $P_{DG,\max}$ 分别为接入配电网的可控 DG 出力最小值和最大值。

2.2 下层优化模型

1)目标函数。下层优化的目标是负荷变化量最小,由配电网综合负荷的波动幅度和波动率共同决定。具体表达式为:

$$\min F_2 = \eta_1 F_T + \eta_2 F_\lambda \quad (11)$$

$$F_T = \frac{P_{k,\max} - P_{k,\min}}{\bar{P}_k} \quad (12)$$

$$F_\lambda = \max \left[\frac{|P_k(t+1) - P_k(t)|}{\bar{P}_k} \right] \quad (13)$$

式(11)-(13)中: F_T 函数为负荷波动幅度函数; F_λ 为负荷波动率函数; η_1 、 η_2 为权重系数。由于负荷的波动率相对负荷波动幅度对配电网的可靠性影响更大,文中取 $\eta_1 = 0.3$ 、 $\eta_2 = 0.7$; P_k 为配电网日负荷功率; $P_{k,\max}$ 、 $P_{k,\min}$ 分别为配电网日负荷功率最大值、最小值; \bar{P}_k 为配电网日平均负荷功率; $P(t)$ 、 $P(t+1)$ 分别为 t 、 $t+1$ 时刻配电网负荷功率。

备运行功率。

2)约束条件。在配电网调度优化策略研究过程当中,需要满足等式间的相互约束,包括配电网所有节点潮流约束,不等式约束等,所有状态变量及控制变量均应保持在一定范围内,否则可能影响到电网的安全运行。

①系统功率平衡约束

2)约束条件。DG 输出有功功率约束

$$\begin{cases} P_{DG}(t) = (1 + \mu_f) P_{DG,t}(t) \\ 0 \leq |\mu_f| \leq \mu_{f,\max} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $P_{DG}(t)$ 为 DG 输出有功功率函数; $P_{DG,t}(t)$ 为 t 时刻 DG 输出有功功率的预测值; μ_f 为 DG 出力的预测误差系数, μ_f 值越趋近于 0,表示预测精度越高。

配电网与可控 DG 功率交互约束

$$P_{pc,\min} \leq P_{pc}(t) \leq P_{pc,\max} \quad (15)$$

式(15)中, $P_{pc,\min}$ 、 $P_{pc,\max}$ 分别为 t 时刻交互功率的最小值和最大值。

电压稳定性指数约束

$$0 \leq U_{Sl}(t) \leq U_{Sl,\max} < 1 \quad (16)$$

式(16)中, $U_{Sl,\max}$ 为电压稳定性指数上限值。 $U_{Sl}(t)$ 应小于 1,否则系统将发生电压崩溃。

3 模型求解方法

遗传算法是一种衍生随机优化算法,遗传算法的核心是用染色体来表征种群^[23-24],在进化过程中父代染色体不断进行交叉变异等操作,通过对染色体适应度值的评价来选出适应度值较高的染色体。经过多次筛选,就可以找到适应度值高的染色体,也就是全局最优解。遗传算法通过交叉操作,能够极大的提升算法的局部搜索能力,而通过变异能够快速的找到全局最优解^[25-26]。遗传算法停止迭代的判定标准是进化代数和收敛情况,当达到最大迭代数后或当总群的最优解在一定的迭代后没有产生最优解,则优化结束。遗传算法流程图见图 2。

在基于需求侧负荷的配电网双层优化模型中,存在多个目标和多个约束条件,利用粒子群算法在动态且多目标的模型求解中收敛速度快,精度高,

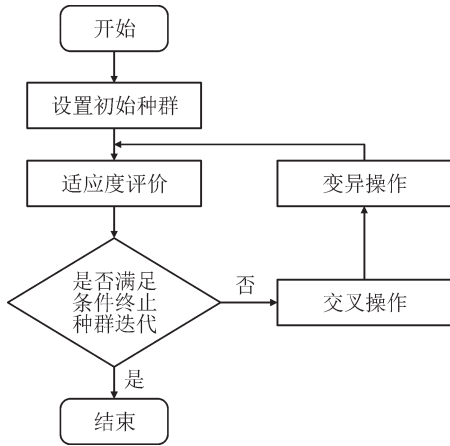


图2 遗传算法流程

Fig. 2 Genetic algorithm flow

易于改进的特点进行求解,能够快速得出最优解,但对于离散的优化问题处理容易陷入局部最优解的困境^[27-31]。通过采用自适应粒子群优化算法,提高粒子在全局搜索的能力,可以避免陷入局部最优的情况,但是收敛速度变慢,随着粒子种群数变大,粒子的适应度设置难度变大,而引入遗传算法可以将粒子的适应度的设置难度降低。

文中采用基于遗传算法的自适应粒子群优化算法用于模型求解,上层目标包括配电网向上级购电成本、DG发电成本、储能运行维护成本归一化的目标值最小值,其中变量为可控DG负荷出力和储能出力;下层目标为配电网综合负荷波动最小,由供电负荷波动幅度和波动率共同决定,变量为配电网日负荷功率。将上层目标作为已知量输入到下层,下层根据上层输入又将优化后的结果返回到上层,从而得到最终的优化结果。通过这种双层优化策略,可以在保证配电网经济性的同时,提高电网的稳定性和供电可靠性^[32-35]。上层模型关注整体成本最小化,而下层模型则关注在上层决策基础上的负荷波动最小化,两者相互配合,共同实现配电网的优化调度。双层模型具体求解流程见图3。

4 算例分析

文中以 IEEE 33 节点配电网系统构建了含可控 DG、储能配电网模型进行仿真验证,见图4。该系统中共有 33 个节点,32 条支路,在节点 3 和 29 分别接入容量为 1、0.8 MW 的分布式光伏电源,在节点 16、33 分别接入 1.5、1 MW 的分布式风力电源,在节点 16 接入储能系统,设置基准电压 $U=12.66$ kV,网络总有功负荷 5 216 kVA。设置仿真步长为 15 min,

一个调度周期为 24 h。

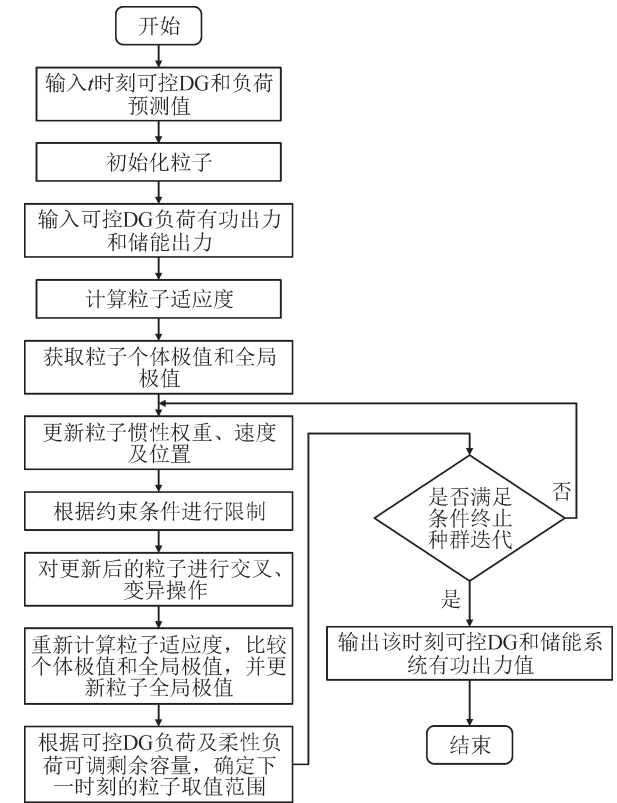


图3 基于遗传算法的自适应粒子群优化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of adaptive particle swarm optimization algorithm based on genetic algorithm

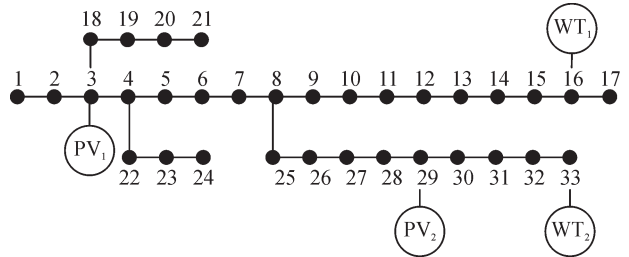


图4 IEEE 33节点配电网系统结构图

Fig. 4 IEEE 33 node distribution system structure diagram

设置配电网储能相关参数见表1,配电网购售电分时电价见表2,光伏、风机相关参数见表3。

表1 储能系统相关参数

Table 1 Related parameters of the energy storage system

参数	数值	参数	数值
装机容量/MWh	2.50	转换效率/%	0.90
有功功率/MW	0.411 5	荷电状态	0.10~0.90
调用成本/[元·(MWh) ⁻¹]	255	放电补贴/[元·(MWh) ⁻¹]	0.15
单位容量成本/[元·(MWh) ⁻¹]	856	维护成本/[元·(MWh) ⁻¹]	60.00

在调度过程中,可控DG出力和储能系统最大充放电均有一定的误差范围,设定误差10%,且在实时配电网调度中光伏出力、风电出力和基础负荷出

力是主要关注对象。

表2 分时电价表

Table 2 Time-of-use tariff

时段类型	谷时段	平时段	峰时段
时间段	22:00-5:00	5:00-8:00 12:00-17:00	8:00-12:00 17:00-22:00
售电价格/ [元·(MWh) ⁻¹]	0.35	0.55	0.75
购电价格/ [元·(MWh) ⁻¹]	0.38	0.58	0.79

表3 可控DG相关参数

Table 3 Controllable DG related parameters

类别	光伏	风电
设计寿命/a	20	20
安装成本/[万元·kW ⁻¹]	4.5	2.0
运维成本/[元·(MWh) ⁻¹]	0.12	0.03
年费用系数/%	8	8

针对文中提出的考虑需求侧负荷的配电网双层优化调度策略, 设定了两种不同的场景进行仿真模拟分析: ①仅考虑发电侧可控、传统无功补偿装置的调度方案; ②考虑可控DG、储能装置、无功补偿装置, 但不具备分布式能源及储能调度方案; ③考虑可控DG、储能装置、需求侧负荷、无功补偿装置的配电网双层优化调度方案。3种情况下的配电网年运行成本见表4。

表4 配电网年运行成本

Table 4 Annual operating cost of distribution network

场景	投资费用/万元	运维费用/万元	购电费用/万元	总费用/万元
1	0.0	0.0	2 388.9	2 388.9
2	69.2	138.6	1 869.2	2 014.0
3	80.4	167.3	1 477.4	1 725.1

场景1中的购电费用为配电网系统中总负荷消耗的电量及网损之和, 电价设定为0.61元/kWh; 情景2中增加了设备投资及设备运维费用, 但大大降低了配电网向上级电网购电费用; 而场景3中考虑了需求侧负荷, 调控可控DG及储能负荷, 虽然在设备投资和运维上增加了费用, 但在配电网购电方面比场景1少了663.8万元, 比场景2少了288.9万元, 经济性更好。

取峰时段11:00-12:00间33节点电压幅值情况, 对比3种场景下的幅值波动见图5。场景2、3相较于传统配电网调度模式下的电压幅度变化明显, 而考虑需求侧负荷, 并协调可控DG及储能出力的场景3相交于场景2电压幅值波动减少5%, 保证配电网有较高的电压水平, 促使配电网能够稳定、可靠

的运行。

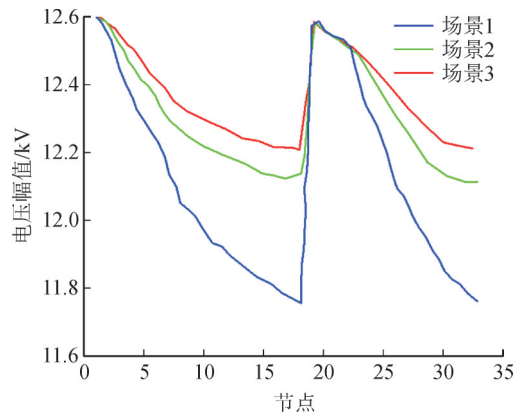


图5 11:00-12:00时段各节点电压幅值曲线

Fig. 5 Voltage amplitude curve of each node during 11:00-12:00

文中选取17节点作为单节点电压研究对象, 传统配电网场景1、2、3模式下的17节点电压对比见图6。在负荷高峰期无功负荷较大, 3个场景下的电压水平都比较高, 但场景2、3相对于场景1来说电压曲线更为平缓, 进一步提升了节点电压的水平, 而场景3相对于场景2来说, 在负荷高峰期, 电压曲线更进一步趋近平缓, 平均极值波动幅度减少了10%。

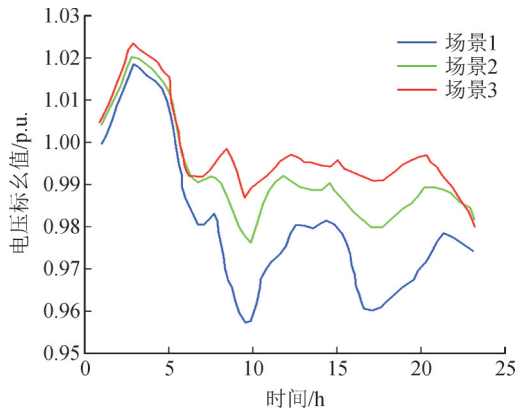


图6 不同场景下配电网的17节点电压对比曲线

Fig. 6 Voltage comparison curves of 17 nodes in the distribution network in different scenarios

5 结语

文中针对传统配电网优化调度问题, 建立了考虑需求侧负荷的配电网双层优化调度策略, 上层以可控DG为对象, 并以配电网整体运行成本最低为目标, 着重考虑配电网的经济性、适用性。下层通过对DG的需求管理及优化配置, 并以配电网综合负荷的波动幅度和波动率最小为目标, 着重考虑配电网的稳定性和安全性。而针对提出的模型, 采用基于遗传算法的自适应粒子群优化算法用于模型

求解,通过 IEEE 33 节点配电系统为算例进行仿对比验证。结果表明,所提出的双层优化方法可以减少配电网运行成本,有效平抑负荷峰谷差,提高配电网整体稳定性。

参考文献:

- [1] 高鑫,魏立保,梁岩.基于主从博弈的配电网-多微网双层优化调度[J]. 电网与清洁能源,2025,41(4):12-17.
GAO Xin, WEI Libao, LIANG Yan. Hierarchical optimization dispatching of distribution network-multi microgrid based on master-slave game theory[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4): 12-17.
- [2] 黄曜,林凌雪,管霖.考虑 DG 与负荷时变性的配电网分段动态重构[J]. 电气自动化,2022,44(6):25-27.
HUANG Yao, LIN Lingxue, GUAN Lin. Time-divided dynamic reconfiguration of distribution network considering time-varying DG and load[J]. Electrical Automation, 2022, 44(6): 25-27.
- [3] 兰征,易波,郭祺,等.中低压配电网有源与无源资源协同的多时间尺度管控策略[J]. 电网与清洁能源,2025,41(3):10-17.
LAN Zheng, YI Bo, GUO Qi, et al. The multi-time scale regulation strategy for low and medium voltage distribution networks based on active and passive resources combined[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 10-17.
- [4] 刘梓轩,朱瑞金,孔德文,等.基于主从博弈的配电网与光充换储电站集群双层优化调度[J]. 电网与清洁能源,2025,41(5):140-147.
LIU Zixuan, ZHU Ruijin, KONG Dewen, et al. Dual-layer optimization scheduling of distribution networks and photovoltaic charging-swapping-storage integrated stations clusters based on master-slave game[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 140-147.
- [5] 刘雪飞,刘洋,马国真,等.考虑负荷差异化需求响应的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(22):131-141.
LIU Xuefei, LIU Yang, MA Guozhen, et al. Multi-objective extended planning for a distribution network considering demarcation of demand response schemes[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 131-141.
- [6] 杨晓辉,邓福伟,冷正阳,等.基于二阶锥规划计及需求侧管理的主动配电网分层优化[J]. 实验室研究与探索,2022,41(9):1-6.
YANG Xiaohui, DENG Fuwei, LENG Zhengyang, et al. Hierarchical optimization of active distribution network based on second-order cone planning and demand side management[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(9): 1-6.
- [7] 王智爽,庞超,马世乾,等.面向配电网扩展规划的可靠性快速评估方法[J]. 智慧电力,2025,53(7):108-114.
WANG Zhishuang, PANG Chao, MA Shiqian, et al. Rapid reliability assessment method for distribution network expansion planning[J]. Smart Power, 2025, 53(7): 108-114.
- [8] ALI S, ULLAH K, HAFEEZ G, et al. Solving day-ahead scheduling problem with multi-objective energy optimization for demand side management in smart grid[J]. Engineering Science and Technology an International Journal, 2022(36):101135.
- [9] ZHANG Xuehan, SON Yongju, CHOI Sungyun. Optimal scheduling of battery energy storage systems and demand response for distribution systems with high penetration of renewable energy sources[J]. Energies, 2022, 15(6): 250-261.
- [10] 杨东俊,涂智福,徐敬友,等.计及低碳排放和需求侧管理的主动配电网双层规划[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(7):709-715.
YANG Dongjun, TU Zhifu, XU Jingyou, et al. Bi-level planning of active distribution network considering low carbon emissions and demand side management[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(7): 709-715.
- [11] 陈倩,王维庆,王海云.基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(16):1-13.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [12] 涂青宇,苗世洪,杨志豪,等.一种考虑峰荷—电量分摊机制和风电关键场景的输—配电网协同调度策略[J]. 中国电机工程学报,2024,44(2):597-609.
TU Qingyu, MIAO Shihong, YANG Zhihao, et al. A collaborative scheduling strategy for transmission-distribution systems considering peak load-electricity quantity allocation mechanism and key wind power scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 597-609.
- [13] 肖建华,李春亮,黄晓权,等.基于粒子群算法的含风电配电网无功优化研究[J]. 电工技术,2022(18):133-134.
XIAO Jianhua, LI Chunliang, HUANG Xiaquan, et al. Research on reactive power optimization of distribution network with wind power based on particle swarm optimization[J]. Electric Engineering, 2022(18): 133-134.
- [14] 任智君,郭红霞,杨苹,等.含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报,2021,42(9):33-38.
REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 33-38.
- [15] 白浩,雷金勇,袁智勇,等.考虑负荷聚集商参与的配电网双层优化调度方法[J]. 南方电网技术,2020,14(11):36-42.
BAI Hao, LEI Jinyong, YUAN Zhiyong, et al. Bi-level optimal dispatch of distribution network considering load aggregator[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 36-42.
- [16] 宋倩芸.计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):53-61.
SONG Qianyun. A Bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 53-61.
- [17] 马佳牧,刘宇哲,刘继红,等.配电网分布式电源双层优化配置与运行[J]. 电气开关,2022,60(4):23-27.
MA Jiamu, LIU Yuzhe, LIU Jihong, et al. Bi-level optimal configuration and operation of the distributed generations in distribution network[J]. Electric Switcher, 2022, 60(4): 23-27.
- [18] 刘文泽,陈珂瑶,成润婷,等.面向韧性提升的主动配电网灵活调度与故障修复协同策略[J]. 电力建设,2025,46(11):10-23.
LIU Wenzhe, CHEN Keyao, CHENG Runting, et al. A coordinated strategy of flexible dispatch and fault repair for active distribution

- networks towards resilience enhancement[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(11):10-23.
- [19] 刘自发,槐贺杨,姚雨森,等.基于Sobol'法的主动配电网静态电压优化[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(4): 72-80.
LIU Zifa, HUAI Heyang, YAO Yusen, et al. Static voltage optimization for active distribution networks based on Sobol' s method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4):72-80.
- [20] 李振坤,徐廷君.考虑“源储荷”协同的主动配电网双层优化配置[J]. 智慧电力, 2025, 53(3): 77-83.
LI Zhenkun, XU Tingjun. Bi-level optimal configuration of active distribution network considering source-storage-load coordination [J]. Smart Power, 2025, 53(3): 77-83.
- [21] 张忠会,雷大勇,李俊,等.基于自适应 ε -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源—网—荷—储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6):2199-2209.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage Bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ε -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6):2199-2209.
- [22] 吕智林,廖庞思,杨啸.计及需求侧响应的光伏微网群与主动配电网双层优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 70-78.
LYU Zhilin, LIAO Pangsi, YANG Xiao. Bi-layer optimization of PV multi - microgrid and active distribution network considering demand-side response[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33 (8):70-78.
- [23] 付宗强,王红蕾.考虑需求侧响应的微电网群协调优化调度模型[J]. 微处理机, 2022, 43(3):60-64.
FU Zongqiang, WANG Honglei. Coordinated optimal scheduling model of multi - microgrid in view of demand side response[J]. Microprocessors, 2022, 43(3):60-64.
- [24] 杨轩.基于改进遗传算法的配电网网架规划[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(15):64-67.
YANG Xuan. Distribution network planning based on improved genetic algorithm[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(15):64-67.
- [25] 李思凡,王海生,胡华青,等.基于遗传算法的分布式配电网供电可靠性评估方法[J]. 电子元件与信息技术, 2022, 6(2):81-83.
LI Sifan, WANG Haisheng, HU Huaqing, et al. Reliability evaluation method of distributed distribution network based on genetic algorithm[J]. Electronic Component and Information Technology, 2022, 6(2):81-83.
- [26] 陈瑞.考虑多源协同互动的主动配电网优化调度研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2022.
CHEN Rui. Research on optimal scheduling of active distribution network considering multi - source collaborative interaction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [27] 谢虎,杨占杰,张伟,等.基于改进遗传算法的主动配电网优化定价策略研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7):116-122.
XIE Hu, YANG Zhanjie, ZHANG Wei, et al. Research on optimal pricing strategy of active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7):116-122.
- [28] 曹锦,陆飞,江友华.基于改进粒子群算法的配电网多目标优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5):95-103.
CAO Jin, LU Fei, JIANG Youhua. Multi-objective optimal control of distribution networks based on improved particle swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5):95-103.
- [29] 李子健,郭佩乾,马宁宁,等.融合双策略粒子群算法的分布式电源配网无功优化[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6):14-22.
LI Zijian, GUO Peiqian, MA Ningning, et al. Reactive power optimization for distribution system with DG by particle swarm optimization algorithm integrating dual strategies[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 14-22.
- [30] 郝韩兵,王同文,朱思杰,等.基于5G和粒子群算法的配电网差动保护[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7):148-155.
HAO Hanbing, WANG Tongwen, ZHU Sijie, et al. Differential protection of distribution network based on 5G and particle swarm algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62 (7): 148-155.
- [31] 艾萌萌,宋兴宇,刘文辉,等.基于多目标粒子群算法考虑饱和情况异步起动永磁同步电机转子设计[J]. 电工技术学报, 2025, 40 (12):3857-3867.
AI Mengmeng, SONG Xingyu, LIU Wenhui, et al. Design of multi-objective particle swarm algorithm for line-start permanent magnet synchronous motor considering saturation condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12):3857-3867.
- [32] 黄耀宣,程杉,黄永章,等.基于改进粒子群算法的MMC-STATCOM参数仿射辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9):176-187.
HUANG Yaoyuan, CHENG Shan, HUANG Yongzhang, et al. MMC-STATCOM affine parameter identification method based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9):176-187.
- [33] 张志远,武永军,李熙钦,等.基于多目标粒子群的农村微电网源网荷储协同优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4):113-119.
ZHANG Zhiyuan, WU Yongjun, LI Xiqin, et al. A study on collaborative optimization operation of source, grid, load, and storage in rural microgrids based on multi-objective particle swarms [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4):113-119.
- [34] 陈刚,刘旭阳,李国雄,等.基于INSPSO-INC算法的光伏MPPT控制策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(2):58-64.
CHEN Gang, LIU Xuyang, LI Gouxiong, et al. Photovoltaic MPPT control strategy based on INSPSO-INC algorithm[J]. Smart Power, 2025, 53(2):58-64.
- [35] 翟耀,马光同,刘力豪,等.自驱式高温超导磁通泵的跨壁励磁实验与粒子群优化研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(18):5759-5775.
ZHAI Yao, MA Guangtong, LIU Lihao, et al. Through-wall charging experiment and particle swarm optimization design of self-regulating high temperature superconducting flux pump[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(18):5759-5775.

黄代雄(1980—),男,高级工程师,研究方向为电网建设(通信作者)(E-mail:576107170@qq.com)。