

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.012

分布式优化算法在军事基地三相不平衡配电系统中的应用

刘志勇, 范 律, 杨朋飞, 刘 浩

(威胜信息技术股份有限公司能效智能解决方案事业部, 长沙 410221)

摘要: 为解决军事基地三相不平衡配电系统的最优功率问题, 提出一种可扩展的、基于等效网络近似的分布式优化算法。通过分布式协调机制与邻近分布式区域交换潮流变量投影值, 并依据径向配电系统的潮流特性精心选取共享变量, 大幅降低了宏迭代次数。在优化过程中使用系统的数字孪生进行仿真, 验证了其在通信受限条件下的鲁棒性。仿真结果表明: 该方法能在合理时间内成功收敛到最优解, 在军事基地通信延迟和低带宽等显著压力下仍表现良好。

关键词: 分布式算法; 配电系统; 通信网络; 数字孪生

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A

Application of Distributed Optimization Algorithm in Three-phase Unbalanced Power Distribution System of Military Bases

Liu Zhiyong, Fan Lv, Yang Pengfei, Liu Hao

(Weisen Information Technology Co., Ltd. Department of Energy Efficiency Intelligent Solutions, Changsha 410221, China)

Abstract: In order to solve the optimal power problem of three-phase unbalanced distribution system for military bases, a scalable distributed optimization algorithm based on equivalent network approximation is proposed. The projection values of the power flow variables are exchanged with the adjacent distributed areas through the distributed coordination mechanism, and the shared variables are carefully selected according to the power flow characteristics of the radial distribution system, so that the number of macro iterations is greatly reduced. In the optimization process, the digital twins of the system are used to simulate and verify its robustness under the condition of limited communication. The simulation results show that the proposed method can successfully converge to the optimal solution in a reasonable time, and still perform well under the significant pressure of communication delay and low bandwidth in military bases.

Keywords: distributed algorithm; distribution system; communication network; digital twin

0 引言

随着可控分布式能源资源的日益普及, 配电系统的优化问题变得愈发复杂, 特别是在军事基地与设施供电方面。传统上, 配电系统依赖先进的配电管理系统^[1]进行集中管理, 但在面对大量分布式能源接入时, 集中式管理方式遭遇了可扩展性差和易受单点故障影响等挑战。其中, 三相不平衡问题尤为突出, 不仅会导致电力质量下降^[2], 如电压波动、频率偏移和谐波电流等问题, 影响军事基地内电子设备和信息系统的正常运行, 甚至造成设备损坏或数据丢失, 而且使设备电流不均匀分布, 加速设备老化, 缩短关键设备, 如通信和雷达系统的寿命, 进而削弱基地的作战能力和信息处理能力。

为应对这些挑战, 研究者们提出了多种解决方案。例如, 基于多智能体深度强化学习的方法可有效治理配电网三相不平衡问题。该方法通过将配电网划分为多个区域, 并在每个区域内设立光伏动作

策略学习智能体, 实现了分布式高效协同治理^[3]。此外, 基于半正定规划的优化方法也被用于改善三相不平衡问题, 通过线性化和凸松弛技术将非凸非线性优化模型转化为半正定模型, 从而提高求解效率^[4]。

同时, 新型配电系统的研究也强调了分层划分和协同调度的重要性。通过建立全网能源管理平台, 协调分布式电源与储能设备, 实现动态潮流优化, 可以提高资源利用率并保障电力系统的安全稳定运行^[5]。此外, 分布式能源管理系统的引入也为分布式资源的优化调度提供了新的思路。

三相不平衡问题不仅会增加线路和变压器的电能损耗^[6], 而且可能影响设备的安全运行^[7]; 为此, 研究者们提出了多种治理方法, 包括使用人工智能物联网技术实现三相动态平衡^[8], 以及通过粒子群优化算法^[9]计算最优单相电流来改善电压不平衡^[10]。

收稿日期: 2024-09-05; 修回日期: 2024-10-04

第一作者: 刘志勇(1983—), 男, 四川人。

随着分布式能源资源的快速发展, 配电系统的优化需要结合分布式管理^[11]和集中控制^[12]的优势, 采用多种技术手段来应对复杂性和不确定性带来的挑战, 以确保军事基地与设施供电的稳定性和可靠性, 进而保障基地的作战能力和信息处理能力^[13]。

笔者开发一种针对不平衡配电系统的分布式最优潮流算法, 具备快速计算、易于处理及高效通信的特点。

1 网络建模与问题公式化

在配电系统优化中, 准确的网络建模是制定有效优化策略的基础。笔者描述了不平衡配电系统的功率流模型, 并对分布式能源资源进行建模^[14]。考虑一个由 n 个节点组成的不平衡辐射配电网络, 节点集合为 N , 边集合为 E 。设 $v_j^p = |V_j^p|^2$ 为节点 $j \in N$ 的相位 p 处电压的平方幅度, $l_{ij}^{pq} = (|I_{ij}^p| |I_{ij}^q|)$ 为线 (i, j) 的相位 $pq \in \phi_{ij}$ 中流动的线路电流的平方幅度。同时, $S_{ij}^{pq} = P_{ij}^{pq} + Q_{ij}^{pq}$, $z_{ij}^{pq} = r_{ij}^{pq} + jx_{ij}^{pq}$, 其中 $pq \in \phi_{ij}$ 。变量 $p_{L,j}^p$ 和 $q_{L,j}^p$ 分别表示连接在节点 j 的相位 $p \in \phi_j$ 处的有功和无功负载。 δ_{ij}^p 是相电流之间的相位差。

1.1 非线性功率流模型

假设系统中的负载为恒定功率负载, 基于近似的相电压和支路电流角度, 为不平衡辐射配电系统开发了非线性功率流模型^[15]。模型定义如式(1)所示:

$$\begin{aligned} P_{ij}^{pp} - \sum_{q \in \phi_j} l_{ij}^{pq} (r_{ij}^{pq} \cos(\delta_{ij}^{pq}) - x_{ij}^{pq} \sin(\delta_{ij}^{pq})) = \\ \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk}^{pp} + p_{L,j}^p - p_{D,j}^p; \\ Q_{ij}^{pp} - \sum_{q \in \phi_j} l_{ij}^{pq} (x_{ij}^{pq} \cos(\delta_{ij}^{pq}) + r_{ij}^{pq} \sin(\delta_{ij}^{pq})) = \\ \sum_{k: j \rightarrow k} Q_{jk}^{pp} + q_{L,j}^p - q_{D,j}^p - q_{C,j}^p. \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 线性化模型

为简化计算, 采用线性化功率流模型。该模型假设线路损耗可以忽略不计, 从而得到如下公式:

$$\begin{aligned} P_{ij}^{pp} = \sum_{k: j \rightarrow k} P_{jk}^{pp} + p_{L,j}^p - p_{D,j}^p; \\ Q_{ij}^{pp} = \sum_{k: j \rightarrow k} Q_{jk}^{pp} + q_{L,j}^p - q_{D,j}^p - q_{C,j}^p. \end{aligned} \quad (2)$$

这种线性化模型能在合理的准确性内解决功率流变量, 如节点电压, 减少了计算时间, 使其适用于大规模配电系统。

1.3 分布式能源资源建模

分布式能源资源的有功或无功功率发电量为决策变量。对于不同的网络目标, 分布式能源资源的建模方式有所不同。例如最小化线路损耗或最大化分布式能源资源发电, 分布式能源资源的有功发电量 $p_{D,j}^p$ 假定为已知, 而无功发电量 $p_{D,j}^p$ 为决策变量^[16]。将 $S_{DR,j}^p$ 定义为节点 j 在相位 $p \in \phi_j$ 上的额定容量, 那么分布式能源资源模型定义如式(3)所示:

$$-\sqrt{(S_{DR,j}^p)^2 - (p_{D,j}^p)^2} \leq q_{D,j}^p \leq \sqrt{(S_{DR,j}^p)^2 - (p_{D,j}^p)^2}. \quad (3)$$

对于网络目标, 例如分布式能源资源最大化, 有功发电量 $p_{D,j}^p$ 被设定为决策变量, 并且假设 $p_{D,j}^p = 0$ 。分布式能源资源模型定义如式(4)所示:

$$0 \leq p_{D,j}^p \leq S_{DR,j}^p. \quad (4)$$

如果同时将有功和无功发电量视为决策变量, 那么分布式能源资源被建模为一个二阶锥方程, 定义如式(5)所示:

$$(p_{D,j}^p)^2 + (q_{D,j}^p)^2 \leq (S_{DR,j}^p)^2. \quad (5)$$

2 分布式算法

配电系统的优化问题具有自然的分解特性, 尤其是在径向配电网络中。通过将系统分解为多个区域子问题, 可以实现分布式求解。

2.1 分解方法与网络近似

将配电系统分解为多个区域子问题, 每个区域通过共享变量(如节点电压和潮流)进行分布式求解。每个区域在假设共享变量恒定的情况下, 先行求解局部子问题, 然后通过迭代更新共享变量^[17]。区域之间的共享变量包括节点电压和潮流, 通过定点迭代方法实现边界共识。这种分解方法充分利用了配电系统的结构特性, 避免了集中式求解的大规模计算问题, 同时降低了通信复杂度。

2.2 局部分布式最优潮流模型

设配电系统由连接区域/微电网组成, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 为所有区域或微电网集合。区域 $A_N \in A$ 定义为有向径向图 $A_m = G(N_m, E_m)$, 其中 N_m 和 E_m 分别为系统中的节点集和边集。中央优化变量集定义为 $X = \bigcup_{m=1}^N X_m$, X_m 表示区域 A_m 的所有局部优化变

量集。定义局部子问题, 使用低保真模型进行优化, 并通过分布式协调机制求解。以下是 2 种目标下的

局部分布式最优潮流模型：

1) 损耗最小化。

区域 $A_m (\forall ij \in E_m \text{ 且 } \forall j \in N_m)$ 对应的分解子问题定义如下^[18]：

$$(D1): \min f_m(X_m^{(n)}) = \sum_{p \in \phi_j, j: i \rightarrow j} l_{ij}^{pp} r_{ij}^{pp};$$

$$v_{0_m}^{p(n)} = v_{0_{ua}}^{p(n-1)}; p_{k_m}^{p(n)} = P_{jk_{da}}^{pp(n-1)}; q_{k_m}^{p(n)} = Q_{jk_{da}}^{pp(n-1)}。 (6)$$

$$(D2): \min f_m(X_m^{(n)}) = \sum_{p \in \phi_j, j: i \rightarrow j} (P_{ij}^{pp})^2 + (Q_{ij}^{pp})^2;$$

$$v_{0_m}^{p(n)} = v_{0_{ua}}^{p(n-1)}; p_{k_m}^{p(n)} = P_{jk_{da}}^{pp(n-1)}; q_{k_m}^{p(n)} = Q_{jk_{da}}^{pp(n-1)}。 (7)$$

2) 分布式能源资源最大化。

与损耗最小化目标类似，区域 A_m 对应分解子问题定义如下：

$$(D3): \max f_m(X_m^{(n)}) = \sum_{\forall j \in N_m} \sum_{p \in \phi_j} p_{D,j}^p;$$

$$v_{0_m}^{p(n)} = v_{0_{ua}}^{p(n-1)}; p_{k_m}^{p(n)} = P_{jk_{da}}^{pp(n-1)}; q_{k_m}^{p(n)} = Q_{jk_{da}}^{pp(n-1)}。 (8)$$

2.3 协同仿真平台

为了实现分布式算法的现实评估，笔者基于 HELICS 开发了一个多代理信息物理协同仿真平台。该平台整合了 Python3、GridLAB-D 和 NS-3 3 大软件，分别模拟计算代理、配电网络和通信网络。HELICS 负责同步仿真并协调各软件之间的消息传递。每个区域的控制器代理通过 HELICS 与 NS-3 通信网络建立连接，实现区域间的通信以及与本地设备代理的交互。设备代理负责格式化 GridLAB-D 产生的数据供控制器理解，并解析控制器的命令到 GridLAB-D 进行仿真^[19]。控制器代理运行本地 GridLAB-D 仿真作为数字孪生模型，获取实施近似最优潮流控制变量后的实际潮流变量，从而评估算法性能。其网络物理系统的协同仿真结构如图 1 所示。

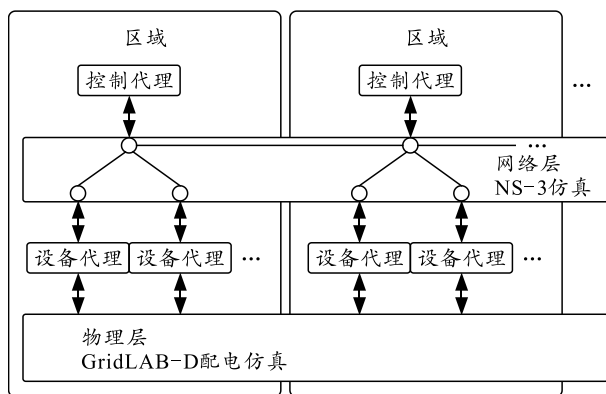


图 1 网络物理系统的协同仿真结构

3 结果与讨论

为了验证所提出的分布式最优潮流算法的有效性，通过详细的仿真实验对其进行全面评估。

3.1 模拟系统

实验采用三相不平衡 IEEE-123 总线测试系统，假设系统由 4 个区域组成，模拟了 3 种不同的分布式能源资源场景：

1) 场景(i)：10 个三相分布式能源资源，容量为 60 kVA，分别位于节点 15、23、30、37、49、50、51、67、78 和 107。

2) 场景(ii)：30 个三相分布式能源资源，容量为 48 kVA。

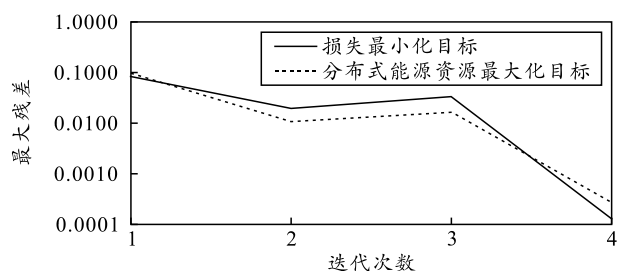
3) 场景(iii)：30 个三相分布式能源资源，容量为 60 kVA。

3.2 分解方法的验证

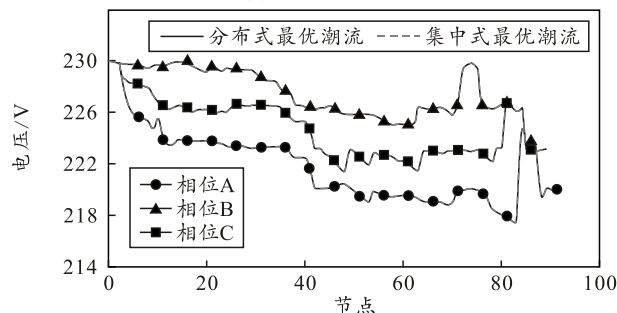
通过与集中式最优潮流方法的比较，验证了分布式最优潮流方法的有效性。表 1 和图 2 展示了 2 种方法在损耗最小化和分布式能源资源最大化目标下的性能对比。

表 1 分布式最优潮流方法的验证

最优潮流问题	目标/kW		时间/s	
	分布式最优潮流	集中式最优潮流	分布式最优潮流	集中式最优潮流
损失最小化：场景(i)	43.976	43.975	20	520
分布式能源资源最大化：场景(iii)	5 080	5 180	20	200



(a) 边界收敛



(b) 节点电压：损耗最小化

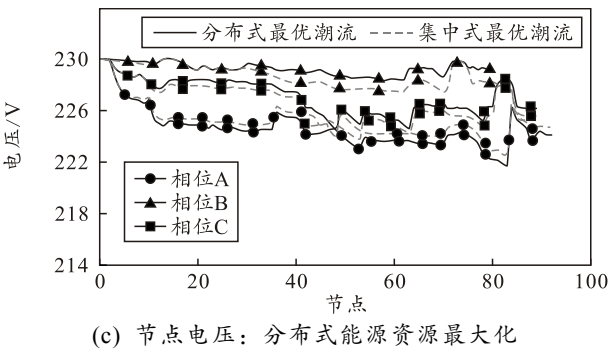


图 2 损失最小化和分布式能源资源最大化目标的分布式最优潮流结果

分布式最优潮流与集中式最优潮流在求解分布式能源资源最大化问题时，当目标值分别为 5.08 和 5.18 MW 时，分布式最优潮流计算速度显著更快，有时可达 10 倍以上。仅需 4 次宏迭代即可达到全局解，如图 2 所示。将分布式最优潮流的节点电压与图 3 所示的 GridLab-D/OpenDSS 模型的对比，电压差在 10^{-4} 或更小的数量级，这些比较验证了分布式最优潮流在最小化和最大化目标中的可行性和最优性。

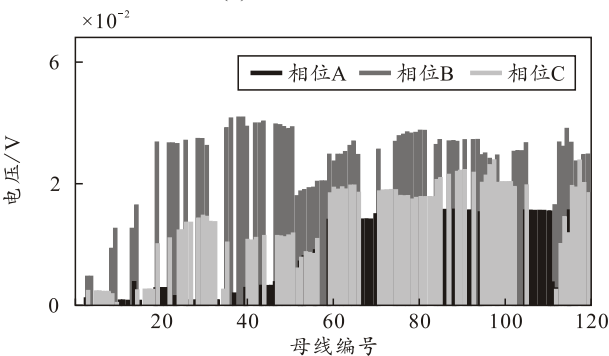
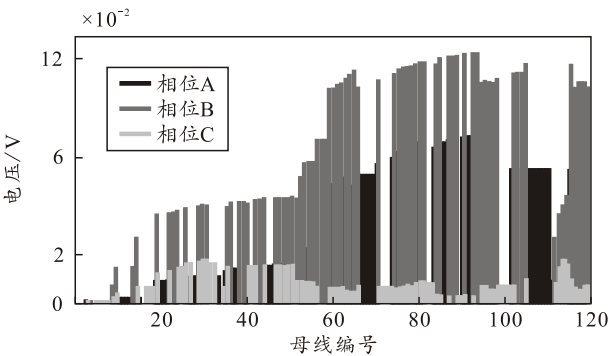


图 3 验证分解方法

3.3 协同仿真与数字孪生的使用

使用 GridLab-D 潮流模拟器对本地区域的数字孪生进行建模。假设分布式代理/本地控制器每 2 s 与邻居通信一次。在收敛后，大约需要 0.2 s 在系统

中分配决策变量。分布式最优潮流和集中式最优潮流的比较结果如表 2 和 3 所示。

表 2 损失最小化结果比较

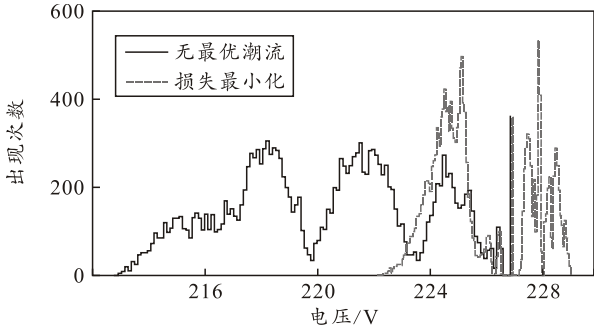
方法	损失/kW		通信轮次	
	场景(i)	场景(ii)	场景(i)	场景(ii)
无最优潮流	63.132	53.338	0	0
线性集中式最优潮流	44.875	26.508	0	0
线性分布式最优潮流	44.959	26.546	5	5
线性分布式最优潮流+数字孪生	44.959	27.238	5	5
非线性集中式最优潮流	43.975	27.160	0	0

表 2 显示：场景(i)中线性模型损耗为 44.959 kW，非线性解为 43.975 kW；场景(ii)中，使用数字孪生模型的损耗为 27.23 kW，更接近非线性解 27.16 kW，而未使用数字孪生模型时为 26.546 kW。虽然数字孪生模型不总能改善结果，但确保了本地解在交换边界变量前的可行性。

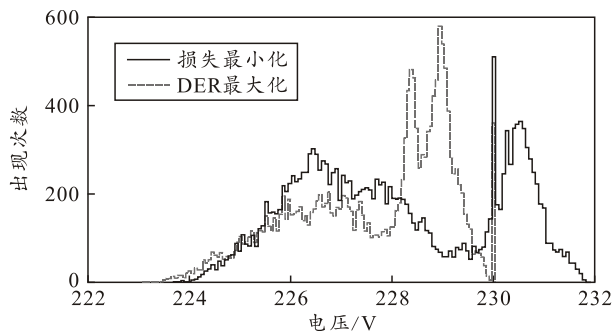
表 3 场景(iii)中分布式能源资源最大化结果比较

方法	发电量/MW	通信轮次
无最优潮流	5.400	0
线性集中式最优潮流	5.135	0
线性分布式最优潮流	5.135	7
线性分布式最优潮流+数字孪生	5.163	5
非线性集中式最优潮流	5.180	0

表 3 验证了协同仿真平台在分布式能源资源场景(iii)最大化问题中的有效性。未执行最优潮流时存在电压越限，而考虑运行限制后，线性分布式最优潮流、线性分布式最优潮流+数字孪生和非线性集中式最优潮流的最优发电分别为 5.135、5.163 和 5.18 MW，表明数字孪生模型使解更接近非线性解。此外，数字孪生模型将通信轮次从 7 次减至 5 次。图 4 显示了损耗最小化(场景(ii))和分布式能源资源最大化(场景(iii))对系统电压的影响。损耗最小化时，母线电压向上限偏移；分布式能源资源最大化时，超限电压降至限值内，验证了预期结果。



(a) 损失最小化



(b) 分布式能源资源最大化

图 4 电压分布

4 结论

笔者提出一种新型分布式最优潮流方法，适用于径向三相不平衡配电系统。该方法结合仿真与优化，提高可扩展性并减少局部子问题的求解时间。通过使用本地网络数字孪生模型与线性近似最优潮流相结合，确保配电系统多个最优潮流问题的潮流可行且接近最优解。该分布式协调方法以更少的通信轮次实现最优解的收敛。通过信息物理协同仿真环境评估算法性能，验证了其在通信受限条件下的鲁棒性。结果表明：该方法能在合理时间内成功收敛到最优解，即使在军事基地通信延迟和低带宽等显著压力下仍表现良好。

参考文献：

- [1] 夏雪, 张瑞曦, 王磊, 等. 面向配电网数智化转型的高级配电管理系统研究与展望[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(12): 33-39.
- [2] 孔惠文. 三相不平衡对 10kV 配电网附加损耗影响的量化分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [3] 李彬贤, 李佳勇, 海征, 等. 基于多智能体深度强化学习的配电网三相不平衡在线治理方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1729-1740.
- [4] 袁智勇, 雷金勇, 于力, 等. 基于半正定规划的低压不对称配电网储能优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 140-145.
- [5] 张昕, 魏立明, 张师. 光伏分布式接入对配电网电压稳定性的影响研究[J]. 吉林电力, 2021, 49(2): 12-15.
- [6] 闫志强, 雷霞, 何建平, 等. 三相不平衡对配电变压器

损耗影响的研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 43-49.

- [7] 边胜. 配电变压器三相负荷不平衡的影响及解决措施[J]. 技术与市场, 2018, 25(12): 82-83.
- [8] 吴彬, 胡敏. 基于 AIoT 平台的用户端智能配电多场景应用研究与实现[J]. 现代建筑电气, 2022, 13(10): 16-21.
- [9] CHANG C K, CHENG S T, BOYANAPALLI B K. Three-Phase Unbalance Improvement for Distribution Systems Based on the Particle Swarm Current Injection Algorithm[J]. Energies, 2022, 15: 3460.
- [10] MELIOPOULOS A P S, POLYMENEAS E, TAN Z, et al. Advanced distribution management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2109-2117.
- [11] CASSEL W R. Distribution management systems: Functions and payback[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 796-801.
- [12] ZHOU J, ZHAO S, MEI B, et al. Improving operational efficiency and benefits of the distribution network with advanced distribution management system[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2020: 4127-4132.
- [13] TSAO Y C, THANH V V, LU J C. Sustainable advanced distribution management system design considering differential pricing schemes and carbon emissions[J]. Energy, 2021, 219(5): 119596.
- [14] BOARDMAN E. Advanced applications in an advanced distribution management system: Essentials for implementation and integration[J]. IEEE Power and Energy, 2019, 18(1): 43-54.
- [15] POPOVIC N D, POPOVIC D S, SESKAR I. A novel cloud-based advanced distribution management system solution[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(8): 3469-3476.
- [16] RAZON A, THOMAS T, BANUNARAYANAN V, et al. Advanced distribution management systems: Connectivity through standardized interoperability protocols[J]. IEEE Power & Energy, 2019, 18(1): 26-33.
- [17] 孙峰洲. 含高比例分布式新能源的柔性配电网优化运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [18] 朱晓荣, 鹿国微, 谢婉莹. 考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 8-16, 40.
- [19] 曹德发, 马明, 汤平瑜, 等. 多源量测环境下基于深度强化学习的配电网分布式状态估计方法[J]. 可再生能源, 2021, 39(10): 1414-1420.