

基于支路潮流模型约束的分布式 储能系统优化配置方法

谢波¹,戴博伟²,郝文斌¹,胡俊阳³,杨彩虹²,李宁宁²

(1.国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041;2.西安交通大学电气工程学院,
陕西西安 710049;3.四川大学计算机学院,四川成都 610065)

摘要:为实现“双碳”目标及整县光伏战略规划,针对平抑配电网负荷以及分布式新能源出力波动性的分布式储能选址定容问题,文中考虑系统收益与成本,在对电力系统约束条件进行相角松弛及二阶锥松弛的基础上结合电池储能的运行特性,提出了一种基于支路潮流模型约束的分布式储能优化配置模型;在满足约束条件的基础上求解储能配置方案及日前调度策略。算例通过与启发式算法——粒子群算法进行对比,验证了所提算法的有效性 & 收敛性。

关键词:优化配置;选址定容;支路流模型;储能配置

中图分类号:TM 715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0007-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220202

Optimization Configuration of Distributed Energy Storage System Based on Branch Flow Model Constraints

XIE Bo¹, DAI Bowei², HAO Wenbin¹, HU Junyang³, YANG Caihong², LI Ningning²

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. School of
Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 3. College of
Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to achieve carbon peak and neutrality goals as well as the implement planning of "whole county photovoltaic (PV)" strategy, aiming at the allocation problem of distributed energy storage that stabilizes the volatility of distributed load and new energy output, and on basis of phase angle and second-order cone relaxation of power system constraints combined with the operating characteristics of battery energy storage, an optimization model for the configuration and day-ahead scheduling strategy of distributed energy storage is proposed based on the branch flow model constraints and considering the system benefits and costs. The calculation results verify the effectiveness and convergence of the proposed algorithm by comparing with the heuristic algorithm-particle swarm algorithm.

Key words: optimization configuration; siting and sizing; branch flow model; energy storage allocation

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标提出,针对中国作为能源消费及生产大国目前主要依赖以燃煤为主的化石能源进行发电的现状,提升清洁能源装机比例是实现绿色可持续发展的必由之路。为贯彻落实“双碳目标”,2021年9月8日国家能源局综合司将全国676个县(市、区)作为“整县光伏”开发试点区域提高配电网侧分布式能源装机量^[1]。光伏能源

出力的随机性与波动性为新型电力系统消纳可再生能源的能力及自身稳定性带来了新的挑战^[2-3],储能系统具有的双向功率特性可以较好地平抑新能源波动并提升配电网电能质量^[4-6]。

目前,国内外学者针对配电网储能系统配置已经做了大量的研究。文献[7-8]采用遗传算法分别针对配电网时段性、局部性设备重过载负荷平衡需求和高光伏渗透率状态下改善电网电压波动指标,建立分布式储能选址定容的优化模型,并通过算例

验证了算法的可靠性,提升了配电网资产整体利用率。文献[9]通过基于信息熵的场景提取方法生成典型运行场景,通过改进粒子群算法最终求解光伏及储能规划方案。文献[10]以降低网损和电压偏移指标为目标,通过改进多目标灰狼算法求解超级电容及蓄电池储能配置方案并通过算例验证其仿真结果。以上文献采用了不同的启发式算法以求解储能配置最优化问题,由于传统电力系统潮流约束具有非线性特性,由其构成的优化问题具有非凸特性,采用启发式算法对模型进行求解将有很大概率陷入局部最优情景。

下面对电力系统功率约束进行基于支路潮流模型的凸松弛变换,通过相角松弛和二阶锥松弛两阶段松弛处理后,得到等效松弛为紧的支路潮流凸松弛模型;并结合储能系统约束条件,建立最小化储能投资成本的储能系统选址定容优化模型。最终,通过IEEE 14 配电网节点系统进行仿真分析,得到了最小化投资成本的分布式储能系统选址定容方案和日内调度策略,该方案有效减少了配电网净负荷峰谷差和功率波动,与大规模种群及迭代次数的粒子群算法计算结果相同。

1 基于支路潮流模型的凸松弛

传统电力潮流约束聚焦于电力系统节点,使得含有 N 个节点的电力系统运行期间,节点 i 满足节点电压方程及节点功率方程。

$$I = \sum_{j=1}^N Y_{ij} \dot{U}_j \quad (1)$$

$$\tilde{S} = \dot{U}_i I_i^* \quad (2)$$

式中: \dot{U} 、 I 、 \tilde{S} 、 Y 分别为该节点的电压、电流、复功率和对应节点导纳矩阵值; i, j 表示系统对应的节点编号。

将式(2)带入式(1)中左侧节点电流 I_i 即可得到注入功率的潮流方程。

$$\begin{cases} P_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^N [\dot{U}_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})] \\ Q_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^N [\dot{U}_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})] \end{cases} \quad (3)$$

式中, G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 之间的电导和电纳。显然由于节点电压 \dot{U}_i 、 \dot{U}_j 和节点间相角 δ_{ij} 均为未知量,这就使加入注入功率的潮流方程约束条件的电力系统优化问题难以求解。

支路潮流模型 (branch flow model, BFM) 由 Steven H Low 教授于 2013 年提出并证明模型应用

于辐射状网络的计算准确性^[11-12]。其模型聚焦于两节点之间的支路潮流信息,其模型如图 1 所示。

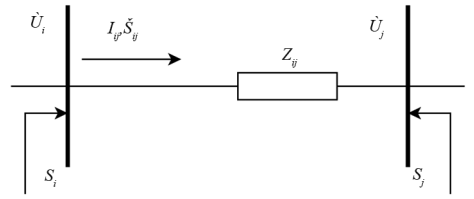


图 1 支路潮流模型

流出节点 i 与流入节点 j 满足欧姆定律。

$$\begin{aligned} \dot{U}_i - \dot{U}_j &= z_{ij} I_{ij} \\ z_{ij} &= r_{ij} + jx_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

流过支路的复功率满足

$$\tilde{S}_{ij} = \dot{U}_i I_{ij}^* \quad (5)$$

式中: z_{ij} 、 r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路潮流模型中节点 i 与节点 j 之间的阻抗及对应的电阻、电抗; I_{ij} 为节点 i, j 之间流过的电流。

将两节点支路潮流模型扩展到整个电力系统,即有功率平衡方程为

$$\sum_{k:j \rightarrow k} S_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (S_{ij} - z_{ij} |I_{ij}|^2) = s_j, \forall j \quad (6)$$

式中, $j \rightarrow k$ 表示在生成树中,由节点 j 指向节点 k 。

在支路功率平衡的基础上进行相角松弛和二阶锥松弛即可得到电力系统线性二阶锥潮流松弛条件,如图 2 所示。

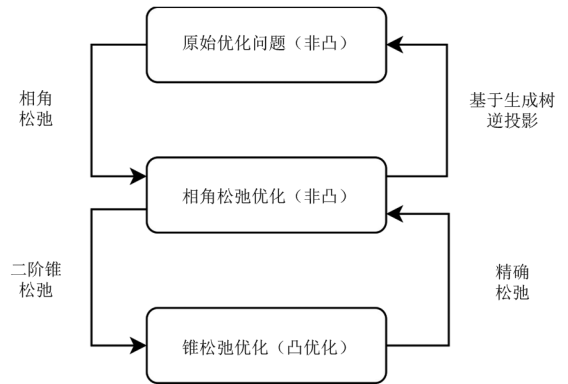


图 2 基于支路潮流模型的凸松弛步骤

1.1 基于支路潮流模型的相角松弛

将式(5)带入式(4)中消去电流项可得

$$\dot{U}_j = \dot{U}_i - z_{ij} \frac{\tilde{S}_{ij}^*}{\dot{U}_i^*} \quad (7)$$

将式(7)乘以该式的共轭后可得节点电压模的平方和支路电流模的平方的关系为

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (8)$$

令 u 表示 U^2 , l 表示 I^2 , 分离式(6)有功功率及无功功率可得经相角松弛后约束条件为

$$u_j = u_i - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)l_{ij} \quad (9)$$

$$\sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij}l_{ij}) = q_j, \forall j \quad (10)$$

$$\sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij}l_{ij}) = p_j, \forall j \quad (11)$$

$$u_i l_{ij} = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (12)$$

至此,除式(10)视在功率表达式外,功率约束条件均完成线性化。此时模型经松弛后仍为非线性非凸模型。

1.2 基于支路潮流模型的二阶锥松弛

将式(10)松弛为旋转的二阶锥约束即可得

$$u_i l_{ij} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (13)$$

进一步将该式改写为标准二阶锥约束形式即可得到^[13]

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - u_i \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij} + u_i \quad (14)$$

经过上述松弛步骤,原潮流约束即转化为二阶锥优化约束,结合其他约束条件和目标函数即可构建对应的优化问题,此类问题可以通过 Cplex、Gurobi 等商业优化求解器进行快速求解。

2 分布式储能选址定容模型

2.1 目标函数

现阶段储能系统建设成本仍然相对较高,从配电网运行规划角度出发,储能选址定容配置问题将以综合建设成本最小化为目标建立目标函数。

$$\min C = C_{\text{invest}} + C_{\text{main}} + C_{\text{loss}} - D_{\text{delay}} \quad (15)$$

式中: C 为总运行成本; C_{invest} 为投资建设成本; C_{main} 为运行维护成本; C_{loss} 为网损成本; D_{delay} 为延缓线路升级收益。

1) 投资建设成本

$$C_{\text{invest}} = (C_p P_{\text{es}} + C_e E_{\text{es}}) \frac{i_0 \cdot (1 + i_0)^n}{(1 + i_0)^n - 1} \quad (16)$$

式中: C_p 为储能单位功率成本; P_{es} 为储能系统额定功率; C_e 为储能系统单位容量成本; E_{es} 为储能系统额定容量; n 为储能系统寿命年限; i_0 为预期收益率。

2) 运行维护成本

$$C_{\text{main}} = 365 \cdot M \cdot \sum_{t=1}^T P_{t,e} \Delta t \quad (17)$$

式中: M 为储能系统单位放电电量的运行维护成本; $P_{t,e}$ 为 t 时刻储能系统的充放电功率。

3) 网损成本

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n \sum_{i:i \rightarrow j} r_{ij} l_{ij} \Delta t \quad (18)$$

式中, $r_{ij} l_{ij}$ 为支路潮流模型下流经线路的有功损耗。

4) 延缓线路升级收益

$$D_{\text{delay}} = (P_{\text{con,max}} - P_{\text{con,es,max}}) \left(1 - \frac{1}{e^{i_0 \cdot \Delta n}}\right) \lambda_g \quad (19)$$

式中: $P_{\text{con,max}}$ 为无储能系统时配电网联络线峰值负荷; $P_{\text{con,es,max}}$ 为加入储能系统后配电网联络线峰值负荷; Δn 为储能系统延缓配电网升级改造的年限,由式(20)计算得到; λ_g 为配电网升级扩建成本。

$$\Delta n = \frac{\lg(1 + \gamma)}{\lg(1 + \beta)} \quad (20)$$

式中: γ 为储能系统的削峰率; β 为负荷年增长率。

2.2 约束条件

1) 电力系统潮流约束

式(9)一式(11)和式(14)即为基于支路潮流模型的电力系统潮流功率平衡约束。

2) 节点电压约束

$$u_{i,\min} \leq u_i \leq u_{i,\max} \quad (21)$$

式中, $u_{i,\min}$ 、 $u_{i,\max}$ 分别为相角松弛处理后节点 i 电压模值平方的上、下限。

3) 支路电流约束

$$l_{ij} \leq l_{ij,\max} \quad (22)$$

式中, $l_{ij,\max}$ 为相角松弛处理后支路 ij 电流模值平方的上限。

4) 电池储能系统能量转换状态约束

在充放电过程中由于存在损耗,储能系统在能量转换过程中会消耗一定量能量,使得能量转换效率无法达到 100%,因此需要考虑电池储能系统能量转换效率 η 对储能系统运行过程产生的影响。

$$\begin{cases} E_{t+1,e} = E_{t,e} - P_{t,e} \sqrt{\eta} \Delta t, P_{t,e} < 0 \\ E_{t+1,e} = E_{t,e} - \frac{P_{t,e}}{\sqrt{\eta}} \Delta t, P_{t,e} > 0 \\ E_{t+1,e} = E_{t,e}, P_{t,e} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中, $P_{t,e}$ 、 $E_{t,e}$ 分别为 t 时刻状态下储能系统的充放电功率和系统容量。

5) 储能系统荷电状态约束

储能系统在运行过程中为了保证运行安全和系统寿命,电池荷电状态不允许过充或过放以减少对

电池的损害,因此进行日内调控时,储能系统荷电状态应满足以下约束。

$$S_{OC, \min} < S_{OC,t} < S_{OC, \max} \quad (24)$$

6) 储能系统总容量约束

$$0 \leq E_{es} < E_{e, \max} \quad (25)$$

式中, $E_{e, \max}$ 为储能系统容量上限。

7) 储能系统总功率约束

$$\max | (P_{t,e}, t \in T) | \leq P_{es, \max} \quad (26)$$

式中, $P_{es, \max}$ 为储能系统最大允许的充放电功率。

3 算例分析

选取改进的 IEEE 14 配电网节点系统,该系统的网络拓扑结构如图 3 所示。

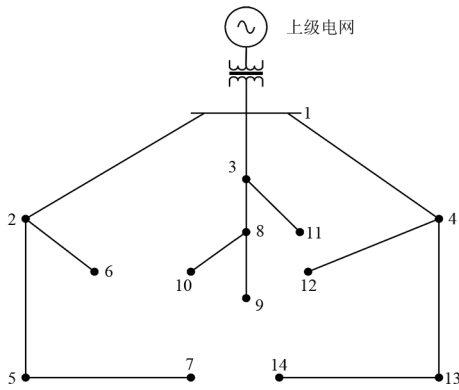


图 3 IEEE 14 配电网系统拓扑结构

该配电网系统额定电压等级为 10 kV, 分别在节点 3 和节点 13 处接入 5 MW 分布式光伏系统, 其光伏功率出力曲线可以由历史采样数据进行聚类分析后得到, 原始出力采样数据如图 4 所示。配电网负荷由固有负荷、公共建筑负荷、工商业负荷、居民负荷 4 种负荷构成, 其典型出力曲线可由相同聚类方法产生, 最终得出的配电网节点系统标么化曲线如图 5 所示。系统总最大净负荷为 26.66 MW + j24.94 Mvar, 选取其中一个节点作为储能的接入节点, 储能系统及启发式算法模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	数值
储能单位容量成本 $C_e / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	1570
储能单位功率成本 $C_p / (\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	400
负荷年增长率 $\beta / \%$	1.5
预期年收益率 $i_0 / \%$	8
$[S_{OC, \min}, S_{OC, \max}]$	$[0.2, 0.95]$
储能系统能量转换效率 η	0.9
粒子群算法种群规模	100
粒子群算法迭代次数	200

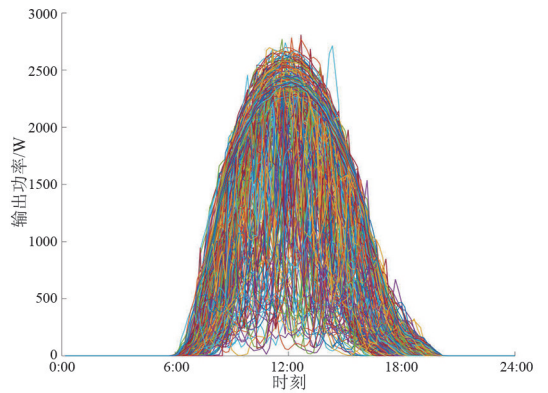


图 4 某地全年光伏出力历史数据

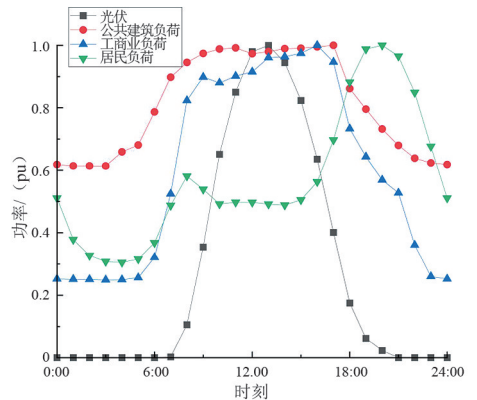


图 5 光伏及不同种类负荷标么化功率

经过求解, 两种算法最终求解结果和求解时间如表 2 所示, 两种算法最终求得的储能选址定容策略是一致的, 但是粒子群算法为了确保取得全局最优结果, 其大规模种群数和迭代次数导致了求解时间极大增加。

表 2 两种算法求解结果及求解时间

算法	接入节点位置	接入容量/MWh	接入功率/kW	求解时间/s
粒子群算法	2	2	800	1 382.31
BFM 松弛算法	2	2	800	167.43

经过优化计算, 目标函数各项计算结果如表 3 所示, 配电网储能系统充放电功率和荷电状态联络线功率净负荷及分别如图 6—图 7 所示。由图 7 对比分析可得出加入储能系统后, 配电网峰谷处功率波动均有明显的改善, 削峰率最终计算结果为 2.96%, 表

表 3 储能系统接入前后成本 单位: 万元

目标函数	无储能	接入储能
投资建设成本	0	60.209
运行维护成本	0	1.089
网损成本	145.95	145.936
延缓线路升级收益	0	91.976
总成本	145.95	115.258

明储能系统具有一定的调峰效果,提高了延缓配电网升级的收益。同时生命周期内建设成本小于延缓线路升级收益,可以为电网带来一定经济效益。

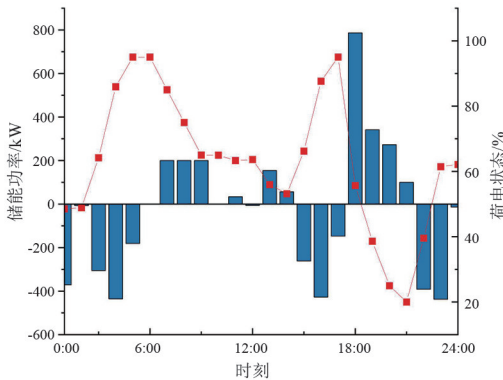


图6 储能系统充放电功率及荷电状态日内调控曲线

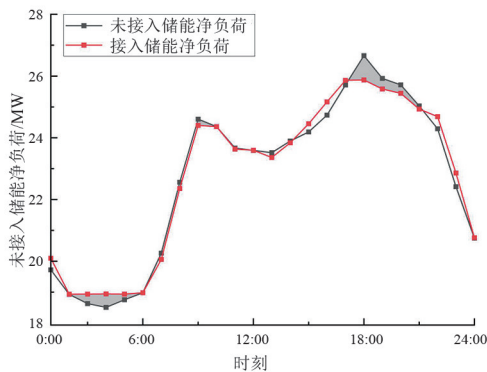


图7 加入储能系统前后日内净负荷曲线

4 结论

采用基于支路潮流模型松弛方法研究了配电网系统储能选址定容调度问题,经过算例仿真的计算结果,得到的主要结论如下:

1) 计算所得的储能系统调度模型可以有效平抑配电网功率波动,减少配电网负荷、新能源出力波动对主网的影响,可为配电网规划、设计、调度提供参考;

2) 使用基于支路潮流模型的松弛算法在保证算法有效性的同时显著减少了迭代次数,避免了启发式算法导致计算结果局部最优;

3) 除储能规划调度问题外,基于支路潮流模型的凸优化松弛可以应用于大部分辐射状配电网规划、优化问题中,具有广阔的应用场景。

参考文献

[1] 国家能源局.国家能源局综合司关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL].

(2021-09-08)[2021-10-28].http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.

- [2] Xuewei Shi, Xuefang Shi, Wenqi Dong, et al. Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility[C]. 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Chengdu, China: IEEE, 2020:464-468.
- [3] A lireza Zare, C Y Chung, Junpeng Zhan, et al. A Distributionally Robust Chance-Constrained MILP Model for Multistage Distribution System Planning With Uncertain Renewables and Loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5248-5262.
- [4] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等.利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(8):15-24.
- [5] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等.用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J].电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
- [6] 金晨,任大伟,肖晋宇,等.支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J].中国电力,2021,54(8):164-174.
- [7] 程瑜,黄森,刘瑞丰.面向配电网设备利用率提升的分布式储能优化配置[J].智慧电力,2021,49(8):8-14.
- [8] 陶琼,桑丙玉,叶季蕾,等.高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J].高电压技术,2016,42(7):2158-2165.
- [9] 赵立军,张秀路,韩丽维,等.基于多场景的配电网分布式光伏及储能规划[J/OL].现代电力;1-9[2021-11-19].DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0257.
- [10] 毛志宇,蒋叶,李培强,等.基于改进灰狼算法的配电网储能优化配置[J/OL].电力系统及其自动化学报;1-10[2021-12-03].DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000890.
- [11] Masoud Farivar, Steven H Low. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part I [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2554-2564.
- [12] Masoud Farivar, Steven H Low. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification—Part II [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2565-2572.
- [13] Stephen Boyd, Lieven Vandenbergh. Convex Optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

作者简介:

谢波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统规划及调度运行研究;

戴博伟(1995),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划及优化;

郝文斌(1976),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统规划及调度运行研究。

(收稿日期:2021-12-14)