

考虑源-荷互动的新型电力系统荷储优化协同控制方法研究

黄健¹, 侯健生¹, 金坚锋¹, 王赢聪¹, 马永真²

(1. 浙江金华供电公司, 浙江 金华 321000;

2. 上海博英信息科技有限公司, 上海 200240)

摘要: 随着分布式电网和储能系统的加入, 若是不能进行有效的协同控制, 将直接影响供电稳定, 提高供电成本。面对这一问题, 研究一种考虑源-荷互动的新型电力系统荷储优化协同控制方法。通过描述源-荷-储互动问题, 建立分布式电源模型和储能系统模型。然后联合协同运行成本和负荷波动构建多目标控制模型, 在两个约束条件下, 利用改进遗传算法求取目标模型最优解, 得到新型电力系统荷储优化协同控制方案。结果表明: 协同控制方法应用下, 三种交互运行场景的电力系统运行成本达到最低值、负荷波动达到最小值。所研究方法的控制效果更好。

关键词: 源-荷互动; 新型电力系统; 目标模型; 改进遗传算法; 荷储优化; 协同控制方法

中图分类号: TP181; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)03-0017-05

Research on Load Storage Optimal Cooperative Control Method for Power System Considering Source Load Interaction

HUANG Jian¹, HOU Jian-sheng¹, JIN Jian-feng¹, WANG Ying-cong¹, MA Yong-zhen²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company Jinhua Power Supply Company, Jinhua 321000 China;

2. Shanghai Proinvent Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200240 China)

Abstract: With the joining of distributed power grid and energy storage system, if effective collaborative control cannot be carried out, it directly affects the stability of power supply and increase the cost of power supply. To solve this problem, a new power system load storage optimal cooperative control method considering source load interaction is studied. In this study, the source load storage interaction problem is described, and the distributed generation model and energy storage system model are established. A multi-objective control model is constructed by combining the cost of cooperative operation and load fluctuation. Under the two constraints, the optimal solution of the objective model is obtained by using the improved genetic algorithm, and a new power system load storage optimal cooperative control scheme is obtained. The results show that under the application of the collaborative control method, the operation cost of the power system in the three interactive operation scenarios reaches the minimum value, and the load fluctuation reaches the minimum value. This shows that the control effect of the research method is better.

Keywords: source netherlands interaction; new power system; target model; improved genetic algorithm; load storage optimization; collaborative control method

0 引言

随着生产规模的扩大, 电力消耗量逐年提升。为满足人们的电量需求, 电力公司一直致力于扩大电力生产量, 电力系统的供电压力越来越大。面对这种情况, 分布式电源的开发和使用成为解决上述难题的主要手段, 不仅极大缓解了传统大电网的供电压力, 另外更重要的是, 分布式电源多为清洁能源, 随着其使用, 减少了化石燃料的燃烧^[1]。然而, 尽管分布式电源具有很多优势, 但是具有很强的随机性和波动性^[2]。为弥补这一缺陷, 在电力系

统又接入了储能电池, 以随时弥补分布式电网供电不足的问题, 保证持续供电不间断。在这种形势下, 电力系统结构变得越来越复杂, 影响了供电的稳定性^[3]。

协同控制的定义是以电力负荷为基准, 按照一定的比例共同出力, 目的是在完成供电任务的同时, 也能节省供电成本, 提高供电可靠性。关于协同控制问题, 赵壮等在其研究中以经济运行成本和环境治理成本为目标, 通过层次分析法赋权后将其组合成一个单目标函数, 然后在7个约束条件下, 利用CPLex进行求解, 得出协同运行方案^[4]。边晓燕等人以“源-荷”综合效益最优为目标函数, 在频率偏差阈值的控制下, 通过一致性算法不断迭代优化, 求出“源-荷”协调调频策略^[5]。彭院院等在其研

*基金项目: 国网浙江省电力公司金华供电公司管理咨询类项目 (JH920000338)

收稿日期: 2023-10-13

究中消纳量最大和运行成本最小为目标,在四个约束条件下,利用改进多目标粒子群算法进行求解,得出协调优化方案^[6]。

结合前人研究经验,在考虑源-荷互动的前提下,研究新型电力系统荷储优化协同控制方法。通过该研究以期优化电力系统供电可靠性和稳定性,为供电方案的制定和改进提供可参考的手段。

1 新型电力系统荷储优化协同控制研究

随着分布式清洁能源以及储能系统的加入,电网结构越加复杂^[7]。面对这种情况,新型电力系统荷储优化协同控制至关重要。为此,提出一种考虑源-荷互动的协同控制方法。该方法主要分为四部分,即源-荷-储建模、控制目标模型构建、约束条件设置以及寻优算法求解。下面针对这四个步骤进行具体研究。

1.1 源-荷-储互动问题描述

为实现源-荷合理互动,进行新型电力系统荷储优化协同控制必不可少。在传统电网供电能力无法满足负荷要求时,分布式电源开始分担供电压力并且储能系统从旁辅助,以随时应对分布式电源供电中断问题^[8]。三者协同工作,才能保证新型电力系统的供电可靠性。

(1) 分布式电源模型

分布式电源主要由三部分组成,由此构成分布式电源模型,该模型表达式如下:

$$\begin{cases} A_t = \frac{a_1 a_2 B_t}{\hat{B}} \left[\frac{a_3 + a_4}{a_3} (B_t - \hat{B}) \right] \\ C_t = \begin{cases} 0, c_t < c_1, c_t < c_2 \\ b \frac{c_t - c_1}{c_0 - c_1}, c_1 \leq c_t < c_0 \\ b, c_0 \leq c_t < c_2 \end{cases} \\ D_t = d_1 d_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_t 、 B_t 、 D_t 代表 t 时刻光伏发电功率、风力、燃气轮机的发电功率; B_t 、 \hat{B} 分别代表实际光照强度与标准光照强度; b 代表风力发电机的额定功率; d_1 代表天然气低位发热值; a_1 、 a_2 分别代表损耗系数、光伏组件额定输出功率; a_3 代表功率温度系数; c_t 代表 t 时刻实际风速; c_0 、 c_1 、 c_2 分别代表切入、额定、切出风速; d_1 代表 t 时刻消耗的燃气量; d_2 代表燃气轮机额定发电效率。

(2) 储能系统模型

储能系统主要由蓄电池组成,蓄电池的存储容量,仅作为其它供电单元的补充存在^[9]。储能系统模型根据蓄电池充、放电两种状态,具有两个公式进行描述。

$$\begin{cases} E_t = E_{t-1}(1-e) + F_t \hat{F} \\ \tilde{E}_t = E_{t-1}(1-e) + \frac{F_t}{\bar{F}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_{t-1} 代表前一时刻蓄电池剩余容量; e 代表储电自损失率; F_t 代表充放电功率; E_t 、 \tilde{E}_t 代表 t 时刻充电、放电状态下的储电量; \hat{F} 、 \bar{F} 分别代表充、放电效率。

经过上述分析,为下述模型的构建奠定了基础。

1.2 控制目标模型构建

协同控制的目的必然是达到某一个方面的指标要求,这就是新型电力系统荷储优化协同控制目标函数。目标函数可以是一个,也可以是多个。一般情况下,为保证得到的控制方案综合效益更好,会选择多个目标,组成多目标函数^[10]。本研究当中,选择总运行成本最小和负荷波动最小作为控制目标模型,其描述如下:

$$\min G = w_1 G_1 + w_2 (G_2) \quad (3)$$

式中, $\min G$ 代表控制目标综合函数值; G_1 代表协同运行成本; G_2 代表负荷波动; w_1 、 w_2 代表两个单目标函数对应的权值^[11]。

(1) 协同运行成本

$$G_1 = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^m g_{j,t} + \sum_{i=1}^n \hat{g}_{i,t} + \sum_k^K \tilde{g}_{i,t} \right] \quad (4)$$

其中,

$$g_{j,t} = f_{j,t} \left(\alpha_1 + h_j + \frac{H_j \cdot \hat{H}_j}{f_{j,t}^{\max} \tilde{H}_j \bar{H}_j} \right) \quad (5)$$

$$\hat{g}_{i,t} = \sum_{l=1}^T \frac{I |F_l|}{I_1 \cdot I_2} + J |F_t| \quad (6)$$

$$\tilde{g}_{i,t} = u_t U_t \Delta t \quad (7)$$

式中, u_t 代表 t 时刻中断负荷的补偿价格; m 代表分布式电源数量; $\hat{g}_{i,t}$ 代表 t 时刻第 i 个储能设备的调度成本; $f_{j,t}$ 代表 t 时刻第 j 个分布式电源有功出力; Δt 调度时间间隔; n 代表储能设备的数量; α_1 代表分布式电源调度成本系数; U_t 代表 t 时刻的综合需求响应中断负荷量; $\tilde{g}_{i,t}$ 代表中断负荷补偿成本; K 代表负荷类型的数量; h_j 、 H_j 、 \hat{H}_j 、 \tilde{H}_j 代表第 j 个分布式电源的运行管理成本系数、单位容量安装成本、资本回收系数、运行时间; $g_{j,t}$ 代表 t 时刻第 j 个分布式电源的调度成本; \tilde{H}_j 、 I_2 代表影响分布式电源、储能设备的容量因素; T 代表优化控制周期; I 、 F_t 、 I_1 、 J 分别代表储能设备的折旧成本、充放电功率、运行时间、运行管理成本系数^[12]。

(2) 负荷波动

$$G_2 = \sum_{t=1}^T (L_t - \bar{L}) \quad (8)$$

式中, L_t 代表 t 时刻的电力负荷值; \bar{L} 代表平均负荷。

上述构建的控制目标模型既考虑了运行成本,又考虑

了负荷波动,这能够保证协同供电成本更低,可靠性更高^[13]。

1.3 约束条件设置

约束条件设置的目的是为上述目标模型某些参数设置限制范围,以保证能够求得解是合理的。

(1) 储能设备约束条件

$$\begin{cases} F_{\min} \leq F_t \leq F_{\max} \\ \sum_{t=1}^T F_t = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, F_{\min} 、 F_{\max} 分别代表充放电功率的上、下限值。

(2) 功率平衡约束条件

$$\sum_{j=1}^m f_{j,t} + \sum_{i=1}^n \hat{R}_{i,t} = \sum_{t=1}^T L_t \quad (10)$$

式中, $f_{j,t}$ 代表 t 时刻第 j 个分布式电源有功出力; $\hat{R}_{i,t}$ 代表 t 时刻第 i 个储能设备的放电功率。

通过上述两个约束条件的设置,规定了下述寻优算法的求解空间。

1.4 求解协同控制方案

本章节主要研究内容是选取一种寻优算法,通过不断迭代选出满足目标函数最优解^[14]。这个最优解就是所要求出的协同控制方案。在这里所选择的寻优算法为改进遗传算法^[15]。具体过程如下:

步骤1:设置融合算法的相关参数;

步骤2:随机产生初始种群,获得初始解空间。该空间中每个解都代表一个个体;

步骤3:计算种群中每个可行解的适应度值 G_i , 计算公式就是上述章节1.2构建的控制目标模型,即公式(3);

步骤4:从种群中选出一些优良的个体(可行解),选择概率如下:

$$P_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (11)$$

式中, P_i 代表第 i 个个体(可行解)的选择概率; G_i 代表第 i 个个体(可行解)的适应度; N 代表种群规模。

步骤5:对根据 P_i 选出的个体(可行解)进行交叉和变异操作。其公式如下:

$$\hat{P}_i = Q \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}{N}} \quad (12)$$

式中, \hat{P}_i 代表第 i 个个体(可行解)的交叉概率; \bar{G} 代表平均适应度; Q 代表交叉概率调节参数。

$$\tilde{P}_i = Q' \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}{N}} \quad (13)$$

式中, \tilde{P}_i 代表第 i 个个体(可行解)的变异概率; Q' 代表变异

概率调节参数。

步骤6:判断是否满足终止条件。若满足,得出初始协同控制方案并进行下一步;否则回到步骤3;

步骤7:将步骤6得到的初始协同控制方案作为蚁群算法的初始种群;

步骤8:执行蚁群算法,将初始协同控制方案进行进一步的优化,得出更为合理的协同控制方案^[16]。

具体过程如图1所示。

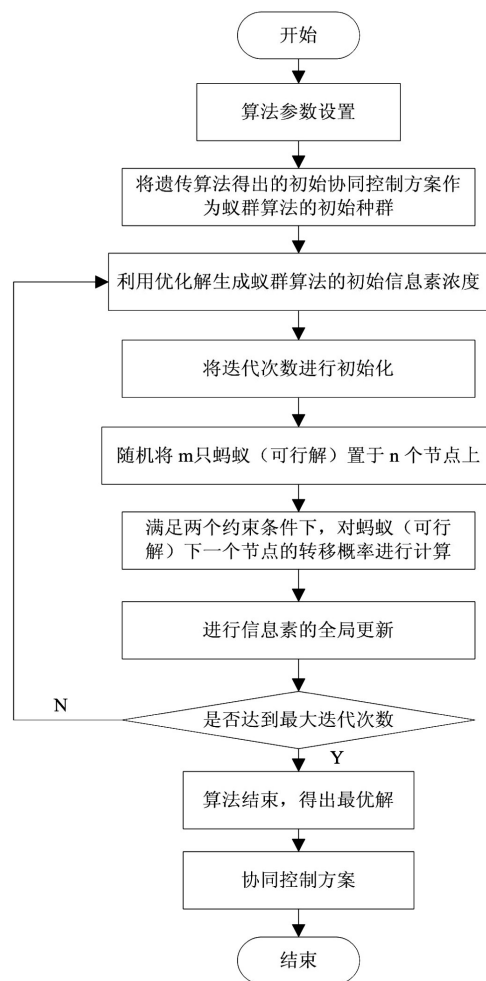


图1 蚁群算法优化协同控制方案流程

经过上述的流程,完成最终的控制目标模型求解工作,得到最优协同控制方案。

2 算例测试

2.1 算例概况

在IEEE33节点配电系统为基础接入分布式能源(风机、光伏、燃气轮机)和储能系统,分别接入点情况如下:风机两组,接入节点12和节点13;光伏一组,接入节点8;燃气轮机三组,接入节点18和节点27;储能系统两组,接入节点5和节点17。33节点新型电力系统基本参数设置情况如表1所示。

表1 33节点新型电力系统基本参数设置表

名称	参数
电压基准值	13.52 kV
基准容量	100 MVA
调度周期	24 h
光伏发电系统容量	100 kW
光伏发电下限 上限	0~20 kW
风力发电机容量	80 kW
微型燃气轮机容量	60 kW
储能系统容量	50 kW
电负荷单位调节成本	200 元/(MW·h)

2.2 电力负荷设置

设置三种分布式电源、储能设备与主网系统间的交互运行场景,每个场景的负荷功率设置情况如图2所示。

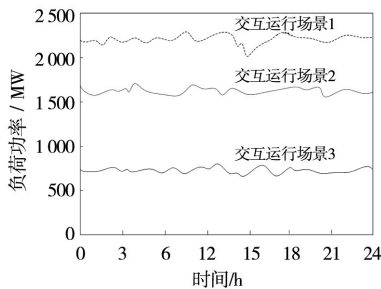


图2 负荷功率设置情况

2.3 协同控制方案

利用章节1.4研究求取控制目标模型最优解,得出最优控制方案,结果如图3所示。

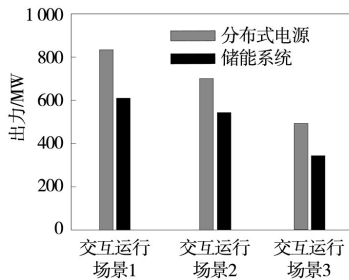


图3 协同控制方案

相同测试数据下利用 CPLex、一致性算法、改进多目标粒子群算法对目标模型(3)进行求解,得到对比协同控制方案。

2.4 协同控制效果

表2 协同控制下的电力系统负荷波动对比表/kW

方法	交互运行场景1	交互运行场景2	交互运行场景3
所研究的协同控制方法	32.32	41.21	38.52
基于CPLex的协同控制方法	87.56	93.22	100.25
基于一致性算法的协同控制方法	85.62	87.62	92.21
基于改进多目标粒子群算法的协同控制方法	125.32	112.52	98.62

运行协同控制方案,统计协同控制成本以及负荷波动

值,以此判断控制方法的控制性能,结果如图4和表2所示。

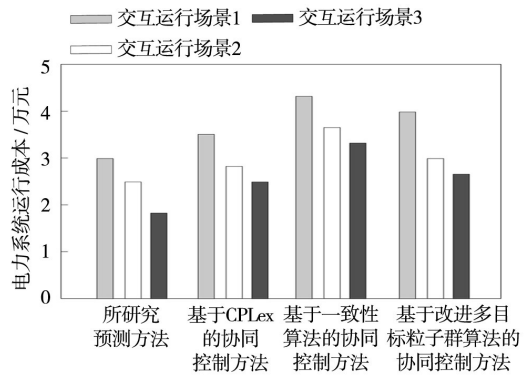


图4 协同控制的电力系统运行成本对比图

从图4和表2中可以看出,与三种对比方法求得的协同控制方案相比,所研究协同控制方法应用下,三种交互运行场景的电力系统运行成本要更低、负荷波动更小。由此说明,所研究方法的控制效果更好。

3 结束语

为缓解供电压力,降低供电成本,分布式电源和储能系统逐渐加入到传统电网当中,但是与此同时,也导致如何协同控制成为一大难题。为此,研究一种考虑源-荷互动的新型电力系统荷储优化协同控制方法。在该研究中设置了两个目标函数,组成了一个组合目标模型,利用改进遗传算法求得协同控制方案。最后通过测试,证明了所研究方法的控制效果,达到了研究目标。

参考文献:

- [1] 郝广涛,韩学山,梁军,等.传统电力系统和高比例可再生能源电力系统调度与控制方法综述[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(9):10-19.
- [2] 任景,原博,薛晨,等.面向清洁低碳的源网荷储一体化系统调度运行研究展望[J].环境工程,2021,39(11):211.
- [3] 张林垚,黄东明,王彦铭,等.基于模糊与一致性复合智能算法的“源-网-荷-储”协同控制策略研究[J].电气传动,2021,51(17):44-51.
- [4] 赵壮,张宏立,王聪.区域能源互联网的“源-网-荷-储”运行优化研究[J].可再生能源,2022,40(2):238-246.
- [5] 边晓燕,孙明琦,赵健,等.基于一致性算法的源-荷协同分布式优化调控策略[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1334-1347,1540.
- [6] 彭院院,周任军,方绍凤,等.含柔性电热负荷响应阈值的源-荷-储协调优化模型[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(5):30-37.
- [7] 刘梦晨,郑华,秦立军,等.基于源网荷储综合调峰资源协同方案研究[J].电测与仪表,2022,59(8):127-132.
- [8] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):167-173.
- [9] 杨冬梅,王俊,杜炜.考虑源网荷储聚合交易的区域电热综

(下转第42页)