

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0157-04

# 一种基于改进 PSO 算法的新型电力系统负荷波动柔性控制

王超

(中国石油西南油气田分公司川东北气矿,四川达州 635000)

**摘要:**由于当下电力需求的季节性、时段性等特点,导致电力需求在时间上存在差异,使得供需不匹配,造成供需矛盾。为此,柔性负荷调节成为解决供需矛盾的主要手段之一。为提高电力系统的稳定性和可靠性,研究一种基于改进 PSO 算法的新型电力系统负荷波动柔性控制方法。研究分为两个部分,前一部分将电压偏离量作为稳定性目标,将控制成本作为经济性目标,由二者构建新型电力系统负荷波动柔性控制多目标函数;后一部分利用细菌觅食优化算法改进 PSO 算法,利用改进 PSO 算法对多目标函数进行求解,得出新型电力系统负荷波动柔性控制方案。结果表明,控制前新型电力系统的负荷在[85 MW~400 MW]之间波动,用所研究方法控制后,负荷波动范围在[218 MW~258 MW]之间,二者相比,波动范围缩小,由此证明了所研究方法的控制性能佳。

**关键词:**改进 PSO 算法;新型电力系统;负荷波动;柔性控制方法;细菌觅食优化算法

**中图分类号:** TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-7241(2026)01-0157-04

## A new power system load fluctuation flexible control based on improved PSO algorithm

WANG Chao

(China Petroleum Southwest Oil and Gas Field Branch Sichuan Northeast Gas Mine, Dazhou 635000, Sichuan, China)

**Abstract:** Due to the seasonal and temporal characteristics of current electricity demand, there are differences in electricity demand over time, resulting in a mismatch between supply and demand and causing supply-demand contradictions. Therefore, flexible load regulation has become one of the main means to solve the supply-demand contradiction. To improve the stability and reliability of the power system, a new flexible control method for load fluctuations in the power system based on the improved PSO algorithm is studied. The research is divided into two parts. The first part takes voltage deviation as the stability objective and control cost as the economic objective. From the two, a new multi-objective function for flexible control of load fluctuations in power systems is constructed. The latter part uses the bacterial foraging optimization algorithm to improve the PSO algorithm, and solves the multi-objective function using the improved PSO algorithm to obtain a new flexible control scheme for power system load fluctuations. The results show that before control, the load of the new power system fluctuated between [85 MW~400 MW], and under the control of the research method, the fluctuation range of load is between [218 MW~258 MW]. Compared with the two, the fluctuation range is greatly reduced, which proves the control performance of the studied method.

**Keywords:** improving PSO algorithm; new power system; load fluctuations; flexible control method; bacterial foraging optimization algorithm

在当下由于电力需求的季节性、时段性等特点,导致电力需求在时间上存在差异,使得供需不匹配,造成供需矛盾。为此,柔性负荷调节成为解决供需矛盾的主要手段之一<sup>[1]</sup>。然而,柔性负荷具有很强的波动性。由于各种因素的影响,如天气、季节、经济和社会活动等,柔性负荷的负荷值会不断发生变化<sup>[2]</sup>。这种波动性会对电力系统的稳定性和可靠性产生影响,因此需要进行有效的管理和控制。为此,进行电力系统负荷波动柔性控制是十分必要的。

近年来,负荷波动柔性控制问题受到了广泛关注。Siyang L 等提出一种基于直接负荷控制和分时电价策略的柔性负荷最优引导机制,首先建立一种时段划分模型,

该模型基于带约束因子的移动边界技术,然后研究了可削减柔性负荷的控制策略,并采用分时电价(time-of-use pricing, TOU)策略进一步修正负荷曲线,最后提出了一种调节可转移负荷的价格型需求响应策略,实现柔性负荷控制<sup>[3]</sup>。直接负荷控制和分时电价策略的联合使用,使得控制策略变得相对复杂。这不仅增加了模型建立的难度,也提高了实施过程中的技术要求。Chauhan S D 等在自动需求响应(automatic demand response, ADR)程序下建模并实现了灵活负荷的直接负荷控制(direct load control, DLC)方案,并在实际 54 节点配电网网络上进行了测试<sup>[4]</sup>。该方法在实施直接负荷控制方案时,可能会面临利益冲突

收稿日期:2024-04-12;录用日期:2024-04-23

基金项目:四川省西南油气科研计划项目(201801-01)

作者简介:王超(1982—),男,本科,工程师,研究方向:电气工程及自动化。

引用本文:王超.一种基于改进 PSO 算法的新型电力系统负荷波动柔性控制[J].自动化技术与应用,2026,45(1):157-160.(WANG Chao. A new power system load fluctuation flexible control based on improved PSO algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(1):157-160.)

的问题。谈竹奎等通过引入柔性可控负荷来增强新型电力系统的调节能力,这种策略在上层优化层考虑温控负荷聚合商的最优功率分配,在下层协调层考虑温控负荷的分布式协调机制<sup>[5]</sup>。由于策略涉及到多个智能体的协调,如何确保各智能体之间的有效通信,以及如何协调它们之间的行动,是一个技术上的挑战。余洋等利用聚合温控负荷双线性模型,将舒适温度范围和最大温度波动范围作为约束条件,提出一种基于 Lyapunov 函数的改进模型,该模型能够降低对通信系统的要求,并快速平衡供用电之间的功率平衡<sup>[6]</sup>。Lyapunov 函数通常用于描述系统的稳定性,而在复杂的温控负荷和新能源功率系统中,如何准确地构建和求解 Lyapunov 函数是一个挑战。

电力系统负荷波动柔性控制可以在一定程度上平抑电力系统的负荷波动,降低电网的运行压力,从而有效地缓解电力供需侧的矛盾<sup>[7]</sup>。因此,研究新型的电力系统负荷波动柔性控制方法具有重要的现实意义和理论价值。为此,提出一种基于改进 PSO 算法的新型电力系统负荷波动柔性控制方法,该研究主要分为两个部分,前一部分建立新型电力系统负荷波动柔性控制目标,后一部分利用改进 PSO 算法对新型电力系统负荷波动柔性控制目标进行求解。

## 1 柔性控制方法研究

### 1.1 柔性控制目标函数建立

建立新型电力系统负荷波动柔性控制目标函数是实现有效控制的关键步骤。目标函数可以作为衡量控制策略性能的指标,帮助了解控制策略是否能够有效地实现预期的控制目标<sup>[8]</sup>。通过建立目标函数,可以将电力系统的运行和控制问题转化为一个多目标优化问题,并使用各种优化算法来求解<sup>[9]</sup>。

#### 1) 稳定性目标函数

保证电力系统的稳定运行是首要目标。通过柔性控制策略,能够有效地应对负荷波动带来的扰动,避免系统发生振荡或崩溃,确保电力供应的连续性和稳定性<sup>[10]</sup>。能够反映电力系统稳定性的性能指标,有频率偏差、电压偏离量、功率不平衡等。这些指标能够量化电力系统的稳定性状态,为后续的目标函数构建提供依据<sup>[11]</sup>。本研究选择电压偏离量作为控制目标之一,表达式为

$$\min A_1 = \sum_{t=0}^T \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{B_i(t) - \hat{B}_i(t)}{\max b_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中,

$$\max b_i = \max B_i - \min B_i \quad (2)$$

式中,  $A_1$  代表电压偏离量;  $B_i(t)$ 、 $\hat{B}_i(t)$  代表  $t$  时刻负荷节点  $i$  的测量电压、电压设定值;  $\max b_i(t)$  代表  $t$  时刻负荷节点  $i$  的电压最大允许偏差值;  $T$  代表控制时间长度;  $N$  代表负荷节点数;  $\max B_i$ 、 $\min B_i$  代表负荷节点  $i$  的电压最大值与最小值。

针对稳定性目标函数,建立的约束条件为

$$\min B_i \leq B_i(t) \leq \max B_i。$$

#### 2) 经济性目标函数

负荷波动柔性控制还需要考虑电力系统的经济性。一方面通过合理的调度和控制,能够降低发电成本、减少能源浪费,提高电力企业的经济效益;另一方面经济性目标函数中涉及电价,因此基于电价模式的电力系统负荷波动柔性控制方法是一种有效的管理方式。在这种模式下,可以通过激励用户参与需求响应,提高电力系统的稳定性和可靠性。例如,当电力供应紧张时,系统可以通过提高电价来激励用户减少用电量,同时通过需求响应技术,实现负荷的快速调整和优化。基于此,新型电力系统负荷波动柔性控制成本函数表达式为

$$\min A_2 = C_1(t) + C_2(t) \quad (3)$$

其中,

$$C_1(t) = \sum_{t=0}^T \left[ D_i(t) \cdot X(t) + \frac{E_i(t)}{L_i} \right] \Delta t \quad (4)$$

$$C_2(t) = b_1(t) + b_2(t) \quad (5)$$

式中,  $A_2$  代表负荷波动柔性控制总成本;  $C_1(t)$  代表柔性负荷调度成本;  $D_i(t)$  代表新型电力系统内部的负荷节点  $i$  在运行过程产生的功率;  $E_i(t)$  代表新型电力系统内部的负荷节点  $i$  在运行过程中,安装、运行以及维修等花费的成本;  $L_i$  代表新型电力系统内部的负荷节点  $i$  的平均使用寿命;  $\Delta t$  代表时间间隔;  $X(t)$  代表  $t$  时刻的电价;  $C_2(t)$  代表柔性负荷调度补偿成本;  $b_1(t)$  代表负荷转移后,用户得到的经济补偿费用;  $b_2(t)$  代表负荷削减后,用户得到的补偿费用。

针对稳定性目标函数,建立的约束条件为

$$\begin{cases} \min D_i \leq D_i(t) \leq \max D_i \\ 0 \leq X(t) \leq \max X \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\max D_i$ 、 $\min D_i$  代表新型电力系统内部的负荷节点  $i$  在运行过程产生的功率的极大值和极小值;  $\max X$  代表电价的极大值。

在实践中,建立新型电力系统负荷波动柔性控制目标函数需要充分考虑电力系统的实际情况和具体需求。同时,还需要不断进行实验和验证,以评估控制策略的性能和效果,并根据实际情况进行调整和改进。

### 1.2 负荷波动柔性控制方案求解

在负荷波动柔性控制中,目标函数通常涉及到多个性能指标和约束条件,因此需要采用多目标优化方法进行求解。粒子群优化算法(PSO)求解负荷波动柔性控制方案是一种有效的解决策略,PSO 算法原理简单,容易实现,粒子群中的每个粒子根据个体极值和全局极值来更新自己的速度和位置,通过迭代寻优最终得到最优解<sup>[12]</sup>。PSO 算法在求解负荷波动柔性控制方案中具有明显的优势,能够提高求解效率,得到更好的解。但是,PSO 算法也存在一些不足之处,如容易陷入局部最优解。为此,本研究中引入细菌觅食优化算法,利用细菌觅食优化算法的全局搜索能力帮助

PSO 算法跳出局部最优的陷阱。具体来说,在改进 PSO 算法中,每个解被视为一个粒子,这些粒子在解空间中通过模拟细菌的觅食行为进行搜索,即粒子的速度和位置根据细菌的趋化行为和复制行为进行更新。在局部搜索方面,改进 PSO 算法通过模拟细菌的趋化行为和复制行为来不断探索和寻找最优解,具有较强的局部搜索能力。在全局搜索方面,改进 PSO 算法通过驱散行为来避免陷入局部最优解,从而能够更好地寻找全局最优解。以下是改进 PSO 算法求解负荷波动柔性控制方案的步骤。

**步骤 1** 初始化粒子群。在细菌觅食的粒子群算法中,每个解被视为一个粒子。根据新型电力系统负荷波动柔性控制目标函数的维数和问题的规模,初始化粒子群。每个粒子的位置和速度表示一种可能的负荷波动柔性控制策略。初始粒子群记为  $P = \{p_1, p_2, p_m\}$ 。

**步骤 2** 根据上一章节构建的新型电力系统负荷波动柔性控制目标函数建立适应度函数。对于每个粒子,根据其位置计算目标函数的适应度值。适应度值用于评估粒子的优劣程度,即控制策略的有效性。

$$A(p_i) = w_1 A_1 + w_2 A_2 \quad (7)$$

式中,  $A(p_i)$  代表粒子  $p_i$  的适应度函数;  $w_1, w_2$  代表目标函数的权重。

**步骤 3** 根据每个粒子的适应度值,更新其个体极值  $G_b$  和全局极值  $G_p$ 。

**步骤 4** 更新粒子的速度和位置。即

$$Q_{k+1} = \beta Q_k + g_1 r_1 (G_b - x_k) + g_2 r_2 (G_p - x_k) \quad (8)$$

$$x_{k+1} = x_k + Q_{k+1} \quad (9)$$

式中,  $Q_{k+1}, Q_k$  代表  $k + 1$  次迭代和  $k$  次迭代时的粒子速度;  $r_1, r_2$  代表  $0 \sim 1$  之间的随机常数;  $x_{k+1}, x_k$  代表  $k + 1, k$  次迭代时的粒子位置;  $\beta$  代表惯性因子;  $k$  代表迭代次数;  $g_1, g_2$  是学习因子。

**步骤 5** 利用式(7)重新计算适应度函数值并排序。

**步骤 6** 根据细菌的趋化行为和复制行为,更新粒子的速度和位置。趋化行为是指粒子向食物丰富的区域移动,趋化行为操作如下。

$$H_i(j + 1, k, l) = H_i(j, k, l) + E_i F_j \quad (10)$$

式中,  $H_i(j + 1, k, l), H_i(j, k, l)$  表示粒子  $p_i$  的在第  $j + 1, j$  次趋向第  $k$  次复制第  $l$  次迁移操作之后所在的位置,  $E_i$  为粒子  $p_i$  的趋向步长长度,  $F_j$  为移动的一个随机前进方向。

复制行为是指粒子在遇到食物丰富的区域时进行分裂。在细菌觅食的粒子群算法中,当粒子(或细菌)的适应度值优于其个体历史最优位置时,这个粒子会进行复制操作。复制后的新粒子与原粒子具有相同的位置,但其速度被重置为零。这意味着新粒子从与原粒子相同的位置开始搜索,但没有任何先前的速度信息。通过复制操作,优秀的粒子个体的信息可以传递给新的粒子,从而保持种群的整体优化方向。同时,复制操作也增加了种群的多样性,有助于算法跳出局部最优解,向更优解的方向进化。

**步骤 7** 重复上述步骤,进行迭代寻优。在每次迭代中,粒子的速度和位置不断更新,适应度值也不断优化。

**步骤 8** 当达到终止条件时,算法停止迭代,并输出全局最优解。

**步骤 9** 对得到的全局最优解进行详细的分析和评估。检查其是否满足负荷波动柔性控制的性能要求和约束条件,并进行必要的调整和优化。

经过上述步骤,得出负荷波动柔性控制方案,运行该方案,实现负荷波动柔性控制。

## 2 测试与分析

### 2.1 算例系统

IEEE 33 系统是一个常用的电力系统仿真模型,包含 33 个节点和相应的电力传输线路。本实验将使用这个模型进行仿真实验,模拟电力系统的基本运行情况和各种操作行为,为负荷波动柔性控制的研究提供了有效的实验平台。IEEE 33 系统如图 1 所示。

该系统模型基本参数设置见表 1。

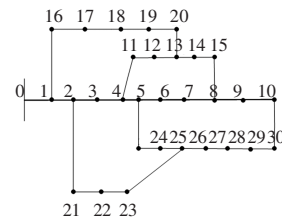


图 1 IEEE 33 电力系统模型

Fig. 1 IEEE 33-bus power system model

表 1 IEEE 33 电力系统模型基本参数表

Tab. 1 Parameters of the IEEE 33-Bus power system model

| 参数     | 参数设置         |
|--------|--------------|
| 额定容量   | 90 kW        |
| 最大出力   | 60 kW        |
| 功率上下限  | 100 ~ 500 kW |
| 节点上下限  | 20 ~ 100 V   |
| 运行时间长度 | 1 天          |
| 配电网损耗值 | 195.04 kW    |
| 有功功率   | 90 kW        |
| 无功功率   | 50 kVA       |
| 基准电压   | 15.63 kV     |

### 2.2 改进 PSO 算法收敛测试

收敛测试是评估改进 PSO 算法性能的重要步骤。通过收敛测试,可以了解算法在负荷波动柔性控制方案求解中的性能。首先,设置改进 PSO 算法初始参数,见表 2。

图 2 为改进 PSO 算法在新型电力系统负荷波动柔性控制过程中的收敛状态。

收敛曲线是通过绘制算法迭代过程中的适应度值变化来评估算法的收敛性能。从图 2 中可以看出,可以观察到改进 PSO 算法的适应度值随着迭代次数的增加而逐渐减小,并最终趋于稳定,收敛曲线没有出现反复波动,收敛速度较快;而传统 PSO 算法的收敛速度要相对较慢,且收敛曲线在迭代过程中出现了反复波动的情况,容易陷入局部最优陷阱当中。由此证明了改进 PSO 算法的性能。

表2 改进 PSO 算法初始参数表

Tab. 2 Initial parameters of the improved PSO algorithm

| 参数              | 参数设置       |
|-----------------|------------|
| 粒子群规模           | 50         |
| 惯性因子 $\beta$    | 0.5        |
| 学习因子 $g_1, g_2$ | 0.63, 1.22 |
| 随机常数 $r_1, r_2$ | 4.63, 0.78 |
| 趋向步长长度          | 2.20       |
| 最大迭代次数          | 100        |

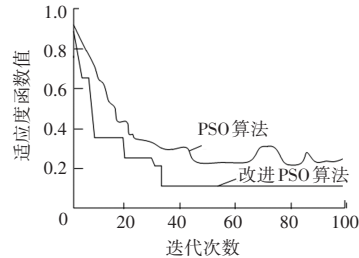


图2 收敛曲线

Fig. 2 Convergence curve

### 2.3 柔性控制方案建立

改进 PSO 算法求解下,得到为控制新型电力系统负荷波动制定的电价控制方案,如图3所示。

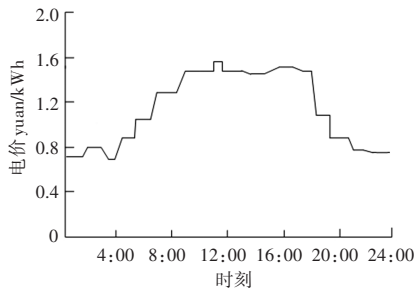


图3 负荷波动柔性控制方案

Fig. 3 Flexible control scheme for load fluctuation

从图3中可以看出,晚间电价之所以比白天便宜,是因为晚上的用电需求相对较低,而发电厂的发电量是一定的,这样不仅可以更好地利用电力资源,避免浪费,而且还可以减轻白天用电高峰期的电力负荷,保证电力系统的稳定运行。

### 2.4 控制效果对比分析

控制方案应用下,新型电力系统负荷波动前后对比以及与文献[3]~文献[6]方法的对比如图4所示。

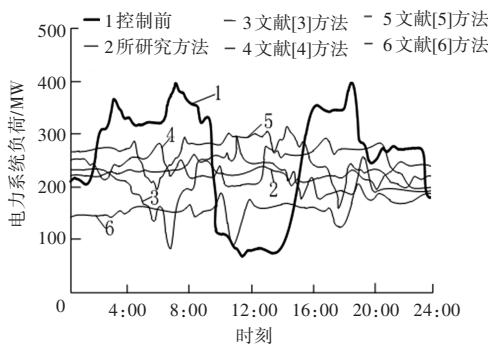


图4 新型电力系统负荷波动范围对比

Fig. 4 Load fluctuation range comparison in modern power systems

从图4中可以看出,在控制前,新型电力系统的负荷在[85 MW~400 MW]之间波动,波动范围大,在控制后,波动范围均有所下降,其中在所研究方法控制下,波动范围最小,负荷范围在[218 MW~258 MW]之间,由此证明所研究方法的控制性能最佳,说明方法的有效性。

## 3 结论

为减小负荷波动范围,提高电力系统的运行效率和稳定性,进行基于改进 PSO 算法的新型电力系统负荷波动柔性控制研究。在研究中利用细菌觅食优化算法对 PSO 算法的改进,且通过仿真实验,基于改进 PSO 算法的负荷波动柔性控制方案在收敛速度、收敛精度和稳定性方面均表现出优异的性能。相较于传统方法,该方案能够更好地适应电力系统的动态变化,有效减小负荷波动范围,提高电力系统的稳定性和可靠性,验证该策略的有效性和优越性。然而,该方案在实际应用中仍面临一些挑战和限制,即电力系统的运行是实时的,要求控制方案具有快速响应的能力。改进 PSO 算法虽然具有较好的全局搜索能力,但在实时控制方面仍需进一步优化,以适应电力系统的快速变化。为了克服这一挑战和限制,未来的研究工作可以进一步优化改进 PSO 算法的性能,提高其计算效率和实时响应能力。

## 参考文献

- [1]李兴国,任永峰,孟庆天,等.考虑可控负荷的含 CSP 和 P2G 的综合能源系统优化调度[J].太阳能学报,2023,44(12):552-559.
- [2]朱霄珣,刘占田,薛劲飞,等.计及柔性负荷参与的综合能源系统优化调度[J].太阳能学报,2023,44(9):29-38.
- [3]SIYANG L, YUAN G, HEJUN Y, et al. Optimal guidance strategy for flexible load based on hybrid direct load control and time of use[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 297-307.
- [4]CHAUHAN S D, CHAUHAN K R, MAURYA K S. Direct load control scheme for flexible loads under automated demand response program for peak demand management, loss minimization, asset management, and sustainable development[J]. Recent Advances in Electrical Electronic Engineering, 2023, 17(1): 38-53.
- [5]谈竹奎,刘斌,王扬,等.基于多智能体协调的柔性温控负荷分布式分层控制策略[J].南方电网技术,2023,17(7):45-54.
- [6]余洋,权丽,贾雨龙,等.平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制[J].电力自动化设备,2021,41(3):92-99.
- [7]颜湘武,王庆澳,卢俊达,等.计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):69-79.
- [8]黄昊,倪秋龙,李震,等.考虑柔性负荷无功调节能力的配网日前两阶段无功随机优化调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):23-33.
- [9]向航,刘继春,王杨.计及制冷负荷柔性调节的微电网两阶段优化运行模型[J].智慧电力,2023,51(7):59-66.
- [10]张斌,司大军,李文云,等.计及多类型可调度柔性负荷响应的电力系统经济调度策略[J].电工电能新技术,2023,42(4):39-47.
- [11]曹子佳,张鹏,冷俊岭,等.基于改进粒子群优化算法与小波分析的医疗设备故障信号处理模型[J].自动化技术与应用,2025,44(9):59-63,83.
- [12]彭婧,卢熙.基于 GNN-PSO 的医院人力资源管理数据需求分析研究[J].自动化技术与应用,2025,44(8):146-150.