

基于鸽群启发算法的风电场多目标优化 功率控制方法研究

郭梦旭 刘成林 刘 双 吕良君 佟英杰

(国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 风力发电作为一种清洁能源发电方式获得了大力发展, 但风力发电存在波动性、间歇性和不可控性等缺点, 因此优化风力发电场的功率控制这一问题日益受到关注。现对鸽群算法种群初始化方法进行改进, 提出一种能够实现多个优化目标的功率控制方法。该功率控制方法可使风电场在满足多种约束条件的情况下获得最优收益, 解决了现有方法控制目标单一的问题, 最后通过实验仿真验证了算法的有效性。

关键词: 功率控制; 带约束多目标优化; 鸽群启发算法

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-0797(2022)02-0009-03

DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2022.02.003

0 引言

随着全球气候变化问题日益受到世界各国的关注, 风力发电作为一种近乎零排放的发电方式进一步获得了发展^[1]。但风力发电存在波动性、间歇性和不可控性等缺点, 电网大规模接入风力发电将为电网调峰、调频带来巨大压力, 并且会严重影响系统的安全性和稳定性^[2]。针对这些问题, 国网公司要求风电场可以根据电网调度部门指令控制功率输出。因此, 如何将调度指令有效转换成风电场各风机的功率输出指令成为一个研究重点^[3]。

经典功率控制分配方法有按比例分配、相似裕度分配、平均分配和优先级分配等, 但是这些分配方法受分配原则限制, 只能实现单一优化目标^[4], 无法满足多种优化目标。例如, 风电场分几期修建, 不同时期风机性能、上网电价、风机最佳工作状态等可能各不相同, 要在使得风电场获得最大发电收益的同时, 又确保风电场机组有均衡的有功调节裕度, 现有的功率分配方式难以应对。

针对现有分配方式存在的不足, 本文基于鸽群启发算法提出了一种多目标综合优化的功率控制方法^[4]。鸽群算法在求解优化问题时具有原理简明、算法收敛速度快、易于实现和鲁棒性强等特点, 适用于求解连续值域内的优化问题^[4-5]。

该优化算法通过模拟鸽群利用地磁、太阳、地标导航归巢等模式, 可快速实现风电场功率优化控制分配的目标。多目标功率控制分配方法首先根据功率输出

目标值制订相应的优化目标, 并将两者组合生成多目标优化的控制指令, 依据风机保护约束确定风机功率可调范围, 再将当前时刻风电场各风机功率可调范围作为鸽群算法初始化鸽群个体坐标向量的定义域, 以风机输出指令为变量, 以调度下发或本地后台设定的功率输出目标值作为跟踪对象建立目标函数。

使用鸽群算法对目标函数求解得到包含多个优化目标的最优功率控制方案, 使风电场在满足多种约束条件的情况下实现多个优化目标的功率分配, 解决了现有控制分配方法控制目标单一的问题, 提高了功率分配的灵活性, 增强了系统的可靠性, 提升了风电场期望收益^[6]。

最后, 利用仿真实验, 验证了算法满足快速、精确、多目标优化的要求。

1 多目标优化风电场功率控制方法

多目标优化风电场功率控制方法大致可以分为以下5个步骤。

步骤1, 根据调度或本地后台的功率输出目标值 P_{target} 设定相应的优化目标 T_{target} , 优化目标 T_{target} 可根据优化目标数量设定维数:

$$T_{\text{target}} = \begin{bmatrix} T_{\text{target}, 1} \\ \vdots \\ T_{\text{target}, k} \\ \vdots \\ T_{\text{target}, m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{target}, k}$ 代表第 k 个优化目标; m 表示优化目标总数。

将功率输出目标值 P_{target} 和优化目标 T_{target} 组合生成多目标优化的控制指令 v :

$$v = \begin{bmatrix} P_{\text{target}} \\ T_{\text{target}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

步骤2, 根据各风机当前保护约束, 确定各风机可调功率范围 $u_{\text{low}} \leq u \leq u_{\text{up}}$ 。风机可调功率保护约束包括输出功率越限保护、功率调节速率保护和通信状态约束。目标函数中各风机输出指令 u 和风机可调功率的上限 u_{up} 、下限 u_{low} 向量为:

$$\begin{aligned} u &= (u_1 \cdots u_i \cdots u_n)^T \\ u_{\text{low}} &= (u_{1,\text{low}} \cdots u_{i,\text{low}} \cdots u_{n,\text{low}})^T \\ u_{\text{up}} &= (u_{1,\text{up}} \cdots u_{i,\text{up}} \cdots u_{n,\text{up}})^T \end{aligned} \quad (3)$$

步骤3, 根据风机可控状态和优化目标, 设定风机控制效率矩阵 B , 表示如下:

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,i} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & \cdots & b_{2,i} & \cdots & b_{2,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, 第一行中的元素 $b_{1,i}$ 对应于第 i 台风机对功率输出目标值 P_{target} 的控制效率, 若风机可控则设为1, 风机不可控则设为0; 第二行中的元素 $b_{2,i}$ 表示第 i 台风机对于设定的优化目标 T_{target} 的优化效率, 具体值依据优化目标设定; n 为风机总个数。

控制效率矩阵 B 中对应各风机优化目标的效率 $b_{2,i}$ 是对应于 m 个优化目标的 m 维列向量:

$$b_{2,i} = \begin{bmatrix} b_{2,1,i} \\ \vdots \\ b_{2,k,i} \\ \vdots \\ b_{2,m,i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $b_{2,k,i}$ 代表第 i 台风机对于第 k 个优化目标 $T_{\text{target},k}$ 的优化效率。

步骤4, 由控制指令 v 、控制效率矩阵 B 和风机功率输出指令 u , 可建立一个考虑风机约束条件并包含多个优化目标的目标函数, 求解目标函数后可获取各风机功率输出指令 u , 目标函数 J 如下:

$$J = \min_{u_{\text{low}} \leq u \leq u_{\text{up}}} \|v - Bu\| = \min_{u_{\text{low}} \leq u \leq u_{\text{up}}} \left\| \begin{bmatrix} P_{\text{target}} \\ T_{\text{target}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,i} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & \cdots & b_{2,i} & \cdots & b_{2,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \right\| =$$

$$\min_{u_{\text{low}} \leq u \leq u_{\text{up}}} \left\| \begin{bmatrix} P_{\text{target}} \\ T_{\text{target},1} \\ \vdots \\ T_{\text{target},k} \\ \vdots \\ T_{\text{target},m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,i} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1,1} & \cdots & b_{2,1,i} & \cdots & b_{2,1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{2,k,1} & \cdots & b_{2,k,i} & \cdots & b_{2,k,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{2,m,1} & \cdots & b_{2,m,i} & \cdots & b_{2,m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \right\| \quad (6)$$

步骤5, 利用鸽群启发算法求解目标函数后得到各风机功率输出指令 u 。

2 鸽群启发算法求解目标函数步骤

鸽群算法通过模拟自然界中鸽子利用地球磁场、太阳位置和地标作为导航指示物搜索归巢路的行为实现群优化。算法中鸽群先以地球磁场、太阳位置为参考建立地图确定大致搜索方向, 当鸽子找到熟悉的地标后会直接飞向目的地实现快速收敛。鸽群启发算法具有原理简明、快速收敛、易于实现和鲁棒性强等特点, 适用于求解公式(6)中的优化问题。

N_p 为鸽群个体数的半数值, $\text{fit}(u_g)$ 表示第 g 只鸽子的适应度, 下面对控制分配方法的具体步骤做详细描述。

步骤a, 鸽群启发算法在各风机可调功率上限 u_{up} 和下限 u_{low} 所确定的多维空间中初始化产生 z 个鸽群个体 $u_g, g \in [1, z]$, 本文中产生初始个体时与传统鸽群算法在搜索空间随机生成个体不同, 为了避免随机生成的个体过于集中于某一点, 本文初始化时产生的任意鸽群个体相互之间距离 $\|u_g - u_i\|_2$ 需大于 \hat{v} 。

风机输出功率约束上限 u_{up} 和下限 u_{low} 所确定的多维空间是与风电场风机数量相同的 n 维空间: $\{(u_{1,\text{low}}, u_{1,\text{up}}) \cdots (u_{i,\text{low}}, u_{i,\text{up}}) \cdots (u_{n,\text{low}}, u_{n,\text{up}})\}$ 。

$u_g = (u_{g,1} \cdots u_{g,i} \cdots u_{g,n})^T$ 表示第 g 只鸽子当前位置, 算法初始化时以各台风机可调输出功率的上边界 $u_{i,\text{up}}$ 和下边界 $u_{i,\text{low}}$ 为定义域随机生成一个值作为 $u_{g,i}$ 的值, 随机生成速度向量 $V_g = (\dot{v}_{g,1} \cdots \dot{v}_{g,i} \cdots \dot{v}_{g,n})^T, \dot{v}_{g,i} \in [0, \hat{v}], \hat{v}$ 为速度上限。

步骤b, 将鸽群启发算法中的搜索个体 u_g 依次代入到目标函数 J 中计算个体适应度 $\text{fit}(u_g)$ 并进行排序, 若本次迭代中的最优个体 u_{best}^k 对应的适应度值比公告牌中记录的更优秀, 则记录本次迭代中的最优个体 u_{best}^k 和对应的适应度值 $\text{fit}(u_{\text{best}}^k)$, 更新公告牌上最优个体 u_{best} 和最优适应度 $\text{fit}(u_{\text{best}})$ 。

步骤c, 当迭代次数 $N_{\text{iter}} \leq N_{\text{nextstage}}$ 时, 鸽群按式(7)(8)

搜索移动, 鸽群中的个体以速度 V_g 按一定概率 P_f 向当前适应度最好的个体 u_{best} 聚集, 并返回步骤b:

$$\begin{cases} V_g(t) = Rand \times V_g(t-1) e^{-Rt} + Rand \times [u_{best} - u_g(t-1)], & \text{if } Rand \leq P_f, \\ V_g(t) = Rand \times V_g(t), & \text{if } Rand > P_f \end{cases} \quad (7)$$

$$u_g(t) = u_g(t-1) + V_g(t) \quad (8)$$

式中: R 为鸽群搜索时的地图因子; $Rand$ 为一个取值范围为 $[0, 1]$ 的随机数; t 为迭代次数。

步骤d, 如果迭代次数 $N_{iter} > N_{nextstage}$, 则鸽群按照适应度排序只保留最优秀的前 N_p 个个体, 并计算这些个体的中心位置, 鸽群向中心位置移动飞向目的地:

$$N_p(t) = \frac{N_p(t-1)}{2} \quad (9)$$

$$u_c = \frac{\sum u_g(t) \times \text{fit}(u_g(t))}{N_p \times \sum \text{fit}(u_g(t))} \quad (10)$$

$$u_g(t) = u_g(t-1) + Rand \times [u_c(t) - u_g(t-1)] \quad (11)$$

步骤e, 如果迭代次数 N_{iter} 或迭代误差满足迭代停止条件, 则算法搜索结束并将公告牌中最优个体 u_{best} 作为各风机功率输出指令 u , 否则转入步骤b。

功率控制算法流程图如图1所示。

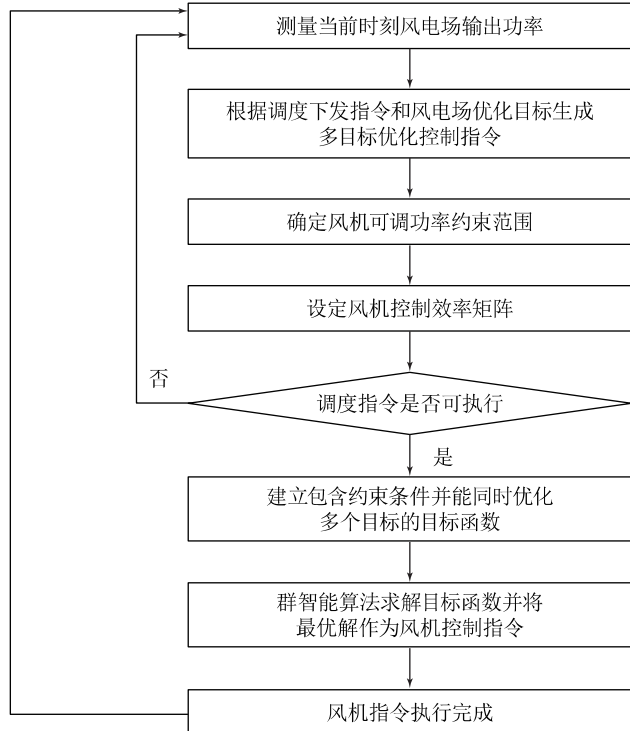


图1 功率控制算法流程图

3 仿真分析

为验证基于鸽群启发算法的带约束多目标风电场

功率控制优化方法的有效性, 利用某一风电场模型进行仿真。

该风电场分三期建设, 有两种风机, 共25台, 总装机容量75 MW, 调控时希望能获得最大发电收益, 同时同期风机有相同裕度发电。

鸽群启发算法: 鸽群个体地图因子 R 取0.2, 鸽群个体数目为256, $N_{nextstage}$ 为100, 速度上限 \hat{v} 为0.2倍风机容量, 迭代停止要求为跟踪误差小于 $Stoperror=2\%$ 或循环迭代1 500次。

仿真开始时, 设定阶跃功率控制指令由0变为30 MW。

由图2可发现本功率分配算法的分配误差快速收敛, 算法迭代搜索200次左右即收敛至0。

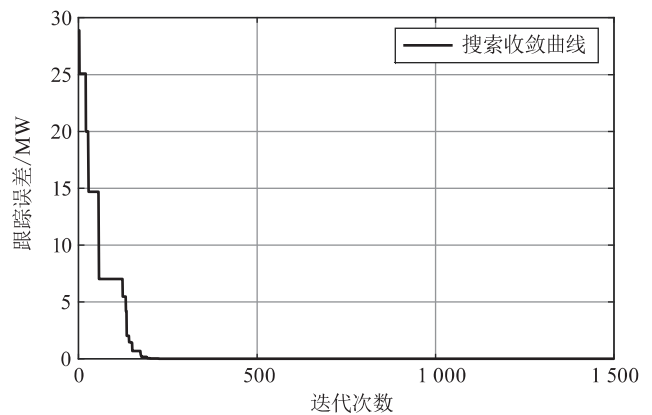


图2 分配误差收敛图

图3中对该案例重复分配10 000次, 发现绝大多数情况下满足跟踪误差迭代结束条件时算法迭代次数都在100~180次以内, 迭代次数最多时也未超过220次。上述结果证明, 本文所提功率控制分配算法可满足快速、精确、多目标优化的要求。

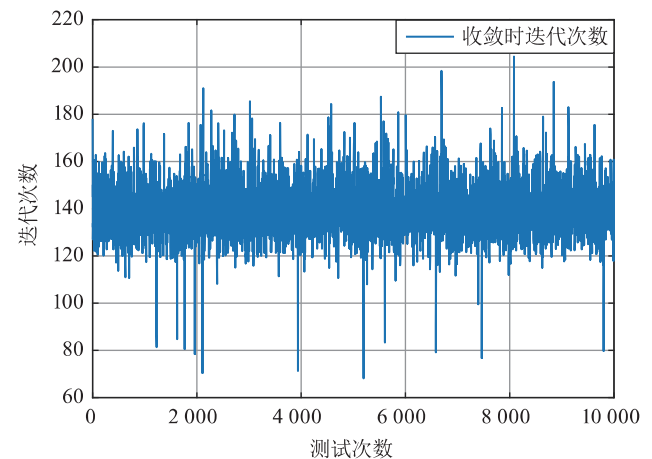


图3 算法迭代次数图 (下转第15页)

4 应用前景

随着智能化变电站建设和变电站智能运检的推进,采用智能巡检机器人和无人机对传统变电站中大量存在的模拟量仪表进行巡视拍照、图像识别、智能预警已成为当下的热门趋势。本文提出了一套变电站断路器动作次数智能管理系统,该系统能够实现对断路器动作次数表计的智能识别、智能预警,具有一定的实践意义,在将来的智能化运维中还可以横、纵向延伸覆盖到更多的表计类定期维护中。

(1) 横向方面:当前变电站内仍存在许多像断路器动作次数一样的数据,例如避雷器动作次数、变压器有载调压开关动作次数等需要人工去抄录、统计,本套管理系统可以延伸到上述表计抄录的管理中,进一步与巡检机器人数据对接,实现变电站智能运检管理扩大化。

(2) 纵向方面:通过变电站断路器动作次数智能管理系统对断路器动作次数数据的管理,建立标准数据库,在断路器足够多、时间足够长,形成大量数据的情况下,可以通过大数据分析出各类、各型断路器的使用年限、动作次数等对断路器健康程度的影响等信息,实现变电站内设备的数字化管理。

(上接第11页)

4 结语

本文基于鸽群启发算法研究了风电场功率多目标优化控制方法,该方法针对风电场功率分配问题的特性,对鸽群启发算法种群初始化方式作出了改进并将其运用到风电场功率控制分配中,实现了风电场多目标优化功率控制分配的目的,既可满足风机保护约束如输出功率越限保护、功率调节速率保护和通信状态约束等,又可改善风电场功率分配效果。该技术有助于提升企业的运维水平及生产效率,增强企业的市场竞争力。此外,从整个新能源发电产业来看,该技术能够提升风电场的可控性,有利于促进风电产业的发展,进而为降低碳排放,减少环境污染作出贡献。

[参考文献]

- [1] 张冬梅,邓博宇,靳剑英,等. 风电场功率控制方法及系统:CN201810523527.0[P]. 2018-10-09.

5 结语

变电站断路器动作次数智能管理系统对断路器动作次数实现智能识别、智能管理,并扩展到其他全数字的仪表识别,符合“机器人”的智能化趋势,大大提高了工作效率,同时还能与大数据分析结合对断路器的健康状态进行诊断,实现设备全过程管理。

[参考文献]

- [1] 何智杰,张彬,金连文. 高精度指针仪表自动读数识别方法[J]. 计算机辅助工程,2006,15(3):9-12.
[2] 文凯. 面向智能运检的变电站避雷器监视器识别系统研究[D]. 成都:西华大学,2019.

收稿日期:2021-10-14

作者简介:王剑平(1991—),男,湖南衡阳人,助理工程师,长期从事变电运行管理与维护工作。

韩玉龙(1984—),男,安徽芜湖人,高级技师,长期从事变电运行管理与维护工作。

- [2] 沈春. 多时间尺度下考虑机组变桨动作优化的风电场有功控制系统研究[D]:南京:南京理工大学,2017.
[3] 景志滨,侯佑华,郭琦,等. 一种风电有功功率控制分配方法及系统:CN201410604778.3[P]. 2015-02-04.
[4] 张杭悦. 近空间飞行器动态受限控制分配技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
[5] 段海滨,叶飞. 鸽群优化算法研究进展[J]. 北京工业大学学报,2017,43(1):1-7.
[6] 黄勇,郭梦旭,黄宝成,等. 一种带约束多目标优化风电场功率控制方法:CN201911105190.2[P]. 2020-03-27.

收稿日期:2021-10-11

作者简介:郭梦旭(1988—),男,江苏人,工程师,从事新能源发电、微网控制研究工作。