

基于萤火虫算法的主动配电网优化调度

吴忠强, 赵立儒

(燕山大学 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:主动配电网为高渗透率分布式可再生能源接入提供了有效途径。针对风能等可再生能源所固有的间歇性、波动性与随机性引起的功率波动问题,在配电网中引入储能系统作为可控负荷,建立包含风能与储能系统的主动配电网调度模型,该模型以储能系统的出力为变量;分别以平滑混合毛功率和混合净功率为目标,有效避免可再生能源接入对配电网造成的冲击。提出改进萤火虫算法求解主动配电网优化调度问题。仿真算例验证了所提模型与算法的有效性。

关键词:主动配电网;风能;储能;调度;萤火虫算法;优化

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.024

0 引言

能源作为社会发展的重要推动力,其需求不断增加,然而作为能源主要组成的化石能源也是污染环境和制约经济发展的主要原因。为缓解日益增长的能源需求与环境保护、经济发展之间的矛盾,可再生清洁能源尤其是风能越来越多地被引入电力系统中。在配电网中直接引入高渗透率的分布式电源导致传统的无源配电网变为有源配电网,单向潮流变为双向潮流,引起电压升高、网损增多等问题^[1-2]。为应对这些新的问题,主动配电网 ADN (Active Distribution Network) 作为有效消纳分布式能源的重要方式,越来越受到人们的关注^[3-4]。ADN 总体可以分为 2 种:一种是分布式电源输出的功率小于负荷的需求,命名为弱主动配电网 WADN (Weak ADN);另一种是分布式电源输出的功率大于负荷的需求,命名为强主动配电网 SADN (Strong ADN)。WADN 需要从输电网购电以满足自身负荷的需求,而 SADN 在满足自身负荷后有余力向电网输出功率。随着可再生清洁能源的大力发展,配电网中大量引进其发电设备,适合建立可再生能源发电系统的 ADN 一般会经过 WADN 过渡到 SADN。ADN 中可再生能源发电系统输出的不稳定功率,对 ADN 自身负荷和输电网有严重的影响。为平滑可再生能源的输出功率,储能系统 ESS (Energy Storage System) 被引入 ADN 中作为可控负荷。ADN 稳定性的影响变量为可再生能源与 ESS 的混合毛出力 HGO (Hybrid Gross Output),输电网稳定性的影响变量为可再生能源与 ESS 的 HGO 减去 ADN 自身负荷后的混合净出力 HNO (Hybrid Net Output)。当 ADN 内的负荷对电能要求较高时,采用平滑 HGO 为目标;当 ADN

内的负荷对电能要求较低时,采用平滑 HNO 为目标。

目前,针对配电网优化调度问题,所提算法基本划分为确定性优化算法与随机优化算法 2 类。确定性优化算法发展较早,相对比较成熟,但其应用条件较严格,难以应对大规模优化问题;随机优化算法,尤其是启发式优化算法,因较直观且能有效解决复杂优化问题而备受关注,发展迅速。进化粒子群优化 EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization) 算法^[5]用于解决市场竞争体制下的发电与储能调度问题,但存在早熟问题;和声搜索算法 HSA (Harmony Search Algorithm)、蛙跳算法 SFLA (Shuffled Frog Leaping Algorithm) 和帝国竞争算法 ICA (Imperialist Competitive Algorithm)^[6-7]应用于求解配电网重构这一复杂组合优化问题,通过优化选择开关与联络开关的组合,实现减小节点电压偏差的目的,但存在算法复杂、计算量大的问题;人工蜂群算法 ABCA (Artificial Bee Colony Algorithm)^[8]应用于优化分布式电源的装机容量、位置以及功率角,目标为减少系统的有功损耗,但其求解精度不高;布谷鸟算法 CSA (Cuckoo Search Algorithm)^[9]应用于非线性经济调度问题,解决考虑阀点效应、复合能源、死区以及旋转备用的配电网经济调度问题,也存在精度不高的问题。

萤火虫算法 FA (Firefly Algorithm)^[10]由于概念简明、流程清晰、参数少以及群进化的特性,被迅速应用于优化问题中。FA 是模拟萤火虫发光的生物学特性而表现出来的社会性行为而设计的随机优化算法,是一种随机的非线性全局优化算法,其计算量随着待优化问题的复杂程度增加而增加。在 FA 中存在 2 个关键的要素,即亮度和吸引度。亮度反映了萤火虫位置的优劣并决定其移动方向,亮度大的萤火虫可以吸引亮度小的萤火虫向自己移动,同时也影响着吸引度,亮度越大吸引度越大;吸引度决定萤火虫移动的距离。通过每个个体亮度和吸引度的

收稿日期:2018-06-28;修回日期:2018-12-23

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2016203006)

Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province(F2016203006)

不断更新,所有个体最终聚集到最亮萤火虫的位置上,从而实现目标优化的目的。另外,萤光在传输的过程中会被传播介质吸收一部分,所以吸引度的大小还与介质吸收因子相关。文献[11]采用自适应 FA 成功解决了配电网经济调度问题,该文献的侧重点在于旋转备用的建模与 FA 自适应性的改进,但未考虑蓄电池等储能装置的影响。

本文将风能、ESS、周期性变换的负荷规划到 ADN 的调度优化中,分别建立其数学模型,并分别以平滑风能与 ESS 的 HGO 和 HNO 为目标函数,采用改进的 FA 对该问题进行求解,结果表明该算法简单,求解精度高。

1 ADN 建模

1.1 风能模型

风能作为重要的可再生能源,在电力系统中大量引入,其出力具有间歇性与随机性。风速采用 Weibull 分布函数表示,其有功出力为风速的多项式函数:

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & w < w_{in}, w > w_{out} \\ \frac{w^3 - w_{in}^3}{w_r^3 - w_{in}^3} P_r & w_{in} < w < w_r \\ P_r & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_w(t)$ 与 P_r 分别为风电场的实际有功出力与额定有功出力,单位为 MW; w 、 w_r 、 w_{in} 和 w_{out} 分别为实际风速、额定风速、切入风速与切出风速,单位为 m/s。

装机容量约束:

$$0 \leq P_w(t) \leq \eta P_1 \quad (2)$$

其中, η 和 P_1 (单位为 MW) 分别为风电装机容量的穿透功率系数和总的额定负荷值。

1.2 ESS 建模

ESS 作为风机 WG (Wind Generator) 输出功率平滑设备,能够在 WG 高输出功率时充电吸收电能,低输出功率时放电释放电能,兼具负荷与电源的双重特性。ESS 的合理调度能够实现输出功率削峰填谷、抑制电压波动的作用^[12]。其数学模型如下:

$$P_{ess}(t) = \Delta P_{ch}(t) - \nabla P_{dis}(t) \quad t = 1, 2, \dots, 24 \text{ h} \quad (3)$$

其中, $P_{ess}(t)$ 为 t 时段内 ESS 的功率,作为可控负荷是系统的可控变量,单位为 MW; $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 分别为 t 时段内 ESS 的充电功率和放电功率,单位为 MW; Δ 和 ∇ 分别为 ESS 充、放电指示参数,目的是防止 ESS 同时处于充、放电的状态, $\Delta + \nabla = 1$, 且 Δ 、 ∇ 的取值只能为 0 或 1。

$$E(t+1) = E(t) + P_{ess}(t) \quad t = 1, 2, \dots, 24 \text{ h} \quad (4)$$

其中, $E(t)$ 为 t 时段结束时刻 ESS 的电量,单位

为 MW。

容量约束:

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (5)$$

其中, $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为 ESS 的最小、最大电量,单位为 MW。

充、放电功率爬坡约束:

$$P_{ch}^{\min} \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch}^{\max} \quad (6)$$

$$P_{dis}^{\min} \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{\max} \quad (7)$$

其中, $P_{ch}^{\min}$ 和 $P_{ch}^{\max}$ 分别为充电功率的最小和最大值, $P_{dis}^{\min}$ 和 $P_{dis}^{\max}$ 分别为放电功率的最小和最大值,单位为 MW。

1.3 目标函数

为计算 HGO 和 HNO, 首先计算前一周期的毛均值出力和净均值出力, 分别记为 P_G 与 P_N 。

$$P_G = \frac{1}{h} \sum_{t=1}^h (P_w(t) + P_{ess}(t)) \quad (8)$$

其中, $h = 24 \text{ h}$, 为一个周期的时间。

$$P_N = \frac{1}{h} \sum_{t=1}^h (P_w(t) + P_{ess}(t) - P_L(t)) \quad (9)$$

其中, $P_L(t)$ 为 t 时段内总有功负荷, 单位为 MW。

ADN 稳定性的影响变量为可再生能源与 ESS 的 HGO, 输电网稳定性的影响变量为可再生能源与 ESS 的 HGO 减去 ADN 自身负荷之后的 HNO。当 ADN 内的负荷对于电能要求较高时, 采用平滑 HGO 为目标, 以提高 ADN 的稳定性; 当 ADN 内的负荷对于电能要求较低时, 采用平滑 HNO 为目标, 以提高输电网的稳定性。ADN 调度分别采用最小化每个周期内 HGO 和 HNO 的方差为目标函数。

以最小化 HGO 方差为目标函数:

$$\min E_{HGO} = \sum_{t=1+h}^{2h} (P_w(t) + P_{ess}(t) - P_G)^2 \quad (10)$$

其中, E_{HGO} 为 HGO 方差。

以最小化 HNO 方差为目标函数:

$$\min E_{HNO} = \sum_{t=1+h}^{2h} (P_w(t) + P_{ess}(t) - P_N)^2 \quad (11)$$

其中, E_{HNO} 为 HNO 方差。

功率平衡约束为有功平衡:

$$P_w(t) + P_{ess}(t) \pm P_{TR}(t) = P_L(t) \quad (12)$$

其中, $P_w(t) = \sum_{m=1}^{n_w} P_w^m(t)$, n_w 为 WG 数目, $P_w^m(t)$ 为 t 时

段内第 m 台 WG 出力; $P_{ess}(t) = \sum_{k=1}^{n_{ess}} P_{ess}^k(t)$, n_{ess} 为 ESS 数目, $P_{ess}^k(t)$ 为 t 时段内第 k 个 ESS 的出力; $P_{TR}(t)$ 为向输电网购买或出售的功率。

2 FA 在 ADN 调度中的应用

本文提出的 ADN 调度属于非线性且包含多约束的非凸优化问题,用传统优化算法求解困难。智能优化算法包括遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)算法和布谷鸟算法等,都在 ADN 调度中取得很好的效果,但也有各自的不足。本文采用 FA 优化算法进行 ADN 调度。FA 优化算法是一种新的群体智能算法,概念简单,设置参数少,易于实现,具有较高的寻优精度和较快的收敛速度等优点^[13-17],非常适用于求解本文提出的模型。

结合 ADN 调度问题,进行 FA 编码,将可控变量 ESS 在整个调度周期内的出力组合编码为萤火虫,以平滑 E_{HGO} 或 E_{HNO} 为目标函数值,赋予每个萤火虫发光亮度。亮度使得萤火虫相互吸引并向亮度大的萤火虫所在位置移动,亮度最大的个体随机小幅度移动,移动过程即寻优过程。以平滑 E_{HGO} 或 E_{HNO} 为目标函数确定各萤火虫的亮度如下:

$$I(\mathbf{x}_i) = 1/E_{\text{HGO}} \text{ 或 } 1/E_{\text{HNO}} \quad (13)$$

其中, $I(\mathbf{x}_i)$ 为第 i 个萤火虫的亮度, $\mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ 为第 i 个萤火虫的位置, d 为问题的维数; E_{HGO} 为第 i 个萤火虫的 HGO 方差; E_{HNO} 为第 i 个萤火虫的 HNO 方差。

FA 的核心是通过不断更新萤火虫的位置使其靠近亮度更大的个体的过程,亮度与位置更新公式在算法中显得尤为重要。

萤火虫位置更新公式如下:

$$\mathbf{x}_j(k+1) = \mathbf{x}_j(k) + \alpha_{ij}(\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}_j(k)) + \boldsymbol{\beta} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{x}_i(k)$ 为萤火虫 i 在 k 次迭代后的位置; α_{ij} 为萤火虫 i 对萤火虫 j 的吸引力; $\boldsymbol{\beta}$ 为萤火虫 j 的随机移动量。

α_{ij} 的计算公式如下:

$$\alpha_{ij} = (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) e^{-\lambda r_{ij}^2} \quad (15)$$

其中, λ 为光吸收系数; r_{ij} 为萤火虫 i 与萤火虫 j 之间的笛卡尔距离; $\alpha_{\max}$ 、 $\alpha_{\min}$ 分别为萤火虫对其距离 $r_{ij} = 0$ 处的最大、最小吸引度。

随机项 $\boldsymbol{\beta}$ 计算公式如下:

$$\boldsymbol{\beta} = \varepsilon \cdot \text{rand}(1, d) (b_u - b_d) \quad (16)$$

其中, ε 为随机移动量步长控制参数; $\text{rand}(1, d)$ 表示维数为 d 的行向量; b_u 和 b_d 分别为萤火虫飞行上限和下限。

针对 ADN 调度的特性,需对 FA 进行改进,使其能够有效地实现解空间内的寻优。

(1) 随机项的改进。

由于经典 FA 的位置更新公式中第三项 $\boldsymbol{\beta}$ 的取值为较小的随机数,在 ADN 调度问题中,为了满足 ESS 的电量约束,需要对随机项进行分段操作,以达

到 ESS 要求的额定电量。具体方法为:引入充放电功率权重系数 c_{temp} ,计算在时间段 $[x, y]$ 内的充电比例或放电比例,并根据充放电比例与总的充放电量计算充放电功率 P_{ch} 、 P_{dis} 及 ESS 电量,代替式(16)中的 $b_u - b_d$ 项。改进伪码如下:

- a. 开始循环,从 1 到最大种群数 s_p ;
 - b. 检测当前时刻,在时间段 $[x, y]$ 随机初始化每个个体的充放电功率权重系数 c_{temp} ;
 - c. 计算每个个体在时间段 $[x, y]$ 内的充放电比例值之和 h_e ;
 - d. 使用权重系数 c_{temp} 计算每个个体在时间段 $[x, y]$ 内的充电比例或放电比例,并根据充放电比例与总的充放电量计算充放电功率 P_{ch} 、 P_{dis} ;
 - e. 计算每个个体在时间段 $[x, y]$ 内的 ESS 电量代替式(16)中的 $b_u - b_d$ 项;
 - f. 结束循环。
- (2) 精英保留。

为了防止每代种群中的最优个体丢失,改进 FA 借用遗传算法中精英保留策略,将每代中的最优个体存储到精英解 C_{elite} 中,在种群更新后再代入种群中随机替换一个萤火虫个体,确保最优个体不会丢失。

ADN 调度的 FA 伪码如下:

- a. FA 参数初始化,设置萤火虫种群数 s_p 、最大迭代次数、飞行范围 $[b_d, b_u]$ 及算法参数 $\alpha_{\max}$ 、 $\alpha_{\min}$ 、 λ 、 ε ;
- b. 在满足 ESS 约束、功率约束的条件下,初始化萤火虫位置;
- c. 根据目标函数初始化种群对应的亮度 I ;
- d. 保存使 I 最大的精英解 C_{elite} ;
- e. 比较 I 后,根据位置更新公式更新萤火虫位置,迭代次数加 1;
- f. 将 C_{elite} 放到种群中代替其中一个个体;
- g. 根据目标函数计算得到种群对应的亮度 I ;
- h. 检验是否达到最大迭代次数,若是,则结束,否则跳转到步骤 d。

3 算例分析

本文采用的算例包含 10 台 2 MW 的 WG、5 台 1.5 MW 的 ESS,一个周期内的负荷总和为 141.64 MW·h,每个时段的满负荷功率为 10 MW。WG 的参数取 $w_{\text{out}} = 2.5 \text{ m/s}$ 、 $w_r = 12 \text{ m/s}$ 、 $w_{\text{in}} = 25 \text{ m/s}$ 、 $\eta = 10\%$;ESS 的装机容量为 $E_{\text{max}} = 50 \text{ MW}$,为保证 ESS 寿命允许的最低电量为 $E_{\text{min}} = 10 \text{ MW}$,本文中 ESS 充电功率取负值,放电功率取正值,取 $P_{\text{ch}}^{\text{min}} = -0.2 \text{ MW}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{min}} = 0$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{max}} = 0.2 \text{ MW}$;算例中的其他参数见文献[18]。FA 的参数设置为:种群数 $s_p = 20$,最大迭代次数 $t_{\text{imax}} = 100$, $b_d = -10$, $b_u = 10$, $\alpha_{\max} = 1$, $\alpha_{\min} = 0.2$,

$\lambda = 1, \varepsilon = 0.0025$ 。

算例 1 为以最小化 HGO 为目标函数,验证 AND 的性能。WG 与 ESS 出力以及 HGO 如图 1 所示。

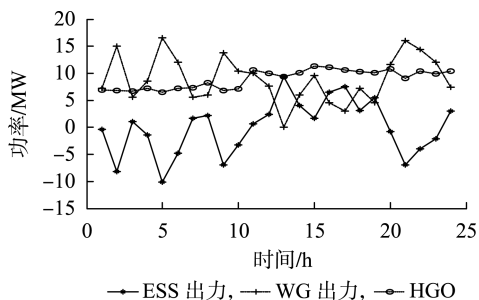


图 1 WG、ESS 出力以及 HGO 曲线

Fig.1 Curves of WG and ESS outputs and HGO

由图 1 可知, WG 出力具有随机性与波动性,最大功率偏差达到 17 MW。在 WG 和 ESS 出力不能满足负荷的需求时,需要向输电网购买电能补充缺额;在 WG 出力超过负荷的需求时,超出的电能不能被消耗掉,只能以充电的方式存储在 ESS 的电池中。由图可知:当 WG 功率达到最大值 15 MW 时,向 ESS 充电 10 MW,当 WG 功率达到最小值 0 时,ESS 放电 10 MW;由 HGO 曲线可看出,曲线较平稳没有大的波动,整个周期内 WG 与 ESS 的 HGO 能够满足 ADN 内负荷对电能的较高要求。ESS 的引入及合理调度能够平滑功率,最大化风能在 ADN 中的应用。

整个周期内 ESS 的电量变化如图 2 所示。

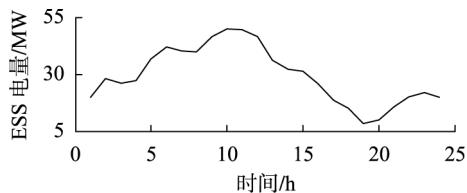


图 2 ESS 电量

Fig.2 Electric quantity of ESS

在整个周期内,ESS 根据 WG 的出力调节充放电模式,2 种模式间的切换导致 ESS 完成了一次深度的充放电过程,最大充放电 42 MW。由 ESS 的装机容量 $E_{\max} = 50$ MW 及为保证 ESS 寿命允许的最低电量 $E_{\min} = 10$ MW 可知,充分利用了 ESS 的调节功能。

在寻优迭代过程中,FA 种群的最优适应度、平均适应度与最小适应度如图 3 所示。

由图 3 可知,最大适应度在迭代周期内是单调递增的,且始终在最上方,这是由于精英保留策略能够确保每代中最优个体进入下一代种群中,避免了整个种群中最优解的丢失。种群最大适应度曲线、平均适应度曲线和最小适应度曲线类似,且距离较小,这是由 FA 中种群向最优解个体移动的特性决

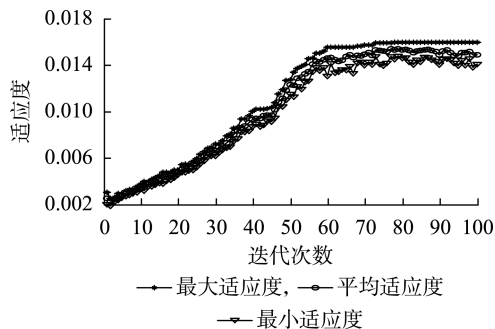


图 3 种群适应度

Fig.3 Population fitness

定的,即由适应度决定的亮度使得萤火虫相互吸引并向亮度大的萤火虫所在位置移动。

算例 2 为以最小化 HNO 为目标函数,验证输电网的性能。WG 与 ESS 出力以及 HNO 如图 4 所示。

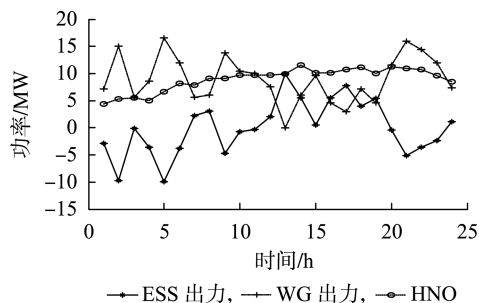


图 4 WG、ESS 出力以及 HNO 曲线

Fig.4 Curves of WG and ESS outputs and HNO

由图 4 可知, WG 出力具有随机性与波动性,最大功率偏差达到 17 MW。在 WG 和 ESS 出力不能满足负荷的需求时,需要向输电网购买电能补充缺额;在 WG 出力超过负荷的需求时,超出的电能不能被消耗掉,只能以充电的方式存储在 ESS 的电池中。由图可知:当 WG 功率达到最大值 15 MW 时,也向 ESS 充电 10 MW,当 WG 功率达到最小值 0 时,ESS 放电也为 10 MW;由 HNO 曲线可看出,曲线较平稳没有大的波动,但是其最大最小值之差大于 HGO,整个周期内 WG 与 ESS 的 HNO 能够满足输电网对电能的较高要求。

整个周期内 ESS 的电量变化如图 5 所示。

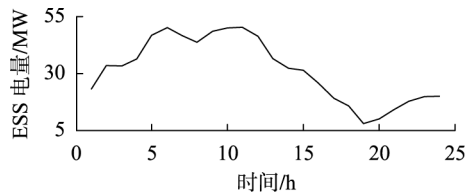


图 5 ESS 电量

Fig.5 Electric quantity of ESS

在整个周期内,ESS 根据 WG 的出力调节充放电模式,2 种模式间的切换导致 ESS 完成了一次深度的充放电过程,最大充放电 43 MW。由 ESS 的装机容量 $E_{\max} = 50$ MW 以及为保证 ESS 寿命允许的

最低电量 $E_{\min} = 10$ MW 可知,充分利用了 ESS 的调节功能。

在寻优迭代过程中,FA 种群的最优适应度、平均适应度与最小适应度如图 6 所示。

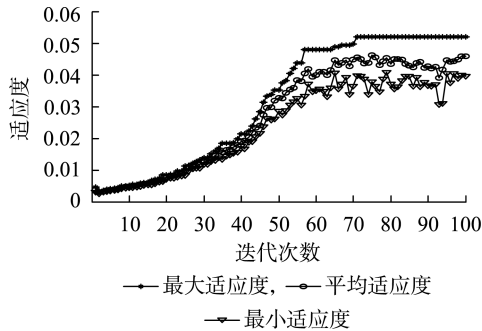


图6 种群适应度

Fig.6 Population fitness

由图 6 可知,最大适应度在迭代周期内是单调递增的,且始终在最上方,可看出精英保留策略能够确保每代中最优个体进入下一代种群中,避免了整个种群中最优解的丢失现象。种群平均适应度曲线和最小适应度曲线与最大适应度曲线的距离比 HGO 稍大,就算法而言更适用于以 HGO 为目标的优化。

为进一步分析 2 种目标下的平滑效果,对比以 E_{HGO} 为目标的 HGO 曲线和以 E_{HNO} 为目标的 HNO+ P_L 曲线,如图 7 所示。

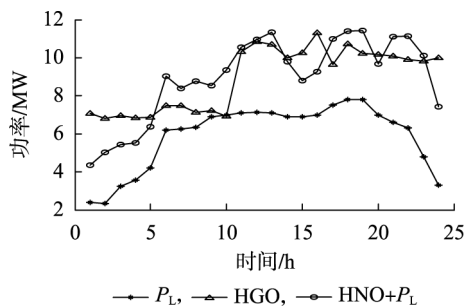


图7 HGO 与 HNO+ P_L 曲线

Fig.7 Curves of HGO and HNO+ P_L

由图 7 可知,HGO 波动较小,功率输出较平滑,适用于 ADN 内部的负荷对电源功率要求较高且输电网对电源要求较低的情况。

对比以 E_{HGO} 为目标的 HGO- P_L 曲线和以 E_{HNO} 为目标的 HNO 曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,以 E_{HNO} 为目标函数的 HNO 曲线波动较小,功率输出较平滑,适用于 ADN 内部的负荷对电源功率要求较低且输电网对电源要求较高的情况。

将 FA 运行结果与遗传算法和粒子群优化算法优化结果进行比较,进一步验证其优势。遗传算法的参数设置为:交叉概率 $p_c = 0.6$,变异概率 $p_m = 0.2$ 。粒子群优化算法的参数设置为:局部学习因子 $c_1 =$

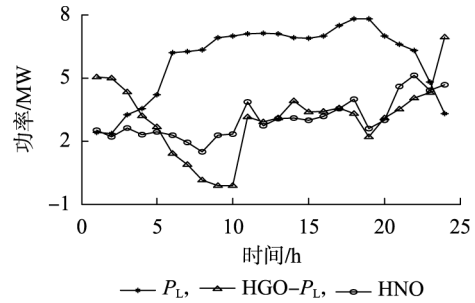


图8 HGO- P_L 与 HNO 曲线

Fig.8 Curves of HGO- P_L and HNO

2.0,全局学习因子 $c_2 = 2.0$,粒子最大速度 $V_{\max} = 0.9$,粒子最小速度 $V_{\min} = 0.4$ 。各优化算法在设定参数条件下达到的最优适应度 T_m 、均方差 T_{sd} 、迭代次数 t_{run} 如表 1 所示。

表1 不同算法结果比较

Table 1 Results comparison of different algorithms

算法	指标	T_m	T_{sd}	t_{run}
FA	HGO	0.016	3.073	72
	HNO	0.052	3.643	72
GA	HGO	0.078	4.241	81
	HNO	0.095	4.722	82
PSO	HGO	0.105	5.300	95
	HNO	0.126	5.708	98

由表 1 可知,FA 的最优适应度、均方差和迭代次数均优于遗传算法和粒子群优化算法;遗传算法优于粒子群优化算法。这表明 FA 具有较高的寻优速度和精度,适用于本文的优化问题。

4 结论

本文针对具有高渗透率分布式电源的 ADN 调度问题,建立了风电储能联合调度模型,采用改进的 FA 有效解决了以平滑 WG 与 ESS 的 HGO、HNO 为目标的调度问题,为具有间歇性、波动性的可再生能源在 ADN 中的应用提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [2] MALIK O, HAVEL P. Active demand-side management system to facilitate integration of RES in low-voltage distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 5(2): 673-681.
- [3] 熊雄, 井天军, 孙可, 等. 主动配电网下多微电网功率协调优化 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 15-21.
XIONG Xiong, JING Tianjun, SUN Ke, et al. Power coordinated optimization among multi-microgrid in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 15-21.
- [4] 凌开元, 赵乐冰, 张新松, 等. 基于双储能系统的主动配电网储能配置 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 171-176.
LING Kaiyuan, ZHAO Lebing, ZHANG Xinsong, et al. Storage allo-

- cation of active distribution network based on double-storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 171-176.
- [5] CHAMBA M S, ANO O. Economic dispatch of energy and reserve in competitive markets using meta-heuristic algorithms [J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(1): 473-478.
- [6] SRINIVASA R R, NARASIMHAM S V L, RAMALINGA R M, et al. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1080-1088.
- [7] JAZEBI S, MOGHIMI H M, NAGHIZADEH R A. Distribution network reconfiguration in the presence of harmonic loads: optimization techniques and analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1929-1937.
- [8] ABU-MOUTI F S, EL-HAWARY M E. Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2090-2101.
- [9] VO D N, SCHEGNER P, ONGSAKUL W. Cuckoo search algorithm for non-convex economic dispatch [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(6): 645-654.
- [10] GAO M L, HE X H, LUO D S, et al. Object tracking using firefly algorithm [J]. IET Computer Vision, 2013, 7(4): 227-237.
- [11] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, ROOSTA A. Reserve constrained dynamic economic dispatch: a new fast self-adaptive modified firefly algorithm [J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(4): 635-646.
- [12] HABIB S, KAMRAN M, RASHID U. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks - a review [J]. Journal of Power Sources, 2015, 277: 205-214.
- [13] 李佳, 刘天琪, 李兴源, 等. 改进粒子群-禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 71-77.
- LI Jia, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Application of improved particle swarm-tabu search algorithm in multi-objective reactive power optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 71-77.
- [14] YOUNES M, KHODJA F, KHERFANE R L. Multi-objective economic emission dispatch solution using hybrid FFA (FireFly Algorithm) and considering wind power penetration [J]. Energy, 2014, 67: 595-606.
- [15] LIANG R H, WANG J C, CHEN Y T, et al. An enhanced firefly algorithm to multi-objective optimal active/reactive power dispatch with uncertainties consideration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 1088-1097.
- [16] MARICHELAM M K, PRABAHARAN T, YANG X S. A discrete firefly algorithm for the multi-objective hybrid flowshop scheduling problems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(2): 301-305.
- [17] SINGH U, RATTAN M. Design of thinned concentric circular antenna arrays using firefly algorithm [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014, 8(12): 894-900.
- [18] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.
- WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.

作者简介:



吴忠强 (1966—), 男, 上海人, 教授, 博士, 从事风力发电系统控制研究 (E-mail: mewzq@163.com)。

Optimal dispatch of active distribution network based on firefly algorithm

WU Zhongqiang, ZHAO Liru

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Active distribution network provides an effective way for the access of distribution renewable energy with high penetration. Aiming at the power fluctuation problem caused by the inherent intermittence, fluctuation, and randomness of wind energy, ESS (Energy Storage System) is introduced into distribution network as a controllable load, and a dispatch model of distribution network with wind energy and ESS is built, which takes the ESS output as its variable. Smoothing the hybrid gross output and hybrid net output are respectively taken as the objectives to effectively avoid the impact of renewable energy access on distribution network. An improved firefly algorithm is proposed to solve the optimal dispatch problem of active distribution network. Simulation example verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: active distribution network; wind energy; energy storage; dispatch; firefly algorithm; optimization