

主动配电网中广义电源对储能系统配置的影响

赵 峰^{1,2}, 李 颖¹, 高峰阳¹, 魏立兵³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 光电控制与智能控制教育重点实验室, 兰州 730070;
3. 甘肃电力科学研究所, 兰州 730070)

摘 要: 为了更好地了解广义电源在主动配电网中对储能系统的影响,建立以广义电源、储能系统以及电动汽车(在一定条件下可以视为储能系统)等作为控制变量,主动配电网的系统网损和反映储能单元削峰填谷能力的负荷曲线均方差最小为目标函数的模型。利用层次分析法结合熵权法将多目标函数问题转化为单目标函数问题以及利用混沌萤火虫优化算法优化广义电源及储能系统有功功率输出量,并通过改进的 IEEE-33 节点系统和 ADN 实际算例验证所提模型、算法的可行性和优越性。

关键词: 主动配电网; 广义电源; 混沌萤火虫算法; 储能系统; 电动汽车

中图分类号: TM732

文献标志码: A

0 引 言

主动配电网(active distribution network, ADN)的产生对于加大可再生能源的消纳能力、提高用电互动化水平、实现配电网的灵活智能管理发挥着重要的作用,逐渐成为未来智能电网发展的重要方向^[1-2]。

广义电源(generalized power sources, GPS)是指能发出一定有功或无功功率的装置,则电容器组可视为只发出无功功率的广义电源^[3-5]。本文侧重研究控制 GPS 中的可控单元对储能系统的影响,并以 ADN 的系统网损和削峰填谷能力的作为其衡量指标。

分布式电源(distributed generation, DG)作为 GPS 中重要的组成之一,以低碳环保、安装方式灵活多变等优点得到快速发展^[6]。文献[7-12]分别考虑 DG 的不同特点,建立不同的 DG 分析模型。微电网(micro-grid, MG)作为 GPS 的另一个重要部分,研究主要集中在 MG 接入电网后的经济性优化方面^[13-17]。

在 ADN 中, GPS 与传统电源有较大区别,其主要特点在于诸如风、光等可再生能源输出功率的不确定性与难以调控性。为了确保系统的安全稳定运行,储能系统(energy storage system, ESS)成为主动配电网的重要组成部分^[18]。

ESS 的容量优化配置是 ADN 研究的重点,研究

人员已对 ESS 容量优化配置问题做了诸多研究。文献[19-20]考虑包含太阳能与风能 2 种输出完全随机的电源的条件下电池容量优化的数学模型;文献[21-22]中,侧重研究 ESS 加入系统后带来的经济效益;此外,文献[19]从削峰能力、电压质量以及功率的主动调节 3 个方面建立主动配电网储能系统的多目标优化配置模型。

电动汽车(electric vehicle, EV)接入 ADN 后,由于 EV 自身具有储能装置, EV 接入时,相当于 ADN 增加了额外的 ESS。如果 EV 内部储能装置在接入 ADN 后,能参与 ADN 优化调度,那么在一定条件下 EV 也能充当 ADN 的 ESS,成为 ADN 的优化调度对象,进而补充 ADN 原有 ESS 的容量,从而节约 ESS 的投入成本。因此,在 EV 接入 ADN 后, ADN 的 ESS 容量优化配置成为一个新的研究内容。

许多学者也对 EV 接入电网做了一系列研究。文献[23]从工程实际的角度快速地求取储能单元容量最优;文献[24]对以 EV 换电站和 ESS 电站作为储能单元分别进行建模和讨论;文献[25]是在分布式发电系统中接入 EV 后,建立 3 个目标优化函数和 EV 的模型。

在可再生资源日益繁荣的今天, GPS、ESS 可能在一个 ADN 中同时作用。这不仅增加 ADN 的运行复杂

性,而且 GPS 对 ADN 中 ESS 的作用产生影响,故用 ADN 网络损耗和削峰填谷能力来衡量 GPS 对 ESS 的程度。所以建立以 GPS、ESS 作为控制变量,系统网损最小和反映 ADN 削峰填谷能力的负荷曲线均方差最小为目标函数的模型。然后利用层次分析法结合熵权法将上述的多目标函数问题转化为单目标函数问题,接着利用混沌萤火虫优化算法优化 GPS 以及 ESS 的有功功率输出量,最后利用通过改进的 IEEE-33 节点系统和 ADN 实际算例验证所提模型、算法的可行性和优越性。

1 主动配电网日前优化调度模型

1.1 ESS 与 EV 模型

1.1.1 ESS 模型

为了便于分析,本文中假设蓄电池在整充放电过程中,蓄电池两端电压基本维持不变^[20]。蓄电池的工作状态有充电和放电 2 种状态,而蓄电池放电满足:

$$SOC_{batt}(t+1)=SOC_{batt}(t)-\Delta t \frac{P_{batt}^d}{\eta_d}, \forall t \quad (1)$$

蓄电池充电时满足:

$$SOC_{batt}(t+1)=SOC_{batt}(t)+\Delta t \frac{P_{batt}^c}{\eta_c}, \forall t \quad (2)$$

式中, $SOC_{batt}(t)$ —— t 时段的储能状态; P_{batt}^c 和 P_{batt}^d —— t 时段蓄电池的充、放电功率; η_c 和 η_d —— t 时段充、放电效率。

1.1.2 EV 模型

本文假设接入 ADN 都可调度,而且 EV 均以充满电的状态离开 ADN。行驶一天后接入电网,再充电时的初始状态为:

$$SOC_{ev}=(1-l_d/L_r) \times 100\% \quad (3)$$

式中, l_d ——电动汽车在充满电的状态下一天行驶的里程; L_r ——电动汽车在充满电状态下可行驶的最大里程。每天行驶里程 l_d 近似满足对数正态分布:

$$f(l)=\frac{1}{l\sigma_l\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\ln l-\mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right] \quad (4)$$

EV 的工作状态分为充电和放电中状态, EV 放电时满足:

$$SOC_{ev}(t+1)=SOC_{ev}(t)-\Delta t \frac{P_{ev}^d}{\eta_d}, \forall t \quad (5)$$

电池充电时满足:

$$SOC_{ev}(t+1)=SOC_{ev}(t)+\Delta t P_{ev}^c \eta_c, \forall t \quad (6)$$

式中, $SOC_{ev}(t)$ —— t 时段的储能状态; P_{ev}^c 和 P_{ev}^d —— t 时段电池的充、放电功率; η_c 和 η_d —— t 时段充、放电效率; t ——时段长度。

本文忽略 EV 内的各种复杂的连接,只简单地认为 EV 整体由各每 EV 蓄电池单元经过串并联以后形成。EV 表现出来的充放电性质是各个 EV 蓄电池的集中体现。所以, EV 放电时满足:

$$SOC_d(t+1)=\delta \times n \times (SOC_{ev}(t)-\Delta t \frac{P_{ev}^d}{\eta_d}), \forall t \quad (7)$$

电池充电时满足:

$$SOC_c(t+1)=\gamma \times n \times (SOC_{ev}(t)+\Delta t P_{ev}^c \eta_c), \forall t \quad (8)$$

式中, $SOC_d(t+1)$ 、 $SOC_c(t+1)$ —— EV 在 $t+1$ 时的放电功率、充电功率; δ 、 γ ——充放电效率,取值范围为 0.1~0.9; n ——该充电站 EV 蓄电池的块数。

1.2 目标函数

ADN 日前调度是在已知 GPS 最大出力、ESS 的最大容量、EV 的最大容量的基础上,对 GPS、ESS 有功出力进行优化控制,使得 ADN 次日全天运行系统网损和负荷曲线均方差最小。

1) 以 ADN 系统网损最小为目标函数,即:

$$\min f_1 = P_{loss} = \sum_{i=1}^T \left[\sum_{z=1}^{z_L} G_{z(i,j)} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}^2 U_{j,t}^2 \cos \theta_{ij}) \right] \quad (9)$$

式中, T ——所划分调度阶段总的阶段数,对于每个调度阶段可认为各 GPS 输出功率以及系统负荷大小不变; P_{loss} ——系统网损; z_L ——网络总支路数; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 节点 i 、 j 在时刻 t 的电压幅值; $G_{z(i,j)}$ ——以节 i 和节点 j 为首末端节点的第 z 条支路的电导; θ_{ij} ——节点 i 、 j 之间的电压相角差。

2) 利用负荷均方差评价 ESS 对 ADN 削峰填谷的作用,以 ADN 负荷曲线均方差最小为目标函数,具体计算如式(10):

$$\min f_2 = \min LS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[(LD_t + P_{sum,t}) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T LD_t \right]^2} \quad (10)$$

式中, LD_t —— t 时刻 ADN 的负荷; $P_{sum,t}$ —— t 时刻 GPS、ESS 以及 EV 总的输出功率。假定 ESS 和 EV 充电过程功率为正,放电过程功率为负。

1.3 约束条件

1) ADN 约束

ADN 优化调度策略研究问题的基本约束条件同传统配电网优化调度策略一致。首先要满足潮流方程约束,保证每个节点有功功率和无功功率平衡,如式(11)

所示;其次是配电网入口功率和配电网各节点电压上下限约束,如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_{\text{grd},t} + P_{\text{GPS},t} - P_{\text{ess},t} - P_{\text{ev},t} - P_{i,t} = \\ e_{ii} \sum_{j=1}^N (G_{ij} e_{j,t} - B_{ij} f_{j,t}) + f_{ii} \sum_{j=1}^N (G_{ij} f_{j,t} + B_{ij} e_{j,t}) \\ Q_{\text{grd},t} + Q_{\text{GPS},t} - Q_{\text{ess},t} - Q_{\text{ev},t} - Q_{i,t} = \\ f_{ii} \sum_{j=1}^N (G_{ij} e_{j,t} - B_{ij} f_{j,t}) - e_{ii} \sum_{j=1}^N (G_{ij} f_{j,t} + B_{ij} e_{j,t}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{grd},t} \leq P_{\text{grd},t,\text{max}} \\ U_{i,\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, N ——配网节点数; $P_{\text{grd},t}$ ——电网在 t 时刻的注入功率,不应超过其上限 $P_{\text{grd},\text{max}}$; $P_{i,t}$ ——负荷节点 i 在 t 时刻的负荷功率; e_{ii} , f_{ii} ——节点 i 在 t 时段电压的实部和虚部; G_{ij} , B_{ij} ——节点 i 和 j 之间的电导和电纳; Q ——无功功率,其脚标意义与有功功率脚标意义相同。

GPS 约束条件:

$$P_{\text{GPS}}^{\min} \leq P_{\text{GPS}}(t) \leq P_{\text{GPS}}^{\max}, \forall t \quad (13)$$

式中, P_{GPS}^{\min} 、 P_{GPS}^{\max} ——GPS 的最小输出功率和最大输出功率。

储能蓄电池单元约束:假设在整个充放电过程中,蓄电池两端电压基本维持不变,蓄电池的出力还要满足下列约束:

$$SOC_{\text{batt}}^{\min}(t) \leq SOC_{\text{batt}}(t) \leq ESS, \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq P_{\text{batt}}^d(t) \leq P_{\text{batt}}^{\text{dmax}}, \forall t \quad (15)$$

$$0 \leq P_{\text{batt}}^c(t) \leq P_{\text{batt}}^{\text{cmax}}, \forall t \quad (16)$$

式中, $P_{\text{batt}}^{\text{dmax}}$ 、 $P_{\text{batt}}^{\text{cmax}}$ 、 SOC_{batt}^{\min} 、 ESS ——蓄电池最大放电功率、蓄电池最大充电功率、蓄电池最小荷电状态、蓄电池最大荷电状态即蓄电池容量。

2) EV 约束条件

假设在整个充放电过程中, EV 蓄电池两端电压基本维持不变, EV 蓄电池的出力还需满足下列约束:

$$SOC_{\text{ev}}^{\min}(t) \leq SOC_{\text{ev}}(t) \leq SOC_{\text{ev}}^{\max}, \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{\text{ev}}^d(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{dmax}}, \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq P_{\text{ev}}^c(t) \leq P_{\text{ev}}^{\text{cmax}}, \forall t \quad (19)$$

式中, $P_{\text{ev}}^{\text{dmax}}$ 、 $P_{\text{ev}}^{\text{cmax}}$ 、 SOC_{ev}^{\min} 、 SOC_{ev}^{\max} ——EV 最大放电功率、EV 最大充电功率、EV 最小荷电状态、EV 最大荷电状态即蓄电池容量。

EV 的约束条件为:

$$SOC_{\text{ev}}^{\min}(t) \leq SOC_{\text{ev}}(t) \leq SOC_{\text{ev}}^{\max}, \forall t \quad (20)$$

式中, SOC_{ev}^{\min} 、 SOC_{ev}^{\max} ——EV 的最小荷电状态和最大荷电状态即充电站的容量。

1.4 将多目标函数转化为单目标函数

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种根据经验的主观定权方法,熵权法(entropy method, EM)常用以确定指标的客观权重,本文利用 AHP 并结合 EM,综合主观性与客观性,提出一种综合指标确定方法:

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{\text{AHP}-i} + \lambda_{\text{EM}-i}}{\sum (\lambda_{\text{AHP}-i} + \lambda_{\text{EM}-i})} \quad (21)$$

式中, λ_i 、 $\lambda_{\text{AHP}-i}$ 、 $\lambda_{\text{EM}-i}$ ——第 i 个子目标所占综合目标函数的综合权重、AHP 权重、EM 权重。根据上述方法可确定各子目标所占权重,同时对子目标函数的量纲进行统一,可将目标函数表达式归纳成:

$$F = \lambda_1 \frac{f_1}{f_{1\text{max}}} + \lambda_2 \frac{f_2}{f_{2\text{max}}} \quad (22)$$

式中, λ_1 、 λ_2 ——各子目标的权重系数; $f_{1\text{max}}$ 、 $f_{2\text{max}}$ ——子目标函数中的最大值。

2 利用 CFA 算法求解

萤火虫算法(firefly algorithm, FA)是剑桥学者 Yang 于 2008 年提出的一种新颖的进化算法, FA 是模拟自然界中萤火虫的发光行为构造出随机优化算法^[26]。基本 FA 如式(23)所示:

$$\begin{cases} R_j = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \\ \beta(\gamma) = \beta_0 \times \exp(-\gamma R_j) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + \beta_0 \times \exp(-\gamma R_j) \times \\ (X_i(t) - X_i(t)) + \alpha \times (r_1 - 0.5) \times X_M \\ X_{bi}(t+1) = X_{bi}(t) + \alpha \times (r_1 - 0.5) \times X_M \end{cases} \quad (23)$$

式中, X_i ——第 i 个萤火虫个体的位置向量,同理 $X_i(t)$ 是第 i 个萤火虫个体在第 t 代时的位置向量; R_j ——两萤火虫之间的距离; β ——萤火虫的吸引度,是关于距离的单调递减函数; β_0 ——最大吸引度,表示在 $R_j = 0$ 时的吸引度, $\beta_0 \in [0, 1]$; α ——随机步长, $\alpha \in [0, 1]$; γ ——荧光吸收率, $\gamma \in [0, 1]$; $r_1 \sim U(0, 1)$ 。若 $r_1 < 0.5$, 则 X_M 取值 $X_{\text{max}} - X_i(t)$, 否则 $X_i(t) - X_{\text{min}}$ 。 X_{max} 代表目标函数搜索空间的上限, X_{min} 代表目标函数搜索空间的下限。

但萤火虫算法本身存在对于初始分布的依赖性、后期收敛速度慢、易于停滞、早熟和求解精度低等缺陷。

混沌优化算法具有全局渐进收敛、易跳出局部极小点和收敛速度快等特点,非常适合与进化算法相结合^[27]。受此启发,本文提出一种混沌萤火虫算法(chaos firefly

algorithm, CFA)。对 FA 进行两方面的改进:一方面是利用 Tent 映射如式(24)产生混沌序列初始化萤火虫,产生 m 个萤火虫,再将这 m 个萤火虫对应到种群的空间^[28];另一方面在迭代的过程中算法每迭代到 N_p 则根据当前最优解进行局部搜索,即根据式(25)的立方映射混沌模型,生成 ps 个新个体,采用随机方式替换掉原种群中相应数目的个体^[29]。

$$X_i(t) = \begin{cases} 2X_i(t), & 0 \leq X_i(t) \leq 1/2 \\ 2(1 - X_i(t)), & 1/2 \leq X_i(t) \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} X_i(t) = G_{\text{best}} \times \text{rand}(ps) \\ X_i(t+1) = 4X_i^3(t) - 3X_i(t) \end{cases} \quad (25)$$

式中, $X_i(t+1)$ ——新生成的萤火虫 i 的位置,第 1 个粒子位置以随机数形式产生, ps ——产生的新个体的数目。

具体 CFA 流程图如图 1 所示。模型中的各个参量与混沌萤火虫算法各参量之间的对应关系如下文。

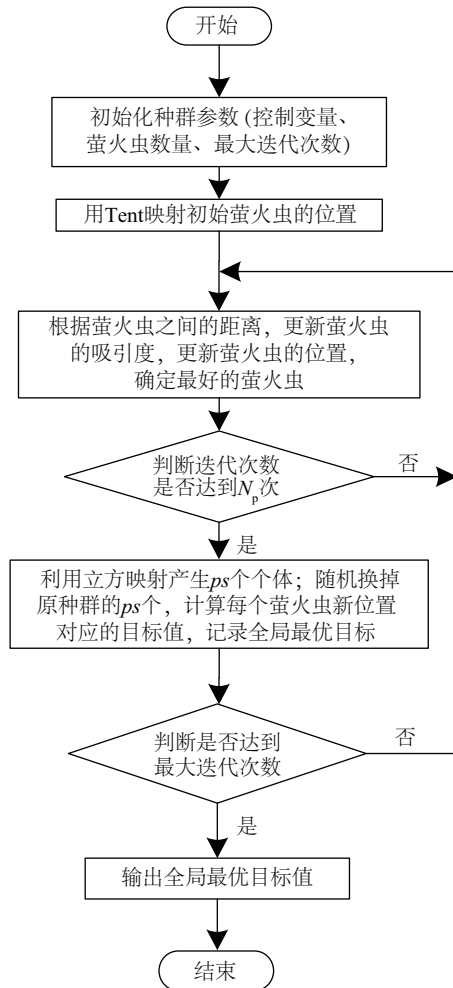


图1 CFA 流程图

Fig. 1 Flow chart of CFA algorithm

模型中 GPS、ESS、EV 有功输出作为混沌萤火虫的

位置向量,其输出上下限作为混沌萤火虫位置向量的限定值,模型中的目标函数系统网损和负荷曲线均方差作为混沌萤火虫的适应度值。

利用混沌萤火虫算法求解最小适应度的过程就是找到系统网损和负荷曲线均方差最小的过程,而此时得出的萤火虫位置向量就是 GPS、ESS 以及 EV 有功功率的输出量。

3 算例验证

3.1 算例1

基于 Matlab 软件平台,以 IEEE-33 节点系统为例进行仿真分析,研究 ADN 中 GPS、ESS 以及 EV 有功输出的合理配置问题。IEEE-33 节点配电系统网络构架如图 2 所示,其电压等级为 10 kV,在 IEEE-33 系统中加入包括 3 个 GPS,分别经节点 21、32、17 接入 ADN,最大输出功率为 600 kW;2 个 ESS 分别经过节点 20、25 接入 ADN,最大容量为 800 kWh;1 个 EV 充电站经过节点 9 接入 ADN,最大容量为 400 kWh。为了取得更为准确的系统网损、负荷曲线均方差和各时刻 GPS 的有功功率输出,分别进行 10 次优化计算,得到 GPS 的输出值均是 10 次结果的平均值。

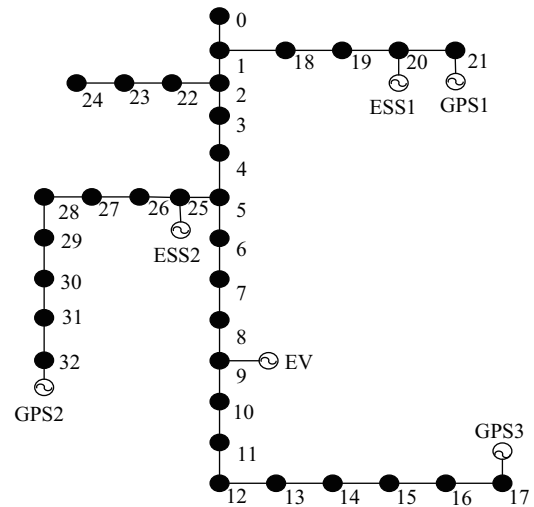


图2 改进IEEE-33节点系统构架

Fig. 2 Architecture of improved IEEE-33 nodes system

利用 CFA 和 FA 这 2 种优化算法在同样的参数下得到的适应度收敛速度对比如图 3 所示。结果表明, CFA 的收敛速度远远大于 FA,故本文利用 CFA 有一定的优越性。

增加 GPS 前后,10 次优化计算得到的 IEEE-33 节点系统网损和负荷曲线均方差如表 1 所示。

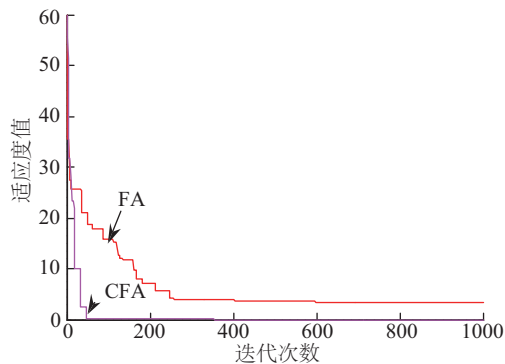


图3 FA和CFA收敛性对比

Fig. 3 Convergence comparison of FA and CFA

表1 IEEE-33节点系统网损和负荷曲线均方差

Table 1 System network loss and load curve variance of IEEE-33 nodes system

仿真次数	系统网损/kW		负荷曲线均方差	
	未加入GPS	加入GPS	未加入GPS	加入GPS
1	5614.2	5434.3	0.423	0.256
2	5719.0	5214.8	0.442	0.341
3	5814.5	6123.5	0.532	0.421
4	5318.6	4914.9	0.825	0.524
5	5134.5	5022.4	0.513	0.324
6	5950.3	5120.5	0.621	0.443
7	5249.5	4845.7	0.510	0.243
8	5215.4	5005.1	0.714	0.521
9	5319.4	5218.3	0.451	0.240
10	5428.7	5314.7	0.538	0.314

利用CFA算法优化计算10次后的GPS平均有功出力如图4所示,各ESS和EV的有功出力如图5所示。

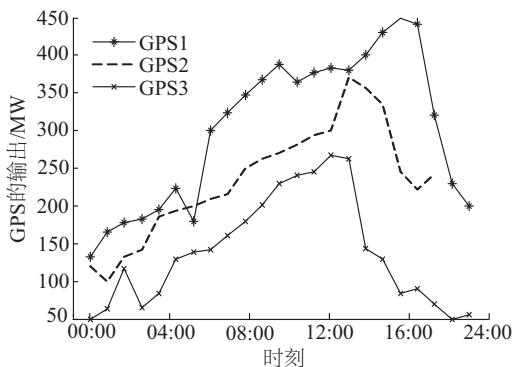


图4 采用CFA优化后各GPS的输出

Fig. 4 Output of GPS with CFA

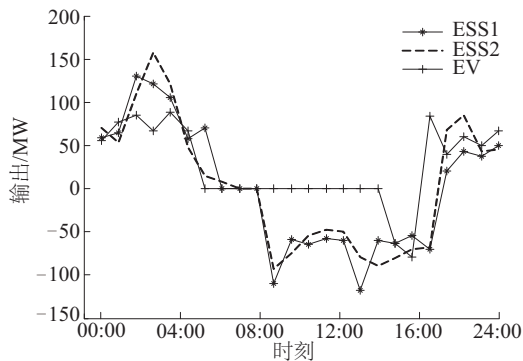


图5 采用CFA优化后的各ESS和EV的输出

Fig. 5 Output of ESS and EV with CFA

3.2 算例2

文献[9]中的算例是一个实际的44节点ADN系统,系统中加入的3个GPS、3个ESS和1个EV,系统中各GPS的具体位置如图6所示。各GPS最大输出功率为600 kW,各ESS容量为800 kWh, EV最大容量为400 kWh。CFA参数设置如下:初始为萤火虫数50,维数为7,最大迭代次数设置为100,萤火虫的每一列表示各GPS(ESS/EV)在一个周期内的有功功率输出。

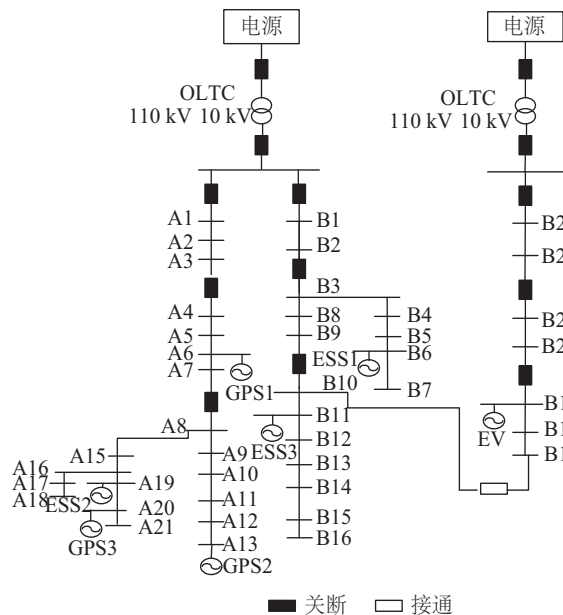


图6 加入GPS的44节点系统

Fig. 6 44 nodes system with added GPS

增加GPS前后,10次优化计算得到的算例的系统网损和负荷曲线均方差如表2所示。

利用CFA优化后的GPS中有功出力如图7所示,各ESS和EV的有功出力如图8所示。从图7、图8可

看出,在算例 2 中加入的 GPS 与算例 1 中各 GPS 的作用相似,本文不再赘述。

表 2 算例的系统网损和负荷曲线均方差

Table 2 System network loss and load curve variance of IEEE-33 nodes system

仿真次数	系统网损/kW		荷曲线均方差	
	未加入 GPS	加入 GPS	未加入 GPS	加入 GPS
1	8314.5	7523.1	0.523	0.316
2	7914.5	7321.4	0.541	0.414
3	8143.1	6782.4	0.682	0.421
4	8318.6	7125.4	0.765	0.624
5	7894.2	7123.8	0.613	0.425
6	7325.5	6914.1	0.635	0.324
7	7045.1	6834.4	0.614	0.443
8	7231.4	6910.0	0.835	0.421
9	7329.5	7034.5	0.616	0.531
10	7438.3	7143.2	0.742	0.414

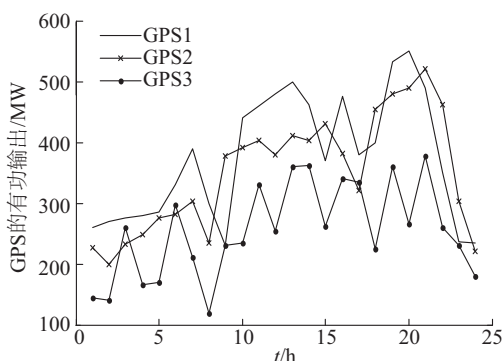


图 7 采用 CFA 优化后各 GPS 的输出

Fig. 7 Output of GPS with CFA

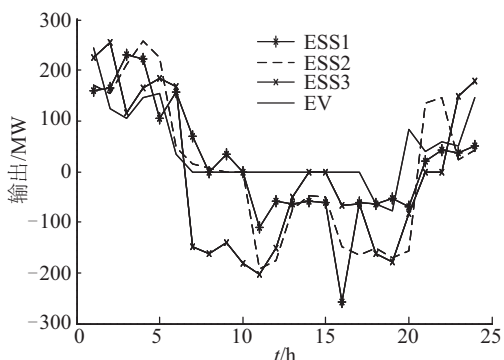


图 8 采用 CFA 优化后的各 ESS 和 EV 的输出

Fig. 8 Output of ESS and EV with CFA

4 结 论

建立 ADN 计及系统网损、负荷曲线均方差最小为目标函数,以有功功率为控制变量的数学模型,并利用 CFA 优化该模型的有功输出。得到的结论如下:

1) CFA 与 FA 相比,提高 FA 防早熟的能力和收敛的速度;

2) 加入 GPS 之后的 ADN 系统,系统网损和负荷曲线均方差均低于未加入 GPS 的 ADN 系统,进而可说明,加入 GPS 并合理控制其输出,可以提高 ADN 系统的安全性指标;

3) 将 EV 加入 ADN 在一定程度上替代 ESS 储能,减小 ADN 对 ESS 容量的需求,降低对 ESS 方面的投资,符合当今提倡的建设节约型社会。

[参考文献]

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Y, LIU D, YU W P, et al. Active distribution network technology and its progress [J]. Automation of electric power systems, 2012, 36 (18): 10-16
- [2] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO B, WANG C S, ZHOU J H, et al. Active distribution network status quo and future development of power system automation [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [3] 潘超,孟涛,尹杭. 基于萤火虫优化算法的主动配电网广义电源规划模型[J]. 水电能源科学, 2014, (12): 186-190.
PAN C, MENG T, YIN H. Generalized power planning model of active distribution network based on firefly optimization algorithm [J]. Hydropower energy science, 2014, (12): 186-190.
- [4] 潘超,孟涛,蔡国伟,等. 含分布式电源的主动配电网双层规划模型[J]. 电测与仪表, 2015, 52(24): 19-23.
PAN C, MENG T, CAI G W, et al. Bi level programming model of active distribution network with distributed generation [J]. Electric measurement and instrumentation, 2015, 52 (24): 19-23.
- [5] 孟涛. 主动配电网广义电源多目标优化配置与运行[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
MENG T. Multi objective optimal allocation and operation of generalized power supply network [D].

- Jilin: Northeast Electric Power University, 2016.
- [6] 苏文辉, 林章岁, 李喜兰, 等. 分布式电源对配电网静态电压稳定的影响研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 41-46.
- SU W H, LIN Z S, LI X L, et al. Research on impact of distributed generation on static voltage stability of distribution networks[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2014, 51(14): 41-46.
- [7] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 155-163.
- ZENG B, LIU N, ZHANG Y Y, et al. Double layer scenario planning method for active power distribution system with efficient use of intermittent distributed power distribution[J]. Journal of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 155-163.
- [8] 方陈, 张翔, 程浩忠, 等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 823-829.
- FANG C, ZHANG X, CHENG H Z, et al. Grid planning of distribution network with distributed generation under active management mode[J]. Power system technology, 2014, 38(4): 823-829.
- [9] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
- YOU Y, LIU D, ZHONG Q, et al. Study on optimal dispatching strategy of active distribution network[J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [10] 朱勇, 杨京燕, 张冬清. 基于有功网损最优的分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 12-16.
- ZHU Y, YANG J Y, ZHANG D Q. Distributed power planning based on active power loss optimization[J]. Power system protection and control, 2011, 39(21): 12-16.
- [11] 姚力, 李少腾, 胡瑛俊, 等. 一种智能电能表通信可靠性测试方法及系统[J]. 电测与仪表, 2013, (3): 94-96.
- YAO L, LI S T, HU Y J, et al. A method and system for measuring communication reliability of intelligent electric energy meter[J]. Electrical measurement and instrumentation, 2013, (3): 94-96.
- [12] 刘健, 程红丽, 张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 44-50.
- LIU J, CHENG H L, ZHANG Z H. The distribution automation system of distribution terminal allocation planning[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(12): 44-50.
- [13] 杨坤. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 5(34): 11-17.
- YANG K. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Theoretical research of urban construction: electronic edition, 2015, 5(34): 11-17.
- [14] 包广清, 徐欣, 王晓兰, 等. 电动汽车与风电机组协同的微电网调度策略[J]. 控制工程, 2016, 23(9): 1387-1393.
- BAO G Q, XU X, WANG X L, et al. Microgrid scheduling strategy coordinated by wind turbines and electric vehicles[J]. Control engineering, 2016, 23(9): 1387-1393.
- [15] 胡晓通, 刘天琪, 刘舒, 等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 33-40.
- HU X T, LIU T Q, LIU S, et al. Coordinated optimal operation of microgrid and distribution network based on dynamic reward and penalty price[J]. Power automation equipment, 2016, 36(3): 33-40.
- [16] VERSCHAE R, KAWASHIMA H, KATO T, et al. Coordinated energy management for inter-community imbalance minimization[J]. Renewable energy, 2016, 87(2): 922-935.
- [17] WANG Y, MAO S, NELMS R M. On hierarchical power scheduling for the macrogrid and cooperative microgrids[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2015, 11(6): 1.
- [18] CHEN S X, GOOI H B. Scheduling of energy storage in a grid-connected PV/battery system via simplorer[C]//TENCON 2009- 2009 IEEE Region 10 Conference, IEEE, Fukuoka, Japan, 2009: 1-5.
- [19] CHEN S X, GOOI H B, WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE transactions on smart grid, 2012, 3(1): 142-151.
- [20] 吴红斌, 郭彩云. 计及电动汽车的分布式发电系统中储能单元的优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 15-21.
- WU H B, GUO C Y. Optimal allocation of distributed

- power system and electric vehicle energy unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 15-21.
- [21] 曹一家, 苗铁群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 1-6.
- CAO Y J, MIAO Y Q, JIANG Q Y. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric power automation equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [22] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
- YOU Y, LIU D, ZHONG Q, et al. Multi objective optimal allocation of energy storage system in active distribution network [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(18): 46-52.
- [23] 黄冠能, 高贞彦, 耿博, 等. 全资源调度下主动配电网削峰填谷优化运行研究[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(3): 1-6.
- HUANG G N, GAO Z Y, GENG B, et al. Study on optimal operation of peak shaving and valley filling in active distribution network [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(3): 1-6.
- [24] KARKI R, HU P, BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2006, 21(2): 533-540.
- [25] 余岳, 栗梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1261-1268.
- YU Y, SU M, SUN Y, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicles [J]. Instruments and meters, 2014, 35(6): 1261-1268.
- [26] 高伟明. 萤火虫算法的研究与应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- GAO W M. Research and application of firefly algorithm [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [27] 程美英, 倪志伟, 朱旭辉. 萤火虫优化算法理论研究综述[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 19-24.
- CHENG M Y, NI Z W, ZHU X H. Review of theoretical studies on optimization algorithms for firefly [J]. Computer science, 2015, 42(4): 19-24.
- [28] 冯艳红, 刘建芹, 贺毅朝. 基于混沌理论的动态种群萤火虫算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(3): 796-799.
- FENG Y H, LIU J Q, HE Y Z. Dynamic population firefly algorithm [J]. Computer application based on chaos theory, 2013, 33(3): 796-799.
- [29] 刘长平, 叶春明. 具有混沌搜索策略的萤火虫优化算法[J]. 系统管理学报, 2013, 22(4): 538-543.
- LIU C P, YE C M. Firefly algorithm with chaotic search strategy[J]. Journal of system management, 2013, 22(4): 538-543.

INFLUENCE OF GENERALIZED POWER SOURCES ON CONFIGURATION OF ENERGY STORAGE SYSTEM IN ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK

Zhao Feng^{1,2}, Li Ying¹, Gao Fengyang¹, Wei Libing³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Control and Intelligent Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to well know about the influence of generalized power sources in active distribution network on energy storage system, firstly established in a controlled distributed generation, energy storage system and electric vehicle charging station under certain conditions, it can be considered as an energy storage system as a control variable, and the minimum of the system network loss and the load curve variance which reflect the energy storage unit load curve peak capacity as the objective function of the model; secondly the model of multi-objective function is transformed into a single objective function by using the fusion of AHP and the entropy method; and then the active power output values of generalized power source are optimized with the chaos firefly algorithm; finally the feasibility and superiority of the proposed model and its algorithm are verified with the improved IEEE-33 nodes system and a practical active distribution network system respectively as examples.

Keywords: active distribution network; generalized power sources; chaos firefly algorithm; energy storage system; electric vehicle