

考虑可控负荷影响的主动配电系统 分布式电源优化配置

林君豪¹, 张 焰¹, 陈 思¹, 杨增辉², 苏 运²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 在常规的配电网分布式电源优化配置基础上, 结合主动配电系统特点, 考虑可控负荷的影响, 建立了分布式电源双层优化配置模型。上层模型用于求解接入主动配电系统的分布式电源最优位置和容量; 下层模型用于求解各时段最优的可控分布式电源出力和可控负荷大小, 并利用鲁棒优化理论, 采用盒式不确定集合表征风力发电、光伏发电等不可控分布式电源出力的不确定性。利用该模型, 可以在求解分布式电源优化配置问题的同时考虑运行调度的因素, 从某种程度上实现主动配电系统电源规划与运行的统筹。最后采用蝙蝠算法求解双层优化模型。通过对 IEEE 33 节点配电系统进行算例分析, 并与遗传算法、粒子群优化算法进行对比, 验证了所提模型的合理性以及蝙蝠算法的适用性和较强的全局寻优能力。

关键词: 分布式电源; 优化配置; 可控负荷; 主动配电系统; 鲁棒优化; 蝙蝠算法

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.007

0 引言

2008 年国际大电网委员会 (CIGRE) 提出了主动配电网 ADN (Active Distribution Network) 的概念, 2014 年 8 月召开的第 45 届 CIGRE 年会上将最初的“主动配电网”概念扩充为“主动配电系统 ADS (Active Distribution System)”, 强调未来配电网将是一个集合了各种形式分布式电源 DG (Distributed Generation)、储能、电动汽车充换电设施和需求响应资源 (即可控负荷), 具有主动控制和运行能力的有机系统, 而不仅仅是一个“网络”^[1-2]。主动配电系统将成为未来配电技术的重要发展方向。

分布式电源不同的安装位置和容量对主动配电系统的电压分布、线路潮流和网络损耗等都有不同程度的影响^[3], 研究分布式电源的优化配置问题对研究主动配电系统的规划和稳定运行有着重要意义^[4]。

近年来, 对分布式电源在传统配电网中的优化配置已经进行了深入研究^[5-10]。文献^[5-6]将分布式电源视为一种类似无功补偿装置的“移动无功补偿器”, 以有功损耗最小为目标函数求解分布式电源接入的最优容量; 文献^[7-8]建立了 2 层规划模型, 上层规划确定配电网网架结构, 下层规划求解以上层网架结构为基础的分布式电源安装容量; 文献^[9]利用模糊数学来描述分布式电源出力的波动性, 并

采用带有精英策略的非支配排序遗传算法求解分布式电源最优配置; 文献^[10]采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛模拟法对风速和负荷 (有功及无功功率) 进行采样, 建立了以年综合费用最小为目标的分布式电源优化配置模型, 并利用萤火虫算法进行求解。但这些研究都是基于传统的配电网, 没有体现主动配电系统“主动”控制需求响应资源 (即可控负荷) 的特点。可控负荷 (空调、热水器、冰箱、电动汽车等) 是一类工作方式灵活可控、不局限在单一时段运行的负荷^[11-14], 可以根据协议在系统峰值或者紧急情况时由电网调度控制部门直接控制其工作状态, 或者利用经济措施 (如分时电价) 诱导用户调整其负荷曲线^[15]。

本文建立了考虑可控负荷影响的主动配电系统分布式电源双层优化配置模型, 把运行调度因素纳入分布式电源优化配置问题的研究之中。利用上层模型求解接入主动配电系统的分布式电源最优位置和容量, 利用下层模型求解各时段最优的可控分布式电源出力和可控负荷大小。同时利用鲁棒优化理论, 采用盒式不确定集合表征风电、光伏等不可控分布式电源出力的不确定性, 无需知道不确定量的具体随机分布。采用蝙蝠算法对该双层优化问题进行求解。最后对 IEEE 33 节点配电系统进行算例分析, 并与遗传算法 (GA)、粒子群优化 (PSO) 算法进行对比, 验证所提模型的合理性以及蝙蝠算法的适用性。

1 主动配电系统分布式电源双层优化配置模型

1.1 双层优化模型架构

本文构建的考虑可控负荷影响的分布式电源优化配置模型分为上下 2 层。由上层模型求解接入主动配电系统的分布式电源最优位置和容量, 包括可控和

收稿日期: 2015-11-29; 修回日期: 2016-04-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2015AA050203); 国家电网公司科技项目 (520900150037)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA-050203) and the Science and Technology Project of SGCC (520900150037)

非可控分布式电源 2 类。可控分布式电源为微型燃气轮机 MT(Micro Turbine),其各个时段输出的有功功率可以控制;不可控分布式电源为风力发电机 WT(Wind Turbine)和光伏发电 PV(PhotoVoltaic),其输出功率由各时段的风速、光照强度等自然因素决定,不可人为调控。在下层优化模型中考虑可控负荷的影响,优化变量为各时段可控分布式电源出力 and 可控负荷的功率。

上、下层模型之间相互影响,求解上层模型得出一组分布式电源优化配置方案后传递给下层模型,由下层模型求解各时段最优的可控分布式电源出力和可控负荷的功率,并把求解结果返回给上层。上层再利用下层反馈的结果计算更为精确的分布式电源各项成本,修正目标函数值,再次优化分布式电源的位置和容量。如此循环迭代至设定的最大迭代次数,得出优化结果。利用该模型得到的分布式电源优化配置方案考虑了可控负荷的运行情况,从某种程度上实现了主动配电系统电源规划与运行的统筹,实现了电网侧和用户侧的双赢。建立的双层优化模型架构如图 1 所示。

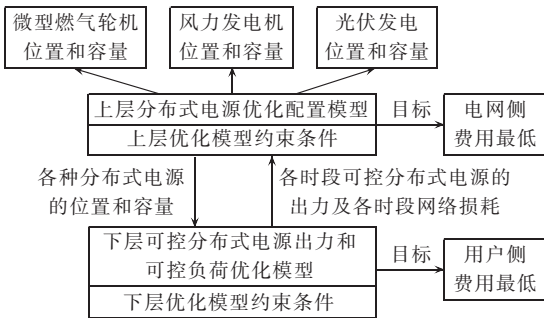


图 1 双层优化模型架构图

Fig.1 Structure of bi-layer optimization model

1.2 上层分布式电源优化配置模型

上层模型的目标函数为电网侧综合费用最小。综合费用包括分布式电源投资成本、运行维护费用、燃料成本、治污成本和系统网损费用。

$$f = \min(C_{\text{INV}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{Fuel}} + C_{\text{Pollu}} + C_{\text{Loss}}) \quad (1)$$

(1) 等年值设备投资成本。

$$C_{\text{INV}} = \sum_{i \in S} \left[\frac{r(1+r)^{T_{\text{DG}}}}{(1+r)^{T_{\text{DG}}} - 1} \lambda_{\text{DG}} W_{\text{DG}} \right] \quad (2)$$

其中, S 为接入分布式电源的节点集合; r 为年利率; T_{DG} 、 λ_{DG} 和 W_{DG} 分别为第 i 个节点上所接的分布式电源的寿命、单位容量投资成本(单位为元/kW)、装机容量(单位为 kW)。

(2) 分布式电源运行维护费用。

$$C_{\text{OM}} = \sum_{i \in S} \lambda_{\text{OM}} W_{\text{DG}} \tau_i \quad (3)$$

其中, λ_{OM} 为分布式电源折合成单位发电量的运行维护费用,单位为元/(kW·h); τ_i 为分布式电源年等效

利用小时数,单位为 h/a。

(3) 分布式电源燃料成本。

$$C_{\text{Fuel}} = \kappa \lambda_{\text{MT}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{MT}}} (P_{\text{MT}}^t \cdot 1) \quad (4)$$

其中, κ 为年最大负荷等效利用天数; T 为 1 d 的时段数,一般取 24; λ_{MT} 为微型燃气轮机的燃料成本,单位为元/(kW·h); Ω_{MT} 为接入微型燃气轮机的节点集合; P_{MT}^t 为节点 i 所接微型燃气轮机 t 时段的有功出力,单位为 kW,由下层模型求解得到。分布式电源燃料成本仅包含微型燃气轮机的燃料成本。

(4) 分布式电源治污成本。

$$C_{\text{Pollu}} = \kappa \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^{N_{\text{Gas}}} \beta_p \alpha'_{ip} (P_{\text{MT}}^t \cdot 1) \quad (5)$$

其中, N_{Gas} 为污染气体的类型数; β_p 为治理单位质量第 p 类污染物所需要的费用,单位为元/g; α'_{ip} 为节点 i 所接微型燃气轮机第 p 类污染物的排放系数,单位为 g/(kW·h); $\sum_{p=1}^{N_{\text{Gas}}} \beta_p \alpha'_{ip}$ 为节点 i 所接微型燃气轮机发单位电量所对应的治污成本,单位为元/(kW·h); $\sum_{t=1}^T (P_{\text{MT}}^t \cdot 1)$ 为节点 i 所接微型燃气轮机全天的发电量,单位为 kW·h。

风力发电和光伏发电不使用燃料,基本不产生污染,所以治污成本可忽略不计。

微型燃气轮机所排放的污染气体主要有 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等,各类污染物对应的 α' 和 β 值在下文的算例分析中会举例给出。

(5) 系统网损费用。

$$C_{\text{Loss}} = \kappa \left(\sum_{t=1}^T \lambda^t P_{\text{Loss}}^t \right) = \kappa \left[\sum_{t=1}^T \lambda^t \sum_{k=1}^b g_k [(U_i^t)^2 + (U_j^t)^2 - 2U_i^t U_j^t \cos \theta_{ij}^t] \right] \quad (6)$$

其中, λ^t 为 t 时段电价; P_{Loss}^t 为年最大负荷日 t 时段网络损耗,单位为 kW,由下层模型求解得到; b 为支路总数; g_k 为第 k 条支路的电导; U_i^t 和 U_j^t 分别为节点 i 和 j 在 t 时段的电压幅值; θ_{ij}^t 为节点 i 和 j 在 t 时段的电压相角差。

对应的约束条件如下。

(1) 各节点接入的分布式电源容量限制。

$$0 < W_{\text{DG}} \leq W_{\text{DG}}^{\text{max}} \quad i \in S \quad (7)$$

其中, $W_{\text{DG}}^{\text{max}}$ 为节点 i 允许接入的分布式电源最大容量。

(2) 系统的分布式电源渗透率约束。

主动配电系统的特点之一就是具备一定比例的分布式可控资源,但若接入的分布式电源容量过大,在运行中可能会对用户造成比较大的冲击,比如分布式电源的突然退出运行,可能造成节点电压的急剧下降。为了使分布式电源对系统的影响处于可控范围,有必要对分布式电源渗透率加以限制。本文设定分布式电源装机容量和不低于系统总负荷的 15%,且不

超过系统总负荷的 40%^[16]。

$$15\% \leq \frac{\sum_{i \in S} W_{DGi}}{\sum_{i=1}^N P_{Li}} \leq 40\% \quad (8)$$

其中, $\sum_{i \in S} W_{DGi}$ 为配电系统中接入的分布式电源容量之和;

N 为配电网节点数量; $\sum_{i=1}^N P_{Li}$ 为系统总负荷。

1.3 下层可控分布式电源出力 and 可控负荷优化模型

下层模型是在求解上层模型得出一组最优分布式电源配置方案的基础上, 求解该情况下可控分布式电源和可控负荷的最优运行调度方案, 以实现主动配电系统电源规划与运行的统筹。下层优化模型的目标函数是用户侧用电费用最低, 可以表示为:

$$f = \min C_{\text{Power}} \quad (9)$$

其中, 年最大负荷日全时段用户用电费用为:

$$C_{\text{Power}} = \sum_{t=1}^T \lambda^t \sum_{i=1}^N P_{Li}^t \quad (10)$$

其中, P_{Li}^t 为节点 i 处 t 时段的负荷有功大小。

对应的约束条件如下。

(1) 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{Gi}^t - P_{Li}^t = U_i^t \sum_{j \in \Omega_i} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{Gi}^t - Q_{Li}^t = U_i^t \sum_{j \in \Omega_i} U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases} \quad (11)$$

其中, P_{Gi}^t 和 Q_{Gi}^t 分别为节点 i 处的电源在 t 时段注入的有功功率和无功功率; P_{Li}^t 和 Q_{Li}^t 分别为节点 i 处负荷在 t 时段消耗的有功功率和无功功率; Ω_i 表示所有与节点 i 直接相连的节点, 包括节点 i 自身; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中相应元素的实部和虚部。

(2) 分布式电源有功和无功出力约束。

风力发电机和光伏电源一般可以简化处理为 PQ 节点, 并认为在分布式电源接入节点处相应地配置了无功补偿自动投切装置, 故分布式电源的无功可以表示为式 (13) 的形式, 其中 φ_{MT} 、 φ_{WT} 、 φ_{PV} 分别为微型燃气轮机、风力发电机、光伏电源的功率因数角。

$$P_{Gi}^t = \begin{cases} P_{MTi}^t & i \in S_1 \\ P_{WTi}^t & i \in S_2 \\ P_{PVi}^t & i \in S_3 \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_{Gi}^t = \begin{cases} Q_{MTi}^t = P_{MTi}^t \tan \varphi_{MT} & i \in S_1 \\ Q_{WTi}^t = P_{WTi}^t \tan \varphi_{WT} & i \in S_2 \\ Q_{PVi}^t = P_{PVi}^t \tan \varphi_{PV} & i \in S_3 \end{cases} \quad (13)$$

其中, S_1 、 S_2 、 S_3 分别为接入微型燃气轮机、风力发电机和光伏电源的节点集合; P_{MTi}^t 为节点 i 所接微型燃气轮机 t 时段的有功出力, 为待优化的可控变量; P_{WTi}^t 和 P_{PVi}^t 分别为节点 i 所接的风力发电机和光伏电源 t 时段的有功出力, 为随机量, 不可控。

(3) 微型燃气轮机出力上下限约束。

$$0 \leq P_{MTi}^t \leq W_{MTi} \quad i \in S_1 \quad (14)$$

其中, W_{MTi} 为节点 i 上所接的微型燃气轮机的容量。

(4) 节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

其中, $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 的电压上限和下限。

(5) 支路潮流约束。

$$|P_{ij}^t| = |-(U_i^t)^2 G_{ij} + U_i^t U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t)| \leq P_{ij}^{\max} \quad (16)$$

其中, P_{ij}^t 为 ij 支路在 t 时段的传输功率; $P_{ij}^{\max}$ 为 ij 支路的传输功率上限。

(6) 含可控负荷的运行调度约束。

$$P_{Li}^t = P_{Li}^{(0)} + P_{Li}^{(1)} + P_{Li}^{(2)} \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T (P_{Li}^{(1)} \cdot 1) = W_{Li}^{(1)} \quad (18)$$

$$P_{Li}^{(2)} = \begin{cases} P_{Li_normal}^{(2)} & \lambda^t < \lambda_L \\ P_{Li}^{(2)}(\lambda^t) = P_{Li_normal}^{(2)} - \frac{P_{Li_normal}^{(2)} - P_{Li_rigid}^{(2)}}{\lambda_H - \lambda_L} (\lambda^t - \lambda_L) & \lambda_L \leq \lambda^t < \lambda_H \\ P_{Li_rigid}^{(2)} & \lambda^t \geq \lambda_H \end{cases} \quad (19)$$

其中, $P_{Li}^{(0)}$ 、 $P_{Li}^{(1)}$ 、 $P_{Li}^{(2)}$ 分别为 t 时段内节点 i 上的不可控负荷、可转移负荷、可削减负荷的有功功率; $W_{Li}^{(1)}$ 为节点 i 所接可转移负荷全时段的用电量; $P_{Li_normal}^{(2)}$ 为节点 i 上所接的可削减负荷正常运行的有功功率; $P_{Li_rigid}^{(2)}$ 为节点 i 上所接可削减负荷的刚性有功功率; λ_H 和 λ_L 分别为用户对电价敏感的上、下临界价格。

式 (18) 描述的是, 对于可转移负荷 (如洗衣机、电动汽车等), 全时段用电总量保持固定, 但具体用电行为发生的时段可以转移^[17]。

式 (19) 描述的是, 对于可削减负荷 (如空调、家庭娱乐设备等), 当电价低于 λ_L 时, 用电行为不受电价影响; 当电价高于 λ_H 时, 负荷部分被削减, 只剩余最低保障性需求; 而当电价处于 λ_L 和 λ_H 之间时, 负荷量 $P_{Li}^{(2)}$ 是电价 λ^t 的函数^[17]。

1.4 考虑风力及光伏发电出力随机性的鲁棒优化模型

上述下层模型中包含了不确定性量 P_{WTi}^t 和 P_{PVi}^t , 本文采用鲁棒优化理论中的盒式不确定集合进行刻画。作为解决不确定性问题的一种方法, 鲁棒优化方法不需要假设变量的概率分布, 而是利用“不确定集合”的形式来描述变量的不确定性, 使得约束条件在不确定变量取集合中所有可能值时都能够满足。当选取的不确定集合为盒式不确定集时, 该鲁棒优化称为盒式集合鲁棒优化^[18-21]。

利用盒式集合 u 来刻画不确定性量 P_{WTi}^t 和 P_{PVi}^t 。

$$P_{WTi}^t = \overline{P_{WTi}^t} + \xi_i^t \quad \text{和} \quad P_{PVi}^t = \overline{P_{PVi}^t} + \eta_i^t, \quad \text{汇总得到盒式集合:}$$

$$u = \left\{ \xi_i^t, \eta_i^t \left| \underline{\xi}_i \leq \xi_i^t \leq \overline{\xi}_i, \underline{\xi}_i = -\overline{\xi}_i; \underline{\eta}_i \leq \eta_i^t \leq \overline{\eta}_i, \underline{\eta}_i = -\overline{\eta}_i \right. \right\} \quad (20)$$

其中, $\overline{P_{WTi}^t}$ 和 $\overline{P_{PVi}^t}$ 分别为风机出力、光伏发电出力的预测值; ξ_i^t 和 η_i^t 分别为风机出力、光伏发电出力的波动量, 属于盒式集合 u 。

ξ_i 和 η_i 这 2 个波动量主要由气象等因素决定。根据文献[22]的研究可知,风力发电出力中绝对值为 10% 以上的大幅波动占 43.4%, 2%~10% 的中幅波动占 40.5%, 2% 以下的小幅波动占 26.1%; 根据文献[23]的研究可知,以光伏发电典型日 12 h 的发电时间来计,有 10~11 h 的波动率平均在 5%~10% 之间,另外 1~2 h 的波动率达到 60% 以上。按照各种波动幅度所占比例可以归算得到 ξ_i 和 η_i 这 2 个波动量合理的取值范围。

为了求解含有不确定量的鲁棒优化模型,首先对上述式(11)~(13)和式(16)进行变换。对于式(16),把所有与节点 i 相连的支路潮流相加,可得:

$$\sum_{j \in \Omega} |P_{ij}^t| = \sum_{j \in \Omega} |-(U_i^t)^2 G_{ij} + U_i^t U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t)| \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \quad (21)$$

利用绝对值不等式 $|A+B| \leq |A| + |B|$, 得:

$$\begin{aligned} & |-(U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} + U_i^t \sum_{j \in \Omega} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t)| \leq \\ & \sum_{j \in \Omega} |-(U_i^t)^2 G_{ij} + U_i^t U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t)| \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \quad (22) \end{aligned}$$

把式(12)中有功潮流等式代入,得:

$$|-(U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} + P_{Gi}^t - P_{Li}^t| \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \quad (23)$$

对于接入风力发电机的节点 i , 即 $i \in S_2$, 根据式(12), 式(23)可以表示为:

$$|-(U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} + P_{WTi}^t - P_{Li}^t| \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \quad i \in S_2 \quad (24)$$

上式含有不确定量 P_{WTi}^t , 求解困难, 需要运用优化对偶理论, 将约束条件中的不确定量转化为确定性形式, 推导过程如下。

首先对风电出力中涉及的不确定量 P_{WTi}^t 进行处理, 把式(20)代入式(24), 并展开:

$$\begin{cases} \xi_i^t + \overline{P_{WTi}^t} - P_{Li}^t - (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \\ \xi_i^t + \overline{P_{WTi}^t} - P_{Li}^t - (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \geq -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

把除不确定量外的其余项移到等式右边, 得:

$$\begin{cases} \xi_i^t \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ \xi_i^t \geq -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \end{cases} \quad (26)$$

令 $A = \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij}$, $A' = -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij}$, 则式(26)变为:

$$\begin{cases} \xi_i^t \leq A \\ \xi_i^t \geq A' \end{cases} \quad (27)$$

最大的风机出力波动量 ξ_i^t 应满足式(27)的第 1 式, 最小的风机出力波动量 ξ_i^t 应满足式(27)的第 2 式, 故式(27)可以写为:

$$\begin{cases} \max \xi_i^t \leq A \Rightarrow \min(-\xi_i^t) \geq -A \\ \min \xi_i^t \geq A' \end{cases} \quad (28)$$

根据拉格朗日优化对偶理论, 同时 ξ_i^t 服从式(20)

的约束, 首先构造 $\min(-\xi_i^t)$ 的拉格朗日函数如下:

$$L_i(\xi_i^t, \delta_i^t, \gamma_i^t) = -\xi_i^t - \delta_i^t (\xi_i^t - \underline{\xi}_i) - \gamma_i^t (\overline{\xi}_i - \xi_i^t) = (-1 - \delta_i^t + \gamma_i^t) \xi_i^t + (\delta_i^t \underline{\xi}_i - \gamma_i^t \overline{\xi}_i) \quad (29)$$

其中, δ_i^t, γ_i^t 为拉格朗日系数。

对式(29)关于 ξ_i^t 求偏导, 得到:

$$\frac{\partial L_i(\xi_i^t, \delta_i^t, \gamma_i^t)}{\partial \xi_i^t} = -1 - \delta_i^t + \gamma_i^t = 0 \quad (30)$$

根据优化对偶理论, $\min(-\xi_i^t)$ 变换为:

$$\min(-\xi_i^t) = \min \max L_i(\xi_i^t, \delta_i^t, \gamma_i^t) = \min(\delta_i^t \underline{\xi}_i - \gamma_i^t \overline{\xi}_i) \quad (31)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} -1 - \delta_i^t + \gamma_i^t = 0 \\ \delta_i^t \geq 0, \gamma_i^t \geq 0 \end{cases} \quad (32)$$

所以式(27)的第 1 式变换为:

$$\begin{cases} \delta_i^t \underline{\xi}_i - \gamma_i^t \overline{\xi}_i \geq -A \\ -1 - \delta_i^t + \gamma_i^t = 0 \\ \delta_i^t \geq 0, \gamma_i^t \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

把 $A = \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij}$ 代入式(33),

则式(25)的第 1 式变换为:

$$\begin{cases} \gamma_i^t \overline{\xi}_i - \delta_i^t \underline{\xi}_i \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ -1 - \delta_i^t + \gamma_i^t = 0 \\ \delta_i^t \geq 0, \gamma_i^t \geq 0 \end{cases} \quad (34)$$

同理, 式(25)的第 2 式变换为:

$$\begin{cases} (\delta_i^t)' \underline{\xi}_i - (\gamma_i^t)' \overline{\xi}_i \leq -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ 1 - (\delta_i^t)' + (\gamma_i^t)' = 0 \\ (\delta_i^t)' \geq 0, (\gamma_i^t)' \geq 0 \end{cases} \quad (35)$$

综合式(34)、(35), 对于接入风力发电机的节点 i , 即 $i \in S_2$, 式(24)变换为:

$$\begin{cases} \gamma_i^t \overline{\xi}_i - \delta_i^t \underline{\xi}_i \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ (\delta_i^t)' \underline{\xi}_i - (\gamma_i^t)' \overline{\xi}_i \leq -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{WTi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ 1 - (\delta_i^t)' + (\gamma_i^t)' = 0, -1 - \delta_i^t + \gamma_i^t = 0 \\ \delta_i^t \geq 0, \gamma_i^t \geq 0 \\ (\delta_i^t)' \geq 0, (\gamma_i^t)' \geq 0 \\ i \in S_2 \end{cases} \quad (36)$$

其中, $\delta_i^t, \gamma_i^t, (\delta_i^t)', (\gamma_i^t)'$ 为拉格朗日系数。

同理, 可以把光伏发电出力 P_{PVi} 转化成如式(36)的形式, 见式(37)。

$$\begin{cases} (\gamma_i^t)'' \overline{\eta}_i - (\delta_i^t)'' \underline{\eta}_i \leq \sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{PVi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ (\delta_i^t)''' \underline{\eta}_i - (\gamma_i^t)''' \overline{\eta}_i \leq -\sum_{j \in \Omega} P_{ij}^{\max} - \overline{P_{PVi}^t} + P_{Li}^t + (U_i^t)^2 \sum_{j \in \Omega} G_{ij} \\ 1 - (\delta_i^t)''' + (\gamma_i^t)''' = 0, -1 - (\delta_i^t)'' + (\gamma_i^t)'' = 0 \\ (\delta_i^t)'' \geq 0, (\gamma_i^t)'' \geq 0 \\ (\delta_i^t)''' \geq 0, (\gamma_i^t)''' \geq 0 \\ i \in S_3 \end{cases} \quad (37)$$

其中, $(\delta_i^t)'', (\gamma_i^t)'', (\delta_i^t)', (\gamma_i^t)'$ 为拉格朗日系数。

式(36)、(37)与式(11)—(19)一起构成了完整的下层鲁棒优化模型。

2 基于蝙蝠算法的双层优化模型求解

本文采用蝙蝠算法 BA(Bat Algorithm)求解上述双层优化模型。蝙蝠算法是由剑桥学者杨新社于 2010 年提出的一种启发式智能优化算法,该算法以蝙蝠回声定位机理为基础,通过模拟自然界蝙蝠的捕食行为来实现优化问题的求解^[24]。每个蝙蝠个体的脉冲音强和脉冲频率影响蝙蝠找到食物的速度和准确度。算法迭代刚开始时,个体采用较强的音强和较小的脉冲频率,一旦捕捉到食物(当前最优解),则不断增大个体脉冲频率,同时不断减小个体的音强,并让适应度值较差的个体不断向适应度值较优的个体移动。经过多次迭代之后,全部个体都汇集在食物藏身之处(全局最优位置)。

把每个蝙蝠个体看作问题的解,将问题的优化转化为蝙蝠个体更新位置的过程,将目标函数适应度值的好坏变成蝙蝠个体所处空间位置的优劣,每次迭代蝙蝠个体位置得到更新,使问题的解得到优化^[25]。

本文上下 2 层优化模型均采用 BA 进行求解,基本步骤相同,只是在求解上层适应度时,需要进入下层模型求解,即嵌套了一个 BA 过程。具体步骤如下。

a. 初始化上层 BA 基本参数:设置蝙蝠个体数目为 m ;搜索脉冲频率范围为 $[f_{\min}, f_{\max}]$;最大脉冲频率为 r_i^0 ;最大脉冲音强为 A_i ;音频衰减系数为 α ;脉冲频率增加系数为 γ 。

b. 随机初始化蝙蝠的位置 $x_i(i=1, 2, \dots, m)$, 找出当前群体中处于最佳位置 x^* 的个体。

c. 初始化搜索脉冲频率 $f_i=f_{\min}+(f_{\max}-f_{\min})\times\text{rand}$, 计算蝙蝠的飞行速度 $v_i=v_i^{t-1}+(x_i^{t-1}-x^*)f_i$, 更新蝙蝠的空间位置 $x_i^t=x_i^{t-1}+v_i^t$ 。

d. 生成在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 rand1 , 如果 $\text{rand1}>r_i^t$, 则对处在最佳位置的蝙蝠进行随机扰动,用扰动后的位置代替当前蝙蝠个体 i 的位置。

e. 进入下层模型,依照 BA 的步骤求解下层优化问题,从而计算出上层模型的适应度值。生成在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 rand2 , 如果 $\text{rand2}<A_i^t$, 并且当前位置的蝙蝠对应的适应度值优于之前的适应度值时,则移动至更新后的位置。

f. 若当前位置的蝙蝠对应的适应度值优于处于最佳位置的蝙蝠对应的适应度值,根据公式 $r_i^{t+1}=r_i^0(1-e^{-\gamma t})$ 以及 $A_i^{t+1}=\alpha A_i^t$ 更新脉冲频率 r_i^t 和脉冲音强 A_i^t 。

g. 对蝙蝠群体进行评估,找出当前最佳蝙蝠以及所处空间位置。

h. 判断迭代次数或者搜索精度是否满足终止条件,若满足则转步骤 **i**; 否则转入步骤 **c**, 进行下一次搜索。

i. 输出全局最优解和最优个体值。

整体的算法流程图如图 2 所示。

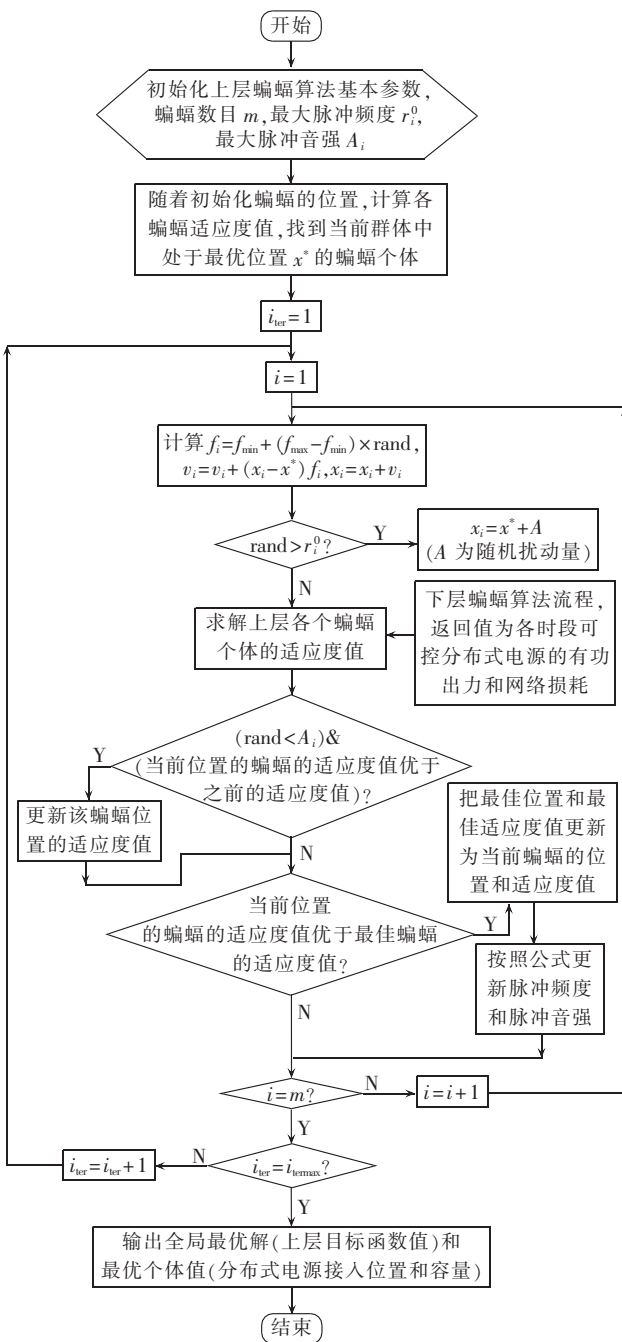


图 2 基于蝙蝠算法的双层优化模型求解流程图

Fig.2 Flowchart of bat algorithm for solving bi-layer model

3 算例分析

本文以 IEEE 33 节点配电系统作为算例,如图 3 所示,线路参数见文献[26]。节点 33 连接上级电网,潮流计算时作为平衡节点,标幺化后的电压为 $1\angle 0^\circ$ 。

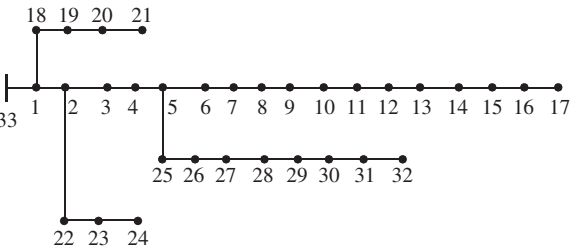


图 3 IEEE 33 节点配电系统图
Fig.3 Diagram of IEEE 33-bus distribution system

系统基准容量为 10 MV·A,基准电压为 12.66 kV。
表 1 为各种分布式电源的参数,表 2 为微型燃气轮机污染物排放系数及治理费用。分布式电源的投资、维护、燃料和治污成本计算式分别见式(2)—(5)。

表 1 分布式电源参数						
Table 1 Parameters of distributed generations						
分布式电源类型	T_{DC}/a	$\lambda_{DC}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	$\lambda_{OM}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	$\lambda_{MT}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	$\tau/(\text{h}\cdot\text{a}^{-1})$	年利 率/%
MT	10	1700	0.033	0.585 1	7000	8
WT	20	3600	0.005	0	1800	8
PV	25	3000	0.015	0	2000	8

表 2 MT 污染物排放系数及治理费用		
Table 2 Emission coefficient and treatment cost of MT pollutants		
污染物类型	排放系数 $\alpha'/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	治污费用 $\beta/(\text{元}\cdot\text{g}^{-1})$
CO ₂	7.250	2.100×10^{-4}
SO ₂	0.004	14.842×10^{-3}
NO _x	0.200	62.964×10^{-3}

分布式电源的候选安装位置集合为节点 {7,8,9,12,27,28},并认为该配电系统中的各个节点位置有相同的风力和光伏资源。某年最大负荷日各时段风机、光伏发电出力的预测值与额定功率的比值曲线如图 4 所示。该年最大负荷等效利用天数 $\kappa=160\text{d}$ 。节点 17、21、24、31 上所接负荷为可转移负荷,节点 20、32 上所接负荷为可削减负荷。优化前各可控负荷各时段的有功功率如图 5 和图 6 所示。

上层 BA 中各参数选取如下:种群大小 $m=50$,脉冲频率最大值 $f_{\max}=1$ 、最小值 $f_{\min}=-1$,脉冲频度最大值 $r^0=0.75$,脉冲频度增加系数 $\gamma=0.05$,脉冲音强衰减系数 $\alpha=0.95$,脉冲音强初始值 $A^0=0.75$,最大迭代次数 $i_{\text{termax}}=50$ 。下层 BA 的最大迭代次数 $i_{\text{termax}}=30$,其余参数与上层相同。设定与可削减负荷相关的临

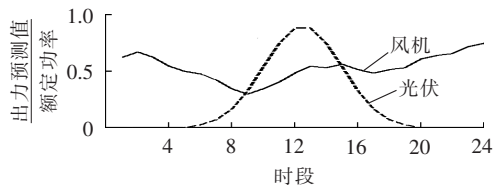


图 4 不可控分布式电源有功出力曲线
Fig.4 Active power output curve of uncontrollable DGs

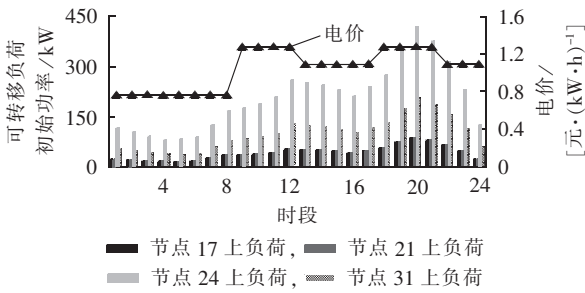


图 5 优化前可转移负荷有功功率
Fig.5 Active power of transferable load before optimization

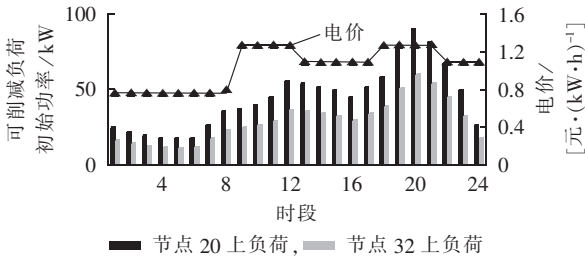


图 6 优化前可削减负荷有功功率
Fig.6 Active power of reducible load before optimization

界电价 $\lambda_L=1.1\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\lambda_H=1.25\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。
求解得到的分布式电源最优配置方案见表 3,同时列出了不考虑可控负荷(假定所有负荷都不参与优化)时分布式电源优化配置方案作为对比。表 4 列出了 2 种情况下电网侧和用户侧的费用。

表 3 分布式电源最优配置方案				
Table 3 Optimal DG allocation scheme				
DG 候选安装节点	不考虑可控负荷		考虑可控负荷	
	类型	容量/kW	类型	容量/kW
7			WT	23
8	WT	20		
9	WT	65	WT	73
12	PV	277	WT	215
27	WT	187	PV	198
28	WT	64	WT	48

表 4 电网侧和用户侧的费用			
Table 4 Costs of grid side and user side			
费用		不考虑可控负荷	考虑可控负荷
电网综合费用	投资成本	20.105	18.728
	运维成本	1.133	0.917
	燃料成本	0	0
	治污成本	0	0
	系统网损费用	21.493	17.164
总计		42.731	36.809
全时段用户用电费用		4.903 2	4.746 3

从表 3、表 4 中可以看出,在主动配电系统分布式电源优化配置的过程中考虑了可控负荷的影响之后,所得配置方案对应的电网综合费用和用户用电费用都有所降低,且电网侧降低的费用主要体现在系统网损费用这部分。由此可见,在进行主动配电系统分

布式电源优化配置时合理地考虑可控负荷的调度,可以有效减少系统网络损耗和用户用电费用,实现电网侧和用户侧的双赢。

图 7 和图 8 分别列出了经过优化后可转换负荷和可削减负荷各时段的有功功率。相比图 5 和图 6 可以发现,可转移负荷的功率分布变得均匀,日最大负荷减小,部分功率从用电高峰期 18—20 时段(高电价时段)转移到了凌晨 1—6 时段(低电价时段),而可削减负荷在高电价的 18—21 时段的功率被削减,电价相对较低的 22 时段的负荷值因没有被削减而成为该日的最大负荷时段。这说明本文所采用的可控负荷调度模型能有效体现出可控负荷对电价的跟随性,也解释了为什么合理地调度可控负荷可以有效降低用户用电费用。

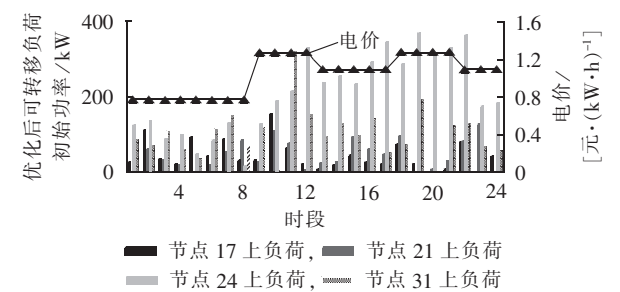


图 7 优化后可转移负荷有功功率
Fig.7 Active power of transferable load after optimization

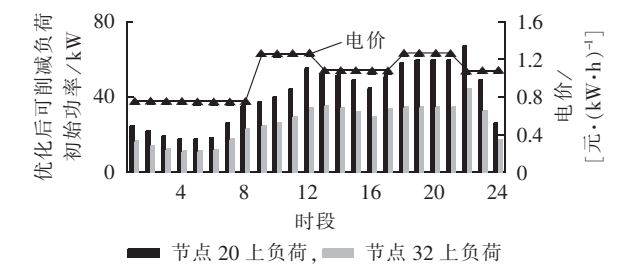


图 8 优化后可削减负荷有功功率
Fig.8 Active power of reducible load after optimization

同时,为说明 BA 的优势,将 BA 与 GA、PSO 算法进行对比分析。3 种算法的上下层模型优化的结果以及程序运行时间见表 5,收敛情况见图 9。可以看出,BA 的寻优结果优于 GA 和 PSO 算法,BA 能较快地跳出局部最优解,其搜索全局最优解的能力更强;但 BA 的计算时间大约是 GA 的 2.7 倍,是 PSO 算法的 1.95 倍。BA 虽然牺牲了计算时间,但其寻找全局最

表 5 BA、GA、PSO 算法计算结果和运算时间比较

Table 5 Comparison of calculative results and operating time among BA,GA and PSO algorithm

算法	上层目标函数值/元	下层目标函数值/元	运算时间/s
BA	3.6809×10^5	4.7463×10^4	27 543.69
GA	3.7384×10^5	4.7827×10^4	10 229.45
PSO	3.7649×10^5	4.7619×10^4	14 146.30

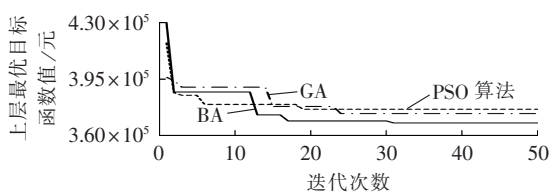


图 9 BA、GA、PSO 算法收敛情况对比
Fig.9 Comparison of convergence among BA,GA and PSO algorithm

优解的能力更强。

4 结语

本文建立了考虑可控负荷影响的主动配电系统分布式电源双层优化配置模型,并利用鲁棒优化理论,采用盒式不确定集合表征风电和光伏等不可控分布式电源出力的不确定性。采用蝙蝠算法求解双层优化模型,并与 GA、PSO 算法进行对比,说明了所建模型的合理性以及蝙蝠算法的适用性和较强的全局寻优能力。在进行主动配电网分布式电源优化配置时合理地考虑可控负荷的调度,可以有效减少系统网络损耗和用户用电费用,实现电网侧和用户侧的双赢。

参考文献:

[1] 马钊,梁惠施. 2014 年国际大电网会议学术动态系列报道配电系统和分布式发电技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):1-5.
MA Zhao,LIANG Huishi. A review of CIGRE 2014 on study committee of distribution system and distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(3):1-5.
[2] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):45-51.
ZHANG Shenxi,LI Ke,CHENG Haozhong,et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):45-51.
[3] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
[4] 王成山,孙充勃,李鹏. 主动配电网优化技术研究现状及展望[J]. 电力建设,2015,36(1):8-15.
WANG Chengshan,SUN Chongbo,LI Peng. Review and perspective on the optimization of active distribution network[J]. Electrical Power Construction,2015,36(1):8-15.
[5] YUAN Y,QIAN K,ZHOU C. The optimal location and penetration level of distributed generation[C]//42nd International Universities Power Engineering Conference,2007(UPEC 2007). West Sussex,UK:IEEE,2007:917-923.
[6] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.
[7] OUYANG W,CHENG H,ZHANG X,et al. Distribution network

- planning considering distributed generation by genetic algorithm combined with graph theory[J]. Electric Power Components and Systems, 2010, 38(3): 325-339.
- [8] 欧阳武. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- OUYANG Wu. Distribution network planning with distributed generation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [9] 曾鸣, 杜楠, 张鲲, 等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 954-959.
- ZENG Ming, DU Nan, ZHANG Kun, et al. Distributed generation planning based on multiobjective static fuzzy model[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 954-959.
- [10] 倪健, 黄红程, 顾洁, 等. 基于萤火虫算法的分布式风电源优化配置[J]. 华东电力, 2014, 42(10): 2074-2080.
- NI Jian, HUANG Hongcheng, GU Jie, et al. Optimal allocation of distributed wind generation based on firefly algorithm[J]. East China Electric Power, 2014, 42(10): 2074-2080.
- [11] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 7(13): 1-10.
- [12] 王成山, 刘梦璇, 陆宁. 采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 37-43.
- WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 37-43.
- [13] 童小娇, 尹昆, 刘亚娟, 等. 包含可控负荷的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 21-35.
- TONG Xiaojiao, YIN Kun, LIU Yajuan, et al. Economic dispatch for microgrid with controllable loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 21-35.
- [14] 周念成, 熊希聪, 王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 1-7.
- ZHOU Niancheng, XIONG Xicong, WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 1-7.
- [15] 江岳春, 王志刚, 杨春月, 等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2875-2880.
- JIANG Yuechun, WANG Zhigang, YANG Chunyue, et al. Multi-objective optimization strategy of controllable load in microgrid [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2875-2880.
- [16] 蒋毅. 分布式电源对配电网电压影响及优化配置研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- JIANG Yi. Research on the effect of voltage caused by distributed generation and optimal allocation of distributed generation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [17] 孙伟卿, 王承民, 张焰. 智能电网中的柔性负荷[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(3): 10-13.
- SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan. Flexible load in smart grids[J]. Power Demand Side Management, 2012, 14(3): 10-13.
- [18] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust optimization: methodology and applications[J]. Mathematical Programming, 2000, 92(3): 453-480.
- [19] 李斯, 周任军, 童小娇, 等. 基于盒式集合鲁棒优化的风电并网最大装机容量[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 208-213.
- LI Si, ZHOU Renjun, TONG Xiaojiao, et al. Robust optimization with box set for maximum installed capacity of wind farm connected to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 208-213.
- [20] 谢鹏, 彭春华, 于蓉. 大规模间歇式电源接入电网多目标鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1479-1484.
- XIE Peng, PENG Chunhua, YU Rong. Multi-objective robust optimized scheduling of power grid connected with large-scale intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1479-1484.
- [21] 陈思, 张焰, 薛贵挺, 等. 考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 60-69.
- CHEN Si, ZHANG Yan, XUE Guiting, et al. Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 60-69.
- [22] 田茹. 风电出力特性研究及其应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- TIAN Ru. Research on characteristics of wind power and relevant application[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [23] 张雪莉, 刘其辉, 马会萌, 等. 光伏电站输出功率影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(5): 75-81.
- ZHANG Xueli, LIU Qihui, MA Huimeng, et al. Analysis of influencing factors of output power of photovoltaic power plant [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(5): 75-81.
- [24] YANG X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[M]// Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization(NICSO 2010). Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2010, 284: 65-74.
- [25] 翟云峰, 蒋云峰, 易国伟, 等. 基于改进蝙蝠算法的微电网优化调度[J]. 电力建设, 2015, 36(6): 103-108.
- ZHAI Yunfeng, JIANG Yunfeng, YI Guowei, et al. Optimal power flow of microgrid based on improved bat algorithm[J]. Electrical Power Construction, 2015, 36(6): 103-108.
- [26] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

作者简介:



林君豪

林君豪(1992—),男,福建福州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划、智能配用电;

张焰(1958—),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统安全性分析;

陈思(1991—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化控制(E-mail: allenchen2835@163.com);

杨增辉(1976—),男,陕西咸阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析、智能电网;

苏运(1987—),男,山东德州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统仿真、配用电数据分析。

(下转第73页 continued on page 73)

长沙:湖南大学,2010.
GAO Ling. Energy-saving generation dispatching based on independent incremental transmission losses and environmental costs[D]. Changsha:Hunan University,2010.

丁 明(1956—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统可靠性与安全防护、新能源与分布式发电系统、电力电子技术在电力系统中的应用等(E-mail:



mingding56@126.com);
楚明娟(1991—),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为新能源与分布式发电系统(E-mail:mingjuan91@126.com);
毕 锐(1979—),男,安徽舒城人,讲师,博士,研究方向为分布式发电技术等
丁 明 (E-mail:biruizz@126.com);
石文辉(1981—),女,北京人,工程师,硕士,研究方向为新能源发电并网仿真与分析(E-mail:whshi@epri.sgcc.com.cn)。

Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application

DING Ming¹,CHU Mingjuan¹,BI Rui¹,SHI Wenhui²

(1. Anhui Key Lab of New Energy Utilization and Energy Conservation,Hefei University of Technology, Hefei 230009,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: For the changed operating conditions of power system with wind farms,a scrolling heuristic algorithm based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation is proposed and applied to a practical project,which considers more factors,such as forced element outage,unit startup-shutdown constraints,economic operation,heating period,wind power output sequence and fluctuation,etc.,integrates the multi-period priorities method into the computing system,and provides not only the traditional economy and reliability indexes but also some peak regulation evaluation indexes,such as insufficient peak regulation coefficient,wind abandoning rate,etc. Calculation and analysis are carried out based on the actual data of a provincial power grid in Northeast China,the influence of grid-connected wind farms on the technical and economic indexes and the operation of thermal power units are discussed,the effects of system constraint strengthening and computing interval on the peak regulation evaluation indexes are emphatically evaluated,the difference among the annual averages of hourly wind abandoning and corresponding reasons are analyzed in detail,and the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: sequential Monte Carlo; probabilistic production simulation; wind power; accommodation capacity; multi-period priorities method; insufficient peak regulation coefficient; wind abandoning analysis

(上接第 53 页 continued from page 53)

Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system

LIN Junhao¹,ZHANG Yan¹,CHEN Si¹,YANG Zenghui²,SU Yun²

(1. Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;
2. Electric Power Research Institute,SMEPC,Shanghai 200437,China)

Abstract: Based on the conventionally optimal allocation of DGs(Distributed Generations) in distribution network and combined with the features of active distribution system,a bi-layer optimal DG allocation model considering the effect of controllable load is proposed. The upper-layer model aims at obtaining the optimal allocation of DGs in the active distribution system while the lower-layer model aims at calculating the optimal power output of controllable DG and load for different periods. According to the robust optimization theory,the box uncertainty set is used to present the uncertainty of uncontrollable DG output,such as wind turbine,photovoltaic,etc. During the optimization of DG allocation,the proposed model also considers the factors of operation and dispatch to achieve the coordination of active distribution system between DG planning and operation to a certain extent. The model is solved by the bat algorithm. Case analysis for the IEEE 33-bus distribution system verifies the rationality of the proposed model and the feasibility of the bat algorithm. Compared with the traditional genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm,the bat algorithm has better global optimization performance.

Key words: distributed power generation; optimal allocation; controllable load; active distribution system; robust optimization; bat algorithm