

DOI: 10.7667/PSPC160737

考虑节能效益的企业分布式电源优化配置

田贺平, 孙舟, 王伟贤, 李香龙

(国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 针对企业供电系统分布式电源规划问题, 以企业节能效益最大化为目标, 建立企业分布式电源优化配置模型。采用改进粒子群算法进行求解, 将参数自适应调节、粒子交叉、模拟退火算法融入粒子群算法, 有效提高了粒子群算法的寻优效率。采用 IEEE33 节点配电系统进行了算例仿真分析, 仿真结果表明, 利用此模型对分布式电源进行优化配置后, 配电网损耗降低、电压质量显著提高、企业节能经济效益得到最大化提升。算例有效验证了优化配置模型与改进粒子群算法的可行性。

关键词: 企业节能; 分布式电源优化配置; 改进粒子群算法

Enterprises distributed power optimization allocation considering energy-saving benefit

TIAN Heping, SUN Zhou, WANG Weixian, LI Xianglong

(State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: In allusion to the distributed power planning of enterprises power supply and distribution system, this paper establishes distributed power optimal allocation model which maximizes energy saving benefits. Improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem, in which integrates parameter adaptive adjustment, particle cross, simulated annealing algorithm into particle swarm algorithm to improve its optimization efficiency. The IEEE33 node distribution system is simulated and analyzed. Simulation results show that using the proposed model to optimize configuration of distributed power supply, distribution network loss is reduced, voltage quality is significantly improved, and energy-saving economic benefits of the enterprises are maximized. Case analysis effectively verifies the feasibility of optimal allocation model and improved particle swarm optimization algorithm.

Key words: enterprises energy saving; distributed power optimization allocation; improved particle swarm optimization algorithm

0 引言

分布式电源具有占地少、见效快、清洁环保的优点, 企业建设分布式电源可以更有力地保障生产供电, 同时可以减少购电成本、提高经济效益。我国电力改革将积极开展分布式电源项目, 放开用户侧分布式电源建设, 鼓励企业因地制宜的投资建设分布式电源, 允许接入各电压等级配电网与终端用电系统, 但分布式电源的接入会对配电网的潮流分布、网损、电压质量以及供电可靠性等多方面造成影响^[1-2], 影响程度与分布式电源的配置情况息息相关^[3-5]。因此, 需要对企业分布式电源的位置、容量的配置进行研究, 将企业获得的收益最大化。

在分布式电源规划中, 可从经济层面、工程层面、财政层面出发, 综合考虑分布式电源特点, 结

合企业实际条件, 建立分布式电源优化配置模型^[6]。文献[7-10]从配电网运营角度出发, 以网损最小为目标构建优化模型, 对单种分布式电源进行优化配置。文献[11]考虑了不同种类分布式电源的规划, 以运行费和风险费最低为目标构建数学模型。文献[12]考虑了分布式电源接入对配电网电压质量的影响, 以有功网损和节点电压偏移最小为目标构建优化模型。文献[13]考虑了多目标分布式电源优化配置模型, 将最小化网损、最大化系统稳定性作为目标建立模型。文献[14]从供电公司角度出发, 建立了总成本最小的目标函数。文献[15]综合考虑分布式电源的经济性与环保性, 构建了以配电网年费用最低的优化模型。文献[16]以成本最低建立数学模型, 目标函数中包含变电站、配电站、线路的投资以及网损费用。文献[17]将配电网扩展费、分布式电源发

电费用以及购电费的总和最低为目标函数, 建立模型。文献[18]针对农村电网建立了包含设备投资、有功网损、购电费以及停电损失的优化模型。文献[19]综合考虑了发电商以及配电网经营者的利益, 分别建立了电网改善收益最大化模型和成本收益最大化模型。

求解分布式电源优化配置数学模型属于多目标、非线性、多约束以及非连续的大规模组合优化问题。求解算法的效率与精度将决定优化配置的结果。目前国内外的学者对优化算法进行了大量研究, 算法主要分为三大类: 传统数学优化算法、启发式优化算法与智能优化算法^[20-24]。智能优化算法凭借突出的全局寻优能力, 成为了解决组合优化问题的主流算法。应用较为广泛的智能优化算法主要有遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模拟退火算法等^[25]。文献[26]运用遗传算法进行求解, 加入了精英保留策略来保存种群中优秀个体。文献[27]将粒子群算法与模拟退火算法进行了整合, 利用模拟退火算法弥补了粒子群算法易陷入局部最优解的缺点。文献[28]运用了遗传-蚁群复合算法, 初期利用遗传算法提高搜索速度, 积累搜索经验, 后期用蚁群算法提高搜索精度。

目前, 研究分布式电源接入对企业配电网节能经济效益影响的文章较少, 本文将企业节能效益最大化定为优化配置目标, 并对粒子群算法进行改进, 进一步提高寻优算法的效率。

1 考虑节能效益的企业分布式电源优化配置模型

1.1 基本原则

分布式电源优化配置模型的建立一般考虑两个方面的因素: 一方面是经济因素, 即考虑以配电公司的年费用最小为目标, 从年费用的数值上, 来体现优化配置的经济性; 另一方面是环保因素, 分布式电源作为清洁能源, 得到了政策上的支持, 对其发电量进行一定数额的补贴, 通过这种方式来补偿分布式电源的建造和维护费用, 将其折算值纳入到年费用的计算中。将其环保性与经济性进行综合, 进而追求分布式电源接入量的最大化。

本文章站在企业的角度, 考虑分布式电源的优化配置带给企业的节能效益, 以年节能效益为目标函数, 其中包括 DG 折算到每年的建设和运维费用、配电网的年网损费用、企业从上级电网的购电费用以及 DG 发电补贴。此外, 本文基于现有配电网进行规划, 不考虑扩建及网络结构变化, 规划期 20 年。

1.2 目标函数

考虑节能效益的企业分布式电源优化配置目标函数为

$$\max ES_{\text{benefit}} = Z_b - Z_c \quad (1)$$

式中: ES_{benefit} 为配电网年节电收益; Z_b 为不含分布式电源配电网年总费用; Z_c 为含分布式电源配电网年总费用。

不含分布式电源配电网年总费用 Z_b 可以表示为

$$Z_b = C_{\text{loss}} + C_b \quad (2)$$

式中: C_{loss} 为不含分布式电源配电网年网损费用; C_b 为不含分布式电源配电网年购电费用。其中不含分布式电源配电网年网损费用 C_{loss} 可以表示为

$$C_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^k (C_p \cdot \tau_{\text{max}} \cdot \Delta P_j) \quad (3)$$

式中: k 为配电网支路数; C_p 为损耗单位电价(元/kWh); τ_{max} 为配电网年最大负荷损耗小时数(h); ΔP_j 为第 j 条支路的有功功率损耗(kW)。

不含分布式电源配电网年购电费用 C_b 可以表示为

$$C_b = C_p \cdot P_{\text{load}} \cdot T_{\text{max}} \quad (4)$$

式中: P_{load} 为配电网总有功负荷(kW); T_{max} 为配电网年最大负荷利用小时数(h)。

含分布式电源配电网年总费用 Z_c 可以表示为

$$Z_c = C_{\text{dgm}} + C_{\text{ploss}} + C_B - C_{\text{sub}} \quad (5)$$

式中: C_{dgm} 为分布式电源折合至每年的投资、运维费用; C_{ploss} 为含分布式电源配电网的年网损费用(其计算方法与 C_{loss} 相同); C_B 为含分布式电源配电网的年购电费用; C_{sub} 为新能源发电财政补贴。

分布式电源折合至每年的投资、运维费用 C_{dgm} 可以表示为

$$C_{\text{dgm}} = \sum_{i=1}^n (\delta \cdot C_{\text{dgi}} + C_{\text{mi}}) \cdot \lambda_i \cdot S_{\text{dgi}} \quad (6)$$

式中: δ 为分布式电源年设备投资费用折算系数, $\delta = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$, r 为年利率; t 为规划年限(一般取 20 年); C_{dgi} 为第 i 个分布式电源的设备投资费(元/kW); C_{mi} 为第 i 个分布式电源的年运行维护费(元/kW); λ_i 为第 i 个分布式电源的功率因数; S_{dgi} 为第 i 个分布式电源的安装容量(kVA)。

含分布式电源配电网年购电费用 C_B 可以表示为

$$C_B = C_p \cdot (P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot S_{\text{dgi}}) \cdot T_{\text{max}} \quad (7)$$

为了体现分布式发电在环境保护方面带来的效益,国家对分布式发电提出了政策上的支持,即对分布式发电进行财政补贴,新能源发电财政补贴 C_{sub} 可以表示为

$$C_{\text{sub}} = C_{\text{sp}} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot S_{\text{dgi}} \cdot T_{\text{max}} \quad (8)$$

式中, C_{sp} 为分布式发电单位电量补贴金额(元)。

1.3 约束条件

分布式电源接入配电网会对系统产生多方面的影响,例如对潮流、电压分布、支路电流、短路电流以及电能质量等方面造成的影响。本文考虑分布式电源通过逆变器接入电网,发生短路故障后,继电保护装置动作进行切除,短路电流对电网影响较小,因此暂不考虑对短路电流的约束。

(1) 潮流方程等式约束条件

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} - P_{\text{Li}} - U_i \sum_{k \in i} U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) = 0 \\ Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{Li}} - U_i \sum_{k \in i} U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} + B_{ik} \cos \delta_{ik}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{DG}i}$, $Q_{\text{DG}i}$ 分别为 DG 注入节点 i 的有功和无功功率; P_{Li} , Q_{Li} 分别为节点 i 注入的有功和无功功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; U_k 为所有与节点 i 相连的 k 节点的电压幅值; G_{ik} , B_{ik} 分别为对应支路 $i-k$ 的支路电导和电纳; δ_{ik} 为相应支路 $i-k$ 首末节点的相角差。

(2) 节点电压约束条件

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (10)$$

式中: U_i 为节点电压幅值; U_{\min} , U_{\max} 分别为节点电压 U_i 的下限和上限。

(3) 支路电流约束条件

$$0 \leq I_j \leq I_{j\max} \quad (11)$$

式中: I_j 为支路 j 上的电流; $I_{j\max}$ 为支路 j 上允许流过的最大电流。

(4) 分布式电源接入总容量约束条件

由于分布式电源出力受自然因素影响,出力具有一定的随机性,输出不够稳定,因此如果接入总容量过大,会造成电能质量和供电可靠性无法保证,因此需要对分布式电源接入配电网的总容量进行约束。

$$S_{\Sigma\text{DG}} < S_L \quad (12)$$

式中: $S_{\Sigma\text{DG}}$ 为分布式电源接入总容量; S_L 为配电网允许分布式电源接入总容量的最大值。

(5) 单个分布式电源接入容量约束条件

$$S_{\text{DG}i} \leq S_{i\max} \quad (13)$$

式中: $S_{\text{DG}i}$ 为节点 i 接入的分布式电源容量; $S_{i\max}$ 为节点 i 允许分布式电源接入的最大容量。

(6) 配电网连通和辐射性约束条件

分布式电源接入配电网后,配电网不能出现孤岛或环网,需保证正常开环运行。

约束条件中的第(5)条单个分布式电源接入容量约束,通过粒子群算法的编码方式来实现,节点电压约束、支路电流约束和分布式电源接入总容量约束通过构建惩罚函数的方式,将相应约束作为惩罚函数加入到目标函数中,具体实现方法为

$$\begin{cases} f_{U_i} = K \delta_{U_i}^2 \\ \delta_{U_i} = \max(0, U_{\min} - U_i) + \max(0, U_i - U_{\max}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} f_{I_j} = K \delta_{I_j}^2 \\ \delta_{I_j} = \max(0, I_j - I_{j\max}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} f_{\Sigma\text{DG}} = K \delta_{\Sigma\text{DG}}^2 \\ \delta_{\Sigma\text{DG}} = \max(0, S_{\Sigma\text{DG}} - S_L) \end{cases} \quad (16)$$

式中: K 为惩罚因子,当超出约束限定值时,对其进行惩罚,使其远离目标函数的最优值, K 一般取很大的正数; f_{U_i} 为节点电压约束条件的惩罚函数; f_{I_j} 为支路电流约束条件的惩罚函数; $f_{\Sigma\text{DG}}$ 为分布式电源接入总容量约束条件的惩罚函数。

由于不含分布式电源配电网年总费用 Z_0 不变,将考虑配电网年节电收益最大化转化为求含分布式电源配电网年总费用 Z_c 最小,并将相应的惩罚函数加入到 Z_c 中,处理方法如下:

$$\min Z_c = C_{\text{dgm}} + C_{\text{Ploss}} + C_B - C_{\text{sub}} + \sum_{i=1}^n f_{U_i} + \sum_{i=1}^b f_{I_i} + f_{\Sigma\text{DG}} \quad (17)$$

2 基于改进粒子群算法的求解策略

2.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是智能算法领域中除蚁群算法、蜂群算法、鱼群算法外的另一种群体智能优化计算方法。此算法是在1995年由美国 James.Kennedy 和 Russell.Eberhart 博士首先提出。PSO 算法从观察鸟群集体协作捕食行为中获得启发,鸟群在捕食的过程中,最快捷有效的策略就是搜寻附近距离食物最近的鸟的周边区域。PSO 算法即是将鸟抽象成粒子,每个粒子都代表所求问题的一个潜在解,每个粒子都存在一个与

其相对应的适应值, 适应值的大小是由适应度函数决定的。通过粒子的速度来决定粒子的移动方向和移动距离, 速度是随着不断学习自身和种群中其他粒子的移动经验进行更新和调整, 从而实现粒子在可行解空间中的寻优过程。由于 PSO 算法具有易于编程实现、收敛速度快、鲁棒性较强的优势, 被广泛应用到电力系统的多个领域中。

PSO 算法首先在可行解空间内对粒子进行初始化, 每个粒子都是优化问题的潜在最优解, 粒子的属性特征包括位置、速度和适应度值。其中适应度值由适应度函数求得, 是衡量一个粒子优劣的标准。粒子在解空间中飞行, 通过追踪个体极值 P_{best} 与群体极值 G_{best} 的方式来更新粒子位置。个体极值 P_{best} 为个体在寻优过程所历经的全部位置中, 适应度值最优的位置。群体极值 G_{best} 为整个种群的全部粒子在寻优过程中搜索到的适应度值最优的位置。粒子每次更新位置都需要计算适应度值, 将新粒子的适应度值与个体极值和群体极值的适应度值进行比较, 然后更新个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 的位置。

假定一个 D 维搜索空间, 种群中包含 n 个粒子 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其中第 i 个粒子为一个 D 维向量 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$, 是第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置, 代表优化问题的一个潜在解。通过适应度函数可以计算出每个粒子所在位置 X_i 对应的适应度值。第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$, 第 i 个粒子的个体极值为 $\mathbf{P}_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$, 第 i 个粒子的群体极值为 $\mathbf{P}_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 。

在每次迭代中, 粒子群中粒子速度与位置更新的方程如式(18)、式(19)。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (18)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (19)$$

式中: ω 为惯性权重; $d=1, 2, \dots, D$; $i=1, 2, \dots, n$; k 为当前的迭代次数; V_{id} 为粒子速度; c_1, c_2 为学习因子(非负常数), 又称加速度因子; r_1, r_2 为 0~1 之间的随机数。为保证粒子不进行盲目搜索, 一般将粒子速度和位置进行一定的限制。迭代停止条件一般取不超出最大迭代次数或到目前为止搜索到的最优适应度值满足阈值要求。

PSO 算法的核心思想是对群体行为的模拟。公式中第一部分为粒子的上一代的速度, 表示对之前速度的记忆, 如果不含第一部分, 即粒子的速度只与个体极值位置和群体极值位置有关, 那么粒子将

丧失对之前速度的记忆功能, 如果一个粒子处于全局最优, 它将保持自己的位置, 其他粒子飞向个体最优位置和群体最优位置的加权中心, 整个种群向全局位置收缩, 这样便成为了一个局部寻优算法, 失去了全局搜索能力。公式第二部分 c_1 负责调节粒子向自身历经的最好位置移动的速度。公式第三部分 c_2 负责调节粒子向全局最优位置移动的速度。 c_1 和 c_2 共同保证了粒子的自我认知性和社会学习性, 即保证了粒子的局部和全局寻优能力。

2.2 粒子群算法的改进

粒子群算法在求解不连续、不可微非线性优化问题以及求解组合优化问题时凸显出了优势, 但同时也存在着许多不足。粒子群算法局部搜索能力比较差, 精度有限。种群中所有粒子都向着当前最优方向搜索, 造成粒子的多样性较差, 寻优后期计算速度明显下降, 易陷入局部最优。粒子群算法对参数有一定的依赖性, 在粒子的寻优过程中主要依靠 P_{best} 和 G_{best} , P_{best} 的模型收敛比较慢, 容易限制搜索范围, G_{best} 的模型收敛速度快, 但容易陷入局部最优。

基于粒子群算法以上缺点, 本文采用模拟退火算法与粒子群算法相结合, 并加入参数自适应控制和粒子交叉操作的方式对基本粒子群算法进行改进。

(1) 参数自适应调节

惯性权重 ω 值控制着粒子继承先前速度的能力, 惯性权重的取值将直接影响整个算法的收敛性, 当惯性权重值较大时, 粒子的全局寻优能力强, 当惯性权重值较小时, 粒子的局部寻优能力强。本文将采取惯性权重自适应调节机制, 其调节方式为

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \left(\frac{k}{T_{max}} \right)^2 \quad (20)$$

式中: ω_{start} 为惯性权重初始值; ω_{end} 为惯性权重在最大次数迭代结束时的取值; k 为当前迭代代数; T_{max} 为最大迭代代数。一般 ω_{start} 取 0.9, ω_{end} 取 0.4 时算法性能最佳, 算法初期惯性权重值较大, 来提高全局搜索能力和搜索速度, 惯性权重值随着迭代次数的增加而变小, 保证了后期精确搜索的能力。

(2) 交叉操作

通过引入遗传算法中的交叉操作来增加粒子的多样性, 通过新的交叉策略筛选优质的粒子, 减小算法后期陷入局部最优解的可能性。在每一次的迭代中, 对所有粒子的适应度值进行从高到低的排序, 保留适应度值较高的一半粒子直接进入下一次迭代, 剩下的一半粒子进行交叉操作。交叉策略为:

随机产生一个交叉位置, 将待交叉的第一个粒子与最后一个粒子进行交叉, 第二个粒子与倒数第二个粒子进行交叉, 以此类推。计算新生成粒子的适应度值, 并将新生成的粒子与参与交叉的粒子进行适应度排序, 取适应度值较高的 $N/2$ 个粒子与未参加交叉操作的粒子组成新的种群。这样可以充分增加粒子群的种群多样化, 对每一代种群中的好个体进行了精英的保留, 为下一次交叉提供了良好的基础, 增强了种群对全局搜索的能力。

(3) 模拟退火算法与粒子群算法的结合

模拟退火算法是一种迭代自适应启发式概率性搜索算法, 算法模拟物理中固体物质退火过程, 模拟退火算法在求解非线性问题上, 具有能以较大概率寻得全局最优解的优势。在全局搜索能力上有着突出的表现, 在处理不同类型优化设计变量时, 不需要任何辅助信息, 对目标函数和约束条件函数没有特别要求, 在初始温度较高, 冷却过程温度下降慢的条件下, 能够以 1 的概率收敛到全局最优值, 并通过 Metropolis 准则, 以一定的概率来接受恶化解, 帮助算法跳出局部最优陷阱。

本文利用模拟退火算法的优势, 将其引入到粒子群算法中, 提升粒子群算法跳出局部最优陷阱的能力。策略为对每个粒子的 $Pbest$ 进行退火算法的抽样, 首先对 $Pbest$ 加入扰动, 即随机产生两个位置, 将粒子两个位置上的值进行对换得到新解, 将新解用 Metropolis 准则进行优选, 修正 $Pbest$ 的值, 将结果作为下一次迭代每个粒子的个体极值, 将其中适应度最低的值作为种群的群体极值 $Gbest$ 。

若适应度函数为 $f(X)$, 当前 $Pbest$ 的适应度值为 $f(Pbest_{old})$, 新解 $Pbest$ 的适应度值为 $f(Pbest_{new})$, 差值为 df , 则 Metropolis 准则为

$$P = \begin{cases} 1, & df < 0 \\ \exp\left(-\frac{df}{T}\right), & df \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

若 $df < 0$, 则以概率 1 接受 $Pbest_{new}$ 替换 $Pbest_{old}$; 否则以概率 $\exp(-df/T)$ 接受 $Pbest_{new}$ 替换 $Pbest_{old}$ 。

2.3 改进粒子群算法编码方式

本文对分布式电源接入企业配电网的位置和容量进行优化配置, 设企业配电网有 M 个节点, 则设 M 个变量 $X_1 \sim X_M$, 形成的一组优化变量为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 。变量采用十进制的编码形式, X_i 的取值范围为 $[0, M_m]$, $M_m = [S_{i_{max}} / S_0]$, $S_{i_{max}}$ 为节点 i 允许安装分布式电源的最大容量。若

$X_i = 0$, 则表明在该节点处不接入分布式电源; 若 $X_i \neq 0$, 则表明在 i 节点上接入 $X_i \cdot S_0$ 容量的分布式电源, 这种编码方式的优势在于可以在一个变量组里同时体现分布式电源的容量信息和位置信息。

2.4 基于改进粒子群算法企业分布式电源优化配置流程

应用改进粒子群算法对分布式电源优化配置流程如图 1 所示。

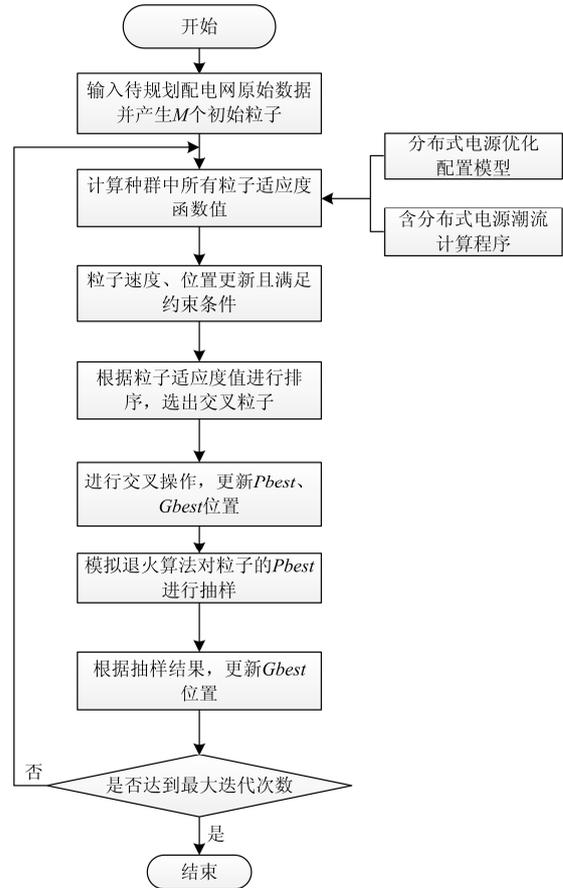


图 1 改进粒子群算法求解分布式电源优化配置流程
Fig. 1 Improved particle swarm optimization algorithm for distributed power configuration process

(1) 输入系统原始数据, 包括配电网网络拓扑结构、支路参数、节点有功和无功负荷参数和粒子群算法中的相关控制参数, 如粒子总数 N 、粒子维度 D 、最大迭代次数 K_{max} 、惯性权重 ω 的起始和结束值、学习因子 c_1 和 c_2 等。在可行域中生成初始化种群, 生成 N 个粒子, 初始化每个粒子的位置 X_i 和速度 V_i 。

(2) 根据分布式电源优化配置模型, 调用潮流程序计算每个粒子对应的适应度值, 求取当前个体极

值 P_{best} 及所对应的适应度值, 从个体极值中选出群体极值 G_{best} 及所对应的适应度值。

(3) 粒子进行速度和位置的更新, 并进行参数 ω 自适应调节。

(4) 对所有粒子的适应度值进行从高到低的排序, 保留适应度值较高的一半粒子直接进入下一次迭代, 剩下的一半粒子准备进行交叉操作。

(5) 根据交叉策略进行相应的交叉操作并生成新的种群, 同时对个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 进行更新。

(6) 对每个粒子的 P_{best} 进行退火算法的抽样, 对 P_{best} 加入扰动后形成新解, 用 Metropolis 准则对新解进行优选, 按照概率 P 接受新解, 修正 P_{best} 的值。

(7) 根据抽样结果, 对当前的全局最优 G_{best} 进行修正。

(8) 判断是否已达到所设置的最大迭代次数 K_{max} , 若已达到, 则直接输出计算结果, 否则程序转向(2), 进行下一次迭代。

3 算例分析

3.1 算例选取与参数设置

本文以工业企业为例, 选取 IEEE33 节点配电系统作为优化测试系统, 其中包含 33 个节点、32 条支路、单电源, 为辐射型三相平衡系统。电源节点作平衡节点, 网络首端基准电压为 12.66 kV, 三相功率的基准值为 10 MVA, 系统负荷总容量约为 4369.35 kVA, 其中总有功负荷为 3715 kW, 总无功负荷为 2300 kvar。网络拓扑结构如图 2 所示。

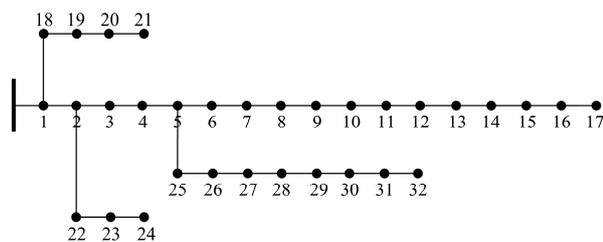


图 2 IEEE33 节点配电系统拓扑结构

Fig. 2 IEEE33 node distribution system topology

由于光伏发电存在较大的随机性, 且光伏电池均在白天发电, 不能满足一部分工业企业的生产用电特点, 因此在工业企业配电网中一般不采用光伏发电, 因工业企业地理位置较为偏远空旷, 风能资源较为丰富, 且生产中会伴随大量的冷热交换, 因此本节在考虑分布式电源优化配置时, 根据地理条件, 并结合生产需求, 选择风机与微型燃气轮机的

组合优化配置。在算例中假设风电机组安装节点候选位置为 {11, 12, 13, 14, 15, 16, 17}, 微型燃气轮机机组安装节点候选位置为 {22, 23, 24, 29, 30, 31, 32}。

算例中模型参数设定: 分布式电源的基准安装容量为 100 kVA, 分布式电源的年最大负荷损耗时间取 4500 h, 年最大负荷利用时间取 4500 h, 分布式电源接入容量限制为配电系统总容量的 30%, 统一采用 PQ 节点处理, 功率因数取 0.9, 风机机组单位设备投资费用为 0.8 万元/kW, 年运行维护费用为 0.03 元/kWh, 微型燃气轮机机组单位设备投资费用为 0.5 万元/kW, 年运行维护费用为 0.06 元/kWh, 单位电价取 0.5 元/kWh, 单位电量财政补贴取 0.13 元/kWh, 分布式电源年设备投资费用折算系数按年利率的 3% 求取。

改进粒子群算法参数设定: 学习因子 c_1 、 c_2 取 2.05, 惯性权重初始值 ω_{start} 取 0.9, 惯性权重结束值 ω_{end} 取 0.4, 种群规模 N 取 50, 最大迭代次数 K_{max} 取 100。

3.2 优化结果与分析

通过 Matlab 进行编程仿真, 经过 100 次迭代, 对分布式电源优化配置问题进行寻优, 求得最优粒子为 [0, 1, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 3, 2, 0, 2, 0], 在对应的节点位置上接入对应容量的分布式电源, 经过优化配置后的配电网结构如图 3 所示。

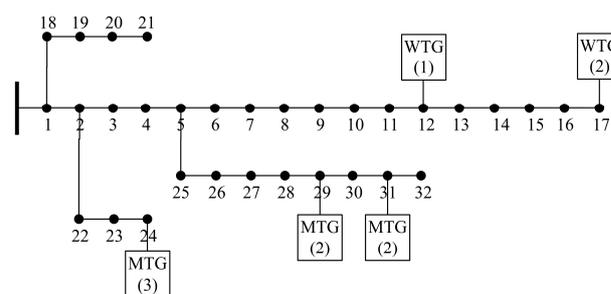


图 3 经分布式电源优化配置后配电网结构图

Fig. 3 Distribution network after optimization configuration of distributed power

(1) 验证算法的有效性

为验证改进粒子群算法的有效性, 本文将改进粒子群算法与基本粒子群算法在同一个算例上的寻优表现进行对比分析。两种算法的收敛曲线如图 4 所示。

由图 4 可以得出, 改进粒子群算法的寻优速度要明显快于基本粒子群算法, 改进粒子群算法在第 50 次迭代左右就完成了最优解的搜索过程, 而基本粒子群算法在第 80 次迭代左右才求得最优解, 在

10次迭代之前,由于基本粒子群算法惯性权重 ω 的值为1,而改进粒子群算法惯性权重初始值 ω_{start} 为0.9,因此在算法迭代初期,基本粒子群算法的全局搜索能力较强,稍快于改进粒子群算法,改进粒子群算法在10次至20次迭代之间陷入了局部最优解,但借助模拟退火算法对 P_{best} 抽样,更新 G_{best} 的方法迅速跳出局部最优陷阱,并且通过算法前期积累的经验,加快了算法的搜索速度。在40次迭代后基本寻得最优解,50次迭代后,算法在寻优精度上进一步提升,求得最优解。而基本粒子群算法粒子多样性较差,在搜索的过程中,粒子学习到好经验的过程较慢,缺乏跳出局部最优的能力,因此搜索速度较慢。通过比较可知,改进粒子群算法在寻优速度和精度上较基本粒子群算法有明显提升,从而验证了改进粒子群算法的有效性。

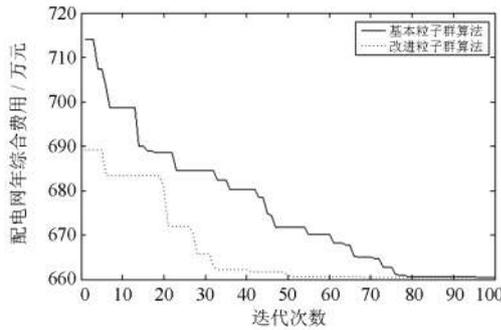


图4 改进粒子群算法与基本粒子群算法寻优收敛曲线对比
Fig. 4 Optimizing convergence curve comparison of improved particle swarm optimization with PSO

(2) 优化后配电网节点电压分析

33节点配电系统接入优化分布式电源后各个节点电压的变化如图5所示。

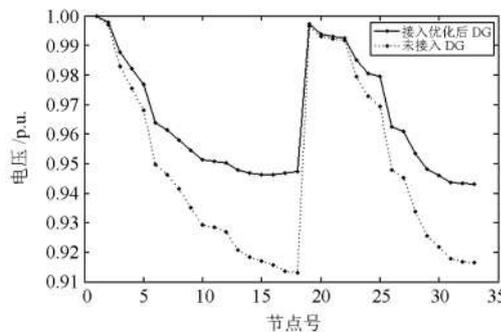


图5 接入优化后DG与未接入DG节点电压对比
Fig. 5 Node voltage contrast of optimization DG and not connected DG

图5中,通过与未接入分布式电源的情况进行比较可以明显看出,分布式电源接入配电网后,除

了变电站出口0节点外,其他节点电压都有不同程度的提升,且越靠近线路末端的节点,电压提升越明显,系统电压最小值出现在17节点处为0.9131,接入优化后DG,提升至0.9474。处于线路末端的32节点,电压值从0.9166提升至0.9431。在系统运行中,线路末端为最薄弱的点,当负荷增大时,若17节点与32节点的负荷增大,有可能导致电压崩溃现象,使系统面临威胁。但分布式电源的接入,优化提高了各个节点的电压值,其中系统最低电压值的提升尤为明显,对配电网电压起到了良好的支撑作用,提高了配电网承受负荷增长的能力,保证了系统的安全可靠运行。

(3) 优化后配电网网损分析

33节点配电系统接入优化分布式电源后各个支路网损的变化如图6所示。

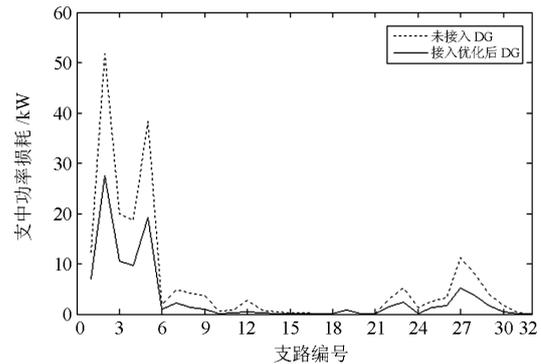


图6 接入优化后DG与未接入DG各支路有功损耗对比
Fig. 6 Contrast of power loss of each branch of optimization DG and not connected DG

图6中,通过与未接入分布式电源的情况进行比较可以明显看出,分布式电源接入配电网后,所有支路的有功损耗都有所下降,其中2号支路降损最为明显,从51.79 kW降低至27.44 kW,降损24.35 kW,有功损耗下降约47.02%。系统总的有功网损从202.68 kW降至99.70 kW,降损102.98 kW,有功损耗下降约50.81%,极大地降低了配电网的损耗。另从优化结果看,分布式电源接入负荷较大的节点,若对应于工业企业,分布式电源可以接入负荷较大的生产厂房附近,就地消纳电能。

(4) 分布式电源不同接入方案电压、网损分析

为了更好地说明分布式电源优化配置对配电网电压、网损的影响,本文选取三种不同情况进行电压、网损的对比:第一种情况为经优化配置的DG接入配电网;第二种情况为采用随机配置的DG接入配电网;第三种情况为配电网未接入DG。三种

情况对比结果如图 7、图 8 所示。

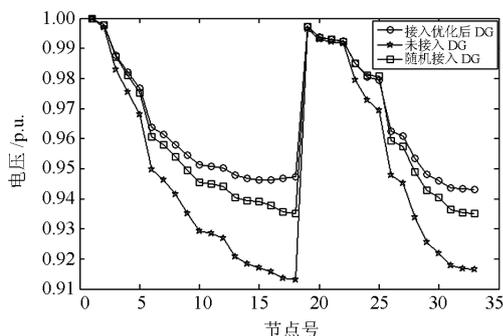


图 7 最优接入、随机接入、不接入 DG 三种情况节点电压对比

Fig. 7 Comparison of node voltage under the condition of best access, random access, and not access

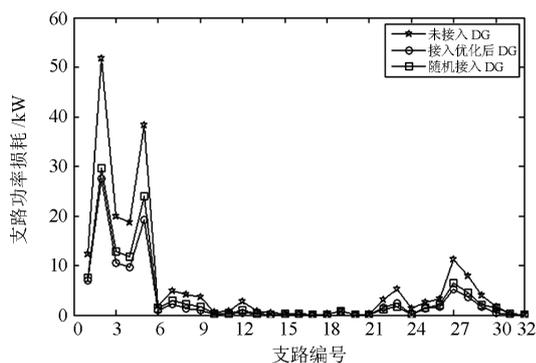


图 8 最优接入、随机接入、不接入 DG 三种情况各支路有功损耗对比

Fig. 8 Comparison of each branch power loss under the cases of optimal access, random access, and no access

图 7 中, 对三种情况下的电压进行对比, 系统节点电压最低值分别为 0.9431, 0.9351, 0.9131; 系统节点电压平均值分别为 0.9648, 0.9607, 0.9484; 优化配置 DG 的情况对于电压支撑效果最为明显, 使系统节点电压最低值提升 3.29%, 节点电压平均值提升 1.64%。图 8 中, 对三种情况下的网损进行对比, 最大支路损耗值分别为 27.44 kW, 29.73 kW, 51.79 kW; 网损数据分别为 99.70 kW, 118.5 kW, 202.68 kW; 其中优化配置 DG 的情况对于降损效果最为明显, 最大支路损耗降损 24.35 kW, 配电网网损下降 50.81%。可以明显地看出, 经优化配置的 DG 接入配电网的各项数据为最优, 采用随机配置的 DG 接入配电网其次, 配电网未接入 DG 较前两组数据较差, 在分布式电源接入配电网时, 不同的接入方案对配电网的影响效果不同, 因此对分布式电源进行优化配置是十分必要的。

(5) 分布式电源不同接入方案费用分析

优化配置 DG(方案 1)、随机接入 DG(方案 2)、未接入 DG(方案 3)三个方案年费用的对比如表 1 所示。

表 1 分布式电源接入方案费用对比

Table 1 Comparison of the cost of distributed power

	access program		
	DG 优化配置 (方案 1)	DG 随机接入 (方案 2)	未接入 DG (方案 3)
风电机组接入位置	12,17	14	无
风电机组接入容量	100,200	200	0
微型燃气轮机机组接入位置	24,29,31	24,29	无
微型燃气轮机机组接入容量	300,200,200	400,300	0
分布式电源设备投资、运行维护年均费用/万元	57.83	51.57	0
年网损费用/万元	22.43	26.66	45.61
年购电费用/万元	633.38	653.63	835.88
财政补贴费用/万元	52.65	47.39	0
年综合费用/万元	660.99	684.47	881.49
年节能效益/万元	220.50	197.02	0

从表 1 中数据可以看出, 方案 1 接入 DG 容量较方案 2 多 100 kW, 因此在分布式电源的年投资和运行维护费上比方案 2 多出 6.62 万元, 但相应地获得财政补贴费用高于方案 2, 为 5.26 万元, 在网损费用的收益上, 方案 1 高于方案 2, 为 4.23 万元, 方案 1 的 DG 接入容量高, 继而年购电费用比方案 2 节省 20.25 万元, 综合总年费用, 方案 1 较方案 2 节省 23.48 万元, 方案 1 的年节能收益为 220.50 万元, 节约年费用 25.01%。因此采用分布式电源优化配置可以显著地提升节能效果, 另从最优方案 1 中可以看出, 分布式电源类型主要以微型燃气轮机机组为主, 原因是微型燃气轮机机组比风机机组的发电成本低。因此在实际企业分布式电源的规划中, 结合实际地理条件、自然条件并充分考虑经济因素对分布式电源进行优化配置, 可以取得显著的节能效果, 并为企业带来丰厚的经济效益。

4 结论

本文针对企业供配电系统分布式电源规划问题, 构建了以最大化企业节能效益为目标的分布式电源优化配置模型。模型中涵盖分布式电源的设备投资和运行维护费、网损费用、从上级电网购电费用以及新能源财政补贴费用, 模型能够充分体现分布式电源优化配置后为企业带来的节能经济收益。本文基于粒子群算法进行了如下改进: 通过参数自

适应调节提高算法初期搜索效率, 增加算法后期搜索精度。通过引入交叉操作增强粒子多样性并保留精英个体。通过模拟退火算法提高算法跳出局部最优解的能力。本文选用 IEEE33 节点配电系统作为算例进行了仿真分析, 首先对比了基本粒子群算法与本文改进粒子群算法在优化同一目标时的寻优效率, 接着对不接入、随机接入和优化配置分布式电源三种情况下配电网的电压、网损与节能效益进行对比分析。有效验证了优化配置模型与改进粒子群算法的可行性。

参考文献

- [1] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-74.
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-74.
- [2] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [3] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.
CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.
- [4] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [5] 胡吟, 韦钢, 言大伟, 等. 分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 100-105.
HU Yin, WEI Gang, YAN Dawei, et al. Distributed power in distribution network optimization[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40 (11): 100-105.
- [6] AULT G W, MCDONALD J R. Planning for distributed generation within distribution networks in restructured electricity market[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(2): 52-54.
- [7] 张勇, 吴淳. 分布式发电机在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 33-37, 43.
ZHANG Yong, WU Chun. DG in distribution network optimization[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (11): 33-37, 43.
- [8] 李文琦. 含分布式发电的配电网网损分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
LI Wenqi. Distribution network with distributed Generation loss analysis[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [9] 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 Yong, YANG Jingyan, ZHANG Dongqing. Optimal planning of distributed power based on active power loss[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 12-16.
- [10] ACHARYA N, MAHAT P, MITHULANANTHAN N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(10): 669-678.
- [11] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.
WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Practical Method for access capacity and optimization of distributed power arrangement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [12] 杨国金. 分布式电源接入配电网的优化配置研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
YANG Guojin. Optimization of power system with distributed power access[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [13] 程杉. 含分布式电源的配电网多目标优化问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
CHENG Shan. Distribution network comprising multi-objective optimization problem of distributed power[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [14] EL-KHATTAM W, BHATTACHARYA K, HEGAZY Y, et al. Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1674-1684.
- [15] 崔艳龙. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
CUI Yanlong. Planning distribution network containing distributed generation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [16] 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. Planning distribution network containing distributed generation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [17] 王真. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- WANG Zhen. Planning distribution network containing distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [18] 唐巍, 薄博, 丛鹏伟, 等. 含分布式发电接入的农村电网多目标规划[J]. 农业工程学报, 2013(增刊 1): 132-137.
- TANG Wei, FU Bo, CONG Pengwei, et al. Rural power grid multi-objective programming with distributed generation access[J]. Agricultural Engineering, 2013(S1): 132-137.
- [19] 张立梅, 唐巍, 王少林, 等. 综合考虑配电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 23-28.
- ZHANG Limei, TANG Wei, WANG Shaolin, et al. Considering the distribution companies and independent power producers benefit distributed power plan[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 23-28.
- [20] 武志锴. 含分布式发电的配电网优化规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- WU Zhikai. Distribution network with distributed generation optimal planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [21] 郭宁, 滕欢, 李基康. 考虑不同群体效益的微电网经济调度模型研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 40-46.
- GUO Ning, TENG Huan, LI Jikang. Economic dispatching model research of microgrid concerning about different beneficiaries[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 40-46.
- [22] 苏海滨, 高孟泽, 常海松. 基于粒子群算法的微电网有功无功下垂控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 365-369.
- SU Haibin, GAO Mengze, CHANG Haisong. Microgrid droop control of active and reactive power based on PSO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 365-369.
- [23] 胡殿刚, 秦睿, 黄亨, 等. 基于免疫记忆粒子群优化算法的风火联合系统的多目标优化调度[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 20-26, 30.
- HU Diangang, QIN Rui, HUANG Ting, et al. Wind Power integrated with thermal system multi-objective optimal dispatch based on immune memory particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 20-26, 30.
- [24] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.
- KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery based on improved genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.
- [25] 陈春泉, 殷豪, 陈清泉. 分布式电源优化配置研究现状与展望[J]. 广东电力, 2013, 26(3): 45-49.
- CHEN Chunquan, YIN Hao, CHEN Qingquan. Distributed power optimization research situation and prospects[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(3): 45-49.
- [26] 徐虹, 芦晶晶, 孙宇斌, 等. 含分布式电源的智能配电网的多目标优化调度[C] // 2012 第七届中国电工装备创新与发展论坛论文集, 2012: 7-9.
- XU Hong, LU Jingjing, SUN Yubin, et al. Intelligent containing distributed power distribution grid multi-objective optimization scheduling[C] // 2012 Seventh China Electrical Equipment Innovation and Development Forum Proceedings, 2012: 7-9.
- [27] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
- LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization algorithm in distributed power siting and sizing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [28] 陈春泉. 配电网分布式电源优化配置[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- CHEN Chunquan. Distributed power distribution network optimization[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-08-25

作者简介:

田贺平(1991-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源、电动汽车。E-mail: 1040266334@qq.com

(编辑 魏小丽)