

Multi-Objective Optimization of Wind/PV/Gas/Storage Micro-Grid Based on Improved Particle Swarm Optimization

Hai Xu¹, Liang Wang¹, Zhen Li², Shuqing Ding³

¹Jiangsu Keneng Power Engineering Consulting Co. LTD., Nanjing Jiangsu

²State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou Power Supply Company, Dezhou Shandong

³Nanjing Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Nanjing Jiangsu

Email: 61204@njnu.edu.cn

Received: Dec. 5th, 2018; accepted: Dec. 20th, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

Based on the economy, reliability and environmental protection of independent micro-grid operation, a multi-objective optimal configuration model with solar energy, wind energy, micro gas generator and energy storage as distributed power source was established. By analyzing the operating characteristics of the distributed power supply of wind and light storage, the annual temperature, photovoltaic intensity and wind speed are taken as inputs to obtain the optimal configuration scheme of multi-objective of independent micro-grid. To solve the optimization problem, an improved particle swarm optimization algorithm is proposed. The results show that the improved particle swarm optimization algorithm has the advantages of strong global optimal search ability and fast optimization. The effectiveness of the proposed model and the proposed method is verified by simulation analysis.

Keywords

Multi-Objective Optimization, Wind and Light Storage, Distributed Power Supply, Improved Particle Swarm Optimization

基于改进粒子群算法的风光燃储微电网多目标优化研究

徐海¹, 王亮¹, 李振², 丁树庆³

¹江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京

²国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州

³南京特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京

Email: 61204@njnu.edu.cn

收稿日期: 2018年12月5日; 录用日期: 2018年12月20日; 发布日期: 2018年12月28日

摘要

基于独立微电网运行的经济性、可靠性、环保性, 建立了以太阳能、风能、微型燃气轮机、储能为分布式电源的多目标优化配置模型。通过分析风光燃储分布式电源的运行特性, 以年气温、光照强度、风速作为输入, 得到独立微电网多目标的最优配置方案。针对优化处理问题, 提出了一种改进粒子群算法。结果表明, 改进粒子群算法具有全局最优搜索能力强、寻优速度快的优点。通过数据仿真分析, 证实了所建模型与所提方法的有效性。

关键词

多目标优化, 风光燃储, 分布式电源, 改进粒子群算法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

集中发电、远距离输电和大电网互联的电力系统仍是电能生产、输送和分配的主要方式。随着人类社会的快速发展, 人们对于电能需求、电能质量及电能可靠性的要求越来越高。然而, 电力负荷的激增导致的电力短时供应不足与电能质量下降、传输过程电能损耗大、局部故障引发的大面积停电等问题均体现出大电网在运行过程中的缺点。为了弥补上述缺点, 微电网应运而生。微电网是指由多种分布式电源、储能系统、能量转换装置、负荷及监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的独立自治系统, 既可以与电网并网运行, 也可以孤岛运行[1]。

目前, 国内外在分布式电源的规划及运行策略方面研究较多, 但是关于不同类型的分布式电源优化配置的文献却相对较少。文献[2]以微电网经济性、环保性和能源利用效率综合最优为目标, 采用种群移动、自适应步长、基因变异以及按比例系数缩减搜索空间等方法来改进仿电磁学算法的寻优速度及全局搜索能力。文献[3]以发电成本、环境成本和甩负荷补偿成本为子目标函数, 在粒子群优化算法中加入种群杂交策略对多目标函数进行求解。文献[4]将微电网等年值成本作为经济性指标及新能源渗透率作为环保性指标建立微电网多目标优化配置模型, 采用非劣排序遗传算法和最大模糊满意度算法进行多目标求解。文献[5]围绕风光柴储微电网系统容量配置问题, 提出了包含微电网全寿命周期内的总成本现值、负荷容量缺失率和污染排放的多目标优化设计模型, 通过多目标遗传算法进行求解。

基于以上背景, 本文在分析风光燃储各种分布式电源的运行特性的基础上, 建立了以微电网经济性、可靠性、环保性为目标的量化函数, 并采用改进粒子群算法对其求解, 得到风光燃储独立微电网分布式电源多目标优化配置方案。通过算例分析研究, 证实了所建模型的正确性和所提方法的有效性。

2. 风光燃储独立微电网电源模型

2.1. 光伏阵列模型

光伏阵列主要依靠光生伏打效应将太阳能辐射转化为电能。光伏阵列的输出功率主要与光照强度和温度有关，其大小可以近似描述为[6]：

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} P_{STC} \frac{G_c(t)}{G_{STC}} \left[1 + k(T_c(t) - T_{STC}) \right] \quad (1)$$

式中： $P_{PV}(t)$ 为工作点的输出功率； η_{PV} 为功率降额因素； STC 为生产厂家提供的标准测试条件，特指光照强度 G_{STC} 为 1 kW/m^2 ，光伏电池表面温度 T_{STC} 为 25°C ； P_{PV} 为标准测试条件下光伏阵列的额定输出功率， $G_c(t)$ 为工作点实际光照强度； k 为功率温度系数； $T_c(t)$ 为工作点的光伏电池表面温度。

2.2. 风力发电机模型

风力发电机的原理是将风能转化为风力机的机械能，然后再通过发电机转化为电能。大量的实验数据表明，风力发电机的输出功率主要取决于实际风速的大小。将风力发电机的输出功率与风速之间的关系[7]可近似化简为：

$$P_{WG}(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) \leq v_{ci}, v(t) \geq v_{co} \\ P_r \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_r 为风机的额定功率； v_{ci} 为切入风速； v_r 为额定风速； v_{co} 为出风速。

2.3. 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机一般是指单机出力在 30 kW 到 350 kW 之间的热力装置。本文中，微型燃气轮机只作为发电装置，而不提供任何制冷制热。在标准大气压即 0°C 、 101.325 kPa 下，燃料成本与实际输出功率之间的表达式如下。

$$C_{MT} = (C_{ng}/L) P_{rc} / \eta_e \quad (3)$$

式中： P_{rc} 表示微燃气轮机在某一时段发出的实际功率； C_{MT} 表示当微型燃气轮机发出 P_{rc} 的有功功率微型燃气轮机所消耗的燃料费用； C_{ng} 表示的是一标准立方米天然气的价格； L 表示的是一标准立方米天然气完全燃烧后产生的热量； η_e 表示微型燃气轮机的能量转换效率。

2.4. 储能装置模型

储能装置作为微电网不可或缺的一部分，它既能够很好地平抑多变的风机和光伏的输出功率，也可以在电能短缺时起到短时支撑的作用。储能装置的种类有很多，但蓄电池仍是当前人们使用最多的储能装置。本文采用蓄电池作为储能装置，其运行过程中 t 时刻的荷电量可由公式(4) [8]表示：

$$P_{SB}(t) = \begin{cases} P_{SB}(t-1) + \left(P_t(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} \right) \cdot \eta_{sb} \\ P_{SB}(t-1) - \left(\frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} - P_t(t) \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_{SB}(t)$ 为 SB 在 t 时刻所存储的能量； $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷； η_{sb} 和 η_{inv} 分别为 SB 的充电效率和逆变器效率； $P_i(t)$ 为风光燃混合系统在 t 时刻的供电量。

3. 微电网的多目标优化配置模型

3.1. 目标函数

微电网中分布式电源的配置，应在满足基本运行条件下，保证其建设和运行成本最低。但由于光伏及风机出力受天气条件影响较大，输出功率具有随机性、波动性，不能很好的保障微电网的供电可靠性。此外，微燃机运行过程中造成了以 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 为主的环境污染问题。针对上述问题，本文以混合微电网(包含风机、光伏阵列、储能装置以及微型燃气轮机)的经济性、可靠性和环保性为目标函数，建立微电网分布式电源多目标权重系数优化配置模型。这里的经济性主要由分布式电源的等年值设备投资成本体现，系统供电可靠性量化为停电损失赔偿费用，环保性则通过将微电网发电排放的污染物折算为污染排放成本展现。微电网的多目标函数表达式为：

$$\min F(X) = \min \sum_{i=1}^3 w_i f_i(x) \quad (5)$$

式中： w_i 为多目标函数中各项的权重系数， $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

3.1.1. 等年值设备投资成本

等年值设备投资成本包含设备初始投资成本、运行和维护成本、设备替换成本以及燃料消耗成本。函数表达式为：

$$f_1(x) = C_{DG} + C_{OM} + C_R + C_F \quad (6)$$

式中： C_{DG} 、 C_{OM} 、 C_R 、 C_F 分别对应表示分布式电源的设备投资成本、运行和维护成本、设备替换成本和燃料消耗成本。

3.1.2. 停电损失费用

从供电侧考虑，停电赔偿成本主要为对用户停电造成的损失所进行的赔偿。

在微电网运行过程中，为确保系统的稳定运行，当发电功率不足时，可以采取切负荷的措施，并根据停电负荷的类型给予一定的赔偿，可表示为：

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{8760} P_{LOLP} \cdot C \quad (7)$$

式中： P_{LOLP} 为系统电量不足功率， C_o 为供电不足赔偿系数。

3.1.3. 污染排放成本

微燃机所形成的污染排放主要考虑 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 。为了体现污染排放对环境的影响，将其折算为污染排放成本，即

$$f_2(x) = \sum_{i \in N_{DG}} \sum_{j \in m} (s_j v_j) x_i p_i \quad (8)$$

式中： m 为废气污染排放的种类； s 为单位废气排放处罚费用； v 为污染排放量； x 为分布式电源数目； p 为单个分布式电源输出功率。

3.2. 约束条件

3.2.1. 分布式电源出力约束

对于任意时刻 t ，第 i 种分布式电源的出力 $P_i(t)$ 需满足其最大输出约束：

$$P_i(t) \leq p_i x_i \quad (9)$$

式中： p_i 为分布式电源的单机容量； x_i 为第 i 种电源的数量。

3.2.2. 分布式电源数目约束

对于任意时刻，各分布式电源运行数量不能超出给定的范围。因而对分布式电源数目进行如下约束：

$$N_{DG,\min} \leq N_{DG} \leq N_{DG,\max} \quad (10)$$

3.2.3. 储能装置运行约束

蓄电池的充放电速率对其寿命有着不可忽视的影响。为了提高蓄电池的使用寿命，降低蓄电池的运行维护成本，需对蓄电池做如下约束：

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \\ P_{ch}(t) \leq 0.2E_{Bat}/\Delta t \\ P_{dch}(t) \leq 0.2E_{Bat}/\Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中： SOC_{\max} 表示蓄电池的最大容量比例； SOC_{\min} 表示蓄电池的最低容量比例； $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dch}(t)$ 分别表示蓄电池的充电和放电功率。

4. 算法优化

4.1. 基本粒子群算法

粒子群优化(PSO)算法是一种群智能算法，其基本思想是对鸟群捕食行为的仿生模拟，通过鸟群之间的集体协作，快速搜寻并寻找到最优解[9]。算法中，粒子在搜索空间中的位置是优化问题的迭代解，其速度决定粒子飞翔的方向和距离，使各个粒子随着当前的全局最优位置以及自身的飞行经验在解空间中进行寻优。初始化时，每个粒子的位置和速度随机分布于解空间，然后根据个体最优极值和全局最优极值来动态调整自身的位置和速度[10]。粒子群算法由三部分组成，第一部分为微粒先前行为的惯性；第二部分为认知部分，表示微粒本身的思考；第三部分为社会部分，表示微粒间的信息共享与相互合作。基本 PSO 算法中第 i 个粒子在 $k+1$ 时刻的第 d 维邻域函数更新计算公式如下[11]：

$$\begin{cases} v_{id}^{(k+1)} = v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 \cdot (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 \cdot (p_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \end{cases} \quad (12)$$

式中， c_1 和 c_2 为两个加速常数； r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的两个随机数； $v_{id}^{(k)}$ 和 $x_{id}^{(k)}$ 分别为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的飞行速度和位置的第 d 维分量； $p_{id}^{(k)}$ 和 $p_{gd}^{(k)}$ 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的最好位置 p_{best} 和群体最好位置 g_{best} 的第 d 维分量。

基本粒子群的突出优点是早期收敛速度特别快，缺点是局部搜索能力差，算法后期收敛速度缓慢，使得求解精度降低。

4.2. 改进粒子群算法

基于基本粒子群存在的缺点，Shi Y 等人提出了带有惯性权重 w 的粒子群算法，该算法在一定程度上解决了基本粒子群算法局部搜索能力弱的问题，并提高了求解精度。目前，设置惯性权重最广泛的方法

是 Shi Y 和 R C Eberhart 提出的线性递减惯性权重设置方法,然而搜索是一个非线性高度复杂的过程,线性递减惯性权重并不能真正反映实际的搜索过程,也不能更好的体现算法的全局和局部搜索能力。针对以上问题,本文提出了一种非线性递减调整惯性权重的改进粒子群算法,改进粒子群算法的更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{(k+1)} = w^{(k)} \cdot v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 \cdot (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 \cdot (p_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \end{cases} \quad (13)$$

$$w^{(k)} = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times \exp\left(-25 \times \left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^3\right) \quad (14)$$

式中, $w^{(k)}$ 为 k 时刻的惯性权重; w_{\max} 、 w_{\min} 分别为惯性权重的上下限值。

改进粒子群算法的流程如下:

- 1) 初始化一个规模为 N 维数为 D 的粒子群, 随机初始化种群中各粒子的位置和速度。
- 2) 计算每个粒子的适应值。
- 3) 对每个粒子将其适应值和其经历的最好位置 p_{best} 的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前的个体最好位置。
- 4) 对每个粒子将其适应值和全局经历的最好位置 g_{best} 大的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前的全局最好位置。
- 5) 使用式(13)更新每个粒子的速度和位置。
- 6) 使用式(14)更新惯性权重。
- 7) 若满足终止条件, 搜索停止, 输出结果; 否则回到步骤 2 继续执行。

5. 算例分析

5.1. 算例描述

选取西北部某偏远地区的独立微电网系统作为研究对象。根据该区域全年预测的风速、光照强度、环境温度及用电负荷需求, 拟合得到各种分布式电源的输出功率。综合微电网运行过程中的经济性、可靠性和环保性目标, 采用改进粒子群算法求解, 最终得出风光燃储微电网多目标优化配置结果。当地一年的光照、温度、风速及用电负荷变化情况分别如图 1~4 所示, 微电网中各分布式电源和各污染物的参数分别如表 1~2 所示。

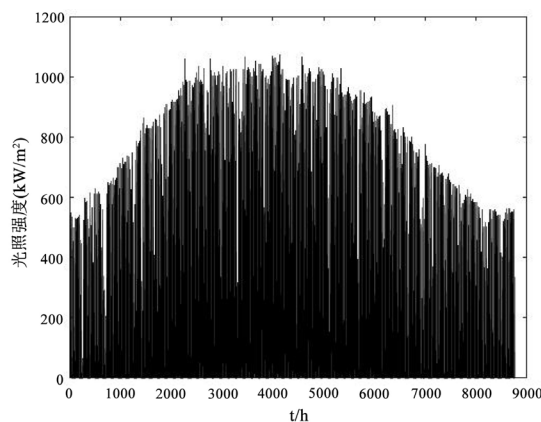


Figure 1. Annual light curve
图 1. 全年光照变化曲线

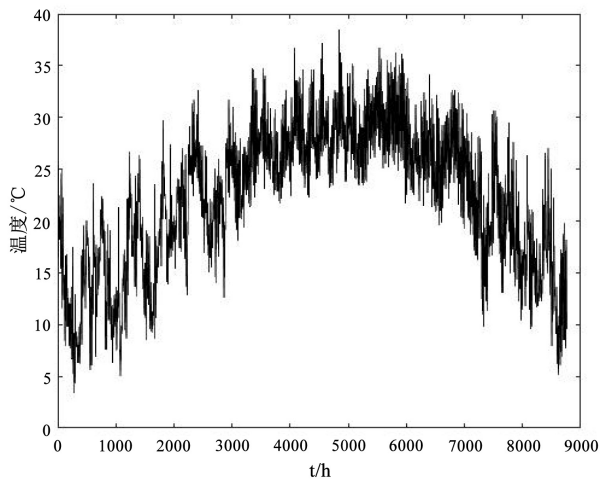


Figure 2. Annual temperature gauge curve
图 2. 全年温度表变化曲线

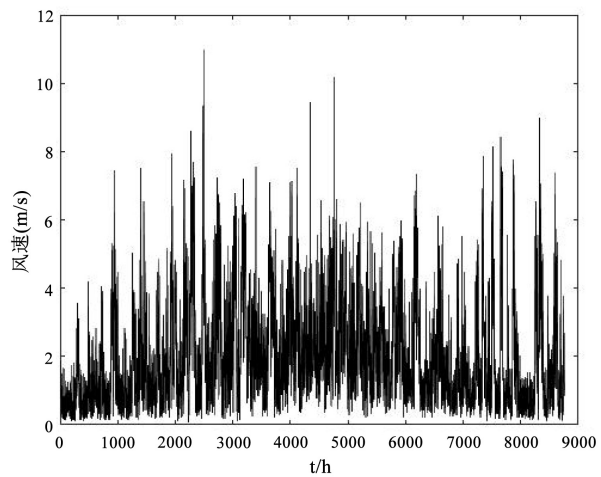


Figure 3. Annual wind speed curve
图 3. 全年风速变化曲线

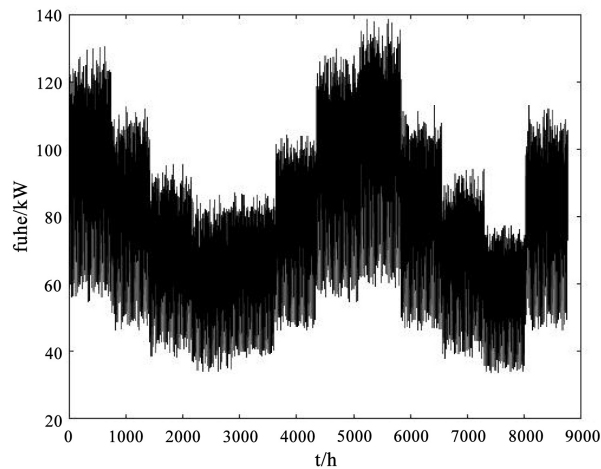


Figure 4. Annual electricity load curve
图 4. 全年用电负荷变化曲线

Table 1. Distributed power parameters**表 1.** 各分布式电源参数

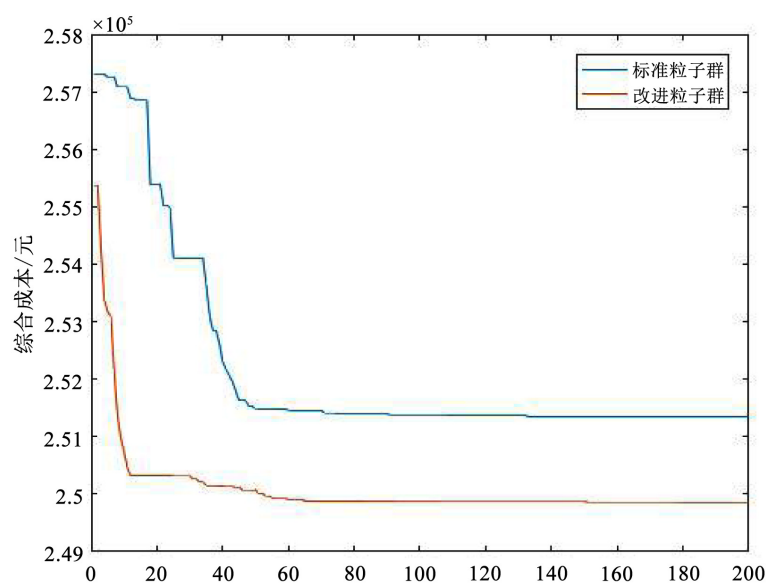
DG	设备投资成本(元/kW)	替换成本(元/kW)	运维成本(元/kW)	寿命(年)
风机	4535	0	35.4	20
光伏	5000	0	88.7	20
蓄电池	567	453.6	5.67	2.5
燃气轮机	6300	1000	43.8	10

Table 2. Parameters of various pollutants**表 2.** 各污染物参数

污染物类型	CO ₂	NO _x	SO ₂
污染费用(元/kg)	0.21	62.946	14.842
污染物(g/kWh)	649	9.8	0.26

5.2. 优化结果比较

在多目标优化过程中，函数中各指标所占权重大小对优化结果有着一定的影响。为了更好地体现出改进粒子群算法的优点，本文将微电网运行过程中的经济性、可靠性、环保性三个目标以同样的权重系数进行优化。如图 5，改进粒子群算法较标准粒子群算法具有更好的全局搜索能力及更快的寻优速度。

**Figure 5.** Standard particle swarm and improved particle swarm optimization curve**图 5.** 标准粒子群和改进粒子群优化曲线

6. 结语

本文主要围绕风光燃储独立微电网系统，根据各分布式电源的运行特征，综合经济性、可靠性、环保性指标，提出了微电网多目标优化配置方法。针对基本粒子群容易产生早熟收敛从而陷入局部最优的缺点，提出了一种非线性递减的惯性权重的改进粒子群算法。分析表明，改进粒子群算法具有全局最优、搜索能力强、寻优速度快等特点，证实了所建模型的正确性和所提方法的有效性。不过本文在优化过程中对不同目标采用了等权重法，在实际工程应用中，还应根据不同情况设计不同的权重系数。

参考文献

- [1] 李瑞生, 马凯琪, 于芑, 等. 交直流混合微电网系统建模及协调控制研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(20): 92-99.
- [2] 吕智林, 谭颖, 李捷, 等. 基于 Markov-ELM 的独立混合微电网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1927-1936.
- [3] 董默. 微电网多目标优化运行研究[J]. 智能电网, 2015, 3(2): 107-111.
- [4] 张有兵, 包侃侃, 杨晓东, 等. 独立微电网多目标优化配置[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(6): 619-623.
- [5] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 26(6): 85-92.
- [6] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2011, 37(7): 1775-1782.
- [7] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微电网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 63-70.
- [8] 宋旭日, 叶林. 风/光/柴多能互补发电系统优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(5): 66-71.
- [9] Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, 27 November-1 December 1995, 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [10] 邓辉平, 江冰, 蔡昌春. 海岛智能微电网多源协调优化运行研究[J]. 信息技术, 2017, 15(4): 104-109.
- [11] Shi, Y. and Eberhart, R.C. (1999) Empirical Study of Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, Washington, DC, 6-9 July 1999, 1945-1950. <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.785511>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org