

# 基于非线性扩散粒子群算法的 光伏微网并网点恒定潮流控制

郑凌蔚<sup>1</sup>, 刘士荣<sup>2</sup>, 徐青鹤<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 自动化研究所, 上海市 徐汇区 200237;  
2. 杭州电子科技大学 自动化研究所, 浙江省 杭州市 310018)

## Constant Power Flow Control at Grid-Connected Point of Photovoltaic Microgrid Based on Nonlinear Diffusion Particle Swarm Optimization

ZHENG Lingwei<sup>1</sup>, LIU Shirong<sup>2</sup>, XU Qinghe<sup>2</sup>

(1. Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Xuhui District, Shanghai 200237, China;  
2. Institute of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** Connecting lots of distributed generations, which vary with natural conditions, to power grid will have unfavourable affects on the latter. By means of adopting constant power flow control for microgrid at grid-connected point can greatly reduce the affects of distributed generations that varies with natural conditions on power grid. A constant power flow control system at grid-connected point, which consists of photovoltaic (PV) system, follow-up power control of diesel generator, follow-up control of battery power and follow-up power control of super capacitor, as well as a nonlinear diffusion particle swarm optimization algorithm are proposed. Taking minimization of power flow error at grid-connected point is taken as objective, the nonlinear diffusion particle swarm optimization algorithm is used to parameter design of system controller. Using above-mentioned method, a simluation platform for an actual PV microgrid is built, and based on the PV generation data in a certain time period and the measured local load data, the simulation of grid-connected operation is performed to verify the proposed method. Simulation results show that the proposed constant power flow control method and the optimal algorithm are available.

**KEY WORDS:** PV microgrid; grid-connecting point; constant power flow; non-linear diffusion particle swarm optimization

**摘要:** 大量自然变动电源接入电网会对电网的稳定运行产生影响, 通过对微网实现并网点恒定潮流控制, 可大大降低自然变动电源对电网的影响。文章用光伏发电系统、柴油机发电功率跟随控制、蓄电池功率跟随控制和超级电容器功率跟

随控制组成了并网点恒定潮流控制系统, 提出了非线性扩散粒子群算法, 以并网点潮流误差最小化为目标, 将非线性扩散粒子群优化算法用于系统控制器参数设计。运用以上方法对一个实际的光伏发电微网建立了仿真平台, 并以该系统某一时间段的光伏发电和本地负荷实测数据为基础对上述方法进行了并网运行仿真验证, 结果表明了文章提出的恒定潮流控制及优化算法是有效的。

**关键词:** 光伏微网; 并网点; 恒定潮流; 非线性扩散粒子群优化

## 0 引言

可再生能源的高效利用在未来分布式发电技术的发展中占有重要地位, 然而, 以太阳能、风能为代表的可再生能源大多具有间歇性和不确定性, 直接接入配电系统, 可能使公共电网出现双向潮流, 会对公共电网的潮流控制<sup>[1]</sup>、电压稳定性<sup>[2-4]</sup>、保护<sup>[5]</sup>、电力市场运行<sup>[6]</sup>、规划设计<sup>[7]</sup>等方面带来负面影响, 甚至危及公共电网安全。如何处理大量分布式电源并应对其发电的间歇性, 以确保电网的可靠性和人身、设备的安全是分布式发电技术面临的问题<sup>[8-10]</sup>。

微型电网(简称微网)将分布式电源、储能装置和本地负荷整合在一起, 可以并网运行, 也可以孤岛运行, 为降低分布式电源对电网的影响提供了条件。通过微网内部的功率平衡控制, 可实现并网点潮流恒定。当并网点潮流为恒定值时, 微网可以看作一个稳定的负荷, 从而可以降低随机潮流对微网带来的各种不利影响, 通过各种储能元件的合理配置, 可大大提高可再生能源的利用比例, 因此, 并

网点恒定潮流控制是微网并网运行成败的关键。

目前对微网并网点恒定潮流控制的研究中多采用频率分析法选择控制参数，其参数选择过程较复杂，控制精度有待提高<sup>[11]</sup>。基本粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)在面对复杂程度高的优化问题时，存在易陷入局部最优，搜索精度不高等不足，因此本文提出一种新的非线性扩散粒子群算法(nonlinear diffusion particle swarm optimization, NDPSO)，设计恒定潮流控制器，给出并网点恒定潮流控制的目标函数，并利用非线性扩散粒子群算法完成参数优化。对由光伏发电(photovoltaic, PV)、柴油发电机(diesel generation, DG)、蓄电池(battery, BAT)、超级电容器(electric double layer capacitor, EDLC)构成的微网建立仿真平台，以某一时间段的光伏发电和负荷的实测数据为基础，对微网并网点恒定潮流控制进行仿真，以验证上述方法的有效性。

### 1 微网的结构

微网主要由分布式电源、储能装置及本地负载组成<sup>[12]</sup>，典型微网结构如图 1 所示，虚线内为微网。分布式电源、储能装置及负荷均接于微网同一交流母线，通过并网点开关与配电网母线相连。除此之外，根据实际需要，微网还可以有多种结构<sup>[13]</sup>。

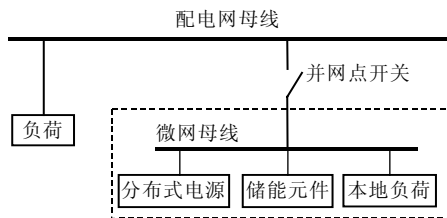


图 1 微网的结构  
Fig. 1 Schematic diagram of microgrid

分布式电源可以是太阳能、风力、潮汐能、小型水利、生物质能等可再生能源，也可以是液体或气体为燃料的内燃机、微型燃气轮机等。

目前微网中用得较多的储能装置主要包括蓄电池、超级电容器、飞轮、超导等。蓄电池是目前使用最广泛的储能装置，技术成本和投资成本较低；超级电容器属于物理储能器件，具有很高的响应速度、功率密度和充放电效率<sup>[14]</sup>；飞轮储能技术是 20 世纪 90 年代提出的，通过动能和电能的相互转化储能，突破了化学电池的局限，用物理方法实现储能<sup>[15]</sup>；超导储能通过电磁相互转化完成电能的储存和释放，充放电速度快，但能量密度不及其它储能形式，因此有将超导储能与蓄电池储能配合使用的例子<sup>[16]</sup>。

## 2 光伏微网并网点恒定潮流控制模型

### 2.1 光伏微网并网点恒定潮流控制

并网点恒定潮流控制即根据分布式电源及补偿装置的不同响应特性对各装置的输出功率进行控制，以平抑 PV 及负荷波动，从而实现系统内部的供需平衡，达到并网点潮流恒定。以典型光伏发电微网为例，若以内燃机发电机组或微型燃气轮机发电机组作为微网的基本稳定电源，以蓄电池和超级电容器为储能装置，光伏发电电源因其自然变动性，通常当作不确定负荷，与实际负荷功率合并处理，并假定光伏发电总是以最大功率输出，不可控制。图 2 给出了柴油发电机作为基本稳定电源时，并网点潮流恒定控制的系统结构图。图中： $P_{GS}$  为并网点潮流设定值； $P_G$  为并网点潮流实际值； $P_{GE}$  为并网点潮流误差，即  $P_{GE} = P_{GS} - P_G$ ； $P_{DG}$  为柴油发电机输出功率； $P_{BAT}$  为蓄电池输出功率； $P_{EDLC}$  为超级电容器输出功率； $P_{PV}$  为光伏发电电源输出功率； $P_{Load}$  为负荷功率。

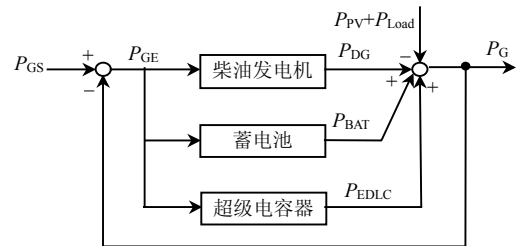


图 2 光伏微网并网点恒定潮流控制模型  
Fig. 2 Constant power flow control model of point of common coupling PV microgrid

作为光伏发电外的主要电源，内燃机发电机组或微型燃气轮机发电机组在并网运行时，承担了负荷的基荷部分，在独立运行时起到黑启动过程中建立最初的电压和频率的作用。蓄电池和超级电容器在系统中起到补偿负荷波动的作用，蓄电池主要承担周期较大(比如周期为数 min)的负荷波动，而超级电容器则承担瞬间(s 级)负荷波动。

### 2.2 单元控制模型

#### 2.2.1 柴油发电机功率跟随控制系统模型

对于柴油发电机，根据拟合精度的不同可有 1 阶、2 阶或多阶数学模型，本文采用 1 阶数学模型，如图 3 所示，图中： $T_{DG}$  为柴油发电机时间常数； $K_p$  为控制器的控制增益，为待优化参数； $T_i$  为控制器

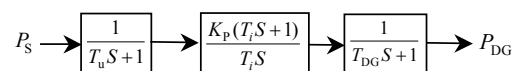


图 3 柴油发电机控制模型  
Fig. 3 DG control model

积分时间常数，为待优化参数。

### 2.2.2 蓄电池与超级电容器功率跟随控制系统模型

蓄电池与超级电容器功率跟随控制系统模型分别如图4和图5所示，图中： $T_{BAT}$ 为蓄电池时间常数； $T_L$ 为滤波器时间常数，为待优化参数； $T_H$ 为改善蓄电池系统频率响应的的时间常数，为待优化参数； $K$ 为比例增益，为待优化参数； $T_{EDLC}$ 为超级电容器时间常数。

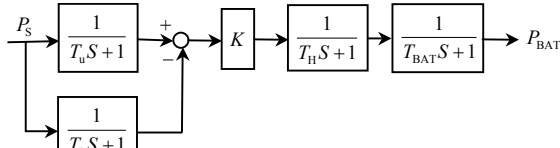


图4 蓄电池控制模型

Fig. 4 BAT control model

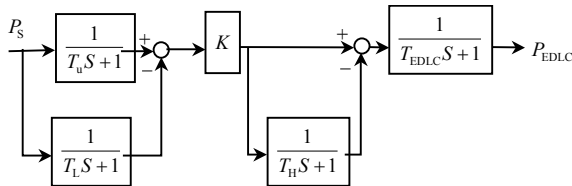


图5 超级电容器控制模型

Fig. 5 EDLC control model

### 2.3 并网点恒定潮流控制模型

由图2所示的光伏发电微网系统在并网点功率跟随控制结构可得

$$P_G(s) = P_{DG}(s) + P_{BAT}(s) + P_{EDLC}(s) - P_{PV}(s) - P_{Load}(s) = (G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}) \cdot (P_{GS}(s) - P_G(s)) - P_{PV}(s) - P_{Load}(s) \quad (1)$$

式中  $G_{DG}$ 、 $G_{BAT}$ 、 $G_{EDLC}$  分别为柴油发电机、蓄电池和超级电容器的系统传递函数。

式(1)变换得到并网点的潮流为

$$P_G(s) = \frac{G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} P_{GS}(s) - \frac{1}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} \cdot (P_{PV}(s) + P_{Load}(s)) \quad (2)$$

并网点的潮流误差  $P_{GE} = P_{GS} - P_G$ ，即

$$P_{GE}(s) = \frac{1}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} \cdot (P_{GS}(s) + P_{PV}(s) + P_{Load}(s)) \quad (3)$$

并网点的潮流误差时域描述为

$$P_{GE}(t) = L^{-1} \left[ \frac{1}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} \cdot (P_{GS}(s) + P_{PV}(s) + P_{Load}(s)) \right] \quad (4)$$

若设并网点的潮流设定值  $P_{GS} = 0$ ，则有

$$P_G(s) = - \frac{1}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} \cdot (P_{PV}(s) + P_{Load}(s)) \quad (5)$$

$$P_{GE}(s) = \frac{1}{1 + G_{DG} + G_{BAT} + G_{EDLC}} \cdot (P_{PV}(s) + P_{Load}(s)) \quad (6)$$

## 3 控制器参数优化

### 3.1 恒定潮流控制目标函数

微网并网运行时，要求并网点潮流能实时跟踪潮流设定值，为此，柴油发电机、蓄电池、超级电容器等功率控制系统的控制器设计是并网点潮流控制的关键。

本文的并网点恒定潮流控制目标是并网点潮流误差累积量达到最小，同时为了使得并网点潮流波动尽可能平缓，要求并网点最大潮流误差为最小。

为此，设计并网点潮流控制目标函数如下式：

$$\min_{\Omega} J = \int_{t_0}^{t_f} P_{GE}(t) dt + \max \{P_{GE}(t)\} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{DG}(t) \leq P_{DG \max} \\ P_{BAT}(t) < P_{BAT \max} \\ P_{EDLC}(t) < P_{EDLC \max} \end{cases}$$

式中： $P_{GE}(t) = P_{GS}(t) - P_G(t)$ ； $\Omega$ 为待优化的控制器的参数集； $J$ 为目标函数。在柴油发电机、蓄电池和超级电容器输出功率受限条件下，优化各电源控制器参数使得 $J$ 达到最小。

### 3.2 控制器参数优化

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年率先提出的一种演化计算方法，该算法是受到鸟群活动规律性的启发，利用群体智能建立一个简化模型<sup>[17]</sup>。该算法以其计算速度快、结构简单受到国内外众多学者的广泛关注，并在一些领域得到成功地应用<sup>[18-19]</sup>。但是基本粒子群算法在面对复杂程度越来越高的优化问题时，存在易陷入局部最优、搜索精度不高等不足。尽管国内外学者提出了各式各样的改进方案<sup>[20-22]</sup>以提高 PSO 算法性能，但其理论及应用研究还有待进一步的完善。为此，本文引入了一种非线性递增策略，在种群演化过程中不断对粒子进行扩散，从而增强了算法的全局搜索能力。与此同时，通过采用一种与扩散操作近似的非线性函数对惯性权重进行调整来增强群体对信息的利用能力，提出了一种非线性扩散粒子群算法(non-linear diffusion particle swarm optimization, NDPSO)，并将其运用于光伏微网系统控制器参数设计。其具体更新方式如式(8)–(9)所示：

$$v_i^{j+1} = \begin{cases} \omega v_i^j + c_1 \xi (p_i^j - x_i^j) + c_2 \eta (p_g^j - x_i^j), & \delta > k \\ r_{\text{and}}() v_{\max}, & \delta < k \end{cases} \quad (8)$$

$$x_i^{j+1} = \begin{cases} x_i^j + v_i^{j+1} & \delta > k \\ R_{\text{andom}}(l_d, u_d) & \delta < k \end{cases} \quad (9)$$

式中： $r_{\text{and}}()$ 为0到1之间的随机数； $R_{\text{andom}}(l_d, u_d)$ 为粒子随机落在种群搜索范围之内，其中， $l_d$ 和 $u_d$ 分别表示群体空间的下上界； $v_i$ 为粒子 $i$ 的速度； $x_i$ 为粒子 $i$ 的当前位置； $p_i$ 为迄今搜索到的个体最优解； $p_g$ 为整个群体迄今搜索到的最优解； $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子； $\xi$ 、 $\eta$ 分别为[0,1]区间内均匀分布的随机数； $\delta$ 为[0,1]之间均匀随机分布； $k$ 为扩散因子； $\omega$ 为惯性权重；其中 $k$ 和 $\omega$ 分别由式(10)(11)计算得到。

$$k = (k_{\text{max}} - k_{\text{min}}) \times (i_{\text{ter}} / G_{\text{en}})^n + k_{\text{min}}, \quad k \in [0.01, 1] \quad (10)$$

$$\omega = -(\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \times (i_{\text{ter}} / G_{\text{en}})^n + \omega_{\text{max}}, \quad \omega \in [0.95, 0.4] \quad (11)$$

式中： $k_{\text{max}}$ 为最大扩散因子； $n$ 为迭代因子，其值为[0,2]之间，并且随演化过程以一定的步长不断增加； $G_{\text{en}}$ 为总迭代次数； $i_{\text{ter}}$ 为当前迭代次数； $\omega_{\text{max}}$ 为最大的惯性权重值； $\omega_{\text{min}}$ 为最小的惯性权重值；

本文利用非线性扩散粒子群算法对上述控制模型参数进行优化，其实现流程如图6所示。

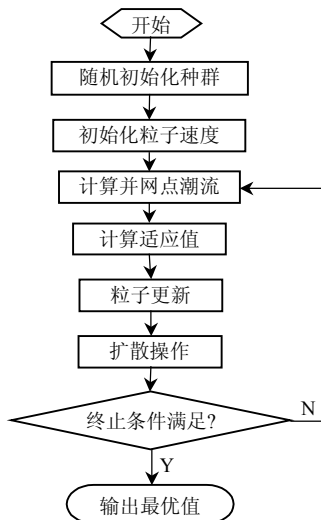


图6 NDPSO 实现流程

Fig. 6 Flow chart of NDPSO

### 4 算例分析

以总发电容量为 240 kW 的光伏微网为例，微网由 120 kW 光伏发电、120 kW 柴油发电机、50kWh 蓄电池及 100kW×2s 超级电容器组成，功率控制系统结构如图2所示。实际算例采用微网的光伏与负荷合并功率，取自杭州电子科技大学4号变电所某时段负荷实测数据。此时间段内，最大功率需求为 86kW，最小功率需求为 35kW。

在本例中考虑并网点潮流设定值  $P_{\text{GS}} = 0 \text{ kW}$ ，

$P_{\text{DGmax}} = 120 \text{ kW}$ ， $P_{\text{BATmax}} = 100 \text{ kW}$ ， $P_{\text{EDLCmax}} = 100 \text{ kW}$ 。用 NDPSO 算法优化得到的柴油发电机、蓄电池和超级电容器的滤波器和控制器参数如表1所示，仿真结果如图7和图8所示。

表1 参数优化结果

Tab. 1 Parameters optimal result

待优化参数	$T_I/s$	$K$	$T_H/s$	$K_P$	$T_I/s$
优化结果	324	48	0.3	57	100

图7给出当用户负荷和光伏发电变动时，并网点潮流以  $P_G = 0$  为参考值的变动曲线。图8给出了控制过程中各电源和补偿装置的输出。可以看出，柴油发电机满足了长周期变化的负荷需求，蓄电池对较短周期变化的负荷需求进行了补偿，超级电容器则对瞬间变化的负荷需求进行了补偿。此外，从图8可知，尽管在持续5min内，负荷变动较大，但由于各电源和补偿装置配合恰当，使得影响蓄电池寿命的充放电次数不多。

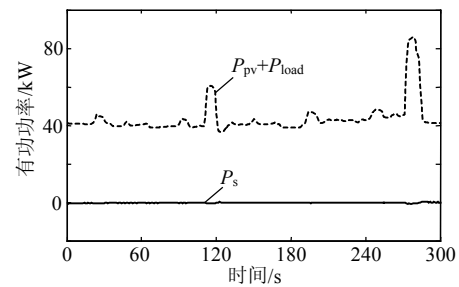


图7 并网点负荷与潮流曲线

Fig. 7 Load and power flow curves of grid-connected point

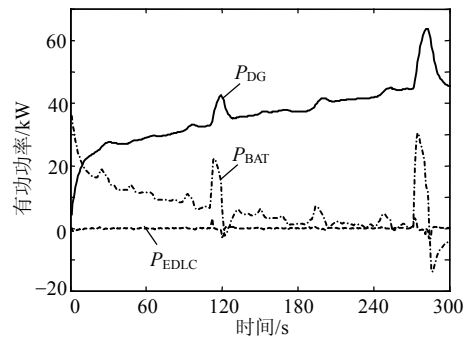


图8 并网点恒定潮流控制中各电源及补偿装置负荷分配曲线

Fig. 8 Load allotted curves among the distributed and compensation devices during constant power flow control of point of common coupling

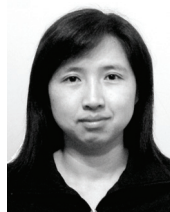
### 5 结论

非线性扩散粒子群算法克服了基本粒子群算法存在的易陷入局部最优、搜索精度不高等不足，此算法应用到微网并网点恒定潮流控制器参数优化中提高了控制精度。仿真结果表明，在较大的负荷波动情况下，并网点潮流仍能保持在恒定值，证明了

本文提出的方法是有效的。

## 参考文献

- [1] 赵晶晶, 李新, 许中. 含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 32(3): 94-98.  
Zhao Jingjing, Li Xin, Xu Zhong. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 32(3): 94-98(in Chinese).
- [2] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.  
Hu Hua, Wu Shan, Xia Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17(in Chinese).
- [3] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.  
Pei Wei, Sheng Kun, Kong Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157(in Chinese).
- [4] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.  
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88(in Chinese).
- [5] Kauhaniemi K, Kumpulainen L. Impact of distributed generation on the protection of distribution networks[C]//Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, Netherlands: IEE, 2004.
- [6] 涂有庆, 吴政球, 黄庆云, 等. 基于贡献因子的含分布式发电配电网网损分摊[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 88-91.  
Tu Youqing, Wu Zhengqiu, Huang Qingyun, et al. Contribution factor based network loss allocation for distribution network containing distributed power generation[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 88-91(in Chinese).
- [7] Bartosz W, Omar A, Joy Wang . Impact of high penetration of distributed generation on system design and operations[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 37-46.
- [8] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.  
Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [9] Dugan R C, Mcdermott T E. Distributed Generation[J]. IEEE Industry Application Magazine, 2002, 8(2): 19-25.
- [10] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.  
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [11] Esaki H, Sugihara, Suzuki S, et al. Simulation of supply-demand control in micro-grid with fluctuating natural power supply [C]//International Conference on E-Business and E-Government. Okinawa, Japan: IEEJ, 2008.
- [12] Liu X, Su B. Microgrids—an integration of renewable energy technologies[C]//China International Conference on Electricity Distribution. Guangzhou, China: CSEE, GIRED, LET, 2008.
- [13] Lasseter R H. Certs Microgrid[C]//IEEE International Conference On System of Systems Engineering. San Antonio, USA: IEEE, 2007.
- [14] 唐西胜, 齐智平. 基于超级电容器储能的独立光伏系统[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11): 1097-1112.  
Tang Xisheng, Qi Zhiping. Study on a stand-alone pv system with ultracapacitor as energy storage device[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(11): 1097-1112(in Chinese).
- [15] 蒙永民, 李铁才, 苟尚峰. 飞轮储能分布式电能控制技术放电部分的仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 60-64.  
Meng Yongmin, Li Tiecai, Xun Shangfeng. Simulation of discharge section in flywheel energy storage using distributed electric energy control technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 60-64(in Chinese).
- [16] Isa T, Kita M, Taguchi A. A hybrid energy storage with a smes and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
- [17] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 10-12.
- [18] Hsieh S T, Sun T Y, Liu C C, et al. Efficient population utilization strategy for particle swarm optimizer[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2009, 39(2): 444-456.
- [19] Bergh F, Engelbrecht A P. Cooperative learning in neural networks using particle swarm optimizers[J]. South African Computer Journal, 2000, 11(6): 84-90.
- [20] Feng X X, Zhang W J, Yang Z L. A dissipative particle swarm optimization[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation, Hawaii, USA: IEEE, 2002.
- [21] Shelokar P S, Siarry P, Jayaraman V K, et al. Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(1): 129-142.
- [22] 张勇, 巩敦卫, 张婉秋. 一种基于单纯形法的改进微粒群优化算法及其收敛性分析[J]. 自动化学报, 2009, 35(3): 289-298.  
Zhang Yong, Gong Dunwei, Zhang Wanqiu. A simplex method based improved particle swarm optimization and analysis on its global convergence[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(3): 289-298(in Chinese).



郑凌蔚

徐青鹤(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能优化算法。

收稿日期: 2010-07-06。

作者简介:

郑凌蔚(1978), 女, 博士研究生, 研究方向为微型电网的运行与控制、可再生能源发电技术, E-mail: zhenglw@hdu.edu.cn;

刘士荣(1952), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与控制、可再生能源发电技术;

(编辑 褚晓杰)