

DOI: 10.7667/PSPC151649

改进拟态物理学算法在交直流系统无功优化中的应用

李盛兴¹, 罗滇生¹, 李一泉², 黄根¹, 杜乾¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510000)

摘要: 拟态物理学算法(APO)具有较好的全局搜索能力, 且能避免粒子群等算法常出现的易早熟收敛现象, 具有较好的稳定性、快速收敛和鲁棒性。针对交直流混联系统无功优化问题, 在矢量模型的拟态物理学算法的基础上, 提出了一种基于改进拟态物理学算法的无功优化算法。为便于处理约束问题, 算法中通过定义不可行度函数判断不可行解, 并采用收缩因子将不可行解拉回可行域内, 再通过多维搜索方法寻求最优解。通过 IEEE30 节点系统仿真测试, 并与其他优化算法进行比较, 结果表明该算法具有较好的求解效率和准确性。

关键词: 拟态物理学算法; 矢量模型; 收缩因子; 多维搜索

Reactive optimization of hybrid AC-DC power system based on improved APO

LI Shengxing¹, LUO Diansheng¹, LI Yiquan², HUANG Gen¹, DU Qian¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Power Dispatch Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The APO is a superior algorithm with global search capability, and it can avoid premature convergence that easily occurs in Particle Swarm Optimization (PSO) and other algorithms. Besides, it has better stability, rapidity convergence and robustness. Aimed at reactive optimization problem of hybrid AC-DC system, and according to the APO of the vector model, a reactive optimization algorithm is proposed based on a kind of improved APO. In order to solve the restricted problem, the algorithm defines infeasibility degree function to judge infeasible solutions, haul the infeasible solution back to the feasible zone by use of the constriction factor, and search the optimal solution based on multidimensional search algorithm. According to the simulation test of IEEE 30-bus system, and compared it with other algorithms, it turns out that the improved APO is accurate and efficient in searching the solutions.

Key words: artificial physics optimization; vector model; constriction factor; multidimensional search

0 引言

随着我国电网的不断发展, 高压直流输电(HVDC)在电力系统中的作用越来越显著, 但受远距离大容量输电和直流通道送电容量比重大等客观因素的影响, 输电通道的电能损耗量很大^[1-2]。因此, 研究交直流混联系统的无功优化问题已成为提高电网运行经济性和安全性的有效手段。

目前, 国内外学者对无功优化的研究大多是针对纯交流系统。其中常用的传统算法有非线性规划法、线性规划法、牛顿法、梯度法等^[3-6]。但上述优化算法只有在初始点离全局最优点较近的情况下,

才可能寻求到真正的最优解。为此, 遗传算法、粒子群算法、禁忌搜索、免疫算法等^[7-10]人工智能算法被学者逐渐运用于电力系统的无功优化领域, 且取得了不错的效果。

拟态物理学算法^[11-13]具有较好的全局搜索能力, 优化过程中避免了粒子群算法的易早熟收敛现象, 具有较好的稳定性、快速收敛和鲁棒性。本文以交直流系统有功网损为目标函数, 提出了一种基于改进拟态物理学算法的无功优化算法。该算法是在矢量搜索方法的拟态物理学算法的基础上, 通过定义不可行度函数判断不可行解, 并采用收缩因子将不可行解拉回可行域内, 再通过多维搜索方法寻求最优解。以 IEEE 30 节点系统为算例进行仿真计算, 并的优化结果进行比较, 结果表明该算法具有

收敛速度快、计算精度高的突出优点。

1 交直流系统的无功优化模型

1.1 目标函数

本文采用的目标函数为交直流系统有功损耗最小, 可描述为

$$\min F = P_{\text{acL}} + P_{\text{dcL}} \quad (1)$$

其中: P_{acL} 为交流系统有功损耗; P_{dcL} 为直流系统有功损耗。

1.2 功率方程约束

在优化过程中保持换流器控制角 θ_d 不变, 直流线路整流侧电压 U_{dr} 保持为额定运行电压, 此时该直流线路逆变侧电压 U_{di} 可由下式求得。

$$U_{\text{dr}} - U_{\text{di}} - I_d R_d = 0 \quad (2)$$

式中: I_d 为直流线路电流; R_d 为直流线路的电阻值。

对于交流节点 i , 节点功率平衡表达式为

$$\begin{cases} P_{is} - U_i \sum_{j \in N_b} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{is} - U_i \sum_{j \in N_b} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于直流节点 m , 节点功率平衡表达式为

$$\begin{cases} P_{ms} - U_m \sum_{j \in N_b} U_j (G_{mj} \cos \theta_{mj} + B_{mj} \sin \theta_{mj}) + \\ \quad sp_k U_{dk} I_{dk} = 0 \\ Q_{ms} - U_m \sum_{j \in N_b} U_j (G_{mj} \sin \theta_{mj} - B_{mj} \cos \theta_{mj}) - \\ \quad U_{dk} I_{dk} \tan \varphi_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_b 为系统节点个数; φ_k 为换流器 k 的功率因数角; sp_k 表示有功功率流入或流出换流器 k 的方向, 当直流节点为整流侧时 $sp_k=1$, 为逆变侧时 $sp_k=-1$ 。

1.3 变量约束

变量约束可分为控制变量约束和状态变量约束^[14-15]。其中控制变量包括发电机端电压 U_G 、无功补偿节点补偿容量 Q_C 、变压器分接头 T_t 、控制电压 U_d 、控制电流 I_d 、控制功率 P_d 等; 状态变量包括发电机无功出力 Q_G 、负荷节点电压 U_f 、支路无功功率 Q_z 、流经换流器电流 I_h 、换流变压器变比 K_a 等。

2 改进的拟态物理学优化算法

2.1 APO 算法的矢量模型

拟态物理学优化算法(APO)是美国怀俄明州立大学的 Spear WM 等人受到牛顿第二定律的启发而提出的一种优化算法^[13]。该算法中每一个个体都是解空间中的一个可行解。每个个体根据自己的惯性及其他个体的合力作用来调整自己的运动, 整个群

体所经历的最好位置便是目前找到的全局最优解, 而个体的好坏由优化问题的适应值来评价。每个好的个体吸引比它差的个体, 而差的个体排斥比它好的个体。每个个体根据全局适应值和自身适应值不断更新自身质量, 从而更新个体的速度和位置。带搜索矢量的 APO 算法, 通过引入个体的速度方向矢量, 增加了算法的种群多样性, 有效提高了算法全局搜索能力, 具有较好的稳定性、快速收敛和鲁棒性。

在 APO 算法的矢量模型中, 假设群体规模为 n , 个体 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 的质量表示为 m_i , m_i 可由下式求得^[12]。

$$m_i = e^{\frac{f(x_{\text{best}}) - f(x_i)}{f(x_{\text{worst}}) - f(x_{\text{best}})}} \quad (5)$$

定义一个具有 N 个个体的集合 $S = \{1, 2, \dots, N\}$, 以及两个相对于个体 i 适应值优劣的集合: 相对于个体 i 的较好个体集合 $N_i = \{j | f(X_j) < f(X_i), \forall j \in S\}$ 和相对较差个体集合 $M_i = \{j | f(X_j) \geq f(X_i), \forall j \in S\}$, 其中 $X_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,k}, \dots, x_{i,n})$ 为个体 i 的位置矢量。设个体 j 相对于个体 i 在第 k 维的方向分量 $r_{ij,k}$ 表示为

$$r_{ij,k} = \begin{cases} 1, & X_{i,k} > X_{j,k} \\ 0, & X_{i,k} = X_{j,k} \\ -1, & X_{i,k} < X_{j,k} \end{cases} \quad (6)$$

则个体 j 相对于个体 i 的方向矢量为

$$\mathbf{r}_{ij} = [r_{ij,1} \quad r_{ij,2} \quad \dots \quad r_{ij,n}]^T \quad (7)$$

从而可得出个体 j 对个体 i 上的作用力矢量表达为

$$\mathbf{F}_{ij} = \begin{cases} G m_i m_j \|x_j - x_i\| \mathbf{r}_{ij}, & \text{if } j \in N_i \\ -G m_i m_j \|x_j - x_i\| \mathbf{r}_{ij}, & \text{if } j \in M_i \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\|x_j - x_i\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{j,k} - x_{i,k})^2}$; G 为引力常数, 通常取值为 $G=10$ 。

则个体 i 在第 k 维的速度和位置矢量表达式为

$$V_i(t+1) = w V_i(t) + \alpha \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{pop}}} \mathbf{F}_{ij} / m_i \quad (9)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (10)$$

式中: w 在为惯性权重, 且 $w \in (0, 1)$; α 是一个随机变量, 且 α 服从 $N(0, 1)$ 标准正态分布。

惯性权重 w 的变化将影响算法的搜索能力, w 较大, 则全局搜索能力较好; w 较小, 则局部搜索能力较好。为平衡个体的全局搜索能力和局部搜索能力, 算法中的惯性权重 w 随着迭代的进行动态下

降, 计算表达式为

$$w = 0.9 - \frac{iter - 1}{Maxiter} 0.5 \quad (11)$$

其中: $iter$ 是当前迭代次数; $Maxiter$ 是最大迭代次数。

2.2 改进的 APO 算法

为了便于处理约束优化问题和增强算法的局部搜索能力, 对拟态物理学算法进行了改进。

2.2.1 矢量 APO 算法的约束条件处理

在无功优化中, 现有的优化算法大多采用罚函数法来处理约束优化问题, 其实际操作难点在于如何构造合适的罚系数。且由于惩罚项的影响, 使得评估函数与目标函数的形态存在差异, 严重依赖于罚系数^[16]。为此, 本文引入不可行度函数来处理约束条件。定义一个解 x_i 的不可行度函数为

$$\phi(x_i) = \sum_{j=1}^J (\min[0, g_j(x_i)])^2 + \sum_{k=1}^K (h_k(x_i))^2 \quad (12)$$

式中: g_j 、 h_k 分别为目标函数的不等式约束和等式约束。

$\phi(x_i)$ 的函数值定义为解 x_i 到可行域的距离, 当 x_i 到可行域的距离越远则 $\phi(x_i)$ 的函数值越大, 反之就越小; 当 x_i 为可行解时, 函数值为零。

通过函数 $\phi(x_i)$ 来判断个体是否越界, 当某个体在 k 维上越出了可行域的边界, 则通过下式将该个体进行拉回。

$$x_{i,k} = \begin{cases} x_{k,\min}, & x_{i,k} < x_{k,\min} \\ x_{k,\max}, & x_{i,k} > x_{k,\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中: $x_{k,\min}$ 和 $x_{k,\max}$ 为可行域边界最小值和最大值。

为确保个体速度方向不变, 引入收缩因子 β 。设个体在 k 维上的收缩因子为 β_k , 其中 $\beta_k \in (0, 1)$, β_k 可通过下式求得。

$$\beta_k = \begin{cases} \frac{x_{k,\min} - x_{i,k}(t)}{x_{i,k}(t+1) - x_{i,k}(t)} & x_{i,k}(t+1) < x_{k,\min} \\ \frac{x_{k,\max} - x_{i,k}(t)}{x_{i,k}(t+1) - x_{i,k}(t)} & x_{i,k}(t+1) > x_{k,\max} \end{cases} \quad (14)$$

同时, 由式(15)得出每个个体在 n 维空间的最小收缩因子 β , 即

$$\beta = \min\{\beta_k\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

则个体 i 的位置矢量表达式可修改为

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \beta V_i(t+1) \quad (16)$$

2.2.2 多维搜索的矢量 APO 算法

为了提高搜索效率, 将多维搜索引入到算法中。引入式(17)所示对角矩阵 τ , 其中 $\tau_k \in [0, \beta_k]$ 。将 τ 代入式(18)中可得到式(19)。

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \tau_k & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \tau_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \tau V_i(t+1) \quad (18)$$

即

$$\begin{bmatrix} x_{i,1}(t+1) \\ \vdots \\ x_{i,k}(t+1) \\ \vdots \\ x_{i,n}(t+1) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{i,1}(t) \\ \vdots \\ x_{i,k}(t) \\ \vdots \\ x_{i,n}(t) \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \tau_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \tau_k & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \tau_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i(t+1) \\ \vdots \\ v_i(t+1) \\ \vdots \\ v_i(t+1) \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

τ_i 需使个体 i 沿速度方向移动到适应值最小的位置, 即

$$\min_{\tau_k \in [0, \beta_k]} f(X_i(t+1)) = \min_{\tau_k \in [0, \beta_k]} f(X_i(t) + \tau V_i(t+1)) \quad (20)$$

2.3 算法的实现步骤

(1) 种群初始化。设进化代数 g 为 0, 随机初始化规模大小为 n 的种群 $X(g) = \{x_{i,k}\}$, 设微粒的初始速度 $v_{i,k}$ 为 0。

(2) 根据式(5)计算个体的质量; 根据式(8)计算个体所受其他个体的作用力;

(3) 根据式(9)和式(10)分别计算个体的下一代速度和位置。

(4) 根据式(12)判断个体的位置有无越界, 若有越界, 则按式(14)和式(15)计算越界个体每一维的最小收缩因子 β 。并按式(18)计算更新个体的位置矢量。

(5) 按式(18)和式(20)更新种群最优个体的位置矢量。

(6) 计算个体适应值, 更新种群最优个体及其适应值。

(7) 判断是否满足结束条件, 若满足, 则停止计算, 并输出最优结果; 若不满足, 进化代数 $t = t + 1$, 返回步骤 2。

3 算例分析

为验证文中所提算法的有效性和可行性, 本文采用 IEEE30 节点系统进行算例仿真分析。该系统包括 6 台发电机节点(1,2,5,8,11,13)、4 台可调变压器支

路(6-9,6-10,4-12,27-28)以及9个无功补偿节点(10,12,15,17,20,21,23,24,29),系统支路详细参数见文献[17]。文中对该节点系统做以下修改:将支路2-6修改为图中所示的直流线路,其中节点2处连接的是整流站,节点6处连接的是逆变站,并以节点6处的逆变站作为直流系统的参考电压节点。换流站内已装设了补偿装置来提供自身换流消耗的无功功率。直流控制系统运行方式为:整流侧定电流控制(1 p.u.),逆变侧定熄弧角控制(15°)。换流变压器的变比范围为15%,每档的调节量为1.25%。运用文中所提算法对此算例进行无功优化,并与标准粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)的优化结果进行比较。其中本文所提算法的种群规模为30,最大迭代次数为200;粒子群算法的粒子种群规模为30,最大迭代次数为200;遗传算法的种群规模为50,最大迭代次数为200,交换概率为0.8,变异概率为0.15。表1给出了各控制变量的取值范围及无功优化所得最优解。表2为交直流系统优化前后各参数的比较。

表1 交直流系统控制变量仿真计算结果

Table 1 Calculation results of AC/DC system controlling variables

变量	优化结果标么值		
	PSO	GA	本文算法
U_{G1}	1.040	1.018	1.036
U_{G2}	1.025	1.020	1.021
U_{G5}	1.089	1.096	1.090
U_{G8}	1.078	1.074	1.078
U_{G11}	1.024	1.034	1.024
U_{G13}	1.023	1.024	1.043
$T_{i(6-9)}$	0.987 5	0.975	0.987 5
$T_{i(6-10)}$	0.987 5	0.975	1
$T_{i(4-12)}$	1	0.962 5	0.975
$T_{i(27-28)}$	1	0.987 5	0.987 5
Q_{C10}	0.008	0.012	0.005
Q_{C12}	0	0	0
Q_{C15}	0.245	0.307	0.278
Q_{C17}	0	0.003	0
Q_{C20}	0.007	0	0.012
Q_{C21}	0	0	0
Q_{C23}	0.136	0.210	0.175
Q_{C24}	0.027	0.105	0.098
Q_{C29}	0	0.021	0
U_d	1.084 5	1.056 4	1.073 4
I_d	0.21	0.21	0.21

由表2可知,用粒子群算法优化后系统的网损降低了5.58%,遗传算法优化后系统的网损降低了5.19%,本文算法优化后网损降低了6.74%。这说明在相同条件下,粒子群算法以及遗传算法所得的优

化结果较为相近,本文所提算法对无功优化所得到的最优解比前两种算法的优化结果更为理想。

通过对表2中三种优化算法的优化时间进行比较,可知本文所提算法的优化时间明显较短。由图1可知,遗传算法由于个体的交叉和变异,导致收敛特性曲线为阶梯状,因此收敛速度比较慢,最优结果具有较大的随机性;粒子群算法的收敛速度较快,在迭代20次左右就达到了最优值,这也使其容易陷入局部最优;本文所提算法的收敛速度最快,且不易陷入局部最优。由此可见本文提出的改进拟态物理学算法求解电力系统无功优化问题具有一定的优势,能满足无功优化的要求。

表2 交直流系统优化前后各参数对比

Table 2 Comparison of AC/DC system parameters before and after optimization

参数	优化前	优化后		
		PSO	GA	本文算法
有功网损/p.u.	0.063 5	0.059 8	0.060 2	0.059 2
优化时间/s		12.58	13.23	11.78

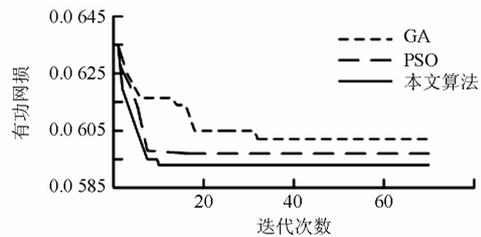


图1 三种优化算法的收敛特性曲线

Fig. 1 Performance characteristics curve of three optimization algorithms

4 结论

本文针对交直流混联系统无功优化问题,以系统有功网损为优化目标,在矢量模型的拟态物理学算法的基础上,提出了一种基于改进拟态物理学算法的无功优化算法。通过引入不可行度函数和带收缩因子的多维搜索方法,避免了罚函数法处理约束条件所带来的困难。且该算法避免了粒子群等算法常出现的易局部收敛现象,具有较好的稳定性和鲁棒性。实验结果表明,采用文中算法对系统进行无功优化,其求解效率和准确性都得到了明显的改善。

参考文献

- [1] 郑伟业, 吴文传, 张伯明, 等. 基于内点法的交直流混联系统抗差状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 1-8.
ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al.

- Robust state estimator for AC/DC hybrid power system based on an interior point method[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(21): 1-8.
- [2] 聂永辉, 杜正春, 李崇涛, 等. 恢复潮流可行的交直流电力系统切负荷新模型[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 209-215.
NIE Yonghui, DU Zhengchun, LI Chongtao, et al. A new load-shedding model to restore AC-DC power flow feasibility[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 209-215.
- [3] DEEB N, SHAHIDEPOUR S M. Linear reactive power optimization in a large power network using the decomposition approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(2): 428-438.
- [4] 聂永辉, 李天云, 刘凤兰, 等. 基于非线性内点理论的交直流系统无功优化新模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(10): 35-40.
NIE Yonghui, LI Tianyun, LIU Fenglan, et al. A new AC-DC reactive optimal power flow model based on nonlinear interior point method[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(10): 35-40.
- [5] MOMOH J, GUO S X, OGBUOBIRI E C, et al. The quadratic interior point method solving power system optimization problems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(3): 1327-1336.
- [6] GRANVILLE S. Optimal reactive dispatch through interior point methods[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(1): 136-146.
- [7] 冷永杰, 张路寅, 赵建峰, 等. 基于多线程遗传算法的目标分级地区电网电压无功优化控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(18): 37-41.
LENG Yongjie, ZHANG Luyin, ZHAO Jianfeng, et al. Target classification reactive power optimal control of regional power grid based on multi-thread genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(18): 37-41.
- [8] 曾嘉俊, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(1): 37-42.
ZENG Jiajun, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(1): 37-42.
- [9] 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.
- [10] 郭创新, 朱承治, 赵波, 等. 基于改进免疫算法的电力系统无功优化[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(15): 23-29.
GUO Chuangxin, ZHU Chengzhi, ZHAO Bo, et al. Power system reactive power optimization based on an improved immune algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(15): 23-29.
- [11] 詹昕, 向铁元, 陈红坤, 等. 基于搜索矢量拟态物理学算法的微电网脆弱性评估及重构[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 74-81.
ZHAN Xin, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Vulnerability assessment and reconfiguration of micro grid based on search vector artificial physics optimization algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 74-81.
- [12] 王艳, 曾建潮. 一种基于拟态物理学优化的多目标优化算法[J]. *控制与决策*, 2010, 25(7): 1040-1044.
WANG Yan, ZENG Jianchao. Multi-objective optimization algorithm based on artificial physics optimization[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(7): 1040-1044.
- [13] XIE L P, ZENG J C, CUI Z H. The vector model of artificial physics optimization algorithm for global optimization problems[C] // *The 10th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, Spain, Sept. 2009: 610-617.
- [14] 彭磊, 张建平, 吴耀武, 等. 基于 GA、PSO 结合算法的交直流系统无功优化[J]. *高电压技术*, 2006, 32(4): 78-81.
PENG Lei, ZHANG Jianping, WU Yaowu, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(4): 78-81.
- [15] 赵波, 曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(5): 3-9.
ZHAO Bo, CAO Yijia. A multi agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(5): 3-9.
- [16] 王新坤. 基于模拟退火遗传算法的自压树状管网优化[J]. *水利学报*, 2008, 39(8): 1012-1016.
WANG Xinkun. Optimization of gravity pipe network based on annealing genetic algorithm[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(8): 1012-1016.
- [17] ELA A A A E, ABIDO M A, SPEA S R. Differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(2): 458-464.

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2015-11-01

作者简介:

李盛兴(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流系统无功优化; E-mail: lxs168@hnu.edu.cn

罗滇生(1979-), 男, 教授, 主要研究方向为智能电网; E-mail: lhx20070322@hnu.edu.cn

李一泉(1979-)男, 博士, 高级工程师, 从事继电保护整定计算和管理工作。

(编辑 姜新丽)