

文章编号: 1001-0920(2008)02-0145-06

锌电解整流供电系统的微粒群优化控制策略

王俊年¹, 申群太², 周少武^{1b}, 沈洪远^{1b}

(1. 湖南科技大学 a. 知识网络实验室, b. 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 在分析锌电解整流供电系统的基础上, 建立基于整流效率和整流系统稳流精度的整流供电系统优化控制数学模型, 并根据整流供电系统的分级递阶控制特性, 提出一种递阶多目标微粒群算法, 用于整流供电系统各机组电流分配的优化决策. 实验结果和现场运行结果都表明, 基于多目标微粒群算法的整流供电系统优化控制策略能够有效提高整流效率和稳流精度.

关键词: 锌电解; 整流供电; 多目标微粒群算法; 递阶编码

中图分类号: TP183

文献标识码: A

Optimal control of direct power supply system in zinc electrolytic process based on PSO

WANG Jun-nian¹, SHEN Qun-tai², ZHOU Shaowu^{1b}, SHEN Hong-yuan^{1b}

(1a. Knowledge Grid Laboratory, 1b. Institute of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Institute of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: WANG Jun-nian, E-mail: jnwang@hnust.edu.cn)

Abstract: Based on the analysis of the zinc electrolysis direct current power supply system, a model for optimal control of the direct current power supply system is obtained. Based on the hierarchy control characteristic of the direct current power supply system, a hierarchy multi-objective particle swarm optimization (HMPSO) is developed to optimize the control of the system. The result of experiment and field running show that the optimal control strategies based on hierarchy multi-objective particle swarm optimization can availably improve the precision of output current and the commuting efficiency.

Key words: Electrolytic zinc process; Direct power supply; Multi-objective PSO; Hierarchy coding

1 引言

直接用于电解过程的交、直流电耗可分为以下几部分: 1) 整流所整流过程中的损耗; 2) 直流母线上的电压降损耗; 3) 槽电压消耗的电能. 其中槽电压消耗的电能占整个电解过程中电能消耗的绝大部分, 因此国内外很多研究都集中在改善电解工艺过程、提高电解效率、降低槽电压消耗的电能上^[1,2]. 对于整流所多台机组并联运行的整流过程中的损耗, 则多是通过实验画出确定并联运行机组的外特性曲线后, 采用图解法选择机组的电流分配以及最佳供电点以降低能耗. 但供电部门目前实行的电价分时计价收费政策, 使工厂采用分时供电调度措施, 要求直流供电系统在保证全天供电总量均衡的条件下削峰

填谷, 在不同的峰谷时段输出不同的直流电流, 以满足全天耗电费用最低的要求^[3]. 这时, 用传统的图解法就很难确定整流机组在各个时段的最佳供电点. 文献[4]利用现场获得的大量有价值的实际操作经验, 采用神经网络专家优化决策来优化并联运行多台机组的投入运行组合和电流分配, 实现整流设备的经济运行. 但是, 现场的实际操作因为缺乏理论依据, 获得的整流效率不一定是全局最优, 因此神经网络不能得到有效的训练. 事实上, 锌电解直流供电系统优化控制的目标是如何在满足总调要求电流 I 的同时, 协调多台整流机组的投运组合和各机组的电流分配, 使整个供电系统功率损失率最低 (即整流效率最高), 这是一个带约束的多目标组合优化问题.

收稿日期: 2006-10-25; 修回日期: 2007-01-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60673119); 湖南省教育厅科研项目 (07B019).

作者简介: 王俊年 (1968—), 男, 甘肃金昌人, 副教授, 博士, 从事智能控制、优化算法等研究; 申群太 (1934—), 男, 湖南邵东人, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业系统控制等研究.

基于群体及 Pareto 概念的多目标进化算法 (MOEA) 具有较高的并行性, 能有效地搜索 Pareto 解, 已成为目前解决多目标优化问题的主要工具^[5]. 微粒群算法从本质上讲也具有与进化算法同样的内在并行计算机制, 而且与进化算法相比, 微粒群算法具有概念简单、搜索效率高等特点. 因此, 可将微粒群算法的应用领域扩展到多目标优化问题^[6-10].

本文在分析锌电解整流供电系统优化决策特点的基础上, 建立了基于整流效率的锌电解整流供电多目标优化控制数学模型, 并根据整流供电系统的分级递阶控制特性, 借鉴递阶遗传算法中的递阶编码机制^[11], 设计了一种递阶多目标微粒群算法 (HMOPSO), 解决了整流供电系统优化控制中的多目标约束优化问题.

2 锌电解整流供电系统优化控制数学模型

锌电解整流供电系统由多台整流机组并联运行, 其中 1 ~ m 号变压器通过二极管桥式整流装置向直流母线供电, $m+1$ ~ n 号变压器经过三相全控桥式可控硅整流装置向直流母线供电.

2.1 单台整流机组的功率损失

每一台整流机组由一台变压器和两台整流器组成, 每一台整流机组的功率损失为整流变压器功率损失与整流器功率损失之和^[2], 即

$$P_g = P_b + P_{z1} + P_{z2}. \quad (1)$$

因为接在同一台变压器的两台整流器型号相同, 故整流器的功率损失 P_{z1} 和 P_{z2} 可表示为

$$P_{z1} = P_{z0} + z_1 P_{zN1} + z_1^2 P_{zN2}, \quad (2)$$

$$P_{z2} = P_{z0} + z_2 P_{zN1} + z_2^2 P_{zN2}, \quad (3)$$

$$z_1 = I_1 / I_{dN}, \quad z_2 = I_2 / I_{dN}. \quad (4)$$

式中: P_{z0} 为整流器的空载功率损失, 单位 kW; z_1 为整流器负载系数; I_1 和 I_2 分别为同一台变压器所带两台整流器的直流负荷电流; I_{dN} 为整流器的额定电流; P_{zN1} 和 P_{zN2} 分别为整流器额定负载时的 1 次和 2 次方功率损失.

整流变压器的功率损失为

$$P_b = P_{b0} + I^2 P_{bk}. \quad (5)$$

式中: P_{b0} 为整流变压器空载功率损失, 单位 kW; P_{bk} 为整流变压器的短路损失, 单位 kW; I 为整流变压器的负载系数, 即

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2 I_{dN}}. \quad (6)$$

如果以向量 (b_1, b_2) (其中 $b_1, b_2 = 0$ 或 1) 表示一台变压器所带两个整流器的投入运行或断开, 1 表示相应整流器投入运行, 0 表示断开, 则整流机组的功率损失可写为

$$P_g = P_b + b_1 \times P_{z1} + b_2 \times P_{z2}. \quad (7)$$

将式(2) ~ (6) 代入式(7), 整理得

$$P_g = P_{b0} + \sum_{j=1}^2 \left[b_j \times \left(P_{z0} + \frac{P_{zN1}}{I_{dN}} \times I_j + \frac{P_{zN2}}{I_{dN}^2} \times I_j^2 \right) \right] + \frac{P_{bk}}{4 I_{dN}^2} \left[\sum_{j=1}^2 (b_j \times I_j) \right]^2. \quad (8)$$

2.2 多台整流机组并联运行的功率损失

用下标 i ($i = 1, 2, \dots, n$, n 为总的并联整流机组数) 标记第 i 台机组的参数, j ($j = 1, 2$) 标记每一台整流变压器带的第 j 台整流器. 式(2) ~ (6) 中 P_{b0} , P_{z0} , P_{zN1} , P_{zN2} , P_{bk} , I_{dN} 等仅与整流调压变压器、硅整流器及其附属设备的技术特性有关, 而与机组的负荷特性无关^[2], 当多台并联机组技术特性完全相同时, 第 i 台整流机组的功率损耗 P_{gi} 可写为

$$P_{gi} = P_{b0} + \sum_{j=1}^2 \left[b_{i,j} \times \left(P_{z0} + \frac{P_{zN1}}{I_{dN}} \times I_{i,j} + \frac{P_{zN2}}{I_{dN}^2} \times I_{i,j}^2 \right) \right] + \frac{P_{bk}}{4 I_{dN}^2} \left[\sum_{j=1}^2 (b_{i,j} \times I_{i,j}) \right]^2. \quad (9)$$

则 n 台机组全部投入并列运行时整流损耗 P_g 可表示为

$$P_g = \sum_{i=1}^n P_{gi} = \sum_{i=1}^n \left\{ P_{b0} + \sum_{j=1}^2 \left[b_{i,j} \times \left(P_{z0} + \frac{P_{zN1}}{I_{dN}} \times I_{i,j} + \frac{P_{zN2}}{I_{dN}^2} \times I_{i,j}^2 \right) \right] + \frac{P_{bk}}{4 I_{dN}^2} \times \left[\sum_{j=1}^2 (b_{i,j} \times I_{i,j}) \right]^2 \right\}. \quad (10)$$

定义一个布尔变量 $L = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$, 其中元素 a_i 为 1 或 0, 分别对应第 i 台机组投运或断开, 则整流所供电时损失的总功率为

$$P_g = \sum_{i=1}^n a_i \times \left\{ P_{b0} + \sum_{j=1}^2 \left[b_{i,j} \times \left(P_{z0} + \frac{P_{zN1}}{I_{dN}} \times I_{i,j} + \frac{P_{zN2}}{I_{dN}^2} \times I_{i,j}^2 \right) \right] + \frac{P_{bk}}{4 I_{dN}^2} \times \left[\sum_{j=1}^2 (b_{i,j} \times I_{i,j}) \right]^2 \right\}. \quad (11)$$

2.3 整流供电系统多目标优化控制模型

对锌电解直流供电系统优化控制决策的目标是, 如何在满足总调要求电流 I 的同时, 协调多台整流机组的投运组合和各机组的电流分配, 使整个供电系统功率损失率最低 (即整流效率最高). 这是一个带约束的多目标组合优化问题, 其目标一是使系统输出总电流 I_d 与总调要求的电流 I 的误差最小, 另一个目标是使系统的功率损失 P_g 最小, 即

$$\min P_g = \sum_{i=1}^n a_i \times \left\{ P_{b0} + \sum_{j=1}^2 \left[b_{i,j} \times \right. \right.$$

$$\left(P_{zO} + \frac{P_{zN1}}{I_{dN}} \times I_{i,j} + \frac{P_{zN2}}{I_{dN}^2} \times I_{i,j}^2 \right) + \frac{P_{jk}}{4 I_{dN}^2} \times \left[\sum_{j=1}^2 (b_{i,j} \times I_{i,j})^2 \right], \quad (12)$$

$$\min = \min \left(\left| \sum_{i=1}^n a_i \times \left(\sum_{j=1}^2 b_j \times I_{i,j} \right) - I \right| \right). \quad (13)$$

综合式(12), (13) 及相关的约束条件, 锌电解直流供电系统优化控制的数学模型可以表示为

$$\begin{aligned} \min f(I_{i,j}) &= (P_g(I_{i,j}), (I_{i,j})), \\ \text{s.t. } I_{i,j} &= a_i \times b_{i,j} \times I_{i,j}, \\ I_{d \min} &\leq I_{i,j} \leq I_{d \max}. \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $I_{i,j}$ 为第 i 台整流机组中的第 j 台整流器的电流分配值; $I_{d \min}$ 和 $I_{d \max}$ 分别为单台硅整流器输出电流的下限和上限.

在所研究的整流供电系统中, 第 1 到第 m ($m < n$) 台机组为二极管整流机组, 其电流调节仅依赖于整流变压器档位的调节, 故在 $i = 1, \dots, m$ 时 $I_{i,j}$ 属于离散变量, 其值在 I_d^k ($k = 1, \dots, 28$) 之间取值. 其中, I_d^k ($k = 1, \dots, 28$) 表示整流变压器在第 k 档位时单台二极管整流器的输出电流. 因此, 锌电解直流供电系统优化控制的数学模型可进一步表示为

$$\begin{aligned} \min f(I_{i,j}) &= (P_g(I_{i,j}), (I_{i,j})), \\ \text{s.t. } I_{i,j} &= a_i \times b_{i,j} \times I_{i,j}, \\ I_{i,j} &= I_d^k, i = 1, \dots, m, j = 1, 2, k = 1, \dots, 28, \\ I_{d \min} &\leq I_{i,j} \leq I_{d \max}, i = m + 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (15)$$

3 递阶多目标 PSO 算法

考察整流供电系统可知, 该系统的控制具有分层控制的特性, 第 1 层控制整流调压变压器的运行投入情况, 即参数 a_i 的值; 第 2 层控制变压器的输出调整, 即变压器的档位调整; 第 3 层控制每台变压器所带的两台整流器的投入运行情况, 即参数 $b_{i,j}$ ($j = 1, 2$) 的值; 第 4 层控制各投入整流器的直流输出电流分配, 即参数 $I_{i,j}$. 若整流器 ($i-j$) 投入运行, 其对应的电流分配值 $I_{i,j}$ 有效; 若整流器 ($i-j$) 不投入运行, 即 $a_i \times b_{i,j} = 0$, 则对该机组没有电流分配, 即 $I_{i,j} = 0$. 另外, 由式(12), (13) 和式(15) 可知, 在一定的工艺和设备条件下目标函数 f 是机组投运开关

状态变量 $a_i, b_{i,j}$, 变压器档位 D_i 及各整流器分配电流值 $I_{i,j}$ 的复杂约束函数. 若以变量串接的方式编码, 则个体微粒矢量中包含了二进制数、整数、实数等多种不同的片断, 因此用一般的多目标 PSO 算法不能满足该系统的优化控制. 根据整流供电系统的分层控制特性, 借鉴递阶遗传算法中的递阶编码机制^[11], 本文提出一种递阶多目标微粒群算法 (HMOPSO), 用以解决锌电解整流供电系统的优化控制.

3.1 递阶编码

递阶编码为层次结构, 每一个微粒包含 4 层: 变压器控制层、变压器调整层、整流器控制层和整流器调整层. 变压器控制层由各整流变压器的运行投入切换参数 a_i 排列组成; 变压器调整层由各变压器的档位 D_i ($D_i = 1, \dots, 28$) 组成; 整流器控制层由整流器运行投入切换参数 ($b_{i,1}, b_{i,2}$) 排列组成; 整流调整层由各整流器的直流电流分配值 $I_{i,j}$ 排列组成. 当 $i = 1, \dots, m$ 时, $I_{i,j}$ 为变压器档位 D_i 对应的二极管整流输出电流, 即 $I_{i,j} = I(D_i)$, 是离散值; 当 $i = m + 1, \dots, n$ 时, $I_{i,j}$ 为变压器档位 D_i 对应的晶闸管整流输出电流, 即 $I_{i,j} = I(D_i) \cos \alpha_i$, 是连续值. 整流调整层的激活与否受其相对应调变控制层和整流控制层的控制, 被激活的调整因子称为显性调整因子, 处于有效状态; 未被激活的调整因子称为隐性因子, 处于无效状态. 微粒的递阶编码结构如图 1 所示.

图 1 中, 第 1 层和第 3 层是控制层, 为二进制编码, 第 2 层 (变压器调整层) 为整数编码, 最底层是整流器调整层, $i = 1, \dots, m$ 时为整数编码, 其值由第 2 层和第 3 层该位置的值决定; 当 $i = m + 1, \dots, n$ 时为实数编码. 整流器的调整受上面第 1 层和第 2 层控制层的控制, 只有当其对应的两层控制层的编码均为“1”时, 该整流器的调整处于激活状态, 对其调整有效; 若整流器对应的两层控制层的两个编码中有一个是“0”, 即若 $a_i \times b_{i,j} = 0$, 则该整流器处于休眠状态, 对它的调整无效. 解码显性调整因子即为需要投入运行的整流器及其电流分配值. 在 PSO 迭代过程中, 显性调整因子和隐性调整因子均参与微粒的迭代飞行. 在迭代过程中显性调整因子有可能转

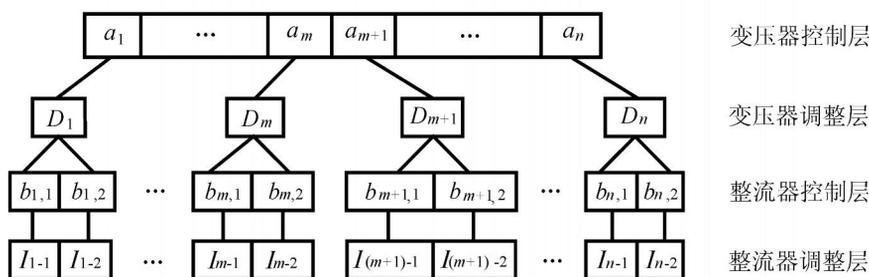


图 1 微粒的递阶编码结构

入休眠变为无效调整,而原来的隐性调整因子也可能被激活转化为有效调整.

3.2 递阶多目标 PSO 算法

递阶多目标 PSO 算法的实现步骤为:

Step1 编码. 优化决策变量的编码方案为,控制层和调整层编成一个码串,控制层采用二进制编码,调整层采用整数编码和实数编码. 解码方案为,显性整流器调整因子直接解码为整流器输出电流,隐性整流器调整因子解码后其值为 0.

Step2 初始化.

Step2. 1: 初始化每个微粒的变压器控制层、整流控制层、变压器调整层和整流器调整层,以及相应的微粒速度,并检查是否满足约束条件,若不满足则重新随机产生;

Step2. 2: 初始的非劣解集中任意存放两个微粒作为初始的 Pareto 解;

Step2. 3: 按递阶结构解码每一个微粒,并根据式(12), (13) 计算各微粒的多目标适应值.

Step3 微粒群更新.

Step3. 1: 分别用二进制微粒群算法更新递阶编码的变压器控制层和整流器控制层;

Step3. 2: 用整数微粒群算法更新递阶编码的变压器调整层;

Step3. 3: 用标准微粒群算法更新递阶编码的晶闸管整流调整层,算法中当前微粒及微粒群经历

过的最好位置 $y_{i,j}$ 和 \hat{y}_j 分别从非劣解集中任意选取一个;

Step3. 4: 更新后的微粒若不满足约束条件,则删除该微粒后重新随机产生一个.

Step4 适应值评价. 按递阶结构解码每一个微粒,并根据式(12), (13) 计算各微粒的多目标适应值.

Step5 更新 Pareto 解存储区.

Step5. 1: 检查微粒群中每一个微粒的 Pareto 占优情况,若某个占优的微粒和非劣解集中的微粒相比属于非劣解,则将该微粒存入非劣解存储区 R_{best} , 作为当前获得的一个非劣解;

Step5. 2: 在 Pareto 解集存储区 R_{best} 中,若一个微粒受控于新存入的微粒,则该微粒被删除.

Step6 循环. 循环执行 Step3 ~ Step5,直到符合算法停止条件. 本文算法的停止条件为稳流精度 $I\%$ 达到预定值或迭代次数等于预设最大迭代次数 t_{max} .

4 实验分析

4.1 系统模型的相关参数

由现场设备参数及文献[2]的相关结论可计算出式(12)中的几个关键参数为 $P_{to} = 33.25$ kW, $P_{bk} = 190$ kW, $P_{za} = 0.227$ kW, $P_{zN1} = 33.19$ kW, $P_{zN2} = 48.94$ kW.

表 1 变压器不同档位时二极管整流器输出电流

档位 j	1	2	3	4	5	6	7
I_d^j	12.000	11.760	11.520	11.280	11.040	10.800	10.560
档位 j	8	9	10	11	12	13	14
I_d^j	10.320	10.080	9.840	9.600	9.360	9.120	8.880
档位 j	15	16	17	18	19	20	21
I_d^j	8.640	8.400	8.160	7.920	7.680	7.440	7.200
档位 j	22	23	24	25	26	27	28
I_d^j	6.960	6.720	6.480	6.240	6.000	5.760	5.520

表 2 6 系列各机组电流分配

给定电流 I	各机组的电流分配									
	I_{1d}		I_{2d}		I_{3d}		I_{4d}		I_{5d}	
	I_{1-1}	I_{1-2}	I_{2-1}	I_{2-2}	I_{3-1}	I_{3-2}	I_{4-1}	I_{4-2}	I_{5-1}	I_{5-2}
12.2	12.240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.961 2	7.961 2	0.000	0.000
19.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.545	9.545	0.000	0.000
26.0	0.000	0.000	0.000	0.000	12.000	0.000	0.000	0.000	6.915	6.915
34.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.000	11.033	11.033	0.000	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000	12.000	0.000	0.000	11.038	11.038	0.000	10.844
68.0	12.000	0.000	12.000	12.000	0.000	0.000	11.979	11.979	7.433	0.000
75.0	0.000	0.000	0.000	12.000	12.000	12.000	7.881	7.881	11.805	11.805
90.0	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	5.645	5.645	6.456	0.000
100	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	6.477	0.000	11.466	11.466

另外,根据给定的整流机组参数和保证功率因数的现场经验值 $\theta = 0 \sim 10^\circ$,可计算出式(15)的约束条件中 $I_d^k \min = I_d^k \cos \theta_{\max}$, $I_d^k \max = I_d^k \cos \theta_{\min}$. 其中变压器不同档位时二极管整流器输出电流如表 1 所示.

4.2 实验结果及分析

用递阶多目标 PSO 算法对某冶炼厂锌电解 6 系列整流供电系统的电流分配策略进行优化,其中算法中相关参数取值为 $\omega = 0.8$, $c_1 = c_2 = 1.5$,微粒群规模 $p = 10$.

6 系列整流供电系统总的并联机组数 $n = 5$,其中二极管整流机组数 $m = 3$. 稳流精度 $I\% = 1\%$,最大迭代次数 $t_{\max} = 300$ 时不同给定电流的机组电流优化分配实验结果如表 2 所示,在表 2 所示的优化电流分配时稳流精度和整流效率如表 3 所示,多目标优化 Pareto 前端如图 2 所示.

表 2,表 3 的实验结果表明,用本文提出的算法对该系列直流整流供电系统进行不同给定电流的优

化控制,在稳流精度小于 0.5% 时,平均整流效率达到 0.983 9,最低整流效率为 0.980 9,好于原系统在稳流精度等于 2% 时的平均整流效率 0.965 1.

另外,从图 2 所示的多目标优化 Pareto 前端还可以看到,本文提出的算法很好地表现出整流供电系统的分层递阶控制特性. 某冶炼厂年电力消耗约为 10.2 亿 kW · h,直接用于电解过程的电量约为 8 亿 kW · h,按平均电价 0.5 元/kW · h 计算,则采

表 3 6 系列不同给定电流时的优化结果

给定电流 I/kA	输出总电流 I_d/kA	稳流精度 $I/\%$	整流效率
12.2	12.240	0.33	0.985 0
16.0	15.922	0.49	0.985 3
19.0	19.090	0.47	0.983 2
26.0	25.829	0.66	0.986 0
34.0	34.065	0.19	0.982 6
45.0	44.920	0.18	0.983 5
68.0	67.390	0.90	0.981 9
75.0	75.372	0.50	0.982 0
90.0	89.746	0.28	0.981 7
100	101.410	1.41	0.980 7

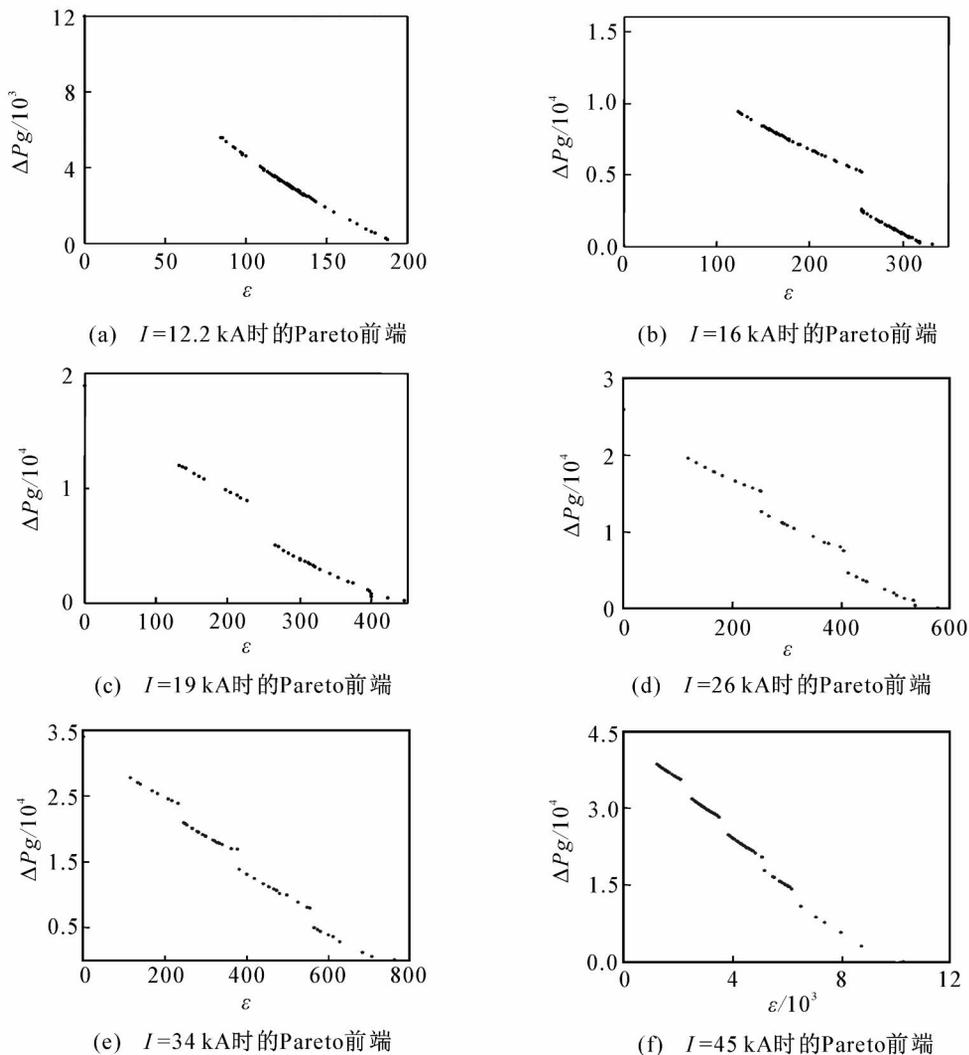


图 2 6 系列电流优化分配的 Pareto 前端

用锌电解整流供电系统的微粒群优化控制策略每年可为企业带来超过 1 500 万元的经济效益。

5 结 语

本文在分析锌电解整流供电系统控制特性的基础上,建立了基于整流效率和整流系统稳流精度的整流供电系统多目标优化控制数学模型,并根据整流供电系统的分级递阶控制特性,借鉴递阶遗传算法中递阶编码的方法,提出一种递阶多目标 PSO 算法,用于整流供电系统各机组电流分配的优化决策。实验结果表明,本文提出的基于 PSO 算法的整流供电系统优化决策方法有效地提高了整流效率和稳流精度,为有色金属电解生产的节能降耗提供了一种新的思路和方法。

参考文献(References)

- [1] Yang Chun-hua, Shen De-yao, Wu Min. Expert optimized control technique for electrolytic deposition process of by hydrometallurgy of zinc [J]. Trans on Nonferrous Metal Society China, 1997, 7(4): 133-137.
- [2] 刘钊斌,冯公伟,崔督普,等. 硅整流所电力设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1983.
(Liu Chan-bin, Fen Gong-wei, Cui Du-pu, et al. Design of rectifier power system [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983.)
- [3] 桂卫华,王雅琳,阳春华,等. 基于模拟退火算法的锌电解过程分时供电优化调度[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 127-130.
(Gui Wei-hua, Wang Ya-lin, Yang Chun-hua, et al. Optimal dispatching system of time sharing power supply for electrolytic zinc process based on simulated annealing algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(1): 127-130.)
- [4] 黄海悦,申群太. 神经网络专家系统在整流直流电力经济运行中的应用[J]. 控制与决策, 2001, 16(6): 940-942.
(Huang Hai-yue, Shen Quan-tai. Application of neural network expert system to optimal operation of direct-current power system[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 940-942.)
- [5] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multi-objective evolution algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.
- [6] Ray T, Liew K M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization [J]. Engineering Optimization, 2002, 34(2): 151-153.
- [7] Coello C A, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiobjectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279
- [8] Hu X, Eberhart R C. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]. Proc of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Hawaii, 2002: 1677-1681.
- [9] Carlo R R, Prospero C N. An effective use of crowding distance in multi-objective particle swarm optimization [C]. Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. Washington, 2005: 257-264.
- [10] Hwang S K, Koo K, Lee J S. Homogenous particle swarm optimizer for multi-objective optimization problem [C]. Proc of the first ICGST International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning. Cairo, 2005: 141-147.
- [11] 王俊年,申群太,周少武. 基于混合递阶遗传算法的判决反馈 RBF 网络信道均衡器设计[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 226-229.
(Wang Jun-nian, Shen Qun-tai, Zhou Shao-wu. Design of RBFN equalizers with decision feedback based on hybrid hierarchy genetic algorithm [J]. Signal Processing, 2006, 22(2): 226-229.)

(上接第 144 页)

- [11] Desoer C A, Yang Y T. On the generalized nyquist stability criterion [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1980, 25: 187-196.
- [12] Tian Y-P, Yang H-Y. Stability of the internet congestion control with diverse delays[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1533-1541.
- [13] Tian Y-P. Stability analysis and design of the second-order congestion control for networks with heterogeneous delays [J]. IEEE/ACM Trans Netw, 2005, 13(5): 1082-1093.
- [14] Athuraliya S, Low S H, Li V H, et al. REM: Active queue management [J]. IEEE Networks, 2001, 15(3): 48-53.