

# 基于人工鱼群算法的电力系统无功优化

唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 蒋秀洁

(华中科技大学电力学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 尝试将人工鱼群算法(AFSA)用于电力系统无功优化,建立了相应的优化模型,对 IEEE6、IEEE14 节点系统及某地区实际电力系统进行了无功优化计算,并与遗传算法(GA)、改进 Tabu 搜索算法(MTSA)进行了比较,结果表明 AFSA 鲁棒性强,全局收敛性好,用于电力系统无功优化计算是有效、可行的。

关键词: 人工鱼群算法; 电力系统; 无功优化; 随机搜索

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)19-0009-04

## 0 引言

电力系统无功优化以满足系统负荷要求和各种运行约束为前提,通过优化计算确定发电机的端电压、有载变压器的分接头档位和无功补偿设备的投切容量等,从而达到使系统的有功损耗和无功补偿费用最小等目标。目前已提出了多种无功优化方法,其中常用的传统算法有:线性规划法<sup>[1]</sup>(LP)、非线性规划法(NLP)、动态规划法(DP)等。这些传统的规划方法已研究和应用多年,但是也存在一些问题,如线性规划法需将模型线性化,这就难以避免较大误差;非线性规划法一般要求目标函数连续可导,因而限制了其应用范围;动态规划法在解高维问题时则会面临维数灾难。近年来,一些新型随机搜索优化算法迅猛发展,由于这些算法可以处理离散、非凸的非线性问题,更有可能找到全局最优解,因而在电力系统无功优化领域得以应用,如遗传算法<sup>[2]</sup>、蚁群算法<sup>[3]</sup>、TS方法<sup>[4]</sup>等。这些新型优化算法的共同特点是在搜索方法上采用随机搜索,因而具有很强的全局搜索能力。它们的应用和发展,使电力系统无功优化的面貌为之一新。

人工鱼群算法<sup>[5,6]</sup>是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索优化算法,主要利用了鱼的觅食、聚群和追尾行为,从构造单条鱼的底层行为做起,通过鱼群中各个体的局部寻优达到全局最优值在群体中突现出来的目的。文献[5,6]的计算实例表明该算法具有良好的克服局部极值、取得全局极值的能力。

本文尝试将人工鱼群算法引入到电力系统无功优化中来,建立了基于该算法的无功优化模型,编制了基于 C++ 语言的优化计算程序。多个算例仿真表明该方法是有效可行的。

## 1 无功优化数学模型

### 1.1 目标函数

在系统有功调度已经给定的情况下,以系统网损最小为目标,以负荷节点电压质量和发电机节点无功出力为罚函数,本文采用扩展的目标函数为:

$$\min F = P_L + \lambda_1 \sum_{j=1}^{N_d} \left( \frac{V_j}{V_{j,\max} - V_{j,\min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{k=1}^{N_g} \left( \frac{Q_k}{Q_{k,\max} - Q_{k,\min}} \right)^2 \quad (1)$$

$$V_j = \begin{cases} V_j - V_{j,\max} & V_j > V_{j,\max} \\ 0 & V_{j,\min} \leq V_j \leq V_{j,\max} \\ V_{j,\min} - V_j & V_j < V_{j,\min} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_k = \begin{cases} Q_k - Q_{k,\max} & Q_k > Q_{k,\max} \\ 0 & Q_{k,\min} \leq Q_k \leq Q_{k,\max} \\ Q_{k,\min} - Q_k & Q_k < Q_{k,\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $N_d$ 、 $N_g$  分别为负荷节点总数、发电机节点总数;  $P_L$  为系统有功损耗;  $V_j$ 、 $V_{j,\max}$ 、 $V_{j,\min}$  分别为节点电压、电压上限值和下限值;  $Q_k$ 、 $Q_{k,\max}$ 、 $Q_{k,\min}$  分别为发电机节点  $k$  的无功出力、无功出力的上限值和下限值;  $\lambda_1$  为负荷节点电压越界惩罚系数;  $\lambda_2$  为发电机无功出力越界惩罚系数。

在目标函数中,第 1 项为有功损耗;第 2 项为对负荷节点电压越界的罚函数;第 3 项为对发电机无功出力越界的罚函数。

### 1.2 功率方程约束

功率约束方程<sup>[2]</sup>,即潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{Gi} - R_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = N \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i = N \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N$  为系统总节点数;  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为发电机节点的有功功率和无功功率出力;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  分别为负荷节点的有功和无功负荷功率;  $Q_{Ci}$  为节点  $i$  无功补偿容量;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $ij$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和电压相角差。

### 1.3 变量约束

变量约束<sup>[2]</sup>可分为控制变量约束和状态变量约束。选取发电机端电压  $V_G$ 、无功补偿节点补偿容量  $Q_C$ 、变压器分接头  $T_t$  为控制变量, 发电机无功出力  $Q_G$ 、负荷节点电压  $V_D$  和线路无功功率  $q_b$  作为状态变量。

控制变量的约束:

$$\begin{cases} V_{Gi. \min} & V_{Gi} & V_{Gi. \max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ Q_{Cj. \min} & Q_{Cj} & Q_{Cj. \max} & j = 1, 2, \dots, N_C \\ T_{tk. \min} & T_{tk} & T_{tk. \max} & k = 1, 2, \dots, N_t \end{cases} \quad (5)$$

状态变量的约束:

$$\begin{cases} Q_{Gi. \min} & Q_{Gi} & Q_{Gi. \max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ V_{Dj. \min} & V_{Dj} & V_{Dj. \max} & j = 1, 2, \dots, N_d \\ q_{bl. \min} & q_{bl} & q_{bl. \max} & l = 1, 2, \dots, N_b \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $V_{Gi}$ 、 $V_{Gi. \max}$ 、 $V_{Gi. \min}$  分别为发电机节点的端电压、端电压上限值和下限值;  $Q_{Cj}$ 、 $Q_{Cj. \max}$ 、 $Q_{Cj. \min}$  分别为无功补偿节点补偿容量、补偿容量的上限值和下限值;  $T_{tk}$ 、 $T_{tk. \max}$ 、 $T_{tk. \min}$  分别为变压器可调分接头、分接头上限值和下限值;  $Q_{Gi}$ 、 $Q_{Gi. \max}$ 、 $Q_{Gi. \min}$  分别为发电机节点无功出力、无功出力上限值和下限值;  $V_{Dj}$ 、 $V_{Dj. \max}$ 、 $V_{Dj. \min}$  分别为负荷节点的电压、电压上限值和下限值;  $q_{bl}$ 、 $q_{bl. \max}$ 、 $q_{bl. \min}$  分别为支路无功潮流、无功潮流的上限值和下限值;  $N_t$ 、 $N_b$  分别为变压器可调分接头数、网络支路数。

## 2 人工鱼群算法

### 2.1 人工鱼群算法简介

在一片水域中, 鱼往往能自行或尾随其它鱼找到营养物质多的地方, 因而鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中营养物质最多的地方。人工鱼群算法就是根据这一特点, 通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群及追尾行为, 从而实现寻优<sup>[5]</sup>。以下是鱼类的几种典型行为:

1) 觅食行为。一般情况下鱼在水中随机、自由地游动, 当发现食物时, 则会向着食物逐渐增多的方向快速游去。

2) 聚群行为。鱼在游动过程中为了保证自身的生存和躲避危害会自然地聚集成群。鱼聚群时所遵守的规则有 3 条: 分隔规则。尽量避免与临近

伙伴过于拥挤; 对准规则。尽量与临近伙伴的平均方向一致; 内聚规则。尽量朝临近伙伴的中心移动。

3) 追尾行为。当鱼群中的一条或几条鱼发现食物时, 其临近的伙伴会尾随其快速到达食物点。

### 2.2 人工鱼群算法描述

文献[5]采用基于行为的多并行通路结构来构造人工鱼个体(AF)的模型, 模型封装了人工鱼的自身状态和行为模式。算法的进行也就是人工鱼个体的自适应行为活动, 个体每活动一次就是算法的一次迭代。

#### 2.2.1 相关定义

人工鱼个体的状态可表示为向量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ , 其中  $x_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 为欲寻优的控制变量; 人工鱼当前位置的食物浓度为  $FC$ ; 人工鱼个体之间的距离表示为  $d_{ij} = |X_i - X_j|$ , 即向量  $(X_i - X_j)$  的二范数;  $VISUAL$  表示人工鱼的感知距离;  $STEP$  表示人工鱼移动步长的最大值;  $\rho$  表示拥挤度因子;  $A_q$  表示安全度系数。

#### 2.2.2 行为描述

##### 1) 觅食行为

人工鱼当前状态为  $X_i$ , 在其可见域内(即  $d_{ij} < VISUAL$ ) 随机选择一个状态  $X_j$ , 当该状态食物浓度大于当前状态时, 则向该方向前进一步; 反之, 则重新随机选择状态  $X_j$ , 判断是否满足前进条件; 反复几次后, 如果仍不满足前进条件, 则随机移动一步。用数学表达式表示为:

$$\begin{cases} x_{i \text{ next } k} = x_{ik} + \text{Random}(STEP)(x_{jk} - x_{ik}) / |X_j - X_i| & FC_j > FC_i \\ x_{i \text{ next } k} = x_{ik} + \text{Random}(STEP) & FC_j \leq FC_i \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, K$ ;  $x_{jk}$ 、 $x_{ik}$  和  $x_{i \text{ next } k}$  分别表示状态向量  $X_j$ 、 $X_i$  及人工鱼下一步状态向量  $X_{i \text{ next}}$  的第  $k$  个元素,  $\text{Random}(STEP)$  表示  $[0, STEP]$  间的随机数。以下各式中的符号含义与此相同。

##### 2) 聚群行为

人工鱼当前状态为  $X_i$ , 设其可见域内的伙伴数目为  $n_{f1}$ , 形成集合  $KI_i$ , 且

$$KI_i = \{ X_j \mid |X_j - X_i| < VISUAL \} \quad (8)$$

若  $KI_i = \emptyset$  ( $\emptyset$  为空集), 表明其可见域内存在其他伙伴, 即  $n_{f1} > 1$ , 则按式(9)探索伙伴中心位置  $X_c$ 。

$$x_{ck} = \left( \sum_{j=1}^{n_{f1}} x_{jk} \right) / n_{f1} \quad (9)$$

式中:  $x_{ck}$  表示中心位置状态向量  $X_c$  的第  $k$  个元素;  $x_{jk}$

表示第  $j(j=1,2,\dots,n_{f1})$  个伙伴  $X_j$  的第  $k$  个元素。计算该中心位置的食物浓度值  $FC_c$ , 如果满足式(10)

$$e^{Aq(FC_c/)} > FC_i \quad (Aq < 1, > 1) \quad (10)$$

表明伙伴中心位置安全度较高并且不太拥挤, 则执行式(11); 否则人工鱼执行觅食行为。

$$x_{nextk} = x_{ik} + Random(STEP)(x_{ck} - x_{ik}) / X_c - X_i \quad (11)$$

若  $KI_i = \hat{\delta}$ , 表明可见域内不存在其他伙伴, 则执行觅食行为。

### 3) 追尾行为

人工鱼当前状态为  $X_i$ , 探索可见域内的所有伙伴中  $FC$  最大的伙伴  $X_{max}$ , 如果满足式(12)

$$FC_{max} > FC_i \quad (12)$$

表明伙伴  $X_{max}$  的食物浓度高且其周围不太拥挤, 则执行式(13); 否则执行觅食行为。

$$x_{nextk} = x_{ik} + Random(STEP)(x_{maxk} - x_{ik}) / x_{max} - X_i \quad (13)$$

式中:  $x_{maxk}$  表示状态向量  $X_{max}$  的第  $k$  个元素。

若人工鱼当前可见域内没有其他伙伴, 也执行觅食行为。

### 4) 公告板

算法中设立一个公告板<sup>[6]</sup>, 用以记录最优人工鱼个体状态及该人工鱼位置的食物浓度值。每条人工鱼在行动一次后就将自身当前状态与公告板进行比较, 如果优于公告板则用自身状态取代公告板状态。

### 2.2.3 行为选择

对人工鱼当前所处的环境进行评价, 即模拟执行聚群、追尾行为, 然后选择行动后食物浓度值较大的动作来执行, 缺省行为方式为觅食行为。

## 3 无功优化问题的求解

用人工鱼群算法求解无功优化问题, 可按以下步骤进行:

1) 输入原始数据, 获取节点信息和支路信息, 获得控制变量的个数及各自的取值范围, 获取人工鱼群的群体规模  $N$ , 最大迭代次数  $G_{emax}$ , 人工鱼的可见域  $VISUAL$ , 人工鱼的移动步长最大值  $STEP$ , 拥挤度因子, 安全度系数  $Aq$  等参数。

2) 当前迭代次数  $G_{en} = 0$ , 利用随机数发生器在控制变量可行域内随机生成  $N$  个人工鱼个体, 形成初始鱼群。人工鱼个体的控制变量取值序列为  $X = [T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1N}, V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GN}, Q_{C1}, Q_{C2}, \dots, Q_{CN}]$ , 每个

个体按以下方法产生:

a. 生成  $N_f + N_g + N_c$  个(设共为  $K$  个)  $[0, 1]$  区间内的随机数, 并根据式(14) 计算出控制变量值:

$$x_k = Random(x_{kmax} - x_{kmin}) + x_{kmin} \quad (14)$$

式中:  $x_k(k=1, 2, \dots, K)$  为控制变量;  $Random(x_{kmax} - x_{kmin})$  为  $[x_{kmin}, x_{kmax}]$  区间的随机数;  $x_{kmax}, x_{kmin}$  为各控制变量的上限及下限。

b. 根据各控制变量的取值进行潮流计算, 若潮流收敛, 则保留该初始人工鱼个体, 否则转本步 a。

c. 已生成  $N$  个人工鱼, 转步骤 3), 否则转本步 a。

3) 计算初始鱼群各人工鱼个体当前位置的食物浓度值(取为式(1)中  $F$  的倒数, 即  $FC = 1/F$ ), 并比较大小, 取  $FC$  为最大值者进入公告板, 保存其状态及  $FC$  值。

4) 各人工鱼分别模拟执行。追尾行为; 聚群行为; 选择行动后  $FC$  值较大者的行为实际执行, 缺省行为方式为觅食行为。

5) 各人工鱼每行动一次后, 检验自身状态与公告板状态, 如果优于公告板状态, 则以自身状态取代之。

6) 中止条件判断。判断  $G_{en}$  是否已达到预置的最大迭代次数  $G_{emax}$ , 若是, 则输出计算结果(即公告板的值), 否则  $G_{en} = G_{en} + 1$ , 转步骤 4)。

## 4 实例计算及结果分析

利用上述模型及求解方法, 用 C++ 语言编程对 IEEE6、14 节点系统及某地区实际电力系统进行了计算测试, 取得了较好的结果。下面主要以 IEEE6 及 IEEE14 节点系统为例, 来说明本算法的有效性和可行性。

IEEE6 节点系统数据及接线图见文献[8], 选取节点 1 为平衡节点, 节点 4 和 6 为无功补偿点。用本文算法进行优化, 算法的参数选择分别为: 人工鱼群体规模  $N = 16$ , 移动步长  $STEP = 0.005$ , 人工鱼的可见域  $VISUAL = 0.025$ , 拥挤度因子  $= 1.618$ , 安全系数  $Aq = 0.9$ , 基准功率  $S_B = 100$  MVA。为便于比较, 本文还分别给出了基于遗传算法(GA)<sup>[3]</sup>和基于改进 Tabu 搜索算法(MTSA)<sup>[8]</sup>的优化结果, 如表 1 所示。

从表 1 可看出: 初始潮流有功网损为 11.505 MW, 用 AFSA 优化后的结果为 8.85 MW, 下降了 2.655 MW, 即有功网损降低了 23.08%; 同初始潮流相比, 优化后各负荷节点电压有了明显改善; GA 及 MTSA 优化后的网损分别为 8.92 MW 和 8.86 MW, 而本文算法为 8.85 MW, 相比之下本文算法略优。

表 1 IEEE6 节点系统变量上下限和无功优化计算结果

Tab. 1 Limits of variables and results of VAR optimization for IEEE6 node system

变量名称	上限值	下限值	初始潮流	GA 优化 <sup>[3]</sup>	MISA 优化 <sup>[8]</sup>	AFSA 优化	
变压器变比	$T_{65}$	1.10	0.90	1.10	0.953 9	0.949 3	0.9608
	$T_{43}$	1.10	0.90	1.025	0.984 1	0.983 4	0.9814
发电机电压	$V_G$	1.10	1.00	1.05	1.093	1.100 0	1.099 2
	$V_{GE}$	1.15	1.10	1.10	1.145	1.141 7	1.142 4
无功补偿容量	$Q_{C4}$	0.050	0.000	0.00	0.048	0.050	0.050
	$Q_{C6}$	0.055	0.000	0.00	0.055	0.055	0.055
发电机无功出力	$Q_G$	1.00	-0.20	0.377 0	0.374	0.392	0.381 3
	$Q_{GE}$	1.00	-0.20	0.345 6	0.186	0.165	0.175 1
负荷节点电压	$V_{D3}$	1.00	0.90	0.858 6	0.998	1.002	1.004 6
	$V_{D4}$	1.00	0.90	0.953 7	0.999	1.004	1.0042
	$V_{D5}$	1.00	0.90	0.901 0	0.998	1.002	0.995 8
	$V_{D6}$	1.00	0.90	0.933 6	0.981	0.984	0.9869
有功网损 ( $P_{loss}$ )				0.115 05	0.089 2	0.088 6	0.088 5

IEEE14 节点系统数据及接线图见文献[9],该系统包含 2 台发电机、3 台可调变压器及 3 个无功补偿点。对该系统进行无功优化计算,算法参数选择同 IEEE6 节点系统。限于篇幅,本文仅给出优化后的网损。优化前初始网损为 17.6 MW,优化后结果为 12.51 MW。文献[3]中广义蚁群算法结果为 12.55 MW,本文结果与之相近。

## 5 结论

人工鱼群算法是一种新的随机搜索优化算法。它通过并行运算寻优,可以用来解决一些非凸、非线性及离散的优化问题,为一些优化问题的解决提供了一条新的思路。本文尝试将其应用到电力系统无功优化中来,多个算例仿真试验结果表明 AFSA 鲁棒性强、全局收敛性好,用于无功优化是有效可行的。由于人工鱼群算法是一种通用的优化算法,在对算法参数的确定方法进一步完善和对邻域的搜索效率进一步提高后,相信其在优化领域的应用前景将会更加广阔。

## 参考文献:

- [1] Gudin N. Reactive Power Optimization Using Successive Quadratic Programming Method [J]. IEEE Trans on PWRs, 1998, 13(4): 1219-1225.
- [2] 熊信银,吴耀武(XIONG Xin-yin, WU Yao-wu). 遗传算法及其在电力系统中的应用(Genetic Algorithms & Its Application in Power Systems) [M]. 武汉:华中科技大学出版社(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 2002.
- [3] 林昭华,侯云鹤,熊信银,等(LIN Zhao-hua, HOU Yun-he, XIONG Xin-yin, et al). 广义蚁群算法用于电力系统无功

优化(Generalized Ant Colony Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization in Power System) [J]. 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 2003, 30(2): 6-9.

- [4] Laguna M, Glover F. Bandwidth Packing: A Tabu Search Approach [J]. Management Science, 1993, 39(4): 492-500.
- [5] 李晓磊,邵之江,钱积新(LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, QIAN Ji-xin). 一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法(An Optimizing Method Based on Autonomous Animals: Fish swarm Algorithm) [J]. 系统工程理论与实践(Systems Engineering Theory & Practice), 2002, 22: 32-38.
- [6] 李晓磊,钱积新(LI Xiao-lei, QIAN Ji-xin). 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究(Studies on Artificial Fish swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques) [J]. 电路与系统学报(Journal of Circuits and Systems), 2003, 8(1): 1-6.
- [7] Swarm semiotics J H, Rauch I, Carreds G. Semiotics Around the World [A]. Proceedings of the Fifth Congress of the International Association for Semiotic Studies. Berkeley (Barlin): 1994. Berlin/ New York: 1997. 937-940.
- [8] 王洪章,熊信银,吴耀武(WANG Hong-zhang, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu). 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化(Power System Reactive Power Optimization Based on Modified Tabu Search Algorithm) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 26(1): 15-18.
- [9] 张伯明,陈寿孙(ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun). 高等电力网络分析(Advanced Analysis of Power System) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1994.

收稿日期: 2004-02-09; 修回日期: 2004-02-27

(下转第 33 页 continued on page 33)

## Method analysis and comparison of power distribution systems composed of PV nodes with constant Jacobian matrix

HE Jiang-sheng, SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, SHAN Ya-zhou

(Electrical Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With the increasing demand for real-time control of power distribution system, it is necessary to search for a new method which could not only form constant Jacobian coefficient matrix to accelerate iteration convergence rapidly, but also solve ill-conditioned nonlinear algebraic equation not to result in divergence as well. Based on Newton-Raphson method in polar form and derived from complex power equation, the Jacobian matrix of the proposed method has become constant by neglecting node load power which will bring less influence in iterating process and by linearizing the real and image of PV node voltage to magnitude. The applicability of constant Jacobian matrix has been demonstrated in detail and tested by numerical tests. The results show that the proposed method is very efficient and require less computer memory obviously. It does not need to decouple, and the ratio of resistance and reactance does not influence its convergence. The proposed method has excellent convergence characteristics and much better robustness. The results of the algorithm are analyzed in this paper. The proposed method can be used in meshed distribution and transmission networks as well.

**Key words:** power distribution system; load flow; constant Jacobian matrix

(上接第 12 页 continued from page 12)

作者简介:

唐剑东(1976-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中的应用; E-mail: tangjdw@vip.sina.com

熊信银(1945-),男,教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中应用;

吴耀武(1963-),男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

## Reactive power optimization of power system based on artificial fish swarm algorithm

TANG Jian-dong, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, JIANG Xiu-jie

(School of Electric Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** An artificial fish swarm algorithm(AFSA) for reactive power optimization of power system and a model based on AFSA are presented for the first time in this paper. Compared with the genetic algorithm(GA) and the modified Tabu search algorithm(MTSA), the reactive power optimization result of IEEE 6, IEEE 14 node system and a real region power system by AFSA shows that AFSA has a strong robustness and good global astringency. It also shows that AFSA is a successful and feasible approach for reactive power optimization.

**Key words:** artificial fish swarm algorithm; power system; reactive power optimization; random search

(上接第 17 页 continued from page 17)

## Multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model

LIU Shao-feng, GAO Jiu-feng, LI Peng

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** This paper performs a multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model using a general nonlinear analysis software Auto97. The results indicate that the method by multi-parameter bifurcation analysis is superior to that by single-parameter analysis in discovering the influences of system parameters on voltage stability of power system. The results imply that a higher reference voltage( $V_{ref}$ ) and a bigger exciter gain( $K_{AVR}$ ) can not only increase the power transmission limit of the system, but also decrease the possibility of voltage collapse caused by system voltage oscillating. The analysis also indicates that there is a complementary relation between  $V_{ref}$  and  $K_{AVR}$ , thus adjusting  $K_{AVR}$  and  $V_{ref}$  properly can avoid Hopf bifurcation and maintain the system's security operation, and that a higher limit of the excitation conduces to sustaining system voltage dynamic stability.

**Key words:** power systems; voltage stability; saddle-node bifurcation; Hopf bifurcation