

# 自适应免疫遗传算法及其在区域电力系统 最优备用容量计算中的应用

史美娟<sup>1,2</sup>, 唐冬雷<sup>2</sup>, 张集作<sup>3</sup>, 吴杰康<sup>1</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 柳州职业技术学院电子电气工程系, 广西 柳州 545006

3. 国电南方公司柳州超高压局, 广西 柳州 545000)

**摘要:** 充分利用区域互联电力系统在紧急情况下可以互相支援互为备用的特点, 建立了区域电力系统的最优备用容量数学模型, 该模型采用基于最小发电成本函数和最小网损函数组成的归一化最小综合经济成本作为目标函数。针对问题的具体特点, 运用自适应免疫遗传算法求解最优备用容量, 利用图论中的最大支撑树概念, 采用自动产生可行解的编码策略对染色体进行编码, 以及交叉、变异概率的自适应选取, 在 IEEE30 节点测试系统上的仿真结果验证了所提模型的合理性、所提方法的可行性。

**关键词:** 区域电力系统; 最优备用容量; 多种群自适应免疫遗传算法; 自适应交叉率; 自适应变异率

**Adaptive immune genetic algorithm based method for optimal reserve calculation of regional power system**

SHI Mei-juan<sup>1,2</sup>, TANG Dong-lei<sup>2</sup>, ZHANG Ji-zuo<sup>3</sup>, WU Jie-kang<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Information Engineering Department of Liuzhou Vocation & Technical College, Liuzhou 545006, China;

3. Liuzhou Super High Voltage Bureau, State Power South Company, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** To take full advantage of the characteristic of the regional interconnection power systems which support and supply reserve for each other under emergencies. A novel model called optimal reserve capacity (ORC) model is presented in the paper. The optimal reserve capacity model consists of minimum generation costs function and minimum grids losses function to minimize the integration economical cost. According to the complex characteristics of the problem, the adaptive immune genetic algorithms is used to calculate the optimal reserve capacity, which introduces the maximal supporting tree idea from the plot theory. A novel chromosome coding strategy is proposed to produce automatic feasible keys. This algorithm based on adaptive crossover and mutation probabilities are adopted. The reasonability of the proposed model and the feasibility of the proposed method have been validated on the IEEE 30 Buses rectified test system.

This paper is supported by National Natural Science Foundation of Guangxi Province(No.0640028).

**Key words:** regional power systems; optimal reserve capacity; multiple population adaptive immune genetic algorithms; adaptive crossover operator; adaptive mutation operator

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0015-06

## 0 引言

在电力系统中, 由于发电机的随机停运、负荷的波动、负荷预测的偏差、线路的故障等, 都会造成对电力系统平衡状态的破坏, 为了保证系统的安全可靠运行, 必须留有一定的备用容量。

然而, 随着电网互联步伐的加快, 区域电力系统的建立, 可以在互联网之间经济地利用全区域

的资源进行备用的分配和协调, 在紧急情况下区域互联网之间可以互相支援, 既可以确保区域系统有足够的可靠性, 又不因保持过大的备用而导致系统运行不经济。基于可靠性和经济性的考虑, 在区域电力系统下, 如何建立最优备用容量数学模型并研究求解该模型的算法, 有着重要的理论价值与现实意义。

目前, 在区域电力系统中关于备用容量的研究还处于探索阶段, 世界各国的电力系统实践表明还没有一套大家公认的成熟经验和研究成果。文献[1]在统一定价(uniform-price)和差别定价(pay as bid)模式下, 提出了电力系统中运行备用容量是具有弹性

**基金项目:** 广西自然科学基金资助项目(桂科自 0640028); 广西壮族自治区教育厅资助项目; 广西壮族自治区研究生教育创新计划资助项目

的,应该通过费用-效益分析使其达到最优,基于电力系统可靠性评估,提出了以最大化社会效益为目标函数的弹性运行备用模型,并且运用基于品质次序的启发式算法对模型进行求解。在文献[2]中,提出了基于经济合同策略的常备用模型,其目标函数为购买运行备用总费用最小(在满足备用需求的情况下)。文献[3]提出在电力市场环境,为供需双方所乐于接受的供电中断不应认为是对系统安全可靠运行的破坏,处于该种情况下的系统应该被认为是供电连续的,并在此基础上提出了市场环境下事故备用容量的确定应在综合考虑保留事故备用容量费用和切负荷赔偿费用的基础上,求取经济上最优的事故备用容量。文献[5]利用概率统计方法,对切负荷措施的可行性、保留负荷备用容量成本及切负荷赔偿费用进行了分析,提出市场环境下负荷备用容量的确定应在综合考虑保留备用容量成本和切负荷赔偿费用的基础上,求取经济上最优的负荷备用容量。文献[7]提出一种确定备用容量的算法,根据经济学中的效用无差异理论,引入可中断负荷替代一部分备用容量,利用存储理论概念建立最优备用容量的数学模型,结合历史数据资料中备用容量利用的概率,运用决策论的算法求解最优备用容量。但是,这些关于备用容量的研究,主要是建立单目标数学模型,只能够使一个目标优化,而不能兼顾其他的优化目标。

本文提出的最优备用容量模型为基于最小发电成本和最小网损的归一化综合经济成本最小的多约束优化模型,充分利用区域互联电网在紧急情况下可以互相支援互为备用的特点,利用多种群自适应免疫遗传算法对模型进行求解。

## 1 区域电力系统最优备用的数学模型

### 1.1 目标函数

在区域电力系统中,确定最优备用容量是一个非常复杂的问题,需要考虑很多的变量和约束。

系统备用关系到电力系统的安全运行和可靠性,随着电网互联步伐的加快,电网互联会带来诸如电网错峰、水火电互补、功率紧急支援等一系列的经济效益,但也会给区域系统安全稳定运行造成威胁,某一子区域电力系统的故障,如果没有得到及时合理的处理,可能会波及其它的子区域电力系统,造成事故范围扩大,严重威胁整个区域电力系统的安全可靠运行。本文在考虑区域电力系统安全稳定和经济运行的前提下,求取最优的备用容量,使得归一化的综合经济成本达到最小化,实现互联电网的安全稳定经济运行。

在区域电力系统中,假设某一时间段 $t$ ,某区

域独立子系统1所需的备用容量为 $P_{R,1}$ ,其数学模型可表示为

$$\min C(P_G) \& \min P_{Loss} \quad (1)$$

式中: $C(P_G)$ 为发电成本函数, $P_{Loss}$ 为网损函数。

考虑 $C(P_G)$ 与 $P_{Loss}$ 量级的一致性,再利用权重和方法为每个目标函数分配权重并将其组合为一个目标函数,表示为

$$\min z = \lambda_1 C(P_G) + 10^3 \lambda_2 E_{price} P_{Loss} \quad (2)$$

式中: $z$ 为归一化目标函数; $\lambda_1, \lambda_2$ 为权重系数, $0 < \lambda_1, \lambda_2 \leq 1, \lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ;  $E_{price}$ 为网损价格,本文取为30,单位为 $\$/kW \cdot h$ 。

通过对式(2)的求解,可得第 $i$ 台发电机的最优发电出力 $P_{best,i}$ ,则在时间段 $t$ ,区域独立子系统1所需的最优备用容量 $P_{Rbest,1}$ 可以表示为

$$P_{Rbest,1} = \sum_{i=1}^N p_i \eta_i P_{N,i} = \alpha \bar{D}(t) + \Delta P \quad (3)$$

式中: $N$ 为三区域系统中发电机的总台数,充分体现了备用共享的原则; $p_i$ 为第 $i$ 台发电机备用被调用的概率,备用被调用的概率主要考虑机组 $i$ 发生故障的概率; $\eta_i$ 为第 $i$ 台发电机的备用系数,表征的是第 $i$ 台发电机承担备用的能力大小,可以定义为 $\eta_i = \frac{P_{N,i} - P_{best,i}}{P_{N,i}}$ ;  $P_{N,i}$ 为第 $i$ 台发电机的额定出力;

$\alpha$ 为负荷预测误差; $\bar{D}(t)$ 为已知时段 $t$ 的实际负荷; $\Delta P$ 为发电机组随机强迫停运容量。目标函数的约束条件包括:

1) 发电机运行约束

$$P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max} \quad i = 1, 2, \Lambda, N_G \quad (4)$$

式中: $P_{Gi}^{\max}$ 、 $P_{Gi}^{\min}$ 为发电机有功功率上、下限; $P_{Gi}$ 为第 $i$ 台发电机的出力。

2) 节点电压约束

$$K_u(U_i) = \begin{cases} K_u (U_i^{\min} - U_i)^2 & U_i < U_i^{\min} \\ K_u (U_i - U_i^{\max})^2 & U_i > U_i^{\max} \\ 0 & U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_i$ 为节点 $i$ 的电压; $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为 $U_i$ 的上、下限; $K_u$ 为节点电压惩罚因子,作为对越限的惩罚,一般取值较大,满足要求时则取值为0。

3) 输电线电流约束

$$K_i(I_i) = \begin{cases} K_i(I_i - I_{hi})^2 & I_i \geq I_{hi} \\ 0 & I_i < I_{hi} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $I_i$  为节点  $i$  的电流;  $I_{hi}$  为支路  $i$  线路的载流量;  $K_i$  为线路电流惩罚因子, 取值的原则同  $K_u$ 。

#### 4) 机组备用容量约束

$$R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max} \quad (7)$$

式中:  $R_i^{\min}$ 、 $R_i^{\max}$  分别为机组  $i$  能提供的最小、最大备用容量。

#### 5) 联络线安全传输容量约束

$$R_{t,l} + P_{t,l} \leq P_{t,l}^{\max} \quad (8)$$

式中:  $R_{t,l}$  表示某一段时间  $t$  联络线  $l$  传输的备用容量;  $P_{t,l}$  表示此时联络线  $l$  传输的功率;  $P_{t,l}^{\max}$  表示此时联络线的传输能力。该约束表示备用在调度中, 不能超过联络线传输容量的限制。

### 1.2 发电成本函数

如果忽略少量的管理成本, 水电的发电成本相对于火电可以认为是零, 在此假设水电的发电成本为零。设  $P_{Gi}$  为第  $i$  台发电机有功功率,  $C_i(P_{Gi})$  为第  $i$  台发电机的成本函数。对于  $C_i(P_{Gi})$ , 一般用二次函数近似表示为

$$C_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + \left| e_i \sin(C_i(P_{Gi}^{\min} - P_{Gi})) \right| \quad (9)$$

式中:  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为常数,  $e_i$ 、 $f_i$  为第  $i$  台发电机阀点效应常数,  $P_{Gi}^{\min}$  为第  $i$  台发电机的有功功率下限。

### 1.3 网损函数

网损是电源、负荷的非线性函数, 一般占总输电量的 3%~10% 左右, 但其累计效应不容忽视。本文引入<sup>[12]</sup>以支路功率损耗表示的网损计算公式

$$P_{\text{Loss}}^j = g_{ij} \left[ V_i^2 + k_{ij}^2 V_j^2 - 2k_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \right] + g_{i0} V_i^2 \\ = g_{i0} V_i^2 + g_{ij} \left[ (V_i - k_{ij} V_j)^2 + 4k_{ij} V_i V_j \sin^2 \frac{\theta_{ij}}{2} \right] \quad (10)$$

式中:  $g_{ij}$  为支路  $i$ 、 $j$  的电导;  $V_i$ 、 $V_j$  为节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  的电压相角差; 若支路为变压器支路,  $k_{ij}$  为折算到  $i$  侧的非标准变压器变比值,  $g_{i0}$  为折算到  $i$  侧的由铁耗引起的等效电

导; 若支路为线路, 则  $k_{ij} = 1$ ,  $g_{i0} = 0$ 。

用麦克劳林公式将正弦函数展开并取其三阶近似, 则支路  $i$ 、 $j$  的三阶近似网损计算公式为

$$P_{\text{Loss}}^j = g_{i0} V_i^2 + g_{ij} (V_i - k_{ij} V_j)^2 + g_{ij} k_{ij} V_i V_j \left( \theta_{ij} - \frac{\theta_{ij}^3}{24} \right)^2 \quad (11)$$

全网的三阶近似网损计算公式为

$$P_{\text{Loss}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{\text{Loss}}^{ij} \\ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ g_{i0} V_i^2 + g_{ij} (V_i - k_{ij} V_j)^2 \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij} k_{ij} V_i V_j \left( \theta_{ij} - \frac{\theta_{ij}^3}{24} \right)^2 \quad (12)$$

式中:  $n$  为三区域系统总节点数。

若采用直流潮流模型, 并忽略无功的影响, 即认为  $V_i = V_j \approx 1.0$  p.u.,  $g_{i0} = 0$ , 系统总网损计算公式(12)可简化为

$$P_{\text{Loss}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij} k_{ij} \left( \theta_{ij} - \frac{\theta_{ij}^3}{24} \right)^2 \\ = \frac{1}{1152} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij} k_{ij} \left[ \theta_{ij} (2\sqrt{6} + \theta_{ij}) (2\sqrt{6} - \theta_{ij}) \right]^2 \quad (13)$$

## 2 多种群自适应免疫遗传算法求解最优备用容量模型

采用多种群自适应免疫遗传算法求解式(2)的步骤为:

1) 抗原识别。输入目标函数及约束条件作为多种群免疫遗传算法的抗原, 设定种群规模  $\text{Popsiz}$ 。针对待求解问题, 判断系统是否求解过此类问题。若系统曾求解过此类问题, 则从记忆库中搜寻该类问题的记忆抗体, 作为求解该问题的初始解, 否则在解空间中用随机的方法产生初始群体。

2) 提取疫苗。采用多种群免疫遗传算法进行区域电力系统最优备用容量计算, 首先需要根据目标函数中的特征信息提取多种疫苗。经过综合分析, 从中抽取两种疫苗-发电成本最小的发电机组和电导最小的线路, 建立两个种群进行免疫遗传进化。

3) 染色体编码策略。利用图论中最大支撑树的概念, 采用自动产生可行解的编码策略对染色体进

行编码。

4) 适应度函数。综合考虑目标函数和约束条件, 建立适合的适应度函数来评价个体的优劣。本文采用罚函数方法处理约束条件, 则增广目标函数  $f$  为:

$$\min f = z + h_1(P_{NS}) + h_2(f_E) + h_3(R_E) \quad (14)$$

式中包括目标函数  $z$  和违反约束条件所对应的惩罚函数  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ , 各符号意义如下:  $P_{NS}$  为联络线过载容量;  $f_E$  为频率超标程度;  $R_E$  为备用超标容量。其中惩罚函数的选取原则为无论  $x$  取任何值, 对于任意的  $x_i$ 、 $x_j$ 、 $x_k$  必须满足:

$$h_1(x_i) < h_2(x_j) < h_3(x_k) \quad (15)$$

5) 遗传操作。应用精英选择法进行选择操作, 采用自适应策略进行交叉、变异操作。

交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$  的自适应表达式为:

$$p_c = \begin{cases} k_2, & g < \bar{g} \\ k_1 \frac{(g_{\max} - g)^*}{g_{\max} - \bar{g}}, & g \geq \bar{g} \end{cases} \quad (16)$$

$$p_m = \begin{cases} k_4, & g < \bar{g} \\ k_3 \frac{(g_{\max} - g)}{g_{\max} - \bar{g}}, & g \geq \bar{g} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $g_{\max}$  为群体中的最大适应度值;  $\bar{g}$  为每代群体的平均适应度值;  $g^*$  是进行交叉的两个个体中较大的适应度值;  $g$  是进行变异个体的适应度值;

$0 < k_1, k_2, k_3, k_4 \leq 1$  为常数。

6) 在每一个种群中, 按比例  $\gamma (0 < \gamma < 1)$  随机抽取  $n \times \gamma$  个个体接种疫苗, 并进行免疫检测, 适应度不如父代的个体将被父代中对应的个体所代替, 适应度优于父代的个体, 采用模拟退火选择, 以某一概率选择接种后的个体进入群体。

7) 收敛条件。采用多种群自适应免疫遗传算法进行区域电力系统最优备用容量的求解, 在进化过程中, 将每一代最优个体放入精华群体加以保存。因此, 可采用最优个体保持迭代数作为算法的收敛依据, 文中设定为 80 次。

### 3 算例与分析

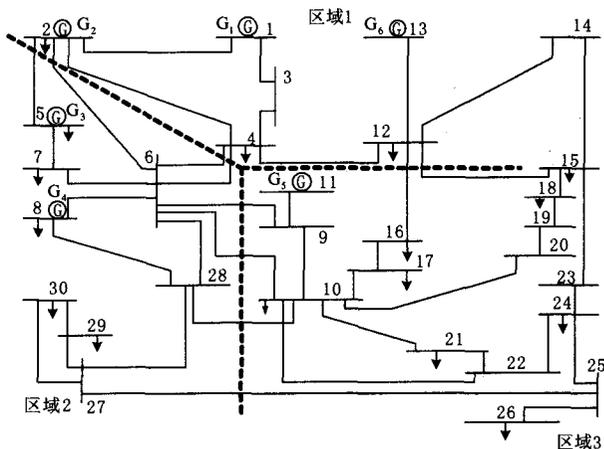


图 1 IEEE30 节点 3 区域系统示意图  
Fig.1 Diagram of partitioning IEEE 30-bus system into three regional areas

采用 IEEE30 节点系统为例, 对上述模型和算法进行验证。根据需要对数据作了一些修改: 去掉节点 3、14、19、20、23 处的负荷, 节点 14 与节点 15、节点 10 与节点 28 之间分别为交直流混合超高压输电线路, 如表 1 所示。因此, 算例系统包括 6 台发电机, 节点编号分别为 1, 2, 5, 8, 11, 13, 划分为三个控制区, 每个控制区相当于一个省级独立子电力系统, 参与整个区域电力系统的电力交易, 网络结构如图 1 所示。

表 1 IEEE30 节点系统机组参数

Tab.1 Generator parameter for IEEE 30-bus system

| 机组序号 | 最小出力 /MW | 最大出力 /MW | $a_i$     | $b_i$ | $c_i$ |
|------|----------|----------|-----------|-------|-------|
| 1    | 50       | 200      | 0.000 338 | 11.2  | 227   |
| 2    | 20       | 80       | 0.000 299 | 10.1  | 671   |
| 5    | 15       | 50       | 0.007 00  | 7.0   | 340   |
| 8    | 10       | 35       | 0.009 5   | 10.0  | 300   |
| 11   | 10       | 30       | 0.000 301 | 10.1  | 630   |
| 13   | 12       | 40       | 0.000 205 | 10.4  | 500   |

本文的负荷模型采用典型日负荷曲线, 三区总负荷为 3626.4 MW, 区域独立子系统 1 的总负荷为 1454.4 MW, 同时假设三区电网的负荷预测误差均为 3.36%。

表 2 发电机组发生故障的概率

Tab.2 Failure probability of generator units

| 机组编号 | 1        | 2        | 5        |
|------|----------|----------|----------|
| 故障概率 | 0.018 34 | 0.011 96 | 0.012 70 |
| 机组编号 | 8        | 11       | 13       |
| 故障概率 | 0.006 48 | 0.008 20 | 0.006 78 |

本文选取最优个体保持迭代数作为算法的收敛依据, 设定为 75 次, 迭代次数达到设置上限 400 次, 群体规模为 30, 得到整个区域独立子电网 1 的最优备用容量和整个区域电网最小经济成本即目标

函数值, 具体如表 3 所示, 根据算法的收敛条件, 将精华群体中每一代最优个体及其目标函数值分三种情况进行了比较, 如图 2 所示。

表 3 各种情况下区域独立子电网 1 的最优备用容量及目标函数值

Tab. 3 The regional 1 optimal reserve and all power grid objective function results in all cases

|                        | 情况 1        |             | 情况 2        |             | 情况 3        |             |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                        | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ |
| 权重系数                   | 0.3         | 0.7         | 0.5         | 0.5         | 0.7         | 0.3         |
| 目标函数值 / ( $10^4$ \$/d) | 3.5801      |             | 3.3019      |             | 3.0489      |             |
| 最优备用容量/MW              | 33.0871     |             | 21.4502     |             | 27.8572     |             |

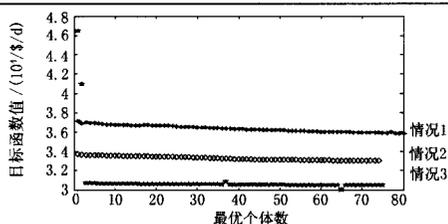


图 2 不同权重系数下的目标函数值

Fig.2 Objective function value in different weight coefficient

由表 3 和图 2 可以看出, 不断改变权重的大小, 将可以得到不同的满意解。具体地说, 当  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ , 区域独立子电网 1 的最优备用容量最小为 21.4502 MW, 但最小经济成本是情况 1 最小经济成本的 92.229%、是情况 2 最小经济成本的 108.298%, 具体采用哪种方案, 要根据具体情况进行选择。同样地, 在不考虑阻塞的情况下, 对整个区域电网来说, 备用的主要问题是装机容量不足, 当运行中的大机组故障时, 系统频率维持困难, 易造成频率崩溃。具体地对区域独立子电网 1 来说, 在典型日 24 点负荷, 机组 1 由于故障退出运行, 最优备用容量是其总负荷的 13.294%~21.563%, 当负荷到达峰荷时, 最优备用容量为峰荷的 11.61%~15.32%, 整个系统的可靠性运行受到了极大的威胁。

由于在计算时还有很多实际的因素没有考虑进去, 如能源约束问题、发电机组爬坡率问题、人为因素等, 因而这些仿真数据并不能真正反映备用需求, 所以认为计算结果比较保守。

#### 4 结论

本文将自适应免疫遗传算法用于求解区域电力系统最优备用容量问题, 根据电力系统具体的负荷特点, 建立了相应的多目标多约束的自适应最优备用容量模型。与现有的备用容量计算方法相比, 所提出的方法可以比较适当地处理多目标多约束优化问题。本文按照动态经济调度模型求取发电机

的最优发电出力, 通过备用系数的定义, 将发电机的最优备用容量与发电机的出力联系起来, 推导了全网的三阶近似网损计算公式, 最后将本文提出的方法应用到具体算例中, 算例计算结果合理, 准确度也较高, 说明了本文所提出方法的基本特征和可行性, 为区域电力系统下备用容量的求解提出了一种新的思路。

#### 参考文献

- [1] Wang J X, Wang X F and Wu Y. Operating Reserve Model in the Power Market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 2(1): 223-229.
- [2] Li F, Zhang X, Dunn R W. Optimal Standing Reserve Utilization Using Genetic Algorithms[A]. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Ohio(USA):553-558.
- [3] 谭论农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.  
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui. Reserve Capacity for Accident in Power Market Environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 54-58.
- [4] 李蔚, 刘长东, 盛德仁, 等. 基于免疫遗传算法的机组负荷优化分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 241-245.  
LI Wei, LIU Chang-dong, SHENG De-ren, et al. Research on Optimization of Unit Commitment Based on Immune Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 241-245.
- [5] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 86-92.  
WANG Zhi-guo, LIU Ji-zhen, TAN Wen, et al. Multi-objective Optimal Load Distribution Based on Speediness and Economy in Power Plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 86-92.
- [6] 谭论农, 张保会. 市场环境下的负荷备用容量[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 10-12.  
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui. Reserve Capacity for Load in Power Market Environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 10-12.
- [7] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境下的最优备用容量的确定[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.  
WU Ji-guang, LIU Jun-yong, NIU Huai-ping, et al. Quantified Optimal Reserve Capacity in Power Market Environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 10-13.
- [8] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [9] Chang Wook Ahn, Ramakrishna R S.A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations[J]. IEEE Trans On Evolutionary Computation,

- 2002,6(6):566-579.
- [10] Chan C Y, Chan T K, Ni Y X, et al. A Decentralized Approach for Operating Reserve Procurement[A]. In: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on APSCOM[C]. Hong Kong:2003.
- [11] 孟祥星,韩学山.不确定性因素引起备用的探讨[J].电网技术,2005,29(1):30-34.  
MENG Xiang-xing, HAN Xue-shan. Discussion on Reserve Caused by Uncertain Factors[J]. Power System Technology, 2005, 29(1):30-34.
- [12] 中国南方电网广东省广电集团公司生产技术部广东省电力实验研究所.跨区域互联电网运行与建设规划研究[M].中国电力出版社, 2004.
- [13] 袁晓辉,张双全,王金文,等.拟梯度遗传算法在水火电厂内经济运行中的运行研究[J].电网技术, 2000, 24(12):66-69.  
YUAN Xiao-hui, ZHANG Shuang-quan, WANG Jin-wen, et al. Application of Quasi-gradient Genetic Algorithm to Economic Operation of Hydropower Station[J]. Power System Technology, 2000, 30(18):64-68.
- [14] 余健明,吴海峰,杨文宇.基于改进多种群遗传算法的配电网规划[J].电网技术,2005,29(7):36-40.  
YU Jian-ming, WU Hai-feng, YANG Wen-yu. An Improved Poly-population Genetic Algorithm Based on Power Distribution Network Planning[J]. Power System Technology, 2005, 29(7):36-40.
- [15] 夏可清,赵明奇,李扬.用于多目标无功优化的自适应遗传算法[J].电网技术,2006,30(13):55-60.  
XIA Ke-qing, ZHAO Ming-qi, LI Yang. A Self-adaptive Genetic Algorithm for Multi-objective Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(13):55-60.
- [16] 吴至复,曾鸣,刘宝华,等.电力市场中的水火电优化调度模型及其应用[J].电网技术,2006,30(15):45-49.  
WU Zhi-fu, ZENG Ming, LIU Bao-hua, et al. An Optimal Dispatching Model of Hydro-thermal Power System in Market Environment and Its Application[J]. Power System Technology, 2006,30(15):45-49.
- [17] 吴杰,卢志刚,杨斌,等.基于改进并行遗传算法的电网状态估计[J].电网技术,2006,30(18):64-68.  
WU Jie, LU Zhi-gang, YANG Bin, et al. Power Network Status Estimation Based on Improved Parallel Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30(18):64-68.
- [18] 熊信银,吴耀武.遗传算法及其在电力系统中的应用[M].华中科技大学出版社, 2002.
- [19] Moya O E. Spinning Reserve, Load Shedding, and Economic Dispatch Solution by Bender's Decomposition[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 384-388.
- [20] Aruldos Albert Victoire T, Ebenzer Jeyakumar A. Reserve Constrained Dynamic Dispatch of Units With Valve-Point Effects[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1273-1282.
- [21] Lee F N, Lemonidis L, Liu K C. Priced-based Ramp-rate Model for Dynamic Dispatch and Unit Commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 30-35.
- [22] Gan D Q, Litvinov E. Energy and Reserve Market Designs with Explicit Consideration to Lost Opportunity Costs[J]. IEEE Trans. Power Syst, 2003, 18(1): 53-59.
- [23] Doherty R, O'Malley M. A New Approach to Qualify Reserve Demand in Systems With Significant Installed Wind Capacity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 587-594.

收稿日期: 2006-12-19; 修回日期: 2007-03-28

作者简介:

史美娟(1980-),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电力系统运行与分析;E-mail:shi.meijuan@163.com

唐冬雷(1964-),男,副教授,从事教学管理和电力系统自动化研究;

吴杰康(1965-),男,工学博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析与在线监控技术、电力市场、电能质量检测与控制、电力系统智能检测与智能控制、配电自动化、电力系统智能仪表的研究。

(上接第10页 continued from page 10)

- TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Hen-dong. Faulted Line Selecting Method of T Circuit of Parallel Transformer with Controllable Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(21):71-76.
- [15] 范春菊,郁惟镛.基于基频电气量的输电线路故障测距的滤波探讨[J].继电器, 2004,32(4):36-39.
- [16] FAN Chun-ju, CAI Hua-rong, YU Wei-yong. Application of Six-Sequence Fault Components in Fault Location for Joint Parallel Transmission Line[J]. Relay, 2005, 10(2): 247-253.

收稿日期: 2006-01-29; 修回日期: 2007-01-10

作者简介:

翁舟波(1971-),男,讲师,工程硕士,从事继电保护教学及研究工作;E-mail:wzb2008@hzcnc.com

范春菊(1967-),女,副教授,博士,长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中应用的研究及教学工作;

田羽(1979-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护及综合自动化。