

## 考虑分布式发电的配电网规划问题的研究

徐玉琴<sup>1</sup>, 李雪冬<sup>1</sup>, 张继刚<sup>2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 保定供电公司, 河北 保定 071000)

**摘要:** 考虑了配电网扩展规划条件下新增负荷节点的情况, 根据新增负荷总量确定待建分布式电源的总容量, 在分布式电源个数、位置和单个电源容量均不确定的情况下, 以网络建设成本与运行费用为目标函数, 建立了包含 DG 的配电网规划的多智能体遗传模型。应用多智能体遗传算法对分布式电源的位置、容量及配电网网架进行了整体优化。通过设计多智能体的竞争行为和自学习行为增加目标函数值寻求最优解, 实现了全局收敛, 提高了收敛速度。

**关键词:** 配电网规划; 分布式发电; 多智能体遗传算法; 不可行解修复

### Research on distribution network planning considering DGs

XU Yu-qin<sup>1</sup>, LI Xue-dong<sup>1</sup>, ZHANG Ji-gang<sup>2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. Baoding Power Supply Company, Baoding 071000, China)

**Abstract:** The paper discusses adding new load nodes in distribution system expansion planning. The total installed capacity of distributed generation expansion is determined according to the amount of new loads. Under the condition that the number of DG units, locations, and the capacity of DG units are unknown, a multi-agent genetic model for distribution planning with DGs is proposed, with an objective function of minimizing the network construction and operation costs. The location, capacity and the topology of the distribution system is globally optimized by multi-agent genetic algorithm. Through the proper designing of the competition and self-learning behavior for the adjustment of the value of the objective function, fast global convergence is achieved.

**Key words:** distribution network planning; distributed generation; multi-agent genetic algorithm; unfeasible solution restoration

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0087-05

## 0 引言

配电系统规划的主要任务是根据规划期间网络中空间负荷预测的结果和现有网络的基本状况确定最优的系统建设方案, 在满足负荷增长和安全可靠供应电能的前提下, 使配电系统的建设和运行费用最小<sup>[1]</sup>。

在全球一次能源逐渐衰竭和电力企业解除管制的背景下, 分布式发电(Distributed Generation, DG)受到越来越多的关注。目前, 大电网与分布式发电相结合被世界许多能源、电力专家公认为是能够节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式, 是 21 世纪电力工业的发展方向<sup>[2-3]</sup>。

在配电网的 DG 规划中, 按决策变量的类型可以分为单一规划<sup>[4]</sup>和综合协调规划两类<sup>[5]</sup>。单一规划是在不改变系统馈线和变电站配置的情况下, 对 DG 的安装位置和容量进行优化; 综合协调规划则

是 DG 与配电变电站或馈线等设备的整体规划, 决策变量类型比单一规划多, 是一种配电网全局优化规划。文献[6]针对配电系统中计及分布式发电的单一规划问题, 在考虑分布式发电的经济性和安全性的基础上, 建立了以分布式发电投资成本最小、系统网损最小和静态电压稳定裕度最大为优化子目标的多目标规划模型, 没有考虑到网络扩展的情况。文献[7]在分布式电源个数、位置和容量均未知的条件下, 采用遗传算法对分布式电源的位置和容量进行了优化, 但该方法只考虑了原有负荷节点负荷值增加情况下的配电网网络扩展规划, 未考虑新增负荷节点对网络结构的影响, 具有一定的局限性。

本文考虑了配电网扩展规划条件下新增负荷节点的情况, 根据新增负荷总量确定待建分布式电源的总容量, 在分布式电源个数、位置和单个电源容量均不确定的情况下, 以网络建设成本与运行费用为目标函数。建立了包含 DG 的配电网规划的多智

能体遗传模型,应用多智能体遗传算法对分布式电源的位置、容量及配电网架进行了整体优化。通过设计多智能体的竞争行为和自学习行为增加目标函数值寻求最优解,充分利用了 Agent 的智能实现全局收敛,并提高收敛速度。算例表明了本文方法的快速性和有效性。

## 1 考虑 DG 的配电网规划的数学模型

### 1.1 目标函数

配电网规划数学模型是在满足运行要求的条件下对规划方案的经济性进行评价的标准,主要包括目标函数和约束条件两部分。数学模型的选择在很大程度上决定了最优方案的确定。本文采用配电网最小年费用  $F$  作为目标函数,其数学表达式为:

$$\min F = \min(F_{N1} + F_{N2}) \quad (1)$$

$$F_{N1} = (\lambda_1 + \gamma_1) \sum_{i=1}^{n_1} [f_i(l_i) \alpha_i] + C \Delta P_1 \tau_{1\max} \quad (2)$$

$$F_{N2} = (\lambda_2 + \gamma_2) \sum_{i=1}^{n_2} [f_i(d_i) \beta_i] + C \Delta P_2 \tau_{2\max} \quad (3)$$

式中:  $F_{N1}$  为线路每年的投资和运行费用之和;  $N1$  为系统支路总数;  $\alpha_i$  为 0-1 变量, 0 表示支路未被选中, 1 表示支路被选中;  $\lambda_1$ 、 $\gamma_1$  分别为线路的投资回报率、年运行维护率;  $\lambda_2$ 、 $\gamma_2$  分别为 DG 的投资回报率、年运行维护率;  $f_i(l_i)$  为线路  $i$  的综合投资费用;  $\tau_{1\max}$  为线路  $i$  的年最大负荷利用小时数;  $C$  为单位电价;  $F_{N2}$  为 DG 每年的投资及运行费用之和, 有时为使问题简化, 可以忽略  $F_{N2}$  中的第二部分;  $f_i(d_i)$  为 DG  $i$  的综合投资费用;  $\beta_i$  为 0-1 变量, 0 表示 DG 未被选中, 1 表示 DG 被选中;  $\Delta P_1$  为线路的有功损耗;  $\Delta P_2$  为 DG 的年电能损失量;  $\tau_{2\max}$  为 DG 的年最大利用小时数。

### 1.2 约束条件

不等式约束条件包括节点电压上下限, 支路功率最大限制, 分布式发电容量上下限, 旋转备用约束, 另外保证网络辐射型运行。即:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ |P_L| \leq P_{L\max} \\ P_{DG\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG\max} \\ \max\{P_{DG_i}\} \leq P_{S\max} - P_S \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U$  为节点电压向量;  $P_L$  为支路有功功率向量;  $P_{DG}$  为分布式发电额定容量向量;  $P_S$  为配电系统向输电系统购买的实际功率;  $P_{S\max}$  为配电系统向输电

系统购买的最大功率。

此外, 由于分布式电源的出力受到诸如风速、太阳辐射强度等不确定性因素的影响, 如果分布式电源总容量所占比例过高, 将导致系统的电能质量下降, 因此, 以上模型的约束条件中考虑了分布式电源的总容量约束。

## 2 配电网规划的多智能体遗传算法

### 2.1 遗传算法和多智能体系统

配电网规划是一个离散的、非线性优化问题, 可以用遗传算法等人工智能算法解决<sup>[8-11]</sup>。本文在遗传算法解决规划问题的基础上采用多智能体系统对其进行改进。

遗传算法具有很强的全局搜索能力, 但其仍存在一些不足: ①遗传算法只考虑到生物之间的竞争, 而没有考虑到生物之间协作的可能性。而生物学证据表明竞争与协作并存能大大加快生物进化的历程。②生物进化过程是一个在环境生态系统中“学习”法则的过程, 包括先天的遗传学习或遗传复制和后天的个体学习。但是以“生成检测”的遗传算法没有充分利用父代进化经验, 而且忽视了个体的学习能力。由上述可得仅仅使用遗传算法来模仿生物处理事物的智能是远远不够的, 还必须深层挖掘与利用生物的智能资源。近年来, 分布式人工智能中基于智能体 (Agent) 的计算已经成功应用于电力系统领域<sup>[12]</sup>, 而多个智能体为了达到特定目的进行相互作用而形成的系统就称为多智能体系统 (MAS)。用 MAS 来解决问题时必须考虑三个因素: 智能体生存的环境、每个智能体的目的和智能体的行为。

多智能体遗传算法基于智能体对环境的感知和反作用的能力, 将代表一种供电恢复方案的智能体固定在网格上, 每个智能体为了增加自身能量与其邻域展开竞争, 同样智能体也可进行自学习来增加能量<sup>[13]</sup>。

### 2.2 智能体编码

本文采用混合编码方式对问题进行编码。每条染色体代表一个智能体, 每条染色体包含两条基因串。通过这两条基因串, 每条染色体代表着一个规划方案, 如图 1 所示。第一条二进制基因串表示了待规划支路是否被选中, 1 表示被选中, 0 表示未被选中; 第二条实数编码基因串表示的是分布式发电的位置和容量, 基因位表示分布式发电的位置, 而基因位上的实数表示分布式发电的容量。

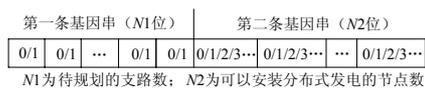


图1 染色体串

Fig. 1 The proposed chromosome

### 2.3 智能体的能量、目的及环境

智能体的能量等于由式(1)求得的目标函数值的相反数, 即  $Energy(a) = -f(a)$ , 智能体的目的就是最大化其能量。

智能体的生存环境为一个环形网络, 称为智能体网格, 记为  $L$ 。设智能体网格的规模为  $(L_{SIZE} \times L_{SIZE})$ , 则其组织形式如图2所示, 其中每个方框代表一个智能体, 而框中的数字则为该智能体所处的行列位置, 以下记处在第  $i$  行、第  $j$  列的智能体为  $L_{ij}$ 。本文由于将染色体对应于智能体, 即对于规模为  $(L_{SIZE} \times L_{SIZE})$  的智能体网格, 它对应着  $(L_{SIZE} \times L_{SIZE})$  条染色体。每个智能体占一个格点位置且不能移动, 但由于它能够感知其局部环境, 因此它可与其周围的智能体发生相互作用, 而能与其发生作用的智能体则由参数感知范围决定, 记为  $R$ 。对于智能体  $L$ , 能与其发生相互作用的智能体为:

$$L_{k,l}, i - R_s \leq k \leq i + R_s, j - R_s \leq l \leq j + R_s \quad (5)$$

由于智能体网格为环形, 因此

$$k = \begin{cases} k + L_{size}, & k < 1 \\ k - L_{size}, & k > L_{size} \end{cases} \quad l = \begin{cases} l + L_{size}, & l < 1 \\ l - L_{size}, & l > L_{size} \end{cases}$$

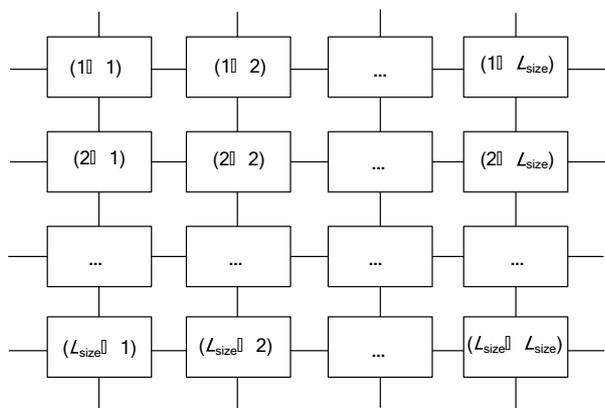


图2 智能体的环境结构

Fig.2 Structure of the agent environment

能与  $L_{ij}$  发生相互作用的智能体位  $L_{ij}$  的邻域, 记为  $N_{ij}$ 。对于智能体的不同行为, 它的感知范围是不同的, 因而它的邻域也不同。

### 2.4 智能体的行为

计算量作为智能体所生存环境中的资源。智能体的行为是由最大化其能量的目的驱动的, 而环境中的资源又是有限的, 这就导致智能体会采取一定

的行为来增大自身的能量, 包括竞争行为与自学习行为。

#### 2.4.1 竞争行为

对于竞争行为, 每个智能体的感知范围恒为 1, 此时的邻域称为竞争邻域, 记为  $N^c$ 。对于智能体  $L_{ij}$ , 它将与其竞争邻域比较能量。若它的能量不小于其竞争邻域中任一智能体的能量, 则可以生存下去; 否则它将死亡, 而它的位置由其竞争邻域中能量最大的智能体的子代所代替。产生子代有两种方式: 第一种方式同时利用  $L_{ij}$  与  $a_{max}$  的信息来产生子代, 它随机抽取一些  $L_{ij}$  与  $a_{max}$  不同的位来修改  $a_{max}$  所对应的位; 第二种方式则采用遗传算法中常用的变异算子来实现。

#### 2.4.2 自学习行为

对于自学习行为, 每个智能体的感知范围记为  $R$ , 此时的邻域称为自学习邻域, 记为  $N^l$ 。只有当某个智能体的能量不小于其自学习邻域中任一智能体的能量时, 它才能获得一次自学习的机会, 以增大自身的能量。

### 2.5 不可行解的修复

遗传算法应用于配电网规划时, 配电网辐射状运行的特点和遗传算法的变异操作将导致大量不可行解的出现(非辐射状网络结构), 这些不可行解将导致潮流计算不收敛, 并最终导致无法进行有效的搜索寻优。

孤岛、孤链和环是不可行解的三种基本形式, 其示意图如图3所示。1) 孤岛, 孤立的未被供电的负荷节点; 2) 孤链, 两个或以上已经由线路连通但没有和电源点连通的负荷节点; 3) 环, 多个负荷节点通过线路构成封闭的环。

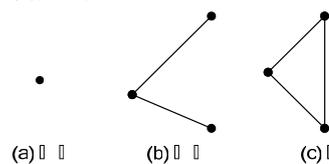


图3 孤岛、孤链和环的示意图

Fig.3 The sketch map of the isolated nodes, isolated chain and closed loop

本文针对不可行解的特点, 提出了一种新的不可行解修复方案。首先, 定义数组  $F$ 、 $A$ 、 $B$ 。  $F$  中存放的是现阶段搜索到的与已存在线路联通的支路,  $A$  中为与  $F$  中支路相连但不重复的支路,  $B$  中存放的是现阶段搜索到的已添加节点。首先初始化  $F$ 、 $A$  及  $B$ , 每一次搜索, 随机从  $A$  中选择一条支路并检查其染色体对应的位置是否为 1, 若是 1, 则判断与此支路两端的节点相连的支路是否在  $F$  中

(判断是否形成环), 若否, 则添加此支路到 F 中并更新 A。若一次搜索中, 全部可以添加的支路其染色体对应位置全是 0, 同时 B 中没有包含所有的节点, 这意味着孤岛或孤链的存在, 则随机从 A 中的可添加支路选一条添加到 F 中, 并把抗体相应位置置 1。这样, 当 B 中包含所有节点的时候, 循环结束。此时, 得到的新的染色体已经包含所有节点而且不包含环。

下面以图 4 为例说明不可行解的修复过程。

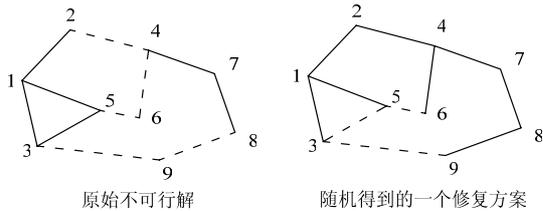


图4 不可行解的处理

Fig.4 Operation on unfeasible solution

节点 1 为电源点, 1-3-5 形成了一个环, 节点 9 为一孤岛, 4-7-8 为一孤链。首先初始化 F 为支路 1-2, 这是原始已投入运行支路; 初始化 A 为支路 1-3、1-5 及 2-4; 初始化 B 为节点 1、2。然后搜索 A 数组, 找到三条支路, 其中 1-3 和 1-5 对应的抗体位置为 1, 则随机添加其中一条支路到 F 中去, 并更新 A 和 B, 例如添加了支路 1-3 至 F, 则 A 中除去支路 1-3 并添加支路 3-9。继续搜索 A, 此时 A 中支路 2-4、3-9 及 1-5 中只有支路 1-5 对应的染色体位置为 1, 则同样将 1-5 加入 F 中并更新 A、B。继续搜索 A, 此时, A 中新加入了两条支路分别为 3-5 和 5-6, A 中支路只有支路 3-5 的染色体相应位置为 1, 但此支路的两个端点 3 和 5 均在 B 中存在, 说明加入此支路会形成环路, 应把此支路从 A 中除去, 并在此支路对应的抗体位置将 1 改为 0。此时 A 中的支路对应的染色体位置均为 0, 且 B 未包含全部节点, 这意味着孤岛或孤链的存在。对 A 中支路随机选择一条添加到 F 中去, 并把此支路对应的染色体位置置为 1。通过以上的操作最终可以消除孤岛、孤链以及环。并且其选择的随机性保证了修复出来的染色体的随机性, 从而在不丢失优秀基因的情况下保持了种群的多样性。

### 3 算法的具体实现

(1) 确定智能体二进制编码对应的支路顺序, 确定初始种群规模 ( $L_{SIZE} \times L_{SIZE}$ )、竞争邻域  $N^c$ 、自学习邻域  $N^l$ 、最大迭代次数  $N$  等。

(2) 产生初始种群, 即 ( $L_{SIZE} \times L_{SIZE}$ ) 个智能体。

(3) 计算智能体的能量。按照式 (1) 的目标函数计算每个智能体的能量。

(4) 对智能体网格中的每个智能体在其竞争邻域采用竞争行为。若  $\forall a \in N_{ij}^c$ ,  $Energy(a) \leq Energy(L_{ij})$ , 则  $L_{ij}$  保持不变; 否则根据参数  $D^h$  确定一种竞争方式产生一个新智能体。

(5) 不可行解修复及计算智能体的能量。

(6) 对智能体网格中的每个智能体在其竞争邻域采用竞争行为及自学习行为。

(7) 不可行解修复及计算智能体的能量。

(8) 终止条件判断。判断进化代数是否到达设定值  $N$ , 若是, 智能体网格中能量最大的智能体即为最优解; 否则转步骤 (4)。

### 4 算例仿真与分析

本文采用文献[14]中的算例验证算法的实用性。该算例初始网络是一个具有 3 个节点, 2 条支路的 10 kV 电网, 要扩展成为 10 个节点, 16 条支路的辐射型网络并规划进分布式发电, 初始网架结构见图 5。

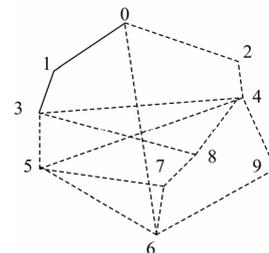


图 5 网架初始结构

Fig.5 The initial structure of the network

假设分布式发电最大接入容量为新增负荷总量的 20%, 即分布式电源的总装机容量不得超过新增负荷总量的 20%。假设网络中负荷节点 1~9 均允许安装分布式电源。通过计算得到此配电网最大可安装的分布式电源容量为 0.93 MVA。

应用多智能体遗传算法及传统遗传算法对算例进行仿真分析, 结合网络规模, 取  $L_{SIZE}$  为 3,  $N^c$  与  $N^l$  均取 1。优化结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为多智能体遗传算法得到的优化结果。

可以看出, 分布式电源被安置在线路的末端, 这样有助于提高线路末端的电压, 降低配电网的网络损耗。本文算法和其他规划算法的比较如表 1 及表 2 所示, 可见本文算法的优越性。

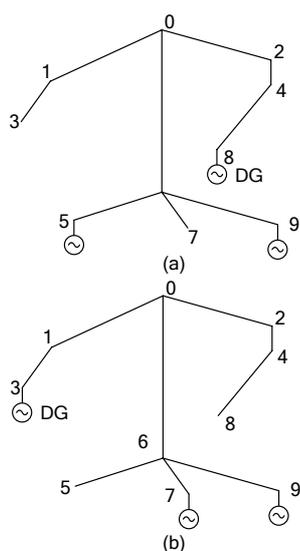


图 6 优化结果

Fig.6 Optimization result

表 1 不同算法的性能对比

Tab.1 Comparison of different algorithms

算法	不可行解修复	投资 / 万元	迭代时间/s	迭代次数
遗传算法	否	731.63	>30	200 以上
本文算法	是	721.53	5~15	15~35

表 2 两种结果的潮流对比

Tab.2 Comparison of different power-flow

节点电压 / p.u.	遗传算法	本文算法
$V_0$	1.0000	1.0000
$V_1$	0.9844-0.0062i	0.9836-0.0076i
$V_2$	0.9923-0.0031i	0.9926-0.0027i
$V_3$	0.9724-0.0056i	0.9687-0.0098i
$V_4$	0.9711-0.0033i	0.9728-0.0019i
$V_5$	0.9648-0.0036i	0.9685-0.0005i
$V_6$	0.9726+0.0027i	0.9726+0.0027i
$V_7$	0.9501+0.0014i	0.9536+0.0043i
$V_8$	0.9632+0.0056i	0.9601+0.0036i
$V_9$	0.9715+0.0039i	0.9715+0.0039i
网络损耗	188.5 kW	182.4 kW

## 5 结论

1) 本文采用多智能体遗传算法解决了含有 DG 的配电网规划问题, 通过在遗传进化过程中引入竞争行为和自学习行为, 提高了进化速度。

2) 提出了不可行解的修复方案, 通过不可行解的修复提高了算法的计算效率。

## 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [3] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.  
QIAN Ke-jun, YUAN Yue. Distributed generation technology and its impact on power systems[J]. Relay, 2007, 35 (13) : 25-29.
- [4] WANG Cai-sheng, NEHRIR M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2068-2076.
- [5] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.  
WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [6] 张云, 王艳君. 含分布式发电的配电网规划优化算法的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 590-593  
ZHANG Yun, WANG Yan-jun. Optimal algorithm on distribution network planning including distributed generation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(4): 590-593.
- [7] CELLI G, PILO F. Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks[C]. //Proceedings of 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications. Sydney (Australia): 2001: 81-86.
- [8] 谢敏, 敬东. 遗传算法在配电网规划中的应用[J]. 电站系统工程, 2002, 18(1): 30-32.  
XIE Min, JING Dong. Genetic algorithms applied in planning of distribution network[J]. Power System Engineering, 2002, 18(1):30-32.
- [9] 刘子俊, 于德龙, 胡少强. 基于禁忌搜索及模糊评价的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 45-50.  
LIU Zi-jun, YU De-long, HU Shao-qiang. Distribution network planning based on tabu search and fuzzy evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 45-50.

(下转第 117 页 continued on page 117)

析, 能够保证含有谐波情况下的电压电流有效值、有功功率等电能参数的 0.05 级计量精度。在定点 DSP 中进行浮点运算时, 运算能够很好地提高定点型 DSP 浮点运算的速度和精度, 能够更充分地保证系统分析与计量的实时性要求。

### 参考文献

- [1] 林广明, 黄义锋, 欧阳森, 等. 基于DSP和CPLD电能质量监测装置的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 97-101.  
LIN Guang-ming, HUANG Yi-feng, OUYANG Sen, et al. Design of a power quality monitoring device based on DSP and CPLD[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 97-101.
- [2] Davis E J, Emanuel A E, Pileggi D J. Evaluation of single-point measurements method for harmonic pollution cost allocation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 14-18.
- [3] 张言权, 张胜宝. 基于嵌入式Linux的电能质量在线监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 71-75.  
ZHANG Yan-quan, ZHANG Sheng-bao. Research on power quality online monitor system based on embedded Linux technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 71-75.
- [4] 侯文清, 张波, 丘东元. 基于DSP的电能质量检测与无功补偿综合测控装置[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 120-127.  
HOU Wen-qing, ZHANG Bo, QIU Dong-yuan. DSP based measurement control device for power quality detection and reactive power compensation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(1): 120-127.
- [5] 张明, 李开成. 电能质量扰动在线辨识装置[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 124-129.  
ZHANG Ming, LI Kai-cheng. Device for on-line power quality disturbance recognition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 124-129.
- [6] Texas Instruments. TMS320F2810, TMS320F2812 digital signal processors[EB/OL]. <http://www.ti.com>, 2003.
- [7] Heydt G T, Fjeld P S, Liu C C, et al. Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1411-1416.
- [8] ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, YUAN Wei. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 160-164.
- [9] Hidalgo R M, Fernandez J G, Rivera R R, et al. A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 31-36.
- [10] 袁绍军. 基于DSP的电能在线计量与分析[D]. 济南: 山东大学, 2008.  
YUAN Shao-jun. Online power metering and analysing based on DSP [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- 
- 收稿日期: 2010-04-08  
作者简介:  
杨福刚(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要研究领域为电力系统及其自动化. E-mail: yangfug@163.com
- 
- (上接第 91 页 continued from page 91)
- [10] 胡斌, 顾洁, 王衍东. 基于蚁群最优的配电网网架规划方法[J]. 继电器, 2005, 33(21): 54-57.  
HU Bin, GU Jie, WANG Yan-dong. An ant colony optimization based method for power distribution network planning[J]. Relay, 2005, 33(21): 54-57.
- [11] 张二飞, 冯林桥, 刘金玲, 等. 配电网规划的计算机辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 56-59.  
ZHANG Er-fei, FENG Lin-qiao, LIU Jin-ling, et al. Computer aided decision-making system of distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 56-59.
- [12] 和敬涵, 朱光磊, 薄志谦. 基于多Agent技术的电力系统集成保护[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 141-147.  
HE Jin-ghan, ZHU Guang-lei, BO Zhi-qian. Integrated protection for power systems based on the multi-agent technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 141-147.
- [13] 钟伟才, 刘静, 刘芳, 等. 组合优化多智能体进化算法[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1341-1353.  
ZHONG Wei-cai, LIU Jing, LIU Fang, et al. Combinatorial optimization using multi-agent evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(10): 1341-1353.
- [14] 陈章潮, 唐德光. 城市电网规划与改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- 
- 收稿日期: 2010-01-17; 修回日期: 2010-06-29  
作者简介:  
徐玉琴(1964-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, 分布式发电与配电网, 电力系统继电保护等; E-mail: xuyuqin\_ncepu@126.com  
李雪冬(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为含DG的配电网供电恢复. E-mail: snowinterli@126.com