

风电场无功补偿问题的研究

朱雪凌¹, 张洋¹, 高昆², 李强², 杜习周², 刘同和³

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052;
3. 濮阳供电公司, 河南 濮阳 457000)

摘要: 研究了改善异步机风电场电压稳定性的措施。基于普通异步风机的恒速风电机组是目前应用较为广泛的风电机组, 其发出有功功率的同时吸收无功功率, 会导致接入风电地区电网的电压稳定性降低。采用在风电场升压站加装静止无功补偿器(SVC)的方法, 控制并网点的电压水平, 重点研究在不同风速和负荷下, 如何确定SVC的补偿量问题。文中对风电场节点的处理较准确地反映了其无功和电压特性。提出了将遗传算法与模拟退火法相结合的遗传模拟退火算法, 采用模拟退火进行个体更新, 以增加群体的多样性, 避免陷入局部最优。以某实际含风电场的电力系统为例对所提算法的有效性进行测试, 结果表明按照该算法确定的SVC补偿量进行风电场的无功补偿, 可以明显提高风电场的电压稳定性。

关键词: 异步机风电场; 电压稳定; 无功补偿; 静止无功补偿器(SVC); 遗传模拟退火算法(GSAA)

Research on the compensation of reactive power for wind farms

ZHU Xue-ling¹, ZHANG Yang¹, GAO kun², LI Qiang², DU Xi-zhou², LIU Tong-he³

(1. North China University of Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. Puyang Power Supply Company, Puyang 457000, China)

Abstract: The measures to enhance voltage stability of induction generator based wind farm are studied in this paper. Wind turbines equipped with induction generator is widely used in the world so far. The local grid voltage stability will be reduced due to the integration of induction generator based wind farm because the high demand of reactive power is absorbed by induction generator. A method that assembling SVC at the low-pressure side of wind farm booster stations to control the voltage level of parallel point is proposed in the paper. How to determine the SVC capacity at different wind speed and load level is researched. The processing of the wind farm node reflects its character accurately. A new kind of hybrid genetic algorithm, which is composed of simple genetic algorithm and simulated annealing is proposed. Simulated annealing method is used to renew individual character. So the diversity of group is increased and the local optimum can be avoided. An actual power system are used to test the effect of the proposed algorithm. Test results show that using the method proposed in this paper to determine SVC capacity can enhance voltage stability of wind farm obviously.

This work is supported by Natural Science Advanced Project Programs Funded by Education Department of Henan Province(No.2008B470003).

Key words: induction generator based wind farm; voltage stability; reactive compensation; static var compensator(SVC); genetic simulated annealing algorithm(GSAA)

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0068-05

0 引言

风力发电机组多数是异步发电机组, 输出有功的同时还要从系统吸收一定的无功, 易引起并网点的电压波动, 所以电压稳定问题是异步机风电场并网运行中普遍存在的问题^[1-5]。目前解决电网电压稳定问题的方法主要有: 无功补偿和无功的合理分布、

带负荷调压变压器调压、无功补偿和调压变压器综合调压、适当增大导线线径和装设并联电抗器等^[1]。

对风电并网所引起的电压稳定问题, 通常采用在风电场母线上安装电容器组以补偿风电机组无功需求的方法^[1,2], 但其使用机械开关, 不具备快速性、反复性、连续性的特点, 不能实现短时纠正电压升高或降落的功能^[6]。静止无功补偿器 SVC (static var compensator) 依靠电力电子开关完成调整与投切功能, 其动作速度是毫秒级的, 远比机械设备的速度

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目 (2008B47003)

快^[7]。SVC 作为电力系统重要的无功装置可控制母线电压在一定的水平上, 减少电压波动和闪变^[8]。目前, 对 SVC 应用于电力系统改善电压稳定性问题的研究, 多侧重于 SVC 的建模及控制器的设计^[9-12], 对于如何确定不同工况下 SVC 的补偿容量问题却少有涉及。本文重点研究将 SVC 应用于并网异步机风电场作为动态无功补偿措施时, 如何确定不同工况下的补偿容量, 以提高风电场的电压稳定性的问题。

采用 SVC 对风电场进行无功补偿优化, 属于多约束非线性组合优化范畴, 是指系统在一定运行方式下使解向量满足各种约束条件, 并达到电压质量最佳的优化问题^[13]。近年来, 启发式搜索算法在无功优化方面应用广泛, 其中遗传算法和模拟退火算法是很受关注的两种优化法。遗传算法具有很强的离散变量处理能力和鲁棒性, 但局部寻优能力较差, 收敛速度较慢; 模拟退火算法具有较强的全局搜索能力, 但会随着系统规模的扩大及复杂性的提高而增加^[14-19]。

本文采用遗传算法与模拟退火算法相结合的遗传模拟退火法, 用退火选择作为个体替换策略, 从而避免陷入局部最优解。该方法应用于实际风电场的无功补偿优化, 可明显改善风电场电压水平, 验证了本文方法的可行性和有效性。

1 风电场稳态数学模型

1.1 风力发电机组稳态等值电路

无功补偿容量主要根据母线电压的变化情况来确定, 并以潮流计算作为分析工具, 在潮流计算中需对风电场节点进行一定的处理。

异步发电机稳态等值电路如图 1 所示^[20]:

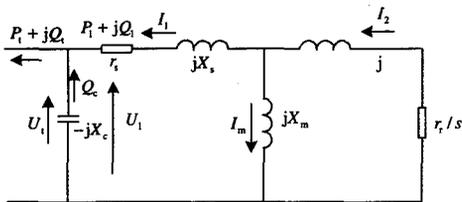


图 1 异步发电机稳态等值电路

Fig. 1 Steady-state equivalent circuit of induction generator

其中: P_i 、 Q_i 、 U_i 为异步发电机输出的有功、无功、异步机的端电压; Q_c 、 x_c 为机端电容器的无功、等效电抗; P_1 、 Q_1 、 U_1 、 I_1 、 r_s 、 $x_{s\sigma}$ 为定子有功、无功、电压、电流、电阻、漏抗; I_2 、 r_r 、 $x_{r\sigma}$ 为折算到定子侧的转子电流、电阻、漏抗; I_m 、 x_m 为

激磁支路电流、电抗; s 为转差。

则异步发电机输出的有功功率和无功功率为:

$$P_i = P_1 = \text{Re}[\dot{U}_1 \dot{I}_1] = \text{Re}[U_1^2 / \hat{Z}] \quad (1)$$

$$Q_i = Q_c + Q_1 = Q_c + \text{Im}[\dot{U}_1 \dot{I}_1] = Q_c + \text{Im}[U_1^2 / \hat{Z}] \quad (2)$$

其中: $Z = r_s + jx_s + jx_m(r_r/s + jx_{r\sigma}) / (r_r/s + jx_{r\sigma} + jx_m)$

1.2 风电场内电网潮流计算方法

风电场内电网一般为单辐射型配网结构, 可采用回路阻抗法进行风电场内电网的潮流计算。对任意风电场内电网的节点电流有:

$$[\dot{I}] = [A][\dot{J}] \quad (3)$$

$[\dot{J}]$ 为风力发电机组注入电网的电流向量 $[n \times 1]$, n 为网络节点数; $[\dot{I}]$ 为网络节点电流向量 $[n \times 1]$; $[A]$ 为关联矩阵 $[n \times n]$; 回路阻抗矩阵 $[Z]$ 为:

$$[Z] = [A]^T [Z_b] [A] \quad (4)$$

$[Z_b]$ 为支路阻抗矩阵。

从风电场并网点到任意节点 i 的电压损耗为:

$$\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{V}_1 + \dots + \Delta \dot{V}_i = \dot{V}_0 - \dot{V}_i \quad (5)$$

写成向量形式, 即

$$[\Delta \dot{U}] = [A]^T [\Delta \dot{V}] \quad (6)$$

$\Delta \dot{V}_i$ 为支路 i 的电压损耗, \dot{V}_0 为风电场并网点电压, \dot{V}_i 为 i 节点电压。

支路电压损耗为:

$$[\Delta \dot{U}] = [Z_b][\dot{I}] = [Z_b][A][\dot{J}] \quad (7)$$

将式(7)代入式(3)有:

$$[\Delta \dot{U}] = [A]^T [Z_b][A][\dot{J}] = [Z][\dot{J}] \quad (8)$$

则从风电场并网点到节点 i 的电压损耗为

$$\Delta \dot{U}_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij} j_j \quad (9)$$

其中: Z_{ij} 是 $[Z]$ 的第 i 行元素。则风电场内电网第 i 节点电压为

$$\dot{V}_i = \dot{V}_0 - Z_{i1} J_1 - \dots - Z_{ii} J_i - \dots - Z_{in} J_n \quad (10)$$

1.3 含风电场电力系统的潮流计算流程

根据上述风电场并网运行的稳态数学模型, 采用电力系统分析综合程序(PSASP), 利用其用户程序接口(UIP)功能, 进行含风电场电力系统的潮流计算程序(PFP)实现, 流程如下:

- ① PSASP 输出计算信息给 PFP;
- ② PFP 读取风电场并网点电压 U_i 和功率 P_i ;
- ③ 根据式(1)和式(2)计算异步发电机转差 s 和风力发电机组无功 Q_i ;

④ 根据式(10)计算风电场内电网节点电压 \dot{V}_i ，进而求得风电场注入电网的有功 P_Σ 和无功 Q_Σ ；

⑤ PFP 输出 P_Σ 和 Q_Σ 信息给 PSASP。

2 风电场无功补偿容量计算方法

2.1 SVC 容量的确定

进行含风电场电力系统潮流计算时，需要考虑风速和负荷变化的影响^[1]。因此，令风速在有效风速范围(4~25 m/s)内变化，步长取 1 m/s；负荷在 0.5 倍满负荷至满负荷内变化，即负荷率在(0.5~1.0)内变化，步长取 0.1；同时令并网点的无功值从 0 开始增加，步长取 0.01 kvar，各个量每变化一次进行一次潮流计算，则可以找到在各个风速、负荷率下使并网点电压均为 1 p.u.的并网点的一系列无功值，取其最大值，就是风电场所需要的总的无功补偿量，即 SVC 的容量值。

2.2 无功补偿优化的数学模型

本文所研究的风电场无功补偿优化问题以并网点电压接近 1 p.u.为目标函数，约束条件包括潮流约束方程、控制变量约束和状态变量约束。数学模型可描述如下：

$$\text{obj: } \min F = |1 - U_k| \quad (11)$$

$$\text{s.t.: } P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_k = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$Q_{k \min} \leq Q_k \leq Q_{k \max} \quad (12)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$$

式中： N 为节点总数， i, j 表示任意节点， k 表示并网点对应的节点， U_k 为并网点电压幅值， P_{Gi} 、 Q_{Gi} 、 $Q_{Gi \min}$ 、 $Q_{Gi \max}$ 、 P_{Li} 、 Q_{Li} 、 V_i 、 $V_{i \min}$ 、 $V_{i \max}$ 分别为节点 i 处的有功出力、无功出力、无功出力下限、无功出力上限、有功负荷、无功负荷、电压、电压下限、电压上限， Q_k 、 $Q_{k \min}$ 、 $Q_{k \max}$ 分别为并网点的无功补偿值、无功补偿值的下限、无功补偿值的上限， G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳、电压相位差。

2.3 遗传模拟退火算法

2.3.1 适应度函数

本文提出的风电场无功补偿优化的目标是使并网点电压 U_k 最接近 1 p.u.，即 U_k 与 1 之间差的绝对值最小化，而遗传算法是求适应度最大的个体，故构造适应度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{F(x)} = \frac{1}{|1 - U_k|} \quad (13)$$

2.3.2 编码与解码

本文遗传算法采用二进制整数编码，无功补偿值 Q_k 为控制变量，其染色体表示为：

$$X = Q_k' \quad (14)$$

Q_k' 表示对应无功补偿值 Q_k 的 l 位二进制整数。解码方式为：

$$Q_k = Q_{k \min} + \frac{Q_{k \max} - Q_{k \min}}{2^l - 1} \times Q_k' \quad (15)$$

2.3.3 选择、交叉和变异

遗传操作采用基于线性排名的选择策略、二进制单点交叉、二进制变异算法。在选择策略中首先假定群体成员按适应度值大小从好到坏依次排列为 f_1, f_2, \dots, f_m ，然后根据一个线性函数来分配概率 P_m ，即

$$P_m = \frac{a - b \times \frac{m}{M+1}}{M} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

其中： M 为群体规模， m 为个体序号， f_m 为个体适应度值， P_m 是适应度值为 f_m 的个体被选中的概率， a 、 b 是常数，一般 a 可取 1.1， $b = 2(a - 1)$ 。

2.3.4 退火过程

通过选择、交叉、变异等操作产生一组新个体，独立随机地选择每个个体中的 2 个基因作为扰动点，经扰动后的个体适应度若增加则一定接受这个新个体，而新个体的适应度若减小则按式(17)中的概率 p 来接受这个新个体：

$$p(T_{m+1}) = \begin{cases} 1, & (f_{m+1} > f_m) \\ \exp\left(-\frac{f_{m+1} - f_m}{T_{m+1}}\right), & (f_{m+1} \leq f_m) \end{cases} \quad (17)$$

$$T_{m+1} = \alpha T_m \quad (18)$$

式中： f_m 、 f_{m+1} 分别为旧个体和新个体的适应度值， $P(T_{m+1})$ 为在 T_{m+1} 温度下的接受概率， α 为降温系数。

2.3.5 终止条件

以达到最大遗传代数作为算法的终止条件。

2.3.6 无功补偿优化的遗传模拟退火算法流程

① 输入遗传算法参数, 给出种群初始值及初始退火温度;

② 修改网络参数, 进行潮流计算;

③ 计算适应度, 进行个体排序;

④ 判断遗传代数是否达到最大值, 若是, 得到最佳个体, 输出结果; 否则进行编码、选择、交叉和变异操作;

⑤ 将步骤④产生的个体作为输入进行模拟退火操作, 然后对个体进行替换, 再转步骤②进行下一代的计算。

3 算例分析

为验证本文所提算法的有效性, 以我国某实际含风电场的电力系统为例进行分析。该系统存在着风电场并网运行时随风速和负荷变化导致风电场母线电压越限的典型情况, 其接线如图 2 所示, 系统中有 3 个发电厂, 其中, 节点 1 为风电场, 装有单机容量为 600 kW 的定桨距风力发电机组 31 台, 算例计算过程如下:

(1) 计算 SVC 容量。在各风速下, 负荷率为 1.0 时, 计算使并网点电压最接近 1 p.u. 的无功值, 如表 1 所示。由表 1 可见无功补偿总容量应取最大值 13.393 6 Mvar, 保留一定的裕度取 14 Mvar。

表 1 各风速下的最优无功补偿值

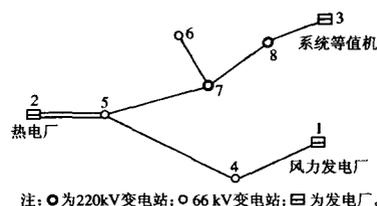
Tab. 1 The optimum reactive compensating value at various wind speed

风速/m/s	补偿值/Mvar	补偿值/Mvar	补偿值/Mvar
4	5.859 95	15	13.114 8
5	5.864 51	16	13.247 6
6	5.875 84	17	13.393 6
7	5.882 02	18	13.103 3
8	5.902 02	19	12.960 5
9	6.441 87	20	12.819 2
10	7.557 31	21	12.679 4
11	8.976 17	22	12.679 4
12	10.447 4	23	12.679 4
13	11.623 4	24	12.679 4
14	12.541 2	25	12.679 4

(2) 计算不同风速、负荷组合下的无功补偿值。

以一种组合情况为例进行说明: 取风速为 17 m/s, 负荷率为 1.0。遗传算法参数设置如表 2 所示, 按此参数进行优化计算, 发现最佳个体所在代数为 35, 适应度为 273.773, 染色体为 10010111100111, 对应的无功补偿变量值 Q_k 为 13.287 3 Mvar, 将此补偿值代

入潮流计算程序, 得并网点电压 U_k 为 1.023 13 p.u.



注: ○为220kV变电站; ○为66kV变电站; □为发电厂。

图 2 算例系统地理接线简图

Fig. 2 Geographic diagram of sample system

表 2 遗传模拟退火算法参数

Tab. 2 The parameter of GSAA

参 数	数 值
遗传算法执行次数	1
群体大小	20
染色体长度	14
最大世代数	50
交叉率	0.85
变异率	0.09
随机种子	0.4
模拟退火初始温度	100

图 3 表示当风速从 4 m/s 变化至 25 m/s、负荷从满负荷变化至 50% 负荷这种最恶劣的运行情况时, 进行无功补偿优化前后并网点电压的变化情况: 未进行无功补偿时, 并网点电压大幅越限; 采用文献 [1] 提出的投切电容器的方法进行无功补偿, 虽然可使并网点电压在 (0.9~1.1) p.u 这一合格范围内变化, 减小了对电网的影响, 但电压仍然存在着大幅波动; 采用本文方法进行无功补偿优化后, 并网点电压非常接近 1 p.u., 电压稳定性好。

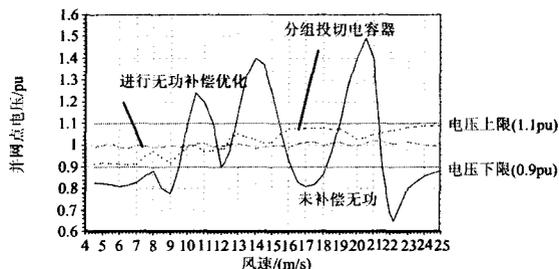


图 3 并网点电压的变化曲线

Fig. 3 The curve of the change of voltage on the connected point

4 结论

(1) 本文采用基于异步发电机等值电路的方法对风电场节点进行处理。在风速给定的情况下,

通过迭代同时求得满足感应电机转矩平衡的滑差和端电压, 然后根据稳态等值电路来确定感应发电机的有功和无功功率, 较准确地反映了其无功和电压特性。

(2) 提出在风电场升压站低压侧加装 SVC 控制并网点电压的具体方法。将遗传算法与模拟退火算法结合起来, 改善了遗传算法的进化过程。算例结果表明, 采用该方法可使并网点电压稳定在 1p.u. 附近, 减小了风电场并网运行对系统电压稳定性的影响。

参考文献

- [1] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿容量及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.
CHEN Shu-yong, SHEN Hong, ZHANG Yang, et al. Researches on the Compensation and Control of Reactive Power for Wind Farms Based on Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 1-6.
- [2] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66.
SUN Tao, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Voltage Fluctuation and Flicker Caused by Wind Power Generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66.
- [3] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电厂的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi, SUN Jian-feng, et al. Analysis on Maximum Power Injection of Wind Farm Connected to Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [4] 赵清声, 王志新. 双馈风力发电机组系统接入与稳定运行仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 69-74.
ZHAO Qing-sheng, WANG Zhi-xin. Simulation Study on Grid Integration and Steady Operation of Doubly-fed Wind Turbine Generators[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 69-74.
- [5] Zhou F Q, Joos G, Abbey C. Voltage Stability in Weak Connection Wind Farms[A]. in: Proceedings of 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. San Francisco, CA, USA. New York, NY, USA: IEEE, 2005.1483-1488.
- [6] 夏祖华, 沈斐, 胡爱军, 等. 动态无功补偿技术应用综述[J]. 电力设备, 2004, 5(10): 27-31.
XIA Zu-hua, SHEN Fei, HU Ai-jun, et al. Application Summarization on Technology of Dynamic Reactive Power Compensation[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(10): 27-31.
- [7] 邹强, 李兴源. 基于最优变目标策略的励磁系统与 SVC 协调控制[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 24-28.
ZOU Qiang, LI Xing-yuan. Coordination Control between Generator Excitation and SVC Based on Optimal Variable Aim Strategy[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 24-28.
- [8] 王杰, 阮映琴, 傅乐, 等. 计及动态负荷的电力系统静止无功补偿器(SVC)与发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 24-29.
WANG Jie, RUAN Ying-qin, FU Le, et al. The Nonlinear Control of SVC and Excitation of Generators in Power Systems with Dynamic Loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 24-29.
- [9] 纪飞峰, 周荔丹, 姚刚, 等. 基于同不对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
JI Fei-feng, ZHOU Li-dan, YAO Gang, et al. Static Var Compensator Based on the Method of Synchronous Symmetrical Component[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 24-29.
- [10] 马幼捷, 周雪松, 相伟. SVC 综合非线性控制器在交流混合系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 19-23.
MA You-jie, ZHOU Xue-song, XIANG Wei. The Application of Synthetical Nonlinear SVC Controller in AC/DC System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 19-23.
- [11] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜, 等. SVC 与浆距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 95-100.
CHI Yong-ning, GUAN Hong-liang, WANG Wei-sheng, et al. Enhancement of Transient Voltage Stability of Induction Generator Based Wind Farm by SVC and Pitch Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 95-100.
- [12] 陆超, 谢小荣, 童陆园, 等. 使用直接神经动态规划方法的 SVC 附加阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 8-12.
LU Chao, XIE Xiao-rong, TONG Lu-yuan, et al. SVC Supplementary Damping Control Using Direct Neural Dynamic Programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 8-12.
- [13] 熊信良, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 耿光飞, 杨仁刚. 基于定向变异遗传算法的地区电网无功功率优化[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 42-44.
GENG Guang-fei, YANG Ren-gang. Reactive Power Optimization of Regional Power Network by Directed Mutation Based Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 42-44.
- [15] 刘方, 颜伟, Yu D C. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 67-72.

运算、保护原理判据、开入量采集、定值处理以及系统自检、通信规约处理等。数据运算、保护原理判据、开入量采集作为重要的事件，设置为任务 0——优先级最高的任务循环运行，任务 0 循环运行中插入等待延时，任务 0 等待任务 1 运行一段时间，延时到任务 0 继续运行。任务在运行时可以被中断终止，运行中断服务子程序，中断处理完成后，再返回被中断的任务。

2.3 软件的规范化设计

大多数的产品开发，往往并不是原理性错误，而是开发的流程控制和设计规范的不严格所致。厂矿继电保护和自动装置的特点是应用行业广泛，各行业的实际需求千差万别，产品设计时很难也不可能一次全部设计到位，日后的升级、改造难以避免，所以要求初始设计时系统产品平台要统一、软件结构设计一定要规范、模块化，这样才能保证日后的升级和扩展。即软件设计要满足模块化和版本的可控性。

继电保护和自动装置，涉及到厂矿生产的安全和人身安全，关系重大，所以对可靠性的要求非常高，而我们对于计算机产品的可靠性认证和安全认证，从国家的标准上还不完善，很多是企业的经验和自觉行为，比如 CMM 的认证，而具体到软件的设计规范往往是空白，能够对设计人员所使用的编译环境有比较严格控制的企业较少，所以往往是软件的 BUG 导致重大的事故，在这点上应该借鉴航空航天产品方面的研发经验，编制一套适合本企业的软件编程规范是非常必要的。

3 结论

厂矿用继电保护和自动装置是电力自动化设备的重要分支，其涉及到的保护对象更多，可靠性要求和电力系统中的要求是一致的，该类产品是计算机技术、通信技术、软件工程、电力自动化、结构工艺等众多学科交叉的产物，其可靠性、安全性关系到企业的生产安全、经济效益甚至人身安全，尽量采用成熟的技术，设计高质量的产品，本着简单、实用、可靠的原则，从技术原理和设计方法上加以体现。

参考文献

[1] 李才勇, 朱志伟, 赵燕钢. 基于 32 位 ARM 和 DSP 的高端继电保护平台[A]. 2006 中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集[C]. 珠海: 2006.270-274.
LI Cai-yong, ZHU Zhi-wei, ZHAO Yan-gang. A High-end Relay Protection Platform Based on 32-bit ARM and DSP.
[2] 胡钰林, 沈健. 一种基于 PowerPC 的合并单元的研究[EB/OL]. Http://www.tede.cn/plus/view.php?aid=101026.
HU Yu-lin, SHEN Jian. A Study of a Merging Unit Based on PowerPC[EB/OL]. Http://www.tede.cn/plus/view.php?aid=101026.

收稿日期: 2009-07-22

作者简介:

王 磊 (1970-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护和自动装置、变电站综合自动化、厂用电自动化的研究与开发工作; E-mail: wl@zhwld.com

吉木斯 (1966-), 男, 工程师, 主要从事变电站综合自动化、厂用电自动化和调度自动化的研究与开发工作。

(上接第 72 页 continued from page 72)

LIU Fang, YAN Wei, Yu D C. A Hybrid Strategy Based on GA and IPM for Optimal Reactive Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72.
[16] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on Niche Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.
[17] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进遗传模拟算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 13-18.
LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing, LI Yun-hua. Researches on Reactive Power Optimization Based on Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 13-18.
[18] 张丰田, 宋家骅, 李鉴. 基于混合差异进化优化算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 33-37.
ZHANG Feng-tian, SONG Jia-hua, LI Jian. A Hybrid Differential Evolution Method for Optimal Reactive

Power Optimization[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 33-37.
[19] 张武军, 叶剑锋, 梁伟杰, 等. 基于改进遗传算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 67-71.
ZHANG Wu-jun, YIE Jian-feng, LIANG Wei-jie, et al. Multiple-objective Reactive Power Optimization Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 67-71.
[20] 吴学光. 风电场并网运行的数学建模及遗传算法模型优化研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 2000.

收稿日期: 2008-09-25;

修回日期: 2009-03-10

作者简介:

朱雪凌 (1966-), 女, 硕士, 副教授, 从事电力系统分析与风力发电并网技术方面的教学和科研工作;

张 洋 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 从事电力系统分析与风力发电并网技术方面的教学和科研工作; E-mail: woshikuai@tom.com

高 昆 (1984-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统分析及新能源发电技术。