

基于遗传算法的风电场最优接入容量问题研究

朱雪凌¹, 张洋¹, 李强², 饶崇浩³, 张振安²

(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: 针对大规模风电场并网运行会引起接入系统节点电压越限、影响系统电压稳定性的问题, 提出了采用遗传算法对系统稳态运行进行优化分析, 并结合典型风速扰动和故障方式校验系统暂态稳定性的方法, 确定风电场的最优接入容量。以某实际含风电场的电力系统为例, 对所提方法的可行性和有效性进行验证, 结果表明按照所提方法确定的风电场最优容量接入系统, 稳态运行时可保证系统各节点电压合格, 且风电场升压站母线电压和并网节点电压接近额定电压, 减小了风电并网对系统电压稳定性的影响; 系统经历暂态过程时, 可保证系统和风电场均稳定。

关键词: 风电接入; 电压稳定; 遗传算法; 无功补偿; 暂态稳定性

Research on the optimum capacity of wind power integration into power system based on genetic algorithm

ZHU Xue-ling¹, ZHANG Yang¹, LI Qiang², RAO Chong-hao³, ZHANG Zhen-an²

(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: To solve the problem of node voltage out-of-range and the voltage stability worsening existing in large-scale wind power integration, a new method is proposed to determine the optimum capacity of wind power integration into power system, which uses genetic algorithm to analyze the steady-state operation of power system, combined with typical wind velocity disturbance and fault mode to check the transient stability of system. An actual power system are used to test feasibility and availability of the proposed method. Test results show that using the method proposed in this paper to determine the optimum capacity of wind power integration can make voltage of each node acceptable, and the bus voltage of wind farm booster station and parallel point approach rating value. The influence on system stability of wind power integration is reduced during steady-state operation. System and wind farm itself can keep stable during transient state.

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

Key words: wind power integration; voltage stability; genetic algorithm; reactive compensation; transient stability

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0055-06

0 引言

随着大规模并网型风电场的开发, 风电在系统中所占比例越来越大, 大规模风电接入电网后会改变系统潮流分布^[1-4]、出现电网电压水平下降^[5-6]、系统短路容量增加、系统暂态稳定性改变等一系列问题^[7]。因此, 需要对风电场接入系统的最优容量进行研究, 以便既保证系统安全与可靠运行, 同时又能充分利用风能资源。

本文对风电场最优接入容量问题进行研究, 目的在于解决风电场引起接入系统节点电压越限、影响系统电压稳定性的问题。目前, 分析风电场接入系统容量的方法主要有: 时域仿真法、稳态潮流仿真法、静态安全约束法、稳态频率约束法等方法^[8]。本文采用优化的方法分析稳态运行情况。由于异步风力发电机组发出有功功率的同时吸收系统无功, 会引起并网节点电压波动, 需在风电场升压站进行无功补偿。故在优化问题的数学模型中, 控制变量除了风电场接入容量外, 还有无功补偿量, 这两个控制变量均为离散变量。目前求解此类优化问题的方

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2008B470003)

法包括单纯形法、内点法、二次规划法、动态规划法和灵敏度法^[9-13], 这些方法大都把离散变量当成连续变量处理, 容易陷入局部最优解, 用于大规模的优化计算时还容易产生“维数灾”^[14]。近年来遗传算法在电力系统运行优化方面应用广泛^[15-20], 遗传算法具有很强的离散变量处理能力和鲁棒性^[14], 故本文采用遗传算法求解风电场最优接入容量问题。

确定风电场最优接入容量时, 需考虑系统可能出现的不同稳态运行方式, 如系统大方式下, 风电场可以接入不同的电压等级, 也可以接入相同电压等级的不同地点。在这些不同的稳态运行方式下, 应用遗传算法确定最优稳态运行接入容量, 结合典型风速扰动和故障方式校验系统的暂态稳定性, 最终确定使系统和风电场均保持暂态稳定的最优接入容量。

将本文所提方法应用于某实际风电场接入电力系统的仿真计算, 结果表明稳态运行时电网电压水平得到明显改善, 提高了系统的暂态稳定性, 验证了本文方法的可行性和有效性。

1 潮流计算中风电场的处理方法

1.1 异步机稳态等值电路

分析风电场并网对系统电压稳定性的影响, 需要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^[21]。

异步发电机稳态等值电路如图 1 所示。

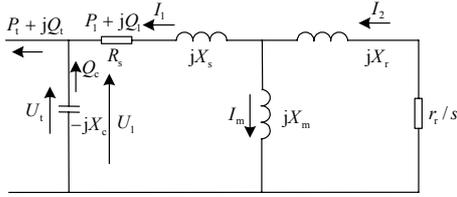


图 1 异步发电机稳态等值电路

Fig.1 Steady-state equivalent circuit of induction generator

其中: P_1 、 Q_1 、 U_1 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:

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

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

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。根据文献 [21] 的推导过程, 可得风电场内电网第 i 节点电压计算公式为:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_k - Z_{i1}J_1 - \dots - Z_{ii}J_i - \dots - Z_{in}J_n \quad (3)$$

其中: $[Z]$ 为回路阻抗矩阵。

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

$[Z_b]$ 为支路阻抗矩阵; Z_{ij} 是 $[Z]$ 的第 i 行元素; \dot{V}_k 为风电场并网点电压; \dot{V}_i 为 i 节点电压。

1.3 全电网的潮流计算流程

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 (UPI) 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_1 和功率 P_1 ;
- 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_1 ;
- ④ 根据式(3)计算风电场内电网节点电压 \dot{V}_i , 求得风电场注入电网的有功 P_2 和无功 Q_2 ;
- ⑤ PFP 输出 P_2 和 Q_2 信息给 PSASP。

2 风电场最优接入容量的计算方法

本文研究的风电场最优接入容量问题, 以尽可能减小风电并网对系统电压稳定性的影响为目标。即风电并网后, 满足系统各节点电压均合格 (在 0.95 p.u. 至 1.05 p.u. 范围内), 且风电场升压站母线电压和并网点电压最接近额定电压 (1 p.u.) 的条件。

2.1 优化计算的数学模型

$$\text{obj: } F = \max \frac{1}{|1 - V_F| + |1 - V_k|} \quad (5)$$

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

$$Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_k = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$0 \leq P_{\Sigma} \leq P_{\Sigma \max}$$

$$0 \leq Q_k \leq Q_{k \max}$$

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

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

其中: N 为节点总数; i, j 表示任意节点

($i, j = 1, 2, \dots, N$); k 表示并网点; V_F 和 V_k 分别为风电场升压站母线电压和并网点电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳、电压相角差; 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; P_{Σ} 、 $P_{\Sigma, \max}$ 、 Q_k 、 $Q_{k, \max}$ 分别为风电场总的有功出力、风电场总的有功出力上限、无功补偿值、无功补偿值的上限。

$P_{\Sigma, \max}$ 和 $Q_{k, \max}$ 的取值不同, 优化计算的结果也不同。目前, 欧洲一些国家通常根据短路容量来确定风电场的装机规模, 一般规定风电场的额定功率和并网点短路容量的比值为 4%~5%^[22]。本文以此比值等于 5% 初步确定 $P_{\Sigma, \max}$ 。 $Q_{k, \max}$ 的取值采用文献 [20] 中提出的计算风电场无功补偿总容量的方法确定。 $P_{\Sigma, \max}$ 和 $Q_{k, \max}$ 的取值确定后, 控制变量的约束条件在优化过程中通过编码就可以自动满足。

2.2 应用遗传算法求解优化问题

2.2.1 适应度函数

$$f(x) = F(x) = \max \frac{1}{|1 - V_F| + |1 - V_k|} \quad (7)$$

2.2.2 编码与解码

变量统一采用十进制整数编码:

$$X = [x_1 \ x_2] = [N_F \ N_C] \quad (8)$$

式中: N_F 为表示风电机组台数的整数; N_C 为表示电容器投入组数的整数。

解码方式为:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= P_{\Sigma 0} + \Delta P \cdot N_F \\ Q_k &= Q_{k0} + \Delta Q \cdot N_C \end{aligned} \quad (10)$$

式中: P_{Σ} 、 Q_k 分别为风电场总的接入容量、电容器无功补偿值; $P_{\Sigma 0}$ 、 Q_{k0} 分别为风电场接入容量初值、电容器无功补偿初值; ΔP 、 ΔQ 分别为风电机组的单机容量、单组电容器的补偿值。

2.2.3 选择、交叉和变异

采用基于线性排名的选择策略和自适应的交叉操作和变异操作:

$$P_m = \frac{a - b \times \frac{m}{M+1}}{M} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

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。

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{av}} & f \geq f_{av} \\ k_3 & f < f_{av} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_2(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{av}} & f' \geq f_{av} \\ k_4 & f' < f_{av} \end{cases} \quad (13)$$

2.2.4 算法流程

- ① 进化代数初始化为 0, 给出种群初始值;
- ② 修改网络参数, 进行潮流计算;
- ③ 计算个体适应度, 进行个体排序;
- ④ 判断进化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、变异、解码等操作后转步骤②进行下一代的计算。

3 校验系统和风电场的稳定性

按照上述方法进行含风电场电力系统稳态运行的分析计算, 得出风电场最优接入容量和最优无功补偿值。再以典型风速扰动和不同线路发生三相短路的故障方式进行校核: 若系统和风电场均保持稳定, 则计算结果是合适的; 若系统或风电场失稳, 则以单台风电机组容量为步长, 逐渐减小 $P_{\Sigma, \max}$ 的取值, 每减小一次, 进行一次优化计算, 再进行稳定性校验, 直到系统和风电场均保持稳定为止。即得到最优的接入容量和无功补偿量。

4 算例分析

系统接线如图 2 所示, 节点 1 为规划建设的风电场, 拟投运单机容量为 750 kW 的新疆金风科技出厂的 S50-750 kW 型异步发电机组; 节点 2 为系统等值机; 系统中有 2 座 110 kV 变电站, 变电容量为 103 MVA, 4 座 35 kV 公用变电站, 变电容量为 37.8 MVA。以下确定该系统风电场最优接入容量。

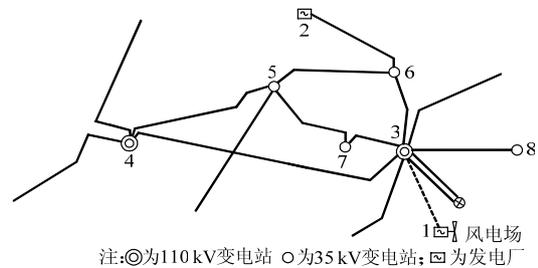


图 2 算例系统地理接线简图

Fig.2 Geographic diagram of sample system

4.1 应用遗传算法求解最优接入容量

首先以风电场并网于节点3所示110 kV变电站的110 kV母线这种情况为例进行计算。按第1、2节给出的方法,参数设置如下: M 取30,最大进化代数取100, a 取1.1, b 取0.2,交叉率取[0.5, 0.9],变异率取[0.001, 0.1], $P_{\Sigma\max}$ 取46.5 MW, $Q_{k\max}$ 取20 Mvar, $P_{\Sigma 0}$ 取0, Q_{k0} 取0。计算结果如表1所示。

表1 风电场以110 kV接入系统计算结果
Tab.1 Calculation results of wind power integration with 110 kV

遗传代数	风电接入容量 /MW	风电场有功出力/MW	无功补偿值/Mvar	升压站母线电压/p.u.	并网点母线电压/p.u.
第20代	22.5	21.7	21 × 0.334	0.95	0.95
第30代	40.5	36.9	36 × 0.334	0.991	0.986

表1给出了遗传算法计算至第20代和第30代的结果,在算至第30代即找到了最优解并保持到第100代不变。由表1可见,风电场接入容量 P_{Σ} 为40.5 MW(54台×750 kW)、无功补偿值 Q_k 为12 Mvar时,风电场升压站母线电压和并网点母线电压非常接近1 p.u.,其他各节点电压均合格:节点2为1 p.u.、节点4为0.95 p.u.、节点5为0.972 p.u.、节点6为0.975 p.u.、节点7为0.980 p.u.、节点8为0.962 p.u.。

再将风电场接入节点3所示变电站的35 kV母线,进行同样的计算,可得表2所示结果,此结果保持到100代不变。由表2可以看出,风电场接入容量 P_{Σ} 为22.5 MW。

表2 风电场以35 kV接入系统计算结果
Tab.2 Calculation results of wind power integration with 35 kV

遗传代数	风电接入容量 /MW	风电场有功出力/MW	无功补偿值/Mvar	升压站母线电压/p.u.	并网点母线电压/p.u.
第26代	20	19.1	18 × 0.334	0.96	0.95
第47代	22.5	21.4	20 × 0.334	0.995	0.98

对比表1和表2可知,风电场并网点电压水平对风电场最大接入容量有很大影响。电压等级越高,系统接纳风电能力越强,风电接入容量相应提高。

4.2 校验系统和风电场的稳定性

4.2.1 风速扰动和故障方式

(1) 渐变风扰动:正常方式下运行于额定风速(14 m/s),渐变风2 s启动,4 s风速降至4 m/s,之后保持8 s结束。

(2) 故障方式

① 故障方式1:节点3与4之间110 kV线路

发生三相短路接地故障后0.12 s切除故障线路。

② 故障方式2:节点3与6之间35 kV线路发生三相短路接地故障后0.12 s切除故障线路。

③ 故障方式3:节点4与5之间35 kV线路发生三相短路接地故障后0.12 s切除故障线路。

4.2.2 校验结果

按照风电场以110 kV接入系统为例进行校验:

(1) 风电场接入容量40.5 MW,无功补偿12 Mvar时,发生渐变风扰动,风电场输出特性曲线见图3,系统稳定性曲线见图4。由图3可见渐变风2 s启动后,风电场有功输出逐渐减少至0,7 s后又逐渐增加至扰动前水平,风电机组的转差率在扰动前后没有明显变化,故风电场稳定。由图4可见系统频率保持在额定值,系统机组的相对功角在扰动期间有小幅波动,扰动后不变,故系统稳定。

(2) 风电场接入容量40.5 MW,无功补偿12 Mvar时,发生上述三种故障方式,风电场输出特性曲线见图5,系统稳定性曲线见图6。图5中曲线1、2、3分别对应故障方式1、2、3时,风电场有功输出;曲线4、5、6分别对应故障方式1、2、3时,风电机组转差率。由图5可见,故障方式1、2时,风电场有功输出和风电机组转差率都不断减小,不能恢复到短路前的状态或稳定在新稳态,故风电场不稳定;故障方式3时风电场稳定。图6中曲线1、2、3分别对应故障方式1、2、3时,系统机组的相对功角变化。由图6可见,故障方式1、2期间系统机组的相对功角有大幅振荡,切除故障后功角经小幅波动后达到一稳定值,系统功角稳定;故障方式3期间系统机组的相对功角有小幅振荡,切除故障后功角经小幅波动后达到一稳定值,系统功角稳定。

以单机容量750 kW为步长,逐渐减小 $P_{\Sigma\max}$ 至37.5 MW时,优化计算结果: P_{Σ} 为35.25 MW、 Q_k 为10.6 Mvar。进一步校验:

(3) 风电场接入容量为35.25 MW,无功补偿值为10.6 Mvar的情况下,发生渐变风扰动,风电场输出特性曲线与图3类似,系统稳定性曲线与图4类似。(因篇幅有限不再赘述)故风电场和系统均稳定。

(4) 风电场接入容量为35.25 MW,无功补偿值为10.6 Mvar的情况下,发生故障方式1、2、3扰动,风电场输出特性曲线见图7。图7中曲线与故障方式的对应关系同图5,由图7可见,发生三种故障瞬间风电机组有功输出均急剧减小,故障切除后,有功输出迅速回升,最后稳定在短路之前的水

平; 风电机组的转差率没有明显变化, 故风电场稳定。系统稳定性曲线与图 6 相似, 即三种故障期间系统机组的相对功角有较大振荡, 切除故障后功角经小幅波动后达到稳定值, 系统功角稳定。

通过比较不同故障方式对接入容量的影响可以发现: 发生三相短路故障的线路距离风电场并网点越近, 对暂态稳定性的影响越大; 故障方式对风电场接入容量的影响高于风速扰动带来的影响。

通过稳态分析和系统经受典型风速扰动及故障方式的校验, 可得算例系统风电场最优接入容量为 35.25 MW, 最优无功补偿值为 10.6 Mvar。

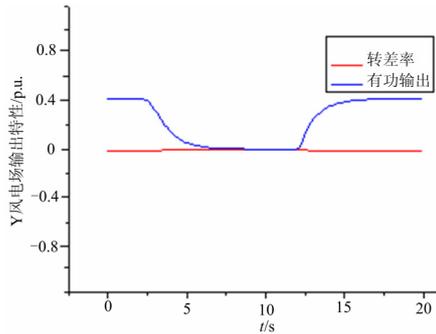


图 3 渐变风扰动时风电场的输出特性 (风电接入 40.5 MW)
Fig.3 Output characteristic of wind farm disturbed with graded wind (40.5 MW wind power integration)

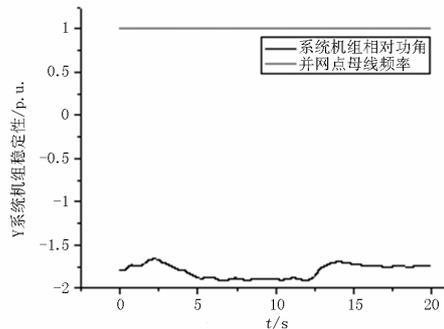


图 4 渐变风扰动时系统的稳定性 (风电接入 40.5 MW)
Fig.4 Stability of system disturbed with graded wind (40.5 MW wind power integration)

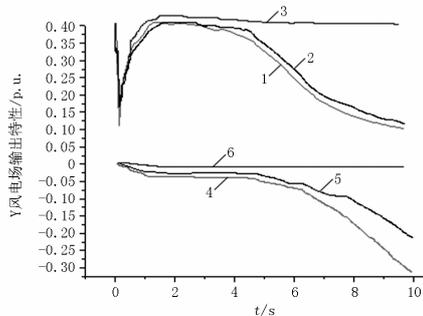


图 5 故障方式时风电场的输出特性 (风电接入 40.5 MW)
Fig.5 Output characteristic of wind farm with fault mode (40.5 MW wind power integration)

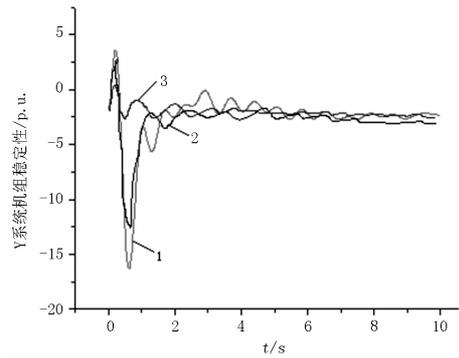


图 6 故障方式时系统的稳定性 (风电接入 40.5 MW)
Fig.6 Stability of system with fault mode (40.5 MW wind power integration)

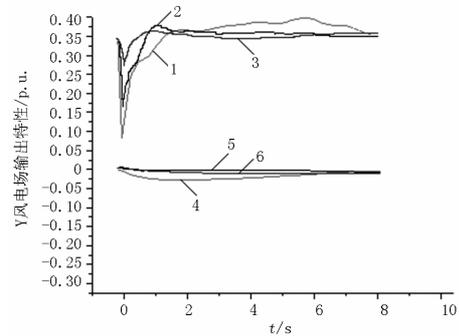


图 7 故障方式时风电场的输出特性 (风电接入 35.25 MW)
Fig.7 Output characteristic of wind farm with fault mode (35.25 MW wind power integration)

5 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确定感应发电机的有功和无功率, 较准确地反映了其无功和电压特性。

(2) 建立了求解风电场最优接入容量的数学模型并采用遗传算法求解。通过计算可知风电场并网点电压水平影响风电的接入容量: 电压等级越高, 系统接纳风电能力越强, 风电接入容量得到相应提高。优化计算得到的风电场最优接入容量可保证系统各节点电压合格, 且风电场升压站母线电压和并网点母线电压接近 1 p.u., 减小了风电场并网运行对系统电压稳定性的影响。

(3) 采用在典型风速扰动和故障方式下校验系统稳定性, 以最终确定风电场接入容量的方法。通过校验可知, 风电场接入容量受风速影响较小, 受系统故障方式影响较大, 发生故障的线路距离风电场并网点越近, 对系统暂态稳定性的影响越大。因此必须通过校验才能最终确定使系统和风电场在稳

态和暂态都稳定的最优风电场接入容量。

参考文献

- [1] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 78-79.
YANG Xiu-yuan, LIANG Gui-shu. Development of Windpower Generation and Its Market Prospect[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 78-79.
- [2] 王承煦, 张源, 朱瑞兆, 等. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 27-32.
LEI Ya-zhou, Gordon Lighthody. An Introduction on Wind Power Grid Code and Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 27-32.
- [4] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 含风电场电力系统的有功优化潮流[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 18-21.
LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. Optimal Real Power Flow in Wind Power Integrated System[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 18-21.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yong-ning, LIU Yan-hua, WANG Wei-sheng, et al. Study on Impact of Wind Power Integration on Power System[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [8] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
SHEN Hong, LIANG Jun, DAI Hui-zhu. Calculation of Wind Farm Penetration Based on Power System Transient Stability Analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11.
- [9] Iba K. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 685-692.
- [10] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Reactive Power Optimization Under Voltage Constraints Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 1-4.
- [11] Lee K Y, Bai X, Park Y M. Optimization Method for Reactive Power Planning by Using a Modified Simple Genetic Algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 1843-1850.
- [12] 张元明, 王晓东, 李乃湖. 基于原对偶内点法的电压无功功率优化[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 42-45.
ZHANG Yuan-ming, WANG Xiao-dong, LI Nai-hu. Voltage/reactive Power Optimization Based on Primal-dual Interior Point Method[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 42-45.
- [13] 袁辉, 徐贵光, 周京阳. 基于模糊线性规划的无功电压优化[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 42-45.
YUAN Hui, XU Gui-guang, ZHOU Jing-yang. A Reactive Power/voltage Optimization Based on Fuzzy Linear Programming[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 42-45.
- [14] 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.
- [15] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LI Bang-feng. Survey on Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56.
- [16] 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.
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.
- [17] 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.
- [18] McCall J. Genetic Algorithm for Modeling and Optimisation[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 184(1): 205-222.
- [19] 钟红梅, 任震, 张勇军, 等. 免疫算法及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 16-19.
ZHONG Hong-mei, REN Zhen, ZHANG Yong-jun, et al. Immune Algorithm and Its Application in Power System Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 16-19.
- [20] 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.

(下转第 87 页 continued on page 87)

以为二次保护控制单元提供准确的采样数据。表 1 所示为以 I_a 采样值为例的试验结果, 结果显示该设计合并单元的比差、角差在不同施加量的情况下都能够满足 IEC60044-8 规定的 0.2 级电子式互感器的要求。

表 1 以 I_a 采样值为例 10 次试验结果Tab.1 Test results of I_a for 10 times

施加量	5% (I_n)		10% (I_n)		20% (I_n)	
	比差	角差	比差	角差	比差	角差
最大值	-0.253	6'15"	-0.179	1'38"	-0.154	1'55"
最小值	-0.301	4'52"	-0.193	1'12"	-0.166	0'53"
平均值	-0.262	5'31"	-0.187	1'22"	-0.162	1'32"
偏差	0.006	0'31"	0.005	0'11"	0.003	0'18"
施加量	50% (I_n)		80% (I_n)		100% (I_n)	
	比差	角差	比差	角差	比差	角差
最大值	-0.130	0'58"	-0.119	1'29"	-0.111	1'46"
最小值	-0.139	0'41"	-0.129	1'05"	-0.121	1'24"
平均值	-0.135	0'51"	-0.123	1'20"	-0.116	1'35"
偏差	0.003	0'5"	0.003	0'7"	0.003	0'6"

5 结束语

本文提出了一种基于 FPGA 与 ARM9 的合并单元实现方案, 充分利用了 FPGA 丰富 I/O 口、可编程以及 ARM9 的执行速度快、数据处理能力强、易于扩展的特点, 能够满足系统高速、稳定的要求。经校验系统测试能够达到 0.2 级的要求。

参考文献

- [1] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (21): 38-42.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Modeling and Mapping Implementation of Sampled Value Model Based on IEC 61850[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2004, 28(11): 38-42.
[2] IEC60044-8, Instrument Transformers-part 8: Electronic Current Transformers[S].
[3] IEC61850-9-1, Communication Networks and Systems in Substations-Part9-1: Specific Communication Service Mapping(SCSM)-Sampled Analogue Values over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].
[4] IEC61850-9-2, Communication Networks and Systems in Substations-Part9-2: Specific Communication Service Mapping(SCSM)-Sampled Values over ISO/IEC 8802-3 Link[S].
[5] 朱炳铨, 任雁铭, 姜健宁, 等. 变电站自动化系统实现 IEC 61850 的过渡策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 54-57.
ZHU Bing-quan, REN Yan-ming, JIANG Jian-ning, et al. Strategy for Implementation of IEC61850 in Substation Automation System During Transitional Period[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 54-57.
[6] 谷重阳, 汪渤, 龙殊颖. 并行模数转换芯片 ADS8364 与 TMS320F2812 的接口设计[J]. 微计算机信息, 2006, 22(1-2): 137-139.
GU Chong-yang, WANG Bo, LONG Shu-ying, et al. Design of Interface of Analog-to-digital Converter ADS8364 and TMS320F2812[J]. Microcomputer Information, 2006, 22(1-2): 137-139.
[7] ATMEL. ARM920T-based Microcontroller AT91RM9200[Z]. 2003.

收稿日期: 2009-08-25; 修回日期: 2009-11-23
作者简介:

张明珠 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为概率统计及计算机应用; E-mail: zmz_xctc@126.com

邹欣洁 (1980-), 女, 助理工程师, 研究方向为数字化变电站综合自动化。

(上接第 60 页 continued from page 60)

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.

- [21] 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.
[22] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2009-12-23
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

李强 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析及新能源发电技术。