

风-光互补发电系统的电压控制

张伯泉¹, 杨宜民²

(1. 广东工业大学计算机学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 风-光互补发电系统是开放的、分布式系统, 适合采用多 Agent 技术进行分散式决策、分散式控制。根据电压与无功功率和有功功率的关系, 建立了考虑电压稳定的以有功损耗最小为目标的电压无功优化控制模型, 并提出一种基于均匀设计和惰性变异的改进粒子群算法用于该模型的求解; 建立了风-光互补发电系统电压控制系统的自动机模型。仿真实验显示, 电压优化控制模型和改进的粒子群算法能够有效实现电压无功优化控制, 电压控制系统的自动机模型能够及时跟踪电压变化, 实现电压自动控制。

关键词: 风-光互补发电; 无功优化; 电压控制; 粒子群算法

Voltage control of wind-photovoltaic hybrid power systems

ZHANG Bo-quan¹, YANG Yi-min²

(1. Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. Institute of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Wind-photovoltaic Hybrid Power System is an open distributed system. It is suitable to make decision and control dispersedly with multi-agent technology. According to the relation between voltage and reactive and active power, a voltage reactive optimization control model considering voltage stability with the least active power loss as objective is constructed, and an advanced Particle Swarm Optimization based on Uniform Design and Inertia Mutation is proposed to solve this model. In order to control voltage automatically, an automata model of voltage control system is made. The results of simulation experiments show that the voltage optimization control model and the advanced Particle Swarm Optimization are effective to voltage reactive power optimization control and the automata model of voltage control system can track the variety of voltage in time and control voltage automatically.

This project is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China(No.60534040), National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.05001819), and Doctoral Research Fund of Guangdong University of Technology(No.083011).

Key words: wind-photovoltaic hybrid power generation; reactive power optimization; voltage control; particle swarm optimization

中图分类号: TP18, TK51, TK8

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2008)16-0005-06

0 引言

风-光互补发电系统是开放的、分布式系统, 这与多 Agent 系统 (MAS) 的特征和应用领域相吻合^[1-3]。借鉴多 Agent 系统思想, 建立基于多 Agent 技术的风-光互补发电的控制系统, 可以实现风-光互补发电的分散式决策、分散式控制, 保证其安全、稳定运行。

风-光发电系统的电压优化控制应既能保证发电场电压的稳定与安全, 也能使得有功损耗最小。根据电压与无功功率和有功功率的关系, 建立考虑电压稳定的以有功功率损耗最小为目标的控制函数能实现这一要求。该数学模型是一个带约束的非线性多极值函数, 用传统的方法很难求解, 且效果不佳。采用基于均匀设计和惰性变异的粒子群算法对其进行优化求解, 能取得令人满意的效果。当风-光发电系统规模变大时, 采用多 Agent 协调优化技术将比单一粒子群算法优化求解效果好。

风-光互补发电系统应能进行电压自动控制。电压控制子系统属于混合控制系统, 建立该混合控

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60534040); 广东省自然科学基金自由申请项目 (05001819); 广东工业大学博士启动基金 (083011)

制子系统的自动机模型, 将其作为 Agent 的知识, 可以实现基于多 Agent 的电压自动控制。

1 基于多 Agent 技术的风-光互补发电系统的体系结构

基于多 Agent 技术建立风-光互补发电控制系

统的体系结构, 可以实现基于多 Agent 的风-光互补发电系统的控制。它由界面管理 Agent 层、能量管理 Agent 层、执行层构成, 如图 1 所示。其中 $n1$ 、 $n2$ 、 $n3$ 、 $n4$ 皆为大于等于 1 的整数, 具体取值要统筹考虑控制系统的简单性、容错性和效率等因素。Agent 的结构如图 2 所示。

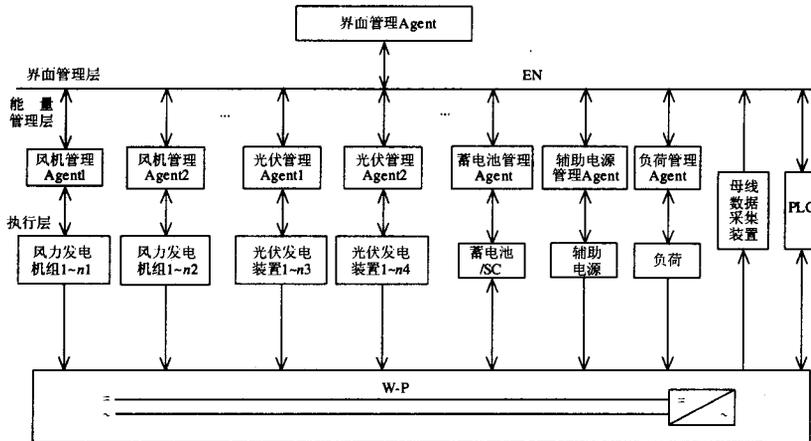


图 1 基于多 Agent 技术的风-光互补发电控制系统的体系结构

Fig.1 Structure of wind-photovoltaic hybrid power control systems based on multi-agents

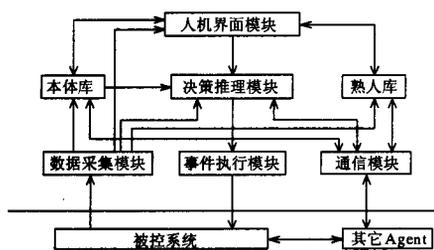


图 2 Agent 结构

Fig.2 Structure of Agent

在这种结构中, 界面管理 Agent 只用于系统的初始化、必要的人机交互等, 发电系统一旦运行将主要由能量管理层的 Agent 进行管理控制。Agent 采用非固定主从式的合作机制, 每一时刻只有一个主 Agent, 一个次主 Agent, 其它为从 Agent。当主 Agent 出现故障时, 由次主 Agent 代替它执行当前任务, 当从 Agent 出现故障时, 由主 Agent 代替它执行当前任务。Agent 的合作协议采用改进的合同网协议, 它简化了 Agent 间的合作过程, 解决了任务分解难题。因此, 这种控制系统结构简单、容错性强、效率高, 适合于风-光互补发电系统的管理控制。

2 电压优化控制

风-光互补发电的无功优化是具有多极值点的混合小整数型的非线性优化问题, 通常以有功功率损耗最小、电压波动最小、无功功率负荷分配最

经济为目标函数^[4,5], 传统的解决方法有等微增率准则法、动态规划法、线性规划法等^[5]。但这些传统方法存在对优化函数解析性要求高、维数灾难、易陷入局部极值解等缺点。本文提出一种改进的粒子群算法, 它用均匀设计法产生 PSO 的初始值, 使初始值比较均匀地分布在解空间, 使某个或某些粒子最大可能地落在全局最优解位置或附近; 在进化过程中, 对惰性粒子以概率为 1 进行变异, 保证粒子的多样性。这样 PSO 能以更大的概率找到全局最优解。

2.1 数学模型

在系统有功潮流调度已确定的前提下, 以负荷点的电压为状态变量, 以无功电源的无功出力为控制变量, 建立考虑监测点电压质量以发电系统有功功率损耗最小为目标的电压优化控制的数学模型, 如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \min f(P, Q, V) &= \sum_{i=1}^M \frac{P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2}{V_i^2} R_i + \lambda \sum_{j=1}^N (V_j - V_N)^2 \\ \text{s.t.} \quad & P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max}, \quad i=1, \dots, M \\ & Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max}, \quad i=1, \dots, M \\ & V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max}, \quad j=1, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^M Q_{Gi} - Q_L = 0$$

$$\sum_{i=1}^M P_{Gi} - P_L = 0$$

其中: P 、 Q 、 V 分别是出力装置的有功出力、无功出力和电压监测点的电压构成的矢量; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别是第 i 台出力装置发出的有功功率和无功功率; V_j 、 V_N 、 R_i 分别是监测点的电压、监测点的额定电压、第 i 个出力装置到负荷端的等值电阻; M 、 N 、 λ 分别是有功与无功出力装置的台数、电压监测点的个数和惩罚系数; P_L 、 Q_L 分别是负荷与传输线路损耗的有功功率和无功功率。

在优化求解过程中, 监测点 j 的电压 V_j 用式(2)计算:

$$V_j = \left(\frac{Q_j}{Q_{jN}} \right)^{\frac{1}{n}} V_{jN} \quad (2)$$

其中: V_{jN} 、 Q_{jN} 、 Q_j 分别是第 j 个监测点的额定电压、额定电压下所需要的无功功率、实际的无功功率; 参数 n 根据负荷的类型确定。

2.2 改进的粒子群算法

均匀设计^[6,7]是王元、方开泰于 1978 年提出的一种新的试验方法。与正交设计比较, 试验次数大大减少, 在许多多水平试验问题中非常实用。对粒子群算法来说, 将其问题域划分为适当多的水平, 在这些水平中均匀地选取粒子, 使粒子均匀分布在问题域中, 能使 PSO 具有更优的求解效果。

定义 1 惰性粒子是指这样的粒子: 在连续 C 代, 其适应度函数值与粒子群当前最优适应度函数值之差小于给定的小的正数 δ_1 , 并且它与粒子群最优适应度函数值对应的粒子的距离小于 δ_2 。用公式(3)表示为:

$$\begin{cases} d_{fi} = \frac{f_i - f_g}{\min\{|f_i|, f_g\}} < \delta_1 \\ d_{di} = \sum_{j=1}^N (x_{ij} - P_{gj})^2 < \delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中: d_{fi} 为粒子 i 与粒子群最优适应度函数值的差值, f_i 是粒子 i 的适应度函数值, f_g 是粒子群最优适应度函数值, d_{di} 是粒子 i 与粒子 g 的距离差。

对惰性粒子进行处理, 可以使粒子群在进化过程中能够保证多样性, 搜索的全局性得到改善, 因而更有可能获得全局最优解。

基于均匀设计和惰性变异的粒子群算法(UMPSO)的流程如下:

Step 1 基于均匀设计初始化粒子的位置 x_i 、速度 v_i , 设置进化代数 G 、种群数目 P 、收敛标准 ε 、惰性代数 T 、惰性适应度函数差值标准 δ_1 、惰性距

离差值标准 δ_2 、学习因子 C_1 与 C_2 和公式(2)中的参数 n 。

Step 2 按式(1)计算每个粒子的适应值。

Step 3 对于每个粒子, 按式(4)对个体最优位置 P_i 进化; 按式(5)对全群最优位置 P_g 进化。

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(P_i(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_K(t)\} / f(P_g(t)) = \min\{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_K(t))\} \quad (5)$$

Step 4 对每个粒子, 按式(3)计算其与 P_g 的偏差,

以决定其惰性累加器 T_i 是否加 1。

Step 5 对每个粒子判断其 T_i 与 T 的大小。如果 $T_i > T$, 则在解空间中以概率 1 对其变异, 并与粒子群当前最优解 P_g 进行比较。如果 $f(x_i) < f(P_g)$, 则令 $P_g = x_i$, 且对 x_i 在解空间重新以概率为 1 初始化变异, 直到产生 x_i , 使 $f(x_i) \geq f(P_g)$, 并令 $T_i = 0$ 。

Step 6 根据式(6)对粒子的位置和速度进行进化。

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \chi(v_{i,j}(t) + c_1 r_{1,j}(t)(P_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2 r_{2,j}(t)(P_{g,j}(t) - x_{i,j}(t))) & \text{if } -V_{\max,j} \leq v_{i,j}(t+1) \leq V_{\max,j} \\ v_{\max,j}(t) & \text{if } v_{i,j}(t+1) > V_{\max,j} \\ v_{\min,j}(t) & \text{if } v_{i,j}(t+1) < -V_{\max,j} \end{cases}$$

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) & \text{if } X_{\min,j} \leq x_{i,j}(t+1) \leq X_{\max,j} \\ X_{\max,j} & \text{if } x_{i,j}(t+1) > X_{\max,j} \\ X_{\min,j} & \text{if } x_{i,j}(t+1) < X_{\min,j} \end{cases} \quad (6)$$

Step 7 判断进化代数是否达到预设的最大的进化代数 G , 或者连续 T 代全群最优值之差小于收敛标准 ε , 并且电压偏差在其控制区内。若是, 则转向 Step 8; 否则转向 Step 2。

Step 8 输出 P_g 及其对应的最优适应度函数值和监测点的电压值, 算法运行结束。

2.3 仿真实验

图 3 是一个风-光互补发电系统, 线路旁边标注的是发电装置到负荷点的传输线路的阻抗, 线路的其它参数未计。

系统由 75 kW 和 45 kW 的变速风力发电机组、30 kW 的光伏发电阵列(PV)、140 kWh 的蓄电池(放电深度为 60%)、10 组 60 kvar 的电容、负荷(LD1、LD2)等组成。负荷点的额定电压为 400 V, 电压允许波动范围为[380 V, 420 V], 电压调节控制区为[390 V,

410 V]。在某采样点, LD1 为 $48+j15.67$, LD2 为 $4+j1.38$, 75 kW 风机的有功出力是 21 kW、无功出力范围是[0, 9 kW], 45 kW 风机的有功出力是 12.5 kW、无功出力范围是[0, 5 kW], PV 的有功出力是 18.5 kW、无功出力范围是[0, 7 kW], 电容器的无功出力范围是[0, 60 kvar], 分 10 组投切。各无功出力装置为控制变量, 负荷点的电压为状态变量, 用式(1)对各装置的无功出力进行优化。

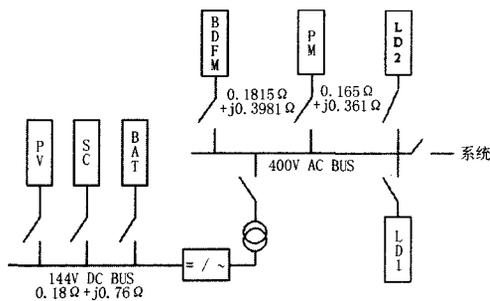


图 3 风-光互补发电系统的等效电路

Fig.3 Equivalent scheme of wind-photovoltaic hybrid power systems

进化中的种群数 $P=20$, 收敛标准 $\varepsilon=1E-6$, 惰性代数 $T=4$, 惰性适应度函数差值标准和惰性距离差值标准 $\delta_1 = \delta_2 = 3E-4$, 学习因子 $C_1=2.8$ 、 $C_2=1.3$, 式(2)中的参数 $n=2$, 使用的均匀设计表是 $U_{20}(10^4)^{[8]}$ 。连续运行 20 次的平均适应度值优化曲线如图 4 所示, 对照结果如表 1 所示。

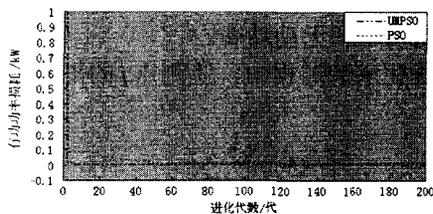


图 4 优化过程示意图

Fig.4 Optimization procedure

实验结果表明, 改进的粒子群算法比标准的粒子群算法具有更高的求解精度和更快的优化速度; 所建立的数学模型既能够保证监测点电压的质量, 又能够降低有功损耗。

表 1 标准 PSO 与 UMP30 优化结果对照

Tab.1 Comparison of optimization results between the standard PSO and UMP30

算法	无功出力装置的无功出力/kvar				负荷点电压 /V	有功功率损耗 /kW	最优值出现的代数/所需时间(代 /ms)
	SC	BDFM	PM	PV			
PSO	6	7.946642	0.982672	2.124113	399.999922	0.00116463	58/33.5
UMP30	6	5.45701	2.737621	2.858746	400.000001	0.00113762	36/21.6

3 基于多 Agent 的电压无功优化控制

基于图 3 的风-光互补发电系统, 采用多 Agent 技术进行电压的无功优化控制。在某时间点, 负荷所需的有功功率为 52 kW、无功功率为 17.05 kvar。Agent1 管理两台风机, Agent2 管理光伏发电装置、蓄电池和静态电容, Agent1 为主 Agent, Agent2 为从 Agent, 同时又是次 Agent。Agent1、Agent2 间的协作优化过程如下:

Step 1: Agent1 用其粒子群算法优化所管辖的发供电装置的无功出力, 用时 15 ms。结果为: 75 kW 风机供电 $21+j5.45701$, 送到负荷端的无功功率为 5.455839 kvar; 45 kW 风机供电 $12.5+j2.737621$, 送到负荷端的无功功率为 2.737252 kvar。负荷端无功缺额为 8.856910 kvar, Agent1 向 Agent2 发出招标通知。

Step2: Agent2 获取招标通知。

Step3: Agent2 用其粒子群算法优化所管辖的

发供电装置的无功出力, 用时 18 ms。结果为: PV 供电 $18.5+j2.858746$, 送到负荷端的无功功率为 2.857081 kW; 静态电容出力 6 kvar, 送到负荷端的无功功率为 5.999829 kW。

Step4: Agent1 获得 Agent2 的供电信息后, 对 Agent2 的供电方案进行评价与修正。然后, Agent1 与 Agent2 签订由其供电 $18.5+j2.858746$ 的合同, 并通知 Agent2。

Step 5: Agent2 接到通知, 并签订供电合同后, 发出发电指令。供电后监测点的电压变为 400.000012 V, 在电压波动允许的范围内。

Step 6: Agent1 与 Agent2 比较供电量, 供电量大的变为主 Agent, 并由其监测电压的变化。如果监测点的电压超出允许的范围, 则转向 Step1; 否则, 继续监测。

在此例中, 多 Agent 协调优化所需的时间(33 ms, 忽略网络传输所需的时间)比 UMP30 优化时间(21.6 ms)长, 这是因为发电系统规模小。在较大规模

的发电系统中,多 Agent 协调优化效率会高于 UMPSO。

4 风-光互补发电系统的电压控制

对图 3 所示的风-光互补发电系统,建立的自动机模型^[9]如图 5 所示。图中 V_i 表示当前电压值, t_{start} 、 t_{end} 分别表示进入当前状态的时刻和当前时刻; s_i 表示状态; s_{ij} 表示当条件成熟时, Agent 从状态 i 向 j 的转移; x 和 Δt 为状态存在的条件; R_{in} 为其它 Agent 的合作请求。每一个 Agent 的知识库中都有一个这样的自动机模型,根据该模型,多个 Agent 可以合作实现发电系统的电压自动控制。

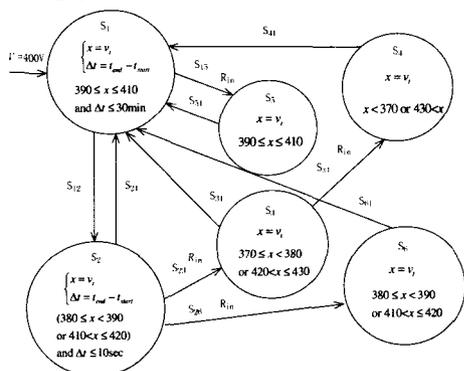


图 5 电压控制子系统的自动机模型

Fig.5 Automation of voltage control sub-system

S₁: 这种状态是由幅度较小、周期较短的负荷引起的,此时系统电压偏移量小,没有超出电压的控制区域,系统不采取动作,直到等待 30 min 后,才进行系统的无功优化,以使有功损耗最少。该状态下的目标是维持该状态,但时间不能超过 30 min。如果此种状态维持时间较长,超过 30 min 或电压超出了该状态下所允许的范围,则状态会发生转移,转向 S₅ 或 S₂。

S₂: 在状态 S₁ 下,当电压 x 在 [380 V, 390 V], 或者在 (410V, 420V), 则状态 S₁ 转换为 S₂。该状态下的目标是维持该状态,但时间不能超过 10 s。

S₃: 在状态 S₂ 下,当电压 x 在 [370 V, 380 V] 或者 (420 V, 430 V] 内,则状态 S₂ 转换为 S₃。当收到其它 Agent 的合作消息 R_{in} 时,也会处于该状态。该状态下主 Agent 采用其粒子群优化算法,对其所管辖的发电装置的无功出力进行优化,使得系统电压调节到状态 S₁ 的电压范围内;如果该主 Agent 不能将电压调节到状态 S₁ 的电压范围内,则它采用合同网协议向其它 Agent 招标,把电压调节到状态 S₁ 的电压范围内。如果是从 Agent, 则当收到信息 R_{in} 时,对其所管理的发电装置进行无功优化,并向主

Agent 投标,共同把电压调整到 S₁ 状态下的电压范围内。

S₄: 在状态 S₃ 下,发电系统的电压仍持续改变,而发电装置不能及时调整无功出力,导致发电系统的电压 $x < 370$ V, 或者 $x > 430$ V, 则状态 S₃ 转换为 S₄。该状态下的目标是:若电压 $x < 370$ V, 则主 Agent 等待管理负荷的 Agent 切除负荷,以把电压调节到状态 S₁ 的电压范围内。若等待一定时间没有发现管理负荷的 Agent 切除负荷,则由主 Agent 切掉相应数量的负荷,以把电压提高到状态 S₁ 的电压范围内;如果电压 $x > 430$ V, 则主 Agent 调整其所管辖的发电装置的无功出力,或者与其它 Agent 一起把电压调节到 S₁ 状态下的电压范围内。如果是管理负荷的 Agent, 则当电压 $x < 370$ V, 它利用自身的负荷调整算法计算应该切除的负荷量,并切除相应数量的负荷,把电压调整到 S₁ 状态下的电压范围内。

S₅: 在状态 S₁ 下,当电压 x 在 [390 V, 410 V] 内,且此状态维持时间 $\Delta t > 30$ min, 或者接收到其它 Agent 的合作信息 R_{in} , 则状态 S₁ 转换为 S₅。该状态下的目标是各个 Agent 采用其粒子群优化算法,对其所管辖的发电装置的无功出力进行协调优化,使得系统能够经济地运行,并且把状态调节到 S₁。

S₆: 在状态 S₂ 下,当电压 x 在 [380 V, 390 V], 或者在 (410 V, 420 V), 且此状态维持时间 $\Delta t > 10$ s, 则状态 S₂ 转换为 S₆。当收到其它 Agent 的消息 R_{in} 时,也会处于该状态。该状态下的目标是主 Agent 采用其粒子群优化算法,对其所管辖的发电装置的无功出力进行优化,把系统电压调节到状态 S₁ 的电压范围内;如果主 Agent 不能将电压调节到状态 S₁ 的电压范围内,则其向其它 Agent 招标,共同把电压调整到状态 S₁ 的电压范围内。如果是其它 Agent, 则当收到信息 R_{in} 时,它对其所管理的发电装置进行优化,并向主 Agent 投标,共同把电压调整到 S₁ 状态下的电压范围内。

图 5 中各种状态的电压波动范围和 Δt 因客户对电能质量的要求和风-光发电系统特点的不同而不同,要视情况而定。

按照电压控制的自动机模型进行电压控制,风-光互补发电系统能够保证其电压的安全和稳定,同时又能降低有功损耗,减少发电成本。图 6 是发电场某天 24 小时 75 kW 风机实际有功出力和最大无功出力,图 7 是 45 kW 风机实际有功出力和最大无功出力,图 8 是光伏发电阵列实际有功出力和最大无功出力,图 9 是负荷所需的无功情况。按照图 5 所示的电压控制的自动机模型对风-光互补发电系统的电压进行控制,结果如图 10 所示。

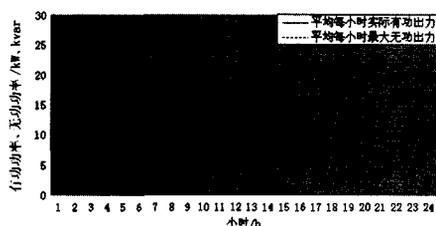


图 6 75 kW 风机平均每小时实际有功出力
和平均每小时最大无功出力

Fig.6 Average hourly active power output and maximal reactive power output of 75kW wind turbine

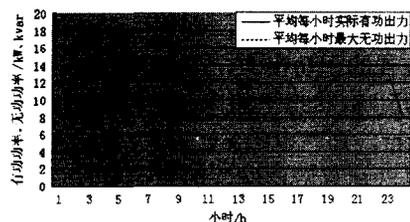


图 7 45 kW 风机平均每小时实际有功出力和
平均每小时最大无功出力

Fig.7 Average hourly active power output and maximal reactive power output of 45kW wind turbine

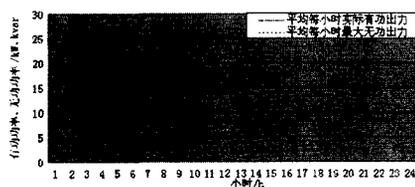


图 8 30 kW 光伏阵列平均每小时实际有功出力和
平均每小时最大无功出力

Fig.8 Average hourly active power output and maximal reactive power output of 30kW photovoltaic array

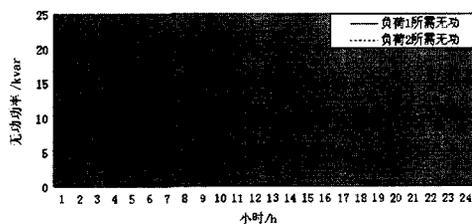


图 9 负荷需要的无功功率

Fig.9 Reactive power load needs

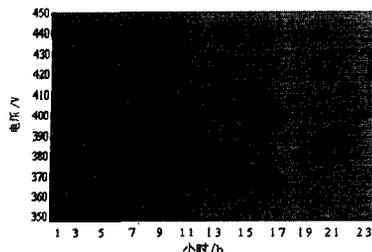


图 10 电压控制结果

Fig.10 Result of voltage control

从图 10 看出, 该自动机模型能够有效地控制发电系统的电压变化。在运行中, 发电系统出现过几次过负荷的情况, 都被控制系统及时切负荷处理, 电压得到控制。

4 结论

电压控制效果如何, 是风-光互补发电系统进一步发展所要解决的重要问题之一。根据风-光互补发电系统的特点, 建立基于多 Agent 技术的控制系统, 它将电压无功优化模型、用于模型求解的改进粒子群算法和电压自动控制模型作为每一个 Agent 的知识, 实现发电系统的电压自动控制。仿真实验表明, 基于多 Agent 技术的控制系统不仅能够有效控制发电系统的电压稳定与安全, 而且能够优化无功发电装置的无功出力, 减少有功损耗, 实现经济运行。

参考文献

- [1] 姚莉, 张维明. 智能协作信息技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 郭红霞. MAS 及其在电力系统中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [3] 张文波, 赵海, 苏威积, 等. 基于合同网模型的多代理协作研究[J]. 电子学报, 2006, 34(5):837-844. ZHANG Wen-bo, ZHAO Hai, SU Wei-ji, et al. Research on Cooperation of Multiple Agent Based on Contract-net Model[J]. Acta Electronica Sinica, 2006,34(5):837-844.
- [4] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Stability[A]. In:IEEE International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems[C]. Rio de Janeiro: 1999.1-6.
- [5] 杜欢, 赵波. 邻域拓扑粒子群优化算法在电力系统无功优化应用[J]. 继电器, 2006,34(14):20-31. DU Huan, ZHAO Bo. Application of Neighborhood Topology Based PSO to Reactive Power Optimization[J]. Relay, 2006, 34(14):20-31.
- [6] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 方开泰. 均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(3):69-80. FANG Kai-tai. History Review of the Theory, Methods, and Applications of Uniform Experimental Design[J]. Application of Statistics and Management, 2004, 23(3):69-80.
- [8] FANG Kai-tai. Uniform Design Based on CD2 Discrepancy— $U_n(q^k)$ [EB/OL]. <http://www.math.hkbu.edu.hk/~ktfang/>, 2004.
- [9] Koutsoukos X D, Antsaklis P J. Hierarchical Design of Piecewise Linear Hybrid Dynamical Systems Using a Control Regulator Approach[M]. IEEE Press, 2004.

收稿日期: 2008-07-15; 修回日期: 2008-07-29

作者简介:

张伯泉(1974-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向: 智能控制及信息处理、新能源发电及其控制。E-mail:zbq-01@163.com