

基于招投标策略的地区电网无功优化控制

陈星莺^{1,2}, 史豪杰¹, 刘 健³, 余 昆^{1,2}, 廖迎晨^{1,2}

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省配用电与能效工程技术研究中心, 江苏 南京 211100;
3. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 专家系统次优控制是实现地区电网在线无功优化控制的后备保障。针对传统产生式规则编制的无功优化专家系统软件逻辑复杂的问题, 提出基于招投标策略的无功优化控制决策模型, 依据综合评标法建立电压无功优化评价模型; 利用多智能体系统(MAS)并行、协调求解问题的特点, 建立地区电网无功优化控制系统架构, 通过多智能体间协调控制实现招投标策略, 确保地区电网在线无功优化控制系统的鲁棒性、可维护性和扩展性。实际应用验证了该系统的有效性。

关键词: 地区电网; 多智能体; 招投标策略; 无功优化控制; 专家系统; 模型; 控制

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.001

0 引言

电力系统无功优化控制关系到用户无功需求、供电质量和系统电压稳定是否得到保障, 也是降低网损、提高系统运行经济性的有效措施^[1]。

地区电网在线无功优化控制通过实时调节变压器有载分接开关和无功补偿装置的状态来优化电网潮流分布, 达到母线电压和枢纽节点功率因数合格等目的, 是一个具有等式和不等式约束的非线性混合整数规划问题。求解该问题时要求优化算法能满足如下条件: ①计算收敛并实时给出控制方案; ②可靠处理地区电网无功优化中大量的离散控制变量; ③支持用户对优化目标、约束条件、设备状态等进行调整。

目前, 已有线性规划法、非线性规划法、遗传算法等被应用于解决该问题^[2-8]。但这些方法不能很好地满足上述几个条件, 比如, 以遗传算法为代表的智能算法在迭代过程中需要大量的潮流计算, 时间上难以满足实时控制的要求。考虑到地区电网是环网设计、开环运行, 通过调度员的经验, 可以获得一些无功优化控制的规则, 形成专家系统次优控制策略集。该方法作为常规无功优化方法的后备保障, 确保了在线无功优化控制系统的鲁棒性。

早期的无功优化控制专家系统为九区图及其改进方法^[9-12], 九区图方法简单易行, 可以在一定程

度上提高单座变电站的电压合格率和功率因数, 但很难从全网角度实现无功电压优化控制。地区电网具有多级有载调压, 通常会出现电压频繁调整, 造成电压调节不合理和设备调节振荡现象。调度自动化系统的完善促进了地区电网无功优化向全网在线无功优化控制发展。基于全网的无功优化控制专家系统须考虑全网的控制目标、不同电压等级母线电压约束、设备动作次数约束等, 这些规则与具体电网相关, 很难通过 IF...THEN...产生式规则形成统一的专家库, 降低了系统的可维护性和鲁棒性, 尤其是随着电网规模增大, 问题越发突出。

本文将招投标策略应用到地区电网无功优化问题中, 同时利用多智能体系统(MAS)并行、协调求解问题的特点, 建立基于招投标策略的无功优化控制决策模型和基于多智能体(Agent)技术的无功优化控制系统架构, 以避免传统无功优化专家系统软件复杂的逻辑, 增强系统的可维护性和可扩展性。

1 招投标策略与地区电网无功优化

招投标是在市场经济条件下, 进行大宗货物的买卖、工程建设项目的发包与承包以及服务项目的采购与提供时, 所采取的一种交易方式。招投标策略是为实现目标进行的招投标系列方案集合, 主要包括投标方案、评标方法和中标方式等。对于大型项目可以拆分成多个标包, 采用分标包竞标的方式进行。一个单位可给多个标包投标, 也可以同时中多个标, 每个标包的中标单位共同负责该项目。

典型的地区电网以 220 kV 变电站为中心成辐射状供电, 其无功优化控制须考虑实际操作约束, 在非组合优化情况下, 控制周期内同一变电站只允许一台设备动作。通过比较可知, 搜寻合适的操作设备过程类似于招投标, 动作设备即为中标对象,

收稿日期: 2014-12-07; 修回日期: 2015-04-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-050214); 国家自然科学基金资助项目(51077043); 国家电网公司重大科技项目(智能配电网自愈控制技术与开发)

Project supported by the National High Technology Research and Development of China(863 Program)(2012AA050214), the National Natural Science Foundation of China(51077043) and State Grid Corporation of China(the Research and Development for Self-healing Control Technology in Smart Distribution Grid)

无功优化的目标和约束条件可视为招标中的多个评标依据。因此,本文提出依据招投标策略进行地区电网的无功优化决策,各变电站根据控制需要发出招标需求,一旦在网内出现招标需求,各变电站将依据招标需求制定投标书供评标使用。

变电站的投标书制作内容主要是确定投标设备,投标书的结构和制作流程如图 1 所示。

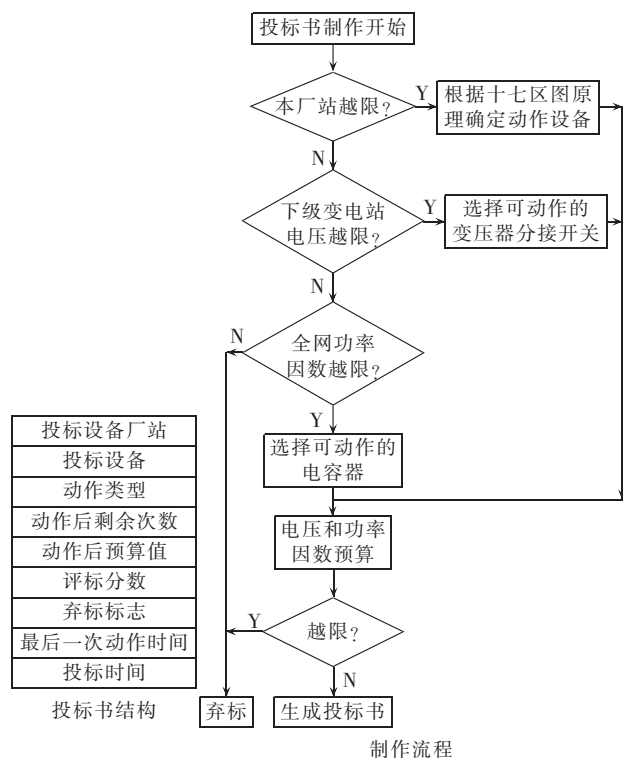


图 1 投标书的结构和制作流程

Fig.1 Bidding document structure and its design flowchart

图 1 所示的投标书制作过程主要针对单一厂站越限的情况,如果所有标书都被废弃,即无法通过单一设备消除越限,则通过联合越限厂站的上下级厂站制作组合投标书。当某一时刻存在多个厂站发生越限时,则将每个厂站的越限事件视为一个标包,多个标包同时独立招标,然后在评标时协调选择每个标包的中标单位共同参与全网优化,最终确定动作设备。

2 基于招投标策略的无功优化控制决策模型

2.1 招标评价模型

目前主要的评标方法有综合评标法、评标价法^[13-14]。综合评标法把各因素(商务评分、技术评分等)乘以相应的权重系数,折合成总评分,以总评分最高者为中标单位。本文的招标评价模型是依据综合评标法演化而来,对每个参与投标的方案按照 n 个指标依次进行评分,根据最后打分的结果进行排序,得分最高的方案中标。招标评价模型如下:

$$\begin{cases} S_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i F_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $F_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为各评价指标的评分函数, $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为 m 个标书中对应同一评价指标的指标值(如有功损耗), m 为标书个数(投标方案); n 为评价指标个数; λ_i 为各评标依据的权重系数; S_k 为投标书 k 的最终得分。系统可以根据需要采用不同的评标依据和权重系数,评出的标优化的结果也不相同。

2.2 基于招标评价方式的地区电网无功优化模型

地区电网无功优化的目标和约束很多,综合考虑系统的安全、经济运行,本文将有功损耗、设备动作代价、当日设备剩余动作次数、反时限动作时间、母线电压和关口功率因数作为评价指标。

2.2.1 有功损耗评价指标

根据每个投标方案设备动作后的情况进行潮流计算,计算该方案的有功网损:

$$\begin{cases} P_k = \sum_{i=1}^{N_{\text{node}}} \sum_{j \in j} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \\ F_{lk} = \frac{\min(P_1, \dots, P_m)}{P_k} \end{cases} \quad (2)$$

其中, F_{lk} 为方案 k 的有功损耗评分值; N_{node} 为系统节点数目; $i \in j$ 表示节点 j 与 i 之间有线路相连; G_{ij} 为节点 j, i 之间的电导; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压; θ_{ij} 为节点 i, j 之间的电压相角差; P_k 为投标书 k 中设备动作后的有功损耗。由式(2)可知, $F_{lk} \in (0, 1]$, 有功损耗越小的方案其 F_{lk} 的值就越大。

2.2.2 设备动作代价评价指标^[15-16]

在实时无功优化调度中,有载调压分接开关和电容器开关频繁动作将会缩短设备使用寿命,据此建立设备动作代价指标:

$$\begin{cases} C_k = \sum_{i=1}^{N_T} C_{Ti} \Delta X_{Ti} + \sum_{i=1}^{N_C} C_{Ci} \Delta X_{Ci} \\ F_{2k} = \frac{\min(C_1, \dots, C_m)}{C_k} \end{cases} \quad (3)$$

其中, F_{2k} 为方案 k 的设备动作代价评分值; $\Delta X_{Ti}, C_{Ti}$ 分别为变压器抽头调节次数和调节成本; $\Delta X_{Ci}, C_{Ci}$ 分别为电容器动作次数和调节成本; N_T, N_C 分别为变压器和电容器台数。由式(3)可知, $F_{2k} \in (0, 1]$, 动作次数越少、调节代价越小的设备其 F_{2k} 越大。

2.2.3 日设备剩余动作次数评价指标

日设备剩余动作次数是每台设备的日动作次数上限与当前已动作次数之差。每个投标方案中需要控制的设备剩余动作次数记为 A_k , 则将日设备剩余动作次数评价指标的评分归一化之后得:

$$F_{3k} = \frac{A_k}{\max(A_1, \dots, A_m)} \quad (4)$$

其中, F_{3k} 为方案 k 的日设备剩余动作次数评分值。由式(4)可知, $F_{3k} \in (0, 1]$, 日设备剩余动作次数越多的设备, 其 F_{3k} 的取值越大。

2.2.4 反时限动作时间评价指标

为了防止某些设备频繁动作, 采用反时限的原理, 在同等条件下, 距离上次动作时间最长的设备优先动作。设投标时间 T_c 和设备上次动作时刻 T_l 的差值为 $T_k = T_c - T_l$, 由此可得:

$$F_{4k} = \frac{T_k}{\max(T_1, \dots, T_m)} \quad (5)$$

其中, F_{4k} 为方案 k 的反时限动作时间评分值。由式(5)可知, $F_{4k} \in (0, 1]$, 投标时间和上次动作时刻相差的时间越长, 对应的 F_{4k} 取值越大。

2.2.5 母线电压和关口功率因数考核指标

母线电压和功率因数是描述电网运行状态的重要指标, 本文采用功率因数转化得来的关口无功大小表示功率因数的情况, 母线电压和功率因数转化形成的无功评价指标如式(6)所示。

$$\begin{cases} U_k = \sum_{i=1}^N (U_i - U_{\text{lim}})^2 \\ Q_k = \sum_{i=1}^{N_B} (Q_i - Q_{\text{lim}})^2 \\ F_{5k} = \frac{\min(U_1, \dots, U_m)}{2U_k} + \frac{\min(Q_1, \dots, Q_m)}{2Q_k} \end{cases} \quad (6)$$

$$U_{\text{lim}} = \begin{cases} U_{\text{imax}} & U_i > U_{\text{imax}} \\ U_i & U_{\text{imin}} \leq U_i \leq U_{\text{imax}} \\ U_{\text{imin}} & U_i < U_{\text{imin}} \end{cases}$$

$$Q_{\text{lim}} = \begin{cases} Q_{\text{imax}} & Q_i > Q_{\text{imax}} \\ Q_i & Q_{\text{imin}} \leq Q_i \leq Q_{\text{imax}} \\ Q_{\text{imin}} & Q_i < Q_{\text{imin}} \end{cases}$$

其中, F_{5k} 为母线电压和关口功率因数指标; U_k, Q_k 分别为电压和无功指标; N, N_B 分别为母线电压考核条数和关口功率因数考核数; $U_i, U_{\text{imax}}, U_{\text{imin}}$ 分别为母线电压、母线电压上限值和下限值; U_{lim} 为母线电压指标限值; $Q_i, Q_{\text{imax}}, Q_{\text{imin}}$ 分别为关口无功功率、无功上限值和无功下限值; Q_{lim} 为关口无功功率指标限值。由式(6)可知, U_k, Q_k 越小则 F_{5k} 的值越大。

在设定评分依据及其计算模型后, 根据各评分依据之间的重要程度, 确定各自的权值, 并计算每个投标书的评分, 将其按从高到低排序, 供评标使用。投标书 k 的评分公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^5 \lambda_i F_{ik} \quad (7)$$

得分最高的投标书即为最后的中标单位, 记为 S_H :

$$S_H = \max(S_1, \dots, S_m) \quad (8)$$

针对出现有 l 处越限的全网优化, 其评标模型如下:

$$\begin{bmatrix} S_{H1} \\ S_{H2} \\ \vdots \\ S_{Hl} \end{bmatrix} = \max \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{l1} & S_{l2} & \dots & S_{lm} \end{bmatrix}$$

其中, S_{Hi} 为标包 i 的最高得分; S_{li} 为标包 l 的第 i 个投标单位的得分。

基于上述评标模型, 评标工作可以尽量做到选择较少的设备, 满足较多的调控目标, 并降低网损, 同时可以避免因优化造成单台设备频繁动作。

3 基于多智能体技术的无功优化控制系统架构

3.1 多智能体技术

智能体技术源于分布式人工智能(DAI), 是近年来计算机科学领域中的一个重要概念^[17-19]。多智能体系统是一个松散耦合的代理网络, 这些智能体通过交互协调, 解决超出单个智能体能力或知识的问题。

多智能体系统由大量自治的软件或硬件实体组成, 单个智能体完全有能力解决局部问题, 但不能独自实现全局目标。每个智能体有自己的输入输出数据接口, 因而整个系统的数据很分散。多智能体系统中存在一组协调智能体, 负责解决智能体间的决策冲突^[20-22]。

利用智能体智能化的工作机制和强大的开发应用功能, 将无功优化专家系统次优控制规则转化为软件组件的进程和经验, 并将分层协调机制作为一种环境来协调电力系统各智能体之间的控制, 构建一套新的框图模式, 为电网无功优化控制提供新的解决方案。

3.2 基于多智能体技术的无功优化控制系统架构

本文依据多智能体技术建立地区电网无功优化控制系统架构, 主要设置如图2所示的智能体。

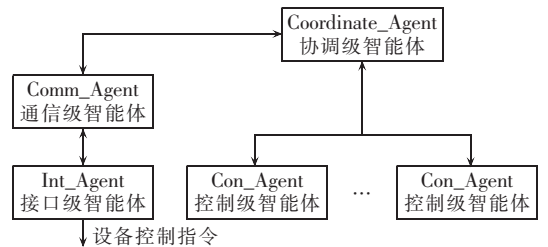


图2 地区电网无功优化控制的多智能体系统架构

Fig.2 Framework of multi-Agent system for optimal reactive power control of district power grid

3.2.1 控制级智能体

控制级智能体(Con_Agent)设置为无功优化控制系统中的基本优化单元, 包含变电站设备信息、预算模块、设备闭锁信息、动作次数记录、考核界限

等。本文将变电站定义为控制级智能体,作为投标单位,各控制级智能体可根据招标需求并行制作投标书。

3.2.2 协调级智能体

一套无功优化控制系统只设置一个协调级智能体(Coordinate_Agent)。协调级智能体是全网无功优化中枢,负责受理招标请求、制作标书、评标、广播标书、发放中标通知等。

3.2.3 通信级智能体

通信级智能体(Comm_Agent)负责智能体之间的数据通信、信息通信,转发的数据包包含实时的遥测/遥信数据、命令数据、协调请求等。线程间的智能体采用消息通信,进程间的智能体采用TCP/IP协议通信。

3.2.4 接口级智能体

接口级智能体(Int_Agent)包含与 SCADA/EMS 相连的数据接口。

3.3 基于招投标策略的智能体协调控制

基于招投标策略的智能体协调控制策略流程框图如图 3 所示,具体控制流程如下。

a. 若无招标请求,协调级智能体定时广播全网优化的标书,各控制级智能体按照逆调压原则优化所管辖厂站的无功潮流分布,达到局部优化。

b. 当某个控制级智能体检测到该变电站范围内某个节点电压或功率因数越限时,主动向协调级智能体发出招标请求,并报告越限情况。协调级智能体收到招标请求后,制作标书,并向系统内所有控制级智能体广播标书。招标书根据控制目标的不同可分为不同标的,如母线电压越限、功率因数越限等。

c. 收到招标书的控制级智能体,将根据本厂站的情况立即生成投标书。投标书的内容包括即将要动作的设备、响应并解决的标的。如果找不到合适的设备动作,则发送弃标信息。

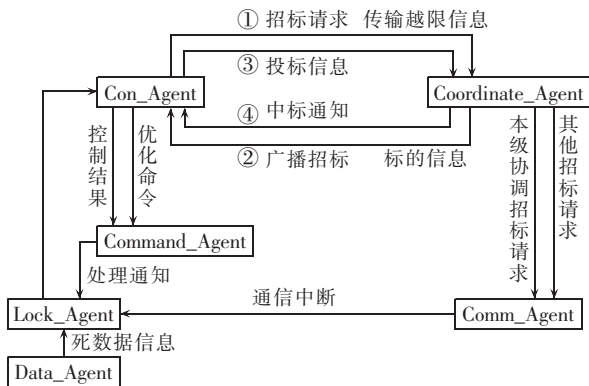


图 3 基于招投标策略的智能体协调控制策略图

Fig.3 Bidding-strategy-based coordinated control among Agents

d. 协调级智能体收到所有投标信息后,根据第2节的评标模型对每份投标书进行评标。协调级智能体评完标书后,向中标的控制级智能体发送中标通知。该控制级智能体收到中标通知后,即可发出设备操作命令。

4 算例分析

由于地区电网采用开环方式运行,不同 220 kV 变电站所供负荷之间相对独立,因此本文采用 220 kV 变电站所供电的区域进行仿真分析,如图 4 所示。分别采用十七区图原理、最优化方法以及本文方法对 24 个时段数据进行仿真分析,结果如表 1、2 所示。

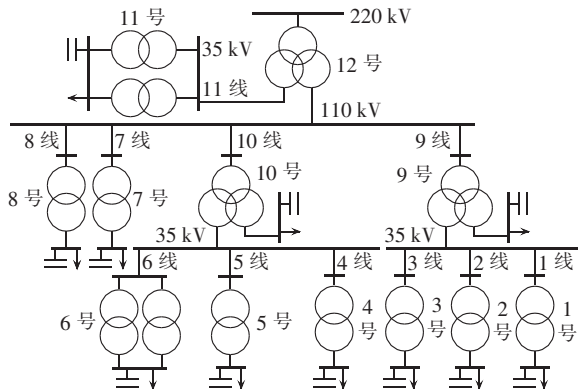


图 4 配电网接线图

Fig.4 Wiring diagram of distribution network

表 1 时段 11 不同控制方式下设备动作比较

Table 1 Comparison of device action among different control strategies for period 11

[illegible]

表 2 不同控制方式结果比较(24 h)

Table 2 Comparison of results among different control strategies(24 h)

控制方式	功率因数	网损率/%	动作次数	10 kV 侧平均 电压/kV
十七区图原理	0.9803	1.6842	28	10.2251
最优化方法	0.9840	1.6838	76	10.3148
本文方法	0.9815	1.6846	24	10.2822

表 1 是时段 11 的仿真结果,采用十七区图原理要求 1—3 号变电站均升高变压器分接头,原因是 3 座变电站的电压均偏低。采用本文方法则分别形成 3 个标包进行招标,在每个标包中,9 号变电站的母线电压和关口功率因数指标均较大,因为能消除更多的电压越限,所以在评标环节中标。最终结果是只需 9 号变电站设备动作,相比于十七区图原理,减少了总的设备动作次数。最优化方法的目标是网损和 10 kV 母线电压偏差最小,通过全网优化

虽然降低了网损、消除了电压越限,但是设备动作次数较多,大量计算造成较长时间才能获得优化结果,延长了越限存在时间。

表2是对24个连续时段进行仿真计算得出的综合指标。由表可知,3种控制方法的网损大小相近,但相比于十七区图原理,本文方法考虑了多座变电站之间的协调,设备动作次数减少,功率因数和电压得到改善。虽然采用最优化方法所得的低压侧平均电压比本文方法更好,但会大幅增加设备动作次数和计算时间,并且优化过程与具体的电网数据密切相关,不能保证所有情况都能快速有效地搜寻到最优策略。

另外,采用本文提供的方法设计的系统已经在南方电网进行应用,对应用系统3个月内的统计数据进行分析可知,10 kV和35 kV电压合格率提高了1.4%;电容器平均运行率为40.67%,提高了10%;110 kV主变有载分接开关调节次数有明显减少,这必将大幅改善电压质量,提升主变健康水平,降低系统网损。

5 结语

采用招投标策略实现地区电网电压无功优化控制是一种区别于基于优化算法的全局优化和基于十七区图原理的局部优化方法。该方法通过集中评价各变电站动作设备带来的影响以确定动作设备,快速实现多座变电站电压无功控制的协调,保证优化效果较好。利用多智能体实现招投标策略,能够避免采用优化算法可能出现的不收敛问题,以及优化时间过长带来的无策略状态,保证系统的鲁棒性;同时避免了专家系统中大量复杂的IF...THEN...规则,可通过改变评标依据的权重来改变无功优化中多目标之间的关系,增强了系统的可维护性和扩展性。

参考文献:

- [1] 杨素琴,陈星莺. 基于地区电网经济运行的无功综合效益优化[J]. 电力自动化设备,2002,22(4):29-32.
- [2] 任晓娟,邓佑满,赵长城,等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):31-36.
- [3] 罗毅,多靖赞. 基于量子免疫克隆算法的多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):31-35.
- [4] YANG Suqin, CHEN Xingying. A method for optimizing var synthetic benefits based on local power system economic operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 29-32.
- [5] REN Xiaojuan, DENG Youman, ZHAO Changcheng, et al. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36.

- [6] LUO Yi, DUO Jingyun. Multi-objective reactive power optimization based on quantum immune colonial algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 31-35.
- [7] 赵波,曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):1-6.
- [8] ZHAO Bo, CAO Yijia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 1-6.
- [9] 康积涛,钱清泉. 电力系统无功优化的二次变异遗传算法[J]. 电力自动化设备,2007,27(9):7-11.
- [10] KANG Jitao, QIAN Qingquan. Reactive power optimization using second mutation genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 7-11.
- [11] DEEB N, SHAHIDEPOUR S M. Linear reactive power optimization in a large power network using the decomposition approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 428-438.
- [12] TOMSOVIC K. A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 7(1): 287-293.
- [13] 李滨,韦化,李佩杰. 电力系统无功优化的内点非线性互补约束算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):53-58.
- [14] LI Bin, WEI Hua, LI Peijie. Interior-point nonlinear algorithm with complementarity constraints for reactive-power optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 53-58.
- [15] 陈树恒,李兴源,刘群英. 基于变电站逻辑自适应的主站电压/无功控制系统[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):57-60.
- [16] CHEN Shuheng, LI Xingyuan, LIU Qunying. Development of master station voltage/reactive power automatic control system based on adaptive substation logic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 57-60.
- [17] WU Q H, CAO Y J, WEN J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(8): 563-569.
- [18] 庄侃沁,李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(15):47-50.
- [19] ZHUANG Kanqin, LI Xingyuan. Strategies and implementation modes of voltage and reactive power control for substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.
- [20] 余涛,周斌. 电力系统电压/无功控制策略研究综述[J]. 继电器,2008,36(6):79-85.
- [21] YU Tao, ZHOU Bin. A survey on voltage/reactive power control strategy for power systems[J]. Relay, 2008, 36(6): 79-85.
- [22] 何小琴,宋伟,刘卫宁. 网上评标系统模型的研究与实现[J]. 计算机应用研究,2006,23(5):207-209.
- [23] HE Xiaoqin, SONG Wei, LIU Weining. Study on online bidding-apprise model and realization of system[J]. Application Research of Computers, 2006, 23(5): 207-209.
- [24] 陶庆,郑文堂. 工程项目评标系统数学建模[J]. 数理统计与管理,2002,21(6):37-41.
- [25] TAO Qing, ZHENG Wentang. Mathematical model's building for evaluation of tenders of project items [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21(6): 37-41.
- [26] 张勇军,任震. 电力系统动态无功优化调度的调节代价[J]. 电力系统自动化,2005,29(2):34-38.
- [27] ZHANG Yongjun, REN Zhen. Readjusting cost of dynamic optimal reactive power dispatch of power systems [J].

- Automation of Electric Power Systems,2005,29(2):34-38.
- [16] 倪炜,单渊达. 具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化,2000,24(21):40-44.
- NI Wei,SHAN Yuanda. A refined genetic algorithm with optimal searching path used in power system reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(21):40-44.
- [17] NAGATA T,SASAKI H. A multi-Agent approach to power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,17(2):457-462.
- [18] 石纯一,张伟. 基于 Agent 的计算[M]. 北京:清华大学出版社,2007:4-10.
- [19] 张明军,曹立霞,厉吉文. 考虑多分区无功电压优化的多 Agent 系统[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):70-74.
- ZHANG Mingjun,CAO Lixia,LI Jiwen. Multi-Agent system for voltage/var optimization considering multi-regional power systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(17):70-74.
- [20] 曹立霞,厉吉文,程新功,等. 基于多 Agent 技术的分布式电压无功优化控制系统[J]. 电网技术,2004,28(7):30-33.
- CAO Lixia,LI Jiwen,CHENG Xingong,et al. Distributed optimal voltage/reactive power control system based on multi-Agent system[J]. Power System Technology,2004,28(7):30-33.
- [21] 许少伦,严正,冯冬涵,等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):7-13.
- XU Shaolun,YAN Zheng,FENG Donghan,et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):7-13.
- [22] 赵文清,张胜龙,牛东晓. 多 Agent 在变压器故障诊断中的研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):23-27.
- ZHAO Wenqing,ZHANG Shenglong,NIU Dongxiao. Transformer fault diagnosis based on multi-Agent [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):23-27.

作者简介:



陈星莺

陈星莺(1964—),女,江苏无锡人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为配电网规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制、高效用电与节能、能源管理与能源经济(E-mail:xychen@hhu.edu.cn);

史豪杰(1989—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为配电网智能调度与控制;

刘健(1967—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为配电网及其自动化技术;

余昆(1978—),男,重庆人,副教授,博士,研究方向为配电网规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制;

廖迎晨(1975—),女,江苏盐城人,讲师,博士研究生,主要研究方向为智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制、能源管理与能源经济。

Optimal reactive power control based on bidding strategy in district power grid

CHEN Xingying^{1,2},SHI Haojie¹,LIU Jian³,YU Kun^{1,2},LIAO Yingchen^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. Jiangsu Engineering Research Center for Distribution & Utilization and Energy Efficiency,Nanjing 211100,China;

3. Shaanxi Electric Power Research Institute,Xi'an 710054,China)

Abstract: The suboptimal control by expert system is the backup protection of online optimal reactive power control in district power grid. Since the logic of expert system software designed according to the traditional production rules is complicated,a decision model of optimal reactive power control is established based on the bidding strategy and an evaluation model of voltage reactive power optimization is built based on the comprehensive bid evaluation method. A framework based on the multi-Agent system is established for the optimal reactive power control of district power grid,which realizes the bidding strategy by the parallel and coordinated control among multiple Agents to ensure its robustness,maintainability and expandability. The practical application verifies its effectiveness.

Key words: district power grid; multi-Agent; bidding strategy; optimal reactive power control; expert system; models; control