

# 基于数据挖掘技术的变电站无功蚁群优化算法

解大<sup>1</sup>, 龚锦霞<sup>1</sup>, 徐劲松<sup>1</sup>, 张延迟<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 华东理工大学自动控制系, 上海 200237)

**摘要:** 针对变电站在集中控制模式下的无功补偿与电压控制的问题, 充分利用变电站运行过程中的大量数据, 将数据挖掘技术应用于变电站电压无功自动调节系统, 提出了基于关联规则的系统蚁群无功优化方法。将改进 Apriori 算法应用于无功优化方案的确定, 并对蚁群优化算法进行改进, 建立了基于实际数据挖掘结果的无功全局优化总体数学模型。以上海 220 kV 万航变电站为例, 以其日常运行的历史数据为基础, 运用本文算法得到在各种典型工况下的最优方案, 以指导实际运行。实验结果表明, 基于数据挖掘的系统无功优化目标值方法可以提高系统运行效率, 降低损耗, 对系统电压稳定, 经济运行意义重大。

**关键词:** 无功优化; 蚁群算法; 数据挖掘

## A new Var optimal compensation strategy based on data mining and ant colony algorithm

XIE Da<sup>1</sup>, GONG Jin-xia<sup>1</sup>, XU Jin-song<sup>1</sup>, ZHANG Yan-chi<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Automatic Control Engineering Department, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** For the problem of the Var compensation and voltage control in center-substations, this paper induces a new algorithm to find the reactive optimization method of power system, using the data collected in power substations. The new algorithm is combined with improved Apriori data mining techniques and ant colony algorithm. The mathematic model of Var optimization of power system are described and applied to resolve the reactive optimal compensation problem of Wanhang substation in Shanghai. Test results show that the application of the new algorithm proposed in this paper for determining the plan of reactive optimization operation can raise the system operation efficiency and reduce the loss. And it is of great economical significance for the system voltage control.

**Key words:** reactive optimization; ant colony algorithm; data mining

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0019-08

## 0 引言

电力系统是一个非线性的互联大系统, 在运行过程中不断产生和积累大量的数据。在电力系统中, 如果能应用数据挖掘技术, 则可以更加充分地利用这些运行数据, 揭示电力系统历年积累的数据背后蕴含的原理、规则, 找到解决问题的更加合理的方法, 同时还可以提供更加有力的科学依据。当前, 已经有许多将数据挖掘技术应用于电力系统各个领域的成功例子。文献[1]论述了利用神经网络对某一特定地区电力负荷历史数据进行分析, 在此基础上得出对电力负荷走势的预测数据挖掘技术还可以用于对于电力系统突发事件的处理过程进行分析, 得出具有针对性的对策供专家参考。文献[2]就这一方面论述了数据挖掘技术在电力系统电压控制方面的作用。文献[3]论述了利用数据挖掘技术, 对电力市

场的报价——采购体系中各种影响开停机计划的因素的分析, 用回归算法、神经网络以及归纳算法等多种算法得出对于各机组的开停机计划表。

人工蚁群算法是受到人们对自然界中真实的蚂蚁集体行为的研究成果的启发而提出的一种基于种群的模拟进化算法, 属于随机搜索算法<sup>[4]</sup>。该模型已成功应用于求旅行商问题(TSP), 二次指派问题, 排序问题等 NP-困难的组合最优化问题, 结果可与模拟退火、遗传算法等通用的启发式算法相媲美<sup>[5]</sup>。

目前, 变电站电压无功控制装置都是考虑就地补偿方式下, 对变电站或变电站内的一台主变进行调节, 即就地控制运行模式<sup>[6]</sup>。这种方式只能做到本站电压、无功优化控制, 缺乏与整个系统电压、无功控制的协调, 主要是适应当前电网在线电压、无功优化计算和控制系统仍未健全条件下实现电压无功自动控制的要求。而在集中控制模式下, 针对

某一个特定系统,以最小网络损耗等为优化控制目标,在满足有关约束条件下,由中心计算机根据优化计算结果,实时给出各接点电压及允许从系统吸收的无功功率量,各节点据此进行电压、无功设备的调节<sup>[6,7]</sup>。该方式主要为实现区域电网电压、无功综合优化控制作准备。

上海电网在“十五”期间大力实施220 kV变电站“集控—受控”的运行管理模式,不断提高220 kV变电站的自动化水平。不仅新建的220 kV变电站全部配置变电站自动化系统,上海电网还对一些采用常规控制的老站进行了自动化改造,配置变电站自动化系统,并纳入“集控—受控”的管理模式。对电网调度自动化提出更高要求,不仅要实现对电网安全运行状态进行监控、安全分析和事故处理,而且要实现经济调度,在电网安全运行基础上,达到降低损耗、节约能源,多发电、多供电的目的。如何适应电网商业运营,降低生产成本,提高经济效益和社会效益,是目前面临的主要问题。因此,迫切需要进行进一步提高上海电网经济运行水平,进行自动电压无功控制研究,加快高级应用软件的开发和应用,提高变电站端自动化设备水平,为实现电网控制创造可靠技术基础。

电力系统数据多,如何提取有用的数据,进行有效的无功优化决策是一个十分有意义的问题。本文介绍了关联规则算法——Apriori算法的概念和步骤及蚁群算法的原理和模型,并进行适当改进,将数据挖掘技术应用于变电站电压无功自动调节系统,充分利用变电站运行过程中的大量数据,将改进Apriori算法应用于无功优化方案的确定,建立总体模型,提出了基于数据挖掘的系统蚁群无功优化方法。以上海220 kV万航变电站为例,以其日常运行的历史数据为基础,运用这一方法得到在各种典型工况下的最优方案,以指导实际运行。

## 1 在中心变电站应用数据挖掘的模型

### 1.1 总体模型

针对上海集中控制的模式,控制策略采用中心站集中控制,无功优先的调节方式,即优先投入电容器进行无功补偿。立足于无功的优化组合,达到无功补偿方式最优。在数据挖掘时,如果有调节分接头的情况,由于调节分接头导致潮流会重新分配,本文直接选取调节分接头后的数据进行挖掘,在本文后期优化处理中也考虑到分接头在调节中的影响,并有相应的模型说明。

应用关联规则对中心变电站的数据进行挖掘,进行无功补偿优化,其过程可以描述为:先根据历

史数据库建立中心变电站及其各个下属变电站之间的正常关联模式,然后根据这个正常关联模式之间的关系同测量数据进行比较,按照评估函数,即优化的目标,确定当前情况下的最优方案。模型如图1所示。

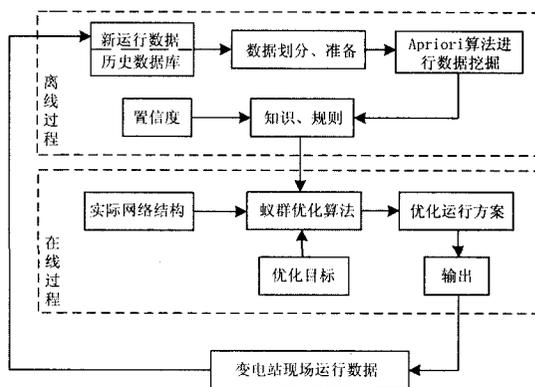


图1 算法总体框架图

Fig.1 The structure of the proposed algorithm

基于数据挖掘的系统运行无功优化方法确定系统结构分为离线和在线两部分。以变电站历史数据库中的运行数据为基础,经数据挖掘从历史数据中得到覆盖对象运行区域的若干模型,分析建立运行模型库,并形成一套日常无功流动及补偿规则。根据采集到的现场实时数据和优化目标,利用离线挖掘出的知识和规则确定当前工况下的优化运行方案。优化过程的输出与现有控制系统交互。

其中,离线处理过程的输入为数据库数据;输出为关联规则及其置信度。Apriori算法数据挖掘是离线处理过程的核心。在各个相应区内发现所有的频繁项集,根据定义,这些项集的频度至少应等于预先设置的最小支持频度。根据所得的频繁项集,产生相应的强关联规则。在线过程根据规则结果,使用改进蚁群算法搜索最优方案。

### 1.2 目标函数的构造

系统中 $i, j$ 两点间的网损表示为:

$$f_i = \alpha_i \left( \frac{P_{ij}}{U} \right)^2 l_i \quad (1)$$

式中: $P_{ij}$ 表示 $i, j$ 之间线路的通过功率, $l_i$ 为线路的长度, $\alpha_i$ 为相关综合系数。

总的线路网损为:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

系统中某一节点 $j$ 的节点电压偏离规定值偏差

为:

$$f_{2j} = \frac{|U_j - U_j^{sp}|}{\Delta U_j^{sp}} \quad (3)$$

总的电压偏差为:

$$F_2 = \sum_{j=1}^n \frac{|U_j - U_j^{sp}|}{\Delta U_j^{sp}} \quad (4)$$

式中:  $n$  为除平衡节点外节点总数;  $U_j^{sp}$  为节点给定电压值;  $\Delta U_j^{sp}$  为节点电压给定最大偏移值。

在变电站供电范围已知的前提下, 无功优化问题的数学模型可以表示为:

$$\min C = \sum_{k \in N_k} (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_1, \alpha_2$  为常数, 可自行选择, 决定权重;  $N_k$  为所有可投入的电容器组的编号的集合。

其中:  $f_1, f_2$  均为  $E$  的函数;  $E = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$  为网络中所有电容器的状态:

$$e_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad 1 \text{ 表示电容器 } i \text{ 投入, } 0 \text{ 表示电容器}$$

$i$  退出。

针对本文模型, 可以考虑如下的约束条件<sup>[8,9]</sup>:

(1) 等式约束, 即功率平衡约束

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_i - U_i \sum_{j=1}^{i=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^{i=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_i, Q_i$  分别表示节点  $i$  注入的有功、无功功率;  $U_i, U_j$  为节点电压,  $G_{ij}, B_{ij}$  为  $i, j$  之间线路的电导和电纳,  $\delta_{ij}$  为  $i, j$  节点之间的电角度之差。

(2) 节点电压约束

$$Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max}, \quad U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max},$$

$$\delta_{ij \min} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij \max}, \quad T_{i \min} \leq T_i \leq T_{i \max}$$

$$C_{i \min} \leq C_i \leq C_{i \max} \quad (7)$$

式中:  $P_i, Q_i$  分别表示节点  $i$  注入的有功、无功功率;  $Q_{Ci \min}, Q_{Ci \max}$  分别表示第  $i$  无功补偿器无功补偿容量的下限、上限;  $U_{i \min}, U_{i \max}$  分别表示节点  $i$  电压幅值上下限,  $T_{i \min}, T_{i \max}$  表示第  $i$  可调变压器分接头调节范围;  $i=1, 2, \dots, n, C_i$  为第  $i$  台电容器单位时间内的投切次数,  $C_{\min}, C_{\max}$  为其限值。

由于电容器在单位时间内的投切次数有限制, 本文采取的投切策略为: 某时刻某负荷作用下, 系

统中当有违反电压约束的节点时, 搜索出的电容器最优投运计划允许执行; 如允许执行能使系统网损下降超过 10% (该值可根据不同系统选取不同的值) 的电容器投运计划。单位时间内, 第  $i$  台电容器的累计投切次数达到  $C_{\max}$ , 则在剩余的单位时间内禁止投切该台电容器。

## 2 离线数据挖掘模型

### 2.1 关联规则基本概念

关联规则是形如  $A \Rightarrow B$  的蕴涵式, 其中  $A \subset I, B \subset I$ , 并且  $A \cap B = \emptyset$ 。规则  $A \Rightarrow B$  在事务集  $D$  中出现, 具有支持度  $s$ , 其中  $s$  是  $D$  中事务包含  $A \cup B$  (即  $A$  和  $B$  二者) 的百分比。它是概率  $P(A \cup B)$ 。规则  $A \Rightarrow B$  在事务集  $D$  中具有置信度  $c$ , 如果  $D$  中包含  $A$  事务的同时也包含  $B$  的百分比是  $c$ , 那么它是条件概率  $P(B|A)$ 。即支持度为:

$$\text{support}(A \Rightarrow B) = P(A \cup B)$$

置信度为:

$$\text{confidence}(A \Rightarrow B) = P(B|A) = \frac{\text{sup port\_count}(A \cup B)}{\text{sup port\_count}(A)} \quad (8)$$

其中:  $\text{sup port\_count}(A \cup B)$  为包含项集  $A \cup B$  的记录数目;  $\text{sup port\_count}(A)$  为包含项集  $A$  的交易记录数目<sup>[10]</sup>。

支持度和置信度是描述关联规则的两个重要概念, 前者用于衡量关联规则在整个数据集中的统计重要性, 后者用于衡量关联规则的可信程度。一般来说, 只有支持度和置信度均较高的关联规则才可能是用户感兴趣的、有用的关联规则。

一般来说挖掘关联规则的问题可以分为两个阶段: (1) 发掘大项集, 也就是事务支持度大于预先给定的最小阈值的项的集合; (2) 使用大项集来产生数据库中置信度大于预先给定的最小阈值的关联规则<sup>[11]</sup>。

### 2.2 Apriori 算法

Agrawal 等于 1994 年提出了一个挖掘顾客交易数据库中项集间的关联规则的重要方法, 其核心是基于两阶段频集思想的递推算法<sup>[12]</sup>。

1) 用频繁的  $(k-1)$ -项集生成候选的频繁  $k$ -项集;

2) 用数据库扫描和模式匹配计算候选集的支持度;

Apriori 的基本思想为首先找出所有的频集, 这些项集出现的频繁性至少和预定义的最小支持度一样。然后由频集产生强关联规则, 这些规则必须满足最小支持度和最小可信度。挖掘关联规则的总体

性能由第一步决定，第二步相对容易实现。

### 2.3 Apriori 算法的改进

从以上的分析可知：可能产生大量的候选集，以及可能需要重复扫描数据库，是 Apriori 算法的两大缺点。

本文对 Apriori 算法进行改进，避免了该算法本身的缺点，将其应用到变电站数据的挖掘过程中：

(1) 基于划分的思想，对中心站的数据进行预处理。对中心站的数据进行分区挖掘，类似于九区图，只对无功不足或过剩和电压越限的部分进行分区整理。经过划分后，可在相应的区域挖掘相应的规则，每次扫描库不用扫描全部数据，只用扫描满足条件的相关数据，大大减少了扫描的时间，存取速度加快。

(2) 利用相似搜索，根据中心变电站的运行情况将其分类。相似搜索的结果使得关联算法的对象的关联程度提高，满足实际运行的要求。

## 3 在线无功优化模型

### 3.1 基本蚁群算法的数学模型<sup>[13, 14]</sup>

设  $m$  是蚁群中的蚂蚁总数， $b_i(t)$  表示  $t$  时刻位于元素  $i$  的蚂蚁数目， $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻路径  $(i, j)$  上的信息量， $d_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$  表示城市  $i$  和  $j$  间的距离。初始时刻，各条路径上信息量相等，设  $\tau_{ij}(0) = C$  ( $C$  为常数)。

蚂蚁  $k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 在运动过程中，根据各条路径上的信息量决定转移方向， $p_{ij}^k(t)$  表示在  $t$  时刻蚂蚁  $k$  由城市  $i$  转移到城市  $j$  的状态转移概率，则：

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}^k(t)]^\alpha \times [\eta_{ik}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0 & \end{cases} \quad (9)$$

其中： $allowed_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$  - tabu  $k$  表示蚂蚁  $k$  下一步允许选择的城市的集合。与真实蚁群不同，人工蚁群系统具有记忆功能， $tabu_k(k=1, 2, \dots, m)$  用以记录蚂蚁  $k$  当前所走过的城市，集合  $tabu_k$  随着进化过程作动态调整。

经过  $n$  个时刻，蚂蚁可走完所有的城市，完成一次循环。每只蚂蚁所走过的路径就是一个解。此时，要根据下式对各路径上的信息量作更新：

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (11)$$

其中： $\rho \in [0, 1)$ ，为挥发因子， $1-\rho$  表示信息残留因子。

$\Delta\tau_{ij}^k(t)$  表示蚂蚁  $k$  在本次循环中在城市  $i$  和  $j$  之间留下的信息量，它的计算公式根据计算模型而定，本文使用最常用的 ant circle system 模型：

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

其中： $Q$  表示信息素强度， $L_k$  为蚂蚁  $k$  在本次循环中所走路径的总长度。在经过若干次循环以后，可以根据适当的停止条件来结束计算。

### 3.2 蚁群算法的改进

本文对蚁群优化处理过程的改进主要有以下几点：

1) 参数选择：将参数作动态调整。在开始时，将参数选择得小一些，避免“伪正反馈”，过小压缩解空间，使寻优空间过小。当计算运行到一定的循环次数时，采用增大参数值的方法来提高解的质量。

2) 参数修正：将数据挖掘的结果对式(9)状态转移概率公式进行修正，使得置信度越高信息素含量越高，蚂蚁选择的概率越大。

在本文中，若第  $k$  只蚂蚁在本次循环中经过  $(i, j)$ ，则按式(13)计算：

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{Q(1+p)}{L_k} \quad (13)$$

式中： $p$  为置信度。可见，置信度越高信息素含量越高，以后蚂蚁越倾向于走此路径。

利用数据挖掘出来的结果，形成备选 tabu 表，每次蚂蚁选择后修改 tabu 表，形成新的 tabu 表，直至形成新的优化方案。

3) 路径选择策略：首先，对变电站中主变某侧出现的功率缺额，将各个电容器组合成各种状态，计算其无功总额，与功率缺额相比较，找出与之相差最大和最小的方案，舍去该状态，在余下的状态中，对其进行编号，进行数据挖掘得到置信度，置信度表实时更新。

其次，本文对基本蚁群算法中的路径选择策略进行了调整，根据挖掘出的关联规则的置信度的大小作为相关备选路径的概率，列出备选节点 tabu 表，计算各备选路径的  $\tau_{ij}^k$ ，通过对蚁群算法路径策略的选择，形成 tabu 表选择确定下一个要到达的节点。可以看出，经过调整后蚂蚁选择路径时没有随机性。

### 3.3 目标函数的处理

对 1.2 节中目标函数的处理如下

### (1) 目标函数的转化

蚁群算法中, 每个优化方案是由一只蚂蚁走过的路径表示的。为了便于求解, 可把变电站无功补偿寻优问题设计成类似于 TSP 的模式。所有可以投切的电容器组对应于 TSP 中的各个城市, 而电容器组的投切决策对应于 TSP 中的两个城市之间的路径。相应的, 对式 (5) 的目标函数可以转化成 TSP 的模式:

$$\min\left(\sum_{s=1}^n ts(s(e_i)) + ts(s(e_{n+1}))\right) \quad (14)$$

式中:  $ts(s(e_{n+1}))$  表示如果新增节点  $n$  注入无功  $Q$  时, 目标函数的变化, 其计算可以通过节点电流注入法求解。

因此, 无功优化问题就可以像 TSP 问题一样, 采用蚁群算法来进行求解。

### (2) 约束条件的处理

主要考虑不等式约束如何在 tabu 表中体现, 即用 tabu 表来限制不满足式 (7) 约束的状态。前面已经说明, 这里的 tabu 表与基本蚁群算法的 tabu 表有所不同, 它的初始建立与离线数据挖掘结果有关, 对决策有影响。

由式 (7), 当无功充足时, 可以通过调整变压器有效地调节电压, 所以在模型中可以不考虑电压和分接头约束。

由于电容器在单位时间内的投切次数有限制,  $C_{i\min} \leq C_i \leq C_{i\max}$  单位时间内, 第  $i$  台电容器的累计投切次数达到  $C_{\max}$ , 则在剩余的单位时间内禁止投切该台电容器。在 tabu 表中将其置为 0, 否则置为 1。

## 4 算例分析

将改进的 Apriori 算法及蚁群优化算法用于无功优化, 并应用在分析上海万航变电站的电压无功调节问题上。在进行数据挖掘前, 数据完整, 已经经过预处理。

万航变电站所辖的变电所共有 19 座, 其中 110 kV 变电所 4 座, 35 kV 变电所 15 座。在 19 座变电所中绝大部分安装了无功补偿设备和有载调压主变压器, 占主变压器总台数的 100%。根据变电站及与其相联系的下属变电站主变电容器分组配备情况, 可将其对应分为 31 组, 如表 1 所示。

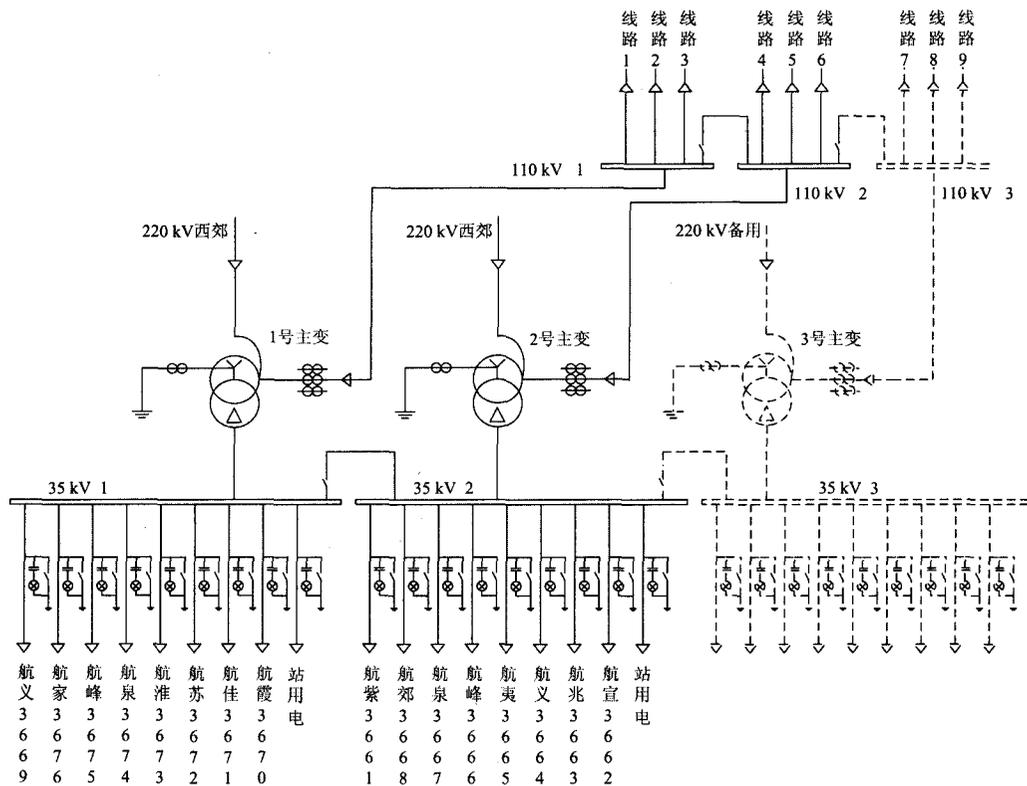


图 2 万航变电站主接线图

Fig.2 Main electrical wiring of Wanhang substation

对万航变电站的历年运行数据进行挖掘, 从挖 掘出来的数据结果也可以看到, 变电站无功补偿一

一般为就地补偿方式，即只要下属变电站检测到无功缺额，就会按照九区图来调节，结果导致中心变电站上的无功过补或者损耗过大等问题，造成相当部分主变在大量时段出现无功倒送现象。

表 1 万航站出线负荷无功配置表

Tab.1 Configuration of the compensated reactor power in substations connected to Wanhang substation

编号	线路名	对应主变	无功补偿
1	1	航余 余姚#1 主变	(2 400+3 600) kvar 分组投切
2	1252		
3	2	航余 余姚#2 主变	(2 400+3 600) kvar 分组投切
4	1255		
5	3	航芙 芙蓉#1 主变	(2 400+3 600)kvar 分组投切
6	1251		
7	4	航芙 芙蓉#2 主变	(2 400+3 600)kvar 分组投切
8	1254		
9	5	航霞 仙霞#2 主变	3 000 kvar 不分组
10	6	航佳 佳信#1 主变	3 000 kvar 不分组
11	7	航苏 江苏#2 主变	(1 200+1 800) kvar 分组投切
12	3672		
13	8	航泉 福泉#2 主变	(1 200+1 800) kvar 分组投切
14	3674		
15	9	航家 曹家堰#2 主变	(1 200+1 800) kvar 分组投切
16	3676		
17	10	航峰 长峰商城甲	(1200+1800)kvar 分组投切
18	3675		
19	11	航义 遵义#3 主变	(1200+1800)kvar 分组投切
20	3669/		
21	12	航淮 淮阴#1 主变	(3 000+1 800) kvar 分组投切
22	3673		
23	13	航兆 兆丰#1 主变	3 000 kvar 不分组
24	14	航峰 长峰商城乙	(1 200+1 800) kvar 分组投切
25	3666		
26	15	航泉 福泉#1 主变	(1 200+1 800) kvar 分组投切
27	3667		
28	16	航宣 宣化#2 主变	3 000 kvar 不分组
29	17	航紫 紫云#1 主变	3 000 kvar 不分组
	3661/		
	航夷		
	3665		
28	18	航义 武夷#1 主变	1 200 kvar 不分组
	3664		
30	19	航义 遵义#2 主变	(1 200+1 800) kvar 分组投切
31	3664		

表 2 列出了置信度大于 0.9 的部分关联规则。其意义如下：

$$I(y5,01,11) \Rightarrow I(x1,2) \wedge I(x2,0) \wedge I(x3,0) \wedge I(x8,0) \wedge$$

$I(x10,0)$  表示在 35 kV 母联断开，110 kV 母联关闭的情况下，110 kV1 号母线上无功不足（由#1 和#2 变压器 110 kV 侧可得出无功缺额），运行在九区图的 5 号区间，即电压  $U$  越上限，无功  $Q$  越下限时，航余 1252，航余 1255，航芙 1251，航峰 3675，航泉 3674 变电站，均检测到无功缺额；航余 1252 变电站有(2 400+3 600) kvar 电容器投入。

表 2 关联规则置信度表示意图

Tab.2 Reliability table of association rule mining algorithm

关联规则	置信度
$I(y5,01,11) \Rightarrow I(x1,2) \wedge I(x2,0) \wedge I(x3,0) \wedge I(x8,0) \wedge I(x10,0)$	1
$I(y5,10,12) \Rightarrow I(x3,5) \wedge I(x4,7) \wedge I(x15,0) \wedge I(x16,0)$	1
$I(y5,01,11) \Rightarrow I(x1,1) \wedge I(x2,3) \wedge I(x3,0) \wedge I(x4,0)$	0.98
$I(y6B,10,21) \Rightarrow I(x5,9) \wedge I(x7,12) \wedge I(x15,0) \wedge I(x16,0)$	0.96
$I(y6A,00,21) \Rightarrow I(x1,0) \wedge I(x7,11) \wedge I(x10,0) \wedge I(x11,0)$	0.96
$I(y6B,00,12) \Rightarrow I(x3,5) \wedge I(x4,7) \wedge I(x15,0)$	0.95
$I(y6A,00,21) \Rightarrow I(x1,0) \wedge I(x7,11) \wedge I(x11,0)$	0.93
$I(y5,10,11) \Rightarrow I(x1,1) \wedge I(x2,0) \wedge I(x3,5) \wedge I(x4,0)$	0.93
$I(y5,00,11) \Rightarrow I(x1,1) \wedge I(x2,3) \wedge I(x3,0) \wedge I(x4,0)$	0.92
$I(y6A,00,11) \Rightarrow I(x1,1) \wedge I(x2,0) \wedge I(x5,9) \wedge I(x7,11)$	0.90
$I(y6A,10,11) \Rightarrow I(x1,0) \wedge I(x2,3) \wedge I(x5,9) \wedge I(x7,11) \wedge I(x16,0)$	0.90

在本文算例中，将参数作动态调整。在开始时，将参数选择得小一些，避免“伪正反馈”，过小压缩解空间，使寻优空间过小。当计算运行到一定的循环次数时，采用增大参数值的方法来提高解的质量。经过实验计算，本例中在总的迭代次数的前 1/4 次计算中参数  $\alpha=0.5$ ， $\beta=1$ ， $\rho=0.4$ ，在以后阶段的计算中参数： $\alpha=1$ ， $\beta=3$ ， $\rho=0.8$ 。参数  $Q$  的取值按式(13)计算进行修正，对置信度高的路径加大信息素，让蚂蚁尽快寻优，减小计算量。

图 3~图 5 为母联在各种情况下分别考虑得到的 110 kV 侧无功缺额连续变化时无功投入优化前后的比较结果。投切方式一和投切方式二是分别为以网损最小化和节点电压偏离规定值最小为目标函数，即以式(5)中分别  $\alpha_1=1$ ， $\alpha_2=0$  和  $\alpha_1=0$ ， $\alpha_2=1$  两种情况进行优化，对目标函数进行计算后得到相关评价系数。无功缺额为标么值表示。

其中，方式 1、2、3 分别如表 3 所示。

使用在线算法得到在不同工况及不同目标函数下的所有电容器的投切结果十分复杂，本文仅给出直观的评价结果。

表3 母联运行方式的表示

Tab.3 The expression when bus-couplers is in different situations

方式	母联的关断情况
1	35 kV 断开, 110 kV 关闭
2	35 kV 关闭, 110 kV 断开
3	全断开

评价系数为同时考虑电压稳定裕度最大和有功网损最小的多目标函数的无功优化函数。评价系数的表达式为:

$$F = \sum_{k \in N_k} (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2) + \sum_{i \in NL} C_i f_{2i} \quad (15)$$

式中:  $F_1, f_{2i}$  分别为式(2)和式(3)所示;  $NL = \{f_{2i} \geq 1\}$ , 即电压超出节点电压给定最大偏移值的节点, 相应的系数  $C_i$  加大, 相当于引入惩罚项。

在 35 kV 母联断开, 110 kV 母联关闭的情况下, 无功补偿方式的结果比较如图 3 所示。

在 35 kV 母联关闭, 110 kV 母联断开的情况下, 无功补偿方式的结果比较如图 4 所示。

35 kV 母联和 110 kV 母联全断开的情况下, 无功补偿方式的结果比较如图 5 所示。

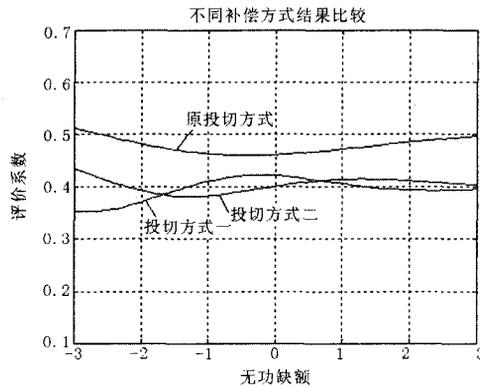


图3 运行方式一的无功补偿方式比较

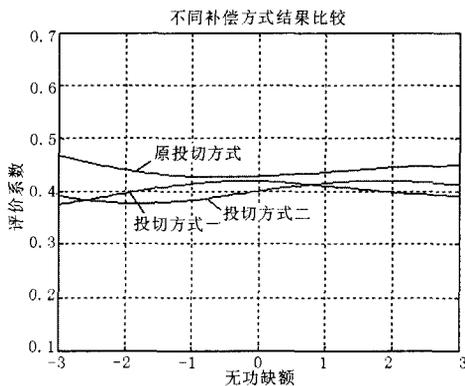
Fig.3 Comparison of Var compensation in 1<sup>st</sup> situation

图4 运行方式二的无功补偿方式比较

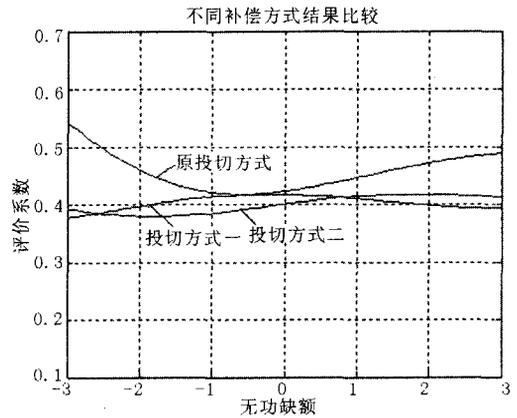
Fig.4 Comparison of Var compensation in 2<sup>nd</sup> situation

图5 运行方式三无功补偿方式比较

Fig.5 Comparison of Var compensation in 3<sup>rd</sup> situation

可以看到, 优化后的方案比原投切方式得到的效果要好, 但进行优化, 优化后的结果的评价系数仍不能达到 0, 即 100% 的完全补偿, 甚至会出现过补偿的情况, 不过总体效果比原有投切结果的效果要好。分析其原因, 可以看到, 由于各个变电站的电容器组投入, 而其分组不够细致, 不能实现无功的无级调节, 而在优化的过程中, 只是以现有的电容器组进行分析。

由分析结果可以看到, 电容器分组投切不能实现无功补偿无级调节, 无功补偿优化, 电压平滑调节难以实现, 建议考虑分级补偿的前提下还应与设备情况相配合从而使分组更加合理, 或者使用 SVC 或 STATCOM 等设备, 以达到更好的无功补偿效果。

## 5 结语

本文对 Apriori 算法进行改进, 避免了该算法本身的缺点, 将其应用到变电站数据的挖掘过程中。根据实际算法产生满足最小信任度阈值的强关联规则。将数据挖掘和蚁群算法结合, 将挖掘出来的关联规则的结果应用于蚁群算法, 对状态转移概率公式进行修正, 并将参数作动态调整。根据置信度高低对蚁群算法路径策略改进, 形成 tabu 表选择确定下一个要到达的节点。对在线运行的情况进行无功优化, 确定电容组的投切策略。将改进后的算法应用于万航变电站的实际运行过程, 并对应用结果进行分析。实验结果表明, 基于数据挖掘的系统无功优化目标值方法可以提高系统运行效率, 降低损耗, 对系统稳定运行意义重大。

## 参考文献

- [1] Brierley P, Batty B. Neural Data Mining and Modeling for Electric Load Prediction[A]. In: IEE Co [1~uium 0I,

- Knowledge Discovery and Data Mining[C]. 1998.
- [2] Madan S, Bol Linger K E. Artificial Intelligence Assisted Voltage Stability Enhancement[A]. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 1996,(1):392-395.
- [3] Steele J A, McDonald J R, Arey C D. Knowledge Discovery in Databases:Application in the Electrical Power Engineering Domain[A]. In: EE Colloquium on IT Strategies for Information Overload[C]. 1997.
- [4] Shelokar P S, Jayaraman V K, Kulkarni B D. An Ant Colony Classifier System: Application to Some Process Engineering Problems[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004,28:1577-1584.
- [5] 王志刚,杨丽徙,陈根永.基于蚁群算法的配电网网架优化规划方法[J].电力系统自动化学报,2002,14(6): 73-76.  
WANG Zhi-gang, YANG Li-xi, CHEN Gen-yong. Ant Colony Algorithm for Distribution Network Planning[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(6):73-76.
- [6] 吴钟飞, 刘涤尘.电压无功功率控制装置在变电站中的应用[J]. 广东电力, 2005,18(4):55-59.  
WU Zhong-fei, LIU Di-chen. Application of Voltage and Reactive Power Control Devices in Substations[J]. Guangdong Electric Power, 2005,18(4):55-59.
- [7] 周邨,赵金荣.电压无功自动控制软件及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9):56-59.  
ZHOU Ye, ZHAO Jin-rong. Software for Automatic Control of Voltage and Reactive Power in Substation and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems,2000, 24(9):56-59.
- [8] Challego R A, Romero R, Monticelli A J. Solving Capacitor Placement Problems in Distribution System Using Genetic Algorithms[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27: 429-441.
- [9] 许文超,郭伟.电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003,15(1).  
XU Wen-chao, GUO Wei. Summarize of Reactive Power Optimization Model and Algorithm in Electric Power System [J]. Proceedings of the EPSA, 2003,15(1).
- [10] Agrawal R,Imielinski T,Swami A. Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases[A]. In:The 1993 ACM SIGMOD Conference[C]. Washington DC, USA. 1993:246-257.
- [11] Berzal F, Cubero J-C, Marin N. TBAR: an Efficient Method for Association Rule Mining in Relational Databases[J].Data&Knowledge Engineering, 2001, 37: 47-64.
- [12] Sergio Granville. Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods[J]. IEEE Trans on PS, 1994,9(1):136-142.
- [13] 段海滨.蚁群算法原理及其应用[M].北京: 科学出版社,2005.  
DUAN Hai-bin.Ant Colony Algorithms:Theory and Applications[M]. Beijing: Science Press,2005.
- [14] Shelokar P S, Jayaraman V K, Kulkarni B D. An ant Colony Classifier System: Application to Some Process Engineering Problems[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004,28:1577-1584
- [15] 鲍文,于达仁,王伟,等.基于关联规则的火电厂传感器故障检测[J].中国电机工程学报, 2003,23(12): 170-175.  
BAO Wen,YU Da-ren,WANG Wei, et al. Sensor Fault Detection in Thermal Power Plants Based on Association Ruile[J].Proceedings of the CSEE, 2003,23(12): 170-175.
- [16] 李建强,牛成林,刘吉臻.数据挖掘技术在火电厂优化运行中的应用[J].动力工程,2006,12(6):830-835.  
LI Jian-qiang, NIU Cheng-lin,LIU Ji-zhen. Application of Data Mining Technique in Optimizing the Operation of Power Plants[J]. Journal of Power Engineering, 2006,12(6):830-835.

收稿日期: 2008-07-07; 修回日期: 2008-08-19

作者简介:

解大(1969-),男,博士,副教授,从事电力系统FACTS研究和电力系统仿真; E-mail: xieda@sjtu.edu.cn

龚锦霞(1984-),女,硕士生,从事电力系统FACTS研究和电力系统仿真;

徐劲松(1973-),男,硕士研究生,主要从事电力系统规划工作和电力系统优化的研究。