

## 地区电网无功优化研究

耿光飞 杨仁刚

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

**摘要** 建立了动态无功优化数学模型,提出用遗传算法对负荷曲线进行优化分段的方法。提出的地区电网无功优化控制基于现有地调自动化系统,利用遗传算法求解整个电网的无功优化问题,并根据优化结果给出控制方案,指导各个变电站 VQC 建立合理的限值。该方法克服了各变电站无功、电压就地最优控制的弊端,节电效益显著。在确定 VQC 上下限时,将每一时段的预测负荷定义为模糊数,在一定的置信水平下精确化,可计算出对应的无功调节范围。设计了无功优化控制系统的软件体系结构,编写了无功优化程序,并在某地区电网的应用中验证了方法的有效性。经过优化计算,系统各母线电压满足约束条件,在满足控制设备投切次数限制的条件下,降低了电能损耗,有功损耗比优化前下降 4.96%。

**关键词** 电力系统;无功优化;遗传算法;短期负荷预测

**中图分类号** TM 714.3

**文章编号** 1007-4333(2004)05-0055-04

**文献标识码** A

## Reactive power optimization in district power system

Geng Guangfei, Yang Rengang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Dynamic reactive power optimization model is established in this study. A new approach utilizing genetic algorithm to auto-separate load curve in segments is proposed. Genetic algorithm has been used to complete the reactive power optimization. It is studied how to build appropriate VQC limits according to the calculation of reactive power optimization. When deciding VQ limits of VQC, the forecasting load of every period of time is defined as a fuzzy number, which turned exact one by a certain believe level to calculate the range of reactive control. The software structure of the reactive power control system is designed in this paper. The reactive power optimization program has been validated in a district power system. The power loss dropped by 4.96% after optimization in a district power system.

**Key words** power system; reactive power optimization; genetic algorithm; short-term load forecasting

目前国内外许多变电站使用电压无功综合控制装置(以下简称 VQC)控制变电站内的电压无功调节设备,改善无功潮流和电能质量;但是,由于 VQC 是按分散控制、就地补偿的原理工作的,所以单纯用 VQC 进行电压无功控制难以使各变电站已投入的电压无功设备和容量得到充分利用,同时,各节点分散控制还可能导致电网无功潮流分布不合理和节点被控对象频繁操作<sup>[1]</sup>。

为实现全局最优控制,一些先进的 VQC 已经具备了区域电网无功优化智能终端的功能,可实现数据共享或区域电网电压无功综合优化控制;可以

远方和当地 2 种方式设定电压限值和无功限值等参数。这为实现区域电网集中无功优化提供了技术条件。因此,研究如何合理设置 VQC 限值,对全网无功调压设备进行统一协调控制,对于电网经济运行、改善电能质量具有现实意义。

由于电力系统的负荷是随时间动态变化的,所以基于静态断面的优化结果往往不能完全满足实际需求;因此,无功优化的控制策略应依据全天的负荷曲线制定,以达到全天的最优目标。对于动态无功优化计算,目前国内外通常采用的方法是将动作次数限制作为约束变量或目标函数中的惩罚项<sup>[2]</sup>,这

收稿日期:2004-04-27

作者简介:耿光飞,博士,讲师,主要从事电力系统最优化潮流和电力系统负荷预测的研究。

使各时段的优化相互关联,增加了优化计算的复杂度,导致求解时间很长且难以得到全局最优解。

笔者采用的方法是,根据对次日24h的母线负荷预测<sup>[3]</sup>,计算出该日变压器分接头和电容器投切计划。具体步骤为,根据负荷水平和负荷曲线的变化趋势以及补偿调压装置动作次数的限制,先确定分段数,然后以无功变化曲线为准对负荷曲线进行分段,根据每一段的负荷平均值进行优化计算,求得次日每一时段补偿调压装置的运行方案。既保证全网潮流最优,又使投切次数合理分配。

## 1 动态无功优化数学模型

静态无功控制以降低有功功率损耗为目标(不考虑时间变量),而动态无功控制以降低电能损耗为目标(考虑时间变量),两者之间有较大差异。

设电网有 $n$ 个节点,以24h的电能损耗为目标函数,以变压器分接头位置和无功补偿量为控制变量,动态无功优化数学模型为:

$$\min_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(Q_t, T_t) \cdot t$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max}, t = 1, 2, \dots, 24 \\ Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max}, t = 1, 2, \dots, 24 \\ T_{\min} \leq T_t \leq T_{\max}, T = N, t = 1, 2, \dots, 24 \\ f_t(Q_t, T_t) = 0, t = 1, 2, \dots, 24 \\ S_{C_i} \leq S_{C_{\max}}, i = 1, 2, \dots, m \\ S_{T_j} \leq S_{T_{\max}}, j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_t, V_{\max}, V_{\min}$ 分别为 $t$ 时刻 $n$ 个节点的电压幅值向量和电压上、下限向量; $Q_t, Q_{\max}, Q_{\min}$ 分别为 $t$ 时刻 $m$ 个补偿节点的无功补偿向量和无功上、下限向量; $T_t, T_{\max}, T_{\min}$ 分别为 $t$ 时刻 $l$ 个变压器分接头位置向量和分接头位置上、下限向量; $S_{C_i}$ 为第 $i$ 个电容(或电感)补偿节点的调节启动次数; $S_{T_j}$ 为第 $j$ 个变压器分接开关的调节动作次数; $t$ 为负荷近似保持不变的一段时间,这里取 $t = 1 \text{ h}$ ; $f_t(Q_t, T_t) = 0$ 表示 $t$ 时段的功率平衡方程式组。

## 2 负荷曲线的优化分段算法

根据动态无功优化数学模型(式(1)),显然,负荷曲线的时段划分得越多,降低电能损耗的效果越明显,但每个时段都要做一次优化计算,无功调节次数增多,计算量也相应增大。本文中综合考虑了有功和无功负荷的变化,应用遗传算法搜索最优的分

段方案。分段算法以某变电站母线24h的负荷曲线为例(图1)。

1) 日负荷曲线分段数学模型。若将负荷曲线划分为 $N$ 个时段,则要求 $N - 1$ 个分点。划分的目标为,使各时段负荷的平均值之间离散性最大,而各时段内负荷的离散性最小,即

$$F_1 = \max_{i=1}^N (P_{a_i} - P_a)^2 \quad (2)$$

$$F_2 = \min_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (P_{ij} - P_{a_i})^2 \quad (3)$$

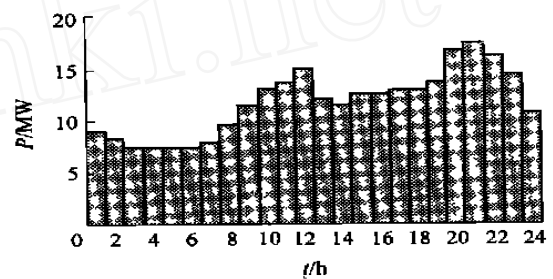


图1 一条母线上24h负荷示意图

Fig. 1 Diagram of 24-hour load on a bus

式中: $P_{ij}$ 为第 $i$ 个时段第 $j$ 个负荷点的有功负荷; $P_{a_i}$ 为第 $i$ 个时段的有功负荷平均值; $K_i$ 为第 $i$ 个时段包含的负荷点个数; $P_a$ 为总的平均有功负荷。

这2个目标函数的本质要求是一致的,即都有使分段数增加的趋势,而在分段数确定的情况下,每个时段内负荷值越集中,则各个时段的负荷平均值越离散。由此可见,负荷曲线的分段问题本质上是一个优化问题,采用遗传算法求解,其待求变量为 $N - 1$ 个分点 $t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ ;因此,用优化算法对负荷曲线进行自动分段是可行的。

2) 分段合理性的判据。时段划分要同时考虑计算效率和调节次数2方面的因素,分段数过多或过少都不好。设已确定分点 $t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ ,记录每一时段 $t_i$ 的最大、最小有功负荷 $P_{i\max}$ 和 $P_{i\min}$ 。在按 $t_i$ 段平均负荷进行优化计算的情况下,变压器分接开关与无功补偿量应使电网有功负荷在 $P_{i\max}$ 和 $P_{i\min}$ 时不发生越限,否则说明分段不合理,该时段还需细分。

图2(a)和(b)分别示出图1所示日负荷曲线的不同分段结果。

在满足无功控制设备动作次数限制的条件下,分段数越多,有功损耗越小。分段数与各时段的起

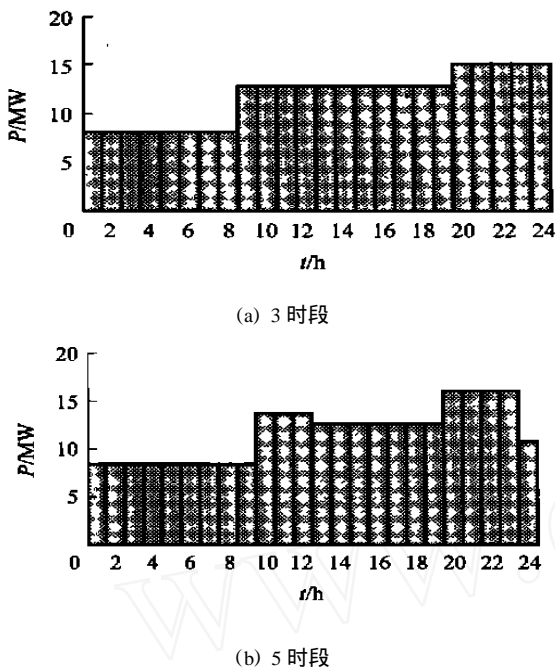


图 2 日负荷曲线分段结果

Fig. 2 Subsection of daily load curve

止时间确定后,还需在各时段中记录特征负荷点,包括该段的负荷平均值,有功与无功最大、最小值以及相应的时刻。

为验证本文动态无功优化算法的可行性,以 Ward-hale 6 节点系统<sup>[4]</sup>为例进行日负荷动态无功优化计算。模拟日负荷曲线见图 3。以初始状态各点的负荷值为基准,模拟负荷值表示为基准值的倍数。表 1 示出不同分段数情况下日负荷动态无功优化结果。

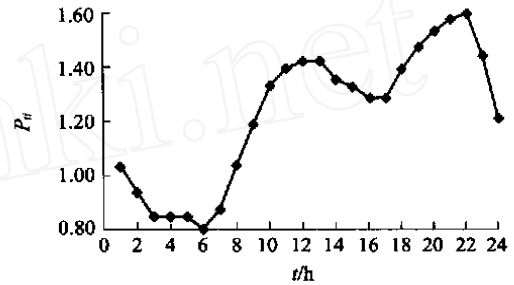


图 3 模拟日负荷曲线

Fig. 3 Simulation of daily load curve

表 1 日负荷动态无功优化统计结果

Table 1 Statistics of dynamic optimization

时段	日能耗/(MW·h)	电压越限节点数	电容最大动作次数	最大变比调整次数	计算时间/s
2	230.4	3	2	2	4.4
3	227.2	1	3	3	6.5
5	224.3	0	4	5	12.3
10	223.6	0	6	8	25.1
24	222.8	0	12	18	53.8

注:若电容器和分接头动作次数上限定为 8 次,则在 24 时段下日电能损耗为 228.5 MW·h。

由表 1 可以看出,计算时间几乎与分段数成正比,而电能损耗却随着分段数的增加趋于平缓。这说明通过合理的分段可以显著降低计算量,同时可以兼顾电能损耗和设备动作次数。

### 3 应用模糊集理论确定 VQC 的限值

本文无功优化的特点在于计算出 VQC 合理的限值。在进行无功优化计算时,认为每一个时段内的有功负荷与无功负荷近似恒定,但是由于实际负荷的随机性,优化计算得出的无功补偿量也应该是一个具有模糊性的数值区间;因此,在确定 VQC 的上下限时,将每一时段的预测无功负荷定义为一个模糊数,其隶属度考虑该时段的最大、最小负荷值以及预测误差。在一定的置信水平下精确化,就可计

算出对应的无功补偿调节范围。

设变电站母线在某一时段预测无功负荷的最小值、平均值、最大值分别为  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\text{avg}}$ ,  $Q_{\max}$ , 取模糊变量  $\bar{Q}$  为三角模糊数,隶属函数为

$$\mu(\bar{Q}) = \begin{cases} \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\text{avg}} - Q_{\min}} & Q_{\min} \leq Q < Q_{\text{avg}} \\ \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max} - Q_{\text{avg}}} & Q_{\text{avg}} \leq Q \leq Q_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\text{avg}}$ ,  $Q_{\max}$  为三角形模糊数的参数,即三角形 3 个顶点的横坐标。取  $\bar{Q}$  的截集得  $\bar{Q} = [a, b]$ , 为阈值或置信水平。

在置信水平为  $\alpha$  的情况下,以  $Q$  分别等于  $a$  和  $b$  可以计算出各变电站 VQC 的电压和无功补偿上

下限,而以  $Q_{avg}$  可计算出该时段的最佳无功补偿量和电压值。

#### 4 无功优化控制系统

无功优化控制系统的软件体系结构见图4,最底层的通信与数据采集模块完成控制系统与调度自动化系统之间的通信和控制系统的信息采集。负荷预测模块从无功优化历史数据库和通信模块中分别获得各变电站负荷的历史数据和实时数据,并预测未来时段的负荷曲线。电压无功优化模块根据未来的负荷曲线以及各变电站无功补偿容量配置求出未来各时段、各变电站母线电压以及无功功率的最佳分布,得到各变电站最佳无功限值曲线和最佳电压限值曲线,并由通信模块发送给各变电站的VQC。

无功优化控制系统的启动可由用户指定或在每天的固定时刻进行,计算次日各时段最佳电压限值和最佳无功补偿限值,并发送给通信模块,下传至各变电站VQC。实时检测当前时段各变电站负荷预测值与实测值之差,当其中最大误差大于某一定值时启动负荷预测修正计算程序,对修正后的负荷值进行无功优化计算,并将计算得到的电压限值和无功补偿限值的修正值发送给各变电站VQC。

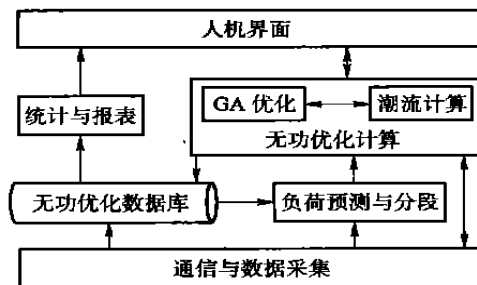


图4 无功优化软件结构

Fig. 4 Structure of reactive power optimization system

#### 5 应用实例

本研究已在 win2000 操作系统上用 C++

Builder 6.0 开发环境实现,并应用于某地级市电网。所用微机机型为 Pentium ,CPU 主频 1.2 GHz。

该电网有 330 kV 变电站 1 座,220 kV 变电站 1 座,110 kV 变电站 5 座。330 kV 变电站内有 1 台 60 MV·A 的调相机。市内 2 座发电厂归省电力局调度。等值处理后,该电网共有 42 个节点,36 条线路,14 台三绕组变压器,3 台二绕组变压器,18 个负荷,7 个无功补偿节点,2 个发电厂,1 台调相机。

采用改进的遗传算法对该系统进行优化计算,仅以 2002 年夏季大运行方式为例。优化前系统有 3 个节点的电压值低于下限,全网有功损耗为 6.881 MW;不做任何补偿时,11 个节点的电压值低于下限,全网有功损耗为 7.414 MW。经过优化计算,各节点电压得到较大提高,有功功率损耗降为 6.540 MW,比优化前和无补偿时分别下降 4.96% 和 11.78%。在满足投切次数限制的条件下,降低了电能损耗和计算量。运行结果表明,本文中提出的方法能够满足在线优化计算的要求。该软件实现全网无功优化计算后,克服了变电站局限于无功、电压就地最优控制,而不能达到全网最优的弊端,节电效益显著。

#### 参 考 文 献

- [1] 丁晓群,周玲,陈晟,等. 无功/电压优化集中控制系统软件[J]. 中国电力,2001,34(6):49~50
- [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] 于尔铿,刘广一,周京阳,等. 能量管理系统[M]. 北京:科学出版社,1998. 86~89
- [4] 李文沅. 电力系统安全经济运行——模型与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社,1989. 136~137