

基于 SCADA 的配电站电压无功实时监控*

白树忠 张春朋

田 岚

(山东工业大学电力工程学院 济南 250061) (山东工业大学电子系)

摘要 提出一种基于 SCADA 的综合控制变压器分接头和并联电容器组的模糊线性规划方法,进行配电站电压无功实时监控。通过推导配电站二次母线电压 V_2 的方程,建立各物理量的隶属函数及模糊目标函数;运用 9 域图和线性规划算法,得到使 V_2 偏差最小的最优调控策略。该方法在实际应用中取得了良好的效果。

关键词 DMS/SCADA, 电压无功控制, 隶属函数, 变压器分接头, 并联电容器组

分类号 TM 73

Voltage and Reactive Power Control in a Distribution Substation Based on SCADA

Bai Shuzhong, Zhang Chunpeng, Tian Lan

(Shandong University of Technology)

Abstract A fuzzy linear programming method based on SCADA and used for the combined control of load tap changer and switching over shunt capacitors bank is proposed, to solve the real-time vol/var control problem in a distribution substation. With developing the equation of the secondary bus voltage (V_2), establishing the membership functions of variables and the fuzzy object function, making using of nine-field figure and linear programming method, the optimal operate policy is obtained to limit the deviation of V_2 to the minimal. This algorithm shows well in practical application.

Key words DMS/SCADA, voltage and reactive power control, membership function, load tap changer, shunt capacitors bank

1 引 言

为适应配电系统对可靠性、安全性、经济性越来越高的要求,发达国家在 20 世纪 80 年代末,我国则在近几年开展了配电管理系统(DMS)的研究。DMS 的一项重要内容就是电压无功控制。通过电压无功控制,提高电压质量,减少网损。近几年,有关中低压变电站电压无功调节研究,大都围绕着独立的变电站无功电压控制装置^[1]或无功优化和规划^[2]进行探讨。然而,集中式装置在实际应用中有较大的局限性,基于 DMS/SCADA 的电压无功控制成为配电站电压无功控制的方向。从系统角度看,虽然要做成实际的控制系统的还面临很大的困难,但是关联分散控制已成为电压无功控制的发展方向^[1]。

本文综合变压器分接头调整和投切电容器这两种调控手段,采取计及多因素的模糊线性规划法,探讨基于 SCADA 的配电站电压无功控制策略。

2 数学模型

2.1 建立方程

图 1 是一台有载调压变压器和并联电容器组的配电站等值电路。变压器用等值模型表示, k 表示理想变压器的变比, kZ_T 和 $\frac{kZ_T}{k-1}$ 表示变压器阻抗, $P_1 + jQ_1$ 表示变压器一次侧送入的功率, $P_L + jQ_L$ 表示负荷功率, \dot{V}_1 和 \dot{V}_2 分别表示变压器一次侧和二次侧电压, Q_C 表示电容器向系统提供的无功功率, Z_C 表示电容器的阻抗。列写功率方程,有

$$P_L + jQ_L \left[\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{kZ_T} \right]^* \dot{V}_2 + \frac{\dot{V}_2^2}{Z_C} \quad (1)$$

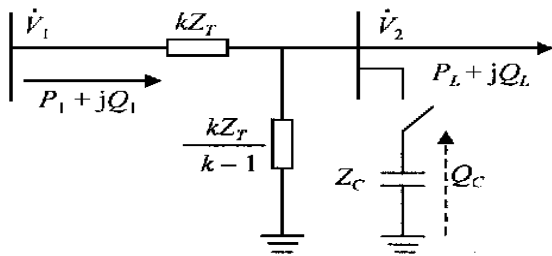


图1 变电站等值电路模型

$$s. t. \begin{cases} V_{2min} & V_2 & V_{2max} \\ Q_{2min} & Q_2 & Q_{2max} \\ pf_{min} & pf & 1 \\ N_{tap} & 30 & \\ N_c & 6 & \end{cases} \quad (6)$$

在约束条件(6)中,对电压、分接头调整次数和电容器投切次数的约束是“硬”约束,对功率因数是“软”约束。即在任何时候都不允许 V_2, N_{tap} 和 N_c 越限,但可允许功率因数 pf 稍有越限,以满足电压合格的要求。对“硬”、“软”约束的区别由隶属函数来反映。

2.2.2 各物理量的隶属函数

1) $|\Delta V_2|$ 的隶属函数:目标是使 $|\Delta V_2|$ 最小,故建立图2所示的隶属函数

$$\mu(|\Delta V_2|) = \frac{-20|\Delta V_2|}{V_{2N}} + 1 \quad (7)$$

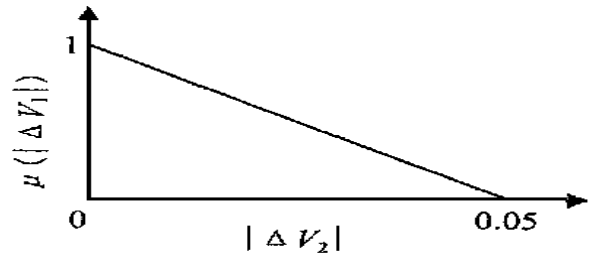


图2 $|\Delta V_2|$ 的隶属函数

2) pf 的隶属函数:主变的功率因数是投切电容器的主要指标。假如投切电容器后能改善功率因数,则给予较高的隶属度,如图3所示。

$$\mu(pf) = \left[1 + \left(\frac{pf - 1}{0.05} \right)^4 \right]^{-1} \quad (8)$$

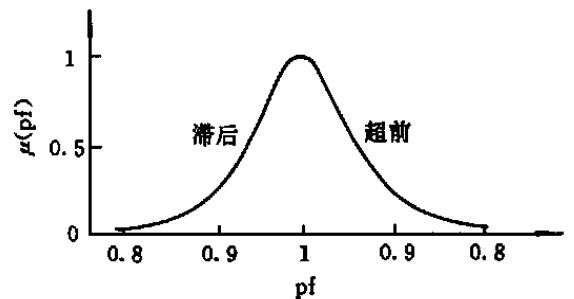


图3 pf 的隶属函数

当 $pf = 0.95$ 时, $\mu(pf) = 0.5$;当 $pf = 0.925$ 时, $\mu(pf) = 0.165$;当 $pf = 0.9$ 时, $\mu(pf) = 0.059$;当 $pf = 0.8$ 时, $\mu(pf) = 0.004$ 。所以,功率因数越限时,隶属函数的值急剧减小。即实际运行过程中,允许功率因数稍有越限,只是越限程度小,电容器动作的可能性小;越限程度大,电容器动作的可能性大。

其中

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_c} + \frac{k-1}{kZ_r}$$

忽略变压器阻抗和电容器阻抗中的电阻,将功率方程实虚部分开,消去未知变量 θ_1 ,则得

$$V_1^2 V_2^2 = k^2 X_r^2 P_L^2 + k^2 X_r^2 \left[Q_L + \left(\frac{1}{X_r} - \frac{1}{X_c} \right) V_2^2 \right]^2 \quad (2)$$

考虑到负荷的静态特性,建立如下的负荷模型^[3]

$$\begin{cases} P_L = aV_2^2 + bV_2 + c \\ Q_L = dV_2^2 + eV_2 + f \end{cases} \quad (3)$$

其中, a, b, c, d, e, f 可由统计规律得到。

将式(3)代入式(2)并化简,得 V_2 的4次方程

$$V_2^4 + pV_2^3 + qV_2^2 + rV_2 + s = 0 \quad (4)$$

若设

$$g = \frac{1}{X_r} - \frac{1}{X_c} + d$$

$$h = \frac{V_1^2}{k^2 X_r^2}, \quad t = \frac{1}{a^2 + g^2}$$

则方程的各系数可写成

$$p = 2t(ab + eg)$$

$$q = t(b^2 + e^2 + 2ac + 2fg - h)$$

$$r = 2t(bc + ef)$$

$$s = t(c^2 + f^2)$$

方程的系数是以 k 和 X_c 为变量的二元多项式,其中 X_c 表征电容器的投运量 Q_c 。当采取某种特定的调控方案时, k 和 X_c 为一组特定的值,方程(4)变为常系数方程,借用费拉里解法和卡尔丹公式,可以非常简单地从各个方程中解得相应的 V_2 。

2.2 目标函数的建立

2.2.1 原始目标函数

控制目标是使变压器二次侧电压波动尽可能小,功率因数尽可能高,变压器分接头和电容器组的动作次数尽量少。这是一个用模糊性语言描述的目标,对其原始目标函数进行模糊化处理,有

3) N_{tap} 的隶属函数: 根据经验值, 变压器分接头平均日动作次数为 7 次, 最大次数为 30 次。 N_{tap} 的隶属函数曲线如图 4 所示。

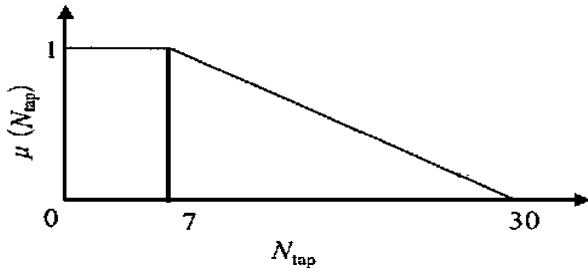


图 4 N_{tap} 的隶属函数

4) N_c 的隶属函数: 相对于变压器分接头而言, 并联电容器组的日动作次数少得多。根据实际需要, 可将其隶属函数按图 5 来描述。

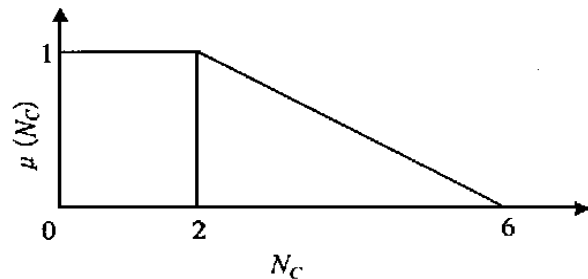


图 5 N_c 的隶属函数

2.2.3 模糊目标函数

若参考历史数据选择调节方式, 则可添加一常量 $C, 0 < C < 1$ 。设 μ_{Con}, μ_{Coff} 分别为投、切电容的隶属度, μ_{Tup}, μ_{Tdown} 分别为升、降变压器分接头的隶属度, 则

$$\mu_{Con} = C = -\mu_{Coff} = -\mu_{Tdown} = -\mu_{Tup}$$

当历史记录为投电容器时

$$\mu_{Coff} = C = -\mu_{Con} = -\mu_{Tdown} = -\mu_{Tup}$$

当历史记录为切电容器时

$$\mu_{Tup} = C = -\mu_{Tdown} = -\mu_{Coff} = -\mu_{Con}$$

当历史记录为升分接头时

$$\mu_{Tdown} = C = -\mu_{Tup} = -\mu_{Coff} = -\mu_{Con}$$

当历史记录为降分接头时

若考虑峰谷期的影响, 可在峰期的调节过程中, 将投电容器的隶属度增大。设增大常量为 λ_{peak} 。

综合起来, 目标函数可以写成

$$\max J = \mu(|\Delta V_2|) + \mu(\text{pf}) + \left\{ \frac{|\mu_{Tup} - \mu_{Tdown}|}{2} - \lambda_{peak} \right\} \mu(N_{tap}) + \left\{ \frac{|\mu_{Coff} - \mu_{Con}|}{2} + \lambda_{peak} \right\} \mu(N_c) \quad (9)$$

文献[3, 4] 提出了基于短期负荷预测的模糊动态规划的配电站无功电压控制方法, 即配电站根据负荷预测确定接下来 24h 内有载调压变压器分接头和电容器组的调控策略。但是现有的配电站自动化系统中, 负荷预测数据一般不易得到, 而且无功电压控制又常由各变电站分散控制实现, 所以基于负荷预测的动态规划方法在配电站监控系统中无法投入实用。假如配电站有 24h 负荷预测的数据, 则可建立基于负荷预测的调控策略的隶属度函数, 对式(9) 加入有关的模糊变量, 改进模糊目标函数, 改善调控效果。

导出的目标函数(式(9)) 描述的是一个线性规划问题, 其约束条件与式(6) 相同。式(9) 可用数值法求解, 这是因为虽然系统运行方式变化不定, 但调控策略总数是有限的, 即变压器变比 k 和电容器容量 Q_c (或 X_c) 的组合方式总数是有限的。如果把 k 和 X_c (或 Q_c) 的所有组合方式看作一个集合 I , 那么在某种特定的运行状态下, 可能采取的调控策略就是 I 的一个子集 I_{sub} 。在 I_{sub} 中求得方程(4) 的解, 然后用数值解法求出式(9) 的最优解, 便得到变压器分接头和开关电容器的最优调控策略。

3 控制原理

采用传统的 9 域图, 运用模糊的决策方法, 通过闭环控制流程, 实现对电压无功的控制。其控制流程为:

- 1) 由 DMS/SCADA 系统获取实时信息, 确定系统当前运行状态和运行方式, 根据 9 域图判断电压无功是否越限;
- 2) 若不越限, 则回到监控状态; 否则, 计算当前 1) 中所有可能的调控策略, 确定相应的各组 k 和 Q_c 的值;
- 3) 将各组 k 和 Q_c 代入方程(4), 解得一组 V_2 ;
- 4) 计算各物理量的隶属函数值, 由式(6) 确定该步的最优控制策略;
- 5) 根据 4) 得到的最优控制策略, 进行实际调控;
- 6) 保存调控前、后系统运行状态和运行方式及调控策略, 作为系统的历史参考信息;
- 7) 返回 1)。

4 软件主要功能

- 1) 以主变副方电压作为控制目标, 要求控制在

允许范围内, 给定的目标电压和电压允许偏移可根据实际系统的需要灵活整定。

2) 无功功率(或进线处功率因数) 有一个给定范围, 可以灵活设定。在电压合格的范围内, 充分利用电容器的补偿作用, 尽可能提高进线功率因数。

3) 确保有载调压分级进行, 一次只能调一档, 以防止连调(滑档) 或拒动。多台主变并列运行时保证同步调档。

4) 电容投切实现轮换, 并可灵活投切。轮换原则是: 先投先切, 且保证同一电容在小于放电时间内不得再次动作。

5) 通信联络、运行状态信息能向外传送并接收调度或监控主机发来的命令。

6) 满足现场闭锁条件, 如电容器退出运行(检修), 主变操作机构故障或系统故障等。

7) 峰谷时间设定, 即根据峰谷时段的不同选择不同的定值。

该软件经在潍坊变电站试运行, 效果较为理想。

5 结 语

本文提出的模糊线性规划算法计算量小, 计算速度快, 容易在线实现, 易于扩展成关联分散系统。经仿真运行, 电压合格率比原来提高 5 个百分点, 平均功率因数为 0.99, 变压器分接头和电容器平均日动作次数为 2~3 次。

基于 DMS/SCADA 的电压无功控制, 降低了

变电站工作人员的劳动强度, 提高了变电站的自动化程度, 对于改善配电站的电压质量, 提高配电站监控的可靠程度, 具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 黄益庄, 王蕾, 吕文哲. 高压变电站电压和无功关联分散控制. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 63~65
- 2 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法. 中国电机工程学报, 1995, 14(6): 375~383
- 3 Fengchang Lu, Yuanyih Hsu. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 681~688
- 4 张鹏, 刘玉田. 配电网电压控制和无功优化的动态规划方法. 见: 第 14 届全国电自专业年会论文集. 济南, 1998. 869~874

作 者 简 介

白树忠 男, 1965 年生。1995 年于山东工业大学电子系获硕士学位, 现在该校电力工程学院从事教学和科研工作。研究方向为变电站综合自动化及计算机应用。

张春朋 男, 1976 年生。1999 年于山东工业大学电力工程学院获硕士学位, 现为清华大学电力系博士生。研究方向为电力系统及自动化。

田 岚 女, 1965 年生。1989 年于山东工业大学电子系获硕士学位, 现为该系副教授。研究方向为语音信号处理及计算机应用。

《基础自动化》征稿启事

《基础自动化》是国家科委批准, 教育部主管, 东北大学主办, 国内外公开发行的技术类刊物; 被选为“中国学术期刊评价数据库”、“中国科学引文数据库”及“中国科学计量指标数据库”来源期刊; 多次被评为省、部优秀期刊。

1 刊登内容

《基础自动化》打破行业界线, 面向现场实际应用, 发表自动化领域先进的理论应用与技术成果, 内容包括: 控制理论研究, 设备自动化, 自动化仪表, 交、直流调速系统, 过程控制, 集散控制, 可编程控制器, 检测技术, 电子元器件, 计算机应用, 网络通讯, 办公自动化, 新产品、新技术介绍等。

2 来稿要求

- 1) 文题醒目、贴切, 中英文对照。
- 2) 摘要应能准确反映文章重点, 限于 100~

150 字; 关键词 3~5 个。

3) 全文限 5 000 字以内, 图、表限于 3 个。稿中易混外文字母大、小写必须书写清楚。科技词语、计量单位及电气符号按国标书写。

4) 参考文献在正文中以角标标出。文末文献表中, 图书的出版者、出版地、出版年; 期刊的卷、期、页码应写全。

5) 作者简介写明性别、出生年、学历、职称、主要从事工作等。

6) 若涉及保密问题, 作者须慎重, 文责自负。

7) 录用稿件适当收取版面费。

8) 写明详细通讯地址、邮编、联系电话、传真, 以便联系。

来稿请寄: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 东北大学 310 信箱, 邮编: 110006; 电话: 23883498。