

# 地区电网无功电压控制实用算法研究

刘俊松

(四川省电力公司安全监察部, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对地区电网辐射状运行的特点,提出了一种实用的无功电压控制算法。首先,介绍了电压模潮流法,该方法不涉及电压的相角,可以直接利用量测计算,适用于辐射状电网。然后,提出了系统网损的估算方法,同时给出了以系统网损最小的节点无功最优注入的估算方法。最后,提出了一种在自动系统出现局部故障情况下,仍可应用的无功电压控制算法。该算法具有较严格的理论基础,具有很好的实用性。

**关键词:**地区电网;无功电压;控制;潮流计算

**Abstract:** A practical reactive power/voltage control method which is suitable for district power grid is proposed in this paper. Firstly, a novel power flow algorithm is introduced which can obtain the exact solution working only with voltage magnitudes. This algorithm can be used in reactive power optimization. Secondly, a power loss evaluation formula is developed and a novel method to optimize the injected reactive power for minimal power loss is also proposed. In the end, a robust control method is developed which can remain working while some RTUs are outage.

**Key words:** district power grid; reactive power/voltage; control; power flow

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)04-0043-02

中国地区电网通常以辐射状方式运行,一般以 220 kV 变电站为电源点,为下面若干个 110 kV/35 kV 变电站供电,形成分区、分片供电的网架结构。这种电网结构自然形成了无功电压控制的分区,有利于无功电压的分区控制。

不同于高压主干网,地区电网的无功电压控制的控制手段主要是投切电容器和调整有载变压器分接头档位等。因此,地区电网的无功电压控制是一种非线性动态优化问题,在数学上目前还没有严格的多项式算法。目前已有的算法可以归结为三大类:① 数学规划法,主要有分定界<sup>[1]</sup>、动态规划<sup>[2]</sup>等。这类方法存在的主要问题是随着电网规模的扩大,计算量急剧增加。若结合一些启发式规则和灵敏度分析,效果可以得到一定改善;② 人工智能法,主要有遗传算法<sup>[3]</sup>、模拟退火法<sup>[4,5]</sup>和 Tabu 搜索<sup>[5]</sup>。这类算法计算速度通常很慢不适合实时调度应用;③ 转化为一系列线性迭代问题<sup>[6]</sup>。以上这些算法在现场应用时都需要依赖状态估计。如果状态估计运行异常,可能导致优化结果不可用,直接应用于闭环控制很困难。

根据地区电网辐射状的特点,提出了一类可以不完全依赖状态估计的无功电压控制算法。首先,利用电压模潮流法<sup>[7]</sup>,由利用负荷的有功、无功直接计算出各支路的功率分布和节点电压幅值的方法,该方法

不涉及任何相角计算,所以可以避开状态估计;然后,提出了使系统网损的节点注入无功的估算方法;最后,给出了适用于地区电网的无功电压的控制方法。

## 1 电压模潮流法

如图 1 所示,支路的阻抗为  $Z_r$ ,发端的节点电压为  $V_s$ ,注入功率为  $S_s$ ,收端的节点电压为  $V_r$ ,注入功率为  $S_r$ ,则可得支路两端的压差为:

$$V_s - V_r = \cos j \left( \frac{S_r}{V_r} \right) Z_i \quad (1)$$

把复数变量按如下形式展开:

$$V = |V| (\cos\theta + j\sin\theta) \\ Z = R + jX, S = P + jQ$$

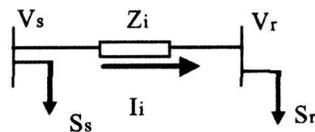


图 1 支路示意图

则:

$$|V_s V_r| (\cos(\theta_s - \theta_r) + j\sin(\theta_s - \theta_r)) - |V_r|^2 \\ = (P_r R_i + Q_r X_i) + j(P_r X_i - Q_r R_i) \quad (2)$$

即

$$\begin{cases} |V_s V_r / \cos(\theta_s - \theta_r)| = |V_r|^2 + (P_r R_i + Q_r X_i) \\ |V_s V_r| \sin(\theta_s - \theta_r) = P_r X_i - Q_r R_i \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中的两式平方和, 得:

$$|V_r|^4 + 2[(P_r R_i + Q_r X_i) - |V_s|^2] |V_r|^2 + (P_r^2 + Q_r^2)(R_i^2 + X_i^2) = 0 \quad (4)$$

所以, 支路发端节点的电压可以表示为:

$$|V_s| = \sqrt{|V_r|^2 + 2[P_r R_i + Q_r X_i] + \frac{(P_r^2 + Q_r^2)(R_i^2 + X_i^2)}{|V_r|^2}} \quad (5)$$

支路的网损为:

$$S_{\text{loss}} = (R + jX) \frac{(P_r^2 + Q_r^2)}{|V_r|^2} \quad (6)$$

根据上面所述, 可得电压潮流算法流程:

1) 自低向上利用下面的两式计算各支路的馈出功率:

$$S_{\text{loss}} = (R + jX) \frac{(P_r^2 + Q_r^2)}{|V_r|^2}$$

$$S_i = S_r + S_{\text{loss}}$$

2) 自上向下按下式计算个节点电压:

$$|V_r|^4 + 2[(P_r R_i + Q_r X_i) - |V_s|^2] |V_r|^2 + (P_r^2 + Q_r^2)(R_i^2 + X_i^2) = 0$$

由于以上的潮流算法对于辐射状电网, 可以利用负荷的有功、无功直接计算出各支路的功率分布和节点电压幅值, 而不涉及任何相角, 所以可以避过状态估计而直接应用于地区电网的无功电压控制。

## 2 系统网损估算

不失一般性, 如图 2 的辐射状系统, 其中支路 2 的网损:

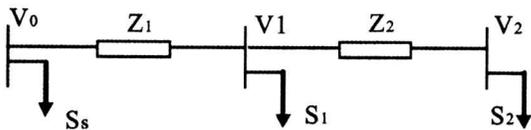


图 2 辐射状系统示意图

$$P_{\text{loss}2} + jQ_{\text{loss}2} = (P_2 + jQ_2) \frac{(P_2^2 + Q_2^2)}{|V_2|^2}$$

$$= (R'_2 + jX'_2)(P_2^2 + Q_2^2) \quad (6)$$

其中,  $R'_2 = \frac{R_2}{|V_2|^2}$ ,  $X'_2 = \frac{X_2}{|V_2|^2}$  所以支路 1 的潮

流:

$$P_{\text{bl}} + jQ_{\text{bl}} = P_1 + P_2 + R'_2(P_2^2 + Q_2^2) + j[Q_1 + Q_2 + X'_2(P_2^2 + Q_2^2)] \quad (7)$$

$$\frac{\partial(P_{\text{bl}}^2 + Q_{\text{bl}}^2)}{\partial Q_2} = 4(P_1 + P_2 + R'_2(P_2^2 + Q_2^2))R'_2 Q_2 + 2[Q_1 + Q_2 + X'_2(P_2^2 + Q_2^2)](1 + 2X'_2 Q_2)$$

对于低压系统, 功率的标么值远小于 1, 所以可忽略高次项:

$$\frac{\partial(P_{\text{bl}}^2 + Q_{\text{bl}}^2)}{\partial Q_2} = 2(Q_1 + Q_2) \quad (8)$$

$$W_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n R_i \frac{(P_{\text{bi}}^2 + Q_{\text{bi}}^2)}{|V_i|^2} = \sum_{i=1}^n R'_i (P_{\text{bi}}^2 + Q_{\text{bi}}^2) \quad (9)$$

将第 k 个节点的无功功率对系统网损求导:

$$\frac{\partial W_{\text{loss}}}{\partial Q_k} = \sum_{i=1}^n R_i \left( \frac{\partial Q_{\text{bi}}^2}{\partial Q_k} \right) \quad (10)$$

根据 (8), 忽略高次项可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{\text{loss}}}{\partial Q_k} &= \sum_{i=1}^n R_i \left( \frac{\partial Q_{\text{bi}}^2}{\partial Q_k} \right) \approx 2 \sum_{i=1}^n R'_i \sum_{f \in k} Q_j \\ &= 2 \sum_{f \in k} \sum_{i=1}^n R_i Q_j \\ &= 2 \sum_{f \in k} R'_{\text{di}} (Q_{\text{bj-1}} - Q_{\text{bj}}) + R'_{\text{dk}} (Q_k + \sum_{l \text{ link to } k} Q_{\text{bl}}) \end{aligned} \quad (11)$$

若要使网损最小则:

$$\frac{\partial W_{\text{loss}}}{\partial Q_k} = 0$$

则:

$$Q_k = \frac{\sum_{f \in k} R'_{\text{di}} (Q_{\text{bj-1}} - Q_{\text{bj}})}{R'_{\text{dk}}} - \sum_{l \text{ link to } k} Q_{\text{bl}} \quad (12)$$

## 3 无功电压控制

利用前面的分析结果, 就可以得到一种实用的地区电网无功电压控制算法:

1) 无功补偿优化: 利用式 (12), 确定电容器投运容量。

2) 电压调整: 公式 (5) 指出了支路收点的电压幅值  $|V_r|$  和注入功率  $S_r$  与发点的电压幅值  $|V_s|$  的简单 (下转第 69 页)

值随电压的升高而降低,且  $\lg\delta\%$  的增量超过  $-0.3\%$ ,  $\lg\delta\% - u$  曲线如图 8 曲线 4。

(3) 电容芯子内局部放电故障主要特征为色谱分析异常,主要特征气体为  $H_2$ 、 $CH_4$ ,严重的伴有少量  $C_2H_2$ ,介损超标。做高电压介损测试时介损值随电压的升高而升高,且  $\lg\delta\%$  的增量超过  $+0.3\%$ ,  $\lg\delta\% - u$  曲线如图 5 曲线 2。

参考文献

[1] 周云波. LB-110/220 型电流互感器的异常分析及防止

对策 [J]. 华北电力技术, 1997, (3): 22

[2] 黄伟忠. 电容式电流互感器绝缘劣化的诊断与探讨 [J]. 湖北电力, 2001(3).

[3] DL/T 596-1996. 电力设备预防性试验规程.

[4] 变压器制造技术丛书编审委员会. 互感器制造技术 [D].

作者简介

高剑: 1975 年生, 1998 年毕业于重庆大学高压专业, 工程师, 从事技术管理工作

(统稿日期: 2007. 5. 20)

(上接第 44 页)

关系, 利用这个公式可以得到一个确定变压器调节方式的实用算法。

地区电网和配电网都处于弱环网运行状态, 电压的调整一般通过降压变进行。如图 3 一条典型的馈线, 其中节点 n 的电压幅值在该馈线中最低并且已越下界, 所以需要调节变压器 TR 的档位以消除电压越界。节点 n 是最低电压点, 若调节 TR 的档位使节点 n 的越界消除, 则可以认为整条馈线的电压合格。

设节点 n 的电压调到  $V'_n$  为合格。假设调节 TR 的档位引起下游的负荷变化可以忽略不计, 则沿节点 n 到根节点 1 的道路上的分叉支路都可以等值在该道路上的功率注入分别标为,  $S_i, i=1, 2, \dots, n$  (如图 3 所示)。则节点 1 的电压应被调节到  $V'_1$ , 根据式 (1)  $V'_1$  可以用如下算法计算:

(1)  $i = n$   $i$  代表节点编号;

(2)  $S'_i = S_{i-1} + S_{bi}$ ,  $S_{bi}$  是支路  $i$  发点的功率

$$|V'_{i-1}| = \sqrt{|V'_i|^2 + 2(P'_i R_i + Q'_i X_i) + \frac{(P'^2_i + Q'^2_i)(R^2_i + X^2_i)}{|V'_i|^2}}$$

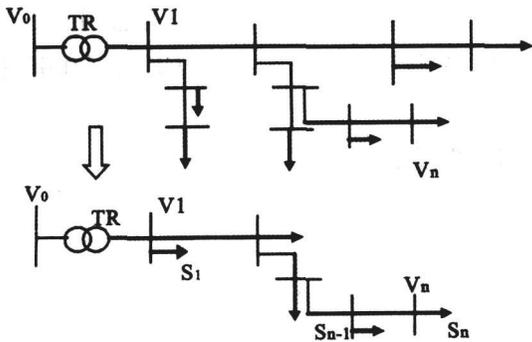


图 3 馈线等值示意图

(3)  $S_{b(i-1)} = S'_i + S_{lossi}$  其中,  $S_{lossi} = (R_i + jX_i)$

$\frac{|S_{bi}|^2}{|V_i|^2}$  是支路  $i$  的线损;

(4)  $i$  不等于 2 则转 (2);

(5) 计算得到  $|V'_1|$

若认为节点 0 的电压保持不变, 则根据  $|V'_1|$  就可以算出变压器应调节的档位。

4 小结

根据地区电网辐射状供电的特点, 提出了一种不依赖于状态估计的无功电压控制的实用算法。前面提出的算法可以在调度自动化系统出现局部故障、状态估计结果不可信的情况下, 仍可进行无功电压控制。算法具有较严格的理论基础, 有很强的实用性。

参考文献

[1] Wang S C, Liao W B, Shen K Y, et al Branch-and-bound dispatching for feeder capacitors on distribution system [A]. PowerCon[C], Australia, 2000, 1569-1573.

[2] Hsu Y Y, Kuo H C. Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming [J]. IEE Proc - C, 1993, 140(6): 433-438.

[3] Ghose T, Goswami S K, Basu S K. Solving capacitor placement problems in distribution system using genetic algorithms. Electric Machines and Power Systems [J], 1999, 27, 429-441.

[4] Chiang Hsiodong, Wang Jincheng, et al. Optimal capacitor placement in distribution systems part I: a new formulation and the overall problem. IEEE Trans on Power Delivery [J], 1990, 5(2): 634-642.

[5] Chiang Hsiodong, Wang Jincheng, et al. Optimal capacitor placement in distribution systems part II: solution algorithms and numerical results. IEEE Trans on Power Delivery [J], 1990, 5(2): 643-649.

(收稿日期: 2008-06-20)