

一种利用小扰动电压偏离确定无功源配置地点的方法

曹立霞¹, 厉吉文¹, 程新功², 居馨³, 张勇²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250022;

3. 郯城县供电公司, 山东 郯城 276100)

摘要: 提出了一种利用小扰动电压偏离配置无功源的方法。该方法根据就地无功补偿原则, 兼顾系统不同运行方式, 将系统发生无功小扰动之后, 平均电压偏离较大的负荷节点作为补偿地点。在 IEEE118 节点系统上的仿真结果表明了该方法选出的补偿节点位于负荷中心附近或远离发电机的位置, 具有较好的鲁棒性, 能够有效降低网损。

关键词: 无功补偿; 无功源配置; 电压偏离; Greedy 算法

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0005-03

0 引言

电力系统的经济性及电压稳定性与无功补偿节点的选择密切相关。无功补偿通过减少发电机向负荷节点提供的无功功率, 达到降低网损和调压的目的。

到目前为止, 已有多种选择补偿节点的方法。文献 [1] 中采用灵敏度分析法, 但根据灵敏度分析法确定的无功补偿节点通常是相邻的节点, 这样无功补偿节点可能都集中在一个或几个区域, 对电压控制不利。文献 [2] 提出了一种基于先导节点确定无功源最佳配置地点的方法, 选出的补偿节点对提高电力系统的电压稳定性有很好的效果。但这些节点往往距离发电机节点比较近, 而无法对距离较远的负荷区提供充足的无功支援。

无功补偿装置应尽可能安装在无功负荷中心, 做到无功功率的就地平衡。确定无功补偿节点的原则是: 选择负荷中心或电压较低、无功不足的节点作为补偿节点。这些节点往往是系统发生无功小扰动之后, 电压偏离较大的节点。根据这一点, 本文提出了一种配置无功源的新方法, 该方法兼顾系统不同运行方式, 将系统发生无功小扰动之后平均电压偏离较大的负荷节点作为补偿地点。以 IEEE118 节点系统为例进行仿真, 结果表明, 该方法选出的补偿节点位于负荷中心附近或远离发电机的位置, 符合就地无功补偿原则, 具有较好的鲁棒性, 能够有效地降低网损。

1 无功补偿节点的选择

1.1 选择无功补偿节点的数学模型

对于 N 个节点的系, 潮流方程的极坐标形式

为:

$$\begin{aligned} P_i &= V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i &= V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{aligned} \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中: P_i, Q_i 分别为节点 i 注入有功、无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差; G_{ij}, B_{ij} 分别为导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实、虚部; $j \neq i$ 表示节点 j 与 i 直接相连。

式 (1) 线性化以后得到下式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p & J_{pq} \\ J_q & J_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

J 为潮流方程的雅可比矩阵, 忽略 ΔP 和 ΔV 、 ΔQ 和 $\Delta \delta$ 之间的相互影响, 我们得到以下的解耦形式:

$$\Delta Q = S \Delta V \quad (3)$$

式 (3) 的具体形式如下^[4]:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{GG} & S_{GL} \\ S_{LG} & S_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

设系统受到 Gauss 随机负荷扰动, 其期望值为零, 标准差正比于扰动前节点无功负荷。定义协方差矩阵为 $C_{LL} = E\{\Delta Q_L \Delta Q_L^T\}$, 其中 $E\{\cdot\}$ 为期望值^[3]。

设在系统中要选择补偿节点个数为 N_c ; 补偿节点的选择矩阵为 $C, C \in R^{N_c \times N}$, N 为负荷节点个数。若系统中第 j 个负荷节点被选为补偿节点集中第 i 个补偿节点, 则 $C_{ij} = 1$, 否则 $C_{ij} = 0$ 。于是由式 (4) 可得, 系统受到上述负荷扰动后, 负荷节点电压偏离向量为^[4]:

$$\Delta V_L = S_{LL}^{-1} \Delta Q_L - S_{LL}^{-1} S_{LG} \Delta V_G \quad (5)$$

假定发电机节点为 PV 节点,在小扰动下,各发电机节点电压不受负荷节点无功功率变化的影响,即可以认为 $V_G = 0$,由式 (5)可得:

$$V_L = S_{LL}^{-1} Q_L \quad (6)$$

补偿节点电压偏离向量为:

$$V_C = C V_L \quad (7)$$

我们选择电压偏离较大的负荷节点作为无功补偿节点,因此,选择补偿节点的问题可描述为选择矩阵 C ,使得目标函数式 (8)达到最大:

$$\vartheta(C) = E\{V_C^T Q_x V_C\} \quad (8)$$

其中: Q_x 是一个对角加权阵,可根据负荷的相对重要性来确定其具体数值。

将式 (7)代入式 (8)得:

$$\begin{aligned} \vartheta(C) &= E\{V_C^T Q_x V_C\} = E\{(C V_L)^T Q_x (C V_L)\} = \\ &= E\{(C S_{LL}^{-1} Q_L)^T Q_x (C S_{LL}^{-1} Q_L)\} \end{aligned} \quad (9)$$

考虑到, $X^T Q_x X = \text{trace}[Q_x X X^T]$, $\text{trace}(\cdot)$ 是方阵主对角元素之和,称为方阵的迹。因此,式 (9)成为:

$$\begin{aligned} \vartheta(C) &= E(\text{trace}(Q_x C S_{LL}^{-1} Q_L Q_L^T (S_{LL}^{-1})^T C^T)) \\ &= \text{trace}(Q_x C S_{LL}^{-1} C_{LL} (S_{LL}^{-1})^T C^T) \end{aligned} \quad (10)$$

所以,补偿节点的选择问题等效为以下整数规划问题:

$$s \begin{cases} \max \vartheta(C) \\ A_C \subset A \\ \text{Card}(A_C) = N_C \end{cases} \quad (11)$$

其中: A 为所有负荷节点集合; A_C 为所有补偿节点集合; $\text{Card}(\cdot)$ 表示集合中元素的个数。

1.2 考虑不同运行方式时,选择无功补偿节点的数学模型

如果考虑到系统的各种运行方式,则应将平均电压偏离较大的负荷节点作为补偿节点,目标函数为:

$$R(C, s) = E\{(C S_{LL}^{-1}(s) Q_L(s))^T Q_x(s) (C S_{LL}^{-1}(s) Q_L(s))\} \quad (12)$$

其中: s 为表征系统不同负荷水平和拓扑结构的变量。

用系统的一组典型的运行方式表示随机变量,这组典型的运行方式集合记为 S ,令 p_s 表示运行方式 s 发生的概率,这样,式 (12)变为:

$$R(C) = \sum_s p_s \text{trace}(Q_x(s) C S_{LL}^{-1}(s) C_{LL}(s) (S_{LL}^{-1}(s))^T C^T) \quad (13)$$

因此,考虑不同运行方式时,选择补偿节点的数学模型为:

$$s \begin{cases} \max R(C) \\ A_C \subset A \\ \text{Card}(A_C) = N_C \\ \sum_s p_s = 1 \end{cases} \quad (14)$$

1.3 算法

求解整数规划问题 (14)的最简单方法是全局搜索法,即对所有可能的补偿节点集都进行计算,根据其目标函数值来确定最终补偿节点集。此方法易于实现,但计算量大。这里,我们采用 Greedy 算法寻求 $C^{(3 \sim 5)}$,其计算量较小,基本原理是:给定补偿节点的集合 $A_C^{(v)}$,则下一个被选中的补偿节点就是余下的负荷节点中使得目标函数值产生最大增量的那个节点,而且一旦某个节点被选中,该节点始终是补偿节点。具体步骤如下:

- 1) 初始化循环控制指针 $v = 1$, $A_C^{(0)} = \emptyset$,设置 $R(A_C^{(0)}) = 0$,对于每一种运行方式 s ,设置 $Q_x(s)$, $C_{LL}(s)$ 。
- 2) 根据式 (13),寻找 $j = \arg \max R(A_C^{(v-1)} \cup \{j\})$, $j \in (A - A_C^{(v-1)})$ 。
- 3) 如果 $R(A_C^{(v-1)} \cup \{j\}) - R(A_C^{(v-1)}) > \epsilon$,停止计算,将 $A_C^{(v-1)} \cup \{j\}$ 作为结果返回。否则,进行下一步。
- 4) 令 $A_C^{(v)} = A_C^{(v-1)} \cup \{j\}$ 。
- 5) 如果 $\text{card}(A_C^{(v)}) = N_C$,说明已经得到了需要数量的补偿节点,停止计算,将 $A_C^{(v)}$ 作为结果返回。
- 6) 如果 $[R(A_C^{(v)}) - R(A_C^{(v-1)})] / [R(A_C^{(v)})] < \epsilon$,说明目标函数的增长速度足够小了,停止计算,将 $A_C^{(v)}$ 作为结果返回, ϵ 是目标函数增量的最小阈值。
- 7) 令 $v \leftarrow v + 1$,转向第 2)步。

2 算例

采用 Matlab 编程,将本文所提出的确定补偿节点的方法在 IEEE118 节点系统^[6]中进行仿真。

我们考虑由以下 4 种网络拓扑结构和一种负荷水平组成的运行方式集合:

- I 没有线路或者变压器退出运行。
- II 仅仅线路 12 ~ 14 退出运行。
- III 仅仅线路 21 ~ 22 退出运行。
- IV 仅仅线路 53 ~ 52 退出运行。

负荷参数见文献 [6]。

考虑以下 5 种情况。在每一种情况中,每一种运行方式具有一定的发生概率,且满足 $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1$ 。

第 1 种情况:

$P = 0.25, P = 0.25, P = 0.25, P = 0.25$ 。

第 2 种情况: $P = 1$ 。

第 3 种情况: $P = 1$ 。

第 4 种情况: $P = 1$ 。

第 5 种情况: $P = 1$ 。

这 5 种情况的计算结果如表 1 所示。

表 1 补偿节点的选择结果

Tab 1 Results of selecting compensation nodes for five cases

情况	获得的补偿节点									
1	44	21	117	45	43	22	53	52	20	95
2	44	117	21	45	43	22	53	52	95	101
3	44	117	21	45	43	22	53	52	95	101
4	21	44	22	117	20	45	43	53	52	95
5	44	52	53	117	21	45	43	22	51	95

从表 1 中,我们可以看到,采用本文方法得到的补偿节点具有较好的鲁棒性,即当运行方式变化时,计算结果几乎不变,只有当在靠近补偿节点的位置发生拓扑结构变化时,计算结果才稍有变化。选出的补偿节点位于负荷中心附近或远离发电机的位置,符合就地无功补偿原则。

我们采用文献 [2] 的方法对第 2 种情况进行仿真,得到的补偿节点是: 14, 38, 77, 92, 56, 103, 47, 23, 71, 60。可见,这些节点大多数距离发电机节点比较近,而无法对距离较远的负荷区提供充足的无功支援,这样有可能会使得网损降低的效果不明显。

为了比较补偿效果,针对第 2 种情况,设计了两种方案:

方案 a: 不安装无功补偿装置。

方案 b: 在本文方法得到的补偿节点上安装无功补偿装置。

方案 c: 在文献 [2] 方法得到的补偿节点上安装无功补偿装置。

比较 3 种方案最优潮流计算的结果,如表 2 所示。

表 2 潮流计算结果比较

Tab 2 Results of power flow calculation			
方案	总的无功 补偿容量 Mvar	有功网损 /MW	降低比例 /(%)
a	-	132.852	-
b	186.257	119.155	10.31
c	215.399	128.760	3.08

由此可见,在本文方法得到的补偿节点上安装无功补偿装置能够有效降低网损。

3 结论

本文提出了一种利用小扰动电压偏离配置无功源的方法,该方法在考虑系统不同运行方式的情况下选择补偿地点。仿真结果表明,该方法选出的补偿节点位于负荷中心附近或远离发电机的位置,具有较好的鲁棒性,能够有效降低网损。

参考文献:

- [1] HUANG Yan-chang, et al Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (4): 1868-1873.
- [2] 姚小寅,孙元章,王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 12-15.
YAO Xiao-yin, SUN Yuan-zhang, WANG Zhi-fang Studies on the Optimal Allocation of Reactive Power Sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 12-15.
- [3] Sancha J L, Fernandez J L. Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish Transmission System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (2): 630-638.
- [4] Conejo A, Gomez T, Fuente J I Pilot-bus Selection for Secondary Voltage Control [J]. European Trans on Electrical Power Engineering (ETEP), 1993, 3 (5): 359-366.
- [5] Conejo A, Fuente J I, Goransson S Comparison of Alternative Algorithms to Select Pilot Buses for Secondary Voltage Control in Electric Power Networks [A]. Proceedings of IEEE 7th Mediterranean Electrotechnical Conference 1994.
- [6] 吴际舜,侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000.
WU Ji-shun, HOU Zhi-jian Flow Calculation of Power System Based on Computer [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.

收稿日期: 2004-09-08; 修回日期: 2005-01-08

作者简介:

曹立霞 (1975 -), 女, 博士研究生, 从事电压无功优化与控制研究工作; E-mail: caolixia126@126.com

厉吉文 (1962 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电压无功控制的的教学和研究工作;

程新功 (1973 -), 男, 讲师, 从事电压无功优化与控制研究工作。

(下转第 35 页 continued on page 35)

社, 1995.

CU I J in-tai An Introduction to Wavelets[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1995.

[9] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991.

HE Jia-li, SONG Cong-ju The Theory of Relay Protection in Power System [M]. Beijing: China Water Power Press, 1991.

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-11-16

作者简介:

宋洪运 (1975 -),男,硕士研究生,主要从事小电流接地系统故障选线的研究; E-mail: fecshy@163.com

吕艳萍 (1955 -),女,副教授,主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化的研究;

夏云非 (1976 -),男,硕士研究生,主要从事电力系统技术的研究。

Research on fault line selection of single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed

SONG Hong-yun, L ü Yan-ping, X IA Yun-fei
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The paper analyzes the characteristics of zero-sequence current after single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed. Based on the improvement of line selection of single-phase grounding at one locality, a method of fault line selection of single-phase grounding at two localities is presented. The method is to select the first line fault using the characteristics that the direction of transient zero-sequence current in the fault line are the most dissimilar to all non-fault lines when lines are fault, and the direction of transient zero-sequence current in all the lines are consistent when busbar fault occurs. It selects the second line fault by virtue of the character that zero-sequence current in fault line is stronger than that in non-fault lines after the first fault line is removed. Theoretical analysis and Matlab simulations show that the proposed method is suitable for various distribution systems with different grounding modes to select fault lines of single-phase earth faults at one or two localities. Moreover, it has a high reliability and strong anti-jamming ability.

Key words: power system with neutral unearthed; two localities; wavelet packet; fault line selection; direction

(上接第 7页 continued from page 7)

An approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance

CAO Li-xia¹, LI Ji-wen¹, CHENG Xin-gong², JU Xin³, ZHANG Yong²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan University, Jinan 250022, China;
3. Tancheng Electric Power Bureau, Tancheng 276100, China)

Abstract: This paper proposes an approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance. Taking account of different operating conditions, the buses with big average voltage deviation are selected as compensation sites according to the principle of reactive power compensation on site after small disturbance occurs. The simulation results on IEEE118 buses system verify that the selected compensation sites, which locate near load centers or far away from generators, have a good robustness and can decrease power loss efficiently.

Key words: reactive power compensation; allocation of reactive power sources; voltage deviation; Greedy algorithm

(上接第 16页 continued from page 16)

Abstract: This paper proposes a linear programming model of optimal power flow (OPF) problems incorporating transient stability constraints. The linear relation between the increments of transient stability margin and control variables is expressed by analytical sensitivity method of transient energy margin, and the transient stability constraint is explicitly described and can be incorporated into conventional linearized OPF model as inequation constraints. The simple algorithm is applied to solve this model. The results on WSCC three-machine nine-bus test system show that this model can maintain transient stability, and effectively handle the combination of operation economy and security.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277013).

Key words: optimal power flow; controlling unstable equilibrium point; transient stability; sensitivity analysis; linear programming