

辐射型配电网无功补偿的精确矩法

矫志宏, 蔡中勤, 郭志忠

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对配电网运行的辐射型结构, 在配电网无功优化的无功近似矩模型基础上, 提出了无功精确矩概念, 根据无功二次精确矩选择最优补偿点, 无功一次精确矩确定所应投放的优化容量。本方法在实验系统上进行验证, 结果表明: 无功精确矩法无论对于降损还是改善电压水平, 其效果比无功近似矩更为显著。

关键词: 配电网; 无功优化; 无功精确矩; 无功一次精确矩; 无功二次精确矩

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2002)-09-0011-04

1 引言

配电网无功补偿主要是通过电容器的投放达到降低网损和提高电压水平的目的。本文研究的配电网无功补偿的精确矩法主要是在文献[1]提出的配电网的功率矩模型的基础上, 以潮流计算^[2]为约束条件, 运用无功精确矩法来解决电容器的补偿问题。目前, 关于配电网优化的问题的处理大多从数学规划法入手, 包括线性规划法^[3]、非线性规划法^[4]、动态规划法^[5]或混合整数规划法^[6]等。近年来还有不少学者尝试着把现在流行的各种智能算法, 如退火法^[7]、人工神经网络法^[8]、遗传算法^[9]等方法用于求解配电网的优化问题。数学规划法普遍面临着比较繁琐, 并且工作量大的缺点。智能算法大多需要耗费大量的计算时间, 因而难以满足实用性的要求。而文献[1]提出的无功近似矩法是在假设配电网各个节点的电压 $U_i = 1.0$ 的条件下求解的, 没有通过潮流计算, 直接取用网络的参数, 计算不精确, 存在一定的误差。

本文以降低网络损耗, 改善电压水平为目的, 并考虑实际配电网的辐射状运行特点, 通过基于逆流编号法的牛顿法潮流^[2]计算无功精确矩, 准确地用无功精确矩表示对网损影响大的节点特征和对电压水平有显著改善的节点特征, 根据无功二次精确矩选择最优补偿点, 无功一次精确矩确定所应投放的优化容量。与无功近似矩相比较, 其无功精确矩模型所反映的物理意义更清晰, 计算结果更准确, 效果更为明显。

2 无功精确矩

2.1 无功网损

配电网的辐射状结构如图1所示。

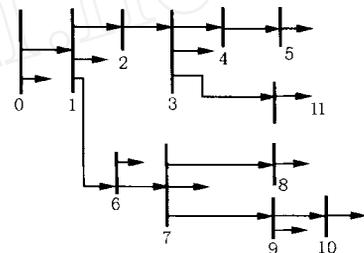


图1 配电网的辐射状结构

Fig. 1 Radial structure of distribution network

辐射型结构的配电网网损可表达为

$$P_l = \sum_{i=1}^n R_i I_{bi}^2 \quad (1)$$

式中: R_i 为 i 支路的电阻; I_{bi} 为 i 支路电流的模; n 为支路数。

$$\text{又因为} \quad I_{bi}^2 = \frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{|U_i|^2} \quad (2)$$

式中: P_{bi} , Q_{bi} 分别为流入 i 节点的支路有功功率和无功功率; U_i 为 i 节点电压。

从而式(1)可表示为

$$P_l = \sum_{i=1}^n R_i \frac{P_{bi} + jQ_{bi}}{U_i} \times \frac{P_{bi} - jQ_{bi}}{U_i} = \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{令} \quad R_{di} = \sum_{j \geq i} R_j \quad (4)$$

式中: R_{di} 表示从 i 节点逆流而上所遇到的所有支路电阻之和。

$$\text{从而} \quad R_i = R_{di} - R_{df} \quad (5)$$

式中: R_{df} 表示从 i 节点的父节点 f 逆流而上所遇到的所有支路电阻之和。

$$\text{则有} \quad R_i \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_f^2} \right) = (R_{df} - R_{dof}) \left(\frac{P_{bf}^2 + Q_{bf}^2}{U_f^2} \right) =$$

$$R_{df} \left(\frac{P_{bf}^2 + Q_{bf}^2}{U_f^2} \right) - R_{df} \left(\frac{P_{bf}^2 + Q_{bf}^2}{U_f^2} \right) \quad (6)$$

$$R_i \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) = (R_{di} - R_{df}) \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) = R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) - R_{df} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) \quad (7)$$

$$R_s \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) = (R_{ds} - R_{di}) \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) = R_{ds} \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) - R_{di} \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (8)$$

式中： R_{df} 表示*f*节点的父节点*gf*逆流而上所遇到的所有支路电阻之和； R_{di} 表示*i*节点的子节点*s*逆流而上所遇到的所有支路电阻之和。

采用交换形式，将式(7)中*i*节点的父节点项 $R_{df} (P_{bi}^2 + Q_{bi}^2)/U_i^2$ 换成式(8)中子节点*s*项中包含 R_{ds} 的项 $R_{di} (P_{bs}^2 + Q_{bs}^2)/U_s^2$ ，相应的对*f*节点和*s*节点作类似的变换。变换后的*i*节点、*f*节点和*s*节点的右边项形式分别为

节点*f*：

$$R_{df} \left(\frac{P_{bf}^2 + Q_{bf}^2}{U_f^2} \right) - R_{df} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) = R_{df} \left(\frac{P_{bf}^2 + Q_{bf}^2}{U_f^2} - \frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) \quad (9)$$

节点*i*：

$$R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} \right) - R_{di} \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) = R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} - \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (10)$$

节点*s*：

$$R_{ds} \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) - R_{ds} \left(\frac{P_{gs}^2 + Q_{gs}^2}{U_{gs}^2} \right) = R_{ds} \left(\frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} - \frac{P_{gs}^2 + Q_{gs}^2}{U_{gs}^2} \right) \quad (11)$$

式中： gs 节点是*s*节点的子节点。

由于节点*i*可能有多个子节点*s*，因此式(10)可写为

$$R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (12)$$

对系统的*n*个节点依次作上述类似变换，可得下式

$$P_1 = \sum_{i=1}^n R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (13)$$

2.2 无功二次精确矩

视在二次精确矩定义为

$$T_s^2(i) = R_{di} \left(\frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (14)$$

式中： R_{di} 表示节点*i*到源节点0的电气距离； P_{bi} 、 Q_{bi} 分别为流入*i*节点支路有功功率、无功功率； P_{bs} 、 Q_{bs} 分别为流入节点*s*（其中*s*是*i*节点下的子节点）的有功功率、无功功率。

系统的有功网损可表示为

$$P_1 = \sum_{i=1}^n T_s^2(i) \quad (15)$$

无功二次精确矩定义为

$$T_q^2(i) = R_{di} \left(\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) \quad (16)$$

由于式(16)与力矩公式形式相同， R_{di} 相当于“力臂”， $\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \frac{Q_{bs}^2}{U_s^2}$ 反映了节点*i*的负荷无功功率对于整个网损的作用相当于作用力，且无功功率具有二次函数形式，因此称之为*i*节点的无功二次精确矩，其*i*节点的无功二次精确矩的物理表示如图2所示。

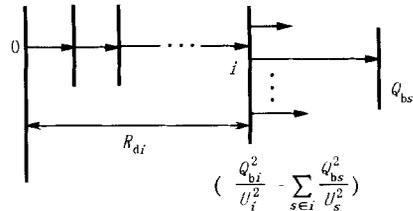


图2 节点*i*的无功二次精确矩示意图

Fig. 2 Quadratic accurate moment of reactive power of node *i*

以图1为例，节点7的无功二次精确矩可表示为

$$T_q^2(7) = R_{d7} \left(\frac{Q_{b7}^2}{U_7^2} - \sum_{s \in 7} \frac{Q_{bs}^2}{U_s^2} \right) = R_{d7} \left(\frac{Q_{b7}^2}{U_7^2} - \frac{Q_{b8}^2}{U_8^2} - \frac{Q_{b9}^2}{U_9^2} \right) \quad (17)$$

由式(15)和式(16)可知

$$P_1^Q = \sum_{i=1}^n T_q^2(i) \quad (18)$$

式(18)即负荷无功功率引起的网损为各节点的无功二次精确矩之和。

2.3 无功一次精确矩

$$P_1^Q = \sum_{i=1}^n R_i \frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} \quad (19)$$

对式(19)的第*m*节点的无功功率求导，整理有

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P_1^Q}{\partial Q_m} = \sum_{i \geq m} H_{di-1} (Q_{bi-1} - Q_{bi}) + H_{dm} Q_{bm} \quad (20)$$

其中令
$$H_{di} = \sum_{j \geq i} \frac{R_j}{U_j^2} \quad (21)$$

式中: H_{di} 是从节点 i 逆流而上直到源节点遇到的所有支路的变电阻 R_j/U_j^2 之和。

令
$$T_m = \frac{1}{2} \frac{\partial P_1^0}{\partial Q_m} = \sum_{i \geq m} H_{di-1} (Q_{bi-1} - Q_{bi}) + H_{dm} Q_{bm} \quad (22)$$

式中: $i-1$ 是 i 的父节点。

由于式(22)亦与力矩形式相同,且无功功率具有一次函数表达式,称之为 m 节点的无功一次精确矩,其 m 节点的无功一次精确矩的物理表示如图3所示。

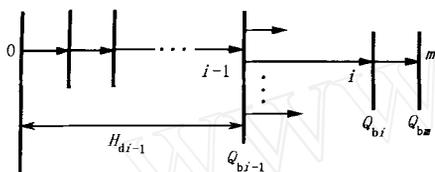


图3 节点 m 的无功一次精确矩示意图

Fig. 3 Linear accurate moment of reactive power of node m

由于式(22)亦与力矩形式相同,且无功功率具有一次函数表达式,称之为无功一次精确矩。

图1中以节点7为例,其无功一次精确矩可表示为

$$T_7 = \sum_{j \geq 7} H_{dj-1} (Q_{bj-1} - Q_{bj}) + H_{d7} Q_{b7} = \frac{R_1}{U_1^2} (Q_{b1} - Q_{b6}) + \left(\frac{R_1}{U_1^2} + \frac{R_6}{U_6^2} \right) (Q_{b6} - Q_{b7}) + \left(\frac{R_1}{U_1^2} + \frac{R_6}{U_6^2} + \frac{R_7}{U_7^2} \right) Q_{b7} \quad (23)$$

3 潮流计算

本文采用基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流来计算配电网网络各节点的电压和各支路传输的无功功率,此方法具有更广泛的适用性。它与常规牛顿法程序唯一的相异之处是仅需要在节点优化上加以改变。此种牛顿法很自然地就解决了弱网孔的配电网的潮流计算问题,而其他一些开发的专门的配电网的潮流算法^[10,11]对于弱网孔问题,采用补偿法去解决。当系统中网孔较多时,补偿法的工作量很大。

以逆流编号法为基础的牛顿法潮流,对于辐射型结构的配电网来说,运算量最小,占内存最少,运算速度最快。为计算无功一次、二次精确矩提供了简捷快速的基础。

4 选择最佳补偿点

本文根据无功二次精确矩选择最佳补偿点。

由式(16)所表示的无功二次精确矩为

$$T_q^2(i) = R_{di} \left(\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_s Q_{bs}^2 \right)$$

根据配电网结构树型辐射状的特点,其树支末端电压总是最低的。 R_{di} 反映了 i 节点到源节点的电气距离,显然 R_{di} 越大的节点越靠近末端节点,所以选择 R_{di} 较大的节点投放电容器,有助于改善系统的电压水平,即 R_{di} 反映了电容器的投放对于改善电压水平的影响。 Q_{bi}^2/U_i^2 为在计及电压影响的情况下流过 i 支路的无功功率的平方,它反映了 i 节点及其顺流节点负荷无功功率对网损的作用。而

$\left(\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_s Q_{bs}^2 \right)$ 这一项则反映了节点 i 的负荷无功功率对于整个网损的作用。显而易见,该项较大的点是对系统网损有较大作用的敏感节点。使该节点的负荷无功功率降低有利于整个网损的降低,由此可见该项反映了电容器的投放对于降低网损的作用。因此 $T_q^2(i)$ 则反映电容器的投放对于既达到改善电压水平,又降低网损的综合作用。设给定的投放节点数为 k ,则对 $T^2(i)$ 进行由大到小的顺序排列选出前 k 个节点作为最优补偿点。

5 补偿容量的确定

设由无功二次精确矩所确定的优化补偿点为 m 节点,所求补偿容量为 Q_m ,为使网损最小,从数学上分析,求极值,应满足 $\frac{\partial P_1^0}{\partial Q_m} = 0$,从物理上分析,无功一次精确矩表示由无功电流引起的电阻压降。

$$T_m = \sum_{j \geq m} H_{dj-1} (Q_{bj-1} - Q_{bj}) + H_{dm} Q_{bm} = 0 \quad (24)$$

解方程(24),可求得 Q_m ,并与工业标准容量相比,选出最接近的值进行无功补偿。

6 算例

用此方法采用33节点、69节点和135节点的三个算例进行计算,其结果如表1所示。

由表1可以看出,按无功精确矩法进行无功补偿,其补偿效果非常明显,是一种很有效的方法,与文献[1]中的无功近似矩法相比,更加精确。不仅网损明显减少,且电压水平显著提高。

表 1 实验系统的计算结果

Tab. 1 Computing results of experimental systems

系统节点数	33	69	135
投放节点数	3	2	4
网损减少量 (%)	35.8	34.3	34.1
最低点电压(前/后)/V	0.85/0.92	0.85/0.91	0.88/0.93

7 结论

本文针对配电网网络结构的辐射型特点,在文献[1]提出的功率矩模型的基础上,建立了配电网无功优化的精确矩模型,提出了配电网无功补偿的精确矩法。本方法以潮流计算为基础,计算无功一次、二次精确矩,并根据无功二次精确矩选择最佳补偿点,无功一次精确矩确定优化容量。其算法通过在三个实验系统进行验证,结果表明,此算法与无功近似矩相比更加精确,无论是降损还是提高电压水平效果都更显著,且算法简洁迅速,运算量较小,编程较易。此方法具有很强的实用性。

参考文献:

- [1] Cai Zhongqin, Guo Zhizhong. Reactive power moment method for optimal compensation on radial distribution systems[A]. POWERCON '98, Beijing, 1998:1435-1437.
- [2] 蔡中勤,郭志忠.基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J].中国电机工程学报,2000,20(6):13-16.
- [3] 侯志俭,吴际舜,梁勇,等.配电网重构与电容器的配置[A].全国高等学校电力系统及其自动化专业第十一届学术年会论文集[C].1995:31-37.
- [4] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1985, 104(11):3278-3297.

- [5] Chen YL. Weak Bus-Oriented Optimal Multi-objective VAR Planning[J]. IEEE Trans. on Power System. 1996, 11(4): 1885-1890.
- [6] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitors placement on radial distribution systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems. 1989, 4(1):725-732.
- [7] Chiang Hsiao-dong, Wang Jir-cheng. Optimal capacitor placement in distribution system. Part I: A new formulation and the overall problem[J]. IEEE Trans on Power Delivery. 1990, 5(2):634-642.
- [8] Hsu Y Y, Yang C C. A hybrid artificial network dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(2):1069-1075.
- [9] Miu K N, Chiang Hsiao-Dong. Capacitor placement, replacement and control in large scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm[J]. IEEE Trans on Power System. 1996, 12(3):1160-1166.
- [10] Renato Cespedes G. New method for the analysis of distribution networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 1990, 5(1):391-396.
- [11] Baran M E, Wu F F. Optimal sizing of capacitors placed of radial distribution system [J]. IEEE Trans on Power Systems. 1989, 2(2):735-743.

收稿日期: 2002-03-28; 回修日期: 2002-04-25

作者简介:

矫志宏(1977-),女,硕士研究生,从事配电自动化的研究工作;

蔡中勤(1973-),女,博士研究生,研究方向为配电网网络分析。

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,从事电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用及电力系统光学测量等技术的研究工作。

Accurate moment method for optimization of capacitors in radial distribution systems

JIAO Zhi-hong, CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the radial structure of the distribution network operation, this paper proposes the concept of reactive accurate moment on the basis of reactive moment model. The optimal placement for capacitors is determined by reactive quadric accurate moment and the optimal sizing by reactive linear accurate moment. It's tested on experimental systems, and the result shows that the reactive accurate moment method is more efficient in both reducing the net loss and improving the voltage profiles than reactive approximate moment.

Key words: distribution network; reactive optimization; reactive accurate moment; reactive linear accurate moment; reactive quadric accurate moment

(上接第 10 页)

comprises three parts: fault transient analysis; reflective and refractive coefficient of line boundary spectrum analysis; the extraction of fault in formation and EMTP simulation tests. This paper is the first part, which theoretically analyzed the fault transients at single end and two different characters are discovered: the different character between positive and reverse directional fault is controlled by the reflective coefficient, and that between the internal and external fault at positive direction is controlled by refractive coefficient of line boundary.

Key words: fault induced transients; transmission line; positive and reverse direction; internal and external faults; reflective coefficient; refractive coefficient